

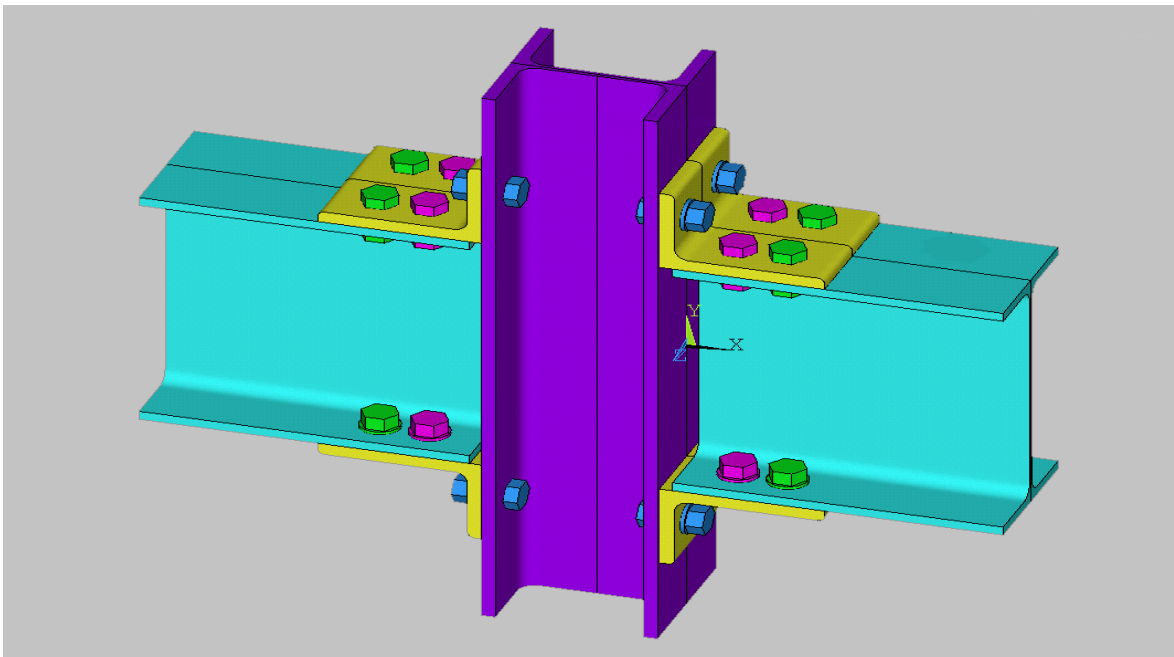


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΥΠΙΚΩΝ
ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΜΕΛΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ**



ΦΟΙΤΗΤΕΣ:

ΒΗΤΤΑΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ

ΕΠΟΠΤΕΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΠΑΡΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι αριθμητική μελέτη της συμπεριφοράς τυπικών χαλύβδινων δομικών μελών με χρήση κατάλληλου λογισμικού. Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στον χάλυβα ως δομικό υλικό. Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναφερόμαστε γενικότερα στις μεταλλικές κατασκευές . Στο τρίτο κεφάλαιο, αναφερόμαστε σε μέλη μεταλλικών κατασκευών υπό εγκάρσια φορτία. Το τέταρτο κεφάλαιο αφορά στην ανάλυση κατασκευών με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης αναφερόμαστε στο λογισμικό ANSYS ,το οποίο χρησιμοποιήσαμε . Το πέμπτο κεφάλαιο αφορά την επίλυση προβλήματος μεταλλικής δοκού με την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο αναφέρονται συμπεράσματα από την επίλυση του προβλήματος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ο ΧΑΛΥΒΑΣ ΩΣ ΔΟΜΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

1.1	ΣΥΣΤΑΣΗ ΧΑΛΥΒΑ.....	5
1.2	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.....	6
1.3	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΩΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.....	8
1.4	ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΛΥΒΑ.....	11
1.5	Η ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΓΙΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.....	13
1.6	ΠΟΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΥΒΑ.....	15
1.7	ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΧΑΛΥΒΑ.....	16

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

2.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	18
2.2	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΙΔΙΑΙΤΕΡΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ.....	18
2.3	ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ.....	20
2.3.1	Βασικές αρχές.....	20
2.3.2	Σχεδιαστικές απαιτήσεις.....	21
2.3.3	Προϋπολογισμός εργασιών και κόστος συντήρησης.....	22
2.3.4	Μέθοδοι ανάλυσης χαλύβδινων κατασκευών.....	22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΛΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΥΠΟ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΑ

3.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	24
3.2	ΕΝΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕΛΩΝ ΥΠΟ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΑ.....	26
3.3	ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΑΡΘΡΩΣΗ.....	28
3.4	ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΣΕ ΚΑΜΠΤΟΜΕΝΑ ΜΕΛΗ.....	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	34
4.2	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ Η/Υ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS.....	38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΟΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Η/Υ

5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	40
5.2	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	40
5.3	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	42
5.4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.....	46

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	52
---	-------------------	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ο ΧΑΛΥΒΑΣ ΩΣ ΔΟΜΙΚΟ ΥΛΙΚΟ

1.1 ΣΥΣΤΑΣΗ ΧΑΛΥΒΑ

Χάλυβες καλούνται τα κράματα **σιδήρου (Fe)** και **άνθρακα (C)**, με περιεκτικότητα σε άνθρακα κάτω του 1,8%. Στη σύνθεση των χαλύβων συνδυάζονται με το σίδηρο διάφορα στοιχεία σε ποσοστιαίες αναλογίες που δεν ξεπερνούν κατά κανόνα το 5%.

Συστατικά στοιχεία κάθε χάλυβα αποτελούν ο **άνθρακας**, σε ποσοστά που κυμαίνονται συνήθως μεταξύ **0,2% και 0,7%**, και το **πυρίτιο (Si)**, σε ποσοστό μεταξύ **0,1% και 0,7%** και ενίοτε έως και 4% σε ειδικούς χάλυβες. Η αναλογία σε άνθρακα καθορίζει ουσιαστικώς τις ιδιότητες των διαφόρων χαλύβων. Τα βασικά συστατικά του χάλυβα και ποσοστιαία περιεκτικότητά τους αναφέρονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 Συστατικά χάλυβα (<http://portal.tee.gr/>)

Άνθρακας	Πυρίτιο & Μαγγάνιο	Νικέλιο	Χρώμιο	Χαλκός
0.20-0.30 %	1.5 %	0.30 %	0.30 %	0.30 %

Για την Οικοδομική χρήση έχουν ιδιαίτερη σημασία οι χάλυβες οι οποίοι περιγράφονται στο ΕΛΟΤ EN 10025 «Προϊόντα μη κεκραμένων κατασκευαστικών χαλύβων θερμής έλασης – Τεχνικοί όροι παράδοσης», καθώς και οι ανοξείδωτοι χάλυβες και ορισμένοι χάλυβες για ήλους.

Οι ανοξείδωτοι χάλυβες παράγονται από κράματα με περιεκτικότητα χρωμίου τουλάχιστον 12%. Πρόσθετα νικελίου ή μολυβδαινίου βελτιώνουν την ικανότητα αντίστασης στην διάβρωση. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι δεν υπάρχουν χάλυβες οι οποίοι δεν διαβρώνονται. Υπάρχουν μόνον χάλυβες που υπό συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος δεν οξειδώνονται. Είναι λοιπόν απαραίτητο κατά την χρήση των ανοξείδωτων χαλύβων να επιλέγεται ο κατάλληλος για την εκάστοτε εφαρμογή.

Οι λεπτόκοκκοι χάλυβες παράγονται από χάλυβες χαμηλού κράματος και υψηλής αντοχής. Αυτοί οι χάλυβες είναι μικρής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Εκ του λόγου αυτού προκύπτει υψηλή καταλληλότητα συγκόλλησης (<http://portal.tee.gr/>).

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΣΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

Ο σίδηρος από την αρχαιότητα κατείχε εξέχουσα θέση στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων. Η κατασκευή εργαλείων, όπλων και σκευών αποτελούν δείγματα της ευρείας εφαρμογής του σιδήρου κατά τα πρώτα χρόνια της ανθρώπινης εξέλιξης.

Η πρώτη παραγωγή τήγματος σιδήρου καταγράφεται στις περιοχές του Καυκάσου και συγκεκριμένα στην Αρμενία, περί το 1500 π.Χ.

Στην Ανατολή υπάρχουν ενδείξεις για παλαιότερη ύπαρξη του σιδήρου σε χώρες όπως η Κίνα και η Ινδία. Στην Ευρώπη ο σίδηρος ήρθε περί το 1200 π.Χ. μέσω των αποικιών.

Στην Ελλάδα η χρήση και επεξεργασία του σιδήρου καταγράφεται σε πολλές ιστορικές αναφορές αλλά και στα Ομηρικά έπη. Η εξέλιξη της επεξεργασίας του σιδήρου κατά τον 17ο αιώνα πραγματοποιείται με τη χρήση καθαρού C (κωκ) ή λιθάνθρακα αντί για ξυλάνθρακα ως υλικού καύσης της καμίνου πετυχαίνοντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερες θερμοκρασίες τήξης.

Στη συνέχεια η εξέλιξη των τεχνολογικών μέσων όπως καμίνων, μηχανών έγχυσης και ανάδευσης του τήγματος αλλά και της σταδιακής απομάκρυνσης του άνθρακα C από τη χημική δομή του σιδήρου οδήγησε το 1850, στην Αγγλία, σε μαζικότερη παραγωγή χάλυβα.

Ουσιαστικά όμως η ευρεία εφαρμογή και χρήση του στην ναυπηγική και στις κατασκευές ξεκινά από το 1880. Περί τα τέλη του δέκατου όγδοου αιώνα ξεκίνησε η κατασκευή γεφυρών και κτιρίων από κατεργασμένο σίδηρο. Έναν αιώνα αργότερα, στα τέλη του δέκατου ένατου αιώνα άρχισε να παράγεται χάλυβας σε ποσότητες και τιμή κόστους τέτοιες ώστε να είναι ανταγωνιστικός του σιδήρου, οπότε ο χάλυβας άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως στη δόμηση τεχνικών έργων.

Η πρώτη χρήση του χάλυβα ως δομικού υλικού έγινε με τη μορφή χυτοσιδήρου, ο οποίος, όμως, λόγω της μικρής του εφελκυστικής αντοχής δημιούργησε την ανάγκη σχεδιασμού τοξωτών φορέων (π.χ. γέφυρες).

Η πρώτη εφαρμογή σε μεγάλης κλίμακα έργο έγινε το 1779 στη γέφυρα Coalbrookdale στην Αγγλία ανοίγματος 33m. Η γέφυρα κόστισε πέντε φορές πάνω από τον προϋπολογισμό, αλλά εξακολουθεί να βρίσκεται ακόμα σε λειτουργία. Ο εμπνευστής και κατασκευαστής ήταν ο εμπειροτέχνης μεταλλουργός Abraham Darby.

Μεταξύ των ετών 1780-1820 κατασκευάστηκαν από χυτοσίδηρο αρκετές γέφυρες κυρίως με αψιδωτή μορφή αλλά και άλλες δομικές κατασκευές. Η αστοχία όμως, εφελκυσμένων μελών με ψαθυρά θραύση, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την κατάρρευση γεφυρών από χυτοσίδηρο, με πάρα πολλά ανθρώπινα θύματα, περιόρισε τη χρήση του χυτοσιδήρου μόνο σε θλιβόμενα μέλη (π.χ. υποστυλώματα).

Η **αύξηση των ανοιγμάτων σε γέφυρες**, στέγαστρα και οικοδομικά έργα έγινε δυνατή κυρίως με την εισαγωγή των **συγκολλήσεων**, η οποία επέτρεψε την ενίσχυση των ελασμάτων πέλματος και κορμού με νευρώσεις, τη χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής και την εφαρμογή συνεχών αντί αμφιέριστων φορέων. Επίσης, η χρήση δικτυωτών φορέων επέτρεψε τη μείωση του βάρους και κατ' επέκταση και του κόστους της κατασκευής.

Η κατασκευή μέσω ελάσεως διαφόρων μορφών διατομών (ορθογωνικών, κυκλικών, σωληνωτών κλπ.), άρχισε όταν ο χυτοσίδηρος και ο πολτοπαγής σίδηρος παρουσίασαν ευρύτερη χρήση. Το 1820 άρχισε η κατασκευή μέσω ελάσεως σιδηροτροχιών, ενώ περί το 1870 διατομών διπλού ταυ (υποστυλωμάτων από χυτοσίδηρο και δοκών από πολτοπαγή σίδηρο).

Το Chocolate Factory στο Menier του Παρισιού (1871-1872) είναι το παλαιότερο κτίριο με σκελετό που αποτελείται εξολοκλήρου από σίδηρο. Αποτελεί έναν υπέροχο συνδυασμό σιδήρου και τούβλου. Για πρώτη φορά ο σίδηρος αναλαμβάνει και τα κατακόρυφα και τα οριζόντια φορτία. Οι διατομές του σιδήρου αποτελούνται από 2 διατομές ταυ οι οποίες σχηματίζουν διατομές «Η» και περιβάλλουν τα τούβλα. Την ίδια περίοδο, εκτεταμένη είναι και η χρήση χάλυβα σε γέφυρες (Εικόνα 1.1)



Εικόνα 1.1 Η γέφυρα Golden Gate στο Σαν Φρανσίσκο (earthlocations.blogspot.com)

Κατά την τελευταία δεκαετία του δέκατου ένατου αιώνα, η κατασκευή κτιρίων γραφείων, εκθεσιακών χώρων και άλλων κατασκευών από χάλυβα άρχισε να γίνεται ιδιαίτερα δημοφιλής τόσο στις Η.Π.Α. όσο και σε πολλές χώρες της Ευρώπης.

Οι θεωρητικές γνώσεις των μηχανικών της εποχής όσον αφορά στη μηχανική συμπεριφορά σιδηρών ή χαλύβδινων δομικών στοιχείων περιορίζονταν ουσιαστικά στον

νόμο ελαστικότητας (Χουκ, 1676), στην θεωρία λυγισμού ράβδων (Οΐλερ, 1744) και στις διαφορικές εξισώσεις λυγισμού πλακών (Ναβιέ, 1823).

Στα τέλη του 19ου αιώνα η τεράστια συσσώρευση πληθυσμών στα μεγάλα αστικά κέντρα, η υπέρμετρη αξία της τιμής των οικοπέδων αλλά και η δημιουργία των πρώτων κολοσσιαίων πολυεθνικών εταιριών οδήγησε στην κατασκευή των ουρανοξυστών.

Με λίκνο τις Η.Π.Α και πρώτο το Σικάγο ξεκίνησε η κατασκευή όλο και υψηλότερων κτιρίων η οποία συνεχίζεται μέχρι σήμερα με πρωτοπόρους πλέον τις χώρες της κεντρικής και ανατολικής Ασίας (Κίνα, Ταϊβάν, Ιαπωνία κλπ.) και των Αραβικών Εμιράτων (Ντουμπάι, Άμπου Ντάμπι).

Με την πάροδο του χρόνου, οι διαστάσεις των κατασκευών από χάλυβα ξεπέρασαν κάθε συμβατικό όριο. Κατασκευάστηκαν έτσι καθ' ύψος αναπτυγμένα χαλύβδινα κτίρια με πολύ μεγάλο ύψος, οριζοντίως αναπτυγμένα κτίρια με πολύ μεγάλο άνοιγμα και γέφυρες με πολύ μεγάλο ελεύθερο άνοιγμα (**Παγκόσμια Ένωση Χάλυβα, 2017**).

1.3 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΩΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Υπάρχουν όμως σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει ο χάλυβας ως βασικό δομικό υλικό σε ένα κτίριο το οποίο προορίζεται για διάφορες χρήσεις. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των κτιριακών φορέων από χάλυβα συνοψίζονται ως εξής (**Παγκόσμια Ένωση Χάλυβα, 2017**):

- **Μείωση των νεκρών φορτίων της κατασκευής.**
- **Η δυνατότητα επέκτασης και τροποποίησης υφιστάμενων κατασκευών:** Λόγω της μεγάλης ποικιλίας διατομών, σχημάτων σύνδεσης των μελών και των μεθόδων σύνδεσης αυτών, μια τροποποίηση μεταλλικού έργου δεν απαιτεί πολύ χρόνο.
- **Δυνατότητα ζεύξης μεγάλων ανοιγμάτων:** Χρησιμοποιώντας μέλη ολόσωμων διατομών και δικτυώματα επιτυγχάνεται μεγάλη μείωση του ίδιου βάρους της κατασκευής.
- **Μικρές διαστάσεις υποστυλωμάτων,** που αυξάνουν τον ωφέλιμο χώρο στην κάτοψη και τα ελεύθερα ανοίγματα στις όψεις.
- **Μικρότερο ίδιο βάρος της φέρουσας κατασκευής,** που μειώνει τα κατακόρυφα φορτία και δημιουργεί ευνοϊκότερες συνθήκες θεμελίωσης, ιδιαίτερα σε κακής ποιότητας εδάφη.
- **Πιο διαπερατές κατασκευαστικές διαμορφώσεις δοκών και πλακών,** που επιτρέπουν ευχερέστερη τοποθέτηση των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων και οδηγούν τελικώς σε μικρότερα μικτά ύψη ορόφων.

- **Μεγάλος βαθμός βιομηχανικής προκατασκευής**, που επιτρέπει την προετοιμασία του υλικού ταυτόχρονα με τις εργασίες εκσκαφής και θεμελίωσης, μικρότερους χρόνους κατασκευής, ανεξαρτητοποίηση από τις καιρικές συνθήκες, εν ξηρώ συναρμολόγηση και άμεση πρόσβαση των συναρμολογημένων τμημάτων (π.χ. πλάκες, στέγες), καλύτερη ποιότητα και ευχερέστερο ποιοτικό έλεγχο.
- **Ομοιογένεια υλικού: Μένει αμετάβλητο στο χρόνο** και έτσι μας δίνει ακρίβεια παραδοχών ανάλυσης και ελέγχων αντοχής.
- **Ελαστικότητα – ολκιμότητα του χάλυβα**: Δίνει τη δυνατότητα εκτεταμένης παραμόρφωσης του χάλυβα χωρίς όμως να αστοχεί. Το υλικό χρησιμοποιείται στο έπακρο του και επιτυγχάνονται πρακτικά μεγάλες αντοχές σε κάμψη, θλίψη, διάτμηση, χρησιμοποιώντας μικρότερες και αισθητικά καλύτερες διατομές. Επίσης μειώνονται τα μόνιμα φορτία της κατασκευής και υπάρχει κέρδος τόσο σε χώρο όσο και σε ποσότητα υλικού.
- **Η δυνατότητα πραγματοποίησης ελαστικού και ανελαστικού σχεδιασμού**: οφείλεται στη χρησιμοποίηση ενός και μόνο πλήρως βιομηχανοποιημένου και ολκιμου υλικού, δηλαδή του χάλυβα.
- **Μικρότερες κατασκευαστικές ανοχές**, που έχουν ως αποτέλεσμα την ευχερέστερη χρήση προκατασκευασμένων μη φερόντων στοιχείων (προσόψεων, ψευδοροφών).
- **Μεγαλύτερη δυνατότητα αλλαγών** στη διαρρύθμιση των χώρων, προσθηκών, επεκτάσεων, ενισχύσεων για μεγαλύτερα φορτία.
- **Δυνατότητα αποσυναρμολόγησης της κατασκευής**.
- **Ο επιμερισμός των φορτίων στα μέλη της κατασκευής**: οφείλεται στο σύνθετο σκελετό των μεταλλικών κατασκευών.
- Η ροή όλων των φορτίων εκτός του σεισμού είναι επικάλυψη, δευτερεύουσες δοκοί, κύριοι φορείς, θεμελίωση.
- Θεωρώντας τον άνεμο ως κύρια δράση στην κατασκευή, τότε ο άνεμος των πλάγιων όψεων παραλαμβάνεται τελικώς από τους κύριους φορείς (πλαίσια), ενώ ο άνεμος των προσόψεων από τους αντιανέμιους συνδέσμους και τους μετωπικούς στύλους.
- **Ο εύκολος εντοπισμός των βλαβών**: οποιαδήποτε αστοχία γίνεται αμέσως αντιληπτή και οπτικά αφού μιλάμε για μόνο ένα υλικό. Άλλοτε τα μεγάλα βέλη κάμψης, άλλοτε τα τοπικά «τσακίσματα» των διατομών που οφείλονται σε τοπικό λυγισμό και άλλοτε η απόκλιση του κορμού των διατομών από την κατακόρυφο που οφείλονται σε πλευρικό ή στρεπτοκαμπτικό λυγισμό, είναι καταφανείς ενδείξεις τοπικής ή καθολικής αστοχίας ενός μέλους ή και τμήματος του φορέα.
- **Ευκολότερη εκτέλεση εργασιών αποκατάστασης βλαβών**: Αυτό συνεπάγεται μεγάλη διάρκεια ζωής των μεταλλικών κατασκευών.
- **Δυνατότητα ανακύκλωσης του χάλυβα**: Είναι δυνατόν τα μεταλλικά μέλη να καθαιρεθούν, να σταλούν σε χυτευτήρια όπου και γίνεται ανάτηξη για να

προκύψουν νέα μέλη. Η σκουριά (δηλαδή η οξείδωση του μετάλλου) ξεκινά από την εξωτερική του επιφάνεια ,προχωρά μέχρι ένα σημείο και μετά σταματά, αποτελεί δηλαδή ένδειξη του χρόνου έκθεσης του μετάλλου στο περιβάλλον αλλά είναι και η ασπίδα προστασίας του.

- **Μεγάλο πλήθος διατομών που διατίθεται στην αγορά.**
- Μεγάλο πλήθος συνδέσεων που διατίθεται στην αγορά.
- Η εξέλιξη της τεχνολογίας των συνδέσεων.

Έναντι των ανωτέρω, υπάρχουν και ορισμένα **μειονεκτήματα** τα οποία συνοψίζονται παρακάτω (Παγκόσμια Ένωση Χάλυβα, 2017):

- **Απαίτηση βιομηχανικής εγκατάστασης για την προετοιμασία του υλικού.**
- **Απαίτηση εξειδικευμένου εργατοτεχνικού προσωπικού.**
- **Αυξημένο κόστος μελέτης.**
- **Ειδικός υπολογισμός συνδέσεων.**
- **Αυξημένο κόστος πυροπροστασίας:** όταν ο χάλυβας μιας κατασκευής θερμανθεί σε θερμοκρασία 700οC χάνει σημαντικό μέρος της αντοχής του και υφίσταται σημαντικές επιμηκύνσεις ,που γίνονται πολύ επικίνδυνες για την ασφάλεια του κτιρίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ταχύτερη ανάπτυξη μεγάλων βελών κάμψης, τα οποία τελικά οδηγούν στη μερική ή και ολική κατάρρευση του φορέα, χωρίς να έχουν μεταβληθεί τα φορτία που φέρει. Μέθοδοι πυροπροστασίας της κατασκευής είναι:
 - Διάφορες επαλείψεις και επιστρώσεις, που σχηματίζουν ένα στρώμα διοξειδίου του άνθρακα υψηλής θερμομονωτικότητας.
 - Πληρώσεις του πυρήνα με μπετόν.
 - Προκαλύμματα, όπως ψευδοροφές, ποδιές, παραπέτα και λοιπές προστατευτικές κατασκευές από πυρίμαχα υλικά.
 - Πληρώσεις των σωληνωτών διατομών με νερό.
 - Χωρισμός σε ζώνες πυρομόνωσης.
 - Φράγματα πυρός.
 - Εξασφάλιση και προστασία οδών διαφυγής.
 - Ανιχνευτές θερμότητας.
 - Εγκαταστάσεις επισήμανσης πυρκαγιάς.
 - Σταθερά και κινητά μέσα κατάσβεσης.
- **Αυξημένο κόστος αντιδιαβρωτικής προστασίας.**

- **Αυξημένο κόστος του υλικού** (ως εισαγόμενο για την Ελλάδα προϊόν).
- **Αυξημένο κόστος συντήρησης** (κυρίως για πρόληψη της σκουριάς): Προκαλείται λόγω οξειδωσης από το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα και επιδεινώνεται με την παρουσία υγρασίας και αναθυμιάσεων.

Ωστόσο, παρατηρώντας προσεκτικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεταλλικών κατασκευών συμπεραίνεται ότι ο μεγάλος αριθμός πλεονεκτημάτων τους, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη τεχνολογιών και μεθοδολογιών για την αντιμετώπιση των διάφορων μειονεκτημάτων τους, τις καθιστά δίκαια την πλέον διαδεδομένη μέθοδο κατασκευών που εφαρμόζεται στις μέρες μας και που σίγουρα θα γνωρίσει και περαιτέρω ανάπτυξη στο μέλλον.

1.4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΧΑΛΥΒΑ

Ο χάλυβας παρασκευάζεται με **εξανθράκωση του χυτοσιδήρου**. Ταυτοχρόνως απομακρύνονται κατά το δυνατόν το **θείο και ο φωσφόρος**, στοιχεία τα οποία όπως προαναφέρθηκε είναι **επιβλαβή**, και ρυθμίζεται η περιεκτικότητα σε **μαγγάνιο και πυρίτιο**, στοιχεία τα οποία εμπεριέχονται στον **ακατέργαστο σίδηρο**. Οι παραπάνω ρύποι απομακρύνονται δια της καύσης με την πρόσδοση οξυγόνου. Η επιθυμητή χημική σύσταση του χάλυβα επιτυγχάνεται με την αποξείδωση και την προσθήκη ασβέστου για την δέσμευση του φωσφόρου (**Παγκόσμια Ένωση Χάλυβα, 2017**).

Για την αποφυγή δημιουργίας **φυσαλίδων**, οι οποίες μπορούν να δημιουργηθούν κατά την χύτευση του ρευστού χάλυβα εξαιτίας **υπολειμμάτων οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα**, προστίθενται στο κράμα συμπληρωματικώς **πυρίτιο, μαγγάνιο, ασβέστιο ή αλουμίνιο**. Οι κατ' αυτόν τον τρόπο επεξεργασμένοι χάλυβες ονομάζονται ησυχασμένοι. Τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι **δεν επηρεάζονται από την γήρανση και συγκολλούνται ιδιαιτέρως καλά**.

Βάσει του τρόπου παρασκευής οι χάλυβες μπορούν να ταξινομηθούν ως ακολούθως (**Παγκόσμια Ένωση Χάλυβα, 2017**):

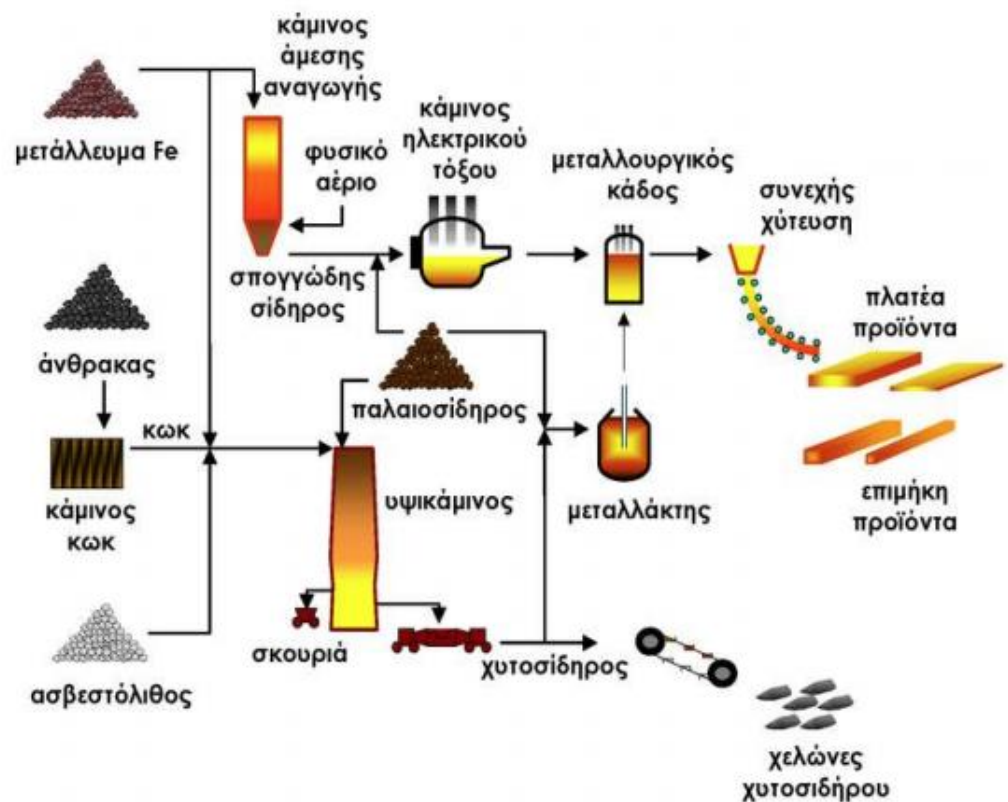
- **Ησυχασμένος χάλυβας**
- **Αφρίζων χάλυβας**
- **Χάλυβας τήξης**
- **Χάλυβας Χωνευτηρίου**
- **Κονιομεταλλουργικός Χάλυβας**

Οι τρεις βασικές μέθοδοι παραγωγής χάλυβα είναι οι κάτωθι:

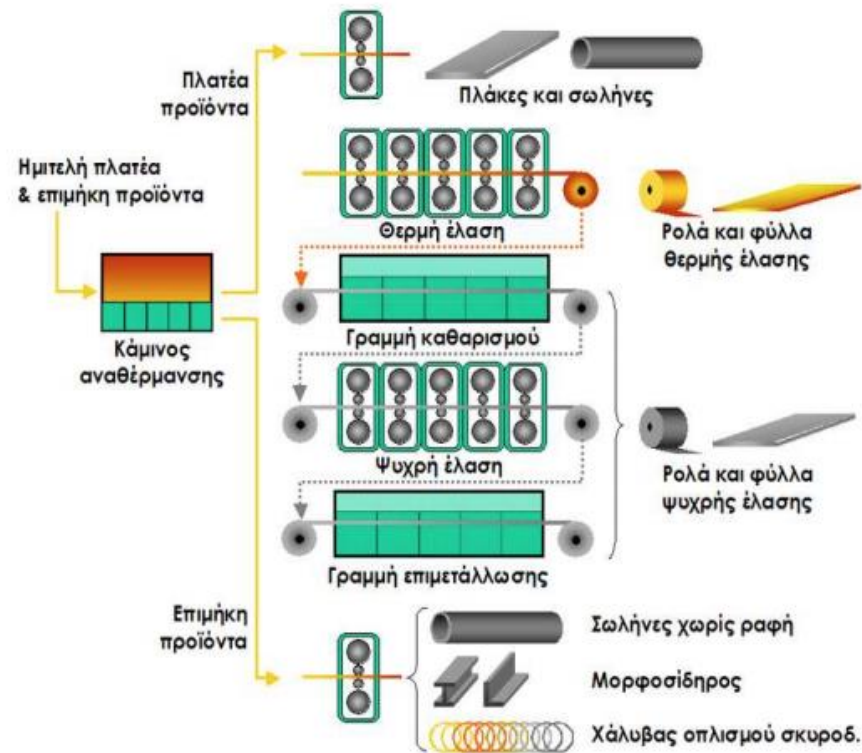
1) Με αναγωγή σιδηρομεταλλευμάτων σε υψικάμινο για την παραγωγή χυτοσίδηρου, και τη μετατροπή του χυτοσίδηρου σε χάλυβα μέσα σε μεταλλάκτη με εμφύσηση οξυγόνου,

2) Με την άμεση αναγωγή σιδηρομεταλλευμάτων - δηλαδή αναγωγή σε στερεά κατάσταση - σε φρεατώδη κάμινο για την παραγωγή σπογγώδους σιδήρου (αγγλ., Direct Reduced Iron ή DRI), και τη μετατροπή αυτού του σπογγώδους σιδήρου που προκύπτει από την διαδικασία σε χάλυβα μέσα σε κάμινο (κλίβανο) ηλεκτρικού τόξου, και

3) Με την ανάτηξη παλαιοσιδήρου (σκραπ) σε κάμινο (κλίβανο) ηλεκτρικού τόξου (αγγλ., Electric Arc Furnace - EAF).



Σχήμα 1.1 Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής χυτοσίδηρου και ημιτελών προϊόντων χάλυβα (Wikipedia, 2017)



Σχήμα 1.2 Σχηματικό διάγραμμα της παραγωγής τελικών προϊόντων χάλυβα
(Wikipedia, 2017)

Σήμερα, στην παγκόσμια χαλυβουργία οι μέθοδοι παρασκευής χάλυβα που κυριαρχούν είναι η μέθοδος εμφύσησης οξυγόνου και ακολουθεί η μέθοδος της ηλεκτρικής καμίνου. Συνοπτικά, οι μέθοδοι παρασκευής χάλυβα είναι οι κάτωθι:

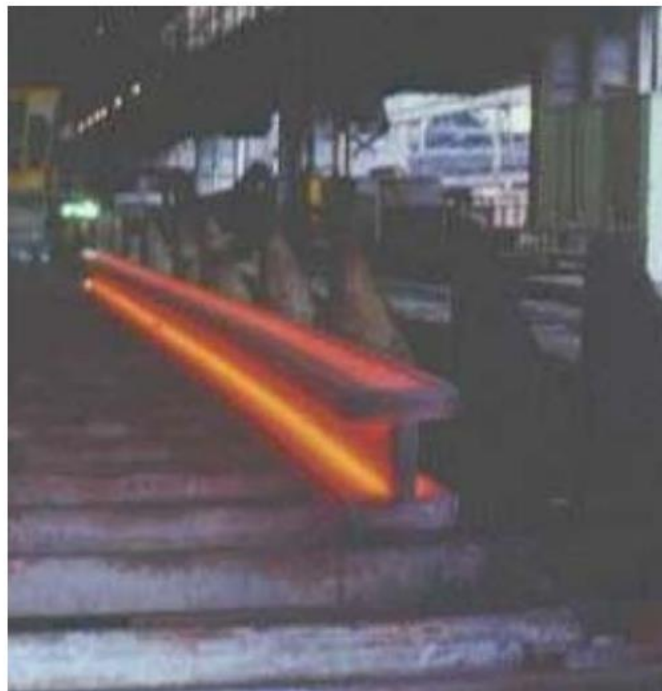
- **Μέθοδος Bessemer**
- **Μέθοδος Siemens – Martin (ανοικτής εστίας)**
- **Μέθοδος εμφύσησης οξυγόνου**
- **Μέθοδος ηλεκτρικής καμίνου**

1.5 Η ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΓΙΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

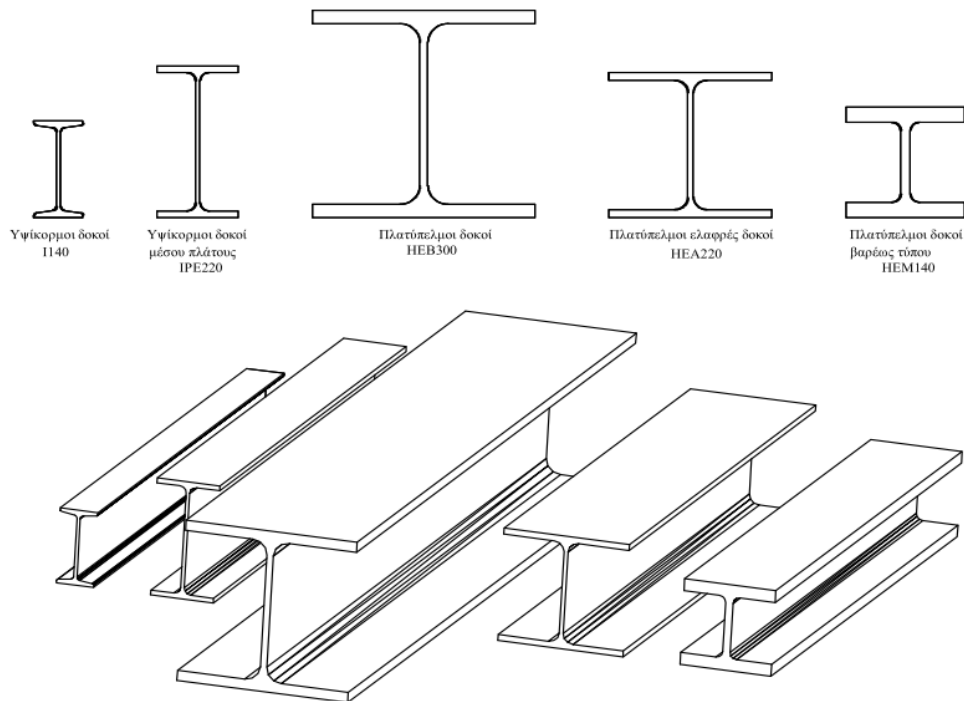
Η μορφοποίηση του χάλυβα πραγματοποιείται με όλες τις προαναφερθείσες μεθόδους αλλά την κύρια θέση έχουν οι τεχνικές πλαστικής διαμόρφωσης. Αυτό οφείλεται σε μια σειρά πλεονεκτημάτων όπως (portal.tee.gr):

- **Οικονομία του υλικού.** Οι τεχνικές πλαστικής διαμόρφωσης έχουν γενικά υψηλή απόδοση σε υλικό. Ιδιαίτερα η σφυρηλασία εν θερμώ λειτουργεί πρακτικά χωρίς τη δημιουργία αποκομμάτων (scrap).
- **Υψηλή παραγωγικότητα.** Τα μηχανήματα έχουν σχεδιασθεί για συνεχή παραγωγή.
- Απαιτούν σε ελάχιστες περιπτώσεις την επέμβαση μηχανουργικής επεξεργασίας.
- Εγγυώνται **υψηλότερο βαθμό ασφαλείας**, γιατί εξασφαλίζουν εσωτερική δομή του μετάλλου χωρίς εσωτερικά σφάλματα ή σε κάθε περίπτωση τα σφάλματα είναι ομοιομορφότερα και λεπτομερέστερα κατανεμημένα σε σύγκριση με τα χυτά.

Όσον αφορά τα προϊόντα χάλυβα που χρησιμοποιούνται στις μεταλλικές κατασκευές αυτά παλαιότερα κατασκευαζόταν με διέλαση. Ακόμη και σήμερα το μεγαλύτερο μέρος των μεταλλικών στοιχείων για την φέρουσα κατασκευή παράγεται με διέλαση. Η πρόοδος της κατασκευαστικής τεχνολογίας, η βελτίωση των μεθόδων προστασίας από διάβρωση και πυροπροστασία οδήγησαν στη μόρφωση και χρήση λεπτότοιχων διατομών ψυχράς ελάσεως. Το βασικότερο πλεονέκτημα της χρήσεως των λεπτότοιχων διατομών ψυχράς ελάσεως είναι η αυξημένη αντοχή με συνέπεια την μείωση του βάρους. Οι λεπτότοιχες διατομές ψυχράς ελάσεως χρησιμοποιούνται πλέον και ως φέροντα δομικά στοιχεία δευτερευούσης σημασίας αλλά και ως καλύψεις. Στην Εικόνα 1.2 παρουσιάζεται το τελικό στάδιο παραγωγής ενός χαλύβδινου δομικού στοιχείου. Στο Σχήμα 1.1 συνοψίζονται οι πρότυπες χαλύβδινες διατομές μορφής διπλού ταυ που χρησιμοποιούνται ευρέως κατά την κατασκευή κτιρίων από χάλυβα..



Εικόνα 1.2 Τελικό στάδιο θερμής έλασης μετάλλου (ψύξη πάνω σε κυλιόμενη ταινία)
(Ε.Μ.Π)



Σχήμα 1.1 Πρότυπες ελατές διατομές θερμής έλασης σχήματος διπλού ταυ (Ε.Μ.Π)

1.6 ΠΟΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΥΒΑ

Οι χάλυβες διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες (αγγλικά., grades), ανάλογα με την χημική τους σύσταση, την περαιτέρω κατεργασία τους, την κρυσταλλική τους δομή ή την τελική τους χρήση.

Ως προς την χημική τους σύσταση, οι χάλυβες ταξινομούνται ως εξής (ocw.aoc.ntua.gr):

- **Κοινοί ή ανθρακούχοι χάλυβες (αγγλ., carbon steels)**, οι οποίοι περιέχουν άνθρακα (έως 2,06%) και μικρό ποσοστό μαγγανίου (έως 1,65%), πυριτίου (έως 0,6%) και χαλκού (έως 0,6%). Χρησιμοποιούνται πολύ και συγκολλούνται εύκολα.

Με βάση τον περιεχόμενο άνθρακα, οι κοινοί χάλυβες διακρίνονται στις εξής υποκατηγορίες:

- Χάλυβες χαμηλού άνθρακα ή μαλακοί χάλυβες (mild steels, $C < 0,60\%$).
- Χάλυβες μέτριου άνθρακα (medium carbon steels, $0,30\% < C < 0,60\%$).

- Χάλυβες υψηλού άνθρακα (high carbon steels $0,60\% < C < 1,00\%$).
- Χάλυβες πολύ υψηλού άνθρακα (ultra-high carbon steels, $1,00\% < C < 2,00\%$).
- **Κραματωμένοι χάλυβες (alloy steels)**, δηλαδή κράματα σιδήρου με άλλα μέταλλα σε σημαντική περιεκτικότητα. Τέτοιοι είναι οι:
 - Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες ή χάλυβες χαμηλής κραμάτωσης, οι οποίοι περιέχουν συνήθως χρώμιο, μολυβδαίνιο, βανάδιο, νικέλιο κ.λπ. σε συνολικό ποσοστό που δεν ξεπερνά σε ποσοστό το 10% κ.β., όπως π.χ. οι εργαλειοχάλυβες ($0,7\% < C < 1,4\%$, $Mn < 0,3\%$).
 - Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες ή χάλυβες υψηλής κραμάτωσης όπως οι ανοξειδωτοι χάλυβες ($Cr > 10,5\%$), οι ταχυχάλυβες ($C \sim 0,7\%$, $Cr \sim 4,0\%$, $5,0\% < Mo < 10\%$, $1,5\% < W < 18,0\%$, $0\% < Co < 8,0\%$) κ.λπ.

Ανάλογα με την περαιτέρω κατεργασία τους, οι χάλυβες διακρίνονται σε (ocw.aoc.ntua.gr):

- **Χάλυβες διαμόρφωσης**, οι οποίοι υφίστανται περαιτέρω μηχανική κατεργασία (έλαση, διέλαση κ.λπ.).
- **Χυτοχάλυβες**, οι οποίοι παράγονται απευθείας με χύτευση υπό μορφή πλινθωμάτων («χελώνων») και επαναχυτεύονται για την κατασκευή διαφόρων εξαρτημάτων.

Τέλος, συχνά γίνεται λόγος για φερριτικούς, περλιτικούς, μαρτενσιτικούς, μπαινιτικούς κ.λπ. χάλυβες ανάλογα με την κύρια κρυσταλλική φάση τους. Η ονοματολογία των χαλύβων γίνεται σύμφωνα με διάφορα συστήματα τυποποίησης όπως DIN, ASTM, ΕΛΟΤ κ.λπ..

Συχνά υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στο όνομα μιας κατηγορίας χάλυβα και την αντοχή της συγκεκριμένης κατηγορίας χάλυβα σε εφελκυσμό. Επί παραδείγματι, το πρότυπο ΕΛΟΤ 1421-3 ορίζει ότι ο χάλυβας B500C πρέπει να έχει όριο διαρροής μεγαλύτερο από 500 MPa (500 N/mm²).

1.7 ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΧΑΛΥΒΑ

Τα χαλυβουργεία παράγουν ημιτελή και τελικά προϊόντα χάλυβα. Τα ημιτελή προϊόντα χάλυβα είναι συνήθως δοκοί τετραγωνικής διατομής («μπιγιέτες») με ακμή περίπου 10 εκ. ή κυκλικής διατομής με διάμετρο περίπου 25 εκ. (κυλινδρικές «μπιγιέτες» ή «κορμοί») και μήκος μερικά μέτρα, ή ακόμα πλατιά πρίσματα (πλάκες ή «σλαμπ») διατομής 10 εκ. x 100 εκ. και με μήκος μερικών μέτρων.

Η παραγωγή των ημιτελών προϊόντων γίνεται με συνεχή χύτευση σε μήτρες από χαλκό, που ψύχονται με νερό και με έλαση σε ειδικά έλαστρα. Τα ημιτελή προϊόντα αναθερμαίνονται και υποβάλλονται σε έλαση, διέλαση, ολκή κ.λπ. για την παραγωγή των τελικών προϊόντων, που μπορεί να είναι πλατέα ή επιμήκη.

Τόσο τα πλατέα προϊόντα όσο και τα επιμήκη παράγονται με θερμή ή ψυχρή έλαση. Η θερμή έλαση γίνεται σε θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 925 °C, οπότε οι παραμορφωμένοι κόκκοι του μετάλλου ανακρυσταλλώνονται.

Η ψυχρή έλαση ωστόσο επιτρέπει την παραγωγή προϊόντων με διαστάσεις πολύ πλησιέστερες στις τελικές διαστάσεις που θέλει ο καταναλωτής. Τα πλατέα προϊόντα διακρίνονται σε πλάκες ή χονδρές κατασκευαστικές λαμαρίνες (plates), με πάχος 1 έως 20 εκ. για χρήση στην ναυπηγική, την οικοδομή, κ.ά., και σε λεπτές λαμαρίνες σε ρολά ή επίπεδα φύλλα (strips), με πάχος 0,1 έως 1 εκ. για την αυτοκινητο-βιομηχανία, την βιομηχανία οικιακών συσκευών, την οικοδομή, κ.ά.

Τα επιμήκη προϊόντα μπορεί να είναι ράβδοι ή χάλυβας σπλισμού σκυροδέματος (μπετόβεργα· αγγλ., reinforcing bars), ελάσματα ή λάμες (τσέρκι - narrow strips), μορφοσίδηρος (διαμορφωμένης διατομής, όπως γωνίες, ταυ, κ.λπ. - profiles), κοίλες δοκοί (αγγλ. hollow sections), σωλήνες με ή χωρίς ραφή (welded or seamless tubes), κ.ά.

Στα επιμήκη προϊόντα συμπεριλαμβάνεται και το σύρμα (αγγλ. wire). Εκτός από τα πλατέα και τα επιμήκη προϊόντα, ο χάλυβας διατίθεται ακόμα στην μορφή χυτής χελώνας (χυτοχάλυβας). Πολλές χαλυβουργίες διαθέτουν φύλλα ή ρολούς επιψευδαργυρωμένου (γαλβανισμένου), επικασσιτερωμένου και επιχρωματισμένου χάλυβα (**Ε.Μ.Π**).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο όρος «**μεταλλικές κατασκευές**», έχει επικρατήσει να αναφέρεται κυρίως σε κατασκευές με φέροντα οργανισμό από χάλυβα. Ανάλογα με το είδος της καταπόνησης των μελών τους, αλλά και τη μορφή τους, οι μεταλλικές κατασκευές διακρίνονται στις ακόλουθες τρεις κυρίως κατηγορίες, οι οποίες εμφανίζονται είτε μεμονωμένα, είτε και σε συνδυασμό μεταξύ τους (www.profisol.gr):

(α) Πλαισιωτές κατασκευές.

Πρόκειται για επίπεδους ή χωρικούς φορείς που συντίθεται από ραβδωτά κυρίως μέλη, μέσω στερεών ή αρθρωτών κόμβων. Τα μέλη των κατασκευών της κατηγορίας αυτής καταπονούνται από αξονικές και διατμητικές δυνάμεις, καθώς και καμπτικές και στρεπτικές ροπές. Βιομηχανικά κτίρια και πολυώροφα κτίρια γραφείων, αποθηκευτικοί χώροι, χωροδικτυώματα, διάφορες μορφές σιδηρών γεφυρών, είναι μερικές από τις κατασκευές που ανήκουν στην κατηγορία αυτή.

(β) Κελυφωτές κατασκευές

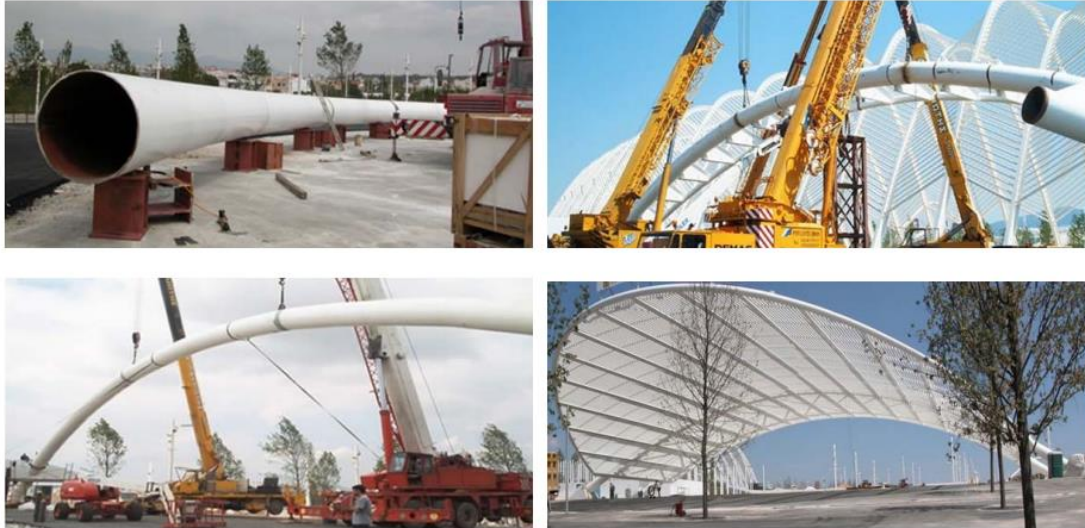
Συντίθενται κυρίως από επιφανειακά μέλη (επίπεδα ή καμπυλωμένα χαλύβδινα φύλλα), με προεξάρχουσα καταπόνηση τον εφελκυσμό. Πολλές φορές συνδυάζονται και με ραβδωτά μέλη, τα οποία είτε προσδίδουν ακαμψία στο φορέα, ή ακόμη μεταφέρουν μέρος των φορτίων στο έδαφος. Στην κατηγορία αυτή παραδείγματος χάριν ανήκουν οι δεξαμενές αποθήκευσης υγρών, σιλό, καπνοδόχοι και το κυρίως σώμα των πλοίων, αεροπλάνων και διαστημικών σκαφών.

(γ) Αναρτημένες κατασκευές

Στις κατασκευές αυτές το βασικό κατασκευαστικό στοιχείο είναι τα καλώδια (ευθύγραμμα ή καμπυλωμένα), τα οποία υπόκεινται σε εφελκυστικές δυνάμεις. Οι οροφές χώρων μεγάλης επιφάνειας και οι κρεμαστές γέφυρες αποτελούν χαρακτηριστικά δείγματα της κατηγορίας αυτής.

2.2 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΙΔΙΑΙΤΕΡΩΝ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ:

Στις εικόνες που ακολουθούν (2.1 έως και 2.3) παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα μεταλλικών κατασκευών ιδιαίτερης σημασίας. Από τα παραδείγματα αυτά αναδεικνύεται και η ευελιξία του χάλυβα ως υλικού δόμησης που συνεπάγεται πληθώρα εφαρμογών του σε διαφορετικής φύσης έργα.



Εικόνα 2.1 Στέγαστρα εισόδων Ολυμπιακού Αθλητικού Κέντρου Αθηνών (Wikipedia)



Εικόνα 2.2 Κατασκευή σηράγγων με τη μέθοδο cut and cover (Wikipedia).



Εικόνα 2.3 Burj Khalifa - ο υψηλότερος ουρανοξύστης στον κόσμο, με ύψος 828 m (Google).

2.3 ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

2.3.1 Βασικές αρχές

Ο σχεδιασμός μιας χαλύβδινης κατασκευής αρχίζει από τον καθορισμό των στόχων της κατασκευής ο οποίος οδηγεί στην επιλογή της μορφής και καταλήγει στον ακριβή υπολογισμό και τα σχέδια των κατασκευαστικών λεπτομερειών (σχέδια εφαρμογής) του κτιρίου. Έχει δε ως αντικείμενο την υλοποίηση μιας κατασκευής η οποία να ικανοποιεί τα επιλεγέντα κριτήρια ασφάλειας, λειτουργικότητας και οικονομίας ή και άλλα δευτερεύοντα.

Η μελέτη ξεκινά από τον καθορισμό των απαιτήσεων του εντολέα ο οποίος συνήθως παρέχει στον μελετητή τα απαραίτητα στοιχεία σχετικά με το σκοπό του έργου και τα όρια του προϋπολογισμού.

Τα στοιχεία αυτά αποτελούν την αρχική πηγή πληροφοριών τις οποίες ο μηχανικός πρέπει να λάβει υπόψη, να τις επεξεργαστεί στα πλαίσια της επιστήμης, των κανονισμών

και της πρακτικής της αγοράς και να τις βελτιώσει έτσι ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι ένα σωστό από πλευράς σχεδιασμού χαλύβδινο κτίριο.

Την προκαταρκτική αυτή φάση σχεδιασμού ακολουθεί ο καθαυτού σχεδιασμός του έργου. Είναι προφανές ότι καθ' όλη τη διάρκεια της φάσης αυτής απαιτείται συνεχής αλληλοενημέρωση και ανταλλαγή απόψεων των εμπλεκομένων μερών ώστε να προκύψει εν τέλει το βέλτιστο αποτέλεσμα (eur-lex.europa.eu).

2.3.2 Σχεδιαστικές απαιτήσεις

Ένα δόμημα πρέπει να μελετάται και να κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε κατά την σκοπούμενη διάρκεια ζωής του και μέσα στα κατάλληλα πλαίσια αξιοπιστίας και οικονομίας (eur-lex.europa.eu):

- Να έχει **επαρκή αντοχή, λειτουργικότητα και αξιοπιστία.**
- Να παραμένει **κατάλληλο για την χρήση** για την οποία προορίζεται
- Να αναλαμβάνει όλες τις **δράσεις και επιρροές**, οι οποίες είναι ενδεχόμενο να συμβούν κατά τη διάρκεια κατασκευής και χρήσης του.
- Να είναι **εύκολα και οικονομικά συντηρούμενο και καθαριζόμενο.**
- Να έχει **υψηλή αισθητική.**

Εκτός από τις παραπάνω γενικές απαιτήσεις πρέπει κατά περίπτωση να λαμβάνεται μέριμνα ώστε το χαλύβδινο κτίριο να ικανοποιεί και ένα πλήθος ειδικών απαιτήσεων όπως είναι ενδεικτικά οι παρακάτω (eur-lex.europa.eu):

- Να υπάρχει πρόβλεψη τοποθέτησης και δυνατότητας κίνησης γερανογεφυρών (cranes) και κινητών φορτίων μονής τροχιάς (monorails), καθώς επίσης και ανελκυστήρων.
- Ο φυσικός φωτισμός να είναι σωστός.
- Ο κλιματισμός του κτιρίου να καλύπτει πλήρως τις ανάγκες σε θέρμανση και ψύξη.
- Ο φυσικός ή τεχνητός αερισμός του κτιρίου να είναι ο καλύτερος δυνατός.
- Η στεγάνωση των εσωτερικών χώρων να είναι απόλυτη.
- Η διάταξη των φερόντων στοιχείων χάλυβα να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την κίνηση μηχανημάτων (π.χ. ανυψωτικών μηχανημάτων) και τη μεταφορά ογκωδών φορτίων.
- Να υπάρχει πρόβλεψη για μελλοντικές επεκτάσεις του κτιρίου και πιθανή αλλαγή χρήσης του.

2.3.3 Προϋπολογισμός εργασιών και κόστος συντήρησης

Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός ενός χαλύβδινου κτιρίου πρέπει να περιλαμβάνει και τον ακριβή υπολογισμό του κόστους ανέγερσης αλλά και πρόβλεψη του κόστους συντήρησής του. Επί παραδείγματι, αξίζει να σημειωθεί ότι οι λύσεις με συγκολλητές διατομές και πολύπλοκες συνδέσεις αντιστοιχούν σε υψηλό κόστος εργατικών ενώ αντίθετα χρήση εν θερμώ εξηλασμένων διατομών οι οποίες κυκλοφορούν στην αγορά σε συνδυασμό με απλές συνδέσεις οδηγούν σε πιο οικονομική κατασκευή.

Αντίθετα όμως, πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα ώστε να προβλέπεται εύκολη συντήρηση της χαλύβδινης κατασκευής. Λαμβανομένου υπόψη του γεγονότος ότι οι κατασκευές χάλυβα αν δεν συντηρηθούν έγκαιρα και με το σωστό τρόπο έχουν προβλήματα διάβρωσης και συνεπώς έλλειψη ασφάλειας λόγω μείωσης της αντοχής απαιτείται εξ αρχής να υπάρχει σχετική μελέτη και να έχει διερευνηθεί το κόστος συντήρησης.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι εφόσον στον προϋπολογισμό κατασκευής ενός χαλύβδινου τεχνικού έργου προστεθεί το κόστος συντήρησής του με ορίζοντα ορισμένων ετών ή δεκαετιών, τότε οι λύσεις οι οποίες με μια πρώτη εξέταση μοιάζουν πολύ ακριβότερες από μία άλλη λύση ενδεχομένως να αποδειχθούν ανταγωνιστικές διότι έχουν πολύ χαμηλότερο κόστος συντήρησης κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους.

2.3.4 Μέθοδοι ανάλυσης χαλύβδινων κατασκευών

Μια κατασκευή από χάλυβα μπορεί να σχεδιαστεί είτε ως ένα στατικά ορισμένος (statically determinate) είτε ως ένας στατικά αόριστος (statically redundant) φορέας.

Στην πρώτη περίπτωση οι εσωτερικές δυνάμεις και ροπές υπολογίζονται με την χρησιμοποίηση των εξισώσεων ισορροπίας ενώ στη δεύτερη περίπτωση είτε με ελαστική καθολική ανάλυση (elastic global analysis) είτε με πλαστική καθολική ανάλυση (plastic global analysis).

Ελαστική καθολική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των εσωτερικών δυνάμεων και ροπών μιας κατασκευής σε όλες τις περιπτώσεις, ενώ πλαστική καθολική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο εφόσον οι διατομές και ο δομικός χάλυβας ικανοποιούν τις απαιτήσεις τις οποίες θέτει ο Ευρωκώδικας 3.

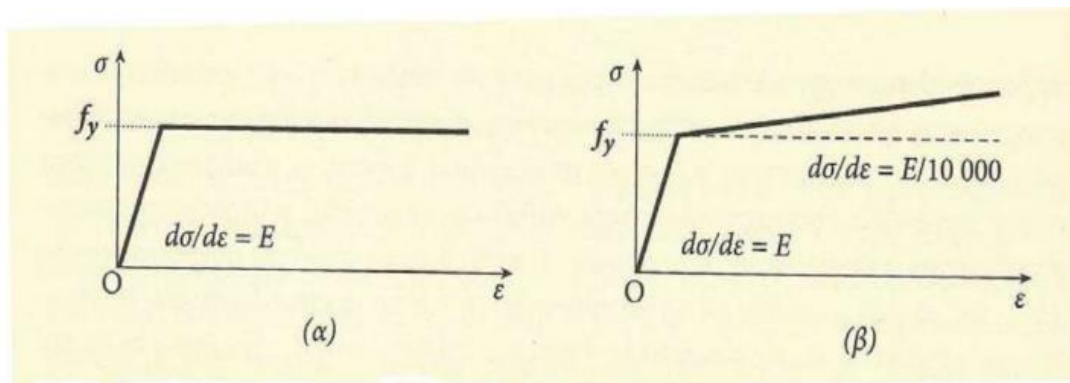
Συνήθως τα φορτία διατομής υπολογίζονται στα πλαίσια της θεωρίας α΄ τάξης, δηλαδή βάσει της αρχικής γεωμετρίας του φορέα.

Όταν όμως υπάρχει κίνδυνος απώλειας ευστάθειας της κατασκευής τότε συχνά οι απλοποιημένες μέθοδοι υπολογισμού αποδεικνύονται ανεπαρκείς και απαιτείται η προσφυγή στη θεωρία β΄ τάξης όπου λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των παραμορφώσεων στην εντατική κατάσταση της κατασκευής.

Η ελαστική καθολική ανάλυση βασίζεται στην υπόθεση ότι η σχέση τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων του υλικού είναι γραμμική, όποια και να είναι η στάθμη της τάσης. Αυτή η υπόθεση μπορεί να διατηρείται και για τις δύο, πρώτης τάξης και δεύτερης τάξης ελαστική ανάλυση, ακόμα και όταν η αντίσταση της διατομής του δομικού στοιχείου βασίζεται σε πλαστικό υπολογισμό.

Η πλαστική ελαστική ανάλυση βασίζεται στην υπόθεση ότι ο φορέας βρίσκεται στην κατάσταση τελικής αστοχίας και υπολογίζεται το φορτίο αστοχίας με προσεγγιστικούς τρόπους. Η πλαστική καθολική ανάλυση μπορεί να εφαρμοστεί είτε μέσω μιας στερεοπλαστικής (rigidplastic) είτε μέσω μιας ελαστοπλαστικής (elastic - plastic) μεθόδου.

Στην ελαστοπλαστική ανάλυση, που συνήθως εφαρμόζεται, για τις ποιότητες δομικού χάλυβα του Ευρωκώδικα 3 χρησιμοποιείται συνήθως η διγραμμική σχέση τάσης-παραμόρφωσης του Σχήματος 2.1(α) ή (ακόμη καλύτερα) του Σχήματος 2.1(β) (**Παγκόσμια Ένωση Χάλυβα, 2017**).



Σχήμα 2.1 (α) Διγραμμική σχέση τάσης-παραμόρφωσης, (β) εναλλακτική διγραμμική σχέση τάσης-παραμόρφωσης για ελαστοπλαστική ανάλυση (**Παγκόσμια Ένωση Χάλυβα, 2017**).

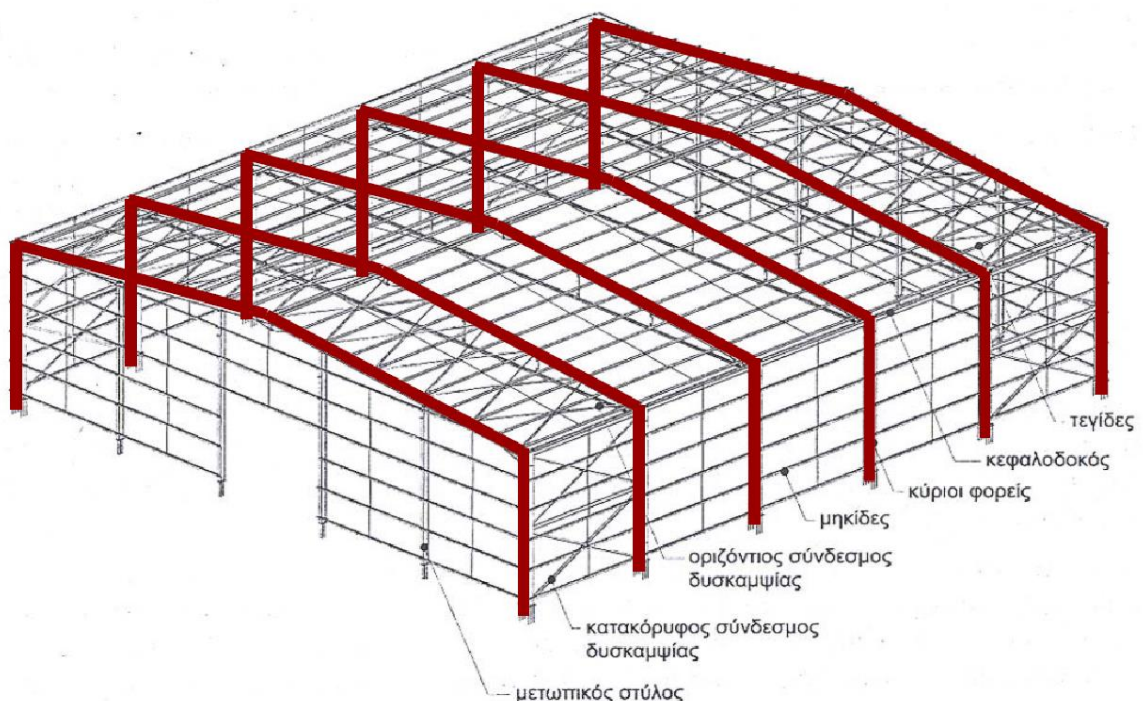
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΛΗ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΥΠΟ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΑ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σε τυπικές μεταλλικές κατασκευές, τα μέλη που δέχονται εγκάρσια φορτία ανήκουν στις παρακάτω κατηγορίες (Σοφιανόπουλος):

- Κύριοι φορείς (Εικόνα 3.1)
- Τεγίδες
- Μηκίδες (πλευρικών και μετωπικών) όψεων
- Μετωπικοί στύλοι
- Υποστυλώματα και δοκοί πολυώροφων κτιρίων (Εικόνα 3.2)
- Δοκοί γεφυρών (Εικόνα 3.3)



Εικόνα 3.1 Κύριοι φορείς μεταλλικού κτιρίου που δέχονται εγκάρσια φορτία (Ε.Μ.Π.)



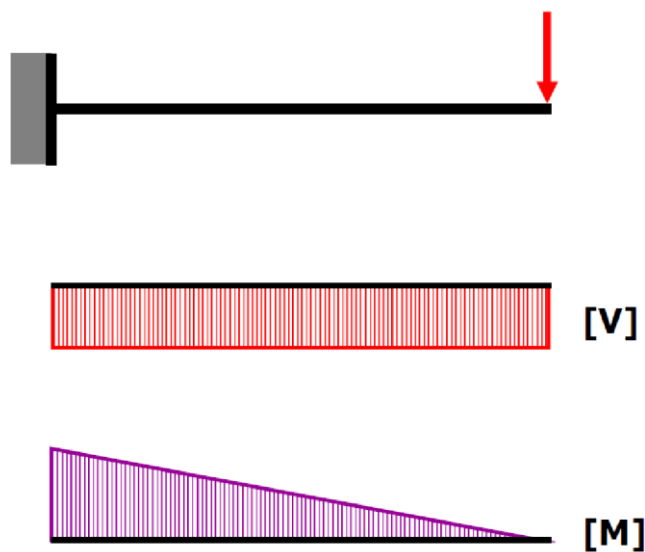
Εικόνα 3.2 Υποστυλώματα και δοκοί πολυώρων κτιρίων (Ε.Μ.Π.)



Εικόνα 3.3 Μεταλλικές δοκοί γεφυρών (Ε.Μ.Π.)

3.2 ΕΝΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕΛΩΝ ΥΠΟ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΦΟΡΤΙΑ

Υπό τη δράση των ασκούμενων εγκάρσιων φορτίων, τα μέλη των μεταλλικών κατασκευών καταπονούνται είτε σε απλή κάμψη ή σε συνδυασμό κάμψης και διάτμησης. Απλούστερες περιπτώσεις τέτοιων στοιχείων είναι οι αμφιέριστες δοκοί και οι πρόβολοι. Τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών για την περίπτωση ενός προβόλου υπό τη δράση ενός συγκεντρωμένου φορτίου στο ελεύθερο άκρο του εικονίζονται στο Σχήμα 3.1. Αντίστοιχο πρόβλημα εξετάστηκε με τη χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

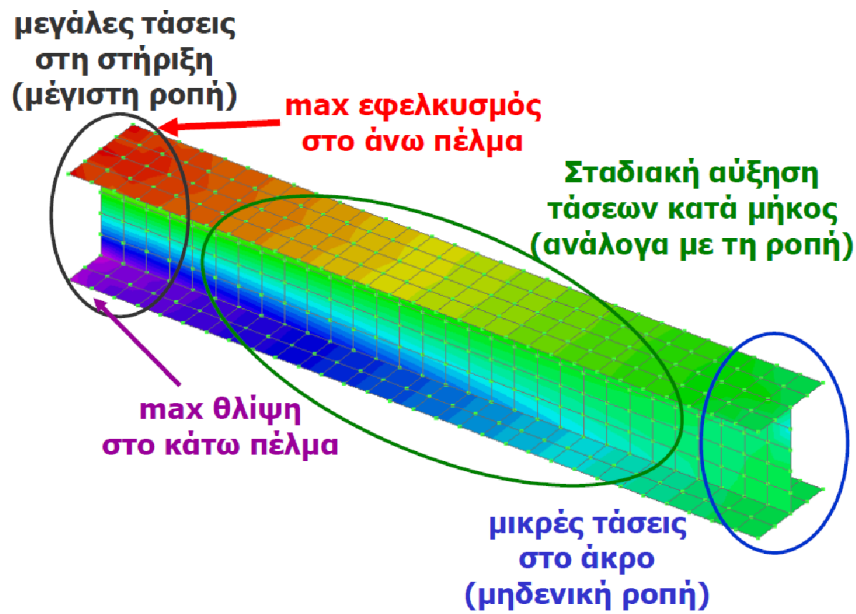


Σχήμα 3.1 Καμπτόμενο στοιχείο και διαγράμματα εντατικών μεγεθών (Ε.Μ.Π.)

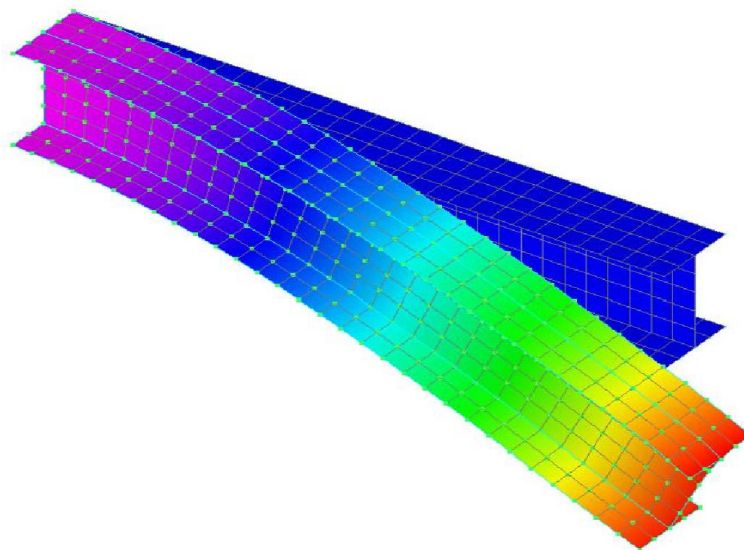
Η ροπή κάμψης οδηγεί στην ανάπτυξη ορθών τάσεων (εφελκυστικών και θλιπτικών), με κατανομή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, ενδεικτικά για ένα μέλος με διατομή «I». Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η παραμόρφωση του ίδιου μέλους.

Θεωρώντας την περίπτωση απλής κάμψης, για μια διατομή χαλύβδινου μέλους ροπής αδράνειας I η οποία παραλαμβάνει ροπή M , η αναπτυσσόμενη τάση $\sigma(z)$ δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma(z) = (M / I) \cdot z \quad (1)$$



Σχήμα 3.2 Κατανομή ορθών τάσεων σε καμπτόμενο μεταλλικό στοιχείο (Ε.Μ.Π.)



Σχήμα 3.3 Παραμόρφωση μεταλλικού προβόλου (Ε.Μ.Π.)

Η τάση αυτή λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της για $z = z_{\max}$ (στην ακρότατη ίνα της διατομής), οπότε:

$$\sigma_{\max} = (M / I) \cdot z_{\max} \quad (2)$$

Επομένως, η μέγιστη ροπή η οποία μπορεί να παραληφθεί ελαστικά από τη διατομή αντιστοιχεί σε:

$$\sigma_{\max} = (f_y / \gamma_{M0}) \quad (3)$$

όπου f_y είναι η τάση διαρροής και γ_{M0} επιμέρους συντελεστής ασφάλειας για αντίσταση της διατομής σε πλήρη πλαστικοποίηση. Οι τιμές του γ_{M0} εμφανίζονται να διαφέρουν ελαφρά από κράτος σε κράτος όπου έχει εισαχθεί και χρησιμοποιείται ο Ευρωκώδικας 3. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές του γ_{M0} κυμαίνονται από 1.0 έως 1.10. Στην Ελλάδα ισχύει $\gamma_{M0} = 1.0$.

Στην περίπτωση όπου θεωρείται ελαστική κατανομή της τάσης κατά το ύψος της διατομής, η ελαστική ροπή η οποία παραλαμβάνεται από τη διατομή δίνεται από τη σχέση:

$$M = (I / z_{\max}) \cdot (f_y / \gamma_{M0}) \quad (4)$$

Ο λόγος (I / z_{\max}) ονομάζεται ελαστική αντίσταση (elastic resistance) της διατομής και συμβολίζεται ως W_{el} . Ενδεικτικά, εάν η διατομή είναι ορθογωνική με πλάτος b και ύψος h , τότε:

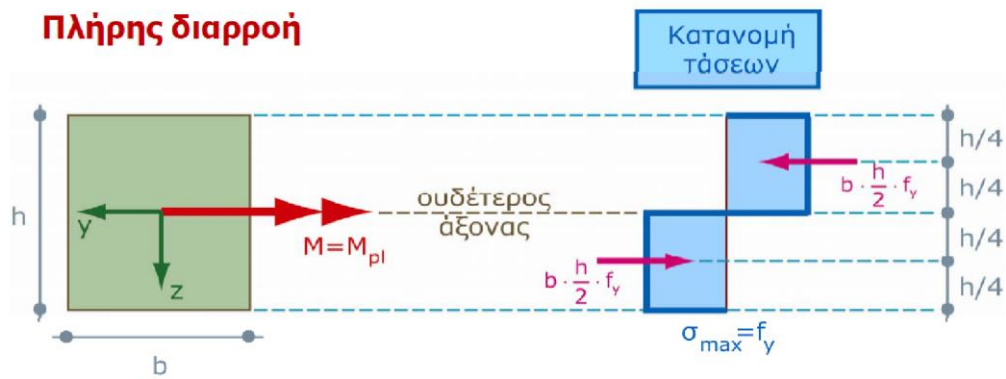
$$z_{\max} = h / 2 \quad (5)$$

οπότε η ελαστική αντίσταση είναι ίση με:

$$W_{el} = (bh^3 / 12) / (h/2) = bh^2 / 6 \quad (6)$$

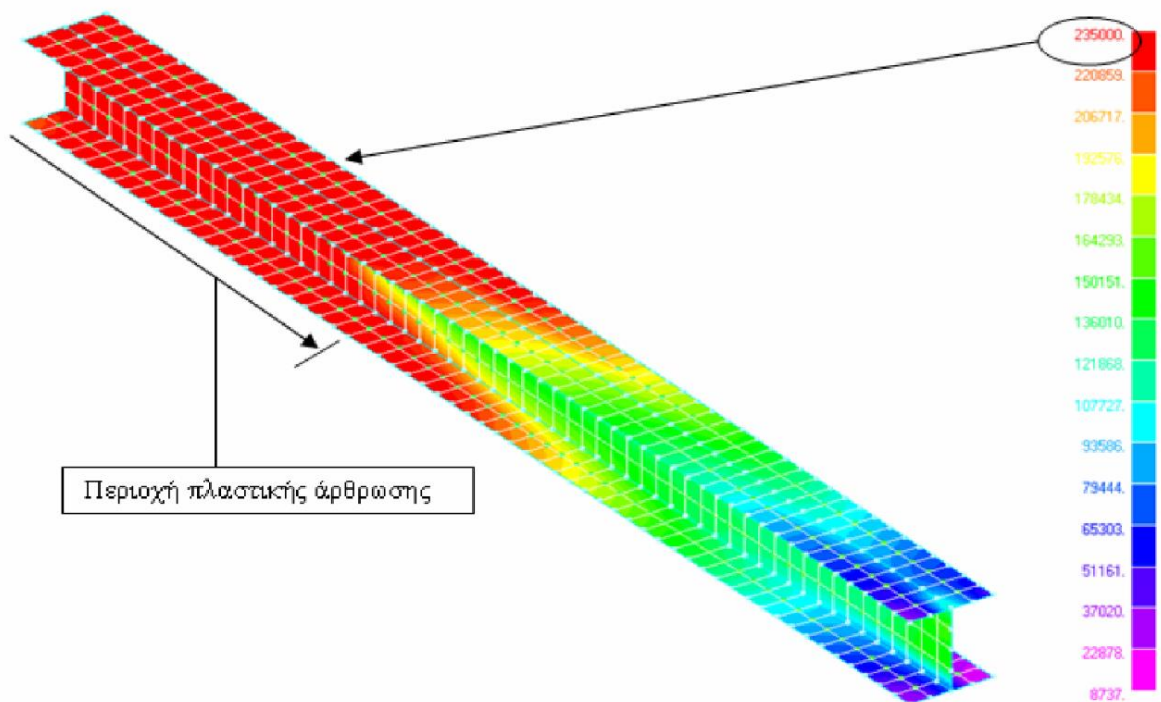
3.3 ΕΛΑΣΤΟΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΑΡΘΡΩΣΗ

Εφόσον θεωρηθεί ότι η διαρροή του υλικού δεν περιορίζεται μόνο στις ακρότατες ίνες αλλά εισχωρεί και επεκτείνεται εντός της διατομής και σε τελική φάση η τάση λαμβάνει σε όλα τα σημεία της διατομής την τιμή της τάσης διαρροής τότε συμβαίνει πλήρης πλαστικοποίηση της διατομής η οποία ισοδυναμεί με δημιουργία άρθρωσης στο σημείο αυτό. Σχετική η κατανομή τάσεων που εικονίζεται για ορθογωνική διατομή (ενδεικτικά) στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Κατανομή τάσεων κατά την πλήρη διαρροή (Ε.Μ.Π.)

Αυτή είναι η επονομαζόμενη πλαστική άρθρωση (plastic hinge). Η ροπή η οποία παραλαμβάνεται τότε από τη διατομή ονομάζεται ροπή πλαστικοποίησης ή πλαστική ροπή (Plastic moment) και αντίστοιχα η αντίσταση της διατομής ονομάζεται πλαστική αντίσταση (plastic resistance) και συμβολίζεται ως W_{pl} . Η πλαστικοποιημένη ζώνη του μέλους επεκτείνεται κατά μήκος του όσο αυξάνονται τα εγκάρσια φορτία και, κατά συνέπεια, η καμπτική ένταση (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5 Πλαστική άρθρωση και ζώνη πλαστικοποίησης καμπτόμενου μεταλλικού μέλους (Ε.Μ.Π.)

Στην ορθογωνική διατομή που θεωρήσαμε παραπάνω η ροπή πλαστικοποίησης προκύπτει από το εικονιζόμενο ζεύγος δυνάμεων (εφελκυστική και θλιπτική) και είναι:

$$M_{pl} = b [(h/2) (f_y/\gamma_{M0}) (h/2)] = (bh^2 / 4)(f_y/\gamma_{M0}) \quad (7)$$

οπότε η πλαστική αντίσταση ορθογωνικής διατομής είναι:

$$W_{pl} = bh^2 / 4 \quad (8)$$

Συγκρίνοντας την ελαστική με την πλαστική αντίσταση ορθογωνικής διατομής προκύπτει ότι:

$$W_{pl} = 1.5 W_{el} \quad (9)$$

3.4 ΛΥΓΙΣΜΟΣ ΣΕ ΚΑΜΠΤΟΜΕΝΑ ΜΕΛΗ

Λυγισμός είναι η ξαφνική, μεγάλη αύξηση των παραμορφώσεων ενός φορέα για μικρή αύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων.

Προϋποθέσεις για την εμφάνισή του είναι:

- Η ύπαρξη θλιπτικών τάσεων στη διατομή. Οι τάσεις αυτές μπορεί να είναι αποτέλεσμα άμεσης θλίψης ή κάμψης του υπό εξέταση μέλους.
- Η μεγάλη λυγηρότητα του μέλους. Λυγηρό θεωρείται ένα μέλος όταν έχει μικρή διατομή σε σχέση με το μήκος του. Για τους επιφανειακούς φορείς, μεγάλη λυγηρότητα προκύπτει όταν το πάχος τους είναι μικρό συγκριτικά με τις υπόλοιπες διαστάσεις τους (μήκος και πλάτος).

Σε μεταλλικά στοιχεία διατομής «I» (διατομές που κατά κανόνα είναι λεπτότοιχες) υπό κάμψη είναι πιθανόν να εμφανιστεί τοπικός λυγισμός στο θλιβόμενο πέλμα και σε ένα τμήμα του κορμού που δέχεται και αυτό θλιπτικές τάσεις. Σε αυτή την περίπτωση, το μεταλλικό στοιχείο αστοχεί πριν μπορέσει να αναπτύξει την πλήρη πλαστική ή ελαστική καμπτική αντοχή του, όπως φαίνεται και στις Εικόνες 3.4 και 3.5.



Εικόνα 3.4 Αστοχία μεταλλικών δοκών στην περιοχή της στήριξης λόγω τοπικού λυγισμού (Ε.Μ.Π.)



Εικόνα 3.5 Τοπικός λυγισμός μεταλλικής υψίκορμης δοκού (Ε.Μ.Π.)

Η πιθανότητα λυγισμού ενός καμπτόμενου στοιχείου εξετάζεται στον Ευρωκώδικα 3 μέσω της κατάταξης της διατομής του.

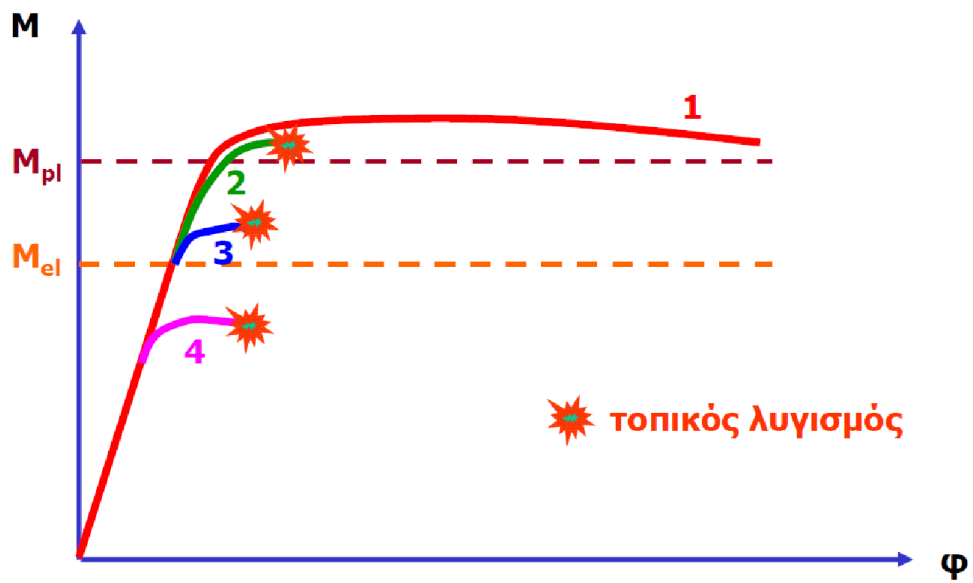
Ο ρόλος της κατάταξης των διατομών είναι να περιγράψει τον βαθμό κατά τον οποίο η αντοχή και η ικανότητα στροφής των διατομών περιορίζεται από την αντοχή τους σε τοπικό λυγισμό. Η κατάταξη μιας διατομής εξαρτάται από τη σχέση πλάτους προς πάχος των τμημάτων της που υπόκεινται σε θλίψη, δηλαδή από την 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 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 (Σοφιανόπουλος).

Τελικά στον Ευρωκώδικα 3 διακρίνονται τέσσερις κατηγορίες διατομών ανάλογα με την αναμενόμενη συμπεριφορά τους.

- **Κατηγορία 1:** Μπορούν να σχηματίσουν πλαστική άρθρωση με την απαιτούμενη από την πλαστική ανάλυση δυνατότητα στροφής χωρίς μείωση της αντοχής τους.
- **Κατηγορία 2:** Μπορούν να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχής τους, αλλά έχουν περιορισμένη δυνατότητα στροφής λόγω τοπικού λυγισμού.
- **Κατηγορία 3:** Η τάση στην ακραία θλιβόμενη ίνα του χαλύβδινου μέλους μπορεί να φθάσει την αντοχή διαρροής, αλλά συμβαίνει τοπικός λυγισμός πριν την ανάπτυξη της πλαστικής ροπής αντοχής.
- **Κατηγορία 4:** Συμβαίνει τοπικός λυγισμός πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής.

Η καμπτική συμπεριφορά μεταλλικών μελών που ανήκουν σε κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες απεικονίζεται σχηματικά στα ποιοτικά διαγράμματα ροπών – καμπυλοτήτων του Σχήματος 3.6. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι είναι προτιμότερη η χρήση μελών με διατομές κατηγορίας 1, καθώς με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται το μεγαλύτερο περιθώριο ασφάλειας έναντι κάμψης.

Ο τοπικός λυγισμός μεταλλικών στοιχείων εξετάζεται σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας μέσω αριθμητικής ανάλυσης ενός απλού προσομοιώματος μεταλλικής δοκού – προβόλου.



Σχήμα 3.6 Καμπτική συμπεριφορά μεταλλικών στοιχείων διαφορετικής κατηγορίας διατομής (Ε.Μ.Π.)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

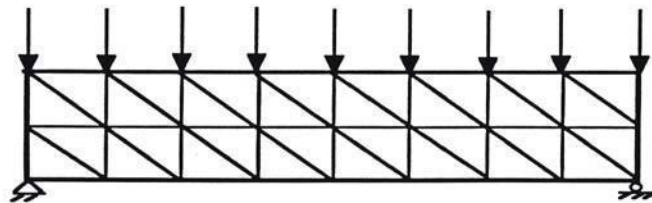
Στην ενότητα αυτή δίνονται κάποιες γενικές πληροφορίες για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή αποτελεί ισχυρό εργαλείο στη μελέτη των κατασκευών και βρίσκει μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Στο πεδίο της ανάλυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο στο (συμβατικό) ελαστικό πεδίο (θεωρία μικρών μετατοπίσεων) αλλά και για μη-γραμμικά προβλήματα, λυγισμό, δυναμική συμπεριφορά κ.ά. Οι πληροφορίες προέρχονται από το βιβλίο του Πέτρου Α. Καρύδη, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Η αρχική διατύπωση της μεθόδου έγινε με βάση την μητρική ανάλυση, αργότερα όμως δόθηκε ευρύτερη και πιο θεμελιώδης θεωρητική βάση. Αρχικά θα θεωρήσουμε την μέθοδο ως επέκταση της μητρικής ανάλυσης στην ανάλυση των συνεχών μέσων (ελάσματα, κελύφη).

Το χαρακτηριστικό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση διδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων. Τα πρώτα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν σε προβλήματα επίπεδης εντατικής κατάστασης, αργότερα όμως διατυπώθηκαν στοιχεία και για τρισδιάστατα στερεά, ελάσματα υπό κάμψη, παχιά κελύφη, και άλλες μορφές κατασκευών. Μετά την καθιέρωσή τους στη γραμμική ελαστική περιοχή εφαρμόστηκαν και σε δυσκολότερα προβλήματα όπως η δυναμική συμπεριφορά, ο λυγισμός και η μη-γραμμική απόκριση και συμπεριφορά του υλικού. Για να επιλυθούν δε προβλήματα με μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού απαιτείται επαναληπτική διαδικασία.

Για προβλήματα κατασκευών υπάρχει ένας ικανός αριθμός προγραμμάτων γενικής χρήσης και το γεγονός αυτό σε συνάρτηση με τις δυνατότητες της μεθόδου έχει οδηγήσει στην ραγδαία εξέλιξη και χρήση της τα τελευταία χρόνια.

Η βασική έννοια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι, όπως και στη μητρική ανάλυση, η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Χρήση τριγωνικών στοιχείων για τη διακριτοποίηση αμφιέρειστης δοκού υπό καμπτική φόρτιση (Καρύδης, Ε.Μ.Π.)

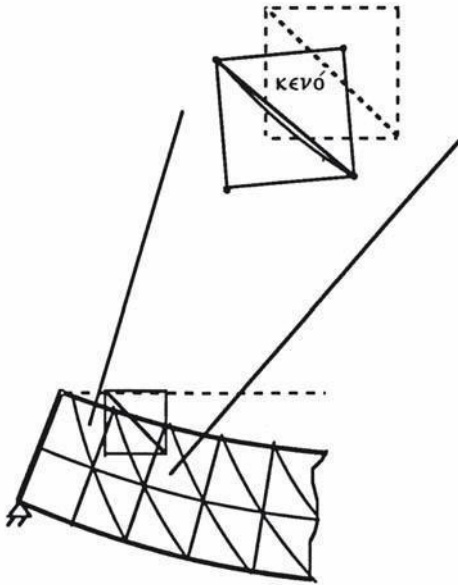
Η μεθοδολογία αυτή αποτελεί φυσιολογική προσομοίωση των πλαισίων, καθώς αυτά αποτελούνται από δοκούς που είναι συνδεδεμένες στα άκρα τους. Σε μία συνεχή όμως κατασκευή δεν υπάρχουν φυσικοί διαχωρισμοί και συνεπώς απαιτείται να γίνει τεχνητός διαχωρισμός σε στοιχεία, τα οποία να συνδέονται κατά μήκος των άκρων (πλευρών) τους. Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή *πεπερασμένα στοιχεία* είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά και οι κόμβοι συνήθως βρίσκονται στα άκρα. Το Σχήμα 4.1 δείχνει τον κορμό δοκού υποδιαιρεμένο σε τριγωνικά στοιχεία. Για να γίνει χρήση μητρικών μεθόδων απαιτείται να προσομοιωθεί η συνεχής κατασκευή με ένα πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και σε ορισμένες περιπτώσεις και οι παράγωγοί τους. Εάν περιλαμβάνονται και οι παράγωγοι γίνεται λόγος για *βαθμούς ελευθερίας* αντί για *μετατοπίσεις κόμβων*. Οι μετατοπίσεις στο εσωτερικό των στοιχείων πρέπει να είναι συμβατές με τις μετατοπίσεις των κόμβων και όλες οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε σχέση με τις κομβικές μετατοπίσεις.

Με αυτό τον τρόπο οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους και το πρόβλημα μετατρέπεται από συνεχές σε διακριτό. Παρόλο που μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός κομβικών μετατοπίσεων ο αριθμός τους είναι πεπερασμένος. Το πρόβλημα εκφράζεται τότε ως ένα σύνολο (σύστημα) γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με αριθμητικές (μητρικές) μεθόδους.

Για να επιτευχθεί ακριβής λύση ενός συγκεκριμένου προβλήματος στη διακριτοποιημένη μορφή του, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και γεωμετρικής συμβιβαστότητας στο εσωτερικό των στοιχείων αλλά και στα σύνορά τους. Οι απαιτήσεις αυτές ανάγονται στην ικανοποίηση τεσσάρων συνθηκών. Ας θεωρηθεί, για παράδειγμα, η συμβιβαστότητα μεταξύ των στοιχείων. Σε μία συνεχή κατασκευή όπως το έλασμα του Σχήματος 4.2 ισχύει συνέχεια των μετατοπίσεων στα κοινά όρια των στοιχείων. Συνεπώς στο αριθμητικό μοντέλο (πεπερασμένα στοιχεία) δεν επαρκεί να ικανοποιείται η συνθήκη της συνέχειας των μετατοπίσεων στους κόμβους και μόνο.

Εάν δηλαδή δεν διατυπωθούν περιορισμοί στις μετατοπίσεις κατά μήκος των ορίων των στοιχείων το θεωρητικό μοντέλο της κατασκευής θα είναι περισσότερο εύκαμπτο επειδή

θα δημιουργηθούν κενά, όπως δείχνει το Σχήμα 4.2. Ένας τρόπος να περιορισθεί το σφάλμα είναι να χρησιμοποιηθούν μικρότερα και περισσότερα στοιχεία διότι έτσι θα δημιουργηθούν περισσότεροι κόμβοι και συνεπώς περισσότερα σημεία στα οποία θα ικανοποιείται η συμβιβαστικότητα.



Σχήμα 4.2 Παραμόρφωση στοιχείων (Καρύδης, Ε.Μ.Π.)

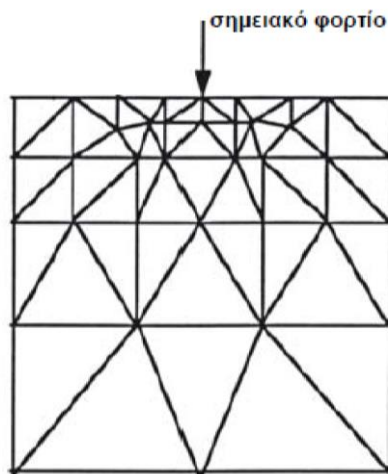
Μία διακριτή προσομοίωση δεν μπορεί όμως να αποδώσει με απόλυτη ακρίβεια την συμπεριφορά ενός συνεχούς μέσου, ανεξαρτήτως του αριθμού των διακριτών μεταβλητών που χρησιμοποιούνται. Υπάρχει δηλαδή πάντοτε ένα σφάλμα, το οποίο όμως μπορεί να περιορισθεί και να γίνει αμελητέο και τοπικό. Δεν είναι συνεπώς δυνατόν να ικανοποιηθούν όλες οι προαναφερθείσες συνθήκες με απόλυτη ακρίβεια, έστω και αν γίνει χρήση μεγάλου αριθμού στοιχείων. Είναι όμως δυνατό, με σωστή επιλογή των ιδιοτήτων των στοιχείων και κατάλληλη διακριτοποίηση, να περιορισθεί το αριθμητικό σφάλμα. Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων των στοιχείων αποτελεί ένα από τα βασικότερα στάδια διατύπωσης μιας λύσης. Θα πρέπει τότε να γίνεται αυτό έτσι ώστε να ικανοποιούνται επαρκώς οι συνθήκες συμβιβαστικότητας χωρίς να χρειασθεί να γίνει χρήση υπερβολικά μικρών στοιχείων.

Η συμπεριφορά των στοιχείων καθορίζεται από συναρτήσεις οι οποίες ορίζουν τον τρόπο μεταβολής των τάσεων ή των μετατοπίσεων στο εσωτερικό τους. Με άλλα λόγια, προκαθορίζεται ο τρόπος συμπεριφοράς των διαφόρων μεταβλητών. Το αποτέλεσμα είναι ότι, παρόλο που οι συνθήκες ισορροπίας και συμβιβαστικότητας ικανοποιούνται μόνο στους κόμβους, η προδιαγεγραμμένη συμπεριφορά στο εσωτερικό κάθε στοιχείου εξασφαλίζει ότι η συμβιβαστικότητα ικανοποιείται επαρκώς στο εσωτερικό και στα σύνορά τους.

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι απαιτείται προσοχή κατά την υποδιαίρεση (διακριτοποίηση) της κατασκευής, καθώς επίσης και κατά την επιλογή της συνάρτησης που περιγράφει τη συμπεριφορά στο εσωτερικό του κάθε στοιχείου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ακρίβεια της μεθόδου αυξάνεται όταν αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων, ή καλύτερα, των κόμβων. Όσο αυξάνεται όμως ο αριθμός των στοιχείων, τόσο αυξάνονται ο χρόνος υπολογισμού και το κόστος.

Σε πολλές περιπτώσεις η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων χρησιμοποιείται για να αποκτηθεί ακριβέστερη εικόνα της τοπικής συμπεριφοράς (σε συγκεντρώσεις τάσεων, σε ανοίγματα, κοντά στο σημείο εφαρμογής του εξωτερικού φορτίου, κλπ). Η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων είναι ένας εφικτός τρόπος ελάττωσης του κόστους χωρίς να μειωθεί ακρίβεια της λύσης του προβλήματος. Λόγω όμως της μεγάλης ποικιλίας κατασκευών και φορτίσεων δεν είναι δυνατό να δοθεί γενικός κανόνας σχετικά με τον αριθμό ή το μέγεθος των στοιχείων ή τον τρόπο διακριτοποίησης που απαιτούνται για επαρκή ακρίβεια. Σε κάθε περίπτωση ο τρόπος διακριτοποίησης πρέπει να βασίζεται στην εμπειρία συμπεριφοράς και μελέτης παρόμοιων κατασκευών. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό πρέπει να επιλυθεί σειρά προβλημάτων με διαφορετικές διακριτοποιήσεις και να υπολογισθεί ο βαθμός σύγκλισης στην ακριβή λύση. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η ακρίβεια της λύσης για το συγκεκριμένο πρόβλημα (Σχήμα 4.3).

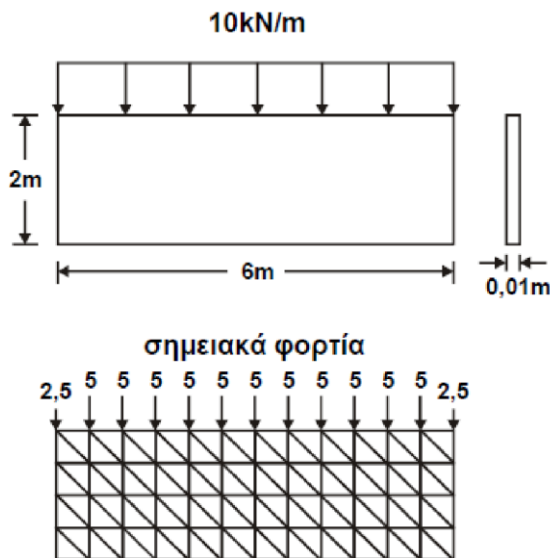


Σχήμα 4.3 Πύκνωση στοιχείων στη θέση εφαρμογής σημειακού φορτίου (Καρύδης, Ε.Μ.Π.)

Στο Σχήμα 4.4 δείχνεται ότι η εξωτερική φόρτιση παριστάνεται με σύνολα αντίστοιχων σημειακών φορτίων τα οποία εφαρμόζονται στους κόμβους των στοιχείων. Στην περίπτωση συγκεντρωμένων φορτίων ο προφανής τρόπος είναι να επιλεγεί κόμβος στο σημείο εφαρμογής του φορτίου. Για κατανεμημένα φορτία πρέπει να επιλεγούν στατικά ισοδύναμα σημειακά φορτία στους αντίστοιχους κόμβους. Τα περισσότερα στοιχεία

επίπεδης εντατικής κατάστασης δεν έχουν στρεπτικό βαθμό ελευθερίας και συνεπώς δεν είναι δυνατό να γίνει χρήση αντίστοιχων ροπών στους κόμβους.

Αυτό δεν είναι όμως σοβαρό πρόβλημα διότι οι κόμβοι είναι αρκετά κοντά ο ένας στον άλλο και έτσι οι δυνάμεις στους κόμβους αποτελούν ικανοποιητική προσομοίωση του κατανεμημένου φορτίου.



Σχήμα 4.4 Ενδεικτική προσομοίωση κατανεμημένου φορτίου σε λεπτότοιχη διατομή (Καρύδης, Ε.Μ.Π.)

4.2 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ Η/Υ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ANSYS

Το ANSYS είναι λογισμικό προσομοίωσης μηχανικών διεργασιών που καλύπτει πολλούς τομείς στις περιοχές της προσομοίωσης.

Το λογισμικό γενικής χρήσης ANSYS διαθέτει εργαλεία για προσομοίωση με ακρίβεια της πολύπλοκης συμπεριφοράς των ρευστών και παρέχει ασφαλή πληροφορία για τις πραγματικές επιδόσεις του προϊόντος ή της διεργασίας κατά το στάδιο του σχεδιασμού, της βελτιστοποίησης, της παραγωγής και της πραγματικής λειτουργίας.

Με τα λογισμικά ANSYS υπάρχει η δυνατότητα να μοντελοποιηθούν με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια, μόνιμες και χρονικά μεταβαλλόμενες ροές, οι οποίες μπορεί να διαθέτουν πολυφασικές περιοχές, με ή χωρίς αλλαγή φάσης, μετάδοση θερμότητας, χημικές αντιδράσεις, περιστρεφόμενες/κινούμενες κατασκευές και άλλα σύνθετα φαινόμενα που χαρακτηρίζουν τον πραγματικό κόσμο.

Το ANSYS τρέχει στην πλατφόρμα προσομοίωσης ANSYS Workbench και εκμεταλλεύεται τα προηγμένα εργαλεία προεπεξεργασίας για επεξεργασία γεωμετρίας και πλεγματοποίησης, την παραμετρικότητα της πλατφόρμας, τις δυνατότητες προσαρμογής από τον χρήστη (user customization), την αυτόματη διαχείριση φακέλων και ροή εργασίας (workflow), όπως επίσης και την πλήρη σουίτα βελτιστοποίησης ANSYS DesignXplorer.

Οι λύσεις ANSYS FEA περιλαμβάνουν κυρίως το λογισμικό ANSYS Mechanical που τρέχει στο ANSYS Workbench, την αυτοματοποιημένη και παραμετρική πλατφόρμα προσομοίωσης που επιτρέπει τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση με βάση την αριθμητική μοντελοποίηση (simulation-driven design & optimization).

Το λογισμικό ANSYS Mechanical είναι εξοπλισμένο με ευφυή τεχνολογία πλεγματοποίησης, αυτόματη ανίχνευση επαφών και πληθώρα εργαλείων διαχείρισής τους, όπως επίσης ώριμους αλγόριθμους τοπολογικής βελτιστοποίησης (topology optimization), παρέχοντας ακρίβεια χωρίς προηγούμενο σε όλο το φάσμα της βιομηχανίας και των κατηγοριών ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, από στατική δομική και δυναμική (ιδιοσυχνοτήτων, αρμονική, τυχαία, πλήρη χρονικά μεταβαλλόμενη), ως κόπωσης και αστοχίας. Επίσης το λογισμικό ANSYS LS-DYNA ανάλυσης τύπου explicit, το οποίο τρέχει στο ANSYS Workbench, αντιμετωπίζει περιπτώσεις πρόσκρουσης (impact), σύγκρουσης (crash) και παρεμφερή σύντομα και βίαια φαινόμενα.

Οι λύσεις ANSYS FEA διαθέτουν μοντέλα υλικών που εκτείνονται από τυπικά μέταλλα, ιξωδοελαστικά και υπερελαστικά υλικά σε σύνθετα υλικά (composite) και συνθήκες ρωγμάτωσης (fracture), ενώ επίσης διαθέτουν ειδικά εργαλεία για κινητική στερεών σωμάτων, υδροδυναμικών φορτίσεων (κύματα) και μοντέλα για έκρηξη, δημιουργώντας μία πλήρη εργαλειοθήκη προσομοίωσης για την αντιμετώπιση των πραγματικών εφαρμογών οι οποίες χαρακτηρίζονται από σύνθετη φυσική.

Οι χρήστες των λογισμικών ANSYS FEA έχουν τη δυνατότητα να αξιολογούν γρήγορα και εύκολα την πραγματική συμπεριφορά ενός προϊόντος κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, έτσι ώστε να απορρίπτουν τα προβληματικά designs πολύ νωρίς στη συνολική διαδικασία παραγωγής. Έτσι, μειώνεται δραστικά ο συνολικός χρόνος από το σχεδιασμό ως την αγορά και το τελικό προϊόν ξεπερνά σημαντικά τον ανταγωνισμό. (οι πληροφορίες της ενότητας αυτή προέρχονται από το διαδίκτυο: <https://simtec.gr/>).

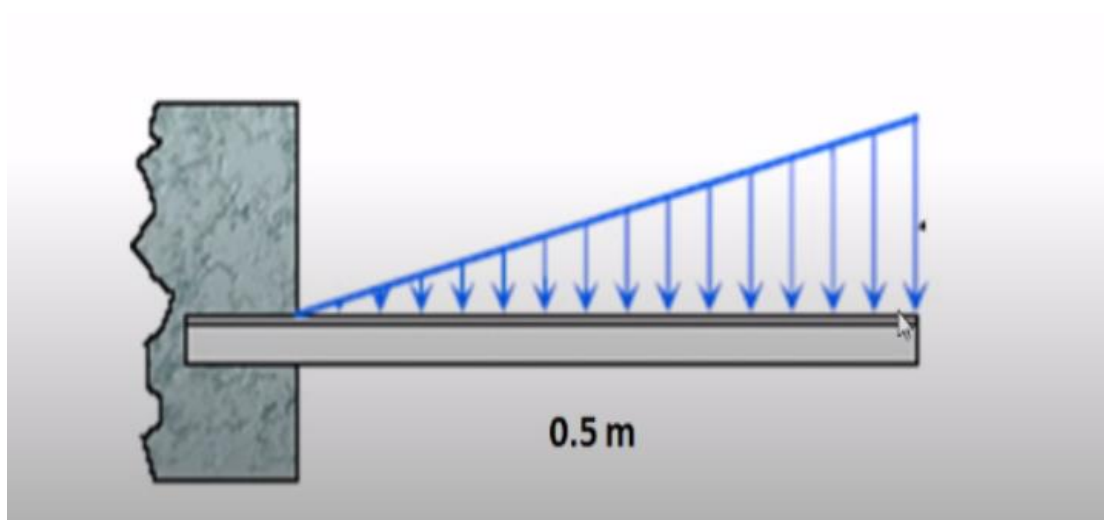
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε εκπαιδευτική έκδοση του λογισμικού ANSYS η οποία διατίθεται δωρεάν στο διαδίκτυο (με λογικούς περιορισμούς στο μέγεθος του προβλήματος).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΔΟΚΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ Η/Υ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας προσομοιώθηκε και ακολούθως επιλύθηκε με χρήση του λογισμικού ANSYS μία απλή μεταλλική δοκός πρόβολος, υπό τη δράση ενός τριγωνικού φορτίου. Ο φορέας που επιλύθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 Το πρόβλημα που επιλύθηκε.

Στόχος είναι να προσομοιωθεί με ακρίβεια η με-γραμμική συμπεριφορά του υλικού και να ανιχνευθεί αναλυτικά ο τοπικός λυγισμός που περιγράφηκε προηγουμένως και αναμένεται να συμβεί στο θλιβόμενο πέλμα. Εξετάστηκαν διάφορες περιπτώσεις φόρτισης και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα (τάσεις και βέλος κάμψης).

5.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

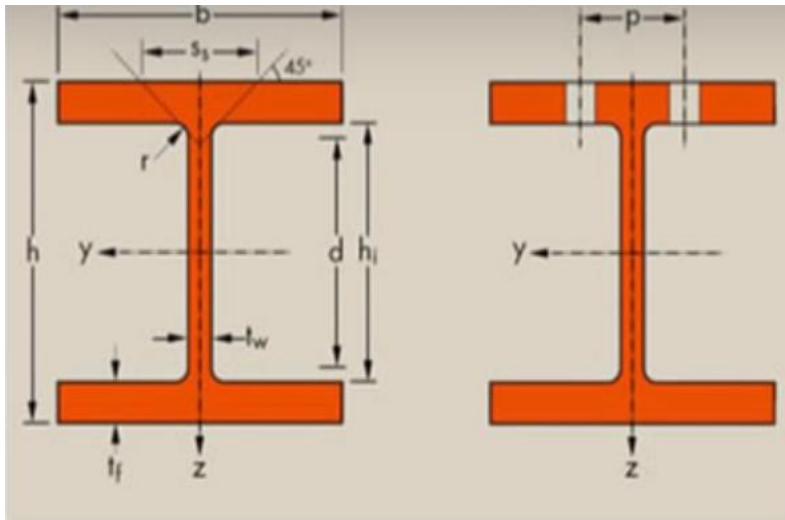
Για το υλικό της δοκού χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Structural Steel NL του προγράμματος. Πρόκειται για ένα διγραμμικό μοντέλο συμπεριφοράς που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις προσομοίωσης της συμπεριφοράς του δομικού χάλυβα (Σχήμα 2.1). Οι χαρακτηριστικές τιμές του υλικού που δηλώθηκαν είναι:

- **Αντοχή Υλικού: 250 MPa**

- **Μέτρο Ελαστικότητας Υλικού: 210 GPa**

Συντελεστής κράτυνσης διατηρήθηκε ο προεπιλεγμένος του προγράμματος

Η δοκός έχει πρότυπη διατομή «I» (Σχήμα 5.2), τύπου W4x4 σύμφωνα με τα Αμερικάνικα πρότυπα. Οι διαστάσεις δοκού φαίνονται στον Πίνακα 5.1



Σχήμα 5.2 Χαρακτηριστικές διαστάσεις πρότυπων διατομών «I» σύμφωνα με τα αμερικάνικα πρότυπα.

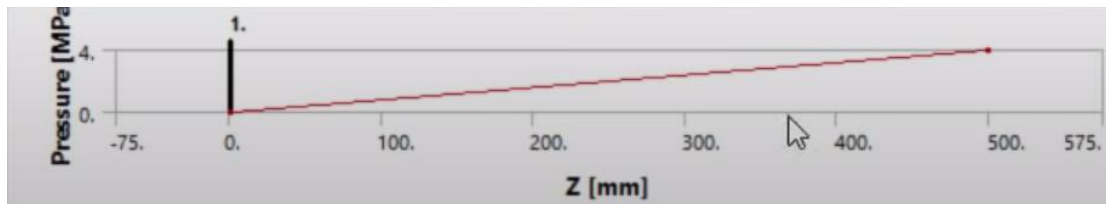
Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά της διατομής που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις της εργασίας.

AMERICAN WIDE FLANGE BEAMS													
Dimensions according to ASTM A6 / A6M - 03													
Tolerances: ASTM A6 / A6M - 03													
Designation	G		Dimensions					A	Dimensions for Detailing				
	lbs/ft	kg/m	h	b	t_w	t_f	r		h_i	d	\emptyset	Pmin	Pmax
			mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	mm	mm		mm	mm
W4 x 4	13	19.3	106	103	7.1	8.8	6	24.70	88.4	76.4	-	-	-

Το μήκος της δοκού είναι 500mm, ενώ κατά την προσομοίωση επιλέχθηκε ως μέγιστη διάσταση διακριτοποίησης (Mesh Element Size) τα 7mm. Η τιμή αυτή καθορίστηκε έπειτα

από δοκιμές, λαμβάνοντας υπόψη και τους περιορισμούς της εκπαιδευτικής έκδοσης του προγράμματος.

Στη άνω πέλμα της δοκού ασκείται κατανεμημένο τριγωνικό φορτίο. Το φορτίο αυτό δηλώνεται ως επιφανειακό (kPa) και εφαρμόζεται στο άνω πέλμα. Το προφίλ του φορτίου που εισάγεται στο πρόγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3. Εξετάστηκαν διαφορετικά σενάρια για τη μέγιστη τιμή του φορτίου.



Σχήμα 5.3 Προφίλ του κατανεμημένου φορτίου που ασκείται στη δοκό που επιλύθηκε.

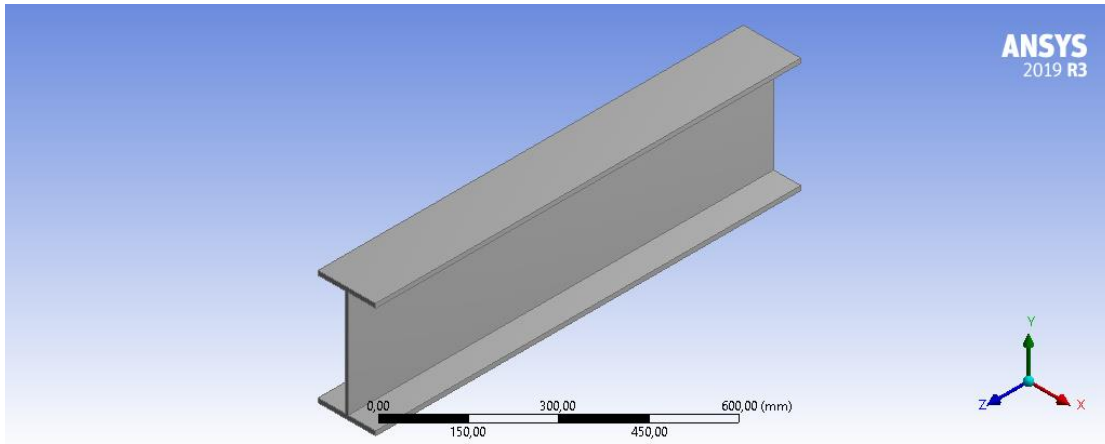
5.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

1ο Στάδιο: Κατασκευή γεωμετρίας.

Η κατασκευή της γεωμετρίας μέσα στο περιβάλλον του ANSYS μπορεί να γίνει, γενικά, με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι να δημιουργηθούν διαδοχικά σημεία (keypoints), τα οποία ακολούθως ενώνονται με γραμμές (lines). Οι γραμμές δηλώνονται ως όρια για επιφάνειες (areas) με «μετακίνηση» των οποίων προκύπτουν, τέλος, οι όγκοι (volumes).

Ο δεύτερος τρόπος είναι να κατασκευαστούν όγκοι ή επιφάνειες είτε από σημεία, χωρίς τη δημιουργία γραμμών, είτε απευθείας ορίζοντας τις διαστάσεις τους. Το τελευταίο μπορεί να φανεί πολύ εύχρηστο σε περιπτώσεις που θέλουμε να κατασκευάσουμε γνωστά γεωμετρικά σχήματα, όπως κύκλους, κυλίνδρους, ορθογώνια, ορθογώνια παραλληλεπίπεδα κ.α.

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, αρχικά ορίσθηκαν οι διαστάσεις της δοκού, με βάση τον παραπάνω πίνακα. Από τη διατομή, με «εξώθηση» “Extrude”, προέκυψε το μοντέλο, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4 Δημιουργία της γεωμετρίας της δοκού στο πρόγραμμα ANSYS.

2ο Στάδιο: Ορισμός των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των υλικών και επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των υλικών είναι μονοσήμαντα ορισμένες αλλά θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά τις μονάδες. Πρέπει να γνωρίζουμε ότι όλες οι μονάδες είναι στο SI εκτός αν τις ορίσουμε εμείς διαφορετικά. Δεν συνιστάται να γίνει αλλαγή μονάδων γιατί υπάρχει σημαντικός κίνδυνος λάθους. Οι ιδιότητες που πρέπει να οριστούν εξαρτώνται από την ιδιαιτερότητα των υλικών αλλά και από το είδος της επίλυσης που μας ενδιαφέρει να κάνουμε. Η επιλογή του είδους των πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από την επίλυση που θα κάνουμε, αυτό δε σημαίνει ότι δεν έχουμε τη δυνατότητα αλλαγής τους στη συνέχεια. Το σημαντικό είναι να έχουμε καταλήξει στη διάστασή τους και στο είδος της καταπόνησης.

3ο Στάδιο: Διακριτοποίηση της γεωμετρίας σε πεπερασμένα στοιχεία και επιβολή των οριακών συνθηκών.

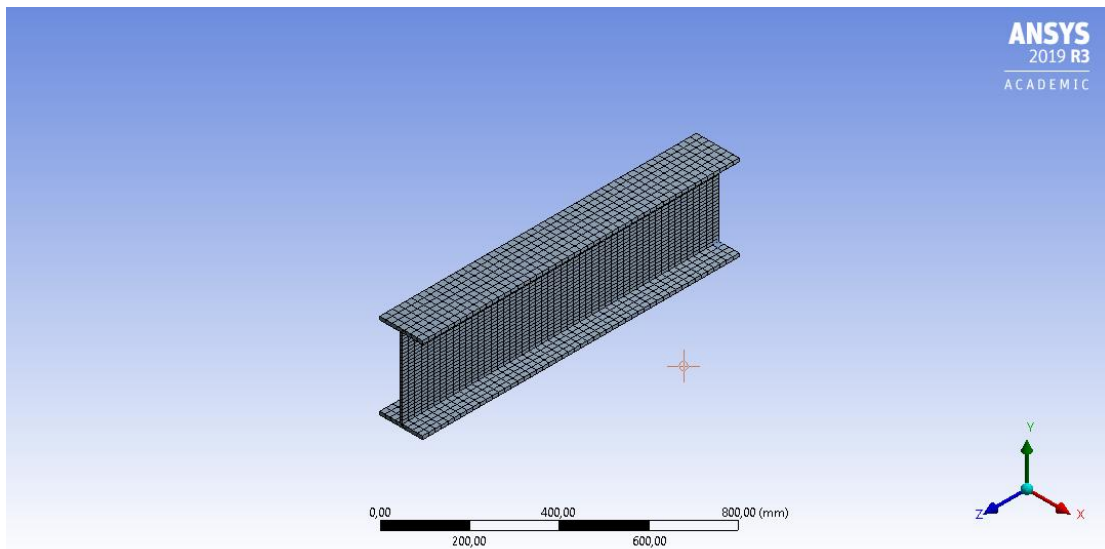
Αφού γίνει η επιλογή του στοιχείου μένει να γίνει η διακριτοποίηση της γεωμετρίας. Η πιο απλή δυνατότητα είναι να γίνει χρησιμοποιώντας τις επιλογές που προσφέρει το πρόγραμμα. Οι επιλογές αυτές είναι αυτόματη δημιουργία πλέγματος (δεν προτείνεται στις περισσότερες περιπτώσεις), ορισμός διαμερίσεων σε γραμμές ή ορισμός μεγέθους στοιχείων (μέγιστο μέγεθος πλευράς ή ακμής) καθώς και η επιλογή του Smart Size η οποία κάνει προσαρμογή του πλέγματος στη γεωμετρία, δηλαδή μικραίνει τα στοιχεία σε περιοχές απότομης αλλαγής της γεωμετρίας και το αραιώνει στο εσωτερικό των επιφανειών και των όγκων όπου δεν υπάρχει ιδιαίτερη ανάγκη για λεπτή διαμέριση.

Αφού καταλήξουμε στις παραπάνω επιλογές ακολουθεί η δημιουργία του πλέγματος. Γενικά οι δυνατότητες του προγράμματος είναι πάρα πολλές και μπορούν να δώσουν πάρα πολλά και πολύ διαφορετικά μεταξύ τους αποτελέσματα ανάλογα με τις παραμέτρους που θα ορίσουμε. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί το πρόγραμμα να γνωρίζει

τις ιδιαιτερότητες του προβλήματος που καλούμαστε να επιλύσουμε, την ακρίβεια ή και το χρόνο επίλυσης που επιθυμούμε, άρα πρέπει να επέμβουμε στις προεπιλογές που έχει. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα να μην οριστούν γεωμετρικά στοιχεία του μοντέλου στο περιβάλλον του ANSYS και στη συνέχεια να γίνει η διακριτοποίηση, αλλά να κατασκευαστούν απευθείας κόμβοι και πεπερασμένα στοιχεία ή να εισαχθούν αφού έχουν υπολογιστεί με κάποιο άλλο προεπεξεργαστή.

Η επιβολή των οριακών συνθηκών μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Οι διαφοροποιήσεις εντοπίζονται στα σημεία όπου μπορούν αυτές να επιβληθούν. Μπορούν να επιβληθούν είτε σε γεωμετρικά στοιχεία (σημεία, γραμμές, επιφάνειες) είτε σε στοιχεία του πλέγματος.(κόμβους, στοιχεία). Όταν επιβάλλονται σε γεωμετρικά στοιχεία γίνεται αυτόματα η μεταφορά τους σε στοιχεία του πλέγματος πριν από την επίλυση.

Το πλέγμα που επιλέχθηκε για την επίλυση του προβλήματος που εξετάζεται απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5

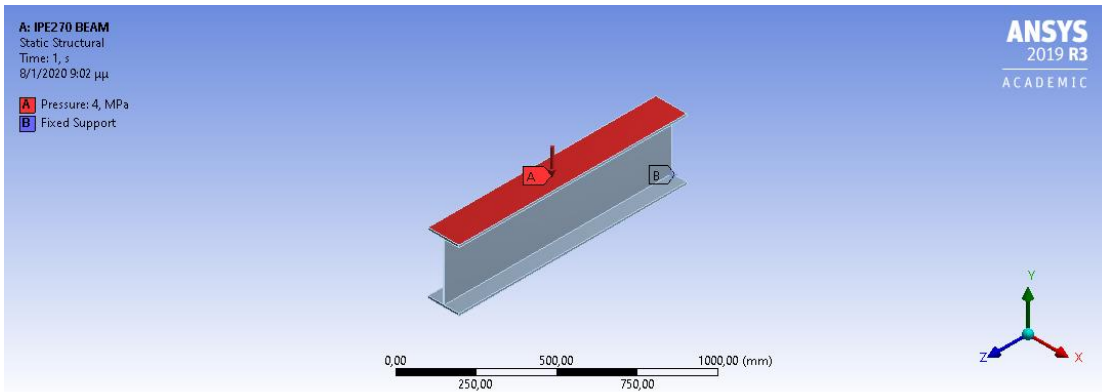


Σχήμα 5.5 Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση της δοκού.

4ο Στάδιο: Ορισμός φορτίου και σημείου πάκτωσης.

Επιλέγουμε είδος φορτίου που ασκείται στη δοκό, καθώς και σημείο εφαρμογής και το μέτρο της δύναμης.

Επίσης ορίζουμε το σημείο που θα είναι πακτωμένη η δοκός, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6 Επιφάνεια επιβολής του φορτίου και θέση πάκτωσης.

5ο Στάδιο: Ανάγνωση και γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων.

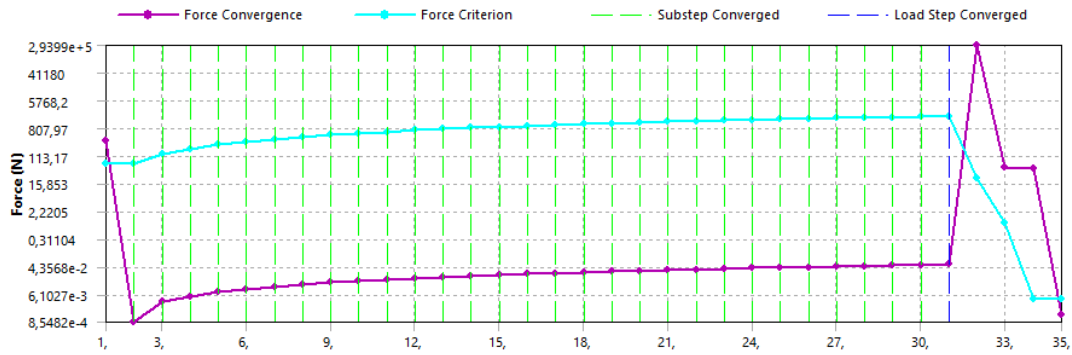
Τα αποτελέσματα μετά από την επίλυση καταγράφονται σε ένα αρχείο (*.rst). Η ανάγνωσή τους είναι ένα ζήτημα που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Υπάρχουν πολλοί τρόποι να δει κάποιος τα αποτελέσματα.

Ενδεικτικά αναφέρουμε τα αποτελέσματα στους κόμβους (Nodal Solution) και τα αποτελέσματα στα στοιχεία (Element Solution). Στους κόμβους γίνεται δίνεται η τιμή του μέσου όρου που προκύπτει από τα πεπερασμένα στοιχεία στα οποία είναι κοινός και έχει συνεχή τιμή ενώ στα πεπερασμένα στοιχεία έχουμε μία τιμή ανά στοιχείο (στα ισοπαραμετρικά μπορούμε να επιλέξουμε επιπλέον αποτελέσματα στα σημεία Gauss).

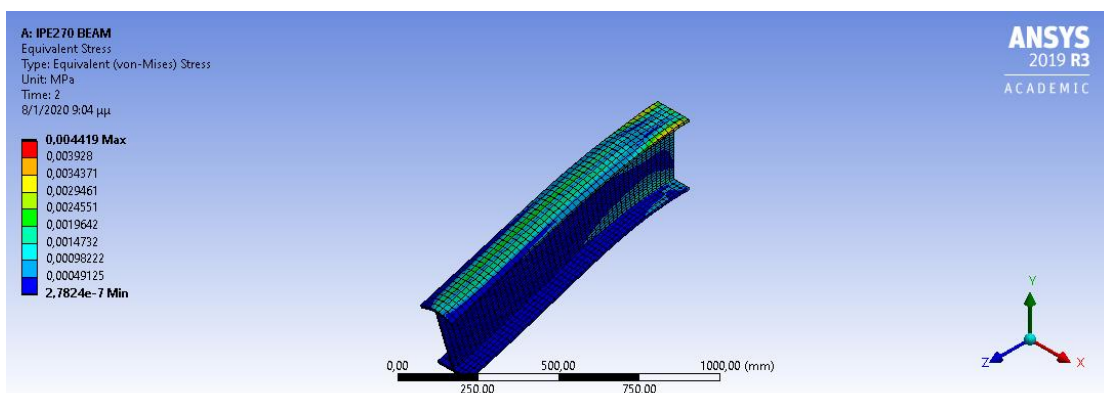
Ακόμα, υπάρχει και η επιλογή του Element Table μέσω του οποίου μπορούμε να κάνουμε ομαλοποίηση των αποτελεσμάτων βγάζοντας μέσους όρους (Element Table Average). Η τελευταία επιλογή προτείνεται σε περιπτώσεις όπου έχουμε συγκεντρωμένα φορτία και μπορεί να δημιουργηθούν τοπικά μέγιστα που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Μετά την εντολή “Solve” η πορεία της ανάλυσης (το φορτίο εφαρμόζεται βηματικά) παρακολουθείται από το ακόλουθο γράφημα (Σχήμα 5.7), που απεικονίζει τα αποτελέσματα του ελέγχου των κριτηρίων σύγκλισης.

Το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος έχει δυνατότητα απεικόνισης χαρακτηριστικών αποτελεσμάτων σε διάφορα στάδια της ανάλυσης (Σχήμα 5.8).



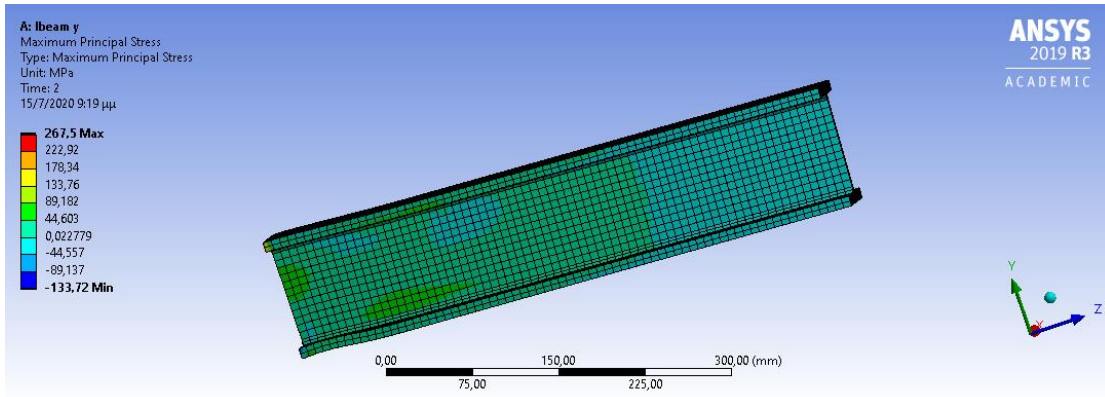
Σχήμα 5.7 Έλεγχοι κριτηρίων σύγκλισης κατά την επίλυση του προβλήματος.



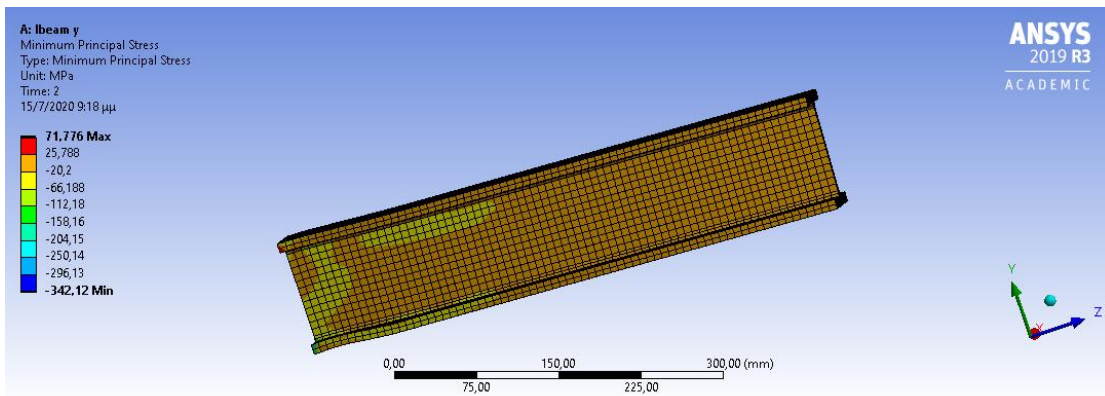
Σχήμα 5.8 Ενδεικτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του ANSYS.

5.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

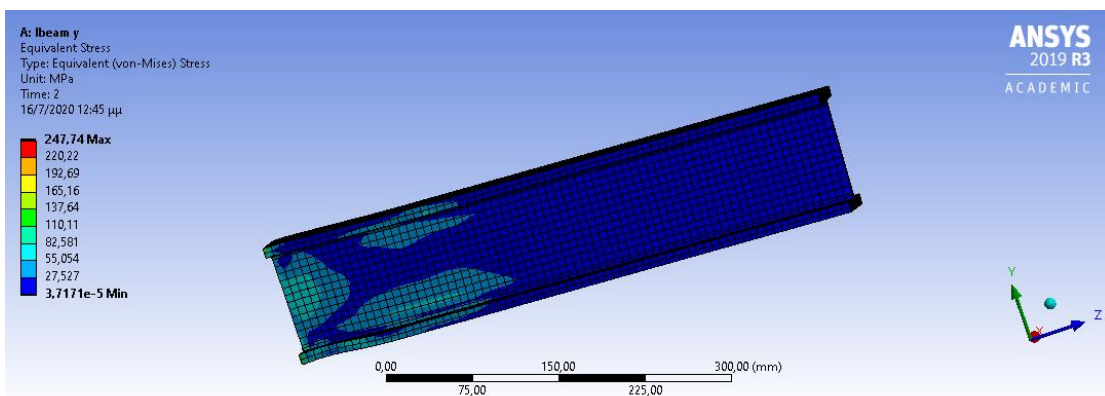
Η μελέτη της δοκού που περιγράφηκε παραπάνω έγινε για τέσσερις δοκιμαστικές τιμές της φόρτισης. Η πρώτη ανάλυση έγινε θεωρώντας μέγιστη τιμή του τριγωνικού επιφανειακού φορτίου ίση με 4 kPa. Τα Σχήματα 5.9 έως 5.12 παρουσιάζουν επιλεγμένα αποτελέσματα από την ανάλυση αυτή. Παρατηρείται ότι η δοκός δεν αστοχεί, καθώς οι τάσεις είναι μικρότερες από την οριακή τιμή. Εξάιρεση αποτελούν κάποιες υψηλές τιμές που καταγράφονται κοντά στην στήριξη και προκύπτουν ως αποτέλεσμα της εφαρμογής των οριακών συνθηκών από το πρόγραμμα.



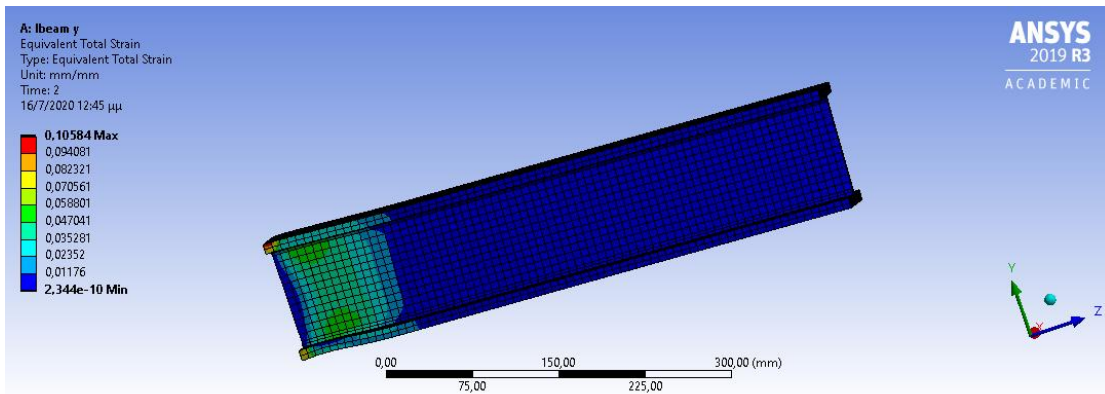
Σχήμα 5.9 Μέγιστες κύριες τάσεις στη δοκό για φορτίο με μέγιστη τιμή 4 kPa.



Σχήμα 5.10 Ελάχιστες κύριες τάσεις στη δοκό για φορτίο με μέγιστη τιμή 4 kPa.



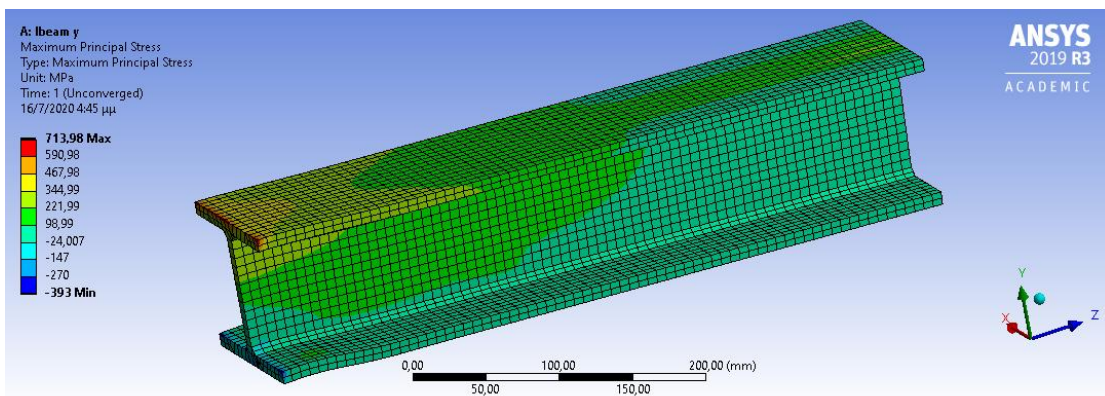
Σχήμα 5.11 Τάσεις von-Mises στη δοκό για φορτίο με μέγιστη τιμή 4 kPa.



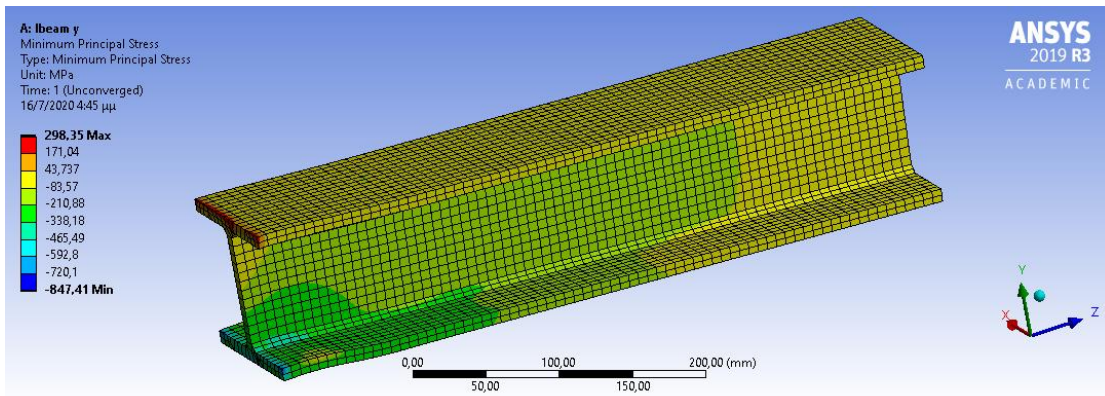
Σχήμα 5.12 Συνολικές παραμορφώσεις στη δοκό για φορτίο με μέγιστη τιμή 4 kPa.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και η δοκός δεν αστοχεί, η κατανομή των τάσεων δείχνει ότι είναι πιθανός ο τοπικός λυγισμός στο θλιβόμενο πέλμα. Αυτό αποτυπώνεται και στην προβολή του παραμορφωμένου φορέα που δίνει το πρόγραμμα (π.χ. Σχήμα 5.12).

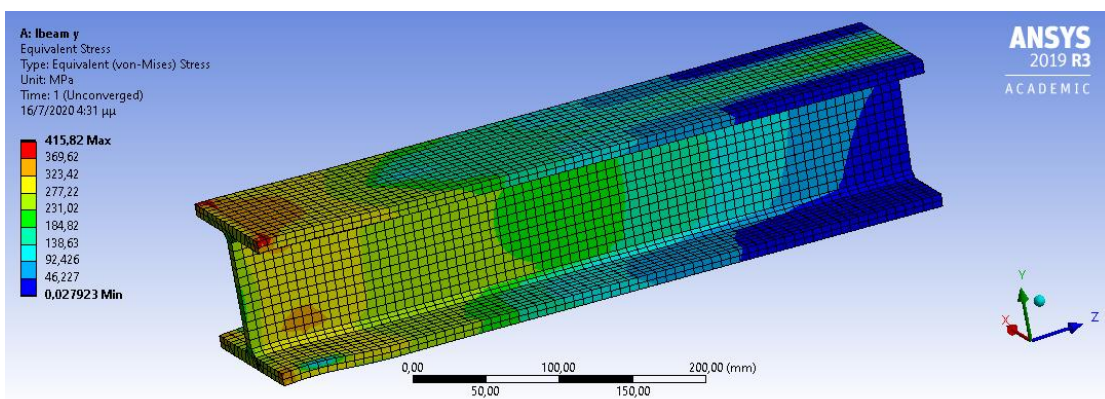
Όταν αυξήθηκε η μέγιστη τιμή του φορτίου σε 5 kPa η δοκός πλέον δε λειτουργεί ελαστικά. Ωστόσο το πρόγραμμα καταγράφει αποτελέσματα για το σύνολο του φορτίου. Επιλεγμένα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.13 έως 5.16. Οι τιμές των τάσεων που καταγράφονται ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού (Σχήμα 5.14) και είναι εμφανής ο τοπικός λυγισμός στο θλιβόμενο πέλμα (Σχήμα 5.16).



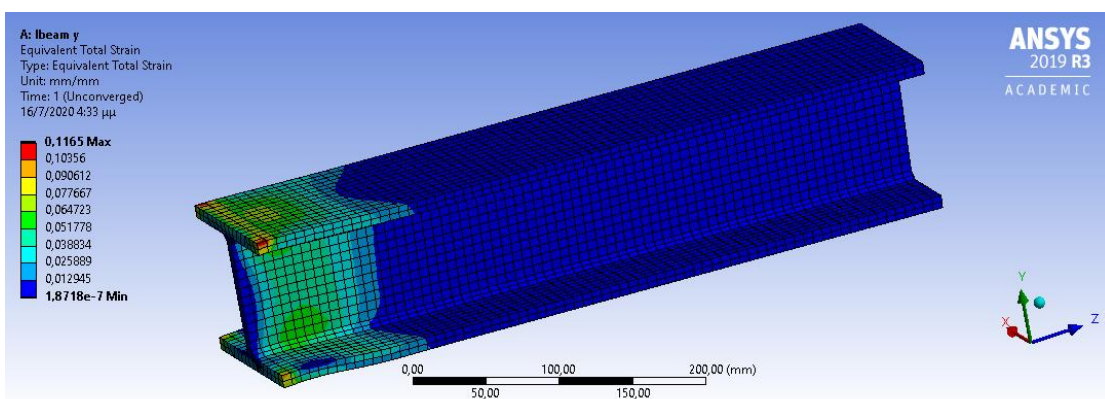
Σχήμα 5.13 Μέγιστες κύριες τάσεις στη δοκό για φορτίο με μέγιστη τιμή 5 kPa.



Σχήμα 5.14 Ελάχιστες κύριες τάσεις στη δοκό για φορτίο με μέγιστη τιμή 5 kPa.

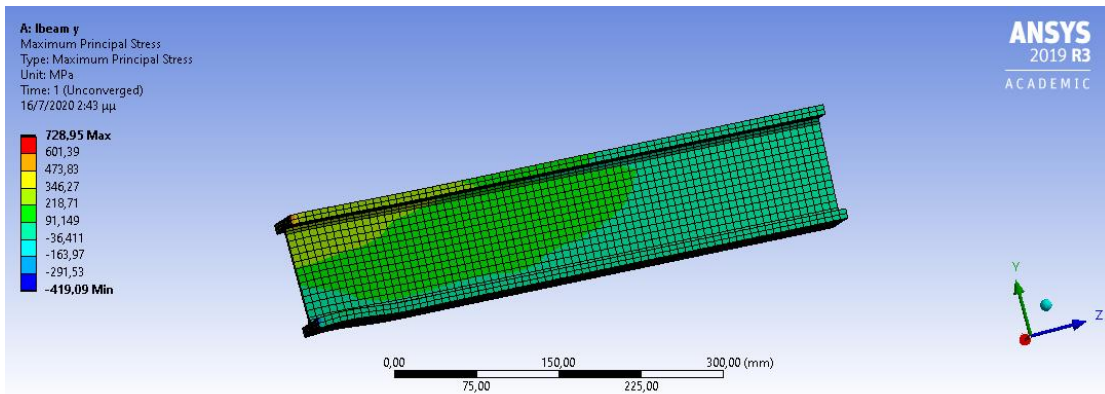


Σχήμα 5.15 Τάσεις von-Mises στη δοκό για φορτίο με μέγιστη τιμή 5 kPa.

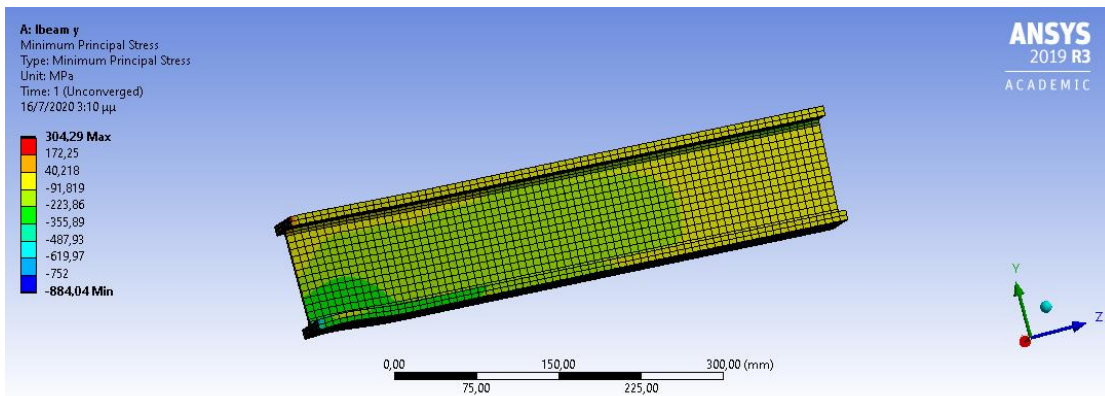


Σχήμα 5.16 Συνολικές παραμορφώσεις στη δοκό για φορτίο με μέγιστη τιμή 5 kPa.

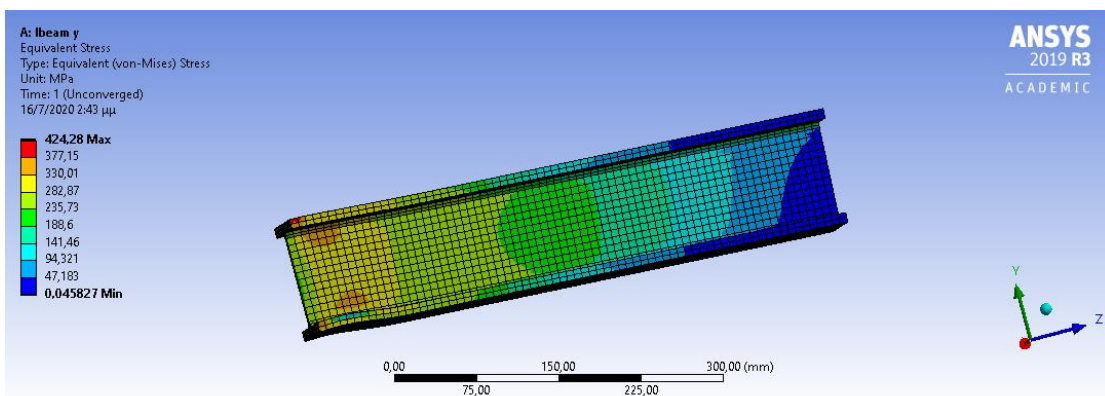
Μεγαλύτερη αύξηση του φορτίου σε τιμή 8 kPa οδηγεί σε τερματισμό της ανάλυσης πριν την πλήρη επιβολή του, δηλαδή σε αστοχία του μέλους και αριθμητική αστάθεια του μοντέλου. Τα αποτελέσματα από το τελευταίο βήμα ανάλυσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.17 έως και 5.20. Χαρακτηριστικές οι υψηλές τιμές των τάσεων σε μεγάλο τμήμα της δοκού.



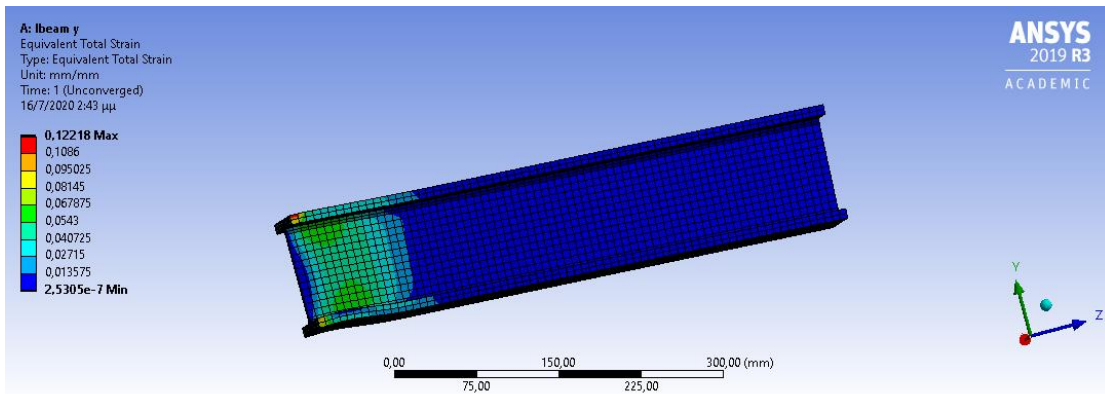
Σχήμα 5.17 Μέγιστες κύριες τάσεις στη δοκό για φορτίο με μέγιστη τιμή 8 kPa.



Σχήμα 5.18 Ελάχιστες κύριες τάσεις στη δοκό για φορτίο με μέγιστη τιμή 8 kPa.

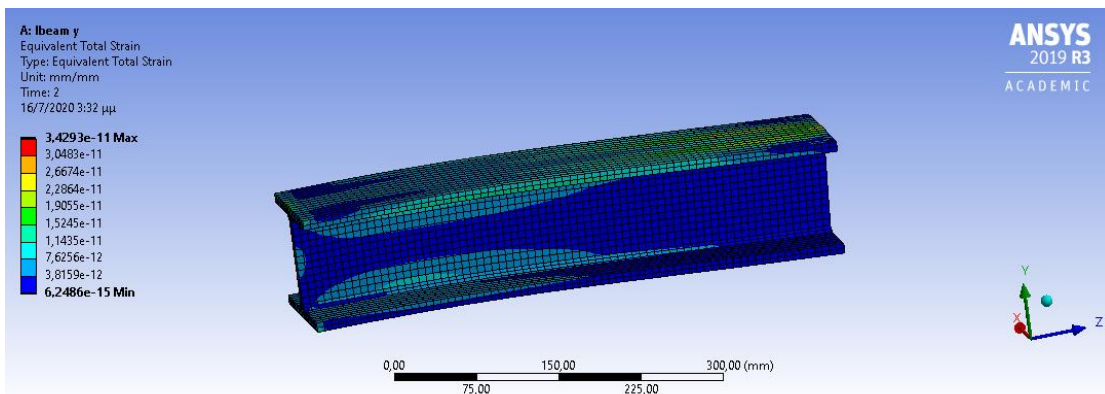


Σχήμα 5.19 Τάσεις von-Mises στη δοκό για φορτίο με μέγιστη τιμή 8 kPa.



Σχήμα 5.20 Συνολικές παραμορφώσεις στη δοκό για φορτίο με μέγιστη τιμή 8 kPa.

Τέλος για μικρότερη τιμή του φορτίου (2 kPa), η ανάλυση δείχνει ελαστική συμπεριφορά της δοκού, χωρίς εκδήλωση τοπικού λυγισμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21.



Σχήμα 5.21 Συνολικές παραμορφώσεις στη δοκό για φορτίο με μέγιστη τιμή 2 kPa.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η συμπεριφορά τυπικών μελών μεταλλικών κατασκευών.

Οι μεταλλικές κατασκευές λόγω των πλεονεκτημάτων τους, με κυριότερα τις εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα, την πλήρως βιομηχανοποιημένη παραγωγή του υλικού αλλά και των δομικών στοιχείων, τη μείωση που επιτυγχάνεται στο βάρος του φορέα και την ευκολία και ταχύτητα στην κατασκευή χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στο σύγχρονο περιβάλλον δόμησης. Μάλιστα, αποτελούν την καλύτερη λύση για βιομηχανικούς χώρους (μεγάλα ανοίγματα) και ψηλά κτίρια.

Με στόχο τη μείωση του ίδιου βάρους, στις συνηθισμένες μεταλλικές κατασκευές συνήθως χρησιμοποιούνται τυποποιημένες διατομές «I» (διπλά ταυ). Τα μεταλλικά στοιχεία με διατομή «I», όταν δέχονται εγκάρσια φορτία, δηλαδή βρίσκονται υπό κάμψη, είναι πιθανό να εμφανίσουν τοπικό λυγισμό στο θλιβόμενο πέλμα. Ο Ευρωκώδικας 3 προβλέπει ειδικό έλεγχο, την κατάταξη διατομής, για να εντοπιστεί η πιθανότητα λυγισμού και να αντιμετωπιστεί.

Η συμπεριφορά μιας δοκού με διατομή «I» υπό κάμψη μελετήθηκε με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με τον Η/Υ επιτρέπει την ακριβή λύση προβλημάτων μηχανικής που δεν είναι δυνατόν να επιλυθούν με την ίδια ακρίβεια με άλλους τρόπους. Τα σύγχρονα λογισμικά όπως το ANSYS διαθέτουν βιβλιοθήκες στοιχείων διαφόρων ειδών (γραμμικά, επιφάνειακά ή χωρικά). Η επιλογή του κατάλληλου στοιχείου εξαρτάται από το είδος του προβλήματος που επιλύεται. Αντίστοιχα, πολύ προσοχή απαιτείται και όταν καθορίζονται άλλες παράμετροι του υπολογιστικού μοντέλου, όπως π.χ. ο αριθμός των στοιχείων στα οποία διαιρείται ο φορέας. Είναι σημαντικό ο μελετητής μηχανικός να είναι εξοικειωμένος με τη μέθοδο και το πρόγραμμα ώστε να μη γίνουν λάθη και να προκύψει η καλύτερη δυνατή λύση. Σε κάθε περίπτωση, η σωστή εφαρμογή της μεθόδου και η χρήση των σύγχρονων προγραμμάτων μπορεί να οδηγήσει σε εντυπωσιακά αποτελέσματα και να επιτρέψει την επίλυση ιδιαίτερα δύσκολων προβλημάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βάγια Ι., Ερμόπουλου Ι. Χ., Ιωαννίδη Γ. (1997). Σιδηρές Κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος Ι, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.

Γαντές Χ., «Σιδηρές Κατασκευές Ι», Διαλέξεις μαθήματος, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Ευρωκώδικας 3: Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα, Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια, CEN, 2003.

Καρύδης Π. Α., «Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε Λεπτότοιχες Κατασκευές», Σημειώσεις μαθήματος, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.

Τσαγκαροπούλου Μ. –Κ. και Τζιβιέρη Μ. (2017) «Σχεδιασμός μεταλλικών κατασκευών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3», Διπλωματική Εργασία, Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.

Ansys Student, Release 2019 R1.

Ιστοσελίδες:

http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me1_2t.htm

eur-lex.europa.eu

http://okeanis.lib2.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/3967/PTX_XAL_mt_15_11_17%20%282%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y

<https://www.ansys.com/>

<http://earthlocations.blogspot.com/2014/11/golden-gate-bridge-san-francisco.html>

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CE%AC%CE%BB%CF%85%CE%B2%CE%B1%CF%82>

http://www.profishol.gr/media/17703/hot%20rolled%20ibeam_ipe.pdf

<https://ocw.aoc.ntua.gr/modules/document/file.php/CIVIL105/%CE%A3%CE%B9%CE%B4%CE%B7%CF%81%CE%AD%CF%82%20%CE%9A%CE%B1%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%BA%CE%B5%CF%85%CE%AD%CF%82%20%CE%99%20-%20%CE%94%CE%B9%CE%B1%CF%86%CE%AC%CE%BD%CE%B5%CE%B9%CE%B5%CF%82%20%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CE%BB%CE%AD%CE%BE%CE%B5%CF%89%CE%BD/%CE%94%CE%B9%CE%AC%CE%BB%CE%B5%CE%BE%CE%B7%202%CE%94%CE%BF%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82%20%CF%87%CE%AC%CE%BB%CF%85%CE%B2%CE%B1%CF%82.pdf>