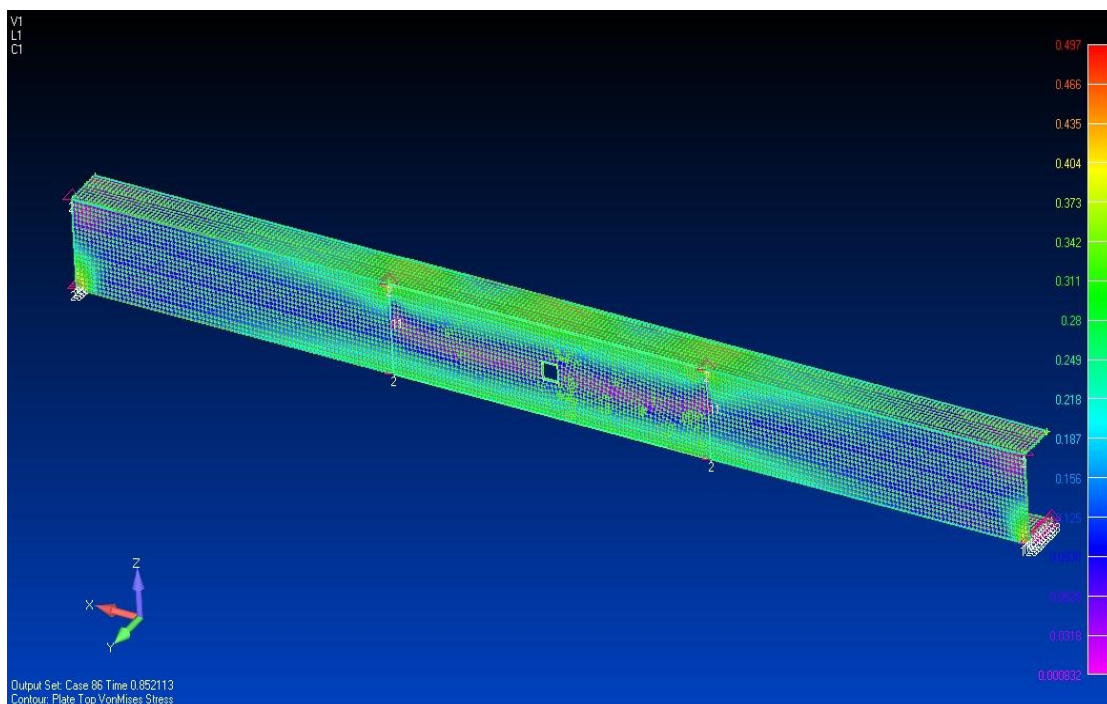




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Οικονόμου Ε. Ντομνίκα

Επιβλέπων : Ιωάννης Ραυτογιάννης

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

ΕΜΚ ΔΕ 2013/80

Ευχαριστίες

Στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας θεωρώ χρέος μου να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Ιωάννη Ραυτογιάννη, για την άριστη συνεργασία μας και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εξεταστική επιτροπή που δέχτηκε να συμμετάσχει στην αξιολόγηση της διπλωματικής εργασίας, καθώς και όλους όσους με βοήθησαν για την περάτωση της.

Τέλος, ευχαριστώ τους δικούς μου ανθρώπους για τη συμπαράσταση και την κατανόηση που μου έδειξαν και δείχνουν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Περιεχόμενα

Εισαγωγικά στοιχεία για τις διατομές ψυχρής διαμόρφωσης	7
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Γενικά για χαλύβδινες λεπτότοιχες διατομές ψυχρής έλασης.....	8
1.3 Μορφές διατομών	10
1.4 Μέθοδοι παραγωγής	12
1.5 Ευστάθεια μελών ψυχρής διαμόρφωσης.....	14
1.6 Πλεονεκτήματα χρήσης στοιχείων από χάλυβα ψυχρής έλασης	14
1.7 Εφαρμογές	15
Ιδιότητες υλικών και διατομών ψυχρής διαμόρφωσης	18
2.1 Ποιότητες χαλύβων	18
2.2 Ιδιότητες υλικού μελών και φύλλων ψυχρής διαμόρφωσης.....	19
2.3 Ονομαστικές διαστάσεις διατομών.....	20
2.4 Επιρροή των καμπυλών προσαρμογής.....	21
2.5 Γεωμετρικές συνθήκες ισχύος	23
2.6 Προσομοίωση για στατική ανάλυση	25
Συμπεριφορά και αντοχή λεπτότοιχων στοιχείων	26
3.1 Γενικά	26
3.2 Αστάθεια καμπτόμενων λεπτότοιχων δοκών.....	26
3.3 Θεωρητική τεκμηρίωση τοπικού λυγισμού.....	28
3.4 Κύρτωση με στρέβλωση διατομής	31
3.5 Γεωμετρικές ιδιότητες ενεργού διατομής	32
3.5.1 Παραδοχές	32
3.5.2 Επίπεδα στοιχεία χωρίς ενισχύσεις.....	32
3.5.3 Επίπεδα στοιχεία με ενισχύσεις	35
3.5.3.1 Γενικά.....	35
3.5.3.2 Ακραίες ενισχύσεις	39
3.6 Αντοχή διατομής σε μονοαξονική κάμψη	42
3.6.1 Ελαστική και ελαστοπλαστική αντοχή με διαρροή του θλιβόμενου πέλματος.....	42
3.6.2 Ελαστική και ελαστοπλαστική αντοχή με διαρροή του εφελκυόμενου πέλματος μόνο.....	44
Ανάλυση λυγισμού με βάση τις διατάξεις του Ευρωκώδικα.....	45
4.1 Γενικά στοιχεία εξεταζόμενων διατομών	45

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

4.2 Προσδιορισμός της ροπής αντοχής της διατομής.....	47
4.2.1 Διατομή C χωρίς ενισχύσεις.....	47
4.2.2 Διατομή C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα	51
Στατικό προσομοίωμα δοκού.....	57
5.1 Κριτήρια επιλογής στατικού μοντέλου	57
5.2 Επιλογή στατικού μοντέλου	57
5.3 Υπολογισμός μεγίστου φορτίου αντοχής της δοκών με βάση τα αποτελέσματα του EC3.....	58
Προσδιορισμός του μέγιστου φορτίου κάμψης με χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων .59	
6.1 Γενικά	59
6.2 Περιγραφή μοντέλων.....	59
6.3 Περιγραφή προσομοίωσης ενός φορέα με το πρόγραμμα FEMAP v10.	60
6.3.1 Δημιουργία της γεωμετρίας (modeling).....	60
6.3.2 Καθορισμός υλικών	63
6.3.2.1 Εισαγωγή των μη γραμμικών ιδιοτήτων	65
6.3.3 Καθορισμός τύπου στοιχείων (property)	65
6.3.4 Δημιουργία δικτύου (mesh generation).....	67
6.3.5 Επιβολή συνοριακών συνθηκών.....	71
6.3.6 Επιβολή φορτίων (loads).....	74
6.3.7 Ανάλυση προσομοιώματος (Analyze).....	77
6.4 Αποτελέσματα μη γραμμικής ανάλυσης στο FEMAP v10	81
Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα	83
7.1 Γενικά	83
7.2 Διατομές C χωρίς ενισχύσεις	83
7.3 Διατομές C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα	87
7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων διατομών C χωρίς ενισχύσεις και διατομών C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις	91
7.5 Διατομές Z χωρίς ενισχύσεις	93
7.6 Διατομή Z με ακραίες κάθετες ενισχύσεις	95
7.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων διατομών Z χωρίς ενισχύσεις και διατομών με Z με κάθετες ακραίες ενισχύσεις στα πέλματα.	99
Γενικά συμπεράσματα	101
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	102

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών
Διπλωματική Εργασία
ΕΜΚ ΔΕ 2013/80
Οικονόμου Ν.Ε. (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 υπο μονοαξονική κάμψη.

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 καθιστάται αναγκαία. Στην παρούσα εργασία 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 γίνεται μια γενική παρουσίαση των στοιχείων ψυχρής έλασης, σχετικά με τα χαρακτηριστικά τους, τις μεθόδους παραγωγής, τα συνήθη προβλήματα ευστάθειας που παρουσιάζουν και τις εφαρμογές τους στην κατασκευή. Στο δεύτερο μέρος γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά του υλικού και των διατομών ψυχρής έλασης. Ακολουθεί το τρίτο μέρος όπου παρουσιάζονται οι μορφές λυγισμού των λεπτότοιχων στοιχείων, εστιάζοντας στις τοπικές αστάθειες που εμφανίζονται στα καμπτόμενα μέλη, σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 ENV 1993-1-3.

Στο τέταρτο μέρος γίνεται ο προσδιορισμός της ροπής αντοχής σε μονοαξονική κάμψη των διατομών ακολουθώντας τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3. Στο πέμπτο μέρος γίνεται η επιλογή του στατικού μοντέλου το οποίο χρησιμοποιείται στα επόμενα μέρη για να μετατραπεί η ροπή αντοχής σε φορτίο κάμψης. Στο έκτο μέρος παρουσιάζεται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FEMAP v10, με το οποίο έγινε προσομοίωση της συμπεριφοράς των φορέων και προσδιορίστηκε το μέγιστο φορτίο κάμψης.

Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων, γίνονται συγκρίσεις και σχολιασμός με τη βοήθεια γραφημάτων. Τα τελικά συμπεράσματα παρατίθενται στο όγδοο μέρος της εργασίας.

National Technical University of Athens
Faculty of Civil Engineering
Institute of Steel Structures
Diploma Thesis
EMK ΔΕ 2013/80

Bending of thin-walled beams C and Z section with web perforation

Oikonomou D.E. (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 section under bending.

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 beams, both with and without stiffeners, with circular and quadrangular web perforations of three sizes.

In the first part of this 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 moment of one axis bending based on ENV 1993.1.3. Afterwards we decide which static model will be used to convert the moment to loads. In the sixth part there is a presentation of FEMAP v10, a finite element analysis program that has been used for a nonlinear static analysis defining the maximum bending load of the members.

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

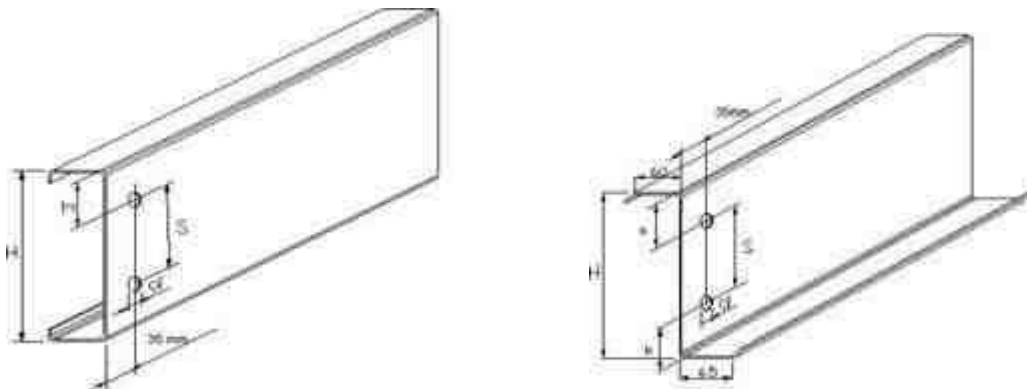
Εισαγωγικά στοιχεία για τις διατομές ψυχρής διαμόρφωσης

1.1 Εισαγωγή

Οι λεπτότοιχες διατομές C και Z είναι στις μέρες μας από τις πλέον διαδεδομένες διατομές ψυχρής έλασης που χρησιμοποιούνται στον κατασκευαστικό κλάδο. Αρκετά συχνά όμως, εμφανίζεται η ανάγκη διάτρησης τους στον κορμό, προκειμένου να περάσει ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός. Αυτό έχει όμως αρνητικές επιδράσεις στην αντοχή τους διότι μειώνεται η φέρουσα ικανότητα τους. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η αντοχή σε κάμψη μελών ψυχρής έλασης διατομών C και Z, πριν και μετά τη διάνοιξη οπών στον κορμό του μέλους, για διατομές με και χωρίς ακραίες ενισχύσεις.

Τα εν ψυχρώ διαμορφωμένα μέλη χρησιμοποιούνται συχνά στον τομέα συστημάτων αποθήκευσης. Τα μέλη χρησιμοποιούνται ως ορθοστάτες για τη στήριξη διαφόρων τύπων μεταλλικών ραφιών. Τέτοιες εφαρμογές απαιτούν διάνοιξη οπών στον κορμό για τον έλεγχο και τη ρύθμιση του ύψους του ραφιού με στόχο την προσαρμογή στο μέγεθος του υλικού που αποθηκεύεται. Οπές διανοίγονται όμως και για την τοποθέτηση υδραυλικών εγκαταστάσεων και ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.

Το γεγονός ότι στον Ευρωκώδικα 3, στο τμήμα 1993-1-3 που αφορά τα λεπτότοιχα μέλη, δεν υπάρχουν διατάξεις για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του μέλους με οπή στον κορμό, καθιστά απαραίτητη τη μελέτη του φαινομένου αυτού.



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

1.2 Γενικά για χαλύβδινες λεπτότοιχες διατομές ψυχρής έλασης

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των χαλύβδινων διατομών ψυχρής διαμόρφωσης είναι το μικρό βάρος τους καθώς αποτελούν την ελαφρύτερη δυνατή κατασκευή. Στο παρελθόν η χρήση τους ήταν περιορισμένη στην αυτοκινητοβιομηχανία, τη ναυπηγική, την αεροναυπηγική, την κατασκευή συρμών και διαφόρων ειδών αντικειμένων για το σπίτι και το γραφείο, δηλαδή εκεί όπου η εξοικονόμηση βάρους ήταν πολύ σημαντική.



Σχήμα 1.2: Αεροσκάφος

Με το πέρασμα του χρόνου, την ανάπτυξη της κατασκευαστικής τεχνολογίας και τη διεύρυνση της γνώσης σε σχέση με τη συμπεριφορά των χαλύβδινων διατομών ψυχρής έλασης το πεδίο εφαρμογής τους μεγάλωσε. Πλέον, ο εν ψυχρώ διαμορφωμένος χάλυβας αποτελεί ένα ανταγωνιστικό προϊόν σε διάφορα έργα πολιτικού μηχανικού (γεφυροποιία, οικοδομικά έργα), με στόχο τη μείωση του ιδίου βάρους διατηρώντας την αισθητική. Οι νέες μέθοδοι πυροπροστασίας, η καλή προστασία έναντι οξειδώσεως και η μεγάλη διάρκεια ζωής του υλικού το κατέστησαν προτιμητέο σε αρκετές κατασκευές (χρήση σε προσθήκες ορόφων, γερανογέφυρες, σύμμικτες πλάκες σε συνδυασμό με σκυρόδεμα).

Τα λεπτότοιχα μέλη ψυχρής διαμόρφωσης αποδεικνύονται αρκετά αποδοτικά ως προς την αντοχή και τη δυσκαμψία τους ενώ παράλληλα συνδυάζουν μικρό ίδιο βάρος. Επίσης, ξεχωρίζουν για την ομοιόμορφη ποιότητα, την οικονομία στη μεταφορά, τη γρήγορη ανέγερση και την ευκολία προκατασκευής.

Οι λεπτότοιχες διατομές σε συνδυασμό με χάλυβες υψηλών ποιοτήτων δημιουργούν προβλήματα υπολογισμού τα οποία δε μας απασχολούν στις κλασικές μεταλλικές κατασκευές. Τέτοια είναι ο τοπικός λυγισμός, ο καθολικός λυγισμός και η στρέβλωση.

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Βέβαια, η αντοχή του υλικού επηρεάζεται και από παρεμβάσεις μετά την τοποθέτηση του όπως η διάνοιξη οπών στον κορμό ή στα πέλματα του μέλους.



Σχήμα 1.3 : Το Zayed National Museum κατασκευάστηκε από χάλυβα ψυχρής έλασης



Σχήμα 1.4 : Μεταλλικός σκελετός κτιρίου

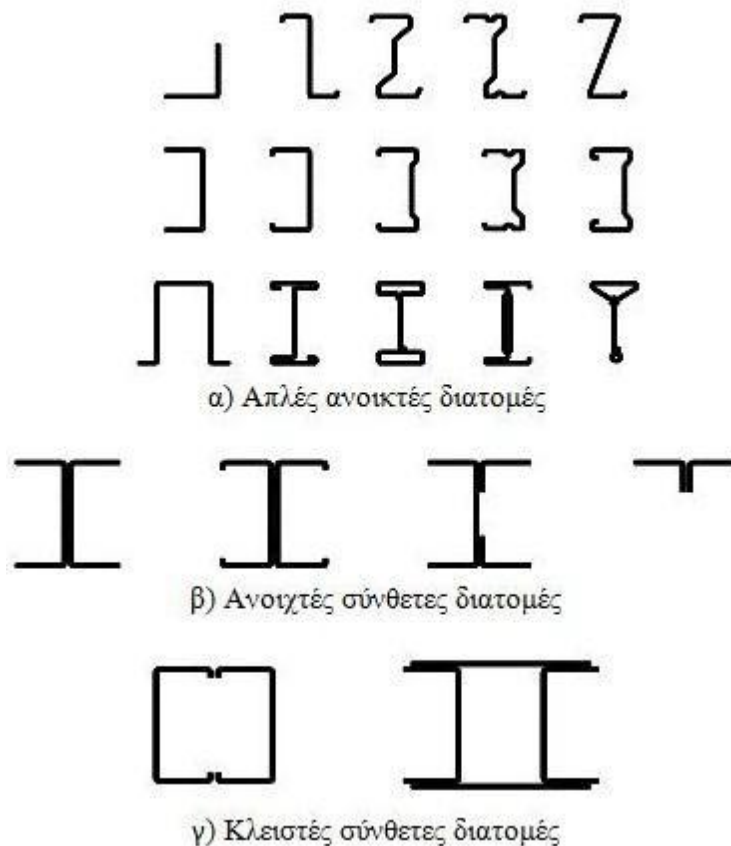
1.3 Μορφές διατομών

Το κοινό χαρακτηριστικό των δομικών στοιχείων και φύλλων ψυχρής έλασης είναι ότι κατασκευάζονται από γαλβανισμένα ή μη επίπεδα ελάσματα θερμής ή ψυχρής έλασης και έχουν σταθερό πάχος σε όλο το μήκος τους.

Τα στοιχεία ψυχρής διαμόρφωσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

1. Ραβδόμορφα στοιχεία, ως μέλη του κυρίως φέροντα οργανισμού,
2. Επιφανειακά στοιχεία του κελύφους της κατασκευής ή πλακών.

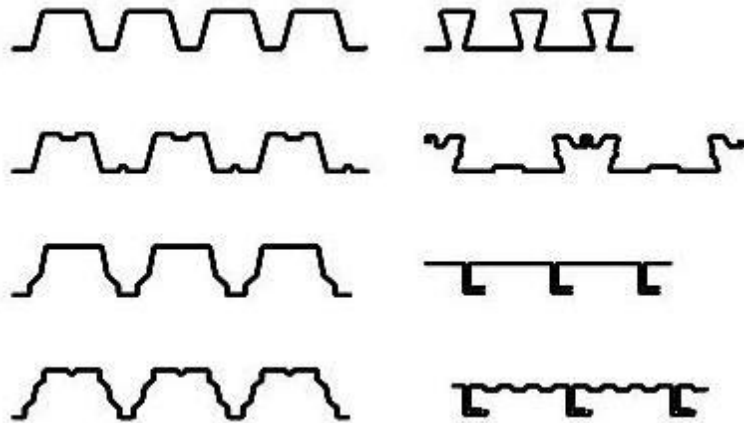
Τυπικές διατομές της πρώτης κατηγορίας μπορούμε να δούμε στο σχήμα 1.5. Τα στοιχεία αυτά αποτελούνται από ανοικτές μεμονωμένες διατομές, κλειστές διατομές και από σύνθετες κλειστές διατομές. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως τεγίδες και μηκίδες (σχετικά μικρά φορτία και ανοίγματα), ως στύλοι και κατακόρυφες στηρίξεις ενώ εμφανίζονται και ως ράβδοι δικτυωμάτων. Το ύψος τους κυμαίνεται από 50 έως 300mm και το πάχος τους από 1 έως 8mm.



Σχήμα 1.5: Τυπικές μορφές ραβδόμορφων στοιχείων

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Παραδείγματα επιφανειακών στοιχείων μπορούμε να δούμε στο σχήμα 1.6. Τα στοιχεία αυτά συνθέτουν το κέλυφος κατασκευών ή κομμάτια πλακών. Το ύψος τους κυμαίνεται από 40 έως 200mm ενώ το πάχος τους από 0,5 έως 2mm. Τα μέλη ψυχρής διαμόρφωσης και τα αυλακωτά φύλλα έχουν σε γενικές γραμμές ένα σταθερό ονομαστικό πάχος κατά μήκος και έχουν είτε ομοιόμορφη είτε απομειούμενη διατομή σε όλο το μήκος τους.



Σχήμα 1.6: Τραπεζοειδή ελάσματα και κασέτες

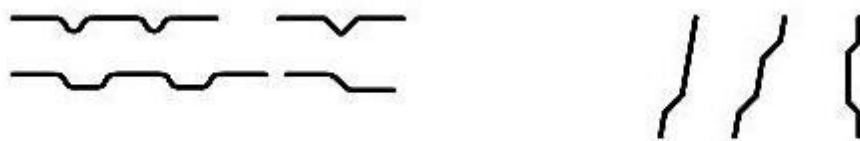
Για λόγους αύξησης της δυσκαμψίας των διατομών ψυχρής διαμόρφωσης, προβλέπονται ακραίες ή ενδιάμεσες ενισχύσεις και εγκοπές. Οι προαναφερθείσες παρεμβάσεις διακρίνονται στα σχήματα που ακολουθούν.



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

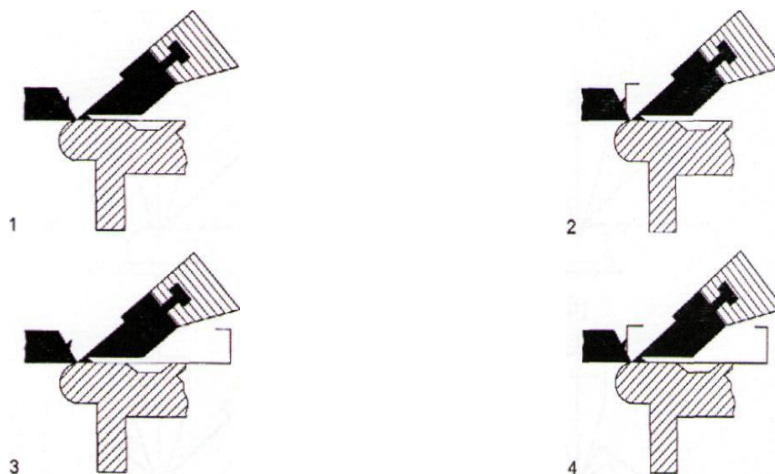
1.4 Μέθοδοι παραγωγής

Οι διατομές ψυχρής διαμόρφωσης μπορούν να κατασκευαστούν με τις τρεις παρακάτω μεθόδους :

1. Αναδίπλωση
2. Συμπίεση
3. Ψυχρή έλαση

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

Η πρώτη μέθοδος αποτελεί την απλούστερη διαδικασία και εφαρμόζεται μόνο για ευθύγραμμες διαμορφώσεις και υπό σταθερά συνήθως γωνία 90°. Πραγματοποιείται σειρά διαμορφώσεων (σχήμα 1.9) με τη χρήση ειδικών μηχανών που ονομάζονται στράντζες. Η μέθοδος της αναδίπλωσης έχει πολύ περιορισμένη χρήση.



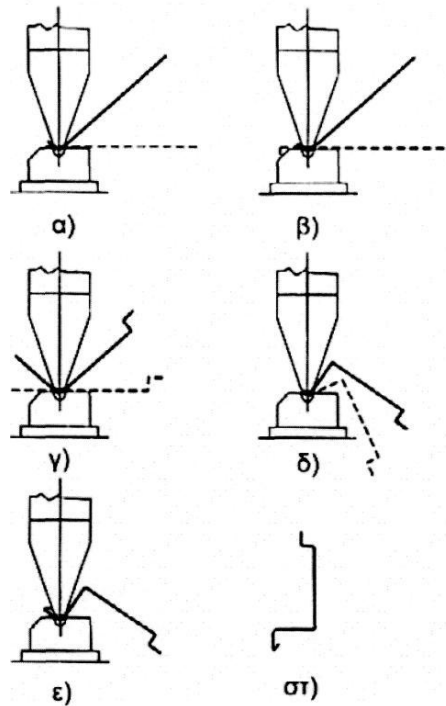
Σχήμα 1.9 : Μορφοποίηση μέσω αναδίπλωσης (folding)

Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος της συμπίεσης έχει ευρύτερη εφαρμογή διότι επιτρέπει την παραγωγή μεγαλύτερης ποικιλίας διατομών. Χρησιμοποιείται για ευθύγραμμες ή και οποιεσδήποτε διαμορφώσεις. Με ειδικές μήτρες πραγματοποιείται κάθε είδους ευθύγραμμη διαμόρφωση (ακόμη και διάφορη γωνία των 90°) ενώ με στραντζόπρεσες ή απλές πρέσες γίνονται οι μη ευθύγραμμες διαμορφώσεις (σχήμα 1.10).

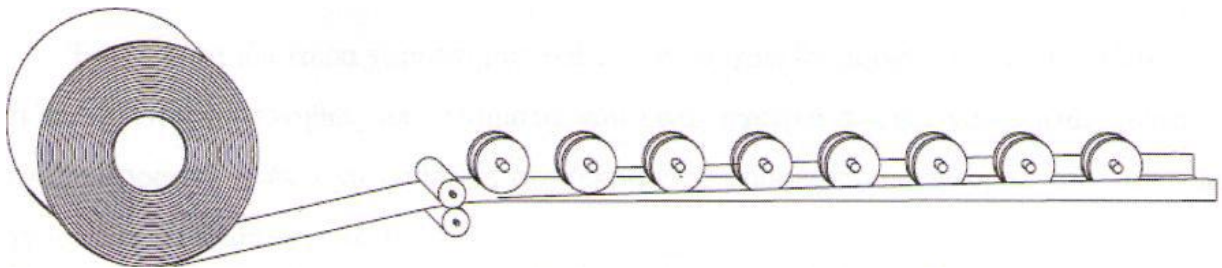
Η τρίτη μέθοδος χρησιμοποιείται για την παραγωγή ανοικτών και κλειστών διατομών μήκους έως και τα 14 μέτρα. Διαθέτει ειδικές διαμορφωτικές μηχανές (extruders) και ξεχωρίζει για τη μεγάλη παραγωγικότητα που προσφέρει με ταυτόχρονη υψηλή ποιότητα παραγόμενων προϊόντων. Κατά τη διαδικασία αυτή, ένα συνεχές φύλλο οδηγείται μέσω μιας σειράς απέναντι διατεταγμένων ελαστρών, τα οποία δίνουν στο χάλυβα την επιθυμητή μορφή. Κάθε

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

ζεύγος ελάστρων, το οποίο ονομάζεται και βαθμίδα, λειτουργεί ώστε να δώσει στο φύλλο μια συγκεκριμένη σταθερή παραμόρφωση. Όσο πιο σύνθετη διατομή επιθυμούμε να παραχθεί τόσοι περισσότερες βαθμίδες απαιτούνται.



Σχήμα 1.10 : Παραγωγή με συμπίεση (press banking)



Σχήμα 1.11 : Διαμόρφωση απλών διατομών (cold rolling)

1.5 Ευστάθεια μελών ψυχρής διαμόρφωσης

Σε σχέση με τη στατική συμπεριφορά των λεπτότοιχων μελών ψυχρής διαμόρφωσης σημειώνεται πως διακρίνονται για : 1) σταθερό πάχος διατομής, 2) μεγάλο πλάτος διατομής σε σχέση με το πάχος και 3) τη μεγάλη ποικιλία διατομών. Ειδικότερα, το μικρό πάχος σε σχέση με το πλάτος τους προκαλεί φαινόμενα τοπικού λυγισμού και επηρεάζεται η αντοχή τους. Παράλληλα, την αντοχή επηρεάζουν και οι διάφορες κατασκευαστικές ατέλειες που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία παραγωγής. Οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των λεπτότοιχων μελών είναι :

1. Ο τοπικός λυγισμός
2. Ο λυγισμός με στρέβλωση της διατομής
3. Ο καθολικός λυγισμός
4. Ο διατμητικός λυγισμός και τα φαινόμενα καμπυλώσεως

Τα λεπτότοιχα θλιβόμενα στοιχεία τείνουν να λυγίζουν ελαστικά , δηλαδή σε τάσεις κάτω του ορίου διαρροής. Αυτή η μορφή λυγισμού ονομάζεται τοπικός λυγισμός και δεν πρέπει να συγχέεται με τον καθολικό λυγισμό ενός μέλους μεγάλου μήκους ή πλευρικά μη εξασφαλισμένου. Ο τοπικός λυγισμός συνιστά μια μορφή αστοχίας μη σχετιζόμενη με το λυγισμό ολόκληρου του μέλους.

Στις λεπτότοιχες διατομές ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται πριν από τη διαρροή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της δυσκαμψίας και αντοχής της διατομής. Στις πρακτικές μεθόδους σχεδιασμού , αυτό λαμβάνεται υπόψη μέσω εισαγωγής μιας ισοδύναμης, μειωμένης διατομής, της ενεργού διατομής.

1.6 Πλεονεκτήματα χρήσης στοιχείων από χάλυβα ψυχρής έλασης

Τα πλεονεκτήματα των λεπτότοιχων διατομών ψυχρής διαμόρφωσης στη χρήση τους στις κατασκευές έχουν ως εξής :

- Σε σύγκριση με παχύτερα προϊόντα θερμής έλασης χρησιμοποιούνται για μικρότερα φορτία και μικρότερα ανοίγματα , ελαφρύτερα στοιχεία
- Οικονομικότερη παραγωγή σύνθετων διατομών σε σχέση με την θερμή έλαση και εξασφάλιση καλύτερης χρήσης υλικού
- Μόρφωση με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται εύκολη συσκευασία και μεταφορά
- Προσφέρουν ελευθερία στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό καθώς επιτρέπουν την επίτευξη μεγάλων ανοιγμάτων χωρίς ενδιάμεσα υποστυλώματα
- Ταχύτητα ανέγερσης και ταχεία απόδοση του επενδυμένου κεφαλαίου. Έχουν ακριβείς διαστάσεις και διανοιγμένες οπές με αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου παραμονής στο εργοτάξιο

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

- Φέροντα φύλλα μπορούν να δώσουν επιφάνειες κατάλληλες για στέγη, όψεις και πλάκες ορόφων με δυνατότητα μόρφωσης σε κλειστές κυψέλες από τις οποίες διέρχεται ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός.
- Φέροντα φύλλα παραλαμβάνουν δυνάμεις και εντός του επιπέδου τους , λειτουργώντας ως διαφράγματα , αν ενωθούν με κατάλληλο τρόπο με τα στοιχεία στήριξης.
- Παρέχουν αντισεισμική προστασία η οποία οφείλεται στο χαμηλό βάρος και τις άριστες συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων.
- Διαθέτουν επαρκή προστασία έναντι διάβρωσης η οποία εξασφαλίζεται μέσω γαλβανίσματος.
- Η διαδικασία παραγωγής τους καταναλώνει λιγότερη ενέργεια σε σχέση με άλλα υλικά και τα προϊόντα είναι ανακυκλώσιμα.

1.7 Εφαρμογές

Οι πλέον συνήθεις εφαρμογές των μελών ψυχρής διαμόρφωσης είναι :

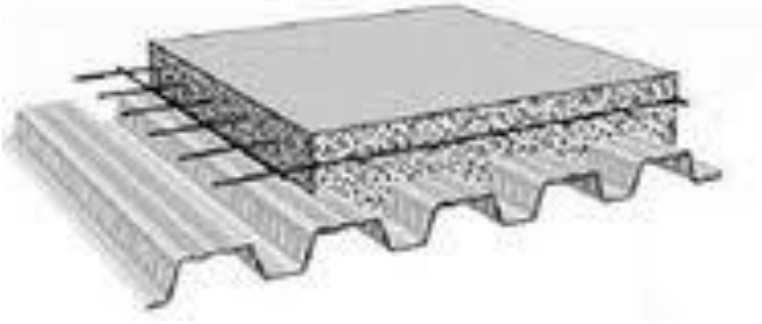
- Τεγίδες και μηκίδες



Σχήμα 1.12 : Τεγίδες διατομής Z

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

- Κύριος φορέας σε προκατασκευασμένα ελαφρά βιομηχανικά κτίρια και σε πολυώροφα μεταλλικά κτίρια
- Μεγάλα πετάσματα για κατοικίες
- Σύμμικτες πλάκες



Σχήμα 1.13 : Χαλυβδόφυλλο σύμμικτης πλάκας

- Δικτυώματα



Σχήμα 1.14 : Δικτυώματα

- Πλαίσια με κοχλιωτούς κόμβους για βιομηχανικά κτίρια
- Κελυφωτές κατασκευές
- Βιομηχανικά ράφια

- Γεωργικά σιλό



Σχήμα 1.15 : Σιλό γεωργικών εκμεταλλεύσεων

- Χωροδικτυώματα



Σχήμα 1.16 : Χωροδικτύωμα με στοιχεία ψυχρής έλασης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ιδιότητες υλικών και διατομών ψυχρής διαμόρφωσης

2.1 Ποιότητες χαλύβων

Οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται για τη μόρφωση μελών και φύλλων ψυχρής ελάσεως πρέπει να είναι κατάλληλοι για ψυχρή έλαση και συγκόλληση. Χάλυβες που θα υποστούν γαλβανισμό πρέπει να είναι κατάλληλοι για γαλβανισμό. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι ονομαστικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών για τις συνήθεις ποιότητες χάλυβα.

Πίνακας 2.1 : Ποιότητες χάλυβα και ονομαστικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών τους

Τύπος χάλυβα	Κανονισμός	Κατηγορία	$f_{yb}(N/mm^2)$	$f_u(N/mm^2)$
Προϊόντα θερμής ελάσεως μη κραματωμένων δομικών χάλυβων. Μέρος 2: Τεχνικές συνθήκες παράδοσης μη κραματωμένων δομικών χάλυβων	EN 10025: Part 2	S 235	235	360
		S 275	275	430
		S 355	355	510
Προϊόντα θερμής ελάσεως δομικών χάλυβων. 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		

Πίνακας 2.1 : Ποιότητες χάλυβα και ονομαστικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών τους

Προϊόντα θερμής ελάσεως δομικών χαλύβων.	EN 10025: Part 4	S 275 M	275	360
		S 355 M	355	450
Μέρος 4: Τεχνικές συνθήκες παράδοσης για θερμομηχανικούς, ελατούς συγκολλησίμους λεπτόκοκκους δομικούς χάλυβες		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

2.2 Ιδιότητες υλικού μελών και φύλλων ψυχρής διαμόρφωσης

Η κατεργασία με την οποία θα παραχθούν οι διατομές ψυχρής έλασης 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 ως εξής :

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

όπου :

- A_g εμβαδό 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

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

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

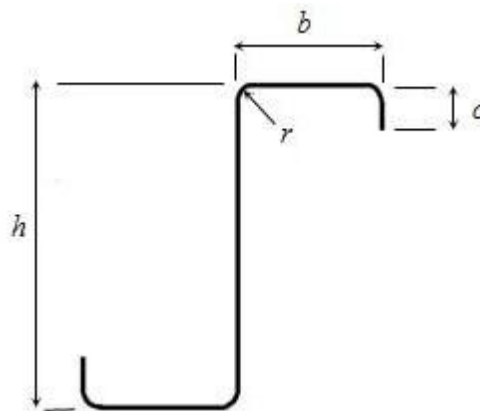
Το μέσο όριο διαρροής f_{ya} χρησιμοποιείται για τους παρακάτω υπολογισμούς :

- i) Της αντοχής της διατομής για ένα αξονικά φορτιζόμενο εφελκυσμένο μέλος
- ii) Της αντοχής της διατομής και της αντοχής σε λυγισμό για ένα αξονικά φορτιζόμενο θλιβόμενο μέλος στο οποίο ολόκληρη η διατομή είναι ενεργή
- iii) Στην καμπτική αντοχή όμοιας διατομής με πλήρη ενεργά πέλματα

Τέλος, το αυξημένο όριο διαρροής λόγω της ψυχρής διαμόρφωσης δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για μέλη τα οποία υφίστανται θερμή επεξεργασία μετά την ψυχρή έλαση σε θερμοκρασία που ξεπερνά τους 580°C για περισσότερο από μια ώρα.

2.3 Ονομαστικές διαστάσεις διατομών

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



Σχήμα 2.1 : Διαστάσεις τυπικών διατομών

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

2.4 Επιρροή των καμπυλών προσαρμογής

Με την ψυχρή έλαση δημιουργούνται καμπύλες προσαρμογής στις διατομές. Όμως, ο υπολογισμός των στοιχείων της διατομής οφείλει να βασίζεται στην πραγματική γεωμετρία της διατομής. Η επιρροή στρογγυλεμένων γωνιών στην αντοχή μιας διατομής μπορεί να αγνοηθεί εάν τηρούνται δυο προϋποθέσεις :

$$r \leq 5t$$

$$r \leq 0.10b_p$$

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

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

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

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

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

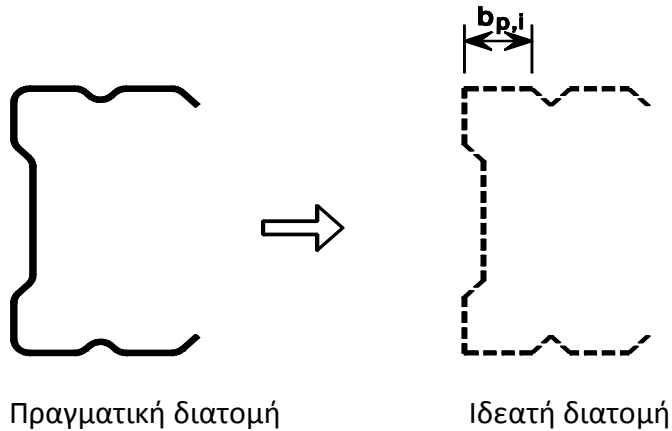
με :

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

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 i 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

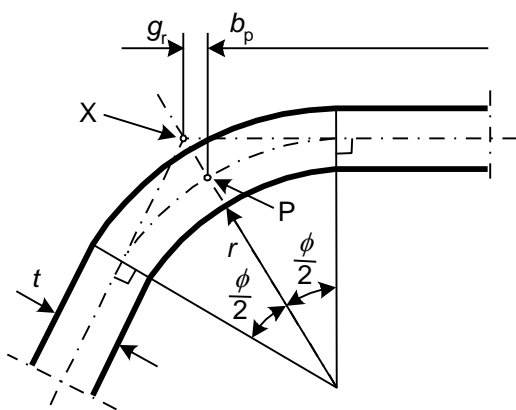
ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



Σχήμα 2.2 : Προσέγγιση στρογγυλεμένων γωνιών

Οι απομειώσεις με βάση τις εξισώσεις (2.2) μπορούν να εφαρμοστούν και κατά τον υπολογισμό των ιδιοτήτων της ενεργού διατομής A_{eff} , $I_{y,eff}$, $I_{z,eff}$ και $I_{w,eff}$ αρκεί τα ισοδύναμα πλάτη των επίπεδων στοιχείων να 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 πειραματικά.



(α) Μέσο σημείο της γωνίας ή κάμψης

X το σημείο τομής των μέσων επιφανειών

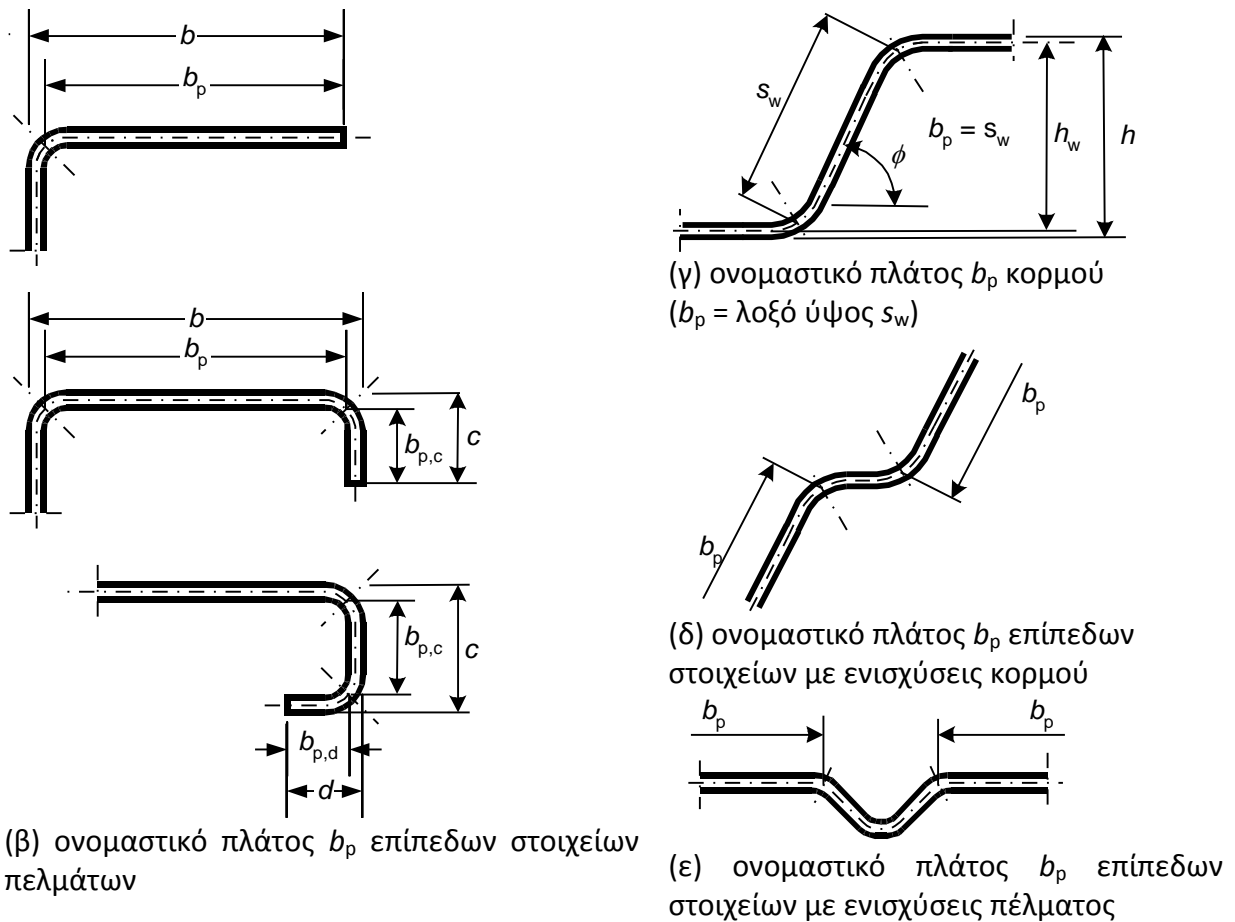
P το μέσο σημείο της γωνίας

$$r_m = r + t/2$$

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

Σχήμα 2.3 : Ονομαστικά πλάτη επίπεδων στοιχείων b_p , ώστε να ληφθούν υπόψη οι κάμψεις

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



(β) ονομαστικό πλάτος b_p επίπεδων στοιχείων πελμάτων

(γ) ονομαστικό πλάτος b_p κορμού
($b_p = \text{λοξό ύψος } s_w$)

(δ) ονομαστικό πλάτος b_p επίπεδων
στοιχείων με ενισχύσεις κορμού

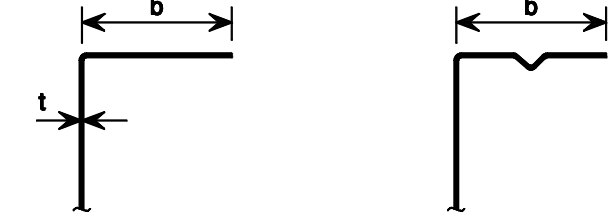
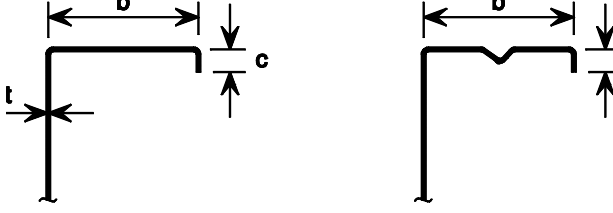
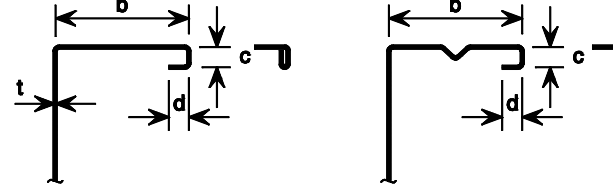
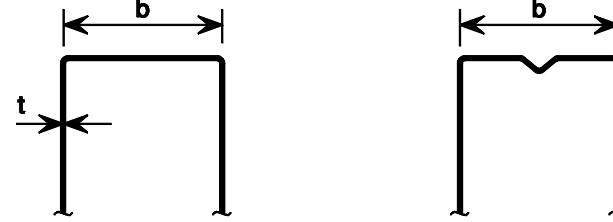

(ε) ονομαστικό πλάτος b_p επίπεδων
στοιχείων με ενισχύσεις πέλματος

Σχήμα 2.3 : Ονομαστικά πλάτη επίπεδων στοιχείων b_p , ώστε να ληφθούν υπόψη οι κάμψεις

2.5 Γεωμετρικές συνθήκες ισχύος

Όσα έχουν αναφερθεί στο σχεδιασμό και υπολογισμό των λεπτότοιχων διατομών ψυχρής έλασης ή μόρφωσης, είναι εφαρμόσιμα σε διατομές που πληρούν κάποιες γεωμετρικές συνθήκες. Αυτές συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί όπου δίνονται οι μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος της διατομής. Για διατομές των οποίων η γεωμετρία δε συμπεριλαμβάνεται στον πίνακα πρέπει να ελεγχθεί η συμπεριφορά τους πειραματικά.

Πίνακας 2.2: Μέγιστοι λόγοι πλάτους - πάχους

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

Για να επιτευχθεί επαρκής ακαμψία και να αποφευχθεί ο πρόωρος λυγισμός των ενισχύσεων, οι διαστάσεις οφείλουν να τηρούν τα παρακάτω όρια:

$$0,2 \leq c/b \leq 0,6$$

$$0,1 \leq d/b \leq 0,3$$

όπου οι διαστάσεις b , c και d είναι αυτές που δίνονται στον Πίνακα 2.2. Εάν $c/b < 0,2$ ή $d/b < 0,1$ το χείλος αγνοείται και θέτουμε $c = 0$ ή $d = 0$. Είναι βασικό να σημειωθεί, ότι το μήκος της σχισμής c μετράται κάθετα στο πέλμα όταν το χείλος δεν είναι κάθετο στο πέλμα.

2.6 Προσομοίωση για στατική ανάλυση

Μια διατομή αποτελείται από μεμονωμένα πλακοειδή στοιχεία , τα οποία εδράζονται σε μια ή δυο πλευρές. Για να προσδιοριστούν οι ιδιότητες της ενεργού διατομής , η διατομή διασπάται σε επιμέρους στοιχεία για τα οποία υπολογίζονται ξεχωριστά τα ενεργά πλάτη. Στη συνέχεια η διατομή ανασυντίθεται από τα ενεργά κομμάτια των επιμέρους στοιχείων.

Κατά τη διάσπαση της διατομής σε τμήματα , πρέπει να προσδιοριστεί η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση ενός κατάλληλου προσομοιώματος για τις συνδέσεις και ενισχύσεις , στο οποίο εισάγονται κατάλληλα στρωφικά και μεταφορικά ελατήρια (Πίνακας 2.3) . Οι σταθερές των ελατηρίων που επιλέγονται προσδιορίζονται πειραματικά ή υπολογιστικά.

Πίνακας 2.3: Προσομοίωση των στοιχείων της διατομής

Τύπος στοιχείου	Προσομοίωμα	Τύπος στοιχείου	Προσομοίωμα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Συμπεριφορά και αντοχή λεπτότοιχων στοιχείων

3.1 Γενικά

Το κυριότερο χαρακτηριστικό των λεπτότοιχων μελών ψυχρής έλασης ή διαμόρφωσης είναι το αρκετά μεγάλο πλάτος τους σε σχέση με το πάχος τους. Λόγω αυτού του χαρακτηριστικού τους, αλλά και λόγω του τρόπου διαμόρφωσης τους με την ψυχρή έλαση, δημιουργούνται προβλήματα όπως μεγάλη ευκαμψία και γεωμετρικές ατέλειες οι οποίες ευθύνονται για σημαντικές παραμορφώσεις ακόμη και με σημειακές καταπονήσεις.

Λόγω αυτών των προβλημάτων, τα τμήματα των λεπτότοιχων διατομών, προτού αστοχήσουν σε διαρροή τείνουν να χάσουν την ευστάθειά τους. Η πιο κρίσιμη μορφή αστοχίας που παρουσιάζεται είναι ο τοπικός λυγισμός, ο οποίος εξαναγκάζει τη διατομή σε μεταβολή του σχήματός της.

Η αντοχή της διατομής είναι αυτή που καθορίζει τις περισσότερες φορές την αντοχή ολόκληρου του μέλους στην περίπτωση εφελκυσμού ή κάμψης πλευρικά εξασφαλισμένων δοκών.

3.2 Αστάθεια καμπτόμενων λεπτότοιχων δοκών

Στη θεωρία της κάμψης, οι διατμητικές παραμορφώσεις δεν λαμβάνονται υπόψη και στη στοιχειώδη θεωρία στρέψης κυκλικής ατράκτου οι διαμήκεις εντάσεις είναι μηδέν.

Αντίθετα, στη θεωρία λεπτότοιχων δοκών (thin walled beams) τα στρεπτικά φορτία παράγουν κάθετες εντάσεις και τάσεις και διαμήκη ή εγκάρσια φορτία επάγουν στρέψη. Έτσι, η παραμόρφωση μιας λεπτότοιχης δοκού περιλαμβάνει ορθή αλλά και διατμητική ένταση. Με απλά λόγια η στρέψη και η κάμψη στις λεπτότοιχες δοκούς συνδέονται.

Ο λόγος για τον οποίο η κάμψη συνδέεται με τη στρέψη είναι πως δεν υφίσταται επιπεδότητα της διατομής. Οι διαμήκεις μετατοπίσεις δεν ακολουθούν γραμμική κατανομή πάνω στο εγκάρσιο επίπεδο ενώ η εγκάρσια τομή παρουσιάζει στρέβλωση έξω από το επίπεδο της η οποία οφείλεται σε στρέψη. Αξίζει να σημειωθεί πως η στρέβλωση, η οποία αυξάνει τις διαμήκεις ορθές εντάσεις και τάσεις, δεν είναι γενικά ίδια σε παρακείμενες εγκάρσιες τομές της δοκού.

Η αστάθεια των λεπτότοιχων δοκών συχνά εμφανίζεται μέσω ενός συνδυασμού κάμψης και στρέψης, ακόμη κι αν η φόρτιση αποτελείται από εγκάρσια και αξονικά φορτία σε ένα επίπεδο.

Σε σχέση με την αστάθεια, υπάρχουν δυο μορφές οι οποίες σχετίζονται με αστοχία διατομής και είναι :

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

- Ο τοπικός λυγισμός (Local buckling)

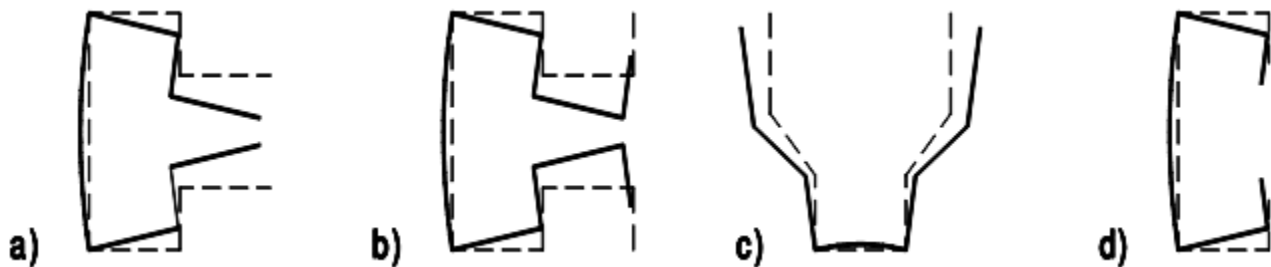
Τα τοιχώματα της διατομής υπόκεινται σε πλακοειδείς παραμορφώσεις (κύρτωση).

Το γενικό σχήμα της διατομής παραμένει αμετάβλητο , δεδομένου ότι οι εσωτερικές ακμές μένουν απαραμόρφωτες , αποτελώντας σημεία στήριξης των πλακοειδών στοιχείων. Όμως, οι εξωτερικές ακμές μπορούν να μετατοπίζονται.

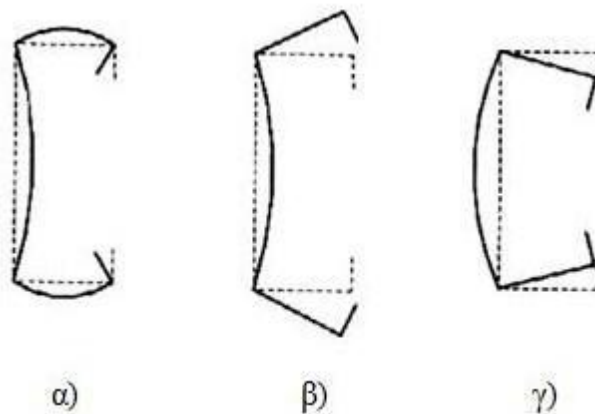
- Λυγισμός με στρέβλωση διατομής (Distorsional buckling)

Τα τοιχώματα της διατομής υφίστανται στρέβλωση , 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 εξαρτάται από τα πλάτη των τοιχωμάτων της διατομής και όχι από το μήκος της ράβδου. Καθοριστικά μήκη λυγισμού είναι οι 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 3.1 : Παραδείγματα μορφών λυγισμού με στρέβλωση διατομής



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

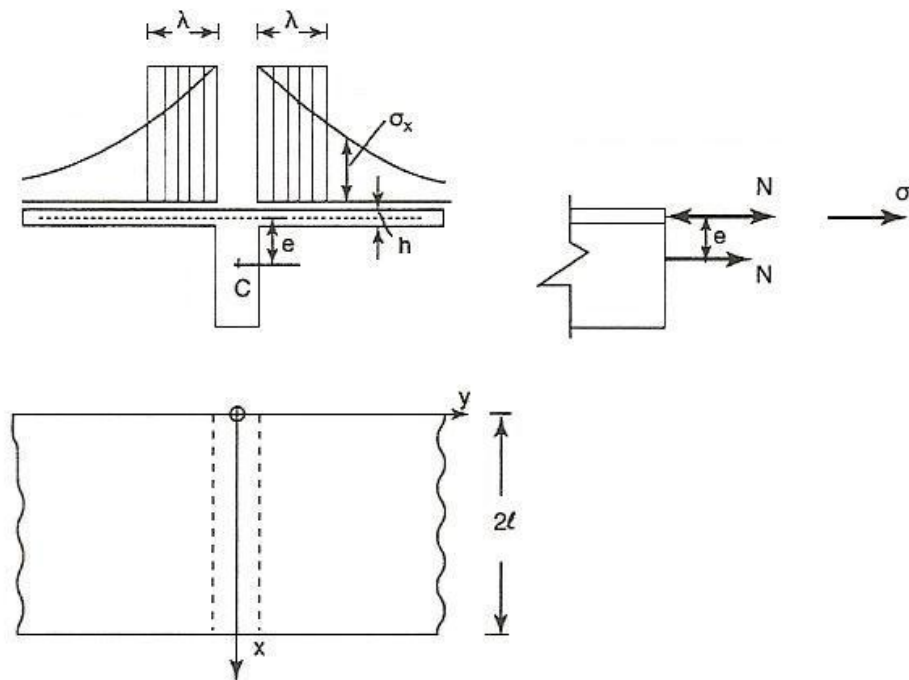
ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Για να περιοριστεί ο κίνδυνος 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, διότι κάθε ενίσχυση προσθέτει έναν ενδιάμεσο κόμβο ο οποίος μπορεί να μετατοπισθεί.

Γίνεται αντιληπτό ότι κάθε αστάθεια οδηγεί σε μείωση της αντοχής και οι διάφορες αστάθειες αλληλοεπηρεάζονται. Μέσω της αλληλεπίδρασης είναι δυνατό να υπάρξει σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητας.

3.3 Θεωρητική τεκμηρίωση τοπικού λυγισμού

Το φαινόμενο έχει εξετασθεί σε σχέση με τη λυγισμική αλλά και τη μεταλυγισμική συμπεριφορά των κατασκευών και για ποικίλες φορτίσεις. Για τη θεωρητική εξήγηση του φαινομένου λαμβάνουμε μια απειρομήκη συνεχή πλάκα με εδράσεις σε ίσες αποστάσεις (σχήμα 3.3). Όλα τα ανοίγματα φορτίζονται κατά τον ίδιο τρόπο από ίσα φορτία, συμμετρικά ως προς τον άξονα Ox . Το πλάτος της πλάκας θεωρείται μεγάλο, ενώ το πάχος της αρκετά μικρό σε σχέση με αυτό της δοκού που τη στηρίζει.



Σχήμα 3.3 : Απειρομήκης συνεχής πλάκα

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Η τασική συνάρτηση που ικανοποιεί τις συνοριακές συνθήκες και την εξίσωση της πλάκας έχει ως εξής :

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

Οι σταθερές A_n και B_n προσδιορίζονται από τη συνθήκη που ορίζει ότι η πραγματική διανομή εντάσεως θα είναι αυτή που ελαχιστοποιεί την συνολικώς 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 δίνεται από τον τύπο :

$$\varepsilon_1 = 2 \cdot \frac{h}{2E} \int_0^{2l} \int_0^l \left[\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2 \cdot \nu \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y + 2(1+\nu)\tau_{xy}^2 \right] dx dy \quad (3.3)$$

Ή λόγω των (3.1) και (3.2) :

$$\varepsilon_1 = 2 \cdot h \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^3 \pi^3}{l^2} \left(\frac{B_n^2}{E} + \frac{A_n B_n}{2G} + \frac{A_n^2}{2G} \right) \quad (3.4)$$

Η συνολική ροπή κάμψης που παραλαμβάνει η ενιαία διατομή της πλάκας και δοκού μπορεί να παρασταθεί από τον τύπο :

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

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

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

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

Η ενέργεια των εξωτερικών δυνάμεων θα είναι :

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

Και το συνολικό έργο θα είναι :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (3.8)$$

Επίσης πρέπει να ισχύει :

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

Από τις παραπάνω εξισώσεις προσδιορίζουμε τα A_n και B_n .

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

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

Και τελικά
$$2\lambda = \frac{4I}{\pi(3 + 2\nu - \nu^2)} \quad (3.9)$$

Η παραπάνω μαθηματική επεξεργασία δίνει τύπους οι οποίοι εφαρμόζονται δύσκολα στην πράξη. Η κατανομή τάσεων ακόμη και για την απλούστερη περίπτωση πλάκας είναι μια τεταρτοβάθμια παραβολή. Διαπιστώθηκε όμως πως το μεγαλύτερο ποσοστό των τάσεων παραλαμβάνεται από το τμήμα που βρίσκεται κοντά στις στηρίξεις της. Άρα μπορούμε να θεωρήσουμε με προσέγγιση και υπέρ της ασφαλείας, ότι η εξωτερική φόρτιση παραλαμβάνεται από μια ομοιόμορφη εσωτερική τάση, που κατανέμεται σε ένα πλάτος $b_{eff} \leq b$ το οποίο ονομάζεται ενεργό πλάτος της διατομής.

Μια προσέγγιση του ενεργού πλάτους έδωσε πρώτος ο Von Karman :

$$\frac{b_{eff}}{bp} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} \quad (3.10)$$

Ο Winter βελτίωσε τον τύπο λαμβάνοντας υπόψη και πιθανές γεωμετρικές ατέλειες:

$$\rho = \frac{b_{eff}}{bp} = \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} \cdot \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{\sigma_{cr}}{f_y}} \right) \quad (3.11)$$

Όπου σ_{cr} είναι η κρίσιμη τάση λυγισμού.

Επειδή η κρίσιμη τάση λυγισμού είναι διαφορετική από φόρτιση σε φόρτιση , το ενεργό πλάτος μιας διατομής διαφέρει ανάλογα με την καταπόνηση της.

Το ενεργό πλάτος αποτελεί ένα εργαλείο για να προσδιοριστεί η ενεργός διατομή. Όταν αναζητείται η φέρουσα ικανότητα ενός μέλους ψυχρής ελάσεως, πρώτο βήμα μας είναι ο προσδιορισμός του ενεργού πλάτους των θλιβόμενων στοιχείων μιας διατομής , βασιζόμενοι στην κατανομή που ακολουθούν οι τάσεις. Στη συνέχεια , υπολογίζουμε τις γεωμετρικές ιδιότητες της ενεργού διατομής και λαμβάνουμε υπόψη τη μετατόπιση του ουδέτερου άξονα , λόγω των τμημάτων της διατομής που δε συμμετέχουν. Η τελική διαδικασία ελέγχου είναι η ίδια όπως και στα πρότυπα ελάσματα.

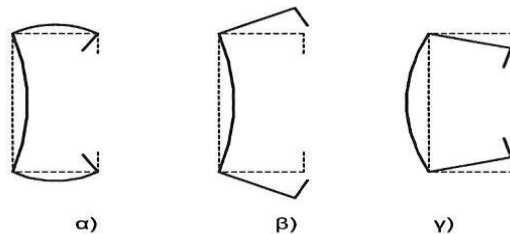
Ο έλεγχος γίνεται με ελαστική ανάλυση και έτσι η αντοχή της διατομής έχει ως όριο την τάση διαρροής σε κάθε τμήμα της. Η αλληλεπίδραση διαφόρων φαινομένων , που προκαλεί διαξονικές καταπονήσεις , ελέγχεται όπως και στις διατομές θερμής ελάσεως. Αν το μέλος δεν κινδυνεύει από λυγισμό, τότε για να υπολογιστεί η ροπή αντοχής χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

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

Για να αποφευχθεί η επαναληπτική διαδικασία 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, αλλά κορμό πλήρως ενεργό.

3.4 Κύρτωση με στρέβλωση διατομής

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



Σχήμα 3.4 : α) τοπικός λυγισμός και β) με γ) λυγισμός με στρέβλωση διατομής

3.5 Γεωμετρικές ιδιότητες ενεργού διατομής

3.5.1 Παραδοχές

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

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

3.5.2 Επίπεδα στοιχεία χωρίς ενισχύσεις

Η κρίσιμη τάση λυγισμού δίνεται από τον τύπο :

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

όπου :

b_p το θεωρητικό πλάτος

t το πάχος της πλάκας

ν το μέτρο Poisson

$K\sigma$ ο αντίστοιχος συντελεστής κυρτώσεως, από τους πίνακες 3.1 και 3.2

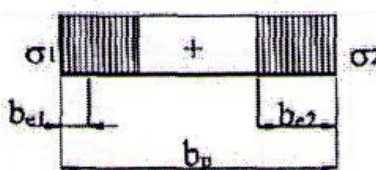
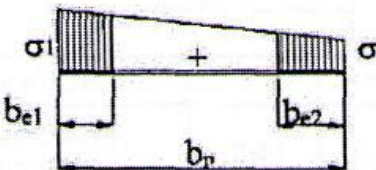
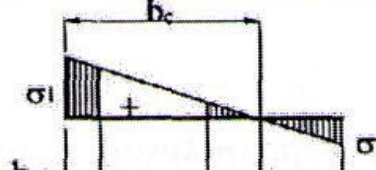
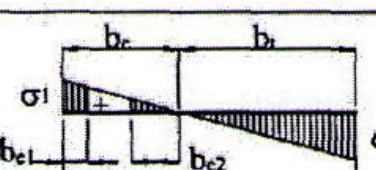
Η ανηγμένη λυγηρότητα υπολογίζεται από τη σχέση $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}}$

Ο μειωτικός συντελεστής υπολογίζεται :

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

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

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_σ	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 $+1 > \psi > -1:$		$k_\sigma = \frac{16}{[(1 + \psi)^2 + 0,112(1 + \psi)^2]^{0,5} + (1 + \psi)}$				

Πίνακας 3.2 : Προεξέχοντα θλιβόμενα τμήματα

	$+1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho b_p$				
	$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c$				
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+1	0	-1	$+1 \geq \psi \geq -1$	
Συντελεστής κύρτωσης k_s	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_s	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 $\sigma_{\max} = \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$, τότε τα ενεργά πλάτη προσδιορίζονται από τους πίνακες 3.1 και 3.2.
- Εάν $\sigma_{\max} < \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$, τότε στη θέση της κρίσιμης τάσης λυγισμού εισέρχεται το σ_{\max} και ο λ_p

που χρησιμοποιείται στους παραπάνω τύπους γίνεται :

$$\overline{\lambda_{p,\max}} = \overline{\lambda_p} \sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{f_y}} \gamma_{M1}$$

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

$$\overline{\lambda_{op}} = \overline{\lambda_p} \sqrt{\frac{\sigma_{op}}{f_y}}$$

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

Η πορεία υπολογισμού είναι η παρακάτω:

1. Προσδιορίζουμε τις τάσεις των άκρων σ_1 και σ_2 , χρησιμοποιώντας την πλήρη διατομή του επίπεδου 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. Υπολογίζουμε το $\overline{\lambda_p}$
4. Ανάλογα με την τιμή της μέγιστης θλιπτικής τάσεως, προσδιορίζουμε το $\overline{\lambda_p}$
5. 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} , $\overline{\lambda_p}$ 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.

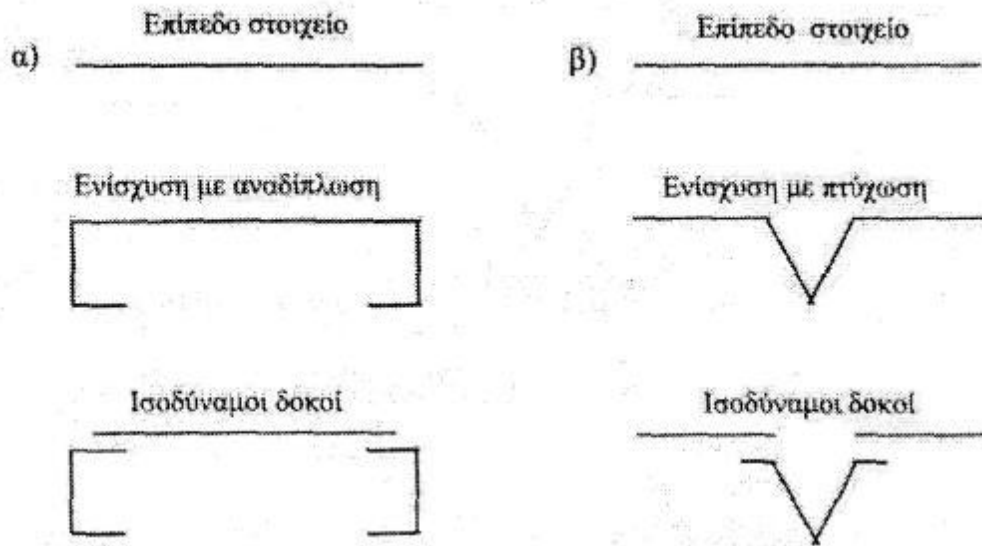
3.5.3 Επίπεδα στοιχεία με ενισχύσεις

3.5.3.1 Γενικά

Οι ενισχύσεις ενός επίπεδου στοιχείου, μπορεί να βρίσκονται στα άκρα του ή να είναι ενδιάμεσες. Ο σκοπός των ενισχύσεων είναι να αυξήσουμε τη δυσκαμψία των στοιχείων. Οι

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

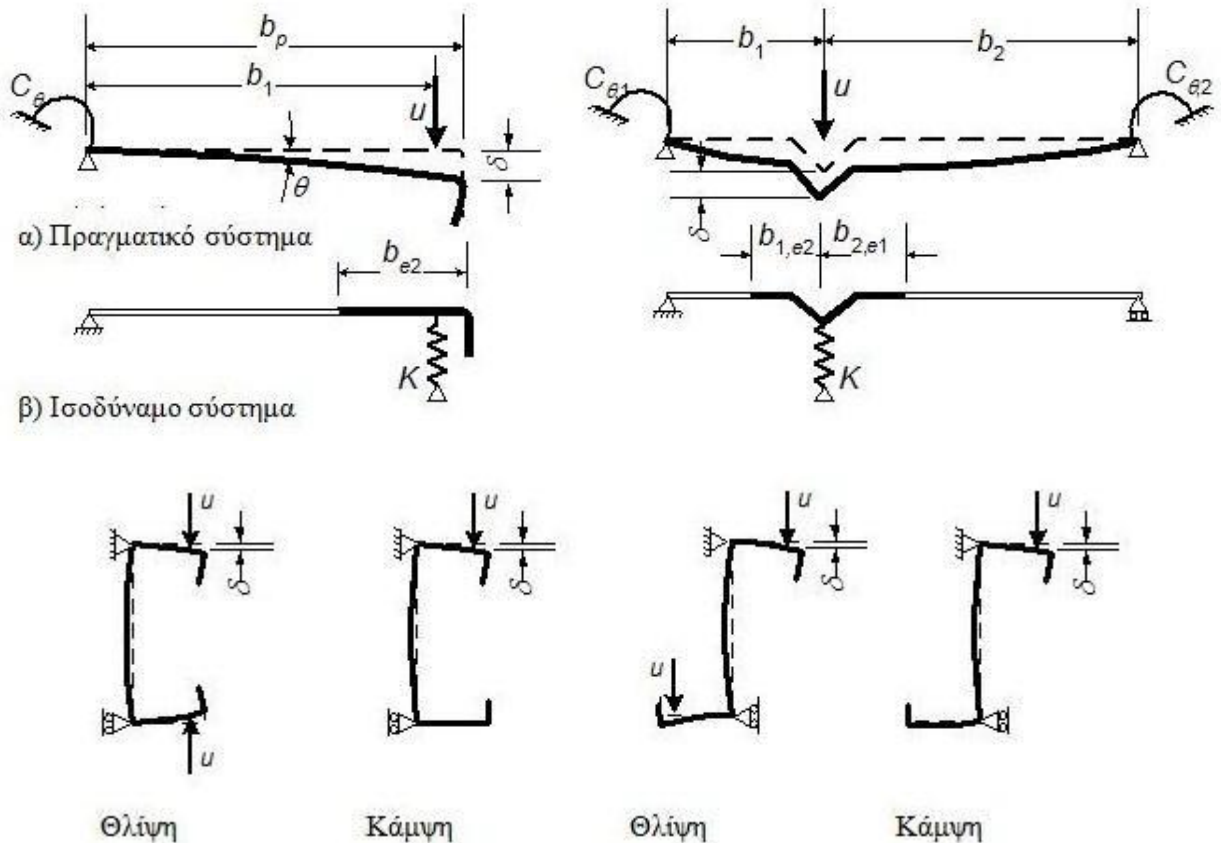
ενισχύσεις αυτές, που έχουν μορφή αναδιπλώσεως ή πτυχώματος, προσδίδουν έντονη τοπική ακαμψία.



Σχήμα 3.5 : Ισοδύναμες δοκοί σε ενισχυμένες διατομές

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

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



γ) Προσδιορισμός του δ για διατομές C και Z

Σχήμα 3.6 : Ακαμψία του ελατηρίου

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

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

$$K = \frac{u}{\delta}$$

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

Κατά τον καθορισμό τιμών για τις στροφικές σταθερές του ελατηρίου C_{θ} , $C_{\theta 1}$, και $C_{\theta 2}$ από τη γεωμετρία της διατομής, είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψη τυχόν άλλες ενισχύσεις που συνεισφέρουν στη θλίψη.

Στην περίπτωση μιας ακραίας ενίσχυσης το βέλος δ υπολογίζεται ως εξής:

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

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

Όταν πρόκειται για σταθερά ελατηρίου σε διατομές C και Z γίνεται εφαρμογή μοναδιαίας δύναμης όπως διακρίνεται στο σχήμα 3.6(γ). Η σχέση που εκφράζει τη σταθερά ελατηρίου K_1 του πέλματος 1 έχει ως εξής:

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

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),

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)

$$k_f = \frac{A_{eff2}}{A_{eff1}} \quad \text{εάν το πέλμα 2 είναι σε θλίψη.}$$

A_{eff1} και A_{eff2} τα ενεργά εμβαδά των ακραίων ενισχύσεων των πελμάτων 1 και 2 αντίστοιχα.

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

Ο μειωτικός συντελεστής χ_d για τον υπολογισμό της αντοχής σε λυγισμό με στρέβλωση πρέπει να υπολογίζεται από τη σχετική λυγηρότητα $\bar{\lambda}_d$ ως εξής :

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

όπου :

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

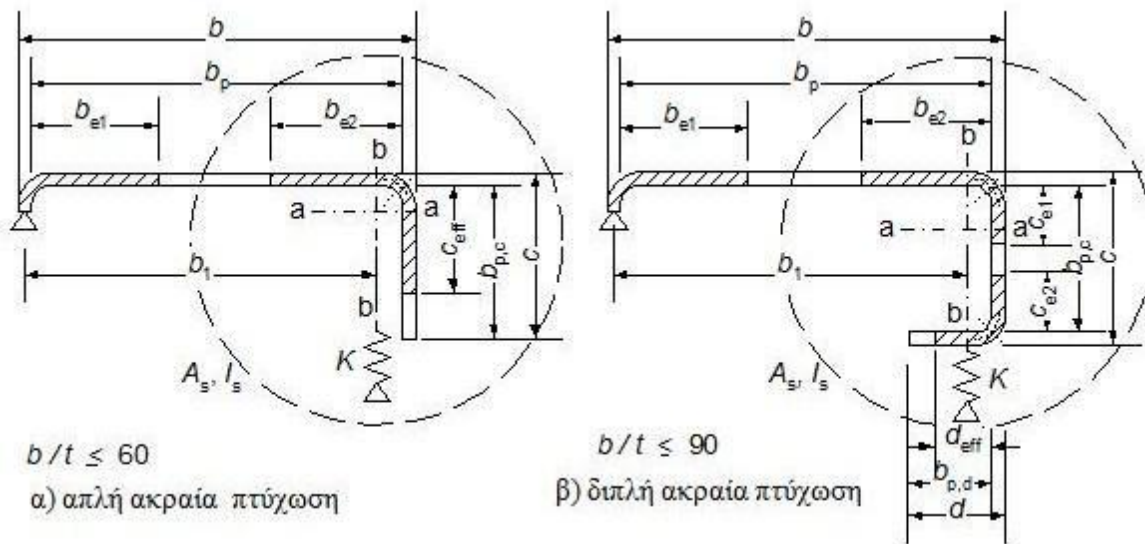
3.5.3.2 Ακραίες ενισχύσεις

Μια ακραία ενίσχυση μπορεί να προέρχεται από απλή ή διπλή αναδίπλωση (απλό ή διπλό στραντζάρισμα). Η ακραία ενίσχυση αγνοείται στον υπολογισμό για τον καθορισμό της αντοχής του επίπεδου στοιχείου με το οποίο συνδέεται, εάν δεν προσφέρει στήριξη σε αυτό. Η διατομή μιας ακραίας ενίσχυσης πρέπει να θεωρείται ότι αποτελείται από τα ενεργά τμήματα της ενίσχυσης και το ενεργό τμήμα του γειτονικού στοιχείου br .

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: $c > 0,2br$
3. Ο λόγος $br/t \leq 60$ για απλή στραντζαριστή ενίσχυση και $br/t \leq 90$ για διπλή στραντζαριστή ενίσχυση.

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



Σχήμα 3.7 : Ακραίες ενισχύσεις

1. Γενική Μέθοδος

Η μέθοδος αυτή είναι μια επαναληπτική μέθοδος. Γίνονται συνεχείς επαναλήψεις, μέχρι να προσεγγισθεί κατά την ποστη 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) Γίνεται ο προσδιορισμός μιας αρχικής ενεργού διατομής της ενίσχυσης, με ενεργά πλάτη προσδιοριζόμενα με την παραδοχή ότι η ενίσχυση παρέχει πλήρη εξασφάλιση και είναι $\sigma_{com,Ed}$

$= \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$. Συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι το επίπεδο στοιχείο br του σχήματος 3.7 είναι

αμφίπλευρα στηριζόμενο και σύμφωνα με την παράγραφο 3.5.2 υπολογίζονται οι αρχικές τιμές be_1 και be_2 . Οι αρχικές τιμές των c_{eff} και d_{eff} υπολογίζονται:

A) για απλή ακραία πτυχωτή ενίσχυση:

$$c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c}$$

όπου η τιμή του ρ προσδιορίζεται από την παράγραφο 3.5.2 και ο συντελεστής κύρτωσης προκύπτει από τα παρακάτω:

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

B) για διπλή ακραία πτυχωτή ενίσχυση :

$$c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c} \text{ με το } \rho$$

με το ρ να προκύπτει από την παράγραφο 3.5.2, με συντελεστή κύρτωσης K_σ για προεξέχον θλιβόμενο στοιχείο (πίνακας 3.1).

$$d_{eff} = \rho \cdot b_{p,d}$$

με το ρ να υπολογίζεται από την παράγραφο 3.5.2 και χρήση συντελεστή κύρτωσης K_σ για προεξέχον θλιβόμενο στοιχείο. (πίνακας 3.2)

ii) Η ενεργός διατομή της ενίσχυσης που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μειωτικού συντελεστή σε λυγισμό με στρέβλωση, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της συνεχούς ελαστικής δέσμευσης. Το εμβαδόν της ενεργού διατομής μιας ακραίας ενίσχυσης A_s είναι ίσο με :

$$A_s = t \cdot (b_{e2} + c_{eff}) \quad \text{ή} \quad (3.12)$$

$$A_s = t \cdot (b_{e2} + c_{e1} + c_{e2} + d_{eff}) \quad (3.13)$$

Η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού $\sigma_{cr,s}$ μιας ακραίας ενίσχυσης υπολογίζεται για δοκό επί ελαστικής βάσης ως εξής :

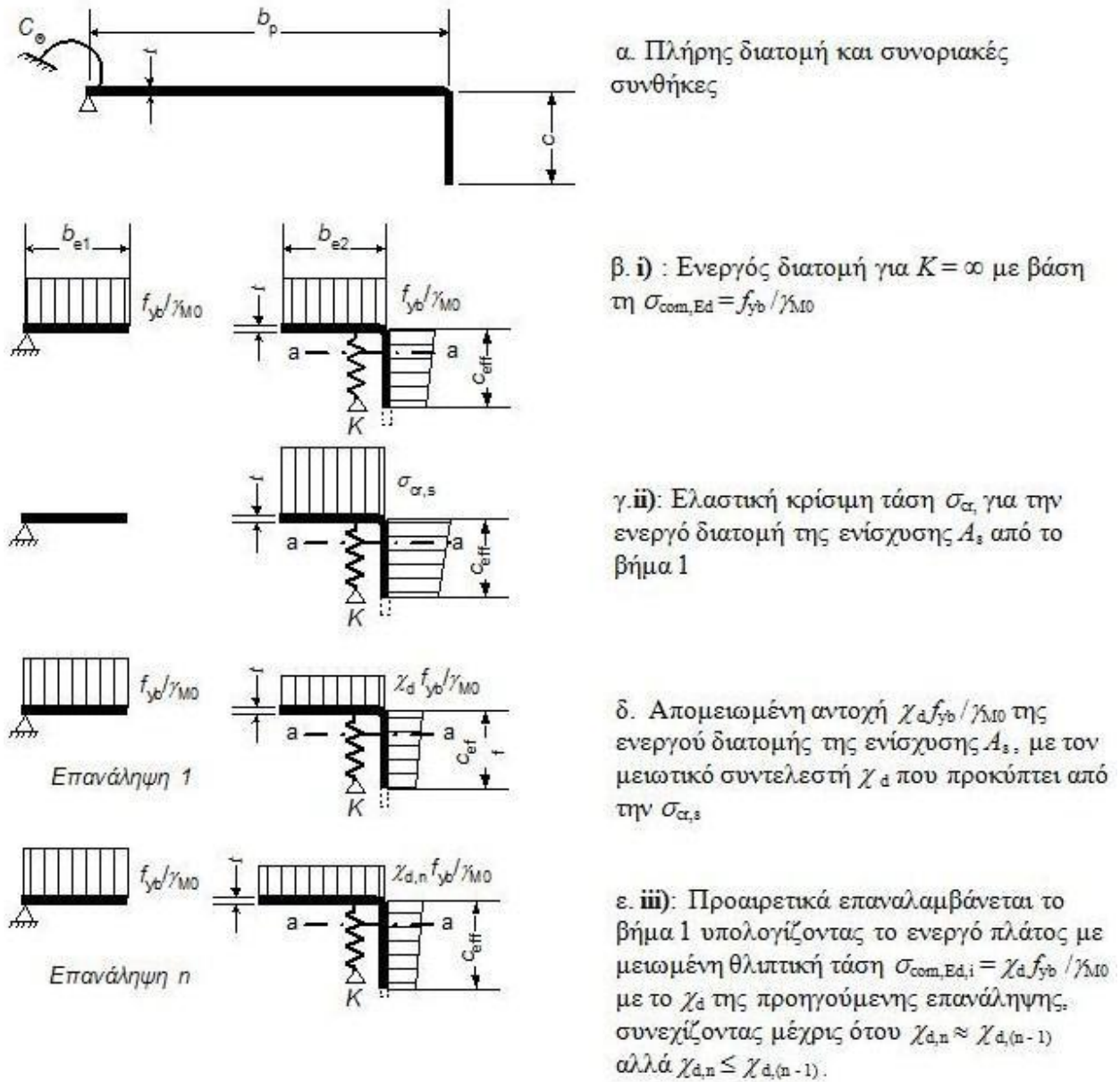
$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} \quad (3.14)$$

όπου :

- K η σταθερά ελατηρίου ανά μονάδα μήκους
- I_s η ροπή αδράνειας της ενεργού διατομής της ενίσχυσης

iii) Ο μειωτικός συντελεστής χ_1 για λυγισμό της ενίσχυσης προσδιορίζεται με τη μέθοδο της παραγράφου 3.5.3.1 και διορθώνεται σταδιακά με επαναληπτική διαδικασία. Ο συντελεστής χ_2 προσδιορίζεται επαναλαμβάνοντας τα παραπάνω βήματα, αν στη θέση της θλιβόμενης τάσης $\sigma_{com,Ed}$ χρησιμοποιηθεί η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού $\sigma_{cr,s}$.

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



Σχήμα 3.8 : Θλιπτική αντοχή πέλματος με ακραία ενίσχυση

Γενικά για να εφαρμοσθεί η γενική μέθοδος, λαμβάνονται υπόψη τα εξής :

- Εάν $X < 1$, η επανάληψη ξεκινά με τροποποίηση του ρ αλλά $\sigma_{cr} = X \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_M}$ και

$$\overline{\lambda}_{p,red} = \overline{\lambda}_p \sqrt{X}$$

- Η μειωμένη ενεργός διατομή της ενίσχυσης $A_{s,red}$ λόγω λυγισμού προσδιορίζεται από τη σχέση :

$$A_{s,red} = x_d A_s \left(\frac{\frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}}}{\sigma_{com,Ed}} \right)$$

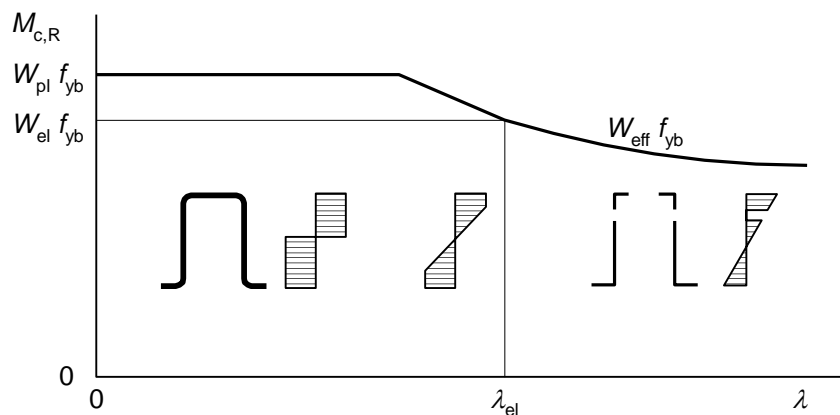
Και $\sigma_{com,Ed}$ η θλιπτική τάση στο κέντρο βάρους της ενίσχυσης με βάση την ενεργό διατομή.

- Η μειωμένη ενεργός διατομή $A_{s,red}$ προκύπτει για μειωμένο πάχος t_{red} για όλα τα στοιχεία της επιφάνειας A_s .
- Οι ιδιότητες της ενεργού διατομής στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας προκύπτουν με το πάχος σχεδιασμού t .

3.6 Αντοχή διατομής σε μονοαξονική κάμψη

3.6.1 Ελαστική και ελαστοπλαστική αντοχή με διαρροή του θλιβόμενου πέλματος

Η αντοχή σχεδιασμού της διατομής υπό κάμψη ως προς έναν κύριο άξονα $M_{c,Rd}$ προσδιορίζεται ως εξής (Σχήμα 3.9) :



Σχήμα 3.9 : Καμπτική ροπή αντοχής ως συνάρτηση της λυγηρότητας

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

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0} \quad (3.15)$$

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

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

$$M_{c,Rd} = f_{yb} (W_{el} + (W_{pl} - W_{el}) 4(1 - \lambda / \lambda_{el})) / \gamma_{M0} \text{ αλλά όχι μεγαλύτερη από } W_{pl} f_{yb} / \gamma_{M0} \quad (3.16)$$

όπου

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

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

όπου

Ψ είναι ο λόγος των τάσεων .

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

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

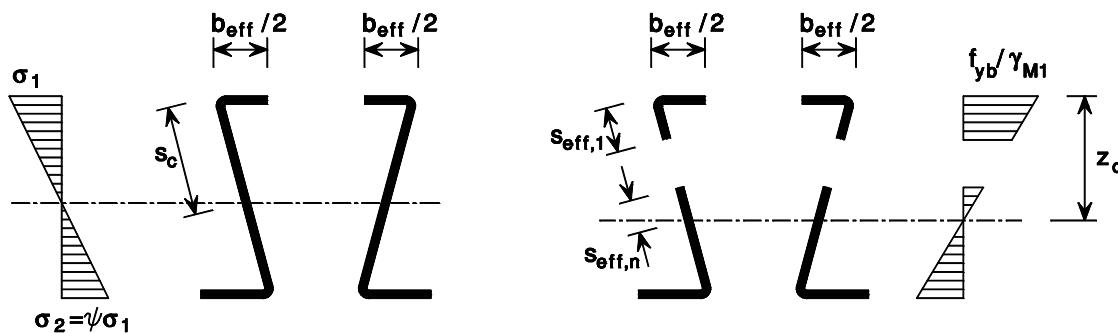
Η προκύπτουσα καμπτική ροπή αντοχής ως συνάρτηση ενός καθοριστικού στοιχείου δίνεται στο σχήμα 3.9.

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

- Ασκείται καμπτική ροπή μόνον ως προς έναν κύριο άξονα της διατομής.
- Το μέλος δεν υπόκειται σε στρέψη ή σε στρεπτικό, στρεπτοκαμπτικό ή πλευρικό ή στρεπτικό ή στρεβλωτικό λυγισμό.
- Η γωνία φ ανάμεσα στον κορμό και το πέλμα είναι μεγαλύτερη από 60° .

Εάν τα παραπάνω δεν ικανοποιούνται, χρησιμοποιείται η εξής έκφραση :

$$M_{c,Rd} = W_{el} f_{ya} / \gamma_{M0} \quad (3.17)$$



Σχήμα 3.10 : Ενεργός διατομή για κάμψη

Η ροπή αντίστασης της ενεργού διατομής W_{eff} προσδιορίζεται με βάση την ενεργό διατομή μόνον για καμπτική ροπή ως προς τον σχετικό κύριο άξονα, με μέγιστη τάση $\sigma_{max,Ed}$ ίση προς f_{yb} / γ_{M0} , λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού και του λυγισμού με

στρέβλωση, όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα. Στην περίπτωση που μπορεί να υπάρξει διατμητική υστέρηση, πρέπει να ληφθεί υπόψη η επιρροή της.

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

3.6.2 Ελαστική και ελαστοπλαστική αντοχή με διαρροή του εφελκυσμένου πέλματος μόνο

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ανάλυση λυγισμού με βάση τις διατάξεις του Ευρωκώδικα

4.1 Γενικά στοιχεία εξεταζόμενων διατομών

Βάσει των διατάξεων που ορίζει ο Ευρωκώδικας θα υπολογιστεί η αντοχή σχεδιασμού των διατομών υπό μονοαξονική κάμψη. Στην παρούσα εργασία αναλύθηκαν διατομές C και Z, χωρίς ακραίες ενισχύσεις και με ακραίες κάθετες ενισχύσεις, χωρίς οπές στον κορμό. Κάθε φορέας έχει μήκος $l = 1200\text{mm}$. Η διαδικασία παρατίθεται ενδεικτικά για τη διατομή C και με τον ίδιο τρόπο προκύπτει το αποτέλεσμα για τη διατομή Z. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο τέλος του κεφαλαίου.

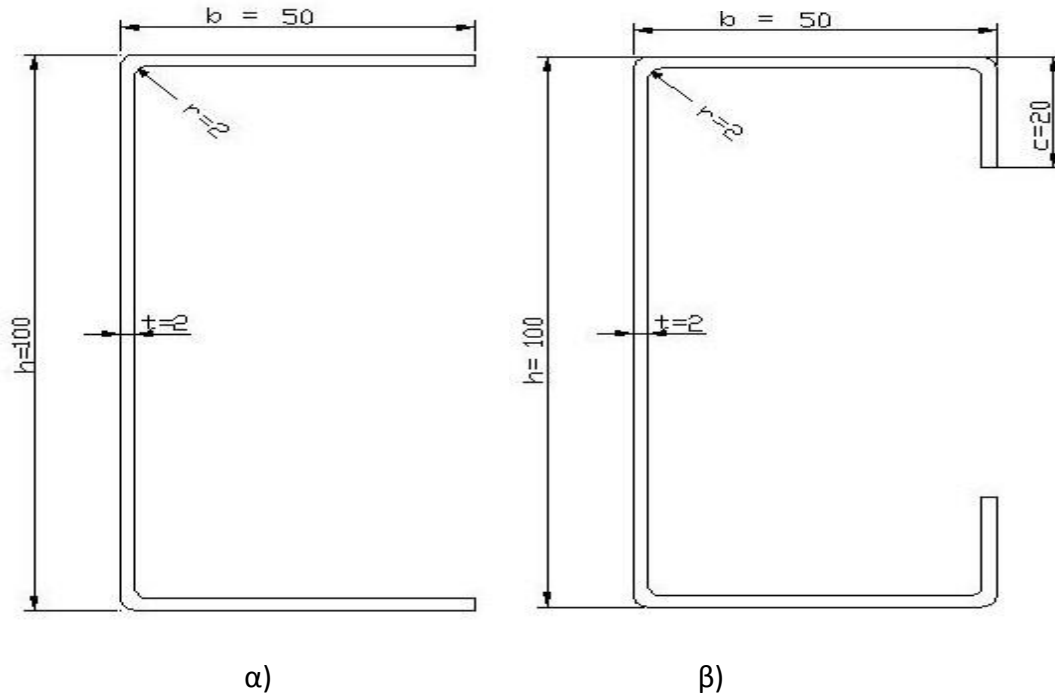
Πίνακας 4.1 : Διαστάσεις εξεταζόμενων διατομών

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

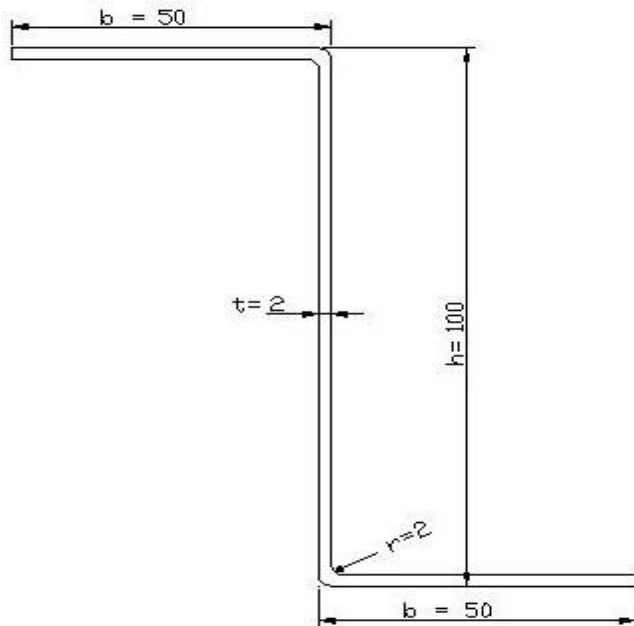
Όπου :

- h, ύψος κορμού
- b, πλάτος πέλματος
- c, εύρος ενίσχυσης
- r, ακτίνα προσαρμογής
- t, πάχος διατομής

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

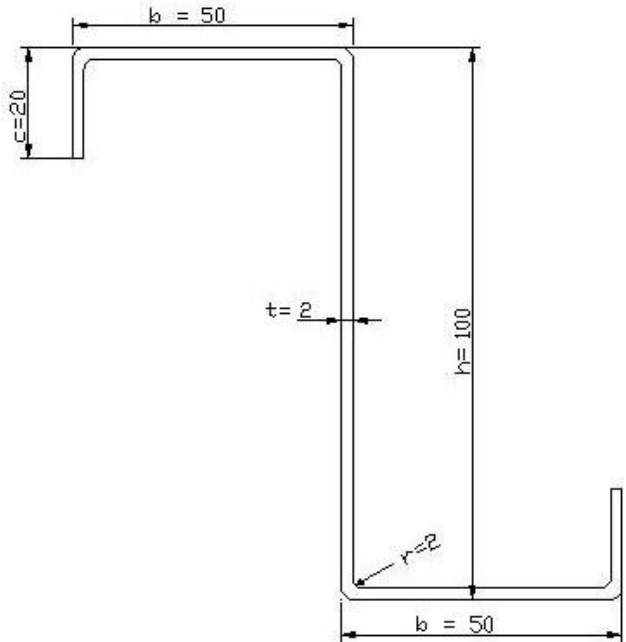


Σχήμα 4.1 : Διατομή C α) χωρίς ενισχύσεις και β) με ακραίες κάθετες ενισχύσεις



Σχήμα 4.2 : Διατομή Z χωρίς ενισχύσεις

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



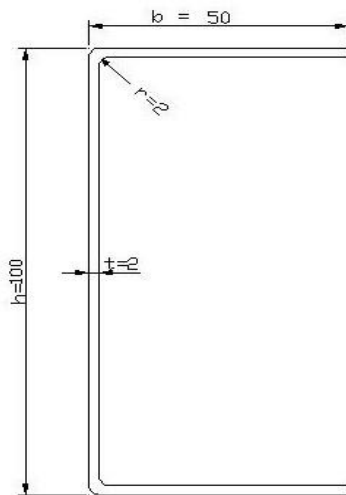
Σχήμα 4.3 : Διατομή Z με ακραίες κάθετες ενισχύσεις

4.2 Προσδιορισμός της ροπής αντοχής της διατομής

4.2.1 Διατομή C χωρίς ενισχύσεις

Θα υπολογιστεί η ροπή αντοχής σε μονοαξονική κάμψη της διατομής C χωρίς ενισχύσεις (Σχήμα 4.4) από χάλυβα S355MC.

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



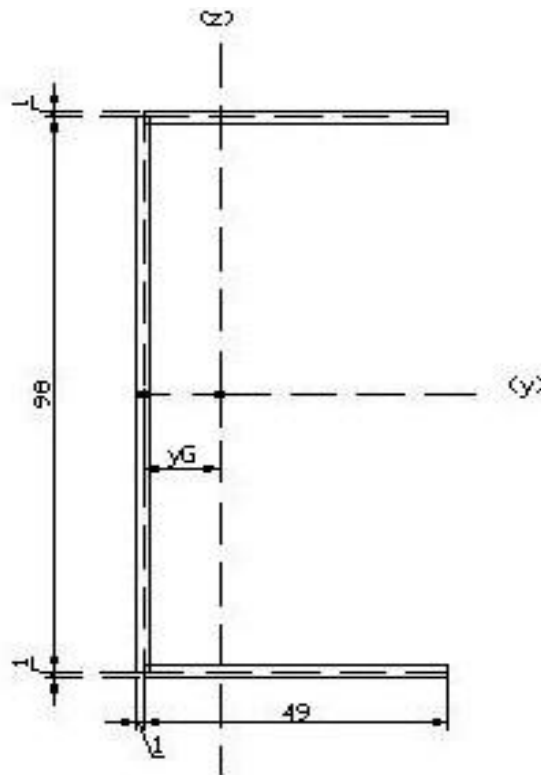
Σχήμα 4.4 : Διατομή C χωρίς ενισχύσεις

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 δυο παραπάνω συνθήκες μπορούμε να αγνοήσουμε την επιρροή των στρογγυλεμένων γωνιών και να θεωρήσουμε ότι η διατομή αποτελείται 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 διακρίνεται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5 : Διατομή C από επίπεδα στοιχεία

Τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής είναι τα εξής:

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

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

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

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

2.Ενεργός διατομή πέλματος

Λόγω της καταπονήσεως της διατομής σε κάμψη , θα εφελκύεται το κάτω πέλμα και έτσι θα είναι πλήρως ενεργό , ενώ θλίβεται το άνω πέλμα και έτσι θα προσδιορίσουμε την ενεργό διατομή του.

Σύμφωνα με τη θεώρηση που έχουμε κάνει , το άνω πέλμα αποτελεί ένα απλά στηριζόμενο στοιχείο υπο ομοιόμορφη θλίψη.

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

$$\Psi = \sigma_2/\sigma_1 = 1$$

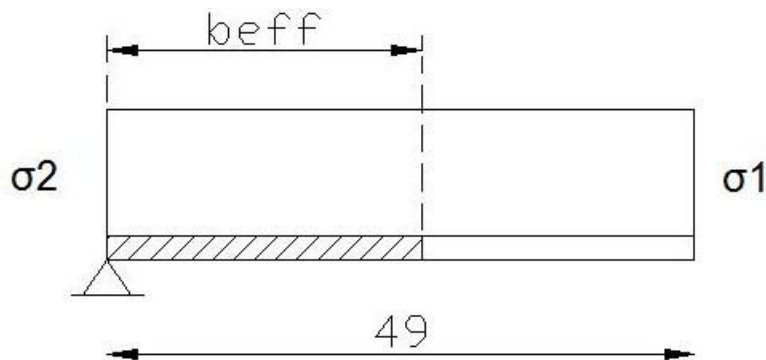
Άρα , ο συντελεστής κυρτώσεως είναι $K_\sigma = 0,43$

Για τη λυγηρότητα $\bar{\lambda}_p$ έχουμε :

$$\lambda_p = 1,052 \cdot \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E \cdot K_\sigma}} = 1,052 \cdot \frac{49}{2} \sqrt{\frac{355}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,43}} = 1,616 > 0,673$$

$$\rho = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p}\right) \cdot \frac{1}{\lambda_p} = \left(1 - \frac{0,22}{1,616}\right) \cdot \frac{1}{1,616} = 0,5346$$

Επομένως $b_{eff} = \rho b_p = 0,5345 \cdot 49 = 26,19 \text{ mm}$ (σχήμα 4.6)



Σχήμα 4.6 : Ενεργός διατομή πέλματος

3.Υπολογισμός κέντρου βάρους διατομής με ενεργά πέλματα και πλήρη κορμό

Λόγω της απομειώσεως του άνω πέλματος σε αντίθεση με το κάτω πέλμα, παρατηρείται μια μετατόπιση του κέντρου βάρους κατά τον άξονα z (κατακόρυφο άξονα) σε νέα θέση με τεταγμένη Z_G , μετρώμενη από το κέντρο βάρους του κάτω πέλματος :

$$z_G = \frac{26,19 \cdot 2 \cdot 98 + 98 \cdot 2 \cdot 49}{(26,19 + 98 + 49) \cdot 2} = 42,55 \text{ mm}$$

4. Ενεργός διατομή κορμού

Ο κορμός είναι ένα διπλά στηριζόμενο στοιχείο και ισχύει :

$$\Psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-42,55}{98 - 42,55} = -0,7674$$

Όπως φαίνεται, $0 > \Psi > -1$ και

$$K_\sigma = 7,81 - 6,92\Psi + 9,78\Psi^2 = 7,81 - 6,92 \cdot (-0,7674) + 9,78 \cdot 0,7674^2 = 18,88$$

Επομένως διαδοχικά λαμβάνουμε :

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{b_p}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_{yb}}{E \cdot K_\sigma}} = 1,052 \cdot \frac{49}{2} \sqrt{\frac{355}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 18,88}} = 0,24 < 0,673$$

Άρα $\rho = 1,00$ (δεν υφίσταται περαιτέρω απομείωση κορμού) και το ενεργό πλάτος του κορμού προκύπτει :

$$h_{eff} = h_c = \frac{h_p}{(1 - \Psi)} = \frac{98}{1 + 0,7674} = 55,45mm$$

$$h_{eff1} = 0,4 \cdot h_{eff} = 22,18mm$$

$$h_{eff2} = 0,6 \cdot h_{eff} = 33,27mm$$

5. Εμβαδόν ενεργού διατομής και μετατόπιση κέντρου βάρους

Το εμβαδόν της ενεργού διατομής δίδεται από τη σχέση :

$$A_{eff} = [b_{eff} + b_p + h_{eff1} + h_{eff2} + (h_p - h_c)] \cdot t = 346,38mm^2 \quad (< A_g)$$

Το κέντρο βάρους της ενεργού διατομής υπολογίζεται ως εξής :

$$Y_{G,eff} = \frac{26,19 \cdot 2 \cdot 13,095 + 49 \cdot 2 \cdot 24,5}{346,38} = 8,91mm$$

$$Z_{G,eff} = \frac{26,19 \cdot 2 \cdot 98 + 22,18 \cdot 2 \cdot 86,91 + 33,27 \cdot 2 \cdot 59,185 + 42,55 \cdot 2 \cdot 21,28}{346,38} = 42,55mm$$

Το κέντρο βάρους μετακινήθηκε κατά :

$$e_{YN} = Y_G - Y_{G,eff} = 12,25 - 8,91 = 3,34mm \quad (\text{μετακίνηση προς τα θετικά του άξονα})$$

Και κατά :

$$e_{ZN} = Z_G - Y_{G,eff} = 49 - 42,55 = 6,45mm \quad (\text{μετακίνηση προς τα θετικά του άξονα})$$

6.Ροπή αντοχής διατομής

Η αντοχή της ενεργού διατομής δίδεται από τη σχέση :

$$M_{Y,Rd} = W_{eff,com} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_M}, \quad \text{όπου } W_{eff} = \frac{I_{eff}}{z_{com}}$$

Η απόσταση του κέντρου βάρους της ενεργού διατομής από την κάτω ίνα του κάτω πέλματος είναι :

$$z_\kappa = z_{G,eff} + 1 = 43,55mm$$

$$z_{com} = h - z_\kappa = 100 - 43,55 = 56,45mm$$

Και άρα :

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

$$I_{y,eff} = \frac{2 \cdot 22,18^3}{12} + \frac{2 \cdot 33,27^3}{12} + \frac{2 \cdot 42,55^3}{12} + \frac{49 \cdot 2^3}{12} + \frac{26,19 \cdot 2^3}{12} \\ + 26,19 \cdot 2 \cdot (98 - 42,55)^2 + 49 \cdot 2 \cdot (42,55)^2 + 22,18 \cdot 2 \cdot (86,91 - 42,55)^2 \\ + 22,18 \cdot 2 \cdot (86,91 - 42,55)^2 + 42,55 \cdot 2 \cdot \left(\frac{42,55}{2}\right)^2 = 503.551,71 \text{mm}^4$$

$$W_{eff,com} = \frac{I_{eff}}{z_{com}} = \frac{503.551,71}{56,45} = 8.920,31 \text{mm}^3$$

$$M_{Y,Rd} = W_{eff,com} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 3.166.711,39 \text{Nmm} = \mathbf{3.166,71 \text{kNmm}}$$

4.2.2 Διατομή C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα

Η ενεργός διατομή θα προσδιοριστεί με την απλουστευμένη μέθοδο . Λόγω της κάμψεως το κάτω πέλμα εφελκύεται και άρα θεωρείται ολόκληρο ενεργό. Το άνω πέλμα θλίβεται και άρα θα πρέπει να προσδιορίσουμε την ενεργό διατομή του.

Ο κορμός τέλος, θλίβεται σε ένα τμήμα του και εφελκύεται στο υπόλοιπο. Το εφελκυτόμενο τμήμα είναι πλήρως ενεργό , ενώ το θλιβόμενο πρέπει να απομειωθεί.

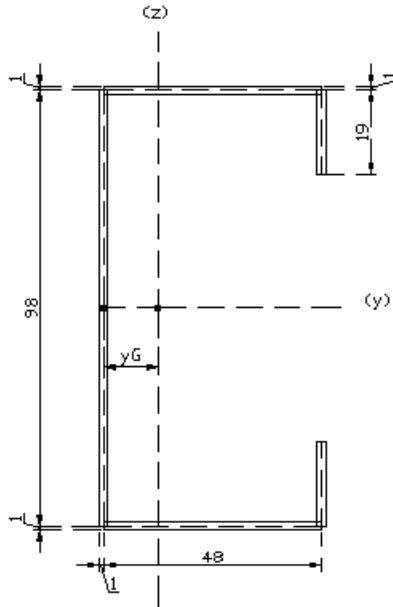
1. Έλεγχος επιρροής στρογγυλεμένων γωνιών.

Ισχύει ότι : $r = 2 \text{mm}$, $5t = 10 \text{mm} \rightarrow r < 5t$

$$\frac{r}{b_p} = \frac{2}{(50 - 2)} = 0,042 < 0,15$$

Εφ' όσον ικανοποιούνται οι δυο παραπάνω συνθήκες μπορούμε να αγνοήσουμε την επιρροή των στρογγυλεμένων γωνιών και να θεωρήσουμε ότι η διατομή αποτελείται 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 διακρίνεται στο σχήμα 4.7.

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



Σχήμα 4.7 : Διατομή C με ακραίες ενισχύσεις από επίπεδα στοιχεία

Τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής είναι τα εξής :

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

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

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

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

2.Ενεργός διατομή πέλματος

Προϋποθέσεις κανονισμού :

i) $45^\circ \leq \phi \leq 135^\circ$

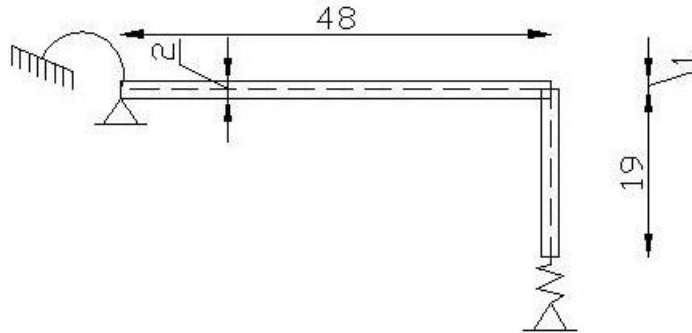
$\phi = 90^\circ$

ii) $c_p > 0,2b_p \rightarrow c = 20 \text{ mm} > 0,2 \cdot 48 = 9,6 \text{ mm}$

iii) $\frac{b_p}{t} \leq 60 \rightarrow \frac{48}{2} = 24 \leq 60$

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Επειδή ικανοποιούνται όλα τα παραπάνω κριτήρια μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η ακραία ενίσχυση του πέλματος λειτουργεί ως στήριξη. Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα, είναι αυτό που διακρίνεται στο σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8 : Προσομοίωση πέλματος – ενίσχυσης

Βήμα 1^ο : Προσδιορίζεται η ενεργός διατομή θεωρώντας την ενίσχυση σαν πλήρη στήριξη. Τότε το πέλμα θεωρείται διπλά στηριζόμενο ενδιάμεσο στοιχείο

A) Άνω πέλμα :

Θεωρώντας τη θλίψη με θετικό πρόσημο και επειδή ισχύει $\sigma_1 = \sigma_2$ θα είναι $\Psi = \sigma_2 / \sigma_1 = 1$.

Άρα $K_\sigma = 4$

$$\sigma_{com} = \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 355 \text{ MPa}$$

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

Άρα $\rho = 1,00$

$b_{eff} = 48 \text{ mm}$

$b_{eff1} = b_{eff2} = 0,5 \cdot 48 = 24 \text{ mm}$

B) Ενίσχυση :

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

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

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

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

Στην περίπτωση μας έχουμε $\frac{c_p}{b_p} = \frac{19}{48} = 0,396$ δηλαδή $0,35 < 0,396 < 0,60$

$$K_\sigma = 0,5 + 0,83 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{c_p}{b_p} - 0,35\right)^2} = 0,603 \quad K_\sigma = 0,5 + 0,83 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{c_p}{b_p} - 0,35\right)^2} = 0,603$$

Για τη λυγηρότητα έχουμε :

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{c_p}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_{yb}}{E \cdot K_\sigma}} = 1,052 \cdot \frac{19}{2} \cdot \sqrt{\frac{355}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,603}} = 0,529 < 0,673$$

Άρα $\rho = 1,00$

$c_{eff} = c_p = 19 \text{ mm}$

$$A_s = (b_{eff2} + c_{eff}) \cdot t = (24 + 19) \cdot 2 = 86 \text{ mm}^2$$

Η θέση του κέντρου βάρους αυτού του ενεργού τμήματος (δηλαδή $b_{eff,2}$, c_{eff}) από το άνω άκρο του πέλματος είναι :

$$Z_{KB} = \frac{24 \cdot 2 \cdot 1 + 19 \cdot 2 \cdot 10,5}{86} = 5,20 \text{ mm}$$

Η ροπή αδρανείας ως προς τον κεντροβαρικό άξονα α-α είναι :

$$I_s^{(a)} = \frac{24 \cdot 2^3}{12} + 24 \cdot 2 \cdot (4,20)^2 + \frac{2 \cdot 19^3}{12} + 19 \cdot 2 \cdot (1 + 9,5 - 5,20)^2 = 3.129,49 \text{ mm}^4$$

Βήμα 2° : Ο μειωτικός συντελεστής χ προσδιορίζεται ως εξής :

$$\frac{I_s}{A_s^2} = 0,423 \geq 0,31 \cdot \left(1,5 + \frac{h_p}{b_p}\right) \cdot \left(\frac{f_{yb}}{E}\right)^2 \cdot \left(\frac{b_p}{t}\right)^3 = 0,043 \rightarrow \chi = 0,5$$

Βήμα 3° : Μειωμένα χαρακτηριστικά διατομής.

Το απομειωμένο εμβαδόν $A_{s,red}$, το οποίο λαμβάνεται υπόψη στον καμπτικό λυγισμό δίδεται από τη σχέση :

$$A_{s,red} = \chi \cdot A_s \cdot \left[\frac{f_{yb} / \gamma_{M1}}{\sigma_{com,Ed}} \right], \text{ με } A_{s,red} \leq A_s$$

$\sigma_{com,Ed}$ είναι η τάση που υπολογίζεται στο κέντρο βάρους της ενισχύσεως.

$$\text{Οπότε : } A_{s,red} = 0,5 \cdot 86 = 43 \text{ mm}^2$$

Στον καθορισμό των ιδιοτήτων της ενεργού διατομής, το απομειωμένο εμβαδόν $A_{s,red}$ θα πρέπει να αντιπροσωπευθεί με τη χρήση ενός μειωμένου πάχους :

$$t_{red} = \frac{t \cdot A_{s,red}}{A_s} = 0,5 \cdot 2 = 1,00 \text{ mm}$$

Η ενεργός διατομή του πέλματος είναι :

$$A_{eff,\pi} = A_{s,red} + t \cdot b_{eff1} = 43 + 2 \cdot 24 = 91 \text{ mm}^2$$

3. Ενεργός διατομή κορμού :

Λόγω της απομειώσεως μόνο του άνω πέλματος, το κέντρο βάρους της διατομής μετατοπίζεται, με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται η κατανομή των τάσεων στον κορμό, που έχει σαν αποτέλεσμα να θλίβεται μεγαλύτερο μέρος του κορμού και να εφελκύεται μικρότερο. Υπολογίζεται η νέα θέση του κέντρου βάρους :

$$Z_G = \frac{24 \cdot (2 \cdot 98 + 1 \cdot 98,5) + 19 \cdot 1 \cdot 86 + 98 \cdot 2 \cdot 49 + 19 \cdot 2 \cdot 10}{24 \cdot 2 + 24 \cdot 1 + 19 \cdot 1 + 98 \cdot 2 + 46 \cdot 2 + 19 \cdot 2} = 44,81 \text{ mm}$$

$$\Psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -\frac{44,81}{53,19} = -0,842$$

Ο κορμός είναι διπλά στηριζόμενο στοιχείο. Ο συντελεστής κυρτώσεως σύμφωνα με τον EC3 για $-1 < \Psi < 0$, δίδεται από την παρακάτω σχέση :

$$K_\sigma = 7,81 - 6,92 \cdot \Psi + 9,78 \cdot \Psi^2 = 20,57$$

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{98}{2} \cdot \sqrt{\frac{355}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 20,57}} = 0,467 < 0,673$$

Άρα $\rho = 1,00$

Τα ενεργά πλάτη του κορμού είναι :

$$h_{eff} = h_c = \frac{h_p}{1 - \Psi} = \frac{100}{1 + 0,842} = 54,29 \text{ mm}$$

$$h_{eff1} = 0,4 \cdot h_{eff} = 21,72 \text{ mm}$$

$$h_{eff2} = 0,6 \cdot h_{eff} = 32,57 \text{ mm}$$

4.Συνολική ενεργός διατομή

Το εμβαδόν της ενεργού διατομής δίδεται από τη σχέση :

$$A_{eff,\pi} = (20 + 46 + 24) \cdot 2 + (24 + 19) \cdot 1 = 223 \text{ mm}^2$$

$$A_{eff,\kappa} = 44,81 \cdot 2 + 21,72 \cdot 2 + 32,57 \cdot 2 = 198,2 \text{ mm}^2$$

$$A_{eff} = A_{eff,\pi} + A_{eff,\kappa} = 223 + 198,2 = 421,2 \text{ mm}^2$$

Το κέντρο βάρους της ενεργού διατομής βρίσκεται στη θέση :

$$y_G = \frac{46 \cdot 2 \cdot 23 + 19 \cdot 2 \cdot 46 + 24 \cdot 2 \cdot 12 + 24 \cdot 36 + 20 \cdot 46,5}{421,2} = 14,80 \text{ mm}$$

$$z_G = \frac{24 \cdot (2 \cdot 98 + 1 \cdot 98,5) + 19 \cdot 1 \cdot 86 + (76,563 \cdot 38,282 + 21,72 \cdot 87,28 + 19 \cdot 9,5) \cdot 2}{421,2} = 44,43 \text{ mm}$$

Παρατηρείται ότι το κέντρο βάρους μετακινήθηκε κατά :

$$e_{yN} = y_G - y_{G,eff} = 17,79 - 14,80 = 2,99 \text{ mm}$$

$$e_{zN} = z_G - z_{G,eff} = 49 - 44,43 = 4,57 \text{ mm}$$

5.Υπολογισμός της ροπής αντοχής της διατομής

Η αντοχή της ενεργού διατομής δίδεται από τη σχέση :

$$M_{Y,Rd} = W_{eff,com} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_M} \quad \text{όπου :} \quad W_{eff,com} = \frac{I_{eff}}{z_{com}}$$

Η απόσταση του κέντρου βάρους της ενεργού διατομής από την κάτω ίνα του κάτω πέλματος είναι $z_k = 44,43 + 1 = 45,43 \text{ mm}$ οπότε $z_{com} = 100 - 45,43 = 54,57 \text{ mm}$

Η ροπή αδρανείας της ενεργού διατομής ως προς τον κεντροβαρικό της άξονα είναι:

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

$$I_{y,eff} = \frac{2 \cdot 76,563^3}{12} + \frac{2 \cdot 21,72^3}{12} + \frac{46 \cdot 2^3}{12} + \frac{23 \cdot 1^3}{12} + \frac{1 \cdot 19^3}{12} + \frac{2 \cdot 19^3}{12} + 76,563 \cdot 2 \cdot (44,43 - 38,28)^2 + 21,72 \cdot 2 \cdot (87,284 - 44,43)^2 + 23 \cdot 1 \cdot (98,5 - 44,43)^2 + 19 \cdot 2 \cdot (44,43 - 10)^2 + 19 \cdot 1 \cdot (88 - 44,43)^2 + 46 \cdot 2 \cdot 44,43^2 + 23 \cdot 1 \cdot (98,5 - 44,43)^2 = 645.788,76 \text{mm}^4$$

$$W_{eff,com} = \frac{I_{y,eff}}{z_{com}} = \frac{645788,76}{54,57} = 11.830,67 \text{mm}^3$$

$$\text{Οπότε } M_{Y,Rd} = W_{eff,com} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = 11830,67 \cdot \frac{355}{1,00} = 4.199.886,58 \text{ Nmm} = \mathbf{4.199,89 \text{kNmm}}$$

Πίνακας 4.2 : Ροπή αντοχής με βάση τον EC3

Διατομή	Ροπή αντοχής διατομής βάσει EC3(kNmm)
C, Z χωρίς ενισχύσεις	3.166,71
C, Z με ενισχύσεις	4.199,89

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Στατικό προσομοίωμα δοκού

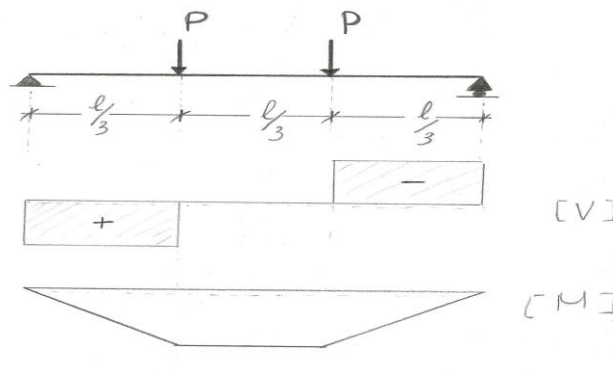
5.1 Κριτήρια επιλογής στατικού μοντέλου

Βασική επιδίωξη μας αποτέλεσε η μελέτη ισοστατικών δοκών στις οποίες δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις εντατικών μεγεθών (καμπτική ροπή με αξονική – καμπτική ροπή με τέμνουσα). Ο χάλυβας ψυχρής ελάσεως αναπτύσσει την ίδια ακριβώς συμπεριφορά με το χάλυβα θερμής ελάσεως σε θέματα αλληλεπίδρασης, με αποτέλεσμα τη μείωση της ροπής αντοχής M_{Rd} .

Ένα ακόμη ανεπιθύμητο φαινόμενο, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αποδείχθηκε ο πλευρικός - στρεπτοκαμπτικός λυγισμός. Σε αυτή την περίπτωση, ανεξαρτήτως στατικού μοντέλου, κατέστη αναγκαία η χρήση πλευρικής εξασφάλισης.

5.2 Επιλογή στατικού μοντέλου

Για τους προαναφερθέντες λόγους επιλέχθηκε αμφιέρειστη δοκός με σημειακά φορτία στα τρίτα της δοκού όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 : Αμφιέρειστη δοκός και αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη

Το συγκεκριμένο στατικό μοντέλο υπερτερεί σε σχέση με την αμφιέρειστη με συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσον της δοκού διότι στο μεσαίο κομμάτι δεν υπάρχει τέμνουσα και μπορούμε να θεωρήσουμε πως το τμήμα αυτό καταπονείται από καθαρή κάμψη.

5.3 Υπολογισμός μεγίστου φορτίου αντοχής της δοκών με βάση τα αποτελέσματα του EC3.

Η ροπή αντοχής των διατομών που υπολογίστηκε στα προηγούμενο κεφάλαιο θα πρέπει να μετατραπεί σε φέρουσα ικανότητα δοκού με βάση τη φόρτιση και το στατικό μοντέλο.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δοκοί μήκους $l = 1200mm$ με μέγιστη διάσταση διατομής $h=100mm$ και πάχος $t=2mm$. Ισχύει:

$$t < \frac{h}{10} < \frac{l}{10} ,$$

$$2 < \frac{100}{10} < \frac{1200}{10}$$

Άρα, πρόκειται για ραβδωτούς φορείς με "λεπτότοιχη διατομή" και η στατική προσέγγιση μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη στατική ραβδωτών φορέων (Σχήμα 5.1).

Είναι εκ των προτέρων γνωστό πως η μέγιστη τιμή καμπτικής ροπής εμφανίζεται στο μεσαίο τμήμα της δοκού και προκύπτει από τη σχέση :

$$M_{\max} = \frac{P \cdot l}{3}$$

και λύνοντας ως προς P η σχέση μετασχηματίζεται σε:

$$P = \frac{3 \cdot M_{\max}}{l}$$

Άρα, οι τιμές ροπής που προέκυψαν με βάση τον EC3 μεταφράζονται σε φορτίο. Για δοκούς C και Z χωρίς ενισχύσεις θα ισχύει :

$$P_{\max} = \frac{3 \cdot (3.166,71)}{1200} = 7,92kN$$

Ενώ για τις δοκούς C και Z με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα το μέγιστο φορτίο υπολογίζεται ως εξής :

$$P_{\max} = \frac{3 \cdot (4.199,89)}{1200} = 10,50kN$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Προσδιορισμός του μέγιστου φορτίου κάμψης με χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων

6.1 Γενικά

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

Στην παρούσα εργασία η επίλυση και ανάλυση των προς εξέταση διατομών έγινε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FEMAP v10 for Windows, το οποίο επιτρέπει στο μηχανικό την προσομοίωση της συμπεριφοράς μιας κατασκευής. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας τόσο του δικτύου στοιχείων κατά την προεπεξεργασία του φορέα όσο και τη δυνατότητα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Η ανάλυση γίνεται με τη διαίρεση του φορέα σε μικρότερα στοιχεία τα οποία συνδέονται με κόμβους.

Η πορεία που ακολουθείται έχει ως 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. Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία μοντελοποίησης και ανάλυσης, καθώς και τα αποτελέσματα στο πρόγραμμα FEMAP v10.

6.2 Περιγραφή μοντέλων

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν 28 φορείς , μήκους $l = 1200mm$ και πάχους $t = 2mm$ ο καθένας. Οι μορφές διατομών είναι τύπου Z και C α) χωρίς ενίσχυση και β) με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα. Για τις προαναφερθείσες περιπτώσεις ο φορέας

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

Με το πρόγραμμα FEMAP v10 πραγματοποιήθηκε μη γραμμική – στατική ανάλυση και προσδιορίστηκε η φέρουσα ικανότητα των φορέων σε μονοαξονική κάμψη.

6.3 Περιγραφή προσομοίωσης ενός φορέα με το πρόγραμμα FEMAP v10.

6.3.1 Δημιουργία της γεωμετρίας (modeling)

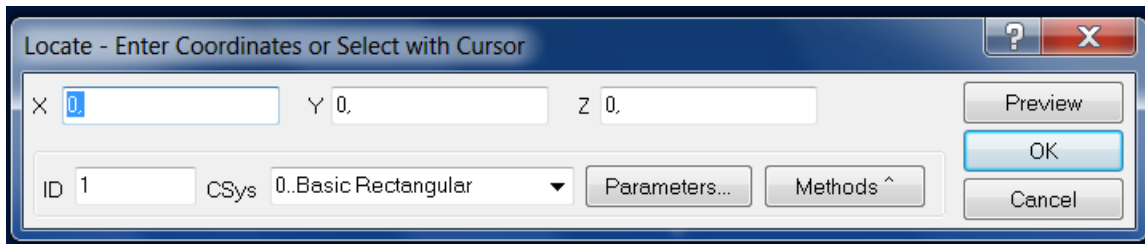
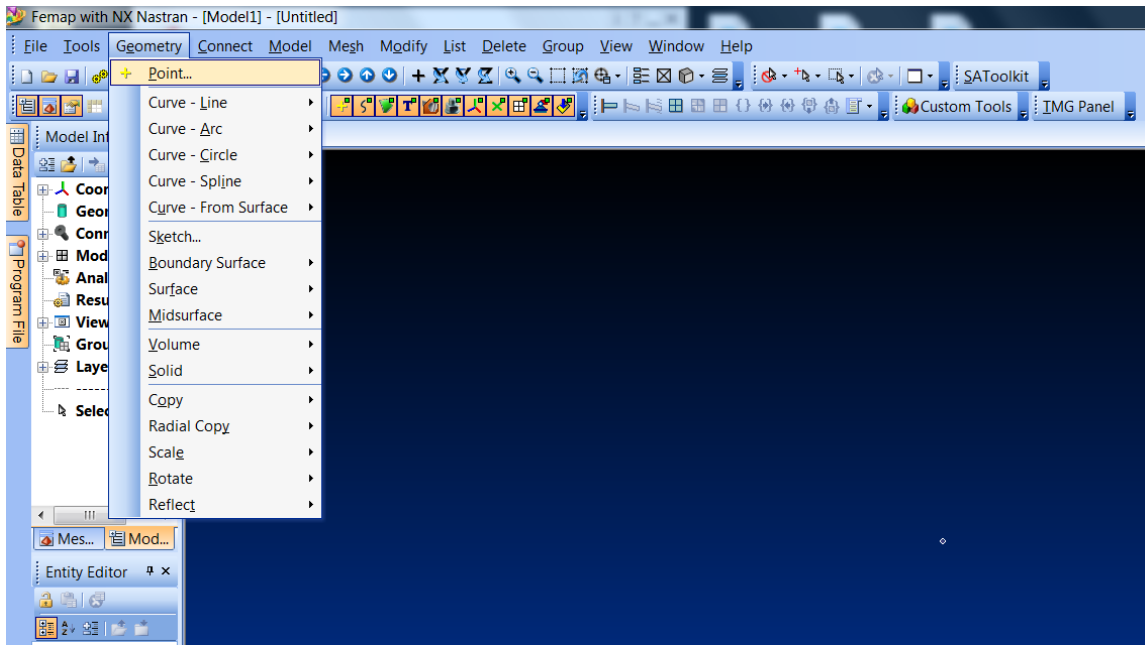
Το μέλος αποτελείται από τον κορμό, τα πέλματα και τις ακραίες ενισχύσεις των πελμάτων. Οι ενισχύσεις προστίθενται για την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του μέλους και της τοπικής ακαμψίας του. Για μέλος χωρίς ενισχύσεις, η προσομοίωση γίνεται δημιουργώντας τρεις επιφάνειες εκ των οποίων οι δυο είναι 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 κάθετες ενισχύσεις γίνεται με τις επιφάνειες που προαναφέρθηκαν συν άλλες δυο επιφάνειες που η καθεμία είναι κάθετη σε κάθε πέλμα αντίστοιχα και αφορούν τις ενισχύσεις. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά η προσομοίωση ενός μέλους Z, με ενίσχυση και με δυο οπές, μια κυκλική και μια τετραγωνική.

Τα δεδομένα για τη δημιουργία της γεωμετρίας του φορέα εισάγονται ως εξής :

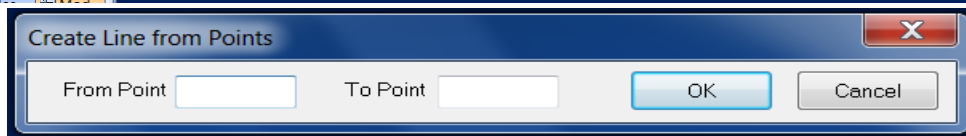
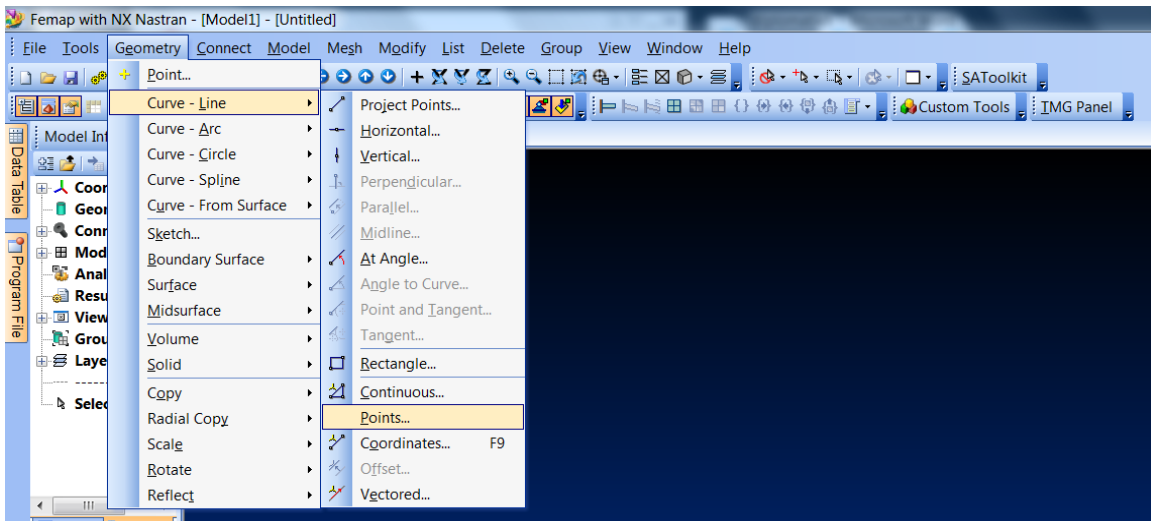
Από το μενού « Geometry » επιλέγεται η εντολή « Point». Στο πλαίσιο διαλόγου που εμφανίζεται εισάγουμε τις συντεταγμένες X, Y, Z για κάθε σημείο.

Έχοντας ορίσει τα ακραία σημεία του φορέα, μπορούμε να προχωρήσουμε στην σχεδίαση των γραμμών που θα συνδέσουν αυτά τα σημεία που ορίστηκαν προηγουμένως. Έτσι ο φορέας θα αποκτήσει μια πρώτη 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 μια γραμμή.

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



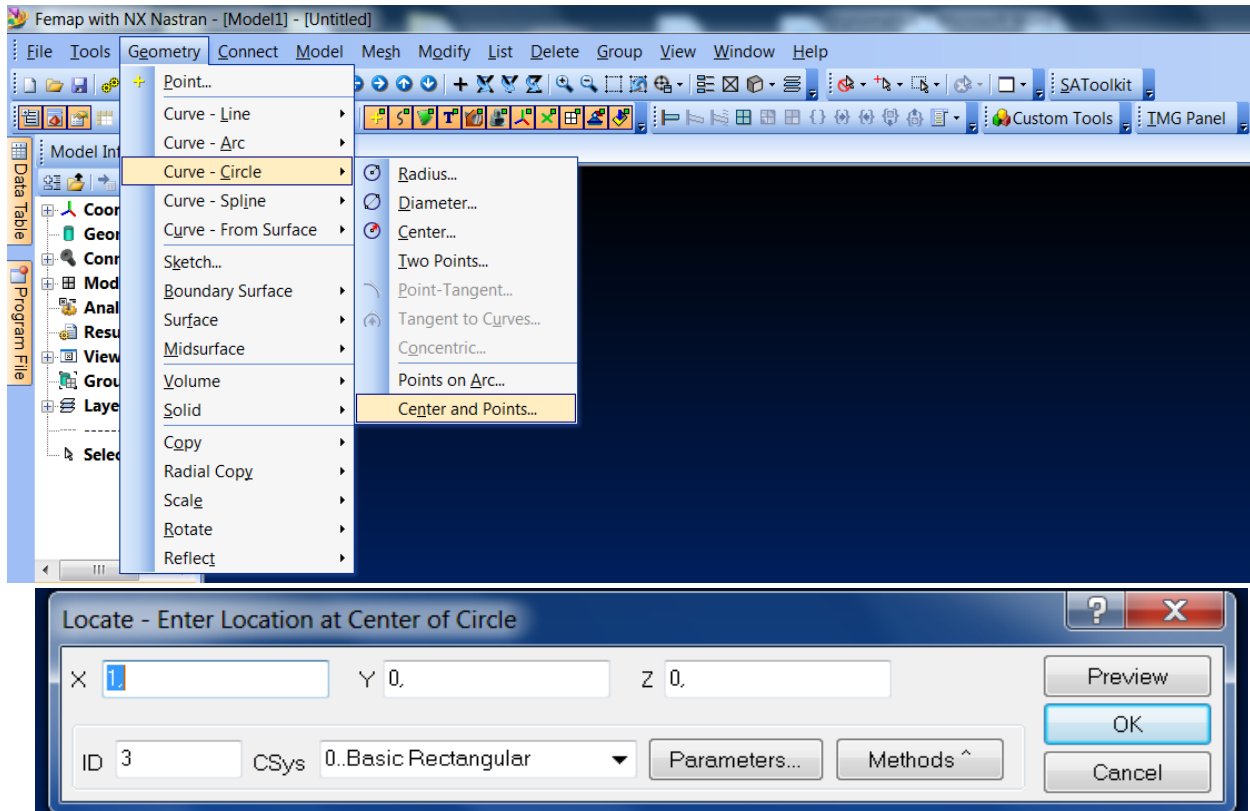
Σχήμα 6.1 : Πλαίσιο διαλόγου δημιουργίας σημείων



Σχήμα 6.2 : Πλαίσιο διαλόγου σχεδίασης γραμμών

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

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



Σχήμα 6.3 : Πλαίσιο διαλόγου σχεδίασης κυκλικής οπής

Για το σχεδιασμό μιας τετραγωνικής οπής στον κορμό επιλέγουμε από το μενού « Geometry » την εντολή « Curve – Line » και μετά « Rectangle ». Στο πλαίσιο διαλόγου που εμφανίζεται ορίζονται οι συντεταγμένες δυο σημείων στη διαγώνιο του τετραγώνου.

Τέλος, από το μενού « Geometry » επιλέγεται η εντολή « Surface » και έπειτα η εντολή « Edge Curves » με την οποία ορίζουμε τις επιφάνειες του φορέα επιλέγοντας τις τέσσερις γραμμές που τις οριοθετούν. Ειδικά για την επιφάνεια του κορμού με οπή επιλέγεται η εντολή « Geometry », έπειτα η εντολή « Boundary Surface » και στο πλαίσιο διαλόγου που εμφανίζεται επιλέγουμε τις ευθείες που οριοθετούν την επιφάνεια καθώς και τη γραμμή που αναπαριστά την οπή. Με αυτή τη διαφοροποίηση εντάσσεται στη γεωμετρία και ανάλυση η μορφή της εκάστοτε οπής. Με τον ορισμό των επιφανειών ολοκληρώνεται το σχεδιαστικό κομμάτι της εργασίας.

6.3.2 Καθορισμός υλικών

Το FEMAP v10 υποστηρίζει επτά τύπους υλικών , ώστε να μπορούν να προσομοιωθούν διάφορα υλικά ανάλογα με τις ιδιότητες τους. Συγκεκριμένα υποστηρίζονται :

A) τα ιστροπικά υλικά (isotropic) των οποίων οι ιδιότητες έχουν ίδια τιμή και κατά τις τρεις διαστάσεις του χώρου

B) τα ορθότροπα υλικά με διαφορετικές ιδιότητες σε δυο και τρεις διαστάσεις (2D orthotropic ή 3D orthotropic)

Δ)τα ανισότροπα υλικά , με διαφορετικές ιδιότητες σε δυο και τρεις διαστάσεις (2D anisotropic ή 3D anisotropic)

E) τα υπερελαστικά υλικά (hyperelastic)

Z) μια κατηγορία « άλλα υλικά » η οποία υποστηρίζει 85 υλικά όπως ελαστικά, αφρώδη, βισκοελαστικά κ.λ.π

Στο βήμα αυτό εισάγονται οι ιδιότητες του χάλυβα S355MC, απο τον οποίο αποτελούνται όλα τα μέλη της δοκού.

Από το μενού « Model » επιλέγεται η εντολή « Material» . Στην οθόνη εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου , που είναι ρυθμισμένο εξ' αρχής να αφορά ισότροπο υλικό (isotropic material). Σε τέσσερις υποπεριοχές ζητείται να καθοριστούν τα χαρακτηριστικά του υλικού , το οποίο αποθηκεύεται στη μνήμη του αρχείου με έναν αύξοντα αριθμό (ID) που φαίνεται στο άνω αριστερά άκρο του παραθύρου (Σχήμα 6.4).

Σε μια από τις υποπεριοχές ζητείται να καθοριστούν οι ελαστικές σταθερές του υλικού και συγκεκριμένα το μέτρο ελαστικότητας E (Youngs Modulus), το μέτρο διάτμησης G (Shear Modulus) και ο λόγος Poisson ν (Poisson's ratio) στην πρώτη και οι αντοχές σε εφελκυσμό (Tension), θλίψη (Compression) και διάτμηση (Shear) στην τρίτη.

Ορισμένες ιδιότητες όπως οι τελευταίες και εκείνες της δεύτερης περιοχής δεν είναι απαραίτητο να καθοριστούν εφόσον δεν πραγματοποιείται τέτοιου είδους ανάλυση.

Ακόμη, αν για κάποιο λόγο δεν εισαχθεί το μέτρο διάτμησης , το πρόγραμμα το υπολογίζει αυτόματα με βάση τη σχέση $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και ν ο λόγος του Poisson.

Το πρόγραμμα διαθέτει επίσης βιβλιοθήκη δεδομένων με αποθηκευμένα χαρακτηριστικά διαφόρων υλικών , τα οποία ο χρήστης μπορεί να επιλέξει με το πλήκτρο « Load ». Με το πλήκτρο « Save » μπορεί ακόμη να αποθηκεύσει στη βιβλιοθήκη του προγράμματος τα δικά του υλικά για μελλοντική χρήση.

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

The screenshot shows the 'Define Material - ISOTROPIC' dialog box with the 'General' tab selected. The 'ID' field contains '1'. The 'Title' field is empty. The 'Color' is set to '55'. The 'Layer' is set to '1'. The 'Type...' button is visible. The 'General' tab is active, showing the following fields:

- Stiffness:** Young's Modulus, E (0,); Shear Modulus, G (0,); Poisson's Ratio, nu (0,).
- Limit Stress:** Tension (0,); Compression (0,); Shear (0,).
- Thermal:** Expansion Coeff, alpha (0,); Conductivity, k (0,); Specific Heat, Cp (0,); Heat Generation Factor (0,).
- Mass Density:** (0,).
- Damping, 2C/Co:** (0,).
- Reference Temp:** (0,).

Buttons at the bottom: fxy, Load..., Save..., Copy..., OK, Cancel.

The screenshot shows the 'Define Material - ISOTROPIC' dialog box with the 'Nonlinear' tab selected. The 'ID' field contains '1'. The 'Title' field is empty. The 'Color' is set to '55'. The 'Layer' is set to '1'. The 'Type...' button is visible. The 'Nonlinear' tab is active, showing the following fields:

- Nonlinearity Type:** None, Nonlinear Elastic, Elasto-Plastic (Bi-Linear), Plastic.
- Nonlinear Properties:** Plasticity Modulus, H (0,); Compute From Tangent Modulus, Et...; Hardening Rule (0..Isotropic); Function Dependence (0..None).
- Yield Function:** Yield Criterion (0..von Mises); Initial Yield Stress (0,); Friction Angle (0,); Extended Material Model... button.

Buttons at the bottom: fxy, Load..., Save..., Copy..., OK, Cancel.

Σχήμα 6.4 : Παράθυρα διαλόγου για τον καθορισμό σταθερών υλικού και μη γραμμικότητας

6.3.2.1 Εισαγωγή των μη γραμμικών ιδιοτήτων

Η εισαγωγή της μη γραμμικής συμπεριφοράς των υλικών γίνεται με την εντολή « Nonlinear » βρίσκεται στο παράθυρο του σχήματος 6.4. Στο νέο παράθυρο διαλόγου που ανοίγει (Σχήμα 6.4) δίνεται η δυνατότητα καθορισμού τριών ειδών μη γραμμικής συμπεριφοράς υλικού :

- Μη γραμμικού ελαστικού (Nonlinear Elastic)
- Γραμμικά ελαστικού – γραμμικά κρατυνόμενου υλικού (Elasto- Plastic Bi- Linear)
- Γραμμικά ελαστικού – απολύτως πλαστικού υλικού (Plastic)

Η προσομοίωση του χάλυβα της δοκού γίνεται με τη δεύτερη κατηγορία των ελαστικά γραμμικών – γραμμικά κρατυνόμενων υλικών και τα ζητούμενα χαρακτηριστικά είναι τρία :

- 1) Το κριτήριο αστοχίας που επιλέγεται μεταξύ των τεσσάρων διατιθέμενων από το πρόγραμμα (Von Mises, Tresca, Mohr – Coulomb και Drucker Prager)
- 2) Η τάση διαρροής του υλικού (Initial Yield Stress) και
- 3) Το μέτρο κράτυνσης (Plasticity Modulus, H)

Υπάρχει ακόμη από το πρόγραμμα η δυνατότητα εισαγωγής του ακριβούς διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων του υλικού με τη μορφή συνάρτησης (Function) και χρήση του στις περιπτώσεις των μη γραμμικά ελαστικών και γραμμικά ελαστικών – απολύτως πλαστικών υλικών.

Τα χαρακτηριστικά του υλικού που καταχωρούνται σε αυτό το βήμα φαίνονται στον πίνακα 6.1 που ακολουθεί :

Πίνακας 6.1 : Τα χαρακτηριστικά του υλικού της προσομοίωσης

	S355MC
Μέτρο ελαστικότητας E (kN/mm²)	210
Λόγος Poisson ν	0,3
Αντοχή σε Εφελκυσμό (kN/mm²)	0,43
Αντοχή σε Θλίψη (Kη/mm²)	0,43
Είδος μη γραμμικότητας	Elasto-Plastic (Bi - Linear)
Μέτρο κράτυνσης (kN/mm²)	4
Κριτήριο αστοχίας	Von Mises
Τάση διαρροής (Kη/mm²)	0,355

6.3.3 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.

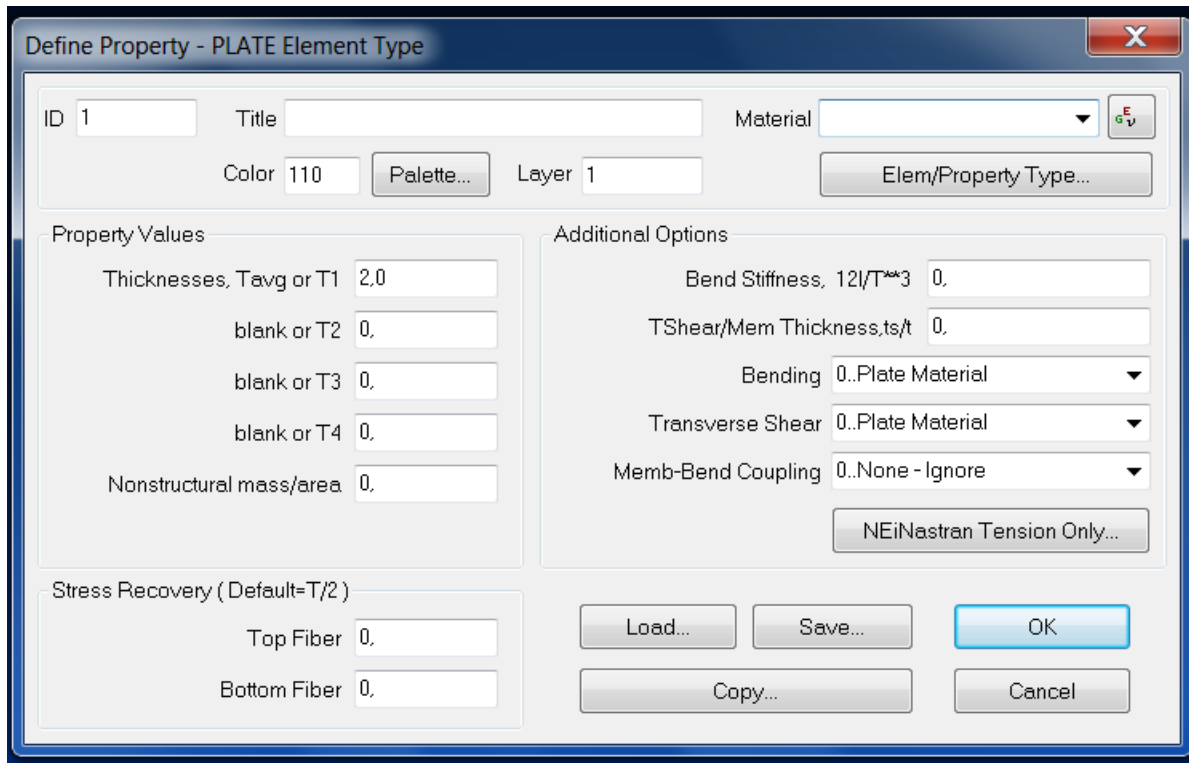
ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Αφού εισήχθησαν λοιπόν οι ιδιότητες και η γεωμετρία του υλικού της δοκού, σειρά έχει ο καθορισμός του είδους και της διατομής των πεπερασμένων στοιχείων με τα οποία θα σχηματιστεί το προσομοίωμα της μελέτης.

Το πρόγραμμα υποστηρίζει γραμμικά (Line Elements), επιφανειακά (Plane Elements), χωρικά (Volume Elements) πεπερασμένα στοιχεία , καθώς και κάποια άλλα ειδικής μορφής στοιχεία όπως συγκεντρωμένες μάζες.

Η δοκός προσομοιώνεται με επίπεδα τετραπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία με ιδιότητες πλάκας (plate) , δηλαδή επίπεδα στοιχεία που έχουν τη δυνατότητα να κάμπτονται.

Για τον καθορισμό του τύπου των στοιχείων ακολουθείται η εξής διαδικασία : Από το μενού « Model » επιλέγεται η εντολή « Property » , οπότε στην οθόνη εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου του σχήματος 6.5 , ρυθμισμένο εξ' αρχής στα επίπεδα καμπτόμενα στοιχεία πλάκας (PLATE Element Type). Όπως και στην περίπτωση των υλικών , κάθε διατομή που δημιουργείται λαμβάνει έναν αύξοντα αριθμό (ID) και ονομάζεται κατάλληλα.



Σχήμα 6.5 : Καθορισμός ιδιοτήτων επίπεδου στοιχείου

Τα μόνα στοιχεία που χρειάζεται να καθοριστούν για κάθε διατομή αυτού του είδους είναι το πάχος της (στο πεδίο T1) και το υλικό από το οποίο αποτελείται (για το λόγο αυτό πρέπει ο καθορισμός υλικού να προηγείται εκείνου των διατομών). Στην περίπτωση που δεν είναι ισοπαχές το στοιχείο σε ολόκληρη την έκταση του υπάρχει η δυνατότητα να δοθεί το πάχος σε κάθε γωνία του ξεχωριστά πληκτρολογώντας εκτός από την T1 και τις τιμές T2, T3 και T4. Υπενθυμίζεται πως οι διαστάσεις προσομοίωσης εισάγονται σε mm , αφού οι μονάδες

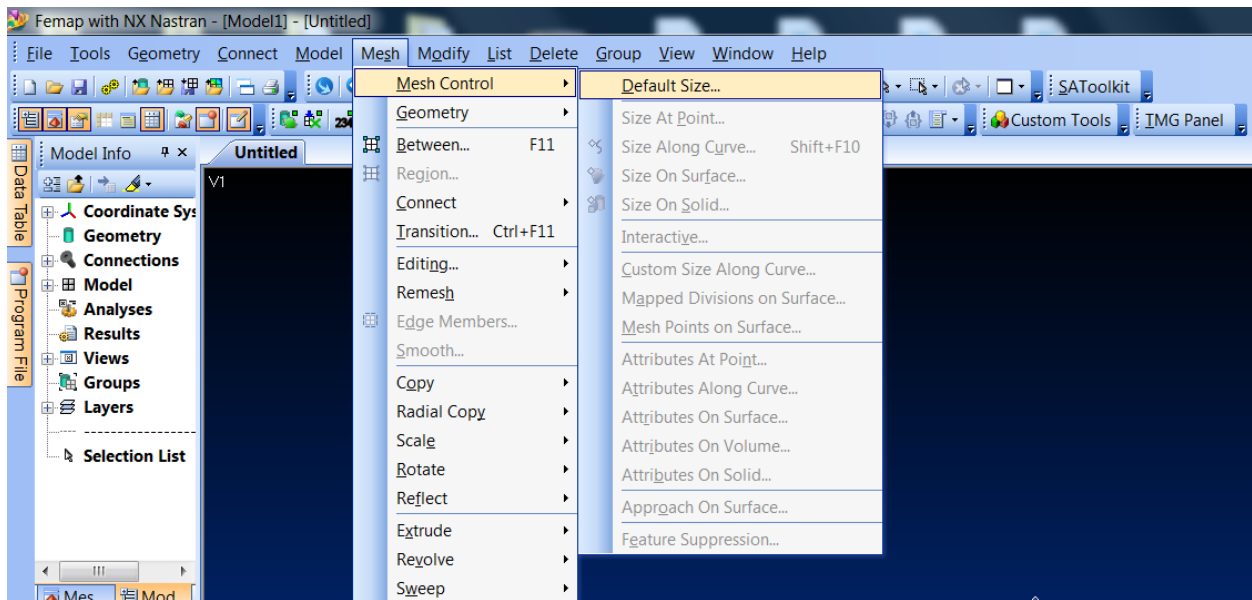
ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

προσομοίωσης έχει προαποφασιστεί να είναι τα kN και τα mm. Στην παρούσα εργασία το πάχος της διατομής είναι σταθερό σε όλες τις επιφάνειες και ίσο με 2mm.

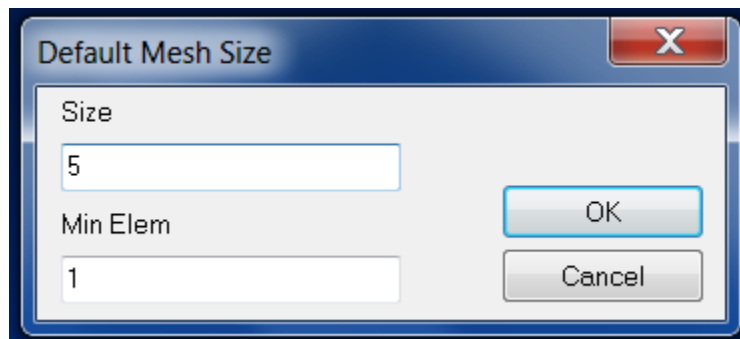
6.3.4 Δημιουργία δικτύου (mesh generation)

Αφού έχουν καθοριστεί οι ιδιότητες του υλικού και η μορφή της διατομής που χρησιμοποιείται στο προσομοίωμα, σειρά έχει η δημιουργία αυτού καθ' αυτού του προσομοιώματος.

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 επιλέχθηκαν 5x5 χιλιοστά.



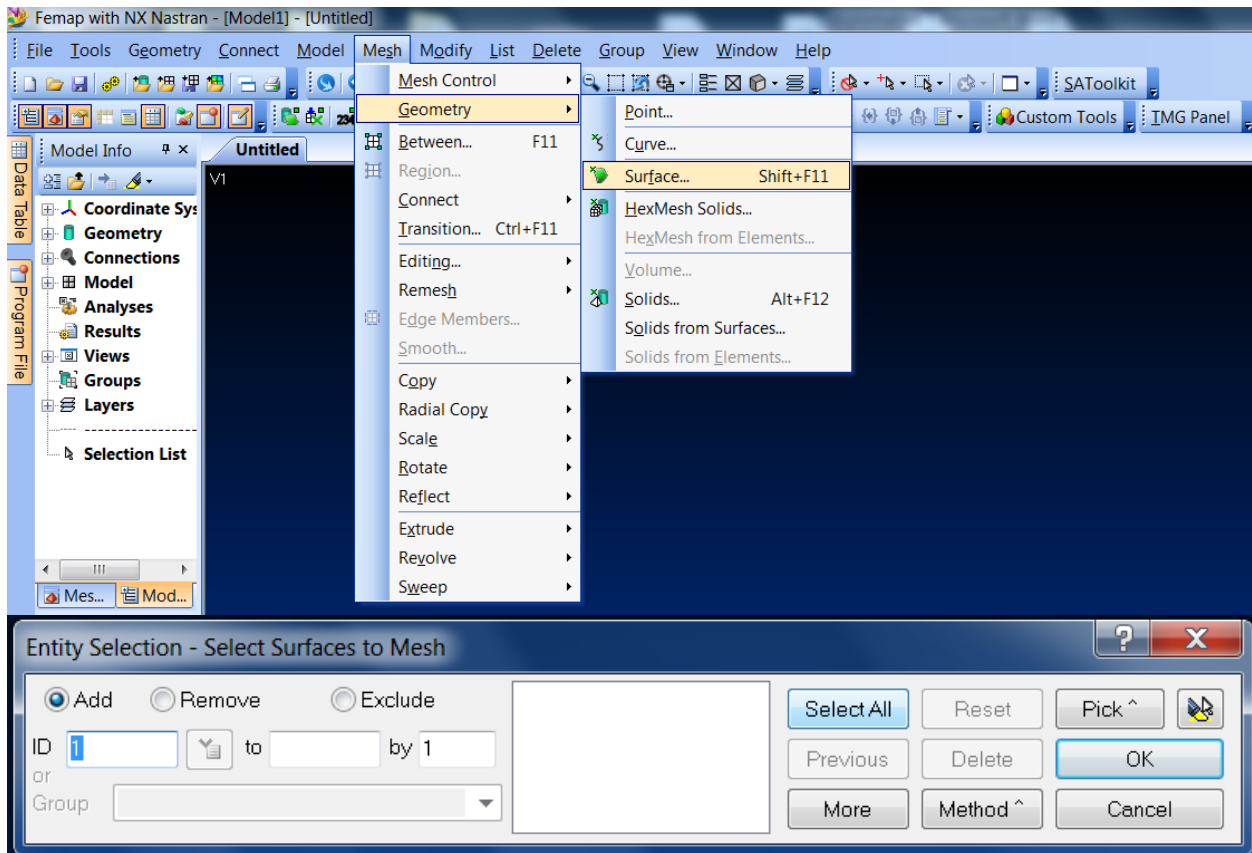
Σχήμα 6.6 : Πλαίσιο διαλόγου δημιουργίας δικτύου



Σχήμα 6.7 : Ορισμός διαστάσεων πεπερασμένων στοιχείων

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

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 » ώστε να επιλεχθούν όλες οι επιφάνειες. Επειδή στο μοντέλο μας υπάρχουν επιφάνειες τύπου Surface αλλά και τύπου Boundary Surface επιλέγουμε να δημιουργηθεί δίκτυο πεπερασμένων και στην επιφάνεια που αναπαριστά την οπή.



Σχήμα 6.8 : Πλαίσιο διαλόγου επιλογής επιφανειών

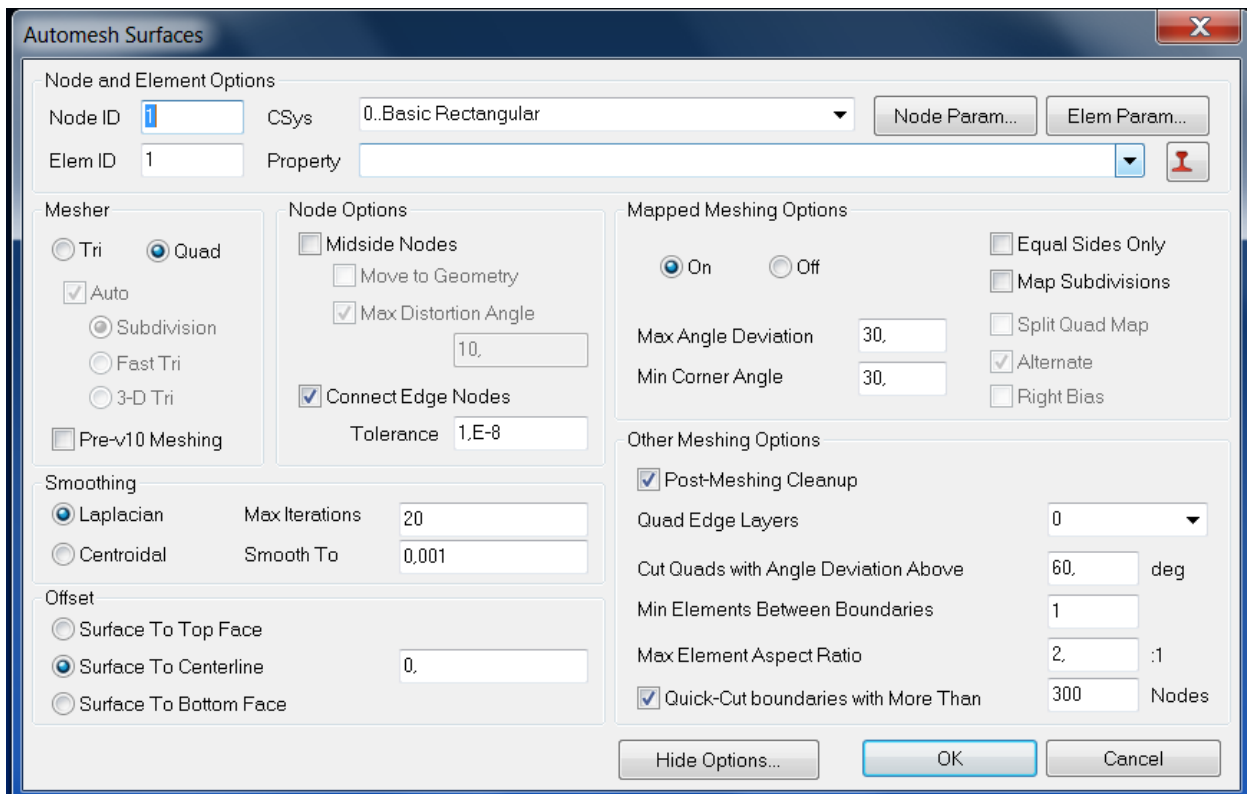
Με την επιλογή των επιφανειών εμφανίζεται ένα πλαίσιο (Σχήμα 6.9) διαλόγου. Στη θέση « Property » πατώντας το βέλος, εμφανίζεται ο τύπος στοιχείου που είχαμε δημιουργήσει προηγουμένως , οπότε τον επιλέγουμε. Πατώντας την εντολή « OK » εμφανίζεται στις επιλεγμένες επιφάνειες το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων και κόμβων.

Επειδή το πρόγραμμα εκλαμβάνει την επιφάνεια ως ξεχωριστή και ανεπηρέαστη από την εντατική κατάσταση των υπολοίπων , είναι αναγκαίο να συνδεθούν οι επιφάνειες ώστε να μπορούν να επιλυθούν ως μια ενιαία δοκός. Η σύνδεση πραγματοποιείται από το μενού « Tools » , επιλέγοντας την εντολή « Check » και στο εμφανιζόμενο υπομενού επιλέγοντας την εντολή « Coincident Nodes » . Επιλέγουμε όλους τους κόμβους και μετά την εντολή « Merge coincident entities » ώστε να συγχωνευτούν οι κόμβοι που έχουν μεταξύ τους απόσταση

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

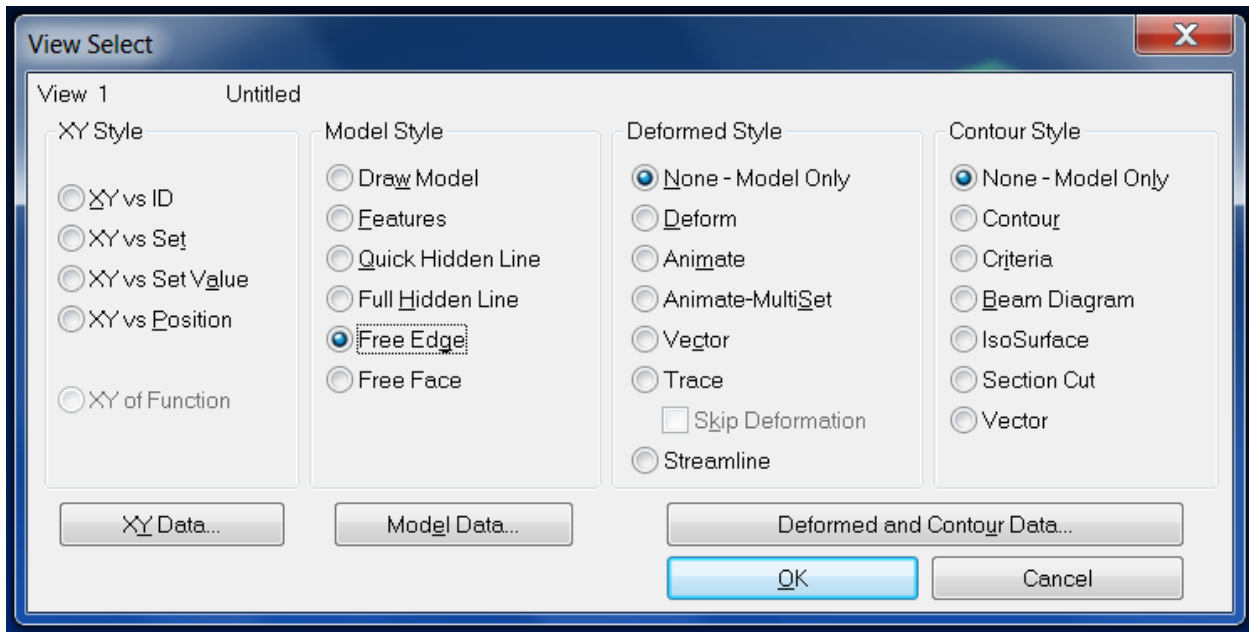
μικρότερη από την προκαθορισμένη. Αυτό το βήμα δεν παραλείπεται ποτέ κατά τη δημιουργία του δικτύου διότι το πρόγραμμα δεν είναι σε θέση να διακρίνει εάν ο προγραμματιστής επιθυμεί τη συνένωση των επιφανειών αυτών στις ακμές τους. Μετά τη συγχώνευση των κόμβων μπορούμε να διαπιστώσουμε κατά πόσο το μοντέλο σχεδιάστηκε σωστά ως εξής :

Πιέζοντας το βοηθητικό πλήκτρο F5 του πληκτρολογίου εμφανίζεται στην οθόνη ένα παράθυρο που περιλαμβάνει τις λειτουργίες καθορισμού προβολής του προσομοιώματος στην οθόνη (Σχήμα 6.10). Πριν την πραγματοποίηση της ανάλυσης κάθε προσομοιώματος μόνο η στήλη με την ονομασία « Model Style » είναι δυνατό να ρυθμιστεί. Από την ενεργό υποπεριοχή « Model Style » σημειώνεται η επιλογή « Free Edge » η οποία δείχνει όλες τις ασύνδετες ακμές των επιφανειών του προσομοιώματος και πιέζεται το πλήκτρο « OK » ώστε η εντολή να ενεργοποιηθεί. Η εικόνα που εμφανίζεται στην οθόνη είναι εκείνη του σχήματος 6.11, όπου φαίνονται ελεύθερες οι ακμές των πελμάτων, του κορμού και της οπής της δοκού. Εάν τα στοιχεία παρέμεναν ασύνδετα μεταξύ τους θα εμφανίζονταν περισσότερες ελεύθερες ακμές.

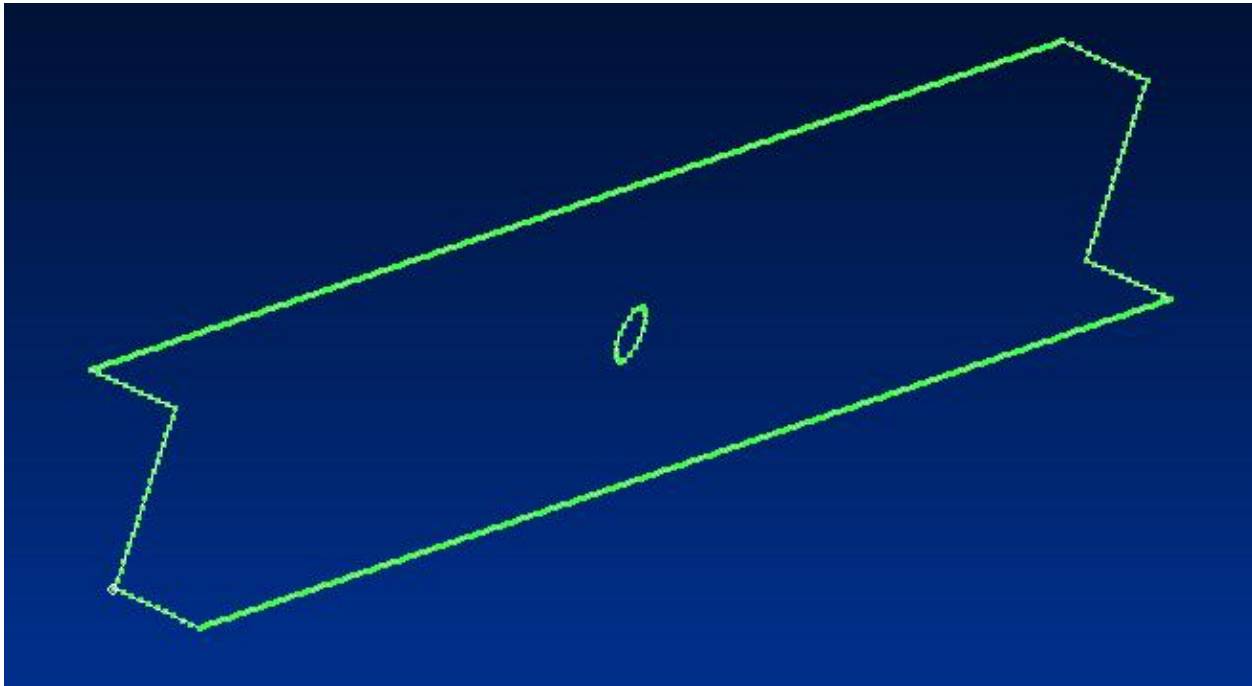


Σχήμα 6.9 : Πλαίσιο διαλόγου καθορισμού ιδιοτήτων δικτύου

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



Σχήμα 6.10 : Παράθυρο καθορισμού προβολής



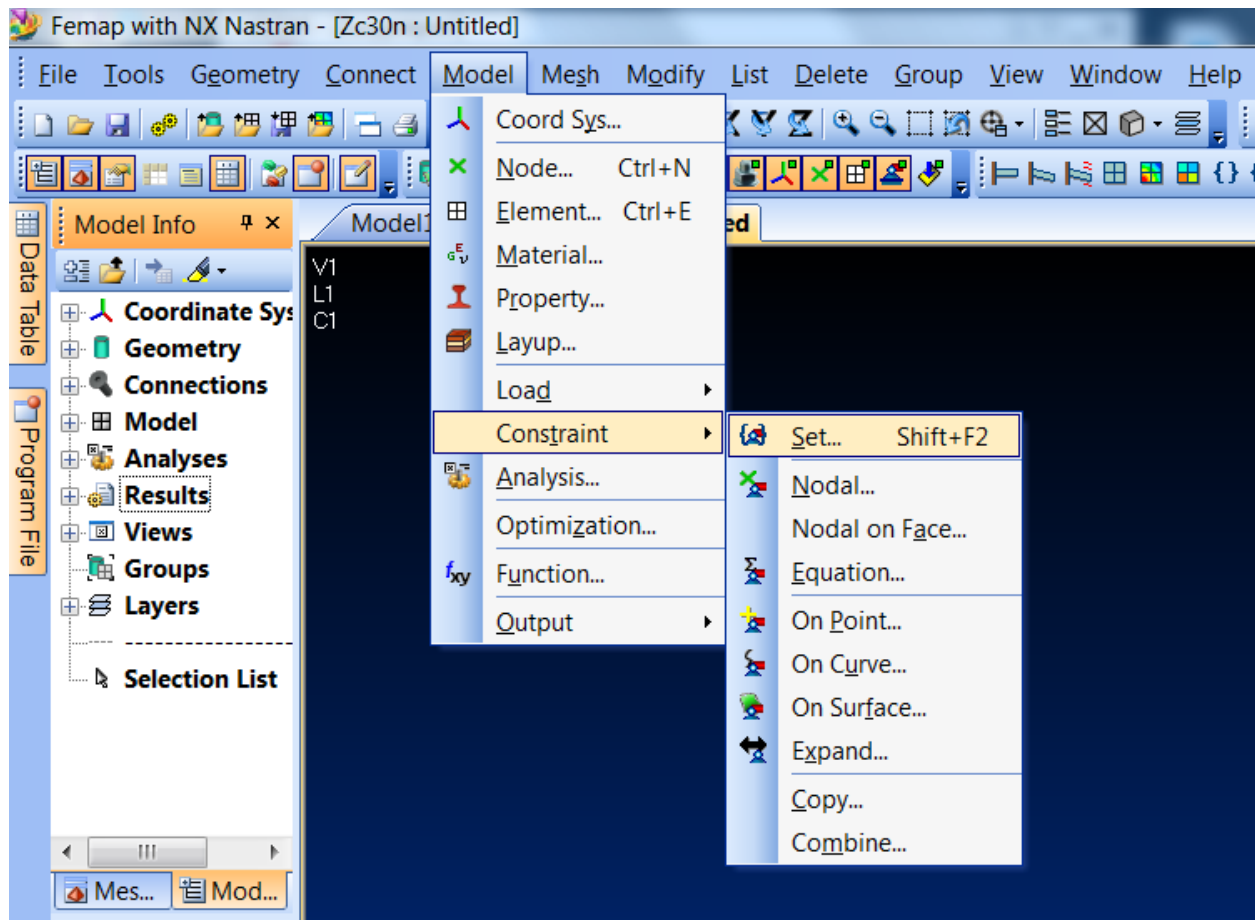
Σχήμα 6.11 : Οι ελεύθερες ακμές της δοκού

Στο βήμα αυτό έχει ολοκληρωθεί η μοντελοποίηση σε ότι αφορά τη γεωμετρία , τα υλικά και το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων. Απομένουν η επιβολή συνοριακών συνθηκών και η φόρτιση της δοκού.

6.3.5 Επιβολή συνοριακών συνθηκών

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 για επικόμβιες συνοριακές συνθήκες δεσμεύονται κάποιοι ή όλοι από τους έξι βαθμούς ελευθερίας του κάθε κόμβου. Όταν πρόκειται για συνοριακές συνθήκες σε γραμμή ή επιφάνεια τότε επιλέγεται είτε πάκτωση , είτε δέσμευση των μετακινήσεων , είτε δέσμευση της στροφής της επιφάνειας ή της γραμμής περί τον διαμήκη άξονα τους.

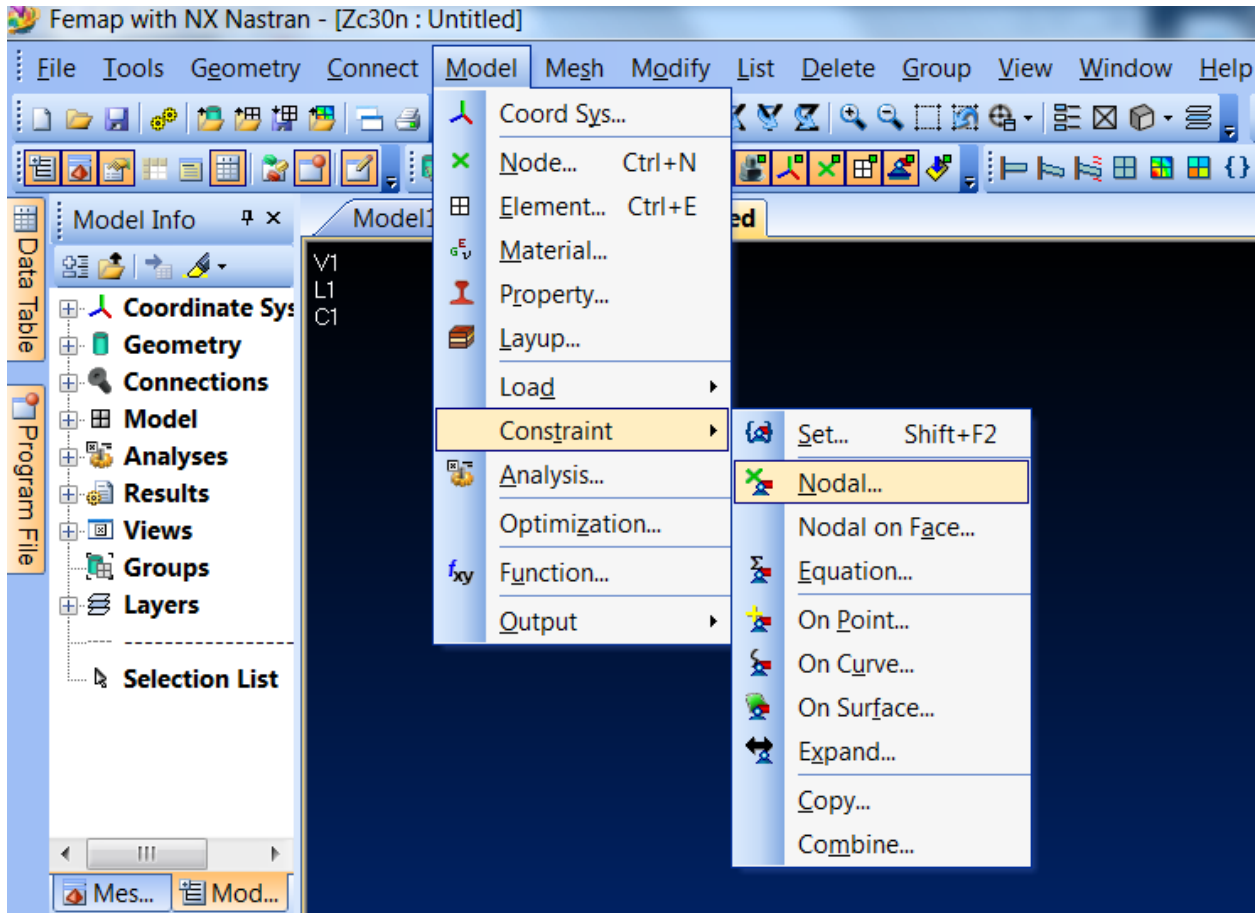
Στην παρούσα εργασία η επιβολή συνοριακών συνθηκών πραγματοποιείται σε μεμονωμένους κόμβους ώστε να ληφθεί υπόψη η λειτουργία αμφιέριστης δοκού αλλά και πλευρική εξασφάλιση (η οποία δεν προκαλεί πρόσθετες δεσμεύσεις στην ισοστατική δοκό) . Από το μενού « Model » επιλέγεται η εντολή « Constraint » και στο υπομενού η εντολή « Set » ώστε να δοθεί όνομα στην ομάδα συνοριακών συνθηκών.



Σχήμα 6.12 : Πλαίσιο διαλόγου ορισμού ομάδας συνοριακών συνθηκών

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

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 απαιτούνται.



Σχήμα 6.13 : Πλαίσιο διαλόγου ορισμού κόμβων στήριξης

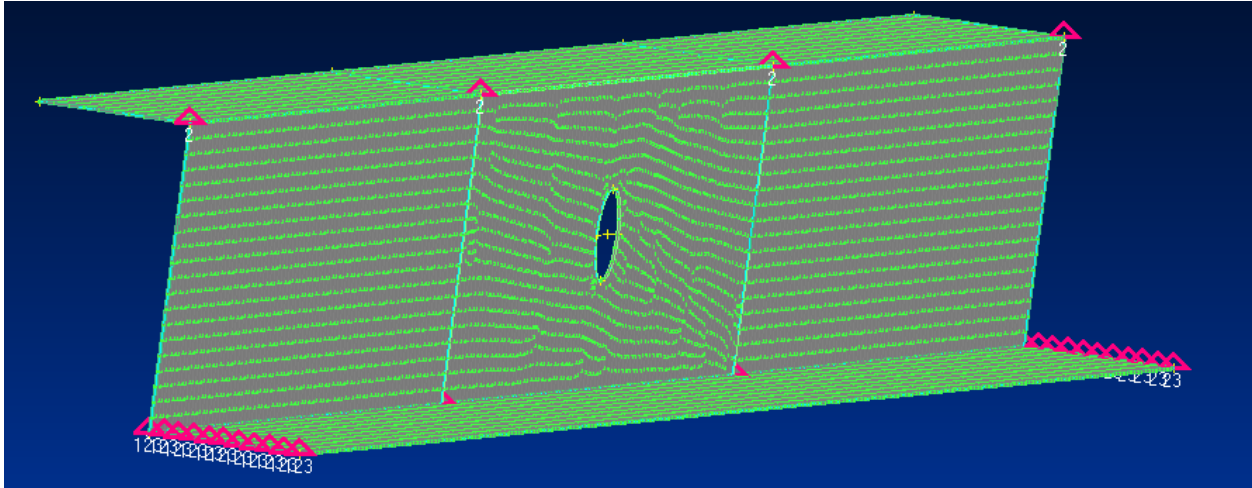
Μετά την επιλογή των κόμβων προς δέσμευση δίνεται η εντολή « OK » και εμφανίζεται το πλαίσιο διαλόγου με τίτλο « Create Nodal Constraints / DOF ». Σε αυτό το πλαίσιο επιλέγουμε ποιούς από τους έξι βαθμούς ελευθερίας θα δεσμευτούν.



Σχήμα 6.14 : Πλαίσιο διαλόγου εισαγωγής συνοριακών συνθηκών

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Στην παρούσα εργασία επιλέγουμε να δεσμευτούν οι ακραίοι κόμβοι του κάτω πέλματος και κάποιοι μεμονωμένοι κόμβοι στον κορμό για να επιτύχουμε την πλευρική εξασφάλιση της δοκού. Η τελική μορφή των συνοριακών συνθηκών διακρίνεται στο σχήμα 6.15.



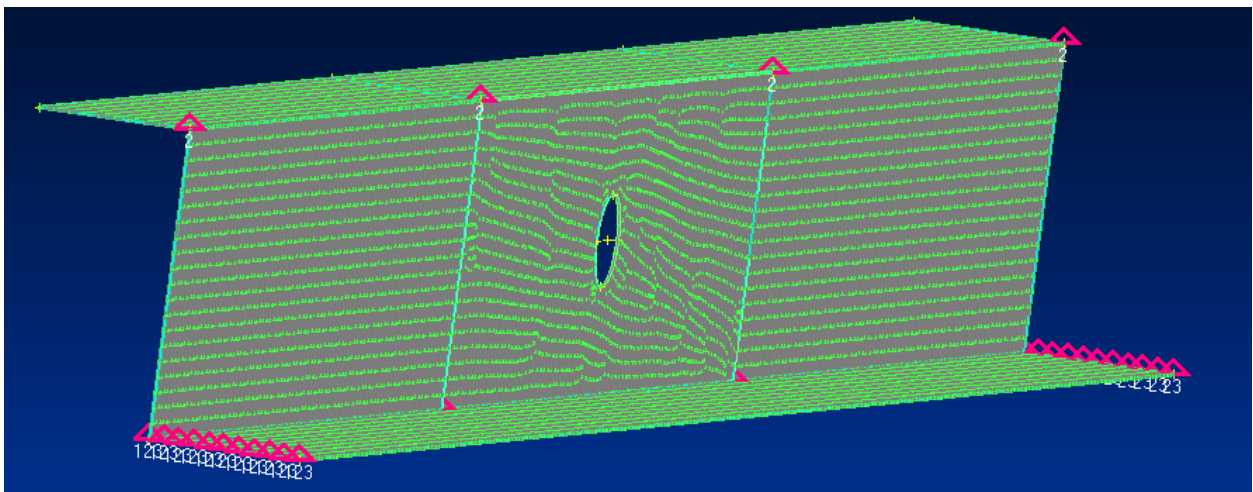
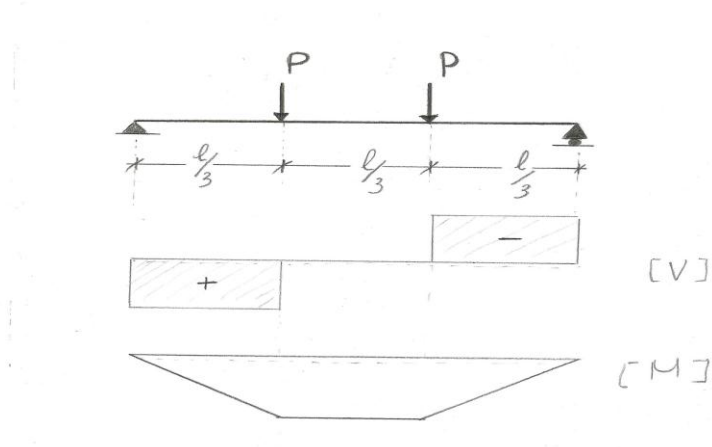
Σχήμα 6.15 : Συνοριακές συνθήκες δοκού Z

Στη μια πλευρά της δοκού δεσμεύονται η διαμήκης, η πλευρική και κατακόρυφη μετατόπιση (T_X , T_Y , T_Z) . Στην άλλη πλευρά της δοκού δεσμεύονται η πλευρική και η κατακόρυφη μετακίνηση (T_Y , T_Z) ενώ επιτρέπεται η διαμήκης μετατόπιση κατά τον άξονα X για να προσομοιωθεί η κύλιση του ενός άκρου . Για τα μεμονωμένα σημεία επιλέγεται η δέσμευση της πλευρικής μετατόπισης T_Y . Οι στροφές R_X , R_Y και R_Z παραμένουν ελεύθερες για όλους τους επιλεγθέντες κόμβους.

Το άνω πέλμα και ο κορμός στις άκρες δεν δεσμεύονται , πέραν του σημείου διεπαφής τους έτσι ώστε να επιτρέπεται μακροσκοπικά η ελεύθερη στροφή των στηρίξεων. Εάν γίνει οποιαδήποτε περαιτέρω δέσμευση στις άκρες δημιουργείται πάκτωση (αντι αρθρώσεως και κυλίσεως) καθώς δεσμεύεται η στροφή μακροσκοπικά. Επίσης , στα μεμονωμένα σημεία δεν υφίσταται περαιτέρω δέσμευση διότι θα ισοδυναμεί με κατάργηση του ισοστατικού μοντέλου.

Άρα με τις συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες πραγματοποιείται η μετάβαση από τη θεωρητική προσέγγιση των ραβδωτών φορέων στην προσομοίωση της αμφιέρειστης με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων (Σχήμα 6.16).

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



Σχήμα 6.16 : Μετάβαση από τη θεωρητική προσέγγιση της αμφιέρειστης δοκού στο προσομοίωμα ανάλυσης με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

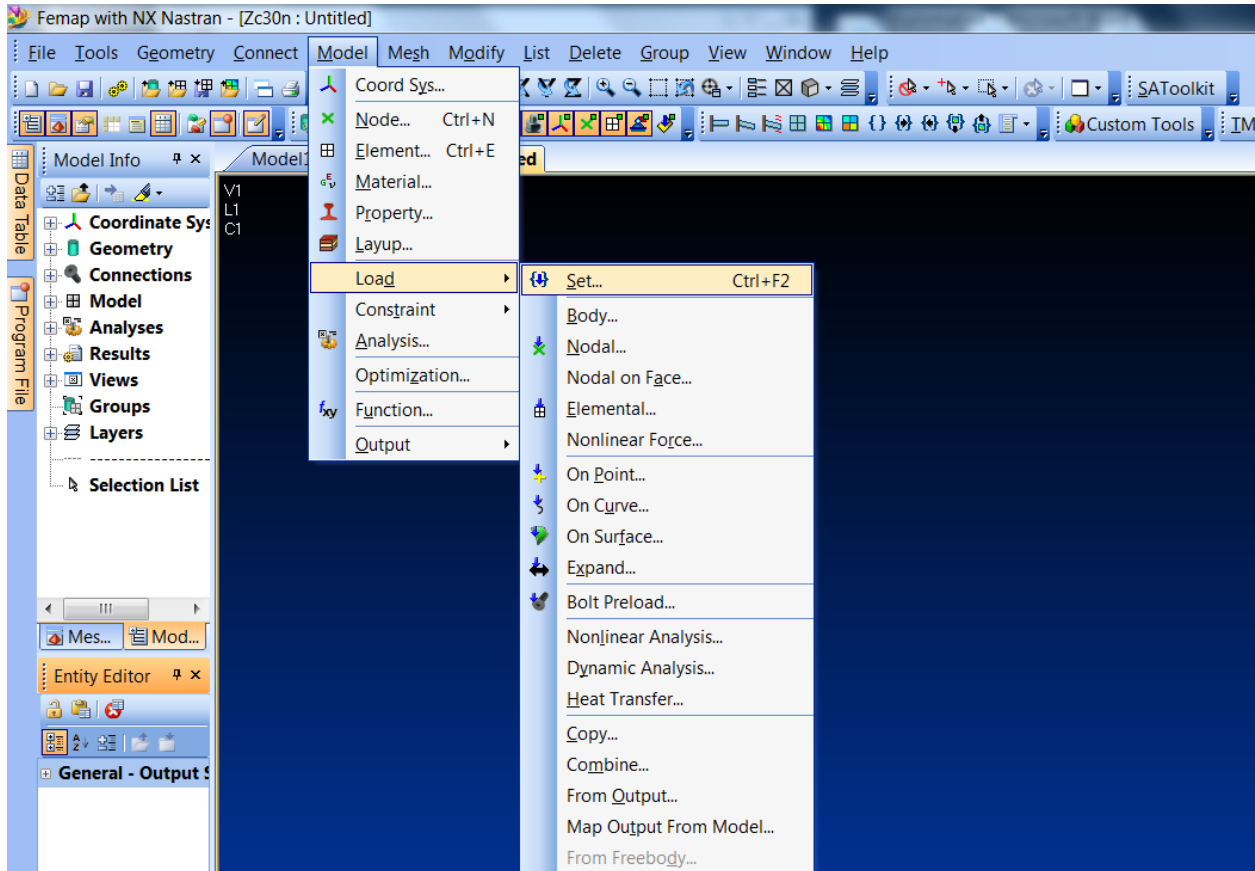
6.3.6 Επιβολή φορτίων (loads)

Το FEMAP v10 διαθέτει ένα μεγάλο πλήθος φορτίων στατικών και δυναμικών που μπορούν να επιβληθούν στο φορέα. Η επιβολή των φορτίων στο προσομοίωμα γίνεται με παρόμοιο τρόπο με εκείνον του καθορισμού των συνοριακών συνθηκών και μπορεί να γίνει τόσο απευθείας στους κόμβους όσο και σε επιφάνειες , ή ακόμη και σε στοιχεία του προσομοιώματος. Όπου και να επιβληθούν βέβαια τα φορτία , το πρόγραμμα τα ανάγει τελικά

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

σε επικόμβια , αφού όλοι οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται σε ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων είναι εφαρμογές εξισώσεων στατικής ισορροπίας στους κόμβους.

Στην παρούσα εργασία τα φορτία που εφαρμόζονται στη δοκό είναι σημειακά και η επιβολή τους γίνεται απευθείας σε κόμβους. 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 εφαρμοσθούν στη συνέχεια.

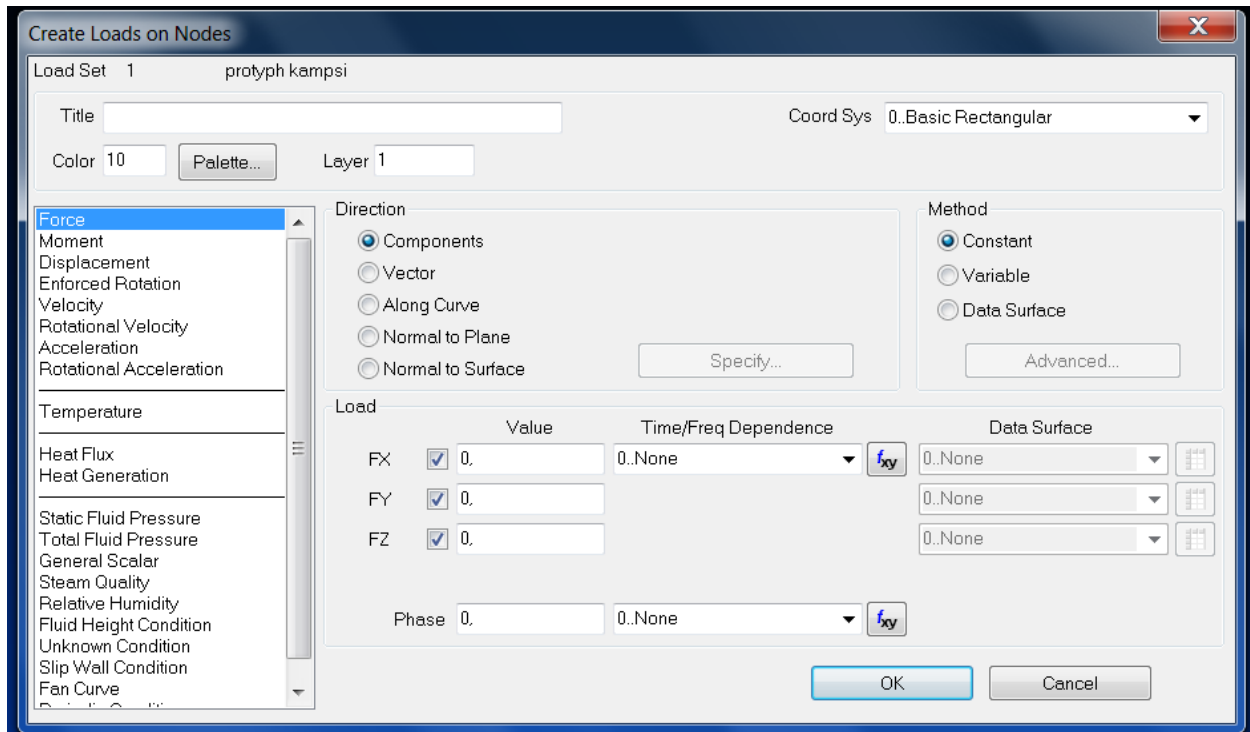


Σχήμα 6.17 : Πλαίσιο διαλόγου ορισμού ομάδας φορτίων

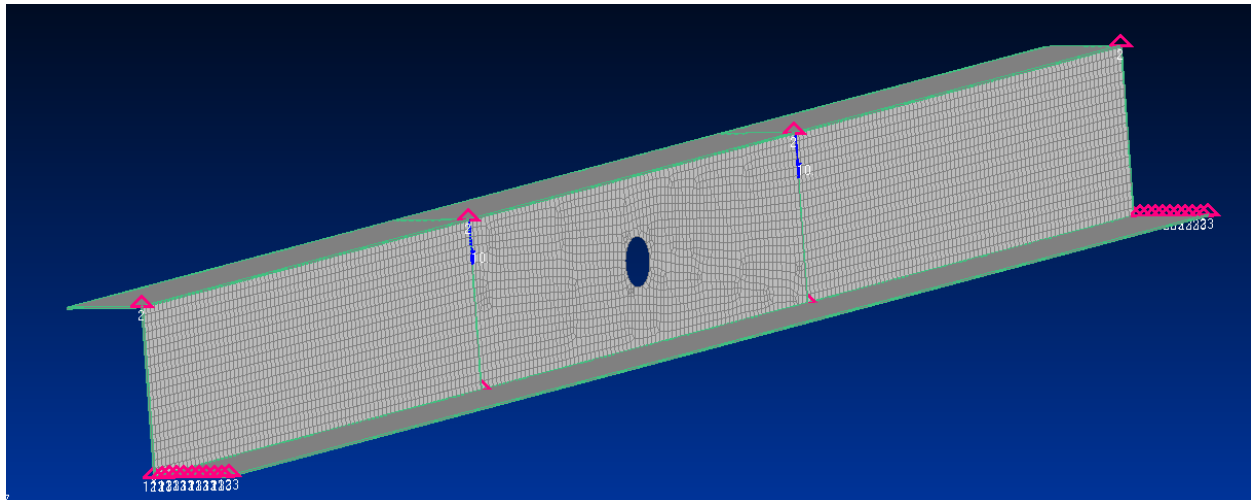
Από το μενού « Model » επιλέγεται η εντολή « Load » → « Nodal » ώστε να εφαρμοσθεί το φορτίο στους κόμβους. Μετά την επιλογή εμφανίζεται το πλαίσιο διαλόγου του σχήματος στο οποίο ζητείται να καθορισθεί το είδος της φόρτισης , το μέγεθος αυτής , προσημασμένο ανάλογα με τη φορά, και η διεύθυνση (X, Y, 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 6.18).

Στο προσομοίωμα μας εισήχθηκε η τιμή $F_z = -10.00$ kN ως καμπτικό φορτίο στους δυο δεσμευμένους κόμβους. Το πρόσημο μείον μπαίνει για να δείξει τη φορά του φορτίου σε σχέση με το σύστημα αξόνων. Το μοντέλο είναι έτοιμο για ανάλυση (Σχήμα 6.19).

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



Σχήμα 6.18 : Παράθυρο διαλόγου καθορισμού φορτίου



Σχήμα 6.19 : Τελικό μοντέλο δοκού με δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων

6.3.7 Ανάλυση προσομοιώματος (Analyze)

Η ανάλυση του προσομοιώματος έγινε με τη μέθοδο της μη γραμμικής ανάλυσης (Nonlinear Static) . Πρίν την ανάλυση του προσομοιώματος με τη συγκεκριμένη μέθοδο απαιτείται η παρακάτω διαδικασία :

- **Επιβολή φορτίσεων**

Επηρεασμένοι από το αποτέλεσμα του μέγιστου φορτίου για τη δοκό με βάση τις διατάξεις του EC3, επιβάλλουμε στους δυο κόμβους φορτίο ίσο με 10kN (λίγο μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με τη θεωρητική)

- **Καθορισμός παραμέτρων μη γραμμικής ανάλυσης**

Η σημαντική δυνατότητα του FEMAP v10, που το κάνει κατάλληλο για την παρούσα μελέτη , είναι η δυνατότητα μη γραμμικής ανάλυσης μέσω τμηματικής φόρτισης του προσομοιώματος. Αυτό πραγματοποιείται διαιρώντας το φορτίο σε μικρότερες ισόποσες διαδοχικές φορτίσεις το πλήθος των οποίων μπορεί να καθοριστεί από τον μελετητή , ενώ είναι δυνατή και η καταγραφή όλων των αποτελεσμάτων (μετατοπίσεις , εντατικά μεγέθη , κλπ.) για κάθε ενδιάμεσο στάδιο της φόρτισης.

Επιλέγοντας την επιβολή του συνολικού φορτίου των 10kN σε 100 στάδια , το πρόγραμμα επιβάλλει αρχικά 0.1 kN και υπολογίζει , λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα του υλικού και της γεωμετρίας , με επαναληπτική διαδικασία τη μετατόπιση όλων των κόμβων του προσομοιώματος. Έπειτα, στον παραμορφωμένο και ήδη εντεταμένο φορέα προσθέτει επιπλέον 0.1 kN φορτίο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιβληθεί ολόκληρο το φορτίο ή να σταματήσει η ανάλυση λόγω αδυναμίας σύγκλισης των αποτελεσμάτων. Το τελευταίο ενδεχόμενο ισοδυναμεί με αστοχία του φορέα , καθώς οι μεγάλες παραμορφώσεις με μικρή αύξηση του φορτίου προκαλούν αυτή την αδυναμία σύγκλισης των αποτελεσμάτων και την παύση της ανάλυσης.

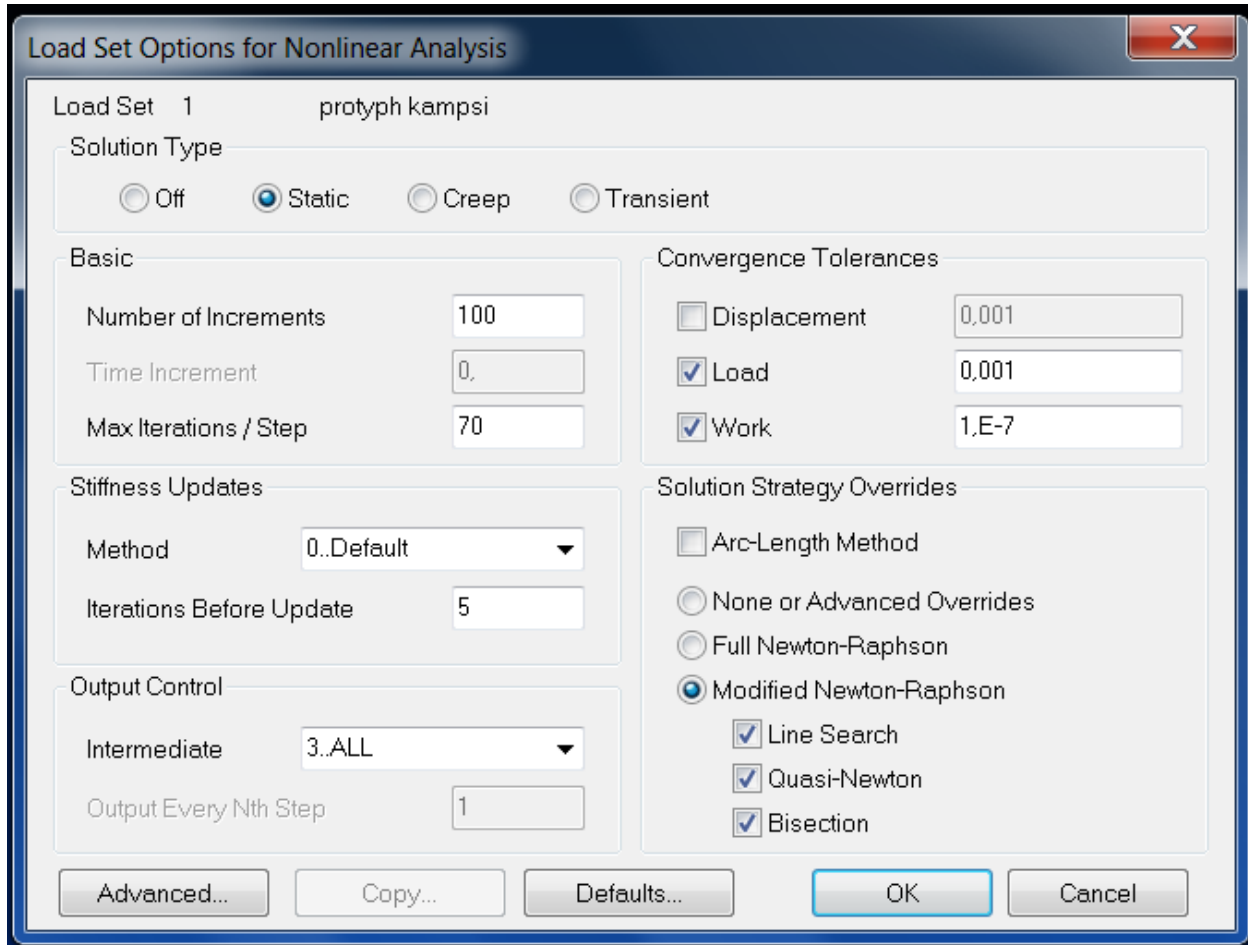
Επιπρόσθετα, η λειτουργία του προγράμματος είναι με τέτοιο τρόπο αυτοματοποιημένη , ώστε στην περίπτωση που το φορτίο δεν είναι χωρισμένο από το μελετητή σε αρκετά μεγάλο πλήθος διαδοχικών φορτίσεων, εκείνο επεμβαίνει και διαιρεί ακόμη περισσότερο το φορτίο στα σημεία που αυτό κρίνει κατάλληλα.

Ο καθορισμός των παραμέτρων σύγκλισης και του πλήθους των διαδοχικών φορτίσεων της μη γραμμικής ανάλυσης γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο :

Από το μενού « Model » επιλέγεται η εντολή « Load » → « Nonlinear Analysis » οπότε εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 6.20.

Για τη φόρτιση που έχει ήδη καθοριστεί από το προηγούμενο βήμα ζητείται αρχικά ο τύπος της ανάλυσης (Solution Type). Η επιλογή αρχικά είναι ρυθμισμένη στο « Off » και υπάρχουν οι επιλογές της στατικής ανάλυσης (Static) , του ερπυσμού (Creep) και της εναλλασσόμενης φόρτισης (Transient). Στη δική μας περίπτωση η επιλογή είναι εκείνη της στατικής μη γραμμικής ανάλυσης.

Αφού επιλεγεί το είδος της ανάλυσης πιέζουμε το πλήκτρο « Defaults » όπου είναι αποθηκευμένες οι προτεινόμενες αρχικές τιμές των παραμέτρων της στατικής μη γραμμικής ανάλυσης.



Σχήμα 6.20 : Καθορισμός παραμέτρων μη γραμμικής ανάλυσης

Στο χωρίο με την ονομασία « Basic » καταχωρούνται δυο από τις βασικότερες παραμέτρους της ανάλυσης : Το πλήθος των ενδιάμεσων τμηματικών φορτίσεων (Number of Increments) και το μέγιστο πλήθος των υπολογιστικών επαναλήψεων που καλείται το πρόγραμμα να κάνει σε κάθε βήμα της φόρτισης , μέχρι να συγκλίνουν τα αποτελέσματα (Max Iterations per Step)

Το αρχικό πλήθος των ενδιάμεσων φορτίσεων που είναι προεπιλεγμένο από το πρόγραμμα είναι 10 , τιμή σχετικά μικρή για την κλίμακα του προσομοιώματος που έχουμε δημιουργήσει. Για το λόγο αυτό το συνολικό φορτίο των 10 *kN* χωρίζεται σε 100 τμήματα των 0.1 *kN* . Στην περίπτωση άλλωστε , που θα χρειαστούν ενδιάμεσα μικρότερα βήματα το πρόγραμμα θα τα δημιουργήσει αυτομάτως χωρίς να διακόψει την ανάλυση.

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων μέχρι τη σύγκλιση διορθώνεται επίσης , καθώς λόγω του μεγάλου πλήθους των στοιχείων του προσομοιώματος είναι πιθανό οι 25 προεπιλεγμένες από την εντολή « Defaults » επαναλήψεις να μην επαρκούν για την επίτευξη της επιθυμητής ακρίβειας . Τελικά επιλέγεται να ζητηθούν 70 επαναλήψεις για κάθε βήμα της φόρτισης μέχρι τη σύγκλιση.

Οι προεπιλεγμένες ρυθμίσεις στο χωρίο « Convergence Tolerances» όπου ζητείται η ακρίβεια σύγκλισης των υπολογισμών παραμένουν ως έχουν.

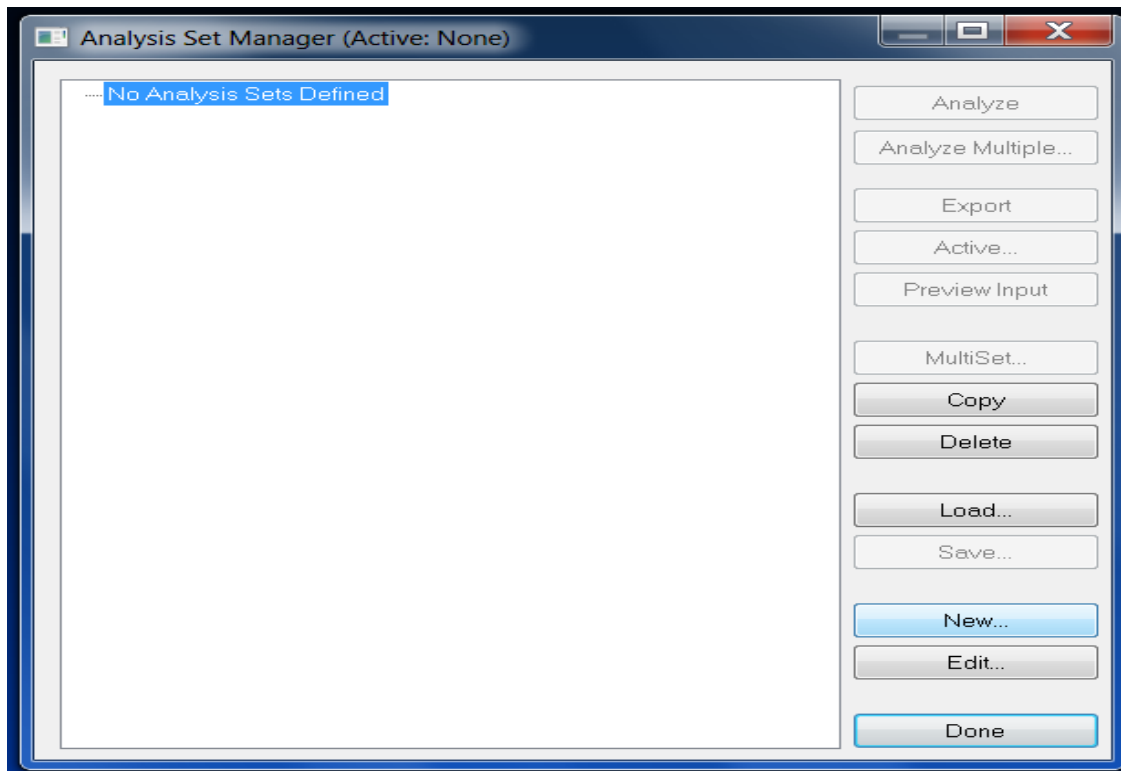
Το ίδιο συμβαίνει και στις ρυθμίσεις του χωρίου « Stiffness Updates» αφού το πρόγραμμα αναλαμβάνει αυτομάτως να καθορίσει οποιοσδήποτε αλλαγές χρειαστούν κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.

Στην επιλογή « Output Control» επιλέγεται η εντολή « ALL » ώστε να κρατηθούν και να είναι διαθέσιμα προς έλεγχο και επεξεργασία τα αποτελέσματα όλων των ενδιάμεσων βημάτων της φόρτισης.

Το τελευταίο χωρίο αφορά την επιλογή της μεθόδου σύγκλισης (Solution Strategy Overrides) όπου επιλέγεται η τροποποιημένη μέθοδος Newton – Raphson λόγω της γρήγορης σύγκλισης που επιτυγχάνει.

▪ Ανάλυση του προσομοιώματος

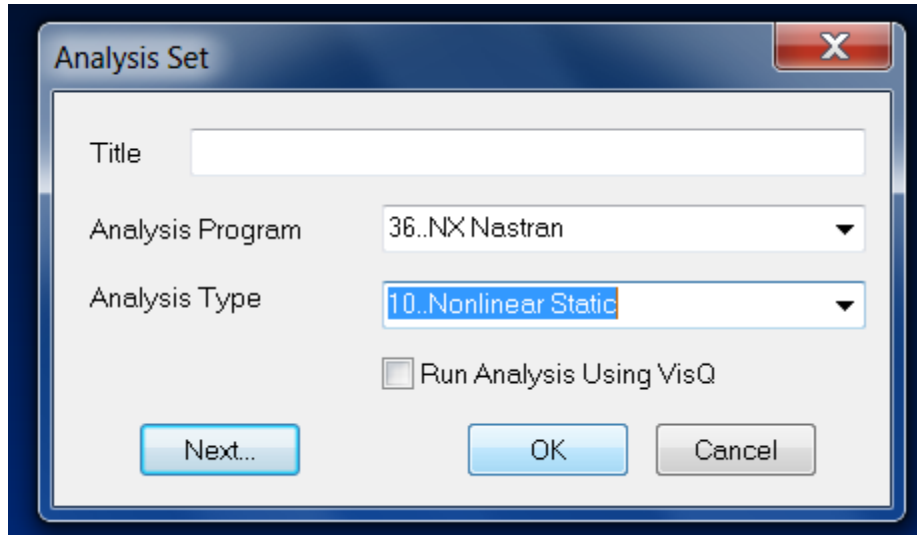
Για την έναρξη της ανάλυσης από το μενού « Model » επιλέγουμε την εντολή « Analysis » και εμφανίζεται το παράθυρο του σχήματος 6.21 :



Σχήμα 6.21 : Παράθυρο δημιουργίας ανάλυσης

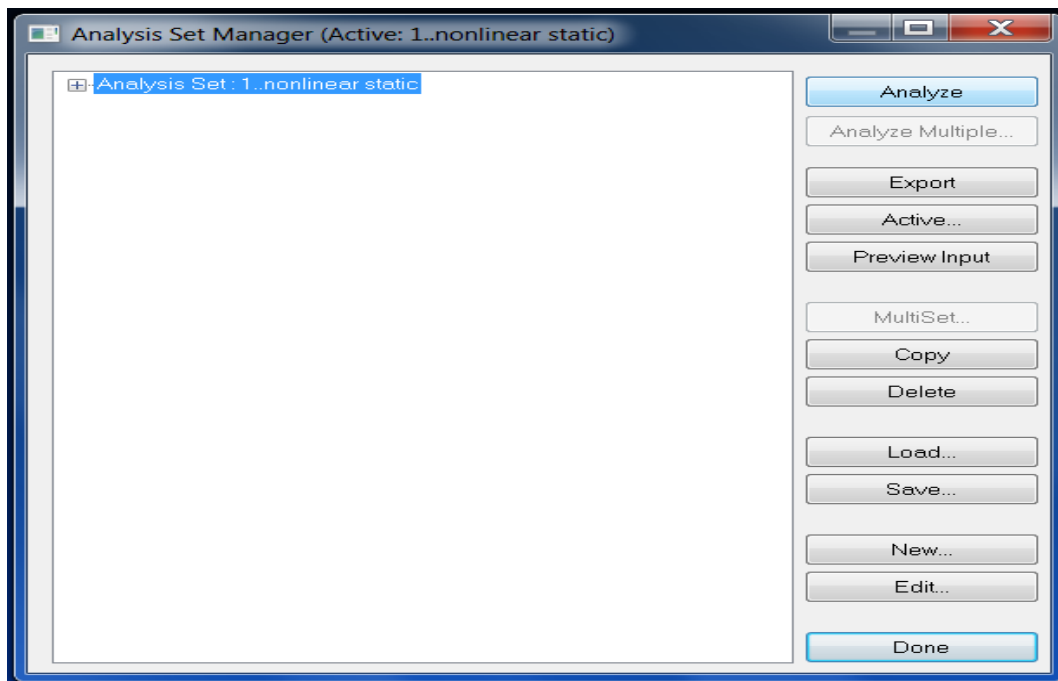
ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Επιλέγεται η εντολή « New » και στο παράθυρο διαλόγου δίνουμε έναν τίτλο στην ανάλυση και επιλέγεται στον τύπο ανάλυσης η μη γραμμική ανάλυση (Nonlinear Static) όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.22 :



Σχήμα 6.22 : Παράθυρο ορισμού τύπου ανάλυσης

Έπειτα, από το μενού « Model » επιλέγουμε την εντολή « Analysis » και στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται επιλέγουμε την ανάλυση που δημιουργήσαμε και την εντολή « Analyze », όπως φαίνεται στο σχήμα 6.23.



Σχήμα 6.23 : Παράθυρο επιλογής τύπου ανάλυσης

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Υπάρχει η δυνατότητα ορισμού μεγάλου πλήθους διαφορετικών αναλύσεων οι οποίες θα εμφανίζονται με τον τίτλο « Analysis Set », έναν αύξοντα αριθμό και το όνομα που έχουμε δώσει στην ανάλυση. Επιλέγοντας την εντολή « Analyze » ξεκινά η ανάλυση και η επόμενη εργασία είναι η επεξεργασία των αποτελεσμάτων για όλα τα προσομοιώματα τα οποία δημιουργούνται με τον ίδιο τρόπο.

6.4 Αποτελέσματα μη γραμμικής ανάλυσης στο FEMAP v10

Τα αποτελέσματα της μη γραμμικής ανάλυσης για όλες τις δοκούς δίνονται συγκεντρωτικά παρακάτω :

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

Διατομή		Μέγιστο φορτίο κάμψης P _{max} (kN)	
Διατομή C χωρίς ενισχύσεις	χωρίς οπή	9,52	
	κυκλική οπή διαμέτρου:	30mm	9,47
		40mm	9,30
		50mm	9,22
	τετραγωνική οπή πλευράς:	20mm	9,40
		25mm	9,39
		30mm	9,33

Πίνακας 6.2 : Αποτελέσματα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για δοκούς C με μήκος $l = 1200mm$

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Διατομή		Μέγιστο φορτίο κάμψης P_{max} (kN)	
Διατομή C με ενισχύσεις	χωρίς οπή	10,69	
	κυκλική οπή διαμέτρου:	30mm	10,68
		40mm	10,65
		50mm	10,64
	τετραγωνική οπή πλευράς:	20mm	10,69
		25mm	10,69
		30mm	10,67

Πίνακας 6.3 : Αποτελέσματα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για δοκούς C με μήκος $l = 1200mm$

Διατομή		Μέγιστο φορτίο κάμψης P_{max} (kN)	
Διατομή Z χωρίς ενισχύσεις	χωρίς οπή	9,50	
	κυκλική οπή διαμέτρου:	30mm	9,49
		40mm	9,45
		50mm	9,35
	τετραγωνική οπή πλευράς:	20mm	9,45
		25mm	9,45
		30mm	9,44

Πίνακας 6.4 : Αποτελέσματα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για δοκούς Z με μήκος $l = 1200mm$

Διατομή		Μέγιστο φορτίο κάμψης P_{max} (kN)	
Διατομή Z με ενισχύσεις	χωρίς οπή	10,71	
	κυκλική οπή διαμέτρου:	30mm	10,71
		40mm	10,70
		50mm	10,70
	τετραγωνική οπή πλευράς:	20mm	10,70
		25mm	10,70
		30mm	10,69

Πίνακας 6.5 : Αποτελέσματα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για δοκούς Z με μήκος $l = 1200mm$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

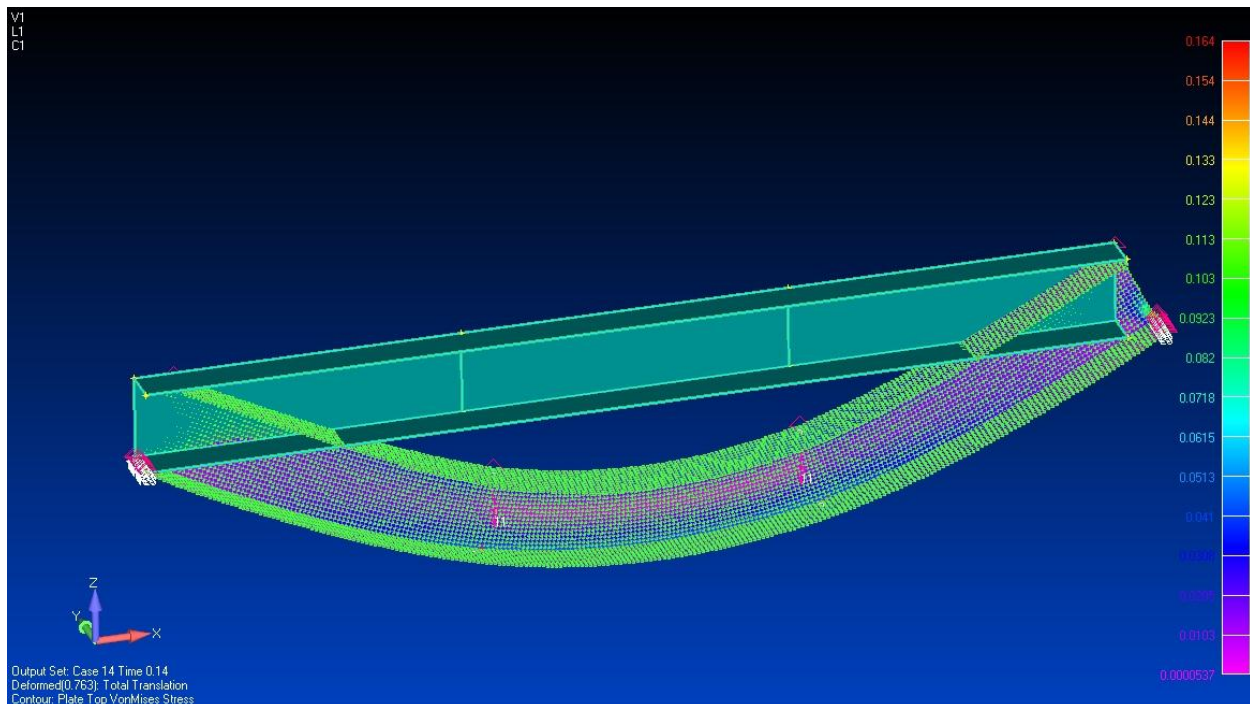
Σύγκριση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

7.1 Γενικά

Ο απώτερος στόχος των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για την συμπεριφορά του κάθε φορέα υπο την συγκεκριμένη φόρτιση και η σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ της θεωρητικής προσέγγισης κατά EC3 και της προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία. Η σύγκριση αυτή αποσκοπεί στην απεικόνιση των αποκλίσεων που προκύπτουν από την εφαρμογή των παραδοχών κατά την εφαρμογή του Ευρωκώδικα σε σχέση με την πιο λεπτομερή και ρεαλιστική μελέτη με πεπερασμένα στοιχεία.

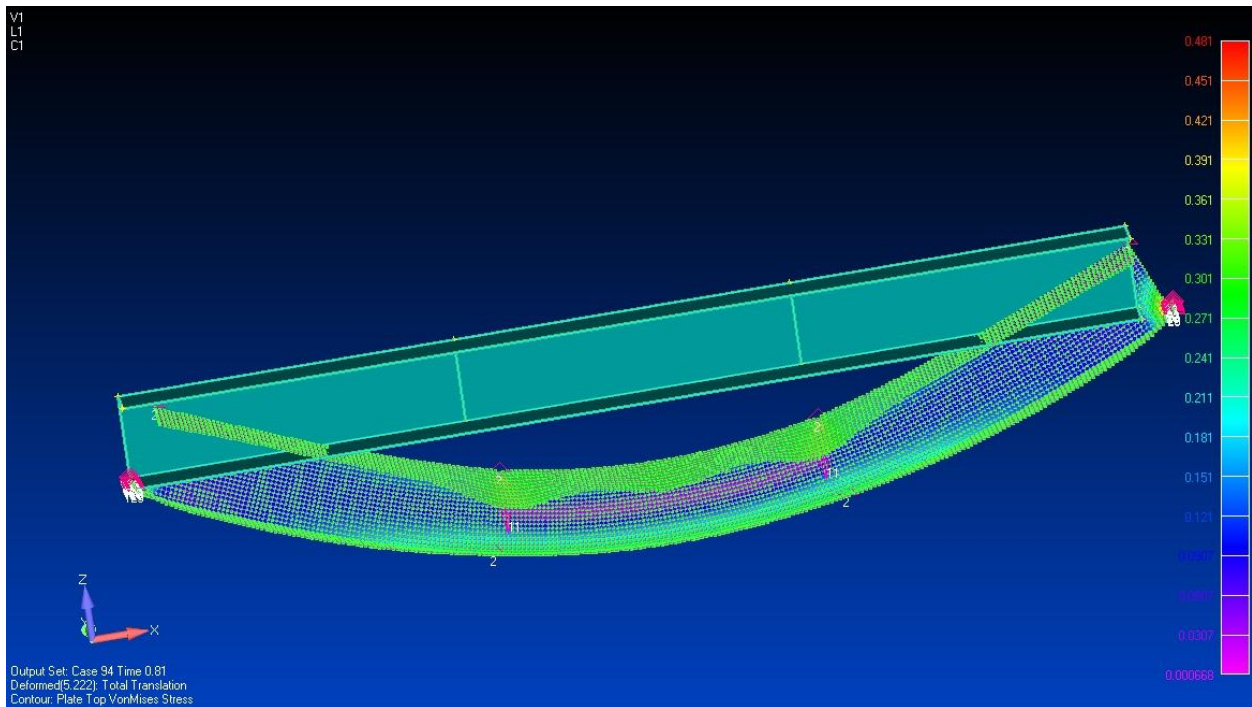
7.2 Διατομές C χωρίς ενισχύσεις

Η παραμόρφωση των δοκών (ανεξαρτήτως ύπαρξης οπής) εξελίσσεται όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε στα σχήματα 7.1 έως 7.3

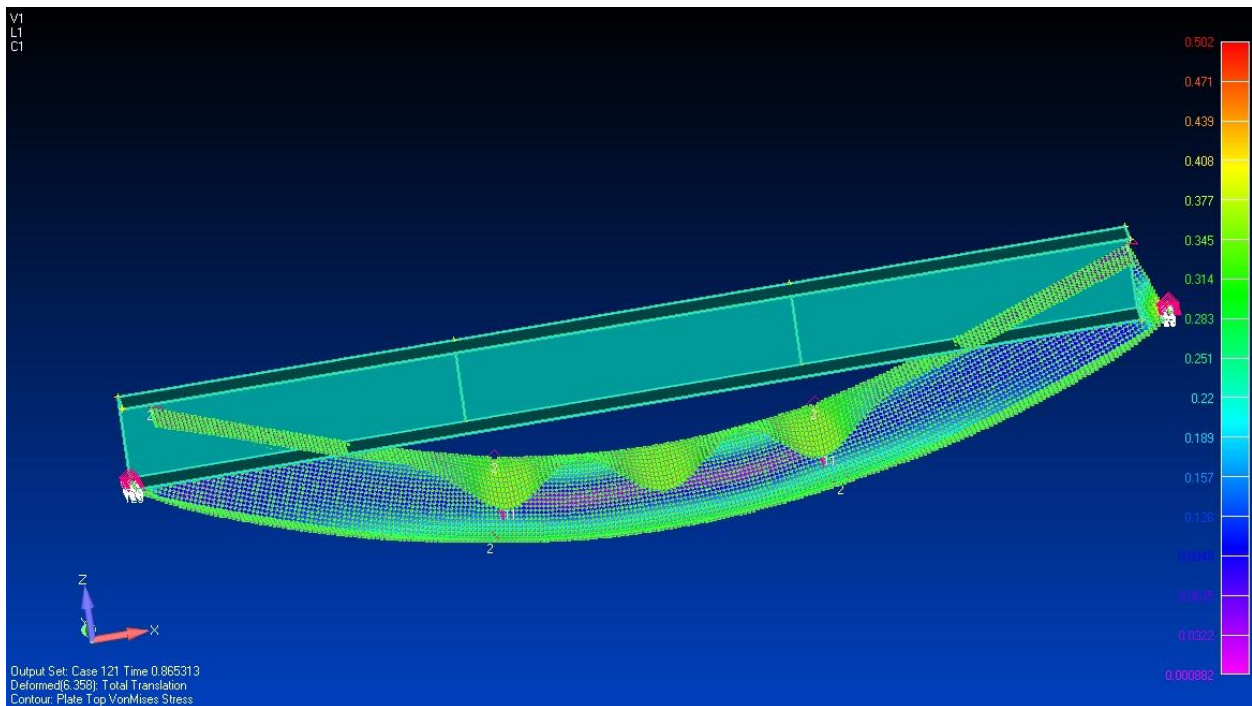


Σχήμα 7.1 : Παραμόρφωση δοκού στα πρώτα βήματα της ανάλυσης

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



Σχήμα 7.2 : Παραμόρφωση δοκού και πρώτα σημάδια τοπικού λυγισμού



Σχήμα 7.3 : Παραμόρφωση δοκού και έντονα σημάδια τοπικού λυγισμού πριν την αστοχία

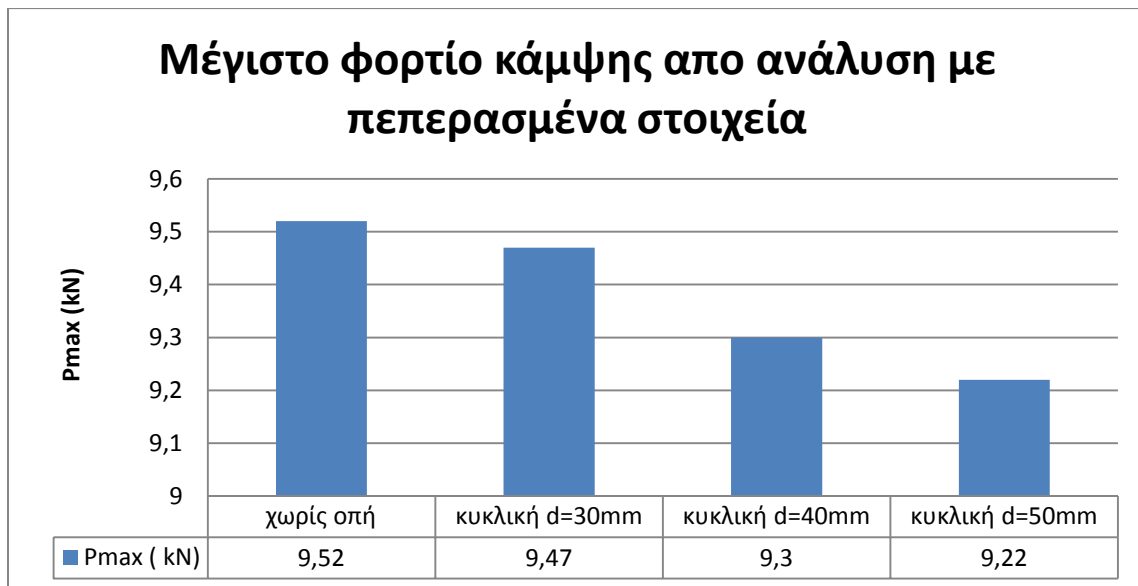
Η κύρια μορφή αστοχίας των δοκών C είναι ο τοπικός λυγισμός και η παρουσία της οπής δεν έχει καμία επίπτωση στην παραμόρφωση.

Στον πίνακα 7.1 δίνεται το μέγιστο φορτίο κάμψης P_{max} για τις δοκούς διατομής C χωρίς ενισχύσεις.

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Διατομή		Μέγιστο φορτίο κάμψης P _{max} (kN)	
Διατομή C χωρίς ενισχύσεις	χωρίς οπή	9,52	
	κυκλική οπή διαμέτρου:	30mm	9,47
		40mm	9,30
		50mm	9,22
	τετραγωνική οπή πλευράς:	20mm	9,40
		25mm	9,39
		30mm	9,33

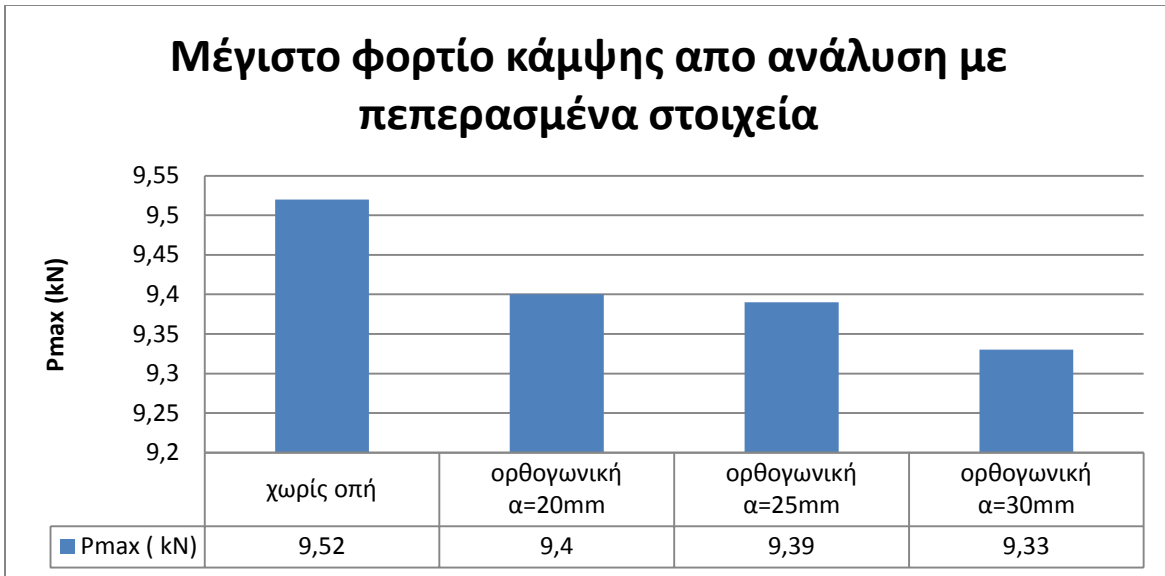
Πίνακας 7.1 : Αποτελέσματα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για δοκούς C με μήκος $l = 1200mm$



Γράφημα 7.1 : Μέγιστο φορτίο κάμψης P_{max} για μέλη διατομής C χωρίς ενισχύσεις

Συγκρίνοντας τις παραπάνω τιμές , συμπεραίνουμε ότι η παρουσία των οπών στον κορμό είχε ως συνέπεια μια μικρή μείωση της φέρουσας ικανότητας των δοκών. Συγκεκριμένα , τη δυσμενέστερη επίδραση είχε η οπή με μεγαλύτερη διάμετρο ($d = 50mm$) η οποία κατάφερε μείωση του μέγιστου φορτίου κάμψης κατά 3,15% ενώ οι οπές με μικρότερη διάμετρο μείωσαν το P_{max} κατά 0,53% και κατά 2,31% αντίστοιχα με το μέγεθος της οπής.

Στο γράφημα 7.2 παρουσιάζονται συγκριτικά τα μέγιστα φορτία κάμψης για τα μέλη με τετραγωνικές οπές στον κορμό, διαφόρων πλευρών.

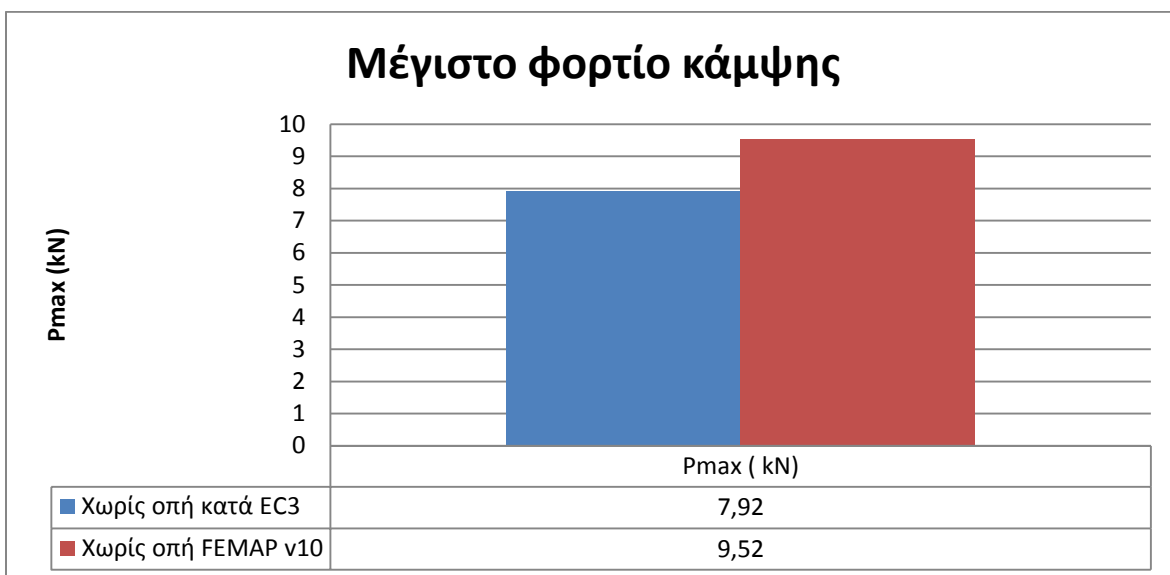


Γράφημα 7.2 : Μέγιστο φορτίο κάμψης Pmax για μέλη διατομής C χωρίς ενισχύσεις

Σε αυτή την περίπτωση , τη δυσμενέστερη επίδραση είχε η οπή με τη μεγαλύτερη πλευρά (α = 30mm) η οποία κατάφερε μείωση του μέγιστου φορτίου κάμψης κατά 2,00% ενώ οι οπές με μικρότερη πλευρά μείωσαν το Pmax κατά 1,26% για α=20mm και κατά 1,37% για α=25mm. Εδώ παρατηρούμε πως οι οπές μείωσαν κατά πολύ λίγο τη φέρουσα ικανότητα των δοκών .

Επίσης , παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση αντοχής για κυκλικές οπές σε σχέση με τις τετραγωνικές οπές στις δοκούς.

Η τιμή του Pmax για δοκό διατομής C χωρίς ενισχύσεις και χωρίς οπή υπολογίστηκε κατά τον EC3 ως Pmax = 7,92 kN ενώ με το FEMAP v10 υπολογίστηκε ως Pmax = 9,52 kN

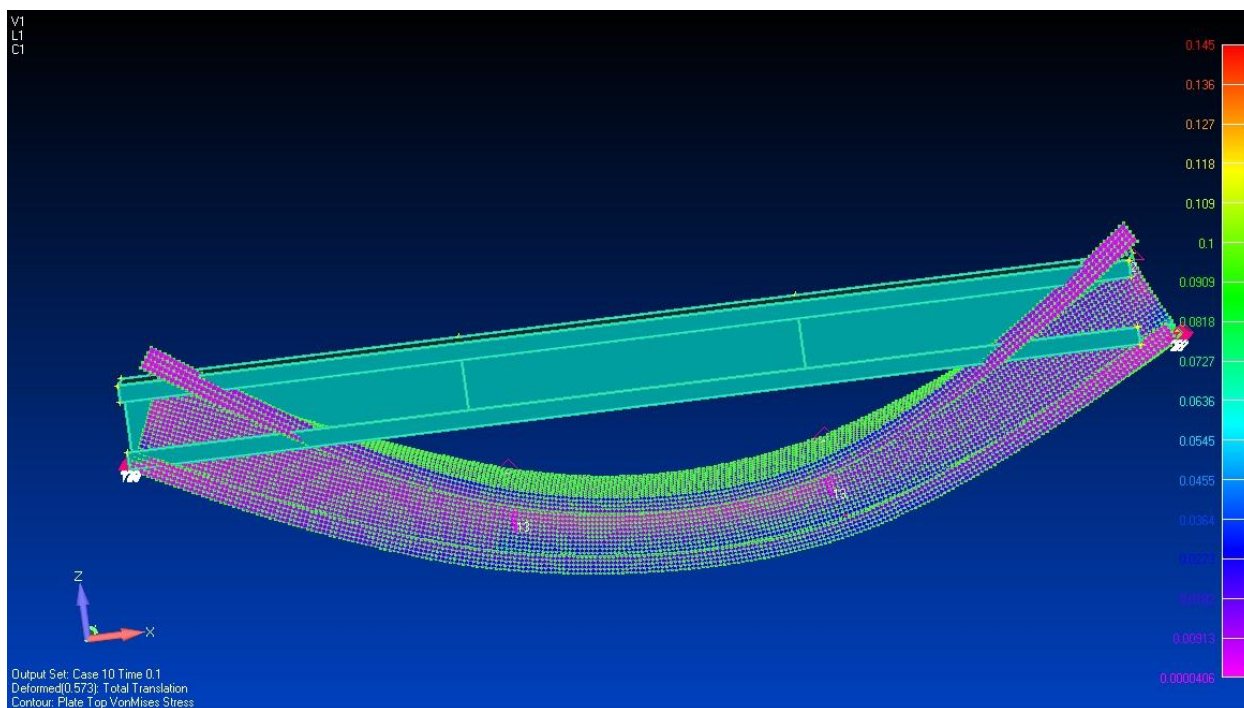


Γράφημα 7.3 : Μέγιστο φορτίο κάμψης Pmax διατομής C χωρίς ενισχύσεις

Όπως μπορούμε να δούμε και στο γράφημα, η προσομοίωση με το FEMAP v10 έδωσε μεγαλύτερο μέγιστο φορτίο σε σχέση με τη θεωρητική προσέγγιση κατά EC3 . Μάλιστα η αύξηση του φορτίου προέκυψε στο 20,2 %.

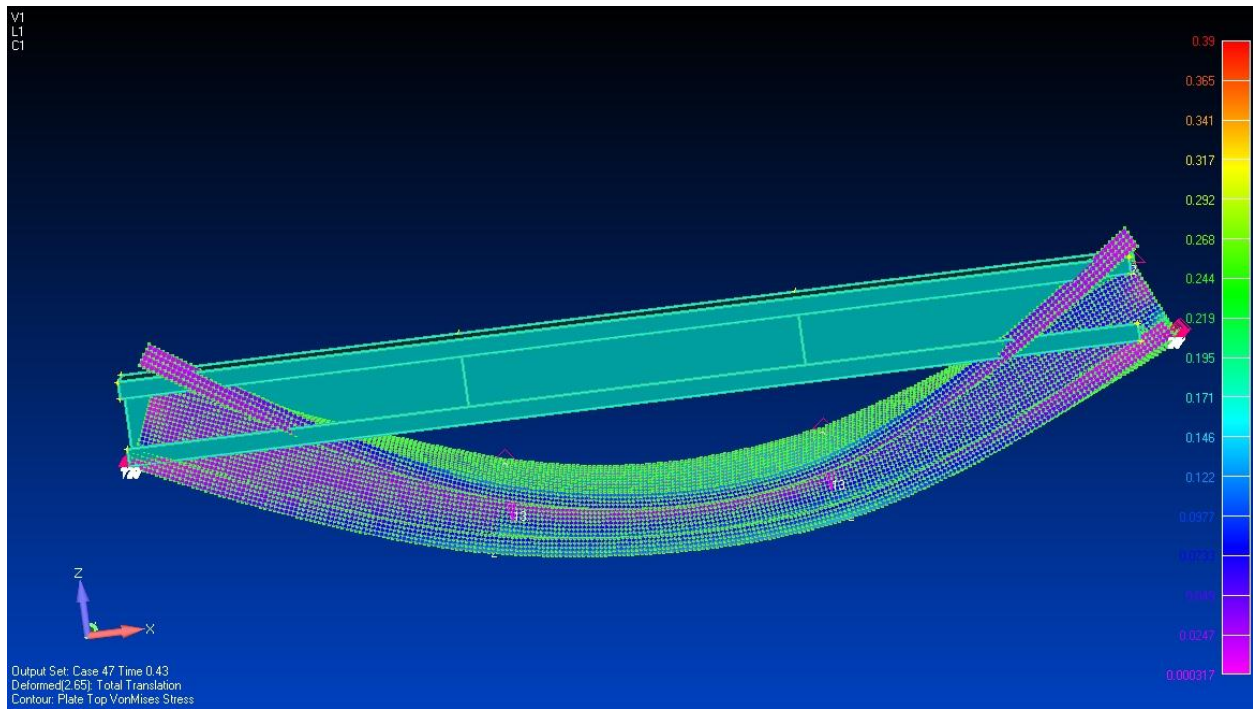
7.3 Διατομές C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα

Η παραμόρφωση των δοκών (ανεξαρτήτως ύπαρξης οπής) εξελίσσεται όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε στα σχήματα 7.4 έως 7.6.

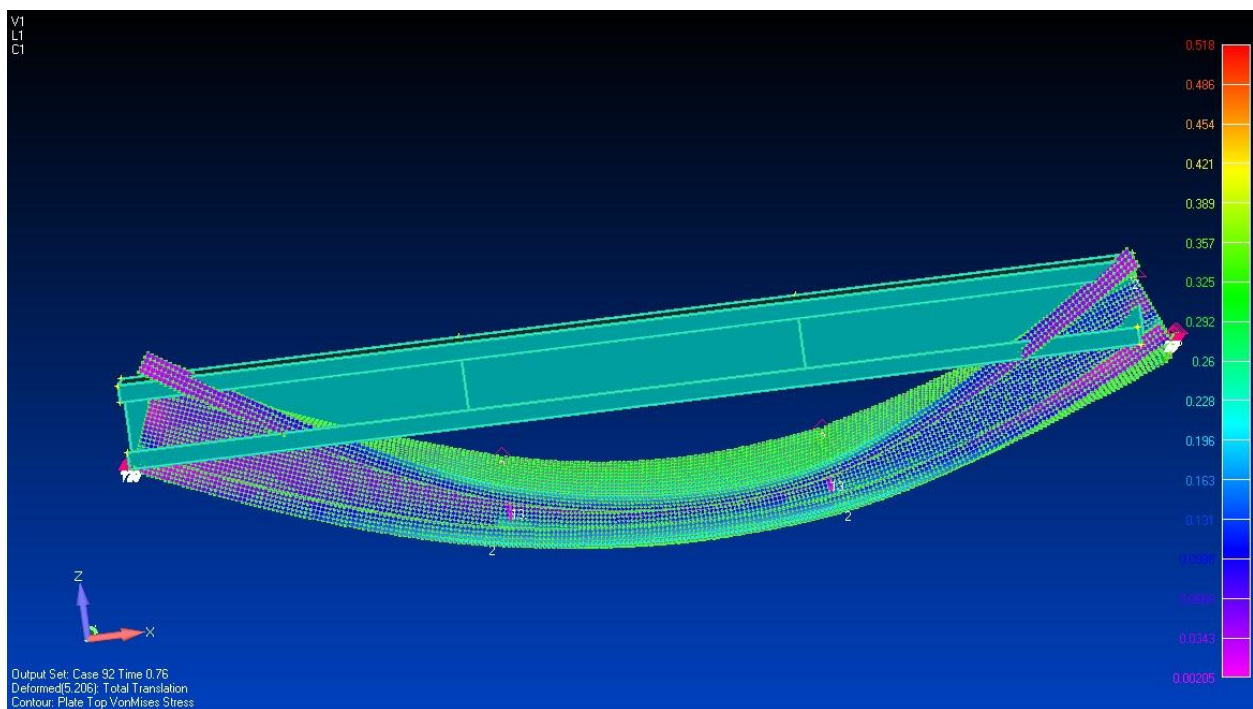


Σχήμα 7.4 : Παραμόρφωση δοκού C με ακραίες ενισχύσεις στα πρώτα βήματα της ανάλυσης

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ



Σχήμα 7.5 : Παραμόρφωση δοκού και πρώτα σημάδια λυγισμού με στρέβλωση



Σχήμα 7.6 : Έντονα σημάδια λυγισμού με στρέβλωση λίγο πριν την αστοχία

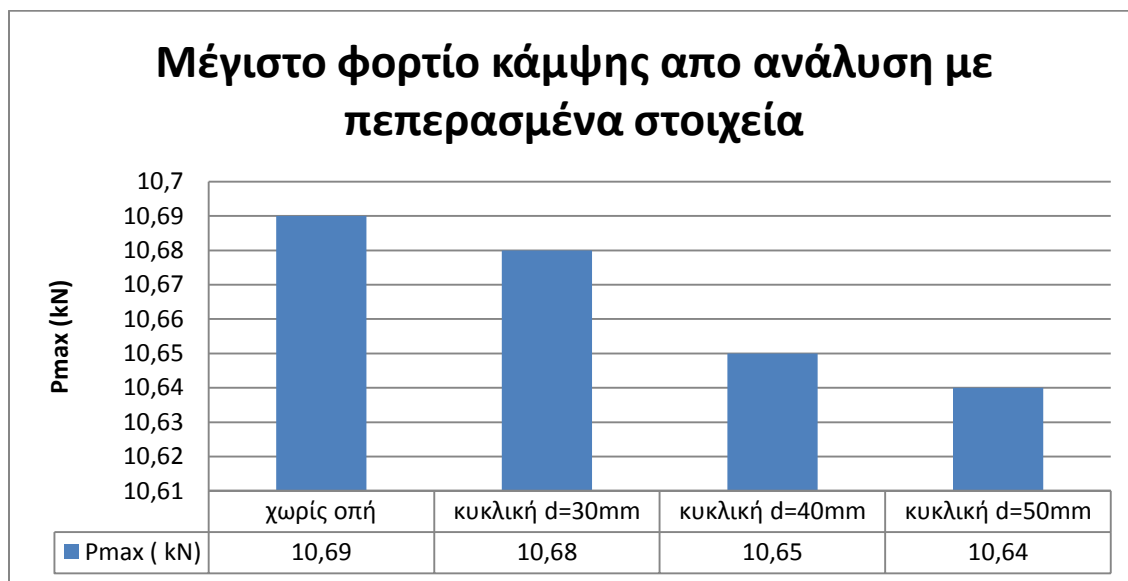
ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Η κύρια μορφή αστοχίας των δοκών C με ακραίες ενισχύσεις στα πέλματα είναι ο λυγισμός με στρέβλωση και η παρουσία οπών δεν έχει καμία επίπτωση στις παραμορφώσεις.

Στον πίνακα 7.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για κάθε οπή:

Διατομή		Μέγιστο φορτίο κάμψης P_{max} (kN)	
Διατομή C με ενισχύσεις	χωρίς οπή	10,69	
	κυκλική οπή διαμέτρου:	30mm	10,68
		40mm	10,65
		50mm	10,64
	τετραγωνική οπή πλευράς:	20mm	10,69
		25mm	10,69
		30mm	10,67

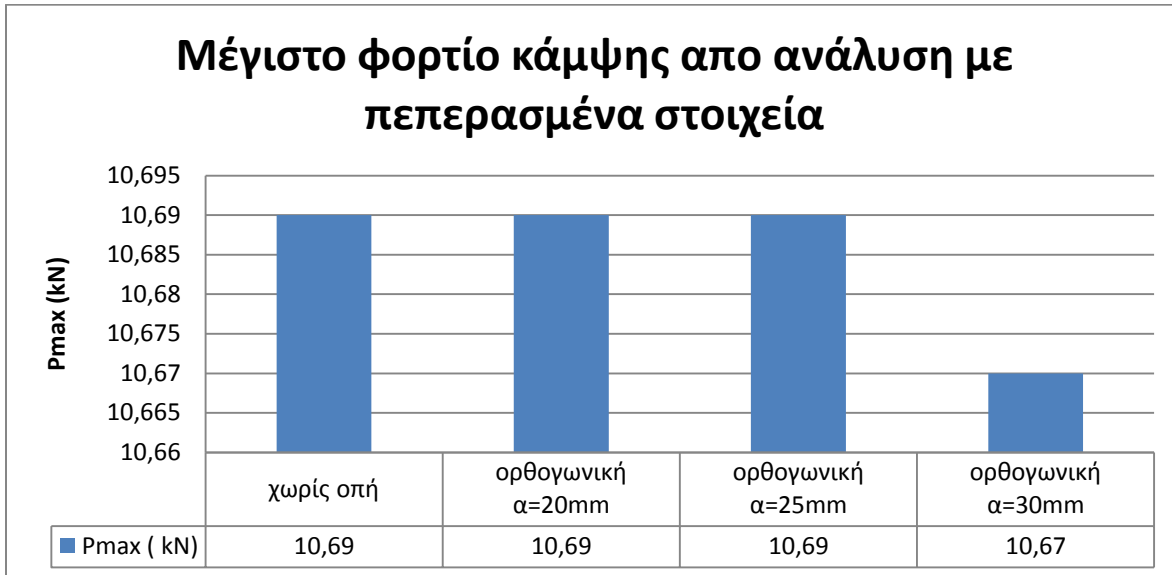
Πίνακας 7.2 : Αποτελέσματα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για δοκούς C με μήκος $l = 1200mm$



Γράφημα 7.4 : Μέγιστο φορτίο κάμψης P_{max} για μέλη διατομής C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα

Συγκρίνοντας τις παραπάνω τιμές προκύπτει πως η παρουσία οπής δεν έχει σχεδόν καμία επίπτωση στη φέρουσα ικανότητα της δοκού και η μέγιστη μείωση που παρατηρείται στο P_{max} είναι της τάξης του 0,47% και οφείλεται στην οπή με $d=50mm$. Αντίστοιχα για κυκλική οπή διαμέτρου $d=30mm$ η μείωση είναι της τάξης του 0,09% και για οπή διαμέτρου $d=40mm$ η μείωση είναι ίση με 0,37%.

Στο γράφημα 7.5 παρουσιάζονται συγκριτικά τα μέγιστα φορτία κάμψης για τα μέλη με τετραγωνικές οπές στον κορμό, διαφόρων πλευρών.

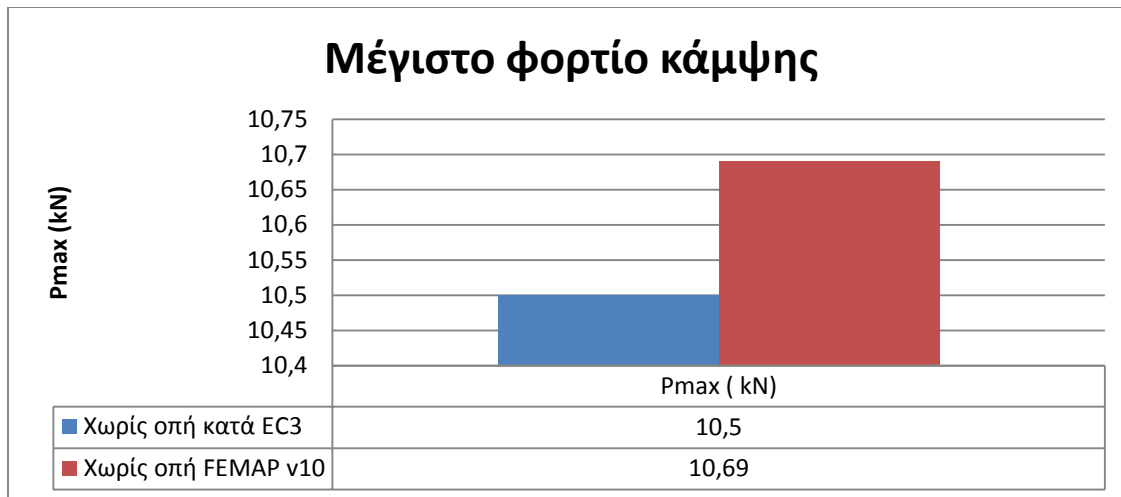


Γράφημα 7.5 : Μέγιστο φορτίο κάμψης Pmax για μέλη διατομής C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα

Στην περίπτωση αυτή , η επίπτωση της οπής στη φέρουσα ικανότητα είναι μηδενική και η μόνη διαφοροποίηση παρουσιάζεται για την τετραγωνική οπή πλευράς α=30mm . Η μείωση του μέγιστου φορτίου κάμψης είναι της τάξης του 0,19% . Για τις υπόλοιπες οπές δεν υπάρχει καμία μείωση.

Επίσης , η μείωση αντοχής είναι μεγαλύτερη στις κυκλικές οπές σε σχέση με τις τετραγωνικές οπές αλλά οι μειώσεις δεν παύουν συνολικά να είναι πάρα πολύ μικρές.

Η τιμή του μέγιστου φορτίου κάμψης κατά EC3 υπολογίστηκε ως Pmax = 10,50 kN ενώ η προσομοίωση με FEMAP v10 έδωσε Pmax = 10,69 kN



Γράφημα 7.6 : Μέγιστο φορτίο κάμψης Pmax διατομής C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις

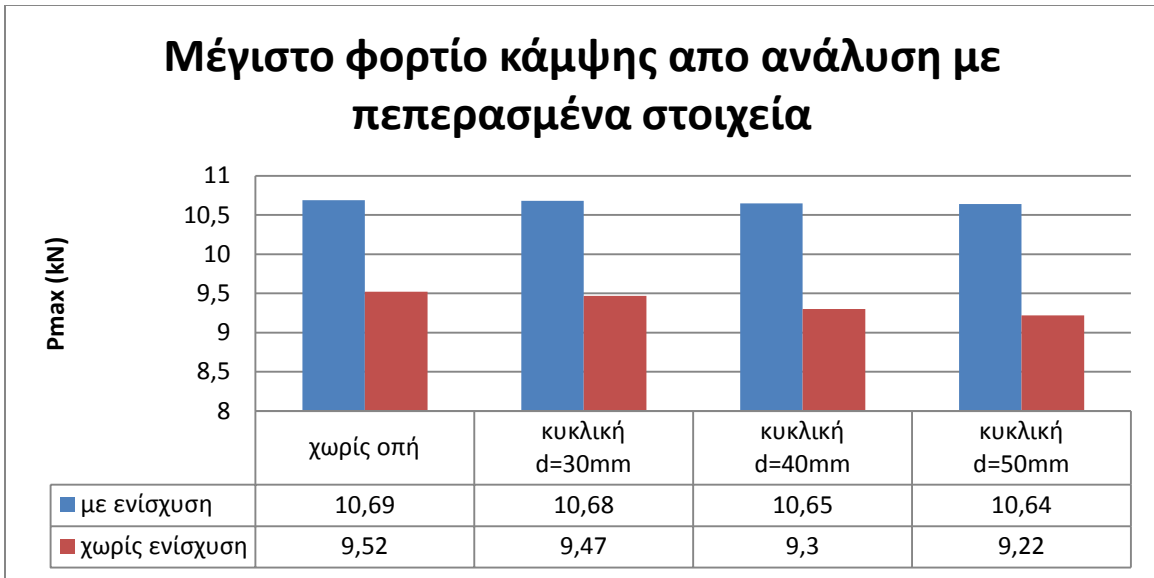
Όπως παρατηρούμε και στο γράφημα 7.6 , η προσομοίωση με FEMAP v10 έδωσε μεγαλύτερη τιμή Pmax σε σχέση με τη θεωρητική προσέγγιση κατά EC3. Η αύξηση του φορτίου είναι της τάξης του 1,81%

7.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων διατομών C χωρίς ενισχύσεις και διατομών C με ακραίες κάθετες ενισχύσεις

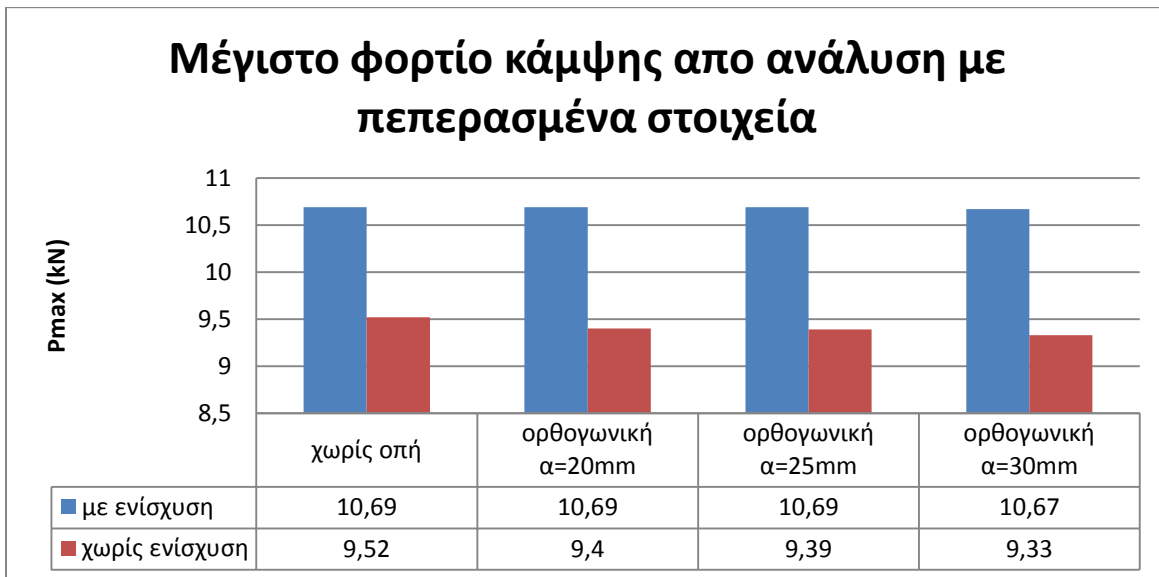
Μελετώντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων που μας έδωσε το FEMAP v10 , για τα μέλη διατομής C , χωρίς ενισχύσεις και με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα, βγάζουμε ορισμένα συμπεράσματα.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατηρούμε πως η παρουσία των ακραίων κάθετων ενισχύσεων οδήγησε σε σημαντική αύξηση του μέγιστου φορτίου κάμψης Pmax . Ειδικότερα , στα μέλη C χωρίς οπές η ενίσχυση αύξησε την αντοχή της δοκού κατά 12,29% , στα μέλη C με κυκλική οπή διαμέτρου d=30mm κατά 12,78% , στα μέλη C με κυκλική οπή διαμέτρου d=40mm κατά 14,52% και στα μέλη C με κυκλική οπή διαμέτρου d=50mm κατά 15,40% (γράφημα 7.7).

Αντίστοιχα, στα μέλη C με ορθογωνική οπή πλευράς α= 20mm η ενίσχυση αύξησε τη φέρουσα ικανότητα της δοκού κατά 13,72 % , στα μέλη C με ορθογωνική οπή πλευράς α=25mm κατά 13,84 % και στα μέλη C με ορθογωνική οπή πλευράς α=30mm κατά 14,36 % (γράφημα 7.8). Άρα, αποδεικνύεται πως οι ενισχύσεις αυξάνουν την αντοχή των δοκών σε μονοαξονική κάμψη.



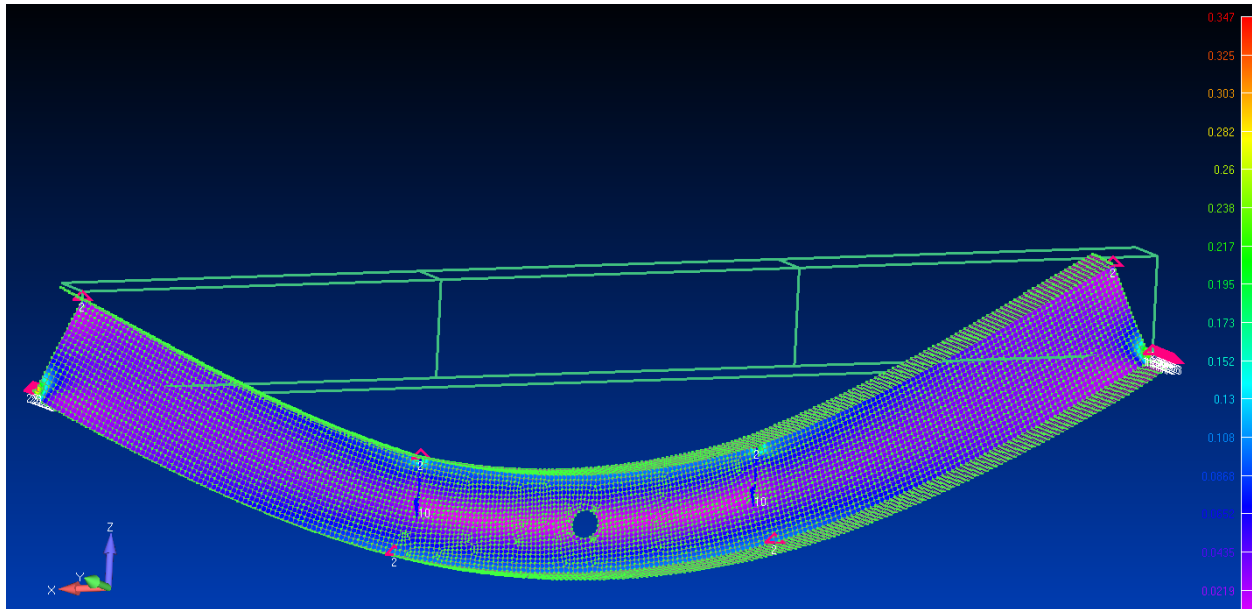
Γράφημα 7.7 : Μέγιστο φορτίο κάμψης P_{max} για δοκούς C με και χωρίς ενισχύσεις



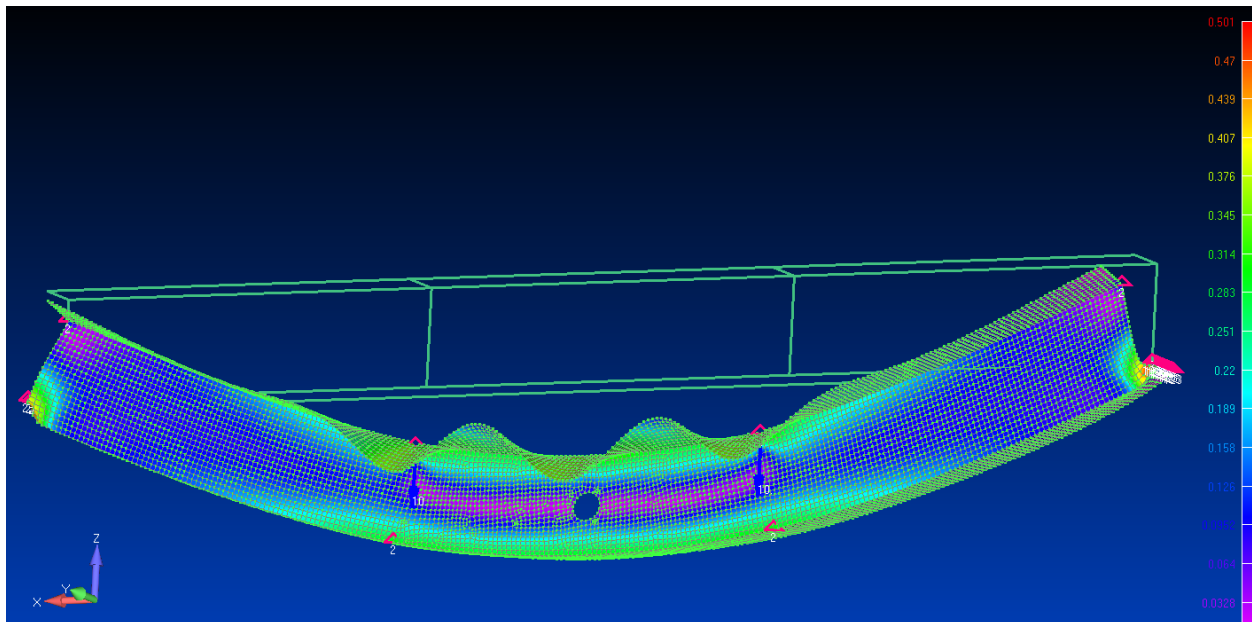
Γράφημα 7.8 : Μέγιστο φορτίο κάμψης P_{max} για δοκούς C με και χωρίς ενισχύσεις

7.5 Διατομές Z χωρίς ενισχύσεις

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η παραμόρφωση της δοκού Z (ανεξαρτήτως ύπαρξης οπής) όπως προέκυψε από μη γραμμική ανάλυση με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 7.7 : Παραμόρφωση δοκού Z χωρίς ενισχύσεις στα πρώτα βήματα της ανάλυσης



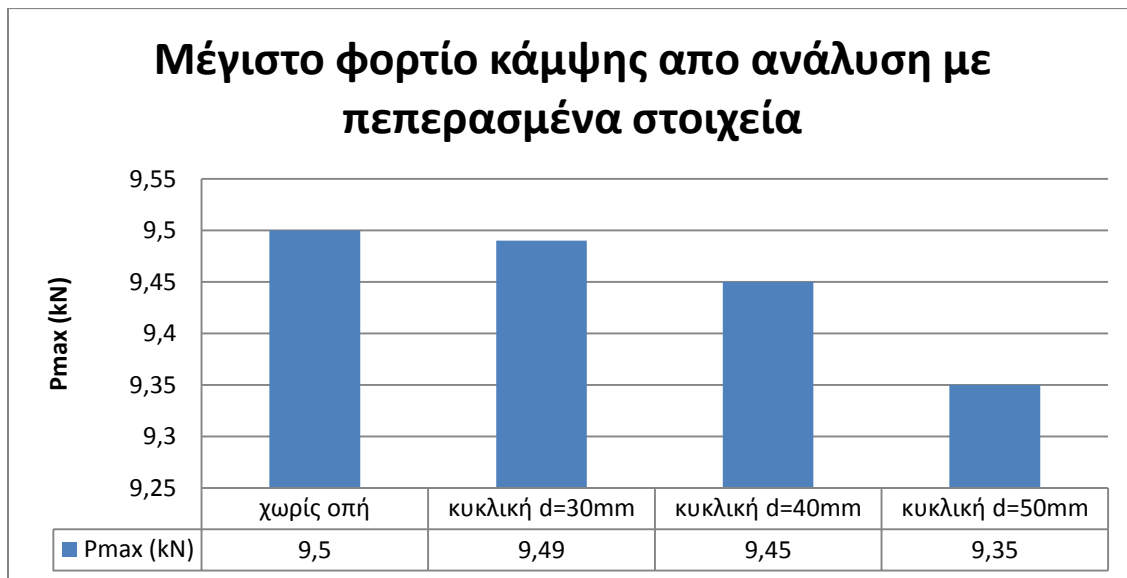
Σχήμα 7.8 : Παραμόρφωση δοκού Z με έντονα σημάδια τοπικού λυγισμού λίγο πριν την αστοχία

Εξετάζοντας τα μοντέλα παρατηρείται πως κυρίαρχη μορφή αστοχίας είναι ο τοπικός λυγισμός του άνω πέλματος και οι οπές δεν επηρεάζουν την παραμόρφωση.

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Διατομή		Μέγιστο φορτίο κάμψης P_{max} (kN)	
Διατομή Z χωρίς ενισχύσεις	χωρίς οπή	9,50	
	κυκλική οπή διαμέτρου:	30mm	9,49
		40mm	9,45
		50mm	9,35
	τετραγωνική οπή πλευράς:	20mm	9,45
		25mm	9,45
		30mm	9,44

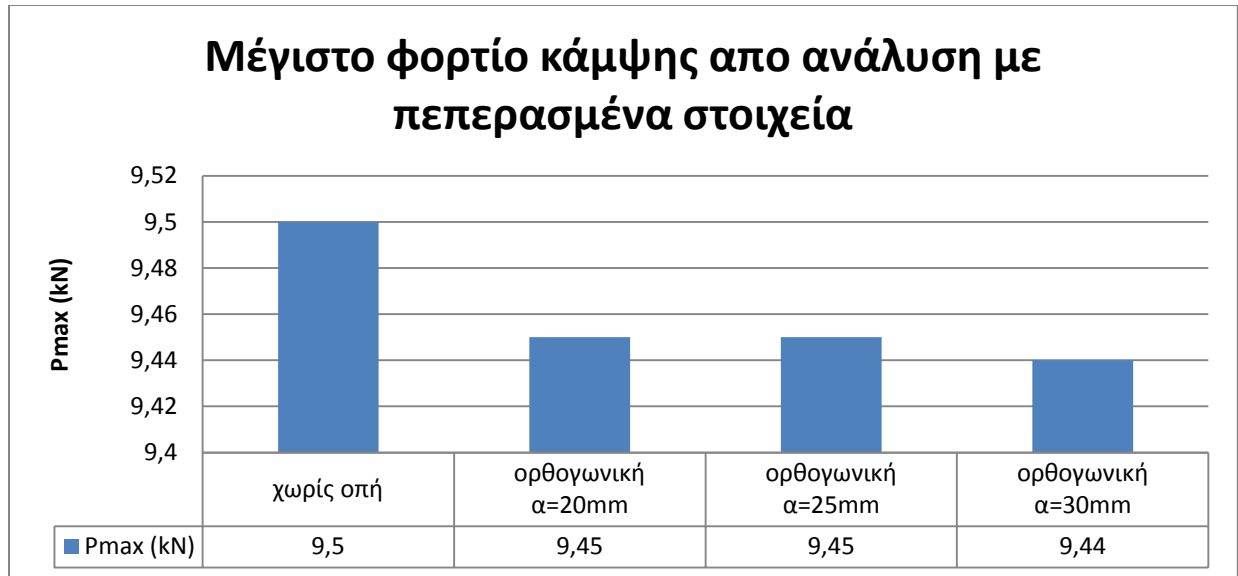
Πίνακας 7.3 : Αποτελέσματα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για δοκούς Z με μήκος $l = 1200mm$



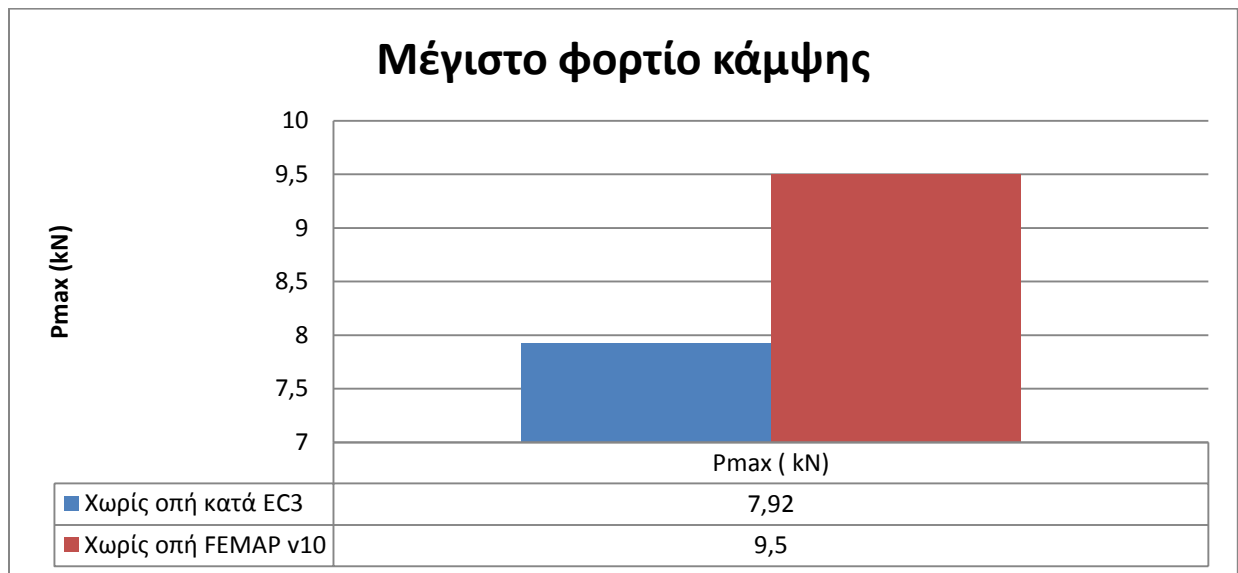
Γράφημα 7.9 : Μέγιστο φορτίο κάμψης για δοκούς διατομής Z χωρίς ενισχύσεις

Όπως βλέπουμε, η ύπαρξη οπής μείωσε λίγο τη φερουσα ικανότητα των δοκών με μέγιστη μείωση της τάξης του 1,58% η οποία εμφανίζεται για κυκλική οπή διαμέτρου $d=50mm$. Αντίστοιχα, για κυκλική οπή διαμέτρου $d=30mm$ η μείωση του P_{max} είναι της τάξης του 0,1 % ενώ για κυκλική οπή διαμέτρου $d=40mm$ η μείωση είναι ίση με 0,53%.

Για οπές τετραγωνικής διατομής η μείωση του P_{max} είναι ακόμα μικρότερη καθώς η μεγαλύτερη μείωση που εμφανίζεται αφορά την τετραγωνική οπή πλευράς $a=30mm$ και είναι της τάξης του 0,63 %. Για τετραγωνική οπή πλευράς $a=20mm$ η μείωση αντοχής ισούται με 0,53% και το ίδιο ισχύει για την οπή πλευράς $a=25mm$. Δηλαδή η αύξηση της τετραγωνικής οπής δε μείωσε σημαντικά την αντοχή της δοκού (γράφημα 7.10)



Γράφημα 7.10 : Μέγιστο φορτίο κάμψης για δοκούς διατομής Z χωρίς ενισχύσεις



Γράφημα 7.11 : Μέγιστο φορτίο κάμψης Pmax διατομής Z χωρίς ενισχύσεις

Όπως ήταν αναμενόμενο, η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία και σε αυτή την περίπτωση έδωσε αυξημένο μέγιστο φορτίο Pmax σε σχέση με τη θεωρητική προσέγγιση του EC3 και μάλιστα η αύξηση ήταν της τάξης του 19,95 %.

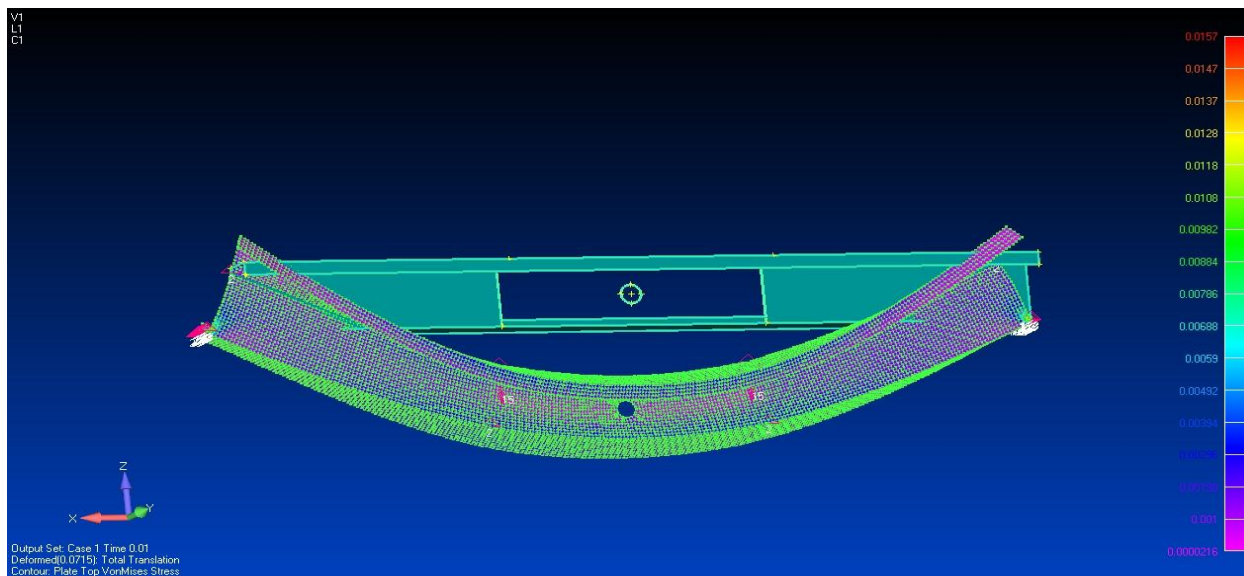
7.6 Διατομή Z με ακραίες κάθετες ενισχύσεις

Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι παραμορφώσεις των μονοαξονικά καμπτόμενων δοκών διατομής Z με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα όπως προέκυψαν από μη γραμμική ανάλυση (Nonlinear Static Analysis) πεπερασμένων στοιχείων.

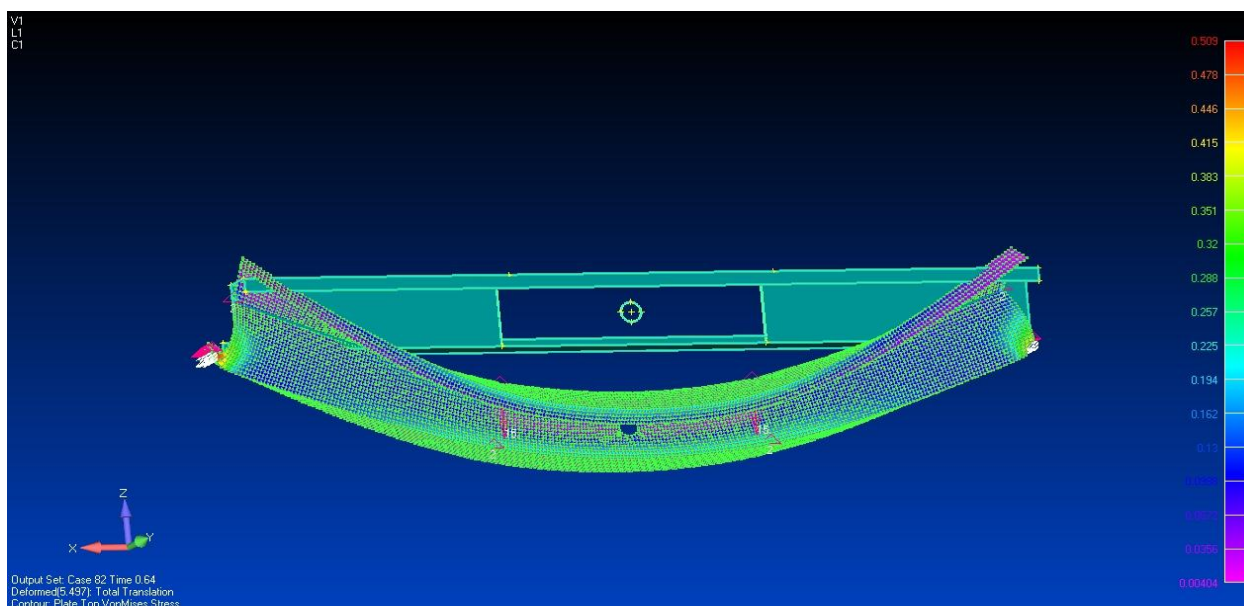
ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Και πάλι η ύπαρξη ή όχι οπής δεν επηρεάζει την παραμόρφωση των μοντέλων και όλα παρουσιάζουν την ίδια εικόνα. Συγκεκριμένα όλες οι δοκοί παραλαμβάνουν βέλος κάμψης ήδη από την πρώτη τοποθέτηση φορτίου (από το πρώτο 0,1 kN) και διακρίνεται λυγισμός με στρέβλωση διατομής με όλο και πιο έντονα σημάδια προς την αστοχία.

Στον πίνακα 7.4 παρουσιάζονται οι τιμές του R_{max} ανα περίπτωση, οι οποίες είναι πάρα πολύ κοντά μεταξύ τους όσο κι αν μεταβάλλεται η εκάστοτε οπή.



Σχήμα 7.9 : Παραμόρφωση δοκού Z με ακραίες κατακόρυφες ενισχύσεις στα πέλματα στα πρώτα βήματα της ανάλυσης.

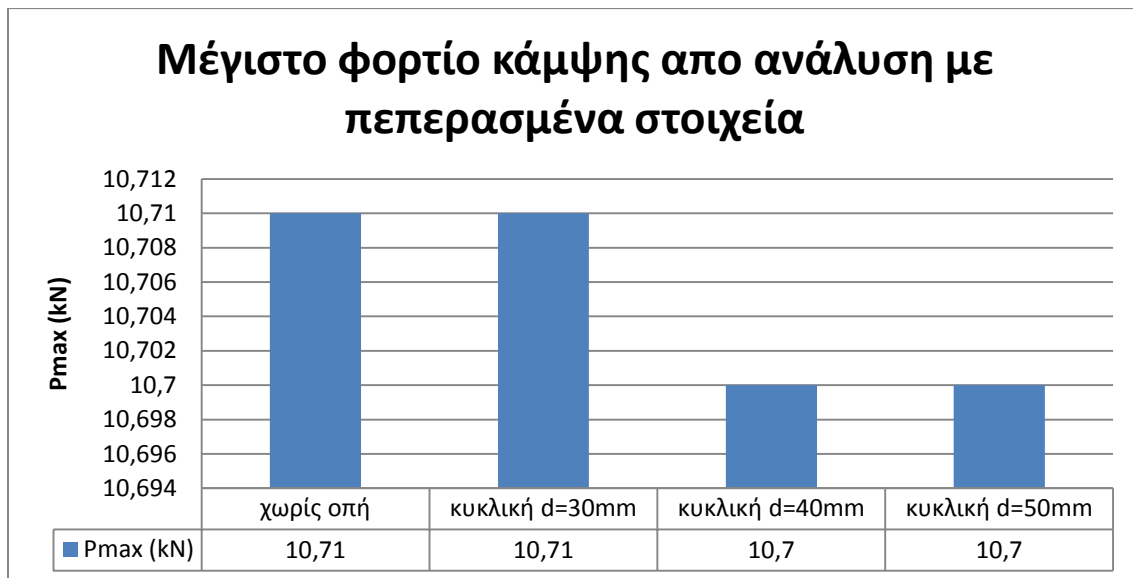


Σχήμα 7.10 : Παραμόρφωση δοκού Z με ακραίες κατακόρυφες ενισχύσεις στα πέλματα λίγο πριν την αστοχία

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Διατομή		Μέγιστο φορτίο κάμψης P _{max} (kN)	
Διατομή Z με ενισχύσεις	χωρίς οπή	10,71	
	κυκλική οπή διαμέτρου:	30mm	10,71
		40mm	10,70
		50mm	10,70
	τετραγωνική οπή πλευράς:	20mm	10,70
		25mm	10,70
30mm		10,69	

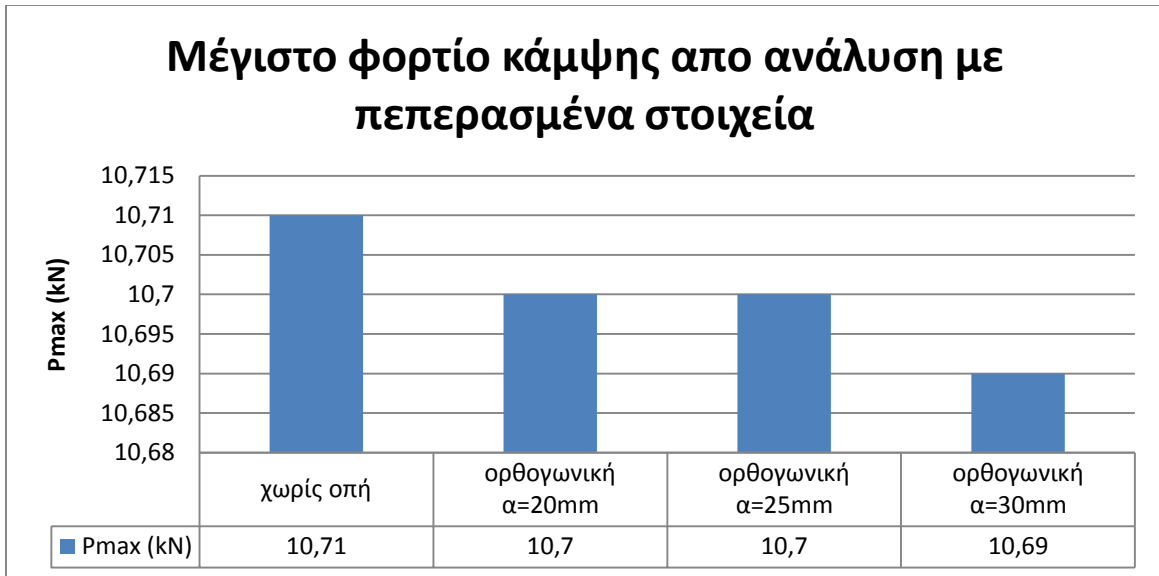
Πίνακας 7.4 : Αποτελέσματα ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία για δοκούς Z με μήκος $l = 1200mm$



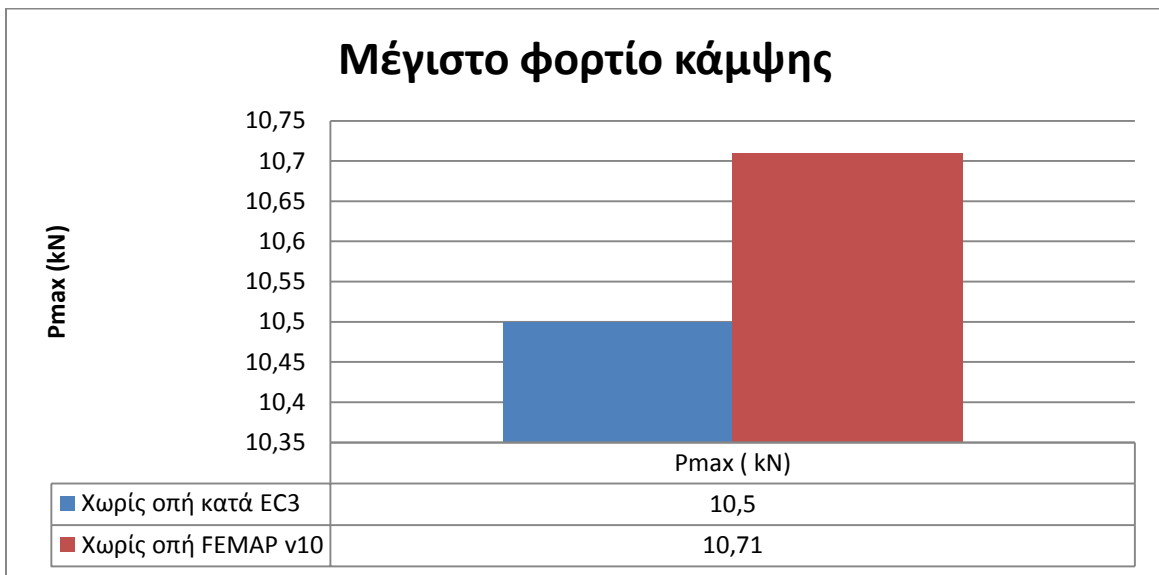
Γράφημα 7.12 : Μέγιστο φορτίο κάμψης για δοκούς διατομής Z με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα

Όπως φαίνεται και στο γράφημα 7.12 , οι τιμές είναι τόσο κοντά η μια στην άλλη που οι διαφορές τους είναι κάτω του 0,1%. Είναι δηλαδή το ίδιο μέγιστο φορτίο P_{max} για όλα τα μέλη με κυκλική οπή.

Αντίστοιχες διαφορές εμφανίζονται και για τις δοκούς με ορθογωνική οπή όπως παρατηρείται με τη βοήθεια του γραφήματος 7.13. Η μόνη εξαίρεση είναι η δοκός με οπή τετραγωνικής πλευράς $a=30mm$ η οποία επιφέρει μείωση στο μέγιστο φορτίο κάμψης κατά 0,19 %



Γράφημα 7.13 : Μέγιστο φορτίο κάμψης για δοκούς διατομής Z με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα

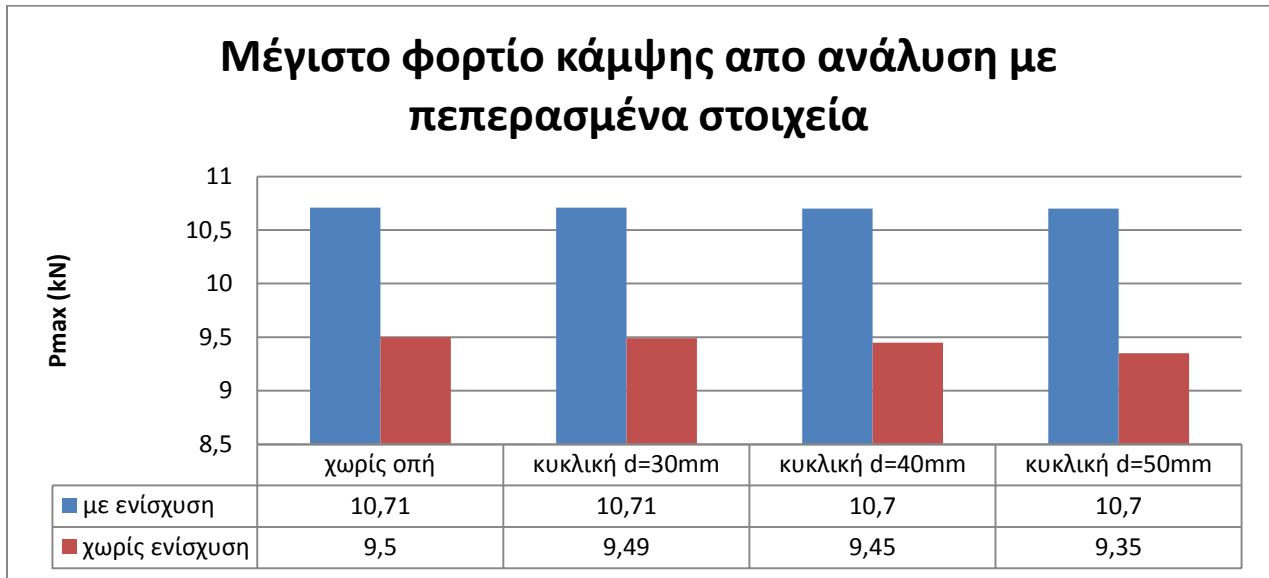


Γράφημα 7.14 : Μέγιστο φορτίο κάμψης Pmax δοκού Z με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα

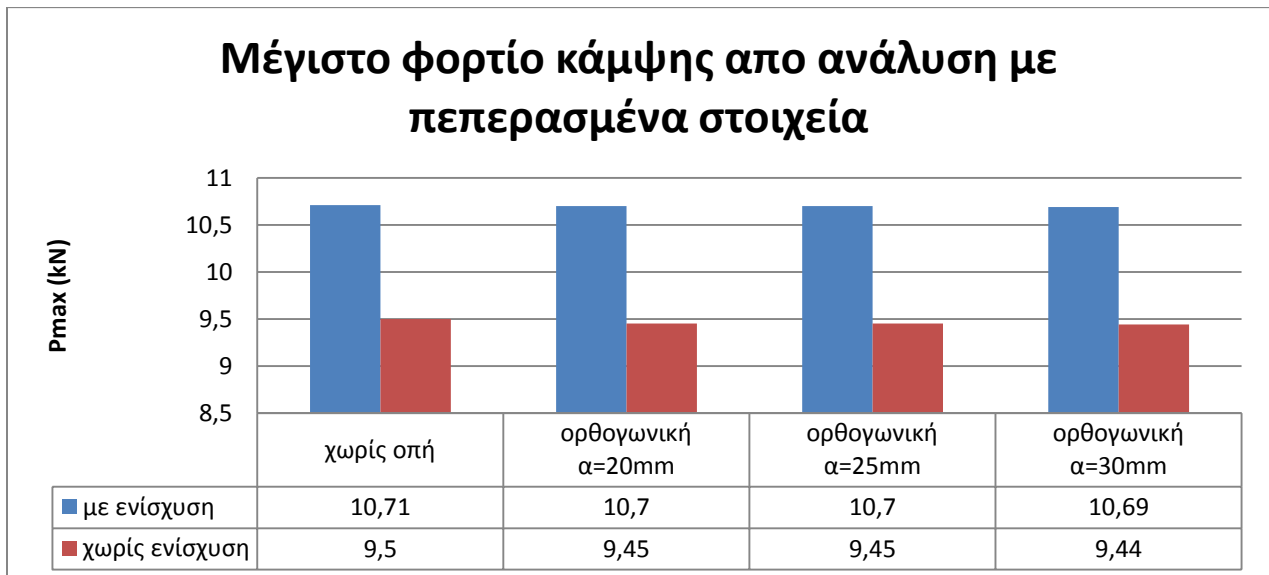
Η σύγκριση θεωρητικής προσέγγισης κατά EC3 και ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία έδειξε για μια ακόμη φορά πως το πρόγραμμα δίνει μεγαλύτερο φορτίο Pmax και μάλιστα η αύξηση που σημειώνεται είναι ίση με 2%.

7.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων διατομών Z χωρίς ενισχύσεις και διατομών με Z με κάθετες ακραίες ενισχύσεις στα πέλματα.

Μελετώντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων , για τα μέλη διατομής Z ενισχυμένα και μη, βγάζουμε ορισμένα συμπεράσματα.



Γράφημα 7.15 : Μέγιστο φορτίο κάμψης P_{max} για δοκούς Z με και χωρίς ακραίες κάθετες ενισχύσεις



Γράφημα 7.16 : Μέγιστο φορτίο κάμψης P_{max} για δοκούς Z με και χωρίς ακραίες κάθετες ενισχύσεις

ΚΑΜΨΗ ΛΕΠΤΟΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ C ΚΑΙ Z ΜΕ ΟΠΗ ΣΤΟΝ ΚΟΡΜΟ

Σύγκεκριμένα, παρατηρούμε πως οι ενισχύσεις και σε αυτή την περίπτωση αύξησαν την αντοχή σε κάμψη και αποδείχθηκε η αποτελεσματικότητά τους. Για δοκούς χωρίς οπή η αύξηση ανήλθε στο 12,74 % ενώ για τις κυκλικές οπές παρατηρήθηκε αύξηση 12,86 % (κυκλική οπής διαμέτρου $d=30\text{mm}$), αύξηση 13,23 % (κυκλική οπή διαμέτρου $d=40\text{mm}$) και αύξηση 14,44 % (κυκλική οπή διαμέτρου $d=50\text{mm}$). Αντίστοιχα, για τις τετραγωνικές οπές η αύξηση που σημειώθηκε ανήλθε στο 13.23% για δυο από τις τρεις οπές ($\alpha=20\text{mm}$ και $\alpha=25\text{mm}$) ενώ για τη μεγαλύτερη οπή η αύξηση ήταν 13.24 % . Αυτό πρακτικά σημαίνει πως η αύξηση ήταν της ίδιας τάξης σε όλες τις τετραγωνικές οπές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Γενικά συμπεράσματα

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, αποδείχθηκε η αποτελεσματικότητα των ακραίων ενισχύσεων σε όλα τα μοντέλα που εξετάστηκαν. Παρατηρήθηκε αύξηση του μέγιστου φορτίου P_{max} σε μονοαξονική κάμψη καθώς περιορίστηκε το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού στο άνω πέλμα. Όμως, η τοποθέτηση ενισχύσεων στις λεπτότοιχες διατομές C και Z οδήγησε τις δοκούς σε αστοχία λόγω λυγισμού με στρέβλωση διατομής. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς, όπως αναφέρθηκε στα θεωρητικά στοιχεία του λυγισμού, η ενίσχυση προσθέτει έναν ενδιάμεσο κόμβο ο οποίος με τη σειρά του μπορεί να μετατοπισθεί προσθέτοντας μια νέα πιθανή μορφή λυγισμού.

Επίσης, αυτό που παρατηρήθηκε πολύ έντονα είναι η μηδενική διαφοροποίηση της αντοχής σε σχέση με τις διαφορετικές οπές στα ενισχυμένα μέλη. Οι διαφορές που σημειώθηκαν είναι τόσο μικρές που μπορούμε να αποφανθούμε πως η αστοχία λόγω λυγισμού με στρέβλωση διατομής δεν επηρεάζεται καθόλου από την ύπαρξη ή μη οπών στον κορμό. Δηλαδή η ενισχυμένη δοκός δεν κινδυνεύει από τη διάνοιξη οπών αλλά καθαρά από λυγισμό με στρέβλωση διατομής.

Κάτι πολύ σημαντικό που παρατηρήθηκε, είναι το γεγονός πως στην κάμψη λεπτότοιχων μελών διατομής C και Z η διάνοιξη οπών δεν επηρεάζει καθόλου την παραμόρφωση των μελών. Συγκεκριμένα, το βέλος κάμψης δεν επηρεάζεται καθόλου από την ύπαρξη ή μη οπών ενώ και ο τοπικός λυγισμός έχει ακριβώς την ίδια μορφή σε όλες τις μη ενισχυμένες δοκούς C και Z διατομής. Αντίστοιχα, και η μορφή του λυγισμού με στρέβλωση διατομής είναι ακριβώς η ίδια.

Τέλος, η σύγκριση των αποτελεσμάτων του Ευρωκώδικα με τα αποτελέσματα των αναλύσεων με χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων έδειξε πως οι διαφορές που σημειώθηκαν δεν ήταν πολύ μεγάλες. Η μέγιστη απόκλιση που παρατηρήθηκε αφορά τις δοκούς χωρίς ενισχύσεις και ήταν της τάξης του 20% περίπου. Ο κυριότερος λόγος διαφοροποίησης έχει να κάνει με τις ιδιότητες του υλικού διότι στη θεωρητική προσέγγιση θεωρούμε απολύτως ελαστική ανάλυση ενώ με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμικότητα υλικού και ανάλυσης. Αντίθετα, στις δοκούς με ενισχύσεις τα θεωρητικά αποτελέσματα είχαν πολύ μικρές αποκλίσεις από τα υπολογισθέντα από τη μη γραμμική ανάλυση του FEMAP v10. Άρα, στις δοκούς με ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα, η προσομοίωση με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων ακολουθεί πιστά τη συμπεριφορά που προβλέπεται από τον κανονισμό, το οποίο σημαίνει πως στα ενισχυμένα μέλη δεν αξιοποιείται καθόλου η μη γραμμικότητα που εισάγεται στο FEMAP v10.

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. Τσατσαρά Ε. (2007), «Κρίσιμα φορτία λυγισμού σε διατομές Z με οπές στον κορμό», Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
6. Λάμπρου Α. (2007), « Διερεύνηση αντοχής λεπτότοιχων διατομών Z με οπές στον κορμό έναντι θλιπτικών φορτίων », Διπλωματική εργασία , Σχολή πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
7. Παϊση Β. (2007), « Μελέτη ευστάθειας λεπτότοιχων δοκών διατομής U υπό κάμψη», Μεταπτυχιακή εργασία , Μεταπτυχιακό πρόγραμμα ειδίκευσης “Δομοστατικός Σχεδιασμός και ανάλυση κατασκευών”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
8. Τριμίντζιου Μ. (2012), « Αντοχή σε θλίψη λεπτότοιχων διατομών C και Z με οπές στον κορμό», Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
9. Δικτυακοί τόποι