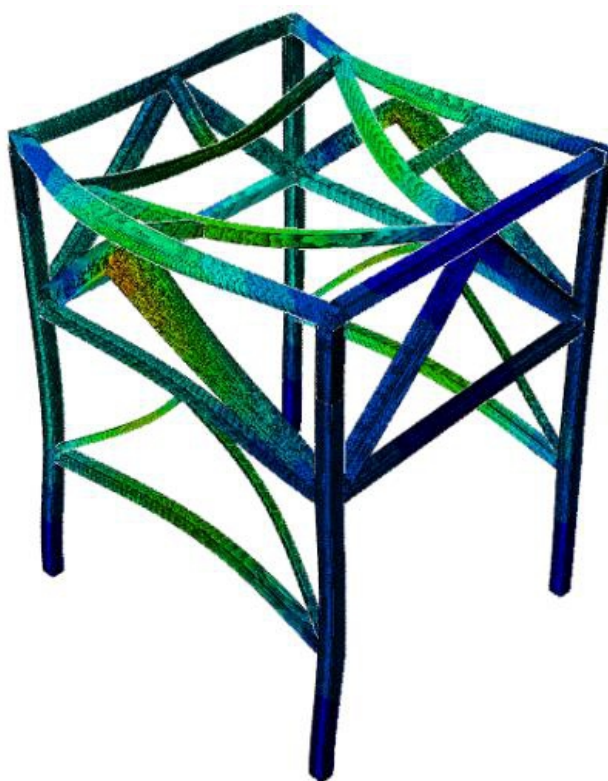




**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΚΟΠΗΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ**

**ΣΧΕΔΙΟΜΕΛΕΤΗ ΕΔΡΑΣΗΣ  
ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΥ ΡΟΜΠΟΤ  
ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ  
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



**ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ  
ΦΙΩΤΟΔΗΜΗΤΡΑΚΗ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΡΙΣΤΟΜΕΝΗΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**Στους παππούδες μου,**

**Μιχάλη, Κατερίνα**

**Νίκο, Ελευθερία**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Αριστομένη Αντωνιάδη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το αντικείμενο καθώς και για τη βοήθεια και την καθοδήγηση που μου πρόσφερε σε όλη τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες του εργαστηρίου μικροκοπής και κατασκευαστικής προσομοίωσης Ιωάννα Πατεράκη, Βαγγέλη Νικολιδάκη και Άγγελο Μαρινάκη. Κυρίως όμως οφείλω να ευχαριστήσω τους πολύτιμους φίλους μου και την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση και στήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας και της ολοκλήρωσης της διπλωματικής μου εργασίας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>5</b>
1.1 Αντικείμενο εργασίας .....	5
1.2 Δομή εργασίας.....	5
<b>2. ΡΟΜΠΟΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ .....</b>	<b>6</b>
2.1 Ρομπότ .....	6
2.1.1 Σειριακά ρομπότ .....	6
2.1.2 Παράλληλα ρομπότ .....	7
2.1.3 Ρομπότ Delta.....	8
2.2 ABB.....	9
2.3 IRB 360-6/1600 .....	10
2.3.1 Χαρακτηριστικά.....	10
2.3.2 Τεχνικές προδιαγραφές .....	11
2.3.3 Εφαρμογές .....	13
2.3.4 Πρότυπα ασφαλείας .....	14
<b>3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....</b>	<b>16</b>
3.1 Εισαγωγή.....	16
3.2 Μοντελοποίηση.....	16
3.3 Εφαρμογή Μ.Π.Σ. σε δοκό .....	18
3.3.1 Εφαρμογή συγκεντρωμένου φορτίου σε πρόβολο .....	21
3.3.2 Εφαρμογή ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου σε πρόβολο .....	23
3.3.3 Εφαρμογή συγκεντρωμένου φορτίου σε αμφιέριστη δοκό .....	24
3.3.4 Εφαρμογή ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου σε αμφιέριστη δοκό .....	26
3.4 Κατασκευή ANASA .....	27
3.4.1 Στατική ανάλυση .....	27
3.4.2 Ιδιοτιμές και ιδιομορφές .....	33
<b>4. Παρουσίαση εναλλακτικών κατασκευών .....</b>	<b>37</b>
4.1 Κατασκευή 1 .....	37
4.2 Κατασκευή 2 .....	42
4.3 Κατασκευή 3 .....	48
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>55</b>
<b>6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>56</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ .....</b>	<b>57</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΙ ΔΟΚΟΙ.....</b>	<b>62</b>



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Αντικείμενο εργασίας

Το έργο ΑΝΑΣΑ (Ανακύκλωση Αστικών Απορριμμάτων) της ΔΕΔΙΣΑ (Διαδημοτική Επιχείρηση Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων) στοχεύει στη δημιουργία ενός αυτόνομου διαχωριστή ανακυκλώσιμων υλικών, ο οποίος θα αναγνωρίζει, επιλέγει και θα μεταφέρει πολλά διαφορετικά ανακυκλώσιμα υλικά στους αντίστοιχους κάδους συλλογής. Προϋπόθεση για την ανάπτυξη ενός αποδοτικού διαχωριστή είναι η χρήση ενός στιβαρού ρομπωτικού βραχίονα ο οποίος θα κινείται με μεγάλη ακρίβεια και υψηλές ταχύτητες, μεταφέροντας αντικείμενα μικρού – μεσαίου βάρους. Το ρομπότ θα πρέπει να διαθέτει ένα σύστημα αρπαγής το οποίο θα συλλαμβάνει και θα συγκρατεί τα αντικείμενα κατά τη διάρκεια της μεταφοράς τους. Με βάση τις απαιτήσεις και τις τεχνικές προδιαγραφές που απαιτούνται, κρίθηκε η αρχιτεκτονική ενός Delta ρομπότ ως η πιο κατάλληλη και αποδοτική. Το ρομπωτικό σύστημα το οποίο κρίθηκε ως το πιο κατάλληλο για τη παραπάνω διαδικασία είναι το IRB 360-6/1600 της ABB.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να μελετηθεί η έδραση του ρομπωτικού συστήματος, η οποία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από τη ΔΕΔΙΣΑ. Έπειτα θα πραγματοποιηθεί σχεδιομελέτη εναλλακτικών κατασκευών προκειμένου να ληφθούν συμπεράσματα σχετικά με τη στιβαρότητα της αρχικής κατασκευής.

### 1.2 Δομή εργασίας

Στο **1<sup>ο</sup> κεφάλαιο** γίνεται μια εισαγωγή στην εργασία μέσω της παρουσίασης του βασικού αντικειμένου και της δομής της.

Στο **2<sup>ο</sup> κεφάλαιο** γίνεται περιγραφή των ρομπότ (σειριακά, παράλληλα, delta) και παρουσιάζεται εν συντομία η βιομηχανία ρομπωτικών συστημάτων ABB και τα χαρακτηριστικά του ρομπωτικού συστήματος IRB360-6/1600.

Στο **3<sup>ο</sup> κεφάλαιο** περιγράφεται το μοντέλο προσομοίωσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε δοκούς και έπειτα εφαρμόστηκε στην κατασκευή της ΔΕΔΙΣΑ.

Στο **4<sup>ο</sup> κεφάλαιο** έγινε εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε εναλλακτικές κατασκευές.

Τέλος, στο **5<sup>ο</sup> κεφάλαιο** αναφέρονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που εξάγονται από τις μελέτες των κατασκευών.

## 2. ΡΟΜΠΟΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Στη σύγχρονη βιομηχανία, η ανάπτυξη της τεχνολογίας και οι τάσεις της αγοράς καθιστούν τα ρομπότ αναπόσπαστο κομμάτι της παραγωγής. Πρόκειται για μία μηχανική συσκευή η οποία μπορεί να υποκαθιστά τον άνθρωπο σε διάφορες εργασίες. Ένα ρομπότ μπορεί να δράσει κάτω από τον απευθείας έλεγχο ενός ανθρώπου ή αυτόνομα κάτω από τον έλεγχο ενός προγραμματισμένου υπολογιστή. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εργασίες υπό αντίξοες συνθήκες, οι οποίες είτε είναι δύσκολες είτε επικίνδυνες για να γίνουν απευθείας από έναν άνθρωπο. Σε άλλες περιπτώσεις, χρησιμοποιείται για να εκτελέσει εργασίες ταχύτερα ή φθηνότερα απ' ό,τι ο άνθρωπος. Συνεπώς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην αυτόματη παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων προϊόντων, με μεγαλύτερη ευελιξία στην παραγωγή και με χαμηλότερο κόστος.

Ρομποτικός χειριστής είναι ένα τηλεχειριζόμενο ή προγραμματιζόμενο ή ευφυές ηλεκτρομηχανικό σύστημα. Τα συστήματα αυτά είναι κατάλληλα για την εκτέλεση εναλλακτικών εργασιών και καθηκόντων, όπως διαχείριση υλικών, μετακίνηση αντικειμένων, συναρμολόγηση, κατεργασίες, συγκολλήσεις και έλεγχος ποιότητας. Τα ρομποτικά συστήματα τα οποία μπορεί να είναι σειριακά ή παράλληλα, θα εξεταστούν αναλυτικότερα στα παρακάτω υποκεφάλαια.



Σχήμα 2.1: Σύγχρονο ρομποτικό σύστημα στη χειρουργική

### 2.1 Ρομπότ

#### 2.1.1 Σειριακά ρομπότ

Οι ρομποτικοί χειριστές σειριακού τύπου αποτελούν την πλειοψηφία των βιομηχανικών ρομπότ. Τα ρομπότ αυτά είναι ανοικτές κινηματικές αλυσίδες στερεών σωμάτων που ονομάζονται σύνδεσμοι, συνδεδεμένων σειριακά μέσω ανεξάρτητα κινούμενων αρθρώσεων. Το ένα άκρο, η βάση του ρομπότ, είναι σταθερά στερεωμένο στο έδαφος, ενώ το άλλο άκρο, στο οποίο είναι συνήθως προσαρτημένο ένα εργαλείο ή ένα τελικό στοιχείο δράσης, μπορεί να κινείται ελεύθερα στο χώρο και να ασκεί δυνάμεις και ροπές σε αντικείμενα που χειρίζεται το ρομπότ κατά την εκτέλεση εργασιών. Κάθε ζεύγος συνδέσμου – άρθρωσης συγκροτεί ένα βαθμό ελευθερίας, ο οποίος μπορεί να είναι περιστροφικός ή γραμμικός. Στην ουσία, η διάταξη προσομοιάζεται σαν ένα ανθρωπόμορφο χέρι που αποτελείται από ένα ώμο (σταθερή βάση), έναν αγκώνα (άρθρωση) και ένα καρπό (τελικός χειριστής). Η θέση και ο προσανατολισμός του τελικού χειριστή του ρομπότ προκύπτουν από τις θέσεις των αρθρώσεων μέσω ενός γεωμετρικού μοντέλου.

Τα σειριακά ρομπότ βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς όπως σε βιομηχανίες φανοποιίας, σε διαδικασίες συγκόλλησης μετάλλων, παλετοποίησης και κατεργασιών.



Σχήμα 2.2: Σειριακό ρομπότ σε κατεργασία συγκόλλησης (αριστερά) και κοπής με πλάσμα (δεξιά)

Στα μειονεκτήματά τους περιλαμβάνονται:

- η δυσκολία κίνησης των συνδέσμων λόγω του μεγάλου βάρους των ενεργοποιητών που διαθέτουν,
- η μικρή σχέση βάρους μεταξύ του ωφέλιμο φορτίου που χειρίζεται και του συνολικού βάρους της ρομποτικής διάταξης,
- η πλήρης εξάρτηση των συνδέσμων μεταξύ τους καθώς στη περίπτωση που εμφανιστεί σφάλμα σε έναν ή περισσότερους, αυτό μεταφέρεται προσθετικά και στους υπόλοιπους.

Αντιθέτως στα πλεονεκτήματα του ρομπότ είναι ο μεγάλος χώρος εργασίας του, ο οποίος περιορίζεται μόνο από το μέγεθός του και το χώρο στον οποίο απασχολείται.

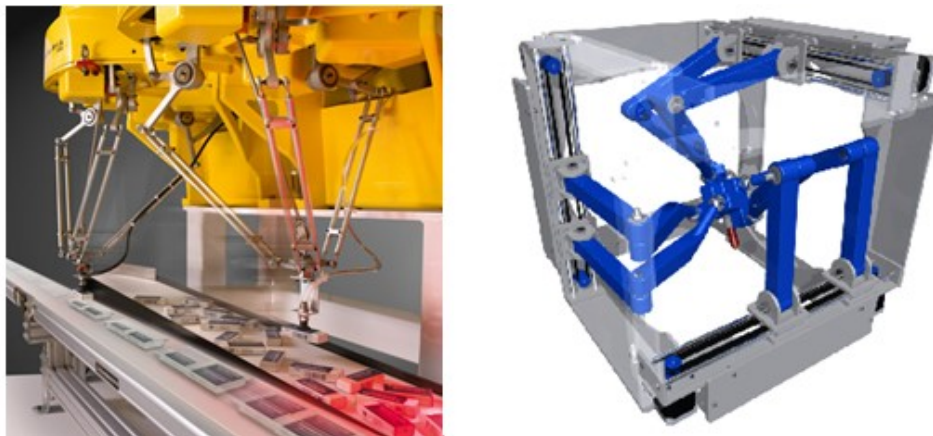
### 2.1.2 Παράλληλα ρομπότ

Ένας παράλληλος χειριστής αποτελείται από μία ακίνητη πλατφόρμα βάσης, μία κινούμενη πλατφόρμα και από διάφορα πόδια (βραχίονες) τα οποία συνδέουν τις δύο πλατφόρμες. Κάθε πόδι είναι στην ουσία μία σειριακή κινηματική αλυσίδα, τα δύο άκρα της οποίας είναι δύο πλατφόρμες. Σε αντίθεση με τους σειριακούς χειριστές, των οποίων όλες οι αρθρώσεις έχουν τη δυνατότητα κίνησης καθοδηγούμενης από έναν κινητήρα, οι παράλληλοι χειριστές διαθέτουν αρθρώσεις χωρίς τη δυνατότητα καθοδηγούμενης κίνησης. Παράδειγμα παράλληλου ρομποτικού συστήματος είναι ο προσομοιωτής πτήσεων ο οποίος αποτελείται από έξι πόδια καθοδηγούμενα από υδραυλικά έμβολα.

Σε σχέση με τους σειριακούς χειριστές, οι παράλληλοι σχεδιάζονται με βραχίονες κοντούς και απλούς στην κατασκευή τους, ώστε να είναι στιβαροί για την αποφυγή τυχών ανεπιθύμητων κινήσεων. Κάθε ενεργοποιητής κινείται με τους δικούς του βαθμούς ελευθερίας, όπως και στους σειριακούς. Ωστόσο, λόγω του κλειστού κυκλώματος της διάταξης (βάση κίνησης – βραχίονες – βάση στήριξης) στους παράλληλους χειριστές η ευελιξία της κίνησης του κάθε βραχίονα περιορίζεται από την κίνηση των υπόλοιπων βραχιόνων. Παρόλα αυτά, λόγω της γεωμετρίας της διάταξης, οι σύνδεσμοι και οι ενεργοποιητές του καταπονούνται μόνο από τάσεις παραμόρφωσης και πίεσης, χωρίς να εμφανίζονται καμπτικές τάσεις. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των παράλληλων χειριστών είναι ότι με την τοποθέτηση των ενεργοποιητών στο κέντρο της βάσης στήριξης, η συνολική μάζα της διάταξης μεταφέρεται στο κέντρο της. Λόγω της σωστής κατανομής του βάρους, ελαχιστοποιείται η ροπή αδράνειας του ρομπότ το οποίο συμβάλει στην ομαλή του λειτουργία. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, οι παράλληλοι χειριστές διαθέτουν

μεγάλο εύρος κινήσεων, κινούνται σε μεγαλύτερες ταχύτητες και με μεγαλύτερη ακρίβεια σε αντίθεση με τους σειριακούς.

Τα παράλληλα ρομπότ προτιμώνται στη βιομηχανία λόγω της ευελιξίας και της ταχύτητάς τους. Για το λόγο αυτό βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς όπως στις μηχανουργικές κατεργασίες, στο χώρο της ανακύκλωσης συσκευασιών καθώς και σε κατεργασίες υψηλής ακρίβειας (ευθυγράμμιση οπτικών ινών). Πολλές εναλλακτικές μορφές παράλληλων ρομπότ έχουν αναπτυχθεί όπως το Hexa, το Star και το Delta, το οποίο θα αναλυθεί στο επόμενο υποκεφάλαιο.

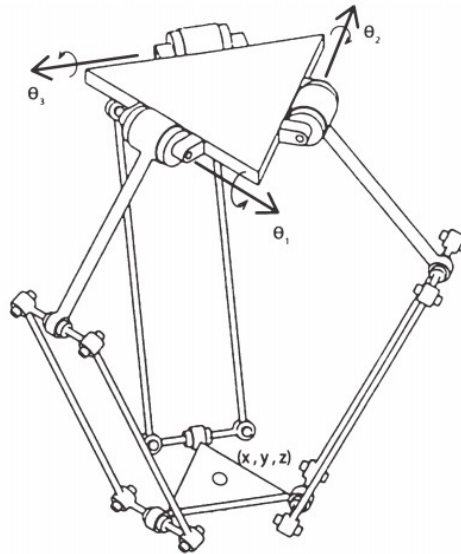


Σχήμα 2.3: Παράλληλο ρομπότ σε διαδικασία συλλογής προϊόντων (αριστερά) και τρισδιάστατος εκτυπωτής (δεξιά)

### 2.1.3 Ρομπότ Delta

Το Delta ρομπότ αποτελείται από τρεις βραχίονες που συνδέονται στη πλατφόρμα με αρθρώσεις διπλής περιστροφής. Το βασικό χαρακτηριστικό του σχεδιασμού είναι η χρήση ενός παραλληλογράμμου στο βραχίονα, ο οποίος διατηρεί τον προσανατολισμό του τελικού χειριστή. Η βάση του ρομπότ είναι τοποθετημένη πάνω από το χώρο εργασίας του και όλοι οι ενεργοποιητές είναι πάνω σε αυτή. Από τη βάση φεύγουν τρεις βραχίονες και η άκρη τους συνδέεται σε μία μικρότερη τριγωνική πλατφόρμα. Η ενεργοποίηση των συνδέσμων εισόδου κινεί αυτή τη πλατφόρμα κατά  $x$ ,  $y$ , και  $z$  διεύθυνση. Καθώς οι ενεργοποιητές είναι τοποθετημένοι στη βάση, οι βραχίονες μπορεί να είναι κατασκευασμένοι από ελαφριά υλικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα κινούμενα μέρη του ρομπότ να έχουν μικρή αδράνεια, οπότε μπορεί το ρομπότ να έχει μεγάλες ταχύτητες και επιταχύνσεις. Έχοντας συνδέσει τους βραχίονες στην πλατφόρμα αυξάνεται η ακαμψία του ρομπότ αλλά μειώνεται ο χώρος εργασίας του.

Η πιο γνωστή υλοποίηση ενός Delta ρομπότ είναι του Clavel, με βάση την οποία σχεδιάστηκε η διάταξη της ABB IRB360 η οποία θα αναλυθεί στο επόμενο υποκεφάλαιο. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη υλοποίηση, το ρομπότ αποτελείται από μία σταθερή βάση, μία κινούμενη πλατφόρμα και τρεις βραχίονες. Το πάνω μέρος των βραχιόνων είναι μία περιστροφική άρθρωση, κινούμενη μέσω ενός σερβοκινητήρα. Οι μεταβλητές ελέγχου είναι οι  $\theta$ , όπως φαίνονται στους άξονες του [σχήματος 2.4](#). Σε αυτό το μοντέλο οι γωνίες υπολογίζονται με τον κανόνα του δεξιού χεριού, με μηδενική γωνία να ορίζεται η γωνία που σχηματίζει ο πάνω βραχίονας όταν βρίσκεται σε οριζόντια θέση. Το παραλληλόγραμμο τεσσάρων αξόνων, του κάτω μέρους των βραχιόνων, διασφαλίζει μόνο τη μεταφορική κίνηση.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα Delta ρομπότ

## 2.2 ABB

Η ABB πρόκειται για μία πρωτοποριακή τεχνολογία στο χώρο της ρομποτικής και της βιομηχανίας. Κατέχει ηγετική θέση στον τομέα των ψηφιακών βιομηχανιών με εφαρμογές στην ηλεκτροκίνηση, τη βιομηχανική αυτοματοποίηση, κίνηση, ρομποτική και στην αυτοματοποίηση, υποστηριζόμενη από την ψηφιακή τεχνολογία ABB Ability™. Προμηθεύει την αγορά με βιομηχανικά ρομπότ, λογισμικά για τη χρήση των ρομπότ και εξοπλισμούς.

Η ABB παρέχει ένα ευρύ φάσμα ρομπότ προκειμένου να βοηθήσει τους κατασκευαστές στη βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας, της ποιότητας των προϊόντων και της ασφάλειας των εργαζομένων. Ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε βιομηχανίας, η ABB, προσφέρει ένα ρομπότ, το οποίο θα τηρεί τις προϋποθέσεις και θα ικανοποιεί τις ανάγκες της. Κάποιες εφαρμογές της ABB στη βιομηχανία είναι:

- Αυτοματοποίηση βιομηχανιών ξύλινων επίπλων και οικοδομικών υλικών.
- Αυτοματοποίηση διαδικασιών συλλογής και συσκευασίας προϊόντων.
- Αυτοματοποίηση διαδικασιών συγκόλλησης.
- Αυτοματοποίηση στην επεξεργασία των προϊόντων, το βάψιμο και την επένδυσή τους.



Σχήμα 2.5: Ρομπότ της ABB για την εκτέλεση διεργασιών υψηλής ακρίβειας σε συνεργασία με τον άνθρωπο (αριστερά), για βάψιμο αντικειμένων (μέση) και για κατεργασίες συγκόλλησης (δεξιά)

### IRB 360

Το IRB360, της ABB, είναι ένα παράλληλο Delta ρομπότ το οποίο εξασφαλίζει την υψηλότερη παραγωγικότητα σε διεργασίες συλλογής και συσκευασίας. Οι διαδικασίες αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές στην ελαφριά βιομηχανία, καθώς αφορά μεγάλο πλήθος ευπαθών προϊόντων μικρού όγκου και βάρους, τα οποία πρέπει να συλλέγουν προσεκτικά και να συσκευαστούν, ταυτόχρονα όμως με μεγάλη ταχύτητα και ακρίβεια τοποθέτησης. Η ABB περιλαμβάνει έξι παραλλαγές αυτού του ρομπότ. Η επιλογή του κατάλληλου προκύπτει ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί το ρομποτικό σύστημα, το handling capacity (payload) δηλαδή το βάρος το οποίο θα μπορεί να διαχειριστεί και το working range (reach), τη διάμετρος στην οποία θα κινείται.



Σχήμα 2.6: Delta ρομπότ IRB 360 της ABB

Οι διάφοροι τύποι IRB360 είναι:

- IRB360-1/800 (payload: 1kg και reach: 800mm)
- IRB360-1/1130 (payload: 1kg και reach: 1130mm)
- IRB360-3/1130 (payload: 3kg και reach: 1130mm)
- IRB360-8/1130 (payload: 8kg και reach: 1130mm)
- IRB360-1/1600 (payload: 1kg και reach: 1600mm)
- IRB360-6/1600 (payload: 6kg και reach: 1600mm)

Συνολικά θα μπορούσαμε να τονίσουμε ότι το IRB360 έχει πολλά πλεονεκτήματα στη βιομηχανία καθώς προσφέρει:

- Μεγάλη ταχύτητα ευελιξίας.
- Δυνατότητα διαχείρισης φορτίων έως 8kg.
- Υγιονομικό σχεδιασμό για τις εφαρμογές πλύσης.
- Εξαιρετική απόδοση παρακολούθησης.
- Ολοκληρωμένο λογισμικό όρασης.
- Ολοκληρωμένος έλεγχος των ιμάντων.

## 2.3 IRB 360-6/1600

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας θα μελετηθούν οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του IRB 360-6/1600.

### 2.3.1 Χαρακτηριστικά

Το IRB360-6/1600 ανήκει στην κατηγορία των Delta ρομπότ. Αποτελείται από έναν κινητήρα, ο οποίος βρίσκεται μέσα σε ένα ακίνητο κιβώτιο-βάση και τέσσερις ελαφριούς



βραχίονες. Οι βραχίονες βρίσκονται σε παράλληλη ζεύξη και οι αρθρώσεις τους συνδέονται με τη βάση. Η κατασκευή έχει 4 βαθμούς ελευθερίας, τρεις μετατοπίσεις και μία περιστροφή. Ο τέταρτος βραχίονας εκτείνεται από τη βάση στο κέντρο της κινούμενης πλατφόρμας και δίνει στον τελικό χειριστή τον τέταρτο βαθμό ελευθερίας γύρω από τον κάθετο άξονα. Οι βραχίονες καταλήγουν σε ένα σύστημα αρπαγής. Το σύστημα αυτό συλλαμβάνει και συγκρατεί τα αντικείμενα κατά τη διάρκεια της μεταφοράς τους. Το ρομπότ αυτό διαθέτει κινητά μέρη από ελαφρά, ανθεκτικά και ανοξείδωτα υλικά. Επίσης η χρήση ενός πλήκτρου φρένου σε κατάλληλη θέση βελτιώνει την εργονομία και τη φιλικότητα προς το χρήστη. Τέλος, η χρήση δομικών στοιχείων που απαιτούν ελάχιστη έως και καθόλου συντήρηση, όπως πλαστικά ρουλεμάν χωρίς τριβή που δεν λιπαίνονται, καθιστούν τη συντήρηση του ρομπότ πιο εύκολη, γρήγορη και με μικρό κόστος.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η συμπεριφορά του ρομποτικού συστήματος σε ιδιαίτερες καταστάσεις, όπως η εμφάνιση ανώμαλων προϊόντων για συσκευασία (π.χ. κατεψυγμένα προϊόντα κολλημένα μεταξύ τους) ή άκαιρη άφιξη προϊόντων στη ροή της παραγωγής (π.χ. λόγω μετατοπίσεων στις ταινίες μεταφοράς). Εξαιτίας αυτών των καταστάσεων είναι πιθανό να δημιουργούνται συγκρούσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το σύστημα βραχιόνων έχει την ιδιότητα να αποσπάται αλλά να παραμένει σε αιωρούμενη συγκράτηση μέσω ελατηρίων. Ως αποτέλεσμα, προλαμβάνονται ζημιές στο ρομπότ, στα προϊόντα και στη γραμμή παραγωγής.

Αξιόλογο χαρακτηριστικό του IRB360 είναι ο εξελιγμένος έλεγχος Quick-Move™ και True-Move™, ο οποίος τον καθιστά παραγωγικότερο. Το σύστημα ελέγχου ρυθμίζει τις κινήσεις λαμβάνοντας υπόψη κάθε στιγμή τη δυναμική του κατάστασης και εξασφαλίζει την ομαλή του κίνηση. Επιπλέον, μειώνει τις μηχανικές καταπονήσεις, αυξάνει το χρόνο ζωής, μεγαλώνει το διάστημα συντήρησης και ελαχιστοποιεί τις αναγκαστικές διακοπές της παραγωγής, οι οποίες θα οδηγούσαν σε απώλειες της παραγωγής. Επιπρόσθετα, ο υπεύθυνος λειτουργίας του ρομπότ έχει τη δυνατότητα να εντοπίσει τις δυσλειτουργίες του ρομπότ, να διακόψει τη λειτουργία του και συνεπώς να προλάβει διαταραχές στη διεργασία.

Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί η εργονομική ευελιξία του ρομπότ. Ο έξυπνος σχεδιασμός του αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα τόσο για την αύξηση της πυκνότητας των μηχανημάτων στο χώρο του εργοστασίου, που οδηγεί σε αύξηση της παραγωγικότητας, όσο και για τη δυνατότητα ένταξης νέων συστημάτων ρομπότ σε ήδη υπάρχουσες γραμμές παραγωγής, όπου υπάρχει δυσκολία ανακατατάξεων άλλων μηχανημάτων.

### **2.3.2 Τεχνικές προδιαγραφές**

Το IRB360-6/1600 ζυγίζει 120kg. Έχει τη δυνατότητα να συλλέγει, να μεταφέρει και να διαχειρίζεται αντικείμενα βάρους έως 6kg. Επιπλέον, η στάθμη του ήχου κατά τη λειτουργία του δεν ξεπερνά τα 70dB εκτός του χώρου εργασίας του. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στις θερμοκρασίες στις οποίες μπορεί να αντέξει ο ρομποτικός χειριστής. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του η θερμοκρασία δεν πρέπει να ξεπερνάει τους 45°C και να μην είναι μικρότερη από 0°C. Ωστόσο, κατά τη μεταφορά και την αποθήκευση του ρομπότ, η θερμοκρασία πρέπει να κυμαίνεται από -25°C έως 55°C. Η μέγιστη υγρασία στην οποία μπορεί να ανταπεξέλθει είναι 95%.

Η βάση του ρομπότ πιστοποιείται με βαθμό προστασίας IP67. Το πιστοποιητικό αυτό επιβεβαιώνει ότι δεν εισχωρεί καθόλου σκόνη στο υλικό του ρομπότ και ταυτόχρονα δεν μπαίνει νερό σε παροδικό βύθισμα υπό δοσμένη πίεση και χρόνο. Ωστόσο, οι βραχίονες

έχουν βαθμό προστασίας IP54, σύμφωνα με το οποίο παρέχεται μερική αδιαβροχοποίηση και προστατεύονται από σκόνη που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη λειτουργία τους. Επιπλέον, το ρομπότ ακολουθεί το πρότυπο ISO14644, το οποίο περιγράφει τα μέγιστα όρια συγκέντρωσης σωματιδίων στον αέρα, τα οποία δεν θα επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία του ρομπότ, και μετράτε σε αριθμό σωματιδίων ανά κυβικό μέτρο. Τα όρια αυτά μεταβάλλονται ανάλογα με το μέγεθος των σωματιδίων. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, το IRB360-6/1600 ανήκει στην κατηγορία 7(σχήμα 2.7).

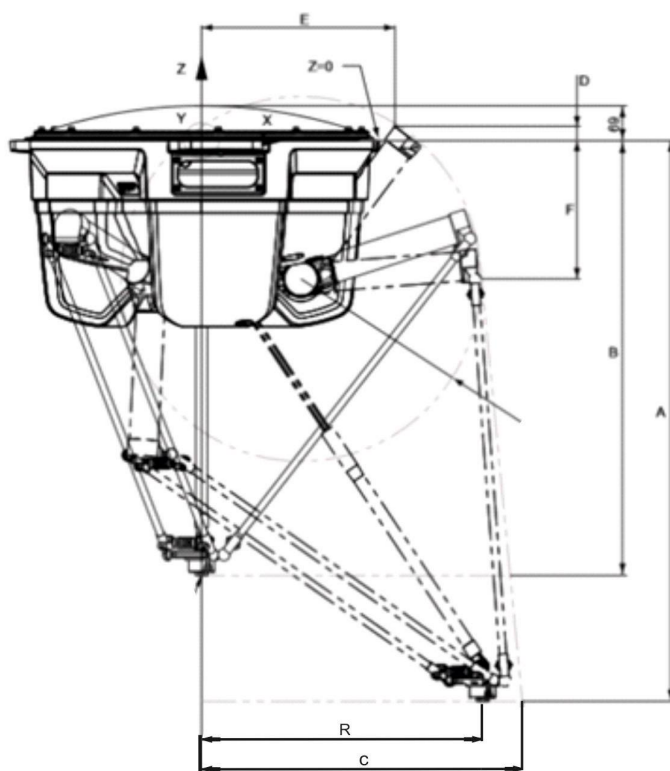
ISO Κατηγορία	(Σωματίδια ανά κυβικό μέτρο)					
	Μέγεθος σωματιδίων					
	0.1 μm	0.2 μm	0.3 μm	0.5 μm	1 μm	5 μm
<b>1</b>	10	2				
<b>2</b>	100	23	10	4		
<b>3</b>	1000	237	102	35	8	
<b>4</b>	10000	2370	1020	352	83	
<b>5</b>	100000	237000	10200	3520	832	29
<b>6</b>	1000000		102000	35200	8320	293
<b>7</b>				352000	83200	2930

Σχήμα 2.7: Πρότυπα καθαρότητας του αέρα στο χώρο εργασίας

Για την μελέτη της κίνησης του ρομπότ θεωρείται ένα σύστημα συντεταγμένων πάνω σε ένα αρχικό σημείο αναφοράς όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.8](#). Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για το προσδιορισμό της αρχικής θέσης του ρομπότ καθώς και των μέγιστων ορίων που μπορεί να κινηθεί έχουν ως εξής:

- Η απόσταση A δηλώνει τη μέγιστη θέση του ρομπότ και ισούται με 1412.5mm.
- Η απόσταση B αναφέρεται στην κίνηση του ρομπότ εντός των ορίων της περιφέρειας ενός θεωρητικού κυλίνδρου με κέντρο τον άξονα περιστροφής του βραχίονα με ακτίνα 515mm και ισούται με 1170.5mm.
- Η απόσταση C ισούται με 883mm.
- Η απόσταση D ισούται με 148.3mm.
- Η απόσταση E ισούται με 478.9mm.
- Η απόσταση F ισούται με 275mm.
- Η απόσταση R δηλώνει τη μέγιστη ακτίνα που μπορεί να κινηθεί ο τελικός χειριστής και ισούται με 800mm.





Σχήμα 2.8: Σχηματική απεικόνιση της κίνησης του ρομπότ

Το ρομπότ κινείται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση αφορά κίνηση 25-205-25 με 90 μοίρες περιστροφή του τέταρτου άξονα ενώ η δεύτερη αφορά κίνηση 90-400-90 με 90 μοίρες περιστροφή του τέταρτου άξονα. Ανάλογα με τη φάση και το payload, το ρομπότ μπορεί να συλλέξει συγκεκριμένο αριθμό αντικειμένων το λεπτό όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.9](#).

Payload	1.0kg	3.0kg	6.0kg
Φάση 1	140	125	100
Φάση 2	105	95	75

Σχήμα 2.9: Πίνακας φάσεων

### 2.3.3 Εφαρμογές

Το IRB360-6/1600 χρησιμοποιείται κυρίως σε διαδικασίες συσκευασίας διαφόρων προϊόντων αλλά και στη συλλογή τους, συλλαμβάνοντας και μεταφέροντας έως και δύο προϊόντα τη φορά. Ανάλογα με τη χρήση του ρομπότ και τα συστήματα αρπαγής που του τοποθετούνται, το ρομπότ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την προσθήκη υλικού στα υπάρχοντα προϊόντα. Οι περισσότερες εφαρμογές πραγματοποιούνται σε βιομηχανίες τροφίμων για τη συλλογή των παραγόμενων προϊόντων, για την επεξεργασία τους ή για να συσκευαστούν. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βιομηχανίες παραγωγής φαρμάκων, καλλυντικών και ειδών υγιεινής. Οι βιομηχανίες αυτές, χαρακτηρίζονται από υψηλά και αυστηρά επίπεδα υγιεινής καθώς και κανονισμών ασφαλείας. Συνεπώς, η προστασία που παρέχει το ρομπότ απέναντι σε περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως νερό και σκόνη, σύμφωνα με τη πιστοποίηση IP67, το καθιστά κατάλληλο για τις παραπάνω βιομηχανίες, στις οποίες η υγιεινή και η ασφάλεια των προϊόντων αποτελεί πρωταρχικό μέλημα.

Παραδείγματα βιομηχανιών στις οποίες έγινε χρήση του IRB360-6/1600:

- Η εταιρεία τροφίμων HoneyTop Speciality Food Limited. Χρησιμοποιήθηκε το ρομπότ με σκοπό να αυξήσει την ταχύτητα της παραγωγής των προϊόντων της σε διαδικασίες συλλογής τους.
- Η Εταιρεία τροφίμων και ποτών Unilever. Αξιοποιήθηκε το ρομπότ με ειδικά ανεπτυγμένο εξοπλισμό να συλλέγει αλλαντικά και έπειτα να τα τοποθετεί σε συσκευασίες.
- Η εταιρεία κατεψυγμένων τροφίμων Prodal. Με σκοπό την αυτοματοποίηση της παραγωγής με τη καλύτερη δυνατή ποιότητα για την προσθήκη έξτρα υλικού σε πίτσες.

#### 2.3.4 Πρότυπα ασφαλείας

Το IRB360-6/1600 έχει σχεδιαστεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.10:

Πρότυπα, EN ISO	Περιγραφή
EN ISO 12100:2010	Ασφάλεια μηχανημάτων - Γενικές αρχές σχεδιασμού - Αξιολόγηση και μείωση κινδύνου
EN ISO 13849-1:2015	Ασφάλεια μηχανών, τμημάτων συστημάτων ελέγχου - Γενικές αρχές σχεδιασμού
EN ISO 13850:2015	Ασφάλεια μηχανημάτων - Συστήματα έκτακτης ανάγκης - Αρχές σχεδιασμού
EN ISO 10218-1:2011	Βιομηχανικά ρομπότ - Προδιαγραφές ασφαλείας
ISO 9787:2013	Ρομπότ και ρομποτικές συσκευές - Σύστημα συντεταγμένων και ορολογίες κίνησης
ISO 9283:1998	Χειρισμός βιομηχανικών ρομπότ - Κριτήρια απόδοσης και συναφείς μέθοδοι δοκιμής
EN ISO 14644-1:2015	Κατηγοριοποίηση της καθαριότητας του αέρα
EN ISO 13732-1:2008	Εργονομία θερμικού περιβάλλοντος
EN 61000-6-4:2007+ A1:2011 IEC 61000-6-4:2006+A1:2010	Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, Πρότυπο εκπομπών για βιομηχανικά περιβάλλοντα
EN 61000-6-2:2005 IEC 61000-6-2:2005	Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, Πρότυπο ανοσίας για βιομηχανικά περιβάλλοντα
EN IEC 60204-1:2006	Ασφάλεια μηχανημάτων - Ηλεκτρικός εξοπλισμός μηχανών - Γενικές απαιτήσεις
EN IEC 60204-1:2006	Εξοπλισμός συγκόλλησης με τόξο
Ευρωπαϊκά πρότυπα	Περιγραφή
EN 614-1:2006+A1:2009	Ασφάλεια μηχανών - Εργονομικές αρχές σχεδιασμού
EN 574:1996+A1:2008	Ασφάλεια μηχανών, Συσκευές ελέγχου με δύο χέρια - Λειτουργικές πιτυχές - Αρχές σχεδιασμού
Επιπλέον πρότυπα	Περιγραφή
ANSI/RIA R15.06	Προδιαγραφές ασφαλείας βιομηχανικών ρομπότ και συστημάτων ρομπότ

<b>ANSI/UL 1740</b>	Πρότυπα ασφαλείας ρομπότ και ρομποτικών εξοπλισμών
<b>CAN/CSA Z 434-14</b>	Βιομηχανικά ρομπότ και συστήματα ρομπότ - Γενικές προδιαγραφές ασφαλείας

Σχήμα 2.10: Πίνακας προτύπων ασφαλείας

### 3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στα πλαίσια της διερεύνησης και της μελέτης κατασκευών, για την υποστήριξη του ρομποτικού συστήματος, της ABB, IRB360 το οποίο αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αναπτύχθηκε μοντέλο προσομοίωσης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Μ.Π.Σ.).

#### 3.1 Εισαγωγή

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ.) είναι μία αριθμητική μέθοδος η οποία εντάσσεται στον κλάδο της υπολογιστικής μηχανικής και υλοποιείται μέσω σύγχρονων λογισμικών CAE (Computer Aided Engineering). Τα λογισμικά CAE και η υπολογιστική μηχανική εν γένει, αποτελούν την τομή τριών πεδίων: των Εφαρμοσμένων Μαθηματικών, της Μηχανικής και της Επιστήμης των Υπολογιστών.

Η μέθοδος χρησιμοποιείται για την ανάλυση πληθώρας προβλημάτων:

- μηχανικής,
- ρευστομηχανικής,
- ηλεκτρομαγνητισμού,
- μετάδοσης θερμότητας
- ακουστικής.

Σε ότι αφορά τα προβλήματα μηχανικής (στατικής και δυναμικής) των κατασκευών, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία μέθοδος αριθμητικής ανάλυσης και επίλυσης πολύπλοκων προβλημάτων φόρτισης αντικειμένων, δομικών στοιχείων, μηχανολογικών εξαρτημάτων και κατασκευών. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η καθολικότητα, δηλαδή η δυνατότητα εφαρμογής της σε ένα πολύ μεγάλο εύρος προβλημάτων που εκτείνονται από πολύ απλά μονοδιάστατα και γραμμικά προβλήματα μέχρι και σε μη γραμμικά προβλήματα σύνθετων δυναμικών φορτίσεων τρισδιάστατων αντικειμένων. Από την άλλη πλευρά, βασικό της μειονέκτημα είναι η αυξημένη υπολογιστική ισχύς και ο χρόνος που απαιτείται από τα διάφορα λογισμικά υλοποίησής της για την ανάλυση των προβλημάτων.

#### 3.2 Μοντελοποίηση

Για τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία πρέπει να ακολουθηθούν συγκεκριμένα βήματα. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση έγινε χρήση ενός εμπορικού λογισμικού FEM (Fine Element Method).

Το πρώτο βήμα αφορά την ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης. Στο βήμα αυτό γίνεται η εισαγωγή ή η σχεδίαση των γεωμετριών με τα εργαλεία σχεδίασης του λογισμικού. Έπειτα καθορίζεται ο τύπος του σώματος δηλαδή:

- αν θα συμπεριφέρεται ως απαραμόρφωτο (rigid) ή παραμορφώσιμο σώμα (deformable),
- αν θα είναι δύο διαστάσεων (2D Planar), τριών διαστάσεων (3D) ή αξονοσυμμετρικό (axisymmetric),
- η τοπολογία του που μπορεί να είναι στερεό (solid), κέλυφος (shell) ή σύρμα (beam).

Στο δεύτερο βήμα καθορίζονται οι απαραίτητες ιδιότητες του μοντέλου όπως:

- φυσικές ιδιότητες (πυκνότητα),
- μηχανικές ιδιότητες (μέτρο ελαστικότητας, λόγος Poisson).

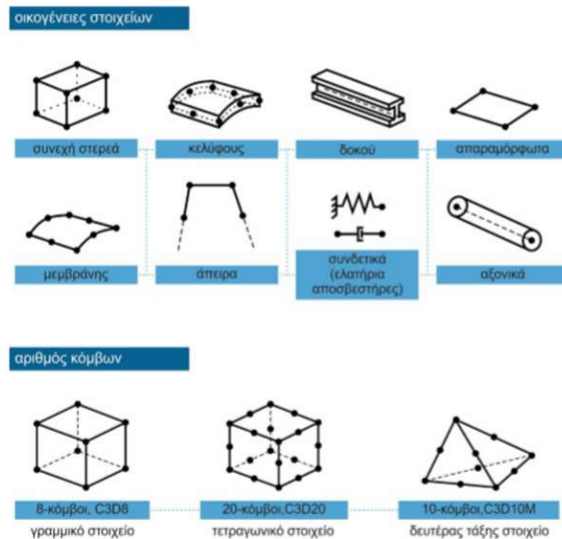
Έπειτα ακολουθεί η συναρμολόγηση της κατασκευής (assembly) και η επιβολή γεωμετρικών περιορισμών προκειμένου να παραμείνει σταθερό το μοντέλο καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή βήματος(step) που ορίζει τον τύπο της ανάλυσης (στατικό, δυναμικό, εξαγωγή ιδιοτιμών και ιδιοσυχνοτήτων κτλ.). Μέσω αυτού το βήματος, ανάλογα με τύπο της ανάλυσης, ο χρήστης επιλέγει τα αποτελέσματα που θα του παρουσιαστούν όπως μετατοπίσεις, τάσεις και παραμορφώσεις.

Ένα από τα σημαντικότερα βήματα της μεθόδου είναι η σωστή αναγνώριση και ο ορισμός των οριακών συνθηκών του προβλήματος. Στο σημείο αυτό, ορίζονται οι δυνάμεις που θα ασκηθούν στο μοντέλο (πίεση, βαρύτητα, συγκεντρωμένη δύναμη) και οι βαθμοί ελευθερίας του σώματος.

Τελευταίο βήμα της μοντελοποίησης είναι ο χωρισμός του μοντέλου σε μικρά διακριτά γεωμετρικά σχήματα προκειμένου να σχεδιαστεί το πλέγμα(meshing). Τα σώματα χωρίζονται σε τετράεδρα ή εξάεδρα στοιχεία (elements) τα οποία έχουν πλευρές, ακμές και κορυφές. Οι κορυφές των πεπερασμένων στοιχείων ονομάζονται κόμβοι (nodes) της κατασκευής (σώματος) και λειτουργούν ως τέτοιοι αφού ενώνουν τις ακμές των διαφορετικών στοιχείων μεταξύ τους. Σκοπός της μεθόδου είναι η μοντελοποίηση του προβλήματος με ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων που έχουν ως άγνωστους τις μετατοπίσεις αυτών των κόμβων, κατ' αντιστοιχία της επίλυσης ενός δικτυώματος. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε κάποιες κατηγορίες στοιχείων, ανάλογα με το πρόβλημα που πρέπει να μοντελοποιηθεί. Οι κατηγορίες χωρίζονται με βάση κάποιες ιδιότητες των στοιχείων, οι οποίες χαρακτηρίζουν και καθορίζουν τη συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Η κατηγοριοποίηση των στοιχείων γίνεται με βάση:

- την οικογένεια στην οποία ανήκουν (τετράεδρα ή εξάεδρα) ,
- τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας στους κόμβους,
- τον αριθμό των κόμβων,
- το βαθμό ολοκλήρωσης (full integration ή reduced integration).

Στο σχήμα 3.1 φαίνονται οι οικογένειες στοιχείων και ο διαχωρισμός τους με βάση τον αριθμό των κόμβων.



Σχήμα 3.1: Κατηγοριοποίηση στοιχείων με βάση την οικογένεια και τον αριθμό των κόμβων

### 3.3 Εφαρμογή Μ.Π.Σ. σε δοκό

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, έγινε εφαρμογή της μεθόδου σε ένα απλό μοντέλο με τέσσερις περιπτώσεις:

- Εφαρμογή συγκεντρωμένου φορτίου σε πρόβολο.
- Εφαρμογή ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου σε πρόβολο.
- Εφαρμογή συγκεντρωμένου φορτίου σε αμφιέριστη δοκό.
- Εφαρμογή ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου σε αμφιέριστη δοκό.

Προτού γίνει εφαρμογή των τεσσάρων περιπτώσεων, γίνεται μια σύντομη περιγραφή βασικών εννοιών με σκοπό την κατανόηση της μοντελοποίησης.

#### Είδη φορτίσεων

Τα φορτία τα οποία μπορεί κανείς να επιβάλλει στις διάφορες κατασκευές διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα συγκεντρωμένα φορτία και στα ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία. Με τον όρο συγκεντρωμένο φορτίο εννοούμε το φορτίο εκείνο του οποίου η ενέργεια περιορίζεται σε ένα σημείο του σώματος. Ένα συγκεντρωμένο φορτίο καθορίζεται πλήρως όταν δοθεί η κατεύθυνση του (διεύθυνση και φορά) καθώς και το μέτρο του. Η άλλη κατηγορία φορτίων που παρουσιάζεται είναι τα ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία. Η δράση των φορτίων αυτών δεν περιορίζεται σ' ένα συγκεκριμένο σημείο του σώματος αλλά εκτείνεται σε όλο το σώμα ή σε ένα ορισμένο τμήμα του με πεπερασμένες διαστάσεις.

#### Στηρίξεις

Οι κατασκευές οι οποίες είναι προορισμένες να παραλαμβάνουν, να φέρουν και στη συνέχεια να μεταβιβάζουν δυνάμεις, ονομάζονται φορείς. Όπως είναι φανερό ένας φορέας δεν είναι δυνατό να είναι απομονωμένος διότι τότε δεν θα εξυπηρετούσε το σκοπό για τον οποίο τέθηκε. Έτσι, για να παραμείνει ακλόνητος πρέπει να στηρίζεται κατά κάποιο τρόπο είτε σε άλλους φορείς. Οι στηρίξεις περιορίζουν την κινητικότητα της κατασκευής την οποία στηρίζουν σε σχέση με τη βάση της στήριξης. Επομένως σε κάθε κατασκευή ασκούνται από το μέρος των στηρίξεων της, δυνάμεις στις διευθύνσεις εκείνες στις οποίες

οι στηρίξεις περιορίζουν την κινητικότητα της κατασκευής. Τις δυνάμεις αυτές ονομάζουμε αντιδράσεις.

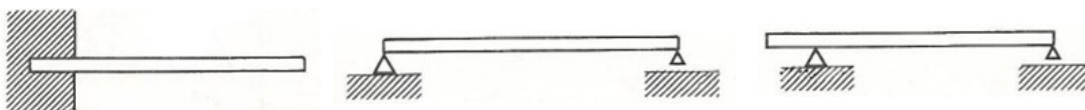
### Βασικά είδη στήριξης:

**Κύλιση** είναι η στήριξη εκείνη που εμποδίζει τη σχετική κίνηση της κατασκευής στο σημείο της στήριξης (έστω το Α) κατά τη διεύθυνση την κάθετη στο επίπεδο της κύλισης. Η στήριξη αυτή αποκλείει τη διεύθυνση μίας κατασκευής μέσα σε άλλη, όσο και την απομάκρυνσή τους. Όσον αφορά την αντίδραση  $R_A$ , περνάει από το σημείο Α και έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο κύλισης.

**Άρθρωση** είναι η στήριξη εκείνη που αποκλείει τη μετατόπιση της κατασκευής στη στήριξη καθ' οποιαδήποτε διεύθυνση. Δημιουργεί στη στηριζόμενη κατασκευή δύο περιορισμούς κινητότητας, χωρίς όμως να εμποδίζει και την περιστροφή του σώματος περί το σημείο της άρθρωσης. Όσον αφορά την αντίδραση  $R_A$ , εφαρμόζεται στο σημείο Α και έχει τυχαία διεύθυνση, συνεπώς παρουσιάζει στην περίπτωση αυτή δύο άγνωστα στοιχεία, το μέτρο της και τη γωνία  $\theta$  που σχηματίζει με κάποια γνωστή διεύθυνση.

**Πάκτωση** είναι η στήριξη εκείνη που αποκλείει όλες τις δυνατές κινήσεις του σώματος στο επίπεδό του. Έτσι το σώμα που στηρίζεται με πάκτωση δεν μπορεί να εκτελέσει ούτε μεταφορική κίνηση ούτε περιστροφή, με αποτέλεσμα να παραμένει τελείως ακίνητο. Συνεπώς ο σύνδεσμος της πάκτωσης εισάγει στο στηριζόμενο σώμα τρεις περιορισμούς κινητότητας. Στο σημείο Α της πάκτωσης αναπτύσσεται, λόγω του περιορισμού της μεταφορικής κίνησης μια δύναμη  $R_A$  τυχαίας διεύθυνσης και μία ροπή  $M_A$ , λόγω του περιορισμού της περιστροφής, που ονομάζεται ροπή πάκτωσης.

**Δοκός** Οι ισοστατικές δοκοί, δηλαδή οι δοκοί που στηρίζονται στέρεα και ισοστατικά στο έδαφος, διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο στήριξης τους σε αμφιέριστες όταν τα σημεία στήριξης βρίσκονται στα άκρα της δοκού, σε μονοπροέχουσες όταν το ένα βρίσκεται σε άκρο της δοκού ενώ το άλλο σε ενδιάμεσο σημείο της, και σε προβόλους όταν η δοκός είναι πακτωμένη στο ένα άκρο της.



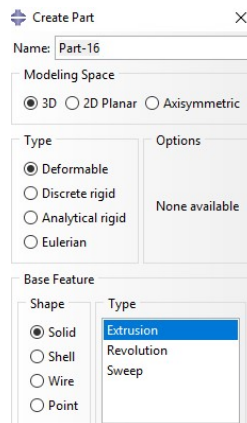
Σχήμα 3.2: Πρόβολος, αμφιέριστη δοκός και μονοπροέχουσα

### Ελαστική γραμμή-βέλος κάμψης

Κατά την εφαρμογή καμπτικού φορτίου σε μία οποιαδήποτε ευθύγραμμη δοκό οι παράλληλες προς τον άξονα της δοκού ίνες μετά την επιβολή του καμπτικού ζεύγους δεν παραμένουν ευθύγραμμες αλλά καμπυλώνονται. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται ελαστική γραμμή. Οι μετατοπίσεις του άξονα της δοκού κατά την κάθετη στον άξονα διεύθυνση, δηλαδή οι τεταγμένες της ελαστικής γραμμής με αφετηρία τον άξονα της δοκού, ονομάζονται βέλη κάμψης.

Για την εφαρμογή της μεθόδου, επιλέχθηκε η σχεδίαση μίας δοκού από χάλυβα με τα παρακάτω χαρακτηριστικά: Όσο αφορά τον τύπο του σώματος, αυτό ορίστηκε ως απαραμόρφωτο, τρισδιάστατο και στερεό. Έπειτα, σχεδιάστηκε μια τετραγωνική δοκός

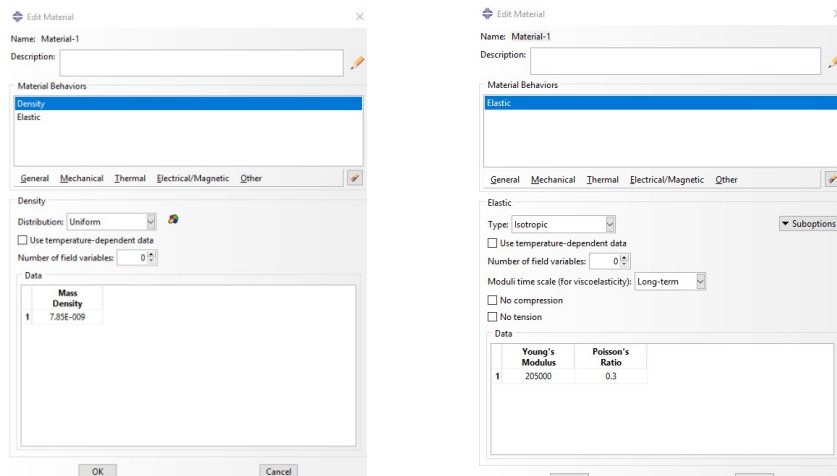
0.05m x 0.05m με μήκος (L) 1m επιλέγοντας με σειρά τις καρτέλες Module→Part→Create Part.



Σχήμα 3.3: Καθορισμός τύπου σώματος

Για τον καθορισμό των ιδιοτήτων του μοντέλου ορίστηκαν κατάλληλα τα παρακάτω μεγέθη με τη χρήση των εντολή Module→Property→Edit Material:

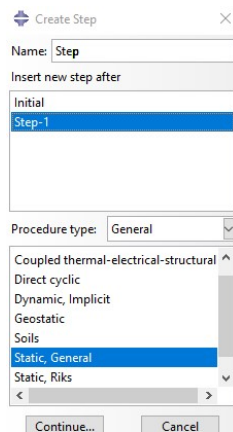
- πυκνότητα ( $\rho$ ) 7850kg/m<sup>3</sup>,
- μέτρο ελαστικότητας (E) 205GPa,
- λόγο poisson ( $\nu$ ) 0.3.



Σχήμα 3.4: Ορισμός πυκνότητας σε  $\text{kg/m}^3$  (αριστερά) και ορισμός μέτρου ελαστικότητας σε  $\text{N/mm}^2$  και  $\nu$  (δεξιά)

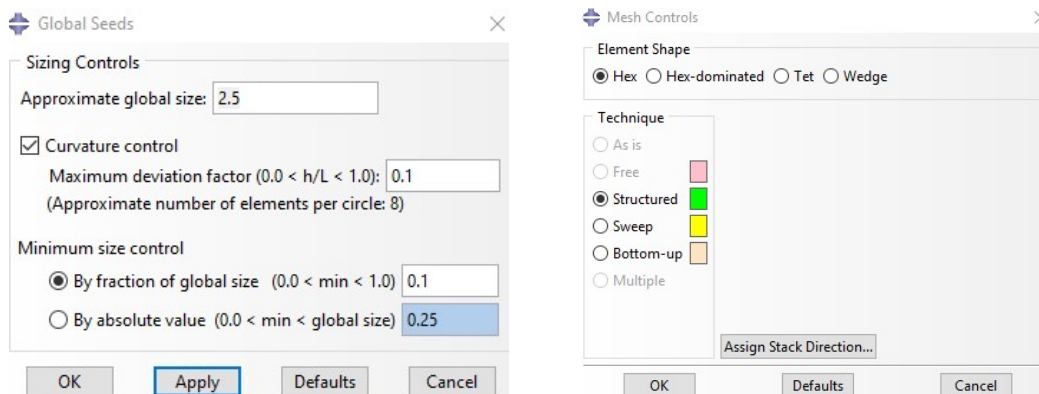
Στη συνέχεια, επιλέχθηκε να γίνει στατική ανάλυση (Module→Step) του μοντέλου δίνοντας αποτελέσματα σχετικά με την παραμόρφωση της δοκού και τον προσδιορισμό του μέγιστου βέλους κάμψης που θα παρουσιαστούν έπειτα από την εφαρμογή δύναμης και οριακών συνθηκών.





Σχήμα 3.5: Ορισμός βήματος στατικής ανάλυσης

Σε όλες τις περιπτώσεις επιλέχθηκαν, C3D8R, τρισδιάστατα εξαεδρικά στοιχεία με 8 κόμβους και μειωμένης ολοκλήρωσης (reduced integration) προκειμένου να επιταχυνθεί η επίλυση και να διασφαλιστεί η ταχύτερη σύγκλιση επιλέγοντας με σειρά τις καρτέλες Module→Mesh→Global Seeds/ Mesh Controls.



Σχήμα 3.6: Επιλογή τύπου στοιχείων (elements)

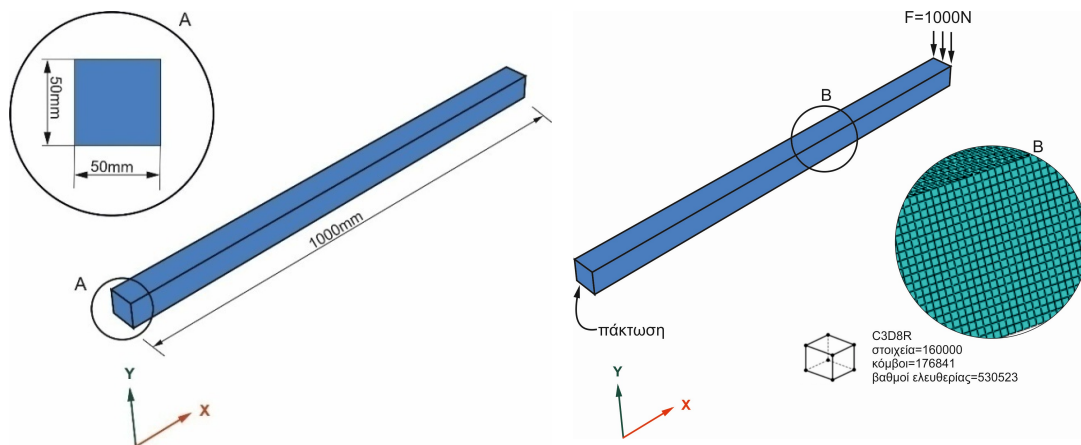
### 3.3.1 Εφαρμογή συγκεντρωμένου φορτίου σε πρόβολο

Στην περίπτωση αυτή έγινε ανάλυση της δοκού, στην οποία εφαρμόστηκε ένα συγκεντρωμένο φορτίο (F) 1000N και πάκτωση στην επιφάνεια, στην οποία μηδενίστηκαν οι βαθμοί ελευθερίας των μετατοπίσεων και των περιστροφών προκειμένου να μείνει ακίνητη η επιφάνεια.

Για τη βέλτιστη κατανόηση του προβλήματος αλλά και για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων του λογισμικού, το πρόβλημα λύθηκε αρχικά με μαθηματικούς υπολογισμούς. Σύμφωνα με τον τύπο  $\gamma_{max} = -FL^3/3EI$  υπολογίζεται το μέγιστο βέλος της κάμψης στη συγκεκριμένη περίπτωση. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της εισαγωγής και υπολογίζοντας τη ροπή αδράνειας (I) από τον τύπο  $I = 1/12bb^3$ , υπολογίζεται ότι το μέγιστο βέλος κάμψης είναι ίσο με  $-3.1219e-03m$  ή  $-3.1219mm$ .

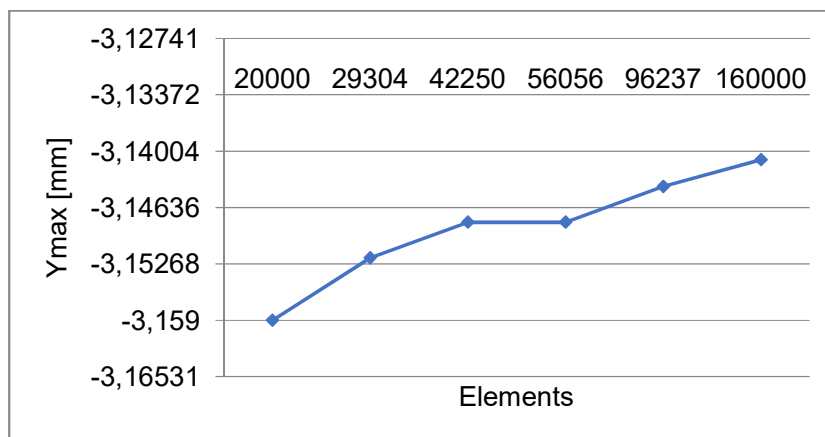
Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, αρχικά σχεδιάστηκε η δοκός, στη συνέχεια εφαρμόστηκε η πάκτωση αλλά και η δύναμη, η οποία διασπάστηκε σε πέντε κόμβους της ακμής για καλύτερη ανάλυση των

αποτελεσμάτων όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7. Έπειτα έγινε η διακριτοποίηση της δοκού σε στοιχεία τύπου C3D8R (σχήμα 3.7).

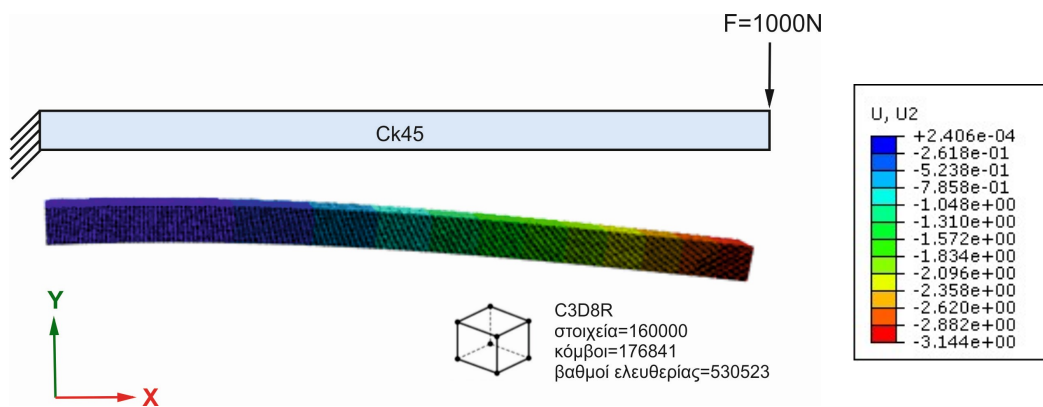


Σχήμα 3.7: Διαστάσεις δοκού (αριστερά), επιβολή συνθηκών και διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία (δεξιά)

Προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα, έγινε εξαγωγή αποτελεσμάτων διαφόρων αριθμών στοιχείων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων η τιμή της μετατόπισης συγκλίνει και πλησιάζει την τιμή της μαθηματικής επίλυσης. Συνεπώς, η διακριτοποίηση που γίνεται αποδεκτή έχει αριθμό στοιχείων 160000 και 176841 κόμβους, με τη μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης ( $\gamma_{max}$ ) να ισούται με -3.144mm (σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.8: Πίνακας στοιχείων σε συνάρτηση με το βέλος κάμψης



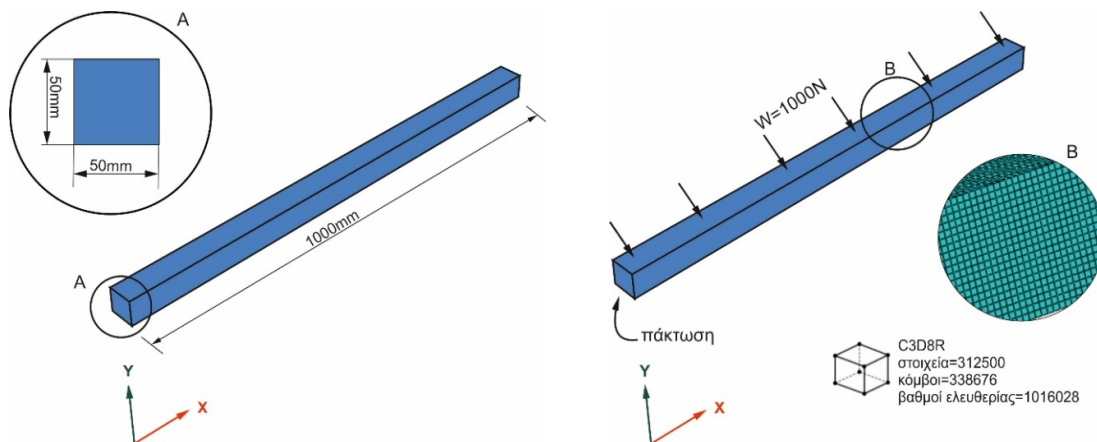
Σχήμα 3.9: Μετατόπιση κατά τον άξονα Y [mm]

### 3.3.2 Εφαρμογή ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου σε πρόβολο

Στην περίπτωση αυτή έγινε ανάλυση της δοκού, στην οποία εφαρμόστηκε ένα ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο (W) 1000N και πάκτωση στην επιφάνεια, στην οποία μηδενίστηκαν οι βαθμοί ελευθερίας των μετατοπίσεων και των περιστροφών προκειμένου να μείνει ακίνητη επιφάνεια.

Για τη βέλτιστη κατανόηση του προβλήματος αλλά και για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων του λογισμικού, το πρόβλημα λύθηκε αρχικά με μαθηματικούς υπολογισμούς. Σύμφωνα με τον τύπο  $\gamma_{\max} = -WL^4/8EI$  υπολογίζεται το μέγιστο βέλος της κάμψης στη συγκεκριμένη περίπτωση. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της εισαγωγής και υπολογίζοντας τη ροπή αδράνειας (I) από τον τύπο  $I = 1/12bb^3$ , υπολογίζεται ότι το μέγιστο βέλος κάμψης ( $\gamma_{\max}$ ) είναι ίσο με  $-1.17e-03m$  ή  $-1.17mm$ .

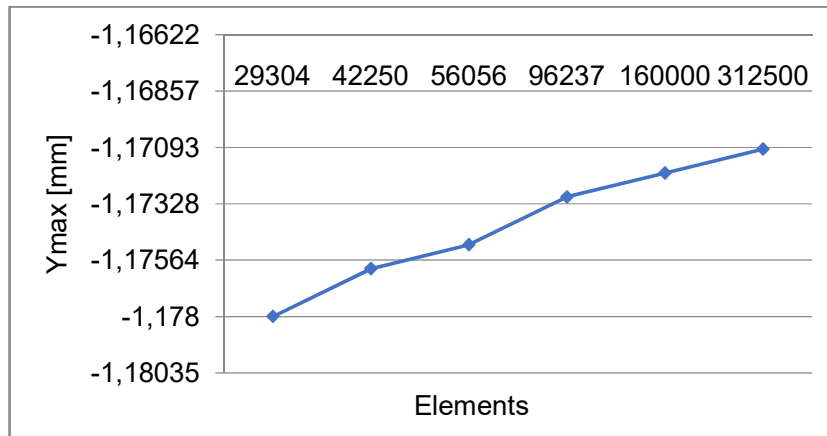
Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, αρχικά σχεδιάστηκε η δοκός, στη συνέχεια εφαρμόστηκε η πάκτωση αλλά και η δύναμη, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10. Έπειτα έγινε η διακριτοποίηση της δοκού σε στοιχεία τύπου C3D8R.



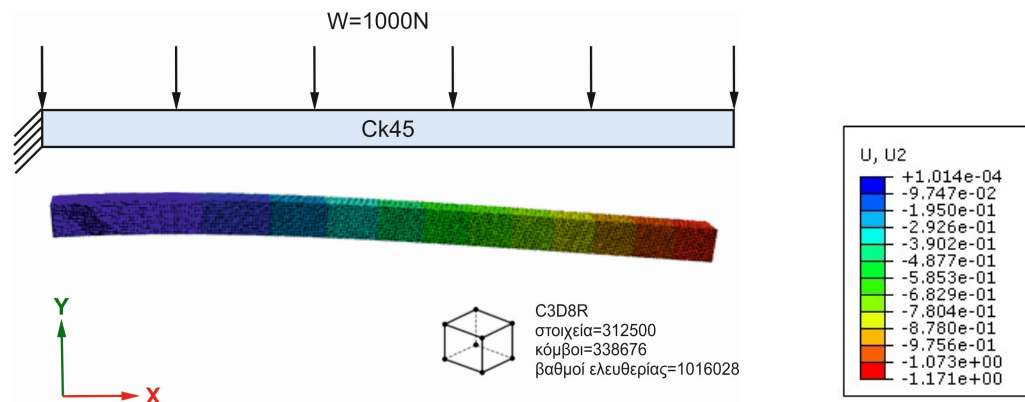
Σχήμα 3.10: Διαστάσεις δοκού (αριστερά), επιβολή συνθηκών και διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία (δεξιά)

Προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα, έγινε εξαγωγή αποτελεσμάτων διαφόρων αριθμών στοιχείων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων η τιμή της μετατόπισης συγκλίνει και πλησιάζει την τιμή της μαθηματικής

επίλυσης. Συνεπώς, η διακριτοποίηση που γίνεται αποδεκτή έχει αριθμό στοιχείων 312500 και 338676 κόμβους, με τη μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης ( $Y_{max}$ ) να ισούται με -1.171mm (σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.11: Πίνακας στοιχείων σε συνάρτηση με το βέλος κάμψης



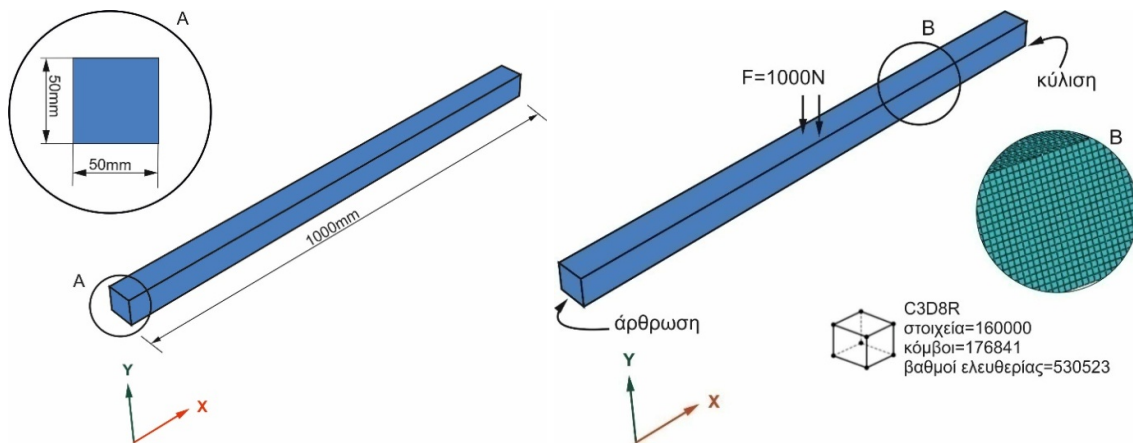
Σχήμα 3.12: Μετατόπιση κατά τον άξονα Y [mm]

### 3.3.3 Εφαρμογή συγκεντρωμένου φορτίου σε αμφιέρειστη δοκό

Στην περίπτωση αυτή έγινε ανάλυση της δοκού, στην οποία εφαρμόστηκε ένα συγκεντρωμένο φορτίο (F) 1000N, με κύλιση και άρθρωση στις ακμές όπως φαίνεται στο σχήμα.

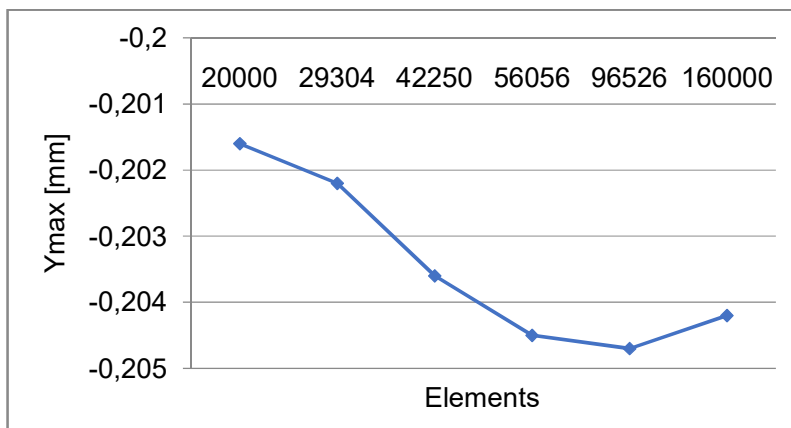
Για τη βέλτιστη κατανόηση του προβλήματος αλλά και για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων του λογισμικού, το πρόβλημα λύθηκε αρχικά με μαθηματικούς υπολογισμούς. Σύμφωνα με τον τύπο  $Y_{max} = -FL^3/48EI$  υπολογίζεται το μέγιστο βέλος της κάμψης στη συγκεκριμένη περίπτωση. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της εισαγωγής και υπολογίζοντας τη ροπή αδράνειας (I) από τον τύπο  $I = 1/12bb^3$ , υπολογίζεται ότι το μέγιστο βέλος κάμψης ζείναι ίσο με -1.951e-04m ή -1.951e-01mm.

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, αρχικά σχεδιάστηκε η δοκός, στη συνέχεια εφαρμόστηκε η άρθρωση, η κύλιση και η δύναμη, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.13. Έπειτα έγινε η διακριτοποίηση της δοκού σε στοιχεία τύπου C3D8R.

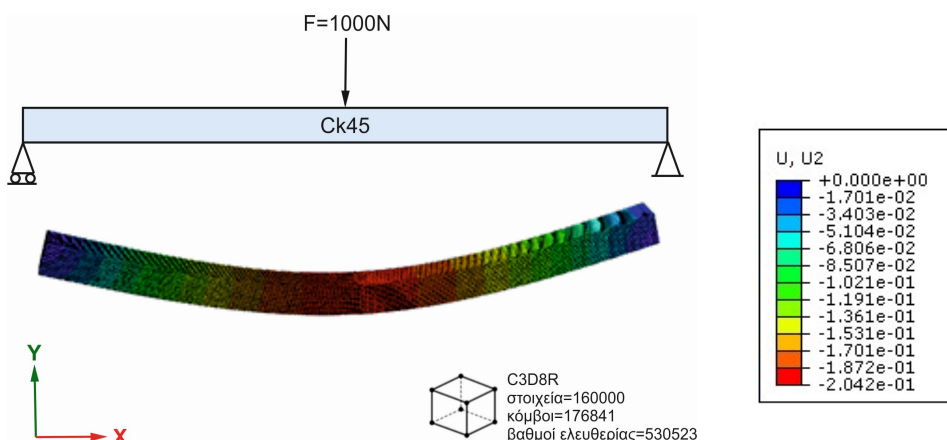


Σχήμα 3.13: Διαστάσεις δοκού (αριστερά), επιβολή συνθηκών και διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία (δεξιά)

Προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα, έγινε εξαγωγή αποτελεσμάτων διαφόρων αριθμών στοιχείων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων η τιμή της μετατόπισης συγκλίνει και πλησιάζει την τιμή της μαθηματικής επίλυσης. Συνεπώς, η διακριτοποίηση που γίνεται αποδεκτή έχει αριθμό στοιχείων 160000 και 176841 κόμβους, με τη μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης ( $Y_{max}$ ) να ισούται με  $2.047e-01mm$  (σχήμα 3.15)



Σχήμα 3.14: Πίνακας στοιχείων σε συνάρτηση με το βέλος κάμψης



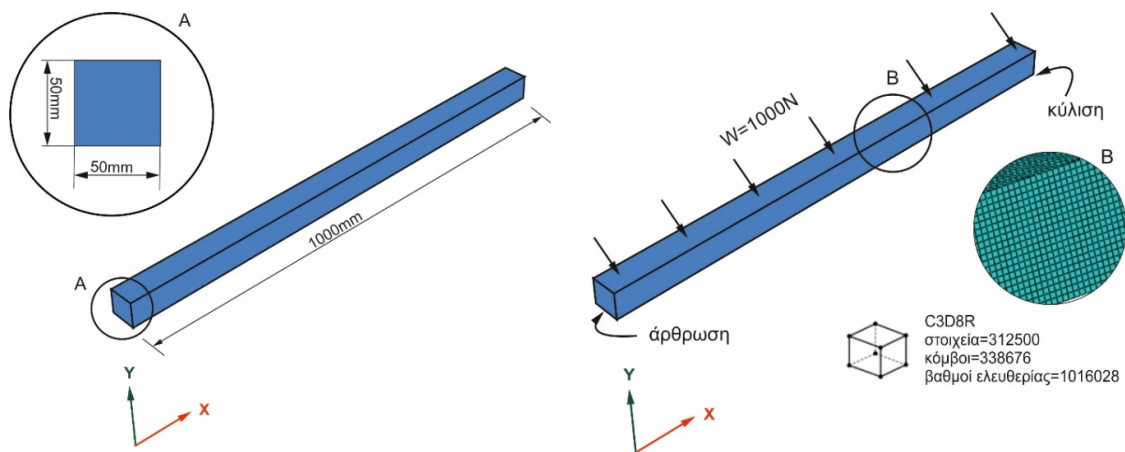
Σχήμα 3.15: Μετατόπιση κατά τον άξονα Y [mm]

### 3.3.4 Εφαρμογή ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου σε αμφιέρειστη δοκό

Στην περίπτωση αυτή έγινε ανάλυση της δοκού, στην οποία εφαρμόστηκε ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο ( $W$ ) 1000N στην επιφάνεια  $E_1$ , με κύλιση και άρθρωση στις ακμές όπως φαίνεται στο σχήμα 3.16.

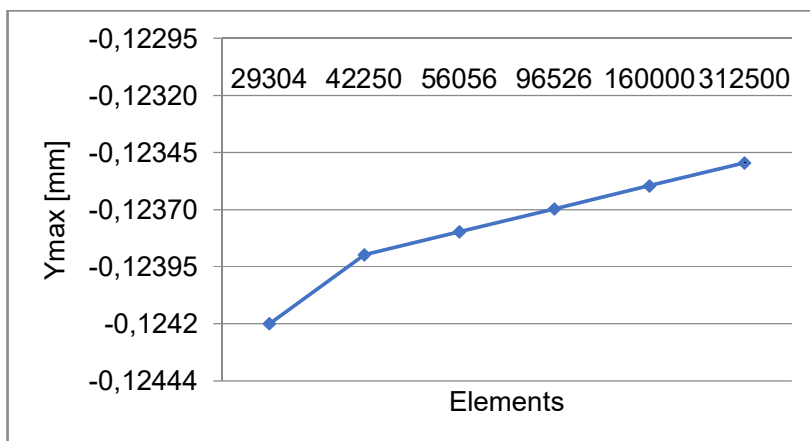
Για τη βέλτιστη κατανόηση του προβλήματος αλλά και για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων του λογισμικού, το πρόβλημα λύθηκε αρχικά με μαθηματικούς υπολογισμούς. Σύμφωνα με τον τύπο  $Y_{max} = -5WL^4 / 384EI$  υπολογίζεται το μέγιστο βέλος της κάμψης στη συγκεκριμένη περίπτωση. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της εισαγωγής και υπολογίζοντας τη ροπή αδράνειας ( $I$ ) από τον τύπο  $I = 1/12bb^3$ , υπολογίζεται ότι το μέγιστο βέλος κάμψης είναι ίσο με  $-1.2191e-04m$  ή  $-1.219e-01mm$ .

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, αρχικά σχεδιάστηκε η δοκός, στη συνέχεια εφαρμόστηκε η άρθρωση, η κύλιση και η δύναμη, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.16. Έπειτα έγινε η διακριτοποίηση της δοκού σε στοιχεία τύπου C3D8R.

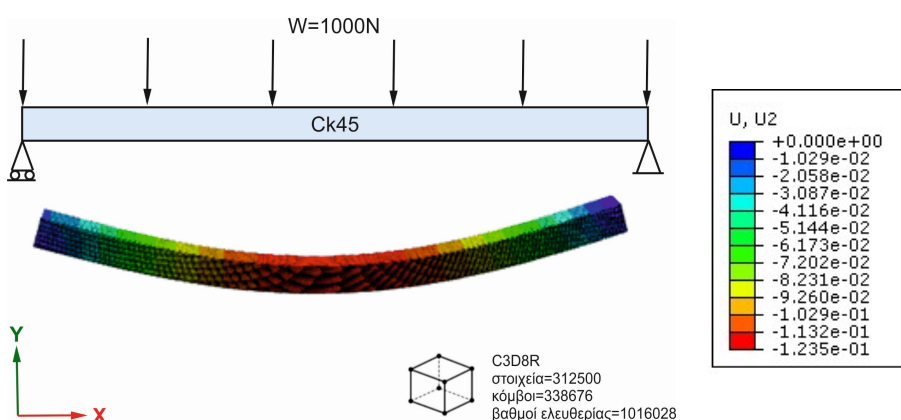


Σχήμα 3.16: Διαστάσεις δοκού (αριστερά), επιβολή συνθηκών και διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία (δεξιά)

Προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα, έγινε εξαγωγή αποτελεσμάτων διαφόρων αριθμών στοιχείων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.17, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων η τιμή της μετατόπισης συγκλίνει και πλησιάζει την τιμή της μαθηματικής επίλυσης. Συνεπώς, η διακριτοποίηση που γίνεται αποδεκτή έχει αριθμό στοιχείων 312500 και 338676 κόμβους, με τη μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης ( $Y_{max}$ ) να ισούται με  $-1.235e-01mm$  (σχήμα 3.18).



Σχήμα 3.17: Πίνακας στοιχείων σε συνάρτηση με το βέλος κάμψης



Σχήμα 3.18: Μετατόπιση κατά τον άξονα Y [mm]

### 3.4 Κατασκευή ANASA

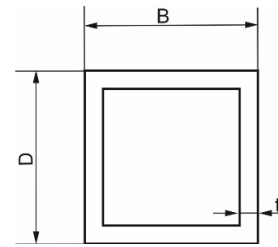
Στα πλαίσια του προγράμματος Ανακύκλωσης Αστικών Απορριμμάτων της ΔΕΔΙΣΑ ζητήθηκε να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί μια διάταξη με σκοπό τη στήριξη του ρομποτικού συστήματος IRB360 το οποίο θα συμβάλει στην ευκολότερη συλλογή και διαλογή των απορριμμάτων. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η κατασκευή και μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων παρουσιάζεται η στατική ανάλυσή της, οι ιδιοτιμές και οι ιδιομορφές που προκύπτουν.

#### 3.4.1 Στατική ανάλυση

Σύμφωνα με τις διαστάσεις του ρομπότ, το βάρος και τον τρόπο λειτουργίας του ζητήθηκε να σχεδιαστεί μια στιβαρή κατασκευή η οποία θα μπορεί να στηρίξει το ρομπότ στην ομαλή του λειτουργία. Στο σχήμα 3.21 απεικονίζεται η κατασκευή που προτάθηκε και σχεδιάστηκε από τη ΔΕΔΙΣΑ, η οποία τροποποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας προκειμένου να DIN 10210 και δοκοί διατομής U κατά DIN 1026.

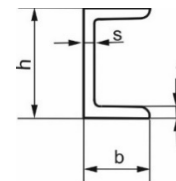


Κοιλοδοκός	D [mm]	B [mm]	t [mm]	Βάρος [kg/m]
90/4	90	90	4	10.70
80/3	80	80	3	7.22
70/3	70	70	3	6.28
50/3	50	50	3	4.39

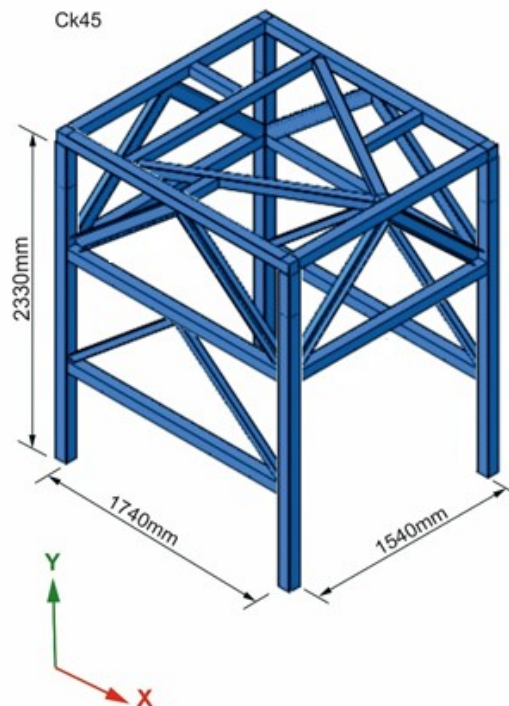


Σχήμα 3.19: Τύποι κοιλοδοκών κατά DINEN 10210

UPN	h [mm]	b [mm]	s [mm]	t [mm]	Βάρος [kg/m]
100	100	50	6	8.5	10,60



Σχήμα 3.20: Τύποι δοκών UPN κατά DIN 1026



Σχήμα 3.21: Κατασκευή ANASA

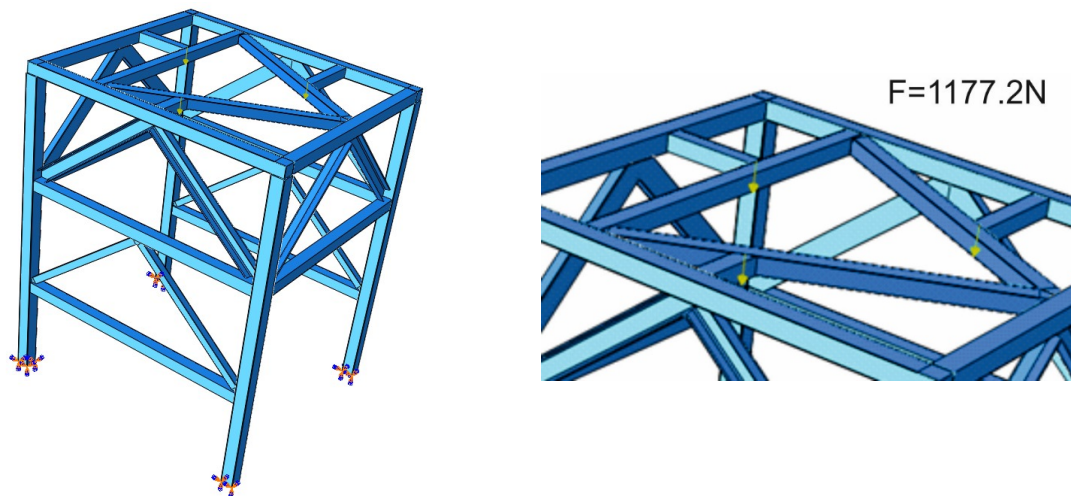
Για να πραγματοποιηθεί η μελέτη της κατασκευής, αρχικά καθορίστηκαν οι ιδιότητες του υλικού της κατασκευής. Επιλέχθηκε χάλυβας (Ck) το υλικό της κατασκευής με τα εξής χαρακτηριστικά:

- μέτρο ελαστικότητας (E) 210 GPa,
- λόγο poisson ( $\nu$ ) 0.3,
- πυκνότητα ( $\rho$ ) 7850kg/m<sup>3</sup>,
- $\sigma_{\epsilon\pi}=120\text{N/mm}^2$ .

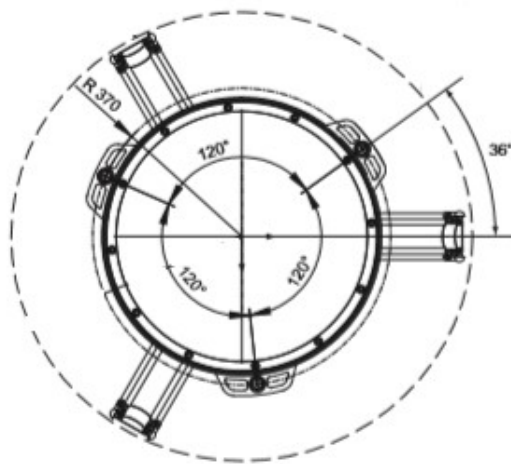


Η καταπόνηση μίας κατασκευής δεν πρέπει να φτάνει στα τελικά όρια της αντοχής της, γιατί κάτι τέτοιο θα προκαλούσε τη θραύση της ή ανεπιθύμητες παραμορφώσεις. Αυτό σημαίνει ότι οι τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό της κατασκευής πρέπει να είναι μικρότερες από ένα όριο. Η τάση που δεχόμαστε να αναπτυχθεί οριακά σε μια διατομή του φορέα για να έχουμε ασφαλή κατασκευή και λειτουργία, ονομάζεται επιτρεπόμενη τάση και συμβολίζεται  $\sigma_{\text{επ}}$  για το λόγο οι υπολογιζόμενες τάσεις θα πρέπει να έχουν τιμή μικρότερη από την επιτρεπόμενη. Ορίζοντας συντελεστή ασφαλείας ( $\nu$ ) να ισούται με 2 για στατική καταπόνηση και γνωρίζοντας την ελάχιστη τιμή του ορίου διαρροής ( $\sigma_s$ ) για το υλικό Ck45 (που χρησιμοποιήθηκε στις συγκεκριμένες κατασκευές) να ισούται με  $240\text{N/mm}^2$ , υπολογίζεται από τον τύπο  $\sigma_s/\nu$  επιτρεπόμενη τάση ( $\sigma_{\text{επ}}$ ).

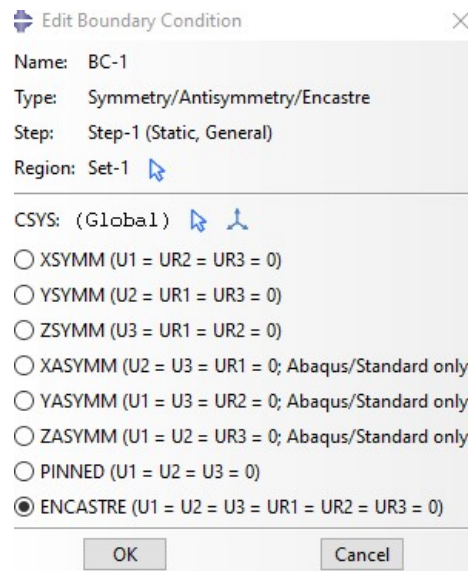
Στο επόμενο στάδιο καθορίστηκε το βήμα (step) για την πραγματοποίηση της στατικής ανάλυσης. Στο σημείο αυτό καθορίστηκαν οι δυνάμεις που ασκούνται στο μοντέλο καθώς και οι οριακές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, ορίστηκε η δύναμη του βάρους του ρομπότ και της κατασκευής. Η πρώτη ισούται με  $1177.2\text{N}$  καθώς είναι γνωστή η μάζα του ρομπότ στα  $120\text{kg}$  και ασκείται με την εντολή point load. Στο σχήμα 3.23 απεικονίζεται η κάτοψη του ρομπότ και παρουσιάζονται τα τρία σημεία στα οποία θα συγκρατείται το ρομπότ από την κατασκευή, τα οποία απέχουν μεταξύ τους  $120$  μοίρες στα οποία θα μοιραστεί και θα ασκηθεί η συνολική δύναμη του ρομπότ. Επιπλέον, η δεύτερη δύναμη, αυτή του βάρους της κατασκευής, ασκείται με την εντολή gravity load. Ως οριακές συνθήκες (boundary conditions), ορίστηκαν πακτώσεις, προκειμένου να μείνουν ακίνητες οι βάσεις της κατασκευής, κατά την επίδραση των δυνάμεων(σχήμα 3.22).



Σχήμα 3.22: Επιβολή οριακών συνθηκών και δυνάμεων

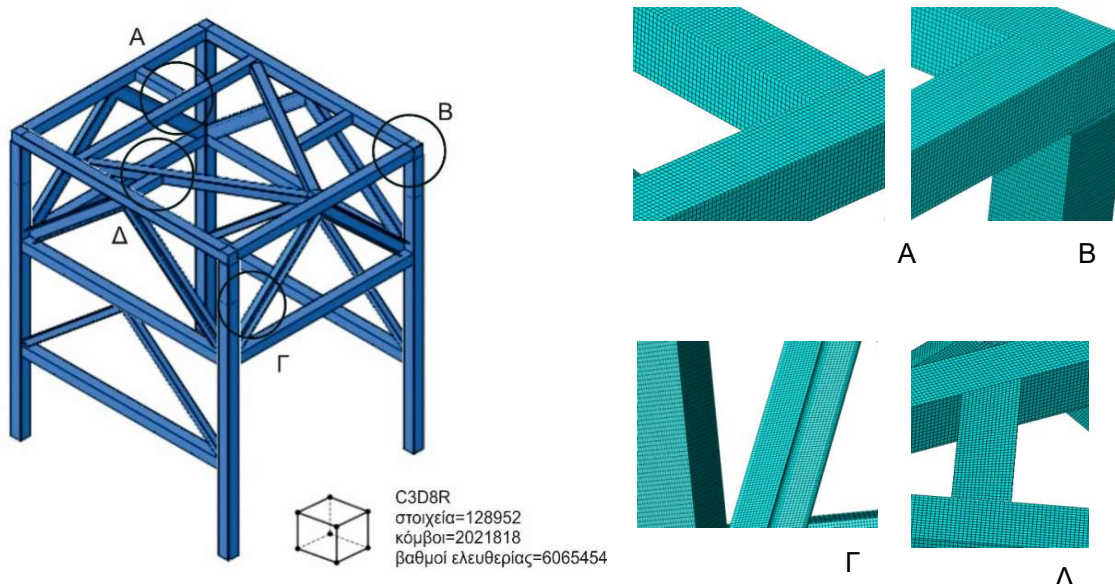


Σχήμα 3.23: Κάτοψη ρομπωτικού συστήματος IRB 360



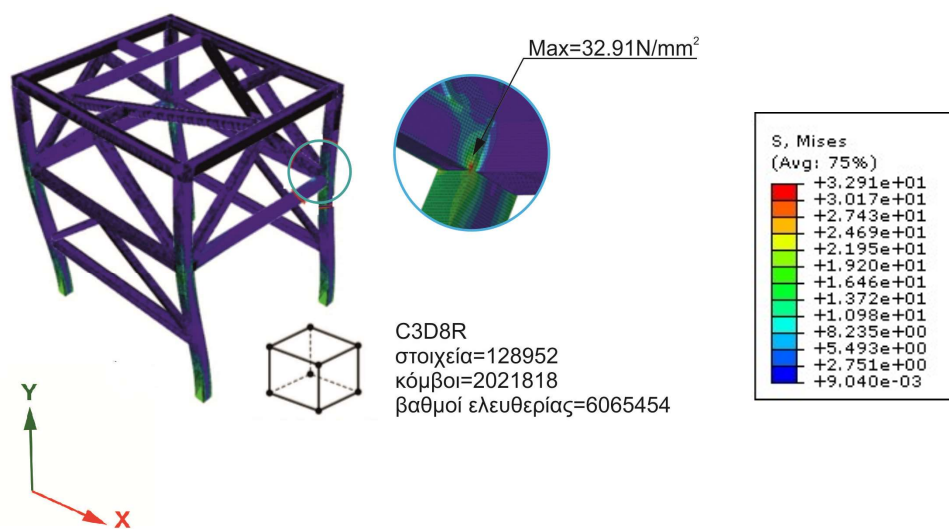
Σχήμα 3.24: Επιβολή οριακών συνθηκών (boundary conditions)

Για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, έγινε διακριτοποίηση της κατασκευής σε γραμμικά εξάεδρα στοιχεία οχτώ κόμβων τύπου C3D8R. Έπειτα από συνεχή διακριτοποίηση της δοκού με όλο και αυξανόμενο αριθμό στοιχείων, κρίθηκε ως βέλτιστη η διακριτοποίηση με 1.289.562 στοιχεία, 2.021.818 κόμβους και 6065454 βαθμούς ελευθερίας. το [σχήμα3.25](#) απεικονίζονται κάποια σημεία της κατασκευής, στα οποία έγινε ομοιόμορφη διακριτοποίηση στα παραπάνω στοιχεία.

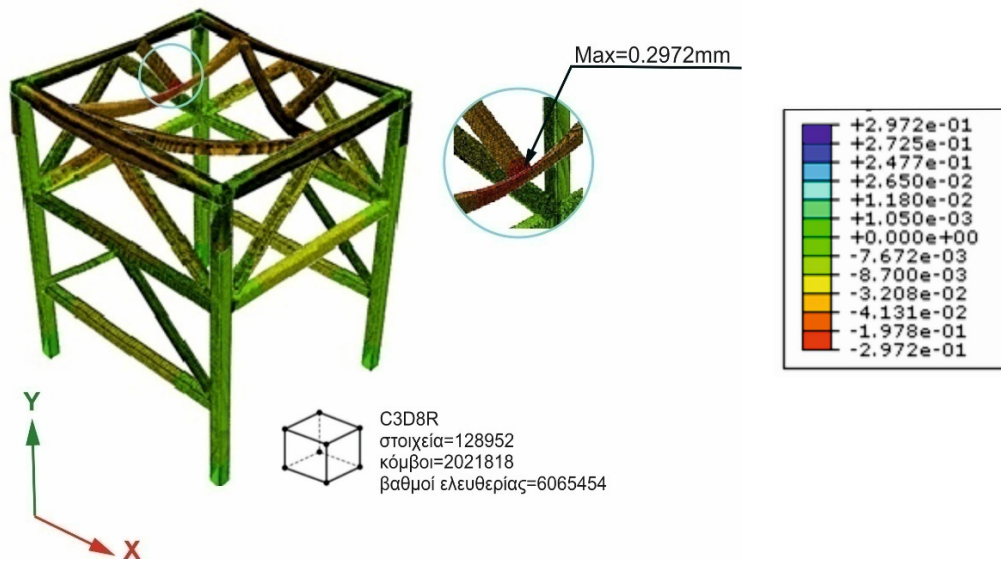


Σχήμα 3.25: Διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία τύπου C3D8R

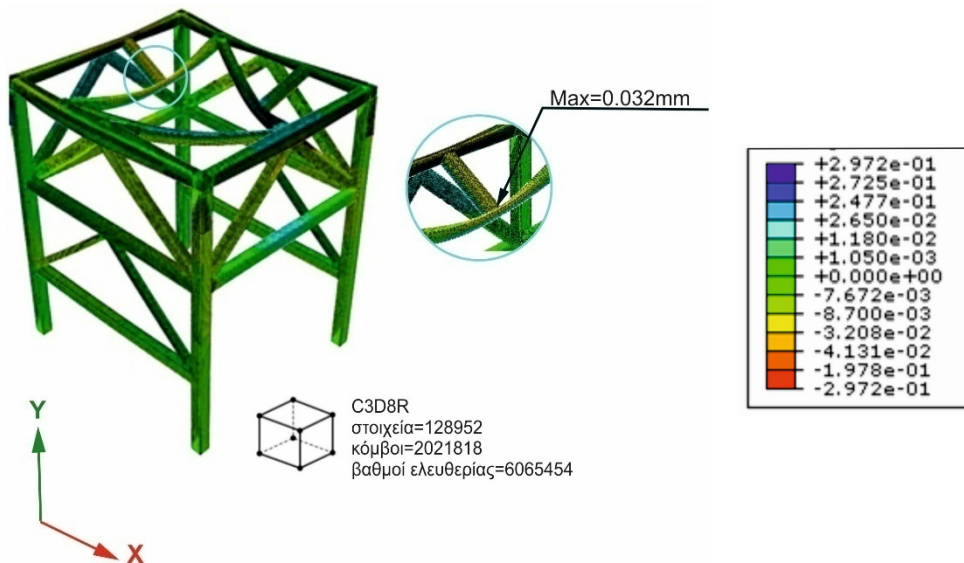
Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης, έγινε εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με την τάση (Von Mises) και τις μετατοπίσεις (U) που προκλήθηκαν. Όσο αφορά την τάση, η μέγιστη τιμή της (σχήμα 3.26) ισούται  $32.91 \text{ N/mm}^2$  ή  $32.91 \text{ MPa}$ . Η τιμή αυτή είναι μικρότερη της επιτρεπόμενης τάσης ( $\sigma_{\text{επ}} = 120 \text{ N/mm}^2$ ). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συνισταμένης μετατόπισης, και των αξόνων X, Y, και Z. Αναλυτικότερα, η μέγιστη τιμή της συνισταμένης μετατόπισης ισούται με  $0.2972 \text{ mm}$ , η μέγιστη τιμή της μετατόπισης κατά τον άξονα X ισούται με  $0.032 \text{ mm}$ , κατά τον άξονα Y ισούται με  $0.2972 \text{ mm}$  και κατά τον Z ισούται με  $0.04131 \text{ mm}$ . Συμπερασματικά, σημειώνεται ότι η μέγιστη μετατόπιση εμφανίζεται στον άξονα Y. Προκειμένου να μειωθεί η μετατόπιση, στα σημεία που εμφανίζονται οι μεγαλύτερες κάμψεις, θα μπορούσαν να προστεθούν περισσότερα στηρίγματα στην τριγωνική βάση.



Σχήμα 3.26: Τάση Von Mises [ $\text{N/mm}^2$ ]

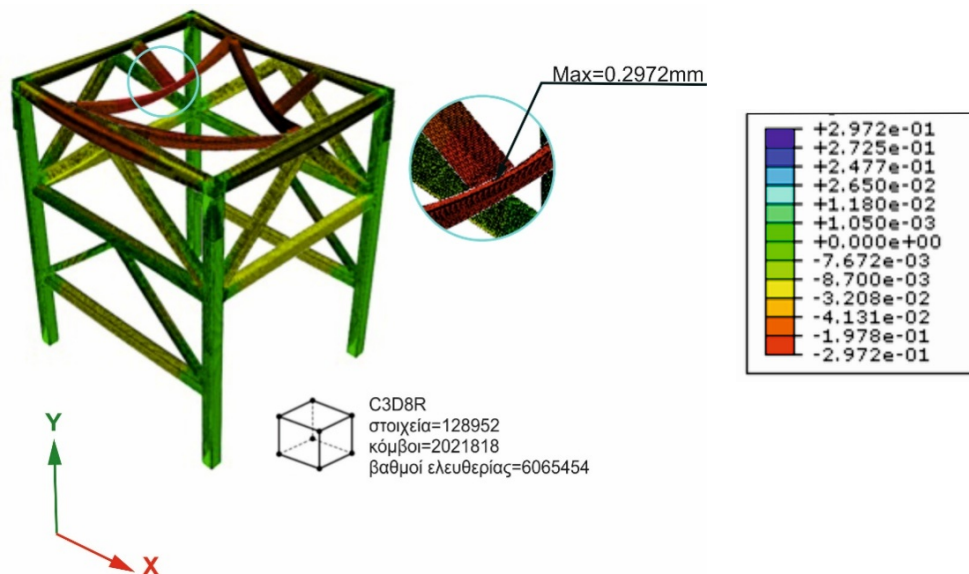


Σχήμα 3.27: Συνισταμένη μετατόπιση [mm]

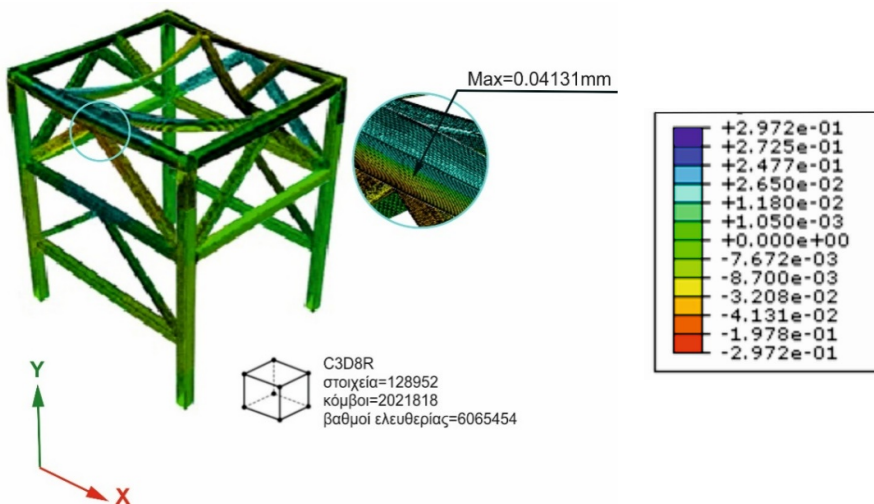


Σχήμα 3.28: Μετατόπιση κατά τον άξονα X [mm]





Σχήμα 3.29: Μετατόπιση κατά τον άξονα Y [mm]



Σχήμα 3.30: Μετατόπιση κατά τον άξονα Z [mm]

### 3.4.2 Ιδιοτιμές και ιδιομορφές

Στην ενότητα αυτή θα γίνει ανάλυση των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων του δυναμικού συστήματος. Πρόκειται για δύο έννοιες με αρκετά σημαντικό ρόλο στη δυναμική ανάλυση των κατασκευών, δηλαδή στην εσωτερική τους ταλάντωση ή συμπεριφορά, που πραγματοποιείται χωρίς την επιβολή εξωτερικών δυνάμεων. Σε ένα δυναμικό σύστημα, ο αριθμός των ιδιομορφών και των ιδιοσυχνοτήτων είναι ίσος με το βαθμό ελευθερίας του. Ο υπολογισμός τους γίνεται με τη βοήθεια των μητρών μάζας (M) και δυσκαμψίας της κατασκευής (K).

Με τον όρο ιδιοσυχνότητα εννοούμε τη συχνότητα εκείνη για την οποία το σύστημα απορροφά τη μέγιστη ενέργεια και βρίσκεται σε κατάσταση συντονισμού. Συμβολίζεται με  $\omega$  και χαρακτηρίζει την ταλάντωση ενός συστήματος στο οποίο ασκούνται συντηρητικές δυνάμεις (δυνάμεις των οποίων το έργο είναι μηδέν).

Η μονάδα μέτρησης της ιδιοσυχνότητας είναι rad/sec και δίνεται από τη σχέση:

$$\omega^2 = \lambda = k/m \quad (1).$$

Επίσης, συχνότητα του συστήματος μετρούμενη σε Hz δίνεται από τη σχέση:

$$f = \omega / 2\pi.$$

Οι ιδιοτιμές υπολογίζονται από τα μητρώα μάζας  $m$  και δυσκαμψίας  $k$ ,

$$Mu(t) - Ku(t) = 0 \quad (2).$$

Παρατηρούμε ότι η εξίσωση είναι της μορφής  $u(t) = af(t)$ , όπου  $a$  είναι το άγνωστο και ανεξαρτήτου χρόνου διάνυσμα μετακινήσεων και  $f(t)$  είναι η άγνωστη χρονική συνάρτηση όλων των μετακινήσεων.

Από τις εξισώσεις (1) και (3) προκύπτει:

$$K - \lambda M = 0 \quad (3)$$

και η προφανής λύση αυτής η ορίζουσα  $\det(K - \lambda M) = 0$ . Οι λύσεις της ορίζουσας είναι οι ζητούμενες ιδιοτιμές  $\lambda$ . Σε κάθε ιδιοτιμή που υπολογίστηκε αντιστοιχεί ένας πίνακας μετακινήσεων  $a_{ij}$ . Το  $a$  καλείται ιδιοδιάνυσμα του προβλήματος της ιδιοτιμής. Για τον υπολογισμό του αγίνεται κανονικοποίηση από την οποία προκύπτουν τα ιδιοδιανύσματα  $\varphi$ .

Υποθέτοντας ότι το σύστημα εκτελεί απλά αρμονική ταλάντωση με διάνυσμα μετακινήσεων με ημιτονοειδή μορφή, σε σχέση με το χρόνο προκύπτει  $U = \varphi \sin \omega t$ .

Από τις σχέσεις (1) και (3) προκύπτει:

$$(K - \lambda M)\varphi = 0$$

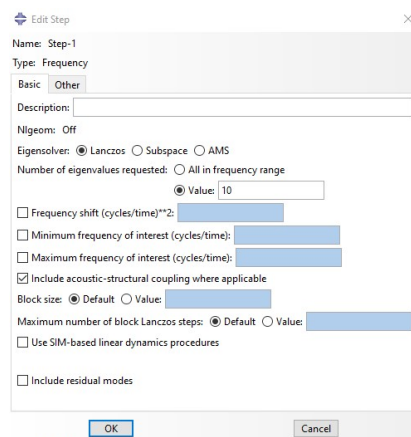
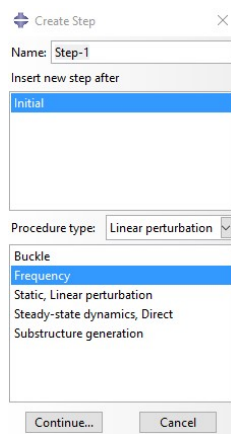
Λύση της παραπάνω εξίσωσης είναι η προφανής  $\varphi = 0$  ή η ορίζουσα ίση με μηδέν:

$$\text{Det}(K - \lambda M) = 0,$$

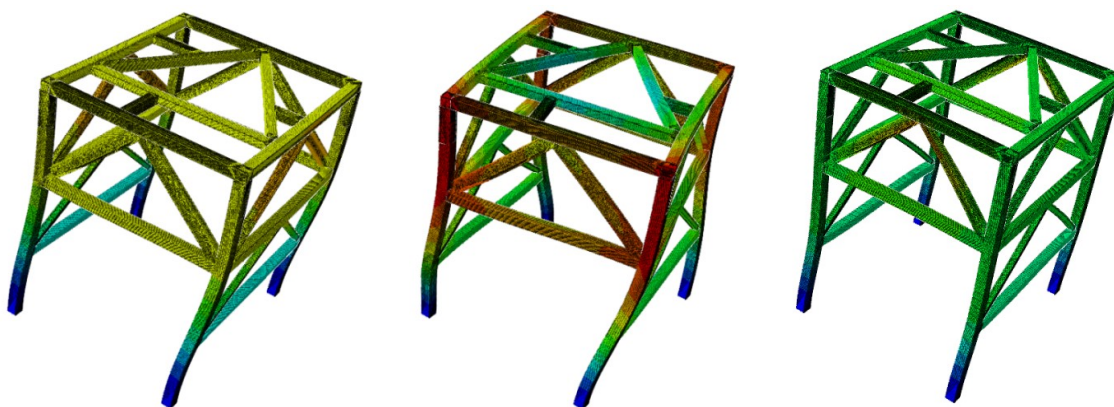
Με λύσεις τις τιμές  $\omega_i^2 = \lambda_i$ , όπου  $i$  αριθμός των ιδιοτιμών και των βαθμών ελευθερίας του συστήματος.

Τα ιδιοδιανύσματα είναι μία έννοια με την οποία βλέπουμε τον τρόπο ταλάντωσης ενός μηχανικού συστήματος. Μέσω αυτών λαμβάνουμε χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την παραμόρφωση και την μετατόπιση του συστήματος. Συμβολίζονται με  $\varphi$  και υπολογίζονται με την εξίσωση  $(-\omega^2 M + K)\varphi = 0$ . Στις τεχνολογικές εφαρμογές συνήθως υπολογίζεται ένας μικρός αριθμός πρώτων ιδιομορφών (5-20). Αυτό συμβαίνει καθώς οι δυνάμεις διέγερσης στη φύση διεγείρουν μόνο τις πρώτες ιδιοσυχνότητες της κατασκευής (χαμηλές). Οι ιδιομορφές δίνουν ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της κατασκευής που είναι χρήσιμα κατά τον σχεδιασμό ενός κατάλληλου συστήματος ελέγχου.

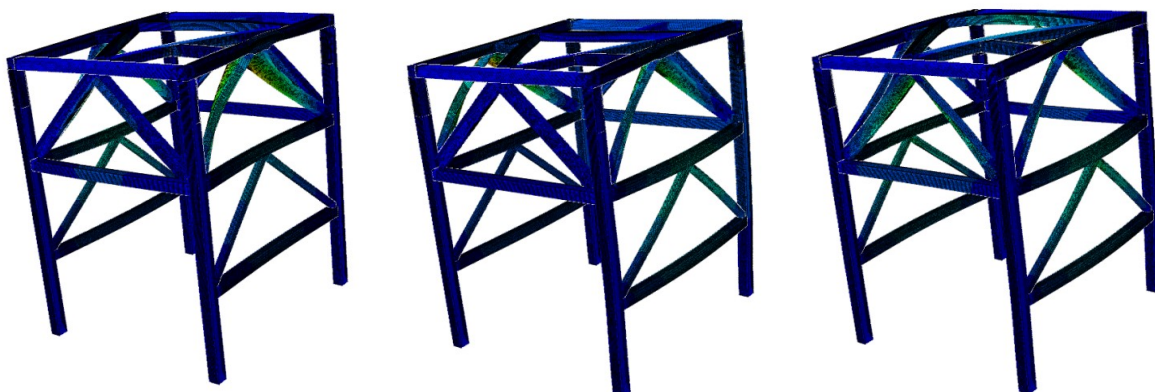
Συνεπώς, για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων έγινε επιλογή βήματος (step) μέσω μιας σειράς εντολών  $\text{Module} \rightarrow \text{Step} \rightarrow \text{Linear perturbation} \rightarrow \text{Frequency}$  και επιλέχθηκε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των δέκα πρώτων ιδιοτιμών και ιδιομορφών. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ιδιομορφών καθώς και οι ιδιοτιμές τους.



Σχήμα 3.31: Καθορισμός βήματος



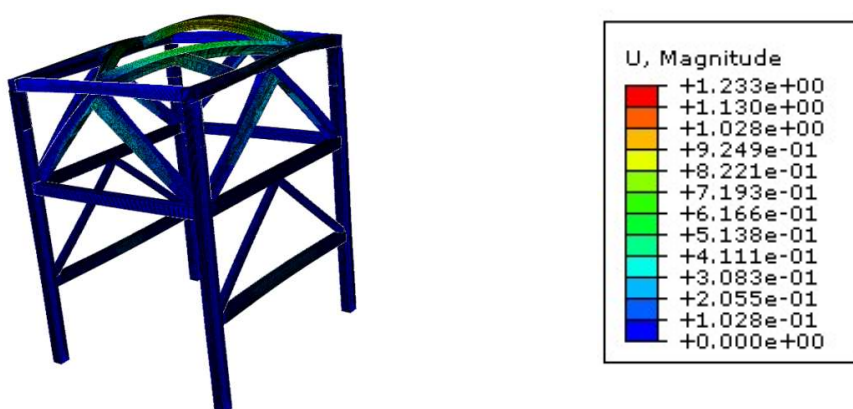
Σχήμα 3.32: Ιδιομορφές 1<sup>ης</sup>, 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> τάξης



Σχήμα 3.33: Ιδιομορφές 4<sup>ης</sup>, 5<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> τάξης



Σχήμα 3.34: Ιδιομορφές 7<sup>ης</sup>, 8<sup>ης</sup> και 9<sup>ης</sup> τάξης



Σχήμα 3.35: Ιδιομορφή 10<sup>ης</sup> τάξης

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΑΣΗΣ	ΙΔΙΟΤΙΜΕΣ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ	
		(rad/time)	(cycles/time)
1	12574	112.13	17.847
2	55014	234.55	37.33
3	62163	249.32	39.681
4	1.97244E+05	444.12	70.684
5	2.17549E+05	466.42	74.233
6	2.31640E+05	481.29	76.6
7	2.55747E+05	505.71	80.487
8	2.79241E+05	528.43	84.103
9	2.94725E+05	542.89	86.403
10	3.14462E+05	560.77	89.249

Σχήμα 3.36: Συγκεντρωτικός πίνακας ιδιοτιμών και συχνοτήτων



## 4. Παρουσίαση εναλλακτικών κατασκευών

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εκτός από την κατασκευή που προτάθηκε από τη ΔΕΔΙΣΑ, σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν άλλες τρεις, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη στιβαρότητά τους.

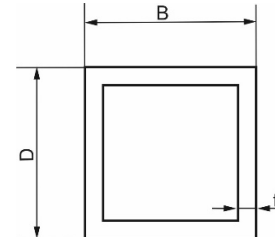
### 4.1 Κατασκευή 1

Αρχικά, αποφασίστηκε να σχεδιαστεί μία κατασκευή της ίδιας μορφής με τη πρώτη αλλά με λεπτότερες δοκούς (σχήμα 4.3). Πιο συγκεκριμένα, σχεδιάστηκαν κοιλοδοκοί χάλυβα τετραγωνικής διατομής κατά DINEN 12010 και δοκοί χάλυβα διατομής Υ κατά DIN 1026. Καθορίστηκε χάλυβας (Ck) ως το υλικό της κατασκευής με τις παρακάτω ιδιότητες:

- μέτρο ελαστικότητας (E) 210Gpa,
- λόγο poisson ( $\nu$ ) 0.3,
- πυκνότητα ( $\rho$ ) 7850kg/m<sup>3</sup>.

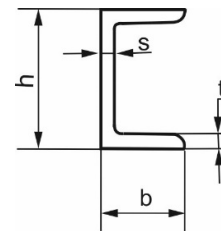
Έπειτα ορίστηκε δύναμη 1177,2N, από το βάρος του ρομπότ, στα σημεία που στηρίζεται το ρομπότ, δύναμη από το βάρος της κατασκευής και πάκτωση στις βάσεις προκειμένου να παραμείνει ακίνητη (σχήμα 4.4). Στη συνέχεια, ορίστηκε βήμα (step) για την πραγματοποίηση της στατικής ανάλυσης για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με την τάση VonMises, τη συνισταμένη μετατόπιση καθώς και τις μετατοπίσεις σε όλους τους άξονες που προκλήθηκαν από την επίδραση της δύναμης. Ομοίως με την ανάλυση της προηγούμενης κατασκευής, για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων έγινε χρήση γραμμικών εξαέδρων στοιχείων τύπου C3D8R. Ως βέλτιστη επιλογή διακριτοποίησης κρίθηκε αυτή με 679767 στοιχεία, 1091980 κόμβους και 3275940 βαθμούς ελευθερίας.

Κοιλοδοκοί	D [mm]	B [mm]	t [mm]	Βάρος [kg/m]
70/4	70	70	4	8.23
60/3	60	60	3	5.34
50/3	50	50	3	4.39
30/3	30	30	3	2.51

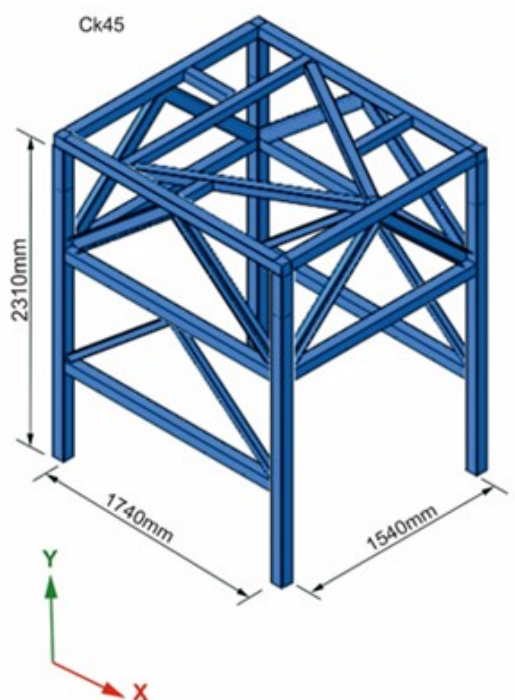


Σχήμα 4.1: Τύποι κοιλοδοκών κατά DINEN 12010

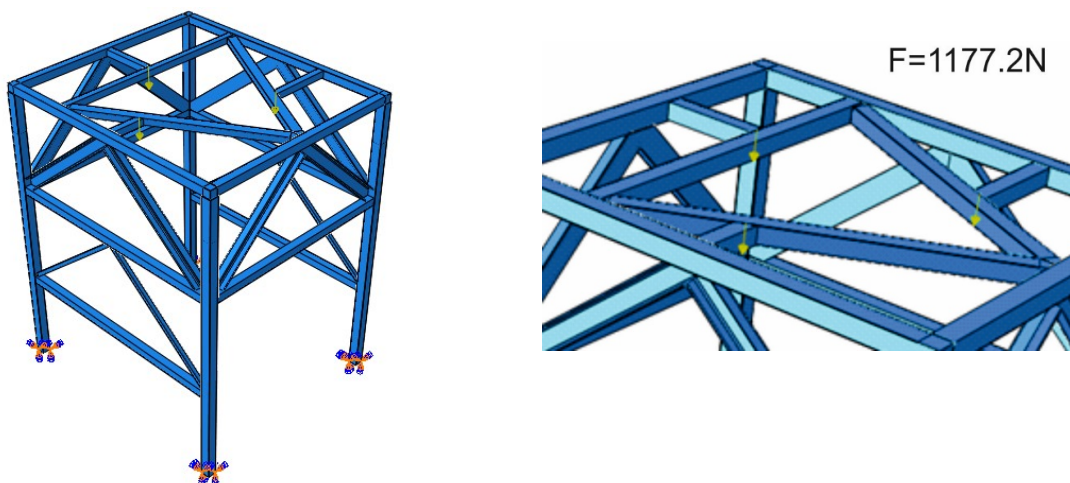
UPN	h [mm]	b [mm]	s [mm]	t [mm]	Βάρος [kg/m]
100	100	50	6	8.5	10,60



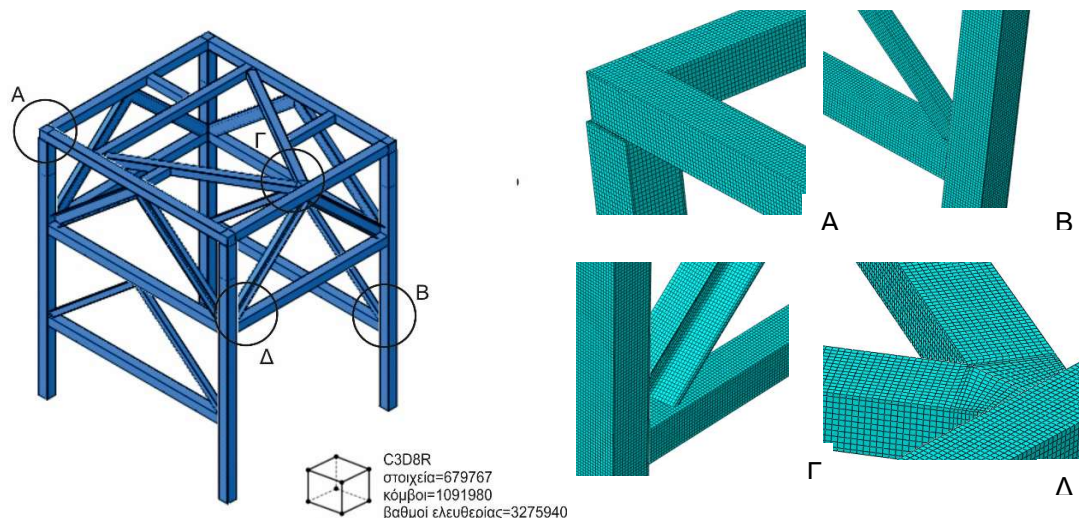
Σχήμα 4.2: Τύποι δοκών UPN κατά DIN 1026



Σχήμα4.3: Κατασκευή 2

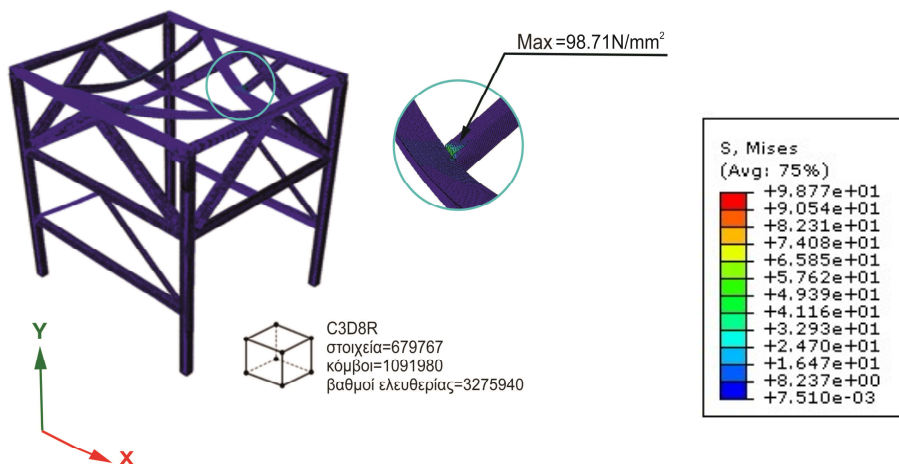


Σχήμα 4.4: Επιβολή οριακών συνθηκών και δυνάμεων

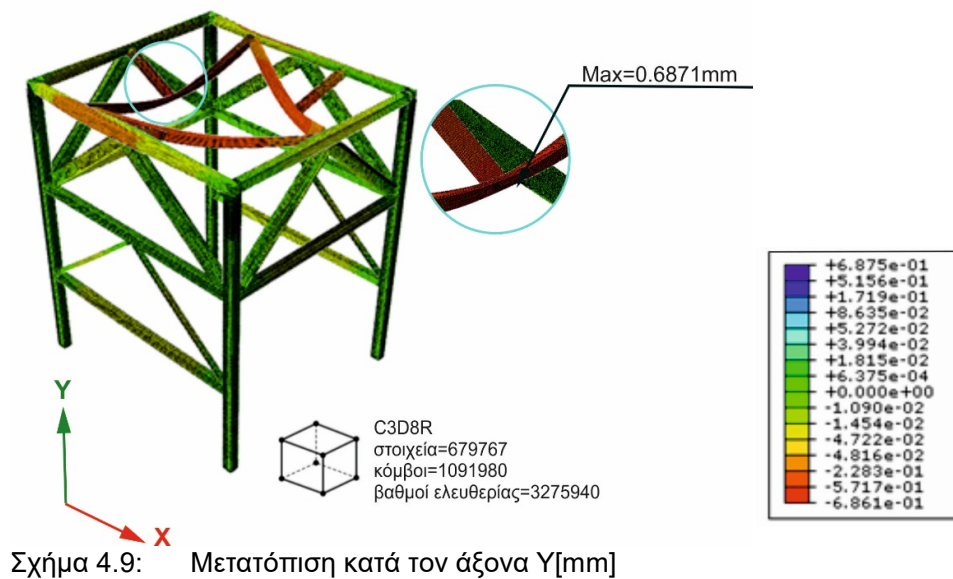
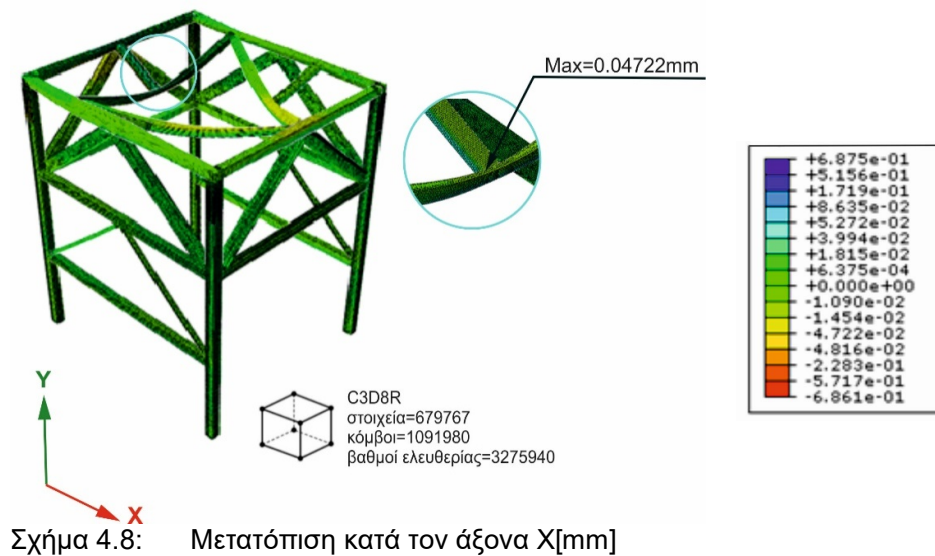
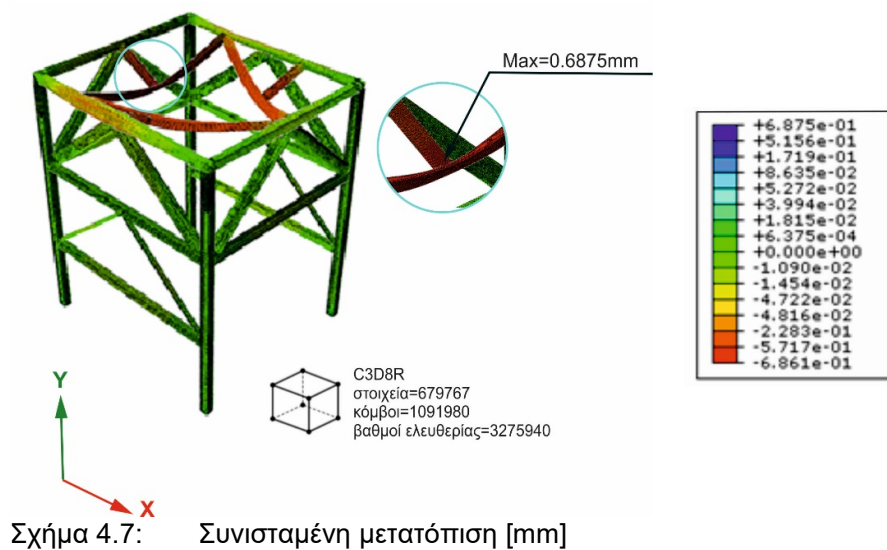


Σχήμα 4.5: Διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία τύπου C3D8R

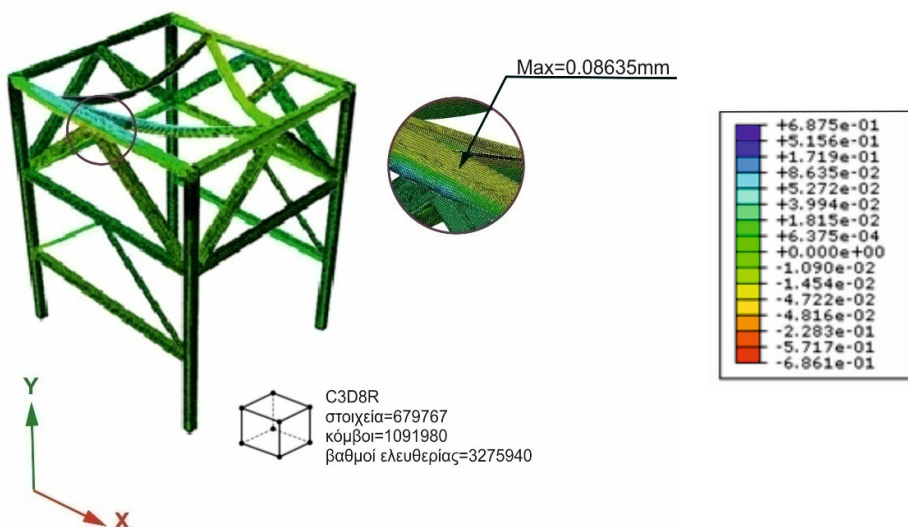
Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα: η μέγιστη τιμή της τάσης Von Mises ισούται με  $98.77 \text{ N/mm}^2$  ή  $98.77 \text{ MPa}$ . Η μέγιστη τιμή είναι μικρότερη της επιτρεπόμενης τάσης,  $\sigma_{\text{επ}} = 120 \text{ N/mm}^2$ , και συνεπώς δεν υπάρχει κίνδυνος θραύσης ή πλαστικής παραμόρφωσης της κατασκευής. Η συνισταμένη μετατόπιση ισούται με  $0.6875 \text{ mm}$  και οι μέγιστες μετατοπίσεις στους άξονες X, Y, Z ισούνται αντίστοιχα με  $0.04722 \text{ mm}$ ,  $0.6861 \text{ mm}$  και  $0.08635 \text{ mm}$ . Συμπερασματικά, σημειώνεται ότι η μέγιστη μετατόπιση εμφανίζεται στον άξονα Y. Ομοίως με την προηγούμενη κατασκευή, θα μπορούσαν να προστεθούν επιπλέον δοκάρια στην κορυφή της κατασκευής, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν κι άλλο οι τάσεις και οι μετατοπίσεις.



Σχήμα 4.6 : Τάση Von Mises [ $\text{N/mm}^2$ ]

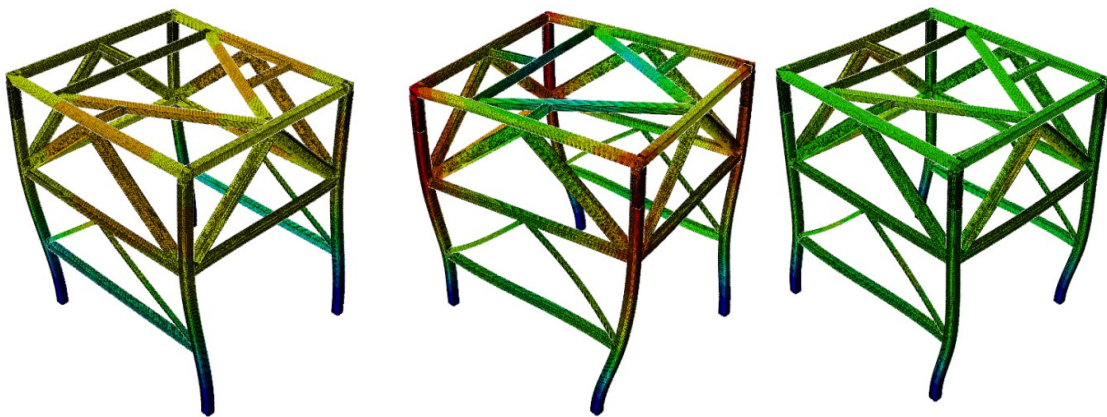




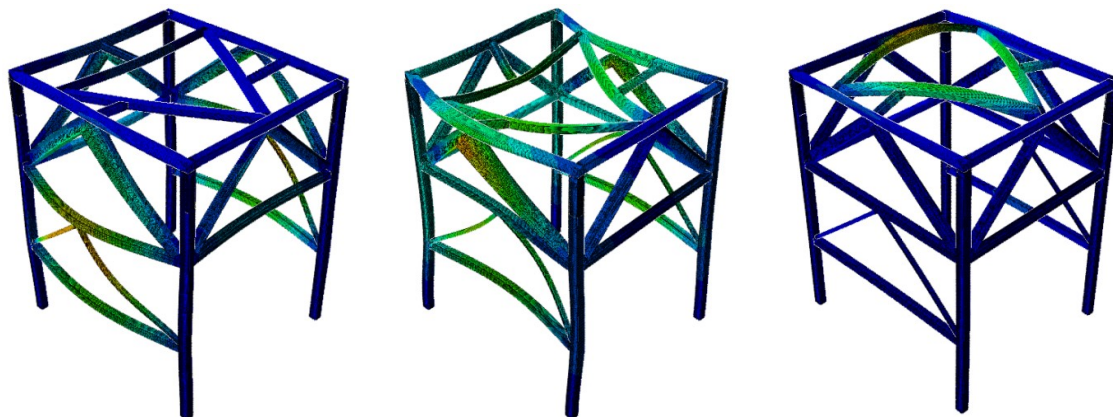


Σχήμα 4.10: Μετατόπιση κατά τον άξονα Z[mm]

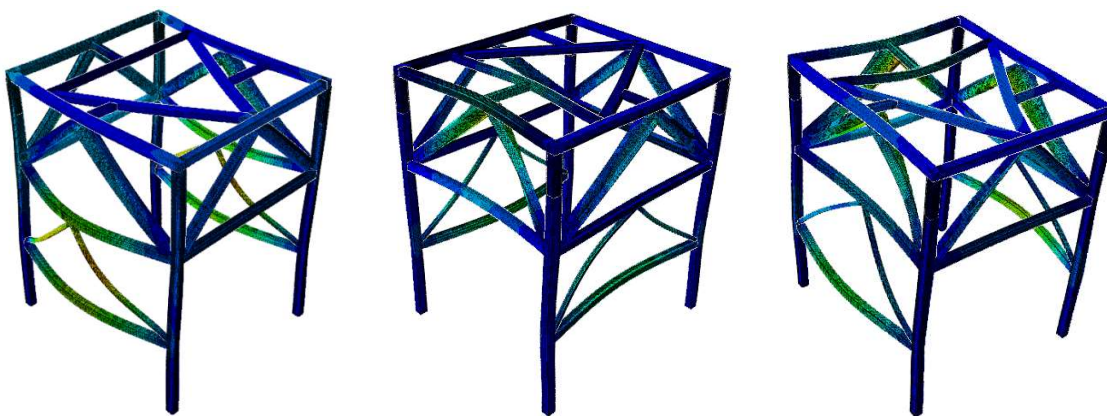
Για την ολοκλήρωση της μελέτης της δεύτερης κατασκευής, πραγματοποιήθηκε ανάλυση των ιδιοτιμών και των ιδιομορφών της. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται οι δέκα πρώτες τάξεις καθώς και ο πίνακας τιμών τους.



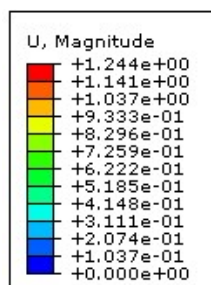
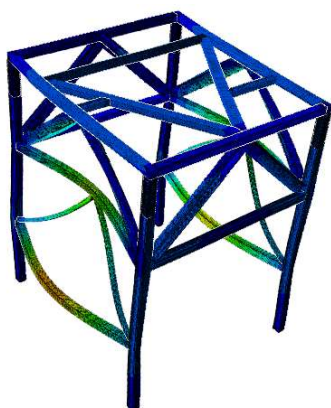
Σχήμα 4.11: Ιδιομορφές 1<sup>ης</sup>, 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> τάξης



Σχήμα 4.12: Ιδιομορφές 4<sup>ης</sup>, 5<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> τάξης



Σχήμα 4.13: Ιδιομορφές 7<sup>ης</sup>, 8<sup>ης</sup> και 9<sup>ης</sup> τάξης



Σχήμα 4.14: Ιδιομορφή 10<sup>ης</sup> τάξης (αριστερά) και οι ιδιοτιμές (δεξιά)

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΑΣΗΣ	ΙΔΙΟΤΙΜΕΣ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ	
		(rad/time)	(cycles/time)
1	7156.1	84.594	13.463
2	30675	175.14	27.875
3	34906	186.83	29.735
4	1.45735E+05	381.75	60.758
5	1.68652E+05	410.67	65.361
6	1.74181E+05	417.35	66.423
7	1.90235E+05	436.16	69.417
8	2.12476E+05	460.95	73.363
9	2.24802E+05	474.13	75.461
10	2.55369E+05	505.34	80.428

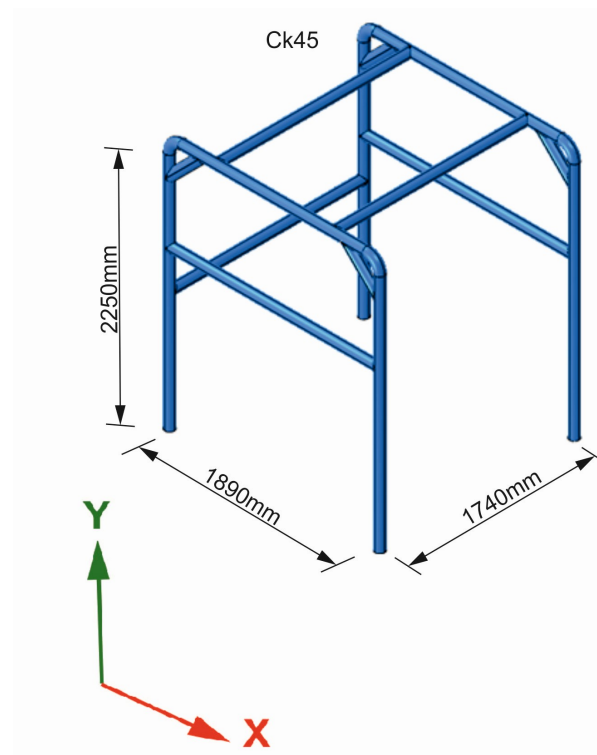
Σχήμα 4.15: Πίνακας ιδιοτιμών και συχνοτήτων

## 4.2 Κατασκευή 2

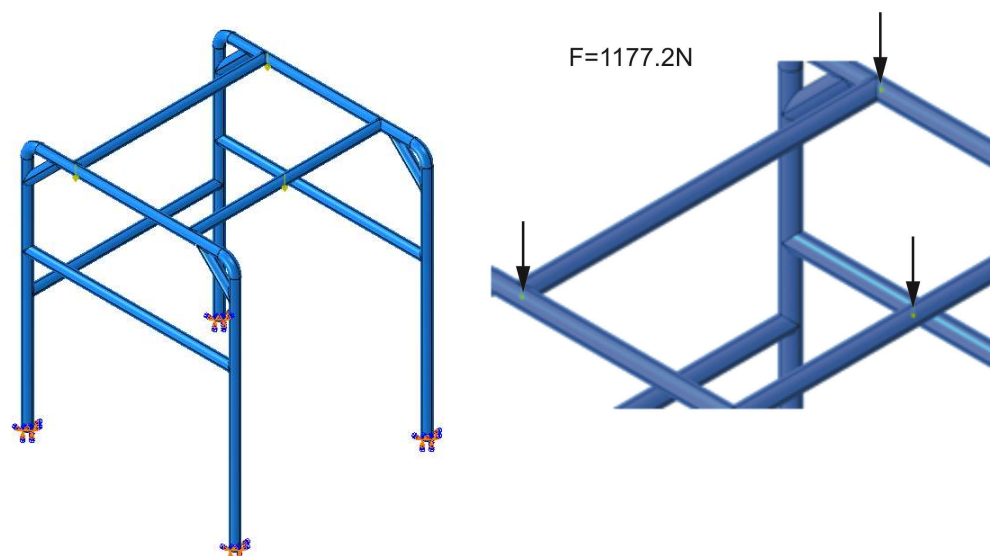
Στη συνέχεια σχεδιάστηκε δεύτερη κατασκευή με κοιλοδοκούς κυκλικής διατομής κατά DIN 1013 όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.16. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δοκοί εξωτερικής διαμέτρου 89mm με πάχος 3mm. Καθορίστηκε χάλυβας (Ck) ως το υλικό της κατασκευής με τις παρακάτω ιδιότητες:

- μέτρο ελαστικότητας (E) 210GPa,
- λόγο poisson ( $\nu$ ) 0.3,
- πυκνότητα ( $\rho$ ) 7850kg/m<sup>3</sup>.

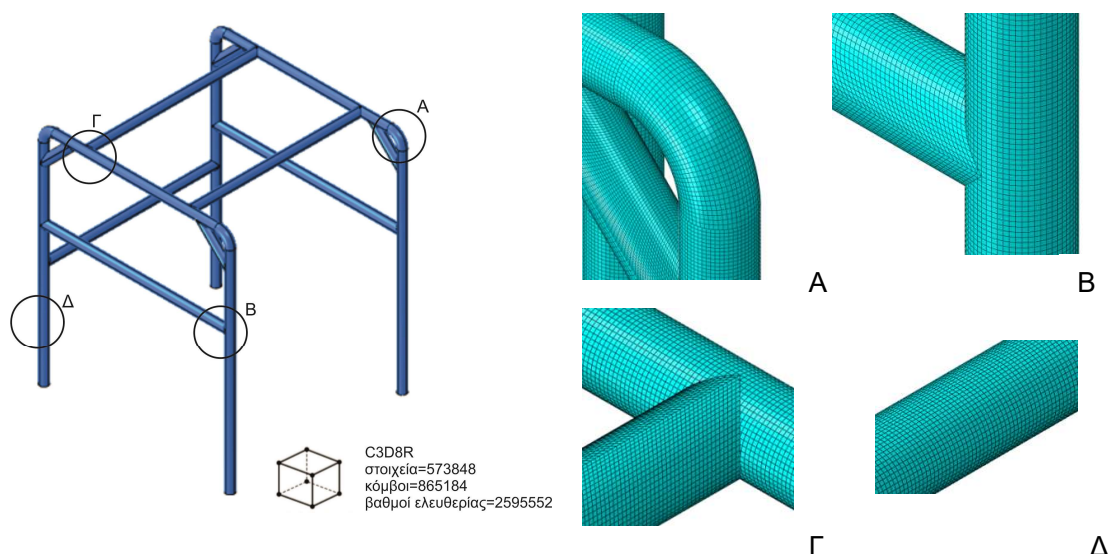
Στη συνέχεια καθορίστηκε η δύναμη του βάρους το ρομπότ 1177.2N και η δύναμη του βάρους της κατασκευής. Ορίστηκαν πακτώσεις στις βάσεις της κατασκευής για να μείνουν ακίνητες κατά την επιβολή των δυνάμεων. Ομοίως με τις προηγούμενες αναλύσεις, πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με την τάση Von Mises, την συνισταμένη μετατόπιση και τις μετατοπίσεις στους άξονες X,Y,Z έπειτα από την επίδραση των ασκούμενων δυνάμεων. Γραμμικά εξάεδρα στοιχεία, τύπου C3D8R χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων όπως φαίνεται και στις εικόνες του σχήματος 4.19. Ως βέλτιστη κρίθηκε η διακριτοποίηση με 573848 στοιχεία, 865184 κόμβους και 2595552 βαθμούς ελευθερίας.



Σχήμα 4.17: Κατασκευή 2



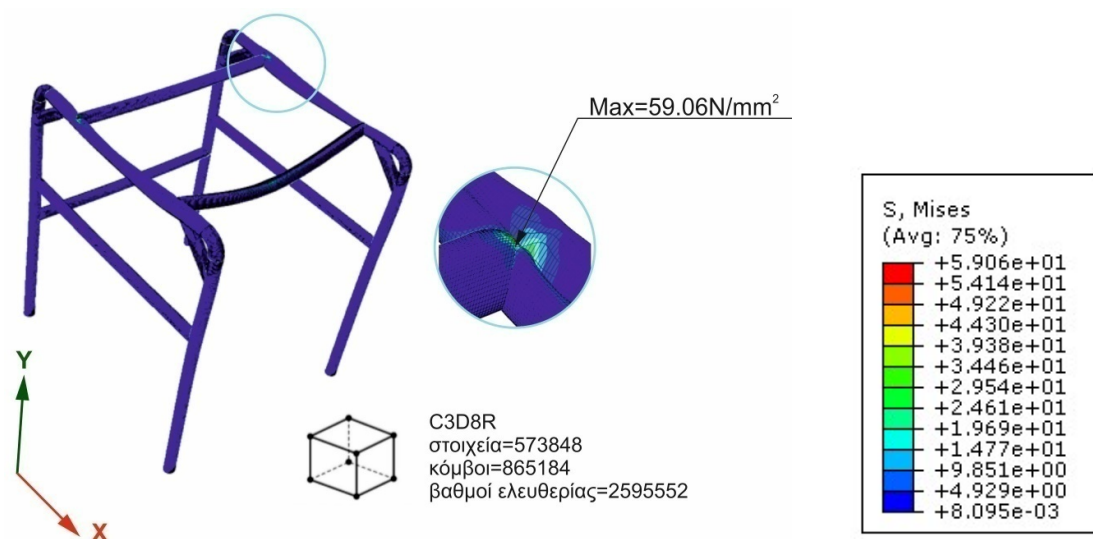
Σχήμα 4.18: Επιβολή οριακών συνθηκών και δυνάμεων



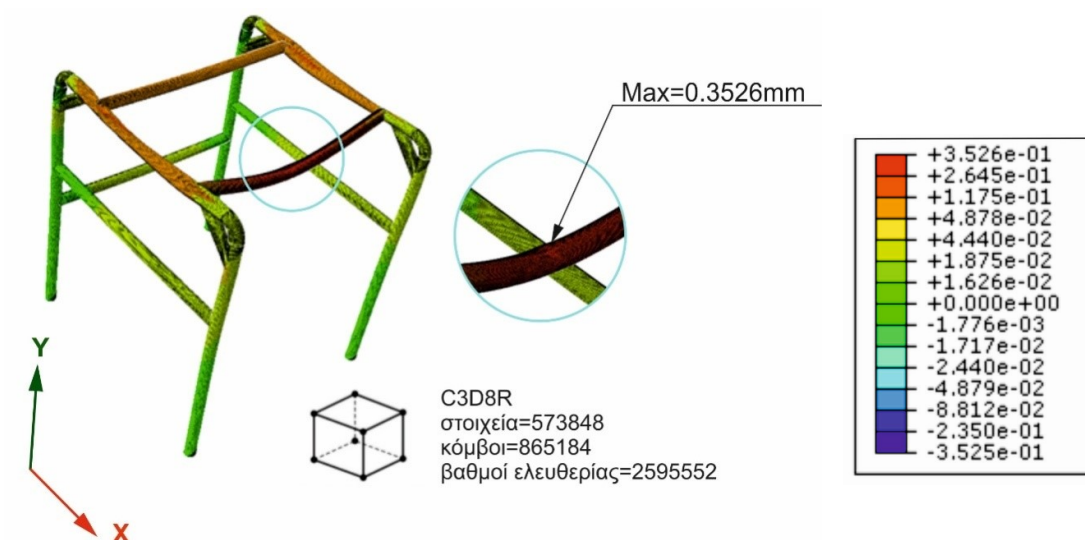
Σχήμα 4.19: Διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία τύπου C3D8R

Έπειτα από την ολοκλήρωση της ανάλυσης προκύπτουν οι μέγιστες τιμές της τάσης και των μετατοπίσεων. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή της τάσης Von Mises ισούται με  $59.06 \text{ N/mm}^2$  ή  $52.06 \text{ MPa}$ . Η μέγιστη αυτή τιμή είναι μικρότερη της επιτρεπόμενης τάσης,  $\sigma_{\text{επ}} = 120 \text{ N/mm}^2$ , και συνεπώς δεν υπάρχει κίνδυνος θραύσης ή πλαστικής παραμόρφωσης της κατασκευής. Η μέγιστη τιμή της συνισταμένης μετατόπισης ισούται με  $0.3526 \text{ mm}$ , του άξονα X με  $0.0444 \text{ mm}$ , του άξονα Y με  $0.3525 \text{ mm}$  και τέλος η μέγιστη τιμή της μετατόπισης κατά τον άξονα Z ισούται με  $0.04878 \text{ mm}$ . Συμπερασματικά, σημειώνεται ότι η μέγιστη μετατόπιση εμφανίζεται στον άξονα Y. Δοκοί ίδιας διατομής θα μπορούσαν να προστεθούν στη δοκό που δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση που θα τη συνδέει με την απέναντι της, προκειμένου να μειωθούν οι τιμές των μετατοπίσεων και της τάσης.

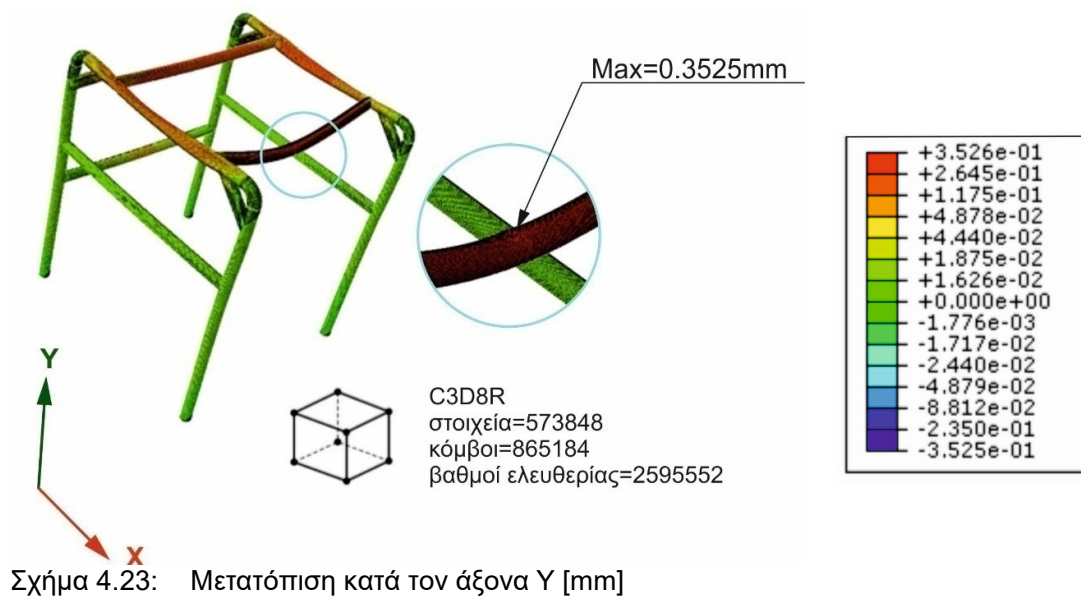
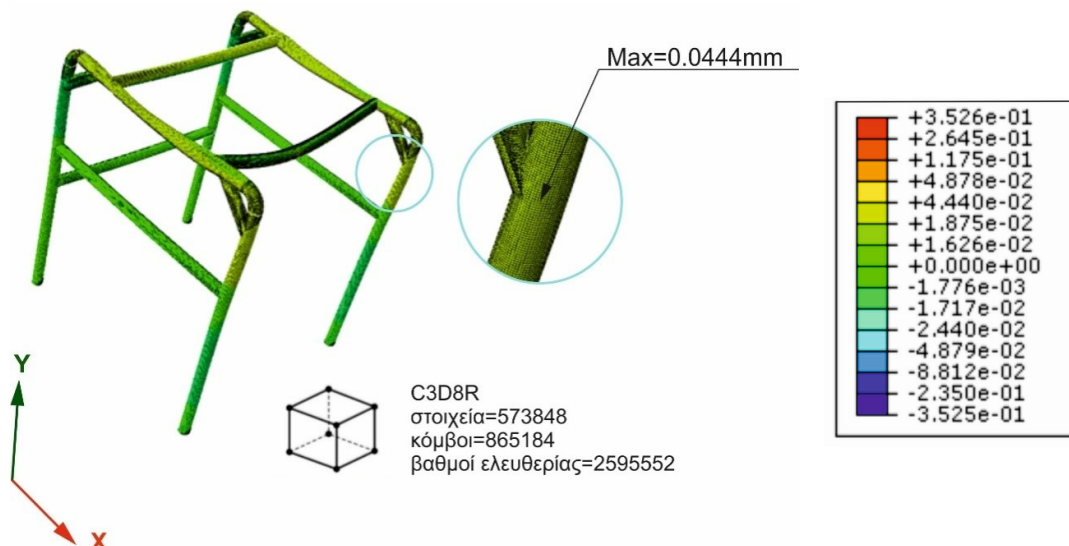


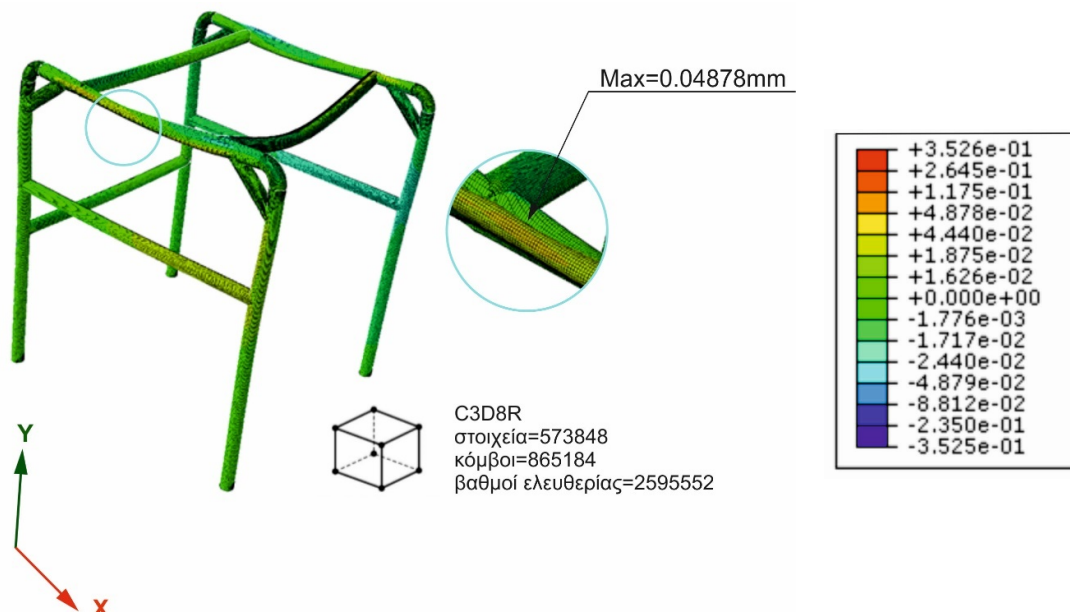


Σχήμα 4.20: Von Mises [N/mm<sup>2</sup>]



Σχήμα 4.21: Συνισταμένη μετατόπιση [mm]





Σχήμα 4.24: Μετατόπιση κατά τον άξονα Z [mm]

Τέλος, πραγματοποιείται η ανάλυση των ιδιοτιμών και ιδιομορφών της τρίτης κατασκευής και παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα οι δέκα πρώτες τάξεις καθώς και ο πίνακας τιμών τους.



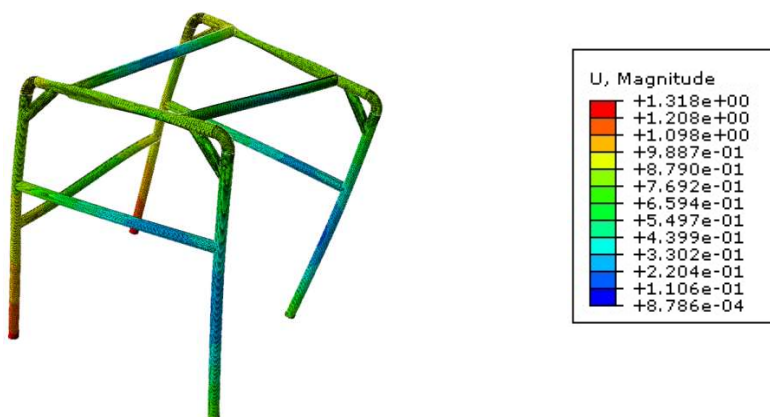
Σχήμα 4.25: Ιδιομορφές 1<sup>ης</sup>, 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> τάξης



Σχήμα 4.26: Ιδιομορφές 4<sup>ης</sup>, 5<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> τάξης



Σχήμα 4.27: Ιδιομορφές 7<sup>ης</sup>, 8<sup>ης</sup> και 9<sup>ης</sup> τάξης



Σχήμα 4.28: Ιδιομορφή 10<sup>ης</sup> τάξης(αριστερά) και οι ιδιοτιμές (δεξιά)

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΑΣΗΣ	ΙΔΙΟΤΙΜΕΣ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ	
		(rad/time)	(cycles/time)
1	6.93184E-06	2.63284E-03	4.19029E-04
2	1.91766E-05	4.37911E-03	6.96957E-04
3	3.35789E-05	5.79473E-03	9.22259E-04
4	3.94121E-05	6.27791E-03	9.99160E-04
5	4.96956E-05	7.04951E-03	1.12197E-03
6	5.86922E-05	7.66108E-03	1.21930E-03
7	3694.4	60.781	9.6737
8	4794.3	69.241	11.020
9	6074.7	77.941	12.405
10	20686	143.83	22.891

Σχήμα 4.29: Πίνακας ιδιοτιμών και συχνοτήτων

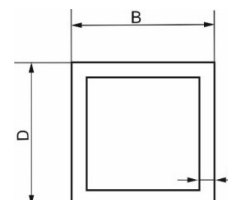
### 4.3 Κατασκευή 3

Τέλος, σχεδιάστηκε μία επιπλέον κατασκευή με κοιλοδοκούς τετραγωνικής διατομής κατά DINEN 10210. Οι κοιλοδοκοί που σχεδιάστηκαν παρουσιάζονται στο [σχήμα 4.30](#). Χάλυβας (Ck) ορίστηκε το υλικό της κατασκευής με τις παρακάτω ιδιότητες:

- μέτρο ελαστικότητας (E) 210Gpa,
- λόγο poisson ( $\nu$ ) 0.3,

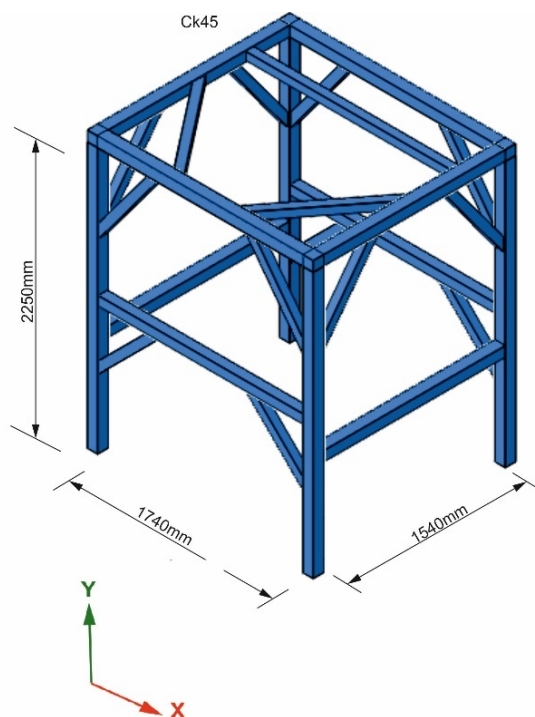
- πυκνότητα ( $\rho$ )  $7850\text{kg/m}^3$ .

Κοιλοδοκοί	D [mm]	B [mm]	t [mm]	Βάρος [kg/m]
90/4	90	90	4	10.70
80/3	80	80	3	7.22
70/3	70	70	3	6.28



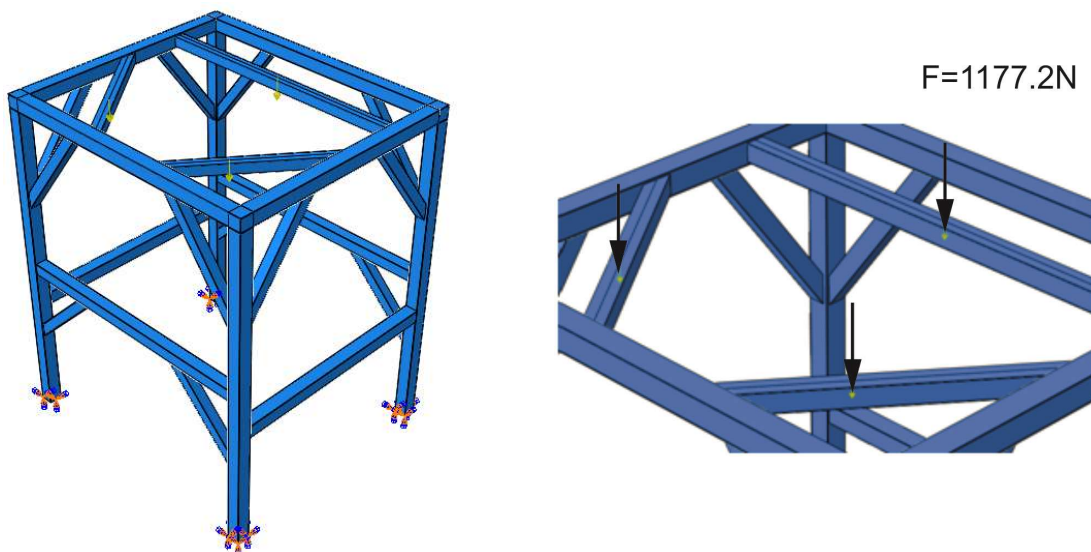
Σχήμα 4.30: Τύποι κοιλοδοκών κατά DINEN 10210

Σε επόμενο στάδιο, ορίστηκε το βήμα (step) για την πραγματοποίηση της στατικής ανάλυσης για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με την τάση Von Mises, την συνισταμένη μετατόπιση και την μετατόπιση των αξόνων X,Y και Z. Ορίστηκαν οι δυνάμεις από το βάρος του ρομπότ  $1177.2\text{N}$  και η δύναμη από το βάρος της κατασκευής. Στο σχήμα 4.32 παρουσιάζεται η δύναμη του ρομπότ, η οποία δρα στα τρία σημεία της κατασκευής ανά  $120^\circ$ , σημεία στα οποία στηρίζεται το ρομπότ. Έπειτα στις βάσεις της κατασκευής ορίστηκαν πακτώσεις προκειμένου να παραμείνει ακίνητη. Για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, έγινε διακριτοποίηση της κατασκευής σε γραμμικά εξάεδρα στοιχεία τύπου C3D8R. Βέλτιστη κρίθηκε η διακριτοποίηση με 964017 στοιχεία, 1697948 κόμβους και 5093844 βαθμούς ελευθερίας.

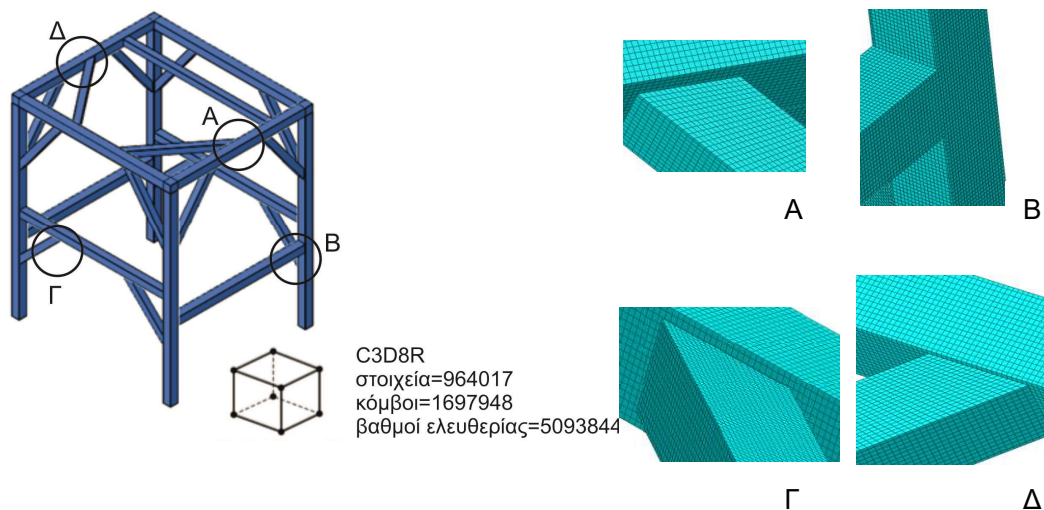


Σχήμα 4.31: Κατασκευή 3



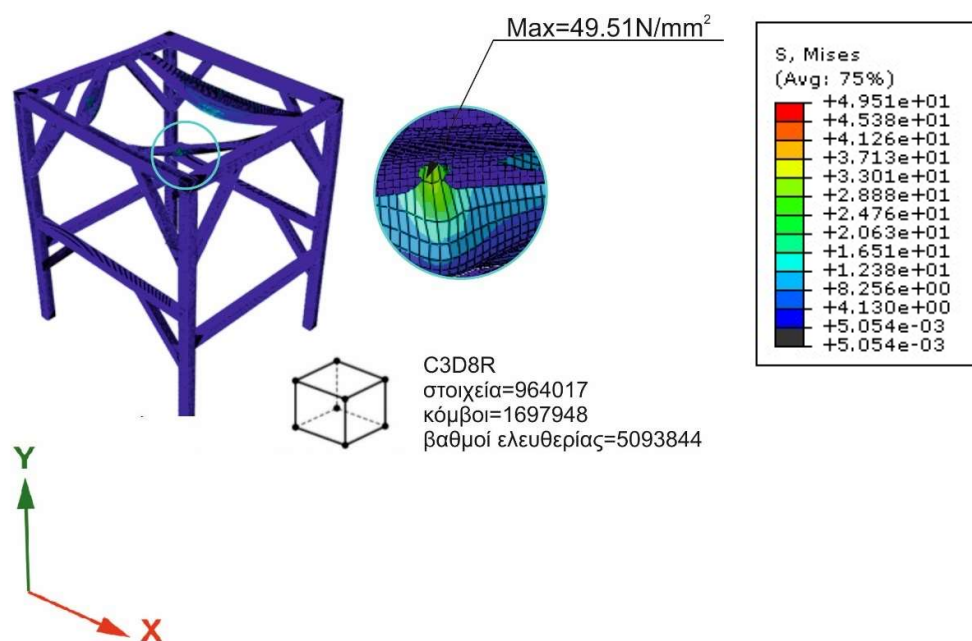


Σχήμα 4.32: Επιβολή οριακών συνθηκών και δυνάμεων

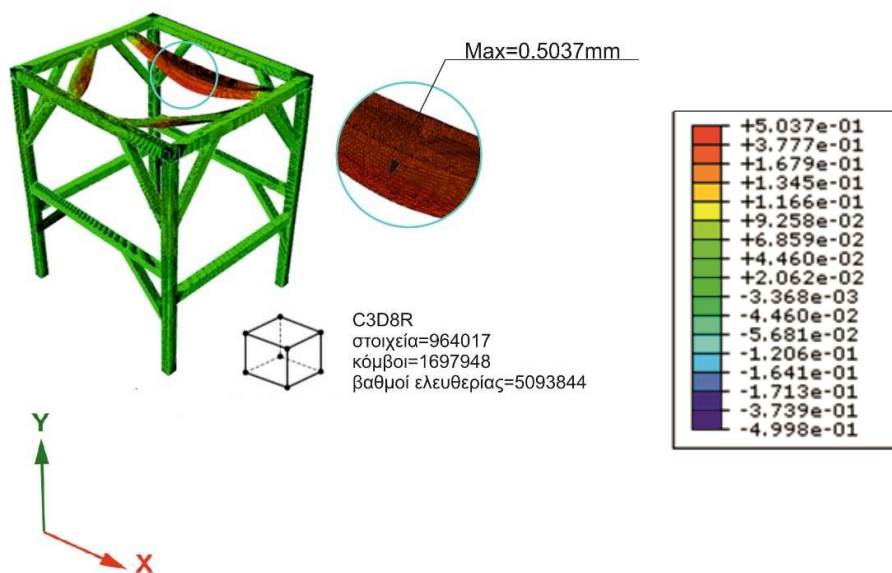


Σχήμα 4.33: Διακριτοποίηση σε πεπερασμένα στοιχεία τύπου C3D8R

Έπειτα από την ολοκλήρωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, προκύπτουν αποτελέσματα σχετικά με την τάση Von Mises και με τις μετατοπίσεις στους άξονες X,Y,Z. Πιο συγκεκριμένα η τιμή της μέγιστης τάσης ισούται με  $49.51 \text{ N/mm}^2$ , τιμή η οποία είναι μικρότερη της επιτρεπόμενης ( $\sigma_{\text{επ}}=120 \text{ N/mm}^2$ ) και κατά συνέπεια αποφεύγονται οι πιθανότητες μόνιμων παραμορφώσεων και θραύσεων. Επιπλέον, όπως φαίνεται παρακάτω, οι μέγιστη τιμή της συνισταμένης μετατόπισης ισούται με  $0.5037 \text{ mm}$ , η μέγιστη μετατόπιση κατά τον άξονα X ισούται με  $0.1345 \text{ mm}$ , κατά τον άξονα Y με  $0.3801 \text{ mm}$  και τον άξονα Z ισούται με  $0.1166 \text{ mm}$ . Παρατηρούμε ότι η μέγιστη μετατόπιση εμφανίζεται στον άξονα Y. Για μείωση της μετατόπισης θα μπορούσε να προστεθεί επιπλέον δοκάρι το οποίο θα συνδέει τη δοκό, που δέχεται τη μεγαλύτερη καταπόνηση, με την υπόλοιπη κατασκευή.

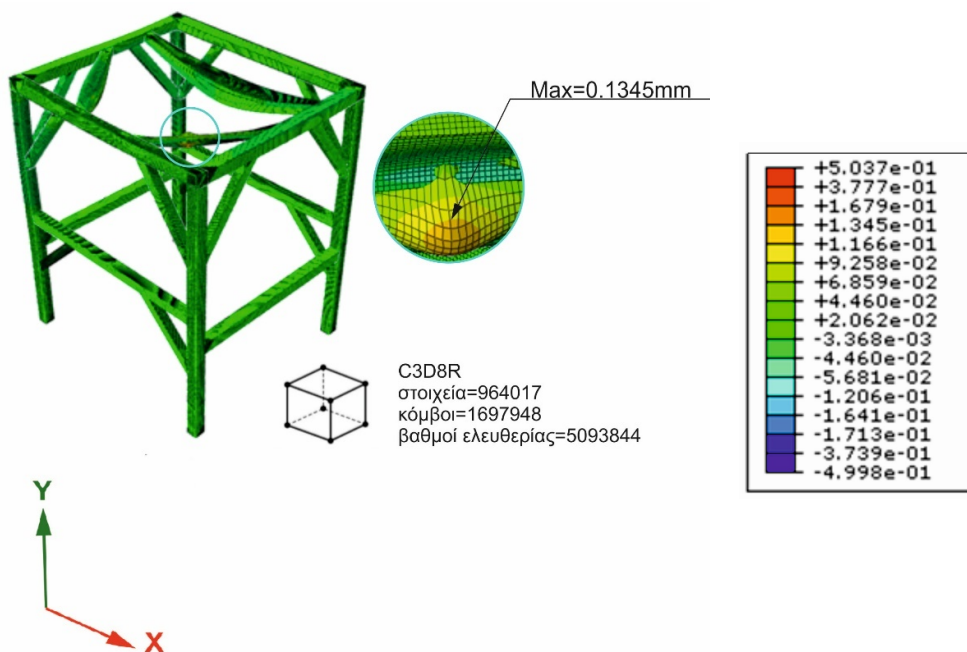


Σχήμα 4.34: Τάση Von Mises [N/mm<sup>2</sup>]

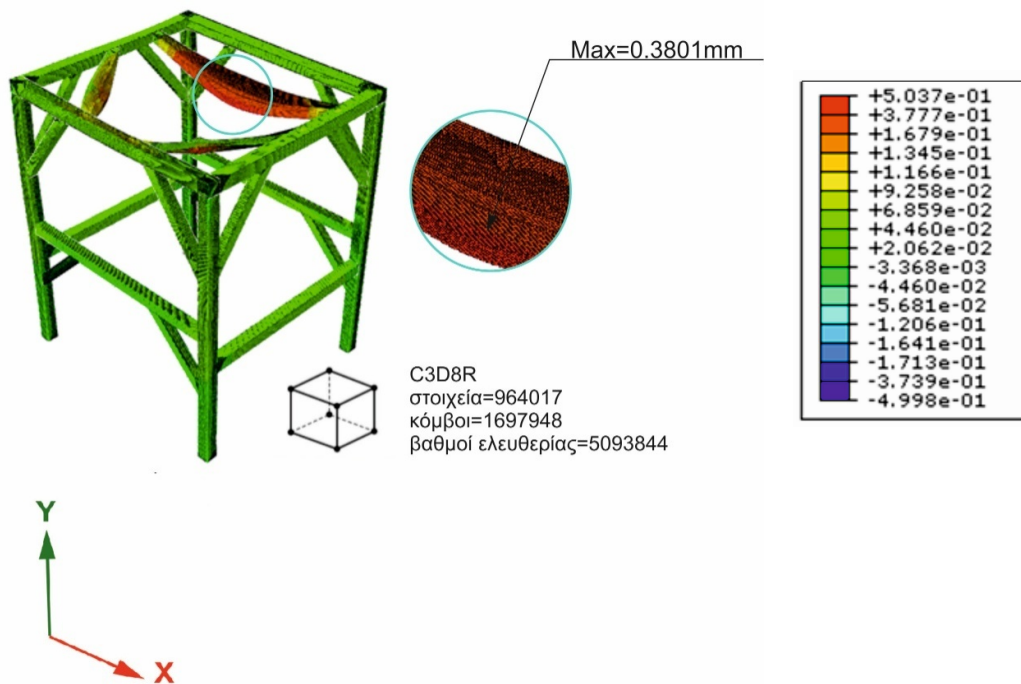


Σχήμα 4.35: Συνισταμένη μετατόπιση [mm]

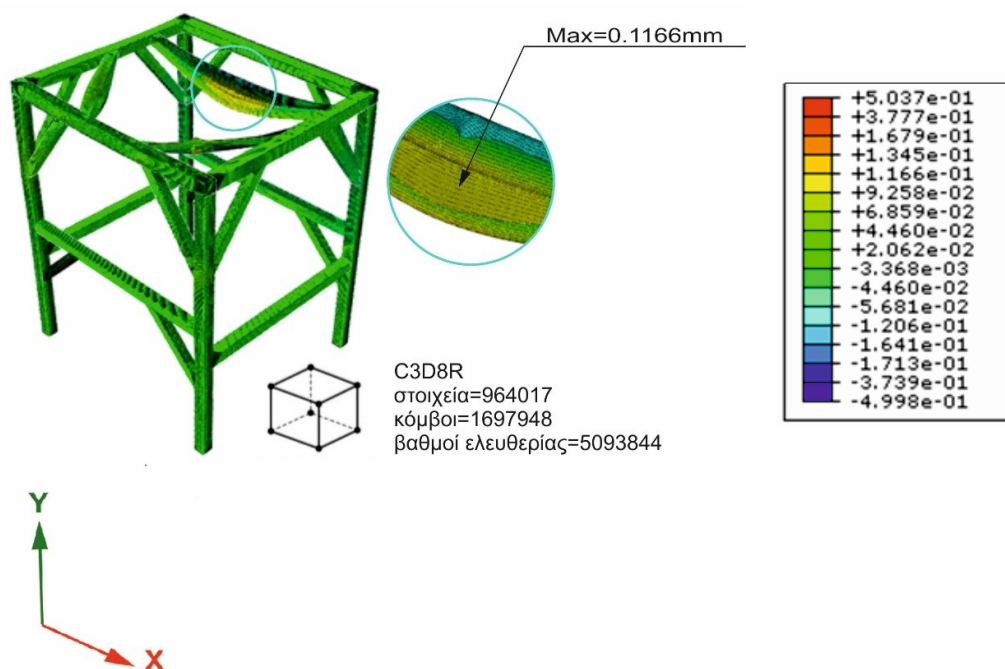




Σχήμα 4.36: Μετατόπιση κατά τον άξονα X [mm]

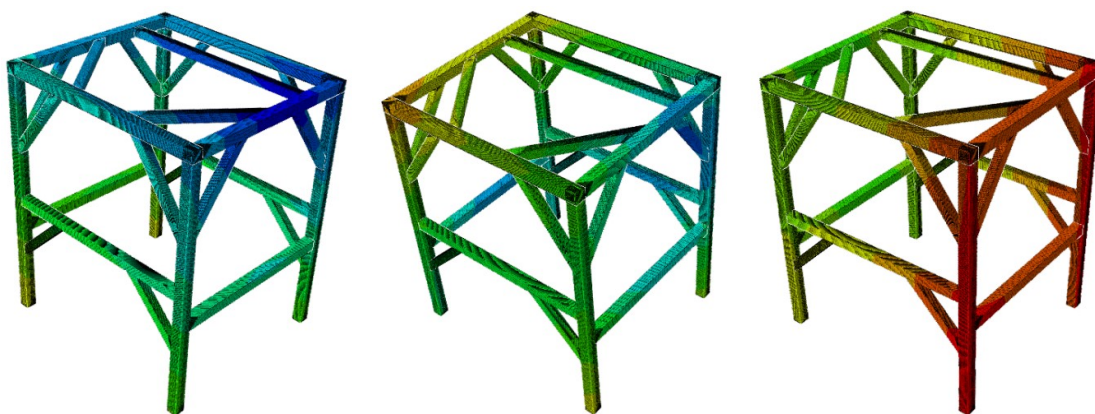


Σχήμα 4.37: Μετατόπιση κατά τον άξονα Y [mm]

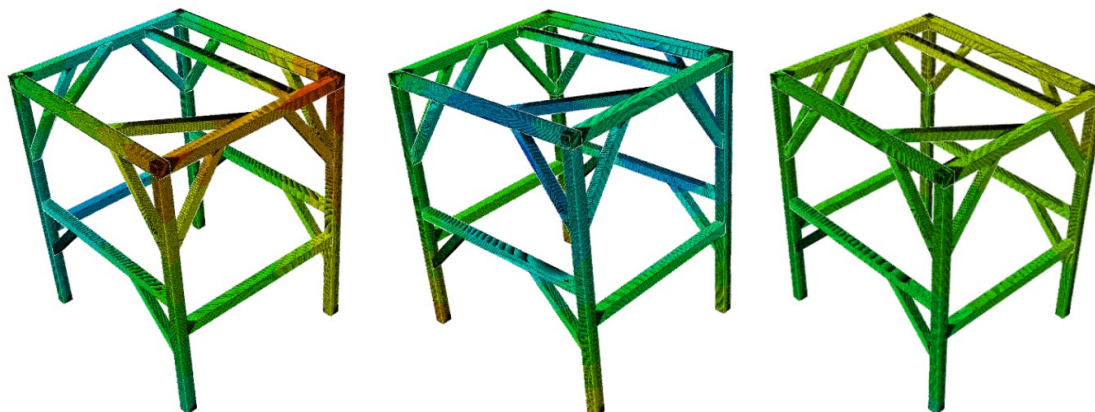


Σχήμα 4.38: Μετατόπιση κατά τον άξονα Z [mm]

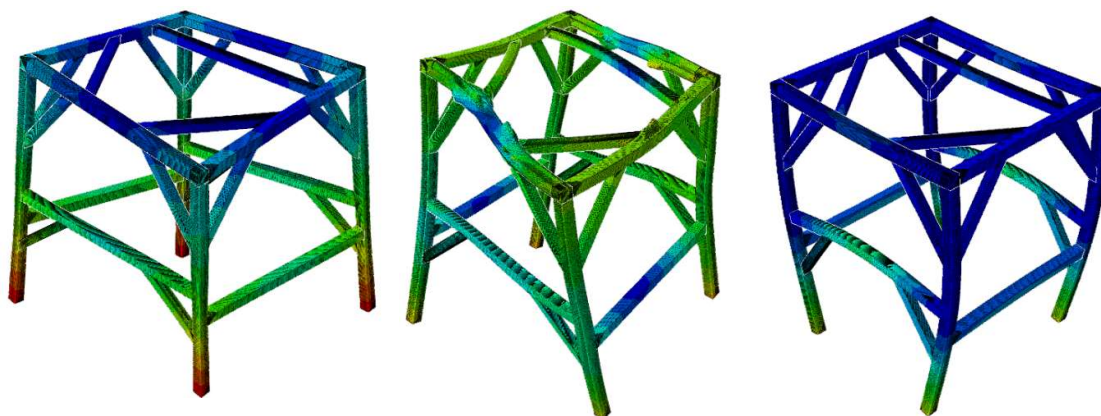
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ιδιομορφική ανάλυση της κατασκευής και παρουσιάζονται οι δέκα πρώτες τάξεις.



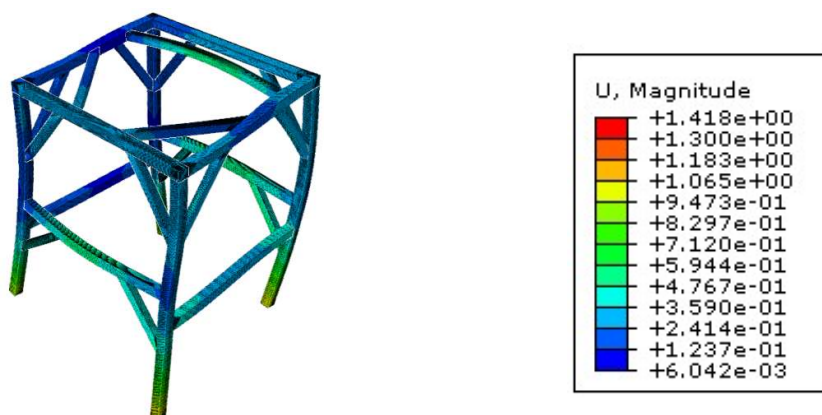
Σχήμα 4.39: Ιδιομορφές 1<sup>ης</sup>, 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> τάξης



Σχήμα 4.40: Ιδιομορφές 4<sup>ης</sup>, 5<sup>ης</sup> και 6<sup>ης</sup> τάξης



Σχήμα 4.41: Ιδιομορφές 7<sup>ης</sup>, 8<sup>ης</sup> και 9<sup>ης</sup> τάξης



Σχήμα 4.42: Ιδιομορφή 10<sup>ης</sup> τάξης (αριστερά) και ιδιοτιμών (δεξιά)

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΑΣΗΣ	ΙΔΙΟΤΙΜΕΣ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ	
		(rad/time)	(cycles/time)
1	-5.49554E-05	0.0	0.0
2	-2.85537E-05	0.0	0.0
3	-1.52189E-05	0.0	0.0
4	-1.48136E-05	0.0	0.0
5	-4.20564E-06	0.0	0.0
6	1.25502E-05	3.54263E-03	5.63827E-04
7	9944.8	99.724	15.871
8	1.11180E+05	333.44	53.068
9	1.21552E+05	348.64	55.488
10	1.41451E+05	376.10	59.858

Σχήμα 4.43: Πίνακας ιδιοτιμών και συχνοτήτων

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ζητήθηκε να μελετηθεί η κατασκευή η οποία σχεδιάστηκε για τη ΔΕΔΙΣΑ με σκοπό τη στήριξη του ρομποτικού συστήματος IRB 360 το οποίο θα διαχωρίζει τα ανακυκλώσιμα υλικά. Μέσω της εφαρμογής των πεπερασμένων στοιχείων προέκυψαν αποτελέσματα σχετικά με τη στιβαρότητα της εν λόγω κατασκευής. Προκειμένου να διαπιστωθεί, σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν άλλες τρεις εναλλακτικές κατασκευές και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν σε σχέση με την αρχική κατασκευή.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	ΤΑΣΗ- VON MISES (N/mm <sup>2</sup> )	U total (mm)	Ux (mm)	Uy (mm)	Uz (mm)
<b>ΑΝΑΣΑ</b>	32.91	0.2972	0.032	0.2972	0.04131
<b>1</b>	98.71	0.6875	0.04772	0.671	0.08635
<b>2</b>	59.06	0.3526	0.0444	0.3525	0.04878
<b>3</b>	49.51	0.5037	0.1345	0.3801	0.1166

Σχήμα 5.1: Πίνακας αποτελεσμάτων

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι η κατασκευή ΑΝΑΣΑ της ΔΕΔΙΣΑ παρουσιάζει μεγαλύτερη στιβαρότητα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες. Αυτό φαίνεται από τις τιμές της τάσης Von Mises, της συνολικής μετατόπισης και των μετατοπίσεων στον εκάστοτε άξονα, οι οποίες είναι μικρότερες σε σχέση με των άλλων κατασκευών. Το αποτέλεσμα αυτό δικαιολογείται πρακτικά και από τη γεωμετρία της κατασκευής και του τρόπου με τον οποίο είναι συνδεδεμένα τα δομικά στοιχεία. Επιπρόσθετα, αξίζει να σημειωθεί ότι η κατασκευή 1 παρουσιάζει τις πιο μεγάλες μετατοπίσεις και τάση. Τα αποτελέσματα αυτά δικαιολογούνται εξαιτίας της μικρότερης διατομής των δομικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται. Στην κατασκευή αυτή, το μεγαλύτερο δομικό στοιχείο είναι κατά 20mm πιο μικρό από των υπολοίπων. Πιο συγκεκριμένα, στις κατασκευές ΑΝΑΣΑ, 2 και 3 χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον δοκάρια διατομής 90mmσε αντίθεση με τη κατασκευή 1 όπου η μεγαλύτερη κοιλοδοκός της είναι διατομής 70mm. Συνοψίζοντας, παρατηρούμε ότι όλες οι κατασκευές που μελετήθηκαν έχουν μικρή διαφορά στα αποτελέσματά τους και συνεπώς θα μπορούσαν όλες να χρησιμοποιηθούν για τη στήριξη του ρομποτικού συστήματος.

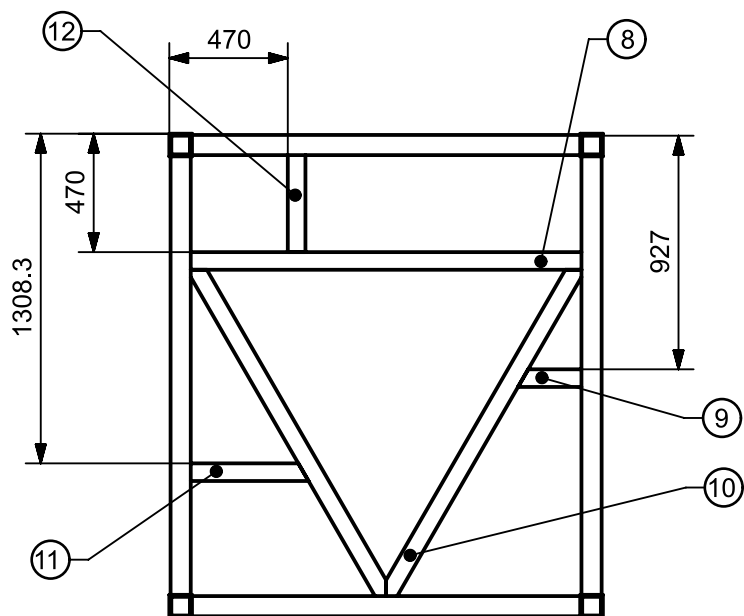
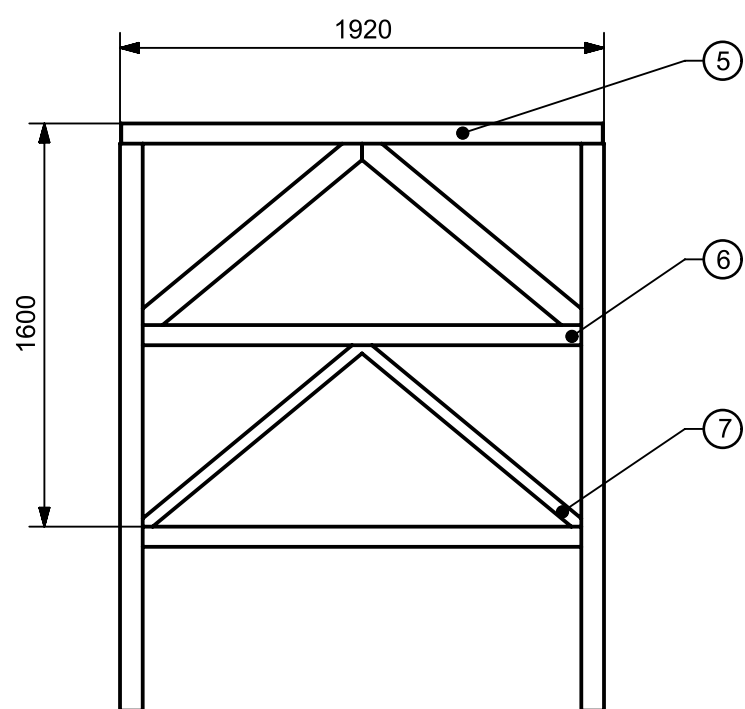
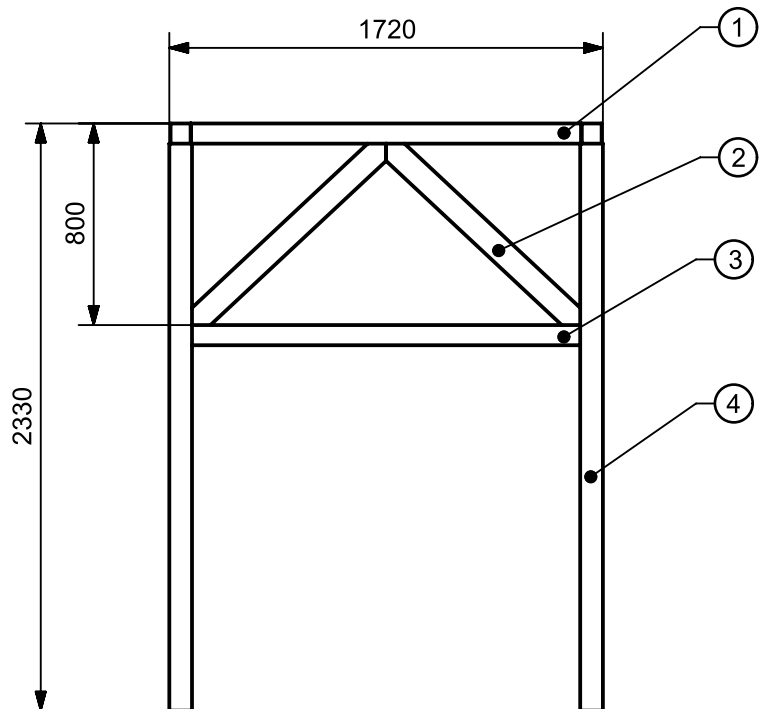
Εν κατακλείδι, από την παραπάνω προσέγγιση του προβλήματος προκύπτουν ικανοποιητικά αποτελέσματα τα οποία διασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, εάν θέλαμε να προσεγγίσουμε το πρόβλημα με περισσότερη λεπτομέρεια, θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη η παράμετρος της ταλάντωσης του ρομποτικού συστήματος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του και το βαθμό στον οποίο επηρεάζει την κατασκευή. Επιπλέον, άλλοι παράμετροι που θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη αφορούν τον τρόπο σύνδεσης του ρομπότ με τη κατασκευή και τον τρόπο σύνδεσης των δομικών στοιχείων της κατασκευής ώστε μερικά από αυτά θα μπορούσαν να μην είναι συγκολλημένα μεταξύ τους.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Πασχάλης Κ. Γκότσης, “Πεπερασμένα Στοιχεία”, Εκδόσεις Ζήτη, 2005
- Αριστομένη Θ. Αντωνιάδης, “Μηχανολογικό Σχέδιο”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2013
- Beer, Johnston, DeWolf, Mazurek, “Μηχανική των Υλικών”, 6<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2012
- Δ.Μ. Εμίρης, Δ.Ε. Κουλουριώτης, “Ρομποτική”, 3<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ, 2015
- Χ.Α. Παπαδόπουλος, “Στοιχεία Μηχανών”, 2<sup>η</sup> Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2014
- Δυναμική, Ταλάντωση και Έλεγχος κατασκευών, Σταυρουλάκης Γεώργιος
- St. Staicu, D.C. Carp-Ciocardia, “*Dynamic analysis of Clavel's Delta parallel robot*”, in International Conference on Robotics and Automation, 2003
- J.Brinker, N. Funk, P. Ingenlath, Y.Takeda, B.Corves, “*Comparative study of serial-parallel robots with full orientation capabilities*”, in IEEE Robotics and Automation Letters, 2017
- Ντεκουμέ Γεωργίου, “Κατασκευή και έλεγχος *Delta Robot*”, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2017
- ABB Group – Leading digital technology for industry
- Μπητρός Συμμετοχική ΑΕ..

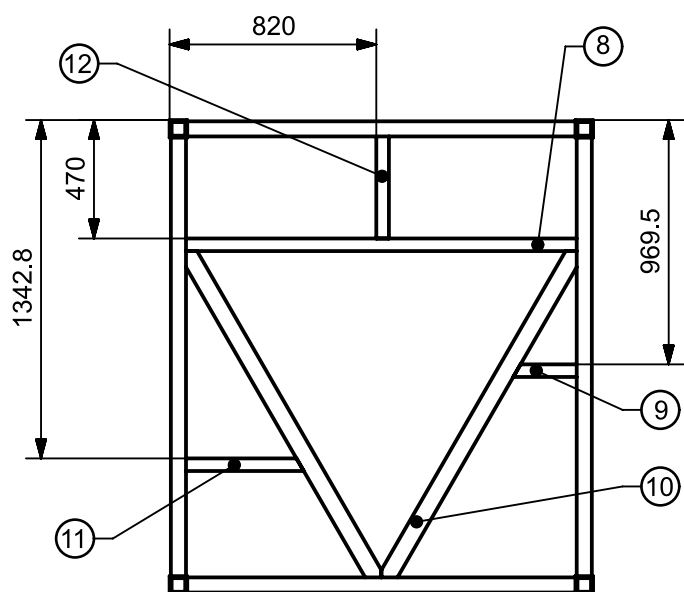
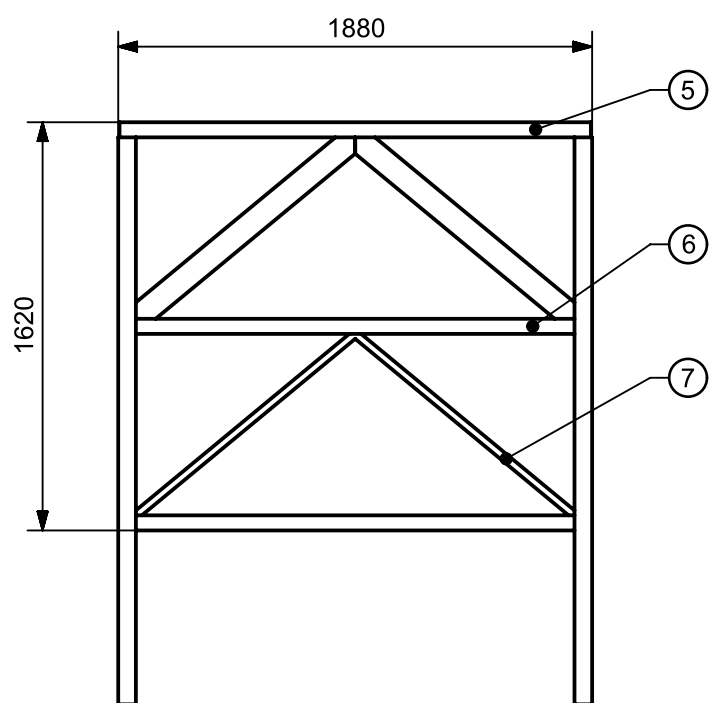
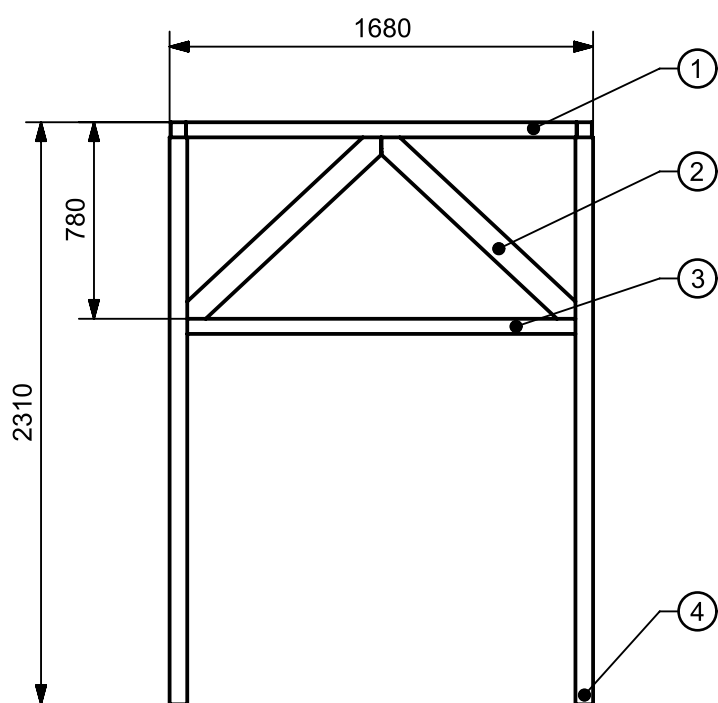




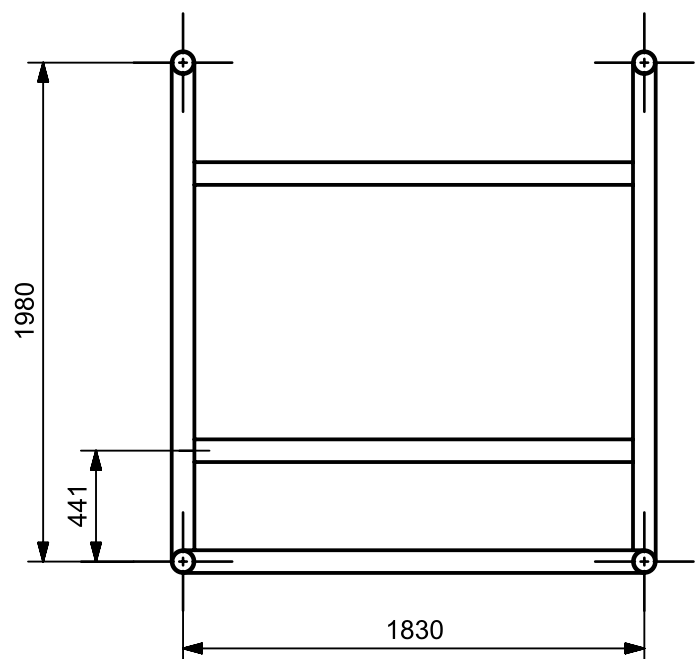
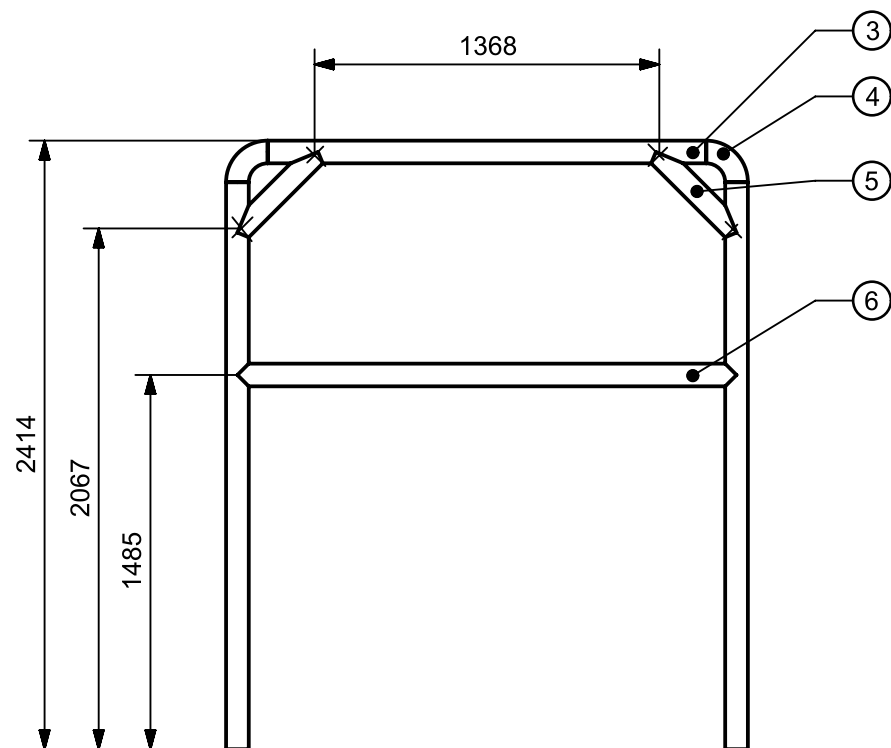
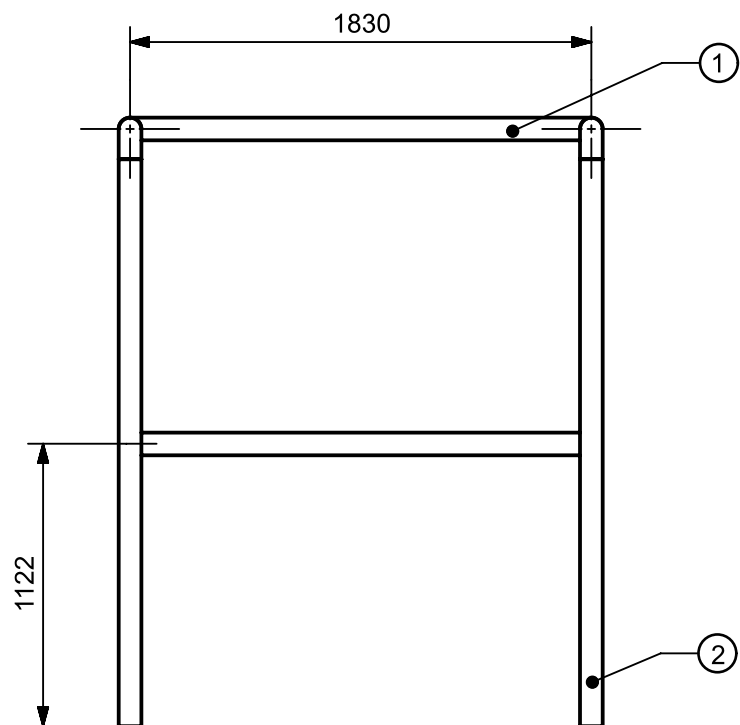


12	1	TMX	Δοκός 12	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 70x70x3	μήκος L=385mm
11	1	TMX	Δοκός 11	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 70x70x3	μήκος L=1509mm
10	2	TMX	Δοκός 10	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 70x70x3	μήκος L=251.7mm
9	1	TMX	Δοκός 9	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 70x70x3	μήκος L=467,2mm
8	1	TMX	Δοκός 8	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 70x70x3	μήκος L=1540mm
7	2	TMX	Δοκός 7	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 50x50x3	μήκος L=1130mm
6	2	TMX	Δοκός 6	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 80x80x3	μήκος L=1740mm
5	3	TMX	Δοκός 5	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 80x80x3	μήκος L=1910mm
4	4	TMX	Δοκός 4	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 90x90x4	μήκος L=2250mm
3	1	TMX	Δοκός 3	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 80x80x3	μήκος L=1540mm
2	4	TMX	Δοκός 2	Δοκός διατομής U κατά DIN 1026 100	μήκοςL=1130mm
1	3	TMX	Δοκός 1	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 80x80x3	μήκος L=1550mm
α/α	ποσότητα	μονάδα	Ονομασία τεμ	Αριθμός σχεδίου ή τυποποιημένη ονομασία	Παρατηρήσεις
1	2	3	4	5	6






12	1	TMX	Δοκός 12	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 50x50x3	μήκος L=405mm
11	1	TMX	Δοκός 11	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 50x50x3	μήκος L=251.7mm
10	2	TMX	Δοκός 10	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 50x50x3	μήκος L=1511mm
9	1	TMX	Δοκός 9	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 50x50x3	μήκος L=467.2mm
8	1	TMX	Δοκός 8	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 50x50x3	μήκος L=1540mm
7	2	TMX	Δοκός 7	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 30x30x3	μήκος L=1130mm
6	2	TMX	Δοκός 6	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 60x60x3	μήκος L=1740mm
5	3	TMX	Δοκός 5	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 60x60x3	μήκος L=1870mm
4	4	TMX	Δοκός 4	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 80x80x4	μήκος L=2250mm
3	1	TMX	Δοκός 3	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 60x60x3	μήκος L=1540mm
2	4	TMX	Δοκός 2	Δοκός διατομής U κατά DIN 1026 100	μήκος L=1130mm
1	3	TMX	Δοκός 1	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 60x60x3	μήκος L=1550mm
α/α	ποσότητα	μονάδα	Ονομασία τεμ	Αριθμός σχεδίου ή τυποποιημένη ονομασία	Παρατηρήσεις
1	2	3	4	5	6



6	1	TMX	Δοκός 6	Δοκός κυκλικής διατομής κατά DIN 1013 89x3	μήκος L=1980mm
5	2	TMX	Δοκός 5	Δοκός κυκλικής διατομής κατά DIN 1013 89x3	γωνία 90°
4	2	TMX	Δοκός 4	Δοκός κυκλικής διατομής κατά DIN 1013 89x3	μήκος L=350mm
3	3	TMX	Δοκός 3	Δοκός κυκλικής διατομής κατά DIN 1013 89x3	μήκος L=1740mm
2	4	TMX	Δοκός 2	Δοκός κυκλικής διατομής κατά DIN 1013 89x3	μήκος L=2250mm
1	5	TMX	Δοκός 1	Δοκός κυκλικής διατομής κατά DIN 1013 89x3	μήκος L=1830mm
α/α	ποσότητα	μονάδα	Ονομασία τεμ	Αριθμός σχεδίου ή τυποποιημένη ονομασία	Παρατηρήσεις
1	2	3	4	5	6



www.m3.tuc.gr

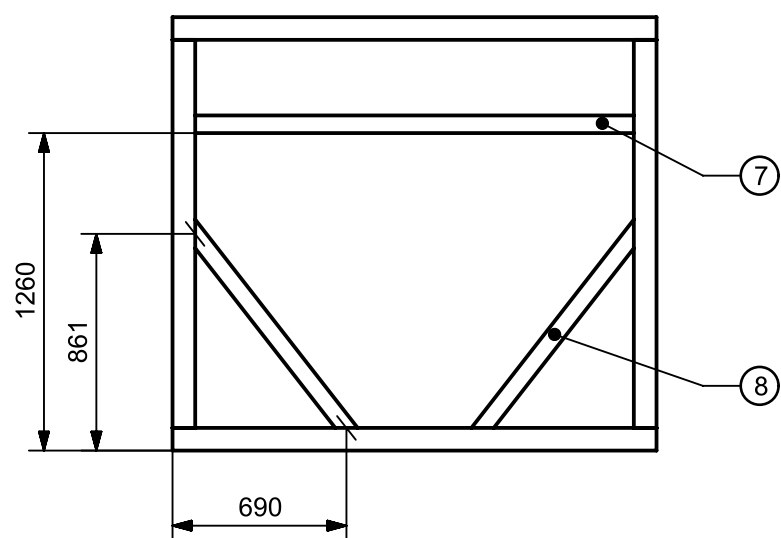
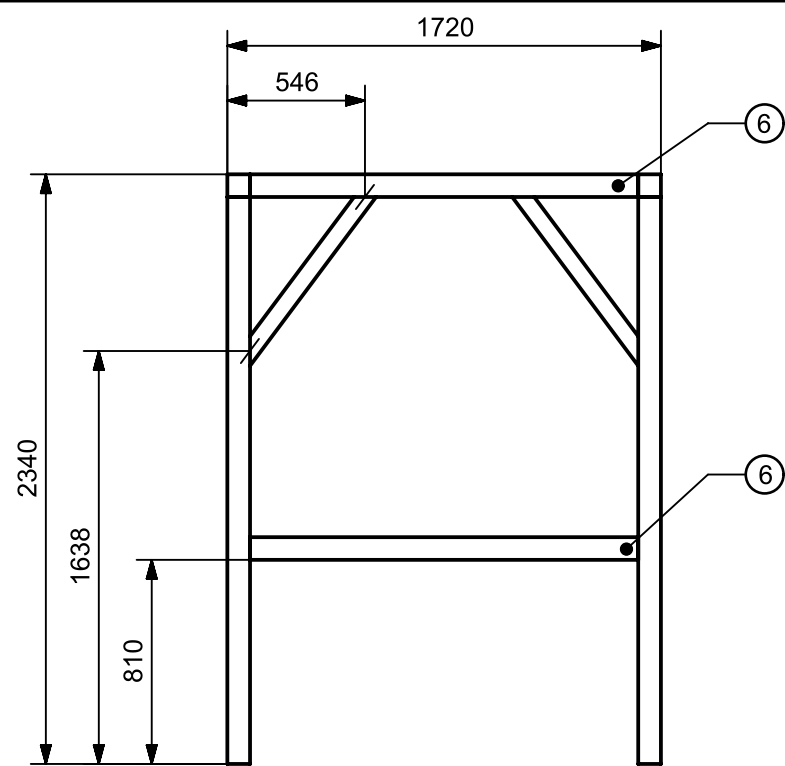
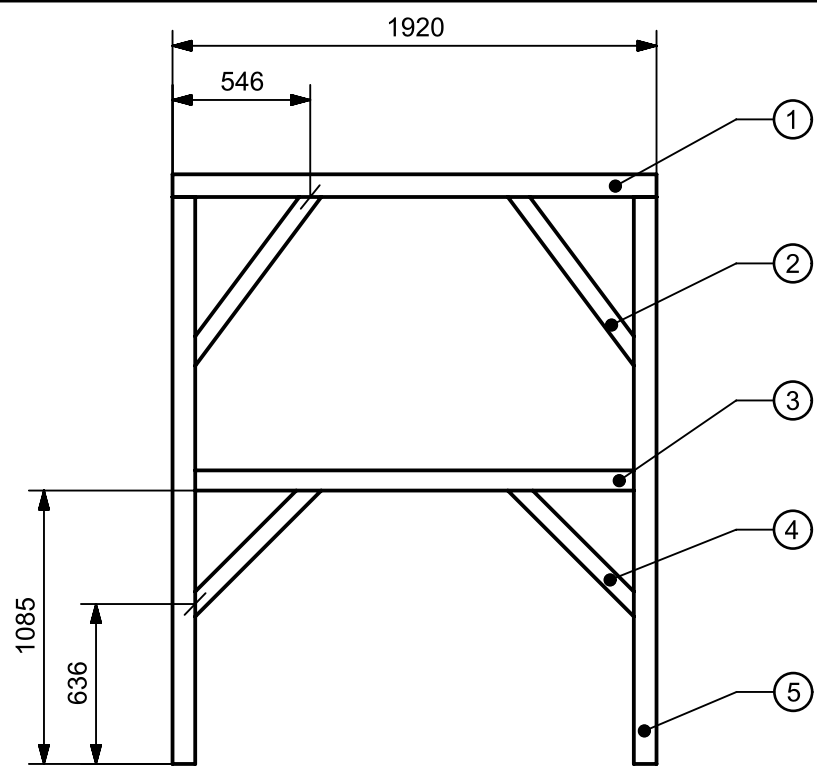
Σχεδίαση:  
**Κατερίνα Φωτοδημητράκη**

Τίτλος:  
**Κατασκευή 2**


Ανοχές:  
Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός:  
**02:003**

Κλίμ. 1:30	Ημερομηνία 16/9/2019	Γλώσσα ΕΛ	Φύλλο 1/1
---------------	-------------------------	--------------	--------------



8	2	TMX	Δοκός 8	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 70x70x3	μήκος L=1048mm
7	1	TMX	Δοκός 7	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 70x70x3	μήκος L=1740mm
6	4	TMX	Δοκός 6	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 90x90x4	μήκος L=1540mm
5	4	TMX	Δοκός 5	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 90x90x4	μήκος L=2250mm
4	2	TMX	Δοκός 4	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 70x70x3	μήκος L=707mm
3	1	TMX	Δοκός 3	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 80x80x3	μήκος L=1740mm
2	4	TMX	Δοκός 2	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 70x70x3	μήκος L=836mm
1	3	TMX	Δοκός 1	Κοιλοδοκός κατά DIN EN 10210 90x90x4	μήκος L=1920mm
α/α	ποσότητα	μονάδα	Ονομασία τεμ	Αριθμός σχεδίου ή τυποποιημένη ονομασία	Παρατηρήσεις
1	2	3	4	5	6



www.m3.tuc.gr

Σχεδίαση:  
**Κατερίνα Φωτοδημητράκη**

Τίτλος:  
**Κατασκευή 3**

Ανοχές:  
Γενικές ανοχές f - ISO2768-1

Αριθμός:  
**02:004**

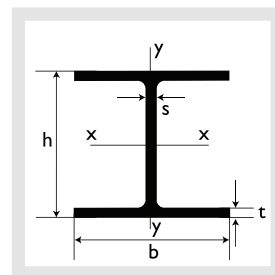
Κλίμ.  
1:30

Ημερομηνία  
16/9/2019

Γλώσσα  
ΕΛ

Φύλλο  
1/1

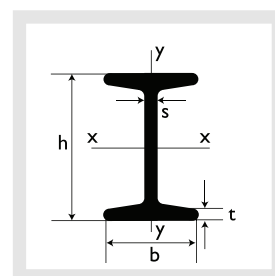
## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΤΥΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΙ ΔΟΚΟΙ**



## ΔΟΚΟΙ ΠΛΑΤΥΠΕΛΜΟΙ ΗΕΑ

Ποιότητα S275JR & S355JR σύμφωνα με EN 10025 & 10034  
ή ST 44-2 & ST 52-3 σύμφωνα με DIN 17100/1025-3

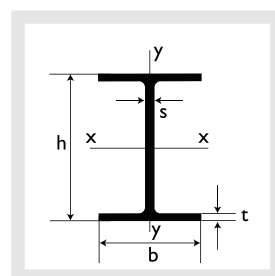
ΗΕΑ	ΒΑΡΟΣ G (kg/m)	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (mm)				ΔΙΑΤΟΜΗ A (cm <sup>2</sup> )	ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΣ (cm <sup>3</sup> )	
		h	b	s	t		W <sub>x</sub>	W <sub>y</sub>
100	16,7	96	100	5,0	8,0	21,2	72,8	26,8
120	19,9	114	120	5,0	8,0	25,3	106,0	38,5
140	24,7	133	140	5,5	8,5	31,4	155,0	55,6
160	30,4	152	160	6,0	9,0	38,8	220,0	76,9
180	35,5	171	180	6,0	9,5	45,3	294,0	103,9
200	42,3	190	200	6,5	10,0	53,8	389,0	134,0
220	50,5	210	220	7,0	11,0	64,3	515,0	178,0
240	60,3	230	240	7,5	12,0	76,8	675,0	231,0
260	68,2	250	260	7,5	12,5	86,8	836,0	282,0
280	76,4	270	280	8,0	13,0	97,3	1010,0	340,0
300	88,3	290	300	8,5	14,0	112,0	1260,0	421,0
320	97,6	310	300	9,0	15,5	124,0	1480,0	466,0
340	105,0	330	300	9,5	16,5	133,0	1680,0	496,0
360	112,0	350	300	10,0	17,5	143,0	1890,0	526,0
400	125,0	390	300	11,0	19,0	159,0	2310,0	571,0
450	140,0	440	300	11,5	21,0	178,0	2900,0	631,0
500	155,0	490	300	12,0	23,0	198,0	3550,0	691,0
550	166,0	540	300	12,5	24,0	212,0	4150,0	721,0
600	178,0	590	300	13,0	25,0	226,0	4790,0	751,0
650	190,0	640	300	13,5	26,0	242,0	5470,0	782,0
700	204,0	690	300	14,5	27,0	260,0	6240,0	812,0
800	224,0	790	300	15,0	28,0	286,0	7680,0	843,0
900	252,0	890	300	16,0	30,0	320,0	9480,0	903,0
1000	272,0	990	300	16,5	31,0	347,0	11190,0	934,0



## ΔΟΚΟΙ INP

Ποιότητα S275JR σύμφωνα με EN 10025 & 10024  
ή ST 44-2 σύμφωνα με DIN 17100/1025-I

INP	ΒΑΡΟΣ G (kg/m)	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (mm)				ΔΙΑΤΟΜΗ A (cm <sup>2</sup> )	ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΣ (cm <sup>3</sup> )	
		h	b	s	t		W <sub>x</sub>	W <sub>y</sub>
80	5,94	80	42	3,9	5,9	7,57	19,5	3,00
100	8,34	100	50	4,5	6,8	10,60	34,2	4,88
120	11,10	120	58	5,1	7,7	14,20	54,7	7,41
140	14,30	140	66	5,7	8,6	18,20	81,9	10,70
160	17,90	160	74	6,3	9,5	22,80	117,0	14,80
180	21,90	180	82	6,9	10,4	27,90	161,0	19,80
200	26,20	200	90	7,5	11,3	33,40	214,0	26,00
220	31,10	220	98	8,1	12,2	39,50	278,0	33,10
240	36,20	240	106	8,7	13,1	46,10	354,0	41,70
260	41,90	260	113	9,4	14,1	53,30	442,0	51,00
280	47,90	280	119	10,1	15,2	61,00	542,0	61,20
300	54,20	300	125	10,8	16,2	69,00	653,0	72,20
320	61,00	320	131	11,5	17,3	77,70	782,0	84,70
340	68,00	340	137	12,2	18,3	86,70	923,0	98,40
360	76,10	360	143	13,0	19,5	97,00	1090,0	114,00
400	92,40	400	155	14,4	21,6	118,00	1460,0	149,00
450	115,00	450	170	16,2	24,3	147,00	2040,0	203,00
500	141,00	500	185	18,0	27,0	179,00	2750,0	268,00



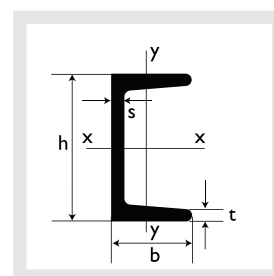
## ΔΟΚΟΙ IPE

Ποιότητα S275JR & S355JR σύμφωνα με EN 10025 & 10024  
ή ST 44-2 & ST 52-3 σύμφωνα με DIN 17100/1025-5

IPE	ΒΑΡΟΣ G (kg/m)	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (mm)				ΔΙΑΤΟΜΗ A (cm <sup>2</sup> )	ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΣ (cm <sup>3</sup> )	
		h	b	s	t		W <sub>x</sub>	W <sub>y</sub>
80	6,00	80	46	3,8	5,2	7,64	20,0	3,69
100	8,10	100	55	4,1	5,7	10,30	34,2	5,79
120	10,40	120	64	4,4	6,3	13,20	53,0	8,65
140	12,90	140	73	4,7	6,9	16,40	77,3	12,30
160	15,80	160	82	5,0	7,4	20,10	109,0	16,70
180	18,80	180	91	5,3	8,0	23,90	146,0	22,20
200	22,40	200	100	5,6	8,5	28,50	194,0	28,50
220	26,20	220	110	5,9	9,2	33,40	252,0	37,30
240	30,70	240	120	6,2	9,8	39,10	324,0	47,30
270	36,10	270	135	6,6	10,2	45,90	429,0	62,20
300	42,20	300	150	7,1	10,7	53,80	557,0	80,50
330	49,10	330	160	7,5	11,5	62,60	713,0	98,50
360	57,10	360	170	8,0	12,7	72,70	904,0	123,00
400	66,33	400	180	8,6	13,5	84,50	1160,0	146,00
450	77,60	450	190	9,4	14,6	98,90	1500,0	176,00
500	90,70	500	200	10,2	16,2	116,00	1930,0	214,00
550	106,00	550	210	11,1	17,2	134,00	2440,0	254,00
600	122,00	600	220	12,0	19,0	156,00	3070,0	308,00

**Δοκοί ειδικών τύπων, διαστάσεων και ποιοτήτων κατόπιν παραγγελίας**





## ΔΟΚΟΙ UNP

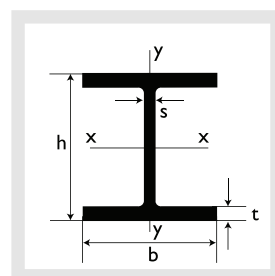
Ποιότητα S235JR & S275JR σύμφωνα με EN 10025 & 10279  
ή ST 37-2 σύμφωνα με DIN 17100/1026

UNP	ΒΑΡΟΣ G (kg/m)	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (mm)				ΔΙΑΤΟΜΗ A (cm <sup>2</sup> )	ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΣ (cm <sup>3</sup> )	
		h	b	s	t		W <sub>x</sub>	W <sub>y</sub>
30x15	1,74	30	15	4,0	4,5	2,21	1,69	0,39
40x20	2,87	40	20	5,0	5,5	3,66	3,79	0,86
35	4,87	40	35	5,0	7,0	6,21	7,05	3,08
50x25	3,86	50	25	5,0	6,0	4,92	6,73	1,48
38	5,59	50	38	5,0	7,0	7,12	10,60	3,75
60x30	5,07	60	30	6,0	6,0	6,46	10,50	2,16
65x42	7,09	65	42	5,5	7,5	9,03	17,70	5,07

Ποιότητα S275JR σύμφωνα με EN 10025 & 10279 ή ST 44-2 σύμφωνα με DIN 17100/1026

80	8,64	80	45	6,0	8,0	11,00	26,50	6,36
100	10,60	100	50	6,0	8,5	13,50	41,20	8,49
120	13,40	120	55	7,0	9,0	17,00	60,70	11,10
140	16,00	140	60	7,0	10,0	20,40	86,40	14,80
160	18,80	160	65	7,5	10,5	24,00	116,00	18,30
180	22,00	180	70	8,0	11,0	28,00	150,00	22,40
200	25,30	200	75	8,5	11,5	32,30	191,00	27,00
220	29,40	220	80	9,0	12,5	37,40	245,00	33,60
240	33,20	240	85	9,5	13,0	42,30	300,00	39,60
260	37,90	260	90	10,0	14,0	48,30	371,00	47,70
280	41,80	280	95	10,0	15,0	53,30	448,00	52,20
300	46,20	300	100	10,0	16,0	58,80	535,00	67,80
320	59,50	320	100	14,0	17,5	75,80	679,00	80,60
350	60,60	350	100	14,0	16,0	77,30	734,00	75,00
400	71,80	400	110	14,0	18,0	91,50	1020,00	102,00

Όλοι οι Δοκοί διατίθενται και σε ειδικές ποιότητες κατόπιν παραγγελίας.  
Υπάρχει δυνατότητα γαλβανίσματος εν θερμώ.



## ΔΟΚΟΙ ΠΛΑΤΥΠΕΛΜΟΙ HEB

Ποιότητα S275JR & S355JR σύμφωνα με EN 10025 & 10034  
ή ST 44-2 & ST 52-3 σύμφωνα με DIN 17100/1025-2

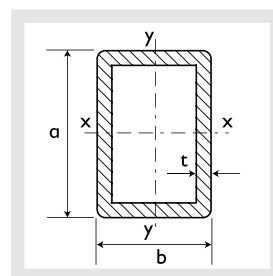
HEB	ΒΑΡΟΣ G (kg/m)	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (mm)				ΔΙΑΤΟΜΗ A (cm <sup>2</sup> )	ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΣ (cm <sup>3</sup> )	
		h	b	s	t		W <sub>x</sub>	W <sub>y</sub>
100	20,4	100	100	6,0	10,0	26,0	89,9	33,5
120	26,7	120	120	6,5	11,0	34,0	144,0	52,9
140	33,7	140	140	7,0	12,0	43,0	216,0	78,5
160	42,6	160	160	8,0	13,0	54,3	311,0	111,0
180	51,2	180	180	8,5	14,0	65,3	426,0	151,0
200	61,3	200	200	9,0	15,0	78,1	570,0	200,0
220	71,5	220	220	9,5	16,0	91,0	736,0	258,0
240	83,2	240	240	10,0	17,0	106,0	938,0	327,0
260	93,0	260	260	10,0	17,5	118,0	1150,0	395,0
280	103,0	280	280	10,5	18,0	131,0	1380,0	471,0
300	117,0	300	300	11,0	19,0	149,0	1680,0	616,0
320	127,0	320	300	11,5	20,5	161,0	1930,0	616,0
340	134,0	340	300	12,0	21,5	171,0	2160,0	646,0
360	142,0	360	300	12,5	22,5	181,0	2400,0	676,0
400	155,0	400	300	13,5	24,0	198,0	2880,0	721,0
450	171,0	450	300	14,0	26,0	218,0	3550,0	781,0
500	187,0	500	300	14,5	28,0	239,0	4290,0	842,0
550	199,0	550	300	15,0	29,0	254,0	4970,0	872,0
600	212,0	600	300	15,5	30,0	270,0	5700,0	902,0
650	225,1	650	300	16,0	31,0	286,0	6480,0	932,0
700	241,0	700	300	17,0	32,0	306,0	7340,0	963,0
800	262,0	800	300	17,5	33,0	334,0	8980,0	994,0
900	291,0	900	300	18,5	35,0	371,0	10980,0	1050,0
1000	314,0	1000	300	19,0	36,0	400,0	12890,0	1090,0

Διαθέσιμοι και δοκοί πλατύπελμοι HEM κατόπιν παραγγελίας



## ΚΟΙΛΟΙ ΔΟΚΟΙ ΜΑΥΡΟΙ ΚΑΙ ΓΑΛΒΑΝΙΣΜΕΝΟΙ ΟΡΘΟΓΩΝΙΟΙ

ΔΙΑΤΟΜΗ a x b (mm)	ΠΑΧΟΣ t (mm)	ΒΑΡΟΣ G (kg/m)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ A (cm <sup>2</sup> )	ΡΟΠΗ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ J <sub>x</sub> (cm <sup>4</sup> ) J <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )		ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΣ W <sub>x</sub> (cm <sup>3</sup> ) W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )		ΑΚΤΙΝΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ i <sub>x</sub> (cm) i <sub>y</sub> (cm)	
40x20	2	1,85	2,36	4,45	1,44	2,22	1,44	1,37	0,78
	2,5	2,30	2,93	5,31	1,68	2,65	1,68	1,35	0,76
	3	2,73	3,48	6,08	1,89	3,04	1,89	1,32	0,74
50x30	2	2,46	3,14	10,16	4,51	4,06	3,01	1,80	1,20
	2,5	3,06	3,90	12,27	5,39	4,91	3,59	1,77	1,18
	3	3,65	4,65	14,21	6,18	5,69	4,12	1,75	1,15
60x30	2	2,76	3,52	15,95	5,30	5,32	3,53	2,13	1,23
	2,5	3,43	4,38	19,34	6,34	6,45	4,23	2,10	1,20
	3	4,10	5,22	22,51	7,28	7,50	4,85	2,08	1,18
60x40	2	3,08	3,92	19,32	10,23	6,44	5,11	2,22	1,62
	2,5	3,83	4,88	23,47	12,35	7,82	6,17	2,19	1,59
	3	4,57	5,82	27,39	14,31	9,13	7,16	2,17	1,57
	4	6,03	7,68	34,50	17,80	11,50	8,90	2,12	1,52
	5	6,90	8,80	40,20	20,50	13,40	10,20	2,13	1,52
70x30	2	3,08	3,92	23,46	6,08	6,70	4,06	2,45	1,25
	3	4,57	5,82	33,32	8,38	9,52	5,58	2,39	1,20
80x40	2	3,71	4,72	38,97	13,12	9,74	6,56	2,87	1,67
	2,5	4,61	5,88	47,62	15,87	11,90	7,93	2,85	1,64
	3	5,51	7,02	55,85	18,43	13,96	9,21	2,82	1,62
	4	7,28	9,28	71,13	23,01	17,78	11,50	2,77	1,57
	5	8,30	10,57	78,48	25,33	19,60	12,66	2,72	1,54
100x40	2	4,20	5,30	66,70	15,70	13,30	7,90	3,53	1,72
	3	6,45	8,22	98,00	22,55	19,60	11,27	3,45	1,66
	4	8,51	10,84	125,68	28,21	25,14	14,11	3,41	1,61
	5	9,86	12,57	141,10	31,50	28,20	15,75	3,35	1,58
100x50	2	4,50	5,70	76,10	25,80	15,20	10,30	3,64	2,12
	2,5	5,60	7,10	93,40	31,50	18,70	12,60	3,62	2,10
	3	6,92	8,82	112,12	37,44	22,42	14,98	3,57	2,06
	4	9,17	11,68	144,13	47,37	28,83	18,95	3,51	2,01
100x60	5	10,65	13,57	163,61	53,64	32,72	21,46	3,47	1,99
	3	7,39	9,42	126,24	56,65	25,25	18,88	3,66	2,45
	4	9,80	12,48	162,57	72,20	32,51	24,07	3,61	2,41
	5	11,44	14,57	185,42	82,42	37,08	27,47	3,57	2,38
	3	8,29	10,56	197,31	66,41	32,88	22,14	4,32	2,51
120x60	4	10,99	14,00	255,20	84,77	42,53	28,26	4,27	2,46
	5	12,84	16,36	286,64	95,80	47,77	31,93	4,19	2,42
	6	15,10	19,23	327,27	108,37	54,55	36,12	4,13	2,38
	3	9,26	11,79	238,38	127,04	39,73	31,76	4,50	3,28
	4	12,28	15,64	309,04	163,64	51,51	40,91	4,45	3,23
120x80	5	14,42	18,36	352,82	187,53	58,80	46,88	4,38	3,20
	6	16,98	21,36	405,32	214,50	67,55	53,63	4,33	3,15



ΔΙΑΤΟΜΗ $a \times b$ (mm)	ΠΑΧΟΣ $t$ (mm)	ΒΑΡΟΣ $G$ (kg/m)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ $A$ (cm <sup>2</sup> )	ΡΟΠΗ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ $I_x$ (cm <sup>4</sup> )	$I_y$ (cm <sup>4</sup> )	ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΣ $W_x$ (cm <sup>3</sup> )	$W_y$ (cm <sup>3</sup> )	ΑΚΤΙΝΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ $i_x$ (cm)	$i_y$ (cm)
<b>140x60</b>	<b>3</b>	9,00	11,40	283,90	74,80	40,60	24,90	4,99	2,56
	<b>4</b>	11,80	15,10	368,60	95,70	52,70	31,90	4,95	2,52
	<b>5</b>	14,60	18,60	448,70	114,70	64,10	38,20	4,91	2,48
	<b>6</b>	17,40	22,10	524,20	132,00	74,90	44,00	4,87	2,44
<b>150x100</b>	<b>3</b>	11,30	14,40	464,60	248,60	62,00	49,70	5,69	4,16
	<b>4</b>	14,98	19,08	601,56	321,55	80,21	64,31	5,62	4,11
	<b>5</b>	18,34	23,36	718,83	383,72	95,84	76,74	5,55	4,05
	<b>6</b>	21,69	27,63	833,82	443,55	111,18	88,71	5,49	4,01
	<b>8</b>	28,80	36,70	1109,70	579,00	148,00	115,80	5,50	3,97
<b>160x80</b>	<b>3</b>	10,80	13,80	469,50	159,70	58,70	39,90	5,84	3,41
	<b>4</b>	14,30	18,20	612,20	206,20	76,50	51,60	5,80	3,37
	<b>5</b>	17,70	22,60	748,40	249,70	93,50	62,40	5,76	3,33
	<b>6</b>	21,10	26,80	878,20	290,10	109,80	72,50	5,72	3,29
<b>180x60</b>	<b>3</b>	10,80	13,80	535,20	94,00	59,50	31,30	6,24	2,61
	<b>4</b>	14,30	18,20	698,00	120,40	77,60	40,10	6,19	2,57
	<b>5</b>	17,70	22,60	853,50	144,60	94,80	48,20	6,15	2,53
	<b>6</b>	21,10	26,80	1001,70	166,60	111,30	55,50	6,11	2,49
<b>200x100</b>	<b>4</b>	18,00	22,90	1217,20	413,20	121,70	82,60	7,29	4,25
	<b>5</b>	22,26	28,36	1458,86	496,69	145,89	99,33	7,17	4,19
	<b>6</b>	26,40	33,63	1702,32	576,27	170,23	115,25	7,12	4,14
	<b>8</b>	34,38	43,79	2139,78	716,81	213,98	143,36	6,99	4,05
	<b>10</b>	43,10	55,00	2733,10	885,40	273,30	177,10	7,05	4,01
<b>250x150</b>	<b>6</b>	35,82	45,63	3884,52	1767,48	319,76	235,66	9,23	6,23
	<b>8</b>	46,94	59,79	4963,19	2246,22	397,06	299,50	9,11	6,13
<b>300x200</b>	<b>6</b>	45,24	57,63	7369,24	3961,20	491,28	396,12	11,31	8,29
	<b>8</b>	59,50	75,79	9501,57	5090,61	633,44	509,06	11,20	8,20
	<b>10</b>	73,90	94,20	11857,20	6281,50	790,50	628,20	11,22	8,17
<b>400x200</b>	<b>8</b>	73,10	93,10	19710,00	6695,00	985,00	669,00	14,60	8,48
	<b>10</b>	90,70	116,00	24140,00	8128,00	1207,00	813,00	14,50	8,39

## ΑΝΟΧΕΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ DIN 59411/78 / EN 10219-2

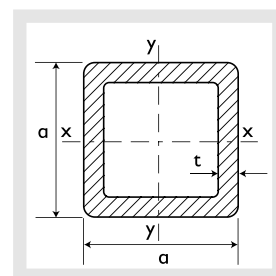
- ΠΑΧΟΣ:  $\pm 10\%$  εκτός ζώνης συγκολλήσεως
- ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ:  $\pm 1\%$  των εξωτερικών διαστάσεων
- ΕΞΩΤ.ΑΚΤΙΝΕΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΟΣ: Max. 3 φορές το πάχος του ελάσματος
- ΜΗΚΟΣ: 0 έως +50mm

ΤΑ ΣΤΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΣΤΙΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ.  
ΟΙ ΚΟΙΛΟΙ ΔΟΚΟΙ ΔΙΑΤΙΘΕΝΤΑΙ ΣΕ ΜΗΚΗ ΤΩΝ 6,0m και 12,00m.  
ΥΠΑΡΧΕΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕ ΆΛΛΑ ΕΠΙΘΥΜΗΤΑ ΜΗΚΗ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΕΣ.



## ΚΟΙΛΟΙ ΔΟΚΟΙ ΜΑΥΡΟΙ ΚΑΙ ΓΑΛΒΑΝΙΣΜΕΝΟΙ ΤΕΤΡΑΓΩΝΟΙ

ΔΙΑΤΟΜΗ a x a (mm)	ΠΑΧΟΣ t (mm)	ΒΑΡΟΣ G (kg/m)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ A (cm <sup>2</sup> )	ΡΟΠΗ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ J (cm <sup>4</sup> )	ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΣ W (cm <sup>3</sup> )	ΑΚΤΙΝΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ i (cm)
25x25	2	1,54	1,96	1,63	1,31	0,91
	2,5	1,90	2,43	1,92	1,54	0,89
30x30	2	1,85	2,36	2,94	1,96	1,12
	2,5	2,30	2,93	3,49	2,33	1,09
40x40	3	2,73	3,48	3,99	2,66	1,07
	2	2,46	3,14	7,34	3,67	1,53
	2,5	3,06	3,90	8,83	4,41	1,50
50x50	3	3,65	4,65	10,20	5,10	1,48
	4	4,80	6,12	12,60	6,30	1,43
	2	3,08	3,92	14,77	5,91	1,94
	2,5	3,83	4,88	17,91	7,16	1,92
60x60	3	4,57	5,82	20,85	8,34	1,89
	4	6,03	7,68	26,15	10,46	1,85
	5	6,73	8,57	28,26	11,30	1,82
	2	3,71	4,72	26,05	8,68	2,35
	2,5	4,61	5,88	31,74	10,58	2,32
70x70	3	5,51	7,02	37,14	12,38	2,30
	4	7,28	9,28	47,07	15,69	2,25
	5	8,30	10,57	52,33	17,44	2,23
	3	6,45	8,22	60,27	17,22	2,71
	4	8,51	10,84	76,95	21,98	2,66
80x80	5	9,87	12,57	87,21	24,92	2,64
	2	4,80	6,10	62,00	16,00	3,19
	3	7,39	9,42	91,45	22,86	3,12
	4	9,80	12,48	117,38	29,35	3,07
	5	11,44	14,57	134,88	33,72	3,04
90x90	6	13,21	16,83	148,64	37,16	2,97
	3	8,29	10,56	131,86	29,30	3,53
	4	10,99	14,00	169,98	37,77	3,48
	5	12,84	16,36	192,66	42,81	3,43
	6	15,10	19,23	219,89	48,86	3,38
100x100	2	6,00	7,70	123,00	25,00	4,00
	3	9,26	11,79	182,71	36,54	3,94
	4	12,28	15,64	236,34	47,27	3,89
	5	14,42	18,36	270,81	54,16	3,84
	6	16,98	21,63	310,83	62,17	3,79
	8	21,57	27,47	361,85	72,37	3,64



ΔΙΑΤΟΜΗ $a \times a$ (mm)	ΠΑΧΟΣ $t$ (mm)	ΒΑΡΟΣ $G$ (kg/m)	ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ $A$ (cm <sup>2</sup> )	ΡΟΠΗ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ $J$ (cm <sup>4</sup> )	ΡΟΠΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΣ $W$ (cm <sup>3</sup> )	ΑΚΤΙΝΑ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ $i$ (cm)
<b>120x120</b>	<b>3</b>	10,91	13,89	314,79	52,47	4,76
	<b>4</b>	14,35	18,28	406,66	67,78	4,72
	<b>5</b>	17,55	22,36	485,15	80,86	4,66
	<b>6</b>	20,75	26,43	561,42	93,57	4,61
	<b>8</b>	27,60	35,20	741,00	124,00	4,59
<b>140x140</b>	<b>4</b>	16,86	21,48	657,65	93,95	5,53
	<b>5</b>	20,69	23,36	790,20	112,89	5,48
	<b>6</b>	24,52	31,23	919,60	131,37	5,43
	<b>8</b>	32,50	41,40	1211,00	173,00	5,40
<b>150x150</b>	<b>4</b>	18,12	23,08	814,78	108,64	5,94
	<b>5</b>	22,26	28,36	981,74	130,90	5,88
	<b>6</b>	26,40	33,63	1141,78	152,24	5,83
	<b>8</b>	33,82	43,08	1372,60	183,01	5,67
<b>180x180</b>	<b>6</b>	32,05	40,83	2031,59	225,73	7,05
	<b>8</b>	41,91	53,39	2585,23	287,25	6,96
	<b>10</b>	52,40	66,70	3232,00	359,00	6,86
<b>200x200</b>	<b>6</b>	35,82	45,63	2827,30	282,73	7,87
	<b>8</b>	46,94	59,79	3615,19	361,52	7,78
	<b>10</b>	59,30	75,50	4525,00	452,00	7,74
<b>250x250</b>	<b>6</b>	45,24	57,63	5665,31	453,22	9,91
	<b>8</b>	59,50	75,79	7306,60	584,53	9,82
	<b>10</b>	75,00	95,50	9141,00	731,00	9,78
<b>300x300</b>	<b>8</b>	71,90	91,60	13044,00	870,00	11,93
	<b>10</b>	90,70	116,00	16150,00	1077,00	11,88
<b>350x350</b>	<b>8</b>	85,40	109,00	21130,00	1210,00	13,90
	<b>10</b>	106,00	136,00	26050,00	1489,00	13,90
<b>400x400</b>	<b>8</b>	97,90	125,00	31860,00	1590,00	16,00
	<b>10</b>	122,00	156,00	39350,00	1968,00	15,90
	<b>12,5</b>	151,00	192,00	47840,00	2390,00	15,80

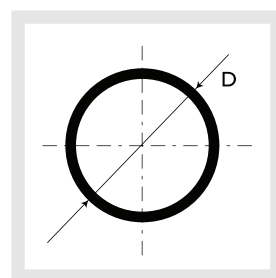
### ΑΝΟΧΕΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ DIN 59411/78 / EN 10219-2

- ΠΑΧΟΣ:  $\pm 10\%$  εκτός ζώνης συγκολλήσεως
- ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ:  $\pm 1\%$  των εξωτερικών διαστάσεων
- ΕΞΩΤ. ΑΚΤΙΝΕΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΟΣ: Max. 3 φορές το πάχος του ελάσματος
- ΜΗΚΟΣ: 0 έως +50mm

ΤΑ ΣΤΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΣΤΙΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ.  
ΟΙ ΚΟΙΛΟΙ ΔΟΚΟΙ ΔΙΑΤΙΘΕΝΤΑΙ ΣΕ ΜΗΚΗ ΤΩΝ 6,0m και 12,00m.

ΥΠΑΡΧΕΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΔΙΑΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΣΕ ΆΛΛΑ ΕΠΙΘΥΜΗΤΑ ΜΗΚΗ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΟΙΟΤΗΤΕΣ.





## ΣΩΛΗΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ST 37-2 (ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΟΙ ΑΠΟ ΕΛΑΣΜΑ ΘΕΡΜΗΣ ΕΛΑΣΗΣ)

ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (D)		ΠΑΧΟΣ (mm)					
(in)	(mm)	1,50	1,80	2,00	2,50	3,00	4,00
1/2"	21,25	0,76	0,90				
3/4"	26,75	0,91	1,07				
1"	33,00	1,17	1,38	1,54			
1 1/4"	42,25	1,54	1,84	2,04			
1 1/2"	48,25	1,77	2,09	2,32	2,88	3,44	
2"	60,00	2,21	2,63	2,92	3,63	4,33	
2 1/2"	76,00			3,71	4,61	5,51	
3"	89,00					6,45	8,54
3 1/2"	102,00					7,39	9,80
4"	114,00					8,29	10,99
4 1/2"	127,00					9,26	12,28

## ΣΩΛΗΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΓΑΛΒΑΝΙΣΜΕΝΟΙ (ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΟΙ ΑΠΟ ΕΛΑΣΜΑ ΓΑΛΒΑΝΙΣΜΕΝΟ)

ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (D)		ΠΑΧΟΣ (mm)	
(in)	(mm)	1,50	1,80
1/2"	21,25	0,76	0,90
3/4"	26,75	0,91	1,07
1"	33,00	1,17	1,38
1 1/4"	42,25	1,54	1,84
1 1/2"	48,25	1,77	2,09
2"	60,00	2,21	2,63

## ΣΩΛΗΝΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ (D)		ΠΑΧΟΣ (mm)			
(in)	(mm)	3,0	4,0	5,0	6,0
6 1/4"	168,3	12,20	16,20		
7"	193,7	14,10	18,70		
8 1/2"	219,1	15,95	21,20	26,40	
9 1/4"	244,5	17,85	23,70	29,50	
10 1/4"	273,0		26,50	33,00	39,45
12 1/4"	323,9		31,50	39,30	47,00

## ΑΝΟΧΕΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ DIN 59411/78 / EN 10219-2

- ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ:  $\pm 1\%$  των εξωτερικών διαστάσεων
- ΠΑΧΟΣ:  $\pm 10\%$  εκτός ζώνης συγκολλήσεως
- ΕΥΘΥΓΙΑ: Max. 0,2% του συνολικού μήκους
- ΜΗΚΟΣ: 0 έως +50mm

ΥΠΑΡΧΕΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΓΑΛΒΑΝΙΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ