

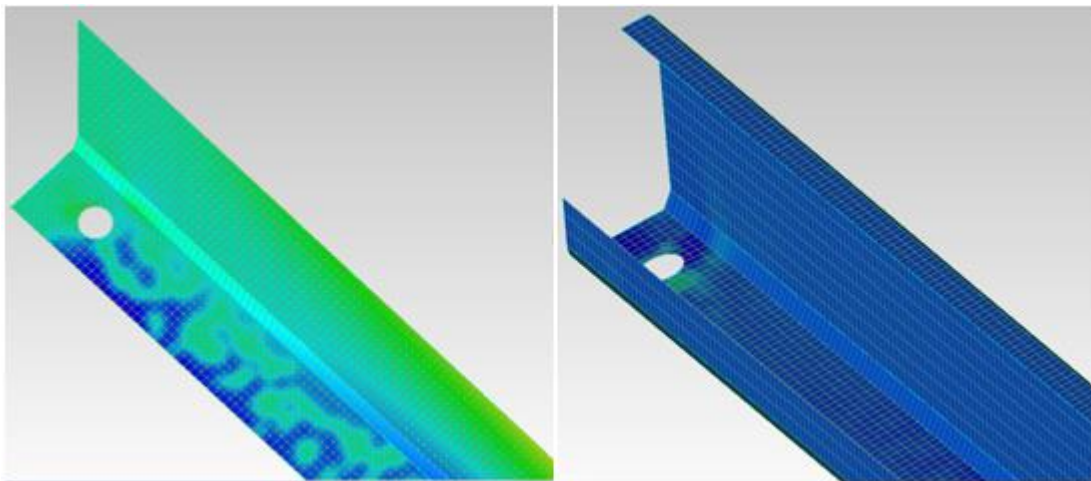


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## Βελτιστοποίηση μελών διατομής γωνιακού υπό αξονική φόρτιση



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρυσούλα Κ. Κόντου

Επιβλέπων: Ιωάννης Ραυτογιάννης

Αθήνα, Μάρτιος 2015

ΕΜΚ ΔΕ 2015/10

Κόντου Κ. Χ.(2015).  
Βελτιστοποίηση μελών διατομής γωνιακού υπό αξονική φόρτιση  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2015/10  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Kontou K. C.(2015).  
Optimization of angle section members under axial force  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2015/10  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

# Πίνακας Περιχομένων

Περίληψη.....	5
Abstract .....	6
Ευχαριστίες.....	7
1. Εισαγωγή.....	8
1.1 Χάλυβες ψυχρής ελάσεως.....	8
1.2 Πλεονεκτήματα χρήσης στοιχείων από χάλυβα ψυχρής ελάσεως .....	12
1.3 Εφαρμογές.....	13
2. Αντοχή μελών με βάση τον Ευρωκώδικα .....	16
2.1 Ιδιότητες υλικών και διατομών .....	16
2.1.1 Ποιότητες χαλύβων.....	16
2.1.2 Ιδιότητες υλικού μελών και φύλλων ψυχρής ελάσεως.....	17
2.1.3 Διαστάσεις διατομών .....	17
2.1.4 Επιρροή στρογγυλεμένων γωνιών .....	18
2.1.5 Γεωμετρικές συνθήκες ισχύος .....	21
2.1.6 Προσομοίωση για στατική ανάλυση.....	22
2.2 Αντοχή λεπτότοιχων στοιχείων.....	23
2.2.1 Θλιπτική αντοχή .....	23
2.2.1.1 Κατάταξη γωνιακών διατομών .....	23
2.2.1.2 Καμπτικός λυγισμός .....	24
2.2.1.3 Τοπικός και στρεβλωτικός λυγισμός .....	25
2.2.1.4 Τοπικός λυγισμός επίπεδων στοιχείων χωρίς ενισχύσεις .....	28
2.2.1.5 Τοπικός λυγισμός επίπεδων στοιχείων με ενισχύσεις .....	32
2.2.1.6 Επίπεδα στοιχεία με ακραίες ενισχύσεις .....	34
2.2.1.7 Αντοχή σε λυγισμό .....	37
2.2.2 Εφελκυστική αντοχή.....	39
3. Προσομοίωση μελών με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FEMAP .....	42
3.1 Εισαγωγή.....	42
3.2 Καθορισμός της γεωμετρίας .....	42
3.3 Καθορισμός του υλικού .....	45
3.4 Διακριτοποίηση των μελών.....	46
3.5 Εισαγωγή των στηρίξεων.....	47
3.6 Εισαγωγή των φορτίων .....	48
3.7 Ανάλυση.....	50
4. Αποτελέσματα αναλύσεων .....	51
4.1 Αποτελέσματα ανάλυσης με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FEMAP .....	51
4.1.1 Αποτελέσματα γραμμικής ανάλυσης για θλιπτικό φορτίο .....	51
4.1.1.1 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 χωρίς ενισχύσεις.....	51
4.1.1.2 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 με ακραίες ενισχύσεις.....	52
4.1.1.3 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 χωρίς ενισχύσεις.....	54
4.1.1.4 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 με ακραίες ενισχύσεις.....	55
4.1.1.5 Σύγκριση μελών γραμμικής ανάλυσης .....	57
4.1.2 Αποτελέσματα μη γραμμικής ανάλυσης.....	58
4.1.2.1 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 χωρίς ενισχύσεις και εφαρμογή θλιπτικού φορτίου .....	58
4.1.2.2 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 με ακραίες ενισχύσεις και εφαρμογή θλιπτικού φορτίου.....	59

4.1.2.3 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 χωρίς ενισχύσεις και εφαρμογή θλιπτικού φορτίου .....	61
4.1.2.4 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 με ακραίες ενισχύσεις και εφαρμογή θλιπτικού φορτίου.....	62
4.1.2.5 Σύγκριση μελών μη γραμμικής ανάλυσης για εφαρμογή θλιπτικού φορτίου.....	64
4.1.2.6 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 χωρίς ενισχύσεις και εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου.....	65
4.1.2.7 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 με ακραίες ενισχύσεις και εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου.....	66
4.1.2.8 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 χωρίς ενισχύσεις και εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου.....	68
4.1.2.9 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 με ακραίες ενισχύσεις και εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου.....	69
4.1.2.10 Σύγκριση μελών μη γραμμικής ανάλυσης για εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου.....	71
4.2 Αποτελέσματα ανάλυσης με τον Ευρωκώδικα 3 .....	72
4.2.1 Θλιπτική αντοχή .....	72
4.2.1.1 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 χωρίς ενισχύσεις.....	74
4.2.1.2 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 με ακραίες ενισχύσεις.....	77
4.2.1.3 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 χωρίς ενισχύσεις.....	79
4.2.1.4 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 με ακραίες ενισχύσεις.....	80
4.2.1.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	81
4.2.2 Εφελκυστική αντοχή.....	81
4.2.2.1 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 χωρίς ενισχύσεις.....	81
4.2.2.2 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 με ακραίες ενισχύσεις.....	83
4.2.2.3 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 χωρίς ενισχύσεις.....	84
4.2.2.4 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 με ακραίες ενισχύσεις.....	86
4.2.2.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	88
4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων της ανάλυσης με το πρόγραμμα και της ανάλυσης με τον Ευρωκώδικα.....	89
5. Συμπεράσματα.....	90
Βιβλιογραφία.....	91

## **Βελτιστοποίηση μελών διατομής γωνιακού υπό αξονική φόρτιση**

Κόντου Κ. Χ. (Επιβλέπων: Ραυτογιάννης Ι.)

### **Περίληψη**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται κατά πόσο βελτιώνεται η συμπεριφορά του μέλους KL 60/60/3 όταν ενισχυθεί και στα δύο σκέλη με ακραίες κάθετες ενισχύσεις. Οι χαλύβδινες διατομές KL χρησιμοποιούνται εκτενώς ως μέλη σε πύργους μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας δικτυωτού τύπου. Η σύνδεση των μελών αυτών με γειτονικά γίνεται μέσω κοχλίωσης στο ένα σκέλος. Παρουσιάζονται αποτελέσματα από αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα FEMAP όσον αφορά στην εφελκυστική και θλιπτική αντοχή των μελών. Τα αριθμητικά μοντέλα που υιοθετούνται προσομοιώνουν το μέλος με τις οπές στο ένα σκέλος σε συνδυασμό με μη-γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας. Διερευνήθηκαν δύο περιπτώσεις της διαμέτρου των οπών ενώ θεωρήθηκαν σταθερά το μήκος των μελών καθώς και η απόσταση των οπών από τα άκρα των μελών. Έγινε και γραμμική ανάλυση λυγισμού τα αποτελέσματα της οποίας κατέδειξαν το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς των αντίστοιχων αντοχών σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3.

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

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔE 2015/10

## **Optimization of angle section members under axial force**

Kontou K. C. (supervised by Rautogiannis I.)

### **Abstract**

This thesis investigates whether extreme vertical supports improve the behavior of a member with L-shaped cross-section 60/60/3. Cold-formed members with L-shaped cross-section are widely used in power transmission towers. A single bolted connection is designed to connect such members to each other. The tensile and compression resistance of these members are examined using finite element analysis by FEMAP software. The numerical models adopted simulate the member with the holes on one section in combination with non-linearity of material and geometry. Two cases of diameter of the holes are investigated and the length of members and the distance of the holes from the ends of the members are considered stable. Buckling analysis results showed the critical buckling load, which was used in the calculations of the resistance in accordance with Eurocode 3.

## Ευχαριστίες

Στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ραυτογιάννη Γ. Ιωάννη, για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέδωσε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας, το ενδιαφέρον του και τη συμβολή του στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη και τη συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Χάλυβες ψυχρής ελάσεως

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

Ωστόσο με την ανάπτυξη της κατασκευαστικής τεχνολογίας και τη διεύρυνση της γνώσης ως προς τη συμπεριφορά των χαλύβδινων διατομών ψυχρής έλασης το πεδίο εφαρμογής τους μεγάλωσε και θεωρείται πλέον ένα ανταγωνιστικό προϊόν σε διάφορα έργα πολιτικού μηχανικού. Η εφαρμογή ικανοποιητικής προστασίας έναντι οξειδώσεως και οι νέες μέθοδοι πυροπροστασίας σε συνδυασμό με τη μεγάλη διάρκεια ζωής του υλικού το κατέστησαν ευρέως χρησιμοποιήσιμο. Πλέον συναντάμε το χάλυβα ψυχρής διαμόρφωσης, εκτός των προ αναφερθέντων, ως τεγίδες και μηκίδες, σε γέφυρες, σε κτίρια, σε κατοικίες και προσθήκες ορόφων, σε στέγαστρα και πλαίσια, σε γερανογέφυρες και υπερμεγέθεις πυλώνες των ναυπηγείων ή των λιμένων και τέλος ως υλικό για επικαλύψεις.

Επιπλέον, τραπεζοειδή χαλυβδόφυλλα εφαρμόζονται ευρέως τα τελευταία 15 χρόνια σε συνδυασμό με σκυρόδεμα, ως στοιχεία σύμμικτων πλακών, οι οποίες έχουν το μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς σε πολυώροφα κτίρια και άλλες κατασκευές. Τα λεπτότοιχα στοιχεία ψυχρής έλασης θεωρούνται πολύ αποδοτικά από άποψη δυσκαμψίας και αντοχής. Επίσης είναι πολύ ελαφριά δεδομένου ότι έχουν πάχη έως και 0,5 mm. Η δημοτικότητά τους οφείλεται εκτός των άλλων στην ευκολία της μαζικής παραγωγής και προκατασκευής, την ομοιόμορφη ποιότητα, τα ελαφριά σχέδια, την οικονομία στη μεταφορά και το χειρισμό, και τη γρήγορη και απλή ανέγερση ή εγκατάσταση.

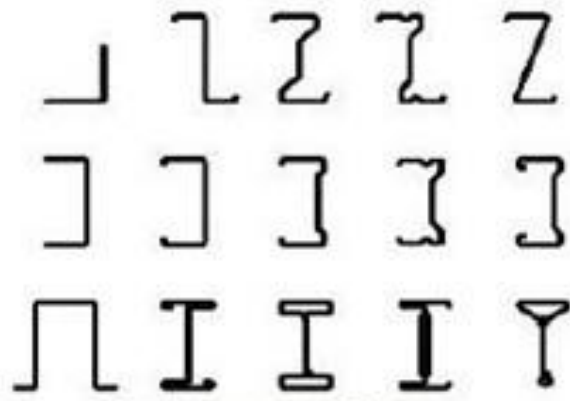
Η χρήση λεπτότοιχων διατομών και χαλύβων υψηλής αντοχής οδηγεί σε ειδικά προβλήματα υπολογισμού, τα οποία δεν συναντάμε κατά τη μελέτη των συνήθων μεταλλικών κατασκευών. Οι πιο συνήθεις αστάθειες είναι ο τοπικός και ο καθολικός λυγισμός. Θα πρέπει ακόμη να ληφθεί υπόψη ότι η αντοχή του υλικού επηρεάζεται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

Τα προϊόντα ψυχρής διαμόρφωσης διακρίνονται σε δύο κυρίως κατηγορίες:

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

Τυπικές διατομές της πρώτης κατηγορίας προϊόντων ψυχρής διαμόρφωσης φαίνονται στο Σχήμα 1.1. Τα ραβδόμορφα αυτά στοιχεία αποτελούνται από ανοικτές μεμονωμένες διατομές, από ανοικτές σύνθετες διατομές και από κλειστές σύνθετες διατομές. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως δοκοί για σχετικά μικρά φορτία και ανοίγματα (τεγίδες και μηκίδες), ως στύλοι και κατακόρυφες στηρίξεις και ως ράβδοι σε δικτυώματα. Συνήθως το ύψος των διατομών ψυχρής διαμόρφωσης κυμαίνεται από 50 έως 300 mm και το πάχος του υλικού από 1 έως 8 mm. Βέβαια και τιμές εκτός αυτών των ορίων χρησιμοποιούνται.





α) Απλές ανοικτές διατομές

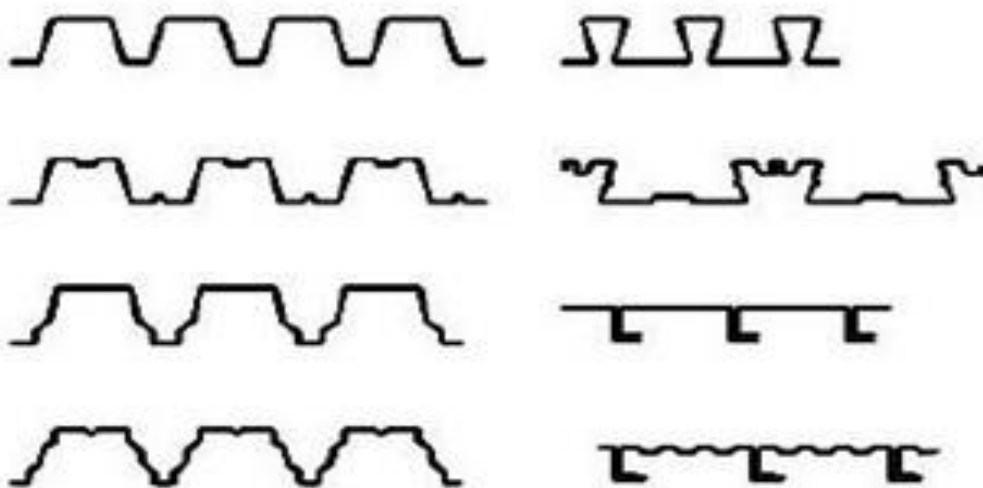


β) Ανοικτές σύνθετες διατομές



γ) Κλειστές σύνθετες διατομές

Σχήμα 1.1: Τυπικές μορφές ραβδόμορφων στοιχείων



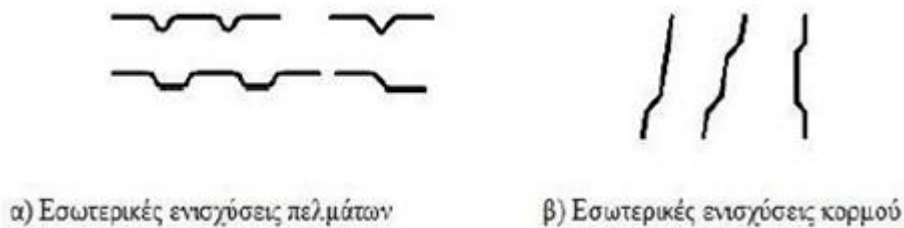
Σχήμα 1.2: Παραδείγματα τραπεζοειδών ελασμάτων και κασετών

Διατομές της δεύτερης κατηγορίας φαίνονται στο Σχήμα 1.2. Από αυτές τις διατομές αποτελούνται επίπεδα φέροντα σκέλη, με το μικρότερο δυνατό πάχος υλικού, και χρησιμοποιούνται γενικά για την κάλυψη επιφανειών υπό μέτρια κατανεμημένη φόρτιση (καταστρώματα οροφής, δαπέδου, επικάλυψη τοίχων). Το ύψος των διατομών κυμαίνεται από 40 έως 200mm και το πάχος τους από 0,5 έως 2 mm. Τα σκέλη ψυχρής ελάσεως και τα αυλακωτά φύλλα έχουν εντός επιτρεπόμενων ανοχών ένα σταθερό ονομαστικό πάχος σε όλο το μήκος τους και μπορεί να έχουν είτε ομοιόμορφη διατομή είτε απομειούμενη διατομή κατά το μήκος τους.

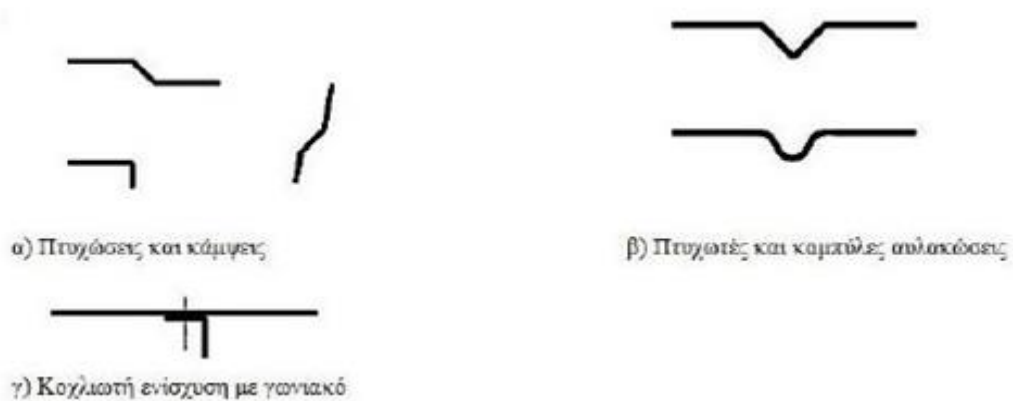
Για την αύξηση της δυσκαμψίας των διατομών ψυχρής έλασης, προβλέπονται ακραίες ή ενδιάμεσες ενισχύσεις. Οι αντίστοιχες ακραίες και πτυχωτές ενισχύσεις ή εγκοπές φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 1.3: Τυπικές μορφές ακραίων ενισχύσεων



Σχήμα 1.4: Τυπικές μορφές ενδιάμεσων διαμήκων ενισχύσεων



Σχήμα 1.5: Τυπικές μορφές ενισχύσεων για σκέλη και φύλλα ψυχρής έλασης

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

- Αναδίπλωση
- Συμπίεση
- Ψυχρή έλαση

Οι δύο πρώτες μέθοδοι εφαρμόζονται για μικρές ποσότητες δομικών στοιχείων και για μήκη έως 6 μέτρα. Η τρίτη μέθοδος χρησιμοποιείται για εν σειρά βιομηχανική παραγωγή. Η μέθοδος της αναδίπλωσης είναι η απλούστερη διαδικασία και εφαρμόζεται για ευθύγραμμες μόνο διαμορφώσεις και υπό σταθερά συνήθως γωνία 90° μέσω μιας σειράς διαμορφώσεων, με χρήση ειδικών μηχανών που καλούνται «στράντζες». Η μέθοδος της αναδίπλωσης έχει πολύ περιορισμένη εφαρμογή.

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

Η τρίτη μέθοδος μέσω ειδικών διαμορφωτικών μηχανών (extruders) χρησιμοποιείται για την κατασκευή τόσο ανοικτών, όσο και κλειστών (συγκολλητών ή μη) διατομών, με μήκη έως και 14 μέτρα. Η μέθοδος της ψυχρής έλασης παρουσιάζει μεγάλη παραγωγικότητα και καλή ποιότητα προϊόντων από άποψη ακρίβειας και εμφάνισης. Κατά τη διαδικασία αυτή, ένα συνεχές φύλλο οδηγείται δια μιας σειράς απέναντι διατεταγμένων ελαστρων (ράουλα) τα οποία δίνουν σταδιακά, μέσω πλαστικής παραμόρφωσης στο χάλυβα την επιθυμητή μορφή. Κάθε ζεύγος ελαστρων προκαλεί μια συγκεκριμένη σταθερή παραμόρφωση. Κάθε ζεύγος ελαστρων ονομάζεται βαθμίδα. Όσο συνθετότερη είναι η διατομή τόσο περισσότερες βαθμίδες χρειάζονται. Σε κλειστές διατομές ψυχρής έλασης, τα έλαστρα σχηματίζουν κατ'αρχήν μια κυκλική διατομή και τα απέναντι άκρα των ελασμάτων συγκολλούνται, πριν την τελική έλαση, σε μια τετραγωνική ή κυκλική διατομή.

Όσον αφορά τη στατική συμπεριφορά, σε σχέση με τα συμβατικά μεταλλικά σκέλη, τα λεπτότοιχα στοιχεία ψυχρής διαμόρφωσης χαρακτηρίζονται από:

- το σταθερό πάχος της διατομής,
- το μεγάλο πλάτος της διατομής σε σχέση με το πάχος της,
- την ποικιλία των διατομών.

Ειδικότερα, το δεύτερο στοιχείο προκαλεί φαινόμενα τοπικού λυγισμού, γεγονός που επηρεάζει τη δυνατότητα ανάληψης φορτίου του σκέλους. Ωστόσο δεν θα πρέπει να παραλειφθούν και οι διάφορες κατασκευαστικές ατέλειες που προκαλούνται κατά τη διαδικασία της ψυχρής διαμόρφωσης. Κατά συνέπεια, η στατική ανάλυση και ο σχεδιασμός των λεπτότοιχων μελών ψυχρής διαμόρφωσης γίνεται γενικά πιο σύνθετος εξαιτίας αυτών των χαρακτηριστικών. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη στατική συμπεριφορά των λεπτότοιχων στοιχείων είναι:

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

Επιπλέον, είναι πιθανή και η αλληλεπίδραση των παραπάνω ασταθειών.

## 1.2 Πλεονεκτήματα χρήσης στοιχείων από χάλυβα ψυχρής ελάσεως

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

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

- *Ταχύτητα ανέγερσης της κατασκευής.* Τα στοιχεία έχουν παραχθεί στις ακριβείς διαστάσεις και έχουν ήδη διανοιγμένες οπές. Έτσι μειώνεται ο χρόνος παραμονής στο εργοτάξιο όπου γίνεται η απλή συναρμολόγηση. Τα διάφορα σκέλη μπορούν να ανυψωθούν σε ομάδες με χρήση γερανού. Τα παραπάνω στοιχεία έχουν ως αποτέλεσμα τη μεγάλη ταχύτητα κατασκευής καθώς και την ταχεία απόδοση του επενδεδυμένου κεφαλαίου.

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

- *Προστασία από διάβρωση.* Μέσω του γαλβανίσματος επιτυγχάνεται επαρκής προστασία έναντι διάβρωσης και κατά συνέπεια μεγάλη διάρκεια ζωής της κατασκευής.

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

- *Φιλικότητα προς το περιβάλλον.* Ο χάλυβας είναι ανακυκλώσιμο υλικό και η διαδικασία παραγωγής του καταναλώνει λιγότερη ενέργεια σε σχέση με άλλα υλικά.

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

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

### 1.3 Εφαρμογές

Οι συνήθεις εφαρμογές των στοιχείων ψυχρής διαμόρφωσης συνοψίζονται στα εξής:

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

- *Κύριος φορέας.* Χρησιμοποιούνται ως κύριος φορέας σε προκατασκευασμένα ελαφρά βιομηχανικά κτίρια ή κτίρια αποθήκευσης καθώς και σε κτίρια κατοικιών και πολυώροφα μεταλλικά κτίρια.

- *Μεγάλα πετάσματα (πάνελ) για κτίρια κατοικίας*
- *Σύμμικτες πλάκες*
- *Δικτυώματα*
- *Πλαίσια με κοχλιωτούς κόμβους για βιομηχανικά κτίρια*
- *Κελυφωτές κατασκευές*
- *Βιομηχανικά ράφια*
- *Χωροδικτυώματα*
- *Γεωργικά σιλό*



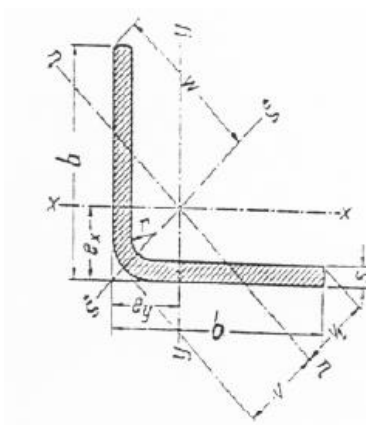
Σχήμα 1.6: Στέγαστρο από στοιχεία ψυχρής έλασης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η βελτίωση της συμπεριφοράς μελών διατομής γωνιακού KL ψυχρής έλασης υπό εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία όταν έχουν ακραίες ενισχύσεις.

Αυτές οι διατομές είναι κατά βάση λεπτότοιχες, δηλαδή έχουν μεγάλο πλάτος σε σχέση με το πάχος τους. Σκέλη από τέτοιου τύπου διατομές χρησιμοποιούνται, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (Σχήμα 1.7) σε δικτυωτούς πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η διατομή μη-πρότυπων γωνιακών ψυχρής έλασης KL που εξετάζεται είναι η KL60x60x3 (Σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.7: Δικτυωτοί πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας



Σχήμα 1.8: Διατομή γωνιακού KL από ψυχρή έλαση

Σχετικά με τη δόμηση της διπλωματικής εργασίας, τα κεφάλαια που ακολουθούν το πρώτο κεφάλαιο της εισαγωγής είναι τέσσερα.

Στο 2ο Κεφάλαιο “Ανοχή μελών με βάση τον Ευρωκώδικα”, παρουσιάζονται οι διατάξεις του Ευρωκώδικα για λεπτότοιχα μέλη.

Στο 3ο Κεφάλαιο “Προσομοίωση μελών με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FEMAP”, περιγράφονται όλα τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την προσομοίωση και επίλυση των μελών με το πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων FEMAP.

Στο 4ο Κεφάλαιο “Αποτελέσματα αναλύσεων” παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης, όπως προέκυψαν βάσει όσων αναλύθηκαν στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο, καθώς και η σύγκρισή τους.

Στο 5ο Κεφάλαιο “Συμπεράσματα”, παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία.

## 2. Αντοχή μελών με βάση τον Ευρωκώδικα

### 2.1 Ιδιότητες υλικών και διατομών

#### 2.1.1 Ποιότητες χαλύβων

Όλοι οι χάλυβες που χρησιμοποιούνται για τη μόρφωση μελών και φύλλων ψυχρής ελάσεως πρέπει να είναι κατάλληλοι για ψυχρή έλαση και συγκόλληση, αν χρειαστεί. Χάλυβες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για σκέλη και φύλλα που πρόκειται να γαλβανιστούν πρέπει να είναι κατάλληλοι για γαλβανισμό. Οι ονομαστικές τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών οι οποίες δίνονται σε αυτήν την ενότητα υιοθετούνται ως χαρακτηριστικές τιμές στους υπολογισμούς.

Πίνακας 2. 1 Ονομαστικές τιμές του βασικού ορίου διαρροής  $f_{yb}$  και της εφελκυστικής αντοχής  $f_u$

Τύπος χάλυβα	Κανονισμός	Κατηγορία	$f_{yb}$ N/mm <sup>2</sup>	$f_u$ N/mm <sup>2</sup>		
Προϊόντα θερμής ελάσεως μη κραματωμένων δομικών χαλύβων. Μέρος 2: Τεχνικές συνθήκες παράδοσης μη κραματωμένων δομικών χαλύβων	EN 10025: Part 2	S 235	235	360		
		S 275	275	430		
		S 355	355	510		
Προϊόντα θερμής ελάσεως δομικών χαλύβων. Μέρος 3: Τεχνικές συνθήκες παραδότης για εξομαλυμένους / εξομαλυμένους ελατούς συγκολλησίμους, λεπτόκοκκους δομικούς χάλυβες	EN 10025: Part 3	S 275 N	275	370		
		S 355 N	355	470		
		S 420 N	420	520		
		S 460 N	460	550		
		S 275 NL	275	370		
		S 355 NL	355	470		
		S 420 NL	420	520		
S 460 NL	460	550				
Προϊόντα θερμής ελάσεως δομικών χαλύβων. Μέρος 4: Τεχνικές συνθήκες παράδοσης για θερμομηχανικούς, ελατούς συγκολλησίμους λεπτόκοκκους δομικούς χάλυβες	EN 10025: Part 4	S 275 M	275	360		
		S 355 M	355	450		
		S 420 M	420	500		
		S 460 M	460	530		
		S 275 ML	275	360		
		S 355 ML	355	450		
		S 420 ML	420	500		
		S 460 ML	460	530		
		Επίπεδα προϊόντα θερμής ελάσεως από χάλυβες υψηλής αντοχής για ψυχρή έλαση Μέρος 2: Συνθήκες μεταφοράς για θερμομηχανικά ελατούς χάλυβες.	EN 10149: Part 2	S 315 MC	315	390
				S 355 MC	355	430
S 420 MC	420			480		
S 460 MC	460			520		
S 500 MC	500			550		
S 550 MC	550			600		
S 600 MC	600			650		
S 700 MC	700			750		



### 2.1.2 Ιδιότητες υλικού μελών και φύλλων ψυχρής ελάσεως

Όπου το όριο διαρροής ορίζεται με το σύμβολο  $f_y$  μπορεί να χρησιμοποιείται το μέσο όριο διαρροής  $f_{ya}$  αν ισχύουν τα παρακάτω. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις πρέπει να χρησιμοποιείται το βασικό όριο διαρροής  $f_{yb}$ .

Το μέσο όριο διαρροής  $f_{ya}$  της διατομής λόγω ψυχρής κατεργασίας μπορεί να προσδιορίζεται από τα αποτελέσματα πειραμάτων πλήρους κλίμακας.

Εναλλακτικώς το αυξημένο μέσο όριο διαρροής  $f_{ya}$  μπορεί να υπολογιστεί με βάση την παρακάτω σχέση:

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

όπου:

$A_g$	εμβαδόν της πλήρους διατομής
$k$	συντελεστής που λαμβάνει υπόψη το τρόπο παραγωγής - $k = 7$ για ψυχρή κάμψη - $k = 5$ για άλλους τρόπους διαμόρφωσης
$n$	αριθμός των κάμψεων κατά $90^\circ$ της διατομής – με εσωτερική ακτίνα $r_1 \leq 5t$ (τμήματα κάμψεων $90^\circ$ υπολογίζονται ως τμήματα του $n$ )
$t$	πάχος σχεδιασμού πυρήνα του αρχικού ελάσματος προ της ψυχρής έλασης χωρίς μεταλλικές ή οργανικές επιστρώσεις

Το αυξημένο όριο διαρροής λόγω της ψυχρής ελάσεως μπορεί να λαμβάνεται υπόψη ως εξής:

- σε αξονικά φορτιζόμενα σκέλη όπου η ενεργός διατομή  $A_{eff}$  της διατομής είναι ίση με την πλήρη διατομή  $A_g$ ,
- για τον υπολογισμό της  $A_{eff}$  το όριο διαρροής πρέπει να λαμβάνεται ως  $f_{yb}$ .

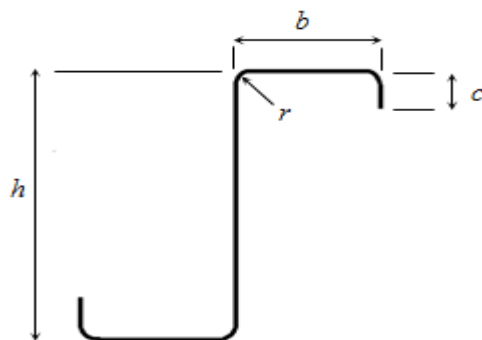
Το μέσο όριο διαρροής  $f_{ya}$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό:

- της αντοχής της διατομής για ένα αξονικά φορτιζόμενο εφελκυσμένο σκέλος
- την αντοχή της διατομής και την αντοχή σε λυγισμό για ένα αξονικά φορτιζόμενο θλιβόμενο σκέλος στο οποίο ολόκληρη η διατομή είναι ενεργή
- την καμπτική αντοχή όμοιας διατομής με πλήρη ενεργά πέλαμα

Το αυξημένο όριο διαρροής λόγω της ψυχρής ελάσεως δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για σκέλη τα οποία υπόκεινται σε θερμή επεξεργασία μετά την ψυχρή έλαση σε θερμοκρασία υψηλότερη από  $580^\circ\text{C}$  για περισσότερη από μία ώρα.

### 2.1.3 Διαστάσεις διατομών

Οι συνολικές διαστάσεις μελών και φύλλων ψυχρής ελάσεως, όπως το συνολικό πλάτος  $b$ , το συνολικό ύψος  $h$ , η εσωτερική ακτίνα καμπύλωσης  $r$  και άλλες εξωτερικές διαστάσεις οι οποίες συμβολίζονται χωρίς δείκτες όπως  $a$ ,  $c$  ή  $d$  μετρούνται από το εξωτερικό άκρο των στοιχείων, εκτός αν δηλώνεται διαφορετικά, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.1).



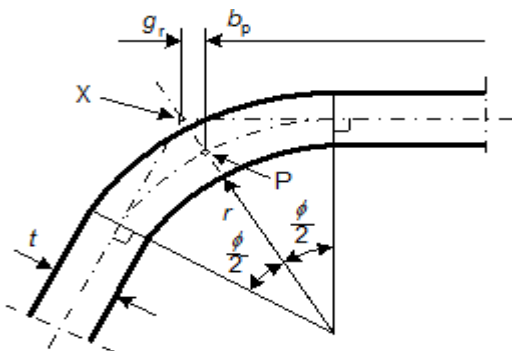
Σχήμα 2. 1 Διαστάσεις τυπικών διατομών

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

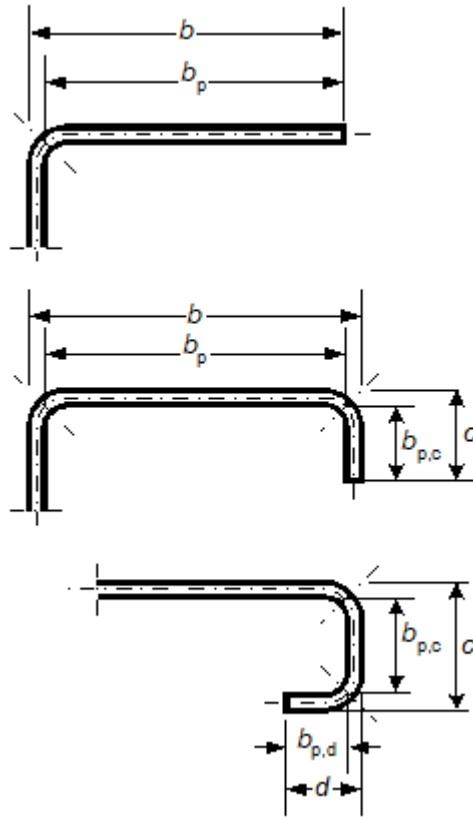
### 2.1.4 Επιρροή στρογγυλευμένων γωνιών

Σε διατομές με στρογγυλευμένες γωνίες, το ονομαστικό πλάτος  $b_p$  των επίπεδων τοιχωμάτων πρέπει να μετράται από το μέσο σημείο των γειτονικών τοιχωμάτων όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 2. 2 - Σχήμα 2. 6 ). Σε διατομές με στρογγυλευμένες γωνίες, ο υπολογισμός των ιδιοτήτων της διατομής πρέπει να βασίζεται στην πραγματική γεωμετρία της διατομής.

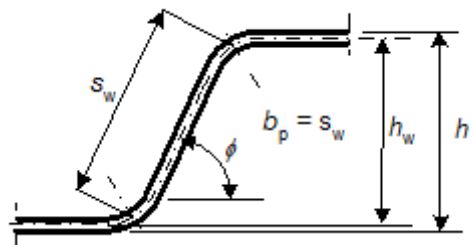
Πλην περιπτώσεων που χρησιμοποιούνται ακριβέστερες μέθοδοι στον υπολογισμό των ιδιοτήτων της διατομής μπορεί να εκτελείται με βάση την ακόλουθη προσεγγιστική μεθοδολογία. Η επιρροή των στρογγυλευμένων γωνιών στην αντοχή της διατομής μπορεί να αγνοηθεί αν για εσωτερικές ακτίνες  $r$  ισχύουν οι σχέσεις  $r \leq 5t$  και  $r \leq 0.10b_p$ . Η διατομή μπορεί τότε να θεωρηθεί ότι αποτελείται από επίπεδα τοιχώματα με αιχμηρές γωνίες. Στις αδρανειακές ιδιότητες της διατομής για τον υπολογισμό δυσκαμψίας η επιρροή των στρογγυλευμένων γωνιών πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη.



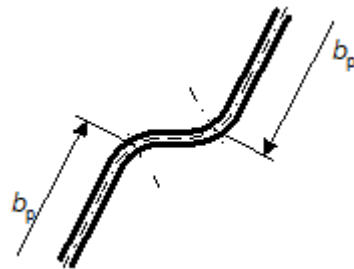
Σχήμα 2. 2 Μέσο σημείο της γωνίας ή κάμψης, X το σημείο τομής των μέσων επιφανειών, P το μέσο σημείο της γωνίας,  $r_m = r + t/2$ ,  $g_r = r_m(\tan(\varphi/2) - \sin(\varphi/2))$



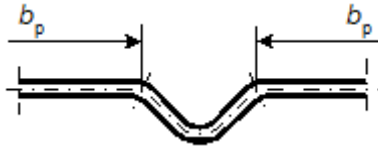
Σχήμα 2. 3 ονομαστικό πλάτος  $b_p$  επίπεδων στοιχείων πελμάτων



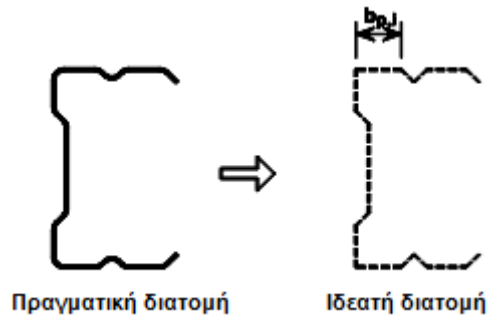
Σχήμα 2. 4 ονομαστικό πλάτος  $b_p$  κορμού ( $b_p = \text{λοξό ύψος } s_w$ )



Σχήμα 2. 5 ονομαστικό πλάτος  $b_p$  επίπεδων στοιχείων με ενισχύσεις κορμού



Σχήμα 2. 6 ονομαστικό πλάτος  $b_p$  επίπεδων στοιχείων με ενισχύσεις πέλματος



Σχήμα 2. 7 προσεγγιστικός τρόπος για να ληφθούν υπόψη στρογγυλεμένες γωνίες

Η επιρροή των στρογγυλεμένων γωνιών στις ιδιότητες της διατομής μπορεί να ληφθεί υπόψη με απομείωση των ιδιοτήτων μιας παρόμοιας διατομής με αιχμηρές γωνίες, βλέπε Σχήμα 2. 7 , με βάση τις παρακάτω προσεγγιστικές σχέσεις:

$$A_g \approx A_{g,sh} (1 - \delta) \quad (2. 2)$$

$$I_g \approx I_{g,sh} (1 - 2\delta) \quad (2. 3)$$

$$I_w \approx I_{w,sh} (1 - 4\delta) \quad (2. 4)$$

με:

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} \quad (2. 5)$$

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
$\phi$	γωνία μεταξύ δύο επίπεδων τοιχωμάτων

$m$	αριθμός επίπεδων τοιχωμάτων
$n$	αριθμός καμπύλων τοιχωμάτων
$r_j$	εσωτερική ακτίνα καμπύλου τοιχώματος $j$

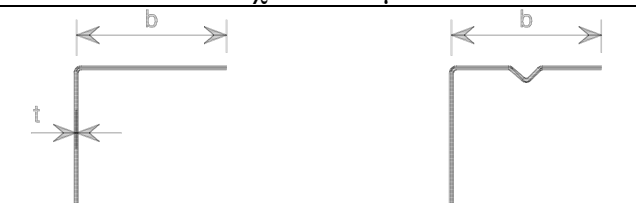
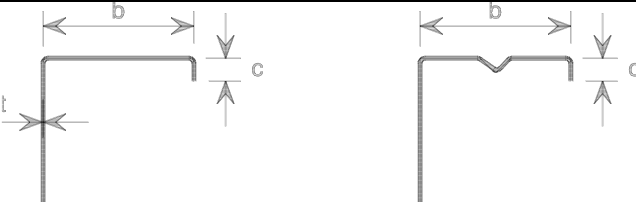
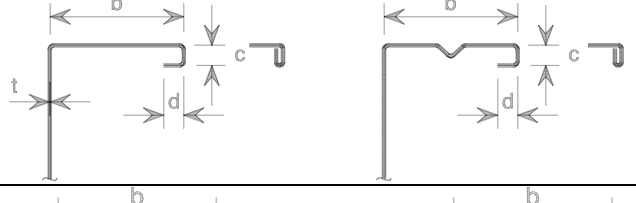

Οι απομοιώσεις με βάση τις εξισώσεις ( 2. 2 - 2. 5 ) μπορούν επίσης να εφαρμοστούν και κατά τον υπολογισμό των ιδιοτήτων της ενεργού διατομής  $A_{eff}$ ,  $I_{y,eff}$ ,  $I_{z,eff}$  και  $I_{w,eff}$  με την προϋπόθεση ότι τα ισοδύναμα πλάτη των επίπεδων στοιχείων μετρώνται από τα σημεία τομής των μέσων επιφανειών των στοιχείων. Όταν η εσωτερική ακτίνα είναι  $r > 0,04 * t * E / f_y$  η αντοχή της διατομής πρέπει να προσδιορίζεται από πειράματα.

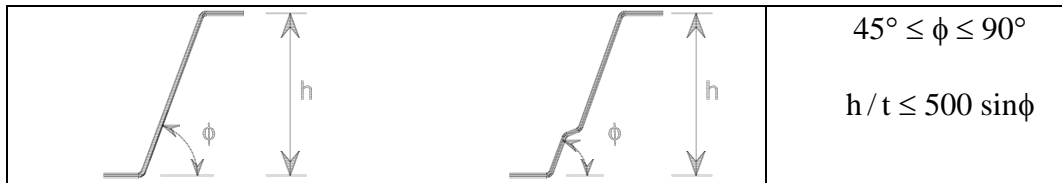
### 2.1.5 Γεωμετρικές συνθήκες ισχύος

Οι διατάξεις για σχεδιασμό βάσει υπολογισμών αυτού του Μέρους 1-3 του EN 1993 ισχύουν μόνο για λόγους πλάτους – πάχους διατομών  $b/t$ ,  $h/t$ ,  $c/t$  and  $d/t$  εντός των ορίων του Πίνακα 2. 2 .

Τα όρια για τους λόγους  $b / t$ ,  $h / t$ ,  $c / t$  και  $d / t$  θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν το πεδίο εκείνο για το οποίο υπάρχει επαρκής εμπειρία και επαλήθευση από πειραματικά αποτελέσματα. Διατομές με μεγαλύτερους λόγους πλάτους προς πάχος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθούν, με την προϋπόθεση ότι η αντοχή τους σε οριακή κατάσταση αστοχίας και η συμπεριφορά τους στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας επαληθεύονται βάσει πειραμάτων και/ή υπολογισμών, που επιβεβαιώνονται με κατάλληλο αριθμό πειραμάτων.

Πίνακας 2. 2 Μέγιστοι λόγοι πλάτους - πάχους

Στοιχεία διατομών	Μέγιστη τιμή
	$b/t \leq 50$
	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$
	$b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$
	$b/t \leq 500$



Οι διαστάσεις των ενισχύσεων πρέπει να είναι εντός των παρακάτω ορίων, έτσι ώστε να παρέχουν επαρκή δυσκαμψία και να αποφεύγεται λυγισμός της ίδιας της ενισχύσεως.

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 .

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

### 2.1.6 Προσομοίωση για στατική ανάλυση

Μια τυχούσα διατομή αποτελείται από μεμονωμένα πλακοειδή στοιχεία, τα οποία εδράζονται σε μία ή δύο πλευρές. Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της ενεργού διατομής, η διατομή διασπάται στα επιμέρους στοιχεία για τα οποία υπολογίζονται ξεχωριστά τα ενεργά πλάτη. Στο επόμενο βήμα η διατομή ανασυντίθεται από τα ενεργά τμήματα των επιμέρους στοιχείων. Κατά τη διάσπαση της διατομής σε επιμέρους τοιχώματα, πρέπει να προσδιοριστεί η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Αυτό συμβαίνει με τη βοήθεια ενός κατάλληλου προσομοιώματος για τη σύνδεση και την ενίσχυση, μέσω της εισαγωγής κατάλληλων στροφικών και μεταφορικών ελατηρίων όπως φαίνονται στον Πίνακα 2. 3 . Οι σταθερές των ελατηρίων μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά ή υπολογιστικά.

Πίνακας 2. 3 Προσομοίωση των στοιχείων της διατομής

Τύπος στοιχείου	Προσομοίωμα	Τύπος στοιχείου	Προσομοίωμα

## 2.2 Αντοχή λεπτότοιχων στοιχείων

### 2.2.1 Θλιπτική αντοχή

#### 2.2.1.1 Κατάταξη γωνιακών διατομών

Ο ρόλος της κατάταξης των διατομών είναι να περιγράψει τον βαθμό κατατονίας που η αντοχή και η ικανότητα στροφής των διατομών περιορίζεται από την αντοχή τους σε τοπικό λυγισμό. Η κατάταξη μιας διατομής εξαρτάται από τη σχέση πλάτους προς πάχος των τμημάτων της που υπόκεινται σε θλίψη, δηλαδή από την τοπική τους λυγηρότητα. Τα θλιβόμενα τμήματα περιλαμβάνουν κάθε τμήμα μιας διατομής το οποίο θλίβεται εξ' ολοκλήρου ή εν μέρει για τον υπό θεώρηση συνδυασμό φορτίων. Τα διάφορα θλιβόμενα τμήματα σε μια διατομή (όπως ο κορμός ή το πέλμα) μπορούν, γενικά, να ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες. Μια διατομή κατατάσσεται σύμφωνα με την υψηλότερη κατηγορία (λιγότερο ευμενή) των θλιβόμενων τμημάτων της. Ένα τμήμα της διατομής που δεν ικανοποιεί τα όρια της κατηγορίας 3 πρέπει να κατατάσσεται στην κατηγορία 4 (Πίνακας 2. 4) .

Διατομές κατηγορίας 4 είναι εκείνες στις οποίες τοπικός λυγισμός θα συμβεί πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής σε ένα ή περισσότερα μέρη της διατομής. Σε διατομές κατηγορίας 4, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι μειώσεις στην αντοχή λόγω των επιδράσεων του τοπικού λυγισμού, χρησιμοποιούνται τα ενεργά πλάτη.

Πίνακας 2. 4 Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος για θλιβόμενα στοιχεία

Γωνιακά						
Δεν ισχύει για γωνιακά σε συνεχή επαφή με άλλα στοιχεία						
Κατηγορία	Διατομή σε θλίψη					
Κατανομή τάσεων στη διατομή (θλίψη θετική)						
3	$h/t \leq 15\varepsilon : \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$					
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460
	$\varepsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

### 2.2.1.2 Καμπτικός λυγισμός

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

- *Καμπτικός λυγισμός (Flexural buckling)*

Οι διατομές υπόκεινται μόνο σε μετατοπίσεις γύρω από τους κύριους άξονες, χωρίς στροφές.

- *Στρεπτικός λυγισμός (Torsional buckling)*

Οι διατομές υπόκεινται σε καθαρές στροφές.

- *Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός ( FT ή LT)*

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

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

- *Καμπτικός λυγισμός (Flexural buckling)*

Τα προβλήματα της ευστάθειας παρουσιάζονται σε περίπτωση θλιβόμενων μελών. Από την αντοχή των υλικών γνωρίζουμε ότι όταν μία ευθύγραμμη ράβδος πρισματικής (σταθερής) διατομής, θλίβεται αξονικά, η αύξηση της φορτίσεως μέχρι κάποιας συγκεκριμένης κρίσιμης τιμής προκαλεί συνεχώς αυξανόμενη αξονική βράχυνση. Γνωρίζουμε, επίσης, ότι όταν μία ελαστική ράβδος έχει λυγηρότητα μεγαλύτερη κάποιας ορισμένης (ελάχιστης) τιμής, η ένταση αυτή βρίσκεται εντός ελαστικής περιοχής και η αξονική βράχυνση είναι ανάλογη της φορτίσεως. Εάν η φόρτιση υπερβεί την προαναφερθείσα κρίσιμη τιμή, η ράβδος εγκαταλείπει την ευθύγραμμη μορφή αξονικής παραμορφώσεως λαμβάνουσα μία ελαφρώς καμπυλομένη μορφή (λόγω κάμψεως). Η συμπεριφορά αυτή της ράβδου είναι γνωστή ως καμπτικός λυγισμός, ο οποίος λαμβάνει χώρα ως προς τον κύριο άξονα της διατομής με την μικρότερη ροπή αδράνειας και ως εκ τούτου με τη μεγαλύτερη λυγηρότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η λυγηρή αυτή ράβδος ισορροπεί τόσο σε ευθύγραμμη μορφή (για φόρτιση μικρότερη της κρίσιμης), όσο και σε ελαφρώς καμπυλομένη μορφή (για φόρτιση ίση ή μεγαλύτερη της κρίσιμης). Μικρή αύξηση της φόρτισης, πάνω από την κρίσιμη τιμή, προκαλεί σημαντικά μεγαλύτερη και



δυσανάλογη καμπτική παραμόρφωση. Σε κάποια δε δεδομένη τιμή της φόρτισης αρχίζει η διαρροή (στην ακραία ίνα της περισσότερο εντεινόμενης από κάμψη διατομής), η οποία αυξανόμενης περαιτέρω της φόρτισης επεκτείνεται, οδηγούσα ακολούθως σε ανελαστικό ή πλαστικό λυγισμό. Επειδή για φόρτιση μεγαλύτερη της κρίσιμης τα περιθώρια μεταλυσισμικής αντοχής της ράβδου είναι πρακτικώς περιορισμένα, θεωρούμε ότι η κρίσιμη φόρτιση συνδέεται με τη μέγιστη φέρουσα ικανότητα αξονικά θλιβομένων ράβδων και ως εκ τούτου η φόρτιση αυτή κατά την οποία λαμβάνει χώρα ο ελαστικός λυγισμός αποτελεί κριτήριο σχεδιασμού.

### 2.2.1.3 Τοπικός και στρεβλωτικός λυγισμός

Το κύριο γνώρισμα των λεπτότοιχων ελασμάτων ψυχρής έλασης ή διαμόρφωσης είναι το εξαιρετικά μεγάλο πλάτος τους σε σχέση με το πάχος τους. Αυτό το στοιχείο τα διακρίνει από τα κλασικά σιδηρά ελάσματα θερμής έλασης αλλά δημιουργεί και προβλήματα τα οποία αποτελούν και χαρακτηριστικό τους. Τέτοια προβλήματα είναι η μεγάλη τους ευκαμψία, με αποτέλεσμα ακόμα και μια απλή σημειακή καταπόνηση να προσδίδει σημαντικές παραμορφώσεις, αλλά και οι γεωμετρικές ατέλειες λόγω της ψυχρής διαμόρφωσης. Εξαιτίας των ανωτέρω προβλημάτων, τα μέρη των λεπτότοιχων αυτών διατομών, προτού αστοχήσουν σε διαρροή, για θλιπτική ή διατμητική καταπόνηση, τείνουν να χάσουν την ευστάθειά τους. Η πιο κρίσιμη μορφή αστοχίας που εμφανίζεται είναι ο τοπικός λυγισμός, ο οποίος εξαναγκάζει τις διατομές σε μεταβολή του σχήματός τους. Γι' αυτό το λόγο, ο τοπικός λυγισμός θεωρείται πολύ σημαντικός και λαμβάνεται υπόψη στον προσδιορισμό της αντοχής και της δυσκαμψίας μελών ψυχρής έλασης. Η αντοχή της διατομής είναι αυτή που στις περισσότερες περιπτώσεις καθορίζει την αντοχή ολόκληρου του σκέλους. Όσον αφορά όμως τις χαλύβδινες διατομές, ο παραπάνω ισχυρισμός δεν επαληθεύεται πάντοτε, παρά μόνο για φόρτιση που προκαλεί εφελκυσμό ή κάμψη πλευρικά εξασφαλισμένων δοκών. Σε περιπτώσεις θλιβόμενων μελών διαπιστώνεται ότι υπάρχει στάθμη της εξωτερικής φόρτισης, για την οποία το σκέλος χάνει την ευστάθειά του, αποκτά δηλαδή τη δυνατότητα να ισορροπήσει πέραν της αρχικής και σε μια γειτονική θέση ισορροπίας, φαινόμενο το οποίο χαρακτηρίζεται από το γενικό όρο λυγισμός.

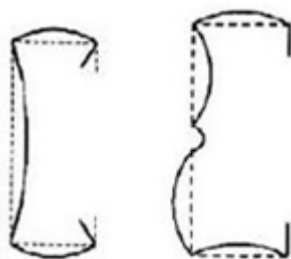
Οι διατομές ψυχρής διαμόρφωσης εμφανίζουν πολύ συχνά μορφές τοπικού λυγισμού, όπου οι διατομές δεν μένουν απαραμόρφωτες ως διαφράγματα (καθολικός λυγισμός), αλλά παραμορφώνονται τοπικά. Η αστοχία δηλαδή αναφέρεται στη διατομή και δεν σχετίζεται με το λυγισμό ολόκληρου του σκέλους. Ανάλογα με τις παραμορφώσεις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

*Τοπικός λυγισμός (Local buckling) (Σχήμα 2. 8 )* Τα τοιχώματα της διατομής υπόκεινται σε πλακοειδείς παραμορφώσεις (κύρτωση). Το γενικό σχήμα της διατομής παραμένει αμετάβλητο, δεδομένου ότι οι εσωτερικές ακμές μένουν απαραμόρφωτες, αποτελώντας σημεία στήριξης των πλακοειδών στοιχείων. Κατ' εξαίρεση, οι εξωτερικές ακμές μπορούν να μετατοπίζονται. Ως ακμές ονομάζονται οι ευθείες τομής των επίπεδων στοιχείων της διατομής (πέλματα, κορμός, ενισχύσεις), αλλά και οι θέσεις των ενισχύσεων ενός τοιχώματος της διατομής.

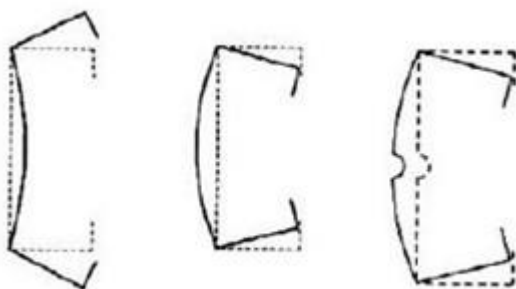
*Λυγισμός με στρέβλωση της διατομής (Distorsional buckling) (Σχήμα 2. 9 )* Τα τοιχώματα της διατομής στρεβλώνονται, λόγω μετατοπίσεων των εσωτερικών ακμών.

Ο τοπικός λυγισμός έχει μικρό μήκος κύματος, ίδιας τάξης μεγέθους με το πλάτος του στοιχείου. Έτσι, ο κίνδυνος τοπικού λυγισμού δεν εξαρτάται από το μήκος της

ράβδου αλλά από τα, πολύ μικρότερα, πλάτη των τοιχωμάτων της διατομής. Καθοριστικά μήκη λυγισμού είναι λοιπόν τα πλάτη των στοιχείων, ως αποστάσεις των, αμετάθετων, ακμών της διατομής. Ο λυγισμός με στρέβλωση της διατομής έχει μεσαίο μήκος κύματος. Τα μήκη αυτά αντιπροσωπεύουν περίπου το μήκος λυγισμού δοκών επί ελαστικών στηρίξεων. Έτσι, ο κίνδυνος λυγισμού με στρέβλωση της διατομής εξαρτάται από τις σχέσεις δυσκαμψιών μεταξύ στηριζόντων και στηριζόμενων στοιχείων.



Σχήμα 2. 8 Παραμορφώσεις διατομής λόγω τοπικού λυγισμού



Σχήμα 2. 9 Παραμορφώσεις διατομής λόγω λυγισμού με στρέβλωση διατομής

Για περιορισμό του κινδύνου τοπικού λυγισμού η διατομή μπορεί να ενισχυθεί με ακραίες ή ενδιάμεσες ενισχύσεις, μορφής απλών ή διπλών αναδιπλώσεων. Έτσι όμως, ενώ μειώνεται ο κίνδυνος τοπικού λυγισμού, αυξάνεται ο κίνδυνος λυγισμού με στρέβλωση της διατομής, γιατί κάθε ενίσχυση προσθέτει έναν ενδιάμεσο κόμβο ο οποίος μπορεί με τη σειρά του να μετατοπισθεί προσθέτοντας έτσι μια νέα πιθανή μορφή λυγισμού. Επομένως, η σημασία του λυγισμού με στρέβλωση της διατομής αυξάνεται στις διατομές νέας γενιάς με πολλές νευρώσεις. Είναι προφανές ότι κάθε εμφανιζόμενη αστάθεια οδηγεί σε μείωση της αντοχής. Γίνεται έτσι αντιληπτό ότι οι διάφορες αστάθειες αλληλοεπηρεάζονται. Μέσω της αλληλεπίδρασης, η οποία εξαρτάται εν μέρει από τις σχέσεις των μηκών των κυμάτων των διαφόρων ιδιόμορφων λυγισμού, μπορούμε να έχουμε σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητας.

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

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

(a) Η επίδραση του τοπικού λυγισμού και του λυγισμού με στρέβλωση της διατομής στον προσδιορισμό της αντοχής και της δυσκαμψίας μελών και φύλλων ψυχρής ελάσεως.

(b) Η επίδραση του τοπικού λυγισμού χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της ενεργού διατομής, οι οποίες στηρίζονται στα ενεργά πλάτη.

(c) Στον υπολογισμό της αντοχής έναντι τοπικού λυγισμού, το όριο διαρροής  $f_y$  πρέπει να λαμβάνεται ως  $f_{yb}$  όταν υπολογίζονται τα ενεργά πλάτη των θλιβόμενων στοιχείων.

(d) Για ελέγχους λειτουργικότητας το ενεργό πλάτος ενός θλιβόμενου στοιχείου πρέπει να βασίζεται στην θλιπτική τάση  $\sigma_{\text{com,Ed,ser}}$  του στοιχείου, υπό τα φορτία λειτουργικότητας.

(e) Ο λυγισμός με στρέβλωση της διατομής λαμβάνεται υπόψη αν αποτελεί κρίσιμο μηχανισμό αστοχίας.

### 2.2.1.4 Τοπικός λυγισμός επίπεδων στοιχείων χωρίς ενισχύσεις

Στο παράδειγμα της πλάκας του παρακάτω σχήματος, η κρίσιμη τάση λυγισμού  $\sigma_{cr}$  δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{cr} = \left(\frac{\pi t}{b_p}\right)^2 * \frac{EK_\sigma}{12(1-\nu^2)} \quad (2.6)$$

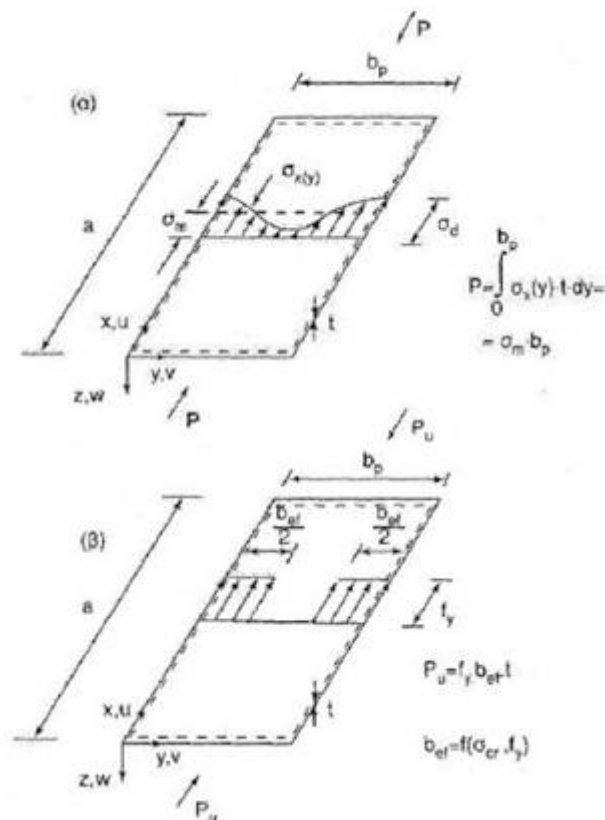
όπου

$b_p$  το θεωρητικό πλάτος,

$t$  το πάχος της,

$\nu$  το μέτρο Poisson

και  $K_\sigma$  ο αντίστοιχος συντελεστής κυρτώσεως, εξαρτώμενος από την μορφή του διαγράμματος τάσεων (Πίνακας 2.5, Πίνακας 2.6)



Σχήμα 2.10 Κατανομή τάσεων περιμετρικά εδραζόμενης θλιβόμενης πλάκας α) πραγματική κατανομή τάσεων, β) κατανομή τάσεων στη βάση του ενεργού πέλματος

Πίνακας 2. 5 Εσωτερικά θλιβόμενα στοιχεία

		$\psi = +1:$ $b_{ef} = \rho b_c$ $b_{e1} = 0,5b_{ef}$ $b_{e2} = 0,5b_{ef}$				
		$+1 > \psi \geq 0:$ $b_{ef} = \rho b_c$ $b_{e1} = \frac{2b_{ef}}{5-\psi}$ $b_{e2} = b_{ef} - b_{e1}$				
		$0 > \psi \geq -1:$ $b_{ef} = \rho b_c$ $b_{e1} = 0,4b_{ef}$ $b_{e2} = 0,6b_{ef}$				
		$\psi < -1:$ $b_{ef} = \rho b_c$ $b_{e1} = 0,4b_{ef}$ $b_{e2} = 0,6b_{ef}$				
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Συντελεστής κύρτωσης $k_e$	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 $+1 > \psi > -1:$		$k_e = \frac{16}{[(1 + \psi)^2 + 0,112(1 + \psi)^3] + (1 + \psi)}$				

Πίνακας 2. 6 Προεξέχοντα θλιβόμενα στοιχεία

	$+1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho b_p$				
	$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c$				
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	+1	0	-1	+1 $\geq \psi \geq -1$	
Συντελεστής κούρτωσης $k_c$	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 κούρτωσης $k_c$	0,43	$\frac{0,578}{\psi - 0,34}$	1,70	$1,70 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

Τότε ορίζοντας την ανηγμένη λυγηρότητα  $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}}$  βρίσκουμε:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)f_y}{\pi^2 EK_\sigma}} \cong 1,052 \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{f_y}{EK_\sigma}} = \frac{b_p}{t} \frac{1}{28,4 * \varepsilon * \sqrt{K_\sigma}} \quad (2.7)$$

Το ενεργό πλάτος  $b_{eff}$  υπολογίζεται σύμφωνα με τον EC3 - Μέρος 1.5 ως εξής:

$$b_{eff} = \rho b_p \quad (2.8)$$

όπου  $\rho$  είναι ο μειωτικός συντελεστής για τοπικό λυγισμό.

Ο μειωτικός συντελεστής  $\rho$  λαμβάνεται:

- Εσωτερικά στοιχεία:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} * \left(1 - \frac{0,055(3+\psi)}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \quad \text{για: } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad (2.9)$$

$$\rho = 1 \quad \text{για: } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \quad (2.10)$$

όπου  $(3+\psi) \geq 0$

- Εξωτερικά στοιχεία:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} * \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \quad \text{για: } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad (2.11)$$

$$\rho = 1 \quad \text{για: } \bar{\lambda}_p \leq 0,748 \quad (2.12)$$

όπου  $\psi$  ο λόγος των τάσεων

$b_p$  το πλάτος του στοιχείου που είναι

-  $b_w$  για κορμούς,

-  $b$  για εσωτερικά στοιχεία (εκτός διατομών RHS),

-  $(b - 3t)$  για πέλματα διατομών RHS,

-  $c$  για εξωτερικά πέλματα,

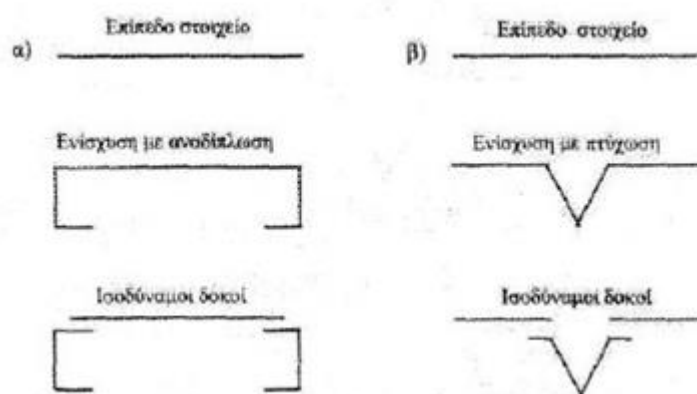
-  $h$  για ισοσκελή/ανισοσκελή γωνιακά,

$t$  το πάχος του στοιχείου

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

### 2.2.1.5 Τοπικός λυγισμός επίπεδων στοιχείων με ενισχύσεις

Οι ενισχύσεις που μπορεί να φέρει ένα επίπεδο στοιχείο, θα βρίσκονται στα άκρα του ή θα είναι ενδιάμεσες. Ο σκοπός των ενισχύσεων είναι η αύξηση της ακαμψίας των επίπεδων πλατεών στοιχείων με την επιχειρούμενη μείωση του επίπεδου πλάτους του στοιχείου. Οι ενισχύσεις αυτές, που έχουν μορφή αναδιπλώσεως ή πτυχώματος όπως φαίνονται στο Σχήμα 2. 11 προσδίδουν έντονη τοπική ακαμψία, ώστε σε σχέση με το απομένον επίπεδο τμήμα του ελάσματος, να μπορούν να θεωρηθούν δοκοί, επί των οποίων στηρίζεται το υπόλοιπο του επίπεδου ελάσματος.



Σχήμα 2. 11 Ισοδύναμες δοκοί σε ενισχυμένες διατομές

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 (EN 1993-1-3), ο έλεγχος ενισχυμένων θλιβόμενων στοιχείων βασίζεται στην παραδοχή ότι η ενίσχυση συμπεριφέρεται σαν ένα θλιβόμενο σκέλος με συνεχή μερική δέσμευση, στα σημεία επαφής του με τα επίπεδα μέρη και με ακαμψία ελατηρίου (συνεχούς ανά μέτρο μήκους), που εξαρτάται από τις συνοριακές συνθήκες, αλλά και την δυσκαμψία του γειτονικού επίπεδου στοιχείου. Αυτό μας επιτρέπει να υιοθετήσουμε απλά μοντέλα σχεδιασμού, όπου τα ενισχυτικά ακαμψίας και τα προσκείμενα σε αυτά τμήματα των επίπεδων στοιχείων, θεωρούνται ως δοκοί επί ελαστικών εδράσεων με στροφική δυσκαμψία που εξαρτάται από τις συνοριακές συνθήκες του στοιχείου.

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

Η σταθερά ελατηρίου μιας ενίσχυσης καθορίζεται εφαρμόζοντας ένα μοναδιαίο φορτίο ανά μονάδα μήκους  $u$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. 12 . Η σταθερά ελατηρίου  $K$  ανά μονάδα μήκους μπορεί να προσδιορίζεται στην παρακάτω σχέση.

$$K = \frac{u}{\delta} \quad (2.13)$$

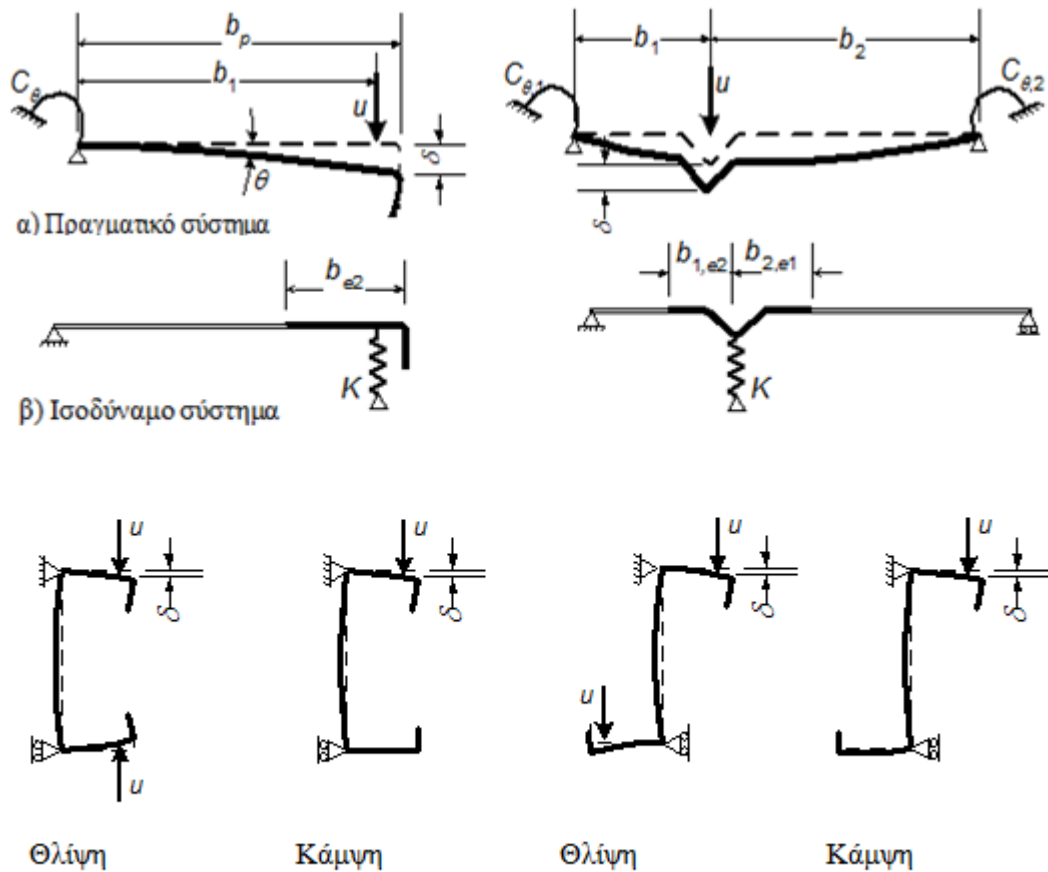
όπου

$K$ : η σταθερά του ισοδύναμου ελατηρίου

$u$ : το μοναδιαίο ανα μονάδα μήκους φορτίο

$\delta$ : η μετακίνηση της ενισχύσεως λόγω του  $u$





γ) Προσδιορισμός του  $\delta$  για διατομές C και Z.

Σχήμα 2. 12 Καθορισμός της ακαμψίας του ελατηρίου

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

Για μια ακραία ενίσχυση το βέλος  $\delta$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$\delta = \theta b_p + \frac{ub_p^3}{3} * \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3}, \quad \theta = \frac{ub_p}{C_\theta} \quad (2.14)$$

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

$$\chi_d = 1,0 \quad \text{αν} \quad \bar{\lambda}_d \leq 0,65 \quad (2.15)$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d \quad \text{αν} \quad 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad (2.16)$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad \text{αν} \quad \bar{\lambda}_d \geq 1,38 \quad (2.17)$$

όπου

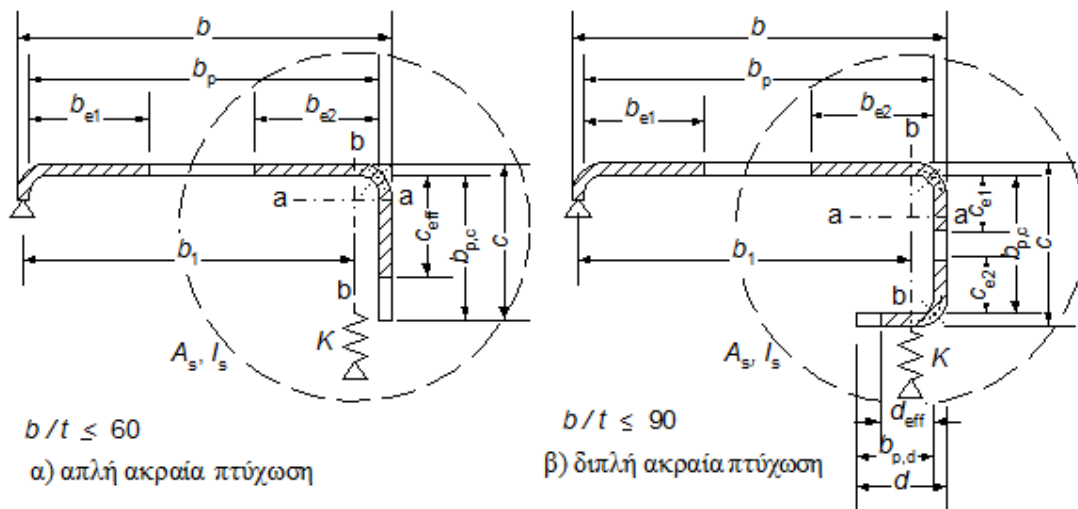
$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}}$$

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

### 2.2.1.6 Επίπεδα στοιχεία με ακραίες ενισχύσεις

Μια ακραία ενίσχυση είναι δυνατόν να προέρχεται από απλή ή διπλή αναδίπλωση (απλό ή διπλό στραντζάρισμα), όπως φαίνεται στο σχήμα. Η ακραία ενίσχυση αγνοείται στον υπολογισμό για τον καθορισμό της αντοχής του επίπεδου στοιχείου στο οποίο είναι συνδεδεμένη εάν δεν προσφέρει στήριξη σε αυτό. Η διατομή μιας ακραίας ενίσχυσης πρέπει να θεωρείται ότι αποτελείται από τα ενεργά τμήματα της ενίσχυσης, στοιχείο c ή στοιχεία c και d (Σχήμα 2. 13 ), και το ενεργό τμήμα του γειτονικού πλακοειδούς στοιχείου  $b_p$ . Οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται προκειμένου να ληφθεί υπόψιν η συνεισφορά της ενίσχυσης είναι οι εξής:

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



Σχήμα 2. 13 Ενισχύσεις άκρων

Για τον υπολογισμό των ενεργών περιοχών των ενισχύσεων υπάρχουν δύο μέθοδοι: η γενική και η απλουστευμένη, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

#### A) Γενική μέθοδος

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

1. Προσδιορίζεται μια αρχική ενεργός διατομή της ενίσχυσης, με ενεργά πλάτη προσδιοριζόμενα με την παραδοχή ότι η ενίσχυση παρέχει πλήρη εξασφάλιση και είναι  $\sigma_{com,Ed} = f_y / \gamma_{M0}$ . Συγκεκριμένα θεωρούμε ότι το επίπεδο στοιχείο  $b_p$  του Σχήμα 2. 13 είναι αμφίπλευρα στηριζόμενο και σύμφωνα με την παράγραφο 2.2.1.4 προσδιορίζονται οι αρχικές τιμές  $b_{e1}$  και  $b_{e2}$ . Οι αρχικές τιμές των  $c_{eff}$  υπολογίζονται ως εξής για απλό στραντζάρισμα:

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

όπου το  $\rho$  υπολογίζεται σύμφωνα με την παράγραφο 2.2.1.3 ενώ ο συντελεστής κύρτωσης  $K_\sigma$  προσδιορίζεται ως εξής:

$$\text{αν } \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0,35 \text{ τότε } K_\sigma = 0,5 \quad (2. 18)$$

$$\text{αν } 0,35 \leq \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0,6 \text{ τότε } K_\sigma = 0,5 + 0,83^3 \sqrt{\left(\frac{b_{p,c}}{b_p} - 0,35\right)^2} \quad (2. 19)$$

2. Υπολογίζεται το εμβαδόν  $A_s$  της ενεργού διατομής της ακραίας ενισχύσεως:

$$A_s = t(b_{e2} + c_{eff}) \quad (2. 20)$$

3. Υπολογίζεται η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού  $\sigma_{cr}$  από την σχέση:

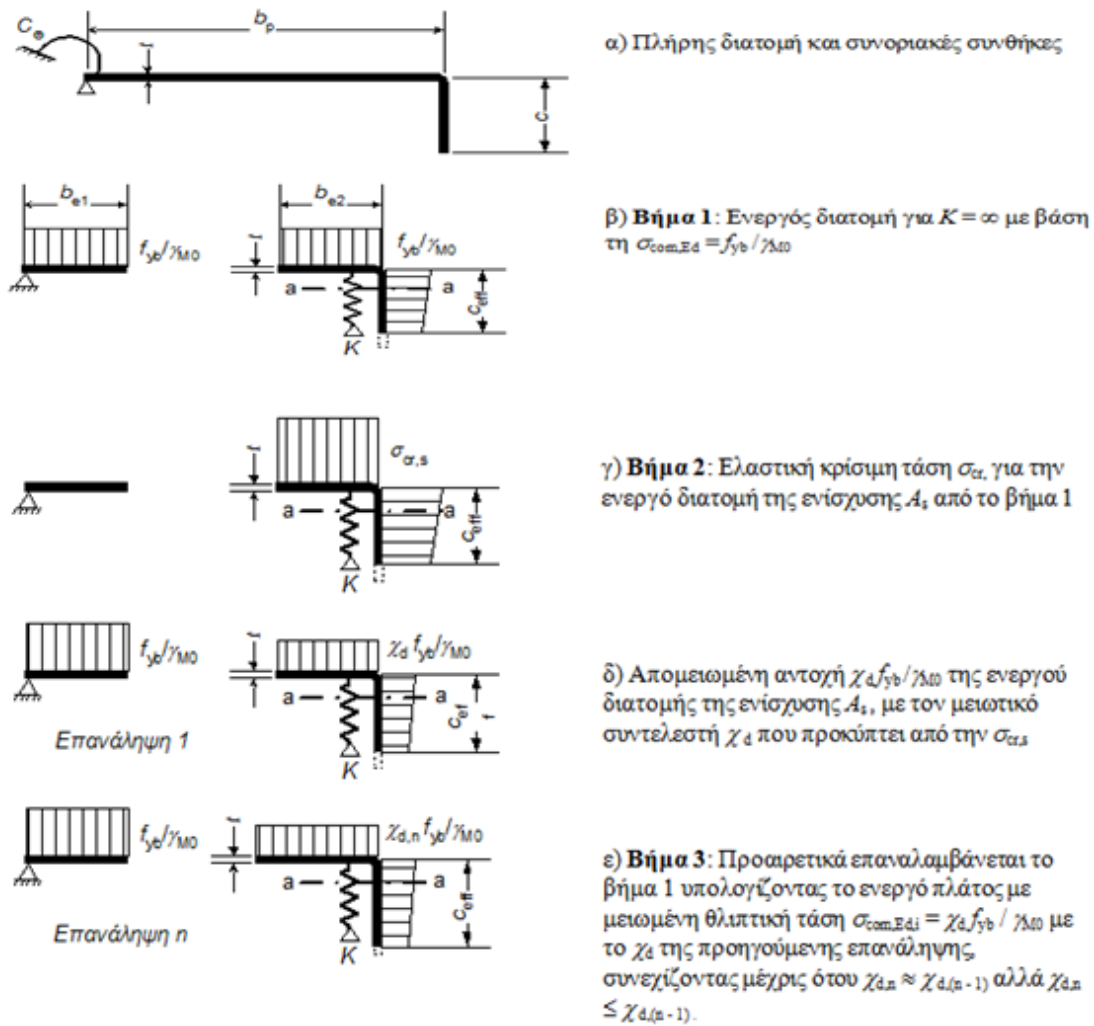
$$\sigma_{cr} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} \quad (2. 21)$$

όπου

$K$  η δυσκαμψία του ελατηρίου

$I_s$  η ενεργός ροπή αδράνειας περί τον άξονα a-a (σχήμα), με βάση το ενεργό εμβαδόν του κατά τα προηγούμενα προσδιορισθέντος ενεργού τμήματος.

4. Υπολογίζεται ο μειωτικός συντελεστής  $X_1$  για λυγισμό της ενίσχυσης με τη μέθοδο που αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2.1.5 και μπορεί να διορθώνεται σταδιακά με επαναληπτική διαδικασία. Επαναλαμβάνοντας όλα τα παραπάνω βήματα χρησιμοποιώντας την ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού  $\sigma_{cr}$  στη θέση της θλιβόμενης τάσης  $\sigma_{com,Ed}$ , προσδιορίζεται ο συντελεστής  $X_2$ .



Σχήμα 2. 14 Θλιπτική αντοχή πέλματος με ακραία ενίσχυση

Κατά την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας πρέπει να έχουμε υπόψη τα ακόλουθα:

- Αν  $X < 1$ , μπορεί να αρχίσει η επανάληψη με τροποποίηση των τιμών του  $\rho$ , με χρησιμοποίηση της ( 2. 7)

$$\sigma_{cr} = X * \frac{f_{yb}}{\gamma_M} \quad \text{οπότε: } \bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{X} \quad (2. 22)$$

- Το απομειωμένο εμβαδό της ενισχύσεως  $A_{s,red}$  το οποίο λαμβάνεται υπόψη για τον καμπτικό λυγισμό θα ληφθεί:

$$A_{s,red} = X * A_s * \left[ \frac{f_y}{\gamma_M} \right] / \left[ \frac{f_y}{\sigma_{cr,k}} \right], \quad \text{αλλά: } A_{s,red} \leq A_s \quad (2. 23)$$

όπου

$\sigma_{cr,k}$  είναι η τάση που υπολογίζεται στο κέντρο βάρους της ενισχύσεως  
- Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων της ενεργού διατομής, το απομειωμένο εμβαδό  $A_{S,red}$  θα πρέπει να εκφραστεί με την χρήση ενός μειωμένου πάχους:

$$t_{red} = t * \frac{A_{S,red}}{A_S} \quad (2.24)$$

για όλα τα στοιχεία που περιλαμβάνονται στο  $A_S$ .

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

#### A) Απλουστευμένη μέθοδος

Η απλουστευμένη μέθοδος έχει σκοπό την αποφυγή της επαναληπτικής διαδικασίας. Η ακολουθούμενη πορεία είναι η εξής:

1. Όπως Γενική μέθοδος
2. Όπως Γενική μέθοδος
3. Υπολογίζεται η  $I_S$ .

$$\text{Av} \quad I_S \geq 0,31 * \left(1,5 + \frac{h}{b_p}\right) \left(\frac{f_y}{E}\right)^2 \left(\frac{b_p}{t}\right)^3 * A_S^2 \quad \text{τότε} \quad X = 0,5 \quad (2.25)$$

$$\text{Av} \quad I_S \geq 4,86 * \left(1,5 + \frac{h}{b_p}\right) \left(\frac{f_y}{E}\right)^2 \left(\frac{b_p}{t}\right)^3 * A_S^2 \quad \text{τότε} \quad X = 1,0 \quad (2.26)$$

όπου

$h$  το συνολικό ύψος του γειτονικού προς το  $b_p$  κορμού της διατομής.

Κατά τα λοιπά, ισχύουν οι τύποι και περιορισμοί .

#### 2.2.1.7 Αντοχή σε λυγισμό

Η εξέταση του τοπικού λυγισμού οδηγεί σε προσδιορισμό ενεργών διατομών. Με βάση τη γραμμική θεωρία ευστάθειας προσδιορίζονται κρίσιμες τάσεις  $\sigma_{cr}$  και ανηγμένες λυγηρότητες οι οποίες χρησιμεύουν ως τιμές αναφοράς για τον προσδιορισμό των κρίσιμων τάσεων. Οι οριακές τάσεις βρίσκονται από κατάλληλες καμπύλες κύρτωσης ή καμπύλες λυγισμού (για λυγισμό με στρέβλωση της διατομής) με τις οποίες λαμβάνονται υπόψη οι επιρροές της μη γραμμικής συμπεριφοράς του υλικού και των ατελειών. Ο υπολογισμός δεν γίνεται με μειωμένες οριακές τάσεις και πλήρεις διατομές, αλλά με τάσεις μέχρι το όριο διαρροής και μειωμένες ενεργές διατομές. Ο λόγος των ιδιοτήτων της ενεργού προς την πλήρη διατομή εκφράζεται με τον συντελεστή  $\beta_A$ , ο οποίος ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης δίνεται από την σχέση  $\beta_A = A_{eff}/A_g$ .

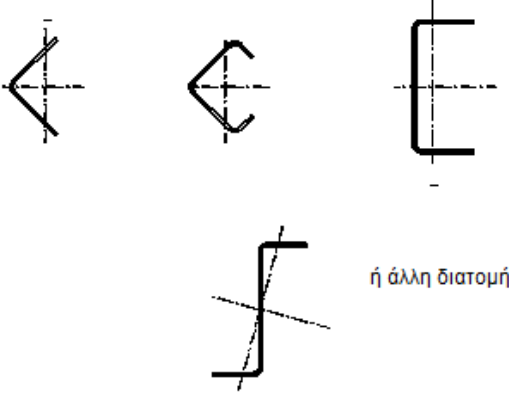
Ο συνδυασμός καθολικού και τοπικού λυγισμού γίνεται με τροποποίηση της ανηγμένης λυγηρότητας  $\bar{\lambda}_k = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}}$  του καμπτικού λυγισμού. Η τελική ανηγμένη λυγηρότητα είναι μειωμένη σε σχέση με την ανωτέρω και εκφράζεται από τη σχέση  $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_k \sqrt{\beta_A}$ . Η λυγηρότητα της ράβδου από την παραπάνω εξίσωση χρησιμεύει ως

τιμή αναφοράς για τον προσδιορισμό των μειωτικών συντελεστών λυγισμού  $\chi$  από κατάλληλες καμπύλες λυγισμού, οι οποίοι εφαρμοζόμενοι στο όριο διαρροής δίνουν τις οριακές τάσεις. Τα οριακά εντατικά μεγέθη σχεδιασμού προκύπτουν από τον πολλαπλασιασμό των οριακών τάσεων με τα αντίστοιχα αδρανειακά μεγέθη της ενεργού διατομής  $A_{eff}$ ,  $W_{eff}$  και εφαρμογή των επιμέρους συντελεστών ασφαλείας έναντι αστάθειας  $\gamma_{M1}$ .

Όπως αναφέρεται παρακάτω, στο κεφάλαιο 3.7, γίνεται γραμμική ανάλυση με χρήση του προγράμματος FEMAP και προσδιορίζεται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού  $P_{cr}$  αποφεύγοντας την ανωτέρω διαδικασία υπολογισμού της ανηγμένης λυγηρότητας  $\bar{\lambda}$ . Έτσι υπολογίζεται η ανηγμένη λυγηρότητα όπου για διατομές κατηγορίας 4 είναι:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{P_{cr}}} \quad (2.27)$$

Σε σκέλη υπό αξονική θλίψη, η τιμή του μειωτικού συντελεστή  $\chi$  υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (2.29), ως συνάρτηση της ανηγμένης λυγηρότητας  $\bar{\lambda}$  και του συντελεστή ατελειών  $\alpha$  (Σχήμα 2.16), ο οποίος εξαρτάται από την αντίστοιχη καμπύλη λυγισμού (Σχήμα 2.15).

	Οποιοσδήποτε	C
<p>ή άλλη διατομή</p>		
<p>*) Ο μέσος όρος του ορίου διαρροής <math>f_{y2}</math> δεν πρέπει να χρησιμοποιείται, εκτός αν <math>A_{eff} = A_g</math></p>		

Σχήμα 2.15 Επιλογή καμπύλης λυγισμού

Καμπύλη λυγισμού	a0	a	b	c	d
Συντελεστής ατελειών $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Σχήμα 2.16 Συντελεστές ατελειών για καμπύλες λυγισμού

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (2.28)$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{αλλά } \chi \leq 1,0 \quad (2.29)$$

Η αντοχή ενός θλιβόμενου σκέλους σε λυγισμό λαμβάνεται για διατομές κατηγορίας 4 από τη σχέση (2. 30).

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2. 30)$$

όπου

για  $A_{eff} < A_g$  :  $f_y = f_{yb}$

για  $A_{eff} = A_g$  :  $f_y = f_{ya}$

$f_{ya}$ : ο μέσος όρος του ορίου διαρροής κατά τη σχέση 2. 1

$f_{yb}$ : το βασικό όριο διαρροής κατά Πίνακας 2. 1

$A_{eff}$ : το ενεργό εμβαδό της διατομής, όπως υπολογισθηκε στις προηγούμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου.

$A_g$ : το εμβαδόν της πλήρους διατομής.

### 2.2.2 Εφελκυστική αντοχή

Η κατανομή των εφελκυστικών τάσεων εντός ενός εφελκυσμένου σκέλους είναι ομοιόμορφη. Οι λεπτομέρειες σύνδεσης μπορούν να επηρεάσουν την ομοιόμορφη κατανομή κατά δύο τρόπους. Πρώτον εάν χρησιμοποιείται κοχλίωση, η διατομή απομοιώνεται λόγω των οπών και οι τάσεις περί αυτές αυξάνονται τοπικά. Δεύτερον, κάποια εκκεντρότητα στη σύνδεση είναι συχνά αναπόφευκτη, οπότε αναπτύσσονται στο σκέλος δευτερεύουσες ροπές.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3:

(α) αντοχή σε οριακή κατάσταση αστοχίας  $N_{u,Rd}$

Σε σκέλη που συνδέονται στα άκρα τους κατά μη συμμετρικό τρόπο, ή εάν το σκέλος καθεαυτό δεν είναι συμμετρικό ως προς κάποιον άξονά του (γωνιακά, ταυ, πι), πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η εκκεντρότητα στη σύνδεση. Στην ειδική περίπτωση ενός γωνιακού συνδεδεμένου με απλή διάταξη οπών στο ένα σκέλος του, το σκέλος μπορεί να αντιμετωπιστεί ως κεντρικά φορτιζόμενο και η οριακή αντοχή του να υπολογιστεί με βάση μια απομειωμένη καθαρή διατομή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. 17

$$\text{με 1 κοχλία: } N_{u,Rd} = \frac{2,0(e_2 - 0,5d_0)t f_u}{\gamma_{M2}} \quad (2. 31)$$

$$\text{με 2 κοχλίες: } N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (2. 32)$$

$$\text{με 3 ή περισσότερες κοχλίες: } N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (2. 33)$$

Στην περίπτωση του γωνιακού με ακραίες ενισχύσεις:

$$N_{u,Rd} = \frac{A_{net} f_u}{\gamma_{Mo}} \quad (2.34)$$

όπου:

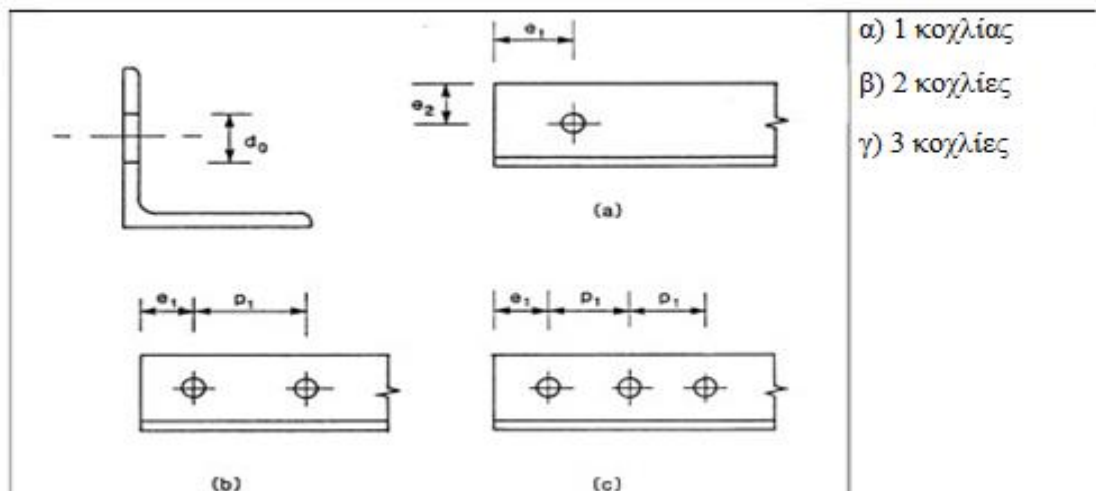
$\beta_2$  και  $\beta_3$ : μειωτικοί συντελεστές, οι οποίοι εξαρτώνται από το βήμα της κοχλίωσης  $p_1$  και δίνονται στον Πίνακα 2.7.

$A_{net}$ : η καθαρή επιφάνεια της διατομής του γωνιακού

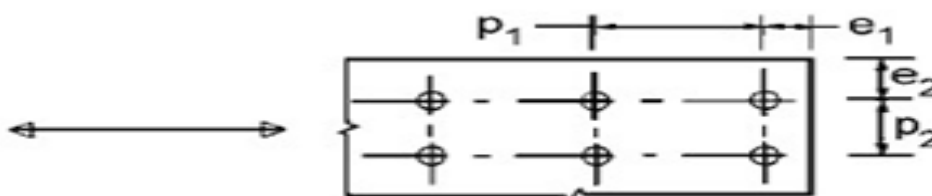
$f_u$ : η εφελκυστική αντοχή (τάση θραύσης) του χάλυβα (Πίνακας 2.1).

Πίνακας 2.7 Μειωτικοί συντελεστές  $\beta_2, \beta_3$

Βήμα	$p_1$	$\leq 2,5 d_0$	$\geq 5,0 d_0$
2 κοχλίες	$\beta_2$	0,4	0,7
3 κοχλίες ή περισσότεροι	$\beta_3$	0,5	0,7



Σχήμα 2.17 Γωνιακά συνδεόμενα με ένα σκέλος



Σχήμα 2.18 Σύμβολα για τις αποστάσεις των μέσων σύνδεσης



(b) αντοχή της πλήρους διατομής σε εφελκυσμό  $N_{pl,Rd}$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.35)$$

όπου:

A το εμβαδόν της πλήρους διατομής

$f_y$  το όριο διαρροής του χάλυβα

$\gamma_{M0}$  επιμερους συντελεστής ασφαλείας του χάλυβα.

Οι κοχλιοτές συνδέσεις των γωνιακών που μελετάμε είναι συνδέσεις διάτμησης κατηγορίας A (συνδέσεις άντυνας). Σε αυτή την κατηγορία μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοχλίες κατηγορίας 4.6 μέχρι και 10.9. Δεν απαιτείται προένταση ούτε ειδική επεξεργασία των επιφανειών επαφής. Η μέγιστη διατμητική δύναμη σχεδιασμού δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή σχεδιασμού σε διάτμηση ούτε την αντοχή σχεδιασμού σε σύνθλιψη άντυνας. Στην παρούσα εργασία η κατηγορία κοχλίων είναι 8.8.

(c) αντοχή σε διάτμηση του κοχλία  $F_{v,Rd}$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (2.36)$$

για κοχλίες ποιότητας 8.8  $\alpha_v = 0,6$ ,  $f_{ub} = 800$  MPa

(d) αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας  $F_{b,Rd}$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (2.37)$$

$$k_1 = \min \left\{ \frac{2,8e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right\} \quad (2.38)$$

$$a_b = \min \left\{ 1; \frac{f_{ub}}{f_u}; \frac{e_1}{3d_0} \right\} \quad (2.39)$$

όπου  $f_u$ , από Πίνακα 2.1

$f_{ub} = 800$  MPa

d διάμετρος κορμού κοχλία

t πάχος λεπτότερου ελάσματος

$d_0$  διάμετρος οπής

### 3. Προσομοίωση μελών με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FEMAP

#### 3.1 Εισαγωγή

Για την προσομοίωση των μελών χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FEMAP (version 11.0.1). Το FEMAP (Finite Element Modeling And Post processing) είναι ένα πρόγραμμα ανάλυσης της Siemens PLM Software, που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό και την ανάλυση μοντέλων σύνθετων μηχανικών προβλημάτων με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Επιτρέπει γραμμική στατική ανάλυση (linear static analysis), μη γραμμική ανάλυση (nonlinear analysis), ανάλυση λυγισμού (buckling analysis), ανάλυση δυναμικής απόκρισης (dynamic response analysis), ανάλυση μεταφοράς θερμότητας (heat transfer analysis) και ροής (fluid flow).

Η ανάλυση με το πρόγραμμα FEMAP περιλαμβάνει τον καθορισμό των δεδομένων, δηλαδή εισαγωγή των διαστάσεων των μελών, των υλικών, των φορτίσεων και των συνοριακών συνθηκών. Έπειτα πραγματοποιείται η ανάλυση με τα επιθυμητά αποτελέσματα.

#### 3.2 Καθορισμός της γεωμετρίας

Η διατομή του γωνιακού KL60x60x3 προσομοιώνεται λεπτομερώς καθώς σχεδιάζονται τα δυο επίπεδα στοιχεία και οι στρογγυλεμένες γωνίες της διατομής με βάση τις ακτίνες προσαρμογής. Στην περίπτωση του παραπάνω γωνιακού με ακραίες ενισχύσεις προστίθενται στα άκρα τους δυο μικρότερα επίπεδα στοιχεία συνολικού πλάτους (μαζί με τις στρογγυλεμένες γωνίες) 20 cm (Σχήμα 3. 1).

Το μήκος των μελών είναι  $L=2,0m$  και υπάρχουν δύο οπές μια οπή στο δεξί και μια στο αριστερό του άκρο. Οι οπές απέχουν από το αριστερό και δεξί άκρο του γωνιακού απόσταση ίση με  $2 \cdot d_0$ , όπου  $d_0$  στην εξίσωση (3. 1)

Το κέντρο των οπών βρίσκεται στο μέσο του πλάτους των γωνιακών (Σχήμα 3. 2).

$$d_0 = d + \alpha \quad (3. 1)$$

όπου:

$d_0$  είναι η διάμετρος τη οπής

$d$  είναι η διάμετρος κορμού του κοχλία

$\alpha$  είναι η ανοχή

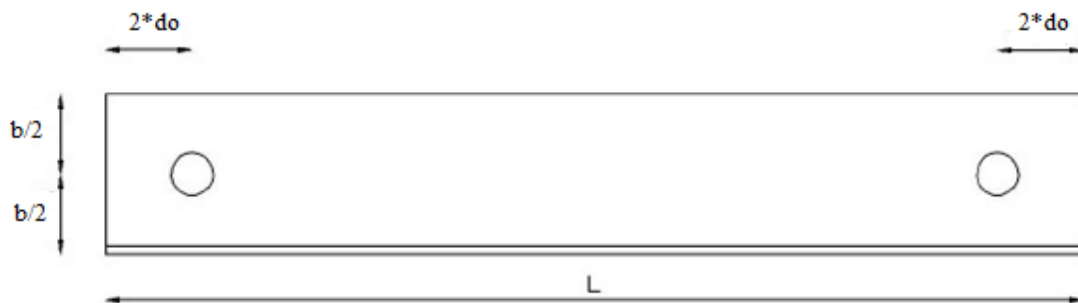
Στο υπολογιστικό προσομοίωμα έχουν προσομοιωθεί οπές για δυο περιπτώσεις κοχλία M12 (Σχήμα 3. 4) και M20 (Σχήμα 3. 5). Η ανοχή για τους κοχλίες M12 είναι 1mm και η ανοχή για τους κοχλίες M20 είναι 2mm. Τα μοντέλα που αναλύθηκαν είναι 4 και φαίνονται στον Πίνακα 3. 1.

Πίνακας 3. 1: Μοντέλα ανάλυσης.

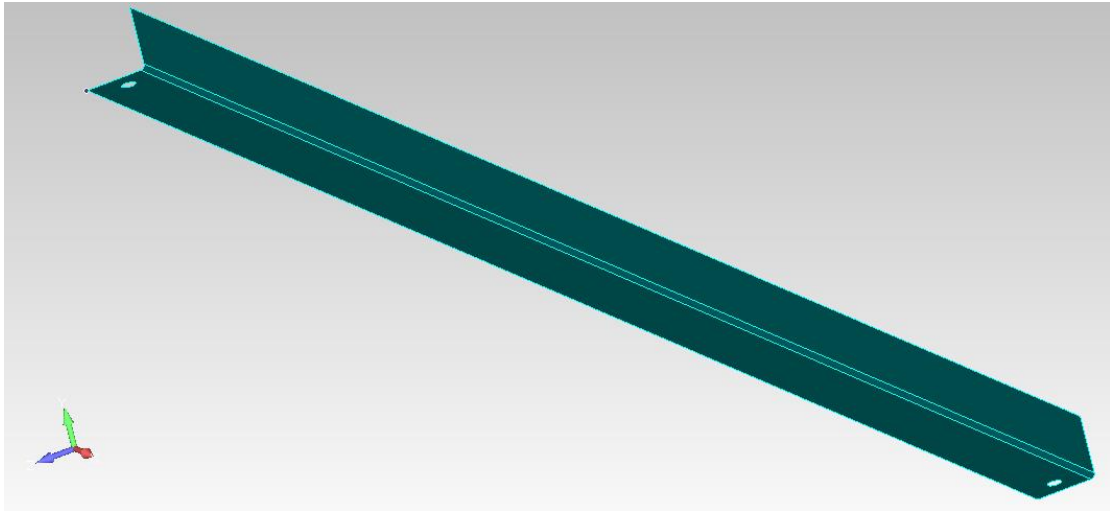
		ΚΟΧΛΙΕΣ	
		M12	M20
ΤΥΠΟΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ	ΓΩΝΙΑΚΟ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	✓	✓
	ΓΩΝΙΑΚΟ ΜΕ ΑΚΡΑΙΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	✓	✓



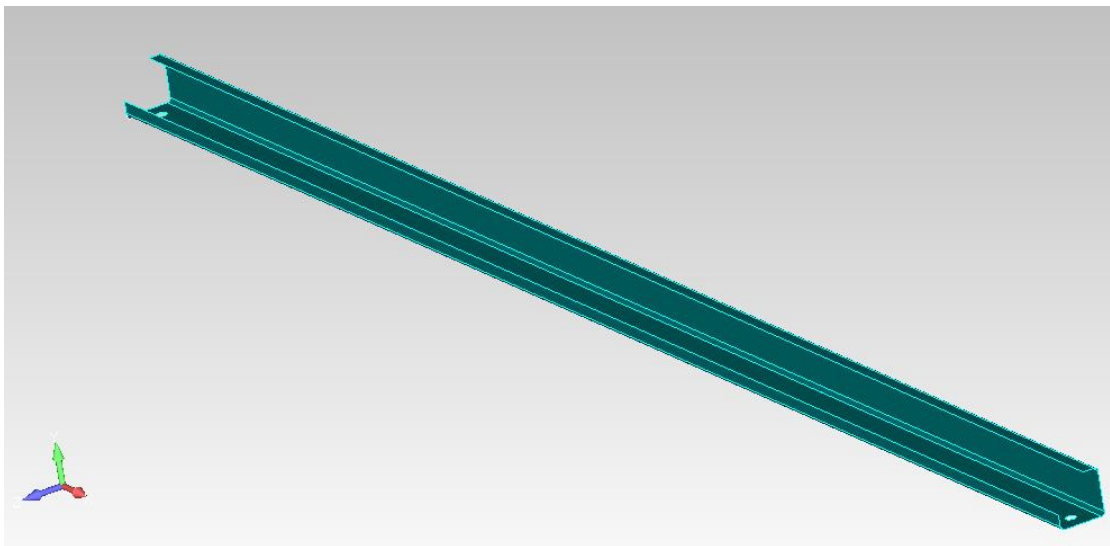
Σχήμα 3. 1: Διατομή γωνιακού KL με ή χωρίς ακραίες ενισχύσεις όπως προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FEMAP.



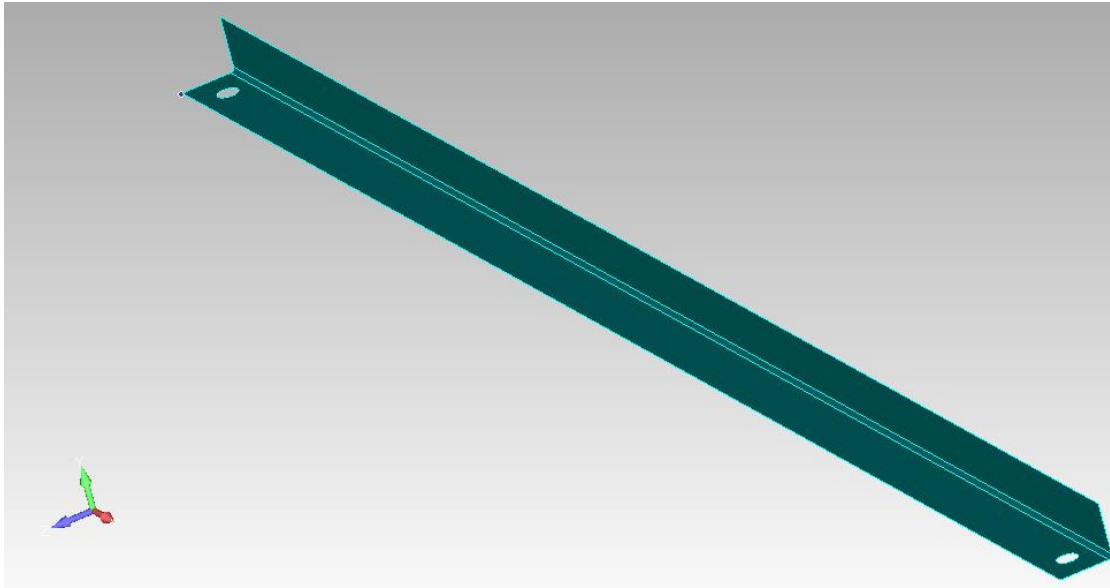
Σχήμα 3. 2: Διάταξη οπών στο γωνιακό



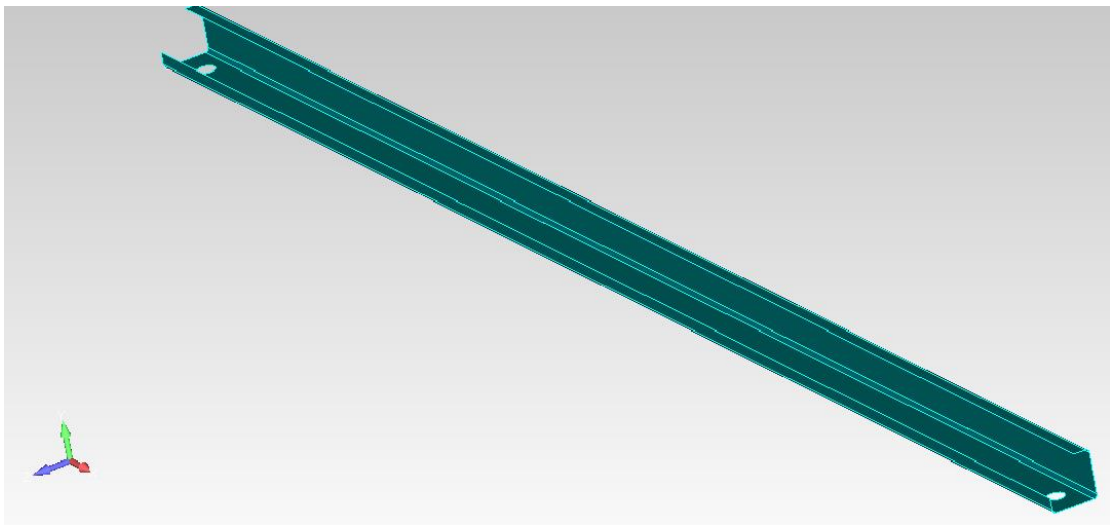
Σχήμα 3. 3: Διατομή γωνιακού KL με οπές για κοχλία M12.



Σχήμα 3. 4: Διατομή γωνιακού KL με ακραίες ενισχύσεις με οπές για κοχλία M12.



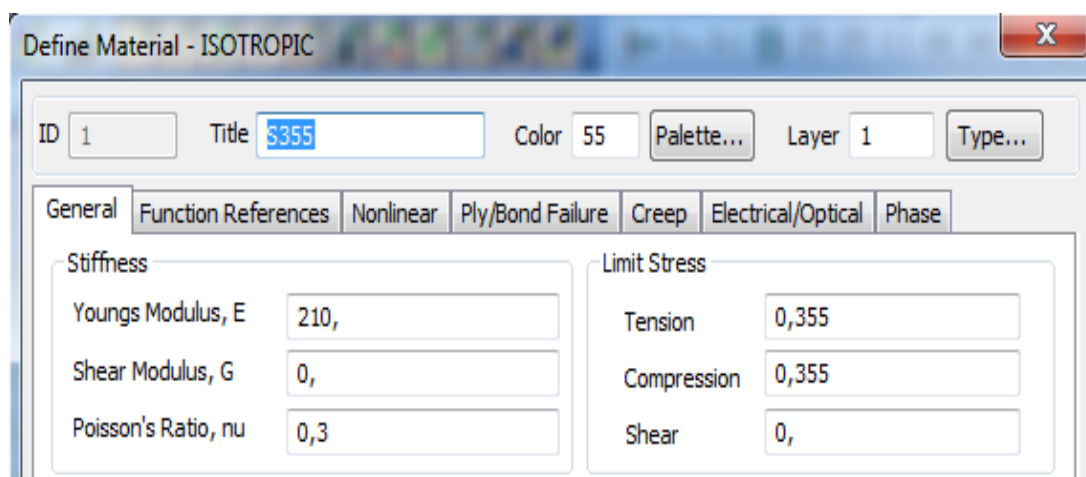
Σχήμα 3. 5: Διατομή γωνιακού KL με οπές για κοχλία M20.



Σχήμα 3. 6: Διατομή γωνιακού KL με ακραίες ενισχύσεις με οπές για κοχλία M20.

### 3.3 Καθορισμός του υλικού

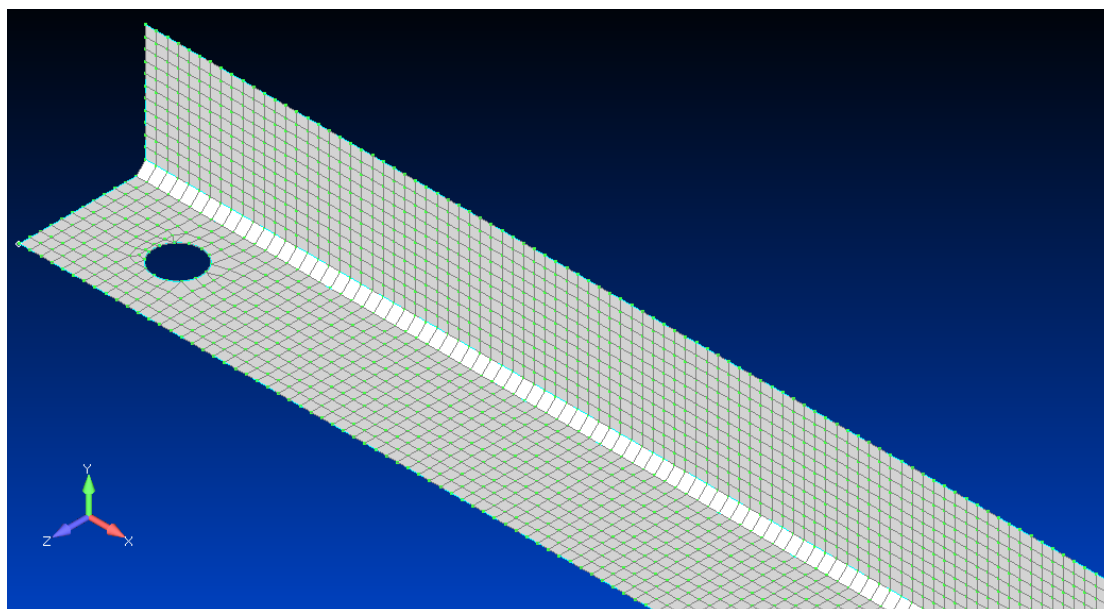
Ο χάλυβας των γωνιακών είναι ποιότητας S355 με όριο διαρροής  $f_y=355\text{MPa}$  και αντοχή θραύσης  $f_t=510\text{MPa}$ . Αντίστοιχα ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8 με όριο διαρροής  $f_{yb}=640\text{MPa}$  και εφελκυστική αντοχή  $f_{ub}=800\text{MPa}$  αυτές οι τιμές χρειάστηκαν σε υπολογισμούς που έγιναν σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3. Το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνεται  $E=210000\text{MPa}$  και ο λόγος του Poisson  $\nu=0.3$ . Στο πρόγραμμα οι αντοχές και το μέτρο ελαστικότητας δεν ορίστηκαν σε MPa αλλά σε  $\text{KN/mm}^2$  (Σχήμα 3. 7).



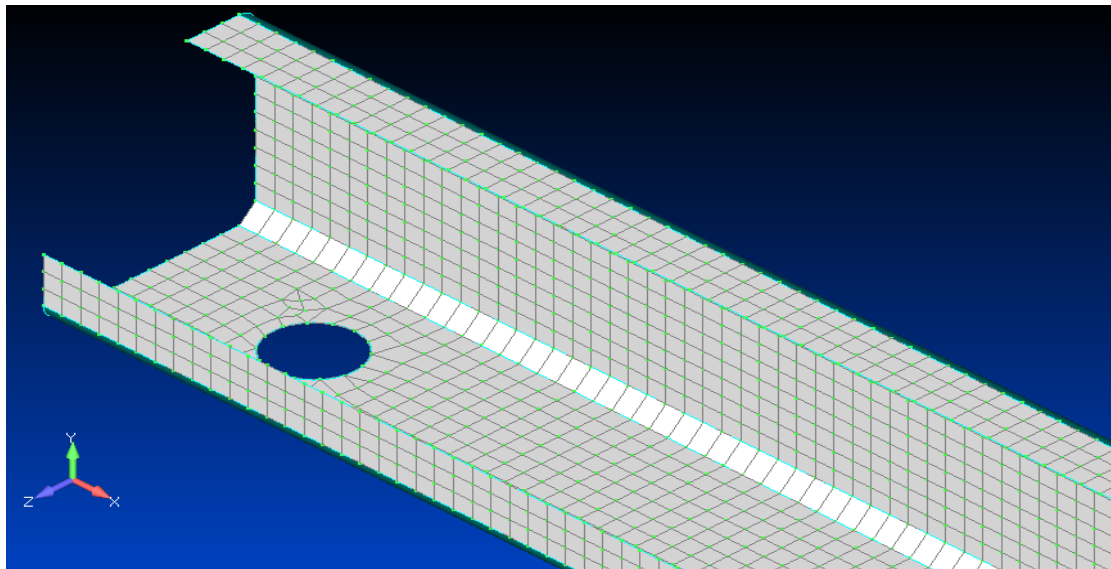
Σχήμα 3. 7: Προσδιορισμός του υλικού στο πρόγραμμα FEMAP.

### 3.4 Διακριτοποίηση των μελών

Η διακριτοποίηση των μελών γίνεται με εξαεδρικά στοιχεία με μέγιστη διάσταση 5mm. Πύκνωση του καννάβου πραγματοποιείται γύρω από τις οπές. Το προσομοίωμα διακριτοποιείται σε πεπερασμένα στοιχεία, το μέγεθος των οποίων είναι συνάρτηση της επιθυμητής ακρίβειας. Παρακάτω φαίνεται η διακριτοποίηση του γωνιακού με ή χωρίς ακραίες ενισχύσεις με οπές για κοχλία M20 (Σχήμα 3. 8), (Σχήμα 3. 9).



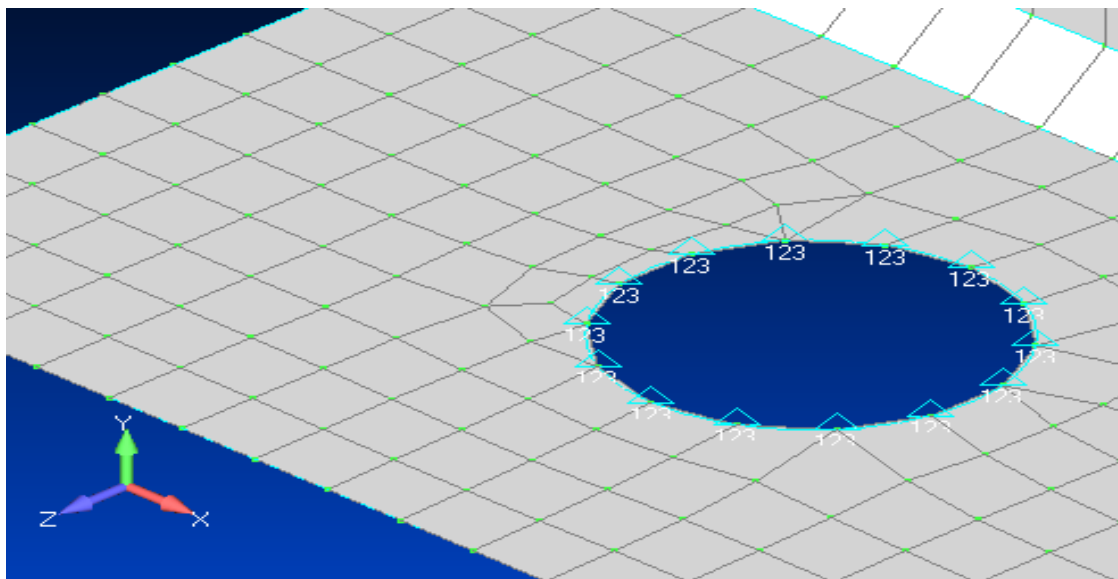
Σχήμα 3. 8: Διακριτοποίηση γωνιακού KL με οπές για κοχλία M20.



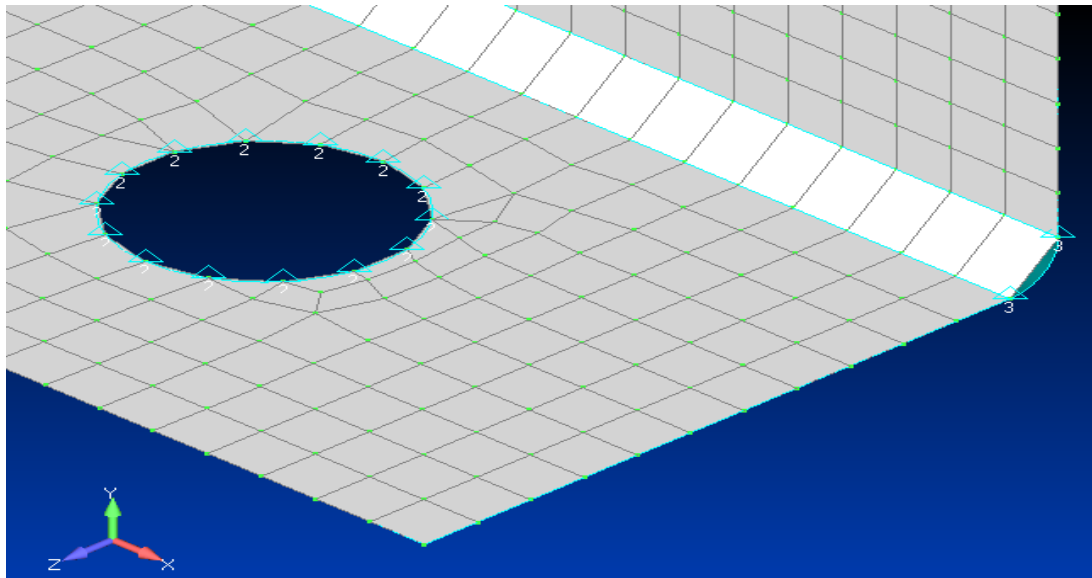
Σχήμα 3. 9: Διακριτοποίηση γωνιακού KL με ακραίες ενισχύσεις με οπές για κοχλία M20.

### 3.5 Εισαγωγή των στηρίξεων

Οι στηρίξεις τοποθετήθηκαν στους κόμβους των δύο οπών. Στην μια οπή δεσμεύτηκαν και οι τρεις βαθμοί ελευθερίας ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ), ώστε το σκέλος να παραμένει αμετακίνητο, ενώ στην άλλη δεσμεύτηκε ο κατακόρυφος βαθμός ελευθερίας ( $Y$ ), ώστε να επιτρέπεται η κίνηση κατά μήκος του διαμήκη άξονα. Επιπλέον, οι κόμβοι της στρογγυλεμένης γωνίας από την πλευρά της οπής που δεσμεύτηκε κατά τον κατακόρυφο άξονα δεσμεύτηκαν ως προς τον άξονα  $Z$ . Στα σχήματα (Σχήμα 3. 10), (Σχήμα 3. 11) που ακολουθούν με τους αριθμούς 1,2,3, συμβολίζονται οι μετακινήσεις ως προς τους άξονες  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  αντίστοιχα.



Σχήμα 3. 10: Οπή δεσμευμένη κατά  $X, Y, Z$ .

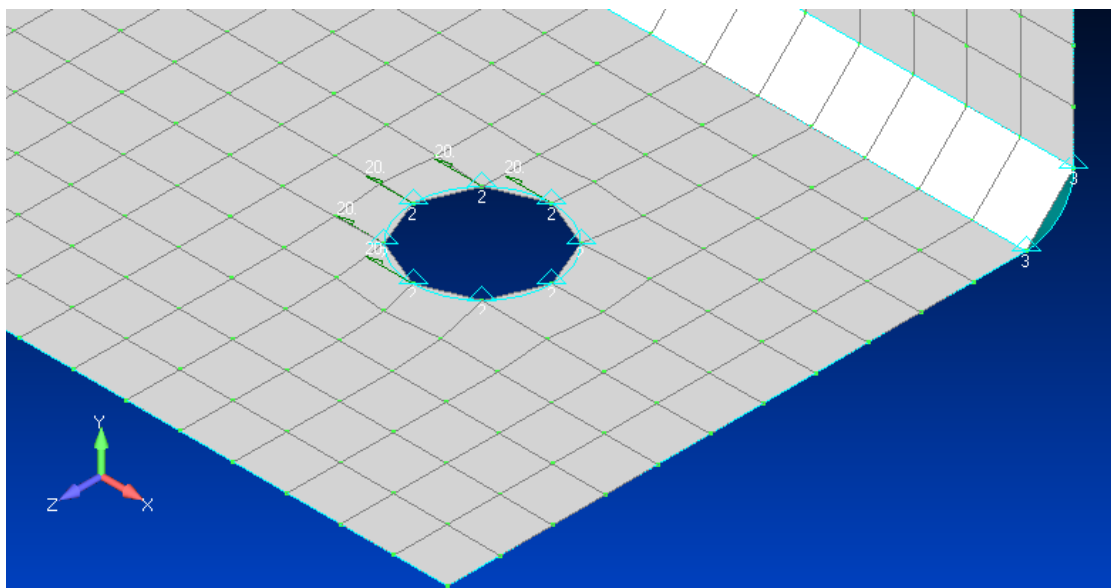


Σχήμα 3. 11: Δέσμευση οπής κατά τον Y και στρογγυλεμένης γωνίας κατά τον Z.

### 3.6 Εισαγωγή των φορτίων

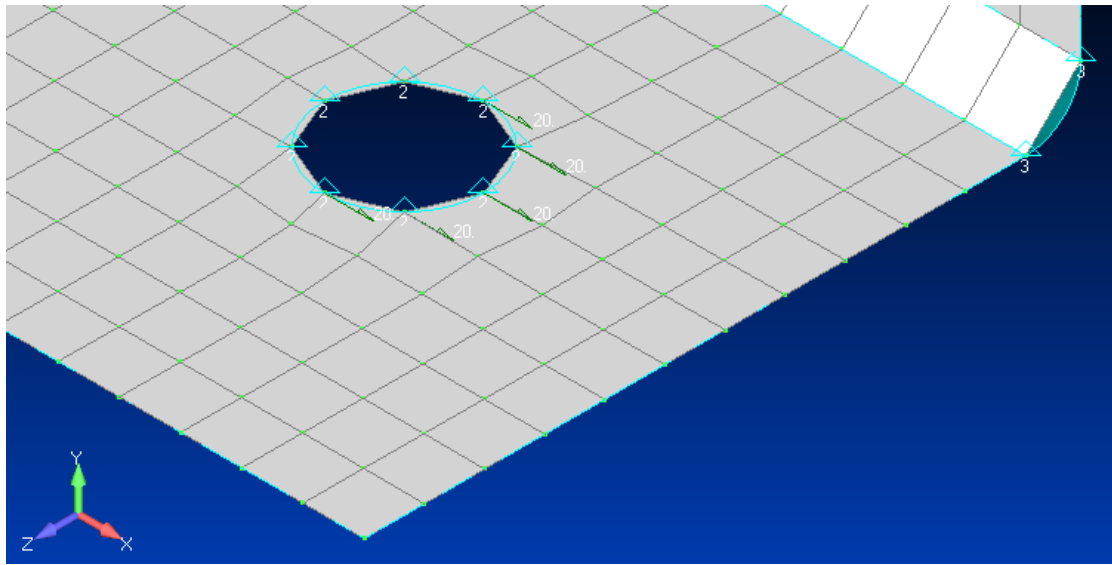
Οι φορτίσεις εφαρμόζονται με τη μορφή συγκεντρωμένων δυνάμεων στους κόμβους με διεύθυνση τον άξονα X, στην περίπτωση του εφελκυσμού τον θετικό άξονα X ενώ στην περίπτωση θλιπτικού φορτίου τον αρνητικό άξονα X.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται τα σκέλη υπό αξονικό φορτίο 100KN. Στα μοντέλα εφαρμόστηκε στην οπή που δεσμεύτηκε κατά τον άξονα Y. Στην περίπτωση της οπής για κοχλία M20 δημιουργήθηκαν 14 κόμβοι οπότε προσεγγιστικά φορτίζονται οι 8 με 12,5 KN ο καθένας, ενώ στην περίπτωση της οπής για κοχλία M12 δημιουργήθηκαν 8 κόμβοι και προσεγγιστικά φορτίζονται οι 5 με 20 KN ο καθένας.

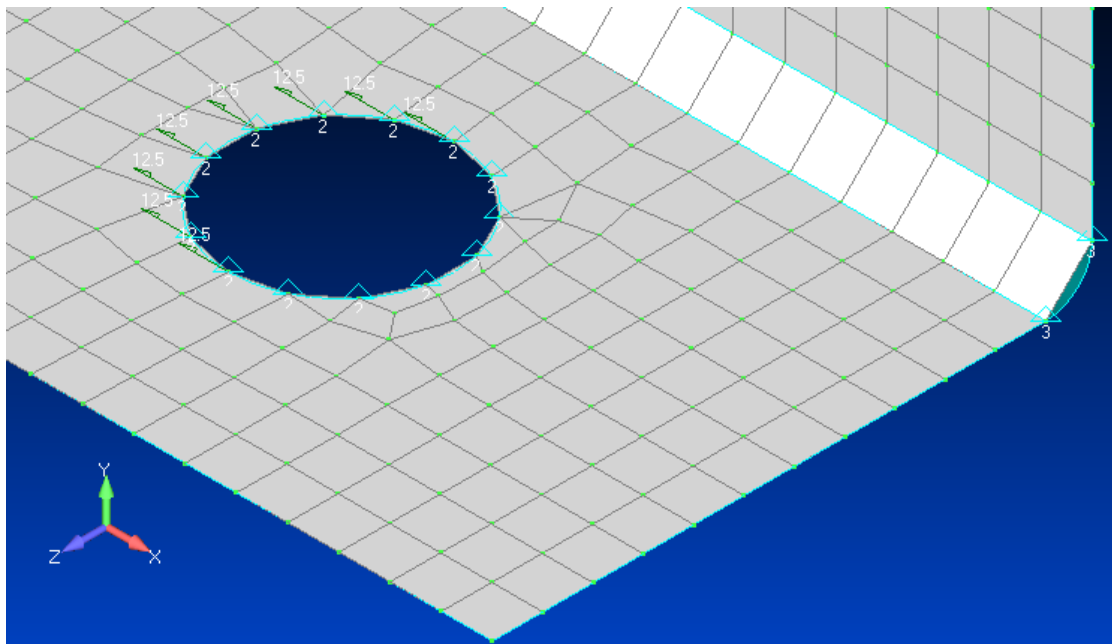


Σχήμα 3. 12: Εφαρμογή θλιπτικού φορτίου 100KN σε σκέλος με οπή για κοχλία M12.

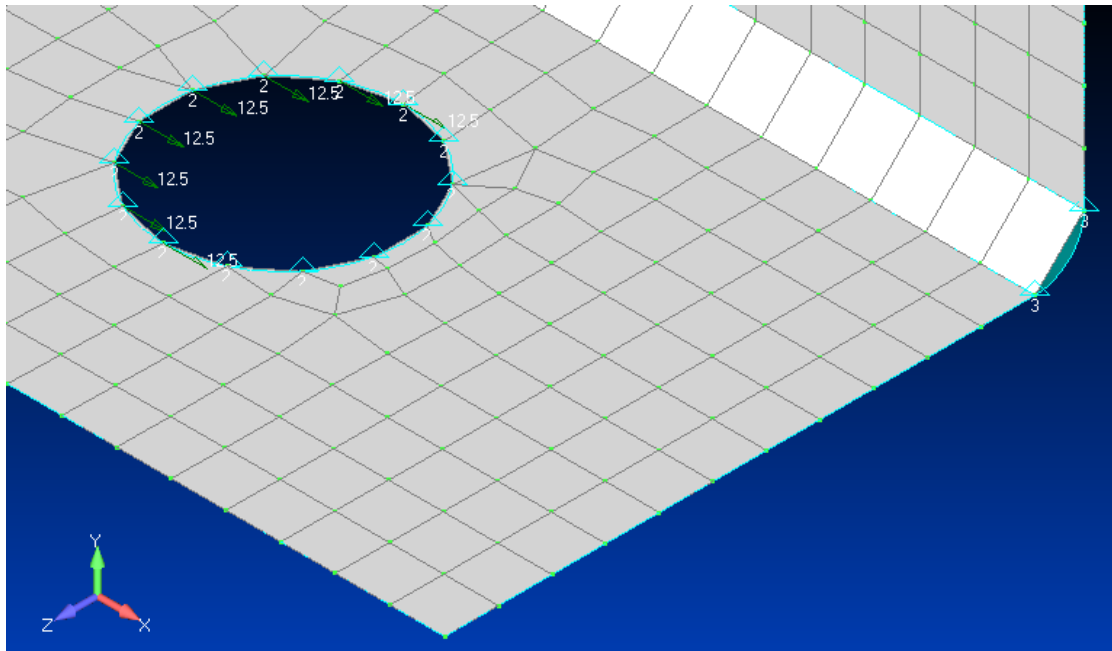




Σχήμα 3. 13: Εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου 100kN σε σκέλος με σπή για κοχλία M12.



Σχήμα 3. 14: Εφαρμογή θλιπτικού φορτίου 100kN σε σκέλος με σπή για κοχλία M20.



Σχήμα 3. 15: Εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου 100KN σε σκέλος με οπή για κοχλία M20.

### 3.7 Ανάλυση

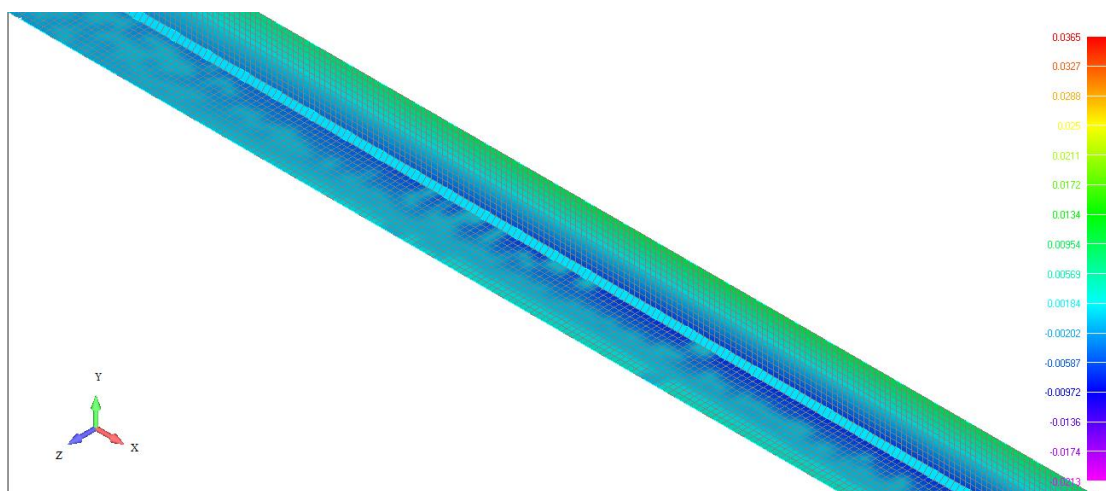
Στην παρούσα διπλωματική εργασία για την περίπτωση εφαρμογής του εφελκυστικού φορτίου έγινε μόνο μη γραμμική ανάλυση (nonlinear analysis) ενώ για την περίπτωση θλιπτικού φορτίου έγινε και γραμμική ανάλυση λυγισμού (buckling analysis) προκειμένου να προσδιοριστεί το κρίσιμο φορτίο λυγισμού που χρειαζόμαστε στους υπολογισμούς σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3.

## 4. Αποτελέσματα αναλύσεων

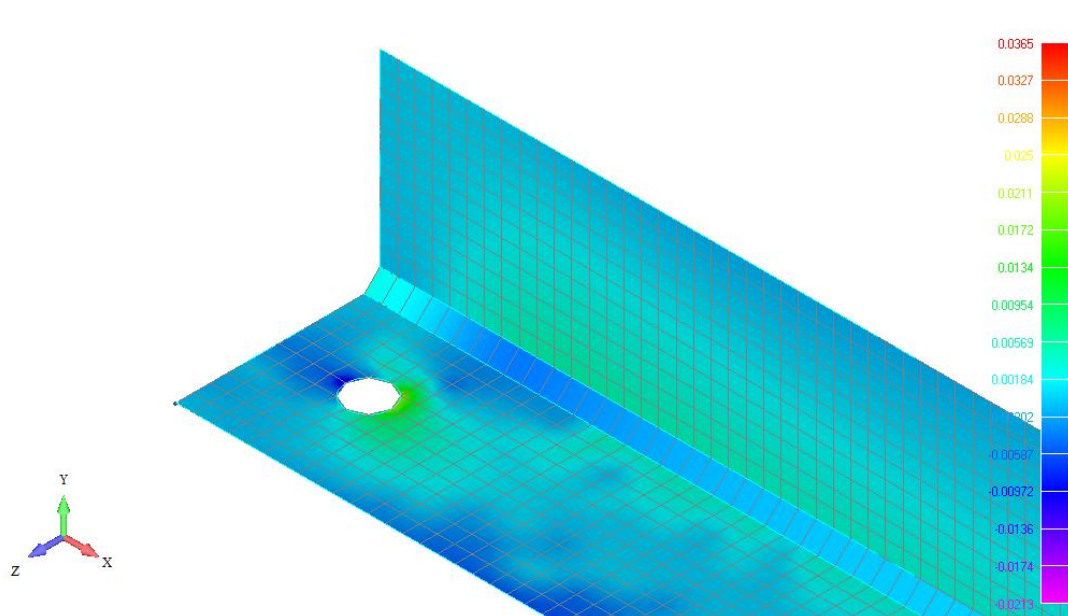
### 4.1 Αποτελέσματα ανάλυσης με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FEMAP

#### 4.1.1 Αποτελέσματα γραμμικής ανάλυσης για θλιπτικό φορτίο

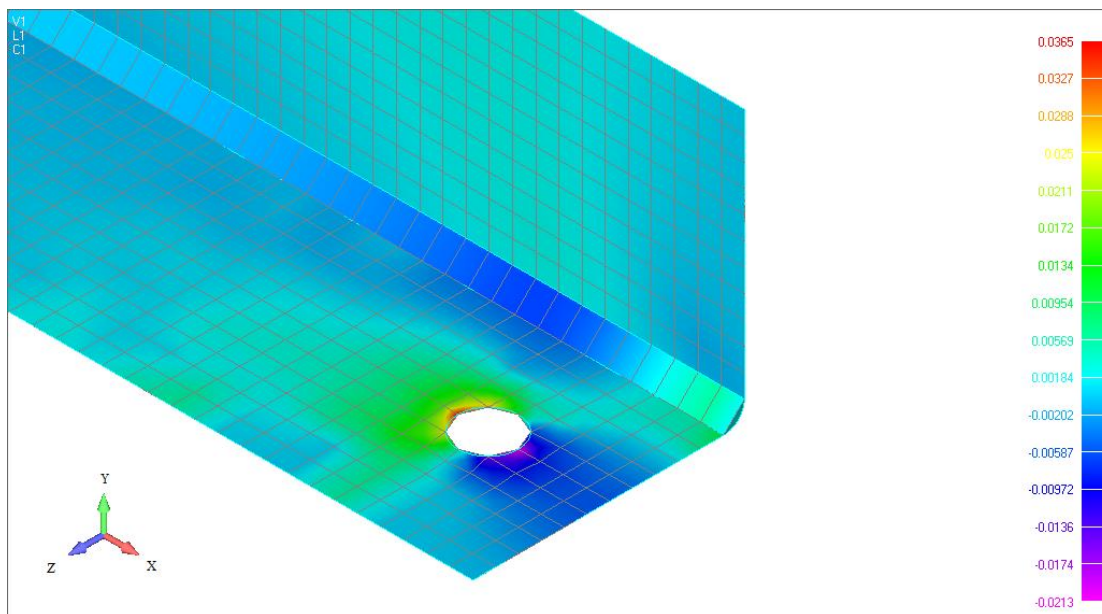
##### 4.1.1.1 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 χωρίς ενισχύσεις



Σχήμα 4. 1 Μεσαίο τμήμα σκέλους

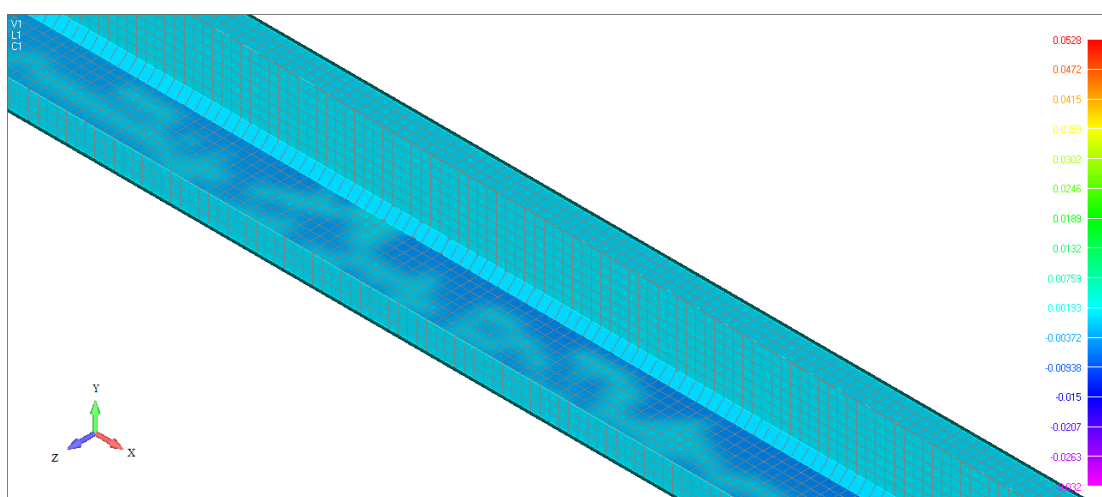


Σχήμα 4. 2 Πακτωμένη οπή σκέλους

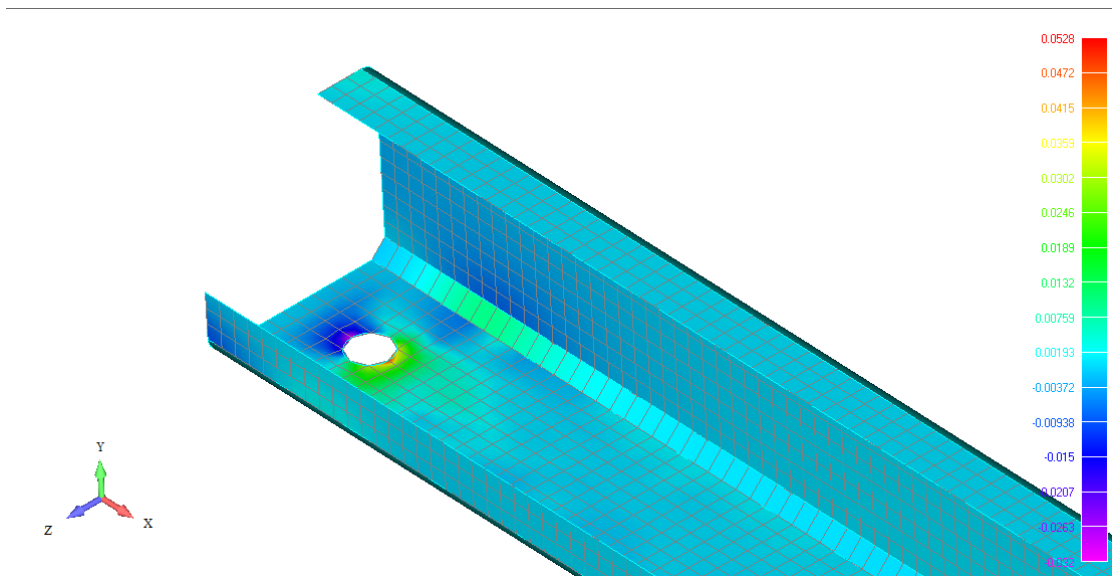


Σχήμα 4. 3 Στήριξη οπής σκέλους κατά τον Y και στρογγυλεμένης γωνίας κατά τον Z

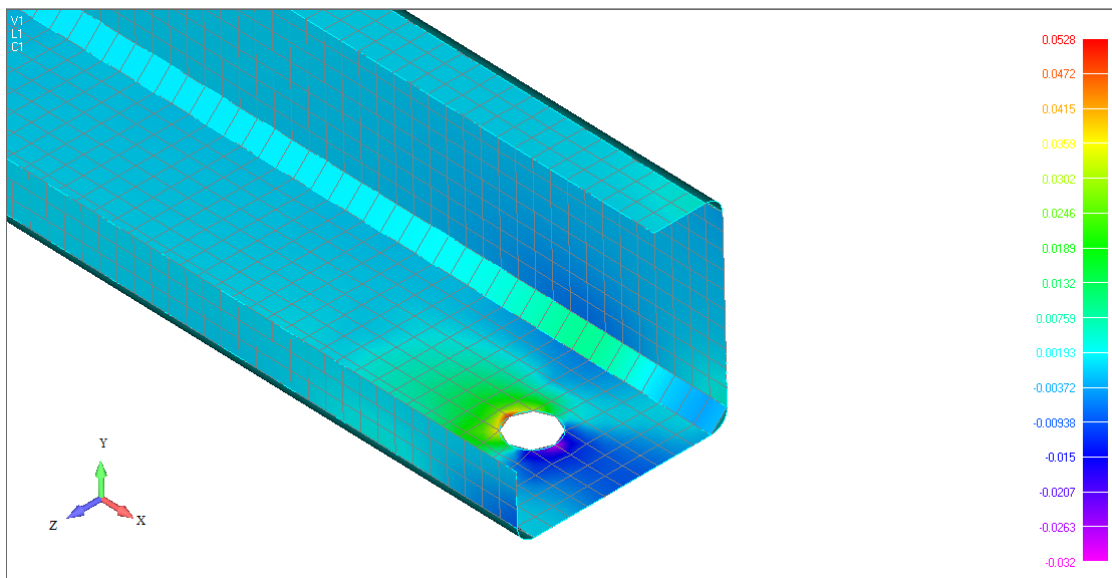
#### 4.1.1.2 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 με ακραίες ενισχύσεις



Σχήμα 4. 4 Μεσαίο τμήμα σκέλους

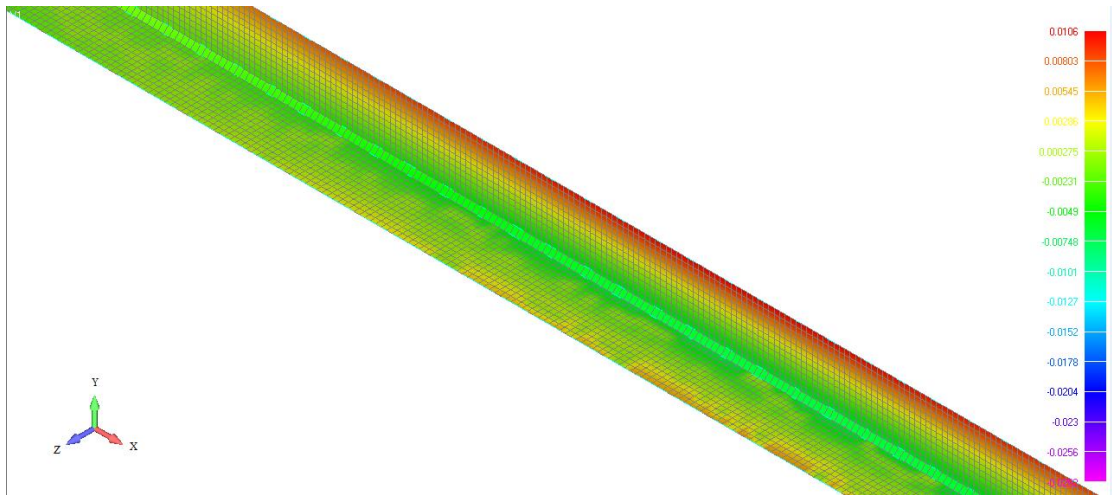


Σχήμα 4. 5 Πακτωμένη οπή σκέλους

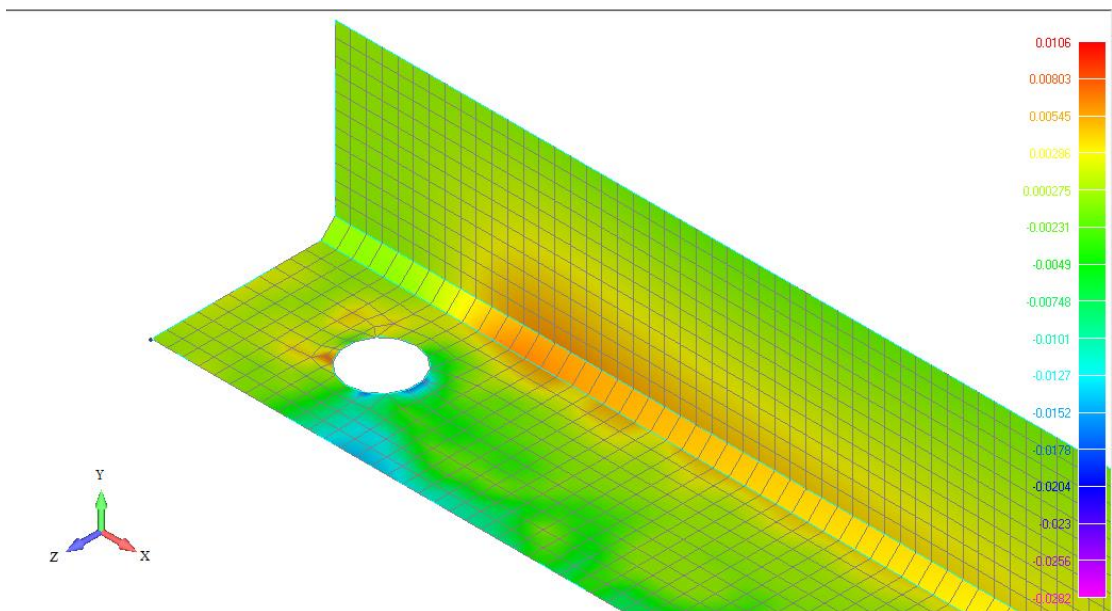


Σχήμα 4. 6 Στήριξη οπής σκέλους κατά τον Y και στρογγυλεμένης γωνίας κατά τον Z

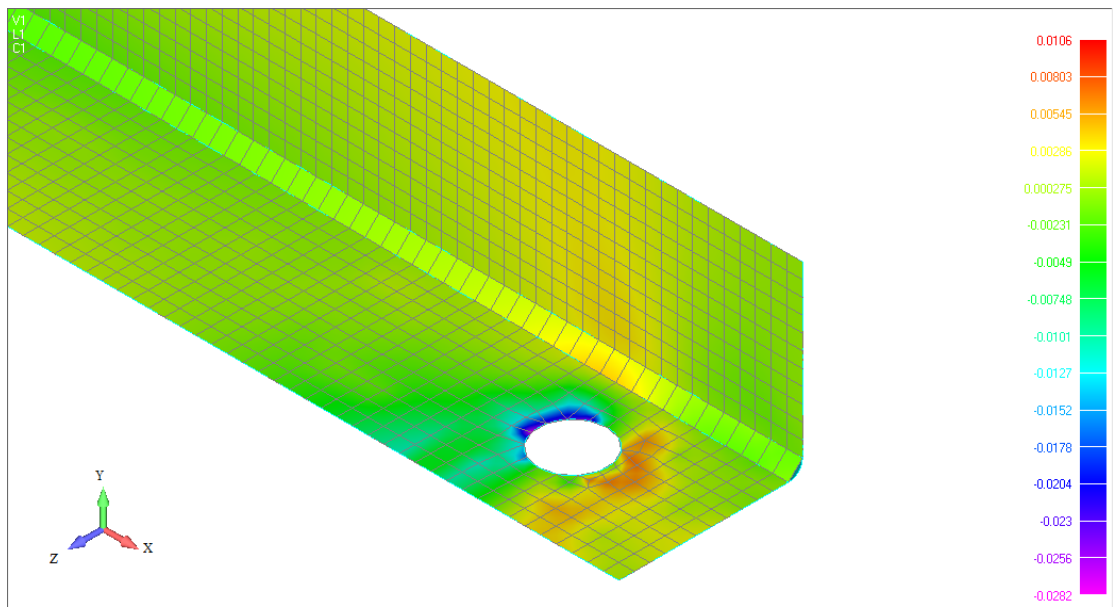
#### 4.1.1.3 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 χωρίς ενισχύσεις



Σχήμα 4. 7 Μεσαίο τμήμα σκέλους

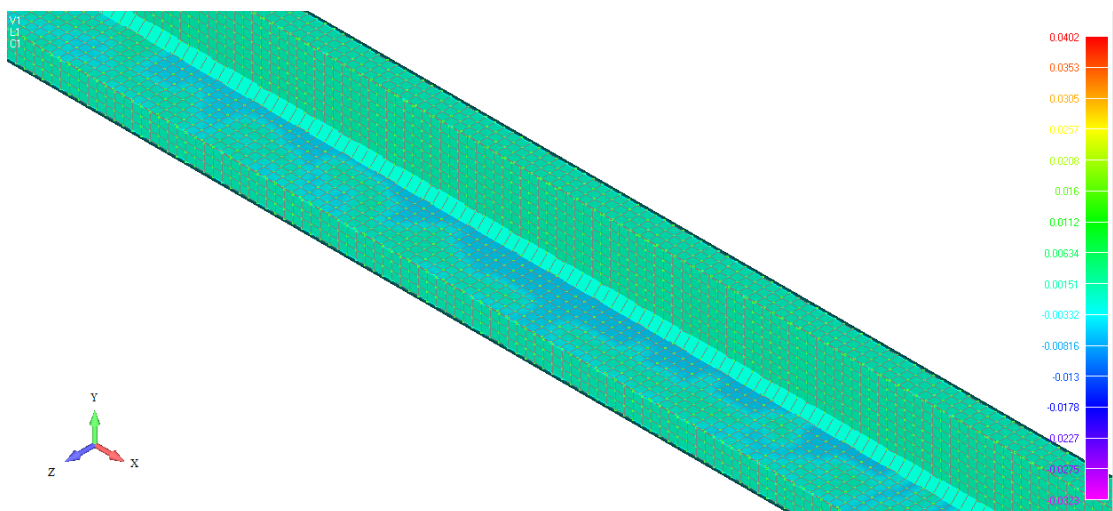


Σχήμα 4. 8 Πακτωμένη οπή σκέλους

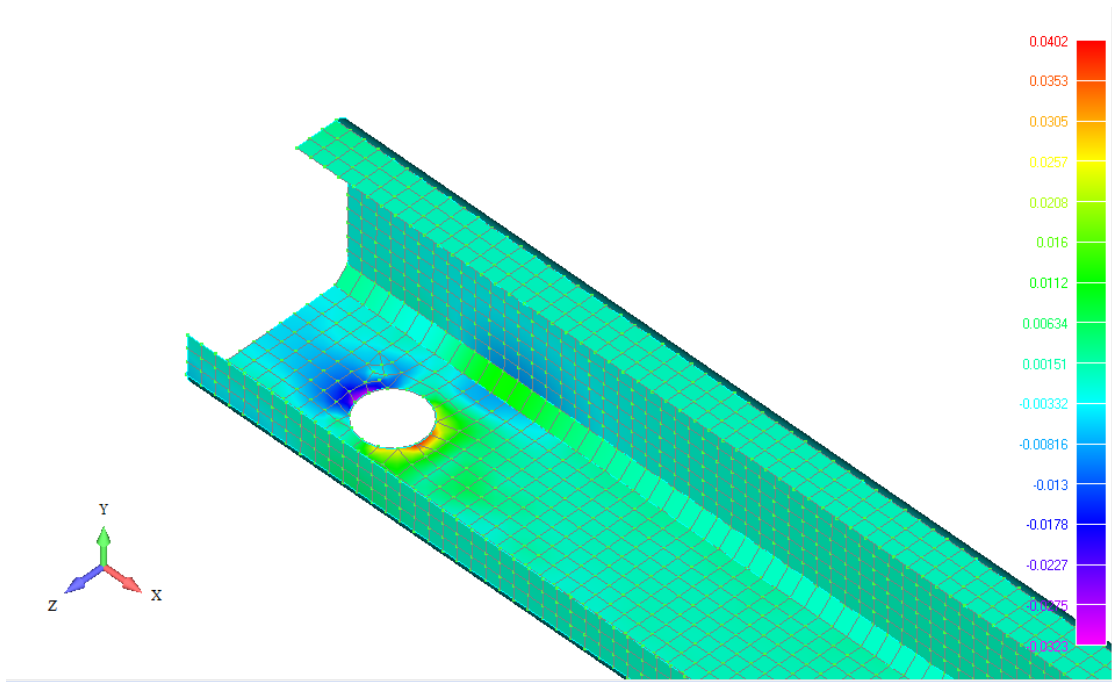


Σχήμα 4. 9 Στήριξη οπής σκέλους κατά τον Y και στρογγυλεμένης γωνίας κατά τον Z

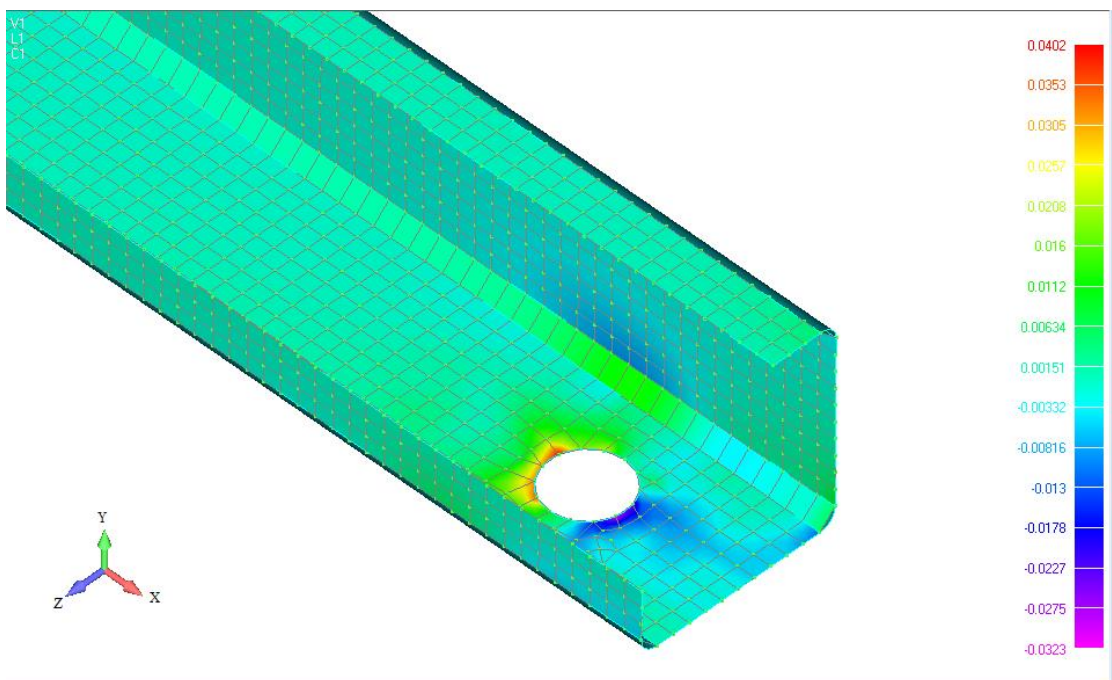
#### 4.1.1.4 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 με ακραίες ενισχύσεις



Σχήμα 4. 10 Μεσαίο τμήμα σκέλους



Σχήμα 4. 11 Πακτωμένη οπή σκέλους



Σχήμα 4. 12 Στήριξη οπής σκέλους κατά τον Y και στρογγυλεμένης γωνίας κατά τον Z



#### 4.1.1.5 Σύγκριση μελών γραμμικής ανάλυσης

Πίνακας 4. 1 Θλιπτική αντοχή FEM με γραμμική ανάλυση λυγισμού

	ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (KN)	
	M12	M20
ΓΩΝΙΑΚΟ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	32,50	35,30
ΓΩΝΙΑΚΟ ΜΕ ΑΚΡΑΙΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	48,40	52,10

*Μοντέλο με κοχλίες M12 χωρίς ακραίες ενισχύσεις ( Σχήμα 4. 1 - Σχήμα 4. 3 )*

Η ένταση εξαπλώνεται σε όλη τη διατομή και τα σημεία μεγαλύτερης καταπόνησης είναι οι δύο οπές, περισσότερο η οπή που εφαρμόζεται το φορτίο παρά η πακτωμένη, και στο μεσαίο τμήμα το άκρο του σκέλους χωρίς οπές όπου παρατηρείται ανισοκατανομή της έντασης αυξανόμενη από την στρογγυλεμένη γωνία μέχρι το άκρο λόγω έκκεντρης εφαρμογής της αξονικής (κάμψη).

*Μοντέλο με κοχλίες M12 με ακραίες ενισχύσεις ( Σχήμα 4. 4 - Σχήμα 4. 6 )*

Η διατομή βελτιώνεται σημαντικά αφού στο μεσαίο τμήμα η ένταση στα σκέλη περιορίζεται, κυρίως στο σκέλος χωρίς οπές όπου η κατανομή της έντασης από την στρογγυλεμένη γωνία έως την ακραία ενίσχυση είναι πιο ομαλή.

*Μοντέλο με κοχλίες M20 χωρίς ακραίες ενισχύσεις ( Σχήμα 4. 7 - Σχήμα 4. 9 )*

Παρατηρείται αύξηση της έντασης στα ελεύθερα άκρα των μελών και περισσότερο στο σκέλος χωρίς οπές.

*Μοντέλο με κοχλίες M20 με ακραίες ενισχύσεις ( Σχήμα 4. 10 - Σχήμα 4. 12 )*

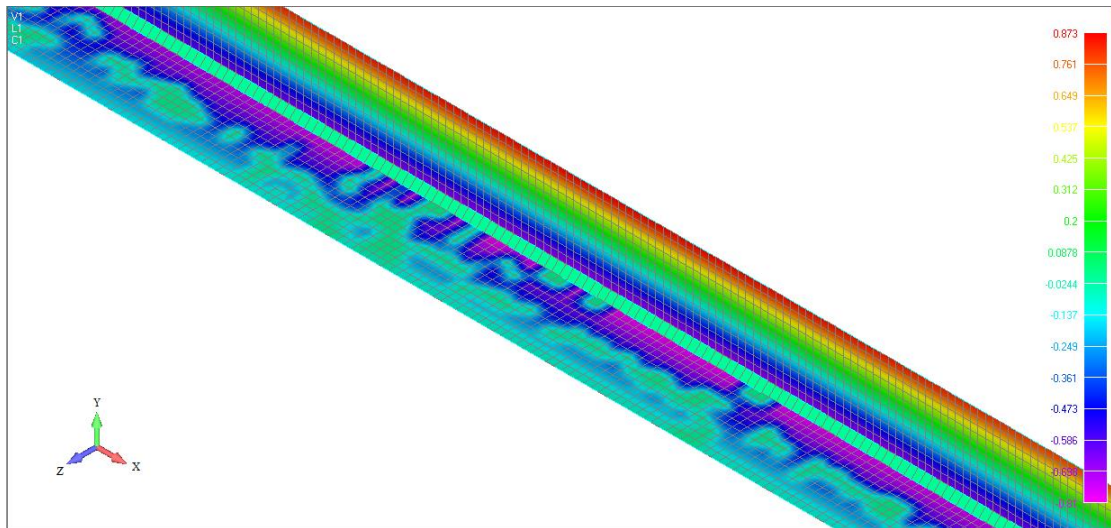
Στο μεσαίο τμήμα η ένταση περιορίζεται όπως και στο μοντέλο με κοχλίες M12 με ακραίες ενισχύσεις είναι ομοιόμορφη για το σκέλος χωρίς οπές. Υπάρχει τοπική ένταση στις οπές καθώς και στα αντίστοιχα τμήματα, που βρίσκονται κοντά στις οπές, των στρογγυλεμένων γωνιών.

Μόνο στο μοντέλο με οπές για κοχλία M12 και χωρίς ακραίες ενισχύσεις, οι στρογγυλεμένες γωνίες που βρίσκονται κοντά στις οπές δεν παρατηρείται αυξημένη ένταση τοπικά.

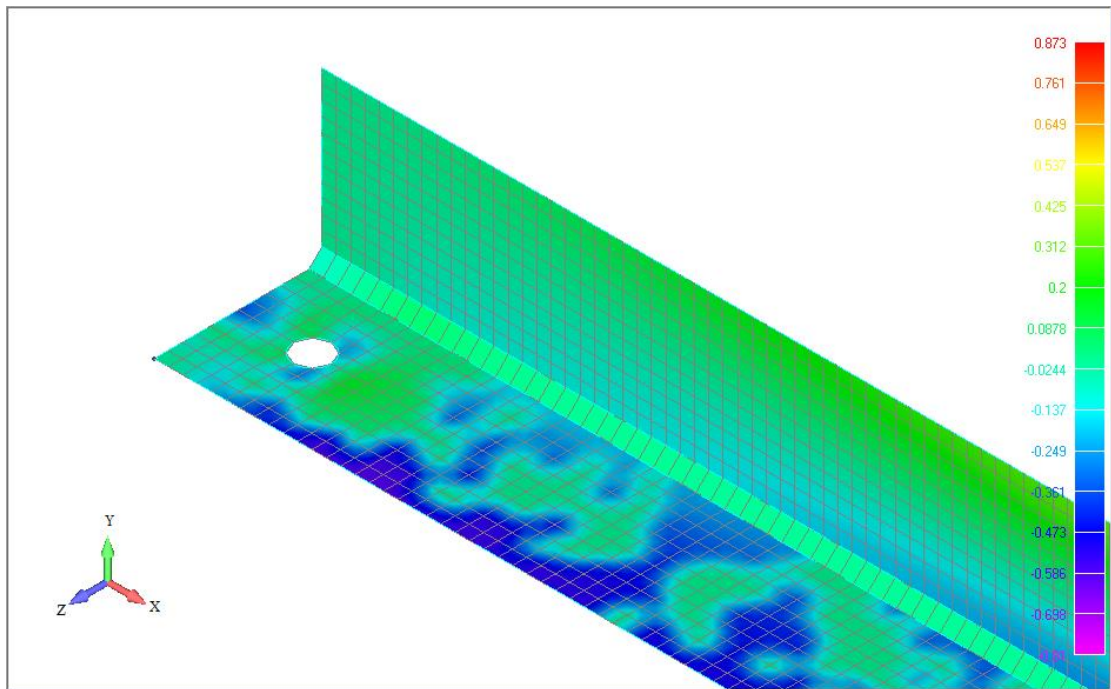
Τέλος όπως φαίνεται στον Πίνακα 4. 1 αυξάνεται η θλιπτική αντοχή της ενισχυμένης διατομής.

## 4.1.2 Αποτελέσματα μη γραμμικής ανάλυσης

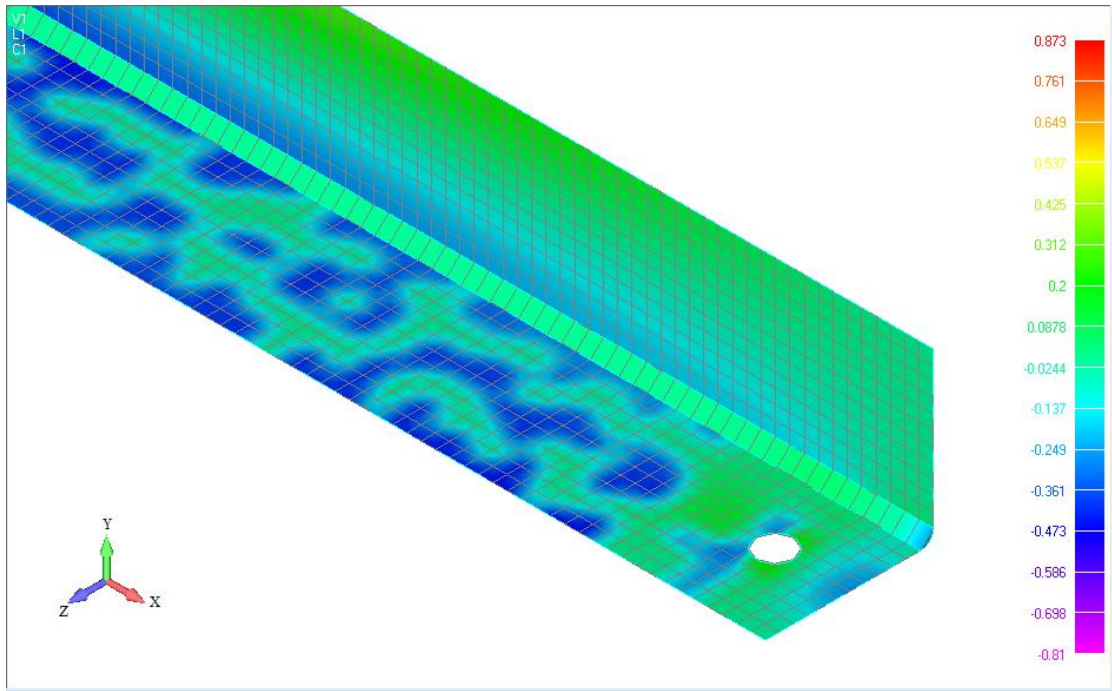
### 4.1.2.1 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 χωρίς ενισχύσεις και εφαρμογή θλιπτικού φορτίου



Σχήμα 4. 13 Μεσαίο τμήμα σκέλους

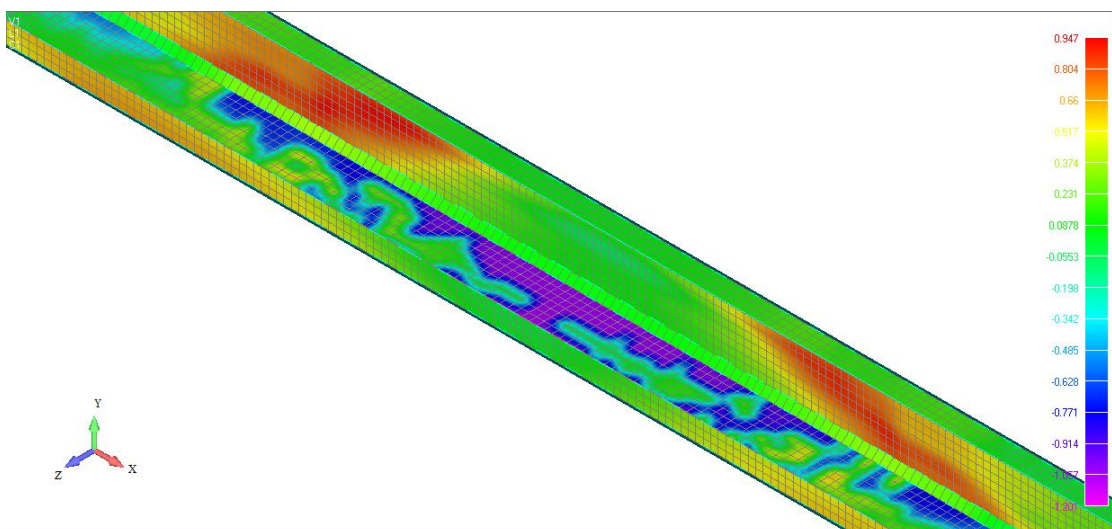


Σχήμα 4. 14 Πακτωμένη σπή σκέλους

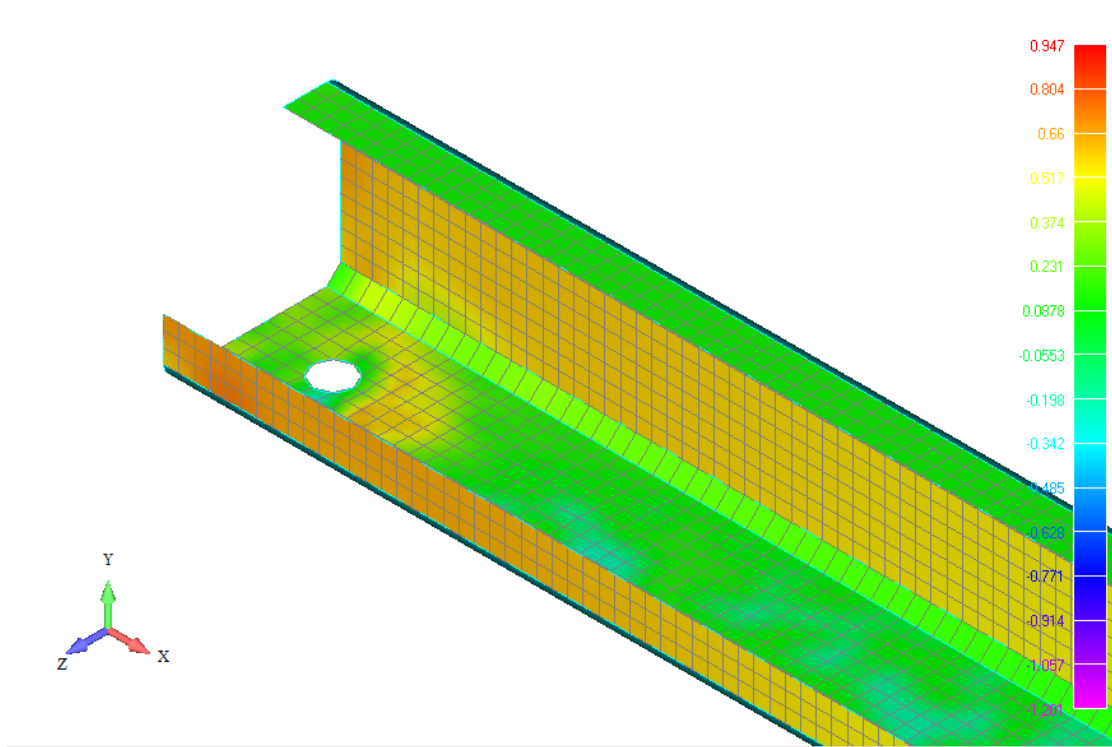


Σχήμα 4. 15 Στήριξη οπής σκέλους κατά τον Y και στρογγυλεμένης γωνίας κατά τον Z

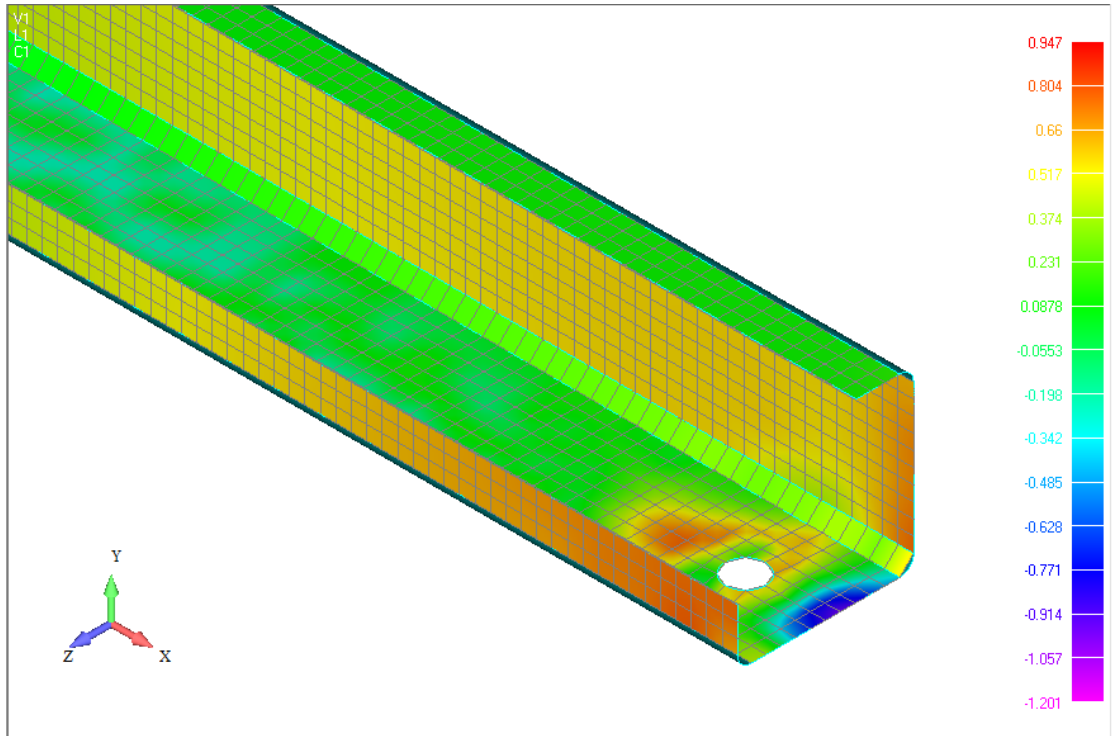
#### 4.1.2.2 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 με ακραίες ενισχύσεις και εφαρμογή θλιπτικού φορτίου



Σχήμα 4. 16 Μεσαίο τμήμα σκέλους

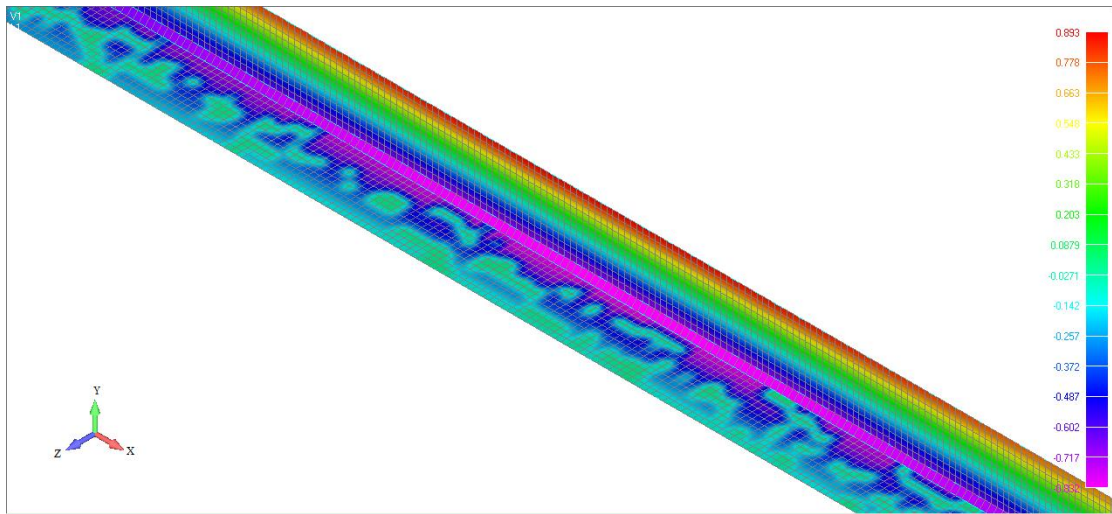


Σχήμα 4. 17 Πακτωμένη οπή σκέλους

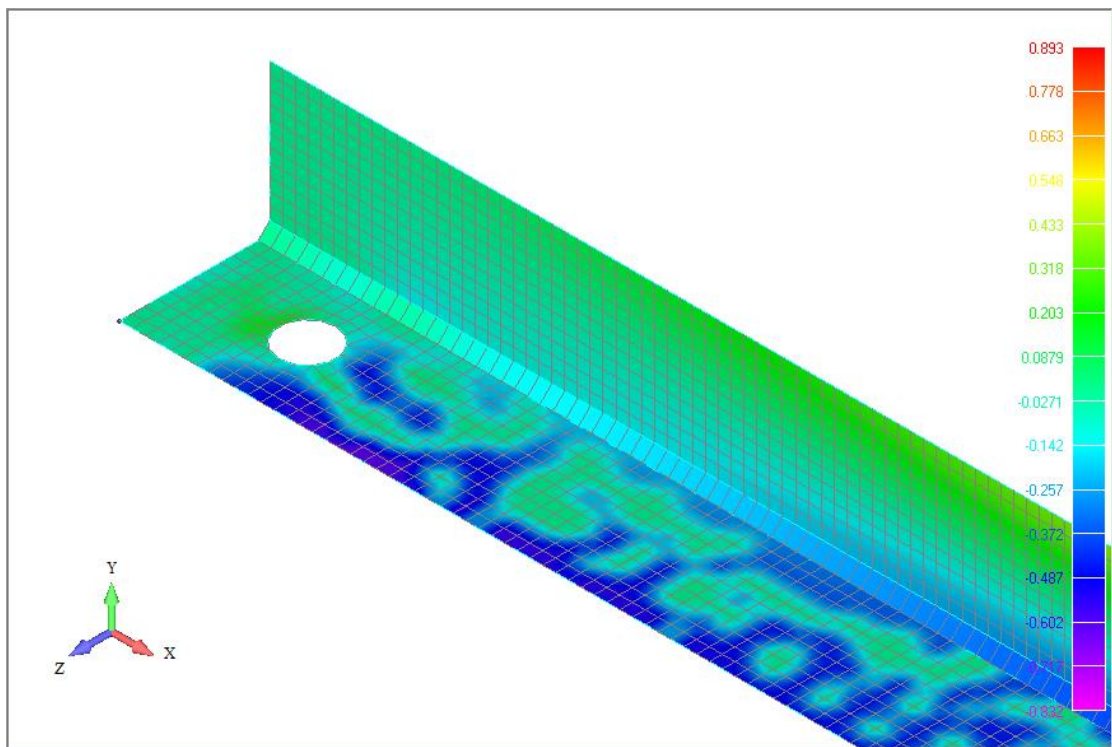


Σχήμα 4. 18 Στήριξη οπής σκέλους κατά τον Y και στρογγυλεμένης γωνίας κατά τον Z

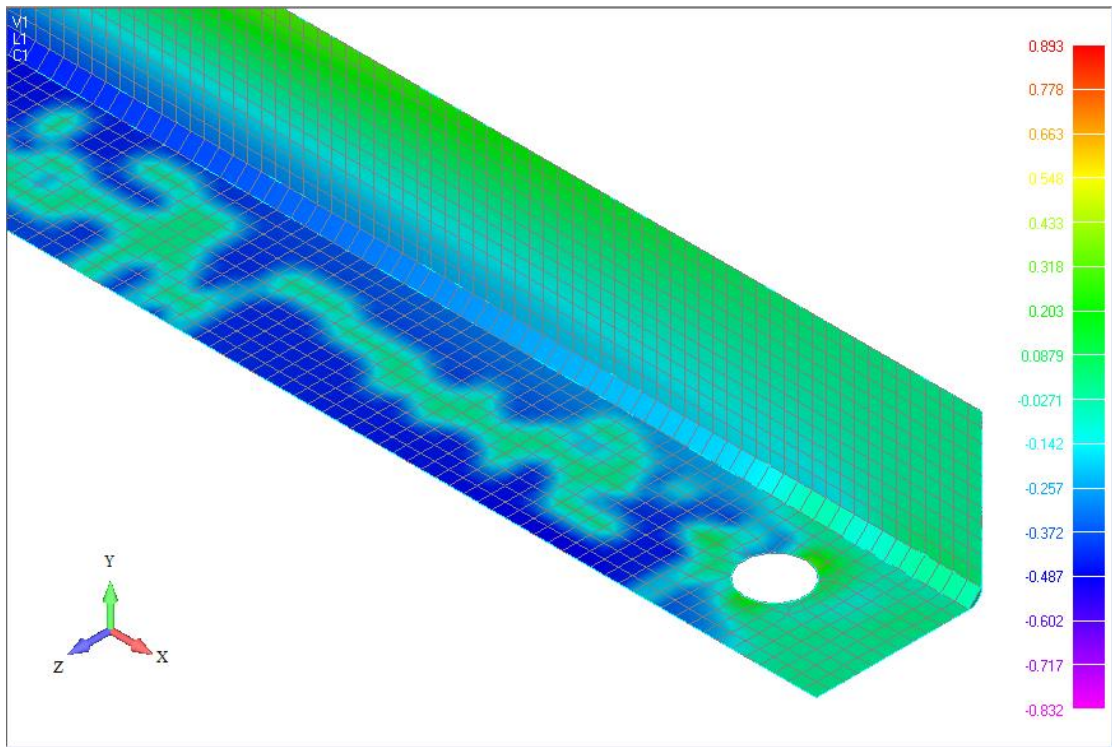
#### 4.1.2.3 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 χωρίς ενισχύσεις και εφαρμογή θλιπτικού φορτίου



Σχήμα 4. 19 Μεσαίο τμήμα σκέλους

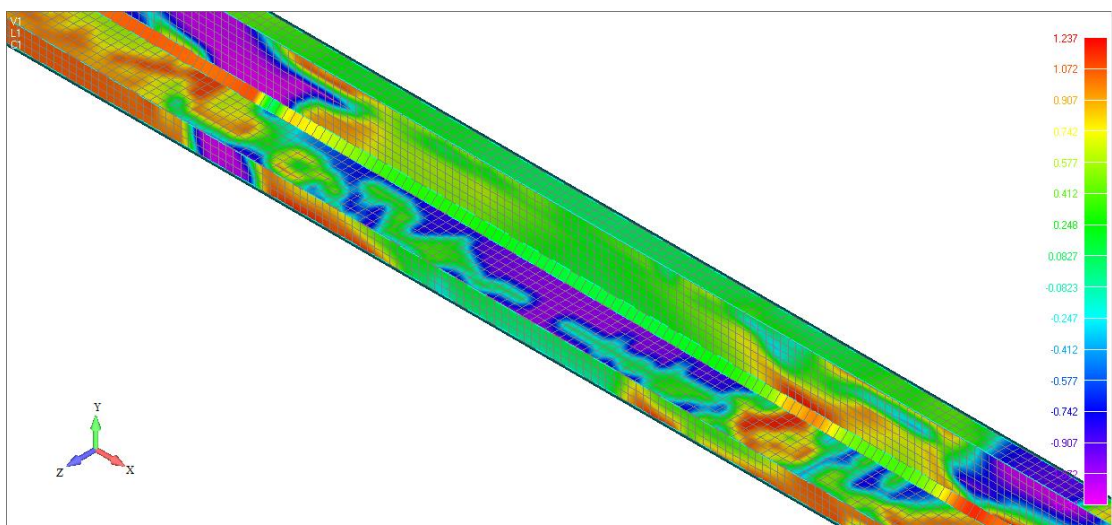


Σχήμα 4. 20 Πακτωμένη οπή σκέλους

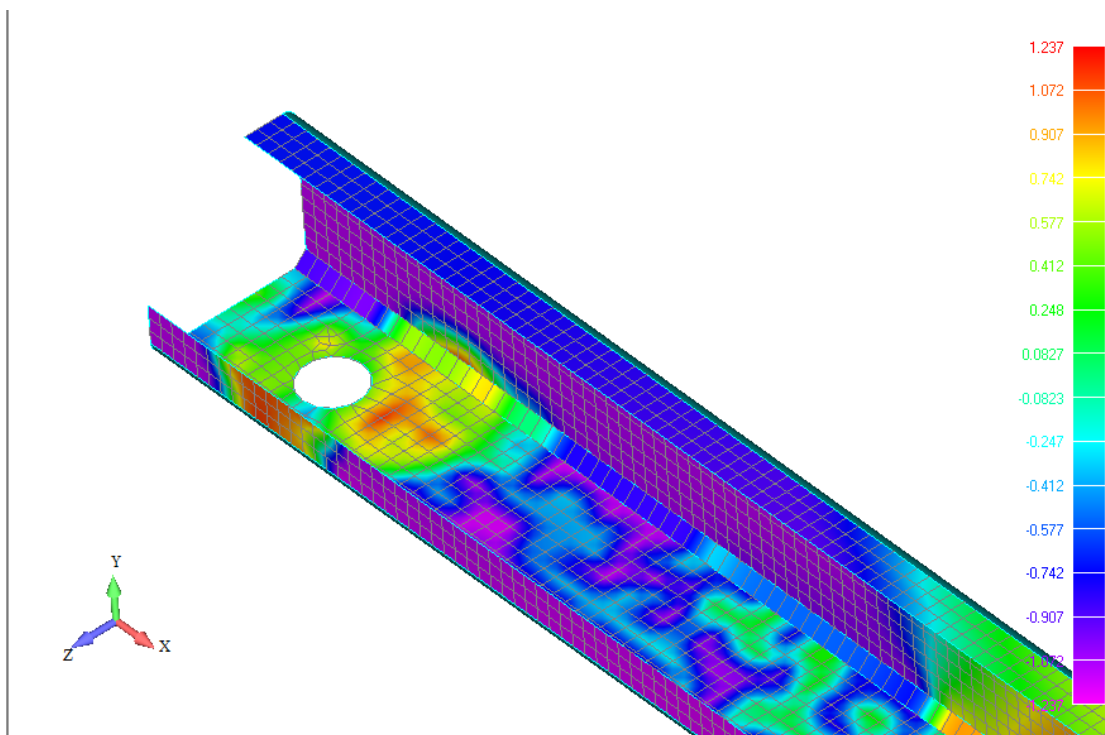


Σχήμα 4. 21 Στήριξη οπής σκέλους κατά τον Y και στρογγυλεμένης γωνίας κατά τον Z

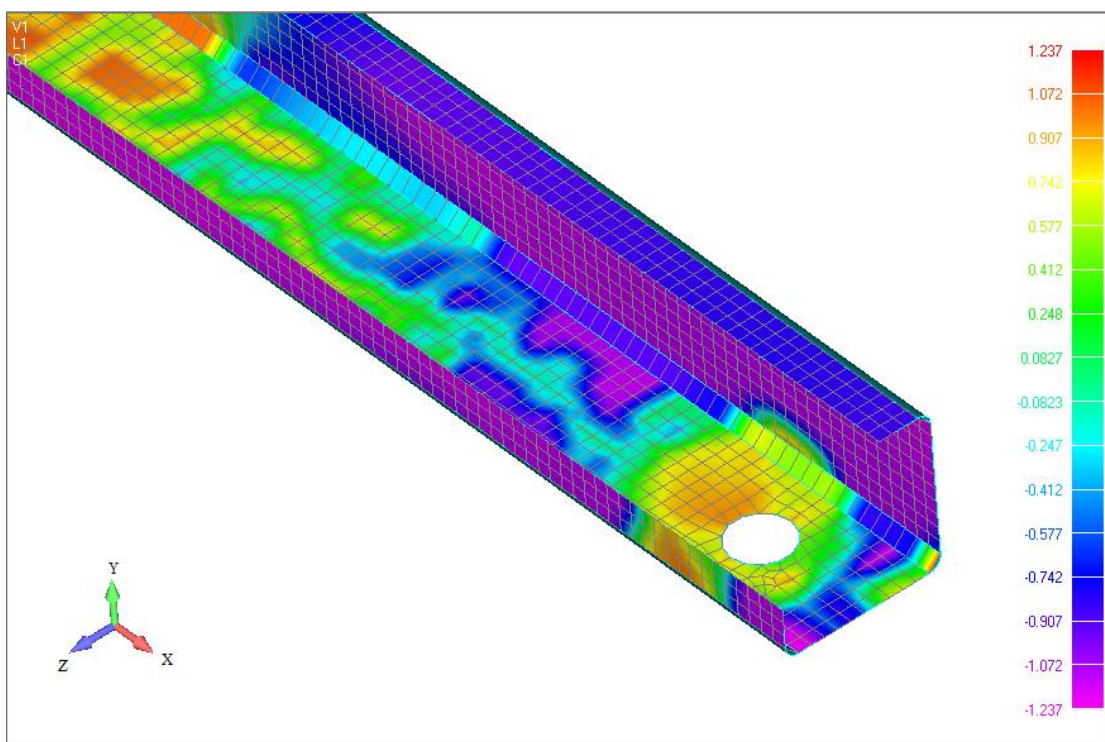
#### 4.1.2.4 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 με ακραίες ενισχύσεις και εφαρμογή θλιπτικού φορτίου



Σχήμα 4. 22 Μεσαίο τμήμα σκέλους



Σχήμα 4. 23 Πακτωμένη οπή σκέλους



Σχήμα 4. 24 Στήριξη οπής σκέλους κατά τον Y και στρογγυλεμένης γωνίας κατά τον Z

#### 4.1.2.5 Σύγκριση μελών μη γραμμικής ανάλυσης για εφαρμογή θλιπτικού φορτίου

Πίνακας 4. 2 Θλιπτική αντοχή FEM με μη γραμμική ανάλυση

	ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (KN)	
	M12	M20
ΓΩΝΙΑΚΟ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	23,75	25,00
ΓΩΝΙΑΚΟ ΜΕ ΑΚΡΑΙΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	35,00	36,90

*Μοντέλο με κοχλίες M12 χωρίς ακραίες ενισχύσεις ( Σχήμα 4. 13 - Σχήμα 4. 15 )*

Στο μεσαίο τμήμα στο άκρο του σκέλους χωρίς οπές παρατηρείται ανισοκατανομή της έντασης αυξανόμενη από την στρογγυλεμένη γωνία μέχρι το άκρο λόγω έκκεντρης εφαρμογής της αξονικής (κάμψη). Περιμετρικά των οπών, τοπικά υπάρχει μεγαλύτερη ένταση απ' ότι στο υπόλοιπο σκέλος.

*Μοντέλο με κοχλίες M12 με ακραίες ενισχύσεις ( Σχήμα 4. 16 - Σχήμα 4. 18 )*

Στο μεσαίο τμήμα στο σκέλος χωρίς οπές με ενίσχυση στο άκρο η ένταση γίνεται κατά τόπους έντονη. Ακόμη αυξάνεται η ένταση στην περιοχή γύρω από τις οπές .

*Μοντέλο με κοχλίες M20 χωρίς ακραίες ενισχύσεις ( Σχήμα 4. 19 - Σχήμα 4. 21 )*

Παρατηρούνται τα ίδια με το αντίστοιχο μοντέλο με οπές για κοχλία M12.

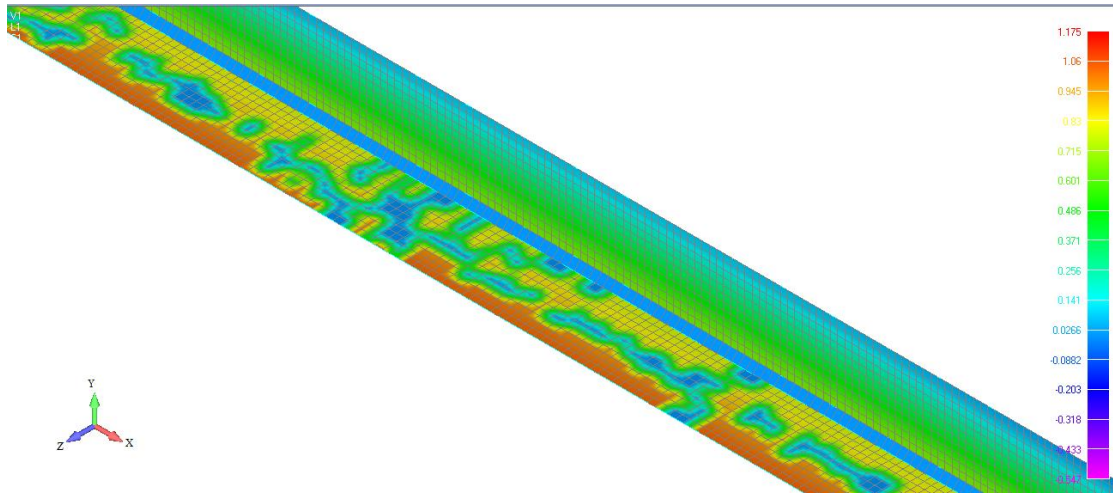
*Μοντέλο με κοχλίες M20 με ακραίες ενισχύσεις ( Σχήμα 4. 22 - Σχήμα 4. 24 )*

Παρατηρούνται τα ίδια με το αντίστοιχο μοντέλο με οπές για κοχλία M12.

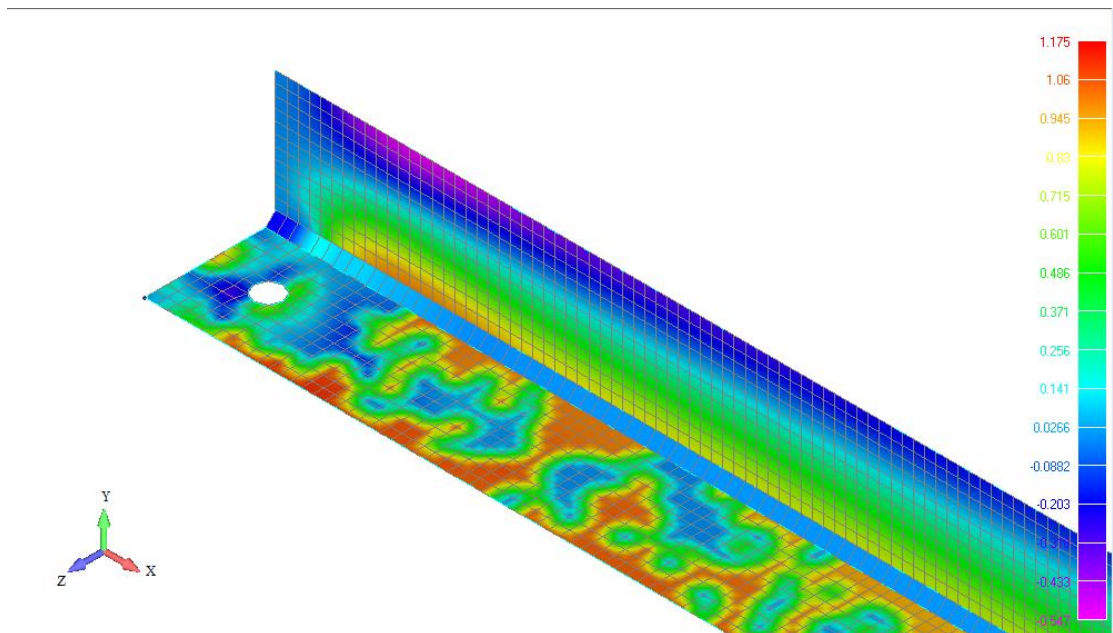
Τέλος όπως φαίνεται στον Πίνακας 4. 2 αυξάνεται η θλιπτική αντοχή της ενισχυμένης διατομής. Οι τιμές διαφέρουν με αυτές του Πίνακας 4. 1 καθώς τα μοντέλα δεν είναι ιδεατά αλλά στις ιδιότητες του υλικού εισέρχεται η μη γραμμική συμπεριφορά.



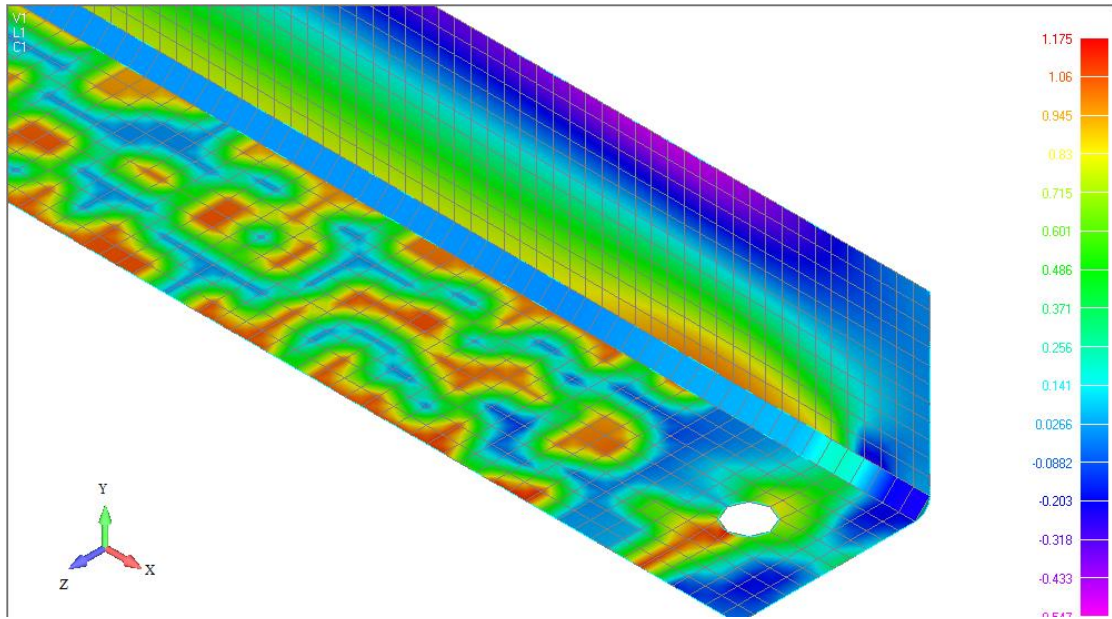
#### 4.1.2.6 Διατομή ΚΛ με οπές για κοχλία M12 χωρίς ενισχύσεις και εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου



Σχήμα 4. 25 Μεσαίο τμήμα σκέλους

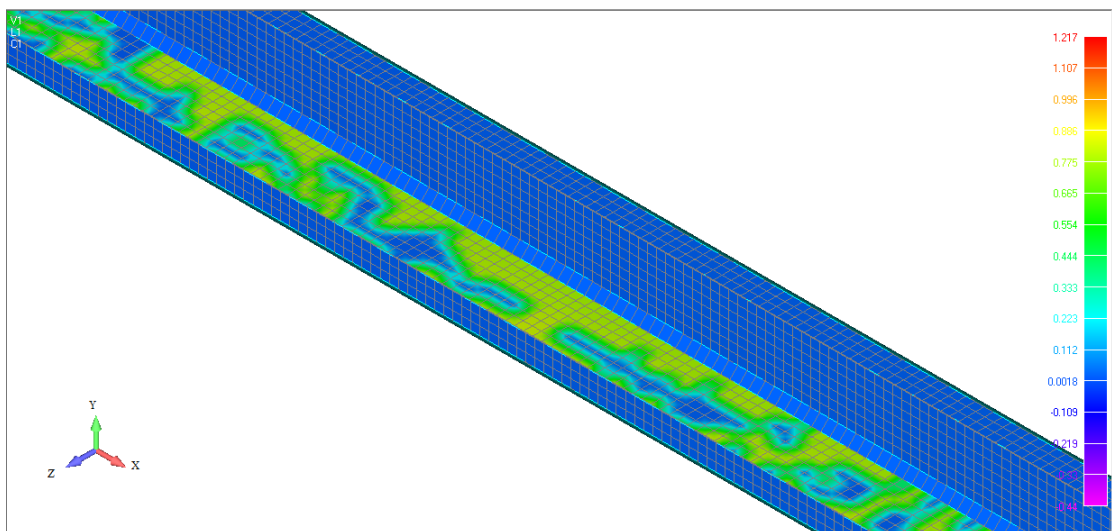


Σχήμα 4. 26 Πακτωμένη οπή σκέλους

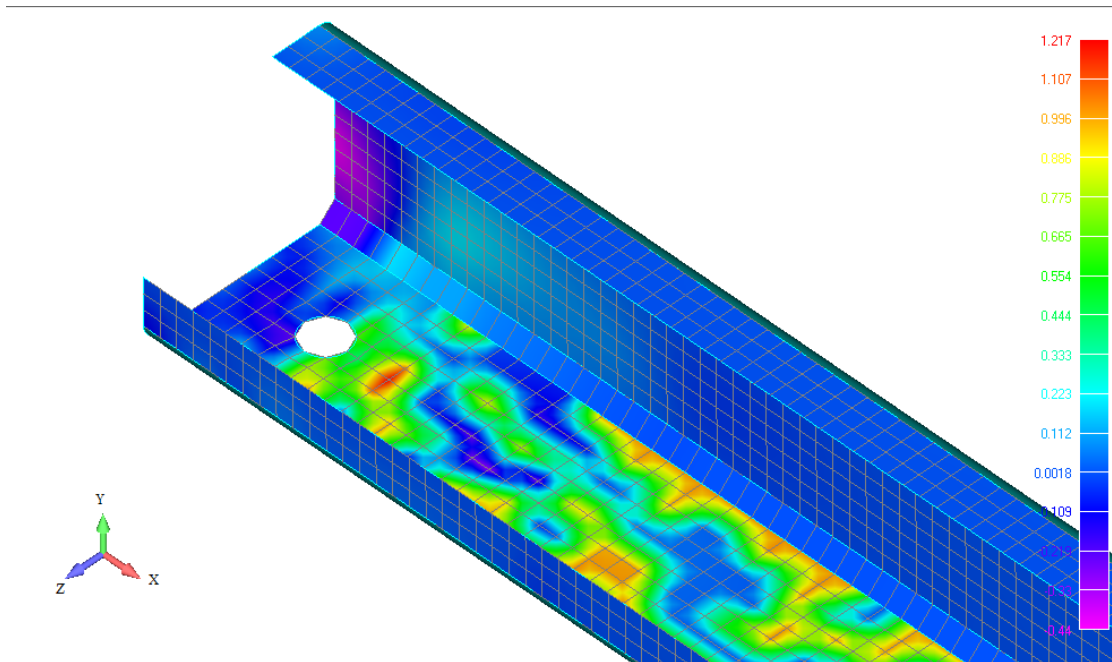


Σχήμα 4. 27 Στήριξη οπής σκέλους κατά τον Y και στρογγυλεμένης γωνίας κατά τον Z

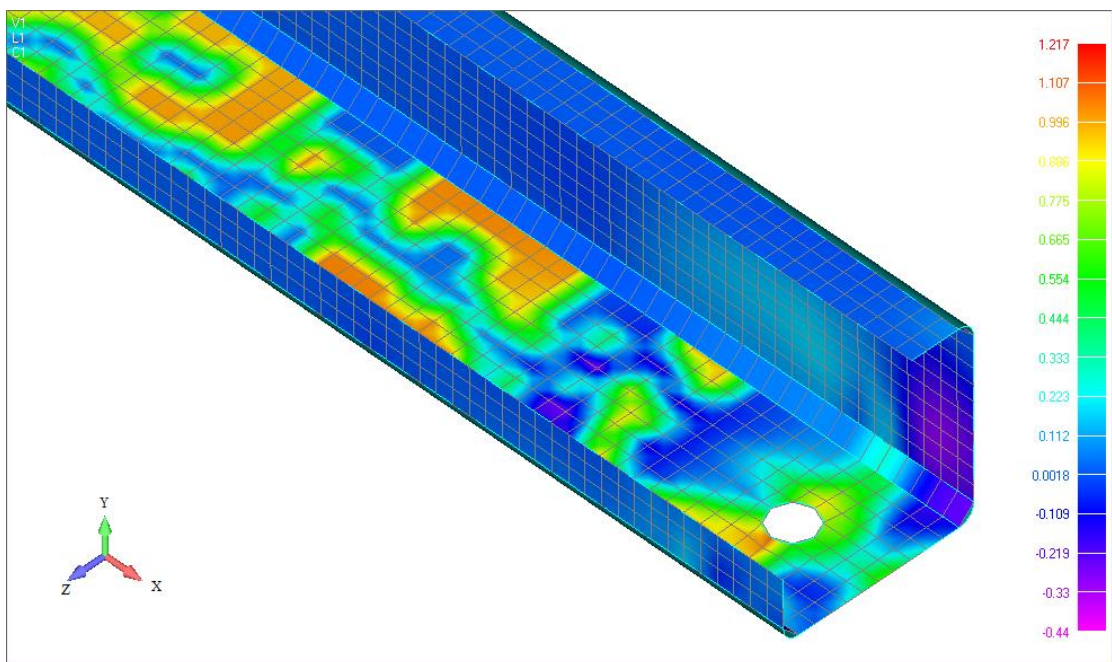
#### 4.1.2.7 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 με ακραίες ενισχύσεις και εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου



Σχήμα 4. 28 Μεσαίο τμήμα σκέλους

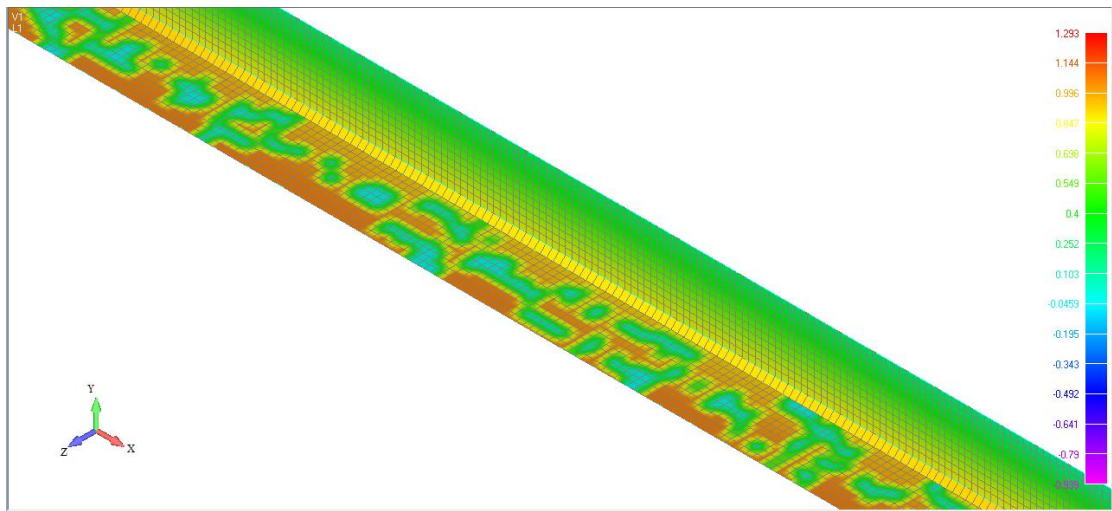


Σχήμα 4. 29 Πακτωμένη οπή σκέλους

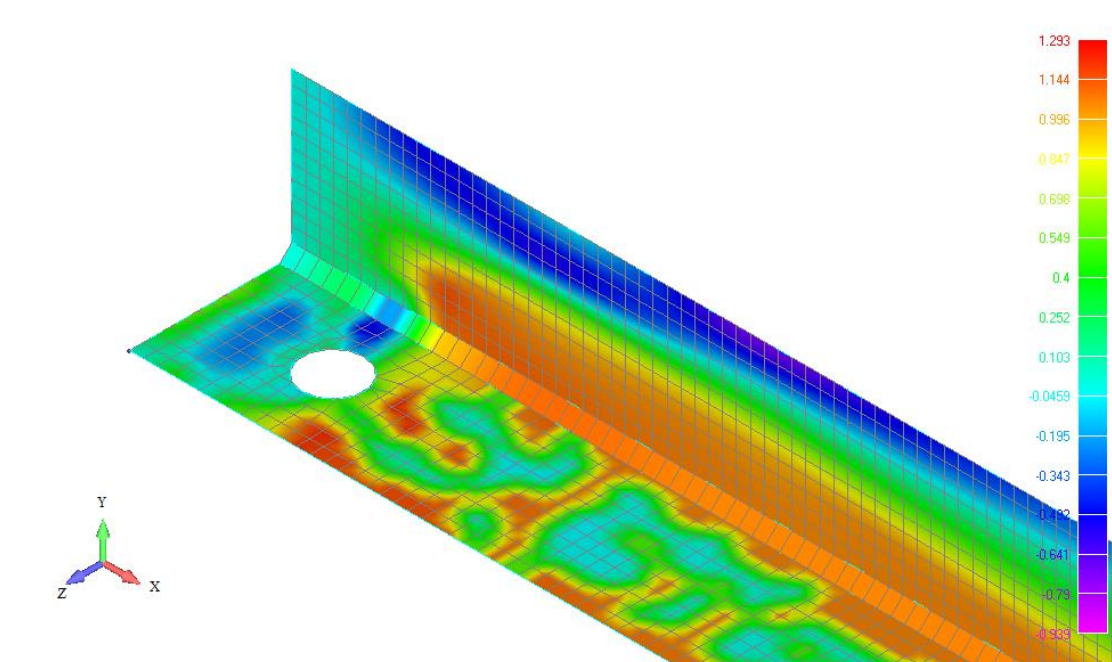


Σχήμα 4. 30 Στήριξη οπής σκέλους κατά τον Y και στρογγυλεμένες γωνίας κατά τον Z

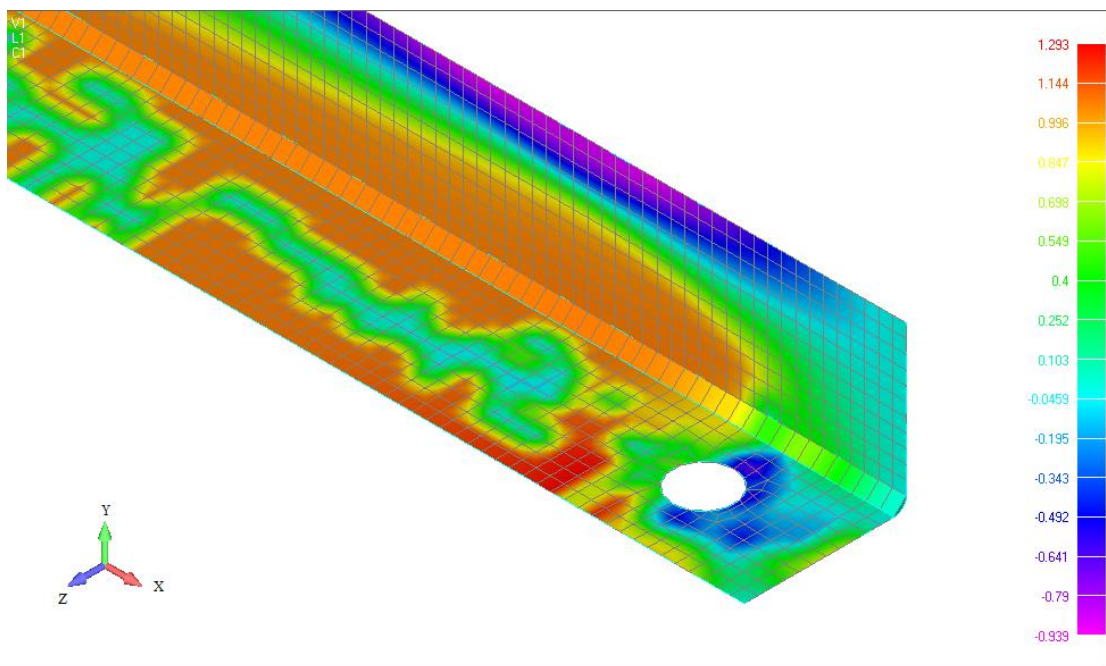
#### 4.1.2.8 Διατομή ΚΛ με οπές για κοχλία Μ20 χωρίς ενισχύσεις και εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου



Σχήμα 4. 31 Μεσαίο τμήμα σκέλους

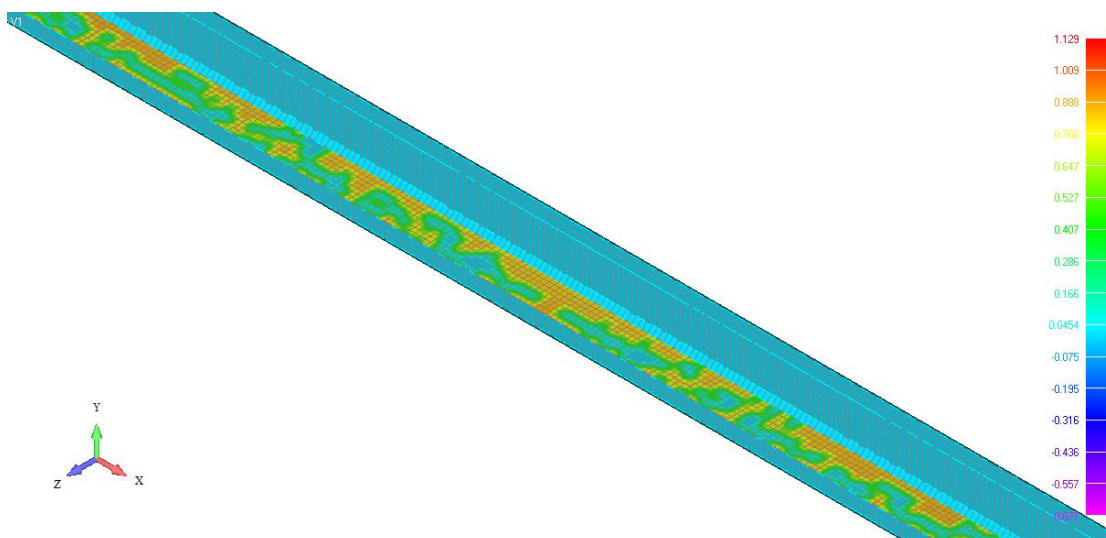


Σχήμα 4. 32 Πακτωμένη οπή σκέλους

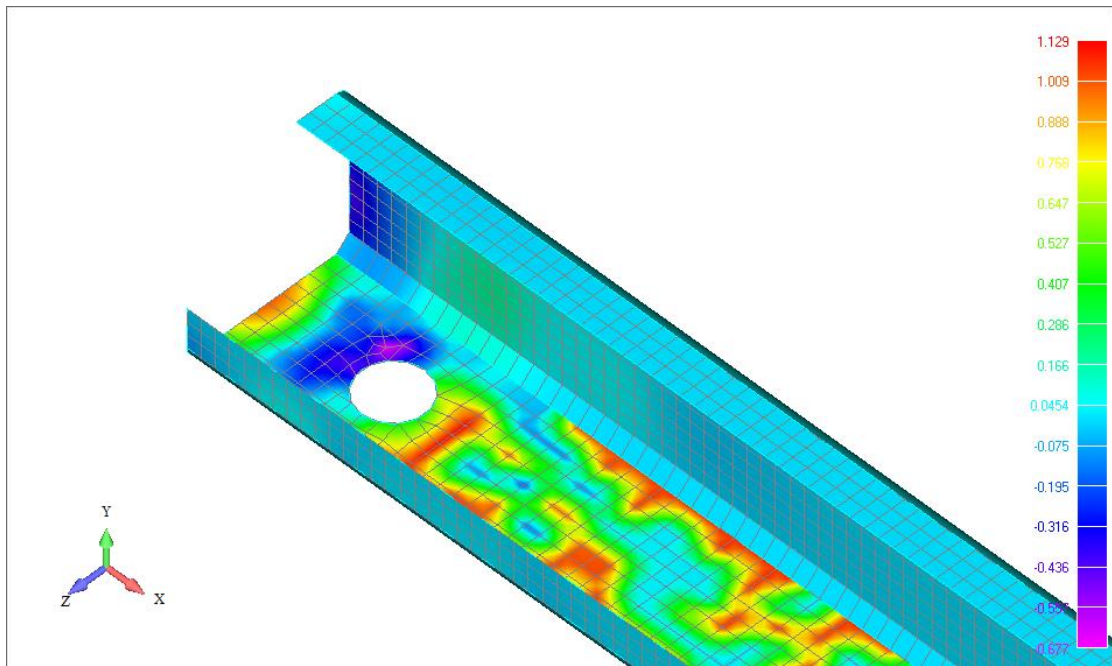


Σχήμα 4. 33 Στήριξη οπής σκέλους κατά τον Y και στρογγυλεμένης γωνίας κατά τον Z

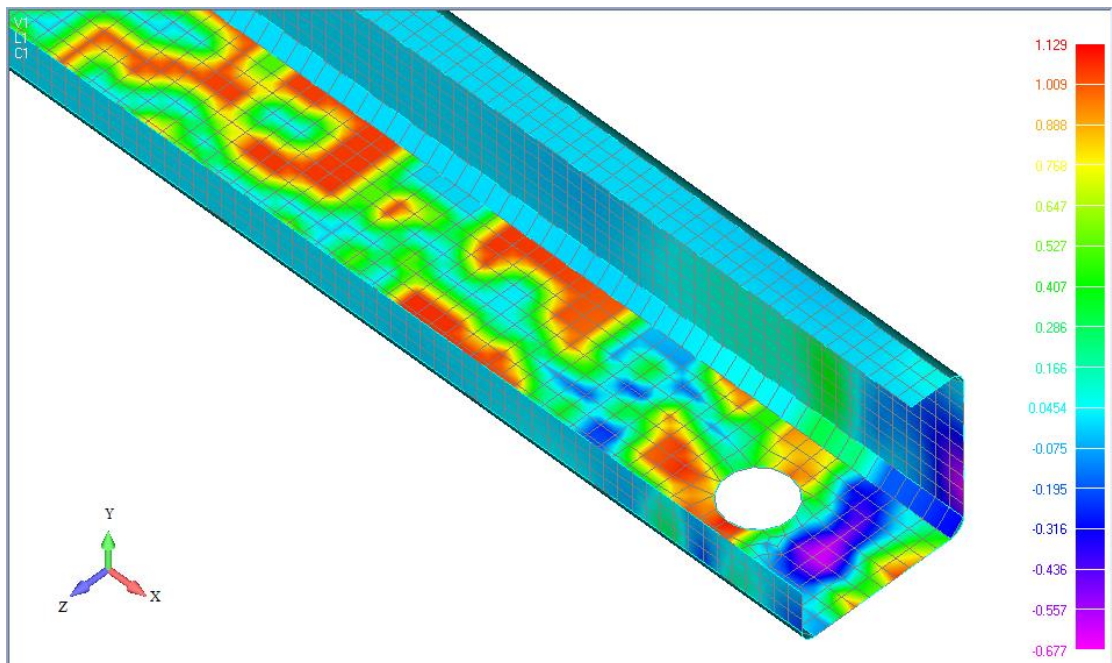
#### 4.1.2.9 Διατομή KL με οπές για κοχλία M20 με ακραίες ενισχύσεις και εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου



Σχήμα 4. 34 Μεσαίο τμήμα σκέλους



Σχήμα 4. 35 Πακτωμένη οπή σκέλους



Σχήμα 4. 36 Στήριξη οπής σκέλους κατά τον Y και στρογγυλεμένης γωνίας κατά τον Z

#### 4.1.2.10 Σύγκριση μελών μη γραμμικής ανάλυσης για εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου

Πίνακας 4. 3 Εφελκυστική αντοχή FEM με μη γραμμική ανάλυση

	ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (KN)	
	M12	M20
ΓΩΝΙΑΚΟ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	73,75	89,10
ΓΩΝΙΑΚΟ ΜΕ ΑΚΡΑΙΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	80,60	84,70

*Μοντέλο με κοχλίες M12 χωρίς ακραίες ενισχύσεις ( Σχήμα 4. 25 - Σχήμα 4. 27 )*

Το ελεύθερο άκρο του σκέλους με τις οπές εφελκύεται περισσότερο, ενώ στο άλλο σκέλος η ένταση είναι μεγαλύτερη κοντά στην στρογγυλεμένη γωνία.

*Μοντέλο με κοχλίες M12 με ακραίες ενισχύσεις ( Σχήμα 4. 28 - Σχήμα 4. 30 )*

Στο σκέλος χωρίς οπές η κατανομή της έντασης από την στρογγυλεμένη γωνία έως την ακραία ενίσχυση είναι πιο ομαλή. Η ένταση στις οπές είναι παρόμοια με το μοντέλο χωρίς ακραίες ενισχύσεις αλλά αυξημένη.

*Μοντέλο με κοχλίες M20 χωρίς ακραίες ενισχύσεις ( Σχήμα 4. 31 - Σχήμα 4. 33 )*

Στο μεσαίο τμήμα η ένταση είναι μεγαλύτερη απ' αυτή του αντίστοιχου μοντέλου με οπές για κοχλία M12.

*Μοντέλο με κοχλίες M20 με ακραίες ενισχύσεις ( Σχήμα 4. 34 - Σχήμα 4. 36 )*

Όμοια με το αντίστοιχο μοντέλο με οπές για κοχλία M12 αλλά αυξημένα.

Τέλος όπως φαίνεται στον Πίνακας 4. 3 η εφελκυστική αντοχή του γωνιακού με ενισχύσεις δεν αυξάνεται πολύ συγκριτικά με αυτήν του γωνιακού χωρίς ενισχύσεις. Ακόμη παρατηρείται ότι το γωνιακό με οπές για κοχλία M20 έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή από το αντίστοιχο ενισχυμένο γωνιακό.

## 4.2 Αποτελέσματα ανάλυσης με τον Ευρωκώδικα 3

### 4.2.1 Θλιπτική αντοχή

Βάσει των διατάξεων που ορίζει ο Ευρωκώδικας 3 θα υπολογιστεί η αξονική δύναμη αντοχής σε θλίψη ( $N_{Rd}$ ) των διατομών που εξετάζονται. Στην παρούσα μελέτη αναλύθηκε η διατομή, χωρίς ενισχύσεις και με ακραίες κάθετες ενισχύσεις, με οπές για κοχλίες M12 και M20 στο ένα σκέλος. Η διαδικασία παρατίθεται παρακάτω για τις τέσσερις διατομές αρχικά χωρίς ακραίες κάθετες ενισχύσεις στα πέλματα. Η μορφή καθώς και οι γεωμετρικές διαστάσεις των εξεταζόμενων διατομών δίνονται παρακάτω στον Πίνακα 4. 4 και τα Σχήμα 4. 37 , Σχήμα 4. 38 . Κάθε φορέας έχει μήκος  $l=2000\text{mm}$ . Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρατίθενται αναλυτικά στο τέλος του κεφαλαίου.

Σύμφωνα με τα όσα αναλύθηκαν στο 2ο κεφάλαιο η πορεία υπολογισμού είναι η ακόλουθη για την διατομή χωρίς ακραίες ενισχύσεις:

1. Κατάταξη διατομής ( Πίνακας 2. 4 )
2. Χρησιμοποιώντας την πλήρη διατομή του επίπεδου σκέλους, προσδιορίζονται οι τάσεις των άκρων  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$ .
3. Από την τιμή του λόγου  $\psi = \sigma_2/\sigma_1$  και τους πίνακες: Πίνακας 2. 5 ή Πίνακας 2. 6 βρίσκεται ο συντελεστής  $K_{\sigma}$ .
4. Από τον τύπο (2.7) υπολογίζεται το  $\bar{\lambda}_p$
5. Από τους 2. 9 - 2. 12 βρίσκεται ο συντελεστής  $\rho$  και άρα το  $b_{eff}$ .
6. Υπολογίζεται ο μειωτικός συντελεστής  $\chi$  (2. 29)
7. Υπολογίζεται η θλιπτική αντοχή  $N_{Rd}$  (2. 30)

Η πορεία υπολογισμού είναι ίδια με την παραπάνω για την διατομή με κάθετες ακραίες ενισχύσεις με την διαφορά ότι τα βήματα 3-5 αντικαθίστανται από τα βήματα της γενικής μεθόδου όπως αναλύθηκε στο 2ο κεφάλαιο αν η διατομή είναι κατηγορίας 4.

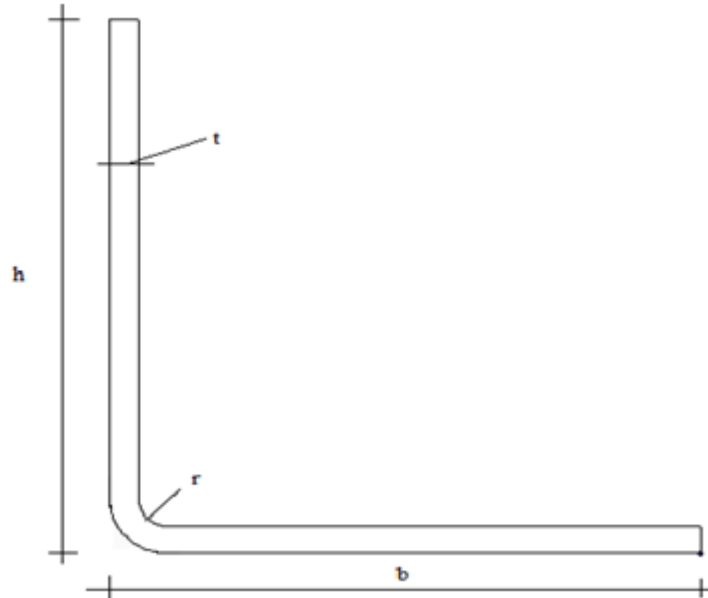
Πίνακας 4. 4 Διαστάσεις εξεταζόμενων διατομών

ΔΙΑΤΟΜΗ	h (mm)	b (mm)	c (mm)	r (mm)	t (mm)
KL χωρίς ενισχύσεις	60	60	-	3	3
KL με ενισχύσεις	60	60	20	3	3

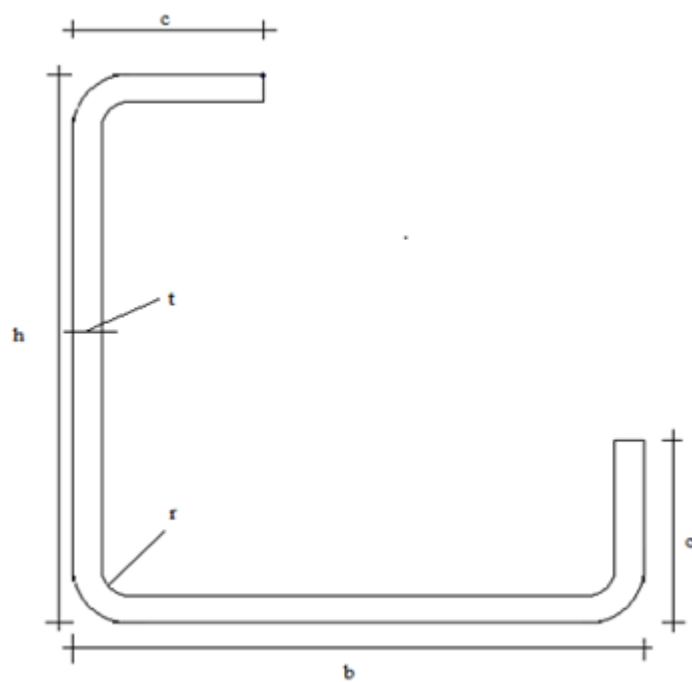
όπου  
h ύψος κορμού



$b$  πλάτος πέλματος  
 $c$  εύρος ενίσχυσης  
 $r$  ακτίνα προσαρμογής  
 $t$  πάχος διατομής



Σχήμα 4. 37 Διατομή KL χωρίς ενισχύσεις



Σχήμα 4. 38 Διατομή KL με ακραίες ενισχύσεις

#### 4.2.1.1 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 χωρίς ενισχύσεις

Τα χαρακτηριστικά της διατομής:

$$h = 60\text{mm}$$

$$b = 60\text{mm}$$

$$t = 3\text{mm}$$

$$r = 3\text{mm}$$

Τα στοιχεία του χάλυβα:

$$f_u = 510\text{MPa}$$

$$f_{yb} = 355\text{MPa}$$

1. Κατάταξη διατομής ( Πίνακας 2. 4 )

αν  $\frac{h}{t} \leq 15\varepsilon$  :  $\frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$  τότε διατομή κατηγορίας 3 αλλιώς κατηγορίας 4

$$\text{όπου } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \rightarrow \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

$$\frac{h}{t} \leq 15\varepsilon \rightarrow \frac{60}{3} \leq 15 \cdot 0,81 \rightarrow 20 \geq 12,15$$

$$\frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon \rightarrow \frac{60+60}{2 \cdot 3} \leq 11,5 \cdot 0,81 \rightarrow 20 \geq 9,315$$

} διατομή κατηγορίας 4

2. Υπολογισμός  $A_{eff}$

Έλεγχος επιρροής στρογγυλεμένων γωνιών

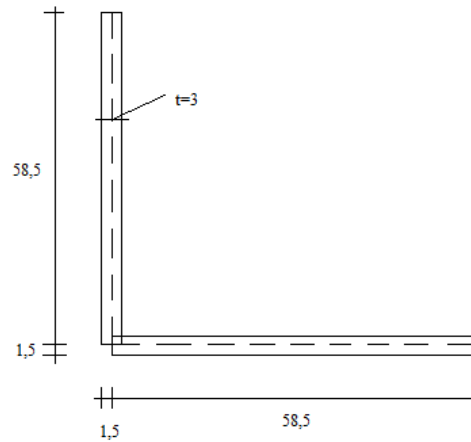
$$r \leq 5t \rightarrow 3 < 15$$

$$\frac{r}{b_p} \leq 0,15 \rightarrow \frac{3}{58,5} \leq 0,15 \rightarrow 0,051 < 0,15$$

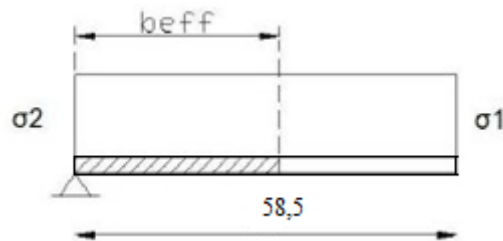
Εφ' όσον ικανοποιούνται οι δύο παραπάνω συνθήκες μπορεί να παραληφθεί η επιρροή των στρογγυλεμένων γωνιών και θεωρείται ότι η διατομή συνίσταται από επίπεδα στοιχεία με αιχμηρές γωνίες. Τότε τα θεωρητικά μήκη των στοιχείων μετρώνται από τα μέσα σημεία των στοιχείων της παρακείμενης γωνίας. Η διατομή έχει την μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 4. 39 .

$$A_g = (h_p + b_p) \cdot t \rightarrow A_g = (58,5 + 58,5) \cdot 3 = 351\text{mm}^2$$

Η διατομή αποτελείται από δύο προεξέχοντα θλιβόμενα στοιχεία με τα ίδια χαρακτηριστικά. Σύμφωνα με τη θεώρηση που κάναμε, το κάθε πέλμα αποτελεί ένα απλά στηριζόμενο στοιχείο υπό ομοιόμορφη θλίψη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. 40 .



Σχήμα 4. 39 Διατομή ΚΛ από επίπεδα στοιχεία



Σχήμα 4. 40 Ενεργός διατομή πελμάτων

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

$$\psi = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 1 \text{ και άρα συντελεστής κύρτωσης } K_\sigma = 0,43$$

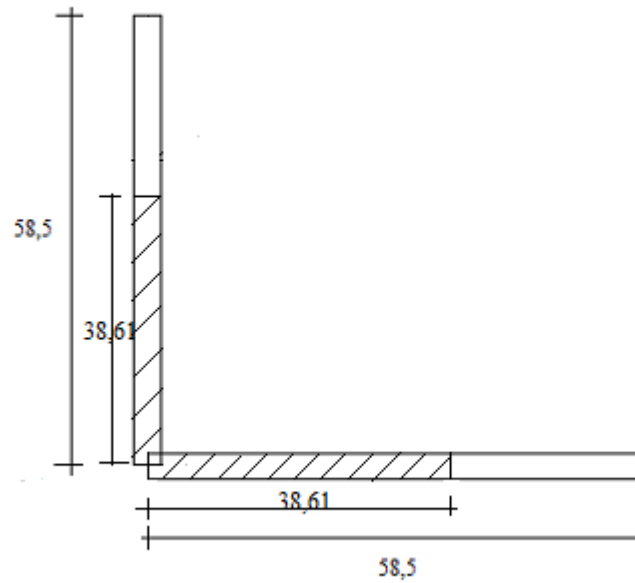
$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_p/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{K_\sigma}} \rightarrow \bar{\lambda}_p = \frac{58,5/3}{28,4 \cdot 0,81 \cdot \sqrt{0,43}} = 1,293 > 0,748 \rightarrow$$

$$\rightarrow \rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \cdot \left(1 - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p}\right) \leq 1 \rightarrow \rho = \frac{1}{1,293} \cdot \left(1 - \frac{0,188}{1,293}\right) \leq 1 \rightarrow \rho = 0,66 < 1$$

το 66% του  $b_p$ , μετρούμενο από τη στήριξη των πελμάτων, είναι ενεργό

$$\text{Επομένως } b_{\text{eff}} = \rho \cdot b_p = 0,66 \cdot 58,5 \text{ mm} = 38,61 \text{ mm}$$

$$A_{\text{eff}} = 2 \cdot 3 \text{ mm} \cdot 38,61 \text{ mm} = 231,66 \text{ mm}^2$$



Σχήμα 4. 41 Ενεργός διατομή

3. Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $\chi$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{P_{cr}}} \rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{231,66 * 0,355}{32,49}} = 1,59$$

όπου  $P_{cr}$  όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.1.1

από Σχήμα 2. 15 για καμπύλη c  $\rightarrow \alpha = 0,49$

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \rightarrow \Phi = 0,5 * [1 + 0,49 * (1,59 - 0,2) + 1,59^2] \rightarrow$$

$$\rightarrow \Phi = 2,1046$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \rightarrow \chi = \frac{1}{2,1 + \sqrt{2,1^2 - 1,59^2}} \leq 1,0 \rightarrow \chi = 0,287 < 1,0$$

4. Υπολογισμός αντοχής της διατομής

$$N_{rd} = \chi \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_M} = 0,287 * \frac{231,66 * 0,355}{1,0} = 23,60 \text{KN}$$

#### 4.2.1.2 Διατομή KL με οπές για κοχλία M12 με ακραίες ενισχύσεις

Τα χαρακτηριστικά της διατομής:

$$h = 60\text{mm}$$

$$b = 60\text{mm}$$

$$t = 3\text{mm}$$

$$r = 3\text{mm}$$

$$c = 20\text{mm}$$

Τα στοιχεία του χάλυβα:

$$f_u = 510\text{MPa}$$

$$f_{yb} = 355\text{MPa}$$

##### 1. Κατάταξη διατομής

Για προεξέχοντα στοιχεία ( Σχήμα 4. 43 )

αν  $\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$  τότε διατομή κατηγορίας 1 αλλιώς κατηγορίας 2

$$\text{όπου } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \rightarrow \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon \rightarrow \frac{14}{3} \leq 9*0,81 \rightarrow 4,67 < 7,29 \rightarrow \text{ενισχύσεις κατηγορίας 1}$$

Για εσωτερικά θλιβόμενα στοιχεία ( Σχήμα 4. 44 )

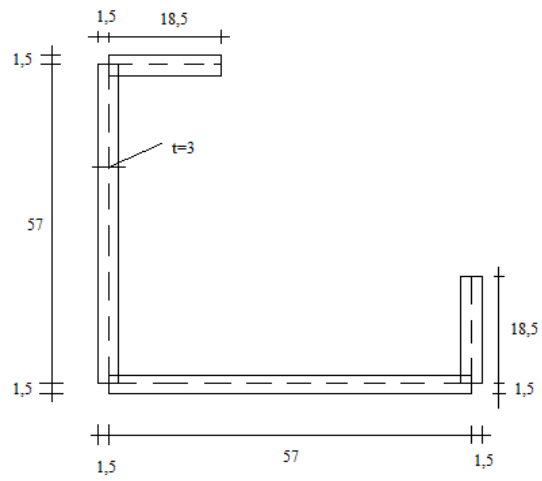
αν  $\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$  τότε διατομή κατηγορίας 1 αλλιώς κατηγορίας 2

$$\text{όπου } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \rightarrow \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,81$$

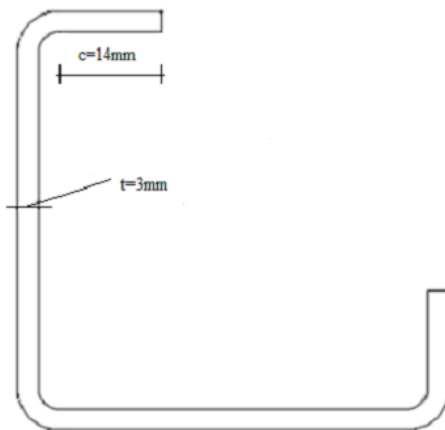
$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon \rightarrow \frac{48}{3} \leq 33*0,81 \rightarrow 16 < 26,73 \rightarrow \text{κορμοί κατηγορίας 1}$$

Άρα η διατομή KL60/60/3, προσθέτοντας την ενίσχυση  $c=20\text{mm}$ , με το συγκεκριμένο πάχος  $t=3\text{mm}$  ισχυροποιείται και πλέον αντιμετωπίζεται ως διατομή κατηγορίας 1.

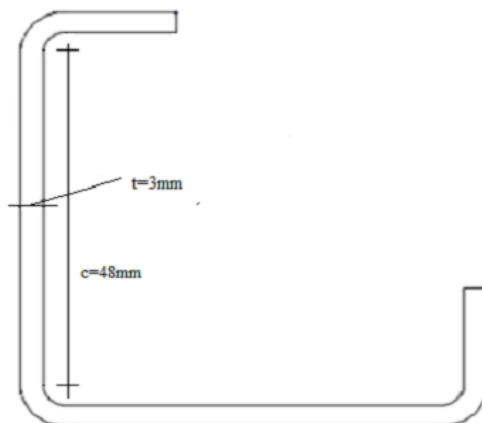
$$A_g = 2(c_p + b_p)*t \rightarrow A_g = 2*(18,5+57)*3 = 453\text{mm}^2 \text{ ( Σχήμα 4. 42 )}$$



Σχήμα 4. 42 Ενεργός διατομή



Σχήμα 4. 43 Προεξέχων θλιβόμενο στοιχείο



Σχήμα 4. 44 Εσωτερικό θλιβόμενο στοιχείο

2. Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $\chi$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{P_{cr}}} \rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{453 \cdot 0,355}{48,38}} = 1,82$$

όπου  $P_{cr}$  όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.1.1

από Σχήμα 2. 16 για καμπύλη b  $\rightarrow \alpha = 0,34$

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \rightarrow \Phi = 0,5*[1 + 0,34 * (1,82 - 0,2) + 1,82^2] \rightarrow \\ \rightarrow \Phi = 2,4316$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \rightarrow \chi = \frac{1}{2,4 + \sqrt{2,4^2 - 1,82^2}} \leq 1,0 \rightarrow \chi = 0,247 < 1,0$$

3. Υπολογισμός αντοχής της διατομής

$$N_{rd} = \chi \frac{Af_y}{\gamma_M} = 0,247 * \frac{453 \cdot 0,355}{1,0} = 39,76 \text{KN}$$

#### 4.2.1.3 Διατομή KL με σπές για κοχλία M20 χωρίς ενισχύσεις

Τα χαρακτηριστικά της διατομής:

$$h = 60 \text{mm}$$

$$b = 60 \text{mm}$$

$$t = 3 \text{mm}$$

$$r = 3 \text{mm}$$

Τα στοιχεία του χάλυβα:

$$f_u = 510 \text{MPa}$$

$$f_{yb} = 355 \text{MPa}$$

Τα βήματα 1,2 όπως υπολογίστηκαν στην παράγραφο 4.2.1.1

$$A_{eff} = 231,66 \text{mm}^2$$

και  $\sigma'$  αυτήν την περίπτωση έχει αλλάξει το κρίσιμο φορτίο  $P_{cr} = 35,29 \text{KN}$

3. Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $\chi$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{P_{cr}}} \rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{231,66 \cdot 0,355}{35,29}} = 1,53$$

όπου  $P_{cr}$  όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.1.1

από Σχήμα 2. 15 για καμπύλη c  $\rightarrow \alpha = 0,49$

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \rightarrow \Phi = 0,5*[1 + 0,49 * (1,53 - 0,2) + 1,53^2] \rightarrow$$

$$\rightarrow \Phi = 1,9963$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \rightarrow \chi = \frac{1}{2 + \sqrt{2^2 - 1,53^2}} \leq 1,0 \rightarrow \chi = 0,305 < 1,0$$

4. Υπολογισμός αντοχής της διατομής

$$N_{rd} = \chi \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_M} = 0,305 * \frac{231,66 * 0,355}{1,0} = 25,08 \text{KN}$$

#### 4.2.1.4 Διατομή KL με σπές για κοχλία M20 με ακραίες ενισχύσεις

Τα χαρακτηριστικά της διατομής:

$$h = 60 \text{mm}$$

$$b = 60 \text{mm}$$

$$t = 3 \text{mm}$$

$$r = 3 \text{mm}$$

$$c = 20 \text{mm}$$

Τα στοιχεία του χάλυβα:

$$f_u = 510 \text{MPa}$$

$$f_{yb} = 355 \text{MPa}$$

Η κατάταξη της διατομής όπως υπολογίστηκε στην παράγραφο 4.2.1.2

$$A_g = 453 \text{mm}^2$$

και  $\sigma'$  αυτήν την περίπτωση έχει αλλάξει το κρίσιμο φορτίο  $P_{cr} = 52,14 \text{KN}$

2. Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή  $\chi$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{P_{cr}}} \rightarrow \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{453 * 0,355}{52,14}} = 1,756$$

όπου  $P_{cr}$  όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.1.1



από Σχήμα 2. 16 για καμπύλη b  $\rightarrow \alpha = 0,34$

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \rightarrow \Phi = 0,5*[1 + 0,34 * (1,756 - 0,2) + 1,756^2] \rightarrow$$

$$\rightarrow \Phi = 2,31$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \rightarrow \chi = \frac{1}{2,31 + \sqrt{2,31^2 - 1,756^2}} \leq 1,0 \rightarrow \chi = 0,262 < 1,0$$

3. Υπολογισμός αντοχής της διατομής

$$N_{rd} = \chi \frac{Af_y}{\gamma_M} = 0,262 * \frac{453 * 0,355}{1,0} = 42,2 \text{KN}$$

#### 4.2.1.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Πίνακας 4. 5 Θλιπτική αντοχή σύμφωνα με την ανάλυση κατά τον Ευρωκώδικα

	ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (KN)	
	M12	M20
ΓΩΝΙΑΚΟ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	23,60	25,10
ΓΩΝΙΑΚΟ ΜΕ ΑΚΡΑΙΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	39,80	42,20

#### 4.2.2 Εφελκυστική αντοχή

##### 4.2.2.1 Διατομή KL με σπές για κοχλία M12 χωρίς ενισχύσεις

Τα χαρακτηριστικά της διατομής:

$$h = 60 \text{mm}$$

$$b = 60 \text{mm}$$

$t = 3\text{mm}$   
 $r = 3\text{mm}$   
 $d = 12\text{mm}$   
 $d_0 = 13\text{mm}$   
 $A = 351\text{mm}^2$

Τα στοιχεία του χάλυβα:

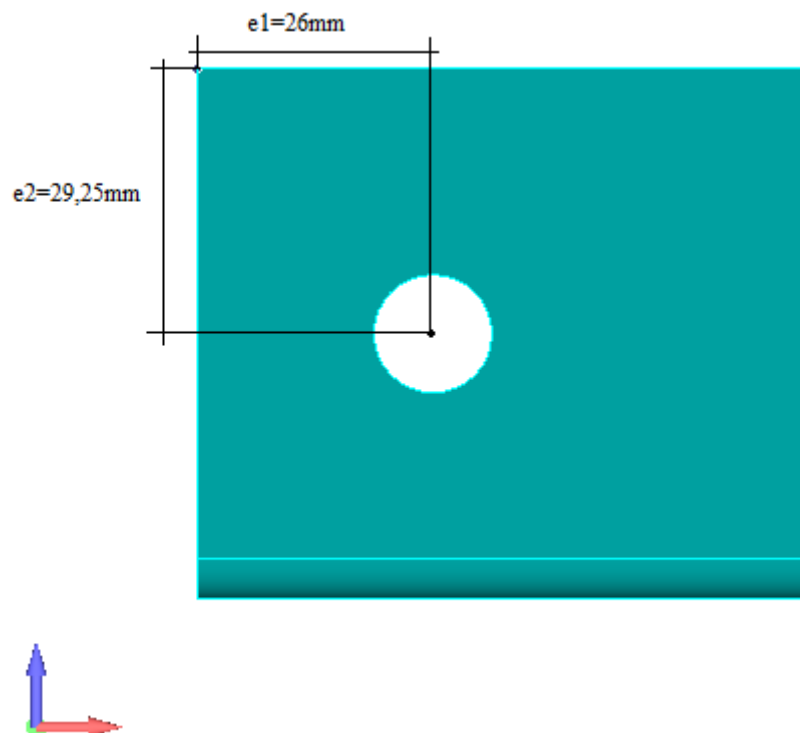
$f_u = 510\text{MPa}$   
 $f_{yb} = 355\text{MPa}$   
 $f_{ub} = 800\text{MPa}$

(a) αντοχή σε οριακή κατάσταση αστοχίας  $N_{u,Rd}$ :

$$N_{u,Rd} = \frac{2,0(e_2 - 0,5d_0)t f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2 \cdot (29,25 - 0,5 \cdot 13) \cdot 3 \cdot 0,51}{1,0} = 69,61\text{KN}$$

(b) αντοχή της πλήρους διατομής σε εφελκυσμό  $N_{pl,Rd}$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{351 \cdot 0,355}{1,0} = 124,61\text{KN}$$



Σχήμα 4. 45 Αποστάσεις κοιλία M12 από άκρο γωνιακού

(c) αντοχή σε διάτμηση του κοιλία  $F_{v,Rd}$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 0,8 * 351}{1,0} = 168,48 \text{KN}$$

(d) αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας  $F_{b,Rd}$

$$k_1 = \min\left\{\frac{2,8e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right\} = \min\left\{\frac{2,8 * 29,25}{13} - 1,7; 2,5\right\} = \min(4,6; 2,5) = 2,5$$

$$a_b = \min\left\{1; \frac{f_{ub}}{f_u}; \frac{e_1}{3d_0}\right\} = \min\left\{1; \frac{800}{510}; \frac{26}{3 * 13}\right\} = \min(1; 1,57; 0,67) = 0,67$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 * 0,67 * 0,51 * 12 * 3}{1,0} = 30,75 \text{KN}$$

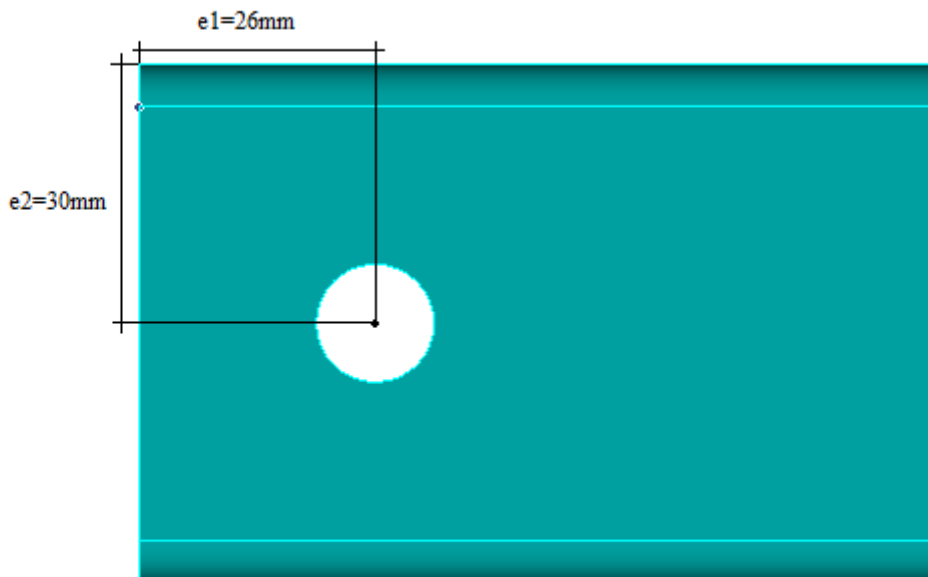
$$N_E = \min\{69,61 \text{KN}; 124,61 \text{KN}; 168,48 \text{KN}; 30,75 \text{KN}\} = 30,75 \text{KN}$$

#### 4.2.2.2 Διατομή KL με σπές για κοιλία M12 με ακραίες ενισχύσεις

Τα χαρακτηριστικά της διατομής:

$$h = 60 \text{mm}$$

$$b = 60 \text{mm}$$



Σχήμα 4. 46 Αποστάσεις κοιλία M12 από άκρο γωνιακού με ενισχύσεις

$$\begin{aligned}
t &= 3\text{mm} \\
r &= 3\text{mm} \\
c &= 20\text{mm} \\
d &= 12\text{mm} \\
d_0 &= 13\text{mm} \\
A &= 453\text{mm}^2 \\
A_{\text{net}} &= 453 - 13 \cdot 3 = 414\text{mm}^2
\end{aligned}$$

Τα στοιχεία του χάλυβα:

$$\begin{aligned}
f_u &= 510\text{MPa} \\
f_{yb} &= 355\text{MPa} \\
f_{ub} &= 800\text{MPa}
\end{aligned}$$

(a) αντοχή σε οριακή κατάσταση αστοχίας  $N_{u,Rd}$ :

$$N_{u,Rd} = \frac{A_{\text{net}} f_u}{\gamma_{M0}} = \frac{414 \cdot 0,51}{1,0} = 211,14\text{KN}$$

(b) αντοχή της πλήρους διατομής σε εφελκυσμό  $N_{pl,Rd}$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{453 \cdot 0,355}{1,0} = 160,81\text{KN}$$

(c) αντοχή σε διάτμηση του κοιλία  $F_{v,Rd}$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 0,8 \cdot 453}{1,0} = 217,44\text{KN}$$

(d) αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας  $F_{b,Rd}$

$$k_1 = \min\left\{\frac{2,8e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right\} = \min\left\{\frac{2,8 \cdot 30}{13} - 1,7; 2,5\right\} = \min(4,76; 2,5) = 2,5$$

$$a_b = \min\left\{1; \frac{f_{ub}}{f_u}; \frac{e_1}{3d_0}\right\} = \min\left\{1; \frac{800}{510}; \frac{26}{3 \cdot 13}\right\} = \min(1; 1,57; 0,67) = 0,67$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,67 \cdot 0,51 \cdot 12 \cdot 3}{1,0} = 30,75\text{KN}$$

$$N_E = \min\{211,14\text{KN}; 160,81\text{KN}; 217,44\text{KN}; 30,75\text{KN}\} = 30,75\text{KN}$$

#### 4.2.2.3 Διατομή KL με σπές για κοιλία M20 χωρίς ενισχύσεις

Τα χαρακτηριστικά της διατομής:

$$\begin{aligned}
h &= 60\text{mm} \\
b &= 60\text{mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t &= 3\text{mm} \\
 r &= 3\text{mm} \\
 d &= 20\text{mm} \\
 d_0 &= 22\text{mm} \\
 A &= 351\text{mm}^2
 \end{aligned}$$

Τα στοιχεία του χάλυβα:

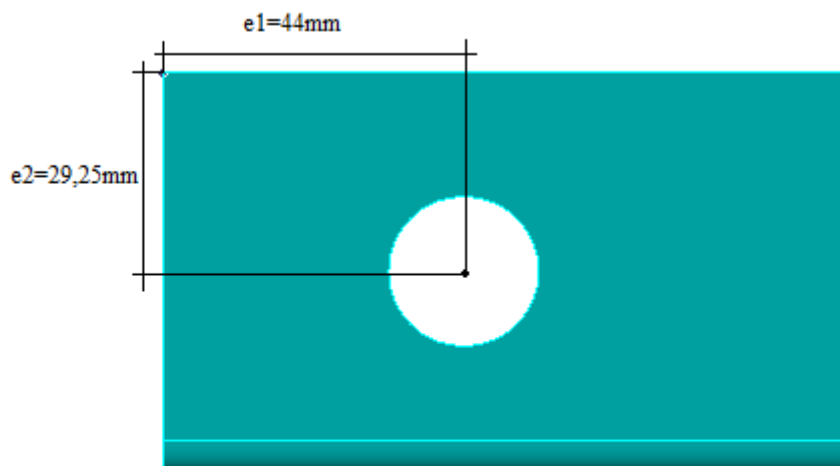
$$\begin{aligned}
 f_u &= 510\text{MPa} \\
 f_{yb} &= 355\text{MPa} \\
 f_{ub} &= 800\text{MPa}
 \end{aligned}$$

(a) αντοχή σε οριακή κατάσταση αστοχίας  $N_{u,Rd}$ :

$$N_{u,Rd} = \frac{2,0(e_2 - 0,5d_0)t f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2 \cdot (29,25 - 0,5 \cdot 22) \cdot 3 \cdot 0,51}{1,0} = 55,84\text{KN}$$

(b) αντοχή της πλήρους διατομής σε εφελκυσμό  $N_{pl,Rd}$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{351 \cdot 0,355}{1,0} = 124,61\text{KN}$$



Σχήμα 4. 47 Αποστάσεις κοιλία M20 από άκρο γωνιακού

(c) αντοχή σε διάτμηση του κοιλία  $F_{v,Rd}$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 0,8 * 351}{1,0} = 168,48 \text{KN}$$

(d) αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας  $F_{b,Rd}$

$$k_1 = \min\left\{\frac{2,8e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right\} = \min\left\{\frac{2,8 * 29,25}{22} - 1,7; 2,5\right\} = \min(2,02; 2,5) = 2,02$$

$$a_b = \min\left\{1; \frac{f_{ub}}{f_u}; \frac{e_1}{3d_0}\right\} = \min\left\{1; \frac{800}{510}; \frac{44}{3 * 22}\right\} = \min(1; 1,57; 0,67) = 0,67$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,02 * 0,67 * 0,51 * 20 * 3}{1,0} = 41,41 \text{KN}$$

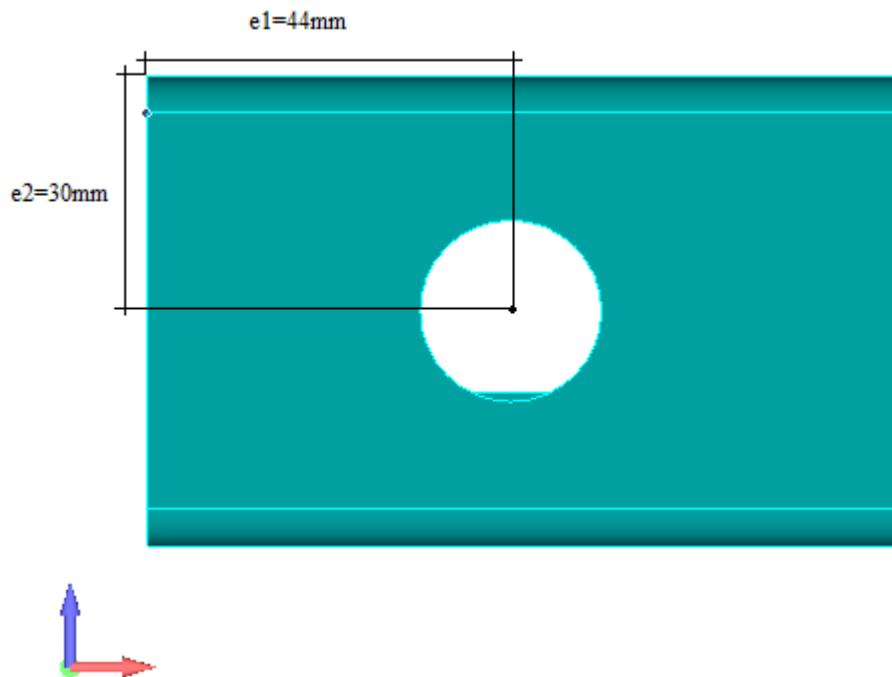
$$N_E = \min\{55,84 \text{KN}; 124,61 \text{KN}; 168,48 \text{KN}; 41,41 \text{KN}\} = 41,41 \text{KN}$$

#### 4.2.2.4 Διατομή KL με οπές για κοιλία M20 με ακραίες ενισχύσεις

Τα χαρακτηριστικά της διατομής:

$$h = 60 \text{mm}$$

$$b = 60 \text{mm}$$



Σχήμα 4. 48 Αποστάσεις κοιλία M20 από άκρο γωνιακού με ενισχύσεις

$$\begin{aligned}
t &= 3\text{mm} \\
r &= 3\text{mm} \\
c &= 20\text{mm} \\
d &= 20\text{mm} \\
d_0 &= 22\text{mm} \\
A &= 453\text{mm}^2 \\
A_{\text{net}} &= 453 - 22 \cdot 3 = 387\text{mm}^2
\end{aligned}$$

Τα στοιχεία του χάλυβα:

$$\begin{aligned}
f_u &= 510\text{MPa} \\
f_{yb} &= 355\text{MPa} \\
f_{ub} &= 800\text{MPa}
\end{aligned}$$

(α) αντοχή σε οριακή κατάσταση αστοχίας  $N_{u,Rd}$ :

$$N_{u,Rd} = \frac{A_{\text{net}} f_u}{\gamma_{M0}} = \frac{387 \cdot 0,51}{1,0} = 197,37\text{KN}$$

(β) αντοχή της πλήρους διατομής σε εφελκυσμό  $N_{pl,Rd}$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{453 \cdot 0,355}{1,0} = 160,81\text{KN}$$

(γ) αντοχή σε διάτμηση του κοιλία  $F_{v,Rd}$

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 0,8 \cdot 453}{1,0} = 217,44\text{KN}$$

(δ) αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας  $F_{b,Rd}$

$$k_1 = \min\left\{\frac{2,8e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right\} = \min\left\{\frac{2,8 \cdot 30}{22} - 1,7; 2,5\right\} = \min(2,12; 2,5) = 2,12$$

$$a_b = \min\left\{1; \frac{f_{ub}}{f_u}; \frac{e_1}{3d_0}\right\} = \min\left\{1; \frac{800}{510}; \frac{44}{3 \cdot 22}\right\} = \min(1; 1,57; 0,67) = 0,67$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,12 \cdot 0,67 \cdot 0,51 \cdot 20 \cdot 3}{1,0} = 43,46\text{KN}$$

$$N_E = \min\{197,37\text{KN}; 160,81\text{KN}; 217,44\text{KN}; 43,46\text{KN}\} = 43,46\text{KN}$$

#### 4.2.2.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Πίνακας 4. 6 Εφελκυστική αντοχή σύμφωνα με την ανάλυση κατά τον Ευρωκώδικα

		ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ				
		$N_u$	$N_{pl}$	$F_v$	$F_b$	$N_{min}$
ΓΩΝΙΑΚΟ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	M12	69,60	124,60	168,50	30,75	30,75
	M20	55,80	124,60	168,50	41,40	41,40
ΓΩΝΙΑΚΟ ΜΕ ΑΚΡΑΙΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	M12	211,10	160,80	217,40	30,75	30,75
	M20	197,40	160,80	217,40	43,50	43,50



### 4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων της ανάλυσης με το πρόγραμμα και της ανάλυσης με τον Ευρωκώδικα

Πίνακας 4. 7 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την θλιπτική αντοχή

		ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (KN)	
		FEMAP	ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ
ΓΩΝΙΑΚΟ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	M12	23,75	23,60
	M20	25,00	25,10
ΓΩΝΙΑΚΟ ΜΕ ΑΚΡΑΙΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	M12	35,00	39,80
	M20	36,90	42,20

Πίνακας 4. 8 Σύγκριση αποτελεσμάτων για την εφελκυστική αντοχή

		ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ (KN)	
		FEMAP	ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ
ΓΩΝΙΑΚΟ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	M12	73,75	30,75
	M20	89,10	41,40
ΓΩΝΙΑΚΟ ΜΕ ΑΚΡΑΙΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ	M12	80,60	30,75
	M20	84,70	43,50

## 5. Συμπεράσματα

Όσον αφορά την θλιπτική αντοχή, ο Ευρωκώδικας μας έδειξε ότι η διατομή KL 60/60/3 ισχυροποιείται με τις ακραίες ενισχύσεις και από κατηγορίας 4 γίνεται διατομή κατηγορίας 1, κατά την οποία δεν παρουσιάζονται φαινόμενα τοπικού λυγισμού. Σε περίπτωση μείωσης του πάχους, η ενισχυμένη διατομή μπορεί να προέκυπτε κατηγορίας 4.

Σύμφωνα με την γραμμική ανάλυση του προγράμματος FEMAP στα μοντέλα χωρίς ενισχύσεις στο άκρο του σκέλους χωρίς οπές παρατηρείται ανισοκατανομή της έντασης αυξανόμενη από την στρογγυλεμένη γωνία μέχρι το άκρο λόγω έκκεντρης εφαρμογής της αξονικής (κάμψη). Περιμετρικά των οπών, τοπικά υπάρχει μεγαλύτερη ένταση απ' ότι στο υπόλοιπο σκέλος. Ενώ στα μοντέλα με ακραίες ενισχύσεις στο σκέλος χωρίς οπές η ένταση γίνεται κατά τόπους έντονη και αυξάνεται στην περιοχή γύρω από τις οπές.

Εξίσου και από τις δυο αναλύσεις εξήχθησαν περίπου τα ίδια αποτελέσματα και παρατηρείται ότι εκτός από την αύξηση της αντοχής στην περίπτωση ενίσχυσης της διατομής, η αντοχή αυξάνεται και στην περίπτωση αύξησης των οπών για χρήση μεγαλύτερου πάχους κοχλία.

Όσον αφορά την εφελκυστική αντοχή, ο Ευρωκώδικας μας έδειξε ότι κρισιμότερη είναι η αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας.

Στα μοντέλα χωρίς ενισχύσεις που αναλύθηκαν με το πρόγραμμα παρατηρήθηκε ότι το ελεύθερο άκρο του σκέλους με τις οπές εφελκύεται περισσότερο, ενώ στο άλλο σκέλος η ένταση είναι μεγαλύτερη κοντά στην στρογγυλεμένη γωνία. Αντίθετα, στα μοντέλα με ακραίες ενισχύσεις, στο σκέλος χωρίς οπές η κατανομή της έντασης από την στρογγυλεμένη γωνία έως την ακραία ενίσχυση είναι πιο ομαλή. Η ένταση στις οπές είναι παρόμοια με το μοντέλο χωρίς ακραίες ενισχύσεις αλλά αυξημένη.

Οι τιμές των αποτελεσμάτων που εξήγαμε από τη μη γραμμική ανάλυση με το πρόγραμμα είναι σχεδόν διπλάσιες απ' αυτές που πήραμε από τους υπολογισμούς σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα. Οπότε διαπιστώνεται ότι οι διατάξεις του Ευρωκώδικα για τον υπολογισμό της αντοχής των γωνιακών με ή χωρίς ακραίες ενισχύσεις σε εφελκυσμό είναι συντηρητικές. Τέλος και σ' αυτήν την περίπτωση παρατηρείται αύξηση της αντοχής αυξάνοντας τη διάμετρο των οπών.

## Βιβλιογραφία

- [1] Βάγιας Ι, Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Ι., «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005
- [2] Βάγιας Ι, «Σιδηρές Κατασκευές, Ανάλυση και διαστασιολόγηση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2003
- [3] Βάγιας Ι, Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Ι., «Σιδηρές Κατασκευές, Παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος Ι» Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005
- [4] Ευρωκώδικας 3: «Σχεδιασμός Κατασκευών από χάλυβα», Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια, CEN, EN 1993-1-1, 2005
- [5] Ευρωκώδικας 3: «Σχεδιασμός Κατασκευών από χάλυβα», Μέρος 1-3: Γενικοί κανόνες- Συμπληρωματικοί κανόνες για λεπτότοιχα σκέλη με έλαση εν ψυχρώ και επικαλύψεις, CEN, ENV 1993-1-3, 1996
- [6] Μιχάλτσος Γ. «Ελαφρές Μεταλλικές Κατασκευές, Μέθοδοι υπολογισμού», Εκδόσεις Συμεών, 2009
- [7] Μιχάλτσος Γ. «Ελαφρές Μεταλλικές Κατασκευές Θεωρία και Εφαρμογές», Εκδόσεις Συμεών, 2008