

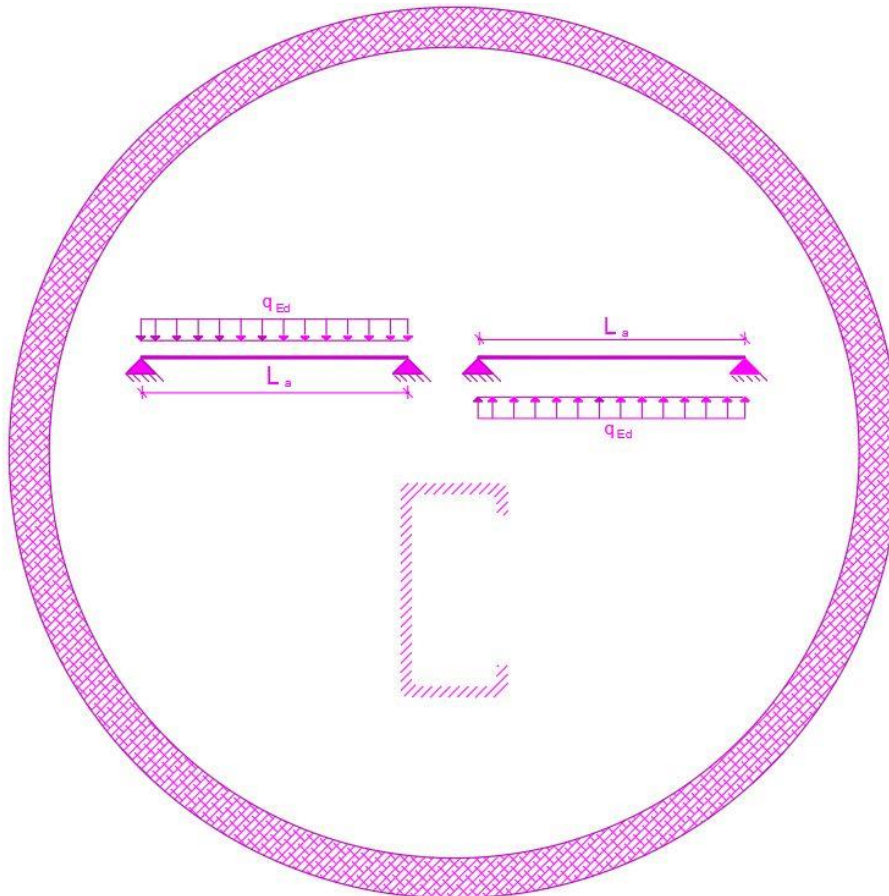


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Σχεδιασμός τεγίδων λεπτότοιχων διατομών C ψυχρής έλασης με ακραίες ενισχύσεις



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ράπτης Γλαύκος Γεώργιος
Επιβλέπων: Ι. Βάγιας

Αθήνα, Νοέμβριος 2018
ΕΜΚ ΔΕ 2018 35

Ράπτης Γ. Γ. (2018)
Σχεδιασμός τεγίδων λεπτότοιχων διατομών C ψυχρής διαμόρφωσης, με ακραίες
ενισχύσεις
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2018 35
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Raptis G. G. (2018)
Design of thin-walled C cold formed section purlins, with edge stiffeners
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2018 35
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	ix
Περίληψη.....	xi
Abstract	xiii
1. Εισαγωγικά στοιχεία για τις διατομές ψυχρής έλασης	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Μορφές Διατομών.....	3
1.3 Μέθοδοι Παραγωγής.....	7
1.4 Πλεονεκτήματα χρήσης μελών ψυχρής έλασης.....	10
1.5 Εφαρμογές	11
2. Ιδιότητες Υλικών & Διατομών Ψυχρής Έλασης	13
2.1 Ποιότητες χάλυβα.....	13
2.2 Ιδιότητες υλικού μελών και φύλλων ψυχρής διαμόρφωσης	14
2.3 Πάχος και ανοχές πάχους διατομής.....	15
2.4 Ονομαστικές διαστάσεις διατομών	15
2.5 Επιρροή στρογγυλεμένων γωνιών	16
2.6 Γεωμετρικές συνθήκες ισχύος - ενισχύσεις.....	18
2.7 Προσομοίωση για στατική επίλυση.....	20
3. Συμπεριφορά & Αντοχή Λεπτότοιχων Στοιχείων	23
3.1 Γενικά.....	23
3.2 Μορφές Καθολικού Λυγισμού.....	23
3.2.1 Καμπτικός λυγισμός (flexural buckling).....	23
3.2.2 Στρεπτικός λυγισμός (torsional buckling)	25
3.2.3 Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (torsional flexural buckling)	26
3.3 Μορφές λυγισμού διατομών	27
3.4 Θεωρητική τεκμηρίωση του τοπικού λυγισμού	28
3.5 Κύρτωση με στρέβλωση της διατομής	33
3.6 Γεωμετρικές ιδιότητες της ενεργού εξεταζόμενης διατομής C.....	34
3.6.1 Παραδοχές	34

3.6.2 Επίπεδα στοιχεία χωρίς ενισχύσεις.....	35
3.6.3 Επίπεδα στοιχεία με ενισχύσεις	37
3.6.3.1 Γενικά	37
3.6.3.2 Ακραίες ενισχύσεις	40
3.7 Σύνδεση τεγίδας και χαλυβδόφυλλου	43
3.7.1 Γενικά	43
3.7.2 Αντοχή σχεδιασμού διατομής	45
3.7.3 Έλεγχοι λυγισμού στο ελεύθερο πέλμα	49
3.7.4 Στρεπτική ακαμψία λόγω επικάλυψης	52
3.7.4.1 Πλευρική ακαμψία ελατηρίου	52
3.7.4.2 Στροφική ακαμψία ελατηρίου.....	54
3.8 Αντοχή σε αξονική θλίψη	59
3.9 Αντοχή διατομής σε μονοαξονική κάμψη	60
3.9.1 Ελαστική και ελαστοπλαστική αντοχή με διαρροή του θλιβόμενου πέλματος	60
3.9.2 Ελαστική και ελαστοπλαστική αντοχή με διαρροή του εφελκυσμένου πέλματος μόνο.....	61
4. Ανάλυση λυγισμού με βάση τις διατάξεις του Ευρωκώδικα.....	63
4.1 Φορτίο βαρύτητας	63
4.1.1 Γενικά στοιχεία εξεταζόμενων διατομών	63
4.1.2 Διατομή Τεγίδας	64
4.1.3 Ιδιότητες χάλυβα	65
4.1.4 Ενεργός διατομή για περίπτωση αξονικής θλιπτικής δύναμης	65
4.1.5 Ενεργός διατομή για περίπτωση καμπτικής ροπής M_y	68
4.1.6 Εγκάρσια κάμψη ελεύθερου πέλματος	71
4.1.7 Έλεγχος τεγίδας για $N_{ed}=0$	73
4.1.8 Έλεγχος τεγίδας για ταυτόχρονη αξονική δύναμη $N_{Ed} = 20 \text{ kN}$	74
4.1.8.1 Έλεγχος διατομής	74
4.1.8.2 Έλεγχος λυγισμού ελεύθερου πέλματος	75
4.1.9 Έλεγχος σε τέμνουσα	75
4.2 Φορτίο αναρρόφησης	76
4.2.1 Γενικά στοιχεία	76

4.2.2. Διατομή Τεγίδας.....	76
4.2.3 Ιδιότητες χάλυβα.....	77
4.2.4 Ενεργός διατομή για θλιπτική δύναμη	77
4.2.5 Ενεργός διατομή για καμπτική ροπή M_y	77
4.2.6 Εγκάρσια κάμψη ελεύθερου πέλματος.....	77
4.2.7 Έλεγχος τεγίδας για $N_{Ed} = 0$	79
4.2.7.1 Έλεγχος διατομής στο μέσο.....	79
4.2.7.2 Έλεγχος λυγισμού ελεύθερου πέλματος.....	79
4.2.8 Έλεγχος τεγίδας για $N_{Ed} = 20$ kN.....	80
4.2.8.1 Έλεγχος διατομής	80
4.2.8.2 Έλεγχος λυγισμού ελεύθερου πέλματος.....	80
4.2.9 Έλεγχος σε τέμνουσα.....	81
5. Υπολογιστικό φύλλο MS Office Excel.....	83
5.1 Γενικά στοιχεία	83
5.2 Πρώτο φύλλο εργασίας «Πληροφορίες - Εισαγωγή».....	84
5.3 Δεύτερο φύλλο εργασίας «Ποιότητες Χάλυβα»	84
5.4 Τρίτο φύλλο εργασίας «Γεωμετρία & Υλικά»	86
5.5 Τέταρτο φύλλο εργασίας «Ενεργά Πλάτη Θλιπτικής Δύναμης»	88
5.6 Πέμπτο φύλλο εργασίας «Ενεργά Πλάτη Καμπτικής Ροπής»	90
5.7 Έκτο φύλλο εργασίας «Εγκάρσια Κάμψη, Ελεύθερο Πέλμα».....	93
5.8 Έβδομο φύλλο εργασίας «Έλεγχοι Φορτίου Βαρύτητας»	97
5.9 Όγδοο φύλλο εργασίας «Έλεγχοι Φορτίου Αναρρόφησης»	101
5.10 Συμπεράσματα.....	103
6. Βιβλιογραφία	105

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου Ιωάννη Βάγια , που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με την εν λόγω διπλωματική εργασία και για την καθοδήγησή του.

Ευχαριστώ επίσης: Πυρρολαΐτες (με την πολύ ευρεία έννοια), Ειρηνάκι, Λενιώ, Γιώργη, Νίκο, Τασία, Έλενα , Χριστίνα, Λίλη, Βασιλικούλα, το ίντερνετ, τον Ruraul , τους μονόκερους , αυτούς που εδώ δεν είχαν όνομα αλλά έχουν μια θέση στην καρδιά μου και το φανταστικό.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2018 35

**Σχεδιασμός τεγίδων λεπτότοιχων διατομών C ψυχρής διαμόρφωσης, με
ακραίες ενισχύσεις**

Ράπτης Γλαύκος Γεώργιος (Επιβλέπων : Βάγιας Ι.)

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μελέτη τεγίδων από λεπτότοιχες διατομές ψυχρής διαμόρφωσης, διατομής “C” με ακραίες ενισχύσεις. Πιο συγκεκριμένα αναπτύσσεται ένα υπολογιστικό φύλλο MS Excel Office για τον υπολογισμό της επάρκειας ή όχι ενός αμφιέριστου συστήματος που καταπονείται από καταναμημένο φορτίο βαρύτητας ή αναρρόφησης ανέμου. Ο τρόπος υπολογισμού των αντοχών και των τελικών ενεργών γεωμετρικών στοιχείων της διατομής βασίζεται στα πρότυπα του Ευρωκώδικα 3 «Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα» μέρος 1-1 «Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια», 1-3 «Γενικοί κανόνες- Συμπληρωματικοί κανόνες για μέλη και φύλλα ψυχρής έλασης» & 1-5 «Δομικά στοιχεία από επίπεδα ελάσματα».

Στο πρώτο μέρος γίνεται μια γενική παρουσίαση των στοιχείων ψυχρής έλασης, σχετικά με τα χαρακτηριστικά τους, τις μεθόδους παραγωγής, τα συνήθη προβλήματα ευστάθειας που παρουσιάζουν και τις εφαρμογές τους στην κατασκευή. Στο δεύτερο μέρος γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά του υλικού και των διατομών ψυχρής έλασης. Ακολουθεί το τρίτο μέρος όπου παρουσιάζονται οι μορφές λυγισμού των λεπτότοιχων στοιχείων, εστιάζοντας στις τοπικές αστάθειες που εμφανίζονται στα καμπτόμενα μέλη, σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 EN 1993-1-3, καθώς και τα μεγέθη που δημιουργούνται λόγω της σύνδεσης της τεγίδας με την επικάλυψη, και επιδρούν στους τελικούς ελέγχους.

Στο τέταρτο μέρος παρουσιάζεται ένα αριθμητικό παράδειγμα, το οποίο δείχνει ολόκληρη την διαδικασία επίλυσης, με βάση την θεωρία που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Στο πέμπτο μέρος το ίδιο αριθμητικό παράδειγμα παρουσιάζεται, μέσα από φωτογραφίες, με το υπολογιστικό φύλλο MS Excel Office που αναπτύχθηκε και εξηγείται αναλυτικά τρόπος λειτουργίας του, μαζί με κάποια συμπεράσματα.

National Technical University of Athens
Faculty of Civil Engineering
Institute of Steel Structures
Diploma Thesis
EMK ΔΕ 2018 35

Design of thin-walled C cold formed section purlins, with edge stiffeners

Raptis Glafkos Georgios (supervised by Vagias I.)

Abstract

The present diploma thesis deals with the study of purlins with lightweight cold formed steel C section with edge stiffeners. More specifically a MS Office Excel worksheet was created which calculates the endurance or not, of a two-point supported beam, with a uniformly distributed gravity or wind suctional stress load. The calculations of the endurance and the final geometric characteristics of the cross section are based on the European Standard Eurocode 3 : Design of steel structures – Part 1-1 : General rules and rules for buildings, - Part 1-3 : General rules- Supplementary rules for cold – formed members and sheeting & Part 1-5 : Plated structural elements.

In the first part of the study there is a general presentation of cold-formed steel elements, describing their features, the cold-forming techniques, the usual instabilities and applications in the construction industry. In the second part the materials are presented. Following the third part where the types of buckling of lightweight steel members are presented, focusing on local instabilities based on EN 1993-1-3, as well as the moments that occur as a result of the connection between the purlin and the sheeting, that influence the final equations.

In the fourth part a numerical example is presented which is based on the distributed theory of the previous chapters. Moreover, in the fifth part the same numerical example is being represented again, throughout photos of the developed worksheet MS Office Excel with a detailed explanation of the functional process, along with some conclusions.

Κεφάλαιο 1

1. Εισαγωγικά στοιχεία για τις διατομές ψυχρής έλασης

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα παλιά χρόνια, δεν ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένη η μόρφωση και η χρήση των λεπτότοιχων διατομών ψυχρής έλασης, κυρίως δε σε έργα που η μείωση του βάρους της κατασκευής αποτελούσε επιτακτική ανάγκη, όπως στην αεροναυπηγική, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην κατασκευή σιδηροδρομικών οχημάτων και γενικώς μεταφορικών μέσων. Αργότερα άρχισαν να χρησιμοποιούνται σαν επικαλύψεις, αλλά και ως φέροντα δομικά στοιχεία δευτερευούσης σημασίας.

Μέσα , ωστόσο, από την πρόοδο της κατασκευαστικής τεχνολογίας, την διεύρυνση της γνώσεως της συμπεριφοράς των χαλύβδινων διατομών ψυχρής έλασης, την πλέον ικανοποιητική προστασία έναντι των επιπτώσεων της οξειδώσεως, καθώς και την εφαρμογή νέων μεθόδων πυροπροστασίας, έχει προκύψει μια ευρεία χρήση των διατομών ψυχρής έλασης, με αποτέλεσμα να είναι ένας από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους κλάδους του βιομηχανικού χάλυβα. Πλέον συναντάμε το χάλυβα ψυχρής διαμόρφωσης, εκτός των προαναφερθέντων, ως τεγίδες και μηκίδες, σε γέφυρες, σε κτίρια, σε κατοικίες και προσθήκες ορόφων, σε στέγαστρα και πλαίσια, σε γερανογέφυρες και υπερμεγέθεις πυλώνες των ναυπηγείων ή των λιμένων και τέλος ως υλικό για επικαλύψεις. Επιπλέον, τραπεζοειδή χαλυβδόφυλλα εφαρμόζονται ευρέως τα τελευταία 15 χρόνια σε συνδυασμό με σκυρόδεμα, ως στοιχεία σύμμικτων πλακών, οι οποίες έχουν το μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς σε πολώροφα κτίρια και άλλες κατασκευές.



Σχήμα 1.1: Μεταλλικός σκελετός κατοικίας

Τα λεπτότοιχα μέλη ψυχρής διαμόρφωσης αποδεικνύονται αρκετά αποδοτικά ως προς την αντοχή και τη δυσκαμψία τους συναρτήσει του μικρού ιδίου βάρους τους. Επίσης, ξεχωρίζουν για την ομοιόμορφη ποιότητα, την οικονομία στη μεταφορά, την ευκολία στη διακίνηση και ανέγερσή τους στο μεταλλικό σκελετό και την ευκολία προκατασκευής. Οι λεπτότοιχες διατομές σε συνδυασμό με χάλυβες υψηλών ποιοτήτων δημιουργούν προβλήματα υπολογισμού τα οποία δε μας απασχολούν στις κλασικές μεταλλικές κατασκευές. Τέτοια είναι ο τοπικός λυγισμός, ο καθολικός λυγισμός και η στρέβλωση. Για το λόγω αυτό μελετάται και αναπτύσσεται η επάρκεια ενός αμφιέριστου συστήματος που καταπονείται από φορτία θετικά και αρνητικά, καθώς η ευρεία χρήση των διατομών αυτών σε στέγαστρα αλλά και σε κύριους φορείς κτιρίων απαιτούν γρήγορα αριθμητικά αποτελέσματα.



Σχήμα 1.2 : Μεταλλική πρόσοψη κατοικίας



Σχήμα 13α: Μεταλλικός σκελετός κτιρίου



Σχήμα 1.3β: Μεταλλικός σκελετός κτιρίου.

1.2 ΜΟΡΦΕΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

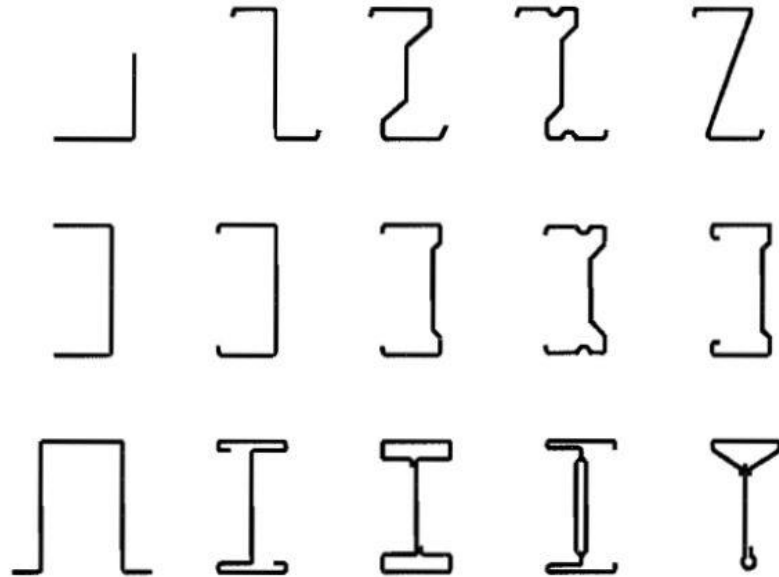
Τα μέλη ψυχρής ελάσεως και τα αυλακωτά φύλλα έχουν εντός επιτρεπόμενων ανοχών ένα σταθερό ονομαστικό πάχος σε όλο το μήκος τους, ενώ μπορεί να έχουν είτε ομοιόμορφη διατομή είτε απομειούμενη διατομή κατά μήκος της διατομής. Τα προϊόντα ψυχρής έλασης διακρίνονται σε δύο κυρίως κατηγορίες:

- Ραβδόμορφα στοιχεία ως μέλη του φέροντα οργανισμού.
- Επιφανειακά στοιχεία του κελύφους της κατασκευής ή πλακών.

Τυπικές διατομές της πρώτης κατηγορίας προϊόντων ψυχρής διαμόρφωσης φαίνονται στο σχήμα 1.5. Τα ραβδόμορφα αυτά στοιχεία αποτελούνται από ανοικτές μεμονωμένες διατομές, από ανοικτές κλειστές διατομές και από κλειστές σύνθετες διατομές. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως δοκοί για σχετικά μικρά φορτία και ανοίγματα (τεγίδες και μηκίδες), ως στύλοι και κατακόρυφες στηρίξεις και ως ράβδοι σε δικτύωματα. Συνήθως το ύψος των διατομών ψυχρής διαμόρφωσης κυμαίνεται από 50 έως 300 mm και το πάχος του υλικού από 1 έως 8 mm. Βέβαια και τιμές εκτός αυτών των ορίων χρησιμοποιούνται.

Παραδείγματα επιφανειακών στοιχείων φαίνονται στο σχήμα 1.6. Από αυτές τις διατομές αποτελούνται επίπεδα φέροντα μέλη, με το μικρότερο δυνατό πάχος υλικού, και χρησιμοποιούνται γενικά για την κάλυψη επιφανειών υπό μέτρια κατανεμημένη φόρτιση

(καταστρώματα οροφής, δαπέδου, επικάλυψη τοίχων). Το ύψος των διατομών κυμαίνεται από 40 έως 200mm και το πάχος τους από 0,5 έως 2 mm.



α) Απλές ανοιχτές διατομές

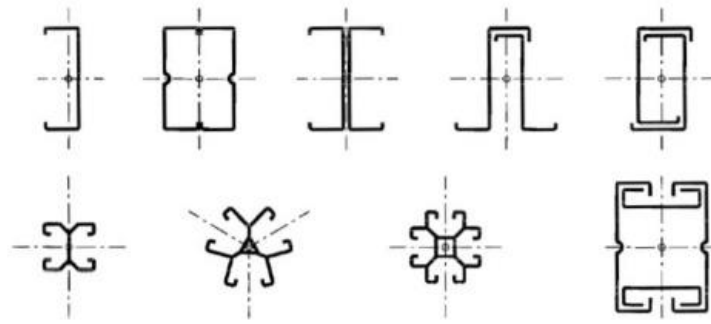


β) Ανοιχτές σύνθετες διατομές

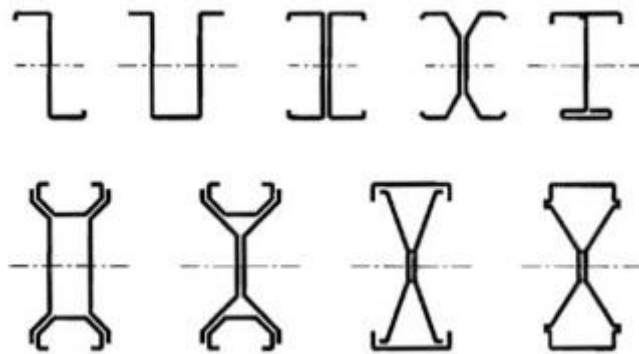


γ) Κλειστές σύνθετες διατομές

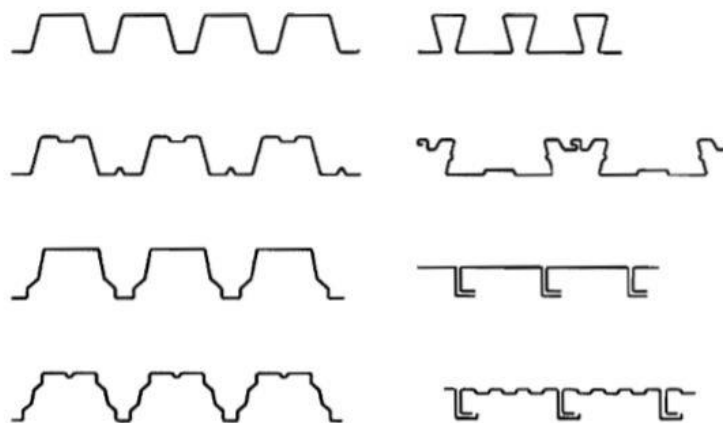
Σχήμα 1.4: Τυπικές μορφές ραβδόμορφων στοιχείων



α) Θλιβόμενα μέλη και εφελκόμενα μέλη



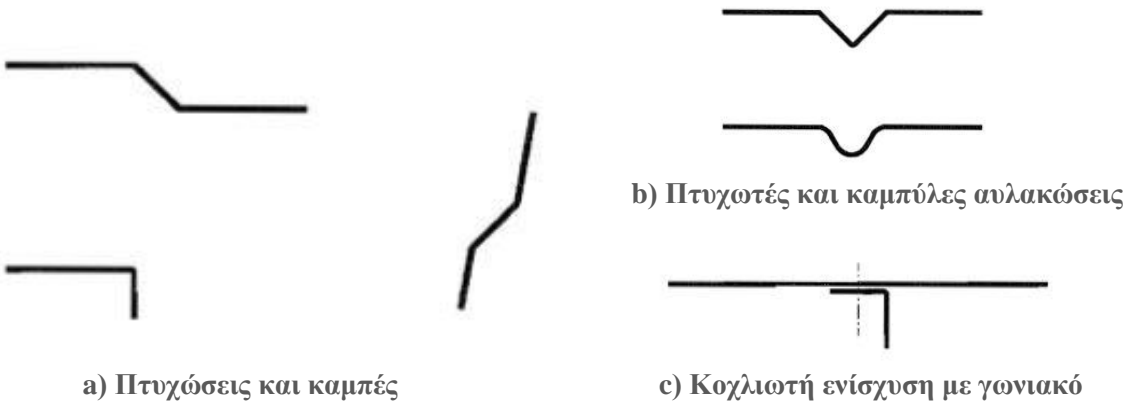
α) Δοκοί και άλλα μέλη τα οποία υπόκεινται σε κάμψη



β) Διαμορφωμένες επικαλύψεις και πλατιά χαλυβδόφυλλα

Σχήμα 1.5: Παράδειγμα μελών ψυχράς διαμορφώσεως και διαμορφωμένων επικαλύψεων

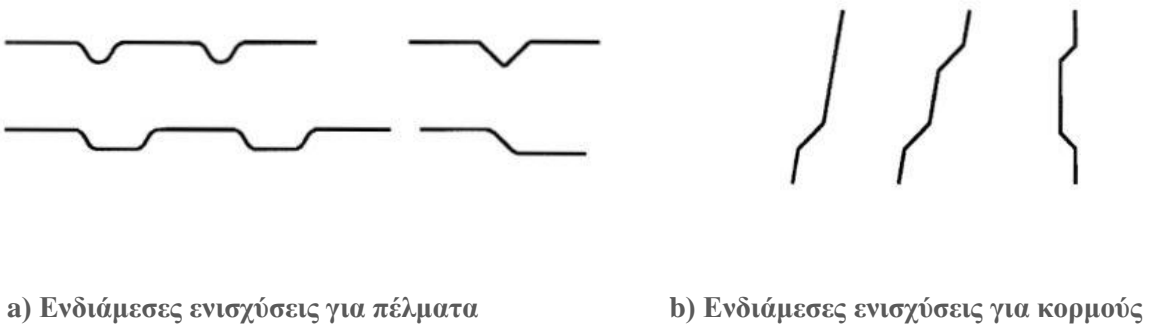
Για την αύξηση της δυσκαμψίας των διατομών ψυχρής έλασης, προβλέπονται ακραίες ή ενδιάμεσες ενισχύσεις. Οι αντίστοιχες ακραίες και πτυχωτές ενισχύσεις ή εγκοπές φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 1.3: Τυπικές μορφές των ενισχύσεων για μέλη ψυχράς ελάσεως και επικαλύψεις



Σχήμα 1.6: Τυπικές μορφές ακραίων ενισχύσεων



Σχήμα 1.7: Τυπικές μορφές ενδιάμεσων διαμήκων ενισχύσεων

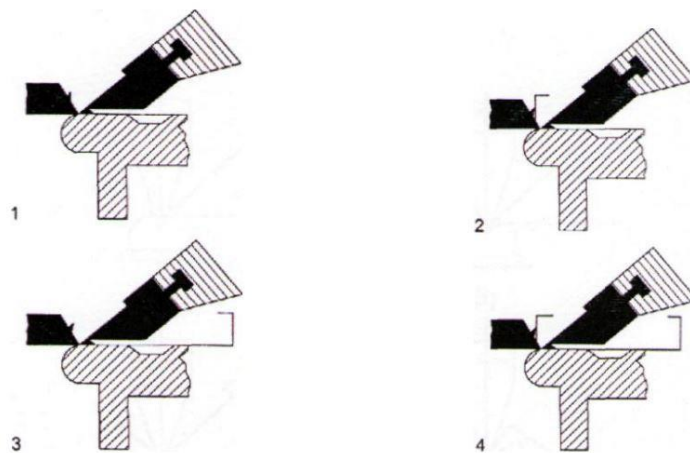
1.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Οι διατομές ψυχρής έλασης ή μόρφωσης, μπορούν να κατασκευαστούν με τις ακόλουθες μεθόδους:

- 1) Αναδίπλωση
- 2) Συμπίεση
- 3) Ψυχρή έλαση

Οι δυο πρώτες μέθοδοι, εφαρμόζονται για μικρές ποσότητες δομικών στοιχείων και για μήκη, συνήθως, έως 6 μέτρων. Η τρίτη μέθοδος χρησιμοποιείται για εν σειρά βιομηχανική παραγωγή.

Η μέθοδος της αναδίπλωσης αποτελεί την απλούστερη διαδικασία, εφαρμόζεται για ευθύγραμμες μόνο διαμορφώσεις και υπό σταθερά συνήθως γωνία 90° μέσω ειδικών μηχανών, που καλούνται «στράντζες» και έχει αρκετά περιορισμένη εφαρμογή.

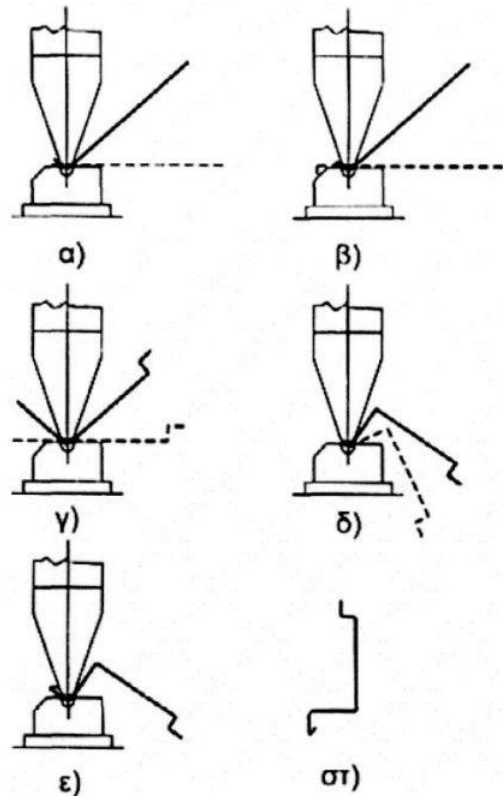


Σχήμα 1.6: παραγωγή με αναδίπλωση (folding)

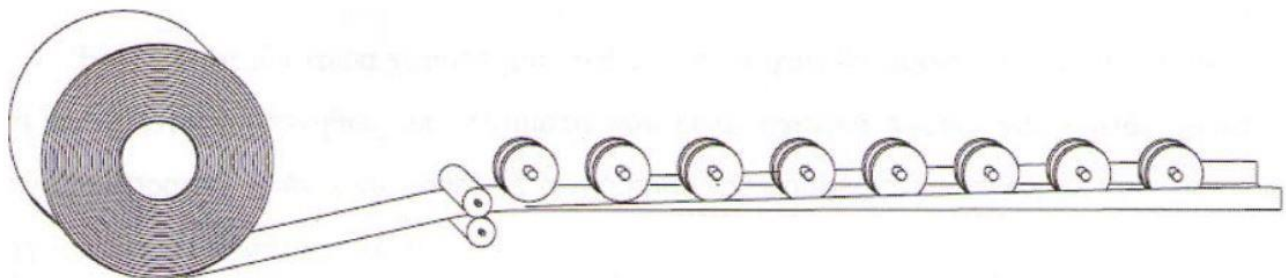
Η μέθοδος της συμπίεσης έχει ευρύτερη εφαρμογή και επιτρέπει την εφαρμογή μεγαλύτερης ποικιλίας διατομών. Εφαρμόζεται είτε για ευθύγραμμες διαμορφώσεις (λόγω όμως της χρήσεως ειδικών μητρών, μπορούμε να έχουμε κάμψη υπό γωνία διάφορη των 90°), με την χρήση των καλούμενων «στραντζοπρεσσών», είτε μέσω απλών πρεσσών για διαμόρφωση (μέσω μήτρας) οποιοδήποτε μορφώματος (ως π.χ. ημικυκλικών ήβων ή πολυγωνικών ενισχυτικών εξογκωμάτων).

Η τρίτη μέθοδος μέσω ειδικών διαμορφωτικών μηχανών (extruders) χρησιμοποιείται για την κατασκευή τόσο ανοικτών, όσο και κλειστών (συγκολλητών ή μη) διατομών, με μήκη έως και 14 μέτρα. Η μέθοδος της ψυχρής έλασης παρουσιάζει μεγάλη παραγωγικότητα και καλή ποιότητα προϊόντων από άποψη ακρίβειας και εμφάνισης. Στην περίπτωση αυτή ένα συνεχές χαλύβδινο φύλλο, προερχόμενο από ένα ρολό (coil), περνάει διαμέσου μίας σειράς ελάστρων, τα οποία δίνουν σταδιακά, μέσω πλαστικής παραμόρφωσης στο χάλυβα την επιθυμητή μορφή. Κάθε ζεύγος ελάστρων προκαλεί μια συγκεκριμένη σταθερή παραμόρφωση. Στο Σχήμα 1.8, μορφώνεται μια πιλοδοειδής διατομή. Κάθε ζεύγος

ελαστρων ονομάζεται βαθμίδα. Όσο συνθετότερη είναι η διατομή τόσο περισσότερες βαθμίδες χρειάζονται. Σε κλειστές διατομές ψυχρής έλασης, τα έλαστρα σχηματίζουν κατ' αρχήν μια κυκλική διατομή και τα απέναντι άκρα των ελασμάτων συγκολλούνται, πριν την τελική έλαση, σε μια τετραγωνική ή κυκλική διατομή.



Σχήμα 1.7: Παραγωγή με συμπίεση (press braking)



Σχήμα 1.8: παραγωγή με ψυχρή έλαση (cold rolling)

1.5 Ευστάθεια Μελών Ψυχρής Έλασης

Η χρήση διατομών ψυχρής έλασης οδηγεί σε ειδικά προβλήματα σχεδιασμού σε σχέση με τις διατομές θερμής έλασης, εξαιτίας της διαδικασίας παραγωγής τους. Ακόμη τα

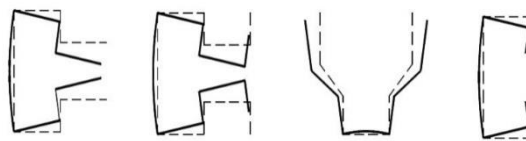
λεπτότοιχα ελάσματα έχουν μεγάλο πλάτος σε σχέση με το πάχος τους γεγονός που τα καθιστά εύκαμπτα.

Η συμπεριφορά των χαλύβδινων διατομών επηρεάζεται από τις τέσσερις αστάθειες:

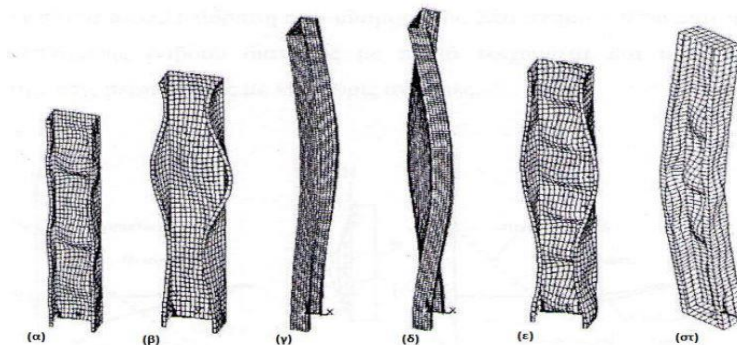
1. τον τοπικό λυγισμό,
2. τον καθολικό λυγισμό,
3. το λυγισμό με στρέβλωση της διατομής,
4. το διατμητικό λυγισμό.

Επιπλέον, είναι πιθανή και η αλληλεπίδραση των παραπάνω ασταθειών. Ομοίως λάθη στο σχεδιασμό, για παράδειγμα έκκεντρη φόρτιση και κατασκευαστικά λάθη λόγω της ψυχρής διαμόρφωσης εντείνουν τα φαινόμενα αυτά.

Η αστοχία λόγω ελαστικού λυγισμού δεν οφείλεται σε υπέρβαση τάσεως αλλά σε αστάθεια ισορροπίας και ακολούθως υπερβολική παραμόρφωση, η οποία λαμβάνει χώρα αμέσως μετά το λυγισμό. Αυτή η μορφή λυγισμού ονομάζεται τοπικός λυγισμός και δεν πρέπει να συγχέεται με τον καθολικό λυγισμό ενός μέλους μεγάλου μήκους ή πλευρικά μη εξασφαλισμένου. Η αποτροπή του λυγισμού ή και η αύξηση της φέρουσας ικανότητας δεν επιτυγχάνεται με αύξηση της αντοχής αλλά με αύξηση της ακαμψίας, η οποία συμβάλλει στη μείωση των βελών κάμψης. Αυτό το σκοπό έχει και η τοποθέτηση ακραίων και ενδιάμεσων ενισχύσεων στις διατομές αυτές, καθώς και η εισαγωγή μιας ισοδύναμης, μειωμένης διατομής, της ενεργού διατομής.



Σχήμα 1.9: Παράδειγμα μορφών λυγισμού με στρέβλωση διατομής



Σχήμα 1.10: Μορφές λυγισμού διατομής «U» υπό αξονική θλίψη

- α) Τοπικός λυγισμός, β) Λυγισμός με στρέβλωση διατομής, γ) Καμπτικός λυγισμός περί τον ασθενή άξονα, δ) Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός, ε) Σύνθετη μορφή λυγισμού, στ) αλληλεπίδραση τοπικού λυγισμού και καμπτικού λυγισμού περί τον ασθενή άξονα

1.4 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΜΕΛΩΝ ΨΥΧΡΗΣ ΕΛΑΣΗΣ

Η χρήση κάθε υλικού έρχεται να ικανοποιήσει ανάγκες και να δώσει απαντήσεις στα διάφορα κατασκευαστικά προβλήματα που αντιμετωπίζει ο μηχανικός, με το τεχνικοοικονομικό κομμάτι να υπεισέρχεται σε κάθε απόφαση. Έτσι λοιπόν η ανάγκη για εξοικονόμηση χρημάτων, ελαφρύτερες κατασκευές και βελτιστοποίηση του σχεδιασμού οδήγησε στην ευρεία χρήση και εξέλιξη των διατομών ψυχρής έλασης, στο πλαίσιο του οποίου τα συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων υλικών είναι:

1) *Οικονομία & Ταχύτητα ανέγερσης της κατασκευής*

Οι λεπτότοιχες διατομές παρέχουν εν γένει οικονομικότερο σχεδιασμό σε σχέση με τις διατομές θερμής έλασης εξαιτίας του μικρότερου βάρους. Αυτό όμως ισχύσει περισσότερο σε ελαφριές κατασκευές όπου δεν έχουμε ανάληψη μεγάλων κατακόρυφων και σεισμικών φορτίων. Το μικρό βάρος δίνει τη δυνατότητα για μεγαλύτερη παραγωγικότητα στο εργοτάξιο καθώς περιορίζεται η χρήση ανυψωτικών μηχανημάτων και τα συνεργεία μπορούν να εργαστούν γρηγορότερα. Επιπλέον, τα στοιχεία έχουν παραχθεί στις ακριβείς διαστάσεις και έχουν ήδη διανοιγμένες οπές. Έτσι μειώνεται ο χρόνος παραμονής στο εργοτάξιο όπου γίνεται η απλή συναρμολόγηση. Τα διάφορα μέλη μπορούν να ανυψωθούν σε ομάδες με χρήση γερανού. Τα παραπάνω στοιχεία έχουν ως αποτέλεσμα τη μεγάλη ταχύτητα κατασκευής καθώς και την ταχεία απόδοση του επενδυμένου κεφαλαίου.

2) *Προστασία από διάβρωση*

Μέσω του γαλβανίσματος, την τοποθέτηση επιστρώσεων και καθοδικής προστασίας από το εργοστάσιο, επιτυγχάνεται επαρκής προστασία έναντι διάβρωσης και κατά συνέπεια μεγάλη διάρκεια ζωής της κατασκευής, καθώς και εξοικονόμηση χρήματος αφού απαλλασσόμαστε από τέτοιες ενέργειες στο εργοτάξιο.

3) *Ελευθερία στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό*

Η χρήση του χάλυβα σαν κύριο δομικό υλικό επιτρέπει το σχεδιασμό ενιαίων χώρων αρκετών τετραγωνικών μέτρων χωρίς την ύπαρξη υποστυλωμάτων. Βασικό στοιχείο σχεδιασμού είναι η ενσωμάτωση των κύριων δοκών στις τοιχοποιίες προσφέροντας υψηλό αισθητικό αποτέλεσμα στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων.

4) *Λύση για δύσκολες εφαρμογές (προσθήκες ορόφων κλπ.) - δυνατότητα προκατασκευής*

Τα στοιχεία από χάλυβα ψυχρής διαμόρφωσης λόγω του χαμηλού βάρους τους είναι κατάλληλα για τις περιπτώσεις προσθήκης καθ' ύψος σε υφιστάμενα κτίρια. Επιπλέον παρέχεται η δυνατότητα προκατασκευής των μεταλλικών στοιχείων σε περιπτώσεις όπου η επί τόπου συναρμολόγηση είναι δύσκολη λόγω της μορφής και της θέσης του υφιστάμενου κτιρίου.

5) *Αντισεισμική Προστασία*

Το χαμηλό βάρος της κατασκευής εξασφαλίζει την άριστη συμπεριφορά του κτιρίου σε περίπτωση σεισμού και προσφέρει υψηλή ασφάλεια σε όσους κατοικούν σε αυτό. Με τη χρήση χιλιάδων αυτοδιάτρητων βιδών και κατάλληλων αγκυριών επιτυγχάνεται άριστη σύνδεση μεταξύ των στοιχείων.

6) Φιλικότητα προς το περιβάλλον

Ο χάλυβας είναι ανακυκλώσιμο υλικό και η διαδικασία παραγωγής του καταναλώνει λιγότερη ενέργεια σε σχέση με άλλα υλικά.

1.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι πιο διαδεδομένες συνήθειες εφαρμογές των διατομών ψυχρής έλασης είναι σε:

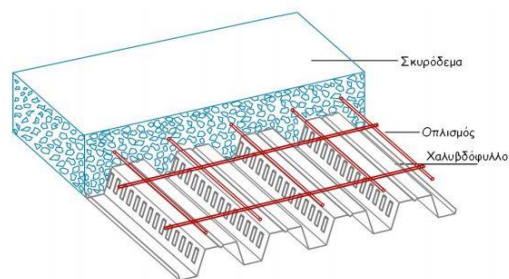
- 1) Τεγίδες και μηκίδες
- 2) Σύμμικτες πλάκες
- 3) Δικτυώματα
- 4) Βιομηχανικά ράφια
- 5) Κύριος φορέας σε προκατασκευασμένα ελαφρά βιομηχανικά κτίρια και σε πολύροφα μεταλλικά κτίρια
- 6) Κελυφωτές κατασκευές
- 7) Μεγάλα πετάσματα (πάνελ) για κτίρια κατοικίας
- 8) Γεωργικά σιλό
- 9) Χωροδικτυώματα
- 10) Πλαίσια με κοχλιωτούς κόμβους για βιομηχανικά κτίρια



Σχήμα 1.11: Τεγίδες μορφής C & Z



Σχήμα 1.12: Γεωργικά Σιλό



Σχήμα 1.13: Σύμμικτη πλάκα.

Κεφάλαιο 2

2. Ιδιότητες Υλικών & Διατομών Ψυχρής Έλασης

2.1 ΠΟΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΥΒΑ

Οι χρησιμοποιούμενοι χάλυβες πρέπει να έχουν κατάλληλο τύπο για ψυχρή μόρφωση – εξέλαση, εάν απαιτείται καθώς και για γαλβάνισμα. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι ονομαστικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών, οι οποίες χρησιμοποιούνται και σαν χαρακτηριστικές τιμές στον υπολογισμό μεγεθών για τις συνήθεις ποιότητες χάλυβα.

Πίνακας 2.1: Ποιότητες χάλυβα και αντίστοιχες ονομαστικές τιμές του βασικού ορίου διαρροής f_{yb} και της εφελκυστικής αντοχής f_u .

Τύπος Χάλυβα	Πρότυπο	Ποιότητα	f_{yb} N/mm ²	f_u N/mm ²
Προϊόντα θερμής ελάσεως μη κραματομένων δομικών χάλυβων. Μέρος 2: Τεχνικές συνθήκες παράδοσης μη κραματομένων δομικών χάλυβων	EN 10025: Part 2	S235	235	360
		S275	275	430
		S355	355	510
Προϊόντα θερμής ελάσεως δομικών χάλυβων. Μέρος 3: Τεχνικές συνθήκες παράδοσης για εξομαλυμένους / εξομαλυμένους ελατούς συγκολλησίσιμους, λεπτόκοκκους δομικούς χάλυβες	EN 10025: Part 3	S275 N	275	370
		S355 N	355	470
		S420 N	420	520
		S460 N	460	550
		S275 NL	275	370
		S355 NL	355	470
		S420 NL S460 NL	420 460	520 550
Προϊόντα θερμής ελάσεως δομικών χάλυβων. Μέρος 4: Τεχνικές συνθήκες παράδοσης για θερμομηχανικούς, ελατούς συγκολλησίσιμους λεπτόκοκκους δομικούς χάλυβες	EN 10025: Part 4	S 275 M	275	360
		S 355 M	355	450
		S 420 M	420	500
		S 460 M	460	530
		S 275 ML	275	360
		S 355 ML	355	450
		S 420 ML S 460 ML	420 460	500 530
Χαλύβδινα φύλλα ψυχρής αναγωγής, δομικής ποιότητας	ISO 4997	CR 220	220	300
		CR 250	250	330
		CR 320	320	400
Συνεχώς εν θερμώ επιψευδαργυρωμένα φύλλα δομικού χάλυβα	EN 10147	S220GD+Z	220	300
		S250GD+Z	250	330
		S280GD+Z	280	360
		S320GD+Z	320	390
		S350GD+Z	350	420

Επίπεδα προϊόντα θερμής ελάσεως από χάλυβες υψηλής αντοχής για ψυχρή έλαση Μέρος 2: Συνθήκες μεταφοράς για θερμομηχανικά ελατούς χάλυβες	EN 10149: Part 2	S 315 MC	315	390
		S 355 MC	355	430
		S 420 MC	420	480
		S 460 MC	460	520
		S 500 MC	500	550
		S 550 MC	550	600
		S 600 MC	600	650
		S 650 MC	650	700
	S 700 MC	700	750	
	EN 10149: Part 3	S 260 NC S	260	370
		315 NC S	315	430
		355 NC S	355	470
		420 NC	420	530
			420	
		420		

Σημειώνεται ότι για τις διάφορες ποιότητες χάλυβα δίνονται οι ελάχιστες τιμές 140 N/mm² και 270 N/mm² για το βασικό όριο διαρροής και εφελκυστικής αντοχής αντίστοιχα.

2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕΛΩΝ ΚΑΙ ΦΥΛΛΩΝ ΨΥΧΡΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Η κατεργασία της ψυχρής έλασης, με όποια μέθοδο κι αν επιλεγεί από την ενότητα 1.4, στις αναφερόμενες σύνηθες ποιότητες του χάλυβα προσθέτει στο υλικό κάποια επιπλέον χαρακτηριστικά ως προς την αντοχή. Συγκεκριμένα το είδος αυτό της εν ψυχρώ διαδικασίας προσδίδει τοπική αντοχή στην παραγόμενη διατομή, που πρέπει να προσμετρήσουμε μέσω ενός αυξημένου μέσου ορίου διαρροής f_{ya} , που υπολογίζεται από την σχέση:

$$f_{ya} = f_{yb} + \frac{(f_u - f_{yb}) * \kappa * n * t^2}{A_g} \leq \frac{f_u + f_{yb}}{2} \quad (2.1)$$

όπου :

- A_g εμβαδό της πλήρους διατομής
- κ συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τον τρόπο παραγωγής $\kappa = 7$ για ψυχρή κάμψη $\kappa = 5$ για άλλους τρόπους διαμόρφωσης
- n αριθμός των κάμψεων κατά 90° της διατομής – με εσωτερική ακτίνα $r_i \leq 5t$ (τμήματα κάμψεων 90° υπολογίζονται ως τμήματα του n)
- t ονομαστική τιμή του πάχους του αρχικού ελάσματος χωρίς επικαλύψεις και επιφανειακή προστασία. (=t_{cor})

Διευκρινίζεται ότι το αυξημένο όριο διαρροής λόγω της ψυχρής έλασης μπορεί να λαμβάνεται υπόψη σε αξονικά φορτιζόμενα μέλη όπου η ενεργός διατομή A_{eff} της διατομής είναι ίση με την πλήρη A_g ενώ στον υπολογισμό της A_{eff} σαν όριο διαρροής λαμβάνεται το $f_y b$. Το μέσο όριο διαρροής f_{ya} μπορεί να χρησιμοποιείται για τους παρακάτω υπολογισμούς :

- 1) Της αντοχής της διατομής για ένα αξονικά φορτιζόμενο εφελκόμενο μέλος
- 2) Της αντοχής της διατομής και της αντοχής σε λυγισμό για ένα αξονικά φορτιζόμενο θλιβόμενο μέλος στο οποίο ολόκληρη η διατομή είναι ενεργή
- 3) Στην καμπτική αντοχή όμοιας διατομής με πλήρη ενεργά πέγματα

Επιπλέον, το αυξημένο όριο διαρροής λόγω της ψυχρής διαμόρφωσης δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για μέλη τα οποία υφίστανται θερμή επεξεργασία μετά την ψυχρή έλαση σε θερμοκρασία που ξεπερνά τους 580°C για περισσότερο από μια ώρα. Τέλος, ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στο γεγονός ότι μερικές θερμικές κατεργασίες (ειδικά στην ανόπτηση) μπορεί να οδηγήσουν σε μια μειωμένη τάση διαρροής μικρότερη της βασικής τάση διαρροής $f_y b$.

2.3 ΠΑΧΟΣ ΚΑΙ ΑΝΟΧΕΣ ΠΑΧΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Προτείνονται τα παρακάτω συνήθεις όρια πάχους:

- Για φύλλα και μέλη : $0,45 \leq t_{cor} \leq 15 \text{ mm}$
- Για κόμβους : $0,45 \leq t_{cor} \leq 4 \text{ mm}$

Το πάχος του πυρήνα t_{cor} του μέλους πρέπει να χρησιμοποιείται σαν σχεδιαστικό πάχος , όπου:

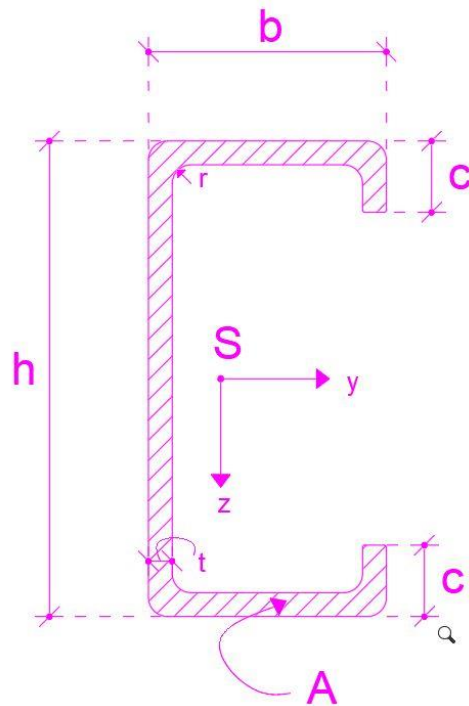
- $t = t_{cor}$ εάν $tol \leq 5\%$
- $t = t_{cor} * \frac{100-tol}{95}$ εάν $tol > 5\%$

με $t_{cor} = t_{nom} - t_{mettalic \ coatings}$

Η επικάλυψη $t_{mettalic \ coatings} = t_{zinc} = 4 \text{ mm}$ για συνήθεις ποιότητες και κατασκευές, ενώ το ονομαστικό πάχος t_{nom} θεωρείται αυτό που προκύπτει ύστερα από την ψυχρή έλαση. Μπορεί να λαμβάνεται υπόψη και σαν το ονομαστικό πάχος t_{nom} του αρχικού φύλλου, εάν οι υπολογιζόμενες περιοχές της διατομής πριν και μετά την ψυχρή έλαση δεν διαφέρουν περισσότερο από 2%, διαφορετικά οι θεωρητικές διαστάσεις πρέπει να αλλάξουν.

2.4 ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Οι ονομαστικές διαστάσεις των επιμέρους στοιχείων της διατομής καθορίζονται από τον Ευρωκώδικα και αφορούν όλες τις διατομές. Οι συνολικές διαστάσεις , όπως το συνολικό πλάτος b , το συνολικό ύψος h και η εσωτερική ακτίνα καμπύλωσης r (και γενικά οι διαστάσεις που συμβολίζονται χωρίς δείκτες) μετρούνται από το εξωτερικό άκρο των διατομών :



Σχήμα 1.14 Διαστάσεις τυπικών διατομών

Οι υπόλοιπες διαστάσεις της διατομής ψυχρής έλασης με δείκτες , όπως b_a , μετρούνται από τον άξονα των στοιχείων ή το μέσο σημείο της γωνίας. Το πάχος t είναι το πάχος σχεδιασμού του χάλυβα που χρησιμοποιείται.

2.5 ΕΠΙΡΡΟΗ ΣΤΡΟΓΓΥΛΕΜΕΝΩΝ ΓΩΝΙΩΝ

Στις διατομές ψυχρής έλασης προκύπτουν αναγκαστικά καμπύλες προσαρμογής, που οφείλονται στον τρόπο παραγωγής τους και τα θεωρητικά πλάτη b_p , μετρούνται από τα μέσα σημεία της παρακείμενης γωνίας, όπως φαίνεται και από το σχήμα 1.15. Ο υπολογισμός όμως των ιδιοτήτων της διατομής, θα βασίζεται στην πραγματική γεωμετρία της διατομής. Η επιρροή των καμπύλων μπορεί να παραλειφθεί εάν ισχύουν οι παρακάτω δυο προϋποθέσεις:

- $r \leq 5t$
- $r \leq 0,15b_p$.

Η διατομή μπορεί να θεωρηθεί τότε ότι αποτελείται από επίπεδα στοιχεία με αιχμηρές γωνίες. Στις αδρανειακές ιδιότητες της διατομής για τον υπολογισμό της δυσκαμψίας η επιρροή των καμπυλών προσαρμογής πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη.

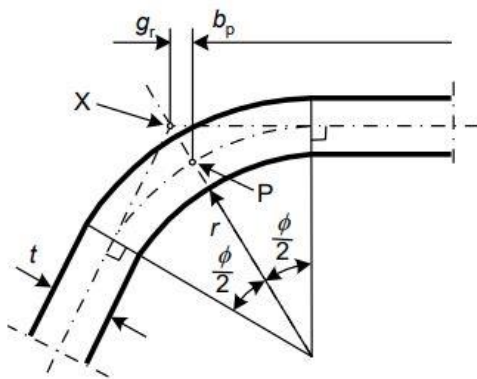
Για τιμές του r οι οποίες ξεπερνούν τα προαναφερθέντα , η επιρροή των καμπυλών προσαρμογής λαμβάνεται υπόψη με απομείωση των ιδιοτήτων μιας παρόμοιας διατομής η οποία διαθέτει αιχμηρές γωνίες με βάση τα παρακάτω :

$$\left. \begin{aligned} A_g &\approx A_{g,sh} * (1 - \delta) \\ I_g &= I_{g,sh} * (1 - 2\delta) \\ I_w &= I_{w,sh} * (1 - 4\delta) \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Όπου:

$$\delta = 0,43 * \frac{\sum_{j=1}^n r_j}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} \quad (2.3)$$

- A_g = το εμβαδόν της πλήρους διατομής
- $A_{g,sh}$ = το εμβαδόν της πλήρους διατομής, αν θεωρηθεί ότι δεν υπάρχουν καμπύλες προσαρμογής, αλλά τα επίπεδα τέμνονται υπό γωνία (αιχμηρές γωνίες)
- $b_{p,i}$ = το ονομαστικό πλάτος του επιπέδου i για διατομής με αιχμηρές γωνίες
- I_g = η ροπή αδρανείας της πλήρους διατομής
- $I_{g,sh}$ = η ροπή αδρανείας με αιχμηρές γωνίες
- I_w = το μέτρο καμπυλώσεως της πλήρους διατομής
- $I_{w,sh}$ = η τιμή του I_w για διατομή με αιχμηρές γωνίες
- m = αριθμός επιπέδων στοιχείων
- n = αριθμός καμπύλων προσαρμογής
- r_i = εσωτερική ακτίνα προσαρμογής του στοιχείου i



(α) Μέσο σημείο της γωνίας ή κάμψης

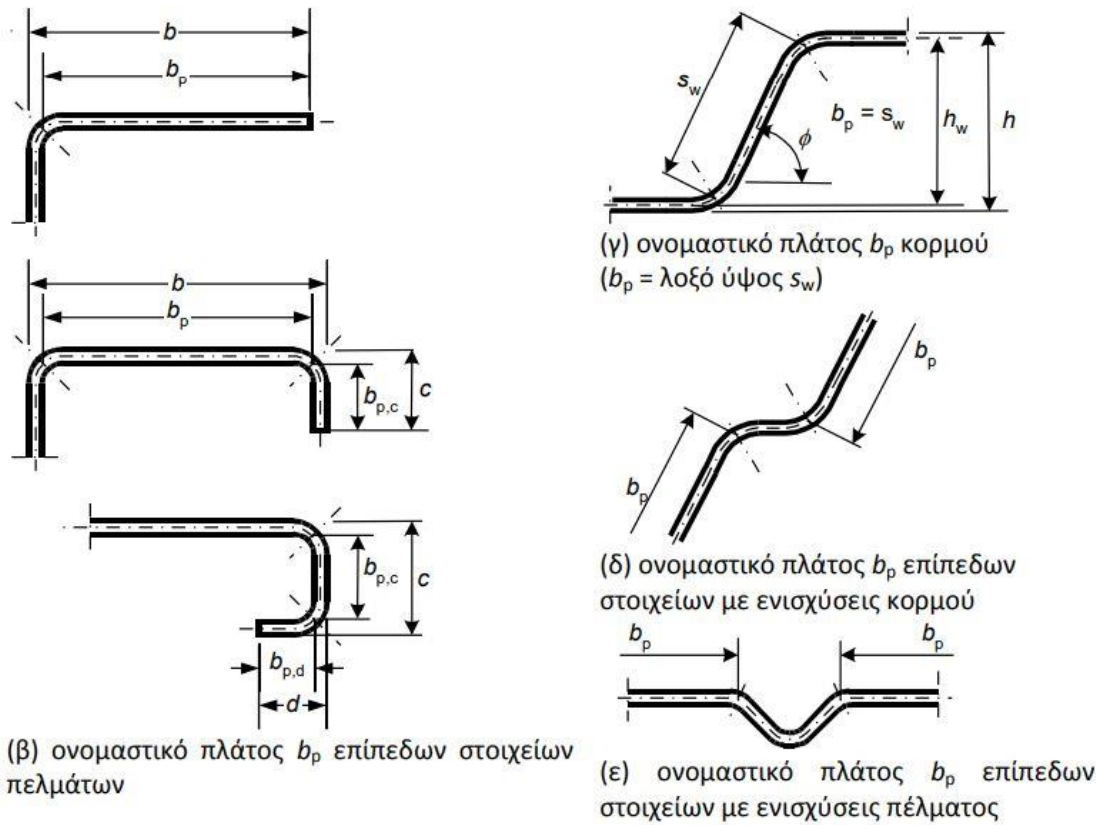
X το σημείο τομής των μέσων επιφανειών

P το μέσο σημείο της γωνίας

$$r_m = r + t/2$$

$$g_r = r_m \left(\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right)$$

Σχήμα 1.15: Ονομαστικά πλάτη των επιπέδων στοιχείων b_p λαμβανομένης υπόψη της καμπυλότητας των γωνιών



Σχήμα 1.15: Ονομαστικά πλάτη των επίπεδων στοιχείων b_p λαμβανομένης υπόψη της καμπυλότητας των γωνιών

2.6 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΙΣΧΥΟΣ - ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ


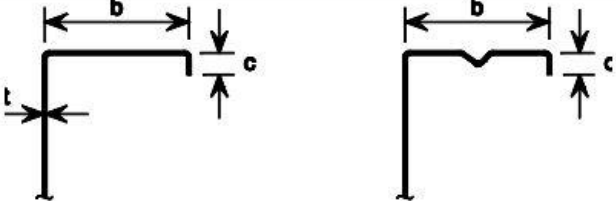
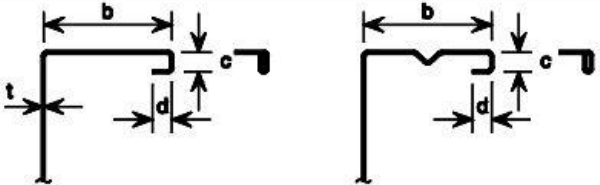
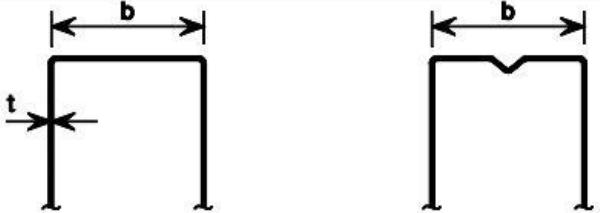

Όσα έχουν αναφερθεί μέχρι στιγμής στον σχεδιασμό και υπολογισμό των λεπτότοιχων διατομών ψυχρής έλασης, μπορούν να εφαρμοστούν σε διατομές που πληρούν ορισμένες γεωμετρικές συνθήκες.

Με σκοπό να επιτευχθεί επαρκής ακαμψία και να προφυλαχθούμε από πρόωρο λυγισμό των τυχόν ενισχύσεων, οι διαστάσεις τους πρέπει να ευρίσκονται στα ακόλουθα όρια:

$$\left. \begin{aligned} 0,2 &\leq \frac{c}{b} \leq 0,6 \\ 0,1 &\leq \frac{d}{b} \leq 0,3 \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Διαφορετικά εάν $c/b < 0,2$ και $d/b < 0,1$ το χείλος πρέπει να αγνοείται ($c=0$ ή $d=0$).

Πίνακας 2.2: Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχους


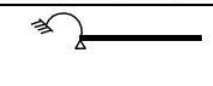

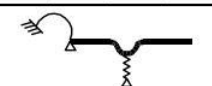

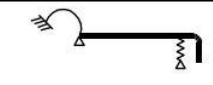

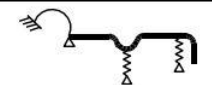

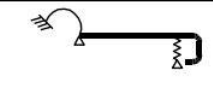

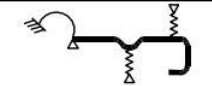


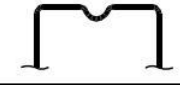
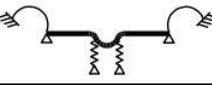




Στοιχεία διατομών	Μέγιστη τιμή
	$b/t \leq 50$
	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$
	$b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$
	$b/t \leq 500$
	$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \phi$

Για διατομές εκτός της γεωμετρίας του παραπάνω πίνακα, ο σχεδιασμός πρέπει να γίνεται πειραματικά. Είναι βασικό να σημειωθεί, ότι το μήκος της σχισμής c μετράτε κάθετα στο πέλμα όταν το χείλος δεν είναι κάθετο στο πέλμα.

2.7 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΓΙΑ ΣΤΑΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ

Μια τυχαία διατομή αποτελείται από μεμονωμένα πλακοειδή στοιχεία, τα οποία εδράζονται σε μία ή δύο πλευρές. Έχοντας ως σκοπό τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της ενεργού διατομής, η διατομή διασπάται στα επιμέρους στοιχεία για τα οποία υπολογίζονται ξεχωριστά τα ενεργά πλάτη. Στο επόμενο βήμα η διατομή ανασυντίθεται από τα ενεργά τμήματα των επιμέρους στοιχείων. Κατά τη διάσπαση της διατομής σε επιμέρους τοιχώματα, πρέπει να προσδιοριστεί η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Αυτό συμβαίνει με τη βοήθεια ενός κατάλληλου προσομοιώματος για τη σύνδεση και την ενίσχυση, μέσω της εισαγωγής κατάλληλων στροφικών και μεταφορικών ελατηρίων όπως φαίνονται στον πίνακα 2.3. Οι σταθερές των ελατηρίων μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά ή υπολογιστικά.

Πίνακας 2.3 Προσομοίωση των στοιχείων της διατομής

Τύπος στοιχείου	Προσομοίωμα	Τύπος στοιχείου	Προσομοίωμα
			
			
			
			
			

Κεφάλαιο 3

3. Συμπεριφορά & Αντοχή Λεπτότοιχων Στοιχείων

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το βασικό χαρακτηριστικό των λεπτότοιχων ελασμάτων ψυχρής έλασης είναι το πολύ μεγαλύτερο πλάτος τους σε σχέση με το πάχος τους. Το παραπάνω γνώρισμα τα διακρίνει από τα κλασικά σιδερά ελάσματα ψυχρής διαμόρφωσης και δημιουργεί προβλήματα ιδιαίτερα για τα λεπτότερα εξ αυτών (π.χ. λαμαρίνες επικαλύψεως πλάτους 1m και πάχους 0,6mm). Τέτοια προβλήματα είναι ότι τα καθιστά αυτομάτως εξαιρετικά εύκαμπτα, ώστε και η πιο απλή σημειακή καταπόνηση να προσδίδει σημαντικές παραμορφώσεις και τους προσδίδει γεωμετρικές ατέλειες λόγω της ψυχρής τους διαμόρφωσης.

Λόγω των ανωτέρω προβλημάτων, τα μέρη των λεπτότοιχων αυτών διατομών, τείνουν να χάσουν την ευστάθειά τους, προτού αστοχήσουν σε διαρροή, για θλιπτική ή διατμητική καταπόνηση. Η πιο κρίσιμη μορφή αστοχίας που εμφανίζεται είναι ο τοπικός λυγισμός, ο οποίος εξαναγκάζει τις διατομές σε μεταβολή του σχήματός τους. Γι' αυτό το λόγο, ο τοπικός λυγισμός θεωρείται πολύ σημαντικός και λαμβάνεται υπόψη στον προσδιορισμό της αντοχής και της δυσκαμψίας μελών ψυχρής έλασης.

Η αντοχή της διατομής είναι αυτή που στις περισσότερες περιπτώσεις καθορίζει την αντοχή ολόκληρου του μέλους. Όσον αφορά ωστόσο τις χαλύβδινες διατομές, ο παραπάνω ισχυρισμός δεν επαληθεύεται πάντοτε, παρά μόνο για φόρτιση που προκαλεί εφελκυσμό ή κάμψη πλευρικά εξασφαλισμένων δοκών. Σε περιπτώσεις θλιβόμενων μελών διαπιστώνεται ότι υπάρχει στάθμη της εξωτερικής φόρτισης, για την οποία το μέλος χάνει την ευστάθειά του, αποκτά δηλαδή τη δυνατότητα να ισορροπήσει πέραν της αρχικής και σε μια γειτονική θέση ισορροπίας, φαινόμενο το οποίο χαρακτηρίζεται από το γενικό όρο λυγισμός.

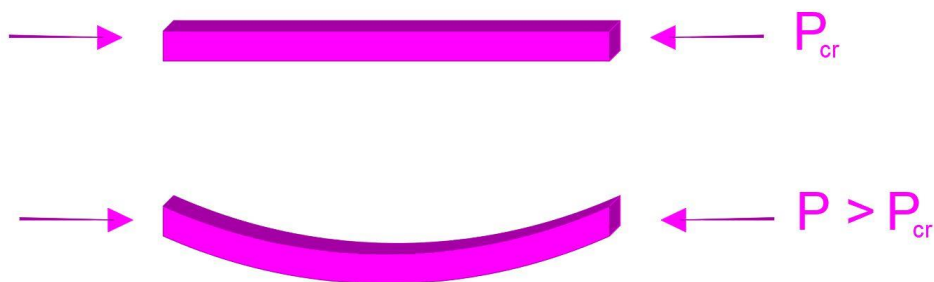
3.2 ΜΟΡΦΕΣ ΚΑΘΟΛΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

3.2.1 Καμπτικός λυγισμός (flexural buckling)

Ο καμπτικός λυγισμός αποτελεί την συνηθέστερη μορφή αστάθειας θλιβόμενων μεταλλικών μελών και οφείλεται στην ύπαρξη θλιπτικής αξονικής δύναμης. Το μέλος αρχικά είναι ευθύγραμμο και λόγω της φόρτισης της αξονικής, η οποία ξεπερνάει ένα κρίσιμο όριο, η ράβδος εγκαταλείπει την ευθύγραμμη αυτή μορφή αξονικής παραμορφώσεως και λαμβάνει μια ελαφρώς καμπυλωμένη μορφή. Η συμπεριφορά αυτή της ράβδου είναι γνωστή σαν καμπτικός λυγισμός και λαμβάνει χώρα περί τον ισχυρό ή ασθενή άξονα της διατομής του μέλους χωρίς όμως να αναπτύσσεται και

Αξίζει να σημειωθεί ότι η λυγηρή αυτή ράβδος ισορροπεί τόσο σε ευθύγραμμη μορφή (για φόρτιση μικρότερη της κρίσιμης), όσο και σε ελαφρώς καμπυλομένη μορφή (για φόρτιση ίση ή μεγαλύτερη της κρίσιμης). Μικρή αύξηση της φόρτισης, πάνω από την κρίσιμη τιμή, προκαλεί σημαντικά μεγαλύτερη και δυσανάλογη καμπτική παραμόρφωση. Σε κάποια δε δεδομένη τιμή της φόρτισης αρχίζει η διαρροή (στην ακραία ίνα της περισσότερο εντεινόμενης από κάμψη διατομής), η οποία αυξανόμενης περαιτέρω της φόρτισης επεκτείνεται, οδηγούσα ακολούθως σε ανελαστικό ή πλαστικό λυγισμό. Επειδή για φόρτιση μεγαλύτερη της κρίσιμης τα περιθώρια μεταλυσισμικής αντοχής της ράβδου είναι πρακτικώς περιορισμένα, θεωρούμε ότι η κρίσιμη φόρτιση συνδέεται με τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα αξονικά θλιβόμενων ράβδων και ως εκ τούτου η φόρτιση αυτή κατά την οποία λαμβάνει χώρα ο ελαστικός λυγισμός αποτελεί κριτήριο σχεδιασμού. Η αντιστοιχούσα στην παραπάνω κρίσιμη φόρτιση λυγισμού είναι, εν γένει, πολύ μικρότερη της τάσεως αναλογίας του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η ράβδος. σχετική στροφή των διατομών.

Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι οι ευθύγραμμες λυγηρές ράβδοι μεγάλου σχετικά μήκους συγκριτικά με τις διαστάσεις της διατομής τους από γραμμικά ελαστικά υλικό θλιβόμενες αξονικά, εντεινόνται γραμμικά αυξανόμενης της φόρτισης μέχρι ορισμένης κρίσιμης τιμής (στάδιο προλυσισμικής συμπεριφοράς). Όταν η φόρτιση λάβει την κρίσιμη τιμή της, η ράβδος εγκαταλείπει την ευθύγραμμη μορφή ισορροπίας, υποκείμενη σε πολύ μικρή κάμψη ως προς τον κύριο άξονα με τη μικρότερη ροπή αδρανείας (φαινόμενο ελαστικού λυγισμού). Ακολούθως, η ράβδος εντεινόμενη μη γραμμικά, μπορεί να φέρει φόρτιση μεγαλύτερη της κρίσιμης (στάδιο μεταλυσισμικής συμπεριφοράς) φθάνουσα σε κατάσταση αστοχίας για ορισμένη τιμή της φόρτισης μετά από διαρροή στην περιοχή της μέγιστης ροπής κάμψεως (φαινόμενο ανελαστικού λυγισμού). Εν τούτοις, επειδή τα περιθώρια μεταλυσισμικής αντοχής είναι πολύ περιορισμένα, θεωρούμε ότι η φέρουσα (σε αξονική θλίψη) ικανότητα της ράβδου από πρακτικής πλευράς αντιστοιχεί στην κρίσιμη φόρτιση ελαστικού φορτίου λυγισμού.

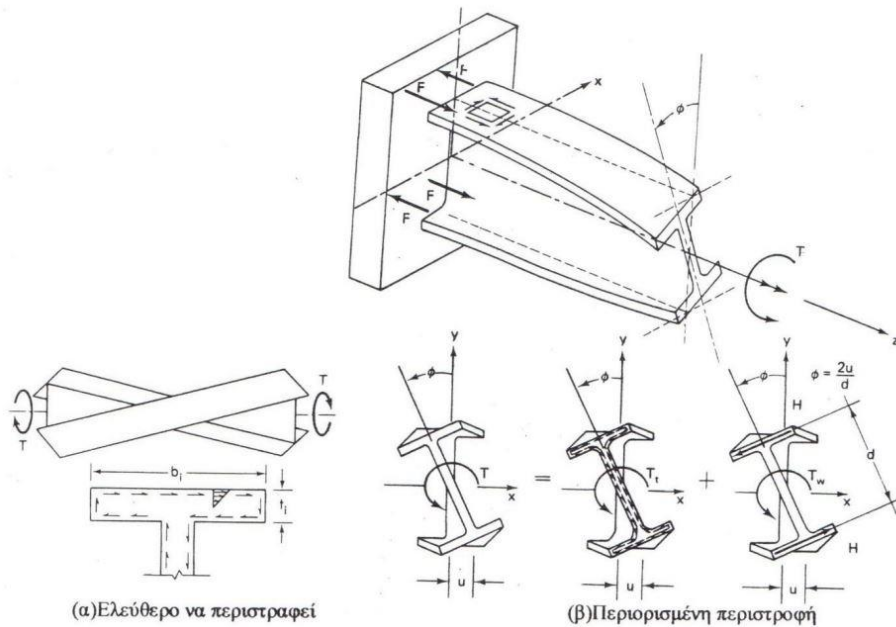


Σχήμα 3.1: Παράδειγμα καμπτικού λυγισμού

3.2.2 Στρεπτικός λυγισμός (torsional buckling)

Στρεπτικός λυγισμός είναι η παραμόρφωση ενός θλιβόμενου μέλους σταθερής διατομής, όταν οι διατομές του στρέφονται κατά τον διαμήκη ευθύγραμμο άξονα του μέλους, ενώ αυτός παραμένει ευθύγραμμος. Ο κίνδυνος στρεπτικού λυγισμού αφορά μόνο τις ανοιχτές διατομές καθώς οι κλειστές έχουν πολύ μεγάλη δυστρεψία. Συνεπώς, στις ανοικτές διατομές δεν είναι γνωστό ποια μορφή λυγισμού θα εμφανιστεί πρώτη και για αυτό πρέπει να εξετάζονται και οι δυο περιπτώσεις για να βρεθεί ποια δίνει το μικρότερο φορτίο.

Η μορφή αυτή αστοχίας βρίσκει διαφορετική εφαρμογή ανάλογα με το είδος της διατομής που υπόκειται σε αυτήν, δηλαδή ανάλογα με το αν είναι απλής ή διπλής συμμετρίας διατομή. Στις διπλά συμμετρικές διατομές παρατηρείται πιο σπάνια από ότι στις διατομές με ένα άξονα συμμετρίας και ο τρόπος που οι πρώτες παραμορφώνονται φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.2: Παράδειγμα στρεπτικού λυγισμού

Οι διατομές με έναν άξονα συμμετρίας είναι όπως προαναφέρθηκε πιο επιρρεπείς στο στρεπτικό λυγισμό από ότι οι διπλά συμμετρικές. Οι μονοσυμμετρικές διατομές διαφέρουν από τις αντίστοιχες συμμετρικές στο ότι το κέντρο βάρους τους δεν συμπίπτει με το κέντρο διάτμησης τους, όπως συμβαίνει στις διπλά συμμετρικές διατομές, γεγονός που τις διαφοροποιεί και στη συμπεριφορά τους ως προς τη φόρτιση στην οποία υπόκεινται. Επίσης, στην περίπτωση του στρεπτικού λυγισμού διατομών με έναν άξονα συμμετρίας το κέντρο διάτμησης διαφέρει από το κέντρο στροφής της διατομής. Επομένως, ο κίνδυνος αστοχίας από στρεπτικό λυγισμό αφορά μόνο τις ανοικτές διατομές καθώς οι κλειστές έχουν πολύ μεγάλη δυστρεψία. Επειδή μία τέτοια μορφή λυγισμού συνδέεται με τη

στρέψη, το κρίσιμο ελαστικό φορτίο λυγισμού εξαρτάται τόσο από τη δυστρεψία κατά Saint-Venant όσο και από τη δυσκαμψία στρέβλωσης. Επιπλέον, στους αριθμητικούς συντελεστές που χρησιμοποιούνται, θα πρέπει να εμπεριέχονται οι συνθήκες δέσμευσης των άκρων σε στρέψη και στρέβλωση. Συνεπώς, στις ανοικτές διατομές δεν είναι γνωστό ποια μορφή λυγισμού θα εμφανιστεί πρώτη (καμπτικός ή στρεπτικός) και για αυτό πρέπει να εξετάζονται και οι δύο περιπτώσεις ώστε να βρεθεί ποια δίνει το μικρότερο κρίσιμο φορτίο.

3.2.3 Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (torsional flexural buckling)

Ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός είναι ένα είδος ελαστικής αστάθειας κατά το οποίο η κάμψη ενός αξονικά θλιβόμενου υποστυλώματος περί τον ισχυρό άξονα συνοδεύεται και από στρέψη. Είναι δηλαδή ένας συνδυασμός των δυο παραπάνω μορφών αστοχίας, του καμπτικού και του στρεπτικού. Οι διατομές των θλιβόμενων ή καμπτόμενων μελών, στα οποία μπορεί να εμφανιστεί ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός, υπόκεινται σε στροφή περί το κέντρο διάτμησης και ταυτόχρονα μετατοπίζονται σε σχέση με τον αρχικά ευθύγραμμο διαμήκη άξονα, ο οποίος όμως παύει να είναι ευθύγραμμος και παραμορφώνεται. Και σε αυτήν την περίπτωση ο κίνδυνος αστοχίας με αυτόν τον τρόπο είναι μεγαλύτερος στις ανοικτές διατομές, ενώ στις κλειστές είναι πολύ μικρός λόγω της μεγάλης δυστρεψίας. Ανάλογα με την εξωτερική φόρτιση υπάρχουν οι εξής περιπτώσεις στρεπτοκαμπτικού λυγισμού:

- Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός μελών υπό αξονική θλίψη
- Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (ή πλευρικός) μη προστατευμένων πλευρικά δοκών υπό κάμψη περί τον ισχυρό άξονα
- Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός μελών υπό θλίψη και κάμψη

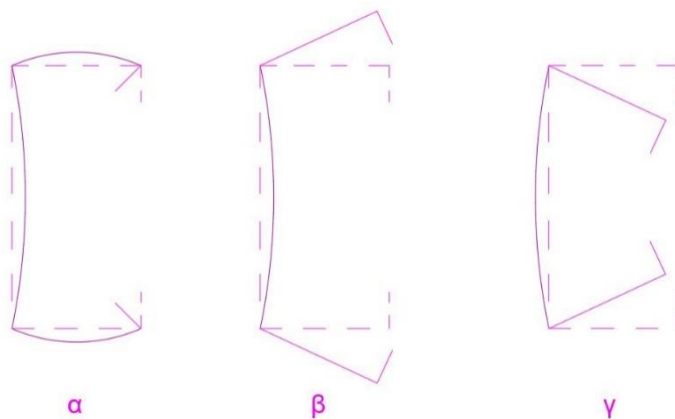
Η Τρίτη περίπτωση, δηλαδή μέλη υπό θλίψη και διαξονική κάμψη είναι η πιο γενική περίπτωση καταπόνησης μιας ράβδου. Από τη διατύπωση των συνθηκών ισορροπίας στην παραμορφωμένη κατάσταση μιας ράβδου με αυτήν την καταπόνηση προκύπτει προκύπτει ένα πολύπλοκο σύστημα τριών διαφορικών εξισώσεων, η λύση του οποίου δεν είναι εφικτή για γενικές περιπτώσεις. Για τον λόγο αυτόν οι κανονισμοί επιτρέπουν τη χρήση απλοποιημένων εξισώσεων που λαμβάνουν υπόψη την αλληλεπίδραση της αξονικής δύναμης και της διαξονικής κάμψης στην ευστάθεια του μέλους. Οι εξισώσεις αυτές ονομάζονται σχέσεις αλληλεπίδρασης και έχουν την ιδιότητα, όταν δρα ένα μόνο εντατικό μέγεθος, να ταυτίζονται με τις σχέσεις ελέγχου για το συγκεκριμένο εντατικό μέγεθος (αξονική δύναμη ή κάμψη).

Εκτός από τον έλεγχο ευστάθειας πρέπει να γίνεται και έλεγχος της αντοχής των διατομών σε κάθε άκρο του μέλους. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται με μια διαφορετική εξίσωση που λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση των εντατικών μεγεθών. Από τους ελέγχους ευστάθειας και αντοχής ενός μέλους μπορούν να προκύψουν και τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης για αξονική δύναμη και κάμψη.

3.3 ΜΟΡΦΕΣ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Εκτός από καθολικό λυγισμό οι διατομές ψυχρής διαμόρφωσης εμφανίζουν πολύ συχνά μορφές τοπικού λυγισμού, όπου οι διατομές δεν μένουν απαραμόρφωτες ως διαφράγματα, αλλά παραμορφώνονται τοπικά. Η αστοχία δηλαδή αναφέρεται στη διατομή και δεν σχετίζεται με το λυγισμό ολόκληρου του μέλους. Ανάλογα με τις παραμορφώσεις της διατομής, διακρίνονται δύο τέτοια είδη λυγισμού:

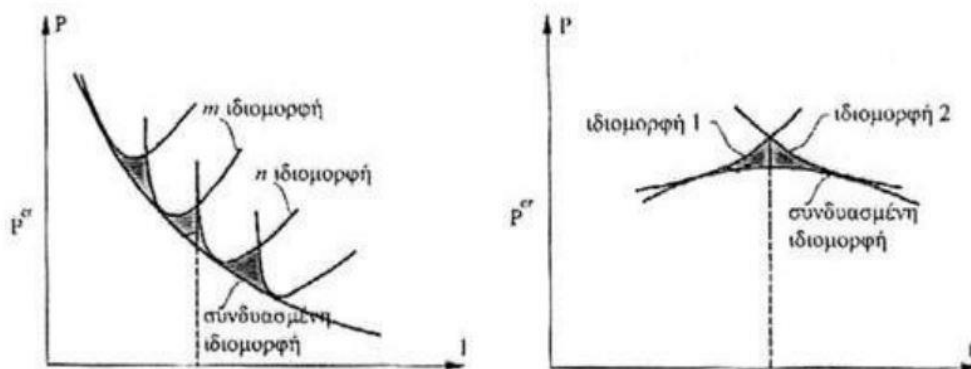
- Τοπικός λυγισμός (local buckling). Τα τοιχώματα της διατομής υπόκεινται σε πλακοειδείς παραμορφώσεις (κύρτωση). Το γενικό σχήμα της διατομής παραμένει αμετάβλητο, δεδομένου ότι οι εσωτερικές ακμές μένουν απαραμόρφωτες, αποτελώντας σημεία στήριξης των πλακοειδών στοιχείων. Κατ' εξαίρεση, οι εξωτερικές ακμές μπορούν να μετατοπίζονται. Ως ακμές ονομάζονται οι ευθείες τομές των επίπεδων στοιχείων της διατομής (πέλματα, κορμός, ενισχύσεις), αλλά και οι θέσεις των ενισχύσεων ενός τοιχώματος της διατομής.
- Λυγισμός με στρέβλωση της διατομής (distorsional buckling). Τα τοιχώματα της διατομής στρεβλώνονται, λόγω μετατοπίσεων των εσωτερικών ακμών. Ο τοπικός λυγισμός έχει μικρό μήκος κύματος, ίδιας τάξης μεγέθους με το πλάτος του στοιχείου. Έτσι, ο κίνδυνος τοπικού λυγισμού δεν εξαρτάται από το μήκος της ράβδου αλλά από, τα πολύ μικρότερα, πλάτη των τοιχωμάτων της διατομής. Καθοριστικά μήκη λυγισμού είναι λοιπόν τα πλάτη των στοιχείων, ως αποστάσεις των, αμετάθετων, ακμών της διατομής. Ο λυγισμός με στρέβλωση της διατομής έχει μεσαίο μήκος κύματος. Τα μήκη αυτά αντιπροσωπεύουν περίπου το μήκος λυγισμού δοκών επί ελαστικών στηρίξεων. Έτσι, ο κίνδυνος λυγισμού με στρέβλωση της διατομής εξαρτάται από τις σχέσεις δυσκαμψιών μεταξύ στηριγμάτων και στηριζόμενων στοιχείων.



Σχήμα 3.3: παραμορφώσεις διατομής λόγω α) Τοπικού λυγισμού και β), γ) λυγισμού με στρέβλωση της διατομής

Για περιορισμό του κινδύνου τοπικού λυγισμού η διατομή μπορεί να ενισχυθεί με ακραίες ή ενδιάμεσες ενισχύσεις, μορφής απλών ή διπλών αναδιπλώσεων. Έτσι όμως, ενώ μειώνεται ο κίνδυνος τοπικού λυγισμού, αυξάνεται ο κίνδυνος λυγισμού με στρέβλωση της διατομής, γιατί κάθε ενίσχυση προσθέτει ένα ενδιάμεσο κόμβο ο οποίος μπορεί με τη σειρά του να μετατοπισθεί προσθέτοντας έτσι μια νέα πιθανή μορφή λυγισμού. Επομένως, η σημασία του λυγισμού με στρέβλωση της διατομής αυξάνεται στις διατομές νέας γενιάς με πολλές νευρώσεις.

Είναι προφανές ότι κάθε εμφανιζόμενη αστάθεια οδηγεί σε μείωση της αντοχής. Γίνεται έτσι αντιληπτό ότι οι διάφορες αστάθειες αλληλοεπηρεάζονται. Μέσω της αλληλεπίδρασης, η οποία εξαρτάται εν μέρει από τις σχέσεις των μηκών των κυμάτων των διαφόρων ιδιομορφών λυγισμού, μπορούμε να έχουμε σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητας. Αν τα μήκη κύματος δύο συνδυασμένων ιδιομορφών είναι της ίδιας τάξης μεγέθους (όπως καμπτικός και στρεπτοκαμπτικός) η αλληλεπίδραση είναι ασθενής μέχρι μέτρια. Αν οι διαφορές είναι μεγάλες η αλληλεπίδραση είναι μέτρια μέχρι ισχυρή.



Σχήμα 3.4: Μείωση της φέρουσας ικανότητας λόγω αλληλεπίδρασης ασταθειών

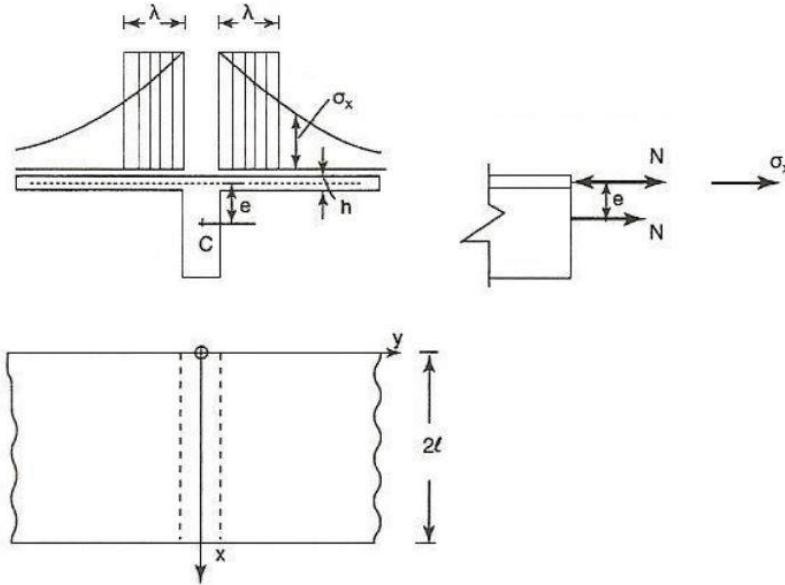
Τόσο ο στρεπτικός όσο και ο λυγισμός με στρέβλωση της διατομής αλληλοεπηρεάζονται με τον καθολικό λυγισμό. Το μέγεθος αλληλεπίδρασης χαρακτηρίζεται ως μεσαίο ή ισχυρό και οδηγεί σε μείωση των θεωρητικών κρίσιμων φορτίων ως και 30% με 50%.

Ο τοπικός λυγισμός μπορεί να λάβει χώρα σε μικρά φορτία, ταυτόχρονα με το λυγισμό με στρέβλωση της διατομής. Οι δύο μορφές λυγισμού μπορούν να αλληλοεπηρεάζονται, η μεταλυγισμική συμπεριφορά τους όμως είναι ευσταθής. Για το λόγο αυτό οι αντίστοιχες αντοχές αντιμετωπίζονται ξεχωριστά, ανεξάρτητα από την ταυτόχρονη ή μη εμφάνιση των δύο ασταθειών.

3.4 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΤΟΥ ΤΟΠΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ

Το φαινόμενο αυτό έχει εξετασθεί τόσο για τη λυγισμική όσο και για τη μεταλυγισμική συμπεριφορά των κατασκευών και για μεγάλη ποικιλία φορτίσεων. Για τη θεωρητική τεκμηρίωση του φαινομένου θα εξετάσουμε μία απειρομήκη συνεχή πλάκα με εδράσεις σε ίσες αποστάσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5. Όλα τα ανοίγματα φορτίζονται με τον

ίδιο τρόπο από ίσα φορτία, συμμετρικά ως προς τον Οx. Το πλάτος της πλάκας θεωρείται απείρως μεγάλο, ενώ το πάχος της h πολύ μικρό σε σχέση με αυτό της δοκού στηρίζεως.



Σχήμα 3.5: Απειρομήκης συνεχής πλάκα

Η τασική συνάρτηση που ικανοποιεί τις συνοριακές συνθήκες και την εξίσωση της πλάκας, τελικώς είναι η εξής:

$$\Phi = \sum_{n=1}^{\infty} [A_n * e^{-\frac{n\pi y}{l}} + B_n * (1 + \frac{n\pi y}{l}) * e^{-\frac{n\pi y}{l}}] * \cos \frac{n\pi y}{l} \quad (3.1)$$

Οι σταθερές A_n και B_n προσδιορίζονται από την συνθήκη που ορίζει ότι η πραγματική διανομή της εντάσεως θα είναι αυτή που ελαχιστοποιεί την συνολική παραγόμενη ενέργεια παραμορφώσεως. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}, \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}, \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial y \cdot \partial x} \quad (3.2)$$

Η ενέργεια παραμορφώσεως της πλάκας, δίνεται από τον τύπο:

$$E_1 = 2 \cdot \frac{h}{2E} \int_0^{\infty} \int_0^{2l} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2 \cdot \nu \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y + 2(1 + \nu)\tau_{xy}^2] dx \cdot dy \quad (3.3)$$

Η λόγω των (3.1) και (3.2) :

$$E_1 = 2h \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^3 \pi^3}{l^2} \left(\frac{B_n^2}{E} + \frac{A_n B_n}{2G} + \frac{A_n^2}{2G} \right) \quad (3.4)$$

Η συνολική ροπή κάμψεως που καλείται να παραλάβει η ενιαία διατομή της πλάκας και της δοκού μπορεί να παρασταθεί, για τον παρόντα συμμετρικό φορέα, από τον τύπο:

$$M = M_0 + M_1 \cdot \cos \frac{\pi x}{l} + M_2 \cdot \cos \frac{2\pi x}{l} + \dots \quad (3.5)$$

Έστω N η δύναμη που θλίβει την πλάκα και $M = M_w + M_f$ η συνολική ροπή που κατανέμεται στον κορμό (M_w) και στην πλάκα (M_f). Τότε θα έχουμε $M_f = N \cdot e$ και επομένως:

$$\left. \begin{aligned} N &= 2h \cdot \int_0^{\infty} \sigma_x dy = 0 \\ M &= 2h \cdot e \cdot \int_0^{\infty} \sigma_x dy = M \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Τότε η ενέργεια των εξωτερικών δυνάμεων θα είναι:

$$E_2 = \int_0^{2l} \frac{N^2 dx}{2AE} + \int_0^{2l} \frac{M_w^2 dx}{2EI} \quad (3.7)$$

Και το συνολικό έργο:

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\pi}{2hE} \sum_{n=1}^{\infty} n[Y_n^2 + (1 + \nu)X_n Y_n + (1 + \nu)X_n^2] + \frac{l}{2AE} \sum_{n=1}^{\infty} X_n^2 + \frac{M_o^2}{EI} + \frac{l}{2EI} \sum_{n=1}^{\infty} (M_n - eX_n)^2 \quad (3.8)$$

Όπου ετέθησαν : $X_n = 2h \cdot \frac{n\pi}{l} \cdot A_n$, $Y_n = 2h \cdot \frac{n\pi}{l} \cdot B_n$

Πρέπει : $\frac{\partial E}{\partial A_n} = \frac{\partial E}{\partial B_n} = 0$, από τις οποίες προσδιορίζουμε τα A_n , B_n .

A_n : $M = M_1 \cos \frac{\pi x}{l}$, εύκολα προσδιορίζουμε :

$$A_1 = \frac{lX_1}{2\pi h} , B_1 = -\frac{(1+\nu)lX_1}{2\pi h}$$

$$\Phi = [A_1 \cdot e^{-\frac{\pi y}{l}} + B_1(1 + \frac{\pi y}{l} \cdot e^{-\frac{\pi y}{l}})] \cdot \cos \frac{\pi y}{l}$$

Και η κατανομή της σ_x θα είναι αυτή του σχήματος 3.6

Έπειτα προσδιορίζουμε το πλάτος 2λ το οποίο θα απαιτείτο σε μια δοκό μορφής T, ώστε αν είχαμε ομοιόμορφη κατανομή της σ_x να λαμβάναμε την ίδια ροπή M_f . Ένα τέτοιο πλάτος 2λ , θα ήταν το ενεργό πλάτος της πλάκας. Έστω σ_c η τάση στο c , ενώ η ομοιόμορφη τάση στο μέσο επίπεδο της πλάκας είναι σ_l , τότε από τη στοιχειώδη θεωρία κάμψεως βρισκουμε:

$$\sigma_l = \sigma_c - \frac{M_w \cdot e}{I} , \quad 2l \cdot h \cdot \sigma_l + \sigma_c \cdot A = 0$$

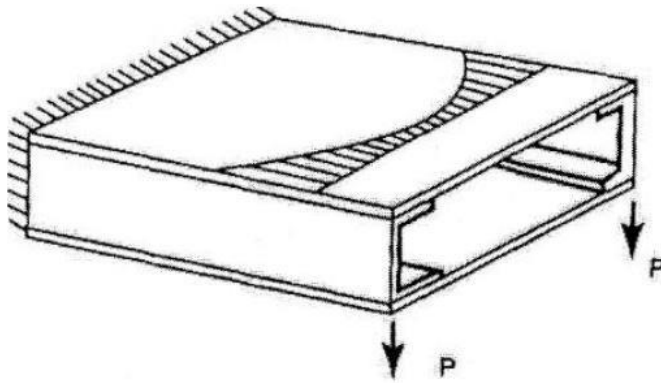
$$M_w = -\frac{I}{l} \left(1 + \frac{2\lambda h}{A}\right) \cdot \sigma_l , \quad M_f = -2\lambda h e \sigma_l$$

$$\text{Τελικώς : } 2\lambda = \frac{4l}{\pi(3+2\nu-\nu^2)} \quad (3.9)$$

$$\text{Για τον χάλυβα ισχύει } \nu=0,3, \text{ οπότε : } 2\lambda = 0,181(2l) \quad (3.10)$$

Δηλαδή, για το υποτιθέμενο διάγραμμα ροπής $M = M_1 \cdot \cos \frac{\pi x}{l}$, το ενεργό πλάτος της πλάκας είναι το 18% του ανοίγματος $2l$ αυτής. Με ανάλογο τρόπο μπορούν να επιλυθούν διάφορες περιπτώσεις φορέων για διάφορες φορτίσεις.

Ένα αντίστοιχο παράδειγμα είναι ο πρόβολος του σχήματος 3.6, ο οποίος φορτίζεται με δύο φορτία P . Η κατανομή των τάσεων φαίνεται στην άνω πλάκα έλασμα. Ο προσδιορισμός των τάσεων και αυτής της κατανομής δεν μπορεί να γίνει με την κλασσική ανάλυση. Αυτή η μετάβαση από την υποτιθέμενη μέχρι σήμερα ομοιόμορφη κατανομή της στοιχειώδους αναλύσεως στην πραγματική κατανομή, είναι γνωστή με τον όρο “shear lag”.



Σχήμα 3.6: Κατανομή των τάσεων στην άνω πλάκα έλασμα προβόλου

Η παραπάνω κοπιώδης μαθηματική επεξεργασία καταλήγει σε περίπλοκους τύπους δυσεφάρμοστους στην πράξη. Η κατανομή των τάσεων ακόμα και για την απλή περίπτωση μιας πλάκας, όπως αυτή του σχήματος, είναι μια τεταρτοβάθμια παραβολή. Παρατηρήθηκε όμως ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των τάσεων παραλαμβάνεται από το τμήμα της πλάκας που βρίσκεται κοντά στις στηρίξεις της. Είναι λοιπόν, δυνατό να θεωρηθεί με προσέγγιση και υπέρ της ασφαλείας, ότι η εξωτερική φόρτιση παραλαμβάνεται από μια ομοιόμορφη εσωτερική τάση, που είναι κατανεμημένη σε ένα πλάτος $b_{eff} \leq b$ το οποίο αποκαλούμε ενεργό πλάτος της διατομής.

Μια προσέγγιση του ενεργού πλάτους έδωσε ο Von Karman με τον τύπο :

$$\frac{b_{eff}}{b_p} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} \quad (3.11)$$

Ο Winter βελτίωσε τον παραπάνω τύπο, προβλέποντας και πιθανές γεωμετρικές ατέλειες:

$$\rho = \frac{b_{eff}}{b_p} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} * \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} \right) \quad (3.12)$$

Όπου σ_{cr} η κρίσιμος τάση λυγισμού (ή τάση δρόμου διακλαδώσεως)

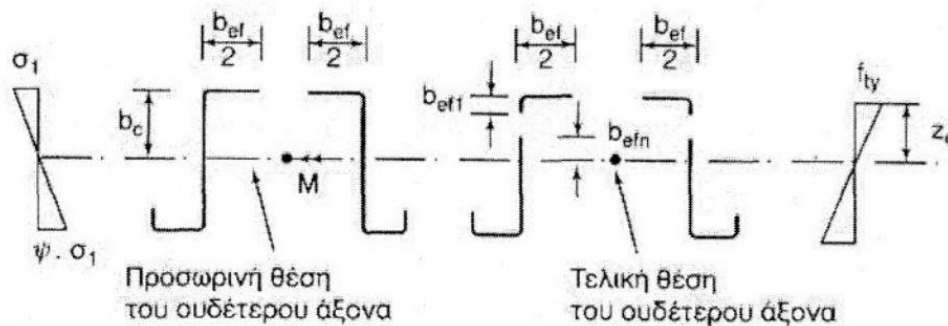
Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η σ_{cr} ,για την ίδια διατομή, είναι διαφορετική από φόρτιση σε φόρτιση. Κατά συνέπεια το ενεργό πλάτος b_{eff} της ίδιας διατομής, διαφέρει ανάλογα με την καταπόνηση στην οποία υπόκειται αυτή. Το ενεργό πλάτος έχει ως σκοπό, να προσδιορίσει τη λεγόμενη ενεργό διατομή. Όταν αναζητούμε τη φέρουσα ικανότητα και υπολογίζουμε το φορτίο αστοχίας ενός μέλους ψυχρής ελάσεως, το πρώτο βήμα είναι να προσδιορίσουμε το ενεργό πλάτος των θλιβόμενων στοιχείων μιας διατομής, βασιζόμενοι

στην κατανομή των τάσεων. Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τις γεωμετρικές ιδιότητες της ενεργού διατομής, λαμβάνοντας υπόψη τη μετατόπιση του ουδέτερου άξονα, λόγω των παραλειπόμενων τμημάτων της διατομής. Η τελική διαδικασία ελέγχου είναι η ίδια όπως και στα πρότυπα ελάσματα.

Η αντοχή μιας λεπτότοιχης ενεργού διατομής, έχει ως όριο την τάση διαρροής σε κάθε τμήμα της, αφού ο έλεγχος γίνεται με ελαστική ανάλυση. Η αλληλεπίδραση διάφορων φαινομένων, που προκαλεί διαξονικές καταπονήσεις, ελέγχεται όπως και στις διατομές ψυχρής ελάσεως. Αν το ελεγχόμενο μέλος δεν κινδυνεύει από λυγισμό, τότε η ροπή αντοχής δίνεται από τον τύπο:

$$R_M = \frac{W_{eff} \cdot f_y}{\gamma_M} \quad \text{όπου } W_{eff} \text{ είναι η ροπή αντιστάσεως της ενεργού διατομής.}$$

Για την αποφυγή μιας κοπιώδους επαναληπτικής διαδικασίας κατά τον προσδιορισμό της ενεργού διατομής, τα ενεργά τμήματα του κορμού μπορούν να υπολογισθούν από το λόγο $X = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$, θεωρώντας διατομή με ελαττωμένο θλιβόμενο πέλμα (ενεργό), αλλά κορμό πλήρως ενεργό.



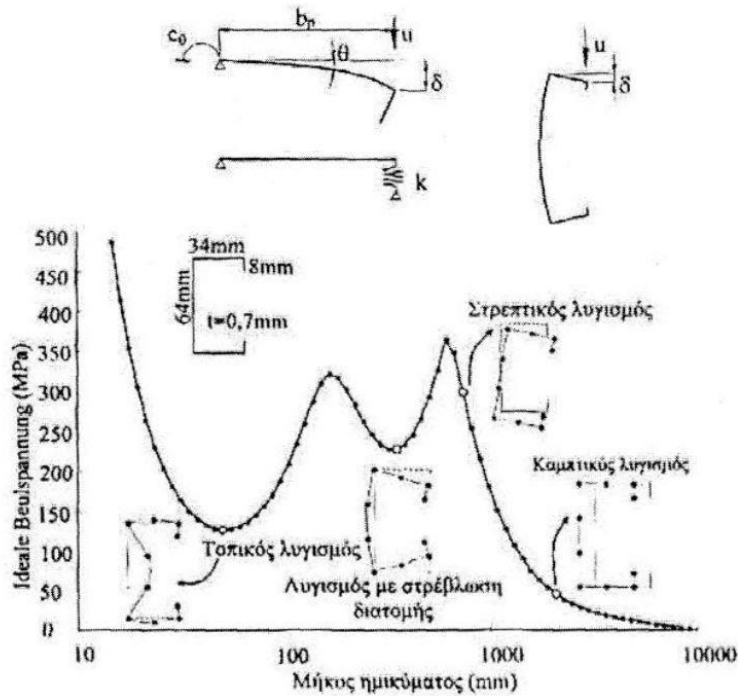
Σχήμα 3.7: Αλλαγή θέσης ουδέτερου άξονα στην ενεργό διατομή

3.5 ΚΥΡΤΩΣΗ ΜΕ ΣΤΡΕΒΛΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Συγκριτικά με τον τοπικό λυγισμό, η κύρτωση με στρέβλωση διατομής είναι μια πιο σύνθετη μορφή αστάθειας. Πλέον η μορφή της διατομής δεν διατηρείται διότι παραμορφώνονται οι ακμές της διατομής. Η συγκεκριμένη μορφή αστάθειας αφορά τις διατομές με ελαστικά στηριζόμενα άκρα ή ενισχύσεις.

Η κύρτωση με στρέβλωση της διατομής αξονικά θλιβόμενων μελών διατομής U, εξαρτάται από τη στροφική δυσκαμψία της τομής κορμού-πέλματος. Πλατύτεροι κορμοί είναι πιο εύκαμπτοι και προσφέρουν μικρότερη δυσκαμψία, έτσι ώστε να είναι πιθανότερη η εμφάνιση παραμορφώσεων της διατομής. Αν το πέλμα είναι στενό, εμφανίζεται τοπικός λυγισμός στον κορμό με όμοια μήκη κύματος, όπως στο πέλμα, κάτι που οδηγεί σε μικρές

τάσεις κύρτωσης. Αν το πέλμα είναι πολύ πλατύ τότε το κύριο μέλημά μας είναι η στήριξη του με ενισχύσεις. Πλατύτερες ενισχύσεις στηρίζουν καλύτερα τα πέλματα αλλά είναι οι ίδιες ευαίσθητες έναντι τοπικού λυγισμού. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.8, το μήκος κύματος για κύρτωση με στρέβλωση διατομής βρίσκεται μεταξύ του μήκους κύματος του τοπικού και του καθολικού λυγισμού.



Σχήμα 3.8: Μήκη ημικυμάτων για διάφορες μορφές ελαστικής αστάθειας θλιβόμενου υποστυλώματος διατομής U

3.6 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ C

3.6.1 Παραδοχές

Σύμφωνα με τον EN 1993-1-3 κατά την περιγραφή διατομών οι οποίες υπόκεινται σε τοπικό ή με στρέβλωση λυγισμό, λαμβάνουμε υπόψη τα παρακάτω:

- Η επίδραση του τοπικού λυγισμού και του λυγισμού με στρέβλωση διατομής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον προσδιορισμό της αντοχής και δυσκαμψίας μελών και φύλλων ψυχρής ελάσεως.
- Η επίδραση του τοπικού λυγισμού μπορεί να λαμβάνεται υπόψη χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της ενεργού διατομής, οι οποίες στηρίζονται στα ενεργά πλάτη.

- Η πιθανή μετατόπιση του κέντρου βάρους της ενεργού διατομής ως προς την πλήρη, λαμβάνεται υπόψη.
- Στον υπολογισμό της αντοχής έναντι τοπικού λυγισμού, το όριο διαρροής πρέπει να λαμβάνεται ίσο με το όριο διαρροής του βασικού υλικού όταν υπολογίζονται τα ενεργά πλάτη θλιβόμενων στοιχείων.
- Για ελέγχους σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας το ενεργό πλάτος ενός θλιβόμενου στοιχείου οφείλει να βασίζεται στη θλιπτική τάση $\sigma_{com,Ed,ser}$ του στοιχείου, υπό τα φορτία σε κατάσταση λειτουργίας.
- Ο λυγισμός με στρέβλωση της διατομής λαμβάνεται υπόψη αν αποτελεί τον κρίσιμο μηχανισμό αστοχίας.

3.6.2 Επίπεδα στοιχεία χωρίς ενισχύσεις

Η κρίσιμη τάση λυγισμού δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{cr} = \left(\frac{\pi t^2}{b_p} \right) \cdot \frac{EK_\sigma}{12(1 - \nu^2)} \quad (3.13)$$

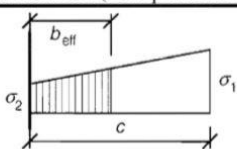
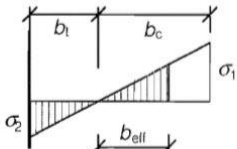
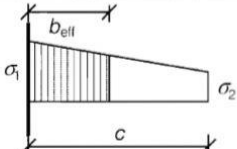
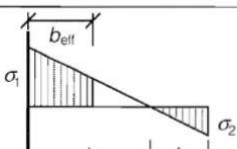
Όπου:

- b_p το θεωρητικό πλάτος
- t το πάχος της πλάκας
- ν το μέτρο Poisson
- K_σ ο αντίστοιχος συντελεστής κυρτώσεως, από τους πίνακες 3.1 και 3.2

Πίνακας 3.1: Εσωτερικά θλιβόμενα στοιχεία

Stress distribution (compression positive)		Effective ^D width b_{eff}				
		$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,5 b_{eff}$				
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff} \quad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$				
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,6 b_{eff}$				
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$\frac{AC1}{AC1} - 1 > \psi \geq -3 \frac{AC1}{AC1}$
Buckling factor k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Πίνακας 3.2: Προεξέχοντα θλιβόμενα στοιχεία

Stress distribution (compression positive)		Effective ^p width b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Buckling factor k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Buckling factor k_σ	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	

Η ανοιγμένη λυγηρότητα υπολογίζεται από τη σχέση: $\lambda_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b_p/t}{28,4 \cdot \epsilon \cdot \sqrt{K_\sigma}}$ (3.14)

Ο μειωτικός συντελεστής υπολογίζεται ως εξής:

- Για εσωτερικά θλιβόμενα στοιχεία:

$$\rho = 1,0 \quad \text{εάν } \lambda_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi}$$

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0,055(\epsilon + \psi)}{\lambda_p^2} \leq 1,0 \quad \text{εάν } \lambda_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} \quad (3.15)$$

- Για προεξέχοντα θλιβόμενα στοιχεία:

$$\rho = 1,0 \quad \text{εάν } \lambda_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0,188}{\lambda_p^2} \leq 1,0 \quad \text{εάν } \lambda_p > 0,748 \quad (3.16)$$

$$\text{Όπου: } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y \left[\frac{N}{mm^2} \right]}} \quad (3.17)$$

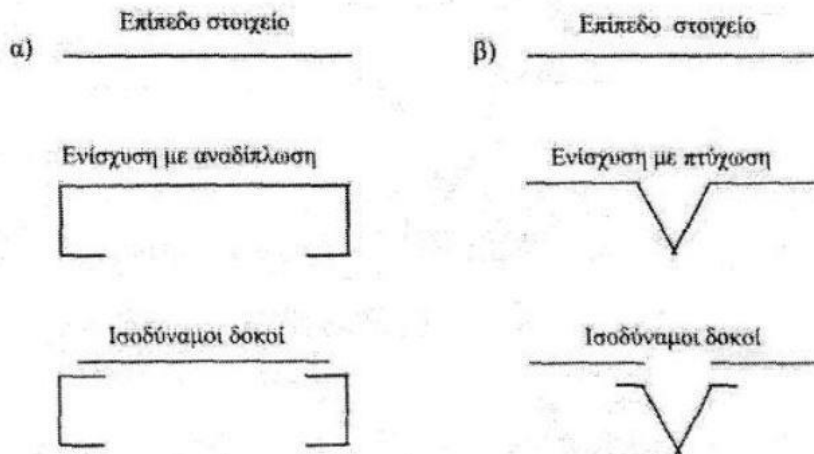
Στη συνέχεια υπολογίζω το ενεργό πλάτος be_{eff} σύμφωνα με τους πίνακες 3.1 και 3.2 και το ισοκατανέμω σε be_1 & be_2 αντίστοιχα. Το αντίστοιχο ενεργό εμβαδόν το εν λόγω στοιχείου που εξετάζω προκύπτει από τον τύπο:

$$A_{eff} = \rho \cdot A_c \quad (3.18)$$

3.6.3 Επίπεδα στοιχεία με ενισχύσεις

3.6.3.1 Γενικά

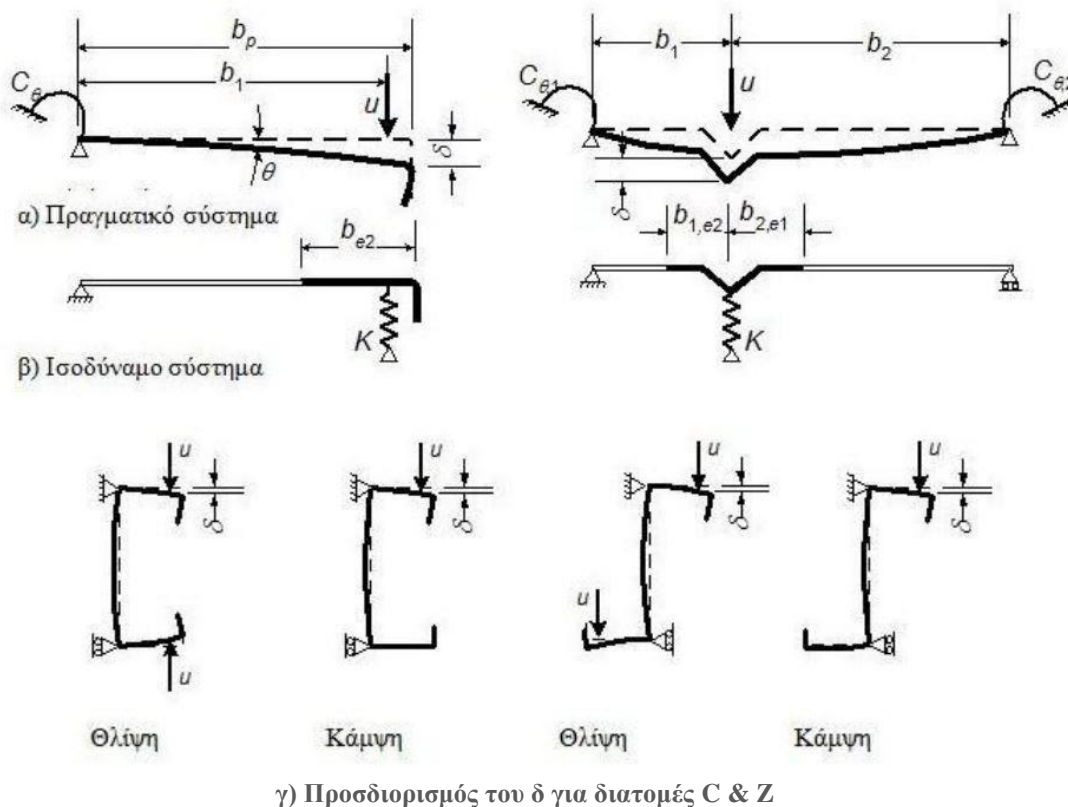
Οι ενισχύσεις ενός επίπεδου στοιχείου, μπορεί να βρίσκονται στα άκρα του ή να είναι ενδιάμεσες. Ο σκοπός των ενισχύσεων είναι η αύξηση της δυσκαμψίας των επίπεδων πλατεών στοιχείων με την επιχειρούμενη μείωση του επίπεδου πλάτους του στοιχείου. Οι ενισχύσεις αυτές, που έχουν μορφή αναδιπλώσεως ή πτυχώματος όπως φαίνονται στο σχήμα 3.9 προσδίδουν έντονη τοπική ακαμψία, ώστε σε σχέση με το απομένον επίπεδο τμήμα του ελάσματος, να μπορούν να θεωρηθούν δοκοί, επί των οποίων στηρίζεται το υπόλοιπο του επίπεδου ελάσματος.



Σχήμα 3.9: Ισοδύναμες δοκοί με ενισχυμένες διατομές

Η έντονη τοπική ακαμψία που προσδίδει μια ενίσχυση επιτρέπει σε αυτή να θεωρείται ως δοκός επάνω στην οποία εδράζεται το υπόλοιπο επίπεδο έλασμα. Σύμφωνα με τον EN1993-1-3, ο έλεγχος ενισχυμένων θλιβόμενων στοιχείων βασίζεται στην παραδοχή ότι η ενίσχυση λειτουργεί σαν θλιβόμενο μέλος με συνεχή μερική δέσμευση, στα σημεία επαφής του με τα επίπεδα μέρη και με ακαμψία ελατηρίου η οποία εξαρτάται από τις συνοριακές συνθήκες, αλλά και την δυσκαμψία του γειτονικού επίπεδου στοιχείου. Με αυτό τον τρόπο υιοθετούμε απλά μοντέλα σχεδιασμού, όπου τα ενισχυτικά ακαμψίας και τα προσκείμενα σε αυτά τμήματα των επίπεδων στοιχείων, θεωρούνται ως δοκοί επί

ελαστικών βάσεων. Η τιμή της σταθεράς ελατηρίου εξαρτάται από τις συνοριακές συνθήκες και τη δυσκαμψία του γειτονικού στοιχείου της διατομής.



γ) Προσδιορισμός του δ για διατομές C & Z

Σχήμα 3.10: Ακαμψία ελατηρίου

Άρα, ο μηχανισμός και το φορτίο λυγισμού, εξαρτώνται από την ενεργό διατομή και την ακαμψία που προσδίδει η ενίσχυση. Εάν η ενίσχυση διαθέτει επαρκή ακαμψία, θεωρείται ως άκαμπτη στήριξη για το επίπεδο στοιχείο.

Όπως είναι γνωστό, η σταθερά του ισοδύναμου ελατηρίου για μια ενίσχυση προσδιορίζεται από την υποχώρηση που εμφανίζεται κατά την εφαρμογή μοναδιαίου φορτίου u ανά μονάδα μήκους :

$$K = \frac{u}{\delta} \quad (3.18)$$

Όπου K η σταθερά του ισοδύναμου ελατηρίου και δ η μετακίνηση της ενίσχυσης λόγω επιβολής του μοναδιαίου φορτίου, το οποίο ασκείται στο κέντρο βάρους της ενεργού διατομής.

Κατά τον καθορισμό των τιμών για τις στρωφικές σταθερές του ελατηρίου C_θ , $C_{\theta 1}$ και $C_{\theta 2}$ από τη γεωμετρία της διατομής, είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψη τυχόν άλλες ενισχύσεις που συνεισφέρουν στη θλίψη. Στην περίπτωση μιας ακραίας ενίσχυσης το βέλος δ υπολογίζεται ως εξής:

$$\delta = \theta b_p + \frac{ub_p^3}{3} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3} \quad \text{με} \quad \theta = \frac{ub_p}{C_\theta} \quad (3.19)$$

Όταν πρόκειται για σταθερά ελατηρίου σε διατομές C και Z γίνεται εφαρμογή μοναδιαίας δύναμης όπως διακρίνεται στο σχήμα 3.10(γ). η σχέση που εκφράζει τη σταθερά ελατηρίου K_1 του πέλματος 1 έχει ως εξής:

$$K_1 = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0,5b_1 b_2 h_w k_f} \quad (3.20)$$

Όπου:

- b1 η απόσταση από το σημείο τομής κορμού – πέλματος ως το κέντρο βάρους της ενεργού διατομής της ακραίας ενίσχυσης του πέλματος 1 (συμπεριλαμβανομένου του ενεργού τμήματος b_{e2} του πέλματος)
- b2 η απόσταση από το σημείο τομής κορμού – πέλματος ως το κέντρο βάρους της ενεργού διατομής της ακραίας ενίσχυσης του πέλματος 2 (συμπεριλαμβανομένου του ενεργού τμήματος του πέλματος).
- h_w το ύψος του κορμού
- $k_f=0$ πέλημα 2 είναι σε εφελκυσμό (π.χ. για δοκούς υπό κάμψη περί τον άξονα y-y) & $k_f = \frac{A_{eff2}}{A_{eff1}}$ εάν το πέλημα 2 είναι σε θλίψη.
- A_{eff1} & A_{eff2} τα ενεργά πλάτη των ακραίων ενισχύσεων των πελμάτων 1 και 2 Αντίστοιχα.

Για την περίπτωση ενδιάμεσων ενισχύσεων, είναι δυνατόν να εξισωθούν οι σταθερές των στρωφικών ελατηρίων με την τιμή μηδέν ώστε να έχουμε και μια συντηρητική εκτίμηση.

Ο μειωτικός συντελεστής χ_d για τον υπολογισμό της αντοχής σε λυγισμό με στρέβλωση πρέπει να υπολογίζεται από τη σχετική λυγηρότητα λ_d ως εξής :

$$\begin{aligned} \chi_d &= 1,0 && \text{εάν } \lambda_d \leq 0,65 \\ \chi_d &= 1,47 - 0,723 \lambda_d && \text{εάν } 0,65 < \lambda_d < 1,38 \\ \chi_d &= \frac{0,66}{\lambda_d} && \text{εάν } \lambda_d \geq 1,38 \end{aligned}$$

Όπου:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}} \quad (\sigma_{cr,s} \text{ είναι η ελαστική τάση λυγισμού της ενίσχυσης})$$

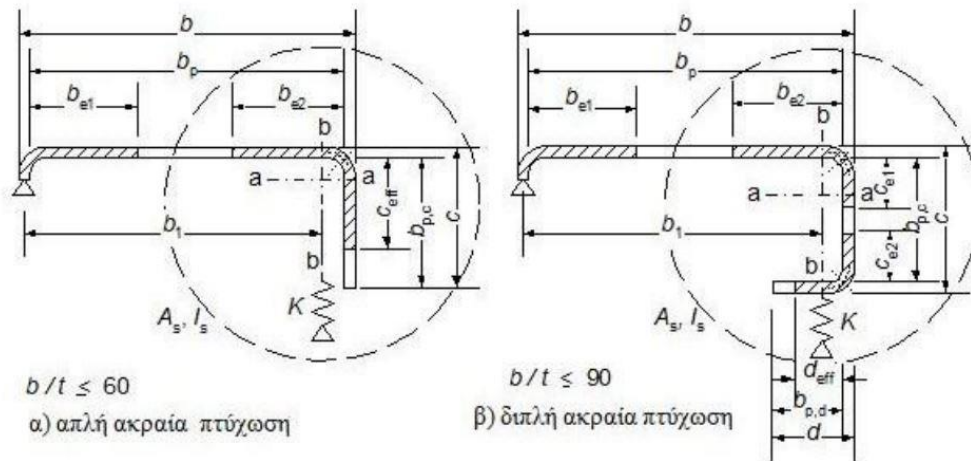
3.6.3.2 Ακραίες ενισχύσεις

Μια ακραία ενίσχυση είναι δυνατόν να προέρχεται από απλή ή διπλή αναδίπλωση (απλό ή διπλό στραντζάρισμα), όπως φαίνεται στο σχήμα. Η ακραία ενίσχυση αγνοείται στον υπολογισμό για τον καθορισμό της αντοχής του επίπεδου στοιχείου στο οποίο είναι συνδεδεμένη εάν δεν προσφέρει στήριξη σε αυτό. Η διατομή μιας ακραίας ενίσχυσης πρέπει να θεωρείται ότι αποτελείται από τα ενεργά τμήματα της ενίσχυσης, στοιχείο c ή στοιχεία c και d (Σχήμα 3.13), και το ενεργό τμήμα του γειτονικού πλακοειδούς στοιχείου b_p .

Οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται προκειμένου να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της ενίσχυσης είναι οι εξής:

- 1) Για το λόγο του πλάτους της ενίσχυσης c με το πλάτος του πέλματος b_p πρέπει να ισχύει: $0,2 < c/b_p < 0,6$ όπου c και b_p φαίνονται στο σχήμα .
- 2) Ο λόγος $b_p/t \leq 60$ για απλή στραντζαριστή ενίσχυση και $b_p/t \leq 90$ για διπλή στραντζαριστή ενίσχυση.
- 3) Για το λόγο του πλάτους της ενίσχυσης c με το πάχος t πρέπει να ισχύει: $c/t < 50$ για απλή στραντζαριστή ενίσχυση και $c/t < 60$ για διπλή στραντζαριστή ενίσχυση.

Αν ικανοποιούνται όλα τα παραπάνω κριτήρια, η επιρροή της ενίσχυσης λαμβάνεται υπόψη. Για τον υπολογισμό των ενεργών περιοχών των ενισχύσεων ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία.



Σχήμα 3.11: Ακραίες ενισχύσεις

Προσδιορίζεται μια αρχική ενεργός διατομή της ενίσχυσης, με ενεργά πλάτη προσδιοριζόμενα με την παραδοχή ότι η ενίσχυση παρέχει πλήρη εξασφάλιση και είναι $\sigma_{com,Ed} = f_y/\gamma_{m0}$. Συγκεκριμένα θεωρούμε ότι το επίπεδο στοιχείο b_p του Σχήματος 3.9 είναι αμφίπλευρα στηριζόμενο και σύμφωνα με την παράγραφο 3.6.2 προσδιορίζονται οι αρχικές τιμές b_{e1} και b_{e2} . Οι αρχικές τιμές των c_{eff} και d_{eff} υπολογίζονται:

- Για απλή ακραία πτυχωτή ενίσχυση:

$$c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c} \quad (3.21)$$

Όπου το ρ υπολογίζεται όπως στην παράγραφο 3.6.2, αλλά ο συντελεστής K_σ προσδιορίζεται ως εξής:

- Εάν $\frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0,35$, τότε $K_\sigma = 0.5$
- Εάν $0,35 \leq \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0,6$, τότε $K_\sigma = 0,5 + 0,83 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{b_{p,c}}{b_p} - 0,35\right)^2}$ (3.21)

- Για διπλή ακραία ενίσχυση:

$$c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c} \quad (3.22)$$

Όπου το ρ υπολογίζεται όπως στην παράγραφο 3.6.2 και ο συντελεστής K_σ προσδιορίζεται για εσωτερικό θλιβόμενο στοιχείο (πίνακας 3.2).

$$d_{eff} = \rho \cdot b_{p,d} \quad (3.23)$$

Όπου το ρ υπολογίζεται όπως στην παράγραφο 3.6.2 και ο συντελεστής K_σ προσδιορίζεται για εσωτερικό θλιβόμενο στοιχείο (πίνακας 3.2).

Η προηγουμένως προσδιορισθείσα ενεργός διατομή της ενίσχυσης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μειωτικού συντελεστή σε λυγισμό με στρέβλωση, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της συνεχούς ελαστικής δέσμευσης. Το εμβαδόν της ενεργού διατομής μιας ακραίας ενίσχυσης A_s είναι ίσο με:

$$A_s = t \cdot (b_{e2} + c_{eff}) \quad \text{ή} \quad (3.24)$$

$$A_s = t \cdot (b_{e2} + c_{e1} + c_{e2} + d_{eff}) \quad (3.25)$$

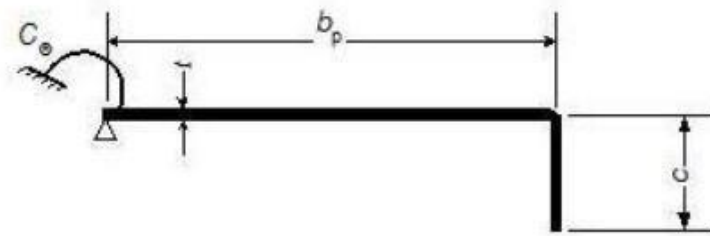
Η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού $\sigma_{cr,s}$ μιας ακραίας ενίσχυσης υπολογίζεται για τη δοκό επί ελαστικής βάσης από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} \quad (3.26)$$

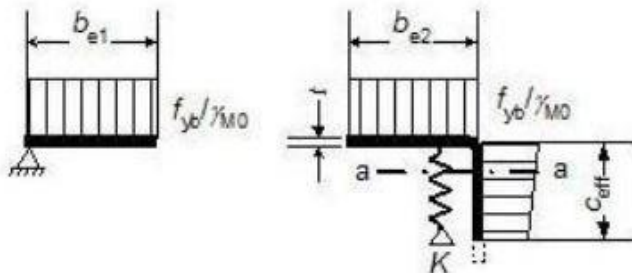
Όπου :

- K η σταθερά του ελατηρίου ανά μονάδα μήκους
- I_s η ροπή αδράνειας της ενεργού διατομής της ενίσχυσης, που υπολογίζεται ως αυτή της ενεργού επιφάνειας A_s , ως προς τον κεντροβαρικό άξονα a-a της ενεργού διατομής.

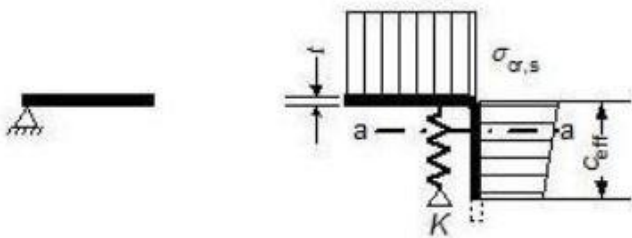
Ο μειωτικός συντελεστής χ_1 για λυγισμό της ενίσχυσης προσδιορίζεται με τη μέθοδο που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.6.3.1 και διορθώνεται σταδιακά με επαναληπτική διαδικασία. Ο συντελεστής χ_2 προσδιορίζεται επαναλαμβάνοντας τα παρακάτω βήματα, αν στη θέση της θλιβόμενης τάσης $\sigma_{com,Ed}$ χρησιμοποιηθεί η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού $\sigma_{cr,s}$.



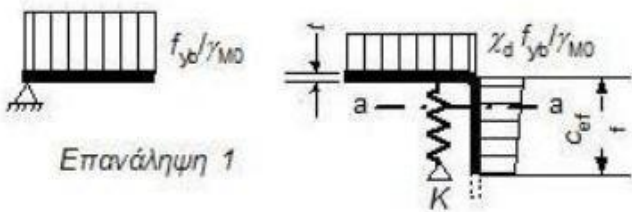
α) Πλήρης διατομής και συνοριακές συνθήκες



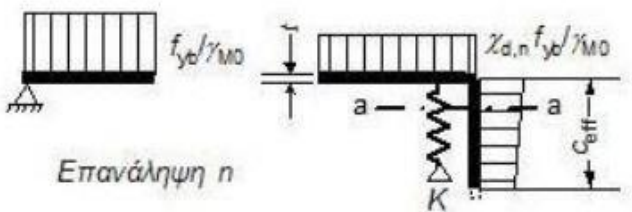
β) i) Ενεργός διατομή για $K=\infty$ με βάση τη $\sigma_{com,Ed} = f_y/\gamma_{M0}$



γ) i) Ελαστική κρίσιμη τάση για την ενεργό διατομή της ενίσχυσης A_s , από το βήμα 1



δ) Απομειωμένη αντοχή $\chi_d * f_{yb}/\gamma_{M0}$ της ενεργού διατομής της ενίσχυσης A_s με τον μειωτικό συντελεστή χ_d που προκύπτει από την $\sigma_{cr,s}$



ε) iii) Προαιρετικά επαναλαμβάνεται το βήμα 1 υπολογίζοντας το ενεργό πλάτος με μειωμένη θλιπτική τάση $\sigma_{com,Ed,I} = \chi_d * f_yb/\gamma_{M0}$ με το χ_d της προηγούμενης επανάληψης συνεχίζοντας μέχρις ότου $\chi_{d,n} \approx \chi_{d,(n-1)}$ αλλά $\chi_{d,n} \leq \chi_{d,(n-1)}$.

Σχήμα 3.12: Θλιπτική αντοχή πέλματος με ακραία ενίσχυση

Γενικά για την εφαρμογή της γενικής μεθόδου, θα πρέπει να έχουμε υπόψη τα παρακάτω:

- Εάν $\chi < 1$, η επανάληψη μπορεί να ξεκινήσει με τροποποίηση των τιμών του ρ , χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.), αλλά :

$$\sigma_{cr} = X \frac{f_{yb}}{\gamma_M} \quad \text{οπότε έχουμε } \lambda_{p,red} = \lambda_p \sqrt{X} \quad (3.27)$$

- Η μειωμένη ενεργός διατομή της ενίσχυσης $A_{s,red}$ λόγω λυγισμού πρέπει να υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \left(\frac{\frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}}}{\sigma_{com,Ed}} \right), \text{ αλλά } A_{s,red} \leq A_s \quad (3.28)$$

Όπου σ η θλιπτική τάση στο κέντρο βάρους της ενίσχυσης υπολογιζόμενη με βάση την ενεργό διατομή.

Στον υπολογισμό των ιδιοτήτων της ενεργού διατομής η μειωμένη ενεργός επιφάνεια $A_{s,red}$ ορίζεται θεωρώντας μειωμένο πάχος t_{red} για όλα τα στοιχεία της επιφάνειας A_s .

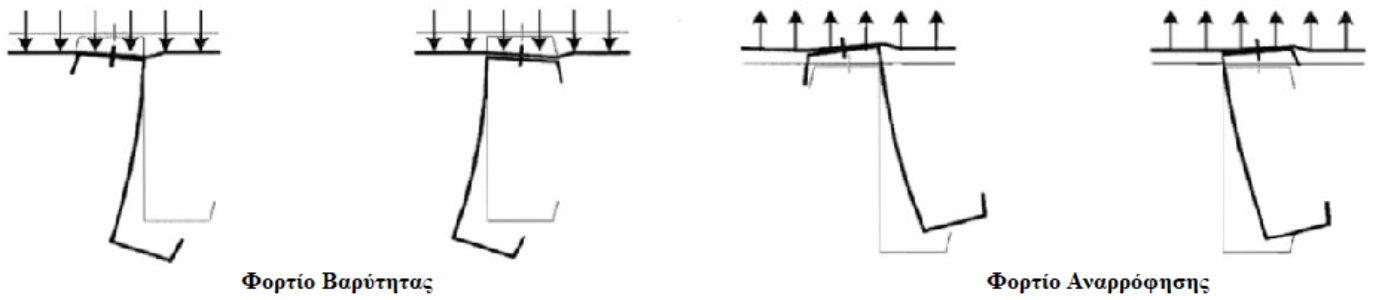
$$t_{red} = t \frac{A_{s,red}}{A_s} \quad (3.29)$$

Οι ιδιότητες της ενεργού διατομής στην οριακή κατάσταση λειτουργίας θα υπολογίζονται με το πάχος σχεδιασμού t .

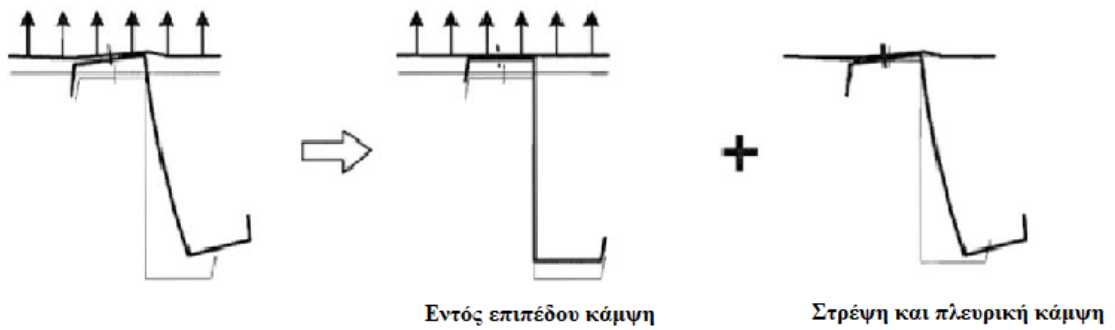
3.7 ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΕΓΙΔΑΣ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΔΟΦΥΛΛΟΥ

3.7.1 Γενικά

Στις περιπτώσεις όπου η τεγίδα συνδέεται με το χαλυβδόφυλλο, υπάρχουν παραπάνω μεγέθη που επιδρούν στον τελικό έλεγχο αντοχής της. Συγκεκριμένα το χαλυβδόφυλλο δεσμεύει και συγκρατεί την τεγίδα, προσφέρει μια εν μέρη στροφική ακαμψία, η οποία αναπαρίσταται από ένα στροφικό ελατήριο με στροφική ακαμψία C_D . Η πλευρική ένταση στο ελεύθερο πέλμα, που δεν συνδέεται άμεσα με το χαλυβδόφυλλο, πρέπει επίσης να υπολογίζεται με υπέρθεση των επιδράσεων των εντός επιπέδου καμπτικών και στρεπτικών ροπών, συμπεριλαμβανομένου της πλευρικής καμπτικής έντασης λόγω παραμόρφωσης της διατομής, τα μοντέλα αναπαράστασης φαίνονται στα σχήματα 3.11.α) & β).

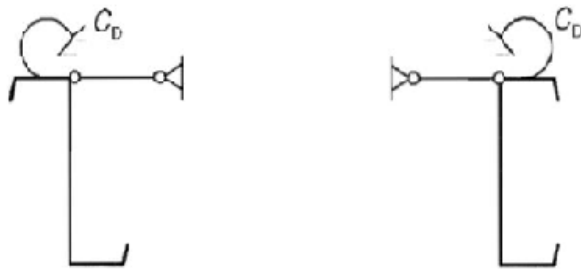


α) Διατομές τεγίδων C & Z με το άνω πέλμα συνδεδεμένο με την επικάλυψη

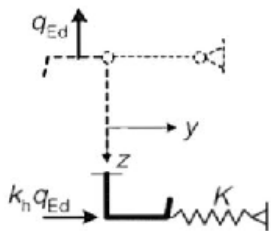


β) Τελική παραμόρφωση χωρισμένη σε δυο μέρη

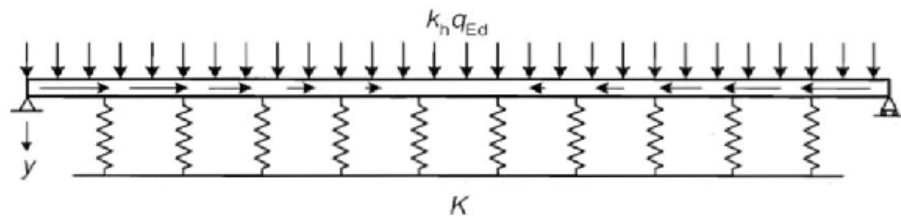
Σχήμα 3.11.α): Μοντέλο πλευρικά εξασφαλισμένης τεγίδας στροφικά περιορισμένης λόγω επικάλυψης



α) Μοντέλο τεγίδας πλευρικά εξασφαλισμένης με στροφικό ελατήριο ακαμψίας CD λόγω επικάλυψης



β) Απλοποιητικά αντικαθιστούμε το στροφικό ελατήριο ακαμψίας CD με ένα πλευρικό ελατήριο ακαμψίας K



γ) Ελεύθερο πέλμα τεγίδας μοντελοποιημένο σαν δοκός με ελαστικές στηρίξεις. Μοντέλο που αναπαριστά την επίδραση της στρέψης και της πλευρικής κάμψης (συμπεριλαμβανομένου της παραμορφωσης της διατομής) σε αμφιέριστο σύστημα με φορτίο αναρρόφησης

Σχήμα 3.12.β): Μοντέλο πλευρικά εξασφαλισμένης τεγίδας στροφικά περιορισμένης λόγω επικάλυψης

3.7.2 Αντοχή σχεδιασμού διατομής

Για τεγίδες που υποβάλλονται σε αξονικές δυνάμεις και εγκάρσια φορτία η αντίσταση της διατομής θα πρέπει να επιβεβαιώνεται όπως υποδεικνύεται στο σχήμα 3.13 υπερθέτοντας τις εντάσεις που δημιουργούνται εξαιτίας:

- Της εντός επιπέδου καμπτικής ροπής $M_{y,Ed}$
- Της αξονικής δύναμης N_{ed}
- Ένα ισοδύναμο φορτίο $q_{h,Ed}$ που ασκείται στο ελεύθερο πέλμα, λόγω στρέψης και πλευρικής κάμψης

Οι μέγιστες τάσεις που ασκούνται στην διατομή θα πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες εξισώσεις:

- Δεσμευμένο πέλμα:

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.30)$$

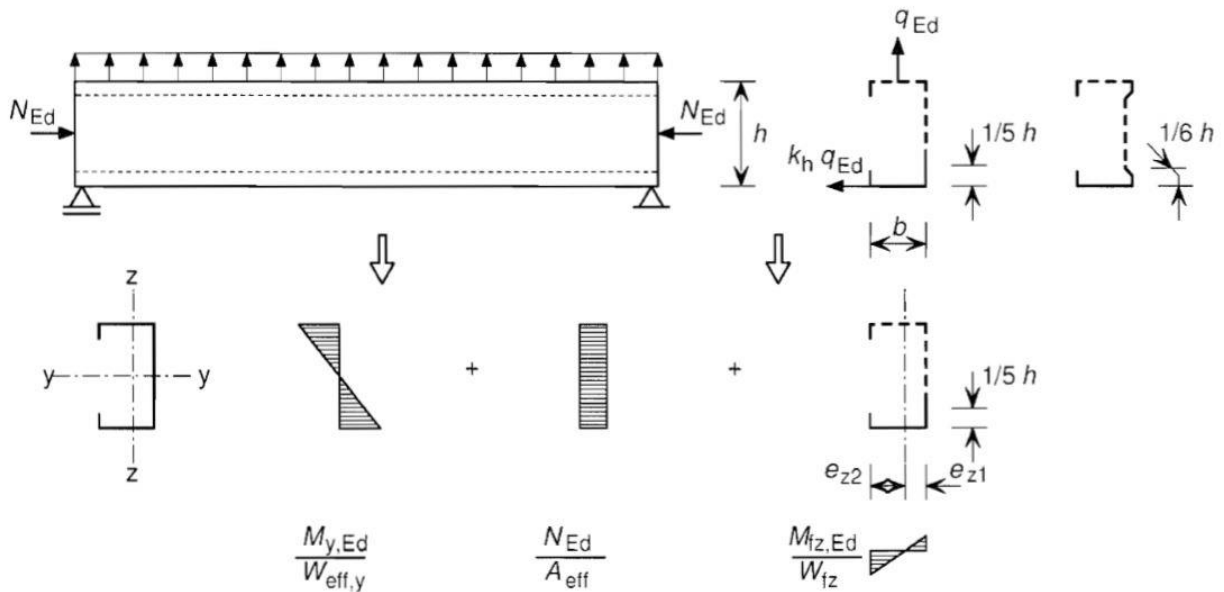
- Ελεύθερο πέλμα:

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.31)$$

Όπου:

- A_{eff} το εμβαδόν της ενεργού διατομής όταν υπόκεινται σε μονοαξονική θλίψη
- f_y η τάση διαρροής
- $M_{fz,Ed}$ η καμπτική ροπή στο ελεύθερο πέλμα λόγω πλευρικού φορτίου $q_{h,Ed}$
- $W_{eff,y}$ η ενεργός ροπή αντίστασης της διατομής για κάμψη μόνο υπό τον άξονα y-y
- W_{fz} η ελαστική ροπή αντίστασης ολόκληρου του ελεύθερου πέλματος, συν το 1/5 του ύψους του κορμού της διατομής που συνεισφέρει στην κάμψη περί του άξονα z-z για διατομή C, ενώ για διατομή Z αντίστοιχα το 1/6 του ύψους του κορμού

και $\gamma_M = \gamma_{M0}$ εάν $A_{eff} = A_g$ ή $W_{eff,y} = W_{el,y}$ και $N_{ed} = 0$, διαφορετικά $\gamma_M = \gamma_{M1}$

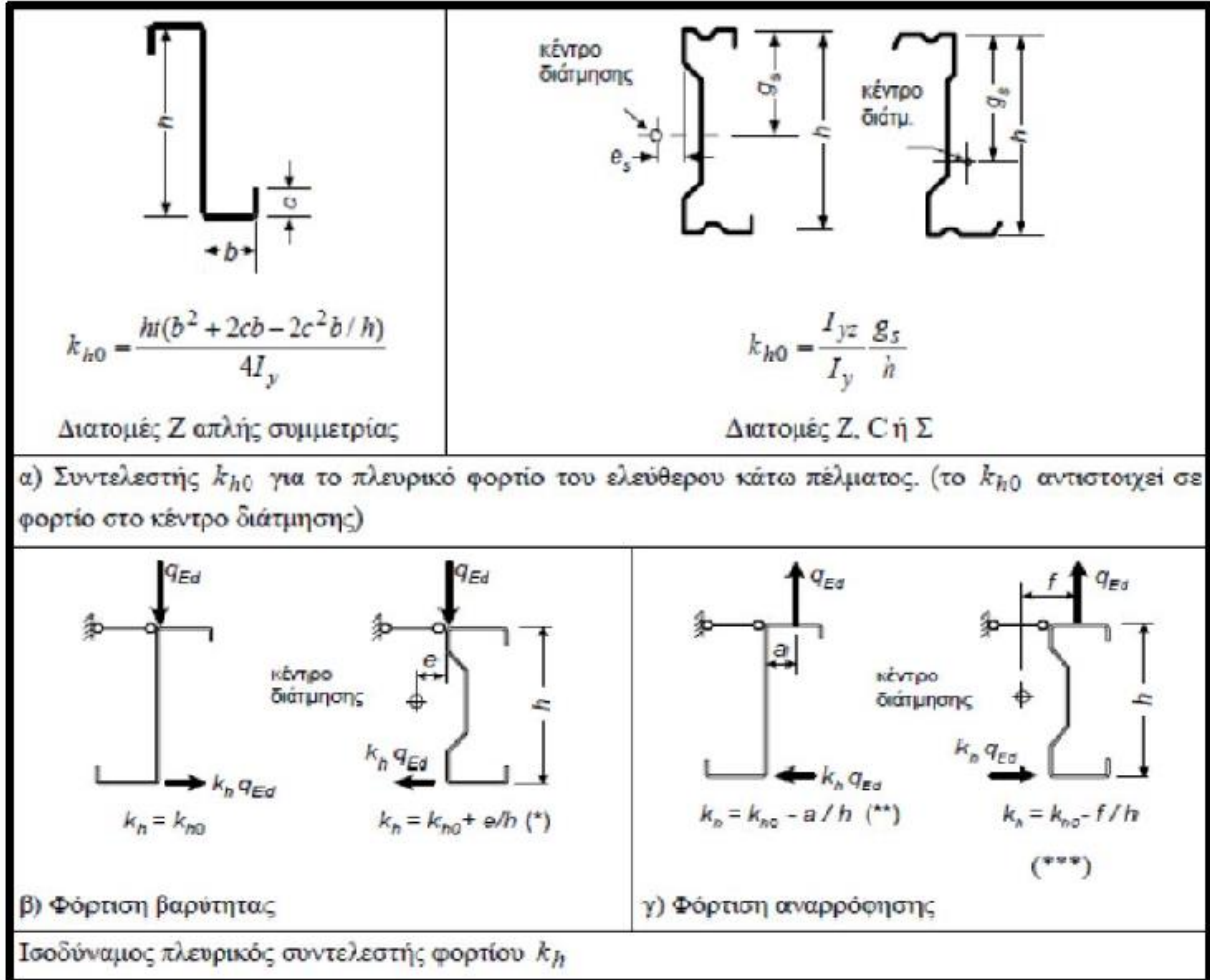


Σχήμα 3.13: Υπέρθηση των τάσεων

Το ισοδύναμο πλευρικό φορτίο $q_{h,Ed}$ που ασκείται στο ελεύθερο πέλμα, λόγω στρέψης και πλευρικής κάμψης υπολογίζεται ως εξής:

$$q_{h,Ed} = k_h \cdot q_{Ed} \quad (3.32)$$

Όπου ο συντελεστής k_h υπολογίζεται με βάση το σχήμα 3.14



Σχήμα 3.14: Μετατροπή της στρέψης και της πλευρικής κάμψης σε ισοδύναμο φορτίο $k_h \cdot q_{Ed}$

Η πλευρική καμπτική ροπή $M_{fz,Ed}$ μπορεί γενικά να υπολογίζεται από τον τύπο 3.33, εκτός από την περίπτωση που η δοκός έχει το ελεύθερο της άκρο υπό ένταση, όπου λόγω θετικής επίδρασης από το στρίψιμο του πέλματος και φαινόμενα δεύτερης τάξεως, η ροπή $M_{fz,Ed}$ μπορεί να θεωρείται ίση με το μηδέν:

$$M_{fz,Ed} = \kappa_R \cdot M_{0,fz,Ed} \quad (3.33)$$

Όπου:

- $M_{0,fz,Ed}$ η αρχική πλευρική καμπτική ροπή του ελεύθερου πέλματος χωρίς τη στήριξη του ελατηρίου
 kR ένας συντελεστής διόρθωσης για την ενεργό στήριξη ελατηρίου

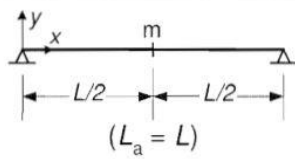
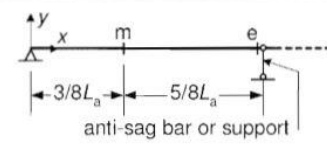
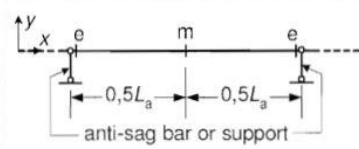
Η αρχική πλευρική καμπτική ροπή του ελεύθερου πέλματος $M_{0,fz,Ed}$ μπορεί να υπολογιστεί από τον πίνακα 3.3 για κρίσιμες περιοχές στο άνοιγμα, για στηρίξεις, για ελκυστήρες και για μεταξύ ελκυστήρων. Η ισχύς του πίνακα περιορίζεται για φάσμα τιμών $R \leq 40$.

Ο συντελεστής διόρθωσης kR για τις σχετικές τοποθεσίες και συνθήκες ορίων, μπορούν να καθοριστούν επίσης από τον πίνακα 3.3, (ή χρησιμοποιώντας την θεωρία των ελαστικών ελατηρίων Winkler) χρησιμοποιώντας τον συντελεστή R του ελατηρίου στήριξης που δίνεται από τον τύπο:

$$R = \frac{K \cdot L_a^4}{\pi^4 E I_{fz}} \quad (3.34)$$

Όπου:

- I_{fz} η ροπή αδρανείας του ελεύθερου πέλματος και του μέρους του κορμού που συνεισφέρει για κάμψη περί τον άξονα z-z
 K η πλευρική ακαμψία του ελατηρίου ανά μονάδα μήκους
 L_a η απόσταση μεταξύ των ελκυστήρων, ή εάν δεν υπάρχουν, το μήκος L της τεγίδας

System	Location	$M_{0,fz,Ed}$	κ_R
 <p style="text-align: center;">$(L_a = L)$</p>	m	$\frac{1}{8} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 - 0,0225R}{1 + 1,013R}$
 <p style="text-align: center;">anti-sag bar or support</p>	m	$\frac{9}{128} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 - 0,0141R}{1 + 0,416R}$
	e	$-\frac{1}{8} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 + 0,0314R}{1 + 0,396R}$
 <p style="text-align: center;">anti-sag bar or support</p>	m	$\frac{1}{24} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 - 0,0125R}{1 + 0,198R}$
	e	$-\frac{1}{12} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1 + 0,0178R}{1 + 0,191R}$

Σχήμα 3.15: Υπολογισμός της αρχικής πλευρικής ροπής $M_{0,fz,Ed}$ και του συντελεστή κ_R

3.7.3 Έλεγχος λυγισμού στο ελεύθερο πέλμα

Στις περιπτώσεις όπου το ελεύθερο πέλμα βρίσκεται σε υπό θλίψη, ο έλεγχος της αντοχής του έναντι λυγισμού είναι:

$$\frac{1}{\chi_{LT}} \cdot \left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (3.35)$$

Όπου ο μειωτικός συντελεστής χ_{LT} είναι ο ίδιος που χρησιμοποιείται στον καμπτικό λυγισμό και λαμβάνεται μέσω των καμπύλων λυγισμού. Συγκεκριμένα ο Ευρωκώδικας

EN 1993-1-1, 6.3.2.3 προτείνει την καμπύλη λυγισμού b ($a_{LT} = 0,34$; $\lambda_{LT,0} = 0,4$; $\beta = 0,75$) για τη λυγηρότητα λ_{fz} για καμπτικό λυγισμό ελεύθερου πέλματος, που δίνεται παρακάτω:

$$\lambda_{fz} = \frac{l_{fz}/i_{fz}}{\lambda_1} \quad (3.36)$$

Με:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \left[\frac{E}{f_{yb}} \right]^{0,5} \quad (3.37)$$

Όπου:

- l_{fz} το μήκος λυγισμού του ελεύθερου πέλματος
- i_{fz} η ακτίνα αδράνειας της πλήρους διατομής του ελεύθερου πέλματος συν το συμμετέχον τμήμα του κορμού για κάμψη περί τον άξονα z-z

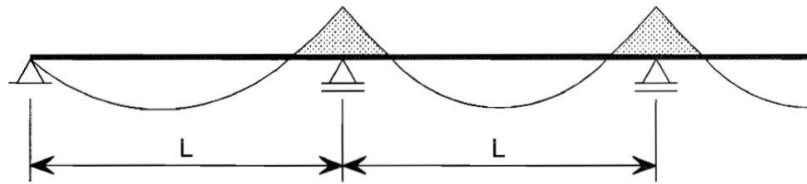
Για φορτίο βαρύτητας, με την προϋπόθεση ότι ισχύει $0 \leq R \leq 200$, το μήκος λυγισμού του ελεύθερου πέλματος, για διακύμανση της θλιπτικής έντασης ως προς το μήκος L όπως φαίνεται στο σχήμα 3.16 , υπολογίζεται ως εξής:

$$l_{fz} = \eta_1 \cdot L_a \cdot (1 + \eta_2 \cdot R^{\eta_3})^{\eta_4} \quad (3.38)$$

Όπου:

- L_a η απόσταση μεταξύ των ελκυστήρων, ή στην περίπτωση που δεν υπάρχει κανένας, το μήκος L της τεγίδας
- R όπως δίνεται από 3.7.2 (3.34)

Ενώ οι συντελεστές η_1 μέχρι η_4 εξαρτώνται από τον αριθμό των ελκυστήρων όπως δίνονται από τον πίνακα 3.4a. Οι πίνακες 3.4a και 3.4b ισχύουν για ίσα μήκη δοκών, φορτισμένες με ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο χωρίς αλληλοεπικάλυψη ή επικάλυψη και με ελκυστήρες που προσφέρουν υποστήριξη πλευρικής ακαμψίας στο ελεύθερο πέλμα. Οι πίνακες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν όταν υπάρχουν αλληλοεπικαλύψεις και επικαλύψεις , υπο την προϋπόθεση ότι το σύστημα σύνδεσης μπορεί να θεωρηθεί ως συνεχόμενο. Σε διαφορετικές περιπτώσεις το μήκος λυγισμού καθορίζεται με πιο σύνθετους υπολογισμούς ή, εκτός από πρόβολο, οι τιμές των πινάκων 3.4a και 3.4b για την περίπτωση 3 ελκυστήρων ανά πεδίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Πρέπει να σημειωθεί ότι εξαιτίας της στρέψης λόγω σύνδεσης με την επικάλυψη, η ροπή μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή χωρίς στρέψη, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερα μήκη λυγισμού ανά άνοιγμα. Παραβλέποντας την αληθινή κατανομή της ροπής , οδηγούμαστε σε μη ασφαλή σχεδιασμό.



Σχήμα 3.16: Κατανομή θλιπτικής έντασης στο ελεύθερο πέλμα για φορτία βαρύτητας (θλίψη στο γραμμοσκιασμένο τμήμα)

Πίνακας 3.4a: Συντελεστές η_i για φορτίο βαρύτητας με 0, 1, 2, 3, 4 ελκυστήρες

Θέση	Πλήθος ελκυστήρων	η_1	η_2	η_3	η_4
Ακραίο άνοιγμα	0	0.414	1.72	1.11	-0.178
Μεσαίο άνοιγμα		0.657	8.17	2.22	-0.107
Ακραίο άνοιγμα	1	0.515	1.26	0.868	-0.242
Μεσαίο άνοιγμα		0.596	2.33	1.15	-0.192
Ακραίο και μεσαίο άνοιγμα	2	0.596	2.33	1.15	-0.192
Ακραίο και μεσαίο άνοιγμα	3 και 4	0.694	5.45	1.27	-0.168

Πίνακας 3.4.b: Συντελεστές η_i για φορτίο αναρρόφησης με 0, 1, 2, 3, 4 ελκυστήρες

Θέση	Πλήθος ελκυστήρων	η_1	η_2	η_3	η_4
Ένα άνοιγμα	0	0.694	5.45	1.27	-0.168
Ακραίο άνοιγμα		0.515	1.26	0.868	-0.242
Μεσαίο άνοιγμα		0.306	0.232	0.742	-0.279
Ένα και ακραία ανοίγματα	1	0.800	6.75	1.49	-0.155
Μεσαίο άνοιγμα		0.515	1.26	0.868	-0.242
Ένα άνοιγμα	2	0.902	8.55	2.18	-0.111
Ακραία και μεσαία ανοίγματα		0.800	6.75	1.49	-0.155
Ένα και ακραία ανοίγματα		3 and 4	0.902	8.55	2.18
Μεσαίο άνοιγμα	0.800		6.75	1.49	-0.155

Για φορτίο βαρύτητας, εάν υπάρχουν περισσότεροι από 3 ίσα κατανεμημένοι ελκυστήρες, και για τις ίδιες προϋποθέσεις της εξίσωσης 3.38, το μήκος λυγισμού δεν χρειάζεται θεωρείται μεγαλύτερο από αυτό που ισχύει για 2 ελκυστήρες, με $L_a = 1/3$. Αυτό ισχύει μόνο όταν δεν υπάρχει αξονική θλιπτική δύναμη.

Εάν η θλιπτική ένταση στο μήκος L της τεγίδας είναι σχεδόν σταθερή, λόγω της εφαρμογής σχετικά μεγάλης αξονικής δύναμης, το μήκος λυγισμού μπορεί να

υπολογίζεται από τους συντελεστές η του πίνακα 3.4a για την περίπτωση που υπάρχουν 3 ή 4 ελκυστήρες ανά άνοιγμα, αλλά το πραγματικό βήμα είναι L_a .

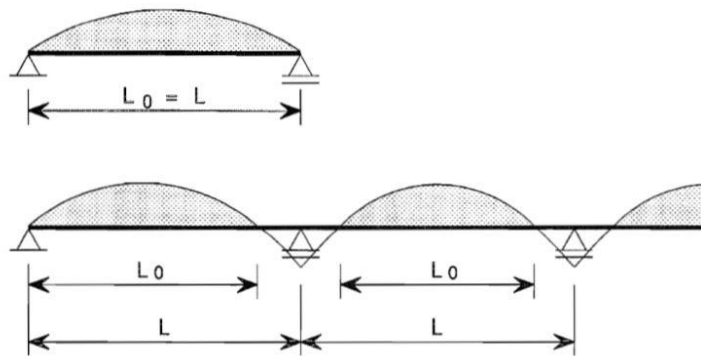
Για φορτίο αναρρόφησης, όταν δεν χρησιμοποιούνται ελκυστήρες, με την προϋπόθεση ότι $0 \leq R_0 \leq 200$, το μήκος λυγισμού στο ελεύθερο πέλμα για διακύμανση της θλιπτικής έντασης στο μήκος L_0 όπως δείχνει το σχήμα 3.15 μπορεί να υπολογίζεται από τον τύπο:

$$l_{fz} = 0,7 \cdot L_0 \cdot (1 + 13,1 \cdot R_0^{1,6})^{0,125} \quad (3.39)$$

Με:

$$R_0 = \frac{K \cdot L_0^4}{\pi^4 \cdot E \cdot I_{fz}} \quad (3.40)$$

Τα μεγέθη I_{fz} και K είναι τα ίδια μεγέθη που έχουν οριστεί στην εξίσωση 3.34 . Εναλλακτικά το μήκος λυγισμού του ελεύθερου πέλματος μπορεί να υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον πίνακα 10.4b σε συνδυασμό με την εξίσωση 3.38.



Σχήμα 3.17: κατανομή θλιπτικής έντασης στο ελεύθερο πέλμα για φορτίο αναρρόφησης

3.7.4 Στρεπτική ακαμψία λόγω επικάλυψης

3.7.4.1 Πλευρική ακαμψία ελατηρίου

Η ελατήρια πλευρική ακαμψία που υπάρχει στο ελεύθερο πέλμα λόγω της επικάλυψης και της σύνδεσης της με την διατομή, μοντελοποιείται με ένα πλευρικό ελατήριο που εφαρμόζεται στο ελεύθερο πέλμα όπως στο σχήμα 3.12β . Η ολική πλευρική ακαμψίας K του ελατηρίου ανά μονάδα μήκους, δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_C} \quad (3.41)$$

Όπου:

- Κ_A είναι η πλευρική σταθερά που αντιστοιχεί στη στρωφική δυσκαμψία της σύνδεσης μεταξύ της επικάλυψης και της τεγίδας
- Κ_B είναι η πλευρική σταθερά λόγω παραμόρφωσης της διατομής της τεγίδας
- Κ_C είναι η πλευρική σταθερά λόγω της καμπτικής δυσκαμψίας της επικάλυψης

Σε συνήθεις περιπτώσεις μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές και ανεκτό να παραβλέψουμε τον όρο 1/Κ_C επειδή το Κ_C είναι πολύ μεγάλο σε σύγκριση με τους όρους Κ_A και Κ_B. η ακαμψία Κ τότε δίνεται από τον τύπο:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B}\right)} \quad (3.42)$$

Ο όρος (1/Κ_A+1/Κ_B) μπορεί να υπολογίζεται είτε από πειράματα είτε από υπολογισμούς.

Η πλευρική δυσκαμψία Κ ανά μονάδα μήκους μπορεί να υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\frac{1}{K} = \frac{4(1 - \nu^2) \cdot h^2 \cdot (h_d + b_{mod})}{E \cdot t^3} + \frac{h^2}{C_D} \quad (3.43)$$

Στην οποία εξίσωση ο όρος b_{mod} υπολογίζεται ως εξής:

- Για περιπτώσεις στις οποίες το ισοδύναμο πλευρικό φορτίο q_{h,Ed} φέρνει τον κορμό της διατομής της τεγίδας σε επαφή με την επικάλυψη και την σπρώχνει:

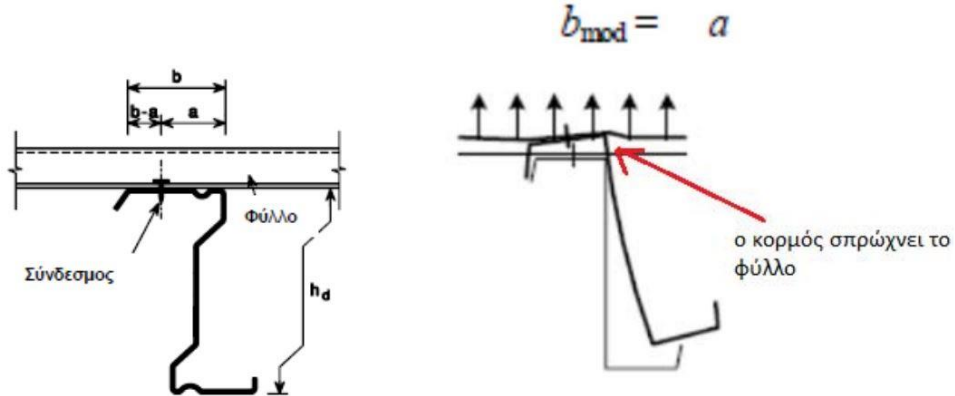
$$b_{mod} = \alpha$$

- Για περιπτώσεις στις οποίες το ισοδύναμο πλευρικό φορτίο q_{h,Ed} απομακρύνει τον κορμό της διατομής της τεγίδας από την επικάλυψη:

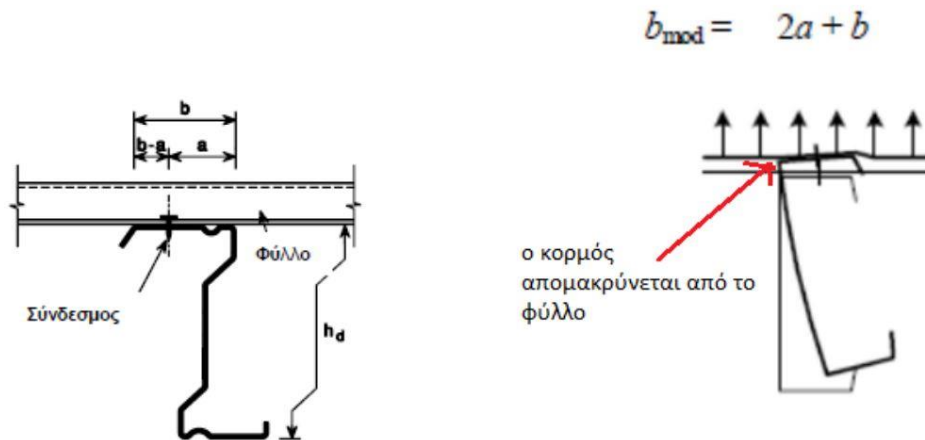
$$b_{mod} = \alpha + 2b$$

Όπου:

- t το πάχος της διατομής της τεγίδας
- α η απόσταση από της συνδέσεις τεγίδας και επικάλυψης (Σχήμα 3.18)
- b το μήκος της διατομής της τεγίδας που συνδέεται με την επικάλυψη
- C_D η ολική στρωφική δυσκαμψία του ελατηρίου
- h το ύψος της διατομής της τεγίδας
- h_d το αναπτυσσόμενο ύψος της διατομής της τεγίδας



Σχήμα 3.18α: Τεγίδα συνδεδεμένη με την επικάλυψη



Σχήμα 3.18β: Τεγίδα συνδεδεμένη με την επικάλυψη

3.7.4.2 Στροφική ακαμψία ελατηρίου

Η στροφική ακαμψία που επιδρά στην τεγίδα λόγω της σύνδεσης της επικάλυψης με την κεφαλή της τεγίδας, μοντελοποιείται σαν ένα στροφικό ελατήριο που συνδέεται στην κεφαλή της τεγίδας. Η στροφική δυσκαμψία του ελατηρίου C_D δίνεται από τον τύπο:

$$C_D = \frac{1}{\left(\frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,C}}\right)} \quad (3.44)$$

Όπου:

$C_{D,A}$ είναι η στροφική δυσκαμψία της σύνδεσης μεταξύ της τεγίδας και της επικάλυψης

$C_{D,C}$ είναι η στροφική δυσκαμψία που αντιστοιχεί στην καμπτική δυσκαμψία της επικάλυψης

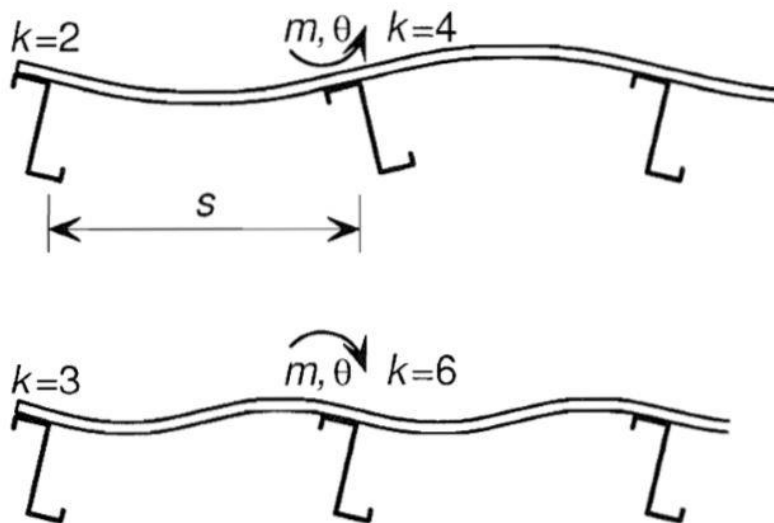
Ο όρος $C_{D,C}$ μπορεί να λαμβάνεται σαν η ελάχιστη τιμή που λαμβάνεται από το υπολογιστικό μοντέλο του σχήματος 3.17, λαμβάνοντας υπόψη τη στροφή της γειτονικής τεγίδας και τη θέση της τεγίδας (ως προς την ύπαρξη; συνέχειας τεγίδων):

$$C_{D,C} = \frac{m}{\theta} \quad (3.45)$$

Όπου:

m είναι η ασκούμενη ροπή ανά μονάδα μήκους της επικάλυψης, ασκούμενη όπως στο σχήμα 3.17

θ είναι επακόλουθη στροφή, μετρούμενη όπως δείχνετε στο σχήμα 3.17



Σχήμα 3.19: Μοντέλο για τον υπολογισμό του $C_{D,C}$

Εναλλακτικά ο όρος $C_{D,C}$ μπορεί να υπολογιστεί πιο συντηρητικά ως εξής:

$$C_{D,C} = \frac{k \cdot E \cdot I_{eff}}{s} \quad (3.46)$$

Όπου ο όρος k είναι ένας αριθμητικός συντελεστής, με τις ακόλουθες τιμές:

- Άκρο, πάνω περίπτωση σχήματος 3.17 $k = 2$
- Άκρο, κάτω περίπτωση σχήματος 3.17 $k = 3$
- Μέση, πάνω περίπτωση σχήματος 3.17 $k = 4$
- Μέση, κάτω περίπτωση σχήματος 3.17 $k = 6$

Όπου:

I_{eff} είναι η ενεργός ροπή αδρανείας ανά μονάδα μήκους της επικάλυψης

s είναι η απόσταση μεταξύ των τεγίδων

Με την προϋπόθεση ότι οι συνδέσεις μεταξύ τεγίδων και επικάλυψης βρίσκονται στο κέντρο του πέλματος της τεγίδας, η τιμή του όρου $C_{D,A}$ για τραπεζοειδή επικάλυψη συνδεδεμένη στην άνω πέλμα της τεγίδας μπορεί να καθοριστεί ως εξής:

$$C_{D,A} = C_{100} \cdot k_{ba} \cdot k_1 \cdot k_{bR} \cdot k_A \cdot k_{bT} \quad (3.47)$$

Όπου:

$$k_{ba} = (b_a/100)^2 \quad \text{εάν } b_a < 125 \text{ mm ;}$$

$$k_{ba} = 1,25 \cdot (b_a/100) \quad \text{εάν } 125 \text{ mm} < b_a < 200 \text{ mm ;}$$

$$k_t = (t_{nom}/0,75)^{1,1} \quad \text{εάν } t_{nom} \geq 0,75 \text{ mm, θετική τοποθέτηση ;}$$

$$k_t = (t_{nom}/0,75)^{1,5} \quad \text{εάν } t_{nom} \geq 0,75 \text{ mm, αρνητική τοποθέτηση ;}$$

$$k_t = (t_{nom}/0,75)^{1,5} \quad \text{εάν } t_{nom} < 0,75 \text{ mm}$$

$$k_{bR} = 1,0 \quad \text{εάν } b_R \leq 185 \text{ mm}$$

$$k_{bR} = 185/b_R \quad \text{εάν } b_R > 185 \text{ mm}$$

Για φορτίο βαρύτητας:

$$k_A = 1,0 + (A-1,0) \cdot 0,08 \quad \text{εάν } t_{nom} = 0,75 \text{ mm, θετική τοποθέτηση}$$

$$k_A = 1,0 + (A-1,0) \cdot 0,16 \quad \text{εάν } t_{nom} = 0,75 \text{ mm, αρνητική τοποθέτηση}$$

$$k_A = 1,0 + (A-1,0) \cdot 0,095 \quad \text{εάν } t_{nom} = 1,00 \text{ mm, θετική τοποθέτηση}$$

$$k_A = 1,0 + (A-1,0) \cdot 0,095 \quad \text{εάν } t_{nom} = 1,00 \text{ mm, αρνητική τοποθέτηση}$$

- Γραμμική παρεμβολή μεταξύ των τιμών $t = 0,75 \text{ mm}$ και $t = 1,00 \text{ mm}$ είναι επιτρεπτό
- Για $t < 0,75 \text{ mm}$ οι εξισώσεις δεν είναι εφαρμόσιμες
- Για $t > 1 \text{ mm}$ οι εξισώσεις χρειάζονται να χρησιμοποιηθούν με $t = 1 \text{ mm}$

Για φορτίο αναρρόφησης:

$$k_A = 1,0 ;$$

$$k_{bT} = \sqrt{\frac{b_{T,max}}{b_T}} \quad \text{εάν } b_T > b_{T,max}, \text{ διαφορετικά } k_{bT} = 1$$

$A[\text{kN/m}] \leq 12\text{kN/m}$ ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο που ασκείται

Όπου:

b_a είναι το μήκος του πέλματος της διατομής της τεγίδας
 b_R είναι το μήκος της αυλάκωσης
 b_T είναι το μήκος του πέλματος της επικάλυψης, το οποίο συνδέεται με την τεγίδα

$b_{T,max}$ υπολογίζεται από τον πίνακα 3.5
 C_{100} είναι ένας στροφικός συντελεστής, που αντιπροσωπεύει τον όρο $C_{D,A}$
εάν $b_a = 100$ mm

Με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει μόνωση μεταξύ επικάλυψης και τεγίδας, ο συντελεστής C_{100} μπορεί να υπολογίζεται από τον πίνακα 3.5.

Εναλλακτικά ο όρος $C_{D,A}$ μπορεί να λαμβάνεται ίσος με 130ρ [Nm/m/rad], όπου ρ είναι ο αριθμός των συνδέσεων τεγίδας – επικάλυψης ανά μέτρο μήκος της τεγίδας (αλλά παραπάνω από μια σύνδεση ανά πλευρό της επικάλυψης) υπό την προϋπόθεση ότι:

- Το μήκος του πέλματος b της επικάλυψης μέσω της οποίας συνδέεται με την τεγίδα δεν ξεπερνάει την τιμή των 120 mm
- Το ονομαστικό πάχος t της επικάλυψης είναι τουλάχιστον 0,66 mm
- Η απόσταση a ή $b - a$ μεταξύ του άξονα της σύνδεσης και του κέντρου στροφής της τεγίδας (εξαρτώμενο από την φορά στροφής), όπως δείχνει το σχήμα 3.16α,β, είναι τουλάχιστον 25 mm.


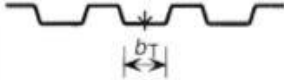
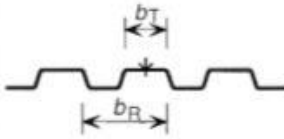
Στην περίπτωση όπου η επίδραση της στρέψης της διατομής πρέπει να ληφθεί υπόψη, είναι ασφαλές να αγνοήσουμε τον όρο $C_{D,C}$ επειδή η δυσκαμψία του ελατηρίου εξαρτάται κυρίως από τον όρο $C_{D,A}$ και την στρέψη της διατομής.

Εναλλακτικά, ο όρος $C_{D,A}$ μπορεί να καθοριστεί από έναν συνδυασμό πειραμάτων και υπολογισμών. Στην περίπτωση που ο όρος $(1/K_A + 1/K_B)$ καθορίζεται από πειράματα, ο όρος $C_{D,A}$ για φορτία βαρύτητας και για φορτία αναρρόφησης πρέπει να υπολογίζεται από τον τύπο:

$$C_{D,A} = \frac{h^2/l_A}{\left(\frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B}\right) - 4(1 - \nu^2)h^2(h_d + b_{mod})/(Et^3l_B)} \quad (3.48)$$

Όπου τα b_{mod} , h και h_d καθορίζονται όπως στην εξίσωση (3.44), ενώ το l_a είναι το σπονδυλωτό μήκος της επικάλυψης και l_b το μήκος της δοκού που εξετάζεται.

Πίνακας 3.5: Στροφικός συντελεστής C_{100} για τραπεζιοειδή χαλυβδόφυλλο επικάλυψης

Positioning of sheeting		Sheet fastened through		Pitch of fasteners		Washer diameter [mm]	C_{100} [kNm/m]	$b_{T,max}$ [mm]
Positive 1)	Negative 1)	Trough	Crest	$e = b_R$	$e = 2b_R$			
For gravity loading:								
×		×		×		22	5,2	40
×		×			×	22	3,1	40
	×		×	×		K_a	10,0	40
	×		×		×	K_a	5,2	40
	×	×		×		22	3,1	120
	×	×			×	22	2,0	120
For uplift loading:								
×		×		×		16	2,6	40
×		×			×	16	1,7	40
Key:								
b_R is the corrugation width;								
b_T is the width of the sheeting flange through which it is fastened to the purlin.								
K_a indicates a steel saddle washer as shown below with $t \geq 0,75$ mm <div style="text-align: center;">  </div>						Sheet fastened: <ul style="list-style-type: none"> - through the trough: <div style="text-align: center;">  </div> - through the crest: <div style="text-align: center;">  </div> 		
The values in this table are valid for:								
- sheet fastener screws of diameter: $\phi = 6,3$ mm;								
- steel washers of thickness: $t_w \geq 1,0$ mm.								

1) Η τοποθέτηση της επικάλυψης είναι θετική όταν το στενό πέλαμα του χαλυβδόφυλλου συνδέεται με την τεγίδα και αρνητική όταν το μακρύ πέλαμα του χαλυβδόφυλλου συνδέεται με την τεγίδα.

3.8 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

Ο έλεγχος γίνεται για ναδειχθεί ότι τα μεγέθη αντοχής είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα μεγέθη των δράσεων. Η αντοχή σχεδιασμού μιας διατομής υπό αξονική θλίψη $N_{c,Rd}$ δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

- Για $A_{eff} < A_g$ είναι $N_{c,Rd} = \frac{f_{yb} \cdot A_{eff}}{\gamma_{M0}}$ (3.49)

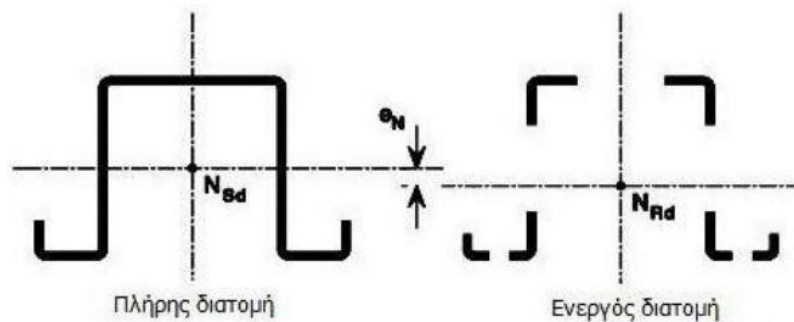
- Για $A_{eff} = A_g$ είναι

$$N_{c,Rd} = \frac{A_g [f_{yb} + (f_{ya} - f_{yb}) \cdot 4 \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{e1}}\right)]}{\gamma_{M0}} \leq \frac{A_g \cdot f_{ya}}{\gamma_{M0}} \quad (3.50)$$

Όπου :

- A_{eff} εμβαδόν ενεργού διατομής, υπολογισμένης σύμφωνα με την παράγραφο 5.5 για ομοιόμορφες θλιπτικές τάσεις ίσες προς f_{yb}/γ_{M1}
- A_g εμβαδόν πλήρους διατομής
- f_{ya} μέση τιμή ορίου διαρροής
- f_{yb} το βασικό όριο διαρροής

Η δρώσα δύναμη εξασκείται στο κέντρο βάρους της πλήρους διατομής, ενώ η αντοχή στο κέντρο βάρους της ενεργού διατομής. Αν τα δύο κέντρα βάρους δεν συμπίπτουν πρέπει να ληφθεί υπόψη η σχετική μετατόπιση e_N (Σχήμα 3.15). Αν η παραπάνω μετατόπιση έχει ευνοϊκό αποτέλεσμα κατά τον έλεγχο τάσεων, η επιρροή της μπορεί να αγνοηθεί αν προσδιορίστηκε στη στάθμη του ορίου διαρροής και όχι στη στάθμη των πραγματικών θλιπτικών τάσεων.

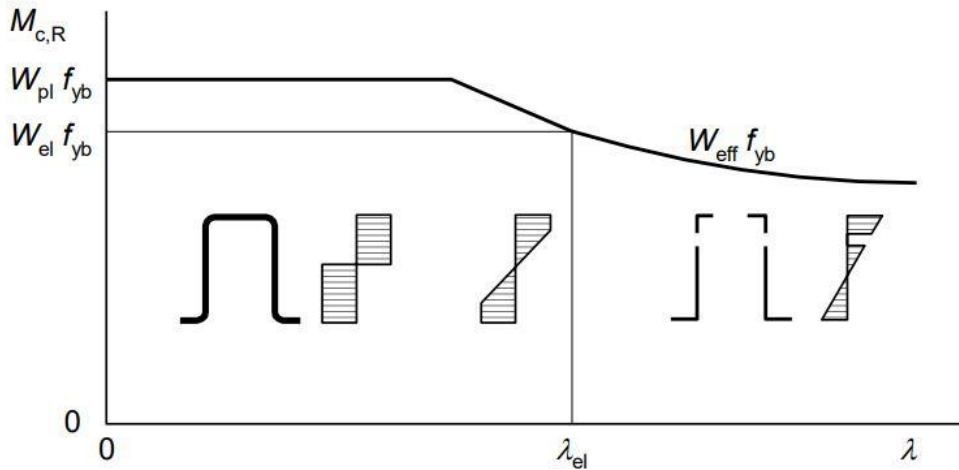


Σχήμα 3.19: Ενεργός διατομή υπό θλίψη

3.9 ΑΝΤΟΧΗ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΜΨΗ

3.9.1 Ελαστική και ελαστοπλαστική αντοχή με διαρροή του θλιβόμενου πέλματος

Η αντοχή σχεδιασμού της διατομής υπό κάμψη ως προς έναν κύριο άξονα $M_{c,Rd}$ προσδιορίζεται ως εξής (Σχήμα 3.12) :



Σχήμα 3.20: Καμπτική ροπή αντοχής ως συνάρτηση της λυγηρότητας

- Εάν η ελαστική ροπή αντίστασης της ενεργού διατομής W_{eff} είναι μικρότερη από την ελαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής W_{el} :

$$M_{c,Rd} = W_{eff} \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} \quad (3.51)$$

- Εάν η ελαστική ροπή αντίστασης της ενεργού διατομής W_{eff} είναι ίση με την ελαστική ροπή αντίστασης της πλήρους διατομής W_{el} :

$$M_{c,Rd} = \frac{f_{yb} \left(W_{el} + (W_{pl} - W_{el}) \cdot 4 \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{el}} \right) \right)}{\gamma_{M0}} \leq \frac{W_{pl} f_{yb}}{\gamma_{M0}} \quad (3.52)$$

Όπου:

λ η λυγηρότητα του στοιχείου που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη τιμή του λόγου λ/λ_{el}

Για διπλά στηριζόμενα επίπεδα στοιχεία $\lambda = \lambda_p$ και $\lambda_{el} = 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,055(3 + \psi)}$ όπου:

ψ είναι ο λόγος των τάσεων.

Για προεξέχοντα στοιχεία $\lambda = \lambda_p$ και $\lambda_{el} = 0,673$.

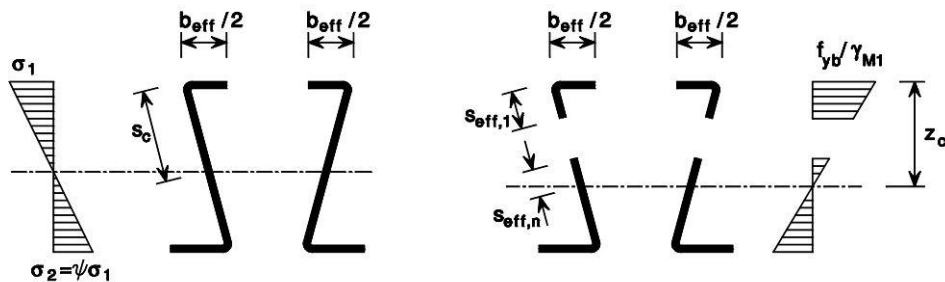
Για ενισχυμένα στοιχεία $\lambda = \lambda_p$ και $\lambda_{el} = 0,65$.

Η προκύπτουσα καμπτική ροπή αντοχής ως συνάρτηση ενός καθοριστικού στοιχείου δίνεται στο σχήμα 3.9.

Η εξίσωση (3.16) εφαρμόζεται στην περίπτωση που ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες:

- 1) Ασκείται καμπτική ροπή μόνον ως προς έναν κύριο άξονα της διατομής.
- 2) Το μέλος δεν υπόκειται σε στρέψη ή σε στρεπτικό, στρεπτοκαμπτικό ή πλευρικό ή στρεπτικό ή στρεβλωτικό λυγισμό.
- 3) Η γωνία φ ανάμεσα στον κορμό και το πέλμα είναι μεγαλύτερη από 60°. Εάν τα παραπάνω δεν ικανοποιούνται, χρησιμοποιείται η εξής έκφραση :

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff} f_{ya}}{\gamma_{M0}} \quad (3.53)$$



Σχήμα 3.21: Ενεργός διατομή για κάμψη

Η ροπή αντίστασης της ενεργού διατομής W_{eff} προσδιορίζεται με βάση την ενεργό διατομή μόνον για καμπτική ροπή ως προς τον σχετικό κύριο άξονα, με μέγιστη τάση $\sigma_{max,Ed}$ ίση προς f_{yb} / γ_{M0} , λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού και του λυγισμού με στρέβλωση, όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα. Στην περίπτωση που μπορεί να υπάρξει διατμητική υστέρηση, πρέπει να ληφθεί υπόψη η επιρροή της.

Η ενεργός διατομή του κορμού προσδιορίζεται για λόγο τάσεων $\Psi = \sigma_2 / \sigma_1$ της διατομής με ενεργό θλιβόμενο πέλμα και πλήρη κορμό, όπως παρατηρείται και στο σχήμα 3.10.

3.9.2 Ελαστική και ελαστοπλαστική αντοχή με διαρροή του εφελκυόμενου πέλματος μόνο

Με την προϋπόθεση ότι η διατομή υπόκειται σε μονοαξονική κάμψη ως προς έναν κύριο άξονα μόνο και η διαρροή ξεκινά στην ακραία εφελκυόμενη ίνα, ο κανονισμός μας επιτρέπει να λάβουμε υπόψη πλαστικά αποθέματα χωρίς περιορισμό των ανοιγμένων παραμορφώσεων και μέχρι μέγιστη θλιπτική τάση $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M0}$. Αυτό φυσικά ισχύει στην περίπτωση της καθαρής κάμψης. Σε αυτή την περίπτωση, η ενεργός ελαστοπλαστική ροπή αντίστασης $W_{Rp,eff}$ υπολογίζεται βάσει διγραμμικής κατανομής τάσεων στην εφελκυόμενη ζώνη και γραμμικής κατανομής τάσεων στη θλιβόμενη ζώνη.

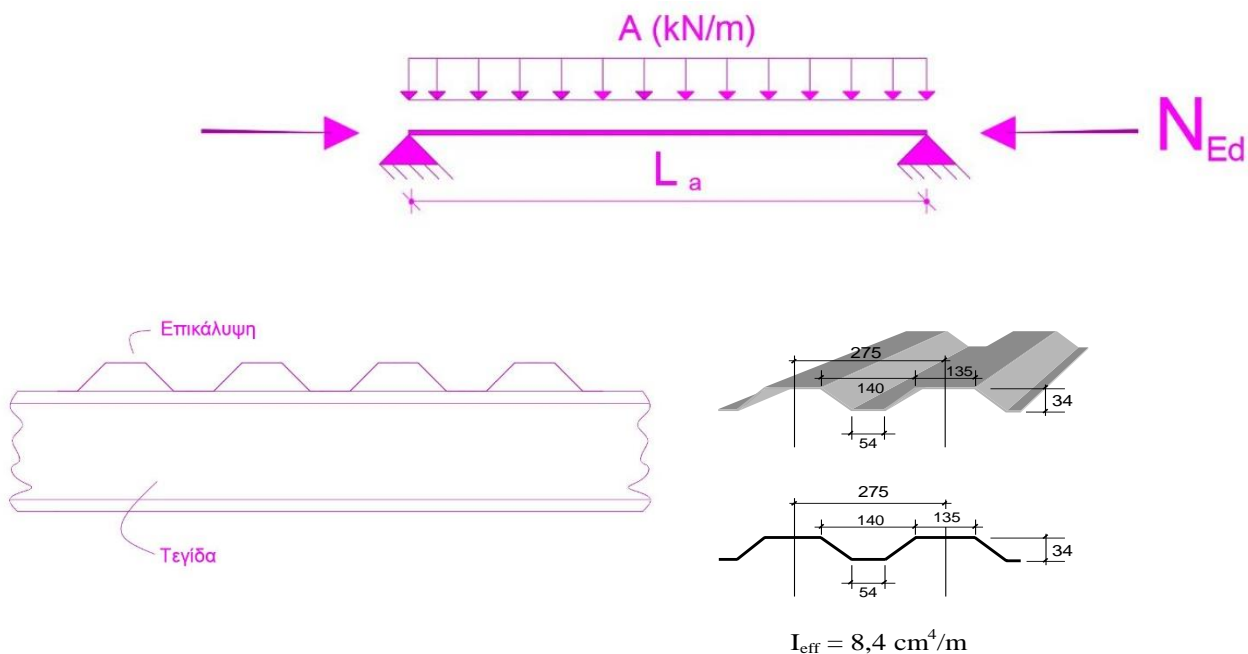
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. Ανάλυση λυγισμού με βάση τις διατάξεις του Ευρωκώδικα

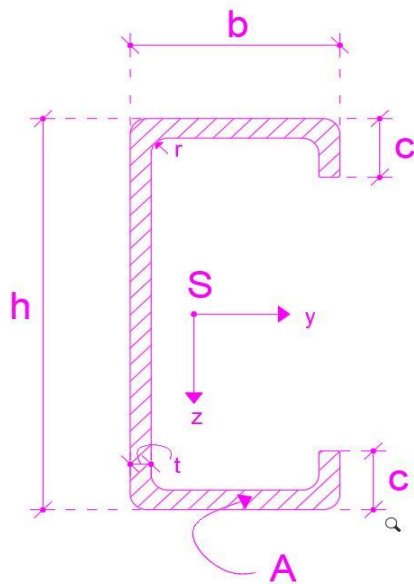
4.1 ΦΟΡΤΙΟ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ

4.1.1 Γενικά στοιχεία εξεταζόμενων διατομών

Βάση των διατάξεων που ορίζει ο Ευρωκώδικας 3 θα εξεταστεί η επάρκεια μιας αμφιέριστης τεγίδας διατομής C, που καταπονείται από ομοιόμορφο καταναμημένο φορτίο και αξονική δύναμη. Στην παρούσα εργασία αναλύθηκαν οι εν λόγω διατομές με ακραίες ενισχύσεις, χωρίς οπές στον κορμό, υπό φορτίο βαρύτητας ή αναρρόφησης. Η τεγίδα στηρίζει επικάλυψη από τραπεζοειδές χαλυβδόφυλλο (Σχ. 4.2 δ), το οποίο παρεμποδίζει την πλευρική της μετάθεση και δεσμεύει μερικώς τις στροφές των διατομών. Παρουσιάζεται ενδεικτικά δυο αριθμητικά παραδείγματα για το φορτίο βαρύτητας και αναρρόφησης αντίστοιχα, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται διάφορες αριθμητικές εφαρμογές, για διαφορετικές διαστάσεις.



Σχήμα 4.1: Εξεταζόμενος φορέας



Πίνακας 4.1: Δεδομένα

h (mm)	180
b (mm)	65
c (mm)	20
A (kN/m)	0,75
N _{Ed} (kN)	0 & 20
f _y (kN/mm ²)	250
La (m)	4,5
t (mm)	1,46

Σχήμα 4.2: Εξεταζόμενη διατομή

4.1.2. Διατομή Τεγίδας

Τα γεωμετρικά στοιχεία της πλήρης διατομής προκύπτουν από πίνακες:

$$A=5,02\text{cm}^2, I_y = 252,6 \text{ cm}^4, W_y = 28,0 \text{ cm}^3, i_y = 7,09\text{cm}$$

Για συνήθους χάλυβες η επικάλυψη ψευδαργύρου λαμβάνεται ίση με $t_{\text{zinc}} = 0,04\text{mm}$

$$t_{\text{cor}} = t_{\text{nom}} - t_{\text{zinc}} = 1,5 - 0,04 = 1,46 \text{ mm}$$

$$0,45 < t_{\text{cor}} = 1,46 \text{ mm} < 15\text{mm}$$

Έλεγχος στρογγυλεμένων γωνιών :

$$r < 5 \cdot t \Rightarrow 4\text{mm} < 5 \cdot 1,46 = 7,3 \text{ mm} \quad \& \quad r < 0,10 \cdot b_p \Rightarrow 4 \text{ mm} < 0,10 \cdot 63,5 = 6,35$$

Επομένως η διατομή της τεγίδας μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από επίπεδα ελάσματα, αφού ικανοποιείται ο έλεγχος των στρογγυλεμένων γωνιών.

Επομένως εφαρμόζεται το μέρος 1.3 του Ευρωκώδικα 3.

Ισοδύναμη διατομή: $b = 65\text{mm}$, $b_p = b - t = 65 - 1,46 = 63,5 \text{ mm}$

$$c = 20 \text{ mm} , \quad b_{p,c} = c - t/2 = 20 - 1,46/2 = 19,3 \text{ mm}$$

Γεωμετρικές συνθήκες:

$$b/t = 63,54/1,46 = 43,5 < 50$$

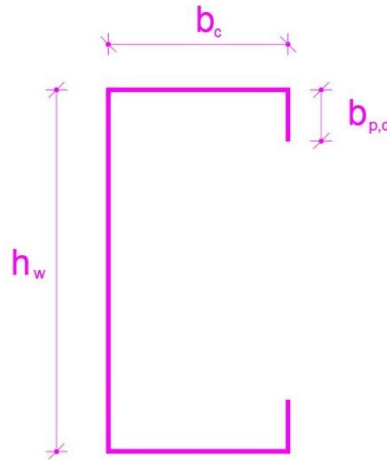
$$h = 180 - 1,46 = 178,5 \text{ mm}$$

$$\varphi = 90^\circ \quad h/t = 178,5 \text{ mm} / 1,46 = 122 < 500 \cdot \sin(90^\circ) = 500$$

Οι ακραίες νευρώσεις μπορεί να θεωρηθούν ενεργές επειδή:

$$0,2 < c/b = 20/63,54 = 0,31 < 0,6$$

Η ισοδύναμη διατομή της τεγίδας και η θέση του κέντρου διάτμησης φαίνεται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Ισοδύναμη διατομή

4.1.3 Ιδιότητες χάλυβα

Βασική τιμή του ορίου διαρροής : $f_{yb} = 23,5 \text{ kN/cm}^2$

Εφελκυστική αντοχή $f_u = 36,0 \text{ kN/cm}^2$

Αριθμός κάμψεων 90° : $n=4$

$K = 7$ (εξέλαση εν ψυχρώ)

Μέση τιμή ορίου διαρροής:

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb}) \cdot k \cdot n \cdot \frac{t^2}{A_g} = 23,5 + (36 - 23,5) \cdot 7 \cdot 4 \cdot \frac{0,146^2}{5,02} = 25,0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Συνεπώς :

$$f_{ya} = 25,0 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} < \frac{36 + 23,5}{5,02} = 29,75 \text{ kN/cm}^2$$

4.1.4 Ενεργός διατομή για περίπτωση αξονικής θλιπτικής δύναμης

Πέλιμα

Πίνακας 3.2 Εσωτερικών θλιβόμενων στοιχείων

$$\psi=1 \Rightarrow \kappa\sigma=4$$

Βήμα 1 $\varepsilon=1$, $b=b_p$

$$\lambda_p = \frac{b}{28,4 \cdot t \cdot \varepsilon} \sqrt{\frac{1}{k_\sigma}} = \frac{6,35}{28,4 \cdot 0,146 \cdot 1} \cdot \sqrt{\frac{1}{4}} = 0,765$$

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\lambda_p^2} = \frac{0,765 - 0,055 \cdot (3 + 1)}{0,765^2} = 0,93$$

$$b_{eff} = \rho \cdot b_p = 0,93 \cdot 6,35 = 5,91 \text{ cm}$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = \frac{5,91}{2}$$

Ενίσχυση

Πίνακας 3.2 Προεξεχόντων θλιβόμενων στοιχείων:

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} = \frac{19,3}{63,5} = 0,3 < 0,35 \Rightarrow k_\sigma = 0,5$$

$$\lambda_p = \frac{b}{28,4 \cdot t \cdot \varepsilon} \sqrt{\frac{1}{k_\sigma}} = \frac{1,93}{28,4 \cdot 0,146 \cdot 1} \cdot \sqrt{\frac{1}{0,5}} = 0,658$$

$$\rho = \frac{0,658 - 0,055 \cdot (3 + 1)}{0,658^2} = 1,01 > 1$$

Επομένως $\rho=1$ και $c_{eff} = 1,93 \text{ cm}$

$$A_s = t \cdot (b_{e2} + c_{eff} + d_{eff}) = 0,146 \cdot (2,96 + 1,93 + 0) = 0,714 \text{ cm}^2$$

Θέση κέντρου βάρους : $e_z = \frac{0,146 \cdot \frac{1,93^2}{2}}{0,714} = 0,381 \text{ cm}$

$$e_y = \frac{0,146 \cdot \frac{2,96^2}{2}}{0,714} = 0,896 \text{ cm} \Rightarrow b_1 = 6,35 - 0,896 = 5,45 \text{ mm}$$

$$I_s = 0,146 \left[2,96 \cdot 0,381^2 + \frac{1,93^3}{12} + 1,93 \cdot \left(\frac{1,93}{2} - 0,381 \right)^2 \right] = 0,246 \text{ cm}^4$$

Δυσκαμψία ελατηρίου που προσφέρει η ενίσχυση , $k_f=1$ συμμετρική διατομή υπό θλίψη

$$K = \frac{E \cdot t^3}{4(1 - n^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f}$$

$$= \frac{2,1 \cdot 10^4 \cdot 0,146^3}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{5,45^2 \cdot 17,85 + 5,45^3 + 0,5 \cdot 5,45^2 \cdot 17,85 \cdot 1}$$

$$= 0,0187 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{cr} = \frac{2 \cdot \sqrt{KEI_s}}{A_s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,0187 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 0,246}}{0,714} = 27,55 \text{ kN/m}^2$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{23,5}{27,55}} = 0,923$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \lambda_d = 1,47 - 0,723 \cdot 0,923 = 0,872 < 1$$

Συνεπώς θα εφαρμοστεί μια επαναληπτική διαδικασία εύρεσης του μειωτικού συντελεστή χ_d έτσι ώστε να υπάρχει τουλάχιστον διαφορά $\chi_{d,n-1} - \chi_{d,n} < 5\%$.

$$\lambda_{p,red} = \lambda_p \cdot \sqrt{\chi_d} = 0,923 \cdot \sqrt{0,802} = 0,827 \Rightarrow \chi_d = 0,872$$

$$\lambda_{p,red} = \lambda_p \cdot \sqrt{\chi_d} = 0,923 \cdot \sqrt{0,872} = 0,862 \Rightarrow \chi_d = 0,846$$

Και μετά από ορισμένους κύκλους επαναλήψεων προκύπτει τελικά:

$$\lambda_{p,red} = \lambda_p \cdot \sqrt{\chi_d} = 0,923 \cdot \sqrt{0,856} = 0,854 \Rightarrow \chi_d = 0,852$$

$$A_{s,red} = \chi_d \cdot A_s = 0,852 \cdot 0,714 = 0,609 \text{ cm}^2$$

$$t_{red} = \chi_d \cdot t = 0,852 \cdot 0,146 = 0,12 \text{ cm}$$

Το μειωμένο εμβαδόν και το μειωμένο πάχος αντίστοιχα που λαμβάνεται μόνο στην ενίσχυση.

Κορμός

Από πίνακα 3.1 εσωτερικών θλιβόμενων στοιχείων έχω:

$$\psi=1 \Rightarrow k\sigma=4$$

$$\lambda_p = \frac{b}{28,4 \cdot t \cdot \varepsilon} \sqrt{\frac{1}{k\sigma}} = \frac{17,85}{28,4 \cdot 0,146 \cdot 1} \cdot \sqrt{\frac{1}{4}} = 2,15$$

$$h_{eff} = \rho \cdot h = 0,417 \cdot 17,85 = 7,44 \text{ cm}$$

$$h_{e1} = h_{e2} = \frac{7,44}{2} = 3,72 \text{ cm}$$

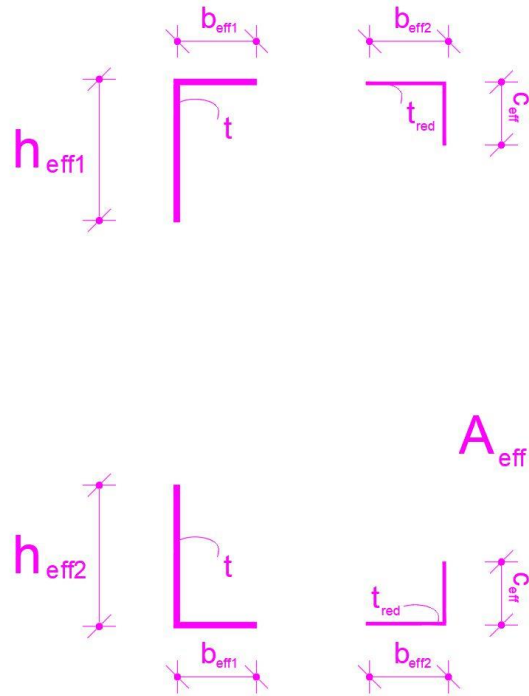
Ενεργό εμβαδόν διατομής:

$$A_{eff} = 2 \cdot (3,72 + 2,96) \cdot 0,146 + 2 \cdot (2,96 + 1,93) \cdot 0,12 = 3,16 \text{ cm}^2$$

Αντοχή σε αξονική θλίψη:

$$N_{c,Rd} = f_{yb} \cdot \frac{A_{eff}}{\gamma_{M0}} = 23,5 \cdot \frac{3,12}{1,0} = 73,3 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 20 \text{ kN} < N_{c,Rd} \text{ , OK}$$



Σχήμα 4.4: Ενεργός διατομή για θλιπτική δύναμη

4.1.5 Ενεργός διατομή για περίπτωση καμπτικής ροπής M_y

Πέλμα

Ίδια διαδικασία όπως στην παράγραφο 4.4.

Άρα : $b_{e1} = b_{e2} = 2,96 \text{ cm}$

Ενίσχυση

Παρόμοια προκύπτει από την παράγραφο 4.4

$$A_s = 0,714 \text{ cm}^2 \quad I_s = 0,246 \text{ cm}^4$$

$k_f = 0$, Πέλμα 2 (κάτω) υπό εφελκυσμό λόγω καμπτικής ροπής.

$$K = \frac{E \cdot t^3}{4(1 - n^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f}$$

$$= \frac{2,1 \cdot 10^4 \cdot 0,146^3}{12 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{5,45^2 \cdot 17,85 + 5,45^3 + 0,5 \cdot 5,45^2 \cdot 17,85 \cdot 0}$$

$$= 0,0259 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{cr} = \frac{2 \cdot \sqrt{KEI_s}}{A_s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,0259 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 0,246}}{0,714} = 32,4 \text{ kN/m}^2$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{23,5}{32,4}} = 0,852$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \lambda_d = 1,47 - 0,723 \cdot 0,852 = 0,854 < 1$$

Συνεπώς θα εφαρμοστεί μια επαναληπτική διαδικασία εύρεσης του μειωτικού συντελεστή χ_d έτσι ώστε να υπάρχει τουλάχιστον διαφορά $\chi_{d,n-1} - \chi_{d,n} < 5\%$.

$$\lambda_{p,red} = \lambda_p \cdot \sqrt{\chi_d} = 0,923 \cdot \sqrt{0,854} = 0,787 \Rightarrow \chi_d = 0,901$$

$$\lambda_{p,red} = \lambda_p \cdot \sqrt{\chi_d} = 0,923 \cdot \sqrt{0,901} = 0,809 \Rightarrow \chi_d = 0,885$$

Και μετά από ορισμένους κύκλους επαναλήψεων προκύπτει τελικά:

$$\lambda_{p,red} = \lambda_p \cdot \sqrt{\chi_d} = 0,923 \cdot \sqrt{0,899} = 0,804 \Rightarrow \chi_d = 0,889$$

$$t_{red} = 0,889 \cdot 0,146 = 0,13 \text{ cm}$$

Στοιχεία ενεργού διατομής:

$$b_c = z_s = \frac{0,146 \cdot \left[\frac{17,85^2}{2} + 6,35 \cdot 17,85 + 1,93 \cdot \left(17,85 - \frac{1,92}{2} \right) \right]}{4,88} + \frac{0,13 \cdot 1,93^2 / 2}{4,83}$$

$$= 9,18 \text{ cm}$$

$$b_c = 9,18 \text{ cm} \quad b_t = 17,85 - 9,18 = 8,67 \text{ cm}$$

Κορμός

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -\frac{b_t}{b_c} = -\frac{8,67}{9,18} = -0,944$$

Από τον πίνακα 3.1 για εσωτερικά θλιβόμενα στοιχεία έχω :

$$-1 < \psi < 0 \Rightarrow k_\sigma = 7,81 - 6,29 \cdot \psi + 9,78 \cdot \psi^2 = 7,81 - 6,29 \cdot (-0,944) = 22,463 \text{ cm}$$

$$\lambda_p = \frac{b}{28,4 \cdot t \cdot \varepsilon} \sqrt{\frac{1}{k_\sigma}} = \frac{17,85}{28,4 \cdot 0,146 \cdot 1} \cdot \sqrt{\frac{1}{22,463}} = 0,9085$$

$$\rho = \frac{0,9085 - 0,055 \cdot (3 - 0,944)}{0,917^2} = 0,964 < 1$$

$$h_{eff} = 0,964 \cdot 9,18 = 8,85 \text{ cm}$$

$$-1 < \psi < 0 \Rightarrow h_{e1} = 0,4 \cdot 8,85 = 2,98 \text{ cm}$$

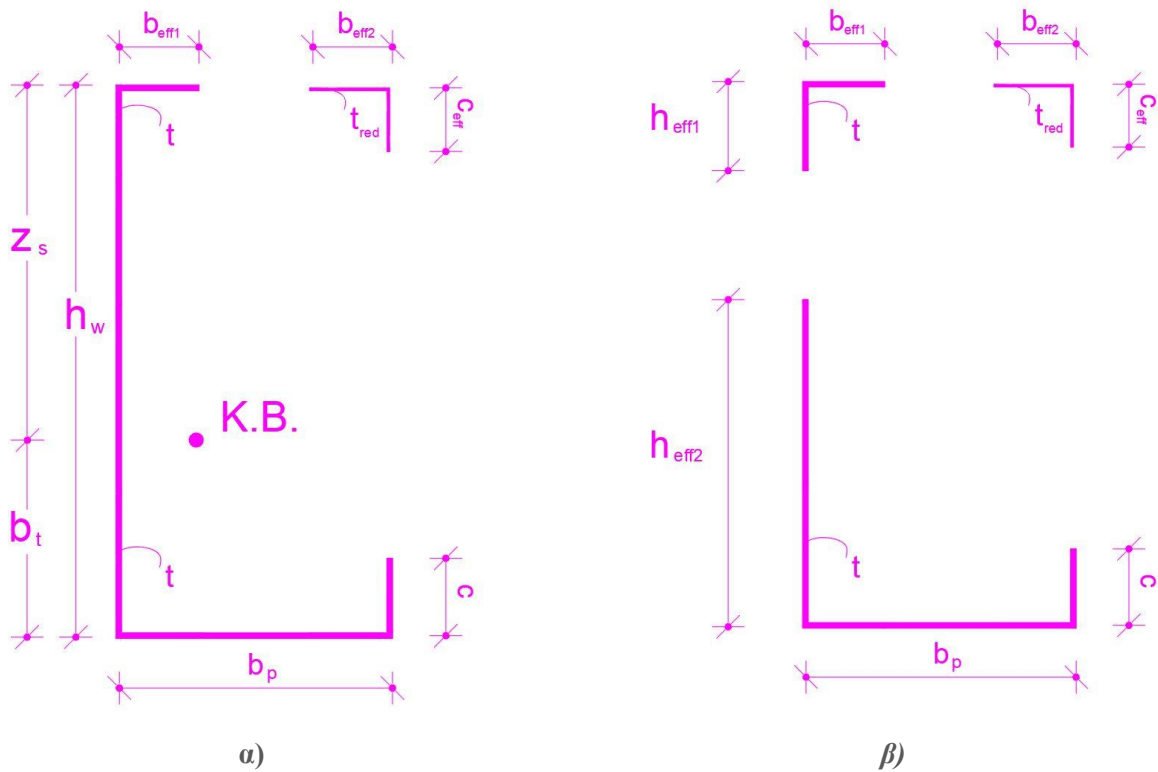
$$h_{e2} = 0,6 \cdot 8,85 = 5,87 \text{ cm}$$

Γεωμετρικά και αδρανειακά μεγέθη ενεργού διατομής:

Εμβαδόν:

$$A_{eff} = 0,13 \cdot (2,96 + 1,93 + 0,146 \cdot (2,96 + 2,98 + 5,87 + 8,67 + 6,35 + 1,93)) = 4,88 \text{ cm}^2$$

$$z_s = \frac{1}{4,88} \left[0,13 \cdot \frac{1,93^2}{2} + 0,146 \cdot \left(\frac{2,96^2}{2} + (5,87 + 8,67) \cdot \left(17,85 - \frac{5,87 + 8,67}{2} \right) + 6,35 \cdot 17,85 + 1,93 \cdot \left(17,85 - \frac{1,93}{2} \right) \right) \right] = 9,18 \text{ cm}$$



Σχήμα 4.4: Ενεργός διατομή για καμπτική ροπή α) με ενεργό θλιβόμενο πέλμα και πλήρη κορμό β) τελική ενεργός διατομή περί τον ισχυρό άξονα

Ροπή αδράνειας:

$$\begin{aligned}
 I &= 0,13 \left[\frac{1,93^2}{2} + 1,93 \left(9,18 - \frac{1,93}{2} \right)^2 + 2,96 \cdot 9,18^2 \right] + 0,146 \\
 &\quad \cdot \left[2,96 \cdot 9,18^2 + \frac{2,96^3}{12} + 2,96 \cdot \left(9,18 - \frac{2,96}{2} \right)^2 + \frac{(5,87 + 8,67)^3}{12} \right. \\
 &\quad \left. + (5,87 + 8,67) \cdot \left(17,85 - \frac{5,87 + 8,67}{2} - 9,18 \right)^2 + 6,35 \right. \\
 &\quad \left. \cdot (17,85 - 9,18)^2 + \frac{1,93^3}{2} + 1,93 \cdot \left(17,85 - \frac{1,93}{2} - 9,18 \right)^2 \right] \\
 &= 239,87 \text{ cm}^4
 \end{aligned}$$

Ροπές αντίστασης :

$$\text{Άνω πέλμα: } W_{\text{eff,o}} = \frac{239,87}{9,18} = 25,946 \text{ cm}^3$$

$$\text{Κάτω πέλμα: } W_{\text{eff,u}} = \frac{239,87}{(17,85-9,18)} = 27,863 \text{ cm}^3$$

4.1.6 Εγκάρσια κάμψη ελεύθερου πέλματος

Θεωρούμε ότι η σύνδεση της τεγίδας – φύλλου γίνεται στο κάτω μέρος του φύλλου, καθώς και ότι οι βίδες σύνδεσης απέχουν μεταξύ τους : $e = 2 \cdot b_R = 2 \cdot 275 = 550 \text{ mm}$

Από τον πίνακα 3.5 για σύνδεση στο κοίλωμα και όχι στην κορυφή, με θετική τοποθέτηση, δηλαδή το στενό πέλμα του χαλυβδόφυλλου συνδέεται με την τεγίδα και την παραπάνω απόσταση σύνδεσης έχω:

$$C_{100} = 3,1 \text{ kNm/m} \quad \text{και} \quad b_{T,\text{max}} = 40 \text{ mm}$$

$$b_a = 65 \text{ mm} < 125 \text{ mm} \Rightarrow k_{ba} = \left(\frac{b_a}{100} \right)^2 = \left(\frac{65}{100} \right)^2 = 0,423$$

$$\text{Πάχος χαλυβδόφυλλου } t_{\text{nom}} = 1 \text{ mm} \Rightarrow k_{ba} = \frac{t_{\text{nom}}^{1,1}}{0,75} = 1,374$$

$$b_R = 275 \text{ mm} > 185 \text{ mm} \Rightarrow k_{bR} = \frac{185}{b_R} = \frac{185}{275} = 0,673$$

$$A = 0,75 \text{ kN/m} < 12 \text{ kN/m} \Rightarrow k_A = 1 + (A - 1,0) \cdot 0,095 = 0,976$$

$$b_T = 54 \text{ mm} < b_{T,\text{max}} = 40 \text{ mm} \Rightarrow k_{bT} = \sqrt{\frac{b_{T,\text{max}}}{b_T}} = 0,861$$

$$\text{Άρα: } C_{D,A} = C_{100} \cdot k_{ba} \cdot k_T \cdot k_{bR} \cdot k_A \cdot k_{bT} = 3,1 \cdot 0,423 \cdot 1,374 \cdot 0,673 \cdot 0,976 \cdot 0,861 = 1,02 \text{ kNm/m}$$

Τα φύλλα εδράζονται σε περισσότερες τεγίδες, των οποίων η απόσταση εν προκειμένω λαμβάνεται ίση με $s = 1,5 \text{ m}$ και τα φύλλα έχουν συνέχεια πάνω στις τεγίδες.

$$k=4, C_{D,C} = \frac{k \cdot E \cdot I_{eff}}{s} = \frac{4 \cdot 2,1 \cdot 10^4}{150} = 47,04 \text{ kNm/m}$$

$$\text{και} \quad C_D = \frac{1}{\frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,C}}} = \frac{1}{\frac{1}{1,02} + \frac{1}{47,04}} = 1,0 \text{ kNm/m}$$

Για φορτίο βαρύτητας η επικάλυψη έρχεται σε επαφή με τον κορμό της διατομής της τεγίδας (βλέπε Σχήμα 4.5) οπότε:

$$b_{mod} = a = \frac{63,5}{2} = 31,75 \text{ mm}$$

$$\frac{1}{K} = \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot h^2 \cdot (h_d + b_{mod})}{E \cdot t^3} + \frac{h^2}{C_D} = \frac{4 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 18^2 \cdot (18 + 3,175)}{2,1 \cdot 10^4 \cdot 0,146^3} + \frac{18^2}{1,0}$$

$$= 706 \text{ cm}^2/\text{kN}$$

$$K = 0,00142 \text{ kN/cm}^2$$

Διατομή ελεύθερου πέλματος (Σχήμα 4.5)

Το κομμάτι της διατομής που εξετάζεται είναι ολόκληρο το κάτω πέλματος και το 1/5 του ύψους του κορμού της, όπως προβλέπει ο κανονισμός για διατομές C.

$$A_{fz} = 0,146 \cdot \left(\frac{17,85}{5} + 6,35 + 1,93 \right) = 1,73 \text{ cm}^3$$

$$y_s = \frac{1}{1,73} \cdot 0,146 \cdot \left(\frac{6,35^2}{2} + 1,93 \cdot 6,35 \right) = 2,74 \text{ cm}$$

$$I_{fz} = 0,146 \cdot \left[\frac{6,35^3}{12} + 6,35 \cdot \left(\frac{6,35}{2} - 2,74 \right)^2 + 1,93 \cdot (6,35 - 2,74)^2 + \frac{17,85}{5} \cdot 2,74^2 \right]$$

$$= 10,887 \text{ cm}^4$$

$$W_{fz1} = \frac{10,887}{2,74} = 3,979 \text{ cm}^4$$

$$W_{fz2} = \frac{10,887}{(6,35 - 2,74)} = 1,1 \text{ cm}^4$$

$$i_{fz} = \sqrt{\frac{10,887}{1,73}} = 2,51 \text{ cm}$$

Δεν υπάρχουν ελκυστήρες μεταξύ των τεγίδων, άρα $L_a = 4,5\text{m}$ το μήκος της τεγίδας.

$$R = \frac{k \cdot L_a^4}{\pi^4 \cdot E \cdot I_{fz}} = \frac{0,00142 \cdot 450^4}{\pi^4 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 10,887} = 2,601$$

$$k_{h0} \approx 0 \quad k_h = \frac{e}{h} = \frac{2,97}{18} = 0,165$$

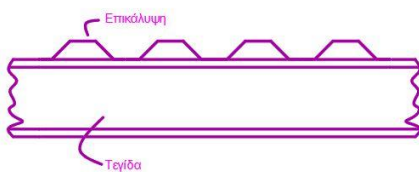
Θεωρώ ότι ο συντελεστής k_{h0} είναι μηδενικός καθώς η κάμψη που υπάρχει είναι μόνο ως προς έναν άξονα, τον κύριο.

Το πλευρικό ισοδύναμο φορτίο είναι: $q_{h,Fd} = k_h \cdot q_{Fd} = 0,165 \cdot 0,75 = 0,124\text{kN/m}$

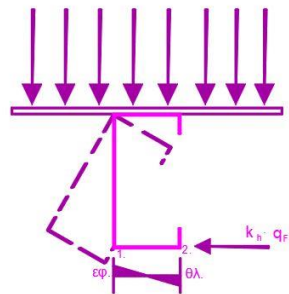
$$M_{0,fz,Ed} = \frac{q_{h,Fd} \cdot L_a^2}{8} = 0,124 \cdot \frac{4,5^2}{8} = 0,314\text{kNm}$$

$$k_R = \frac{1 - 0,0225 \cdot R}{1 + 1,013 \cdot R} = \frac{1 - 0,0225 \cdot 2,601}{1 + 1,013 \cdot 2,601} = 0,259$$

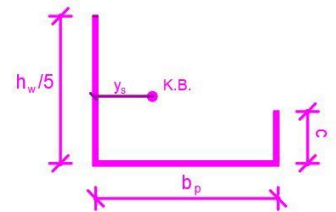
$$M_{fz,Ed} = k_R \cdot M_{0,fz,Ed} = 0,259 \cdot 0,314 = 0,0811\text{kNm} = 8,11\text{kNcm}$$



α)



β)



γ)

Σχήμα 4.5: α) Σύνδεση τεγίδας – επικάλυψης β) παραμόρφωση τεγίδας για φορτίο βαρύτητας γ) διατομή ελεύθερου πέλματος

4.1.7 Έλεγχος τεγίδας για $N_{ed}=0$

Η μέγιστη δρώσα του αμφιέριστου φορέα προκύπτει στο μέσο της τεγίδας:

$$M_{y,Ed} = 0,75 \cdot \frac{4,5^2}{8} = 1,90\text{kNm}$$

- Άνω πέλμα (δεσμευμένο)

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,ed}}{W_{eff,y}} = \frac{190}{25,94} = 7,32 \frac{kN}{cm^2} < \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{23,5}{1,0} = 23,5 \frac{kN}{cm^2}$$

- Κάτω πέλμα (ελεύθερο)

Δυσμενέστερο το σημείο 1 (Σχ. 1.5β), όπου αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις τόσο λόγω M_y , όσο και λόγω M_{fz} .

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} = -\frac{190}{27,86} - \frac{8,11}{3,98} = -8,853 \frac{kN}{cm^2} \text{ (εφελκυστική)}$$

Έλεγχος : $\sigma = 8,853 \text{ kN/cm}^2 < 23,5 \text{ kN/cm}^2$

4.1.8 Έλεγχος τεγίδας για ταυτόχρονη αξονική δύναμη $N_{Ed} = 20 \text{ kN}$

Λόγω της θλιπτικής αξονικής δύναμης N_{Ed} υπάρχουν θλιπτικές τάσεις σε όλη την διατομή, ίσες με:

$$\sigma_N = \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} = \frac{20}{3,16} = 6,32 \frac{kN}{cm^2}$$

4.1.8.1 Έλεγχος διατομής

Εξετάζεται η διατομή στο μέσο της τεγίδας, γιατί εκεί αναπτύσσονται οι μεγαλύτερες ροπές και θεωρείται ότι είναι το δυσμενέστερο σημείο:

- Άνω πέλμα (δεσμευμένο)

$$\begin{aligned} \sigma_{max,Ed} &= \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} = \frac{190}{25,94} + \frac{20}{3,16} = 13,64 \frac{kN}{cm^2} \text{ (θλίψη)} < \frac{23,5}{1,0} \\ &= 23,5 \frac{kN}{cm^2} \end{aligned}$$

- Κάτω πέλμα (ελεύθερο)

Σημείο 1

$$\begin{aligned} \sigma_{max,Ed} &= \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} = -\frac{190}{27,86} + \frac{20}{3,16} - \frac{8,11}{3,98} \\ &= -2,53 \frac{kN}{cm^2} \text{ (εφελκυσμός)} < 23,5 \frac{kN}{cm^2} \end{aligned}$$

Σημείο 2

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} = -\frac{190}{27,86} + \frac{20}{3,16} + \frac{8,11}{1,1} = 6,88 \frac{kN}{cm^2} \text{ (θλίψη)}$$

$$< 23,5 \frac{kN}{cm^2}$$

4.1.8.2 Έλεγχος λυγισμού ελεύθερου πέλματος

Έχω ότι $0 < R = 2,601 < 200$

Για μηδενικό αριθμό ελκυστήρων, είναι:

$$n_1 = 0,414, \quad n_2 = 1,72, \quad n_3 = ,11, \quad n_4 = -0,178$$

$$l_{fz} = n_1 \cdot L_a \cdot (1 + n_2 \cdot R^{n_3})^{n_4} = 0,414 \cdot 4,5 \cdot (1 + 1,72 \cdot 2,601^{1,11})^{-0,178} = 1,36m$$

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^4}{23,5}} = 93,9$$

$$\lambda_{fz} = \frac{l_{fz}/i_{fz}}{\lambda_1} = \frac{135,55/2,26}{93,9} = 0,5754$$

Καμπύλη λυγισμού b (όπως προτείνει ο Ευρωκώδικας) => $\chi_{LT} = 0,849$

Ο έλεγχος θα γίνει στο στήριγμα, όπου το ελεύθερο πέλμα θλίβεται λόγω N_{Ed} ($M_y = 0$, $M_{fz,Ed} = 0$) με τάση $\sigma_N = 6,32 kN/cm^2$.

Στο μέσο της τεγίδας, το ελεύθερο πέλμα εφελκύεται με τάση:

$$\sigma = -6,82 + 6,32 = -0,5 kN/cm^2$$

Εξίσωση ελέγχου (στο στήριγμα):

$$\frac{1}{\chi_{LT}} \cdot \left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} = \frac{1}{0,849} \cdot (0 + 6,32) + 0 = 7,44 \frac{kN}{cm^2} < \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 23,5 kN/cm^2$$

4.1.9 Έλεγχος σε τέμνουσα

Ο έλεγχος σε τέμνουσα αφορά και τις δυο περιπτώσεις $N_{Ed} = 0$ και $N_{Ed} = 20 kN$

$$V_{Ed} = A \cdot L/2 = 0,75 \cdot 4,5/2 = 1,69 kN$$

$$\text{Συντελεστής λυγηρότητας: } \lambda_w = 0,346 \cdot \frac{s_w}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} = 0,346 \cdot \frac{17,85}{0,146} \cdot \sqrt{\frac{23,5}{2,1 \cdot 10^4}} = 1,42$$

Για κορμό χωρίς ενίσχυση στη στήριξη, η οριακή τάση σε διατμητικό λυγισμό:

Οριακή τάση σε διατμητικό λυγισμό: $f_{bv} = 0,67 \cdot \frac{f_{yb}}{\lambda_w^2} = 0,67 \cdot \frac{23,5}{1,42^2} = 7,86 \text{ kN/cm}^2$

Διατμητική δύναμη αντοχής σχεδιασμού: $V_{Rd} = \frac{h_w}{\sin\varphi} \cdot t \cdot \frac{f_{bv}}{\gamma_{M1}} = \frac{17,85}{\sin 90^\circ} \cdot 0,146 \cdot \frac{7,86}{1,0} = 20,49 \text{ kN}$

Έλεγχος:

$$V_{b,Rd} = 20,49 \text{ κN} > 1,69 \text{ κN} = V_{Ed}$$

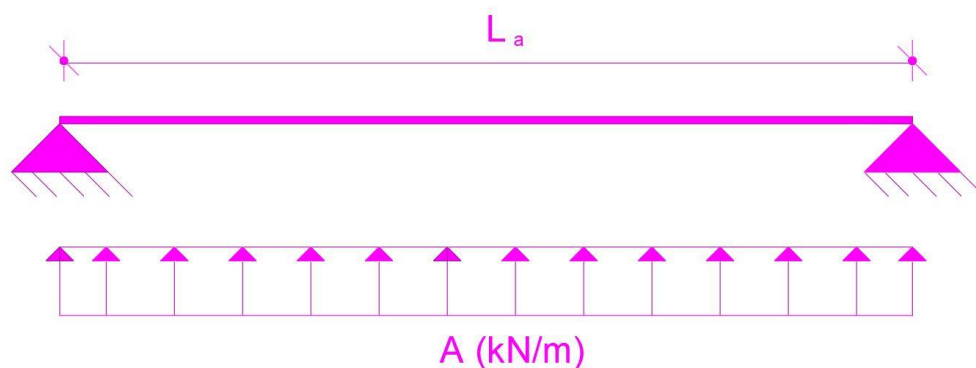
Έλεγχος σε συγκεντρωμένη δύναμη

Έλεγχος σε συγκεντρωμένη δύναμη δεν απαιτείται, επειδή η στήριξη της τεγίδας γίνεται μέσω ειδικού παρεμβλήματος.

4.2 ΦΟΡΤΙΟ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ

4.2.1 Γενικά στοιχεία

Ζητείται ο έλεγχος της τεγίδας της παραγράφου 4.1, όταν καταπονείται από φορτίο αναρρόφησης ανέμου $w_{Ed} = 0,75 \text{ kN/m}$, για τις περιπτώσεις όπου η αξονικά δύναμη είναι: a) $N_{Ed} = 0 \text{ kN}$, b) $N_{Ed} = 20 \text{ kN}$



Σχήμα 4.6 Φόρτιση τεγίδας (λοιπά στοιχεία βλ. σχ. 4.1)

4.2.2. Διατομή Τεγίδας

Όπως στην παράγραφο 4.1.2

4.2.3 Ιδιότητες χάλυβα

Όπως στην παράγραφο 4.1.3

4.2.4 Ενεργός διατομή για θλιπτική δύναμη

Όπως στην παράγραφο 4.1.4

4.2.5 Ενεργός διατομή για καμπτική ροπή M_y

Όπως στην παράγραφο 4.1.5, αλλά έχουμε θλίψη στο πάνω πέλμα και εφελκυσμό στο κάτω, οπότε αντιστρέφονται οι ροπές αντίστασης:

Άνω πέλμα: $W_{eff,o} = 27.863 \text{ cm}^3$

Κάτω πέλμα: $W_{eff,u} = 25,946 \text{ cm}^3$

4.2.6 Εγκάρσια κάμψη ελεύθερου πέλματος

Η σύνδεση τεγίδας με επικάλυψη γίνεται όπως στην παράγραφο 4.1

Από τον πίνακα 3.5 για φορτίο αναρρόφησης, για σύνδεση στο κοίλωμα και όχι στην κορυφή, με θετική τοποθέτηση, δηλαδή το στενό πέλμα του χαλυβδόφυλλου συνδέεται με την τεγίδα και την παραπάνω απόσταση σύνδεσης έχω:

$C_{100} = 1,7 \text{ kNm/m}$ και $b_{T,max} = 40 \text{ mm}$

Οι συντελεστές k_{ba} , k_t , k_{bR} , k_{bT} είναι όπως στο παράδειγμα 1, ενώ για φόρτιση αναρρόφησης $k_A = 1$.

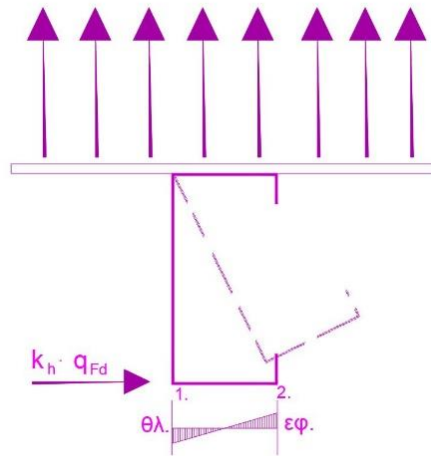
$C_{D,A} = 1,7 \cdot 0,423 \cdot 1,374 \cdot 0,673 \cdot 1 \cdot 0,861 = 0,573 \text{ kNm/m}$

$$C_{D,C} = \frac{\kappa \cdot E \cdot I_{eff}}{s} = \frac{4 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 0,084}{150} = 47,04 \text{ kNm/m}$$

$$C_D = \frac{1}{\frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,C}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,573} + \frac{1}{47,04}} = 0,566 \text{ kNm/m}$$

Κατά την αναρρόφηση, η επικάλυψη έρχεται σε επαφή με την άκρη του πέλματος της τεγίδας οπότε:

$b_{mod} = 2 \cdot a + b = 2 \cdot 63,5/2 + 63,5 = 127 \text{ mm}$



Σχήμα 4.7: Παραμόρφωση τεγίδας για αναρρόφηση ανέμου

$$\frac{1}{K} = \frac{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot h^2 \cdot (h_d + b_{mod})}{E \cdot t^3} + \frac{h^2}{C_D} = \frac{4 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot 18^2 \cdot (18 + 12,7)}{2,1 \cdot 10^4 \cdot 0,146^3} + \frac{18^2}{0,566}$$

$$= 1126,44 \text{ cm}^2/\text{kN}$$

$$K = 0,000888 \text{ kN/cm}^2$$

Διατομή ελεύθερου πέλματος όπως στην παράγραφο 4.1

$$I_{fz} = 10,887 \text{ cm}^4, W_{fz1} = 3,979 \text{ cm}^3, W_{fz2} = 1,1 \text{ cm}^3, i_{fz} = 2,51 \text{ cm}$$

Δεν τοποθετούνται ελκυστήρες μεταξύ των τεγίδων, συνεπώς:

$L_a = 4,5 \text{ m}$, όσο το μήκος της τεγίδας.

$$R = \frac{k \cdot L_a^4}{\pi^4 \cdot E \cdot I_{fz}} = \frac{0,000888 \cdot 450^4}{\pi^4 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 10,887} = 1,631$$

$$f = e + \frac{b}{2} = 2,97 + \frac{6,35}{2} = 6,15 \text{ cm}$$

$$k_h = \frac{f}{h} = \frac{6,15}{18} = 0,341$$

$$q_{h,Fd} = k_h \cdot q_{Fd} = 0,341 \cdot 0,75 = 0,256 \text{ kN/m}$$

$$M_{o,fz,Ed} = \frac{q_{h,Fd} \cdot L_a^2}{8} = \frac{0,256 \cdot 4,5^2}{8} = 0,648 \text{ kNm}$$

$$k_R = \frac{1 - 0,0225 \cdot R}{1 + 1,013 \cdot R} = \frac{1 - 0,0225 \cdot 1,631}{1 + 1,013 \cdot 1,631} = 0,3616$$

$$M_{fz,Ed} = k_R \cdot M_{o,fz,Ed} = 0,3616 \cdot 0,648 = 0,203 \text{ kNm} = 23,45 \text{ kNcm}$$

4.2.7 Έλεγχος τεγίδας για $N_{Ed} = 0$

4.2.7.1 Έλεγχος διατομής στο μέσο

Μέγιστη δρώσα ροπή $M_{y,Ed} = 0,75 \cdot \frac{4,5^2}{8} = 1,90 \text{ kNm}$

- Άνω πέλμα (δεσμευμένο)

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} = -\frac{190}{27,863} = -6,81 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \text{ (εφελκυστική)}$$

Έλεγχος : $6,81 \text{ kN/cm}^2 < f_y/\gamma_{M0} = 23,5/1,0 = 23,5 \text{ kN/cm}^2$

- Κάτω πέλμα (ελεύθερο)

Δυσμενέστερο το σημείο 1, όπου αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις τόσο λόγω M_y , όσο και λόγω M_{fz} (Σχ. 4.7)

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} = \frac{190}{27,863} + \frac{23,45}{3,98} = 13,21 \text{ kN/cm}^2$$

Έλεγχος : $13,21 \text{ kN/cm}^2 < 23,5 \text{ kN/cm}^2$

4.2.7.2 Έλεγχος λυγισμού ελεύθερου πέλματος

$L_0 = 4,5 \text{ m}$

$$R_0 = \frac{K \cdot L_0^4}{\pi^4 \cdot E \cdot I_{fz}} = \frac{0,000888 \cdot 450^4}{\pi^4 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 10,887} = 1,631$$

Λόγω έλλειψης ελκυστήρων και επειδή $0 < R_0 < 200$ τότε το μήκος λυγισμού δίνεται κατευθείαν από τον τύπο:

$$l_{fz} = 0,7 \cdot L_0 \cdot (1 + 13,1 \cdot R_0^{1,6})^{-0,125} = 0,7 \cdot 4,5 \cdot (1 + 13,1 \cdot 1,631^{1,6})^{-0,125} = 2,06 \text{ m}$$

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^4}{23,5}} = 93,9$$

$$\lambda_{fz} = \frac{l_{fz} \cdot i_{fz}}{\lambda_1} = \frac{198 \cdot 2,51}{93,9} = 0,8753$$

Καμπύλη λυγισμού b => $\chi_{LT} = 0,725$

Εξίσωση ελέγχου στο μέσο της τεγίδας:

$$\frac{1}{\chi_{LT}} \cdot \left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} = \frac{1}{0,8753} \cdot \left(\frac{190}{27,86} + 0 \right) + \frac{23,45}{3,98} = 11,20 \frac{kN}{cm^2} < \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 23,5 \frac{kN}{cm^2}$$

4.2.8 Έλεγχος τεγίδας για $N_{Ed} = 20 \text{ kN}$

4.2.8.1 Έλεγχος διατομής

- Άνω πέλμα (δεσμευμένο)

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} = \frac{-190}{27,86} + \frac{20}{3,16} = -0,5 \frac{kN}{cm^2} \text{ (εφελκυσμός)} < \frac{23,5}{1,0}$$

$$= 23,5 \frac{kN}{cm^2}$$

- Κάτω πέλμα (ελεύθερο)

Εξετάζεται μόνο το σημείο 1 που είναι το δυσμενέστερο καθώς θλίβεται λόγω M_y , N και M_{fz} :

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} = \frac{190}{25,94} + \frac{20}{3,16} + \frac{23,45}{3,98}$$

$$= 19,53 \frac{kN}{cm^2} \text{ (εφελκυσμός)} < 23,5 \frac{kN}{cm^2}$$

4.2.8.2 Έλεγχος λυγισμού ελεύθερου πέλματος

Έλεγχος στο σημείο 1 στο μέσο της τεγίδας.

$$\frac{1}{\chi_{LT}} \cdot \left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} = \frac{1}{0,8753} \cdot \left(\frac{190}{25,94} + \frac{20}{3,16} \right) + \frac{23,45}{3,98} = 24,71 \frac{kN}{cm^2}$$

$$> 23,5 \frac{kN}{cm^2}$$

Συνεπώς η τεγίδα δεν επαρκεί.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος μπορούν να τοποθετηθούν ενδιάμεσοι ελκυστήρες.

4.2.9 Έλεγχος σε τέμνουσα

Όπως στην παράγραφο 4.1.9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. Υπολογιστικό φύλλο MS Office Excel

5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η πορεία ανάπτυξης του υπολογιστικού φύλλου Excel, που αποτελεί το βασικό έργο της διπλωματικής εργασίας, με βάση το οποίο εξετάζεται η επάρκεια μιας αμφιέριστης τεγίδας ψυχρής έλασης διατομής C με ακραίες ενισχύσεις. Το εν λόγω υπολογιστικό φύλλο αποτελείται από τα εξής φύλλα εργασίας:

- 1) Πληροφορίες – Εισαγωγή
- 2) Ποιότητες Χάλυβα
- 3) Γεωμετρία & Υλικά
- 4) Ενεργά Πλάτη Θλιπτικής Δύναμης
- 5) Ενεργά Πλάτη Καμπτικής Ροπής
- 6) Εγκάρσια Κάμψη, Ελεύθερο Πέλμα
- 7) Έλεγχοι Φορτίου Βαρύτητας
- 8) Έλεγχοι Φορτίου Αναρρόφησης

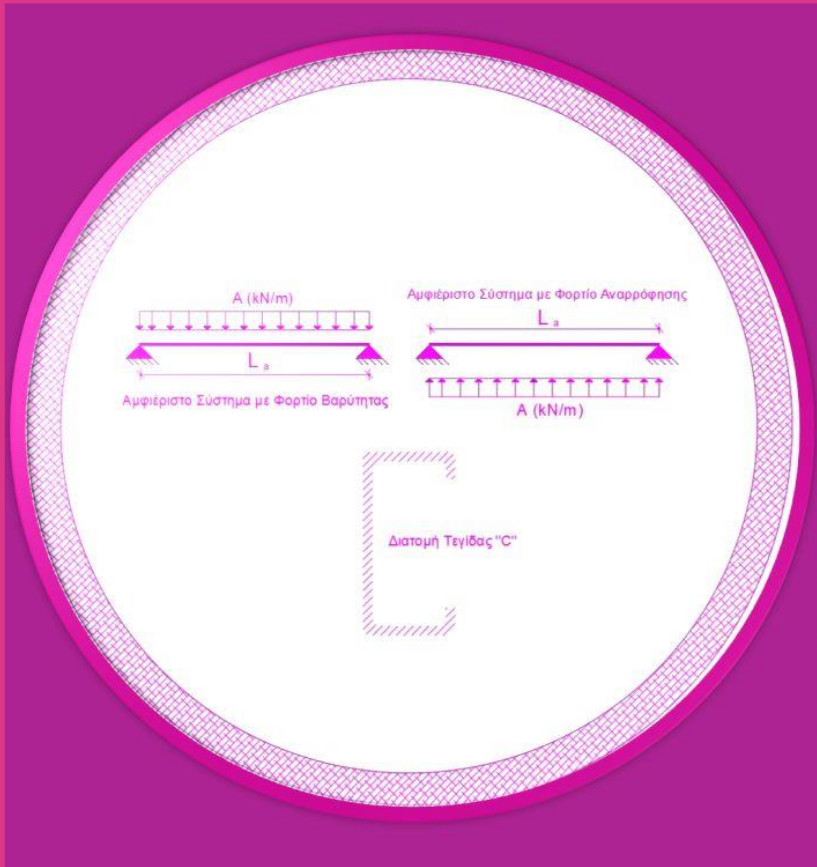
Στα πρώτα δυο φύλλα δεν χρειάζεται κάποια εισαγωγή δεδομένων, καθώς παρουσιάζονται κάποιες συνοπτικές οδηγίες χρήσης και οι ποιότητες χάλυβα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Στα υπόλοιπα φύλλα ο χρήστης εισάγει τα απαραίτητα δεδομένα εκεί που του ζητούνται και στο τελευταίο φύλλο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι απαραίτητη προϋπόθεση είναι η παρακολούθηση όλων των φύλλων εργασίας, καθώς έτσι μπορεί να γίνει πιο κατανοητό το πρόβλημα και να βρεθούν τρόποι αντιμετώπισης σε περιπτώσεις μη επάρκειας. Τα κελιά προς συμπλήρωση για τον χρήστη φέρουν συγκεκριμένο χρώμα, όπου χρειάζεται επιλογή από πίνακα υπάρχει η αντίστοιχη επεξήγηση κλικάροντας στο κελί και ο αντίστοιχος πίνακας. Τα χρώματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατηγοριοποίηση των κελιών είναι τα εξής:

	Κελί συμπλήρωσης δεδομένων
	Κελί τίτλου ενότητας-σχεδίου- επεξήγησης
	Κελί σημαντικού αποτελέσματος
	Κελί αποτελέσματος ελέγχου

Σχήμα 5.1: Χρώματα κελιών

5.2 ΠΡΩΤΟ ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ «ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ - ΕΙΣΑΓΩΓΗ»

Το πρώτο φύλλο εργασίας λειτουργεί ουσιαστικά ως «εξώφυλλο» με μια συνοπτική περιγραφή της εφαρμογής του υπολογιστικού φύλλου, καθώς και κάποιες οδηγίες χρήσης προς τον χρήστη/στρια για την εύκολη συμπλήρωση και κατανόηση των δεδομένων. Δεν χρειάζεται καμία συμπλήρωση στοιχείων.



The diagram illustrates a circular pipe cross-section with a meshed wall. It shows two loading scenarios: a uniformly distributed load A (kN/m) acting downwards on the top half of the pipe, and a uniformly distributed load A (kN/m) acting upwards on the bottom half. The length of the pipe is denoted as L_s . A cross-section of the pipe wall is labeled "Διατομή Τεγίδας 'C'".

<p><i>Εξετάζεται το αμφιέριστο σύστημα του σχήματος, λεπτότοιχης διατομής ψυχρής έλασης "C", στις περιπτώσεις ομοιόμορφου φορτίου βαρύτητας και αναρρόφησης. Τα αποτελέσματα βγίκαν ακολουθώντας το πρότυπο του Ευρωκώδικα EN 1993-1-3 που αφορά τις εν λόγω διατομές.</i></p>									
<p>Οδηγίες</p>									
1.	Τα κελιά που έχουν πικρόλ χρώμα είναι για συμπλήρωση δεδομένων από τον/την χρήστη/στρια. Όπου χρειάζεται υπάρχουν οι κατάλληλοι πίνακες για τη σωστή συμπλήρωση συντελεστών. Παρακάτω δίνεται η περιγραφή κάθε χρώματος κελιού που χρησιμοποιήθηκε.								
2.	Οι αρνητικές τάσεις δηλώνουν εφελκυσμό, ενώ οι θετικές τάσεις δηλώνουν θλίψη.								
3.	Στο φύλλο "Ποιότητες Χάλυβα" παρουσιάζονται οι ποιότητες χάλυβα που μπορεί να διαλέξει ο/η χρήστης/στρια. Δεν χρειάζεται καμία συμπλήρωση κελιού.								
4.	Όπου υπάρχουν έλεγχοι το αποτέλεσμα πρέπει να είναι TRUE για να επαρκούν τα δεδομένα.								
5.	Η αξονική δύναμη εισάγεται με το πρόσημό της, αρνητική όταν είναι εφελκυστική και θετική όταν είναι θλιπτική.								
6.	Τα φορτία εισάγονται πάντα θετικά.								
7.	Κάθε φύλλο εργασίας από το "Γεωμετρία & Υλικά" και μετά έχει κελιά προς συμπλήρωση δεδομένων. Χρειάζεται η ταυτόχρονη παρακολούθηση όλων των φύλλων.								
8.	Παρουσιάζονται δυο περιπτώσεις								
<table border="1" data-bbox="998 1249 1453 1365"> <tr> <td style="background-color: #90EE90;"></td> <td>Κελί συμπλήρωσης δεδομένων</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #E0E0E0;"></td> <td>Κελί τίτλου ενότητας-σχεδίου-επεξήγησης</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #90EE90;"></td> <td>Κελί σημαντικού αποτελέσματος</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #ADD8E6;"></td> <td>Κελί αποτελέσματος ελέγχου</td> </tr> </table>			Κελί συμπλήρωσης δεδομένων		Κελί τίτλου ενότητας-σχεδίου-επεξήγησης		Κελί σημαντικού αποτελέσματος		Κελί αποτελέσματος ελέγχου
	Κελί συμπλήρωσης δεδομένων								
	Κελί τίτλου ενότητας-σχεδίου-επεξήγησης								
	Κελί σημαντικού αποτελέσματος								
	Κελί αποτελέσματος ελέγχου								

5.3 ΔΕΥΤΕΡΟ ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ «ΠΟΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΥΒΑ»

Στο τρίτο υπολογιστικό φύλλο παρουσιάζεται ο πίνακας ποιοτήτων του χάλυβα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τις οποίες παρουσιάζει ο Ευρωκώδικας. Δεν χρειάζεται κάποια συμπλήρωση, ενώ το επόμενο φύλλο συνδέεται με αυτό μέσω του drop down menu για την επιλογή μια από τις εν λόγω ποιότητες.

Table 3.1a: Nominal values of basic yield strength f_{yb} and ultimate tensile strength f_u

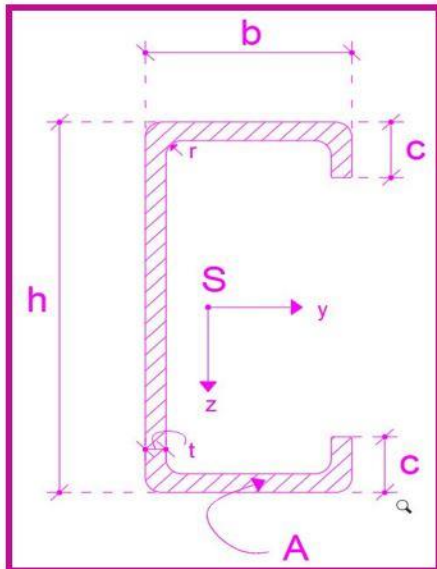
Type of steel	Standard	Grade	f_{yb} kN/cm ²	f_u kN/cm ²		
Hot rolled products of non-alloy structural steels. Part 2 : Technical delivery conditions for non alloy	EN 10025: Part 2	S 235	235.00	360.00		
		S 275	275.00	430.00		
		S 355	355.00	510.00		
Hot rolled products of structural steels. Part3 : Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels.	EN 10025: Part 3	S 275 N	275.00	370.00		
		S 355 N	355.00	470.00		
		S 420 N	420.00	520.00		
		S 460 N	460.00	550.00		
		S 275 NL	275.00	370.00		
		S 355 NL	355.00	470.00		
		S 420 NL	420.00	520.00		
		S 460 NL	460.00	550.00		
Hot rolled products of tructural steels. Part 4 : Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels.	EN 10025 : Part 4	S 275 M	275.00	360.00		
		S 355 M	355.00	450.00		
		S 420 M	420.00	500.00		
		S 460 M	460.00	530.00		
		S 275 ML	275.00	360.00		
		S 355 ML	355.00	450.00		
		S 420 ML	420.00	500.00		
Cold reduced steel sheet of structural quality	ISO 4997	CR 220	220.00	300.00		
		CR 250	250.00	330.00		
		CR 320	320.00	400.00		
Continuous hot dip zinc coated carbon steel sheet of structural quality	EN 10326	S220GD+Z	220.00	300.00		
		S250GD+D	250.00	330.00		
		S280GD+Z	280.00	360.00		
		S320GD+Z	320.00	390.00		
		S350GD+Z	350.00	420.00		
Hot rolled Flat products made of high yield strength steels for cold forming Part 2 : Delivery conditions for thermomechanically rolled steels	EN 10149 : Part 2	S 315 MC	315.00	390.00		
		S 355 MC	355.00	430.00		
		S 420 MC	420.00	480.00		
		S 460 MC	460.00	520.00		
		S 500 MC	500.00	550.00		
		S 550 MC	550.00	600.00		
		S 600 MC	600.00	650.00		
		S 650 MC	650.00	700.00		
	EN 10149: Part 3	S 260 NC	260.00	370.00		
		S 315 NC	315.00	430.00		
		S 355 NC	355.00	470.00		
		S 420 NC	420.00	530.00		
		Colled rolled flat products made of high yield strength micro-alloyed steels for cold forming	EN 10268	H240LA	240.00	340.00
				H280LA	280.00	370.00
H320LA	320.00			400.00		
H360LA	360.00			430.00		
H400LA	400.00			460.00		
Continuouly hot-dip coated strip and sheet of steels with higher yield strength for cold forming	EN 10292	H260LAD	240.00	340.00		
		H300LAD	280.00	370.00		
		H340LAD	320.00	400.00		
		H380LAD	360.00	430.00		
		H420LAD	400.00	460.00		
Continuously hot-dipped coated zinc-aluminium (ZA) coated steel strip and sheet	EN 10326	S220GD+ZA	220.00	300.00		
		S250GD+ZA	250.00	330.00		
		S280GD+ZA	280.00	360.00		
		S320GD+ZA	320.00	390.00		
		S380GD+ZA	350.00	420.00		
Continuously hot-dipped coated aluminium-zinc (AZ) coated steel strip and sheet	EN 10326	S220GD+AZ	220.00	300.00		
		S250GD+AZ	250.00	330.00		
		S280GD+AZ	280.00	360.00		
		S320GD+AZ	320.00	390.00		
		S380GD+AZ	350.00	420.00		
Continuously hot-dipped zinc coated strip and sheet of nuld steel for cold forming	EN 10327	DX51D+Z	140.00	270.00		
		DX52D+Z	140.00	270.00		
		DX53D+Z	140.00	270.00		

κ
7
5
Συντελεστής κ για τον υπολογισμό της αυξημένης τάσεως διαρροής: =7 για έλαση εν ψυχρώ. =5 για διαμόρφωση εν ψυχρώ

1) Minimum values of the yield strength and ultimate tensile strength are not given in the standard. For all steel grades a minimum value of 140N/mm² for yield strength and 270N/mm² for ultimate tensile strength may be assumed

2) The yield strength values given in the names of the materials correspond to transversal tension. The values for longitudinal tension are given in the table.

5.4 ΤΡΙΤΟ ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ «ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ & ΥΛΙΚΑ»



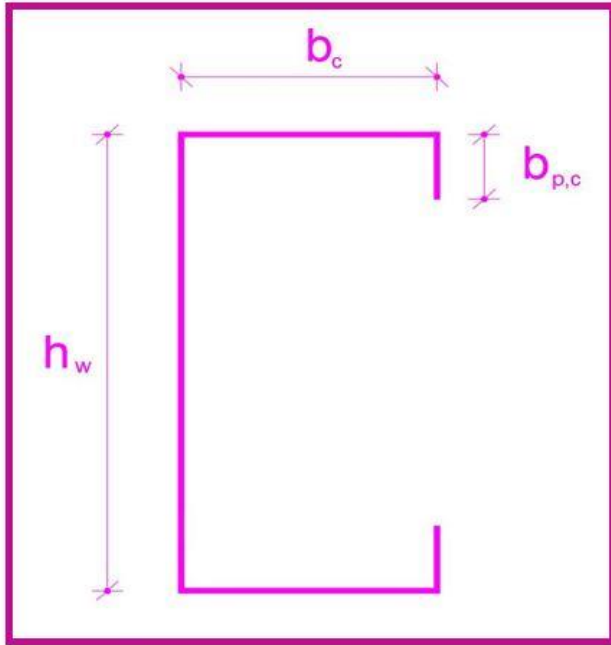
Διατομή "C"

Χαρακτηριστικά Διατομής				
b (cm)	h (cm)	c (cm)	A (cm ²)	I _y (cm ⁴)
6.5	18	2	5.02	252.99
t _{cor} (cm)	r (cm)	φ (Μοίρες)	W _y (cm ³)	i _y (cm)
0.146	0.4	0	28.11	7.095686024
Έλεγχος Στρογγυλεμένων γωνιών			r ≤ 5t & r ≤ 0,10 bp	
Αποτέλεσμα			TRUE	
Επιρροή των καμπυλών προσαρμογής				
δ	Αριθμός καμπύλων προσαρμογής n	Αριθμός επίπεδων στοιχείων m	Άθροισμα εσωτερικών ακτίνων προσαρμογής	Άθροισμα ονομοστικών πλατών επίπεδων στοιχείων
0.019990702	4	5	1.6	34.416
A _g (cm ²)	I _y (cm ⁴)	Τελικά γεωμετρικά δεδομένα		
4.92	242.87	A (cm ²)	I _y (cm ⁴)	W _y (cm ³)
		5.02	252.99	28.11

Σε αυτό το φύλλο γίνεται η εισαγωγή των διαστάσεων της διατομής, με την βοήθεια του κατάλληλου σχήματος. Συγκεκριμένα εισάγονται:

- Το πλάτος b της διατομής
- Το ύψος h της διατομής
- Το μήκος c της ακραίας ενίσχυσης
- Το πάχος t της διατομής
- Η ακτίνα καμπυλότητάς της r
- Καθώς και οι μοίρες φ της ακραίας ενίσχυσης μετρημένες από το κάθετο τμήμα του πέλματος

Με βάση αυτά υπολογίζονται τα μεγέθη: Εμβαδόν A, ροπή αδράνειας I_y ως προς τον ισχυρό άξονα, ροπή αντίστασης W_y, και ακτίνα αδρανείας i_y ολόκληρης της διατομής. Στη συνέχεια, ελέγχεται η επιρροή των στρογγυλεμένων γωνιών, ώστε να εξεταστεί εάν μπορεί να θεωρηθεί μια ισοδύναμη διατομή με επίπεδα στοιχεία και αιχμηρές γωνίες. Ο έλεγχος αυτός θα πρέπει πάντα να ικανοποιείται.



Ισοδύναμη Διατομή με Αιχμηρές Γωνίες

Ισοδύναμη Διατομή		
b_p (cm)	b_{p,c} (cm)	h_w (cm)
6.35	1.93	17.85
Γεωμετρικές συνθήκες		
Έλεγχος ορίων χείλους		$0,2 \leq c/b \leq 0,6$
Αποτέλεσμα	TRUE	
Έλεγχος μέγιστων λόγων πλάτους προς πάχος		
Έλεγχος b/t	TRUE	
Έλεγχος c/t	TRUE	
Έλεγχος h/t	TRUE	

Υπολογίζονται τα νέα μεγέθη της ισοδύναμης διατομής και ελέγχονται με βάση τις γεωμετρικές συνθήκες που ορίζει ο Ευρωκώδικας με βάση τον παρακάτω πίνακα.

Στοιχεία διατομών	Μέγιστη τιμή
	$b/t \leq 50$
	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$
	$b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$
	$b/t \leq 500$
	$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \phi$

Τέλος, με βάση τις ποιότητες του χάλυβα που παρουσιάστηκαν στο φύλλο εργασίας «Ποιότητες Χάλυβα» ο/η χρήστης/ρια επιλέγει την ποιότητα με την βοήθεια του Drop down menu, που συνδέει τα δυο φύλλα. Επιλέγεται ο συντελεστής κ για τον υπολογισμό της αυξημένης τάσεως διαρροής, για έλαση εν ψυχρώ ή διαμόρφωση εν ψυχρώ (σύμφωνα με το δεύτερο υπολογιστικό φύλλο)

Υλικά & Ιδιότητες		
Ποιότητα	f_{yb} kN/cm ²	f_u kN/cm ²
S 235	235.00	360
κ	η	f_a kN/cm ²
7	4	25.0

Συντελεστές	
γ_{M0}	1
γ_{M1}	1
γ_{M2}	1.25

5.5 ΤΕΤΑΡΤΟ ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ «ΕΝΕΡΓΑ ΠΛΑΤΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ»

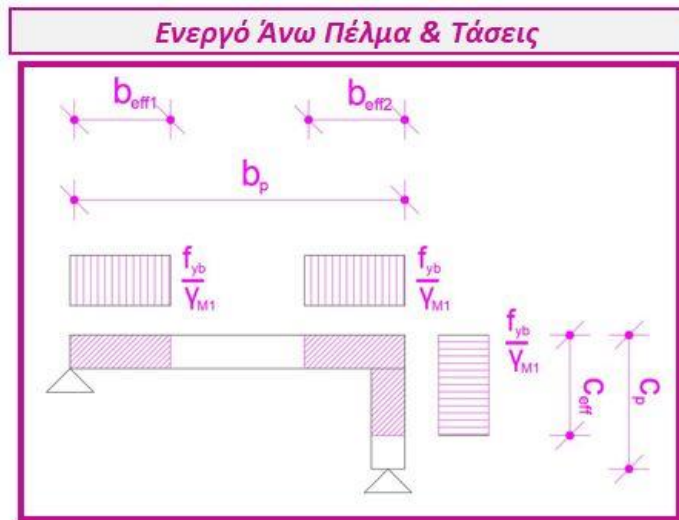
Στο φύλλο εργασίας αυτό υπολογίζεται το ενεργό πλάτος της διατομής στην περίπτωση που καταπονείται μόνο από θλιπτική δύναμη και όχι από καμπτική ροπή. Η διατομή θλίβεται ολόκληρη και για αυτό υπολογίζονται τα ενεργά πλάτη σε όλα τα επίπεδα στοιχεία από τα οποία αποτελείται και λόγω συμμετρίας ότι ισχύει για το πάνω μισό θα ισχύει και για το κάτω.

Φορτία Βαρύτητας & Αναρρόφησης Ανέμου	
Δεδομένα	
E (Mpa)	210000
ϵ	1.00
b_p (cm)	6.35
$b_{p,c}$ (cm)	1.93
hw (cm)	17.85
t (cm)	0.146
Λόγος Poisson ν	0.3

Εσωτερικά Θλιβόμενα Στοιχεία	
Table 4.1: Internal compression elements	
Stress distribution (compression positive)	Effective ^a width b_{eff}
	$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$ $b_{c1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{c2} = 0,5 b_{eff}$
	$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$ $b_{c1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{c2} = b_{eff} - b_{c1}$
	$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho \cdot b = \rho \cdot \bar{b} \cdot (1 - \psi)$ $b_{c1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{c2} = 0,6 b_{eff}$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1 $1 > \psi > 0$ 0 $0 > \psi > -1$ -1 $\frac{E \sigma_1}{\sigma_2} \cdot 1 > \psi > -3 \frac{E \sigma_1}{\sigma_2}$
Buckling factor k_{σ}	4,0 8,2 / (1,05 + ψ) 7,81 7,81 - 6,29 ψ + 9,78 ψ^2 23,9 5,98 (1 - ψ) ²

Αρχικά παρουσιάζονται κάποιο σταθερά δεδομένα που ισχύουν για τον χάλυβα, όπως το μέτρο ελαστικότητάς του E, ο λόγος Poisson ν και ο συντελεστής ϵ , καθώς και οι τελικές διαστάσεις της διατομής από το προηγούμενο φύλλο εργασίας. Με βάση τον πίνακα 3.1 υπολογίζεται αρχικά το ενεργό πλάτος του πάνω πέλματος, το οποίο θεωρείται εσωτερικά θλιβόμενο στοιχείο, αφού πρώτα συμπληρωθεί ο συντελεστής $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ από τον/την χρήστη/στρια.

Πέλιμα	
Συντελεστής ψ	1
Συντελεστής κύρτωσης k_{σ}	4
Λυγηρότητα λ_p	0.7662
Συντελεστής ρ	0.93
b_{eff}	5.91
b_{eff1}	2.96
b_{eff2}	2.96



Στη συνέχεια υπολογίζεται το ενεργό πλάτος της ακραίας ενίσχυσης όπως ορίζει ο Ευρωκώδικας EN 1993 1-3 για τις ακραίες ενισχύσεις. Με βάση τον λόγο $b_{p,c}/b_p$ υπολογίζεται ο συντελεστής κύρτωσης k_{σ} , η λυγηρότητα λ_p και τέλος ο συντελεστής ρ , ο οποίος θα πολλαπλασιαστεί με το μήκος της ενίσχυσης για να βρεθεί το ενεργό μήκος της.

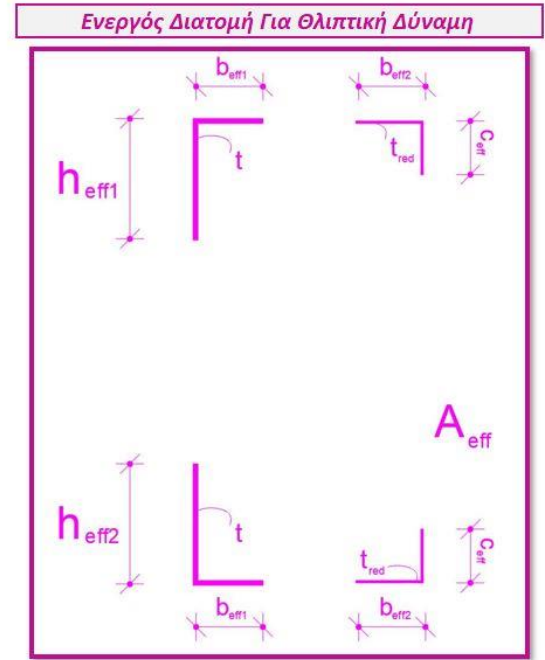
Λόγω των ενεργών αυτών πλατών, η διατομή αλλάζει διαστάσεις με αποτέλεσμα να μετατοπίζεται το κέντρο βάρους της. Για το λόγο αυτό υπολογίζεται το νέο κέντρο βάρους και τα καινούργια αδρανειακά χαρακτηριστικά.

Υπολογίζεται η δυσκαμψία που προσφέρει η ακραία ενίσχυση, η οποία προσομοιάζεται με αυτήν ενός ελατηρίου, ώστε να βρεθεί η κρίσιμη ελαστική τάση, η ανοιγμένη λυγηρότητα λ και τέλος ο μειωτικός συντελεστής χ , για το μειωμένο πάχος και εμβαδόν της ακραίας ενίσχυσης. Στην περίπτωση που ο συντελεστής χ είναι μικρότερος της μονάδας, επιχειρείται μια επαναληπτική διαδικασία για τον προσδιορισμό ενός πιο ακριβή συντελεστή, η οποία σταματάει εάν η διαφορά των συντελεστών $\chi_{n-1} - \chi_n$ διαφέρει λιγότερο από 5%.

Ενίσχυση	
Λόγος $b_{p,c}/b_p$	0.303
Συντελεστής κύρτωσης k_{σ}	0.5
Λυγηρότητα λ_p	0.657
Συντελεστής ρ	1
c_{eff} (cm)	1.93
A_s (cm ²)	0.713
Νέα Θέση Κέντρου Βάρους	
e_z (cm)	0.380
e_y (cm)	0.895
I_s (cm ⁴)	0.245
k_f	1
Δυσκαμψία ελατηρίου K (kN/cm ²)	0.0186852
$\sigma_{cr,s}$ (kN/cm ²)	27.516
Ανοιγμένη λυγηρότητα λ	0.924
Μειωτικός συντελεστής χ	0.802
Επαναληπτική Διαδικασία για $\chi < 1$	
$\lambda_{p,red}$	0.828
χ	0.872
$\lambda_{p,red}$	0.863
χ	0.846
$\lambda_{p,red}$	0.850
χ	0.855
$\lambda_{p,red}$	0.855
χ	0.852
$A_{s,red}$ (cm ²)	0.607
t_{red} (cm)	0.12

Τέλος υπολογίζεται και το ενεργό πλάτος του κορμού, με παρόμοια διαδικασία όπως στο πέλμα, που αποτελεί εσωτερικά θλιβόμενο στοιχείο. Με τον τρόπο αυτό έχουν υπολογιστεί όλα τα ενεργά πλάτη της διατομής και τα καινούργια αδρανειακά χαρακτηριστικά της.

Κορμός	
ψ	1
Συντελεστής κύρτωσης k_{σ}	4
Λυγρότητα λ_{ρ}	2.15
Συντελεστής ρ	0.417
h_{eff}	7.45
h_{eff1}	3.72
h_{eff2}	3.72
A_{eff} (cm)	3.16
$N_{c,Rd}$	74.4



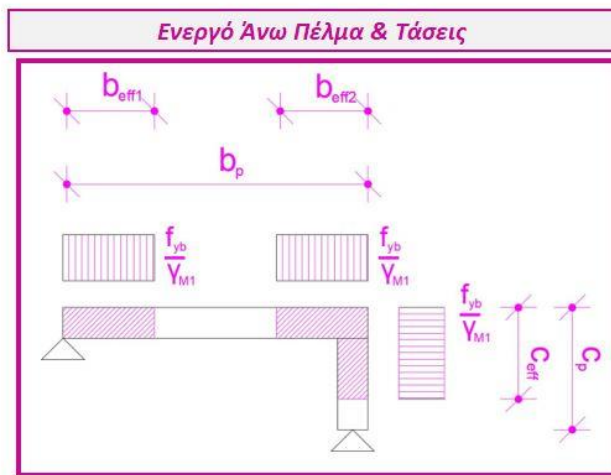
5.6 ΠΕΜΠΤΟ ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ «ΕΝΕΡΓΑ ΠΛΑΤΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ»

Ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με αυτής της παραγράφου 5.5, με τη διαφορά ότι στην περίπτωση καμπτικής ροπής, έχω στο κάτω πέλμα εφελκυσμό και στο πάνω πέλμα θλίψη, στο οποίο υπολογίζονται και τα ενεργά πλάτη.

Φορτία Ανεμοπίεσης & Αναρρόφησης Ανέμου	
Δεδομένα	
E (Μpa)	210000
Μήκος τεγίδων L (m)	4.5
ϵ	1.00
b_p (cm)	6.35
$b_{p,c}$ (cm)	1.93
hw (cm)	17.85
t (cm)	0.146
Λόγος Poisson ν	0.3

Εσωτερικά Θλιβόμενα Στοιχεία	
Table 4.1: Internal compression elements	
Stress distribution (compression positive)	Effective ^a width b_{eff}
	$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{c1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{c2} = 0,5 b_{eff}$
	$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{c1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{c2} = b_{eff} - b_{c1}$
	$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{c1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{c2} = 0,6 b_{eff}$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1 $1 > \psi > 0$ 0 $0 > \psi > -1$ -1 $\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 1 > \psi \geq -3(\frac{\sigma_2}{\sigma_1})$
Buckling factor k_{σ}	4,0 $8,2 / (1,05 + \psi)$ 7,81 $7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$ 23,9 $5,98 (1 - \psi)^2$

Πέλιμα	
Συντελεστής ψ	1
Συντελεστής κύρτωσης k_{α}	4
Λυγηρότητα λ_p	0.7662
Συντελεστής ρ	0.93
b_{eff}	5.91
b_{eff1}	2.96
b_{eff2}	2.96

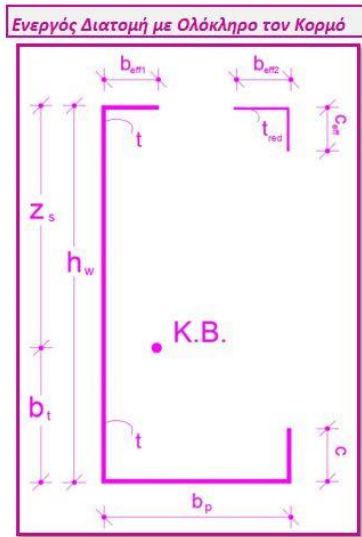


Υπολογίζονται με την ίδια διαδικασία τα ενεργά πλάτη στο πέλιμα, στην ακραία ενίσχυση, η νέα θέση του κέντρου βάρους, λόγω μετατόπισής του από τα ενεργά πλάτη, η δυσκαμψία που προσφέρει η ενίσχυση, η οποία προσομοιάζεται με αυτήν ενός ελατηρίου, η κρίσιμη ελαστική τάση, η ανηγμένη λυγηρότητα και τέλος ο μειωτικός συντελεστής χ . Ακολουθείται η ίδια επαναληπτική διαδικασία εάν βρεθεί ότι ο μειωτικός συντελεστής χ είναι μικρότερος της μονάδας και τέλος υπολογίζεται το μειωμένο πάχος και το μειωμένο ενεργό εμβαδόν.

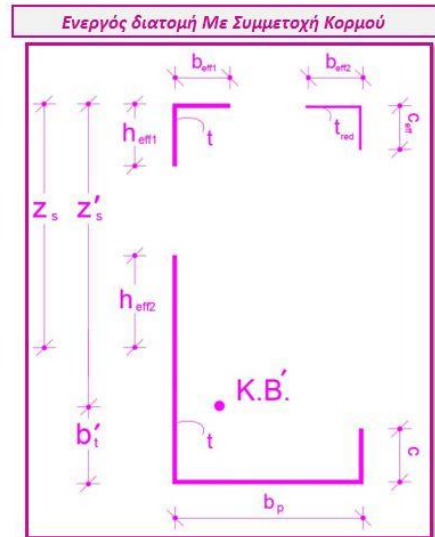
Στη συνέχεια υπολογίζεται το ενεργό πλάτος του κορμού, με βάση τις τάσεις της νέας μετατόπισης, που οδηγούν στον υπολογισμό του συντελεστή ψ . Έπειτα βρίσκεται εκ νέου το κέντρο βάρους της διατομής με τα τελικά ενεργά μεγέθη.

Στο τέλος παρουσιάζονται τα τελικά αδρανειακά ενεργά μεγέθη της διατομής για τις δυο ξεχωριστές περιπτώσεις φόρτισης, για φορτίο δηλαδή βαρύτητας και για φορτίο αναρρόφησης. Η ουσιαστική διαφορά τους έγκειται στις αντίστροφες ροπές αντιστάσεως για το κάτω και το πάνω πέλιμα.

Ενίσχυση	
Λόγος $b_p \cdot c / b_p$	0.303
Συντελεστής κύρτωσης k_{α}	0.50
Λυγηρότητα λ_p	0.657
Συντελεστής ρ	1.00
c_{eff} (cm)	1.93
A_s (cm ²)	0.713
Νέα Θέση Κέντρου Βάρους	
e_z (cm)	0.3802
e_g (cm)	0.895
I_s (cm ⁴)	0.245
k_f	0
Δυσκαμψία ελατηρίου K (kN/cm ²)	0.0258
$\sigma_{cr,s}$ (kN/cm ²)	32.4
Ανηγμένη λυγηρότητα λ	0.852
Μειωτικός συντελεστής χ	0.854
Επαναληπτική Διαδικασία για $\chi < 1$	
$\lambda_{p,red}$	0.787
χ	0.901
$\lambda_{p,red}$	0.809
χ	0.885
$\lambda_{p,red}$	0.802
χ	0.890
$\lambda_{p,red}$	0.804
χ	0.889
$A_{s,red}$ (cm ²)	0.634
t_{red} (cm)	0.13



Κορμός	
ψ	-0.9440
Συντελεστής κύρτωσης k_{σ}	22.463
Λυγηρότητα λ_p	0.9085
Συντελεστής ρ	0.964
heff (cm)	8.85
heff1 (cm)	2.98
heff2 (cm)	5.87



Νέα Θέση Κέντρου Βάρους	
Νέο Εμβαδόν A (cm ²)	4.88
z_s (cm)	9.18
bt (cm)	8.67

Γεωμετρικά & Αδρανειακά Μεγέθη Ενεργού Διατομής Για Φορτίο Ανεμοπίεσης	
Εμβαδόν A' (cm ²)	4.83
z_s' (cm)	9.24
b_i' (cm)	8.61
Ροπή Αδράνειας I (cm ⁴)	239.870
Ροπή Αντίστασης Άνω Πέλματος W _α (cm ³)	25.946
Ροπή Αντίστασης Κάτω Πέλματος W _κ (cm ³)	27.863

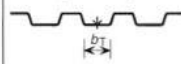

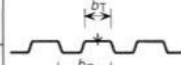
Γεωμετρικά & Αδρανειακά Μεγέθη Ενεργού Διατομής Για Φορτίο Αναρρόφησης Ανέμου	
Εμβαδόν A' (cm ²)	4.83
z_s' (cm)	9.24
b_i' (cm)	8.61
Ροπή Αδράνειας I (cm ⁴)	239.870
Ροπή Αντίστασης Άνω Πέλματος W _α (cm ³)	27.863
Ροπή Αντίστασης Κάτω Πέλματος W _κ (cm ³)	25.946

Τα σχήματα που παρουσιάζονται ισχύουν για το φορτίο βαρύτητας, το οποίο δημιουργεί εφελκυσμό στο κάτω πέλμα και θλίψη στο άνω, στο οποίο βρίσκονται και τα ενεργά πλάτη. Για φορτίο αναρρόφησης οι υπολογισμοί είναι παρόμοιοι με τη διαφορά ότι αντιστρέφεται η θλίψη και ο εφελκυσμός, άρα και οι ροπές αντίστασης.

5.7 ΈΚΤΟ ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ «ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΑΜΨΗ, ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΠΕΛΜΑ»

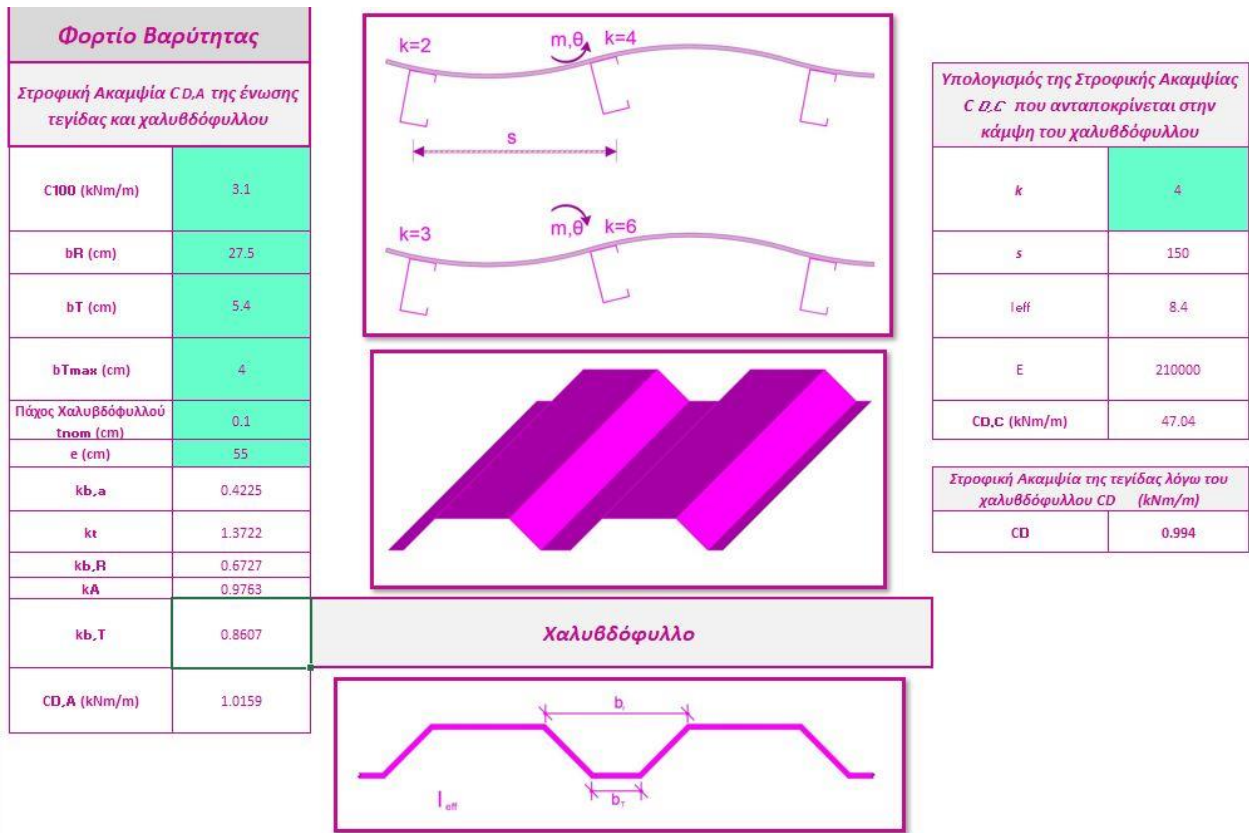
Δεδομένα		
Φορτίο ανεμοπίεσης q_{ed} (kN/m)	0.75	TRUE
Φορτίο αναρρόφησης q_{ed} (kN/m)	0.75	TRUE
Positioning of Sheeting: Positive = TRUE Negative = FALSE	TRUE	
Ροπή Αδράνειας Χαλυβδόφυλλου I_{eff} (cm ⁴ /m)	8.4	
L_a (cm)	450	
b_p (cm)	6.35	
$b_{p,c}$ (cm)	1.93	
h_w (cm)	17.85	
t (cm)	0.146	
b_a (cm)	6.5	
e (cm) Κ.Δ.	2.97	
Απόσταση Τεγίδων s (cm)	150	
E (Mpa)	210000	
ε	1.00	
Λόγος Poisson ν	0.3	

Table 10.3: Rotation coefficient C_{100} for trapezoidal steel sheeting

Positioning of sheeting		Sheet fastened through		Pitch of fasteners		Washer diameter [mm]	C_{100} [kNm/m]	$b_{L,min}$ [mm]
Positive 1)	Negative 1)	Trough	Crest	$e = b_H$	$e = 2b_H$			
For gravity loading:								
×		×		×		22	5,2	40
×		×			×	22	3,1	40
	×		×	×		K_s	10,0	40
	×		×		×	K_s	5,2	40
	×	×		×		22	3,1	120
	×	×			×	22	2,0	120
For uplift loading:								
×		×		×		16	2,6	40
×		×			×	16	1,7	40
Key: b_H is the corrugation width; b_L is the width of the sheeting flange through which it is fastened to the purlin.								
K_s indicates a steel saddle washer as shown below with $t \geq 0,75$ mm						Sheet fastened: - through the trough: 		
						- through the crest: 		
The values in this table are valid for:								
- sheet fastener screws of diameter: $\phi = 6,3$ mm;								
- steel washers of thickness: $t_s \geq 1,0$ mm.								
1) The position of sheeting is positive when the narrow flange is on the purlin and negative when the wide flange is on the purlin.								

Στο φύλλο αυτό εξετάζεται η στροφική δυσκαμψία που προσφέρει η σύνδεση της τεγίδας και του χαλυβδόφυλλου, που λόγω αυτής ασκείται στο ελεύθερο πέλμα ένα πλευρικό φορτίο και τελικά μια πλευρική ροπή $M_{fz,Ed}$, η οποία επιδρά στους τελικούς ελέγχους αντοχής της τεγίδας.

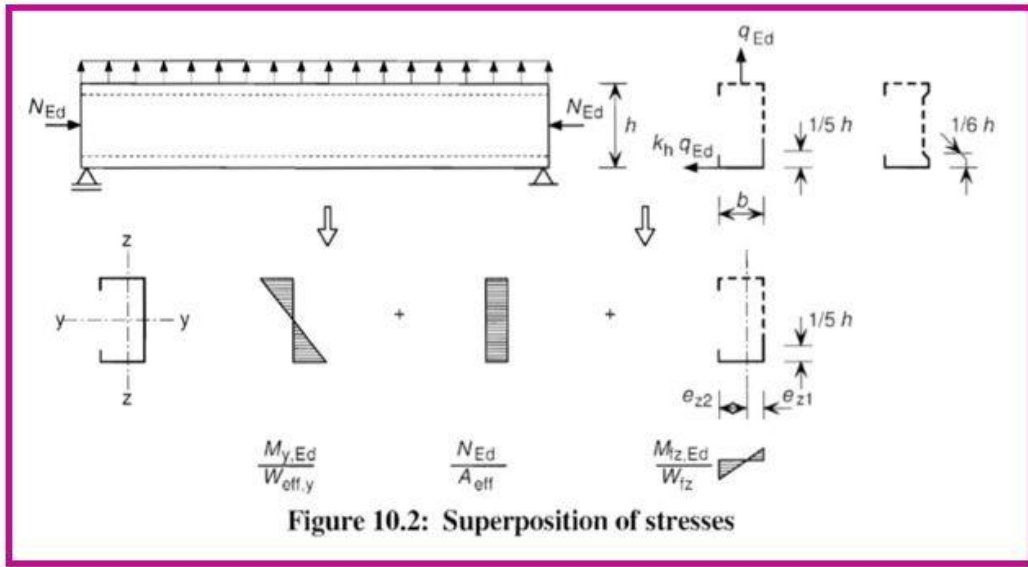
Για τους υπολογισμούς των συντελεστών που θα οδηγήσουν στην εύρεση της στροφικής δυσκαμψίας ο/η χρήστης/στρια πρέπει να δώσει σαν δεδομένα το φορτίο, είτε αναρρόφησης είτε βαρύτητας, προτείνεται ωστόσο να δοθούν και στα δυο οι ίδιες τιμές για να γίνει στο τέλος η σύγκριση τότε η τεγίδα επαρκεί ή όχι καλύτερα, η ροπή αδρανείας του χαλυβδόφυλλου, το μήκος της τεγίδας, καθώς και η τοποθεσία του χαλυβδόφυλλου, θετική ή αρνητική, δηλαδή εάν συνδέεται με την τεγίδα η μικρή πλευρά του χαλυβδόφυλλου ή η μεγάλη αντίστοιχα.



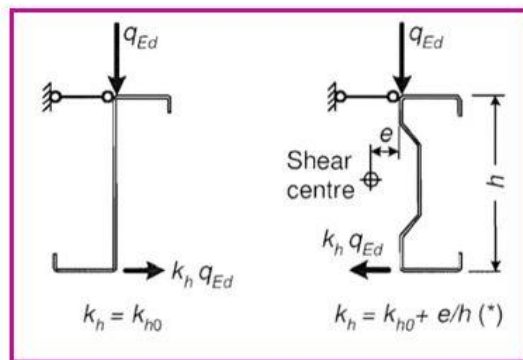
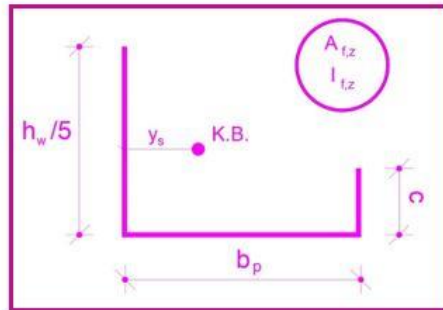
Επιλέγεται λοιπόν αρχικά από τον πίνακα 3.5 η τιμή του συντελεστή C₁₀₀, εισάγονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του χαλυβδόφυλλου και υπολογίζεται η στροφική δυσκαμψία της σύνδεσης μεταξύ της επικάλυψης και της τεγίδας. Έπειτα συμπληρώνεται ο συντελεστής k που εξαρτάται από την θέση της τεγίδας, όπως φαίνεται στο σχήμα και υπολογίζεται η στροφική δυσκαμψία που ανταποκρίνεται στην κάμψη του χαλυβδόφυλλου και τέλος η συνολική στροφική δυσκαμψία του χαλυβδόφυλλου.

Στη συνέχεια υπολογίζεται η πλευρική ροπή λόγω του πλευρικού φορτίου που ασκείται στο ελεύθερο πέλμα της τεγίδας, από την στρέψη και την πλευρική κάμψη. Από τον Ευρωκώδικα θεωρούμε ότι στον υπολογισμό της ροπής αντίστασης του ελεύθερου πέλματος συνεισφέρει και το 1/5 του κορμού της διατομής, οπότε υπολογίζεται το κέντρο βάρους του σχήματος αυτού και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του. Τα δυο κρίσιμα σημεία που μας ενδιαφέρουν είναι το σημείο 1 που βρίσκεται κάτω αριστερά της διατομής και το αντίστοιχο κάτω δεξιά σημείο 2. Όπως ορίζει ο Ευρωκώδικας υπολογίζεται το πλευρικό φορτίο και μετά η αρχική πλευρική ροπή η οποία πολλαπλασιάζεται με τον διορθωτικό συντελεστή k_R για να βρεθεί η τελική πλευρική ροπή, που θα χρησιμοποιηθεί στους ελέγχους.

Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθείται και για το φορτίο αναρρόφησης, με την μόνη διαφορά στη συμπλήρωση κάποιων συντελεστών.



Στρεπτοκαμπτικός Έλεγχος Αντοχής της Διατομής	
<i>Διατομή Ελεύθερου Πέλματος (πέλαμα και 1/5 κορμού)</i>	
$A_{f,z}$ (cm ²)	1.73
y_s (cm)	2.74
$I_{f,z}$ (cm ⁴)	10.887
Ακτίνα αδράνειας i_{fz} (cm)	2.51
W_{fz1} (αριστερά) (cm ³)	3.979
W_{fz2} (δεξιά) (cm ³)	1.100
L_a (cm)	450.000
R	2.601
kh_0	0
kh	0.165
Μετέπειτα φορτίο λόγω στροφής και κάμψης $q_{h,ed}$ (kN/m)	0.124
Αρχική μετέπειτα ροπή χωρίς ελατήριο $M_{0,fz}$ (kNm)	0.313
κR	0.2590
$M_{fz,Ed}$ (kNm)	0.0811



Φορτίο Αναρρόφησης	
Στροφική Ακαμψία CD,A της ένωσης τεγίδας και χαλυβδόφυλλου	
C100 (kNm/m)	1.7
bR (cm)	27.5
bT (cm)	5.4
bTmax (cm)	4
Πάχος Χαλυβδόφυλλου tnom (cm)	0.1
e (cm)	55
kb,a	0.4225
kt	1.3722
kb,R	0.6727
kA	1.00
kb,T	0.8607
CD,A (kNm/m)	0.571

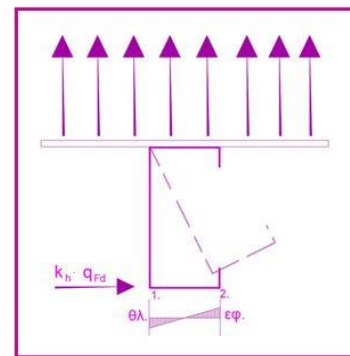
Υπολογισμός της Στροφικής Ακαμψίας C z.C που ανταποκρίνεται στην κάμψη του χαλυβδόφυλλου

k	4
s	150
l _{eff}	8.4
E	210000
CD,C (kNm/m)	47.04

Στροφική Ακαμψία της τεγίδας λόγω του χαλυβδόφυλλου CD (kNm/m)	
CD	0.564

Υπολογισμός Μετέπειτα Ακαμψίας 1/K (cm²/kN)

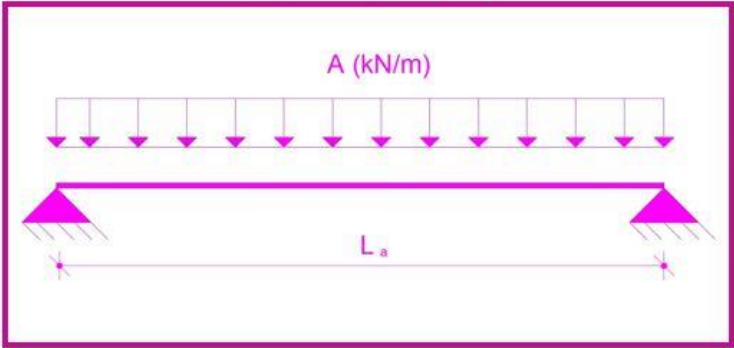
Ο κορμός της τεγίδας έρχεται σε επαφή με την επικάλυψη;	FALSE
a (cm)	3.177
b _{mod} (cm)	12.708
1/K (cm ² /kN)	1128.79
K (kN/cm ²)	0.00089



Στρεπτοκαμπτικός Έλεγχος Αντοχής της Διατομής

Διατομή Ελεύθερου Πέλματος (πέλαμα και 1/5 κορμού)	
Af,z (cm ²)	1.73
ys (cm)	2.74
I _{f,z} (cm ⁴)	10.887
Ακτίνα αδράνειας ifz (cm)	2.51
Wfz1 (Αριστερά) (cm ³)	3.979
Wfz2 (Δεξιά) (cm ³)	1.100
La (cm)	450.000
R	1.631
kh0	0.000
kh	0.342
Πλευρικό φορτίο λόγω στροφής και κάμψης qh,ed (kN/m)	0.256
Αρχική πλευρική ροπή χωρίς ελατήριο M0,fz (kNm)	0.648
κR	0.3616
Mfz,Ed (kNm)	0.2345

5.8 ΈΒΔΟΜΟ ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ «ΕΛΕΓΧΟΙ ΦΟΡΤΙΟΥ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ»

Φορτίο Βαρύτητας	Δεδομένα	
	A (kN/m)	0.75
	La (m)	450
	Ροπή Αντίστασης Άνω Πέλματος Wα (cm ³)	25.946
	Ροπή Αντίστασης Κάτω Πέλματος Wκ (cm ³)	27.863
	Wfz1 (Αριστερά) (cm ³)	3.979
	Wfz2 (Δεξιά) (cm ³)	1.100
	Mfz,Ed (kNcm)	8.114
	R	2.601

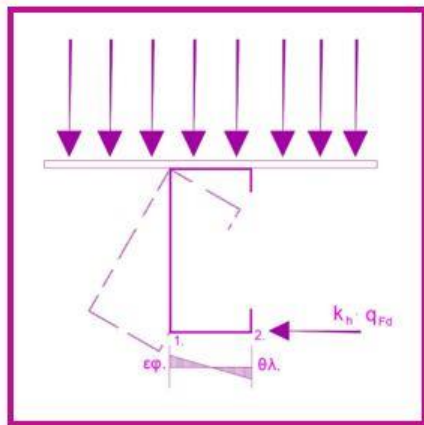
Στο φύλλο εργασίας αυτό πραγματοποιούνται οι έλεγχοι επάρκειας της διατομής με βάση τα μεγέθη που έχουν υπολογιστεί και τα οποία παρουσιάζονται μαζί με το αμφιέριστο σύστημα για φορτίο βαρύτητας μόνο.

Αρχικά πραγματοποιούνται οι έλεγχοι για μηδενική αξονική δύναμη. Υπολογίζεται η μέγιστη τάση που ασκείται στο πάνω και στο κάτω πέλμα και συγκρίνεται με την επιτρεπόμενη. Εξετάζεται διαφορετικά το πάνω και το κάτω πέλμα, γιατί στο κάτω έχω την επίδραση της πλευρικής ροπής, διαφορετική για τα σημεία 1 και 2. Δυσμενέστερο σημείο είναι το σημείο 1 καθώς σε αυτό έχω εφελκυσμό και λόγω καμπτικής ροπής M_y και λόγω πλευρικής ροπής M_{fz1} .

Έπειτα γίνεται ο έλεγχος και για ύπαρξη αξονική δύναμης, τα αποτελέσματα του οποίου είναι τα ίδια εάν συμπληρωθεί $N_{Ed} = 0$. Υπολογίζονται πάλι οι μέγιστες τάσεις και συγκρίνονται με τις επιτρεπόμενες στα δυο πέλματα. Στο κάτω πέλμα εξετάζονται και τα δυο σημεία γιατί δεν ξέρουμε πιο από τα δυο είναι δυσμενέστερο και έχει μεγαλύτερη κατά απόλυτη τιμή τάση που του ασκείται.

Τελευταίος έλεγχος είναι αυτός του λυγισμού του ελεύθερου πέλματος. Σε περιπτώσεις θλίψης του κάτω ελεύθερου πέλματος κρίνεται ιδιαίτερα κρίσιμος έλεγχος καθώς λόγω του πλευρικού φορτίου δημιουργείται παραπάνω ένταση. Αυτό σε περιπτώσεις φορτίου αναρρόφησης που το κάτω πέλμα θλίβεται.

Μηδενική Αξονική $N_{ed}=0$	
Μέγιστη Δρώσα Ροπή $M_{y,Ed}$ (kNcm)	189.84375
<i>Άνω Πέλμα (δεσμευμένο)</i>	
$\sigma_{max,Ed}$ (kN/cm ²)	7.316870139
Έλεγχος $\sigma_{max,Ed} < f_{y/\gamma M}$	TRUE
<i>Κάτω Πέλμα (ελεύθερο)</i>	
$\sigma_{max,Ed}$ (kN/cm ²) (εφελκυστική)	-8.853
Έλεγχος $\sigma_{max,Ed} < f_{y/\gamma M}$	TRUE



Μη Μηδενική Αξονική N_{ed}	
N_{ed} (kN)	20
σ_N (kN/cm) (θλιπτικές τάσεις)	6.32
<i>Άνω Πέλμα (δεσμευμένο)</i>	
$\sigma_{max,Ed}$ (kN/cm ²) (θλιπτική)	13.64
Έλεγχος $\sigma_{max,Ed} < f_{y/\gamma M}$	TRUE
<i>Κάτω Πέλμα (ελεύθερο)</i>	
<i>Σημείο 1</i>	
$\sigma_{max,Ed}$ (kN/cm ²)	-2.53
Έλεγχος $\sigma_{max,Ed} < f_{y/\gamma M}$	TRUE
<i>Σημείο 2</i>	
$\sigma_{max,Ed}$ (kN/cm ²)	6.88
Έλεγχος $\sigma_{max,Ed} < f_{y/\gamma M}$	TRUE

Συντελεστές για φορτίο βαρύτητας και 0,1,2,3,4 ελκυστήρες

Table 10.2a : Coefficients η_i for down load with 0, 1, 2, 3, 4 anti-sag bars

Situation	Anti sag-bar Number	η_1	η_2	η_3	η_4
End span	0	0.414	1.72	1.11	-0.178
Intermediate span		0.657	8.17	2.22	-0.107
End span	1	0.515	1.26	0.868	-0.242
Intermediate span		0.596	2.33	1.15	-0.192
End and intermediate span	2	0.596	2.33	1.15	-0.192
End and intermediate span	3 and 4	0.694	5.45	1.27	-0.168

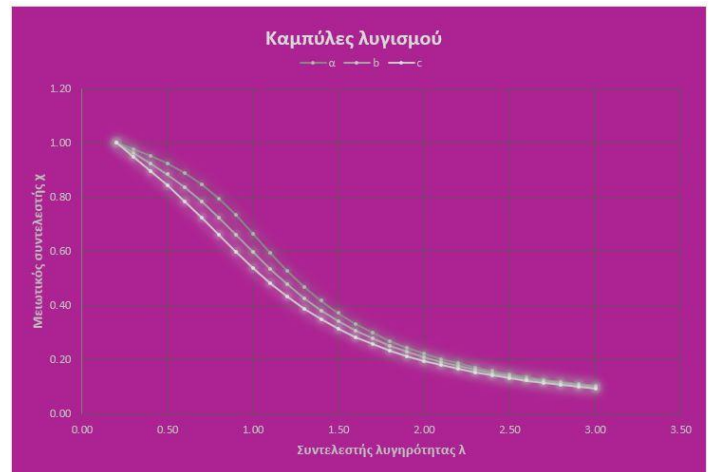
Table 10.2b : Coefficients η_i for uplift load with 0, 1, 2, 3, 4 anti-sag bars

Situation	Anti sag-bar Number	η_1	η_2	η_3	η_4
Simple span	0	0.694	5.45	1.27	-0.168
End span		0.515	1.26	0.868	-0.242
Intermediate span		0.306	0.232	0.742	-0.279
Simple and end spans	1	0.800	6.75	1.49	-0.155
Intermediate span		0.515	1.26	0.868	-0.242
Simple span	2	0.902	8.55	2.18	-0.111
End and intermediate spans		0.800	6.75	1.49	-0.155
Simple and end spans	3 and 4	0.902	8.55	2.18	-0.111
Intermediate span		0.800	6.75	1.49	-0.155

Υπολογίζεται λοιπόν το μήκος λυγισμού του ελεύθερου πέλματος όπως ορίζει ο Ευρωκώδικας, συμπληρώνοντας τους απαραίτητους συντελεστές, σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, οι οποίοι εξαρτώνται από την ύπαρξη ή όχι ελκυστήρων και ανάλογα του αριθμού τους. Με βάση αυτόν βρίσκεται ο μειωτικός συντελεστής χ_{LT} από τις καμπύλες λυγισμού και συγκεκριμένα την καμπύλη λυγισμού b, που προτείνει ο Ευρωκώδικας. Πραγματοποιείται έτσι ο έλεγχος λυγισμού του ελεύθερου πέλματος.

Έλεγχος Λυγισμού Ελεύθερου Πέλματος	
η_1	0.414
η_2	1.72
η_3	1.11
η_4	-0.178
Μήκος λυγισμού ελεύθερου Πέλματος l_{z} (cm)	135.549
λ_1	93.91
Συντελεστής λυγηρότητας λ_{fz}	0.5754
Από καμπύλες λυγισμού (καμπύλη b)	
Μειωτικός συντελεστής χ_{LT}	0.849
Έλεγχος τεγίδας στη στήριξη όπου θλιβεται με τάση σ_N	
$\frac{I}{\chi_{LT}} \left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq f_{yb} / \gamma_{M1}$	
Έλεγχος	TRUE

ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΛΥΓΙΣΜΟΥ			
λ	α	b	c
0.20	1.00	1.00	1.00
0.30	0.98	0.96	0.95
0.40	0.95	0.93	0.90
0.50	0.92	0.88	0.84
0.60	0.89	0.84	0.79
0.70	0.85	0.78	0.72
0.80	0.80	0.72	0.66
0.90	0.73	0.66	0.60
1.00	0.67	0.60	0.54
1.10	0.60	0.54	0.48
1.20	0.53	0.48	0.43
1.30	0.47	0.43	0.39
1.40	0.42	0.38	0.35
1.50	0.37	0.34	0.31
1.60	0.33	0.31	0.28
1.70	0.30	0.28	0.26
1.80	0.27	0.25	0.23
1.90	0.24	0.23	0.21
2.00	0.22	0.21	0.20
2.10	0.20	0.19	0.18
2.20	0.19	0.18	0.17
2.30	0.17	0.16	0.15
2.40	0.16	0.15	0.14
2.50	0.15	0.14	0.13
2.60	0.14	0.13	0.12
2.70	0.13	0.12	0.12
2.80	0.12	0.11	0.11
2.90	0.11	0.11	0.10
3.00	0.10	0.10	0.10



Τέλος, πραγματοποιείται έλεγχος στην αντοχή τέμνουσας δύναμης που ασκείται. Η μέγιστη τέμνουσα δύναμη που ασκείται είναι στα άκρα της δοκού, δηλαδή στις στηρίξεις και με αυτήν συγκρίνεται η τέμνουσα αντοχής της διατομής. Σύμφωνα με τον συντελεστή λυγηρότητας υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω πίνακα η οριακή τάση σε διατμητικό λυγισμό και τέλος η διατμητική δύναμη αντοχής σχεδιασμού.

Έλεγχος σε Τέμνουσα	
Συντελεστής λυγηρότητας λ_w	1.42
Οριακή τάση σε διατμητικό λυγισμό f_{bv} (kN/cm ²)	7.86
Διατμητική Δύναμη Αντοχής Σχεδιασμού $V_{b,Rd}$ (kN)	20.49
Ασκούμενη Δύναμη V (kN)	1.69
Έλεγχος	TRUE

Relative web slenderness	Web without stiffening at the support	Web with stiffening at the support ¹⁾
$\bar{\lambda}_w \leq 0,83$	$0,58 f_{yb}$	$0,58 f_{yb}$
$0,83 < \bar{\lambda}_w < 1,40$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,40$	$0,67 f_{yb} / \bar{\lambda}_w^2$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$

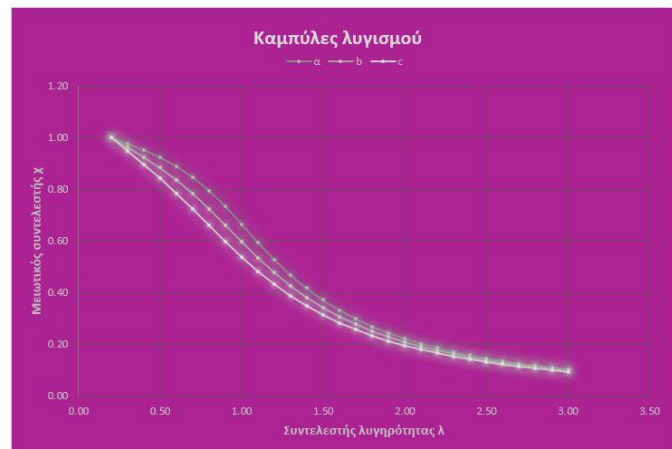
¹⁾ Stiffening at the support, such as cleats, arranged to prevent distortion of the web and designed to resist the support reaction.

5.9 ΌΓΔΟΟ ΦΥΛΛΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ «ΕΛΕΓΧΟΙ ΦΟΡΤΙΟΥ ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗΣ»

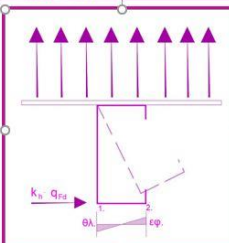
Στο φύλλο εργασίας αυτό ακολουθούνται οι ίδιοι έλεγχοι όπως και στο φορτίο βαρύτητας με τις ίδιες διαδικασίες.

Φορτίο Αναρρόφησης Ανέμου		Δεδομένα	
		A (kN/m)	0.75
		La (cm)	450.00
		Ροπή Αντίστασης Άνω Πέλματος Wα (cm ⁴)	27.86
		Ροπή Αντίστασης Κάτω Πέλματος Wκ (cm ⁴)	25.95
Υπάρχουν ελκυστήρες συνδεδεμένοι με τις τεγίδες ;		Wfz1 (Αριστερά) (cm ³)	3.98
FALSE		Wfz2 (Δεξιά) (cm ³)	1.10
		Mfz,Ed (kNcm)	23.45
		R	2.60

ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΛΥΓΙΣΜΟΥ			
λ	α	b	c
0.20	1.00	1.00	1.00
0.30	0.98	0.96	0.95
0.40	0.95	0.93	0.90
0.50	0.92	0.88	0.84
0.60	0.89	0.84	0.79
0.70	0.85	0.78	0.72
0.80	0.80	0.72	0.66
0.90	0.73	0.66	0.60
1.00	0.67	0.60	0.54
1.10	0.60	0.54	0.48
1.20	0.53	0.48	0.43
1.30	0.47	0.43	0.39
1.40	0.42	0.38	0.35
1.50	0.37	0.34	0.31
1.60	0.33	0.31	0.28
1.70	0.30	0.28	0.26
1.80	0.27	0.25	0.23
1.90	0.24	0.23	0.21
2.00	0.22	0.21	0.20
2.10	0.20	0.19	0.18
2.20	0.19	0.18	0.17
2.30	0.17	0.16	0.15
2.40	0.16	0.15	0.14
2.50	0.15	0.14	0.13
2.60	0.14	0.13	0.12
2.70	0.13	0.12	0.12
2.80	0.12	0.11	0.11
2.90	0.11	0.11	0.10
3.00	0.10	0.10	0.10



Μηδενική Αξονική Ned=0	
Μέγιστη Δράση Ροπή My,Ed (kNcm)	189.84375
Άνω Πέλαμα (δεσμευμένο)	
σmax,Ed (kN/cm ²) (εφελκυστική)	-6.813592138
Έλεγχος σmax,Ed < fy/γM	TRUE
Κάτω Πέλαμα (ελεύθερο)	
σmax,Ed (kN/cm ²) (εφελκυστική)	13.2097845
Έλεγχος σmax,Ed < fy/γM	TRUE



Έλεγχος Λυγισμού Ελεύθερου Πέλματος	
η1	0.694
η2	5.45
η3	1.27
η4	-0.168
Μήκος λυγισμού ελεύθερου Πέλματος lz (cm)	188.2511414
λ1	93.9
Συντελεστής λυγρότητας λz	0.799151427
Από καμπύλες λυγισμού (καμπύλη b)	
Μειωτικός συντελεστής χLT	0.725
$\frac{I}{\chi_{LT}} \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed}}{W_{eff,y} + A_{eff}} \right) + \frac{M_{z,Ed}}{W_{lz}} \leq f_{yb} / \gamma_{M1}$	
Έλεγχος	TRUE

Συντελεστές για φορτίο βαρύτητας και 0,1,2,3,4 ελκυστήρες					
Table 10.2a : Coefficients ηi for down load with 0, 1, 2, 3, 4 anti-sag bars					
Situation	Anti sag-bar Number	η1	η2	η3	η4
End span	0	0.414	1.72	1.11	-0.178
Intermediate span		0.657	8.17	2.22	-0.107
End span	1	0.515	1.26	0.868	-0.242
Intermediate span		0.596	2.33	1.15	-0.192
End and intermediate span	2	0.596	2.33	1.15	-0.192
End and intermediate span		3 and 4	0.694	5.45	1.27
Table 10.2b : Coefficients ηi for uplift load with 0, 1, 2, 3, 4 anti-sag bars					
Situation	Anti sag-bar Number	η1	η2	η3	η4
Simple span	0	0.694	5.45	1.27	-0.168
End span		0.515	1.26	0.868	-0.242
Intermediate span	1	0.306	0.232	0.742	-0.279
Simple and end spans		0.800	6.75	1.49	-0.155
Intermediate span	2	0.515	1.26	0.868	-0.242
Simple span		0.902	8.55	2.18	-0.111
End and intermediate spans	3 and 4	0.800	6.75	1.49	-0.155
Simple and end spans		0.902	8.55	2.18	-0.111
Intermediate span		0.800	6.75	1.49	-0.155

Μη Μηδενική Αξονική Ned=0	
Ned (kN)	20
σN (kN/cm) (θλιπτικές τάσεις)	6.32
Άνω Πέλαμα (δεσμευμένο)	
σmax,Ed (kN/cm ²)	-0.494432543
Έλεγχος σmax,Ed < fy/γM	TRUE
Κάτω Πέλαμα (ελεύθερο)	
Σημείο 1, Δυσμενέστερο	
σmax,Ed (kN/cm ²)	19.5289441
Έλεγχος σmax,Ed < fy/γM	TRUE

Έλεγχος Λυγισμού Ελεύθερου Πέλματος	
Έλεγχος στο μέσο της τεγίδας στο σημείο 1 της διατομής	
$\frac{I}{\chi_{LT}} \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed}}{W_{eff,y} + A_{eff}} \right) + \frac{M_{z,Ed}}{W_{lz}} \leq f_{yb} / \gamma_{M1}$	
$\frac{1}{\chi_{LT}} \cdot \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed}}{W_{eff,y} + A_{eff}} \right) + \frac{M_{z,Ed}}{W_{lz}}$	24.71
Έλεγχος	FALSE

Έλεγχος σε τέμνουσα	
Συντελεστής λυγρότητας λw	1.42
Οριακή τάση σε διατμητικό λυγισμό fvb (kN/cm ²)	7.86
Διατμητική Δύναμη Αντοχής Σχεδιασμού Vb,Rd (kN)	20.49
Ασκούμενη Δύναμη V (kN)	1.69
Έλεγχος	TRUE

5.10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μέσα από την εισαγωγή πολλών διαφορετικών τιμών των γεωμετρικών μεγεθών προέκυψε το συμπέρασμα ότι η αύξηση του πλάτους και του ύψους της διατομής καθώς και η μείωση του πάχους των τοιχωμάτων προκαλούν αυξημένη επιρροή του τοπικού λυγισμού. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση του πλάτους προκαλεί μεγαλύτερη επιρροή του τοπικού λυγισμού από ότι η αύξηση του ύψους, διότι τα πέλματα είναι μονά στηριζόμενα στοιχεία σε αντίθεση με τον κορμό και συνεπώς παρουσιάζουν μεγαλύτερο συντελεστή κύρτωσης, φαινόμενο που εμφανίζεται κυρίως στις ανοιχτές διατομές. Επιπλέον, σε φορτία ανεμοπίεσης σε συνδυασμό με θλιπτική αξονική δύναμη, κρίσιμος κρίνεται ο έλεγχος λυγισμού του ελεύθερου πέλματος (στο σημείο 1) , καθώς όλα τα μεγέθη συνδράμουν στη θλίψη του.

Ένας απλός και γρήγορος τρόπος αντιμετώπισης όταν δεν ικανοποιείται κάποιος έλεγχος είναι η τοποθέτηση ελκυστήρων ανάμεσα στις τεγίδες, ή η αύξηση του πάχους της διατομής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. Βιβλιογραφία

1. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (1999). «Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος ΙΙ». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
2. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005α). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, 2η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
3. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ., (2005β). «Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος Ι». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
4. Μιχάλτσος Γ. (2009), «Ελαφρές μεταλλικές κατασκευές: Θεωρία της παραμορφωσίμου διατομής, διαφραγματική θεωρία, εφαρμογές στα οικοδομικά έργα, στοιχεία του ENV 1993.1.3», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
5. Μιχάλτσος Γ. (2008), «Ελαφρές μεταλλικές κατασκευές: Μέθοδοι υπολογισμού», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
6. Βάγιας Ι.Κ., Dubina D. (2004), «Σιδηρές κατασκευές από λεπτότοιχες διατομές ψυχρής διαμόρφωσης», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
7. EN 1993-1-3, Ευρωκώδικας 3, «Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα. Μέρος 1-3: Γενικοί κανόνες, πρόσθετοι κανόνες για μέλη και φύλλα ψυχρής έλασης», CEN Ευρωπαϊκή Επιτροπή Κανονισμών, Βρυξέλλες.
8. EN 1993-1-5, Ευρωκώδικας 3, «Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα. Μέρος 1-5: Δομικά στοιχεία από επίπεδα ελάσματα»
9. Διαδικτυακοί τόποι