

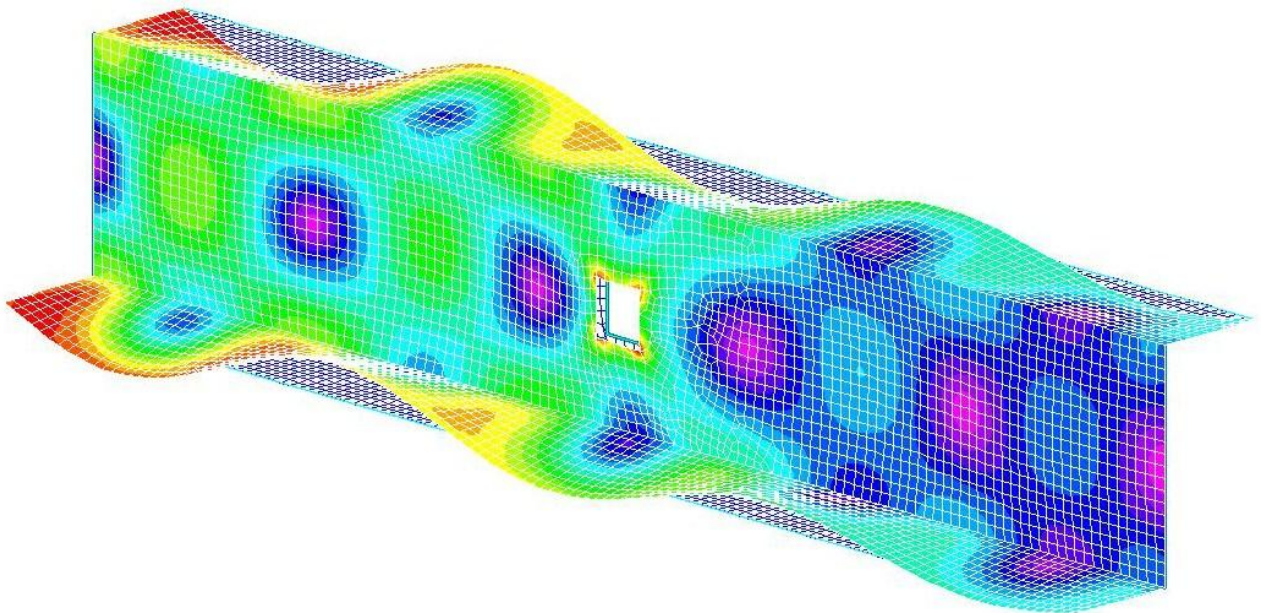


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΕΣ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τριμίντζιου Σ. Μαρία

Επιβλέπων: Ιωάννης Ραυτογιάννης

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

ΕΜΚ ΔΕ 2012/31

Τριμίντζιου Σ.Μ. (2012).
Αντοχή σε θλίψη λεπτότοιχων διατομών C και Z με οπές στον κορμό
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2012/31
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Trimintziou S.M. (2012).
Compressive strength of thin-walled C and Z sections with web perforations
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2012/31
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Στα πλαίσια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Ι.Ραυτογιάννη, για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε, για την υπομονή του και για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετάδωσε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επίσης οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και στους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράσταση και κατανόησή τους, σε όλη τη διάρκεια των μαθητικών και ακαδημαϊκών μου σπουδών.

Πίνακας περιεχομένων

| | |
|--|-----------|
| Περίληψη..... | 1 |
| Abstract | 2 |
| Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγικά στοιχεία για τις διατομές ψυχρής διαμόρφωσης | 3 |
| 1.1 Εισαγωγή..... | 3 |
| 1.2 Γενικά για τη χρήση του χάλυβα ψυχρής διαμόρφωσης..... | 4 |
| 1.3 Μορφές διατομών | 6 |
| 1.4 Μέθοδοι παραγωγής | 8 |
| 1.5 Ευστάθεια μελών ψυχρής έλασης..... | 10 |
| 1.6 Πλεονεκτήματα χρήσης στοιχείων από χάλυβα ψυχρής διαμόρφωσης..... | 11 |
| 1.7 Εφαρμογές..... | 12 |
| Κεφάλαιο 2 - Ιδιότητες υλικών και διατομών ψυχρής έλασης..... | 16 |
| 2.1 Ποιότητες χαλύβων..... | 16 |
| 2.2 Ιδιότητες υλικού μελών και φύλλων ψυχρής έλασης | 17 |
| 2.3 Ονομαστικές διαστάσεις διατομών | 18 |
| 2.4 Επιρροή των καμπύλων προσαρμογής..... | 19 |
| 2.5 Γεωμετρικές συνθήκες ισχύος..... | 21 |
| 2.6 Προσομοίωση για στατική ανάλυση | 22 |
| Κεφάλαιο 3 - Συμπεριφορά και αντοχή λεπτότοιχων στοιχείων | 24 |
| 3.1 Γενικά | 24 |
| 3.2 Μορφές καθολικού λυγισμού | 24 |
| 3.3 Μορφές λυγισμού διατομών | 25 |
| 3.4 Θεωρητική τεκμηρίωση τοπικού λυγισμού | 28 |
| 3.5 Κύρτωση με στρέβλωση διατομής | 32 |
| 3.6 Γεωμετρικές ιδιότητες ενεργού διατομής υποκείμενης σε τοπικό λυγισμό ή λυγισμό με στρέβλωση διατομής | 33 |
| 3.6.1 Παραδοχές | 33 |
| 3.6.2 Επίπεδα στοιχεία χωρίς ενισχύσεις..... | 34 |
| 3.6.3 Επίπεδα στοιχεία με ενισχύσεις..... | 37 |
| 3.6.3.1 Γενικά..... | 37 |
| 3.6.3.2 Ακραίες ενισχύσεις..... | 40 |
| 3.7 Αντοχή διατομής σε αξονική θλίψη..... | 44 |
| Κεφάλαιο 4 - Ανάλυση λυγισμού με βάση τον Ευρωκώδικα | 45 |
| 4.1 Γενικά στοιχεία εξεταζόμενων διατομών | 45 |
| 4.2 Προσδιορισμός της αξονικής δύναμης αντοχής σε ομοιόμορφη θλίψη της διατομής | 47 |
| 4.2.1 Διατομή C χωρίς ενισχύσεις..... | 47 |
| 4.2.2 Διατομή C χωρίς ενισχύσεις και με οπή στον κορμό ύψους 40mm | 51 |
| 4.2.3 Διατομή C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα | 54 |

| | |
|--|------------|
| 4.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναλύσεων | 58 |
| Κεφάλαιο 5 - Προσδιορισμός του κρίσιμου φορτίου λυγισμού με χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων | 59 |
| 5.1 Γενικά | 59 |
| 5.2 Περιγραφή μοντέλων..... | 59 |
| 5.3 Περιγραφή προσομοίωσης ενός φορέα με το πρόγραμμα MSC NASTRAN | 60 |
| 5.3.1 Δημιουργία της γεωμετρίας (modeling) | 60 |
| 5.3.2 Καθορισμός υλικών (materials) | 63 |
| 5.3.3 Καθορισμός τύπου στοιχείων (property) | 65 |
| 5.3.4 Δημιουργία δικτύου (mesh generation)..... | 67 |
| 5.3.5 Επιβολή συνοριακών συνθηκών (constraints)..... | 70 |
| 5.3.6 Επιβολή φορτίων (loads) | 72 |
| 5.3.7 Ανάλυση (Analyze)..... | 74 |
| Κεφάλαιο 6 - Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα | 76 |
| 6.1 Διατομές C χωρίς ενισχύσεις..... | 76 |
| 6.2 Διατομές C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις | 82 |
| 6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων διατομών C χωρίς ενισχύσεις και διατομών C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις..... | 88 |
| 6.4 Διατομή C χωρίς ενισχύσεις: Σύγκριση με φορέα μήκους 200mm..... | 89 |
| 6.5 Διατομή C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις: Σύγκριση με φορέα μήκους 200mm | 92 |
| 6.6 Διατομές Z χωρίς ενισχύσεις..... | 94 |
| 6.7 Διατομές Z με ακραίες κάθετες ενισχύσεις..... | 99 |
| 6.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων διατομών Z χωρίς ενισχύσεις και διατομών Z με κάθετες ακραίες ενισχύσεις..... | 103 |
| 6.9 Διατομή Z χωρίς ενισχύσεις: Σύγκριση με φορέα μήκους 200mm | 105 |
| 6.10 Διατομή Z με ακραίες κάθετες ενισχύσεις: Σύγκριση με φορέα μήκους 200mm... | 107 |
| Κεφάλαιο 7 - Τελικά συμπεράσματα | 111 |
| Βιβλιογραφία..... | 112 |

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών
Διπλωματική Εργασία
ΕΜΚ ΔΕ 2012/31
Τριμίντζιου Σ.Μ. (Επιβλέπων: Ραυτογιάννης Ι.)

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο μια προκαταρκτική έρευνα για τη διερεύνηση της επίδρασης μιας οπής στον κορμό, στην αντοχή και την ευστάθεια λεπτότοιχων διατομών C και Z ψυχρής διαμόρφωσης υπό ομοιόμορφη θλίψη.

Οι χαλύβδινες λεπτότοιχες διατομές C και Z χρησιμοποιούνται ευρέως στις ελαφρές μεταλλικές κατασκευές, κυρίως ως δευτερεύοντα δομικά στοιχεία. Ωστόσο τοπικές αστάθειες όπως ο τοπικός λυγισμός και ο λυγισμός με στρέβλωση της διατομής επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή των μελών, με μεγαλύτερη επιβλαβή επίδραση σε περιοχές με οπές και μεγάλες παραμορφώσεις. Λόγω της περιορισμένης γνώσης για τη συμπεριφορά διάτρητων στοιχείων από χάλυβα ψυχρής διαμόρφωσης, η μελέτη αυτού του φαινομένου καθίσταται απαραίτητη. Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκαν 28 φορείς, διατομής C και Z, χωρίς ενισχύσεις και με ακραίες κάθετες ενισχύσεις, με κυκλικές και τετραγωνικές οπές στον κορμό, τριών διαστάσεων.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας 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 και στον τρόπο αντιμετώπισής τους υπολογιστικά, σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 ENV 1993-1-3.

Εν συνεχεία στο τέταρτο μέρος γίνεται ο προσδιορισμός της αξονικής αντοχής σε ομοιόμορφη θλίψη των διατομών ακολουθώντας τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3. Στο πέμπτο μέρος παρουσιάζεται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων MSC Nastran, με το οποίο έγινε η προσομοίωση της λυγισμικής συμπεριφοράς των φορέων και προσδιορίστηκε το κρίσιμο φορτίο λυγισμού αυτών.

Τέλος παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων και των δύο μεθόδων και γίνονται συγκρίσεις και σχολιασμός με τη βοήθεια γραφημάτων. Επίσης για μεγαλύτερο εύρος αποτελεσμάτων τα μέλη που αναλύθηκαν συγκρίνονται με φορείς με ίδια χαρακτηριστικά σε φόρτιση και συνοριακές συνθήκες αλλά με μικρότερο μήκος. Τα τελικά συμπεράσματα που εξήχθησαν παρατίθενται στο έβδομο μέρος της εργασίας.

National Technical University of Athens
Faculty of Civil Engineering
Institute of Steel Structures
Diploma Thesis
EMK ΔΕ 2012/23

Compressive strength of thin-walled C and Z sections with web perforations

Trimintziou S.M. (supervised by Raftoyiannis I.)

Abstract

The present study is a preliminary research concerning the detrimental effects of a web hole, to the load-carrying capacity of lightweight cold-formed steel C and Z sections under uniform compression.

Lightweight steel C and Z-sections are extensively used in constructing light industrial steel buildings. However, local instabilities as distortional and local buckling can significantly influence the load carrying capacity of such members, especially in areas of large deformations and perforations. Due to the limited awareness of the static behavior of perforated cold-formed steel sections, the research of this phenomenon is essential. In the present study, 28 models were analyzed of C and Z shaped stub columns, both with and without stiffeners, with circular and quadrangular web perforations of three dimensions.

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 ENV 1993.1.3.

In the fourth part we present the computation of the compressive resistance of concentrically loaded sections based on ENV 1993.1.3. Afterwards there is a presentation of MSC Nastran, a finite element analysis program that has been used for a linear buckling analysis defining the critical buckling capacity of the members.

Finally the results of the above methods are presented along with comparisons and comments and some final conclusions.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

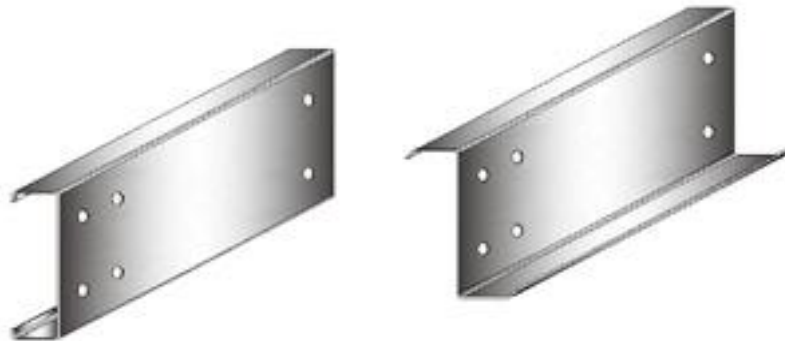
ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΨΥΧΡΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

1.1 Εισαγωγή

Οι χαλύβδινες διατομές C και Z είναι από τις πλέον διαδεδομένες διατομές ψυχρής έλασης που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα στον κατασκευαστικό κλάδο. Πολλές φορές, εμφανίζεται η ανάγκη διάτρησης των διατομών στον κορμό, προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι διάφορες λειτουργίες και ανάγκες της κατασκευής. Αυτό ωστόσο επιδρά αρνητικά στην αντοχή του μέλους καθώς μειώνεται η φέρουσα ικανότητά του και υπάρχει μεγαλύτερος κίνδυνος αστοχίας. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η αντοχή σε θλίψη μελών ψυχρής έλασης διατομών C και Z, πριν και μετά τη διάνοιξη οπών στον κορμό του μέλους, για διατομές με ακραίες ενισχύσεις και χωρίς ακραίες ενισχύσεις.

Μία συνήθης χρήση των εν ψυχρώ διαμορφωμένων μελών με οπές στον κορμό είναι στον τομέα συστημάτων αποθήκευσης. Τα μέλη χρησιμοποιούνται ως ορθοστάτες για τη στήριξη διαφόρων ειδών μεταλλικών ραφιών, όπως είναι τα ράφια παλέτες ή τα ράφια πρόβολοι, οπότε και χρειάζονται οπές για τον έλεγχο και τη ρύθμιση του ραφιού, ώστε να προσαρμοστεί κάθε φορά στο μέγεθος του αποθηκευόμενου υλικού. Επίσης οπές διανοίγονται για τη διευκόλυνση εργασιών, όπως οι υδραυλικές εγκαταστάσεις, οι συνδέσεις και οι ηλεκτρικές καλωδιώσεις σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές.

Το γεγονός ότι στον Ευρωκώδικα 3, στο τμήμα 1993-1-3 που αφορά τα λεπτότοιχα μέλη, δεν υπάρχει καμία διάταξη ώστε να προβλεφθεί υπολογιστικά η συμπεριφορά ενός μέλους ψυχρής έλασης με οπή στον κορμό του, καθιστά τη μελέτη αυτού του φαινομένου απαραίτητη.



Σχήμα 1.1: Μέλη διατομής C και Z με οπές στον κορμό



Σχήμα 1.2: Λεπτομέρεια μέλους με οπή στον κορμό

1.2 Γενικά για τη χρήση του χάλυβα ψυχρής διαμόρφωσης

Το βάρος των χαλύβδινων λεπτότοιχων διατομών ψυχρής έλασης αποτελεί το μεγάλο πλεονέκτημά τους καθώς είναι η ελαφρύτερη δυνατή κατασκευή. Παλαιότερα η χρήση τους ήταν περιορισμένη σε κατασκευές που η εξοικονόμηση βάρους είχε μεγάλη σπουδαιότητα, όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη ναυπηγική, την αεροναυπηγική, την κατασκευή συρμών και γενικότερα μεταφορικών μέσων. Με το πέρασμα των χρόνων οι διατομές ψυχρής έλασης χρησιμοποιήθηκαν ακόμη ως επικαλύψεις και ως φέροντα δομικά στοιχεία δευτερεύουσας σημασίας.

Ωστόσο με την ανάπτυξη της κατασκευαστικής τεχνολογίας και τη διεύρυνση της γνώσης ως προς τη συμπεριφορά των χαλύβδινων διατομών ψυχρής έλασης το πεδίο εφαρμογής τους μεγάλωσε και θεωρείται πλέον ένα ανταγωνιστικό προϊόν σε διάφορα έργα πολιτικού μηχανικού. Η εφαρμογή ικανοποιητικής προστασίας έναντι οξειδώσεως και οι νέες μέθοδοι πυροπροστασίας σε συνδυασμό με τη μεγάλη διάρκεια ζωής του υλικού το κατέστησαν ευρέως χρησιμοποιήσιμο. 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 πολυώροφα κτίρια και άλλες κατασκευές.

Τα λεπτότοιχα στοιχεία ψυχρής έλασης θεωρούνται πολύ αποδοτικά από άποψη δυσκαμψίας και αντοχής. Επίσης είναι πολύ ελαφριά δεδομένου ότι έχουν πάχη έως και 0,5 mm. Η δημοτικότητά τους οφείλεται εκτός των άλλων στην ευκολία της μαζικής παραγωγής και προκατασκευής, την ομοιόμορφη ποιότητα, τα

ελαφριά σχέδια, την οικονομία στη μεταφορά και το χειρισμό, και τη γρήγορη και απλή ανέγερση ή εγκατάσταση.

Η χρήση λεπτότοιχων διατομών και χαλύβων υψηλής αντοχής οδηγεί σε ειδικά προβλήματα υπολογισμού, τα οποία δεν συναντάμε κατά τη μελέτη των συνηθών μεταλλικών κατασκευών. Οι πιο συνηθείς αστάθειες είναι ο τοπικός και ο καθολικός λυγισμός. Θα πρέπει ακόμη να ληφθεί υπόψη ότι η αντοχή του υλικού επηρεάζεται και από πρόσθετα προβλήματα όπως για παράδειγμα από την παρουσία οπών στα πέλματα ή τον κορμό των διατομών.



Σχήμα 1.3: Μεταλλικός σκελετός κατοικίας



Σχήμα 1.4: Το εθνικό μουσείο του Zayed το οποίο κατασκευάστηκε με χάλυβα ψυχρής διαμόρφωσης

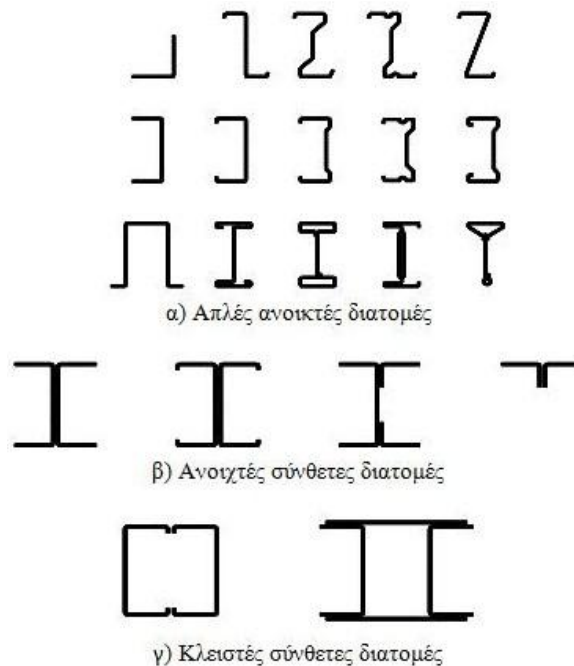
1.3 Μορφές διατομών

Τα προϊόντα ψυχρής διαμόρφωσης διακρίνονται σε δύο κυρίως κατηγορίες:

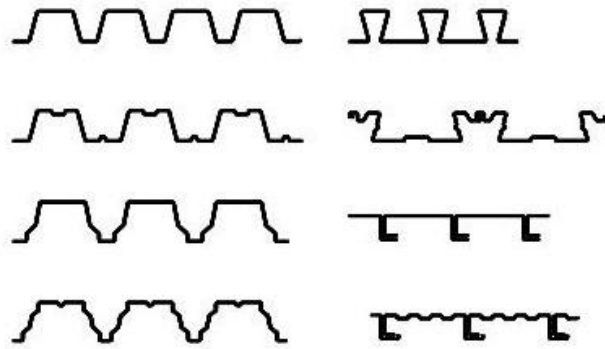
- Ραβδόμορφα στοιχεία ως μέλη του φέροντα οργανισμού
- Επιφανειακά στοιχεία του κελύφους της κατασκευής ή πλακών

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 δικτυώματα. 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. Τα μέλη ψυχρής ελάσεως και τα αυλακωτά φύλλα έχουν εντός επιτρεπόμενων ανοχών ένα σταθερό ονομαστικό πάχος σε όλο το μήκος τους και μπορεί να έχουν είτε ομοιόμορφη διατομή είτε απομειούμενη διατομή κατά το μήκος τους.

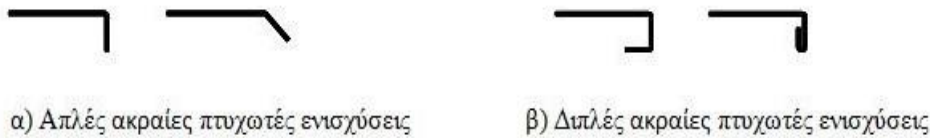


Σχήμα 1.5: Τυπικές μορφές ραβδόμορφων στοιχείων



Σχήμα 1. 6: Παραδείγματα τραπεζοειδών ελασμάτων και κασετών

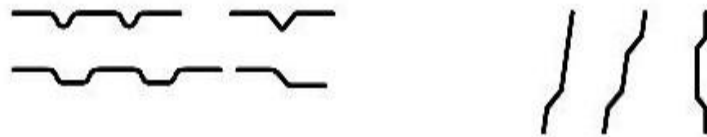
Για την αύξηση της δυσκαμψίας των διατομών ψυχρής έλασης, προβλέπονται ακραίες ή ενδιάμεσες ενισχύσεις. Οι αντίστοιχες ακραίες και πτυχωτές ενισχύσεις ή εγκοπές φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



α) Απλές ακραίες πτυχωτές ενισχύσεις

β) Διπλές ακραίες πτυχωτές ενισχύσεις

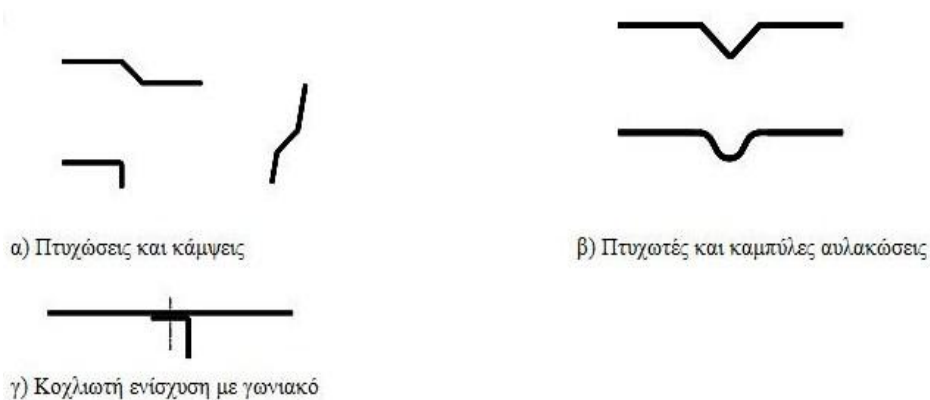
Σχήμα 1.7: Τυπικές μορφές ακραίων ενισχύσεων



α) Εσωτερικές ενισχύσεις πελμάτων

β) Εσωτερικές ενισχύσεις κορμού

Σχήμα 1.8: Τυπικές μορφές ενδιάμεσων διαμήκων ενισχύσεων



α) Πτυχωτές και κάμψεις

β) Πτυχωτές και καμπύλες αυλακώσεις

γ) Κοχλιωτή ενίσχυση με γωνιακό

Σχήμα 1.9: Τυπικές μορφές ενισχύσεων για μέλη και φύλλα ψυχρής ελάσεως

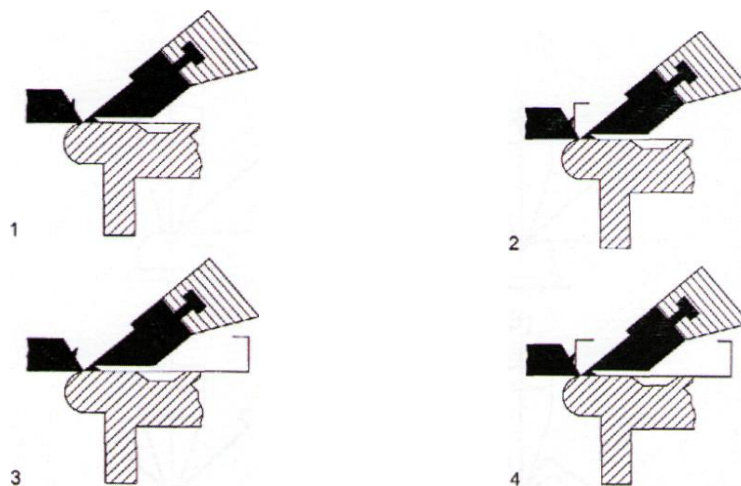
1.4 Μέθοδοι παραγωγής

Οι διατομές ψυχρής ελάσεως μπορούν να κατασκευαστούν με τις ακόλουθες μεθόδους:

1. Αναδίπλωση
2. Συμπίεση
3. Ψυχρή έλαση

Οι δύο πρώτες μέθοδοι εφαρμόζονται για μικρές ποσότητες δομικών στοιχείων και για μήκη έως 6 μέτρα. Η τρίτη μέθοδος χρησιμοποιείται για εν σειρά βιομηχανική παραγωγή.

Η μέθοδος της αναδίπλωσης είναι η απλούστερη διαδικασία και εφαρμόζεται για ευθύγραμμες μόνο διαμορφώσεις και υπό σταθερά συνήθως γωνία 90° μέσω μιας σειράς διαμορφώσεων (Σχήμα 1.10), με χρήση ειδικών μηχανών που καλούνται «στράντζες». Η μέθοδος της αναδίπλωσης έχει πολύ περιορισμένη εφαρμογή.

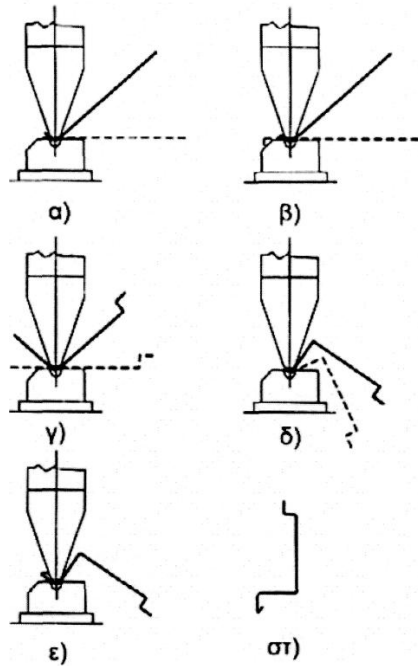


Σχήμα 1.10: Μορφοποίηση μέσω αναδίπλωσης (folding)

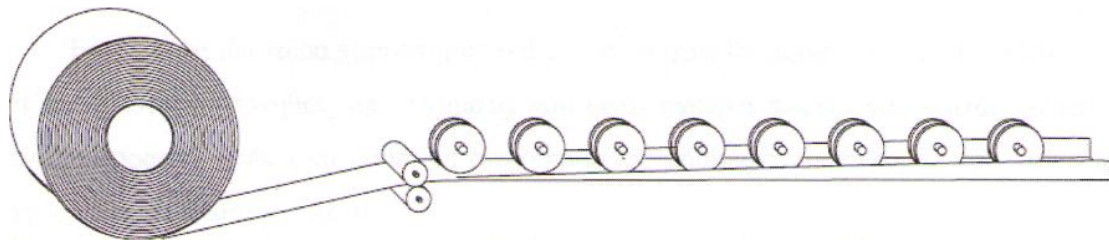
Η συμπίεση έχει ευρύτερη εφαρμογή, επιτρέποντας την παραγωγή μεγαλύτερης ποικιλίας διατομών. Εφαρμόζεται είτε για ευθύγραμμες διαμορφώσεις (λόγω όμως της χρήσεως ειδικών μήτρων μπορούμε να έχουμε κάμψη υπό γωνία διάφορη των 90°), με χρήση των στραντζοπρεσσών είτε μέσω απλών πρεσσών για διαμόρφωση (μέσω μήτρας) οποιουδήποτε μορφώματος (Σχήμα 1.11).

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. Κατά τη διαδικασία αυτή, ένα συνεχές φύλλο οδηγείται δια μιας σειράς απέναντι διατεταγμένων ελαστρων (ράουλα) τα οποία δίνουν

σταδιακά, μέσω πλαστικής παραμόρφωσης στο χάλυβα την επιθυμητή μορφή. Κάθε ζεύγος ελαστρων προκαλεί μια συγκεκριμένη σταθερή παραμόρφωση. Στο Σχήμα 1.12, μορφώνεται μια πηλοδοειδής 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 1.11: Παραγωγή με συμπίεση (press banking)



Σχήμα 1.12: Διαδικασία διαμόρφωσης απλών διατομών (cold rolling)



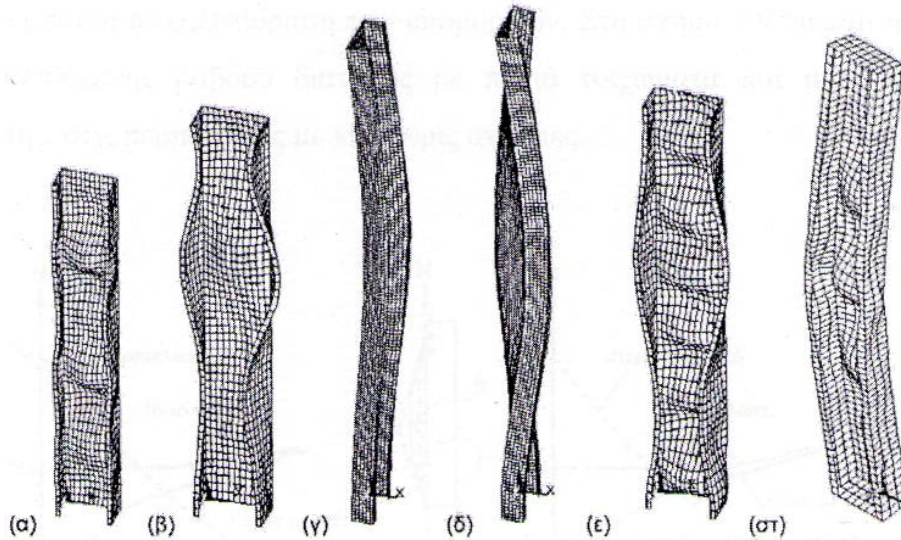
Σχήμα 1.13: Ψυχρή έλαση χαλυβδόφυλλων

1.5 Ευστάθεια μελών ψυχρής έλασης

Όσον αφορά τη στατική συμπεριφορά, σε σχέση με τα συμβατικά μεταλλικά μέλη, τα λεπτότοιχα στοιχεία ψυχρής διαμόρφωσης χαρακτηρίζονται από: 1) το σταθερό πάχος της διατομής, 2) το μεγάλο πλάτος της διατομής σε σχέση με το πάχος της, 3) την ποικιλία των διατομών. Ειδικότερα, το δεύτερο στοιχείο (2) προκαλεί φαινόμενα τοπικού λυγισμού, γεγονός που επηρεάζει τη δυνατότητα ανάληψης φορτίου του μέλους. Ωστόσο δεν θα πρέπει να παραλειφθούν και οι διάφορες κατασκευαστικές ατέλειες που προκαλούνται κατά τη διαδικασία της ψυχρής διαμόρφωσης. Κατά συνέπεια, η στατική ανάλυση και ο σχεδιασμός των λεπτότοιχων μελών ψυχρής διαμόρφωσης γίνεται γενικά πιο σύνθετος εξαιτίας αυτών των χαρακτηριστικών. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη στατική συμπεριφορά των λεπτότοιχων στοιχείων είναι:

- ο τοπικός λυγισμός
- ο λυγισμός με στρέβλωση της διατομής
- ο καθολικός λυγισμός
- ο διατμητικός λυγισμός και τα φαινόμενα καμπυλώσεως

Επιπλέον, είναι πιθανή και η αλληλεπίδραση των παραπάνω ασταθειών. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται διάφορες μορφές λυγισμού μιας διατομής U, όπως υπολογίστηκαν με ιδιομορφική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Οι κρίσιμες τάσεις λυγισμού και τα κρίσιμα μήκη κύματος φαίνονται στο σχήμα.



Σχήμα 1. 14: Ιδιόμορφες διατομές U με ακραίες ενισχύσεις υπό αξονική θλίψη. Απλές ιδιόμορφες: α) τοπικός λυγισμός, β) τοπικός λυγισμός με στρέβλωση της διατομής γ) καμπτικός λυγισμός περί τον ασθενή άξονα δ) στρεπτοκαμπτικός λυγισμός ε) αλληλεπίδραση τοπικού λυγισμού και λυγισμού με στρέβλωση της διατομής στ) αλληλεπίδραση τοπικού λυγισμού και καμπτικού λυγισμού περί τον ασθενή άξονα.

1.6 Πλεονεκτήματα χρήσης στοιχείων από χάλυβα ψυχρής διαμόρφωσης

Τα πλεονεκτήματα των προϊόντων ψυχρής διαμόρφωσης ως προς τη χρήση τους στις κατασκευές είναι τα εξής:

- *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.
- *Ταχύτητα ανέγερσης της κατασκευής*
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 επενδεδυμένου κεφαλαίου.
- *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 αγκυρίων επιτυγχάνεται άριστη σύνδεση μεταξύ των στοιχείων.

- *Προστασία από διάβρωση*
Μέσω του γαλβανίσματος επιτυγχάνεται επαρκής προστασία έναντι διάβρωσης και κατά συνέπεια μεγάλη διάρκεια ζωής της κατασκευής.
- *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.
- *Φιλικότητα προς το περιβάλλον*
Ο χάλυβας είναι ανακυκλώσιμο υλικό και η διαδικασία παραγωγής του καταναλώνει λιγότερη ενέργεια σε σχέση με άλλα υλικά.

Σε σύγκριση με άλλα δομικά υλικά, όπως το ξύλο και το σκυρόδεμα, η χρήση χαλύβδινων στοιχείων ψυχρής διαμόρφωσης έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Ελαφρότητα
- Υψηλή δυσκαμψία και αντοχή
- Δυνατότητα προκατασκευής και μαζικής παραγωγής
- Δυνατότητα κάλυψης μεγάλων ανοιγμάτων (μέχρι 10m)
- Μεγαλύτερη ακρίβεια στη μόρφωση των κατασκευαστικών λεπτομερειών
- Ευκολία στη δημιουργία οδών διέλευσης όπως αγωγοί και καλωδιώσεις
- Αποφυγή ερπυσμού και συστολής ξήρανσης για ήπιες θερμοκρασίες
- Ελευθερία από τερμίτες και μούχλα
- Ενιαία ποιότητα
- Καλή πυραντίσταση και ευκολία αντικατάστασης των υλικών πυροπροστασίας μετά από ενδεχόμενη πυρκαγιά.
- Ευκολία και οικονομία τόσο κατά τη μεταφορά όσο και κατά την κατασκευή
- Μεγάλη περιβαλλοντική προστασία λόγω μεγάλου χρόνου χρήσης, επανάχρησης, ανακύκλωσης και περιορισμού των μπάζων στο ελάχιστο

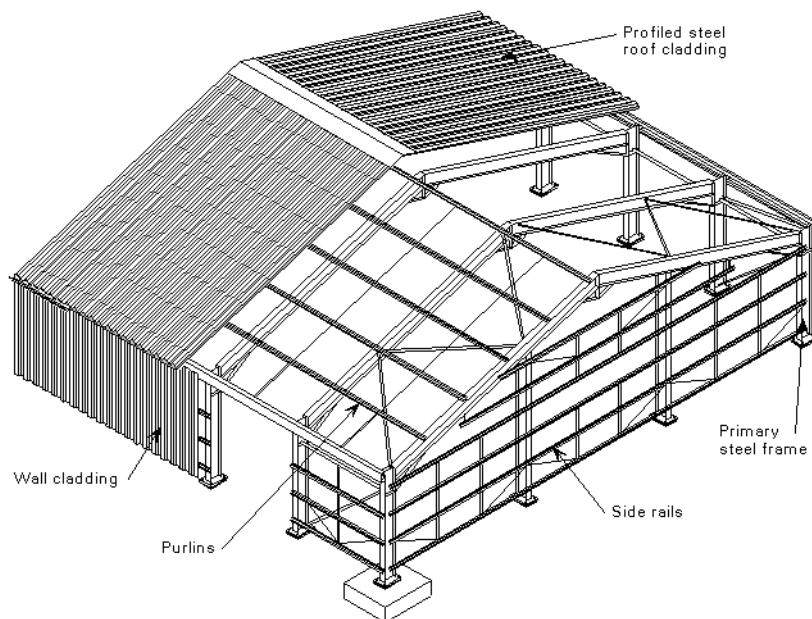
1.7 Εφαρμογές

Οι συνήθεις εφαρμογές των στοιχείων ψυχρής διαμόρφωσης συνοψίζονται στα εξής:

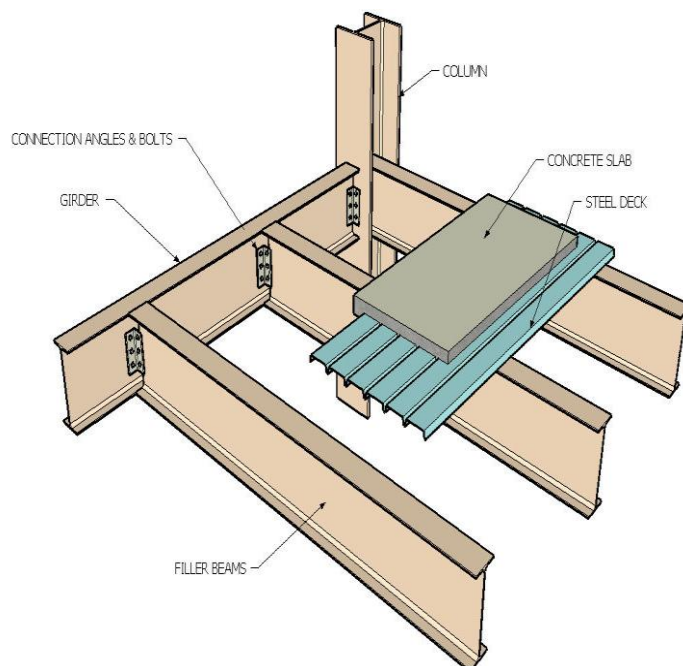
- Τεγίδες και μηκίδες

Αποτελούν βασικό πεδίο εφαρμογής για στήριξη επικαλύψεων, ιδιαίτερα οι διατομές Z που συνδέονται μεταξύ τους με υπερκάλυψη ώστε να δημιουργείται συνεχής δοκός.

- Κύριος φορέας
Χρησιμοποιούνται ως κύριος φορέας σε προκατασκευασμένα ελαφρά βιομηχανικά κτίρια ή κτίρια αποθήκευσης καθώς και σε κτίρια κατοικιών και πολυώροφα μεταλλικά κτίρια.
- Μεγάλα πετάσματα (πάνελ) για κτίρια κατοικίας
- Σύμμικτες πλάκες
- Δικτυώματα
- Πλαίσια με κοχλιωτούς κόμβους για βιομηχανικά κτίρια
- Κελυφωτές κατασκευές
- Βιομηχανικά ράφια
- Χωροδικτυώματα
- Γεωργικά σιλό



Σχήμα 1.15: Κατασκευή από χάλυβα ψυχρής διαμόρφωσης, φαίνονται οι τειγίδες, οι μηκίδες και τα φύλλα επικάλυψης οροφής και τοίχου



Σχήμα 1.16: Χαλυβόφυλλο σύμμικτης πλάκας



Σχήμα 1.17: Τεγίδες διατομής Z από χάλυβα ψυχρής διαμόρφωσης



Σχήμα 1.18: Στέγαστρο από στοιχεία ψυχρής έλασης



Σχήμα 1.19: Επικάλυψη toll με χαλυβδόφυλλα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΨΥΧΡΗΣ ΕΛΑΣΗΣ

2.1 Ποιότητες χαλύβων

Όλοι οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται για τη μόρφωση μελών και φύλλων ψυχρής ελάσεως πρέπει να είναι κατάλληλοι για ψυχρή έλαση και συγκόλληση, αν χρειαστεί. Χάλυβες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για μέλη και φύλλα που πρόκειται να γαλβανιστούν πρέπει να είναι κατάλληλοι για γαλβανισμό. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι ονομαστικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών 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 | Κανονισμός | Κατηγορία | f_{yb} N/mm ² | f_u N/mm ² |
|---|---------------------|-----------|-------------------------------|----------------------------|
| Προϊόντα θερμής ελάσεως μη κραματωμένων δομικών χαλύβων. Μέρος 2: Τεχνικές συνθήκες παράδοσης μη κραματωμένων δομικών χαλύβων | EN 10025: Part 2 | S 235 | 235 | 360 |
| | | S 275 | 275 | 430 |
| | | S 355 | 355 | 510 |
| Προϊόντα θερμής ελάσεως δομικών χαλύβων. Μέρος 3: Τεχνικές συνθήκες παράδοσης για εξομαλυμένους / εξομαλυμένους ελατούς συγκολλησίμους, λεπτόκοκκους δομικούς χάλυβες | EN 10025: Part 3 | S 275 N | 275 | 370 |
| | | S 355 N | 355 | 470 |
| | | S 420 N | 420 | 520 |
| | | S 460 N | 460 | 550 |
| | | S 275 NL | 275 | 370 |
| | | S 355 NL | 355 | 470 |
| | | S 420 NL | 420 | 520 |
| S 460 NL | 460 | 550 | | |
| Προϊόντα θερμής ελάσεως δομικών χαλύβων. Μέρος 4: Τεχνικές συνθήκες παράδοσης για θερμομηχανικούς, ελατούς συγκολλησίμους 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 | 420 | 500 |
| S 460 ML | 460 | 530 | | |

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

| | | | | |
|--|---------------------|----------|-----|-----|
| 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 | 260 | 370 |
| | | S 315 NC | 315 | 430 |
| | | S 355 NC | 355 | 470 |
| | | S 420 NC | 420 | 530 |

2.2 Ιδιότητες υλικού μελών και φύλλων ψυχρής έλασης

Η κατεργασία με την οποία θα παραχθούν οι διατομές ψυχρής έλασης, με όποια από τις μεθόδους της παραγράφου 1.4 επιτυγχάνεται, επηρεάζει τις ιδιότητες του υλικού. Συγκεκριμένα, σε σύγκριση με το αρχικό υλικό, η ψυχρή έλαση αυξάνει το όριο διαρροής του υλικού, ιδιαίτερα στις γωνίες και τα πέλματα και προσδίδει τοπική αντοχή στην παραγόμενη διατομή. Αυτή η τοπική αντοχή προσμετρείται με τον υπολογισμό ενός αυξημένου μέσου ορίου διαρροής f_{ya} , το οποίο υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση:

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb}) \cdot \frac{k \cdot n \cdot t^2}{A_g} \quad \text{αλλά} \quad f_{ya} \leq \frac{(f_u + f_{yb})}{2} \quad (2.1)$$

όπου:

A_g εμβαδόν της πλήρους διατομής

- k συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τον τρόπο παραγωγής
 -k = 7 για ψυχρή κάμψη
 -k = 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 πάχος σχεδιασμού πυρήνα του αρχικού ελάσματος προ της ψυχρής έλασης χωρίς μεταλλικές ή οργανικές επιστρώσεις

Το αυξημένο όριο διαρροής λόγω της ψυχρής ελασης μπορεί να λαμβάνεται υπόψη σε αξονικά φορτιζόμενα μέλη όπου η ενεργός διατομή A_{eff} της διατομής είναι ίση με την πλήρη διατομή A_g , ενώ στον υπολογισμό της A_{eff} το όριο διαρροής πρέπει να λαμβάνεται ως f_{yb} .

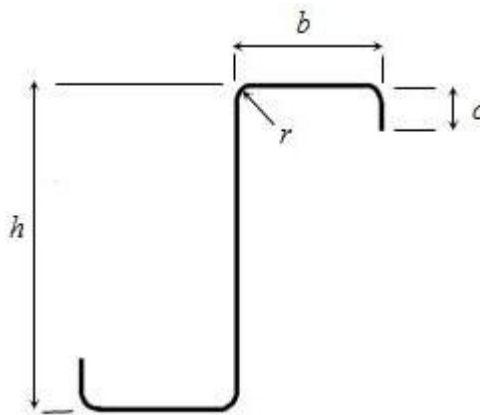
Το μέσο όριο διαρροής f_{ya} μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό:

- της αντοχής της διατομής για ένα αξονικά φορτιζόμενο εφελκούμενο μέλος
- της αντοχής της διατομής και της αντοχής σε λυγισμό για ένα αξονικά φορτιζόμενο θλιβόμενο μέλος στο οποίο ολόκληρη η διατομή είναι ενεργή
- στην καμπτική αντοχή όμοιας διατομής με πλήρη ενεργά πέλματα

Τέλος, το αυξημένο όριο διαρροής λόγω της ψυχρής ελάσεως δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για μέλη τα οποία υπόκεινται σε θερμή επεξεργασία μετά την ψυχρή έλαση σε θερμοκρασία υψηλότερη από 580°C για περισσότερη από μία ώρα.

2.3 Ονομαστικές διαστάσεις διατομών

Οι ονομαστικές διαστάσεις των επιμέρους στοιχείων της διατομής καθορίζονται από τον Ευρωκώδικα και ισχύουν για κάθε διατομή. Οι συνολικές διαστάσεις μελών και φύλλων ψυχρής ελάσεως, όπως το συνολικό πλάτος b , το συνολικό ύψος h , η εσωτερική ακτίνα καμπύλωσης r και άλλες εξωτερικές διαστάσεις οι οποίες συμβολίζονται χωρίς δείκτες όπως a , c ή d μετρούνται από το εξωτερικό άκρο των στοιχείων, εκτός αν δηλώνεται διαφορετικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 : Διαστάσεις τυπικών διατομών

Οι υπόλοιπες διαστάσεις της διατομής μελών και φύλλων ψυχρής ελάσεως που συμβολίζονται με δείκτες, όπως b_d , h_w ή s_w , μετρώνται από τον άξονα των στοιχείων ή το μέσο σημείο της γωνίας. Το πάχος t είναι το πάχος σχεδιασμού του χάλυβα.

2.4 Επιρροή των καμπύλων προσαρμογής

Με τη διαδικασία της ψυχρής έλασης δημιουργούνται καμπύλες προσαρμογής στις διατομές. Ωστόσο ο υπολογισμός των ιδιοτήτων της διατομής θα πρέπει να βασίζεται στην πραγματική γεωμετρία της διατομής. Η επιρροή των στρογγυλευμένων γωνιών στην αντοχή της διατομής μπορεί να αγνοηθεί αν για εσωτερικές ακτίνες r ισχύουν οι σχέσεις $r \leq 5t$ και $r \leq 0.10b_p$. Η διατομή μπορεί τότε να θεωρηθεί ότι αποτελείται από επίπεδα τοιχώματα με αιχμηρές γωνίες. Στις αδρανειακές ιδιότητες της διατομής για τον υπολογισμό δυσκαμψίας η επιρροή των στρογγυλευμένων γωνιών πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη.

Για τιμές r μεγαλύτερες των παραπάνω, η επιρροή των στρογγυλευμένων γωνιών στις ιδιότητες της διατομής μπορεί να ληφθεί υπόψη με απομείωση των ιδιοτήτων μιας παρόμοιας διατομής με αιχμηρές γωνίες, βλέπε σχήμα 2.3, με βάση τις παρακάτω προσεγγιστικές σχέσεις:

$$A_g \approx A_{g,sh} \cdot (1 - \delta) \quad (2.2\alpha)$$

$$I_g \approx I_{g,sh} \cdot (1 - 2\delta) \quad (2.2\beta)$$

$$I_w \approx I_{w,sh} \cdot (1 - 4\delta) \quad (2.2\gamma)$$

με:

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} \quad (2.2\delta)$$

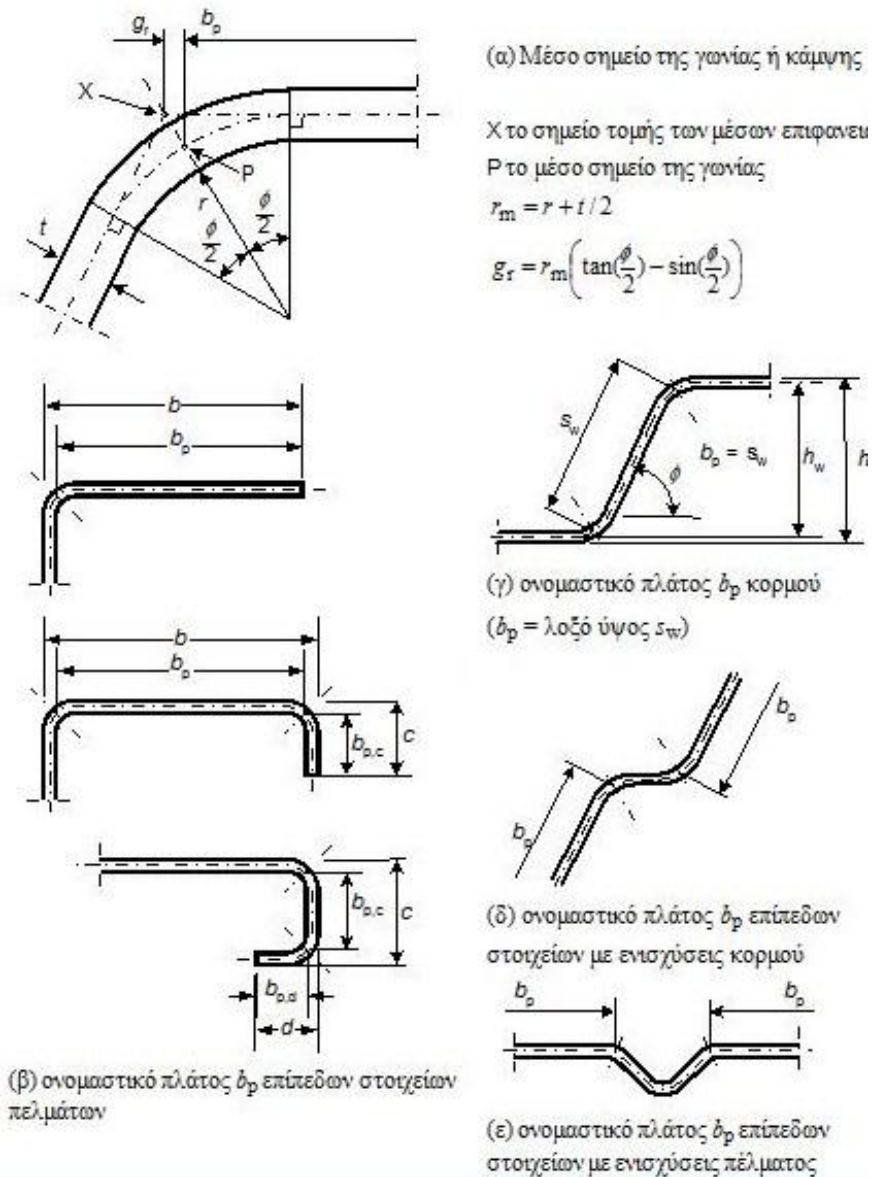
όπου:

| | |
|------------|---|
| A_g | εμβαδόν πλήρους διατομής |
| $A_{g,sh}$ | η τιμή του A_g για μια διατομή από επίπεδα στοιχεία |
| $b_{p,i}$ | ονομαστικά πλάτη επίπεδων τοιχωμάτων l για μια διατομή από επίπεδα στοιχεία |
| I_g | ροπή αδράνειας πλήρους διατομής |
| $I_{g,sh}$ | τιμή της I_g για μια διατομή από επίπεδα στοιχεία |
| I_w | σταθερά στρέβλωσης πλήρους διατομής |
| $I_{w,sh}$ | τιμή της I_w για μια διατομή από επίπεδα στοιχεία |
| ϕ | γωνία μεταξύ δύο επίπεδων τοιχωμάτων |
| m | αριθμός επίπεδων τοιχωμάτων |
| n | αριθμός καμπύλων τοιχωμάτων |
| r_j | εσωτερική ακτίνα καμπύλου τοιχώματος j |

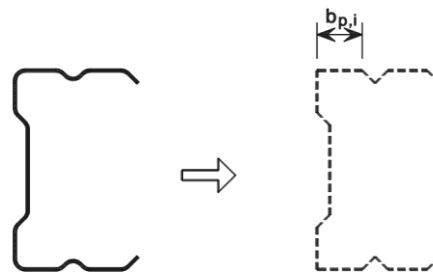
Οι απομειώσεις με βάση τις εξισώσεις (2.2) μπορούν επίσης να εφαρμοστούν και κατά τον υπολογισμό των ιδιοτήτων της ενεργού διατομής A_{eff} ,

$I_{y,eff}$, $I_{z,eff}$ και $I_{w,eff}$ με την προϋπόθεση ότι τα ισοδύναμα πλάτη των επίπεδων στοιχείων μετρώνται από τα σημεία τομής των μέσων επιφανειών των στοιχείων.

Τέλος όταν η εσωτερική ακτίνα είναι $r > 0,04 \cdot t \cdot E/f_y$ η αντοχή της διατομής πρέπει να προσδιορίζεται από πειράματα.



Σχήμα 2.2: Ονομαστικά πλάτη επίπεδων στοιχείων b_p , ώστε να ληφθούν υπόψη οι κάμψεις



Πραγματική διατομή Ιδεατή διατομή

Σχήμα 2.3: Προσεγγιστικός τρόπος για να ληφθούν υπόψη οι στρογγυλεμένες γωνίες

2.5 Γεωμετρικές συνθήκες ισχύος

Όσα έχουν αναφερθεί σχετικά με το σχεδιασμό και τον υπολογισμό των λεπτότοιχων διατομών ψυχρής έλασης ή διαμόρφωσης είναι εφαρμόσιμα μόνο στις διατομές που πληρούν ορισμένες γεωμετρικές συνθήκες. Αυτές συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα όπου δίνονται οι μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος της διατομής. Για διατομές των οποίων η γεωμετρία δεν περιλαμβάνεται στον πίνακα, ο σχεδιασμός τους πρέπει να διεξαχθεί πειραματικά.

Για την εξασφάλιση επαρκούς ακαμψίας και ασφάλειας έναντι πρόωρου λυγισμού των τυχών ενισχύσεων, οι διαστάσεις τους πρέπει να βρίσκονται μέσα στα ακόλουθα όρια:


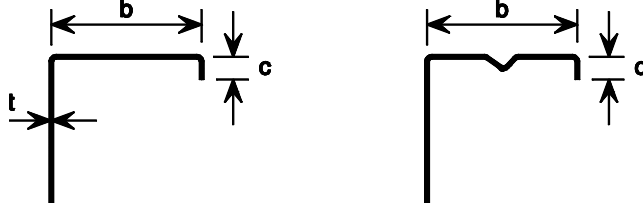
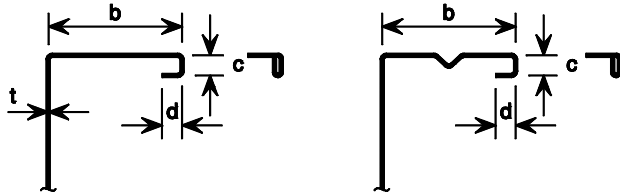
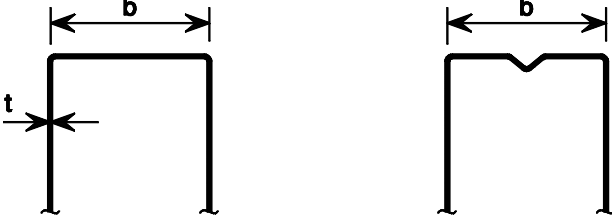

$$0,2 \leq \frac{c}{b} \leq 0,6$$

$$0,1 \leq \frac{d}{b} \leq 0,3$$

όπου οι διαστάσεις b, c και d είναι αυτές που απεικονίζονται στον πίνακα 2.2.

Αν $c/b < 0,2$ ή $d/b < 0,1$ το χείλος αγνοείται και τίθεται $c = 0$ ή $d = 0$. Θα πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι το μήκος του χείλους c μετράται κάθετα στο πέλμα στην περίπτωση που το χείλος δεν είναι κάθετο στο πέλμα.

Πίνακας 2.2: Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος

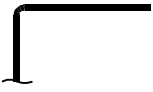


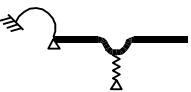

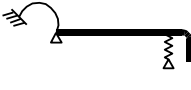

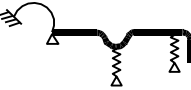

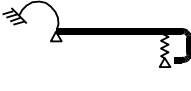

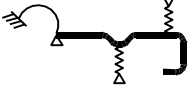

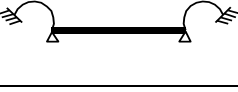

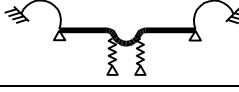




| Στοιχεία διατομών | Μέγιστη τιμή |
|---|---|
|  | $b/t \leq 50$ |
|  | $b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$ |
|  | $b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$ |
|  | $b/t \leq 500$ |
|  | $45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin\phi$ |

2.6 Προσομοίωση για στατική ανάλυση

Μια τυχούσα διατομή αποτελείται από μεμονωμένα πλακοειδή στοιχεία, τα οποία εδράζονται σε μία ή δύο πλευρές. Για 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 |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3.1 Γενικά

Το κύριο γνώρισμα των λεπτότοιχων ελασμάτων ψυχρής έλασης ή διαμόρφωσης είναι το εξαιρετικά μεγάλο πλάτος τους σε σχέση με το πάχος τους. Αυτό το στοιχείο τα διακρίνει από τα κλασικά σιδηρά ελάσματα θερμής έλασης αλλά δημιουργεί και προβλήματα τα οποία αποτελούν και χαρακτηριστικό τους. Τέτοια προβλήματα είναι η μεγάλη τους ευκαμψία, με αποτέλεσμα ακόμα και μια απλή σημειακή καταπόνηση να προσδίδει σημαντικές παραμορφώσεις, αλλά και οι γεωμετρικές ατέλειες λόγω της ψυχρής διαμόρφωσης.

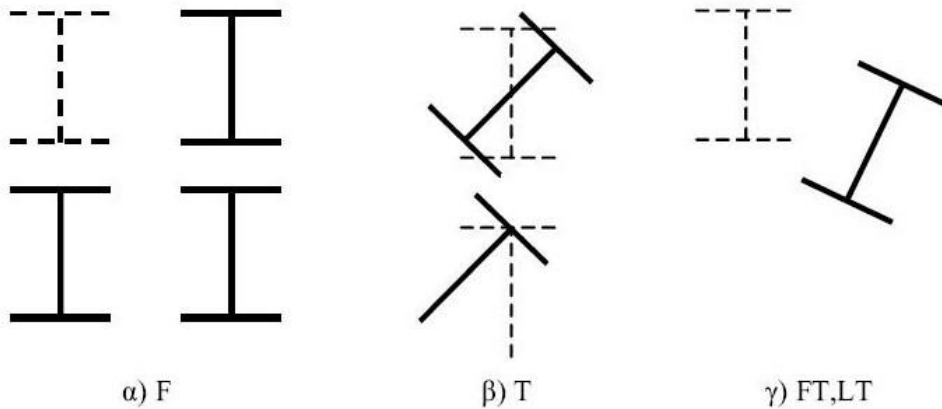
Εξαιτίας των ανωτέρω προβλημάτων, τα μέρη των λεπτότοιχων αυτών διατομών, προτού αστοχήσουν σε διαρροή, για θλιπτική ή διατμητική καταπόνηση, τείνουν να χάσουν την ευστάθειά τους. Η πιο κρίσιμη μορφή αστοχίας που εμφανίζεται είναι ο τοπικός λυγισμός, ο οποίος εξαναγκάζει τις διατομές σε μεταβολή του 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 όμως 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 Μορφές καθολικού λυγισμού

Η συμπεριφορά των μελών επηρεάζεται ως γνωστόν από φαινόμενα καθολικής αστάθειας, τα οποία υποβιβάζουν την αντοχή τους. Οι αστάθειες αυτές χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισης οι διατομές υπόκεινται σε παραμορφώσεις στερεού σώματος (ως διαφράγματα), οι οποίες αποτελούνται από μετατοπίσεις γύρω από τους κύριους άξονες και από στροφές. Οι καθολικές αστάθειες χαρακτηρίζονται από το γενικό όρο καθολικός λυγισμός. Ανάλογα με τη θέση της διατομής στην παραμορφωμένη κατάσταση, διακρίνονται οι εξής μορφές λυγισμού:

- **Καμπτικός λυγισμός (Flexural buckling)**
Οι διατομές υπόκεινται μόνο σε μετατοπίσεις γύρω από τους κύριους άξονες, χωρίς στροφές.
- **Στρεπτικός λυγισμός (Torsional buckling)**
Οι διατομές υπόκεινται σε καθαρές στροφές.
- **Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (FT ή LT)**
Οι διατομές υπόκεινται ταυτόχρονα σε μετατοπίσεις γύρω από τους κύριους άξονες και σε στροφές. Διακρίνονται, ανάλογα με τη φόρτιση, δύο είδη στρεπτοκαμπτικού λυγισμού. Το πρώτο είδος (FT= flexural torsional) αφορά λυγισμό μελών υπό θλίψη και κάμψη, ενώ το δεύτερο (LT= lateral torsional), ονομαζόμενο και πλευρικός λυγισμός, αφορά λυγισμό μελών υπό καθαρή κάμψη.



Σχήμα 3.1: Παραμορφώσεις διατομών κατά τον καθολικό λυγισμό.

Το μήκος κύματος των μορφών καθολικού λυγισμού είναι μεγάλο και τα σημεία μηδενισμού συμπίπτουν με τις θέσεις στήριξης έναντι των σχετικών μετατοπίσεων ή στροφών. Ο κίνδυνος καθολικού λυγισμού αυξάνει έτσι με την αύξηση των ανοιγμάτων. Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες μορφές καθολικού λυγισμού, ο στρεπτικός λυγισμός έχει μικρά ως μεσαία μήκη κύματος και ταυτίζεται συχνά, με τον τοπικό λυγισμό.

3.3 Μορφές λυγισμού διατομών

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:

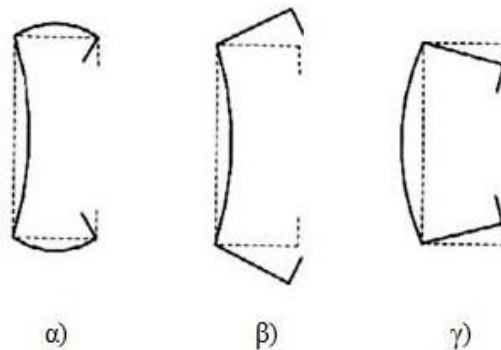
- Τοπικός λυγισμός (Local buckling)

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.

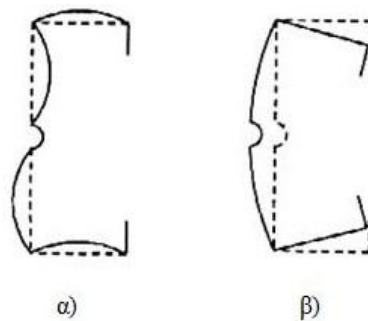
- Λυγισμός με στρέβλωση της διατομής (Distorsional buckling)

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 στηριζόντων και στηριζόμενων στοιχείων.



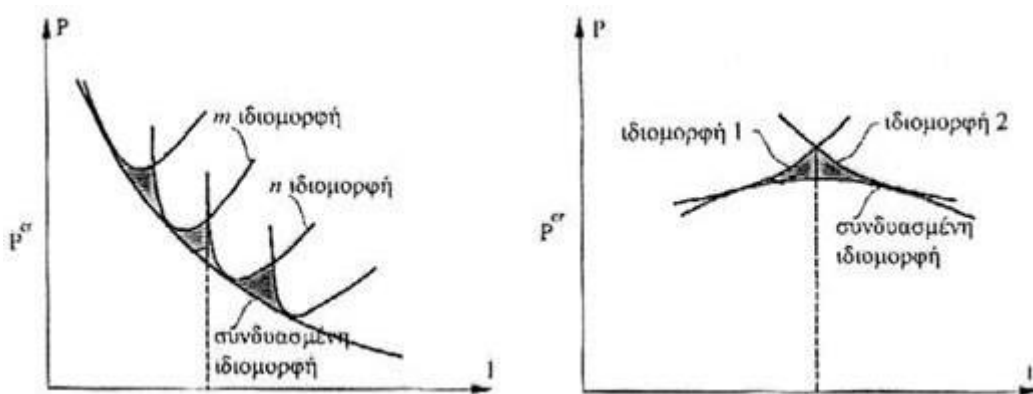
Σχήμα 3.2: Παραμορφώσεις διατομής λόγω α) τοπικού λυγισμού και β), γ) λυγισμού με στρέβλωση της διατομής



Σχήμα 3.3: Παραμορφώσεις διατομής λόγω α) τοπικού λυγισμού και β) 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 ιδιόμορφων λυγισμού, μπορούμε να έχουμε σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητας. Αν τα μήκη κύματος δύο συνδυασμένων ιδιόμορφων 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.



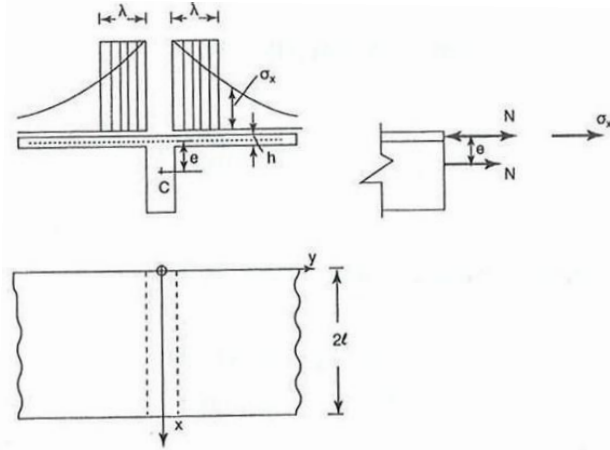
Σχήμα 3.4: Μείωση της φέρουσας ικανότητας λόγω αλληλεπίδρασης ασταθειών

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 Θεωρητική τεκμηρίωση τοπικού λυγισμού

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 στηρίξεως.



Σχήμα 3.5: Απειρομήκης συνεχής πλάκα

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

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

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

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

Η ενέργεια παραμορφώσεως της πλάκας δίδεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\mathcal{E}_1 = 2 \cdot \frac{h}{2E} \int_0^{2\ell} \int_0^{2\ell} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2 \cdot \nu \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y + 2(1 + \nu)\tau_{xy}^2] dx \cdot dy \quad (3.3)$$

Ή λόγω των (3.1) και (3.2):

$$\mathcal{E}_1 = 2 \cdot h \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^3 \pi^3}{\ell^2} \left(\frac{B_n^2}{E} + \frac{A_n B_n}{2G} + \frac{A_n^2}{2G} \right) \quad (3.4)$$

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:

$$M = M_o + M_1 \cdot \cos \frac{\pi x}{\ell} + M_2 \cdot \cos \frac{2\pi x}{\ell} + .. \quad (3.5)$$

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:

$$N = 2h \cdot \int_0^{\infty} \sigma_x dy = 0 \quad (3.6)$$

$$M_w = 2h \cdot e \cdot \int_0^{\infty} \sigma_x dy = M$$

Η ενέργεια των εξωτερικών δυνάμεων θα είναι:

$$\varepsilon_2 = \int_0^{2\ell} \frac{N^2 dx}{2AE} + \int_0^{2\ell} \frac{M_w^2 dx}{2EI} \quad (3.7)$$

Και το συνολικό έργο:

$$\begin{aligned} \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = & \frac{\pi}{2hE} \sum_{n=1}^{\infty} n [Y_n^2 + (1+\nu)X_n Y_n + (1+\nu)X_n^2] + \\ & + \frac{\ell}{2AE} \sum_{n=1}^{\infty} X_n^2 + \frac{M_o^2 \ell}{EI} + \frac{\ell}{2EI} \sum_{n=1}^{\infty} (M_n - eX_n)^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

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

Πρέπει: $\frac{\partial \varepsilon}{\partial A_n} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial B_n} = 0$

Από αυτές τις εξισώσεις προσδιορίζουμε τα A_n, B_n .

Αν $M = M_1 \cos \frac{\pi x}{\ell}$ τότε εύκολα βρίσκουμε:

$$A_1 = \frac{\ell X_1}{2\pi h} \quad B_1 = -\frac{(1+\nu)\ell X_1}{2\pi h}$$

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

Η κατανομή της σ_x θα είναι αυτή του σχήματος

Έπειτα προσδιορίζουμε το πλάτος 2λ το οποίο θα απαιτείτο σε μια δοκού 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_e , τότε από τη στοιχειώδη θεωρία κάμψεως βρίσκουμε:

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

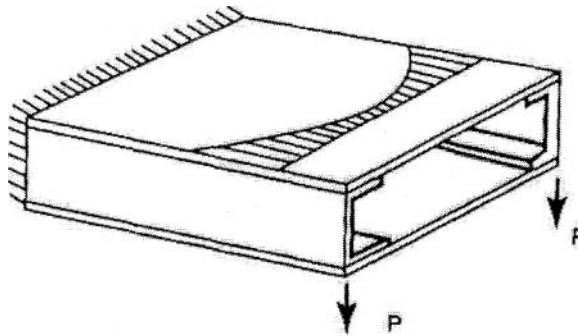
$$M_w = -\frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{2\lambda h}{A} \right) \cdot \sigma_\ell \text{ και } M_f = -2\lambda h e \sigma_\ell$$

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

Για τον χάλυβα ισχύει $\nu = 0,3$ άρα $2\lambda = 0,181(2\ell)$ (3.10)

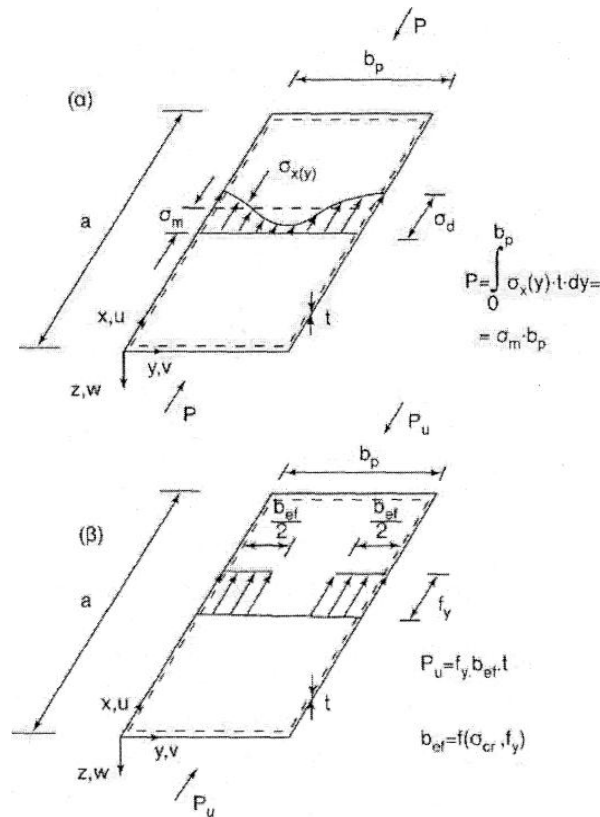
Δηλαδή για το υποτιθέμενο διάγραμμα ροπής $M = M_1 \cdot \cos \frac{\pi x}{\ell}$, το ενεργό πλάτος της πλάκας είναι το 18% του ανοίγματος 2ℓ αυτής. Με ανάλογο τρόπο μπορούν να επιλυθούν διάφορες περιπτώσεις φορέων για διάφορες φορτίσεις.

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 κλασική 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 $b_{\text{eff}} \leq b$ το οποίο αποκαλούμε ενεργό πλάτος της διατομής.



Σχήμα 3.7: Κατανομή τάσεων περιμετρικά εδραζόμενης θλιβόμενης πλάκας α) πραγματική κατανομή τάσεων, β) κατανομή τάσεων στη βάση του ενεργού πέλματος

Μια προσέγγιση του ενεργού πλάτους έδωσε πρώτος 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:

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

όπου σ_{cr} η κρίσιμη τάση λυγισμού (ή τάση δρόμου διακλαδώσεως).

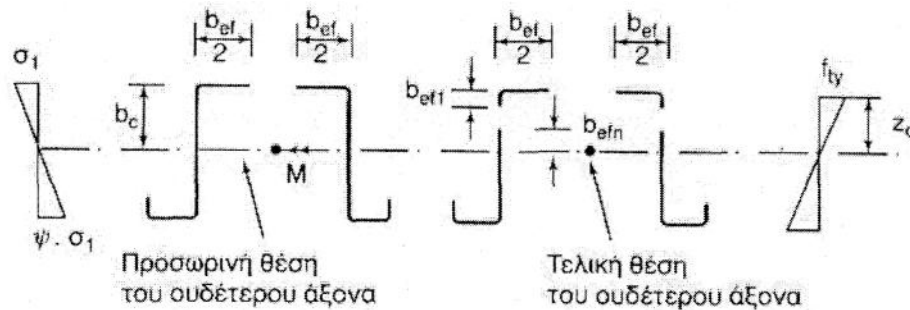
Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η σ_{cr} , για την ίδια διατομή, είναι διαφορετική από φόρτιση σε φόρτιση. Κατά συνέπεια το ενεργό πλάτος b_{eff} της ίδιας διατομής, διαφέρει ανάλογα με την καταπόνηση στην οποία υπόκειται αυτή.

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:

$$R_M = \frac{W_{ef} \cdot f_y}{\gamma_M} \quad \text{όπου } W_{ef} \text{ η ροπή αντιστάσεως ενεργού διατομής}$$

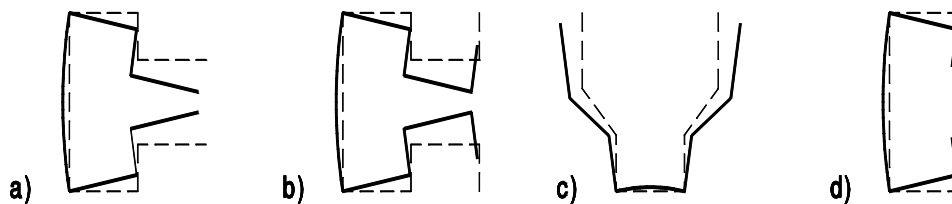
Για την αποφυγή μιας κοπιώδους επαναληπτικής διαδικασίας κατά τον προσδιορισμό της ενεργού διατομής, τα ενεργά τμήματα του κορμού μπορούν να υπολογισθούν από το λόγο $X = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$, θεωρώντας διατομή με ελαττωμένο θλιβόμενο πέλμα (ενεργό), αλλά κορμό πλήρως ενεργό.



Σχήμα 3.8: Αλλαγή θέσης ουδέτερου άξονα στην ενεργό διατομή

3.5 Κύρτωση με στρέβλωση διατομής

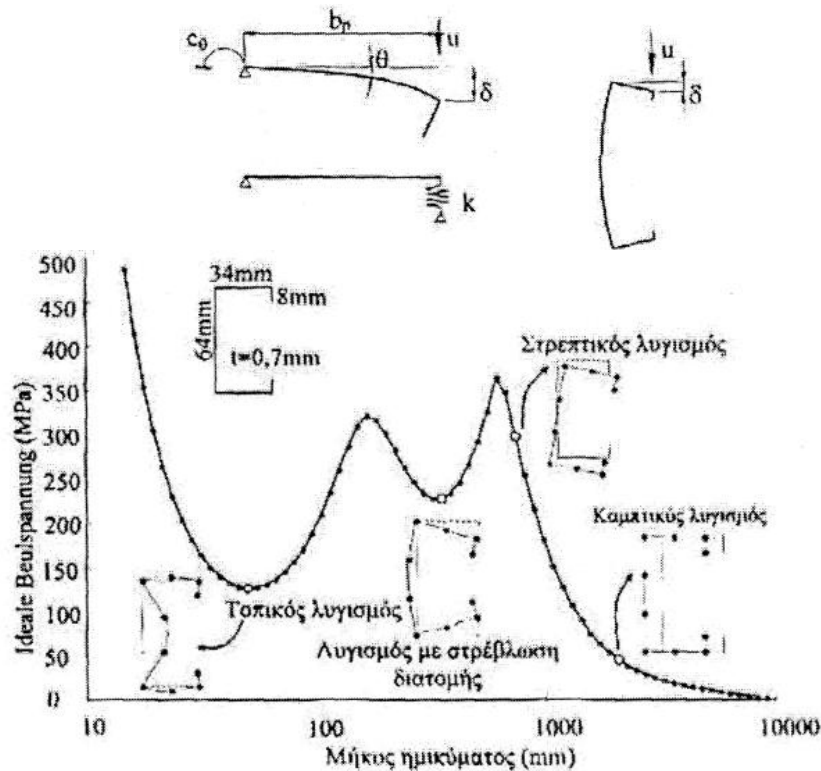
Η κύρτωση με στρέβλωση διατομής αποτελεί, σε σχέση με τον τοπικό και τον καθολικό λυγισμό, μια πολύ πιο σύνθετη μορφή αστάθειας. Σε αυτή την περίπτωση, η μορφή της διατομής δεν διατηρείται δεδομένου ότι παραμορφώνονται οι ακμές της διατομής. Επομένως, η συγκεκριμένη μορφή αστάθειας αφορά τις διατομές με ελαστικά στηριζόμενα άκρα και παραμορφώσιμες ενισχύσεις.



Σχήμα 3.9: Παραδείγματα μορφών λυγισμού με στρέβλωση της διατομής

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

πέλημα είναι στενό, εμφανίζεται τοπικός λυγισμός στον κορμό με όμοια μήκη κύματος, όπως στο πέλημα, κάτι που οδηγεί σε μικρές τάσεις κύρτωσης. Αν το πέλημα είναι πολύ πλατύ τότε το κύριο μέλημά μας είναι η στήριξή του με ενισχύσεις. Πλατύτερες ενισχύσεις στηρίζουν καλύτερα τα πέσματα αλλά είναι οι ίδιες ευαίσθητες έναντι τοπικού λυγισμού. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.10, το μήκος κύματος για κύρτωση με στρέβλωση διατομής βρίσκεται μεταξύ του μήκους κύματος του τοπικού και του καθολικού λυγισμού.



Σχήμα 3.10: Μήκη ημικυμάτων για διάφορες μορφές ελαστικής αστάθειας θλιβόμενου υποστυλώματος διατομής U

3.6 Γεωμετρικές ιδιότητες ενεργού διατομής υποκείμενης σε τοπικό λυγισμό ή λυγισμό με στρέβλωση διατομής

3.6.1 Παραδοχές

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, μέρος 1.3 (EN 1993-1-3) κατά την περιγραφή διατομών υποκείμενων σε τοπικό λυγισμό ή σε λυγισμό με στρέβλωση διατομής, λαμβάνονται υπ' όψιν τα εξής:

1. Η επίδραση του τοπικού λυγισμού και του λυγισμού με στρέβλωση της διατομής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον προσδιορισμό της αντοχής και της δυσκαμψίας μελών και φύλλων ψυχρής ελάσεως.

2. Η επίδραση του τοπικού λυγισμού μπορεί να λαμβάνεται υπόψη χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της ενεργού διατομής, οι οποίες στηρίζονται στα ενεργά πλάτη.
3. Η πιθανή μετατόπιση του κέντρου βάρους της ενεργού ως προς την πλήρη διατομή, λαμβάνεται υπόψη.
4. Στον υπολογισμό της αντοχής έναντι τοπικού λυγισμού, το όριο διαρροής f_y πρέπει να λαμβάνεται ίσο με το όριο διαρροής του βασικού υλικού f_{yb} όταν υπολογίζονται τα ενεργά πλάτη των θλιβόμενων στοιχείων.
5. Για ελέγχους στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας το ενεργό πλάτος ενός θλιβόμενου στοιχείου πρέπει να βασίζεται στη θλιπτική τάση $\sigma_{com,Ed,ser}$ του στοιχείου, υπό τα φορτία λειτουργικότητας.
6. Ο λυγισμός με στρέβλωση της διατομής λαμβάνεται υπόψη αν αποτελεί τον κρίσιμο μηχανισμό αστοχίας.

3.6.2 Επίπεδα στοιχεία χωρίς ενισχύσεις.

Στο παράδειγμα της πλάκας του σχήματος, η κρίσιμη τάση λυγισμού σ_{cr} δίνεται από τον τύπο:

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

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, ο οποίος εξαρτάται από τη μορφή του διαγράμματος των τάσεων.

Η ανηγμένη λυγηρότητα προσδιορίζεται από τη σχέση $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}}$ οπότε

βρίσκουμε:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)f_y}{\pi^2 EK_\sigma}} \cong 1,052 \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{f_y}{EK_\sigma}} = \frac{\frac{b_p}{t}}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{K_\sigma}} \quad (3.14)$$

όπου:

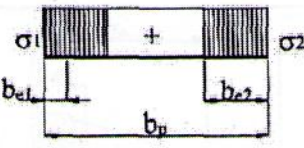
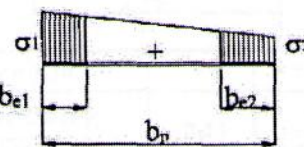
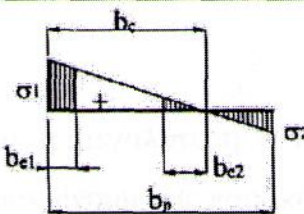
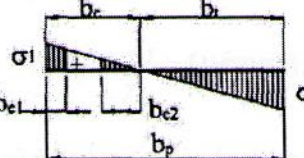
K_σ ο συντελεστής κυρτώσεως, από τους πίνακες 3.1 και 3.2

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{23,5}{f_y}} \quad \text{με } f_y \text{ σε KN/cm}^2$$

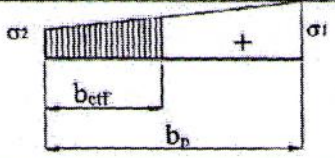
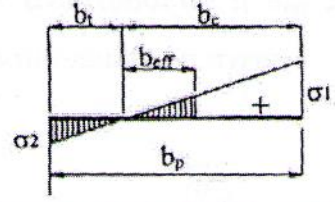
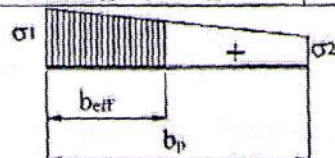
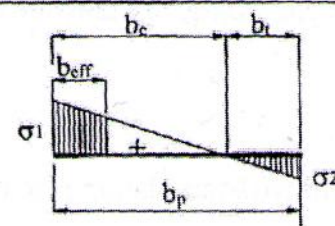
Ο μειωτικός συντελεστής υπολογίζεται:

- Αν $\overline{\lambda}_p > 0,673$ τότε $\rho = \frac{1}{\lambda_p} \cdot \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right)$
 - Αν $\overline{\lambda}_p \leq 0,673$ τότε $\rho = 1$
- (3.15)

Πίνακας 3.1: Εσωτερικά θλιβόμενα στοιχεία

| | | | | | | |
|---|--|---------------------------|------|--|------|--------------------|
|  | $\psi = +1:$ $b_{eff} = \rho b_p$ $b_{e1} = 0,5b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5b_{eff}$ | | | | | |
|  | $+1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho b_p$ $b_{e1} = \frac{2b_{eff}}{5-\psi}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$ | | | | | |
|  | $0 > \psi \geq -1:$ $b_{eff} = \rho b_c$ $b_{e1} = 0,4b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6b_{eff}$ | | | | | |
|  | $\psi < -1:$ $b_{eff} = \rho b_c$ $b_{e1} = 0,4b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6b_{eff}$ | | | | | |
| $\psi = \sigma_2/\sigma_1$ | +1 | $1 > \psi > 0$ | 0 | $0 > \psi > -1$ | -1 | $-1 > \psi > -3$ |
| Συντελεστής κύρτωσης k_o | 4,0 | $\frac{8,2}{1,05 + \psi}$ | 7,81 | $7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$ | 23,9 | $5,98(1 - \psi)^2$ |
| Εναλλακτικά, για $+1 > \psi > -1:$ | | | | $k_o = \frac{16}{[(1 + \psi)^2 + 0,112(1 + \psi)^2]^{0,5} + (1 + \psi)}$ | | |

Πίνακας 3.2: Προεξέχοντα θλιβόμενα στοιχεία

| | | | | | |
|--|---|-----------------------------|------|--------------------------------|------|
|  | $+1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho b_p$ | | | | |
|  | $\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c$ | | | | |
| $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ | +1 | 0 | -1 | $+1 \geq \psi \geq -1$ | |
| Συντελεστής κύρτωσης k_ψ | 0,43 | 0,57 | 0,85 | $0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$ | |
|  | $+1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho b_p$ | | | | |
|  | $\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c$ | | | | |
| $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ | +1 | $+1 \geq \psi > 0$ | 0 | $0 > \psi > -1$ | -1 |
| Συντελεστής κύρτωσης k_ψ | 0,43 | $\frac{0,578}{\psi - 0,34}$ | 1,70 | $1,70 - 5\psi + 17,1\psi^2$ | 23,8 |

Εάν σ_{max} είναι η μεγαλύτερη θλιπτική τάση, υπό την επίδραση των φορτίων λειτουργίας, διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Εάν $\sigma_{max} = \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$ (μέγιστη θλιπτική τάση ίση με το όριο διαρροής διά συντελεστή ασφαλείας), τότε εφαρμόζονται οι τύποι (3.14) και (3.15). Τα ενεργά πλάτη προσδιορίζονται από τους πίνακες 3.1 και 3.2.
- Εάν $\sigma_{max} < \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$, τότε στη θέση του σ_{cr} εισέρχεται το σ_{max} και ο λ_ρ που χρησιμοποιείται στους παραπάνω τύπους γίνεται:

$$\bar{\lambda}_{p,max} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{max}}{f_y} \gamma_{M1}} \quad (3.16)$$

- Εάν αναπτύσσεται η σ_{op} . Στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, θα χρησιμοποιηθεί η σχέση:

$$\bar{\lambda}_{op} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{op}}{f_y}} \quad (3.17)$$

όπου σ_{op} η μέγιστη θλιπτική τάση πλακοειδούς στοιχείου για φορτία λειτουργίας, με χρήση της ενεργού διατομής.

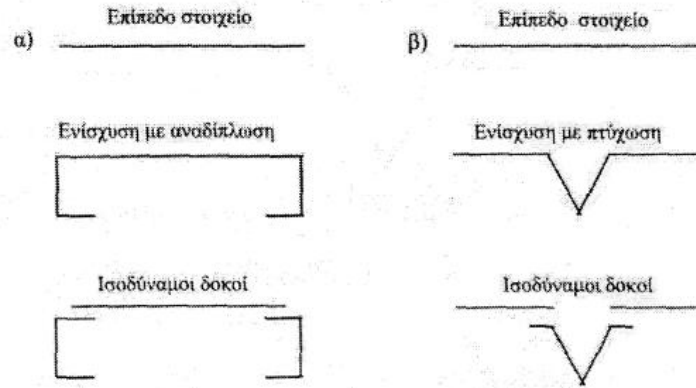
Συνοπτικά η πορεία υπολογισμού είναι η ακόλουθη:

1. Προσδιορίζουμε τις τάσεις των άκρων σ_1 και σ_2 , χρησιμοποιώντας την πλήρη διατομή του επιπέδου μέλους.
2. Από την τιμή του λόγου $\Psi = \sigma_2 / \sigma_1$ και από τους πίνακες 3.1 και 3.2 βρίσκουμε τον K_σ .
3. Από τον τύπο (3.14) υπολογίζουμε το $\bar{\lambda}_p$.
4. Ανάλογα με την τιμή της μέγιστης θλιπτικής τάσεως, προσδιορίζουμε το $\bar{\lambda}_p$ κατά τους τύπους (3.16) ή (3.17).
5. Από τους τύπους (3.15) βρίσκουμε τον συντελεστή ρ και επομένως το b_{eff} .
6. Επαναλαμβάνουμε τους υπολογισμούς με το b_{eff} στη θέση του b_p .
7. Με το τελικό b_{eff} , $\bar{\lambda}_p$ και t που υπολογίζουμε, ελέγχουμε το έλασμα για τοπικό λυγισμό, με τη βοήθεια των καμπυλών λυγισμού από τον πίνακα 5.5.2 του EC.3.1.1.

3.6.3 Επίπεδα στοιχεία με ενισχύσεις

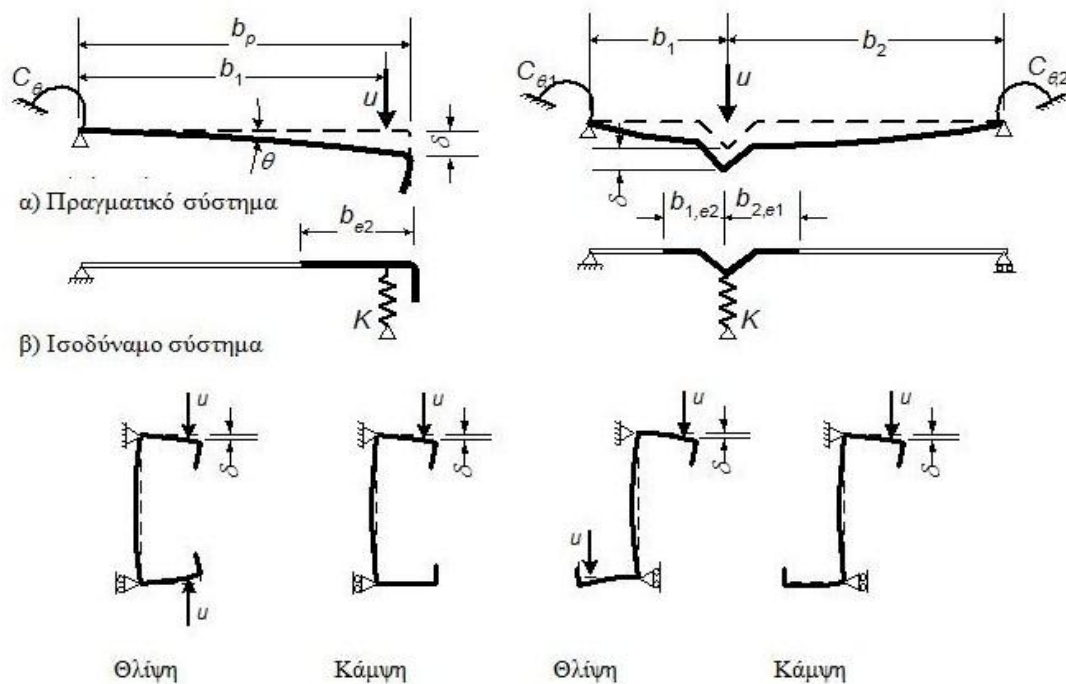
3.6.3.1 Γενικά

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 3.11 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 3.11: Ισοδύναμες δοκοί σε ενισχυμένες διατομές

Η έντονη τοπική ακαμψία που προσδίδει μια ενίσχυση επιτρέπει σε αυτή να θεωρείται ως δοκός επί της οποίας στηρίζεται το υπόλοιπο του επίπεδου ελάσματος. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 (EN 1993-1-3), ο έλεγχος ενισχυμένων θλιβόμενων στοιχείων βασίζεται στην παραδοχή ότι η ενίσχυση συμπεριφέρεται σαν ένα θλιβόμενο μέλος με συνεχή μερική δέσμευση, στα σημεία επαφής του με τα επίπεδα μέρη και με ακαμψία ελατηρίου (συνεχούς ανά μέτρο μήκους), που εξαρτάται από τις συνοριακές συνθήκες, αλλά και την δυσκαμψία του γειτονικού επίπεδου στοιχείου. Αυτό μας επιτρέπει να υιοθετήσουμε απλά μοντέλα σχεδιασμού, όπου τα ενισχυτικά ακαμψίας και τα προσκείμενα σε αυτά τμήματα των επίπεδων στοιχείων, θεωρούνται ως δοκοί επί ελαστικών βάσεων. Η σταθερά του ελατηρίου μιας ενίσχυσης εξαρτάται από τις οριακές συνθήκες και τη δυσκαμψία του γειτονικού στοιχείου της διατομής.



γ) Προσδιορισμός του δ για διατομές C και Z

Σχήμα 3.12: Καθορισμός της ακαμψίας του ελατηρίου

Επομένως, ο μηχανισμός λυγισμού και το φορτίο λυγισμού, εξαρτώνται από το ενεργό εμβαδόν και την ακαμψία της ενίσχυσεως. Στην περίπτωση που η ενίσχυση διαθέτει επαρκή ακαμψία, μπορεί να θεωρηθεί ως άκαμπτη στήριξη για το προσκείμενο επίπεδο στοιχείο.

Η σταθερά του ισοδύναμου ελατηρίου για μια ενίσχυση προσδιορίζεται από την υποχώρηση που προκαλείται εφαρμόζοντας ένα μοναδιαίο φορτίο u ανά μονάδα μήκους (Σχήμα 3.12), από τη σχέση:

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

όπου K η σταθερά του ισοδύναμου ελατηρίου και δ η μετακίνηση της ενίσχυσης λόγω του φορτίου u , που ασκείται στο κέντρο βάρους (b_1) του ενεργού μέρους της διατομής.

Κατά τον καθορισμό των τιμών των στροφικών σταθερών του ελατηρίου C_θ , $C_{\theta 1}$, $C_{\theta 2}$ από τη γεωμετρία της διατομής, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τυχόν άλλες ενισχύσεις που υπάρχουν στο ίδιο το στοιχείο, ή σε οποιοδήποτε άλλο στοιχείο της διατομής που υπόκειται σε θλίψη.

Για μια ακραία ενίσχυση το βέλος δ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

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

$$\text{με: } \theta = \frac{ub_p}{C_\theta}$$

Στην περίπτωση των ακραίων ενισχύσεων για διατομές C και Z, το C_θ πρέπει να υπολογίζεται με εφαρμογή μοναδιαίας δύναμης u , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.12(γ). Προκύπτει έτσι η ακόλουθη έκφραση για τη σταθερά ελατηρίου K_1 του πέλματος 1:

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

όπου:

- b_1 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), βλέπε σχήμα 3.13(α).
- b_2 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
- $k_f = 0$ πέλμα 2 είναι σε εφελκυσμό (π.χ. για δοκούς υπό κάμψη περί τον άξονα γ-γ)

$$k_f = \frac{A_{\text{eff}2}}{A_{\text{eff}1}} \quad \text{αν το πέλημα 2 είναι σε θλίψη (π.χ. για δοκό υπό αξονική θλίψη)}$$

$k_f = 1$ για συμμετρική διατομή σε θλίψη.

$A_{\text{eff}1}$ και $A_{\text{eff}2}$ τα ενεργά εμβαδά των ακραίων ενισχύσεων (συμπεριλαμβανομένου του ενεργού πλάτους b_{e2} του πέλεματος, βλέπε σχήμα 3.13(β)), των πελμάτων 1 και 2 αντίστοιχα.

Για ενδιάμεσες ενισχύσεις, οι σταθερές των στροφικών ελατηρίων $C_{\theta,1}$ και $C_{\theta,2}$, μπορούν εναλλακτικά να ληφθούν συντηρητικά ίσες με 0, οπότε το βέλος προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\delta = \frac{ub_1^2 b_2^2}{3(b_1 + b_2)} \cdot \frac{12(1 - \nu^2)}{Et^3} \quad (3.21)$$

Ο μειωτικός συντελεστής χ_d για τον υπολογισμό της αντοχής σε λυγισμό με στρέβλωση (καμπτικός λυγισμός της ενίσχυσης) πρέπει να υπολογίζεται από τη σχετική λυγηρότητα $\bar{\lambda}_d$ από τις σχέσεις:

$$\chi_d = 1,0 \quad \text{αν } \bar{\lambda}_d \leq 0,65 \quad (3.22)$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d \quad \text{αν } 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad (3.23)$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad \text{αν } \bar{\lambda}_d \geq 1,38 \quad (3.24)$$

όπου:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{cr,s}} \quad (3.25)$$

όπου $\sigma_{cr,s}$ η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού της ενίσχυσης.

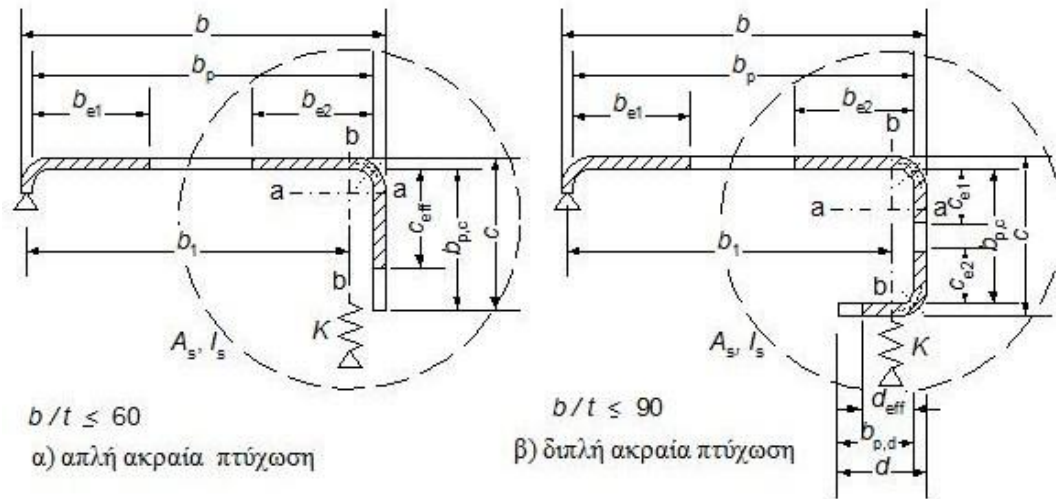
3.6.3.2 Ακραίες ενισχύσεις

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. Η γωνία μεταξύ ενίσχυσης και του επιπέδου ελάσματος είναι μεταξύ 45° και 135°.
2. Για το πλάτος της ενίσχυσης c πρέπει να ισχύει: $c > 0,2b_p$, όπου c και b_p φαίνονται στο σχήμα.
3. Ο λόγος $b_p/t \leq 60$ για απλή στραντζαριστή ενίσχυση και $b_p/t \leq 90$ για διπλή στραντζαριστή ενίσχυση.

Αν ικανοποιούνται όλα τα παραπάνω κριτήρια, η επιρροή της ενίσχυσης λαμβάνεται υπόψη. Για τον υπολογισμό των ενεργών περιοχών των ενισχύσεων υπάρχουν δύο μέθοδοι: η γενική και η απλουστευμένη, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.



Σχήμα 3.13: Ακραίες ενισχύσεις

1. Γενική Μέθοδος

Η μέθοδος αυτή είναι μια επαναληπτική μέθοδος. Γίνονται συνεχείς επαναλήψεις, μέχρις ότου προσεγγισθεί κατά την $n^{οστη}$ επανάληψη ο μειωτικός συντελεστής λυγισμού $\chi_n \approx \chi_{n-1}$ ($\chi_n < \chi_{n-1}$), όπου χ_{n-1} ο μειωτικός συντελεστής που βρέθηκε από την $(n-1)$ προσέγγιση. Η διαδικασία περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

i) 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 3.13 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:

α) για απλή ακραία πτυχωτή ενίσχυση:

$$c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c} \quad (3.26)$$

όπου το ρ υπολογίζεται από την παράγραφο 3.6.2, αλλά ο συντελεστής κύρτωσης K_σ προσδιορίζεται ως εξής:

$$- \text{εάν } \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0,35, \quad K_\sigma = 0,5 \quad (3.27)$$

$$- \text{εάν } 0,35 \leq \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0,6, \quad K_\sigma = 0,5 + 0,83 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{b_{p,c}}{b_p} - 0,35\right)^2} \quad (3.28)$$

β) για διπλή ακραία πτυχωτή ενίσχυση:

$$c_{\text{eff}} = \rho \cdot b_{p,c} \quad (3.29)$$

όπου το ρ υπολογίζεται από την παράγραφο 3.6.2, με συντελεστή κύρτωσης K_σ για εσωτερικό θλιβόμενο στοιχείο (πίνακας 3.1).

$$d_{\text{eff}} = \rho \cdot b_{p,d} \quad (3.30)$$

όπου το ρ υπολογίζεται από την παράγραφο 3.6.2, με συντελεστή κύρτωσης K_σ για προεξέχον θλιβόμενο στοιχείο (πίνακας 3.2).

ii) Η προηγούμενως 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:

$$A_s = t \cdot (b_{e2} + c_{\text{eff}}) \quad \text{ή} \quad (3.31)$$

$$A_s = t \cdot (b_{e2} + c_{e1} + c_{e2} + d_{\text{eff}}) \quad (3.32)$$

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

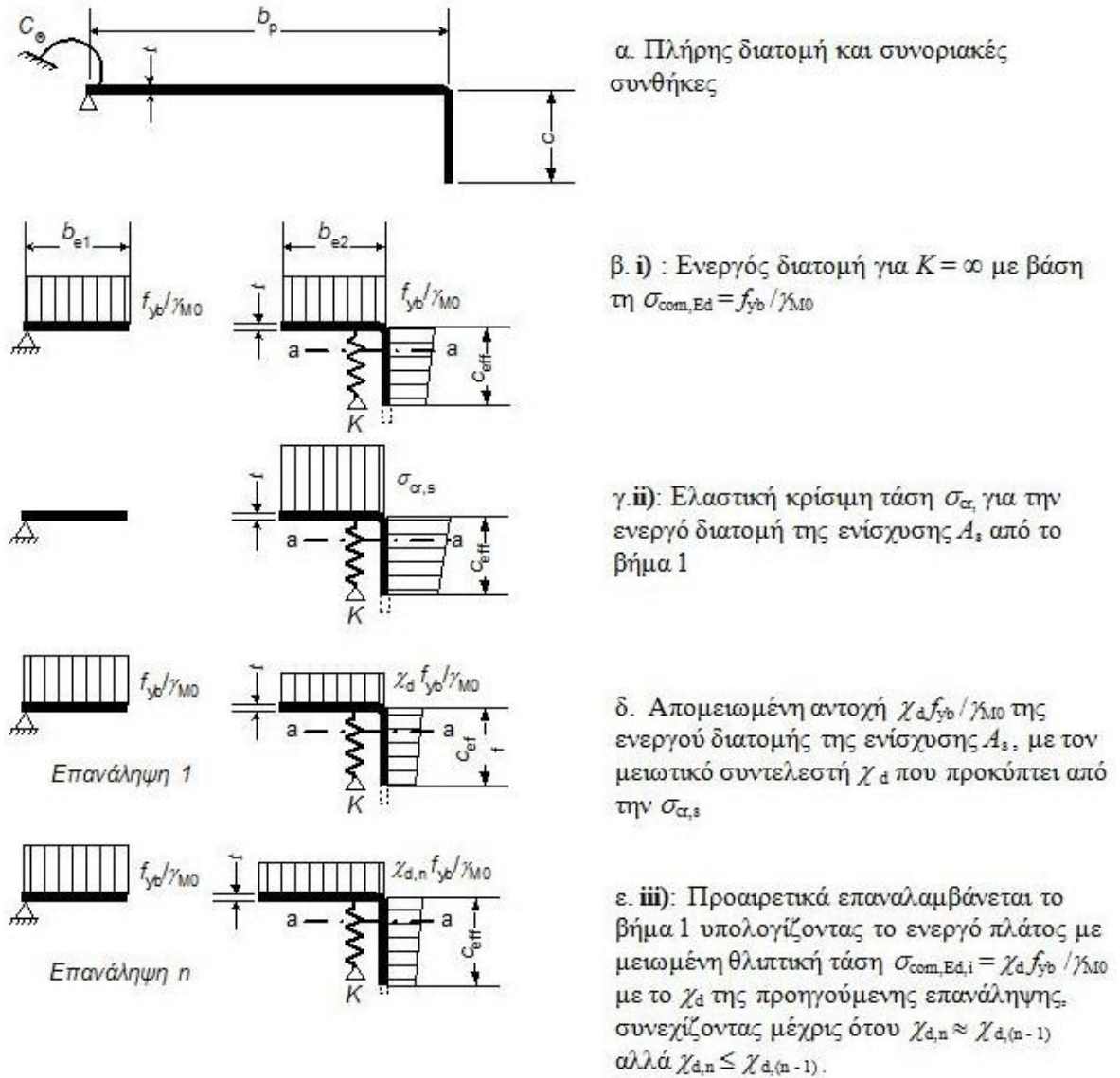
$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \sqrt{K E I_s}}{A_s} \quad (3.33)$$

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.

iii) Ο μειωτικός συντελεστής χ_1 για λυγισμό της ενίσχυσης προσδιορίζεται με τη μέθοδο που αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.6.3.1 και μπορεί να διορθώνεται σταδιακά με επαναληπτική διαδικασία. Επαναλαμβάνοντας όλα τα παραπάνω βήματα χρησιμοποιώντας την ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού $\sigma_{cr,s}$ στη θέση της θλιβόμενης τάσης $\sigma_{\text{com,Ed}}$, προσδιορίζεται ο συντελεστής χ_2 .



Σχήμα 3.14: 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 (3.14), αλλά:

$$\sigma_{cr} = \chi \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_M}, \text{ οπότε έχουμε } \bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi} \quad (3.34)$$

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

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \left(\frac{f_{yb}}{\gamma_{M0} \sigma_{com,Ed}} \right), \text{ αλλά } A_{s,red} \leq A_s \quad (3.35)$$

όπου $\sigma_{com,Ed}$ 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 .

$$t_{red} = t \cdot A_{s,red} / A_s \quad (3.36)$$

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

3.7 Αντοχή διατομής σε αξονική θλίψη

Ο έλεγχος γίνεται για να δειχθεί 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 $N_{c,Rd} = \frac{f_{yb} \cdot A_{eff}}{\gamma_{M_0}}$ (3.37)

- για $A_{eff} = A_g$ είναι

$$N_{c,Rd} = \frac{A_g \cdot \left[f_{yb} + (f_{ya} - f_{yb}) \cdot 4 \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{e1}} \right) \right]}{\gamma_{M_0}} \leq \frac{A_g \cdot f_{ya}}{\gamma_{M_0}} \quad (3.38)$$

όπου:

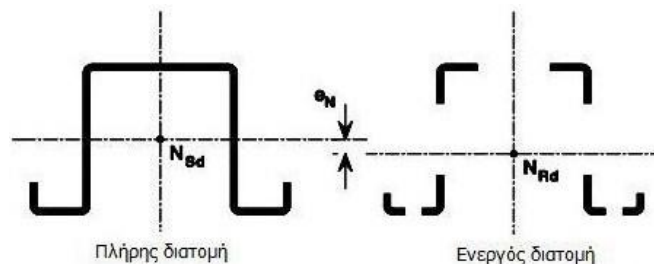
A_{eff} εμβαδόν ενεργού διατομής, υπολογισμένης σύμφωνα με την παράγραφο 5.5 για ομοιόμορφες θλιπτικές τάσεις ίσες προς f_{yb}/γ_{M1}

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 3.15: Ενεργός διατομή υπό θλίψη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ

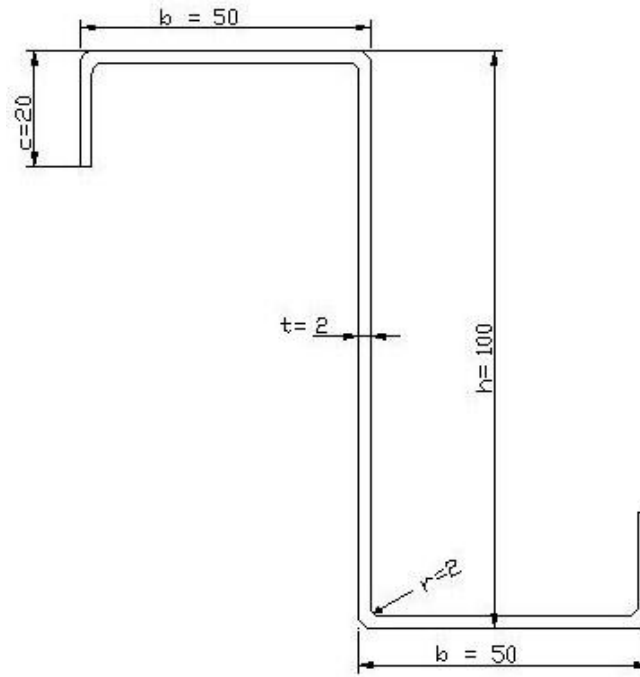
4.1 Γενικά στοιχεία εξεταζόμενων διατομών

Βάσει των διατάξεων που ορίζει ο Ευρωκώδικας 3 θα υπολογιστεί η αξονική δύναμη αντοχής σε θλίψη (N_{Rd}) των διατομών που εξετάζονται. Στην παρούσα μελέτη αναλύθηκαν διατομές C και Z, χωρίς ακραίες ενισχύσεις και με ακραίες κάθετες ενισχύσεις, χωρίς οπές και με οπές στον κορμό, κυκλικές και τετραγωνικές, διαφόρων μεγεθών. Η διαδικασία παρατίθεται ενδεικτικά για τρεις διατομές C, αρχικά χωρίς οπές, έπειτα με μία οπή ύψους 40 mm και τέλος με κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα, χωρίς οπές. Η μορφή καθώς και οι γεωμετρικές διαστάσεις των εξεταζόμενων διατομών δίνονται παρακάτω στον πίνακα 4.1 και τα σχήματα 4.1 και 4.2. Κάθε φορέας έχει μήκος $l=600\text{mm}$. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τις υπόλοιπες διατομές είναι όμοια με αυτήν που παρουσιάζεται. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατίθενται αναλυτικά στο τέλος του κεφαλαίου.

Πίνακας 4.1 : Διαστάσεις εξεταζόμενων διατομών

| Διατομή | h (mm) | b (mm) | c (mm) | r (mm) | t (mm) |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| C χωρίς ενισχύσεις | 100 | 50 | - | 2 | 2 |
| C με ακραίες ενισχύσεις | 100 | 50 | 20 | 2 | 2 |
| Z χωρίς ενισχύσεις | 100 | 50 | - | 2 | 2 |
| Z με ακραίες ενισχύσεις | 100 | 50 | 20 | 2 | 2 |

Όπου: h, ύψος κορμού
 b, πλάτος πέλματος
 c, εύρος ενίσχυσης
 r, ακτίνα προσαρμογή
 t, πάχος διατομής



β)

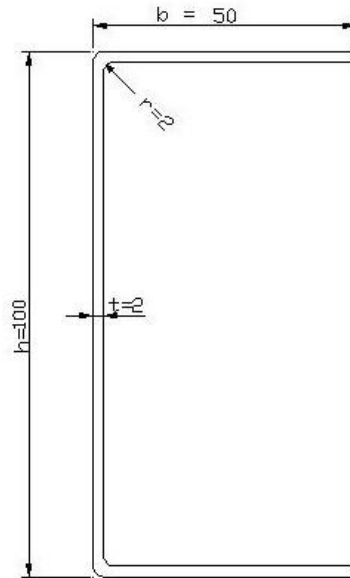
Σχήμα 4.2: Διατομή Z α) χωρίς ενισχύσεις και β) με ακραίες κάθετες ενισχύσεις

4.2 Προσδιορισμός της αξονικής δύναμης αντοχής σε ομοιόμορφη θλίψη της διατομής

4.2.1 Διατομή C χωρίς ενισχύσεις

Θα υπολογιστεί η αξονική δύναμη αντοχής σε ομοιόμορφη θλίψη της διατομής C χωρίς ενισχύσεις (Σχ. 4.3) από χάλυβα S355MC.

Στοιχεία χάλυβα S355MC: $f_{yb}=355 \text{ N/mm}^2$ και $f_u=430 \text{ N/mm}^2$



Σχήμα 4.3: Διατομή C χωρίς ενισχύσεις και χωρίς οπές

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενης διατομής (πίνακας 4.2):

Πίνακας 4.2: Διαστάσεις εξεταζόμενης διατομής

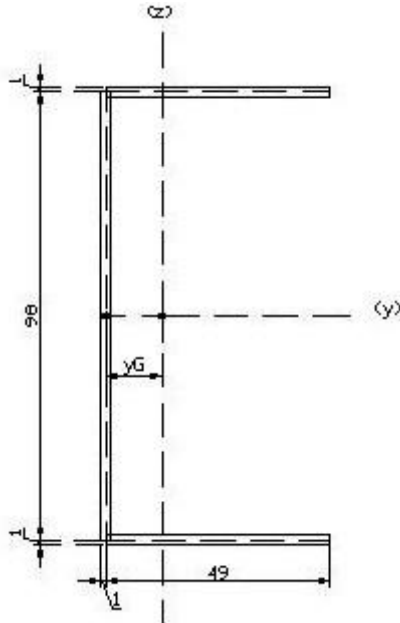
| Διατομή | h (mm) | b (mm) | r (mm) | t (mm) |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| C χωρίς ενισχύσεις | 100 | 50 | 2 | 2 |

1. Έλεγχος επιρροής στρογγυλεμένων γωνιών.

Έχουμε $r = 2\text{mm}$, $5t = 10\text{mm} \Rightarrow r < 5t$

$r/b_p = 2/(50-1) = 0,04 < 0,15$

Εφ' όσον ικανοποιούνται οι δύο παραπάνω συνθήκες μπορούμε να παραλείψουμε την επιρροή των στρογγυλεμένων γωνιών και να θεωρήσουμε ότι η διατομή συνίσταται από επίπεδα στοιχεία με αιχμηρές γωνίες. Τότε τα θεωρητικά μήκη των στοιχείων μετρώνται από τα μέσα σημεία των στοιχείων της παρακείμενης γωνίας. Η διατομή θα έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Διατομή C από επίπεδα στοιχεία

Τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής είναι τα εξής:

$$A_g = (h_p + 2 \cdot b_p) \cdot t = (98 + 2 \cdot 49) \cdot 2 = 392 \text{ mm}^2$$

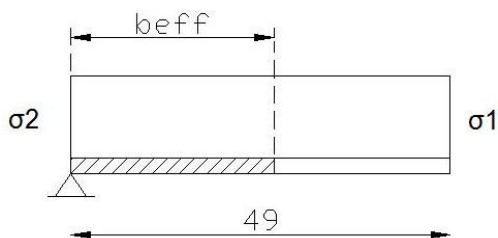
$$y_G = \frac{2 \cdot (49 \cdot 2 \cdot 24,5)}{2 \cdot (49 \cdot 2) + 98 \cdot 2} = 12,25 \text{ mm}$$

$$I_y = \frac{2 \cdot 98^3}{12} + 2 \cdot \frac{49 \cdot 2^3}{12} + 2 \cdot (29 \cdot 2 \cdot 49^2) = 627.526,67 \text{ mm}^4$$

$$I_z = \frac{98 \cdot 2^3}{12} + 2 \cdot \frac{2 \cdot 49^3}{12} + 98 \cdot 2 \cdot 12,25^2 + 2 \cdot (49 \cdot 2 \cdot (24,5 - 12,25)^2) = 98.106,17 \text{ mm}^4$$

2. Ενεργός διατομή πέλματος

Θεωρούμε το πέλμα ως ένα απλά στηριζόμενο στοιχείο υπό ομοιόμορφη θλίψη, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Ενεργός διατομή πέλματος

Για $\sigma_1 = \sigma_2$ και θεωρώντας τη θλίψη με θετικό πρόσημο έχω :

$$\psi = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 1$$

Άρα ο συντελεστής κυρτώσεως είναι $K_\sigma = 0,43$

Για τη λυγηρότητα λ_p έχουμε :

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{b_p}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_{yb}}{E \cdot K_\sigma}}$$

για τον υπολογισμό στην κατάσταση οριακής αντοχής (μέγιστη αντοχή μέλους σε θλίψη).

Οπότε είναι:

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{49}{2} \cdot \sqrt{\frac{355}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,43}} = 1,616 > 0,673$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p}\right) \cdot \frac{1}{\bar{\lambda}_p} = \left(1 - \frac{0,22}{1,616}\right) \cdot \frac{1}{1,616} = 0,5345$$

Επομένως : $b_{\text{eff}} = \rho \cdot b_p = 0,5345 \cdot 49 = 26,19 \text{ m}$

3. Ενεργός διατομή κορμού.

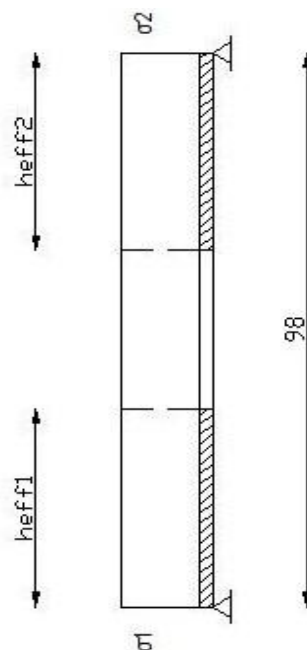
Θεωρούμε τον κορμό ως ένα διπλά στηριζόμενο στοιχείο υπό ομοιόμορφη θλίψη, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.6.

Επειδή $\sigma_1 = \sigma_2$ ο λόγος ψ είναι $\psi = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 1$ και ο συντελεστής κυρτώσεως είναι

$K_\sigma = 4$. Όμοια με προηγουμένως, υπολογίζουμε την λυγηρότητα $\bar{\lambda}_p$ ως εξής:

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{98}{2} \cdot \sqrt{\frac{355}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,43}} = 1,059 > 0,673$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p}\right) \cdot \frac{1}{\bar{\lambda}_p} = \left(1 - \frac{0,22}{1,059}\right) \cdot \frac{1}{1,059} = 0,7477$$



Σχήμα 4.6: Ενεργός διατομή κορμού

Οπότε τα ενεργά πλάτη του κορμού είναι:

$$h_{\text{eff1}} = h_{\text{eff2}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot h_p = \frac{0,7477 \cdot 98}{2} = 36,64 \text{ mm}$$

4. Εμβαδόν ενεργού διατομής και νέο κέντρο βάρους.

Το εμβαδόν της ενεργού διατομής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A_{\text{eff}} = 2 \cdot t \cdot (b_{\text{eff}} + h_{\text{eff1}}) = 2 \cdot 2 \cdot (26,19 + 36,64) = 251,33 \text{ mm}^2$$

Το νέο κέντρο βάρους βρίσκεται στη θέση:

$$y_{G,\text{eff}} = \frac{2 \cdot (26,19 \cdot 2 \cdot 13,095)}{251,33} = 5,46 \text{ mm}$$

Το κέντρο βάρους της διατομής μετατοπίστηκε κατά:

$$e_N = y_G - y_{G,\text{eff}} = 12,25 - 5,46 = 6,79 \text{ mm}$$

(η μετατόπιση έγινε προς τα θετικά του άξονος y - y)

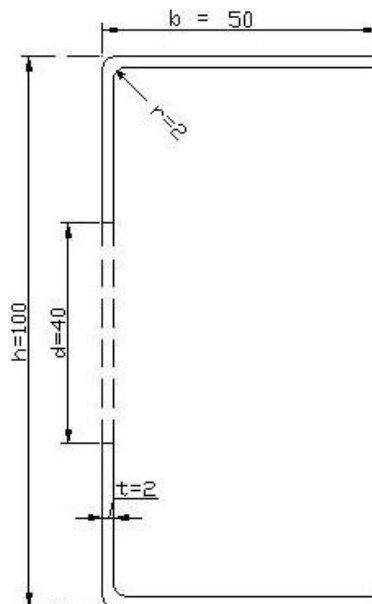
5. Υπολογισμός της αξονικής δύναμης αντοχής της διατομής.

Η αξονική δύναμη αντοχής της ενεργού διατομής δίδεται από τη σχέση:

$$N_{\text{Rd}} = A_{\text{eff}} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_M} = 251,33 \cdot \frac{355}{1,1} = 81.111,64 = 81,11 \text{ kN}$$

4.2.2 Διατομή C χωρίς ενισχύσεις και με οπή στον κορμό ύψους 40mm

Θα υπολογιστεί η αξονική δύναμη αντοχής σε ομοιόμορφη θλίψη της διατομής C χωρίς ενισχύσεις και με οπή στον κορμό ύψους 40mm (Σχ. 4.7) από χάλυβα S355MC.



Σχήμα 4.7: Διατομή C με οπή στον κορμό

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενης διατομής (πίνακας. 4.3):

Πίνακας 4.3: Διαστάσεις εξεταζόμενης διατομής

| Διατομή | h (mm) | b (mm) | d (mm) | r (mm) | t (mm) |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| C χωρίς ενισχύσεις με οπή στον κορμό | 100 | 50 | 40 | 2 | 2 |

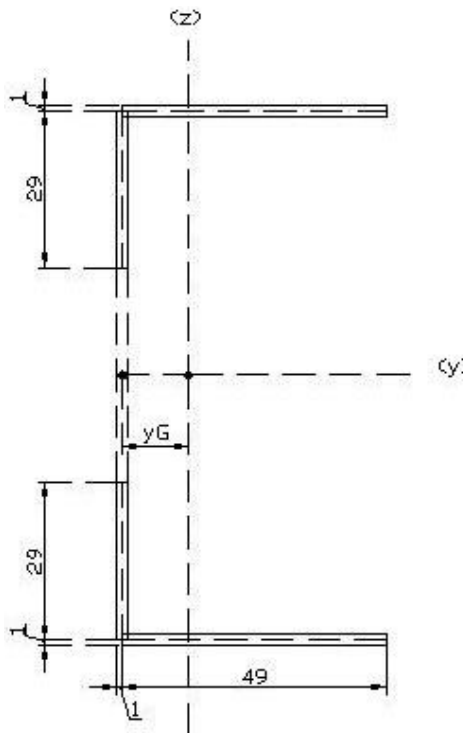
Στοιχεία χάλυβα S355MC: $f_{yb}=355 \text{ N/mm}^2$ και $f_u=430 \text{ N/mm}^2$

1. Έλεγχος επιρροής στρογγυλεμένων γωνιών.

Έχουμε $r = 2 \text{ mm}$, $5t = 10 \text{ mm} \Rightarrow r < 5t$

$$r/b_p = 2/(50-1) = 0,04 < 0,15$$

Εφ' όσον ικανοποιούνται οι δύο παραπάνω συνθήκες μπορούμε να παραλείψουμε την επιρροή των στρογγυλεμένων γωνιών και να θεωρήσουμε ότι η διατομή συνίσταται από επίπεδα στοιχεία με αιχμηρές γωνίες. Τότε τα θεωρητικά μήκη των στοιχείων μετρώνται από τα μέσα σημεία των στοιχείων της παρακείμενης γωνίας. Η διατομή θα έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8: Διατομή C με οπή από επίπεδα στοιχεία

Τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής είναι τα εξής:

$$A_g = (2 \cdot h'_p + 2 \cdot b_p) \cdot t = (2 \cdot 29 + 2 \cdot 49) \cdot 2 = 312 \text{ mm}^2$$

$$y_G = \frac{2 \cdot (49 \cdot 2 \cdot 24,5)}{312} = 15,39 \text{ mm}$$

$$I_y = 2 \cdot \frac{2 \cdot 29^3}{12} + 2 \cdot \frac{49 \cdot 2^3}{12} + 2 \cdot (49 \cdot 2 \cdot 49^2) = 478.791 \text{ mm}^4$$

$$I_z = 2 \cdot \frac{29 \cdot 2^3}{12} + 2 \cdot \frac{2 \cdot 49^3}{12} + 2 \cdot 29 \cdot 2 \cdot 15,39^2 + 2 \cdot (49 \cdot 2 \cdot (24,5 - 15,39)^2) = 82.996,29 \text{ mm}^4$$

2. Ενεργός διατομή πέλματος

Όμοια διαδικασία με την παράγραφο 5.1 : $b_{\text{eff}} = 26,19 \text{ m}$

3. Ενεργός διατομή κορμού

Θεωρούμε ότι ο κορμός αποτελείται από δύο απλά στηριζόμενα στοιχεία υπό μοιόμορφη θλίψη, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.9.

Επειδή $\sigma_1 = \sigma_2$ ο λόγος ψ είναι $\psi = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 1$ και ο συντελεστής κυρτώσεως είναι $K_\sigma = 4$.

Η λυγηρότητα $\bar{\lambda}_p$ για τον υπολογισμό στην κατάσταση οριακής αντοχής (μέγιστη αντοχή μέλους σε θλίψη) είναι:

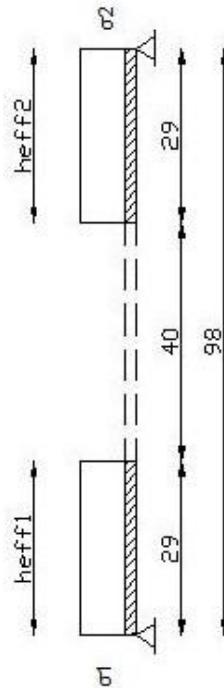
$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{58}{2} \cdot \sqrt{\frac{355}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,43}} = 0,627 < 0,673$$

$$\rho = 1$$

Άρα τα ενεργά πλάτη του κορμού είναι:

$$h_{\text{eff1}} = h_{\text{eff2}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot h_p = \frac{1 \cdot 58}{2} = 29 \text{ mm}$$

Δηλαδή ολόκληρος ο κορμός είναι πλήρως ενεργός.



Σχήμα 4.9: Ενεργός διατομή κορμού

4. Εμβαδόν ενεργού διατομής και νέο κέντρο βάρους.

Το εμβαδόν της ενεργού διατομής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A_{\text{eff}} = 2 \cdot t \cdot (b_{\text{eff}} + h_{\text{eff1}}) = 2 \cdot 2 \cdot (26,19 + 29) = 220,77 \text{ mm}^2$$

Το νέο κέντρο βάρους βρίσκεται στη θέση:

$$y_{G,\text{eff}} = \frac{2 \cdot (26,19 \cdot 2 \cdot 13,095)}{251,33} = 5,46 \text{ mm}$$

Το κέντρο βάρους της διατομής μετατοπίστηκε κατά:

$$e_N = y_G - y_{G,\text{eff}} = 15,39 - 5,46 = 9,93 \text{ mm}$$

(η μετατόπιση έγινε προς τα θετικά του άξονος $y-y$)

5. Υπολογισμός της αξονικής δύναμης αντοχής της διατομής.

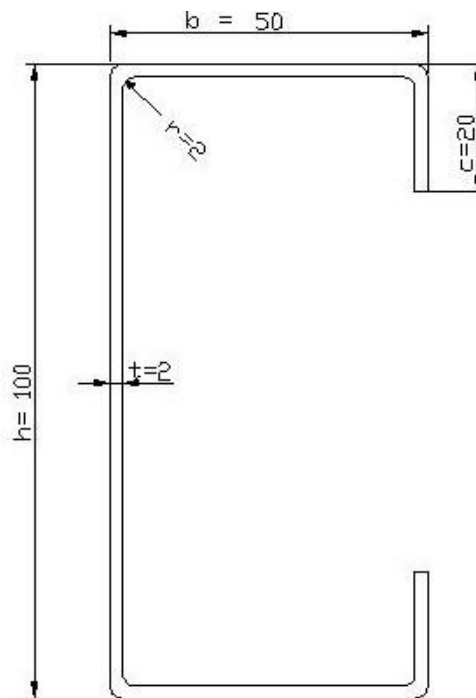
Η αξονική δύναμη αντοχής της ενεργού διατομής δίδεται από τη σχέση:

$$N_{\text{Rd}} = A_{\text{eff}} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_M} = 220,77 \cdot \frac{355}{1,1} = 71.249,49 = 71,25 \text{ kN}$$

4.2.3 Διατομή C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα

Θα υπολογιστεί η αξονική δύναμη αντοχής σε ομοιόμορφη θλίψη της διατομής C με ακραίες ενισχύσεις κάθετες στα πέλματα (Σχ. 4.10) από χάλυβα S355MC.

Στοιχεία χάλυβα S355MC: $f_{yb}=355 \text{ N/mm}^2$ και $f_u=430 \text{ N/mm}^2$



Σχήμα 4.10: Διατομή C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις χωρίς οπή

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενης διατομής (πίνακας 4.4):

Πίνακας 4.4: Διαστάσεις διατομής C με ακραίες ενισχύσεις

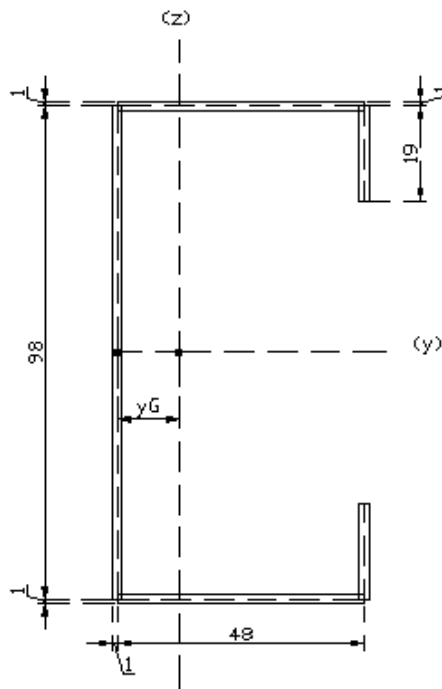
| Διατομή | h (mm) | b (mm) | c (mm) | r (mm) | t (mm) |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| C με κάθετες στα πέλματα ενισχύσεις | 100 | 50 | 20 | 2 | 2 |

1. Έλεγχος επιρροής στρογγυλεμένων γωνιών.

Έχουμε $r = 2\text{mm}$, $5t = 10\text{mm} \Rightarrow r < 5t$

$$r/b_p = 2/(50-2) = 0,042 < 0,15$$

Εφ' όσον ικανοποιούνται οι δύο παραπάνω συνθήκες μπορούμε να παραλείψουμε την επιρροή των στρογγυλεμένων γωνιών και να θεωρήσουμε ότι η διατομή συνίσταται από επίπεδα στοιχεία με αιχμηρές γωνίες. Τότε τα θεωρητικά μήκη των στοιχείων μετρώνται από τα μέσα σημεία των στοιχείων της παρακείμενης γωνίας. Η διατομή θα έχει τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11: Διατομή C με ακραίες ενισχύσεις από επίπεδα στοιχεία

Τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής είναι τα εξής:

$$A_g = [h_p + 2 \cdot (b_p + c_p)] \cdot t = (98 + 2 \cdot (48 + 19)) \cdot 2 = 464 \text{ mm}^2$$

$$Y_G = \frac{2 \cdot (48 \cdot 2 \cdot 24) + 2 \cdot (19 \cdot 2 \cdot 48)}{464} = 17,79 \text{ mm}$$

$$I_y = \frac{2 \cdot 98^3}{12} + 2 \cdot \frac{48 \cdot 2^3}{12} + 2 \cdot \frac{2 \cdot 19^3}{12} + 2 \cdot (48 \cdot 2 \cdot 49^2) + 2 \cdot (19 \cdot 2 \cdot 39,5^2) = 738.786,67 \text{ mm}^4$$

$$I_z = \frac{98 \cdot 2^3}{12} + 2 \cdot \frac{2 \cdot 48^3}{12} + 2 \cdot \frac{19 \cdot 2^3}{12} + 98 \cdot 2 \cdot 17,79^2 + 2 \cdot (48 \cdot 2 \cdot (24 - 17,79)^2) + 2 \cdot (19 \cdot 2 \cdot (48 - 17,79)^2) = 175.750,81 \text{ mm}^4$$

2. Ενεργός διατομή κορμού.

Θεωρούμε τον κορμό ως ένα διπλά στηριζόμενο στοιχείο υπό ομοιόμορφη θλίψη, ακολουθώντας ίδια διαδικασία με την παράγραφο 4.2.1.

Επειδή $\sigma_1 = \sigma_2$ ο λόγος ψ είναι $\psi = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 1$ και ο συντελεστής κυρτώσεως είναι $K_\sigma = 4$.

Από τη σχέση της λυγηρότητας $\bar{\lambda}_p$ έχουμε:

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{98}{2} \cdot \sqrt{\frac{355}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 4}} = 1,059 > 0,673$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p}\right) \cdot \frac{1}{\bar{\lambda}_p} = \left(1 - \frac{0,22}{1,059}\right) \cdot \frac{1}{1,059} = 0,7477$$

Οπότε τα ενεργά πλάτη του κορμού είναι:

$$h_{\text{eff1}} = h_{\text{eff2}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot h_p = \frac{0,7477 \cdot 98}{2} = 36,64 \text{ mm}$$

3. Ενεργός διατομή πέλματος.

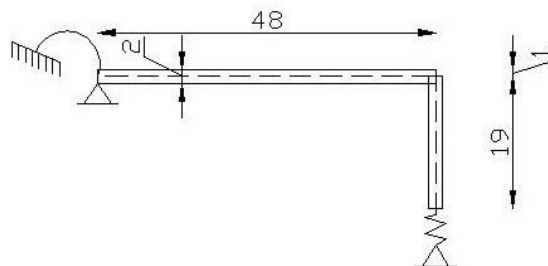
Για να θεωρηθεί ότι οι ενισχύσεις συνεισφέρουν στην αντοχή και ότι λειτουργούν ως στηρίγματα πρέπει να πληρούνται οι εξής προϋποθέσεις:

α) $45^\circ \leq \phi \leq 135^\circ$ όπου ϕ η γωνία μεταξύ ενισχύσεως και επιπέδου στοιχείου. Εδώ $\phi = 90^\circ$

β) $c_p \leq 0,2 b_p \Rightarrow c_p = 19 \text{ mm} > 0,2 b_p = 9,6 \text{ mm}$

γ) $b_p/t \leq 60 \Rightarrow b_p/t = 24 \text{ mm} \leq 60 \text{ mm}$

Επειδή ικανοποιούνται τα παραπάνω κριτήρια μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η ακραία ενίσχυση του πέλματος λειτουργεί ως στήριξη. Το μοντέλο που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12: Προσομοίωση πέλματος-ενίσχυσης

Πρώτη προσέγγιση

Θα προσδιορίσουμε την ενεργό διατομή του πέλματος, θεωρώντας ότι η ενίσχυση λειτουργεί ως πλήρης στήριξη. Οπότε το πέλμα μελετάται ως διπλά στηριζόμενο ενδιάμεσο στοιχείο (σχήμα 4.13).

α) Πέλημα :

Για $\sigma_1 = \sigma_2$ και θεωρώντας τη θλίψη με θετικό πρόσημο έχω :

$$\psi = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 1$$

Άρα ο συντελεστής κυρτώσεως είναι $K_\sigma = 4$

Από τη σχέση της λυγηρότητας $\bar{\lambda}_p$ έχουμε:

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{48}{2} \cdot \sqrt{\frac{355}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 4}} = 0,519 < 0,673$$

$$\rho = 1$$

Επομένως : $b_{eff} = \rho \cdot b_p = 1 \cdot 48 = 48 \text{ mm}$

β) Ενίσχυση:

Για απλή στραντζαριστή ακραία ενίσχυση, η αρχική τιμή του c_{eff} θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$c_{eff} = \rho \cdot c_p$$

όπου ο συντελεστής ρ προσδιορίζεται ως εξής:

$$i) \text{ αν } \frac{c_p}{b_p} < 0,35 \text{ τότε: } K_\sigma = 0,5$$

$$ii) \text{ αν } 0,35 < \frac{c_p}{b_p} < 0,6 \text{ τότε } K_\sigma = 0,5 + 0,83 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{c_p}{b_p} - 0,35\right)^2}$$

Στην περίπτωσή μας έχουμε:

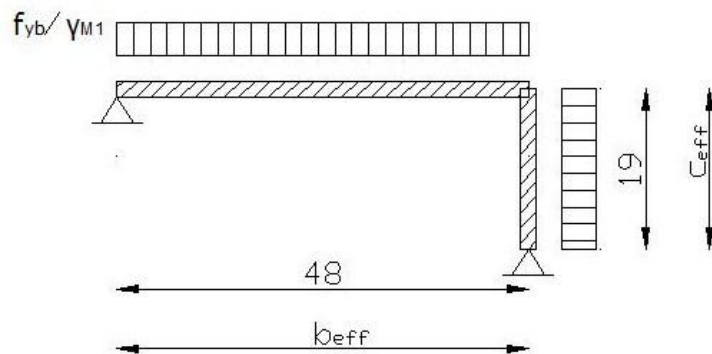
$$\frac{c_p}{b_p} = \frac{19}{48} = 0,3958 > 0,35$$

Άρα $K_\sigma = 0,5 + 0,83 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{19}{48} - 0,35\right)^2} = 0,606$

Για την λυγηρότητα έχουμε:

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{c_p}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_{yb}}{E \cdot K_\sigma}} = 1,052 \cdot \frac{19}{2} \cdot \sqrt{\frac{355}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,606}} = 0,5277 < 0,673$$

Άρα $\rho = 1$ και $c_{eff} = \rho \cdot c_p = 1 \cdot 19 = 19 \text{ mm}$



Σχήμα 4.13: Ενεργός διατομή πέλματος-ενίσχυσης

Εφόσον το πέλμα είναι πλήρως ενεργό, δε χρειάζεται να προχωρήσουμε στη θεώρηση του πέλματος ως δοκού επί ελαστικής στηρίξεως.

4. Εμβαδόν ενεργού διατομής.

Το εμβαδόν της ενεργού διατομής βρίσκεται από τη σχέση:

$$A_{\text{eff}} = 2 \cdot t \cdot (b_{\text{eff}} + h_{\text{eff1}} + c_{\text{eff}}) = 2 \cdot 2 \cdot (48 + 36,64 + 19) = 414,56$$

Το κέντρο βάρους της ενεργού διατομής βρίσκεται στη θέση:

$$Y_{\text{Geff}} = \frac{2 \cdot (48 \cdot 2 \cdot 24) + 2 \cdot (19 \cdot 2 \cdot 48)}{414,56} = 19,92 \text{ mm}$$

Παρατηρούμε ότι το κέντρο βάρους της διατομής μετακινήθηκε κατά

$$e_N = Y_G - Y_{\text{Geff}} = 17,79 - 19,92 = -2,13$$

(Η μετατόπιση έγινε προς τα αρνητικά του άξονα γ-γ)

5. Υπολογισμός της αξονικής δύναμης αντοχής της διατομής.

Η αξονική δύναμη αντοχής της ενεργού διατομής δίδεται από τη σχέση:

$$N_{\text{Rd}} = A_{\text{eff}} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_M} = 414,56 \cdot \frac{355}{1,1} = 133.789,81 = 133,79 \text{ KN}$$

4.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αναλύσεων

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων για την εύρεση της αξονικής δύναμης αντοχής σε θλίψη, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Ευρωκώδικα 3, για όλες τις διατομές που μελετήθηκαν.

Πίνακας 4.8: Αξονική δύναμη αντοχής εξεταζόμενων διατομών

| Εξεταζόμενη διατομή | | Αξονική δύναμη αντοχής N_{Rd} (KN) | |
|------------------------------|--------------------------------|--|--------|
| | | Πάχος στοιχείου $t=2\text{mm}$ | |
| Διατομή C,Z χωρίς ενισχύσεις | χωρίς οπή | 81,11 | |
| | με κυκλική οπή διαμέτρου: | 40mm | 71,25 |
| | | 50mm | 64,79 |
| | | 60mm | 58,34 |
| | με τετραγωνική οπή πλευράς: | 20mm | 77,93 |
| | | 25mm | 76,87 |
| 30mm | | 75,64 | |
| Διατομή C,Z με ενισχύσεις | χωρίς οπή | 133,79 | |
| | με κυκλική οπή διαμέτρου: | 40mm | 123,93 |
| | | 50mm | 117,47 |
| | | 60mm | 111,02 |
| | με τετραγωνική οπή πλευράς: | 20mm | 130,61 |
| | | 25mm | 129,55 |
| 30mm | | 128,32 | |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΡΙΣΙΜΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

5.1 Γενικά

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί σήμερα τη σημαντικότερη μέθοδο της υπολογιστικής μηχανικής. Η αξία της μεθόδου έγκειται στη δυνατότητα της να παρουσιάζεται ως ένα ενιαίο εργαλείο για την στατική και δυναμική γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους, για τυχαία γεωμετρία, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες.

Στην παρούσα εργασία η επίλυση και ανάλυση των προς εξέταση διατομών έγινε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων MSC NASTRAN for WINDOWS, το οποίο επιτρέπει στο μηχανικό την προσομοίωση της συμπεριφοράς μιας κατασκευής. Το NASTRAN for Windows είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ικανό να δημιουργήσει τόσο το δίκτυο των στοιχείων κατά την προεπεξεργασία του φορέα όσο και να μας βοηθήσει να επεξεργαστούμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης μας. Η ανάλυση γίνεται με τη διαίρεση του φορέα σε μικρότερα στοιχεία τα οποία συνδέονται με κόμβους.

Η πορεία που ακολουθείται είναι η εξής:

1. Δημιουργία της γεωμετρίας του φορέα (solid modeling)
2. Καθορισμός υλικών και τύπου στοιχείων των μελών του φορέα
3. Δημιουργία δικτύου πεπερασμένων στοιχείων από κόμβους και στοιχεία (mesh generation)
4. Εφαρμογή φορτίων και επιβολή συνοριακών συνθηκών (loads and constraints)
5. Ανάλυση φορέα
6. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία μοντελοποίησης και διεξαγωγής αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα MSC NASTRAN.

5.2 Περιγραφή μοντέλων

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκαν 28 φορείς, μήκους $l=600$ mm και πάχους $t=2$ mm ο καθένας, αποτελούμενοι από δύο μορφές διατομών, μία διατομή C και μία Z. Κάθε φορέας επιλύθηκε: α) χωρίς ενίσχυση και β) με κάθετες στα πέλματα ενισχύσεις. Για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις ο φορέας εξετάστηκε χωρίς

οπές και με οπές. Οι οπές έγιναν στον κορμό των διατομών και είναι κυκλικές με διάμετρο $d=40,50,60$ mm και τετραγωνικές με πλευρά μήκους $a=20,25,30$ mm.

Με το πρόγραμμα MSC NASTRAN έγινε η προσομοίωση της λυγισμικής συμπεριφοράς των φορέων και προσδιορίστηκε το κρίσιμο φορτίο λυγισμού αυτών.

5.3 Περιγραφή προσομοίωσης ενός φορέα με το πρόγραμμα MSC NASTRAN.

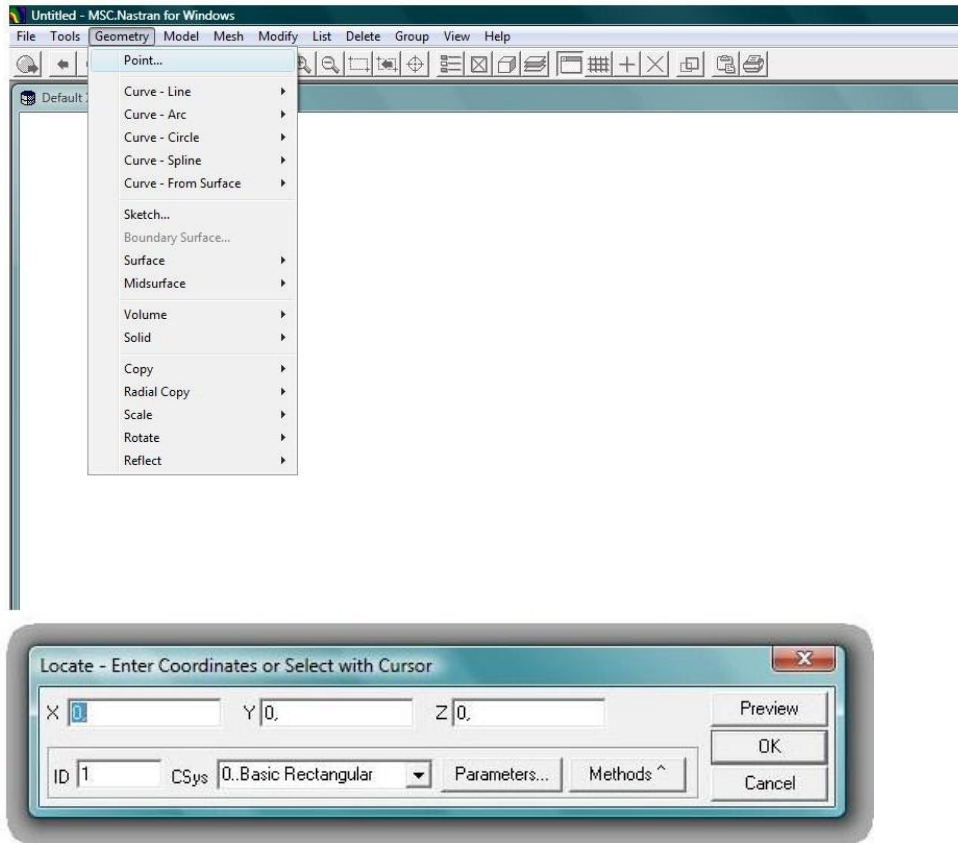
5.3.1 Δημιουργία της γεωμετρίας (modeling)

Το μέλος αποτελείται από τις εξής επιφάνειες: τον κορμό, τα πέλματα και τις ακραίες ενισχύσεις των πελμάτων. Οι ενισχύσεις προστίθενται για την επαύξηση της φέρουσας ικανότητας του μέλους καθώς και της τοπικής ακαμψίας του. Η προσομοίωση ενός μέλους χωρίς ενισχύσεις γίνεται δημιουργώντας τρεις επιφάνειες εκ των οποίων οι δύο είναι παράλληλες μεταξύ τους και αφορούν τα πέλματα της διατομής, ενώ η τρίτη είναι κάθετη στα πέλματα και αφορά τον κορμό. Η προσομοίωση ενός μέλους με ακραίες ενισχύσεις γίνεται με τις τρεις επιφάνειες που προαναφέρθηκαν συν άλλες δύο επιφάνειες που η καθεμία είναι κάθετη σε κάθε πέλμα αντίστοιχα και αφορούν τις ενισχύσεις. Εδώ θα παρουσιαστεί ενδεικτικά η προσομοίωση ενός μέλους διατομής Z, με ενίσχυση και με δύο οπές, μία κυκλική και μία τετραγωνική.

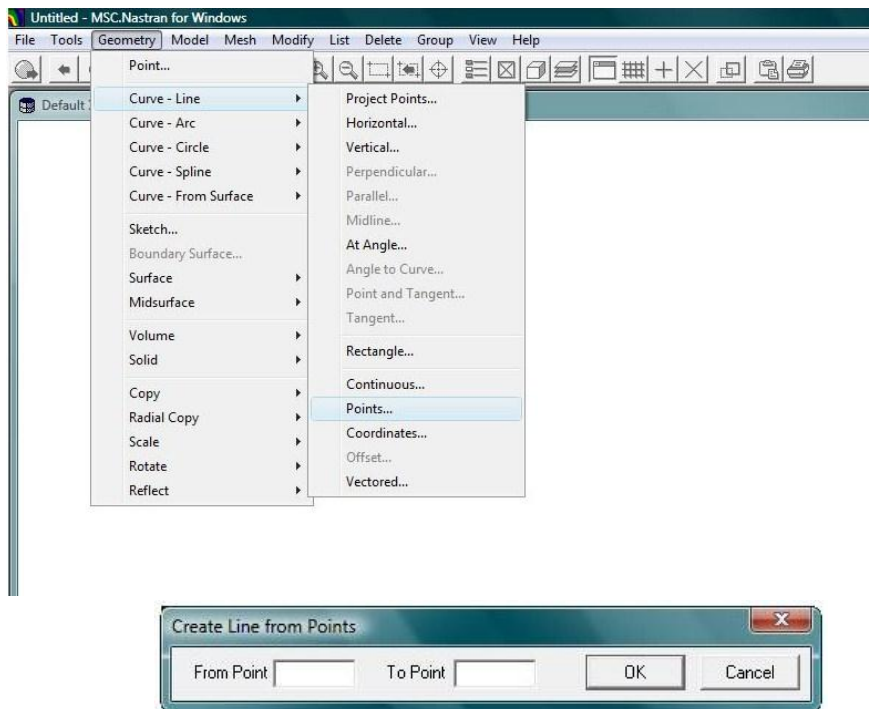
Η εισαγωγή των δεδομένων για τη δημιουργία της γεωμετρίας του φορέα γίνεται ως εξής:

Από το μενού «Geometry» επιλέγεται η εντολή «Point». Στο πλαίσιο διαλόγου που εμφανίζεται εισάγουμε τις συντεταγμένες X, Y, Z του κάθε σημείου.

Έχοντας ορίσει τα ακραία σημεία του φορέα μας, προχωρούμε στην σχεδίαση των γραμμών που θα συνδέσουν αυτά τα σημεία προκειμένου ο φορέας να πάρει μορφή. Από το μενού «Geometry» επιλέγεται η εντολή «Curve - Line» και στο πλαίσιο διαλόγου που εμφανίζεται ορίζουμε τα ακραία σημεία που θέλουμε να ενωθούν με μία γραμμή.

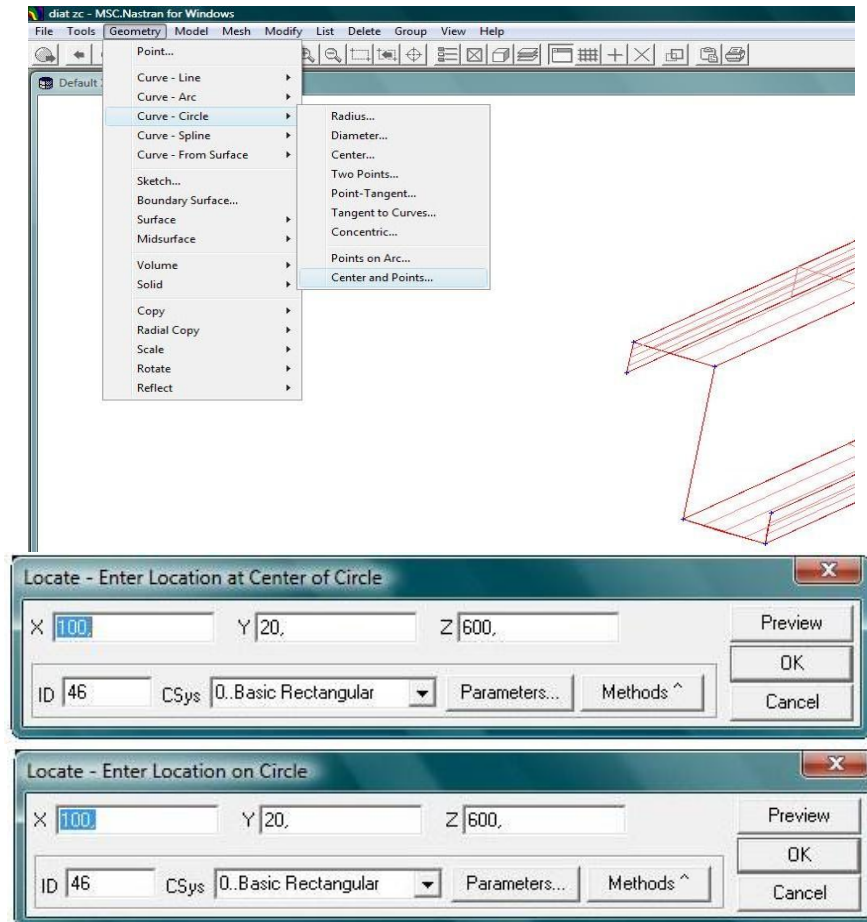


Σχήμα 5.1: Πλαίσιο διαλόγου δημιουργίας σημείων



Σχήμα 5.2: Πλαίσιο διαλόγου σχεδίασης γραμμών

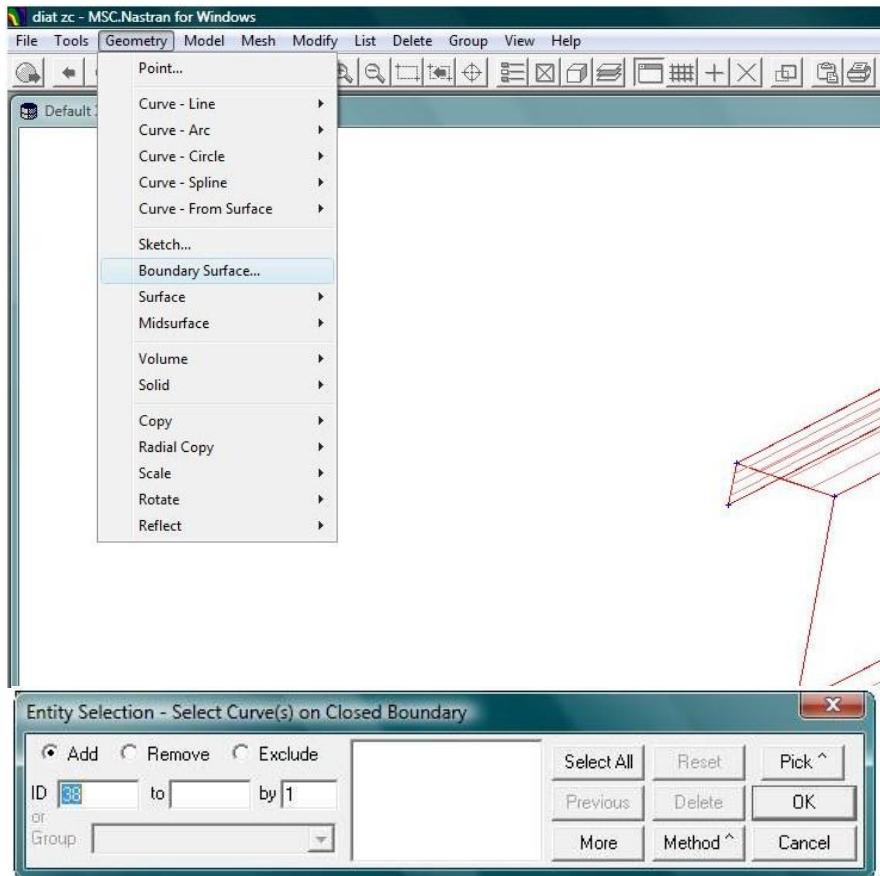
Για το σχεδιασμό μιας κυκλικής οπής στον κορμό επιλέγουμε από το μενού «Geometry» την εντολή «Curve - Circle» και έπειτα «Center and Points» και στο πλαίσιο διαλόγου που εμφανίζεται ορίζουμε τις συντεταγμένες του κέντρου του κύκλου και δύο σημεία της περιφέρειας αυτού, ένα στον άξονα γ και ένα στον άξονα z.



Σχήμα 5.3: Πλαίσιο διαλόγου σχεδίασης κυκλικής οπής

Για το σχεδιασμό μιας τετραγωνικής οπής στον κορμό επιλέγουμε από το μενού «Geometry» την εντολή «Curve - Line» και έπειτα «Rectangle». Στο πλαίσιο διαλόγου που εμφανίζεται ορίζουμε τις συντεταγμένες δύο σημείων στη διαγώνιο του τετραγώνου.

Τέλος, από το μενού «Geometry» επιλέγουμε την εντολή «Boundary Surface» με την οποία μπορούμε να ορίσουμε τις επιφάνειες του φορέα επιλέγοντας τις γραμμές που οριοθετούν μία επιφάνεια. Με τον ορισμό των επιφανειών ολοκληρώνεται και η σχεδίαση του φορέα.



Σχήμα 5.4: Πλαίσιο διαλόγου ορισμού επιφανειών φορέα

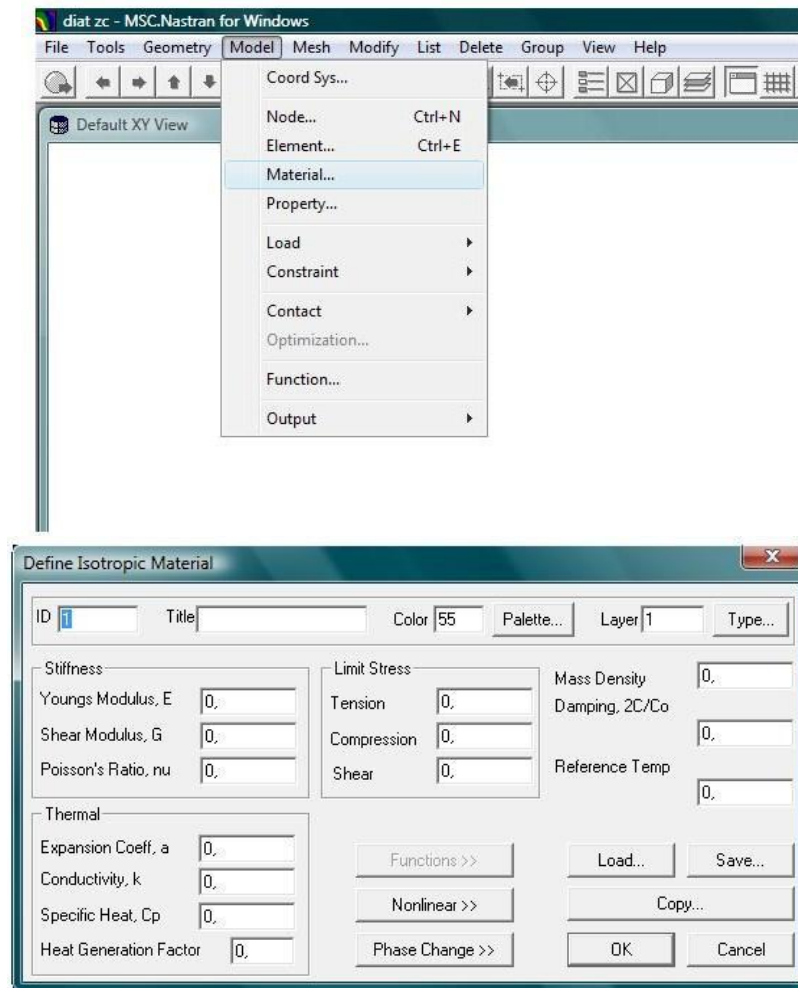
5.3.2 Καθορισμός υλικών (materials)

Το MSC/NASTRAN υποστηρίζει επτά τύπους υλικών, ώστε να μπορούν να προσομοιωθούν διάφορα υλικά ανάλογα με τις ιδιότητές τους. Υποστηρίζονται:

- α) τα ιστροπικά υλικά (isotropic) των οποίων οι ιδιότητες έχουν την ίδια τιμή και κατά τις 3 διαστάσεις του χώρου
- β) τα ορθότροπα υλικά με διαφορετικές ιδιότητες σε δύο και τρεις διαστάσεις (2D orthotropic), (3D orthotropic)
- δ) τα ανισότροπα υλικά, με διαφορετικές ιδιότητες σε δύο και τρεις διαστάσεις (2D anisotropic), (3D anisotropic)
- ε) τα υπερελαστικά υλικά (hyperelastic)
- ζ) μία κατηγορία «άλλα υλικά» η οποία υποστηρίζει 85 υλικά όπως ελαστικά, αφρώδη, βισκοελαστικά κ.λ.π

Για τον προσδιορισμό των υλικών του φορέα ακολουθείται η εξής διαδικασία: Από το μενού «Model» επιλέγεται η εντολή «Material». Στο πλαίσιο διαλόγου που εμφανίζεται («Define Isotropic Material»), με προεπιλεγμένο τύπο υλικού το ιστροπικό, ζητούνται το μέτρο ελαστικότητας E (Young's modulus), το μέτρο διάτμησης G (shear modulus), ο λόγος του Poisson ν (Poisson's ratio), οι συντελεστές θερμικής διαστολής α , θερμικής αγωγιμότητας k και η ειδική

Θερμότητα C_p , οι οποίοι δεν είναι απαραίτητα να καθοριστούν εάν δεν λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση θερμοκρασιακές μεταβολές και θερμικά φορτία, οι οριακές τάσεις (Limit stress) σε εφελκυσμό (tension), θλίψη (compression) και διάτμηση (shear) καθώς και η πυκνότητα του υλικού (mass density). Σ' αυτό το σημείο συμπληρώνονται μόνο εκείνες οι ιδιότητες του υλικού που είναι απαραίτητες για να γίνει ο επιθυμητός τύπος ανάλυσης.

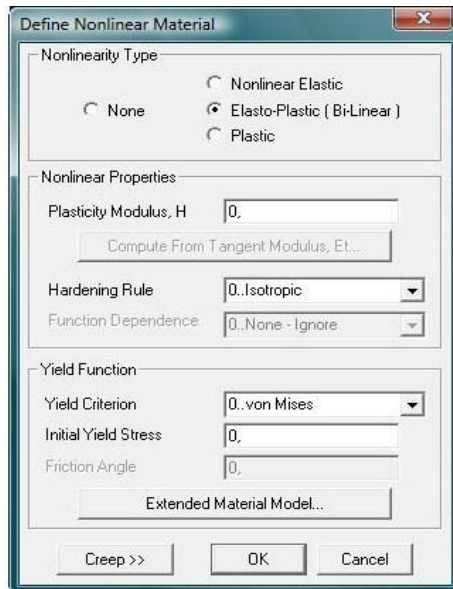


Σχήμα 5.5: Πλαίσιο διαλόγου διαμόρφωσης υλικών φορέα

Το πρόγραμμα δίνει μεγάλη ελευθερία στον καθορισμό των μονάδων. Οι μονάδες μέτρησης με τις οποίες θα εισαχθούν οι σταθερές του υλικού καθορίζουν τις μονάδες σε ολόκληρη τη μοντελοποίηση και ανάλυση. Γι' αυτό είναι αναγκαίο κατά την έναρξη μιας ανάλυσης να έχουν προαποφασιστεί οι μονάδες της γεωμετρίας, των φορτίων, της μάζας κ.λ.π., ούτως ώστε να υπάρχει συμβατότητα όλων των μονάδων και να προκύψουν λογικά αποτελέσματα.

Για μη γραμμικό υλικό επιλέγεται η εντολή «Nonlinear» στο πλαίσιο διαλόγου «Define Isotropic Material». Στο νέο πλαίσιο διαλόγου που εμφανίζεται ζητείται να καθορισθεί ο τύπος της μη γραμμικότητας του υλικού, ανάμεσα στα: μη γραμμικό ελαστικό (Nonlinear Elastic), ελαστοπλαστικό-διγραμμικό (Elasto-plastic,

Bi-linear) το οποίο περιγράφει υλικά με κράτυνση και πλαστικό (Plastic) το οποίο αναφέρεται σε υλικά με γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι το όριο διαρροής και με τελείως πλαστική συμπεριφορά πέρα από αυτό, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η κράτυνση του υλικού. Ανάλογα με την ως άνω επιλογή, ζητείται το όριο διαρροής (Initial Yield Stress) και το κριτήριο αστοχίας Von Mises.



Σχήμα 5.6: Πλαίσιο διαλόγου καθορισμού μη γραμμικού υλικού

Τέλος υπάρχει και η δυνατότητα να επιλεγεί κάποιο από τα έτοιμα υλικά της βιβλιοθήκης του προγράμματος, που αφορούν διάφορα είδη χάλυβα και τα οποία βρίσκονται με την εντολή «Load» στο πλαίσιο διαλόγου επιλογής υλικού.

Στο πλαίσιο της δικής μας εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε χάλυβας S355 με στοιχεία:

Μέτρο ελαστικότητας, E 210 kN/mm²

Μέτρο διάτμησης, G 80 kN/mm²

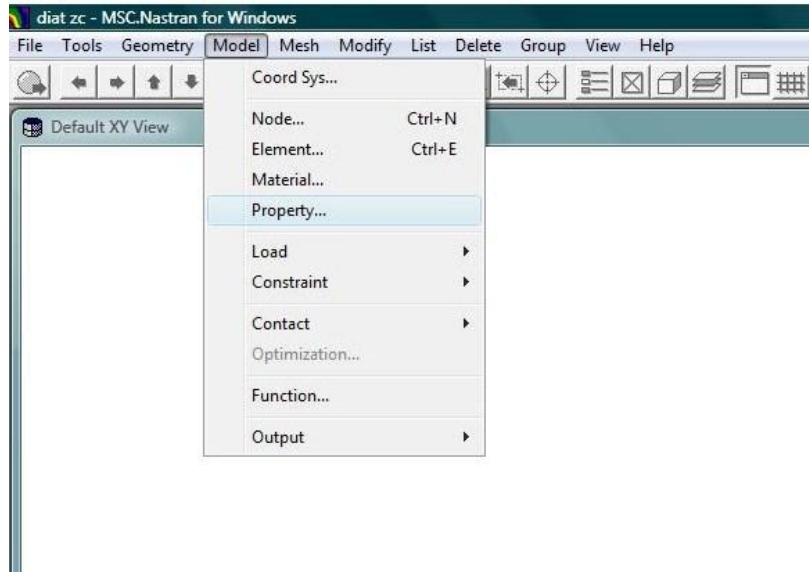
Λόγος Poisson, ν 0,3

Τα υπόλοιπα στοιχεία του πλαισίου μένουν κενά καθώς δεν χρειάζεται να προσδιορισθούν στα πλαίσια της ανάλυσης που θα κάνουμε. Το υλικό που ορίσαμε θα ονομαστεί με το όνομα «steel» και θα χρησιμοποιηθεί αργότερα.

5.3.3 Καθορισμός τύπου στοιχείων (property)

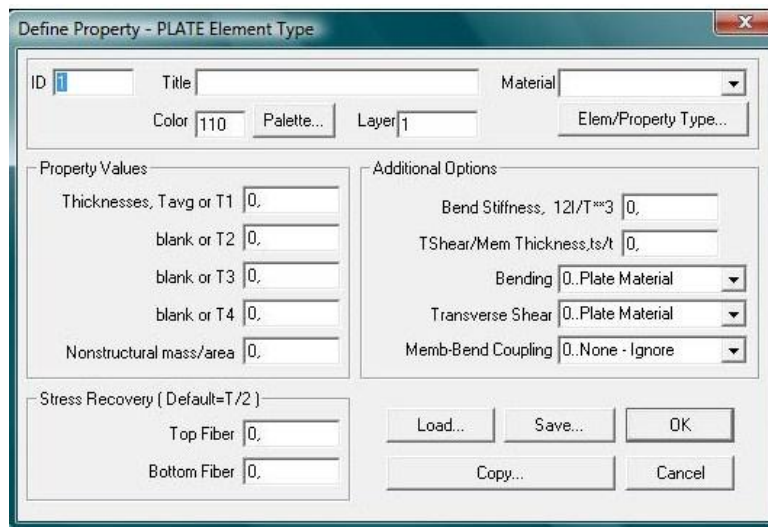
Ο τύπος στοιχείων βοηθά στον προσδιορισμό επιπλέον πληροφοριών, που αφορούν κυρίως γεωμετρικές παραμέτρους αλλά και τη μάζα και το υλικό των στοιχείων. Για τον καθορισμό του τύπου στοιχείων ακολουθείται η εξής διαδικασία:

Από το μενού «Model» επιλέγεται η εντολή «Property» οπότε εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου με τίτλο «Define Property».



Σχήμα 5.7: Πλαίσιο διαλόγου καθορισμού τύπου στοιχείων φορέα

Ο τύπος των στοιχείων επιλέγεται μέσω της εντολής «Elem/Property type...», η οποία εμφανίζεται στο τρέχον πλαίσιο διαλόγου. Το πρόγραμμα υποστηρίζει διάφορα γραμμικά και μη γραμμικά στοιχεία. Στην περίπτωση μας επιλέγουμε το στοιχείο πλάκας (plate), το οποίο είναι και η προεπιλογή του προγράμματος.



Σχήμα 5.8: Πλαίσιο διαλόγου καθορισμού παραμέτρων του τύπου του φορέα

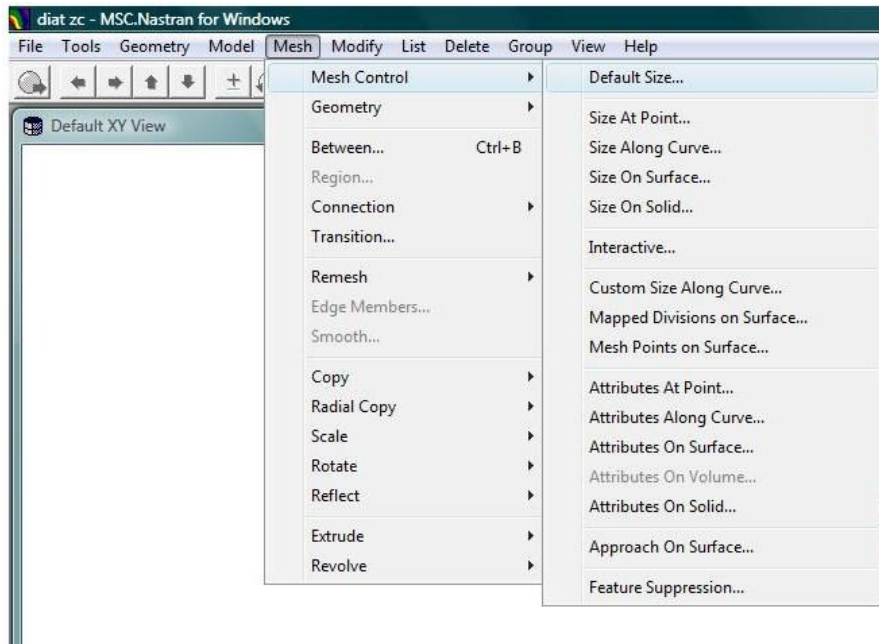
Στη θέση «Material» καθορίζεται το υλικό το οποίο είχαμε προσδιορίσει στο προηγούμενο βήμα, στην περίπτωση μας το υλικό με το όνομα steel. Στη θέση «Thickness T1» προσδιορίζεται το πάχος του στοιχείου. Εάν το στοιχείο δεν είναι ισοπαχές δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής τιμών στις θέσεις T2, T3 και T4. Οι μονάδες μέτρησης του πάχους θα πρέπει να βρίσκονται σε συμφωνία με τις ήδη χρησιμοποιηθείσες στο στάδιο εισαγωγής των υλικών.

Στην παρούσα εφαρμογή το πάχος της διατομής είναι σταθερό σε όλες τις επιφάνειες και ίσο με 2mm.

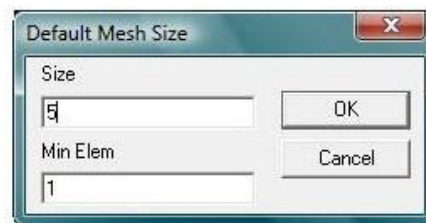
5.3.4 Δημιουργία δικτύου (mesh generation)

Σ' αυτό το σημείο δημιουργείται το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων στο φορέα και η μεταξύ τους σύνδεση με κόμβους. Ακολουθείται η εξής διαδικασία:

Από το μενού «Mesh» επιλέγεται η εντολή «Mesh control» και έπειτα «Default size...». Στο πλαίσιο διαλόγου που εμφανίζεται δηλώνεται το μέγεθος των τετρακομβικών στοιχείων πλάκας στα οποία θα διαιρεθεί ο φορέας. Στην περίπτωση μας οι διαστάσεις των στοιχείων επιλέχθηκαν 5x5 χιλιοστά.

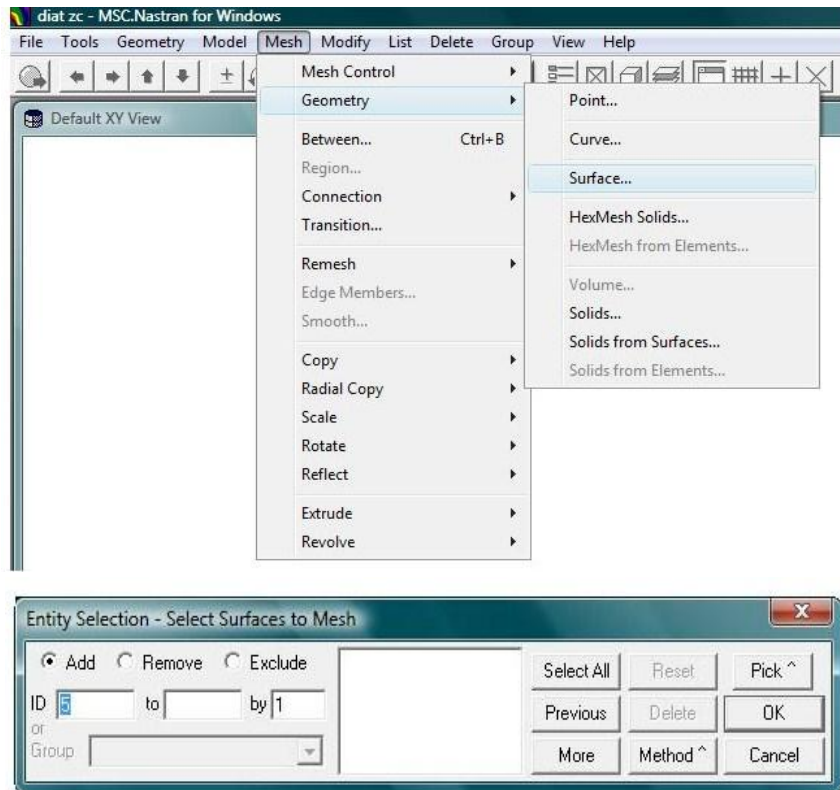


Σχήμα 5.9: Πλαίσιο διαλόγου δημιουργίας δικτύου



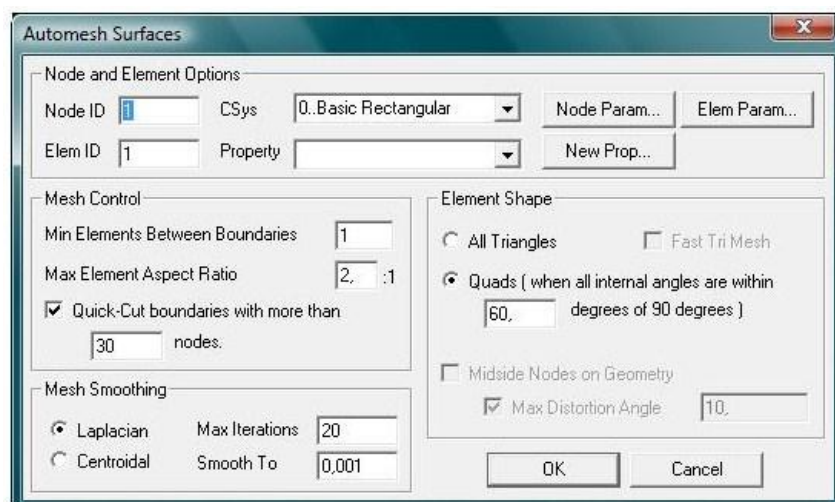
Σχήμα 5.10: Ορισμός διαστάσεων πεπερασμένων στοιχείων

Στη συνέχεια επιλέγεται η επιφάνεια που θέλουμε να διαιρεθεί σε πεπερασμένα στοιχεία. Από το μενού «Mesh» επιλέγεται η εντολή «Geometry» και στο υπομενού επιλέγεται η εντολή «Surface». Στο πλαίσιο διαλόγου που εμφανίζεται επιλέγεται η εντολή «Select All» προκειμένου να επιλεγθούν όλες οι επιφάνειες.



Σχήμα 5.11: Πλαίσιο διαλόγου επιλογής επιφανειών δικτύου

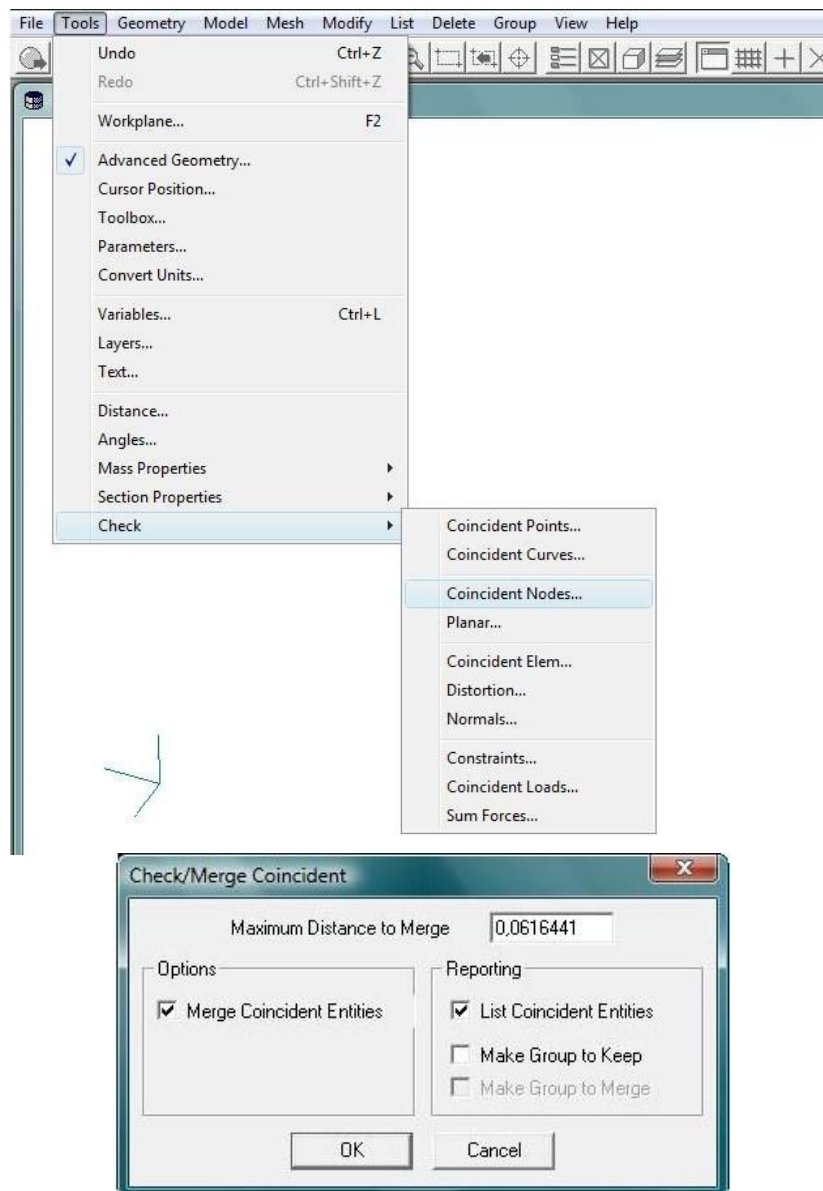
Με την επιλογή των επιφανειών εμφανίζεται το παρακάτω πλαίσιο διαλόγου. Στη θέση «Property», πατώντας το βέλος, εμφανίζεται ο τύπος στοιχείου που είχαμε δημιουργήσει στο προηγούμενο βήμα, οπότε τον επιλέγουμε. Πατώντας την εντολή «OK» εμφανίζεται στις επιλεγμένες επιφάνειες το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων και κόμβων.



Σχήμα 5.12: Πλαίσιο διαλόγου καθορισμού ιδιοτήτων δικτύου

Επειδή το πρόγραμμα εκλαμβάνει την κάθε επιφάνεια ως ξεχωριστή και ανεπηρέαστη από την εντατική κατάσταση των υπολοίπων, είναι αναγκαίο να

συνδεθούν οι επιφάνειες ώστε να μπορούν να επιλυθούν ως μία ενιαία δοκός. Η σύνδεση γίνεται από το μενού «Tools» όπου επιλέγεται η εντολή «Check». Στο υπομενού που εμφανίζεται επιλέγεται η εντολή «Coincident Nodes». Τότε ζητείται να προσδιορισθούν οι κόμβοι που πρέπει να ελεγχθούν και επιλέγεται η εντολή «Select All» ώστε να συμπεριληφθούν όλοι οι κόμβοι. Στην ερώτηση που εμφανίζεται επιλέγεται η εντολή «No» και στο νέο πλαίσιο διαλόγου ζητείται η μέγιστη απόσταση μεταξύ κόμβων ώστε αυτοί να θεωρηθούν ως ένας. Επιλέγουμε «Merge coincident entities» και μετά «OK» προκειμένου να συγχωνευτούν οι κόμβοι των οποίων η απόσταση είναι μικρότερη από την ορισμένη.



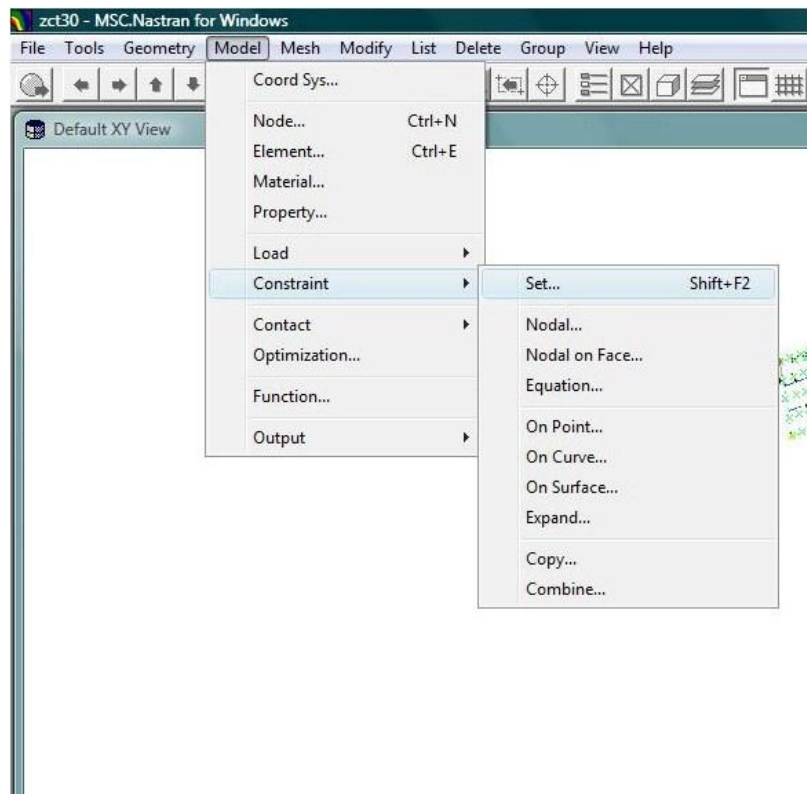
Σχήμα 5.13: Πλαίσιο διαλόγου συγχώνευσης συνοριακών κόμβων

Σε αυτό το σημείο έχει ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση σε ό,τι αφορά τη γεωμετρία, τα υλικά και το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων της δοκού. Απομένουν η επιβολή συνοριακών συνθηκών και η φόρτιση του φορέα.

5.3.5 Επιβολή συνοριακών συνθηκών (constraints)

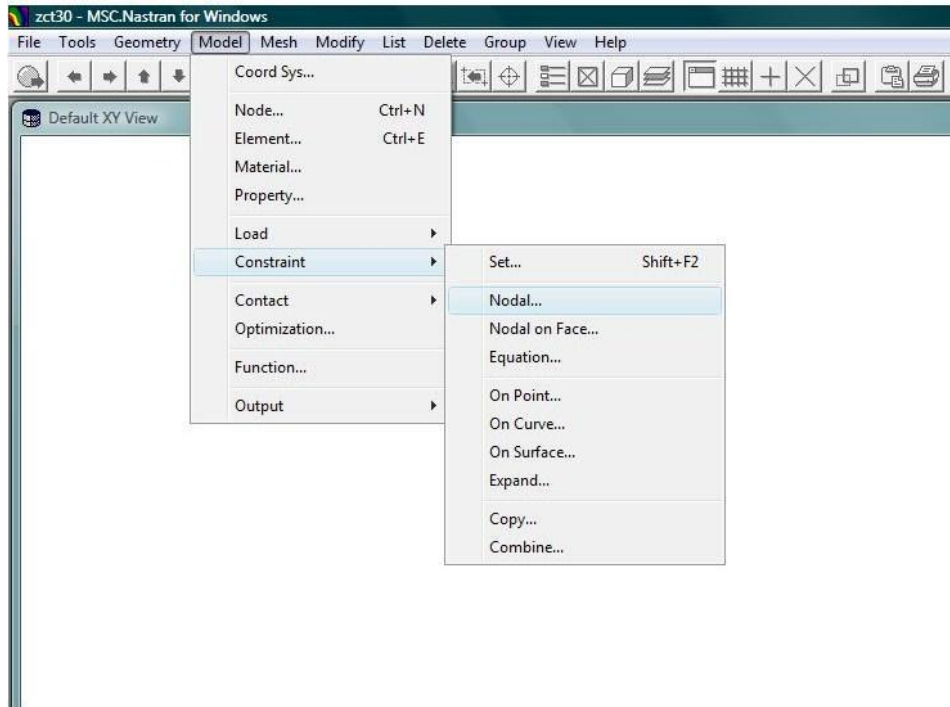
Από το πρόγραμμα δίνεται η επιλογή επιβολής συνοριακών συνθηκών είτε απευθείας σε μεμονωμένους κόμβους (Nodal Constraint) είτε σε γραμμές (Constraint on Curve) ή σε επιφάνειες (Constraint on Surface). Όταν πρόκειται να επιβληθούν επικόμβιες συνοριακές συνθήκες δεσμεύονται κάποιοι ή όλοι από τους έξι βαθμούς ελευθερίας του κάθε κόμβου. Όταν πρόκειται να επιβληθούν συνοριακές συνθήκες σε γραμμή ή επιφάνεια τότε επιλέγεται είτε πάκτωση, είτε δέσμευση των μετακινήσεων (και των τριών), είτε δέσμευση της στροφής της επιφάνειας ή της γραμμής περί το διαμήκη άξονά τους. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

Από το μενού «Model» επιλέγεται η εντολή «Constraint» και από το υπομενού επιλέγεται η εντολή «Set» ώστε να δοθεί όνομα στην ομάδα συνοριακών συνθηκών.



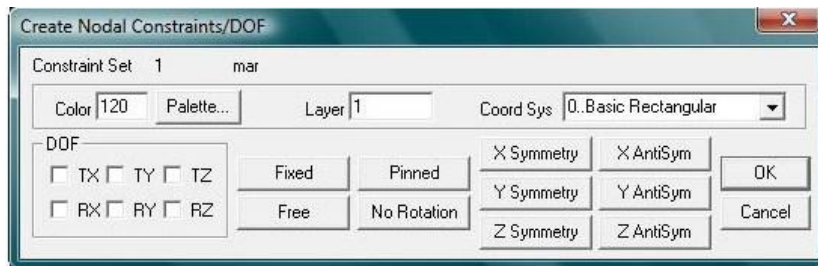
Σχήμα 5.14: Πλαίσιο διαλόγου ορισμού ομάδας συνοριακών συνθηκών

Από το μενού «Model» επιλέγεται η εντολή «Constraint» και από το υπομενού επιλέγεται η εντολή «Nodal» ώστε να γίνει η δέσμευση των βαθμών ελευθερίας που θέλουμε στους κόμβους που θα επιλέξουμε.



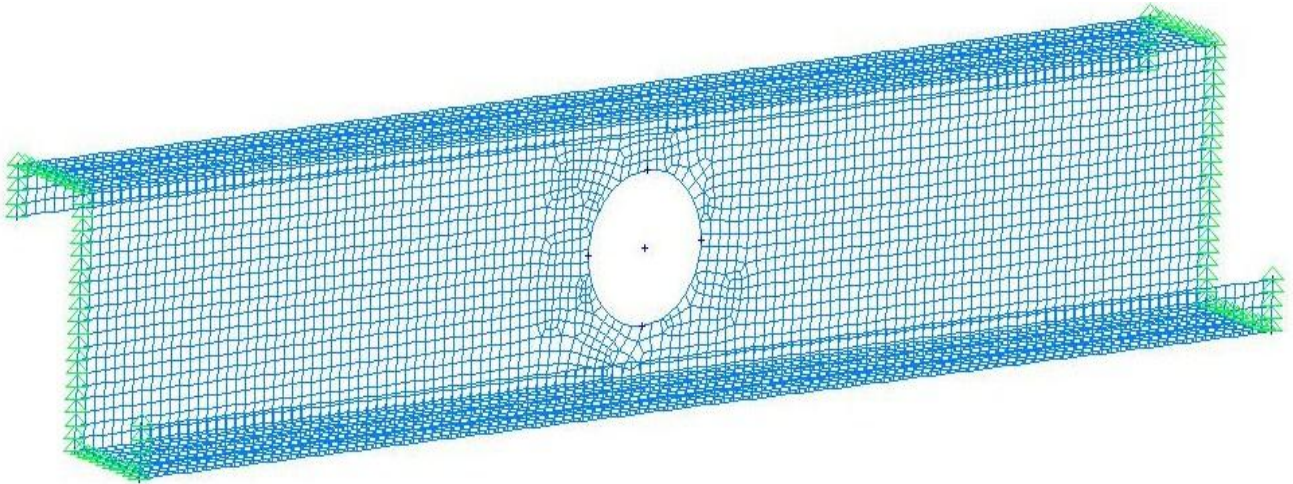
Σχήμα 5.15: Πλαίσιο διαλόγου ορισμού κόμβων στήριξης

Μετά την επιλογή των κόμβων προς δέσμευση δίνεται η εντολή «OK» και εμφανίζεται το πλαίσιο διαλόγου με τίτλο «Create Nodal Constraints/DOF». Σ' αυτό το πλαίσιο επιλέγουμε ποιους από τους έξι βαθμούς ελευθερίας θα δεσμεύσουμε.



Σχήμα 5.16: Πλαίσιο διαλόγου εισαγωγής συνοριακών συνθηκών

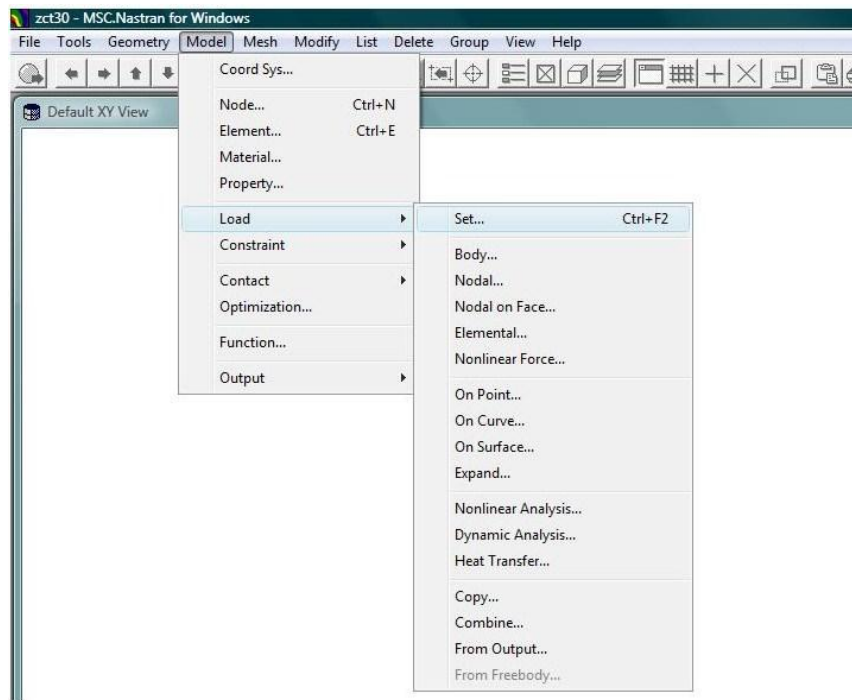
Στη δική μας εφαρμογή επιλέγουμε να δεσμεύσουμε όλους τους ακραίους κόμβους του κορμού, των πελμάτων και των ενισχύσεων. Στη μία πλευρά της δοκού δεσμεύονται η πλευρική, η κατακόρυφη και η διαμήκης μετατόπιση (TX, TY, TZ). Στην άλλη πλευρά της δοκού δεσμεύονται η πλευρική και η κατακόρυφη μετακίνηση (TX, TY) ενώ επιτρέπεται η διαμήκης μετατόπιση κατά τον άξονα Z. Σε αυτή την πλευρά εφαρμόζεται και η φόρτιση της δοκού. Οι υπόλοιποι κόμβοι είναι ελεύθεροι να μετακινηθούν και να στραφούν. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η δοκός με το δίκτυο και τις επιβεβλημένες συνοριακές συνθήκες.



Σχήμα 5.17: Συνοριακές δεσμεύσεις κόμβων

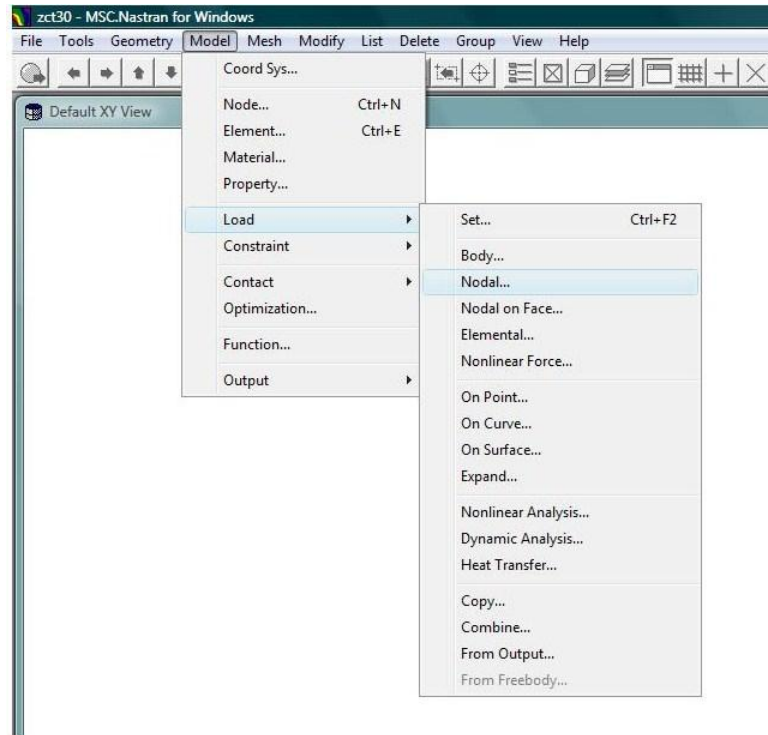
5.3.6 Επιβολή φορτίων (loads)

Η επιβολή φορτίων μπορεί να γίνει αντίστοιχα με την επιβολή συνοριακών συνθηκών είτε σε κόμβους (Load on Curve), είτε σε γραμμή (Load on curve), είτε σε επιφάνειες (Load on Surface). Ακολουθώντας την ανάλογη διαδικασία, από το μενού «Model» επιλέγεται η εντολή «Load». Από το υπομενού που εμφανίζεται επιλέγεται η εντολή «Set» ώστε να δοθεί όνομα στην ομάδα φορτίων που θα εφαρμοστούν στη συνέχεια.



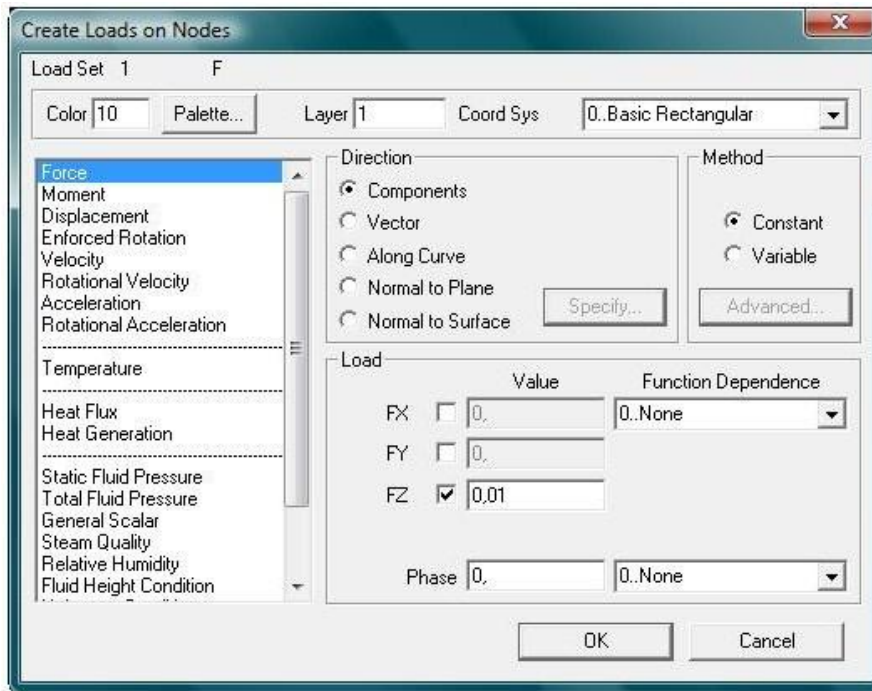
Σχήμα 5.18: Πλαίσιο διαλόγου ορισμού ομάδας φορτίων

Από το μενού «Model» επιλέγεται η εντολή «Load» και από το υπομενού επιλέγεται η εντολή «Nodal». Στο πλαίσιο διαλόγου που εμφανίζεται επιλέγονται οι κόμβοι στους οποίους εφαρμόζεται το φορτίο.



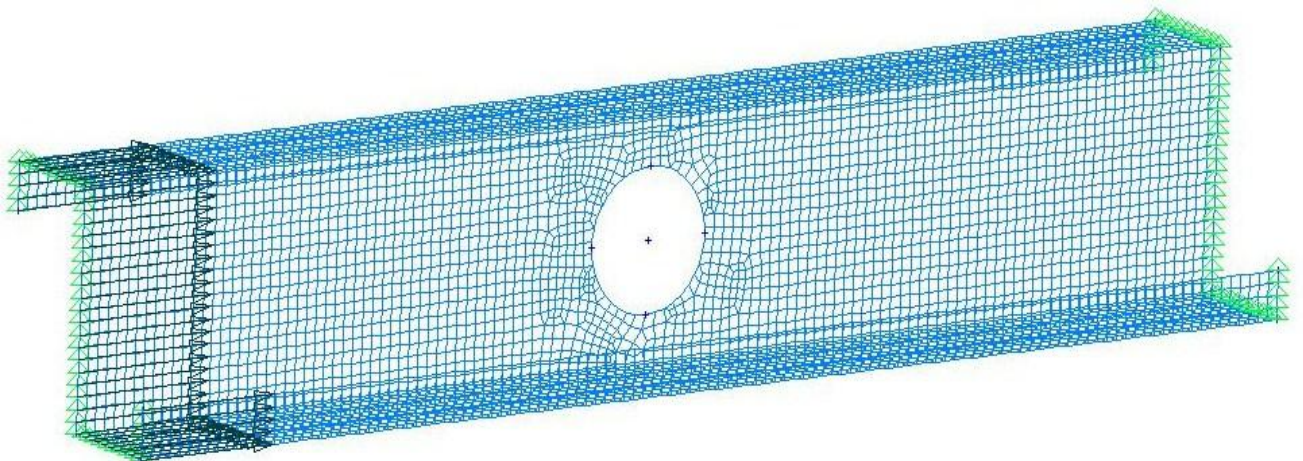
Σχήμα 5.19: Πλαίσιο διαλόγου επιλογής κόμβων επιβολής φορτίου

Μετά την επιλογή εμφανίζεται το πλαίσιο διαλόγου του σχήματος στο οποίο ζητείται να καθοριστεί το είδος της φόρτισης, το μέγεθος αυτής, προσημασμένο ανάλογα με τη φορά, και η διεύθυνση (X, Y, Z) σε σύστημα τοπικών ή καθολικών συντεταγμένων. Στη θέση «Value» εισάγεται η τιμή του φορτίου. Οι μονάδες μέτρησης θα πρέπει να συμβαδίζουν με τις μονάδες που έχουν χρησιμοποιηθεί στο στάδιο της εισαγωγής των υλικών.



Σχήμα 5.20: Πλαίσιο διαλόγου καθορισμού φορτίου

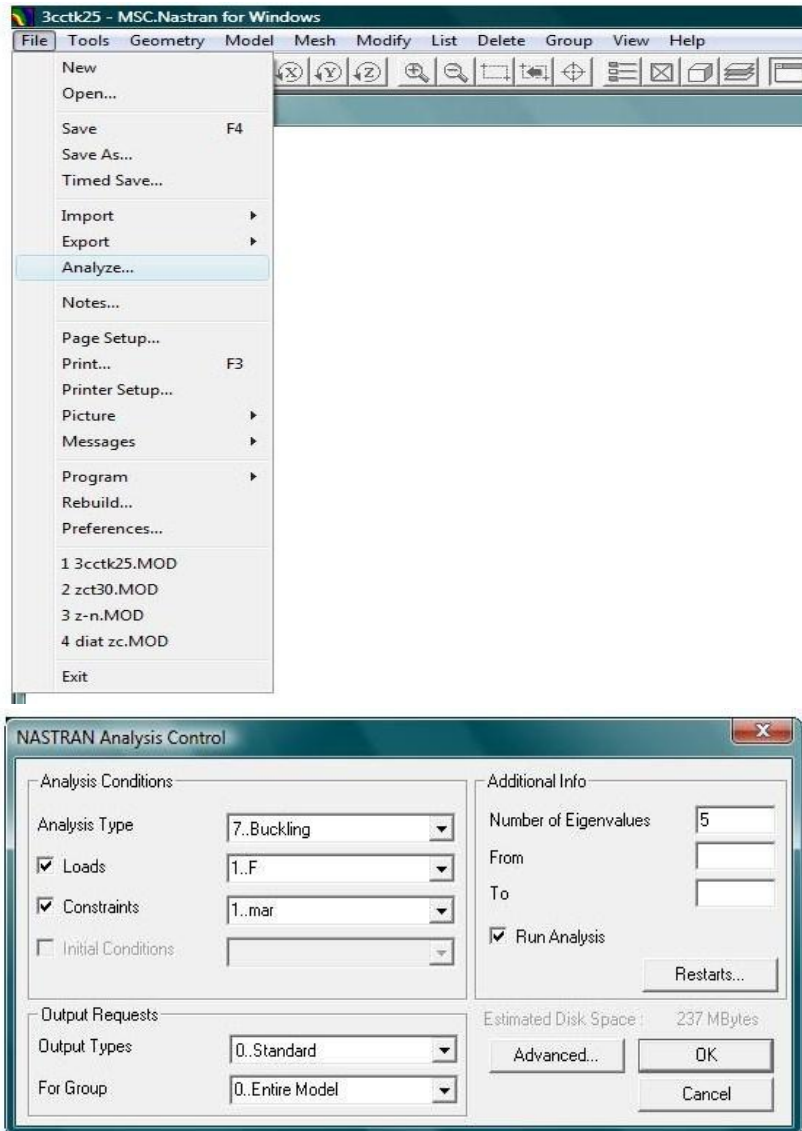
Στην παρούσα εφαρμογή εισήχθηκε η τιμή 0.01 kN ως αξονικό θλιπτικό φορτίο επί του άξονα Z και εφαρμόστηκε στους κόμβους που είχαν δεσμευτεί οι μετακινήσεις μόνο στους άξονες X,Y. Ανάλογα με τη θετική φορά του άξονα Z τέθηκε και το πρόσημο μπροστά από την τιμή ώστε να είναι θλιπτικό. Τώρα το μοντέλο είναι έτοιμο για ανάλυση.



Σχήμα 5.21: Τελικό μοντέλο δοκού με δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων

5.3.7 Ανάλυση (Analyze)

Από το μενού «File» επιλέγεται η εντολή «Analyze». Στο πλαίσιο διαλόγου που εμφανίζεται καθορίζεται ο τύπος ανάλυσης και ο αριθμός των ιδιομορφών που θα υπολογιστούν.



Σχήμα 5.22: Πλαίσιο διαλόγου καθορισμού παραμέτρων ανάλυσης

Στη θέση «Analysis Type» επιλέγεται Buckling, δηλαδή γραμμική ανάλυση λυγισμού. Στη θέση «Loads» επιλέγεται ο τύπος φορτίων που επιθυμούμε, από αυτούς που έχουν οριστεί σε προηγούμενο στάδιο και στη θέση «Constraints» επιλέγεται η ομάδα συντοριακών συνθηκών αντίστοιχα. Στη θέση «Number of Eigenvalues» εισάγεται ο αριθμός των ιδιομορφών που επιθυμούμε να υπολογιστούν. Στη δική μας εφαρμογή επιλέγονται πέντε ιδιομορφές. Πατώντας «OK» ξεκινά η ανάλυση.

Μετά το τέλος της ανάλυσης μπορούμε να δούμε την παραμόρφωση του φορέα και τις τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτόν. Προκειμένου να προσδιοριστεί το κρίσιμο φορτίο λυγισμού θα πολλαπλασιαστεί το εφαρμοσμένο καταναμημένο φορτίο με το συντελεστή της πρώτης ιδιομορφής που έχει υπολογιστεί από την ανάλυση.

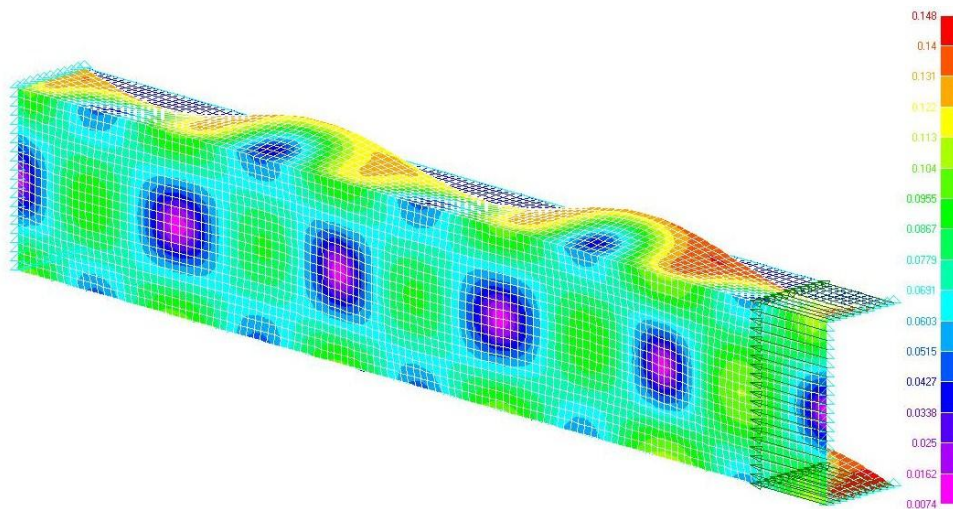
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

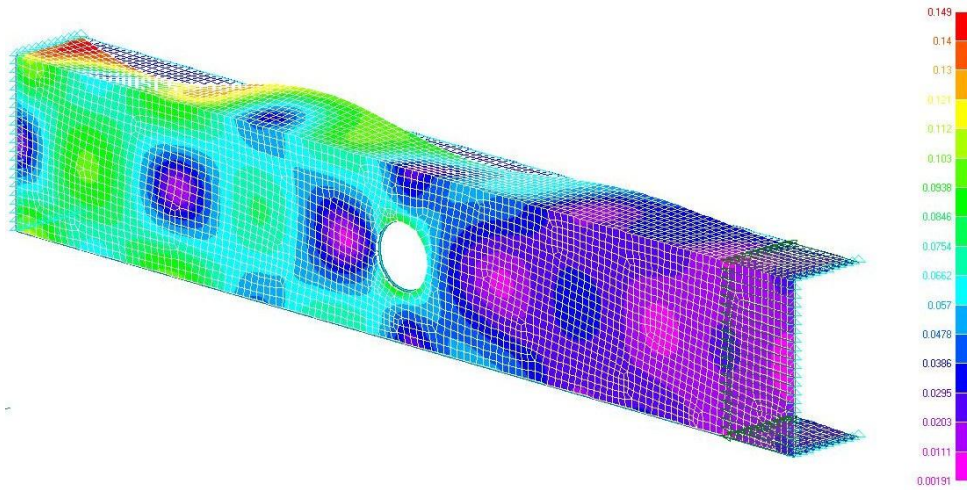
Προκειμένου να διεξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την επιρροή της οπής στον κορμό στα μέλη που ανωτέρω αναλύθηκαν, θα γίνει σύγκριση των πρώτων ιδιομορφών των μελών, όπως προέκυψαν από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού. Ακόμη, για να επιτευχθεί μεγαλύτερο εύρος συμπερασμάτων, θα μελετηθεί η συμπεριφορά του φορέα ανάλογα με το μήκος του, μέσω της σύγκρισης ενός φορέα μήκους 600 mm και ενός φορέα μήκους 200 mm με όμοια φορτία και συνοριακές συνθήκες.

6.1 Διατομές C χωρίς ενισχύσεις.

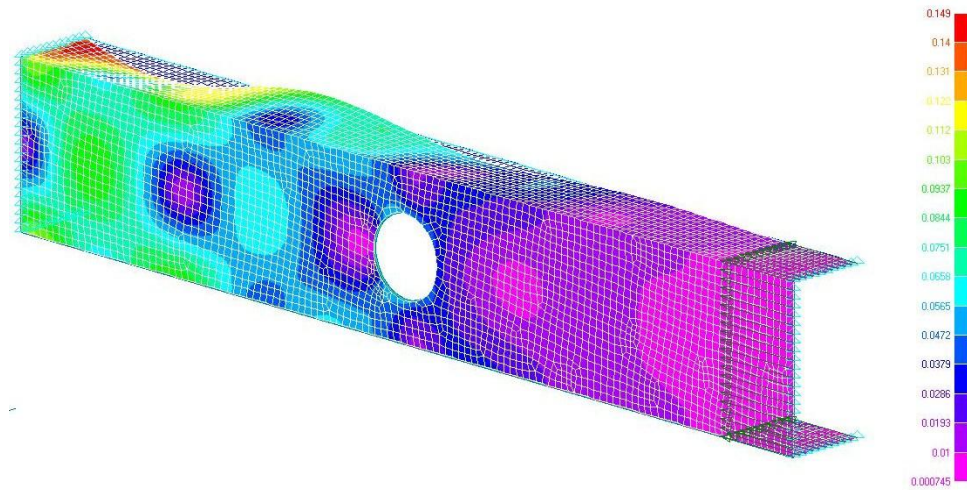
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι παραμορφώσεις των αξονικά θλιβόμενων μελών διατομής C χωρίς ενισχύσεις όπως προέκυψαν από γραμμική ανάλυση λυγισμού με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.



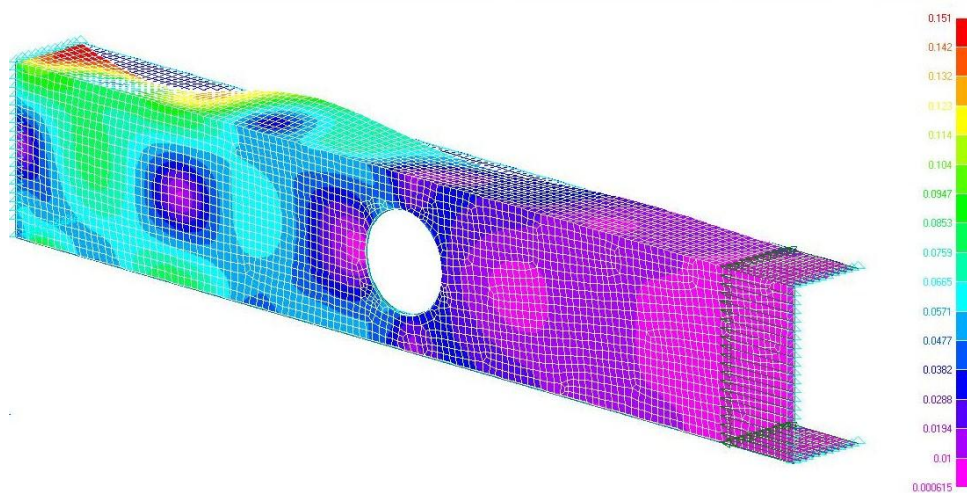
Σχήμα 6.1: Μοντέλο διατομής C χωρίς ενισχύσεις, χωρίς οπή



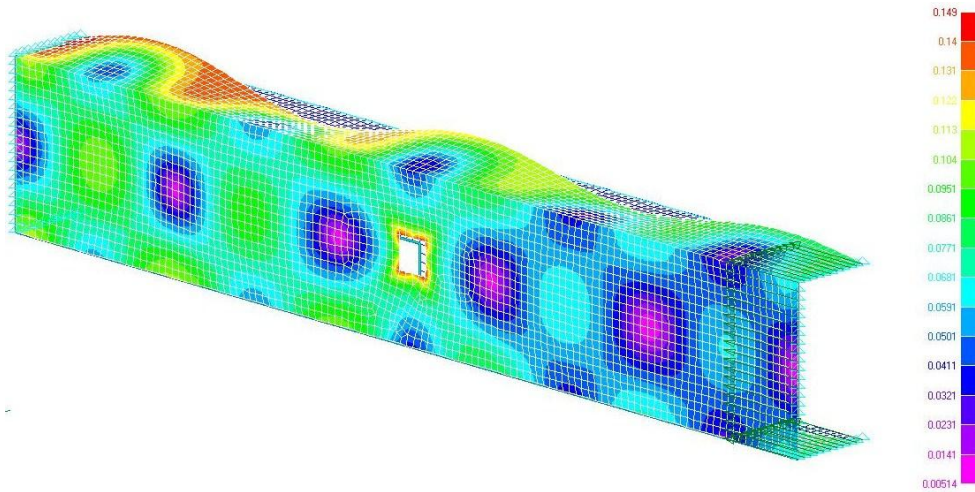
Σχήμα 6.2: Μοντέλο διατομής C χωρίς ενισχύσεις με κυκλική σπή στον κορμό διαμέτρου 40mm



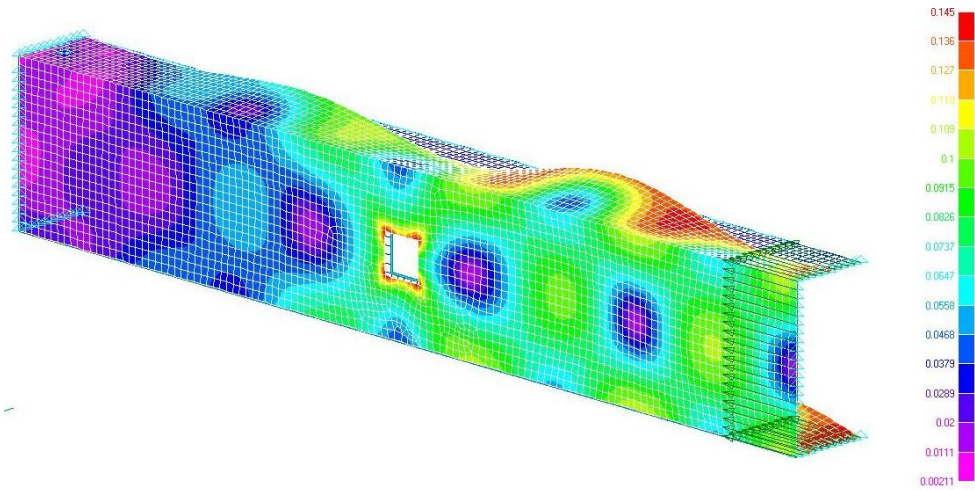
Σχήμα 6.3: Μοντέλο διατομής C χωρίς ενισχύσεις με κυκλική σπή στον κορμό διαμέτρου 50mm



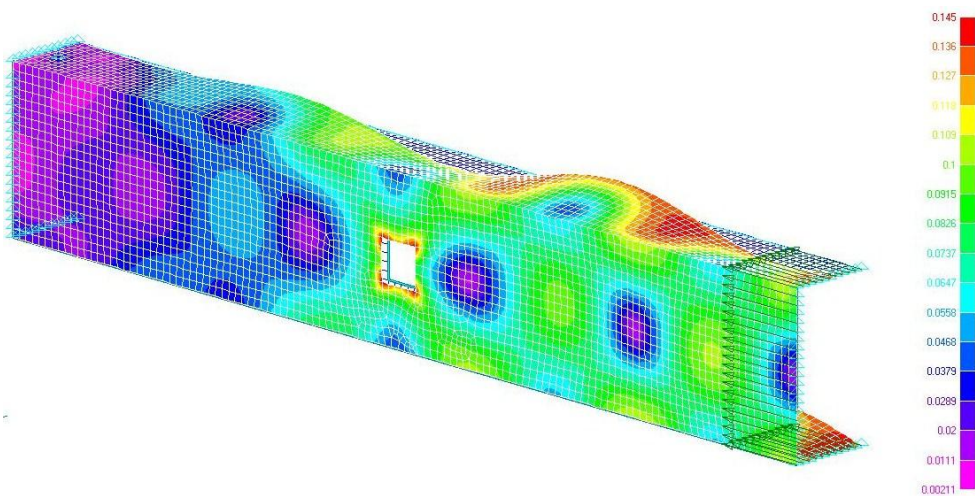
Σχήμα 6.4: Μοντέλο διατομής C χωρίς ενισχύσεις με κυκλική σπή στον κορμό διαμέτρου 60mm



Σχήμα 6.5: Μοντέλο διατομής C χωρίς ενισχύσεις με τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 20mm



Σχήμα 6.6: Μοντέλο διατομής C χωρίς ενισχύσεις με τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 25mm



Σχήμα 6.7: Μοντέλο διατομής C χωρίς ενισχύσεις με τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 30mm

Παρατηρώντας τα μοντέλα βλέπουμε ότι η κύρια μορφή αστοχίας είναι η αλληλεπίδραση του τοπικού λυγισμού με τον λυγισμό με στρέβλωση διατομής. Η παρουσία της οπής μειώνει σημαντικά τον αριθμό των ημικυμάτων σε σχέση με το μέλος χωρίς οπή.

Στον πίνακα 6.1 δίνονται τα κρίσιμα φορτία λυγισμού για την ομάδα των μη ενισχυμένων μελών διατομής C, ενώ στο γράφημα 6.1 παρουσιάζονται συγκριτικά τα μέλη με κυκλική οπή στον κορμό διαφόρων διαμέτρων.

Πίνακας 6.1: Κρίσιμο φορτίο λυγισμού διατομών C χωρίς ενισχύσεις

| Εξεταζόμενη διατομή | | Κρίσιμο φορτίο λυγισμού P_{cr} (KN) | |
|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------|
| Διατομή C χωρίς ενισχύσεις | χωρίς οπή | 87,60 | |
| | με κυκλική οπή διαμέτρου: | 40mm | 85,26 |
| | | 50mm | 83,88 |
| | | 60mm | 83,62 |
| | με τετραγωνική οπή πλευράς: | 20mm | 86,68 |
| | | 25mm | 86,91 |
| | | 30mm | 85,82 |

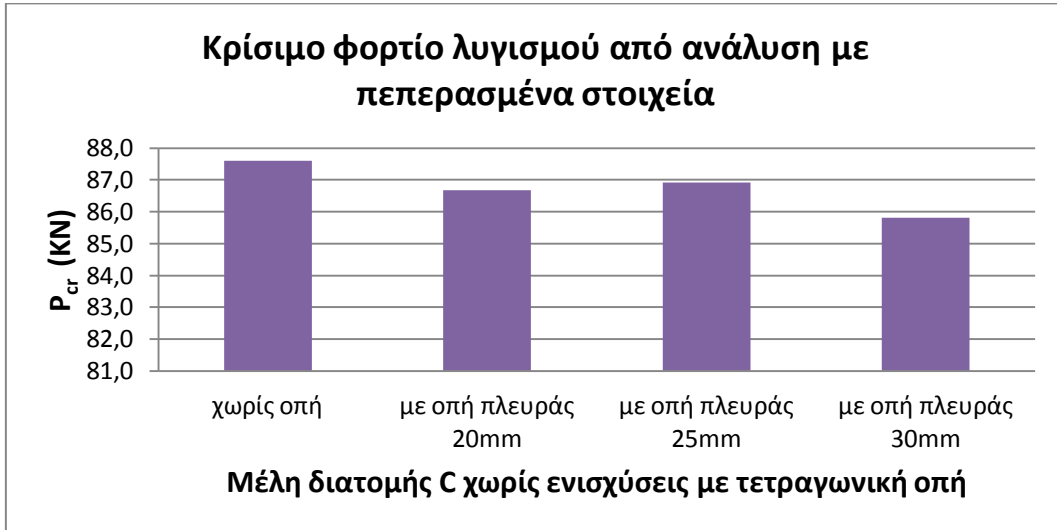
Γράφημα 6.1: Σύγκριση P_{cr} μελών διατομής C χωρίς ενισχύσεις με κυκλική οπή



Συγκρίνοντας τις παραπάνω τιμές, συμπεραίνουμε ότι η παρουσία των οπών στον κορμό είχε ως συνέπεια μια μικρή μείωση της φέρουσας ικανότητας των μελών. Συγκεκριμένα, τη δυσμενέστερη επίδραση είχε η οπή με μεγαλύτερη διάμετρο ($d=60\text{mm}$) η οποία κατάφερε μείωση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού κατά 4,54%, ενώ οι οπές με μικρότερη διάμετρο μείωσαν το P_{cr} κατά 4,24% και 2,67% αντίστοιχα με το μέγεθος της οπής.

Στο γράφημα 6.2 παρουσιάζονται συγκριτικά τα κρίσιμα φορτία λυγισμού για τα μέλη με τετραγωνικές οπές στον κορμό, διαφόρων πλευρών.

Γράφημα 6.2: Σύγκριση P_{cr} μελών διατομής C χωρίς ενισχύσεις με τετραγωνική οπή



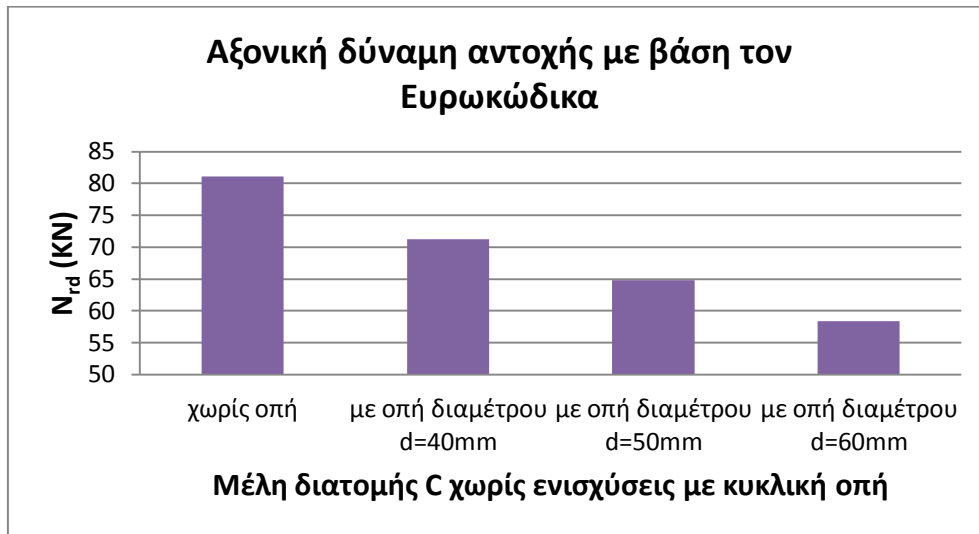
Σ' αυτή την περίπτωση, τη δυσμενέστερη επίδραση είχε η οπή με μεγαλύτερη πλευρά ($\alpha=30\text{mm}$) η οποία κατάφερε μείωση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού κατά 2,03% ενώ οι οπές με μικρότερη πλευρά μείωσαν το P_{cr} κατά 0,78% για $\alpha=25\text{mm}$ και κατά 1,05% για $\alpha=20\text{mm}$. Εδώ παρατηρούμε ότι οι οπές μείωσαν κατά πολύ λίγο τη φέρουσα ικανότητα των μελών. Επίσης η διαβάθμιση του μεγέθους της οπής δεν επηρεάζει σημαντικά το κρίσιμο φορτίο λυγισμού.

Η αξονική δύναμη αντοχής κάθε διατομής όπως υπολογίστηκε με βάση τον Ευρωκώδικα, φαίνεται συγκεντρωτικά στον πίνακα 6.2 και στα γραφήματα 6.3 και 6.4.

Πίνακας 6.2: Αξονική δύναμη αντοχής με βάση τον Ευρωκώδικα διατομών C χωρίς ενισχύσεις

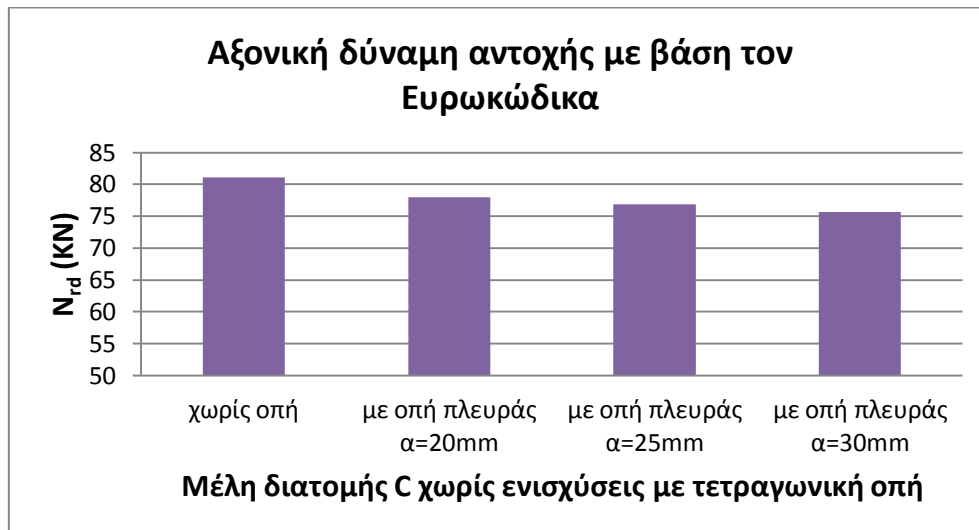
| Εξεταζόμενη διατομή | | | Αξονική δύναμη αντοχής N_{Rd} (kN) |
|----------------------------|-----------------------------|------|--------------------------------------|
| Διατομή C χωρίς ενισχύσεις | χωρίς οπή | | 81,11 |
| | με κυκλική οπή διαμέτρου: | 40mm | 71,25 |
| | | 50mm | 64,79 |
| | | 60mm | 58,34 |
| | με τετραγωνική οπή πλευράς: | 20mm | 77,93 |
| | | 25mm | 76,87 |
| | | 30mm | 75,64 |

Γράφημα 6.3: Σύγκριση N_{rd} μελών διατομής C χωρίς ενισχύσεις με κυκλική οπή



Παρατηρούμε ότι η κυκλική οπή μείωσε την αξονική δύναμη αντοχής της διατομής. Συγκεκριμένα, τη δυσμενέστερη επίδραση είχε η οπή με μεγαλύτερη διάμετρο ($d=60\text{mm}$) η οποία κατάφερε μείωση της αντοχής κατά 28%, ενώ οι οπές με μικρότερη διάμετρο, 50mm και 40mm, μείωσαν τη N_{rd} κατά 20,1% και 12,1% αντίστοιχα. Επίσης υπάρχει μεγαλύτερη διαβάθμιση αντοχής ανάλογα με τη διάμετρο της οπής, απ' ότι υπήρχε στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού.

Γράφημα 6.4: Σύγκριση N_{rd} μελών διατομής C χωρίς ενισχύσεις με τετραγωνική οπή



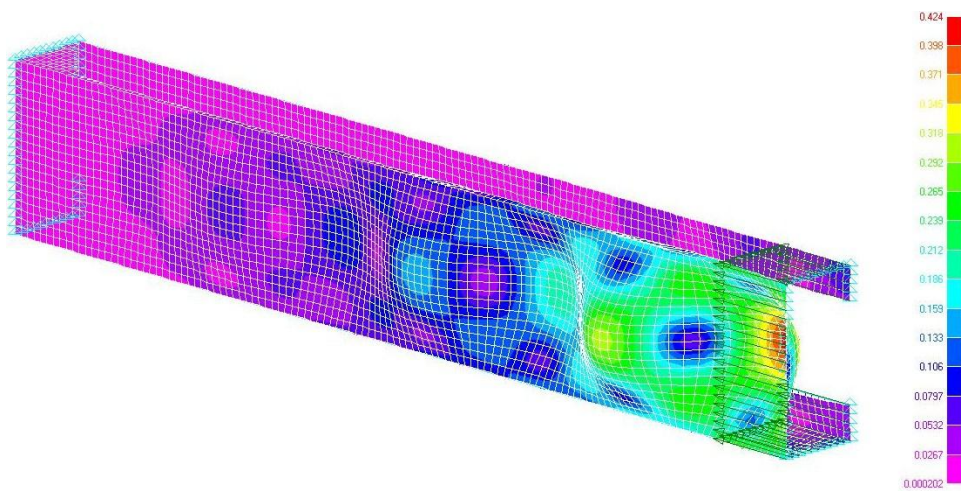
Για την τετραγωνική οπή παρατηρούμε μικρότερη μείωση της αξονικής δύναμης αντοχής. Η οπή πλευράς $\alpha=30\text{mm}$ μειώνει τη N_{rd} κατά 6,7%, η οπή πλευράς $\alpha=25\text{mm}$ κατά 5,2% και η οπή πλευράς $\alpha=20\text{mm}$ κατά 3,9%.

Γενικά οι τιμές της αξονικής δύναμης αντοχής με βάση τον Ευρωκώδικα παρουσιάζουν μεγαλύτερη μείωση με την παρουσία της οπής σε σχέση με το μέλος

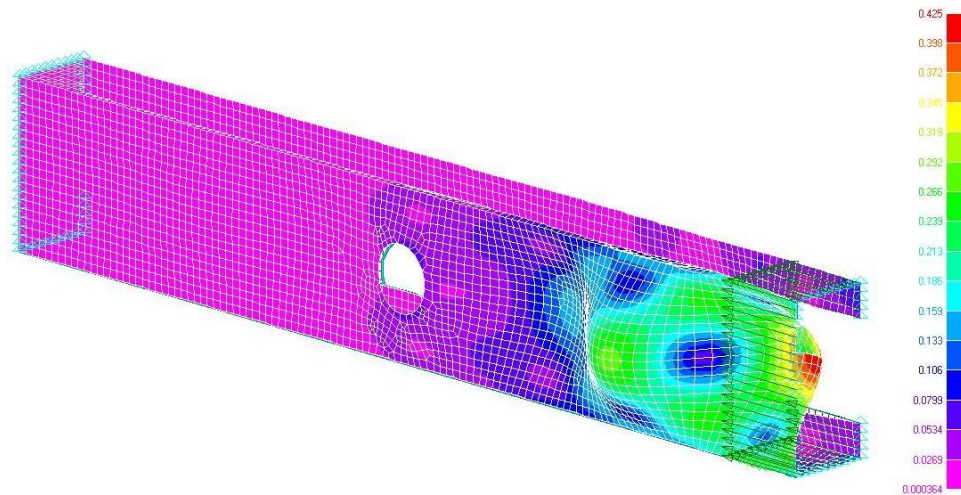
χωρίς οπή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την ανάλυση που έγινε υπερεκτιμήσαμε την παρουσία της οπής καθώς η διατομή που εξετάστηκε σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, αφορά μόνο το κέντρο του φορέα που έχει τη μικρότερη αντοχή.

6.2 Διατομές C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις

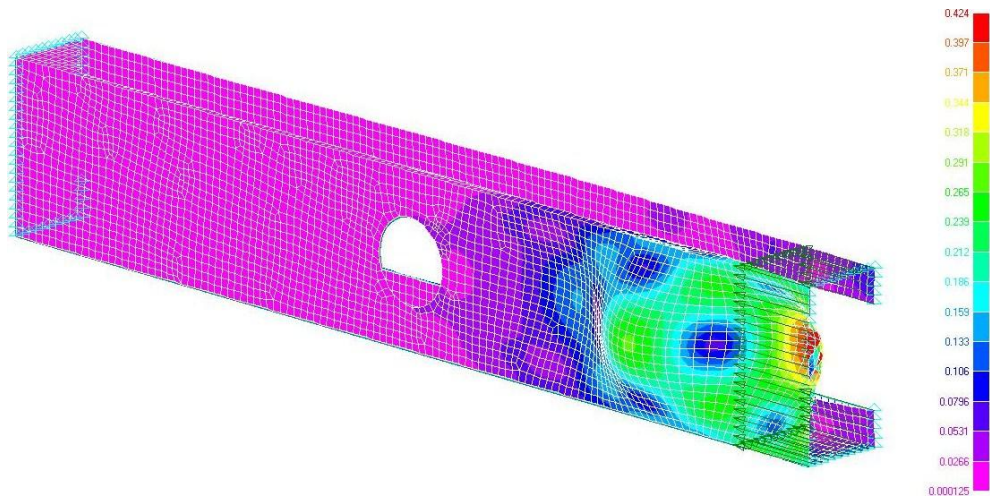
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι παραμορφώσεις των αξονικά θλιβόμενων μελών διατομής C με ακραίες κάθετες στα πέλματα ενισχύσεις όπως προέκυψαν από γραμμική ανάλυση λυγισμού με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.



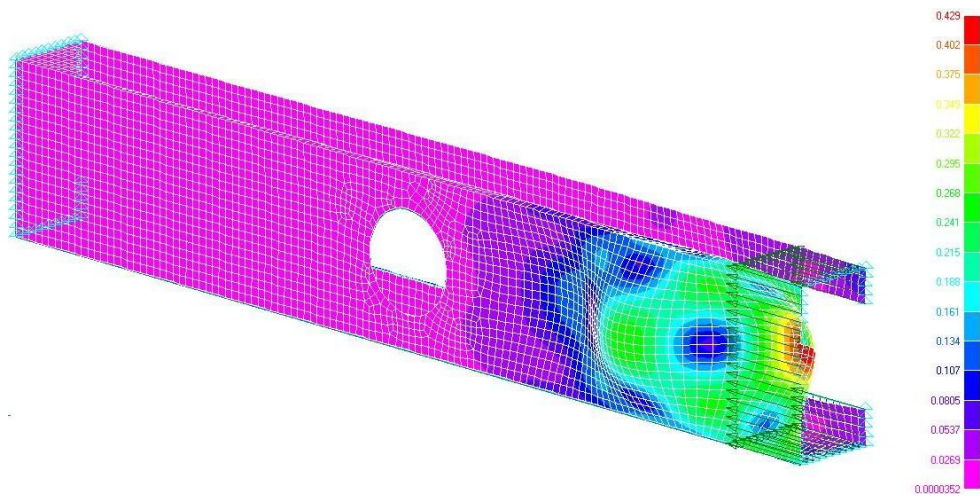
Σχήμα 6.8: Μοντέλο διατομής C με κατακόρυφες ενισχύσεις χωρίς οπή



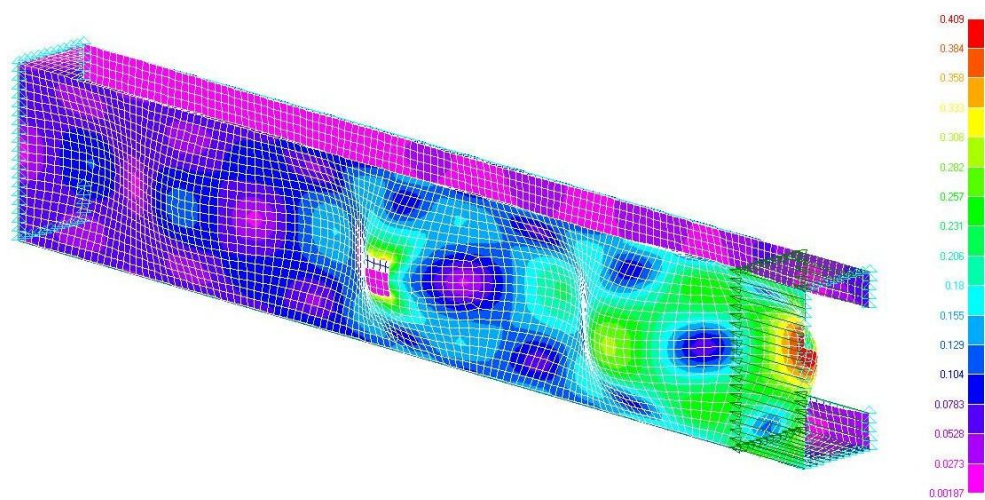
Σχήμα 6.9: Μοντέλο διατομής C με κατακόρυφες ενισχύσεις και κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 40mm



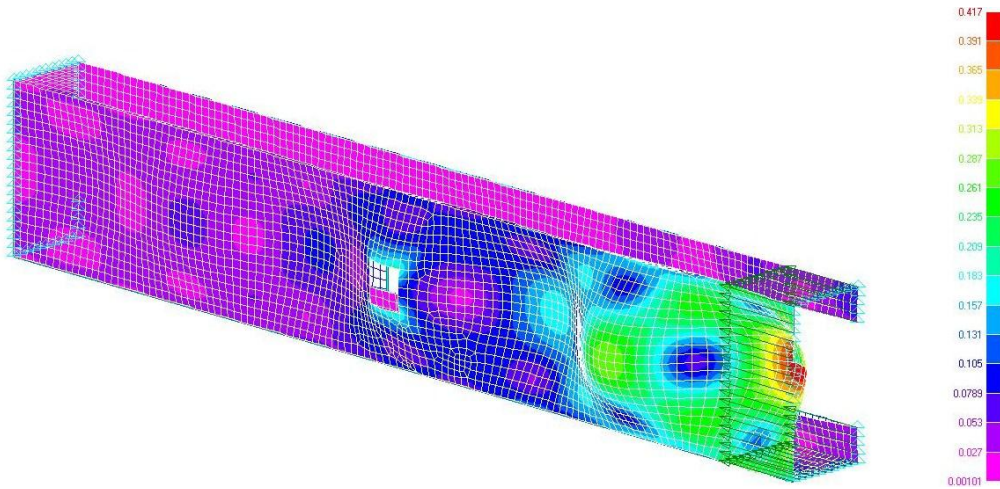
Σχήμα 6.10: Μοντέλο διατομής C με κατακόρυφες ενισχύσεις και κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 50mm



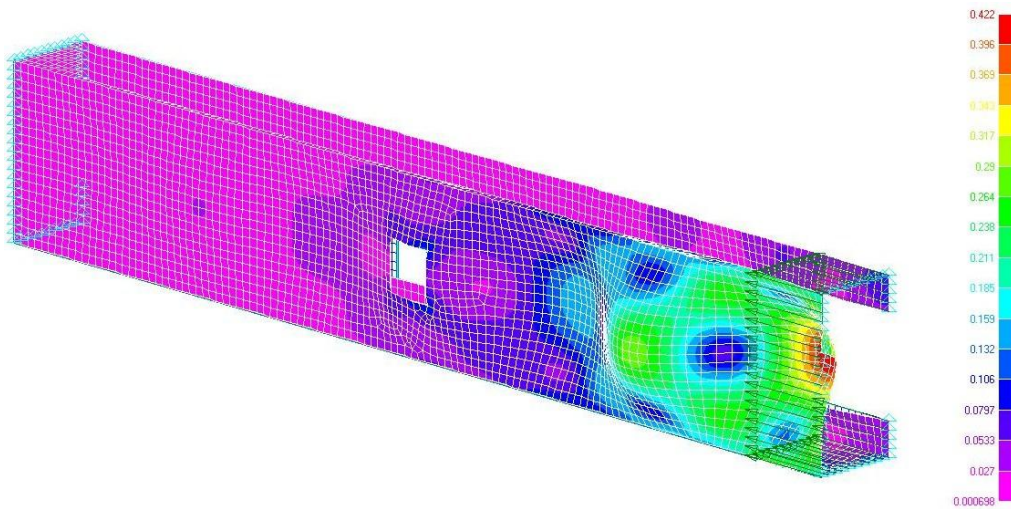
Σχήμα 6.11: Μοντέλο διατομής C με κατακόρυφες ενισχύσεις και κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 60mm



Σχήμα 6.12: Μοντέλο διατομής C με κατακόρυφες ενισχύσεις και τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 20mm



Σχήμα 6.13: Μοντέλο διατομής C με κατακόρυφες ενισχύσεις και τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 25mm



Σχήμα 6.14: Μοντέλο διατομής C με κατακόρυφες ενισχύσεις και τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 30mm

Από τα παραμορφωμένα σχήματα των μελών, συμπεραίνουμε ότι η παρουσία των κατακόρυφων ακραίων ενισχύσεων περιορίσει σημαντικά τη μετατόπιση των πελμάτων σε όλους τους φορείς. Ο τρόπος αστοχίας για όλες τις περιπτώσεις είναι ο τοπικός λυγισμός. Επίσης παρατηρούμε ότι τα ημικύματα στις περιπτώσεις με μεγαλύτερες οπές ολοκληρώνονται πριν την οπή στο φορέα, με αποτέλεσμα η οπή να μην επηρεάζει σημαντικά ή και καθόλου το λυγισμό του μέλους.

Στον πίνακα 6.3 δίνονται τα κρίσιμα φορτία λυγισμού για την ομάδα των ενισχυμένων μελών διατομής C, στο γράφημα 6.5 παρουσιάζονται συγκριτικά τα μέλη με κυκλική οπή στον κορμό, διαφόρων διαμέτρων και στο γράφημα 6.6 αντίστοιχα τα μέλη με τετραγωνική οπή.

Πίνακας 6.3: Κρίσιμο φορτίο λυγισμού διατομών C με ενισχύσεις

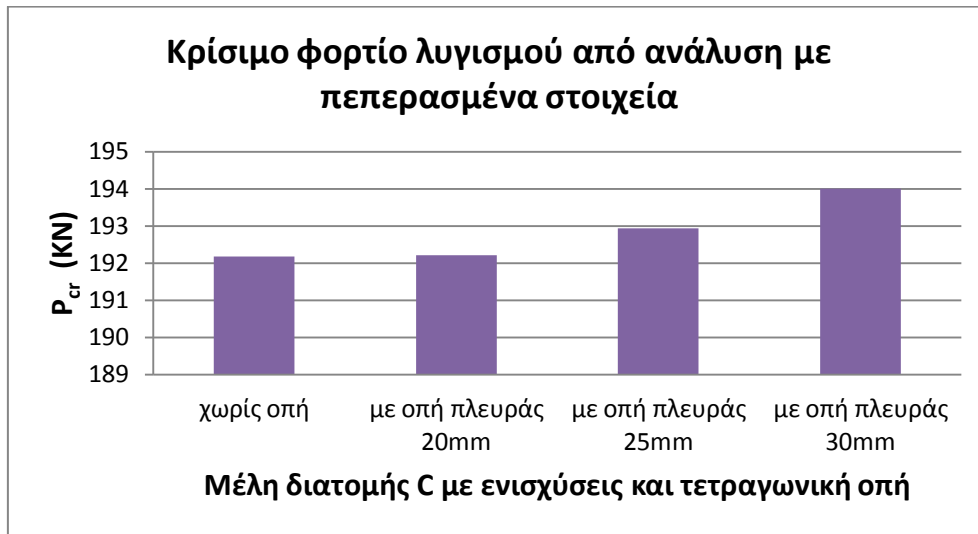
| Εξεταζόμενη διατομή | | Κρίσιμο φορτίο λυγισμού P_{cr} (KN) | |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------|
| Διατομή C με ενισχύσεις | χωρίς οπή | | 192,17 |
| | με κυκλική οπή διαμέτρου: | 40mm | 194,04 |
| | | 50mm | 194,93 |
| | | 60mm | 195,69 |
| | με τετραγωνική οπή πλευράς: | 20mm | 192,22 |
| | | 25mm | 192,94 |
| | | 30mm | 194,01 |

Γράφημα 6.5: Σύγκριση P_{cr} μελών διατομής C με ενισχύσεις και κυκλική οπή



Όπως φαίνεται στο σχήμα, με την παρουσία της οπής το κρίσιμο φορτίο λυγισμού αυξήθηκε σε σχέση με το μέλος χωρίς οπή. Συγκεκριμένα για οπή διαμέτρου 40mm αυξήθηκε κατά 0,9%, για οπή διαμέτρου 50mm κατά 1,4% και διαμέτρου 60mm κατά 1,8%. Βλέπουμε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η οπή τόσο αυξάνεται και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, χωρίς ωστόσο να παρουσιάζει σημαντικές διαφορές στην τιμή του.

Γράφημα 6.6: Σύγκριση P_{cr} μελών διατομής C με ενισχύσεις και τετραγωνική οπή



Ομοίως στην περίπτωση της τετραγωνικής οπής το κρίσιμο φορτίο αυξάνεται αλλά πολύ λιγότερο σε σχέση με τις κυκλικές οπές. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η διαφορά είναι αμελητέα. Συγκεκριμένα για οπή πλευράς 20mm το κρίσιμο φορτίο αυξήθηκε κατά 0,02% (πρακτικά σταθερό), για πλευρά 25mm αυξήθηκε κατά 0,4% και για πλευρά 30mm κατά 0,9%.

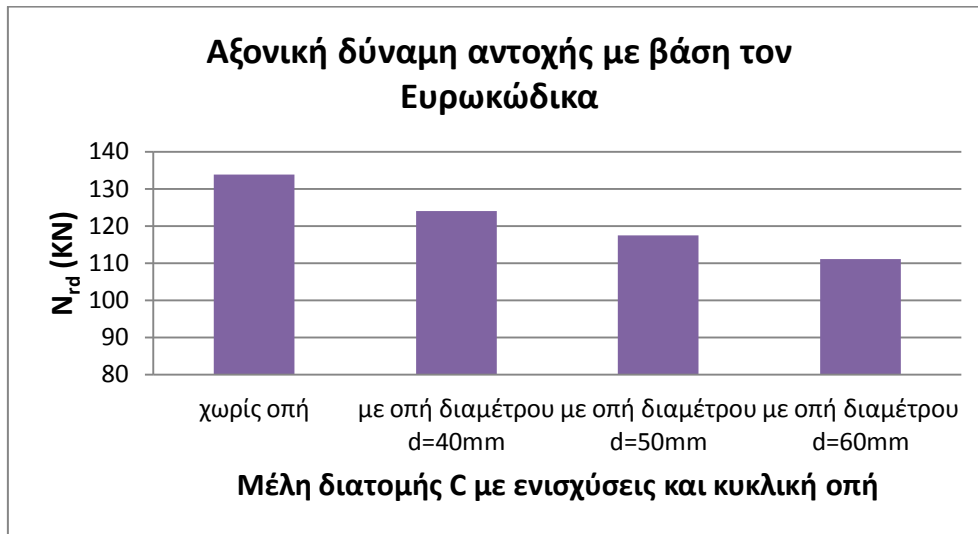
Η αύξηση στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού με την παρουσία της οπής εξηγείται από το γεγονός ότι ο λυγισμός σταματά πριν την οπή, όπως φαίνεται και στα παραμορφωμένα μοντέλα. Ωστόσο οι διαφορές στην τιμή του δεν θεωρούνται σημαντικές.

Η αξονική δύναμη αντοχής κάθε διατομής από τις παραπάνω, όπως υπολογίστηκε με βάση τον Ευρωκώδικα, φαίνεται συγκεντρωτικά στον πίνακα 6.4 και γραφικά στα γραφήματα 6.7 και 6.8.

Πίνακας 6.4: Αξονική δύναμη αντοχής με βάση τον Ευρωκώδικα διατομών C με ακραίες ενισχύσεις

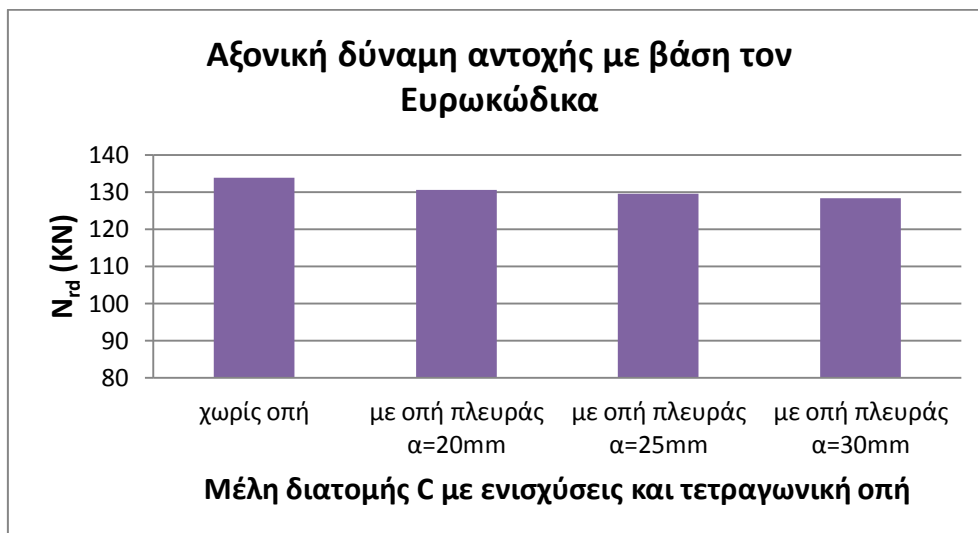
| Εξεταζόμενη διατομή | | Αξονική δύναμη αντοχής N_{Rd} (kN) | |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------|
| Διατομή C με ενισχύσεις | χωρίς οπή | 133,79 | |
| | με κυκλική οπή διαμέτρου: | 40mm | 123,93 |
| | | 50mm | 117,47 |
| | | 60mm | 111,02 |
| | με τετραγωνική οπή πλευράς: | 20mm | 130,61 |
| | | 25mm | 129,55 |
| | | 30mm | 128,32 |

Γράφημα 6.7: Σύγκριση N_{rd} μελών διατομής C με ενισχύσεις και κυκλική οπή



Οι αντοχές των διατομών που υπολογίστηκαν με βάση τον Ευρωκώδικα έδειξαν ότι η κυκλική οπή μείωσε την αντοχή, για διάμετρο 40mm κατά 7,3%, για διάμετρο 50mm κατά 12,2% και για διάμετρο 60mm κατά 17%. Εδώ αποδεικνύεται ότι οι ενισχύσεις προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή στη διατομή.

Γράφημα 6.8: Σύγκριση N_{rd} μελών διατομής C με ενισχύσεις και τετραγωνική οπή



Στις τετραγωνικές οπές πάλι εμφανίζεται μικρότερη σχετικά μείωση της αντοχής. Για πλευρά 20mm η αξονική δύναμη αντοχής μειώνεται κατά 2,4%, για πλευρά 25mm κατά 3,2% και για πλευρά 30mm κατά 4,1%.

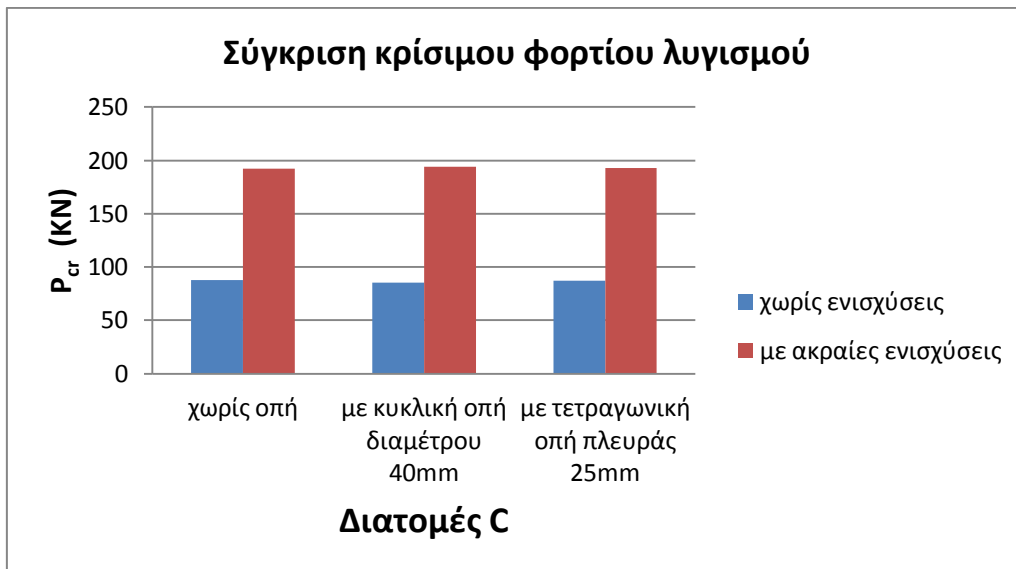
6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων διατομών C χωρίς ενισχύσεις και διατομών C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις.

Μελετώντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων των δύο μεθόδων, για τα μέλη διατομής C, χωρίς ενισχύσεις και με ακραίες κάθετες στα πέλματα ενισχύσεις, βγάζουμε ορισμένα συμπεράσματα. Ενδεικτικά θα συγκριθούν οι διατομές χωρίς οπή, οι διατομές με κυκλική οπή διαμέτρου 40mm και οι διατομές με τετραγωνική οπή 25x25(mm).

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων βλέπουμε ότι η παρουσία των ακραίων κάθετων ενισχύσεων οδήγησε σε σημαντική αύξηση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Ειδικότερα, στα μέλη διατομής C χωρίς οπές, οι ακραίες ενισχύσεις είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση του κρίσιμου φορτίου κατά 119%. Στα μέλη με κυκλική οπή διαμέτρου 40mm η αντίστοιχη αύξηση λόγω ενισχύσεων ήταν 127% και στα μέλη με τετραγωνική οπή πλευράς 25mm ήταν 121%.

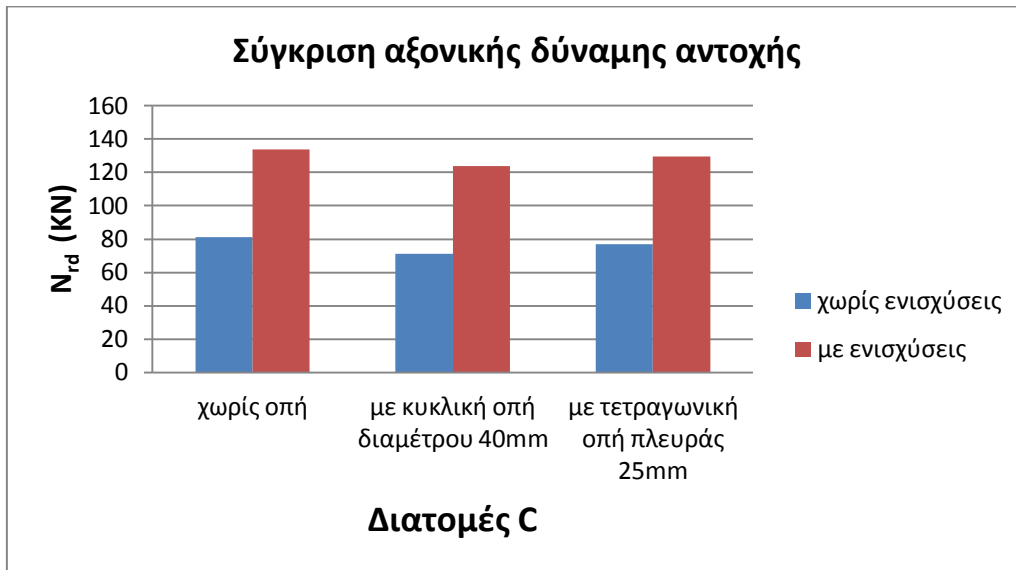
Παρατηρούμε ακόμη ότι με την παρουσία των ενισχύσεων αυξάνεται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού όταν υπάρχει οπή, γεγονός που οφείλεται στην αλλαγή του λυγισμού του μέλους, ο οποίος ολοκληρώνεται πριν την οπή.

Γράφημα 6.9: Σύγκριση P_{cr} μελών διατομής C χωρίς ενισχύσεις και διατομής C με ακραίες ενισχύσεις



Εξίσου αυξάνεται και η αξονική δύναμη αντοχής της διατομής με την παρουσία των ακραίων ενισχύσεων. Στα μέλη διατομής C χωρίς οπές, οι ακραίες ενισχύσεις είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής κατά 64%. Στα μέλη με κυκλική οπή διαμέτρου 40mm η αντίστοιχη αύξηση λόγω ενισχύσεων ήταν 73% και στα μέλη με τετραγωνική οπή 25x25(mm) ήταν 68%.

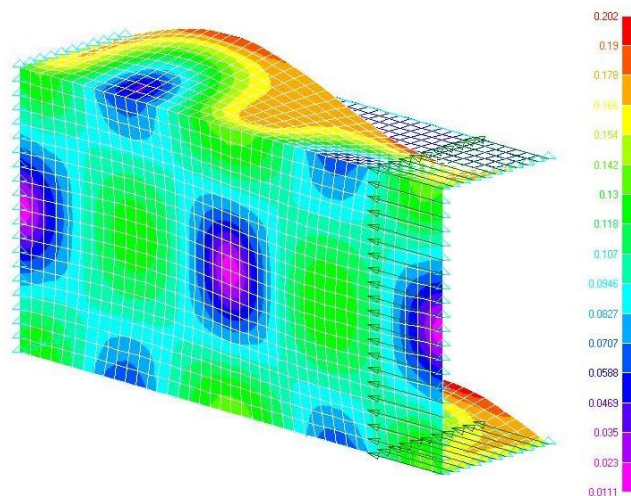
Γράφημα 6.10: Σύγκριση N_{rd} μελών διατομής C χωρίς ενισχύσεις και διατομής C με ακραίες ενισχύσεις



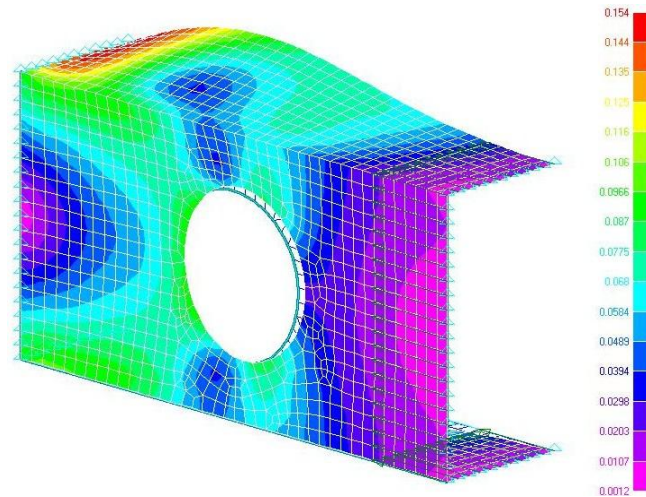
Κατά συνέπεια, αποδεικνύεται και στην πράξη η αποτελεσματικότητα των ενισχύσεων στην ισχυροποίηση της γενικότερης συμπεριφοράς του μέλους, τόσο στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού όσο και στην αξονική θλιπτική αντοχή της διατομής.

6.4 Διατομή C χωρίς ενισχύσεις: Σύγκριση με φορέα μήκους 200mm.

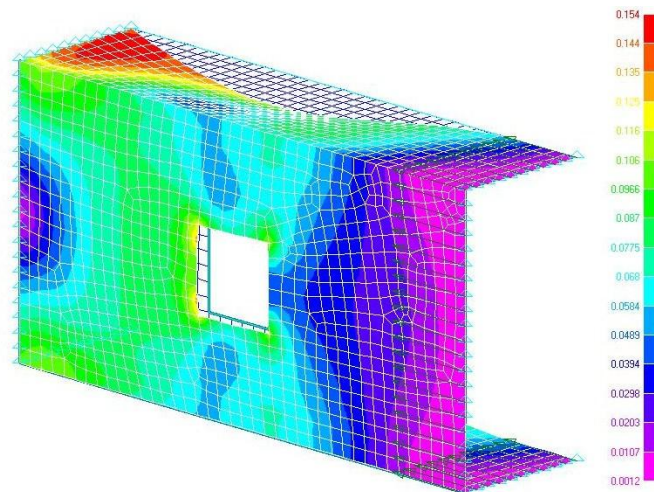
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι παραμορφώσεις των αξονικά θλιβόμενων μελών διατομής C χωρίς ενισχύσεις, για μέλη μήκους 200mm, όπως προέκυψαν από γραμμική ανάλυση λυγισμού με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Αναλύθηκαν ενδεικτικά τρία μέλη: χωρίς οπή, με κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 60mm και με τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 30mm.



Σχήμα 6.15: Μοντέλο διατομής C χωρίς ενισχύσεις, χωρίς οπή



Σχήμα 6.16: Μοντέλο διατομής C χωρίς ενισχύσεις με κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 60mm



Σχήμα 6.17: Μοντέλο διατομής C χωρίς ενισχύσεις με τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 30mm

Παρατηρώντας τα παραμορφωμένα μοντέλα βλέπουμε ότι ο τρόπος αστοχίας είναι ο συνδυασμός τοπικού λυγισμού με λυγισμό με στρέβλωση της διατομής. Η παρουσία των οπών επηρεάζει το λυγισμό του μέλους καθώς αλλάζει ο αριθμός των ημικυμάτων. Στο μέλος χωρίς οπή έχουμε δύο ημικύματα ενώ στα μέλη με οπή έχουμε ένα. Γενικά σε όλα τα μοντέλα βλέπουμε τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις στα πέλματα των διατομών.

Στον πίνακα 6.5 δίνονται τα κρίσιμα φορτία λυγισμού για την ομάδα των μη ενισχυμένων μελών διατομής C, μήκους φορέα 200mm.

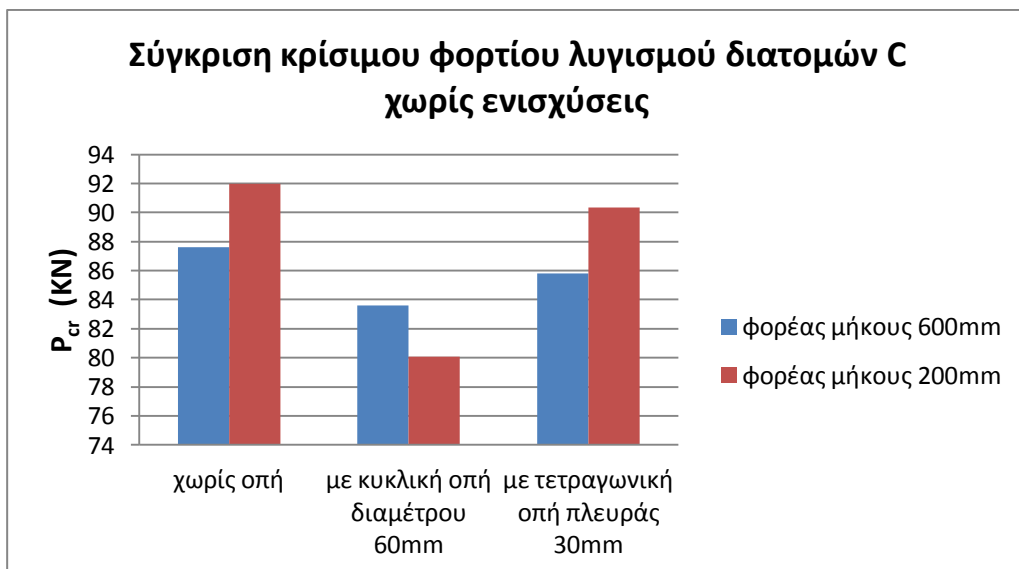
Πίνακας 6.5: Κρίσιμο φορτίο λυγισμού μελών διατομής C χωρίς ενισχύσεις και μήκους 200mm

| Εξεταζόμενη διατομή | | Κρίσιμο φορτίο λυγισμού P_{cr} (KN) |
|---------------------|---------------------------------|--|
| C χωρίς ενισχύσεις | χωρίς οπή | 91,98 |
| | με κυκλική οπή διαμέτρου 60mm | 80,06 |
| | με τετραγωνική οπή πλευράς 30mm | 90,36 |

Με την παρουσία της οπής το κρίσιμο φορτίο λυγισμού μειώνεται κατά 12,96% για την κυκλική οπή (έναντι 4,54% του φορέα μήκους 600mm) και κατά 1,76% για την τετραγωνική οπή (έναντι 2,03% του φορέα μήκους 600mm).

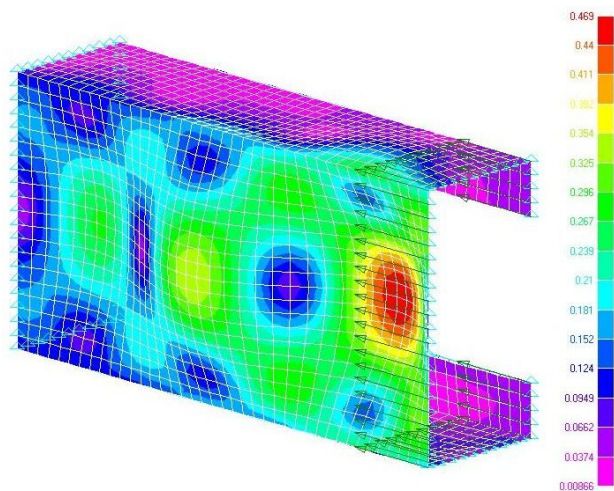
Στο γράφημα 6.11 παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τα παραπάνω μέλη, για τον φορέα μήκους 600mm και τον φορέα μήκους 200mm. Ο φορέας 200mm φαίνεται γενικά να έχει μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο λυγισμού εκτός από την περίπτωση του μέλους με κυκλική οπή όπου το κρίσιμο φορτίο μειώνεται πολύ περισσότερο σε σχέση με τον μακρύτερο φορέα. Συγκεκριμένα ο φορέας με μήκος 200mm εμφάνισε μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο λυγισμού κατά 5% στις διατομές C χωρίς οπή και κατά 5,3% στις διατομές με τετραγωνική οπή πλευράς 30mm, ενώ στις διατομές με κυκλική οπή διαμέτρου 60mm το κρίσιμο φορτίο μειώθηκε κατά 4,25%.

Γράφημα 6.11: Σύγκριση P_{cr} μελών διατομής C χωρίς ενισχύσεις για μήκη φορέα 200mm και 600mm

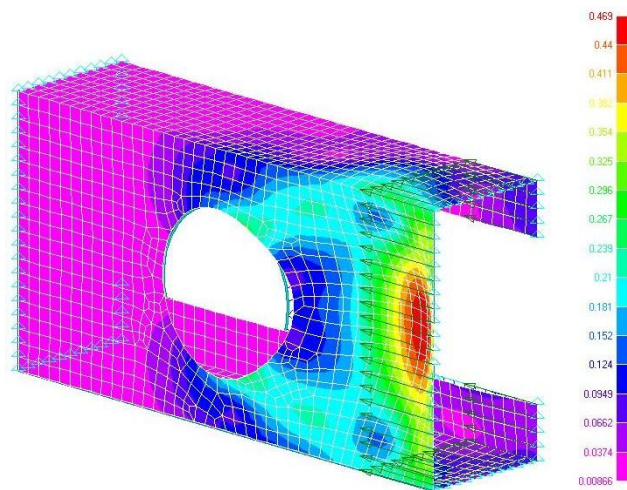


6.5 Διατομή C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις: Σύγκριση με φορέα μήκους 200mm.

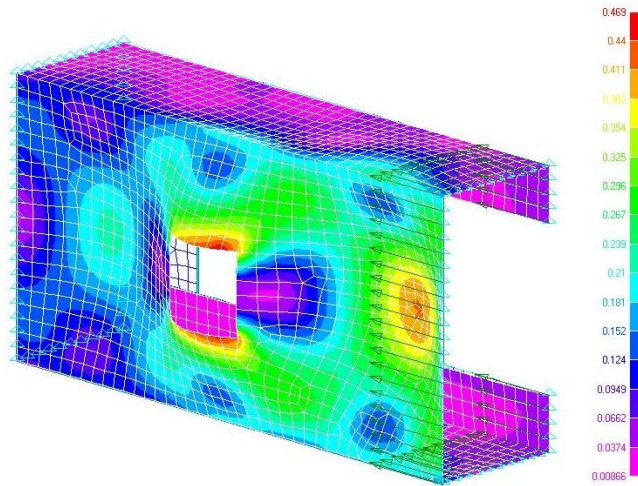
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι παραμορφώσεις των αξονικά θλιβόμενων μελών διατομής C με ακραίες κάθετες στα πέλματα ενισχύσεις, για μέλη μήκους 200mm, όπως προέκυψαν από γραμμική ανάλυση λυγισμού με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Αναλύθηκαν ενδεικτικά τρία μέλη: χωρίς οπή, με κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 60mm και με τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 30mm.



Σχήμα 6.18: Μοντέλο διατομής C με κατακόρυφες ενισχύσεις χωρίς οπή



Σχήμα 6.19: Μοντέλο διατομής C με κατακόρυφες ενισχύσεις με κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 60mm



Σχήμα 6.20: Μοντέλο διατομής C με κατακόρυφες ενισχύσεις και τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 30mm

Η παρουσία των ενισχύσεων περιορίσε τις μετατοπίσεις των πελμάτων και οδήγησε τα μέλη σε καθαρό τοπικό λυγισμό, δύο ημικυμάτων για το μοντέλο χωρίς οπή και το μοντέλο με τετραγωνική οπή. Στο μοντέλο με την κυκλική οπή ο λυγισμός διακόπτεται από την οπή και παραμένει στο πρώτο μέρος του φορέα χωρίς ουσιαστικά να προκαλεί πρόβλημα σ' αυτόν.

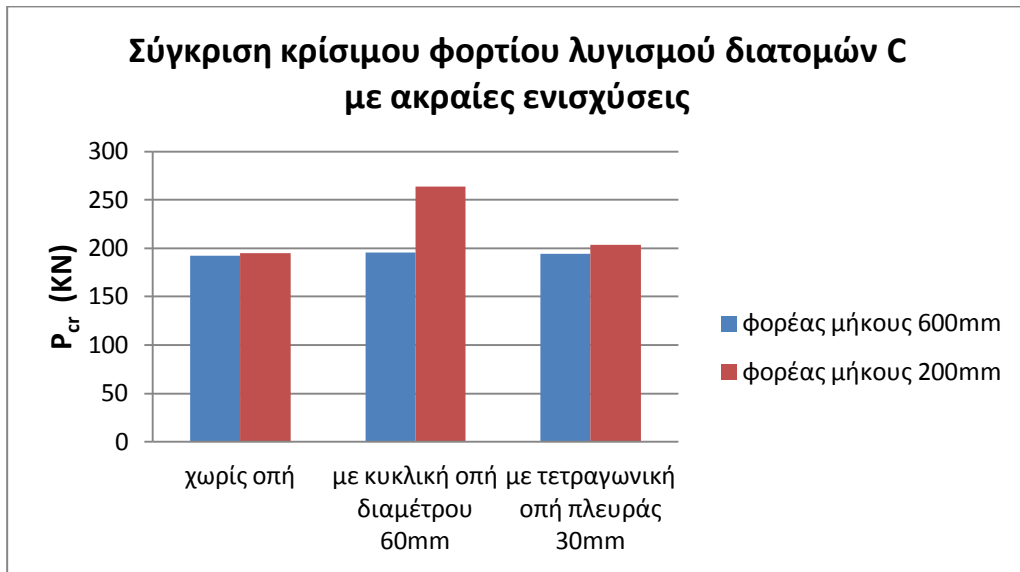
Πίνακας 6.6: Κρίσιμο φορτίο λυγισμού μελών διατομής C με ακραίες ενισχύσεις και μήκους 200mm

| Εξεταζόμενη διατομή | | Κρίσιμο φορτίο λυγισμού P_{cr} (KN) |
|-------------------------------|------------------------------------|--|
| C με ακραίες ενισχύσεις | χωρίς οπή | 195,19 |
| | με κυκλική οπή διαμέτρου 60mm | 263,54 |
| | με τετραγωνική οπή πλευράς 30mm | 203,55 |

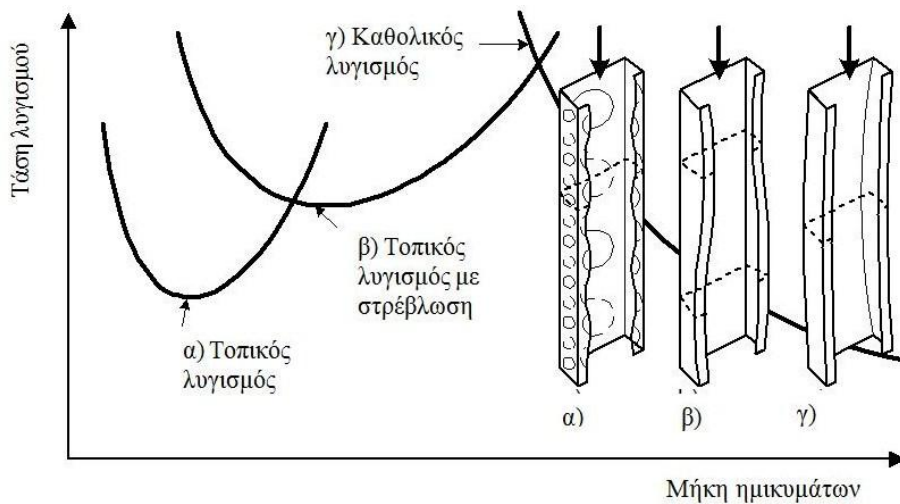
Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού αυξήθηκε με την παρουσία της οπής κατά 35% (έναντι 1,8% του φορέα μήκους 600mm) για το μοντέλο με την κυκλική οπή και κατά 4,3% (έναντι 0,9%) για το μοντέλο με την τετραγωνική οπή (πρακτικά αμελητέο).

Συγκριτικά με τον μακρύτερο φορέα, ο φορέας μήκους 200mm παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού όπως φαίνεται και στο γράφημα 6.12. Ειδικότερα, στον φορέα μήκους 200mm το κρίσιμο φορτίο είναι μεγαλύτερο κατά 1,57% για το μέλος χωρίς οπή, κατά 34,67% για το μέλος με κυκλική οπή και κατά 4,92% για το μέλος με τετραγωνική οπή.

Γράφημα 6.12: Σύγκριση P_{cr} μελών διατομής C με ακραίες ενισχύσεις για μήκη φορέα 200mm και 600mm



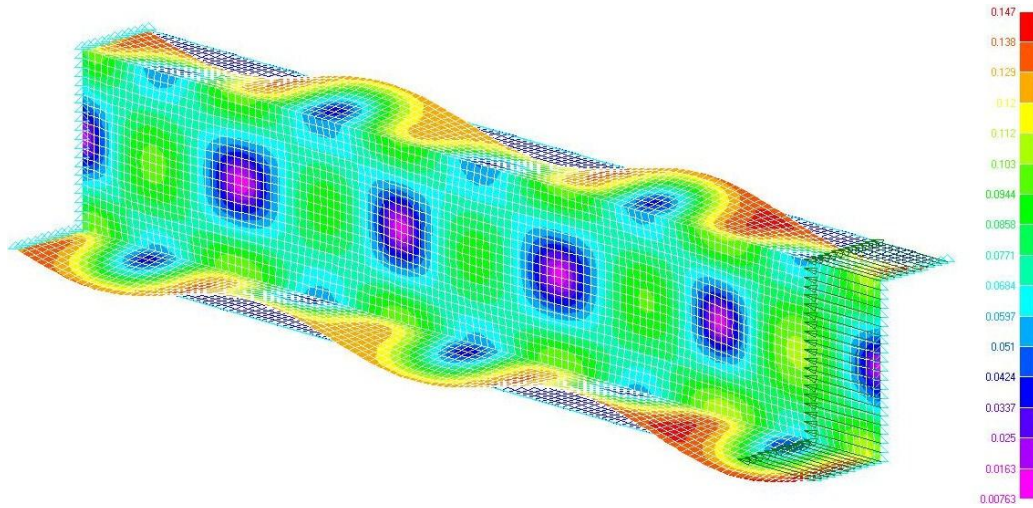
Γενικά οι αλλαγές που εμφανίζονται στην τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού οφείλονται στην αλλαγή του μήκους των ημικυμάτων των μελών, όπως φαίνεται στο σχήμα. Έτσι για μεγαλύτερο ή μικρότερο μήκος ημικύματος είναι δυνατόν να έχουμε μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο λυγισμού, καθώς μπορεί να πέσουμε σε υψηλότερο σημείο της αντίστοιχης καμπύλης.



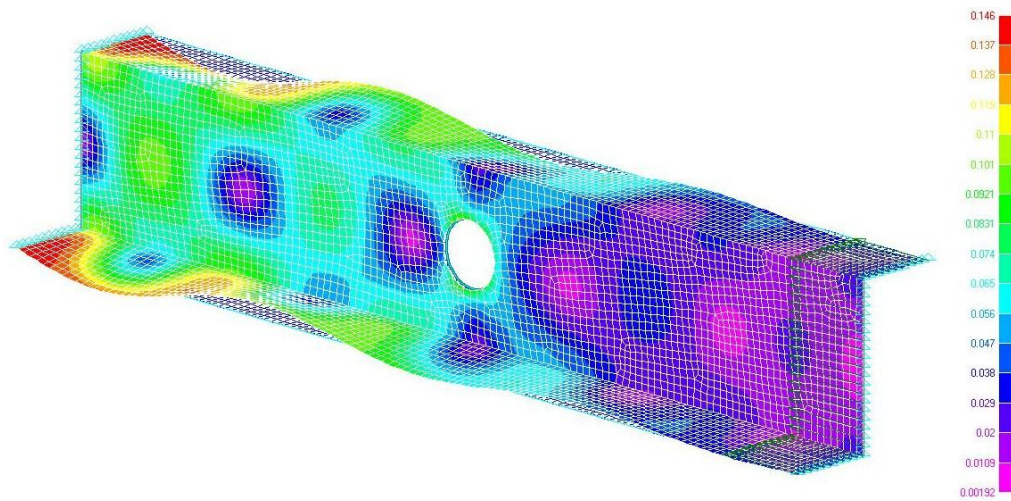
Σχήμα 6.21: Παραδείγματα της ελαστικής κρίσιμης τάσης για διάφορες ιδιομορφές λυγισμού ως συνάρτηση του μήκους των ημικυμάτων και παραδείγματα μορφών λυγισμού

6.6 Διατομές Z χωρίς ενισχύσεις

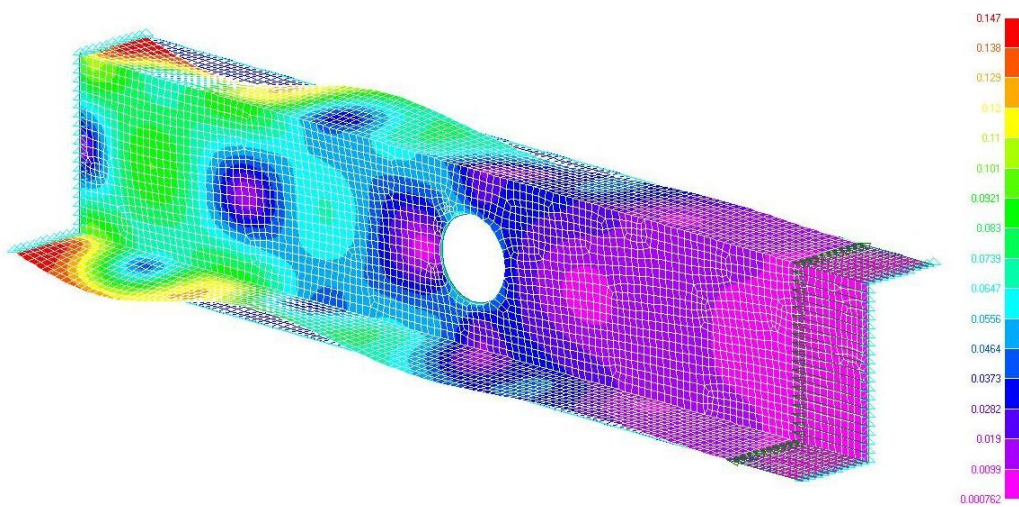
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι παραμορφώσεις των αξονικά θλιβόμενων μελών διατομής Z χωρίς ενισχύσεις όπως προέκυψαν από γραμμική ανάλυση λυγισμού με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.



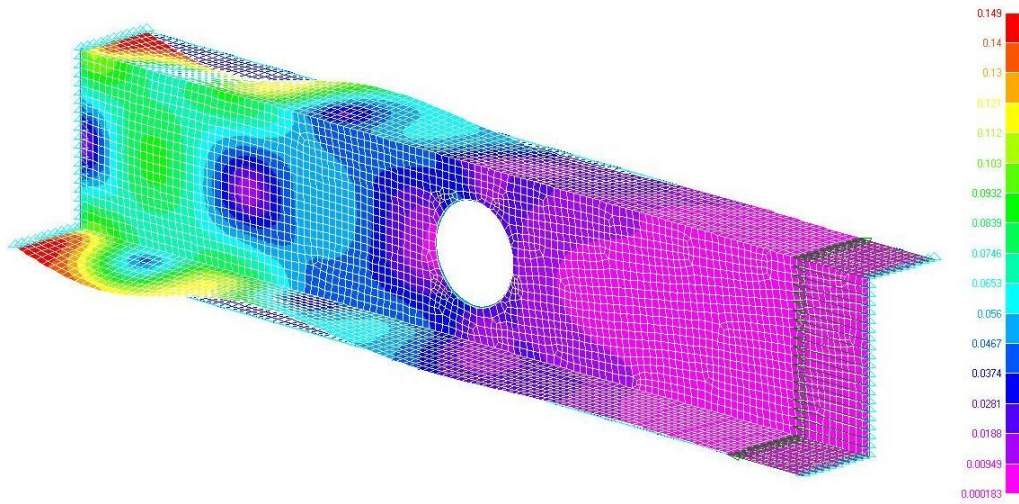
Σχήμα 6.22: Μοντέλο διατομής Z χωρίς ενισχύσεις, χωρίς οπή



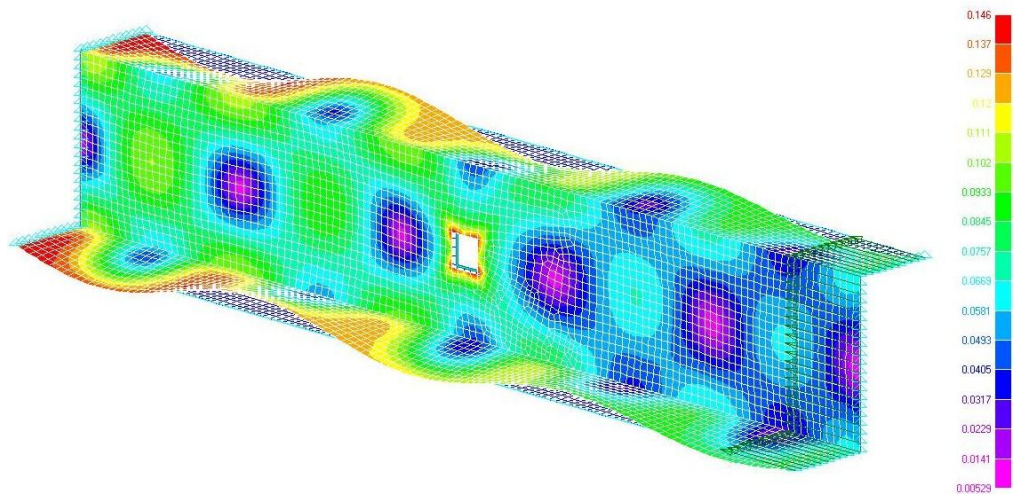
Σχήμα 6.23: Μοντέλο διατομής Z χωρίς ενισχύσεις με κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 40mm



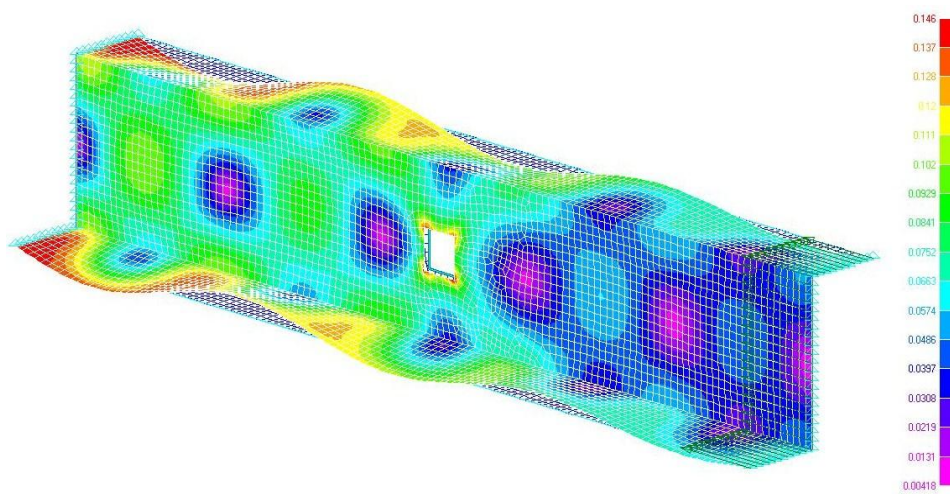
Σχήμα 6.24: Μοντέλο διατομής Z χωρίς ενισχύσεις με κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 50mm



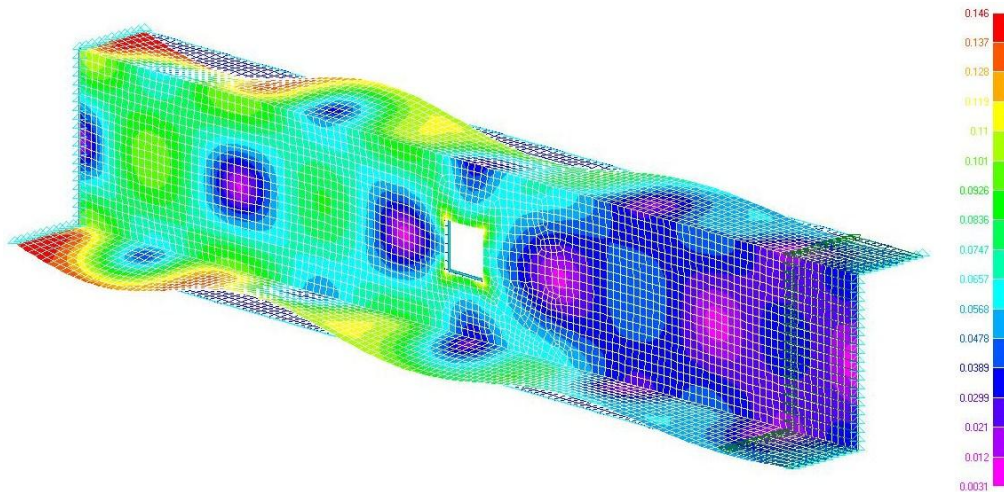
Σχήμα 6.25: Μοντέλο διατομής Z χωρίς ενισχύσεις με κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 60mm



Σχήμα 6.26: Μοντέλο διατομής Z χωρίς ενισχύσεις με τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 20mm



Σχήμα 6.27: Μοντέλο διατομής Z χωρίς ενισχύσεις με τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 25mm



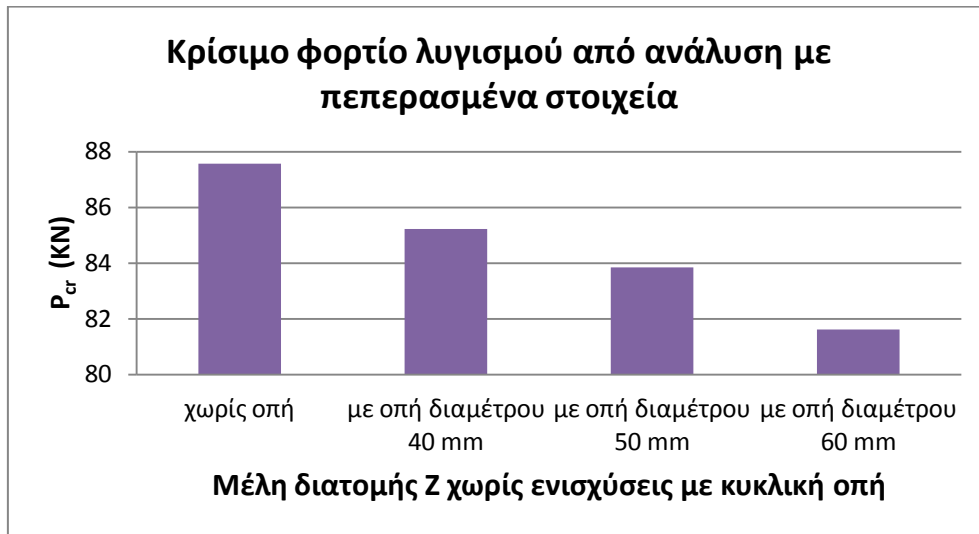
Σχήμα 6.28: Μοντέλο διατομής Z χωρίς ενισχύσεις με τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 30mm

Εξετάζοντας τα μοντέλα παρατηρούμε ότι η κυρίαρχη μορφή αστοχίας για όλες τις περιπτώσεις είναι η αλληλεπίδραση τοπικού λυγισμού και λυγισμού με στρέβλωση της διατομής. Είναι φανερό ότι η παρουσία της οπής μειώνει σημαντικά τον αριθμό των ημικυμάτων κυρίως στα μέλη με κυκλική οπή, σε σχέση με το μέλος χωρίς οπή. Στον πίνακα 6.7 δίνονται τα κρίσιμα φορτία λυγισμού για την ομάδα των μη ενισχυμένων μελών διατομής Z, ενώ στο γράφημα 6.13 παρουσιάζονται συγκριτικά τα μέλη με κυκλική οπή στον κορμό διαφόρων διαμέτρων.

Πίνακας 6.7: Κρίσιμο φορτίο λυγισμού μελών διατομής Z χωρίς ενισχύσεις

| Εξεταζόμενη διατομή | | Κρίσιμο φορτίο λυγισμού P_{cr} (KN) | |
|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-------|
| Διατομή Z χωρίς ενισχύσεις | χωρίς οπή | 87,56 | |
| | με κυκλική οπή διαμέτρου: | 40mm | 85,22 |
| | | 50mm | 83,85 |
| | | 60mm | 81,62 |
| | με τετραγωνική οπή πλευράς: | 20mm | 86,64 |
| | | 25mm | 86,23 |
| | | 30mm | 85,78 |

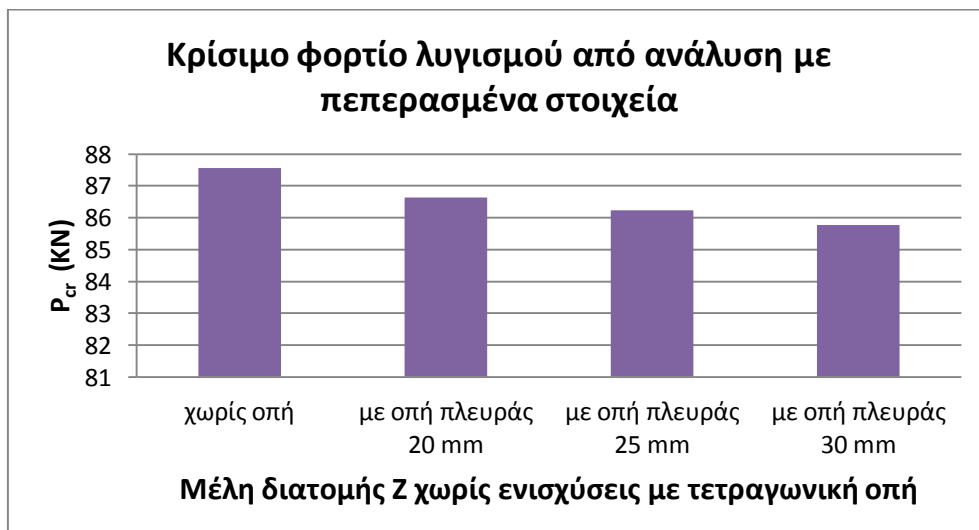
Γράφημα 6.13: Σύγκριση P_{cr} μελών διατομής Z χωρίς ενισχύσεις με κυκλική οπή



Συγκρίνοντας τις παραπάνω τιμές, συμπεραίνουμε ότι η παρουσία των οπών στον κορμό είχε ως συνέπεια τη μείωση της φέρουσας ικανότητας των μελών. Συγκεκριμένα, τη δυσμενέστερη επίδραση είχε η οπή με μεγαλύτερη διάμετρο ($d=60\text{mm}$) η οποία κατάφερε μείωση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού κατά 6,8%, ενώ οι οπές με μικρότερη διάμετρο μείωσαν το P_{cr} κατά 4,2% και 2,7% για διάμετρο 50mm και 40mm αντίστοιχα.

Στο γράφημα 6.14 παρουσιάζονται συγκριτικά τα κρίσιμα φορτία λυγισμού για τα μέλη με τετραγωνικές οπές στον κορμό διαφόρων πλευρών.

Γράφημα 6.14: Σύγκριση P_{cr} μελών διατομής Z χωρίς ενισχύσεις με τετραγωνική οπή



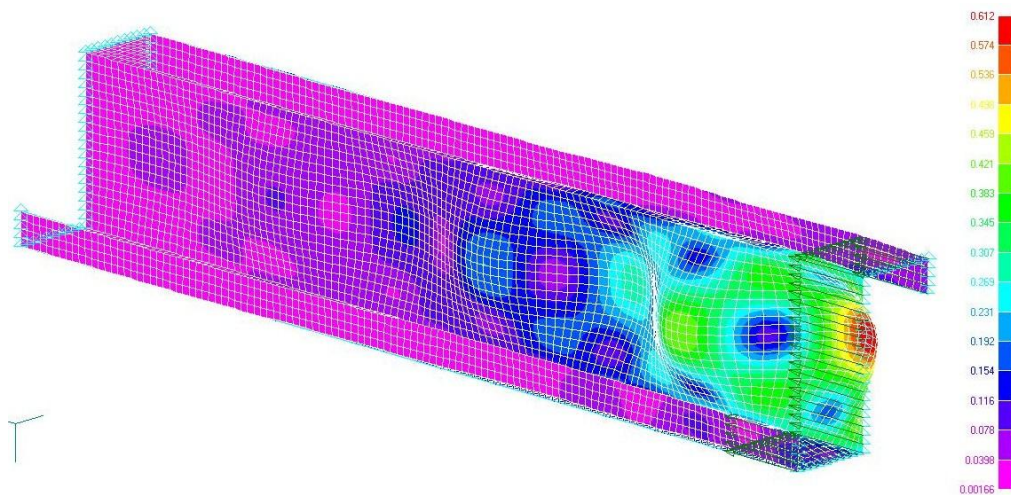
Σ' αυτή την περίπτωση, τη δυσμενέστερη επίδραση είχε η οπή με τη μεγαλύτερη πλευρά ($a=30\text{mm}$) η οποία κατάφερε μείωση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού κατά 2,03% ενώ οι οπές με μικρότερη πλευρά μείωσαν το P_{cr} κατά 1,52%

για $\alpha=25\text{mm}$ και κατά 1,05% για $\alpha=20\text{mm}$. Εδώ παρατηρούμε ότι οι οπές μείωσαν κατά πολύ λίγο τη φέρουσα ικανότητα των μελών. Επίσης η διαβάθμιση του μεγέθους της οπής δεν επηρεάζει σημαντικά το κρίσιμο φορτίο λυγισμού.

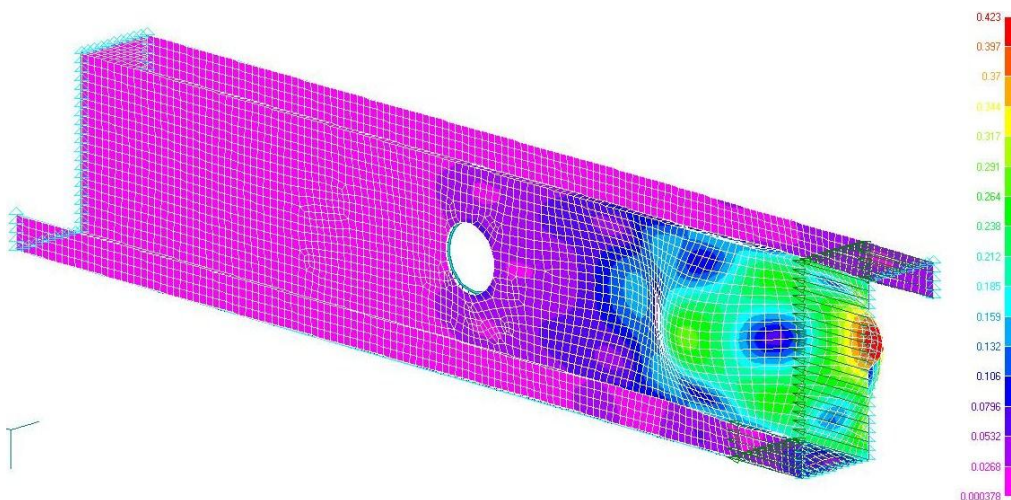
Η αξονική δύναμη αντοχής κάθε μέλους διατομής Z όπως υπολογίστηκε με βάση τον Ευρωκώδικα, είναι ίδια με τα μέλη διατομής C, όπως παρουσιάστηκαν ανωτέρω στον πίνακα 6.2 και στα γραφήματα 6.3 και 6.4.

6.7 Διατομές Z με ακραίες κάθετες ενισχύσεις

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι παραμορφώσεις των αξονικά θλιβόμενων μελών διατομής Z με ακραίες κάθετες στα πέλματα ενισχύσεις όπως προέκυψαν από γραμμική ανάλυση λυγισμού με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

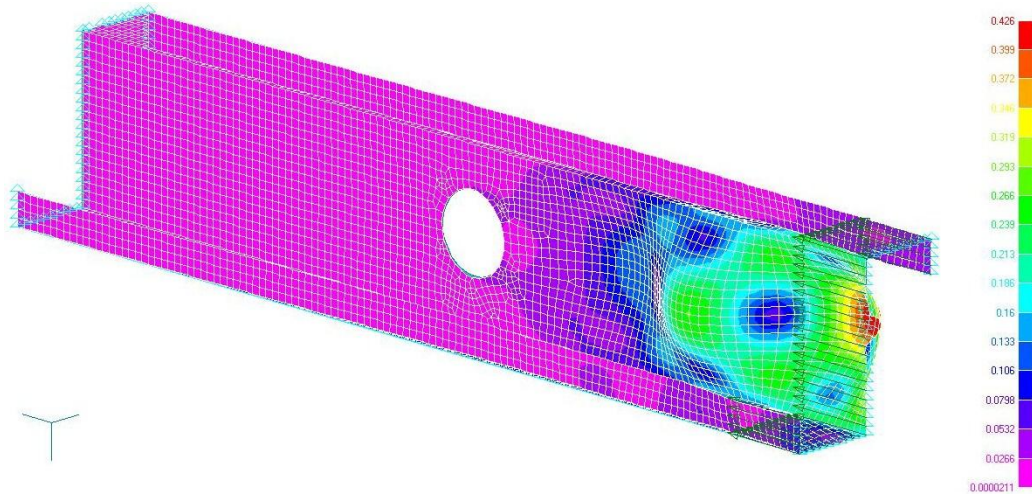


Σχήμα 6.29: Μοντέλο διατομής Z με κατακόρυφες ενισχύσεις χωρίς οπή

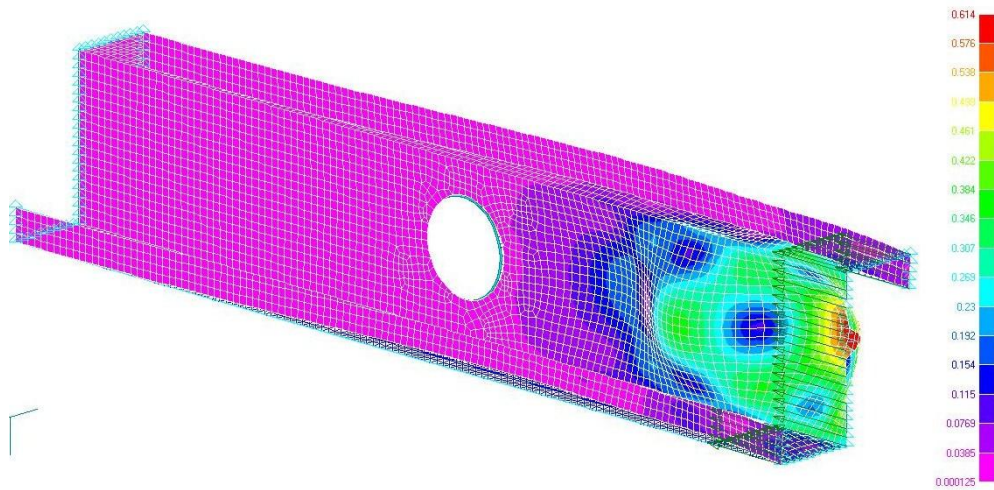


Σχήμα 6.30: Μοντέλο διατομής Z με κατακόρυφες ενισχύσεις και κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 40mm

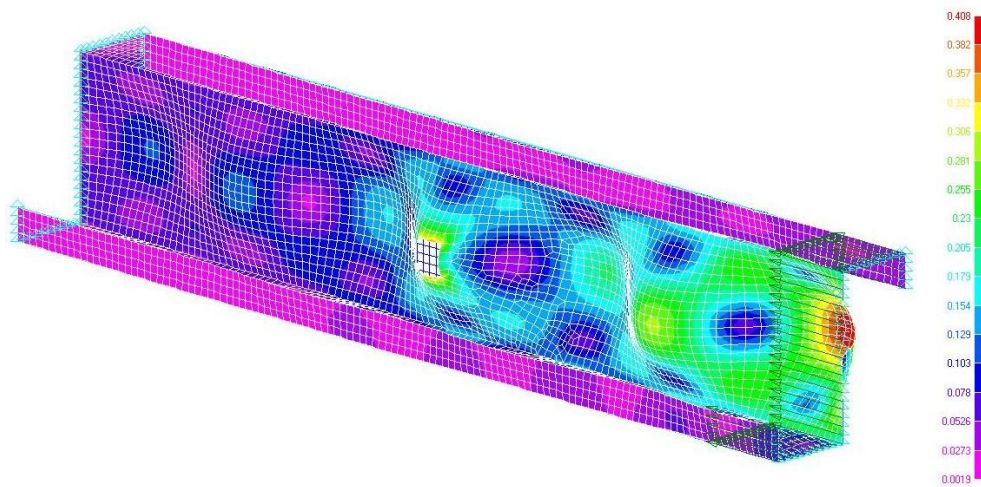
ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΕΣ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



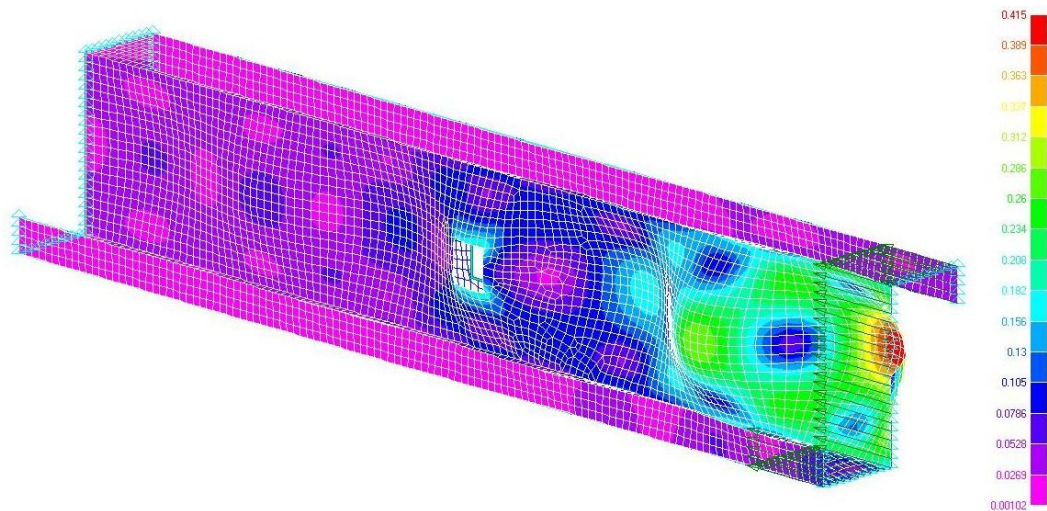
Σχήμα 6.31: Μοντέλο διατομής Z με κατακόρυφες ενισχύσεις και κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 50mm



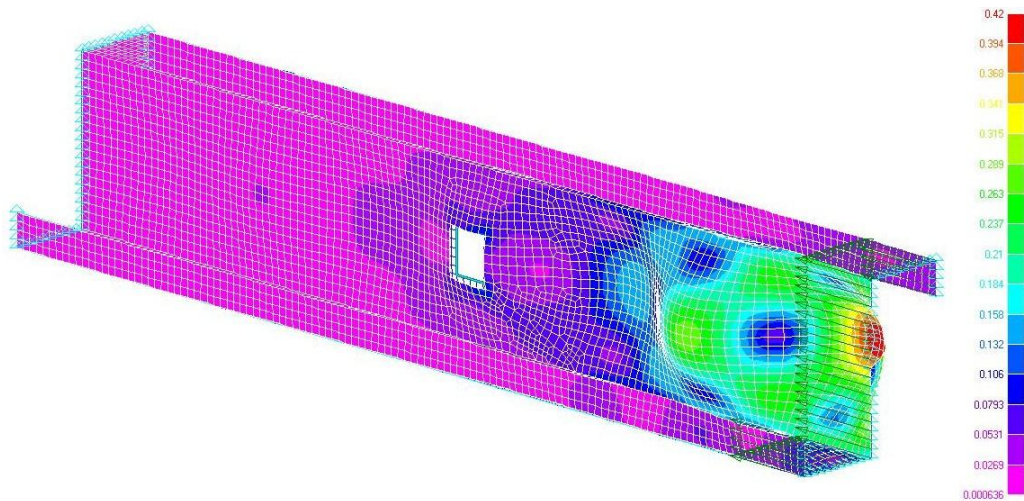
Σχήμα 6.32: Μοντέλο διατομής Z με κατακόρυφες ενισχύσεις και κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 60mm



Σχήμα 6.33: Μοντέλο διατομής Z με κατακόρυφες ενισχύσεις και τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 20mm



Σχήμα 6.34: Μοντέλο διατομής Z με κατακόρυφες ενισχύσεις και τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 25mm



Σχήμα 6.35: Μοντέλο διατομής Z με κατακόρυφες ενισχύσεις και τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 30mm

Παρατηρώντας τα παραμορφωμένα σχήματα των μελών, συμπεραίνουμε ότι η παρουσία των κατακόρυφων ακραίων ενισχύσεων περιόρισε σημαντικά τη μετατόπιση των πελμάτων σε όλους τους φορείς. Η μορφή αστοχίας σε όλες τις περιπτώσεις είναι η αλληλεπίδραση τοπικού λυγισμού και λυγισμού με στρέβλωση της διατομής. Επίσης παρατηρούμε ότι τα ημικύματα στις περισσότερες περιπτώσεις ολοκληρώνονται πριν την οπή στο φορέα, με αποτέλεσμα η οπή να μην επηρεάζει σημαντικά ή και καθόλου το λυγισμό του μέλους.

Στον πίνακα 6.8 δίνονται τα κρίσιμα φορτία λυγισμού για την ομάδα των ενισχυμένων μελών διατομής Z, στο γράφημα 6.15 παρουσιάζονται συγκριτικά τα μέλη με κυκλική οπή στον κορμό διαφόρων διαμέτρων και στο γράφημα 6.16 αντίστοιχα τα μέλη με τετραγωνική οπή.

Πίνακας 6.8: Κρίσιμο φορτίο λυγισμού μελών διατομής Z με ακραίες ενισχύσεις

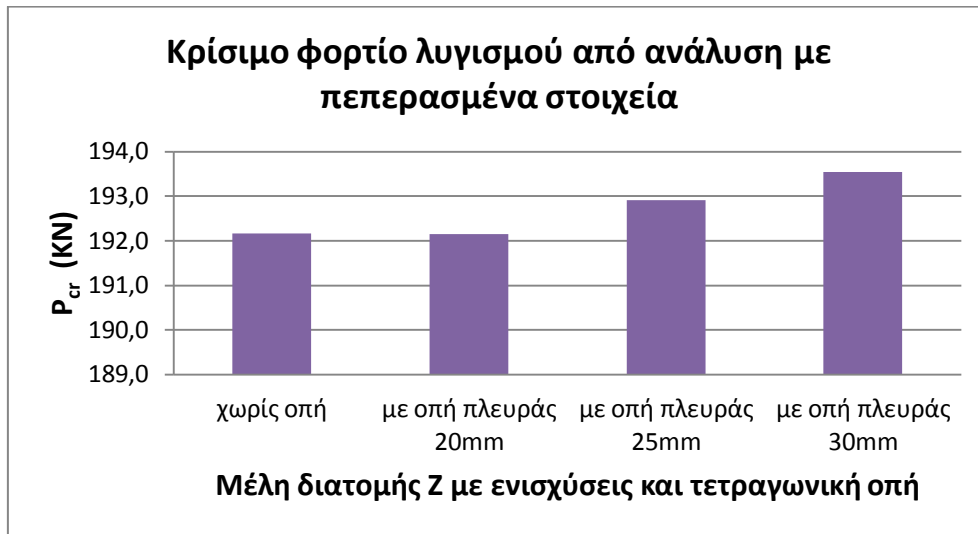
| Εξεταζόμενη διατομή | | | Κρίσιμο φορτίο λυγισμού P_{cr} (KN) |
|-------------------------|-----------------------------|------|---------------------------------------|
| Διατομή Z με ενισχύσεις | χωρίς οπή | | 192,16 |
| | με κυκλική οπή διαμέτρου: | 40mm | 194,08 |
| | | 50mm | 195,06 |
| | | 60mm | 195,93 |
| | με τετραγωνική οπή πλευράς: | 20mm | 192,15 |
| | | 25mm | 192,90 |
| | | 30mm | 193,54 |

Γράφημα 6.15: Σύγκριση P_{cr} μελών διατομής Z με ενισχύσεις και κυκλική οπή



Παρατηρούμε ότι με την παρουσία της οπής το κρίσιμο φορτίο λυγισμού αυξήθηκε σε σχέση με το μέλος χωρίς οπή, όπως συνέβη και στα μέλη διατομής C με ενισχύσεις. Συγκεκριμένα για οπή διαμέτρου 40mm αυξήθηκε κατά 0,99%, για οπή διαμέτρου 50mm κατά 1,51% και διαμέτρου 60mm κατά 1,96%. Με την αύξηση του εμβαδού της οπής μεγαλύτερη είναι η οπή τόσο αυξάνεται και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, χωρίς ωστόσο να παρουσιάζει σημαντικές διαφορές στην τιμή του. Η μεγαλύτερη τιμή οφείλεται στο γεγονός ότι ο λυγισμός του μέλους ολοκληρώνεται πριν την οπή.

Γράφημα 6.16: Σύγκριση P_{cr} μελών διατομής Z με ενισχύσεις και τετραγωνική οπή



Στην περίπτωση της τετραγωνικής οπής το κρίσιμο φορτίο αυξάνεται, για οπή πλευράς 25 και 30mm, ενώ για οπή πλευράς 20mm παραμένει πρακτικά σταθερό. Αυτό φαίνεται και από τα παραμορφωμένα μέλη στα σχήματα, όπου παρατηρούμε ότι η παραμόρφωση του μέλους με οπή 20x20 μοιάζει περισσότερο με την παραμόρφωση του μέλους χωρίς οπή ενώ αντιθέτως στα υπόλοιπα μέλη τα ημικύματα φαίνονται να ολοκληρώνονται πριν την οπή αλλάζοντας έτσι το λυγισμό του μέλους. Συγκεκριμένα, για οπή πλευράς 20mm το κρίσιμο φορτίο μειώθηκε κατά 0,005% (πρακτικά σταθερό), για πλευρά 25mm το κρίσιμο φορτίο αυξήθηκε κατά 0,38% και για πλευρά 30mm κατά 0,71%. Η αλλαγή στην τιμή του φορτίου ουσιαστικά είναι αμελητέα.

Η αξονική δύναμη αντοχής κάθε μέλους διατομής Z με ενισχύσεις όπως υπολογίστηκε με βάση τον Ευρωκώδικα, είναι ίδια με τα μέλη διατομής C με ενισχύσεις, όπως παρουσιάστηκαν ανωτέρω στον πίνακα 6.4 και στα γραφήματα 6.3 και 6.4.

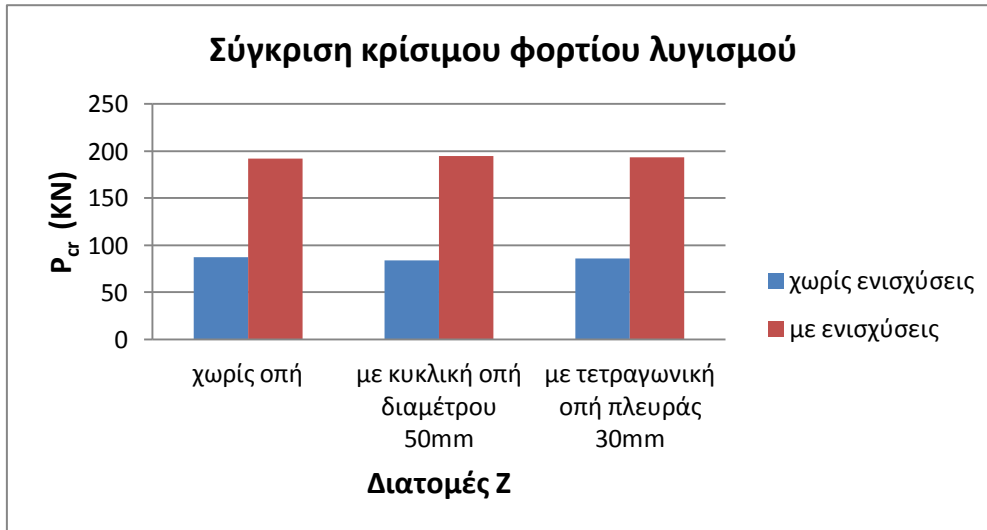
6.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων διατομών Z χωρίς ενισχύσεις και διατομών Z με κάθετες ακραίες ενισχύσεις.

Μελετώντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων των δύο μεθόδων, για τα μέλη διατομής Z, ενισχυμένα και μη, βγάζουμε ορισμένα συμπεράσματα. Ενδεικτικά θα συγκριθούν οι διατομές χωρίς οπή, οι διατομές με κυκλική οπή διαμέτρου 50mm και οι διατομές με τετραγωνική οπή 30x30(mm).

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων βλέπουμε ότι η παρουσία των ακραίων κάθετων ενισχύσεων οδήγησε σε σημαντική αύξηση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Ειδικότερα, στα μέλη διατομής Z χωρίς οπές, οι ακραίες ενισχύσεις είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση του κρίσιμου

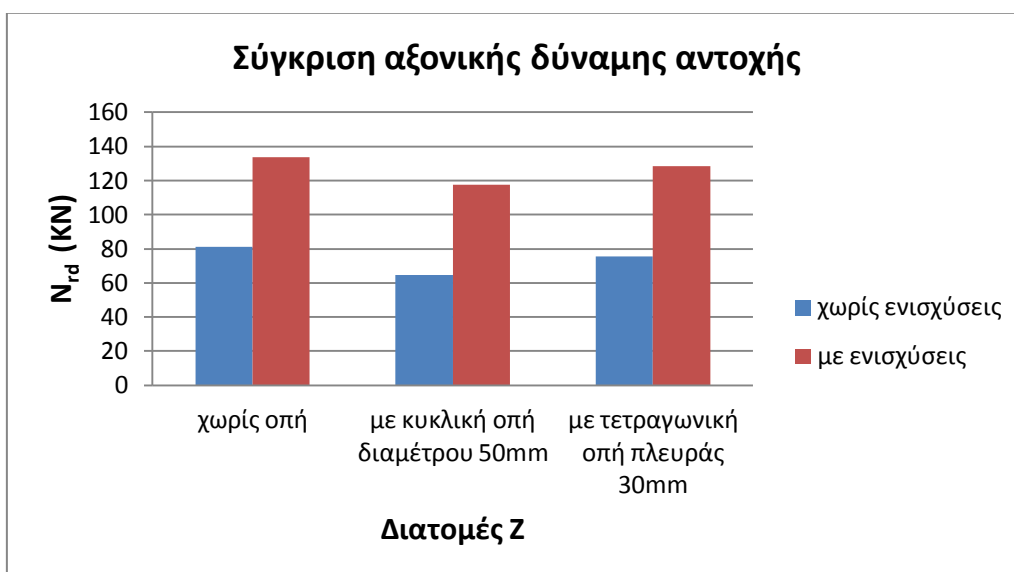
φορτίου κατά 119%. Στα μέλη με κυκλική οπή διαμέτρου 50mm η αντίστοιχη αύξηση λόγω ενισχύσεων ήταν 132% και στα μέλη με τετραγωνική οπή 30x30(mm) ήταν 125%.

Γράφημα 6.17: Σύγκριση P_{cr} μελών διατομής Z χωρίς ενισχύσεις και διατομής Z με ακραίες ενισχύσεις



Σημαντική ήταν και η αντίστοιχη αύξηση της αξονικής δύναμης αντοχής της διατομής, λόγω της παρουσίας των ενισχύσεων, αν και μικρότερη σε τιμή. Για τις διατομές χωρίς οπή η N_{rd} αυξήθηκε κατά 64%. Στα μέλη με κυκλική οπή διαμέτρου 50mm η αντοχή αυξήθηκε λόγω ενισχύσεων κατά 81% και στα μέλη με τετραγωνική οπή 30x30(mm) κατά 69%.

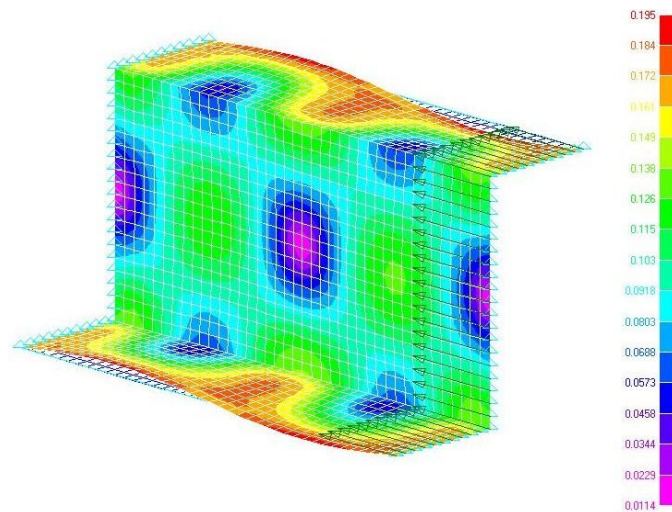
Γράφημα 6.18: Σύγκριση N_{rd} μελών διατομής Z χωρίς ενισχύσεις και διατομής Z με ακραίες ενισχύσεις



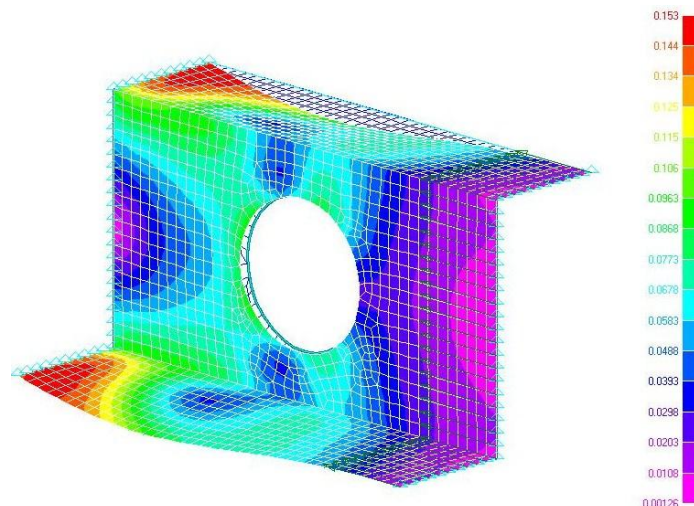
Κατά συνέπεια, αποδεικνύεται και στην πράξη η αποτελεσματικότητα των ενισχύσεων στην ισχυροποίηση της γενικότερης συμπεριφοράς του μέλους, τόσο στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού όσο και στην αξονική θλιπτική αντοχή της διατομής.

6.9 Διατομή Z χωρίς ενισχύσεις: Σύγκριση με φορέα μήκους 200mm.

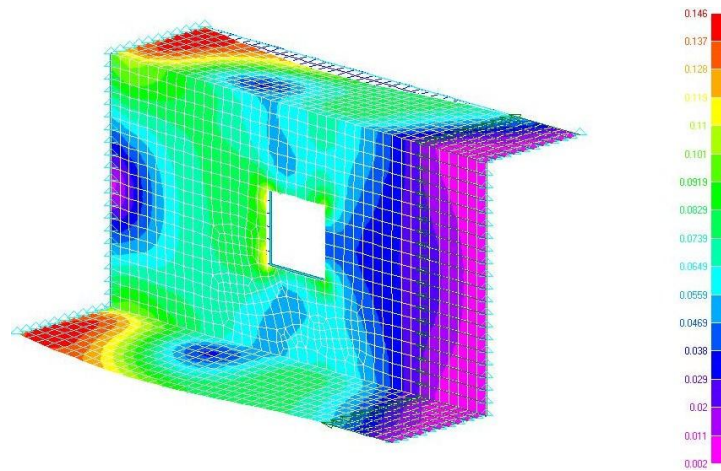
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι παραμορφώσεις των αξονικά θλιβόμενων μελών διατομής Z χωρίς ενισχύσεις, για μέλη μήκους 200mm, όπως προέκυψαν από γραμμική ανάλυση λυγισμού με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Αναλύθηκαν ενδεικτικά τρία μέλη: χωρίς οπή, με κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 60mm και με τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 30mm.



Σχήμα 6.36: Μοντέλο διατομής Z χωρίς ενισχύσεις, χωρίς οπή



Σχήμα 6.37: Μοντέλο διατομής Z χωρίς ενισχύσεις με κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 60mm



Σχήμα 6.38: Μοντέλο διατομής Z χωρίς ενισχύσεις με τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 30mm

Όπως φαίνεται από τα παραμορφωμένα μοντέλα η κύρια μορφή αστοχίας είναι η αλληλεπίδραση τοπικού λυγισμού και λυγισμού με στρέβλωση της διατομής.

Στον πίνακα 6.9 δίνονται τα κρίσιμα φορτία λυγισμού για την ομάδα των μη ενισχυμένων μελών διατομής Z, μήκους φορέα 200mm και στο γράφημα 6.19 παρουσιάζονται συγκριτικά τα μέλη χωρίς οπή, με κυκλική οπή διαμέτρου 60mm και με τετραγωνική οπή πλευράς 30mm για κάθε έναν από τους φορείς που προαναφέρθηκαν.

Πίνακας 6.9: Κρίσιμο φορτίο λυγισμού μελών διατομής Z χωρίς ενισχύσεις και μήκους 200mm

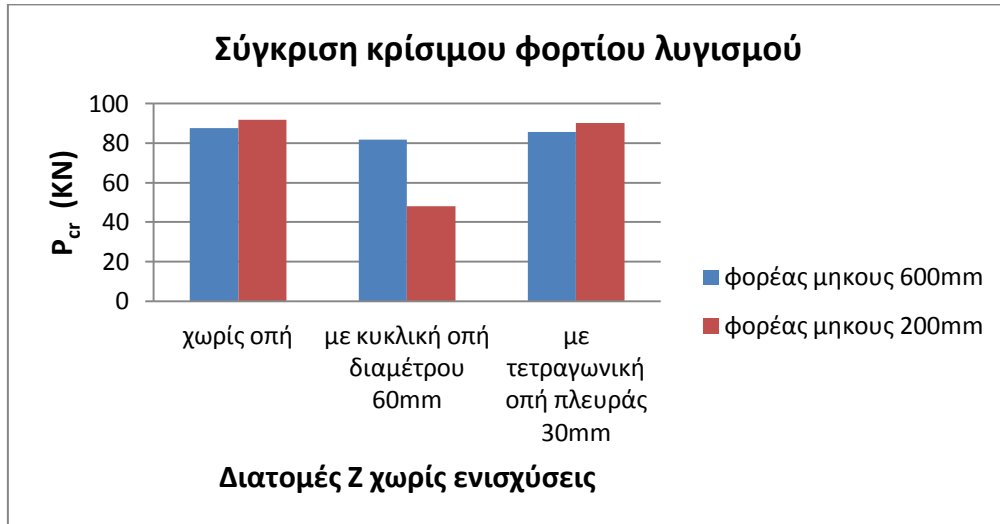
| Εξεταζόμενη διατομή | | Κρίσιμο φορτίο λυγισμού P_{cr} (KN) |
|---------------------|---------------------------------|--|
| Z χωρίς ενισχύσεις | χωρίς οπή | 91,95 |
| | με κυκλική οπή διαμέτρου 60mm | 47,94 |
| | με τετραγωνική οπή πλευράς 30mm | 90,28 |

Διαπιστώνουμε ότι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού μειώνεται όταν υπάρχει οπή στον κορμό του μέλους. Για την κυκλική οπή διαμέτρου 60mm το φορτίο μειώνεται κατά 47,8% (έναντι 6,8% του φορέα μήκους 600mm), ενώ για τετραγωνική οπή πλευράς 30mm μειώνεται κατά 1,81% (έναντι 2,03% του φορέα μήκους 600mm).

Παρατηρούμε ότι το μέλος με την κυκλική οπή εμφανίζει διαφορετική συμπεριφορά από τα άλλα δύο μέλη καθώς μειώνεται σημαντικά το κρίσιμο φορτίο λυγισμού και γίνεται αρκετά μικρότερο από το αντίστοιχο του φορέα μήκους 600mm. Αντίθετα, το μέλος χωρίς οπή και το μέλος με τετραγωνική οπή εμφανίζουν μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο στον φορέα μήκους 200mm απ' ότι στον μακρύτερο φορέα. Συγκεκριμένα ο φορέας με μήκος 200mm εμφάνισε μεγαλύτερο κρίσιμο

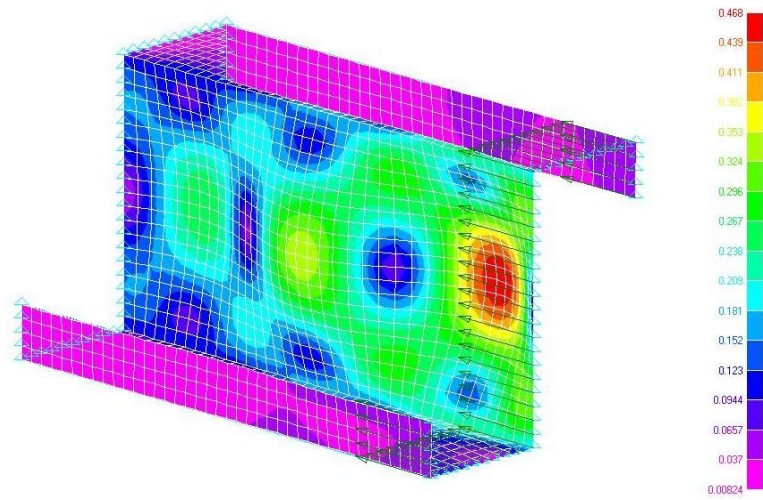
φορτίο λυγισμού κατά 5% στις διατομές Z χωρίς οπή και στις διατομές με τετραγωνική οπή πλευράς 30mm. Στις διατομές Z με κυκλική οπή διαμέτρου 60mm, ο φορέας με μήκος 200mm εμφάνισε μικρότερο κρίσιμο φορτίο λυγισμού κατά 41% σε σχέση με τον φορέα μήκους 600mm.

Γράφημα 6.19: Σύγκριση P_{cr} μελών διατομής Z χωρίς ενισχύσεις για φορείς μήκους 200mm και 600mm

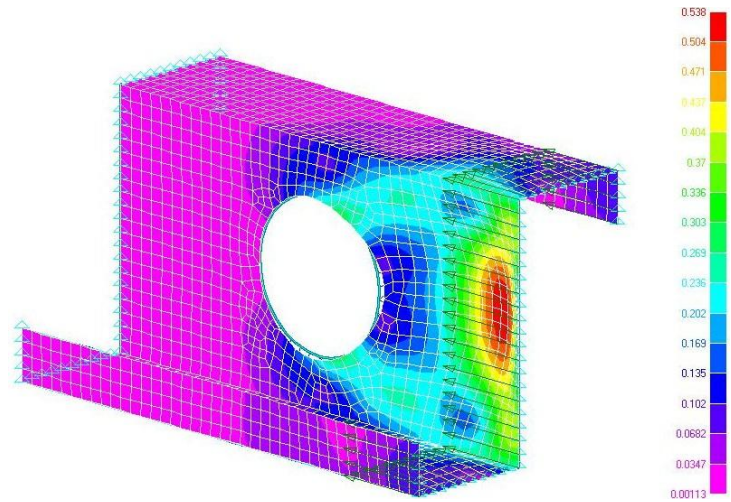


6.10 Διατομή Z με ακραίες κάθετες ενισχύσεις: Σύγκριση με φορέα μήκους 200mm.

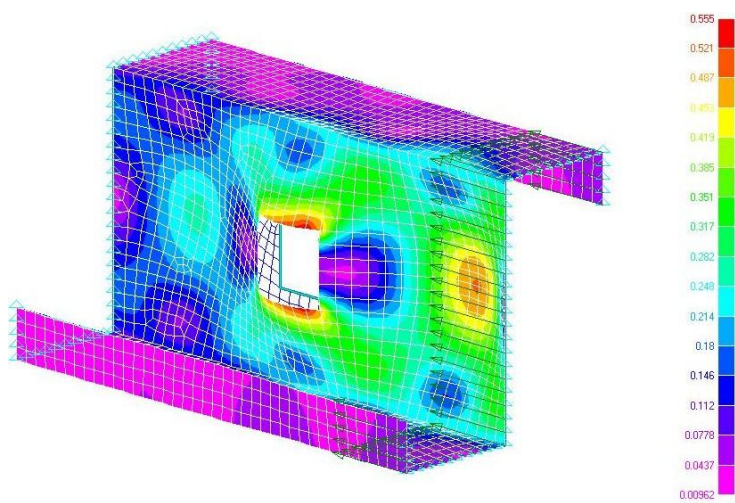
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι παραμορφώσεις των αξονικά θλιβόμενων μελών διατομής Z με ακραίες κάθετες στα πέλματα ενισχύσεις, για μέλη μήκους 200mm, όπως προέκυψαν από γραμμική ανάλυση λυγισμού με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Αναλύθηκαν ενδεικτικά τρία μέλη: χωρίς οπή, με κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 60mm και με τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 30mm.



Σχήμα 6.39: Μοντέλο διατομής Z με κατακόρυφες ενισχύσεις χωρίς οπή



Σχήμα 6.40: Μοντέλο διατομής Z με κατακόρυφες ενισχύσεις και κυκλική οπή στον κορμό διαμέτρου 60mm



Σχήμα 6.41: Μοντέλο διατομής Z με κατακόρυφες ενισχύσεις και τετραγωνική οπή στον κορμό πλευράς 30mm

Παρατηρώντας τα παραπάνω σχήματα διαπιστώνουμε ότι η μορφή αστοχίας για όλα τα μέλη είναι ο τοπικός λυγισμός. Στο μέλος με την κυκλική οπή παρατηρούμε όπως και στον μακρύτερο φορέα ότι ο λυγισμός σταματά στο τμήμα του φορέα που βρίσκεται η οπή και μετά την οπή ο φορέας παραμένει απαραμόρφωτος.

Στον πίνακα 6.10 δίνονται τα κρίσιμα φορτία λυγισμού για την ομάδα των ενισχυμένων μελών διατομής Z, μήκους φορέα 200mm και στο γράφημα 6.20 παρουσιάζονται συγκριτικά τα μέλη με κυκλική οπή διαμέτρου 60mm και με τετραγωνική οπή πλευράς 30mm.

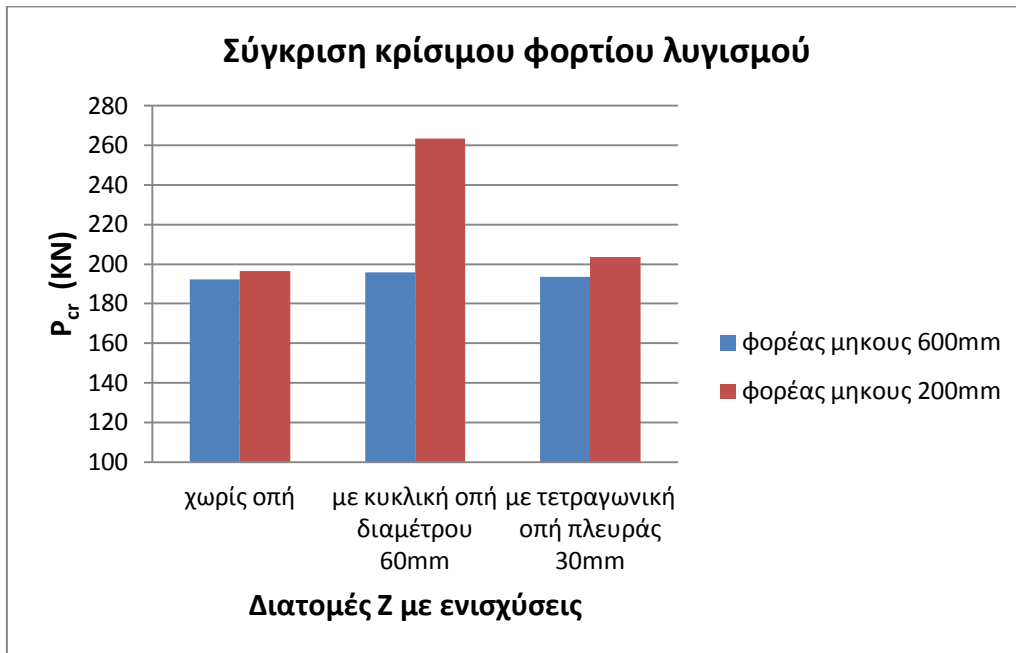
Πίνακας 6.10: Κρίσιμο φορτίο λυγισμού μελών διατομής Z με ακραίες ενισχύσεις και μήκους 200mm

| Εξεταζόμενη διατομή | | Κρίσιμο φορτίο λυγισμού P_{cr} (KN) |
|---------------------|---------------------------------|--|
| Z με ενισχύσεις | χωρίς οπή | 196,56 |
| | με κυκλική οπή διαμέτρου 60mm | 263,58 |
| | με τετραγωνική οπή πλευράς 30mm | 203,53 |

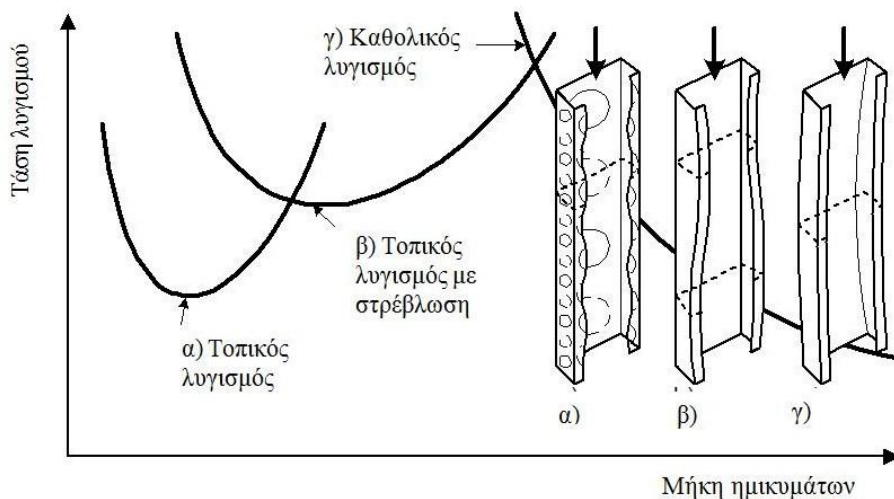
Διαπιστώνουμε ότι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού αυξάνεται με την εμφάνιση της οπής και μάλιστα πολύ περισσότερο απ' ότι αυξήθηκε στο μακρύτερο φορέα. Για την κυκλική οπή διαμέτρου 60mm το φορτίο αυξάνεται κατά 34% (έναντι 1,96% του φορέα μήκους 600mm), ενώ για τετραγωνική οπή πλευράς 30mm αυξάνεται κατά 3,5% (έναντι 0,71% του φορέα μήκους 600mm).

Βλέπουμε λοιπόν, ότι ενώ οι φορείς παραμορφώνονται με παρόμοιο τρόπο, ο φορέας με μικρότερο μήκος εμφανίζει μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο λυγισμού και μεγαλύτερη διακύμανση στις τιμές του ανάλογα με το είδος της οπής. Συγκεκριμένα ο φορέας με μήκος 200mm εμφάνισε μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο λυγισμού κατά 2,3% στις διατομές Z χωρίς οπή, κατά 34,5% στις διατομές με κυκλική οπή διαμέτρου 60mm και κατά 5,1% στις διατομές με τετραγωνική οπή πλευράς 30mm.

Γράφημα 6.20: Σύγκριση P_{cr} μελών διατομής Z με ενισχύσεις για φορείς μήκους 200mm και 600mm



Η αύξηση στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού εξηγείται από το παρακάτω σχήμα. Διαπιστώνουμε ότι το κρίσιμο φορτίο επηρεάζεται από το μήκος ημικύματος κάθε φορά ανάλογα με τη μορφή λυγισμού του κάθε μοντέλου. Έτσι για μεγαλύτερο ή μικρότερο μήκος ημικύματος είναι δυνατόν να έχουμε μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο λυγισμού, καθώς μπορεί να πέσουμε σε υψηλότερο σημείο της αντίστοιχης καμπύλης.



Σχήμα 6.42: Παραδείγματα της ελαστικής κρίσιμης τάσης για διάφορες ιδιομορφές λυγισμού ως συνάρτηση του μήκους των ημικυμάτων και παραδείγματα μορφών λυγισμού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση που έγινε, αποδείχτηκε η αποτελεσματικότητα των ακραίων ενισχύσεων σε όλα τα μοντέλα που εξετάστηκαν. Οι ακραίες ενισχύσεις περιόρισαν σημαντικά τις μετατοπίσεις των πελμάτων και αύξησαν τόσο το κρίσιμο φορτίο λυγισμού όσο και την αξονική δύναμη αντοχής κάθε διατομής, συμβάλλοντας έτσι στη γενικότερη βελτίωση της αντοχής κάθε μέλους σε τοπικό λυγισμό.

Όσον αφορά τις οπές στον κορμό, παρατηρήθηκε ότι στις μη ενισχυμένες διατομές η παρουσία των οπών μείωσε το κρίσιμο φορτίο λυγισμού του μέλους ενώ στις ενισχυμένες διατομές παρουσιάστηκε μια μικρή αύξηση στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού με την παρουσία των οπών. Γενικότερα όμως, οι διαφορές στην τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού στα μέλη χωρίς οπή και στα μέλη με οπή είναι μικρές και δεν θεωρούνται σημαντικές. Σε όλα τα μοντέλα παρατηρήθηκε μείωση της αξονικής δύναμης αντοχής παρουσία της οπής και σε μεγαλύτερο ποσοστό απ' ότι επηρεάστηκε το κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Αυτή η διαφορά στην τιμή οφείλεται στην υπερεκτίμηση της επίδρασης της οπής στο μέλος, κατά τη διαδικασία της ανάλυσης σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα. Στα περισσότερα μοντέλα που εξετάστηκαν η κύρια μορφή λυγισμού ήταν η αλληλεπίδραση του τοπικού λυγισμού με τον λυγισμό με στρέβλωση της διατομής. Όσον αφορά τα διαφορετικά μεγέθη των οπών δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στις τιμές των αποτελεσμάτων. Ωστόσο παρατηρήθηκε ότι για μεγαλύτερο μέγεθος της οπής, ο τοπικός λυγισμός του μέλους ολοκληρωνόταν πριν από αυτήν χωρίς έτσι να επηρεάζεται σημαντικά η αντοχή του μέλους λόγω της οπής.

Τέλος, με τη σύγκριση που έγινε ως προς την επιρροή των οπών σε φορείς ανάλογα με το μήκος τους, διαπιστώθηκε ότι για μικρότερο μήκος φορέα παρουσιάζεται μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Ο τρόπος λυγισμού είναι σε γενικές γραμμές ο ίδιος μόνο που για μικρότερο μήκος μέλους εμφανίζονται μεγαλύτερες διακυμάνσεις στην τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού ανάλογα με το μέγεθος και τη μορφή της οπής. Συμπερασματικά θα λέγαμε ότι τα μέλη χωρίς ενισχύσεις είναι πιο ευαίσθητα και η παρουσία των οπών επηρεάζει περισσότερο την αντοχή τους, ενώ στα μέλη με ακραίες ενισχύσεις η παρουσία οπών δεν έχει σημαντικές επιπτώσεις στην αντοχή των μελών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. 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.
2. Μιχάλτσος Γ. (2008), «Ελαφρές μεταλλικές κατασκευές: Μέθοδοι υπολογισμού», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
3. Βάγιας Ι.Κ., Dubina D. (2004), «Σιδηρές κατασκευές από λεπτότοιχες διατομές ψυχρής διαμόρφωσης», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
4. ENV 1993-1-3, Ευρωκώδικας 3 (2004), «Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα. Μέρος 1-3: Γενικοί κανόνες, πρόσθετοι κανόνες για μέλη και φύλλα ψυχρής έλασης», CEN Ευρωπαϊκή Επιτροπή Κανονισμών, Βρυξέλλες.
5. Polyzois D., Raftoyiannis I. (2007), «Numerical stimulation of axially-loaded cold-formed steel Z-sections with web perforations», Συνέδριο ISCAS'07.
6. Ghersi A., Landolfo R, Mazzolani F.M. (2002), «Design of metallic cold-formed thin-walled members», Spon Press, London.
7. Τσατσαρά Ε. (2007), «Κρίσιμα φορτία λυγισμού σε διατομές Z με οπές στον κορμό», Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
8. Λάμπρου Α. (2007), «Διερεύνηση αντοχής λεπτότοιχων διατομών Z με οπές στον κορμό έναντι θλιπτικών φορτίων», Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
9. Παπαδρακάκης Μ., Γκισιάκης Α. (2002), «Μοντελοποίηση φορέων με πεπερασμένα στοιχεία με το πρόγραμμα Nastran για Windows έκδοση 4.5», Σημειώσεις, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
10. Moen C., Schafer B. (2007), «Direct strength design for cold-formed steel members with perforations», Department of Civil Engineering, John Hopkins University, Baltimore.
11. ICTWS 2001 Conference (2001), «A probabilistic approach to the limit state of centrally loaded thin-walled columns», Z. Kala, J. Kala, B. Teply, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology, Brno.
12. Moen C., Schafer B. (2009), «Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes», Engineering structures journal, 31(12), 2812-2824.
13. Zhen Yu Wu et al. (2011), «Numerical Simulation of Cold-Formed Steel Stiffened Lipped Channel Columns with and without Perforations», Advanced Materials Research, 243-249, 761-764.
14. Moen C., Schafer B. (2008), «Experiments on cold-formed steel columns with holes», Thin-walled structures journal, 46(10), 1164-1182.
15. Δικτυακοί τόποι