



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**ΣΤΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΠΛΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

Φοιτητής:

ΜΑΝΩΛΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

A.M. 2012010034

Επιβλέπων καθηγητής:

ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΧΑΝΙΑ 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της απόκτησης του διπλώματος μηχανικού παραγωγής και διοίκησης. Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους για την υποστήριξη, την καθοδήγηση και την αφοσίωση που υπέδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια της.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη, καθηγητή της σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείου Κρήτης, για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω τη διπλωματική εργασία του ενδιαφέροντος μου, καθώς και για την εποπτεία της πορείας της εργασίας όλο αυτό το διάστημα.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη που μου παρείχε καθημερινά, αλλά και όλους τους ανθρώπους που συνέβαλαν με τις υποδείξεις τους στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κουτσιανίτη Παναγιώτη για την συνεργασία του καθώς και την εταιρία FlorosGroup για το δείγμα και τις αναλυτικές πληροφορίες τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μελέτη ενός διπλού βραχίονα συστήματος σκίασης (τέντας) που διατίθενται τυποποιημένος εδώ και αρκετά χρόνια στην αγορά. Ο βραχίονας θα σχεδιαστεί σε περιβάλλον προγράμματος τρισδιάστατης σχεδίασης και θα μελετηθεί στατικά χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε πρόγραμμα ανάλυσης δεδομένων.

Για την στατική ανάλυση, θα προστεθούν στην κατασκευή το βάρος του υφάσματος της τέντας και των εξαρτημάτων της, οι δυνάμεις που επιδρούν σε διάφορες θέσεις στήριξης, ενώ παράλληλα θα συνυπολογιστούν φορτίσεις ανέμου και χιονιού για επιλεγμένες κλιματολογικές συνθήκες.

Σκοπός της εργασίας είναι, υπολογίζοντας τις τάσεις, να επαληθευτεί η αντοχή του στηρίγματος και κατ' επέκταση να προταθούν βελτιώσεις σύμφωνα με το υπάρχον υλικό.

ABSTRACT

This thesis deals with the study of a double-sided shading system (tent) that has been available on the market for several years. The arm will be designed in a three-dimensional design environment and will be studied statistically using the finite element method in a data analysis program.

For static analysis, the weight of the fabric of the awning and its components will be added to the construction, the forces acting in various support positions, while simultaneously wind and snow loads will be included for selected climatic conditions.

The purpose of the dissertation is, calculating the trends of each occasion to verify the strength of the bracket and by extension to suggest improvements according to existing material.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 8 |
| 1.1 | Συστήματα σκίασης..... | 8 |
| 1.1.1 | Γενικά περί συστημάτων σκίασης | 8 |
| 1.1.2 | Συστήματα σκίασης με βραχίονες | 9 |
| 1.2 | Σκοπός της εργασίας & αντικείμενο | 11 |
| 1.3 | Δομή της εργασίας & περιεχόμενα | 12 |
| 2 | Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ | 14 |
| 2.1 | Βασικές αρχές της μεθόδου..... | 14 |
| 2.2 | Ιστορική αναδρομή | 15 |
| 2.3 | Λόγοι ανάπτυξης της μεθόδου | 16 |
| 2.4 | Βασικά στάδια..... | 17 |
| 2.5 | Διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία | 20 |
| 2.6 | Μορφές στοιχείων..... | 21 |
| 2.6.1 | Μονοδιάστατα στοιχεία..... | 22 |
| 2.6.2 | Δισδιάστατα στοιχεία | 22 |
| 2.6.3 | Τρισδιάστατα στοιχεία | 24 |
| 2.6.4 | Προσανατολισμός πλέγματος..... | 24 |
| 2.7 | Σφάλματα | 25 |
| 3 | ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ | 27 |
| 3.1 | Επεξεργασία σε περιβάλλον CAD/CAE | 27 |
| 3.2 | Το μοντέλο της μελέτης | 27 |
| 3.3 | Εισαγωγή της γεωμετρίας | 28 |
| 3.4 | Εισαγωγή Υλικού..... | 29 |
| 3.5 | Εισαγωγή Διατομών Βραχιόνων | 30 |
| 3.6 | Ορισμός του Assembly και του Step..... | 32 |
| 3.7 | Εισαγωγή Συνοριακών συνθηκών..... | 32 |
| 3.8 | Υπολογισμός και Εισαγωγή φορτίων..... | 34 |
| 3.8.1 | Περιπτώσεις φόρτισης & Υπολογισμός δυνάμεων | 34 |
| 3.8.2 | Υπολογισμός δύναμης λόγω του βάρους της τέντας & των βραχιόνων ... | 35 |
| 3.8.3 | Φορτίο λόγω Χιονιού | 36 |
| 3.8.4 | Φορτίο λόγω Ανέμου..... | 37 |

| | |
|--|----|
| 3.9 Διακριτοποίηση με Πεπερασμένα Στοιχεία | 44 |
| 3.10 Δημιουργία Ανάλυσης (Job) | 45 |
| 4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 47 |
| 4.1 Αποτελέσματα | 47 |
| 4.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων | 60 |
| 4.3 Προτάσεις | 63 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 64 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|---|----|
| Πίνακας 3.1: Κατηγορίες Εδάφους..... | 39 |
| Πίνακας 3.2: Συντελεστής φορτίων ανέμου | 41 |
| Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα Αναλύσεων | 62 |

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Συστήματα σκίασης

1.1.1 Γενικά περί συστημάτων σκίασης

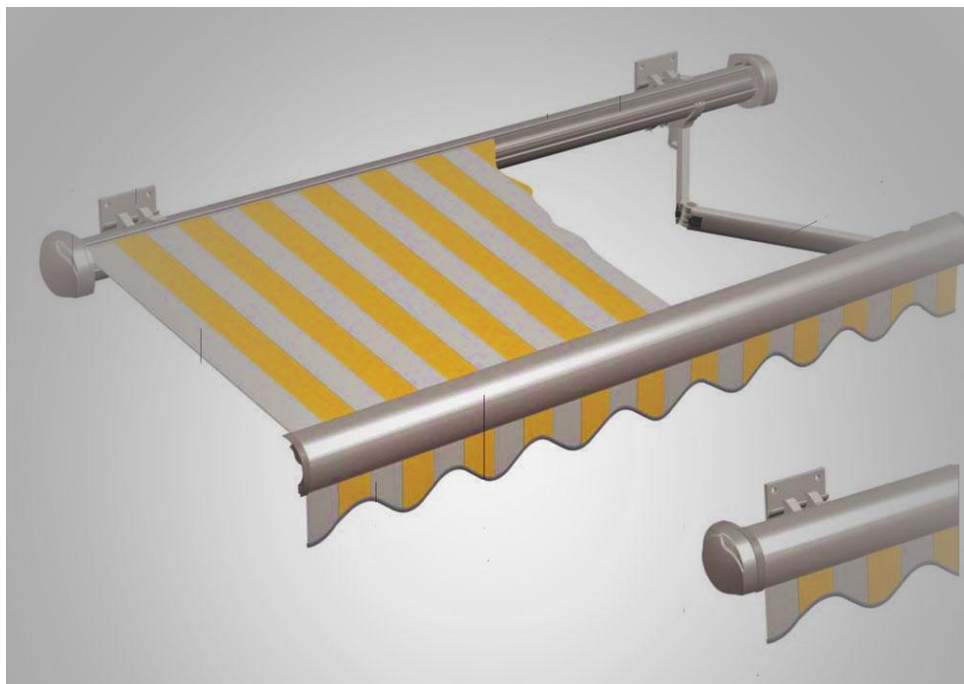
Η σκίαση αποτελεί στις μέρες μας ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα παθητικής εξοικονόμησης ενέργειας και ένας εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας στη σύγχρονη αρχιτεκτονική. Παράλληλα, τα συστήματα σκίασης έχουν ξεπεράσει προ πολλού σχεδιαστικά την εποχή της κλασσικής «τέντας», όντας πλέον σε θέση να προσδώσουν στο κτίριο όχι μόνο προστασία από τον ήλιο και μόνωση, αλλά και πολύ καλύτερη εμφάνιση.

Οι σύγχρονες τέντες συνιστούν το δημοφιλέστερο σύστημα σκίασης εξωτερικού χώρου. Χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος τοποθέτησης και ευκολία στο χειρισμό, ειδικά μετά την είσοδο ηλεκτρικών συστημάτων ανύψωσης και την προσθήκη προηγμένης τεχνολογίας, όπως αισθητήρων ανέμου, που ενεργοποιούν το μάζεμα της τέντας όταν η ένταση του αέρα είναι υπερβολικά ισχυρή και απειλεί την ακεραιότητα της.

Οι τέντες ανέρχονται σε διάφορα σχήματα και μεγέθη, αλλά γενικά υπάγονται σε δύο κατηγορίες, τις στάσιμες και τις ανασυρόμενες. Μια ανασυρόμενη τέντα είναι ιδανική για μπαλκόνια, βεράντες και παράθυρα, εκεί που χρειάζεται να έχουμε τον έλεγχο στα καιρικά φαινόμενα. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να απολαύσουμε τον ήλιο ή την σκιά όταν το επιθυμούμε, ενώ να προφυλαχθούμε από την βροχή όταν το επιτάσσει. Οι στάσιμες τέντες είναι κατάλληλες για εισόδους κτηρίων ή επαγγελματικούς χώρους. Οι τέντες στηρίζονται σε εξωτερικούς τοίχους, στην οροφή (μαρκίζα) και με την βοήθεια βραχιόνων ή αντηρίδων ανέρχονται και κατέρχονται. Οι βραχίονες της στηρίζονται από ειδική βάση στο μηχανισμό που τοποθετείτε, όπως το απαιτούν οι συνθήκες.



Εικόνα 1.1: Σύστημα σκίασης με αντηρίδες (tenteschaniotis.gr)



Εικόνα 1.2: Σύστημα σκίασης με βραχίονες (tenteschaniotis.gr)

1.1.2 Συστήματα σκίασης με βραχίονες

Τα συστήματα εξωτερικής σκίασης, όπως οι τέντες με βραχίονες, θεωρούνται από τα πιο έξυπνα συστήματα στην αγορά και προσφέρουν αρκετές δυνατότητες. Οι τέντες με βραχίονες μπορούν να χαρακτηριστούν τέντες τελευταίας τεχνολογίας αν

και είναι στο χώρο πάρα πολλά χρόνια. Στηρίζονται αποκλειστικά πάνω στις μεγάλων αντοχών βάσεις και τοποθετούνται γρήγορα, εύκολα και ευέλικτα.

Διατίθενται με:

- αντίβαρο αλουμινίου
- χειροκίνητο ή ηλεκτρικό μηχανισμό (μοτέρ)
- βραχίονες βαρέως τύπου και
- άξονα Φ60 έως Φ70.

Χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντοχή στις δύσκολες καιρικές συνθήκες και ενδείκνυνται για μπαλκόνια, ανοιχτούς επαγγελματικούς χώρους και παραθαλάσσιες περιοχές. Η επιλογή τους, κατά βάση, γίνεται για λόγους πρακτικούς όπως την περίπτωση που δεν είναι δυνατή η υποστήριξη άλλου είδους συστήματος σκίασης (τέντες με αντηρίδες), παραδείγματος χάρη στρογγυλά μπαλκόνια, πολυμορφικοί χώροι, αλλά και για αισθητικούς λόγους. Αποτελεί το πιο ανθεκτικό και έξυπνο σύστημα τέντας, ιδανικό για τις ιδιαίτερα δύσκολες συνθήκες του Μεσογειακού κλίματος, όπου απαιτείται η μέγιστη αντοχή στον αέρα, τον ήλιο, την βροχή, ακόμη και το χιόνι.

Οι βραχίονες δίνουν την δυνατότητα να σταματήσουν στο σημείο που επιθυμεί ο χειριστής, με χειροκίνητη ή ηλεκτροκίνητη λειτουργία. Παρέχουν, επίσης, πολλαπλές γωνίες κλίσης προσφέροντας έτσι υψηλή αισθητική και διακριτικότητα. Σε συνδυασμό με τα νέα υφάσματα τέντας που διατίθενται με ευκολία στην εγκατάσταση και τη μεταφορά της, η τέντα με βραχίονες αποτελεί το πλέον διαχρονικά κομψό και λειτουργικό σύστημα σκίασης στην αγορά.



Εικόνα 1.3: Τμήματα συστήματος σκίασης με βραχίονες (tentoepiskevi.gr)

1.2 Σκοπός της εργασίας & αντικείμενο

Οι βραχίονες είναι το τμήμα της κατασκευής το οποίο χρησιμεύει στο άνοιγμα και στο κλείσιμο μιας τέντας. Το συγκεκριμένο μέρος δεν είναι σταθερό σε κάποια επιφάνεια, στερεώνονται συνήθως στον τοίχο αλλά και στο ταβάνι με ειδικές βάσεις αλουμινίου που μας επιτρέπουν τον έλεγχο της κλίσης τους.

Η προσπάθεια να σκιαστούν εξωτερικοί χώροι με μεγαλύτερη έκταση σε κέντρα αναψυχής, επαγγελματικούς ή οικιακούς χώρους, αποτέλεσε οδηγό στην δημιουργία συστημάτων σκίασης με διπλούς βραχίονες. Χρησιμοποιώντας τους διπλούς βραχίονες επιτυγχάνουμε προβολή έως 6,25m σε χώρους όπου δεν μπορούμε να έχουμε κάποια σταθερή βάση (κολώνες). Είναι υψίστης αντοχής και ποιότητας πράγμα που αποδεικνύει και την ανθεκτικότητά τους σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Το υλικό κατασκευής τους είναι το αλουμίνιο και φέρουν εσωτερικό συρματόσχοινο (ή αλυσίδα) στην άρθρωσή τους, το οποίο κατά τη σύμπτυξη δημιουργεί τάση στο προφίλ του βραχίονα. Βασικά χαρακτηριστικά:

- Μικρότερο μήκος: 5.00 m
- Μεγαλύτερο μήκος: 6.25 m
- Ελάχιστο μήκος άξονα: 5.65 m
- Προφίλ υπερβαρέος τύπου

Όπως αναφέραμε οι βραχίονες είναι πάρα πολλά χρόνια στο χώρο, με αποτέλεσμα οι κατασκευαστές να έχουν την εμπειρία να αναπτύξουν σημαντικά και να τελειοποιήσουν σχεδόν την αποτελεσματικότητά τους, την αισθητική τους, την μεγάλη διάρκεια ζωής τους και την σωστή λειτουργία τους.

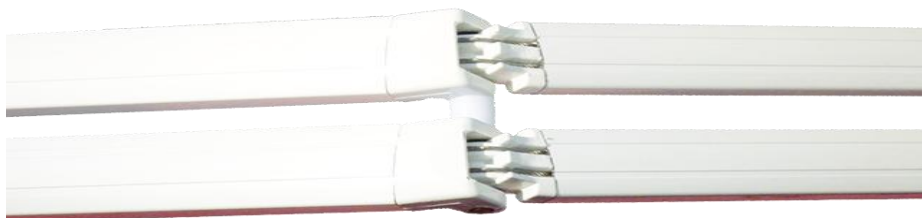
Με την παρούσα εργασία επιχειρείτε η μελέτη ενός διπλού βραχίονα τέντας, που διατίθενται τυποποιημένος στην αγορά, ως προς τις αντοχές του. Πρόκειται για ένα εξάρτημα στήριξης που παρέχει δυνατότητα επιλογής θέσης της τέντας.

Για την στατική μελέτη θα προστεθούν στην κατασκευή τα βάρη της τέντας και των εξαρτημάτων της, οι δυνάμεις που επιδρούν σε διάφορες θέσεις στήριξης, ενώ παράλληλα θα συνυπολογιστούν φορτίσεις ανέμου και χιονιού για επιλεγμένες κλιματολογικές συνθήκες. Έτσι, υπολογίζοντας τις τάσεις θα εξεταστεί η αντοχή του διπλού βραχίονα.

Τέλος, ως επέκταση της μελέτης αυτής θα προταθούν σχετικές βελτιώσεις σε σχέση με το υπάρχον προϊόν, με σκοπό την βελτίωση της αντοχής του και την αποφυγή κρίσιμων σημείων (εάν υπάρξουν).



Εικόνα 1.4: Περιπτώσεις συστημάτων σκίασης με Διπλούς Βραχίονες (lamda.com.gr)



Εικόνα 1.5: Εσωτερικό συρματόσχοινο στην άρθρωση Διπλού Βραχίονα (marlon.gr)

1.3 Δομή της εργασίας & περιεχόμενα

Η εργασία αναπτύσσεται στα παρακάτω κεφάλαια:

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται μία εισαγωγή της εργασίας, προσδιορίζεται ο σκοπός της, παρουσιάζεται το αντικείμενο αυτής και περιγράφεται η δομή της.

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μία εισαγωγή στην βασική θεωρία των Πεπερασμένων Στοιχείων και στην μεθοδολογία σύμφωνα με την οποία θα γίνει η μελέτη του αντικειμένου της εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 3** αναλύεται η προσομοίωση του αντικειμένου στατικά σύμφωνα με τη χρήση συγκεκριμένου λογισμικού, παρουσιάζονται τα τεχνικά

χαρακτηριστικά του καθώς και οι πιθανές φορτίσεις από το ίδιο το βάρος του αλλά και από τις επιλεγμένες κλιματολογικές συνθήκες.

Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης, γίνεται ο σχολιασμός αυτών και προτείνονται πιθανές προτάσεις βελτιστοποίησης του αντικειμένου.

Τέλος, η εργασία συμπληρώνεται με τις κύριες βιβλιογραφικές πηγές.

2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1 Βασικές αρχές της μεθόδου

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements method) είναι μια αριθμητική μέθοδος που εξυπηρετεί τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Το κεντρικό νόημα αυτής της μεθόδου είναι η δυνατότητα προσομοίωσης της πραγματικής κατασκευής με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Πρόκειται για μια εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων και αποτελεί έως σήμερα τη σημαντικότερη μέθοδο του τομέα της υπολογιστικής μηχανικής. Υπάρχουν διάφορα τεχνικά προβλήματα τα οποία περιγράφονται από εξισώσεις, για τις οποίες πολλές φορές δεν είναι εφικτό να βρεθούν λύσεις, εκτός περιπτώσεων όπου αφορούν προβλήματα με πολύ απλή μορφή. Η ανάγκη για επίλυση σύνθετων (τεχνικών) προβλημάτων, λοιπόν, οδήγησε στην ανάπτυξη προσεγγιστικών μεθόδων επίλυσης, όπως η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων. Μια προσεγγιστική μέθοδο η οποία δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα και χρησιμεύει για την επίλυση προβλημάτων σε πολλούς κλάδους, όπως της Μηχανικής, της Θερμότητας, της Ρευστομηχανικής, του Ηλεκτρομαγνητισμού και άλλων.

Η ανάπτυξη της μπορεί να θεωρηθεί ως συμβολή τριών βασικών επιστημονικών πεδίων, των ενεργειακών μεθόδων της μηχανικής (energy methods), της θεωρίας προσεγγίσεων των μαθηματικών (approximation theory), αλλά και των πληροφοριακών συστημάτων σχεδιασμού CAD (Computer Aided Design). Η αξία της μεθόδου βασίζεται στη δυνατότητα που έχει να παρουσιάζεται ως ένα ενιαίο εργαλείο για την στατική και δυναμική, γραμμική και μη-γραμμική, ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους, για τυχαία γεωμετρία, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες.

«Η σύνδεση μεταξύ των στοιχείων (elements) και των κόμβων (nodes), τα οποία αποτελούν το πλέγμα της γεωμετρίας μας, περιγράφονται από την παρακάτω σχέση:

$$[k]*\{u\}=\{f\}$$

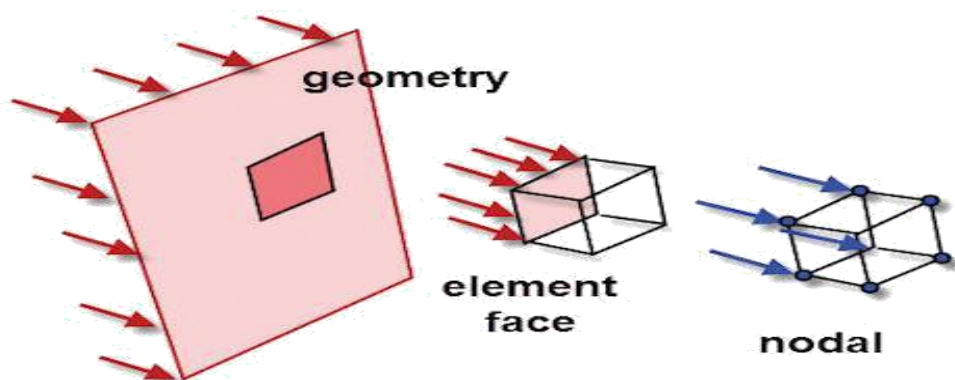
Όπου:

$[k]$: είναι το μητρώο της ακαμψίας του στοιχείου, και το οποίο διαμορφώνεται βάσει της γεωμετρίας, των ιδιοτήτων του υλικού και των ιδιοτήτων του στοιχείου.

$\{u\}$: είναι το διάνυσμα μετατόπισης, το οποίο περιγράφει πόσο μετατοπίστηκαν οι κόμβοι (nodes) από την αρχική τους θέση, λόγω των φορτίων που ασκούνται σε αυτούς.

$\{f\}$: είναι το φορτίο που δέχονται τα στοιχεία (elements).

Αυτές είναι οι τρεις συνθήκες που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία ενός συστήματος εξισώσεων που η μετατόπιση είναι ο άγνωστος. Επίσης, εφαρμόζονται οριακές συνθήκες (Boundary Conditions) για να αποτρέψουν την κίνηση στο άκαμπτο σώμα και για να βρεθούν οι μετατοπίσεις $\{u\}$ από τις γραμμικές εξισώσεις» (Κουφόπουλος, 2017, σ. 17).



Εικόνα 2.1: Γεωμετρικά στοιχεία (Κουφόπουλος, 2017)

2.2 Ιστορική αναδρομή

Το χαρακτηριστικό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων. Τα Πεπερασμένα Στοιχεία έχουν αφετηρία θεωρητικά στις αρχές του εικοστού αιώνα και είναι συνυφασμένα με τον μαθηματικό Γερμανικής καταγωγής W. Ritz το 1909 και τον Ρώσο μαθηματικό B. G. Galerkin το 1915. Η απουσία όμως του ηλεκτρονικού υπολογιστή καθυστέρησε την διάδοση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και την περαιτέρω ανάπτυξη της, η οποία άρχισε σε μεγαλύτερους ρυθμούς από το 1940 και έπειτα.

Η ιδέα της ανάπτυξης της μεθόδου γεννήθηκε στην αεροναυπηγική εξαιτίας της ανάγκης να βρεθούν λύσεις στα πολύπλοκα προβλήματα που αντιμετώπιζαν στην κατασκευή των αεροσκαφών.

Το 1940 ο Hrenikoff (1940) παρουσίασε την καλούμενη μέθοδο του πλαισίου (framework method) με την οποία ένα επίπεδο ελαστικό μέσο μπορούσε να αντικατασταθεί από ένα ισοδύναμο σύστημα ράβδων και δοκών. Ακολούθησε, το 1943 ο Courant όπου βρήκε λύση στο πρόβλημα της στρέψης χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία με την αρχή της ελαστικής δυναμικής ενέργειας και την ονόμασε Rayleigh-Ritz μέθοδο. Λόγω του ότι εκείνη την εποχή δεν υπήρχε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, η θεωρία του Courant δεν μπορούσε να βρει εφαρμογή και σύντομα ξεχάστηκε έως ότου ανακαλύφθηκε ο υπολογιστής, όπου οι επιστήμονες ξανά θεμελίωσαν την συγκεκριμένη μέθοδο.

Το 1954 ο Argyris και Kesley (Argyris, 1954, Argyris J. H. and Kesley, 1960) ανέπτυξαν μεθόδους μητρωϊκής δοκιμής ανάλυσης που ήταν βασισμένες σε ενεργειακές μεθόδους. Μετά από δύο χρόνια το μητρώο δυσκαμψίας της ράβδου υπολογίστηκε από τον Turner και τους συνεργάτες του (Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C. and Topp 1956).

Το όνομα « Πεπερασμένα Στοιχεία » χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1960 στην εργασία του Clough, καθηγητή του πανεπιστημίου 'University of California, Berkeley', και από τότε χρησιμοποιούν όλοι την παραπάνω ονομασία.

Ωστόσο, έχουν σημειωθεί σημαντικά βήματα προόδου στην εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση διάφορων πολύπλοκων προβλημάτων. Παρόλα αυτά, μηχανικοί, μαθηματικοί και άλλοι επιστήμονες θα συνεχίσουν για την ανάπτυξη νέων εφαρμογών.

2.3 Λόγοι ανάπτυξης της μεθόδου

Με την χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή και των υπολογιστικών μεθόδων, όπως τα πεπερασμένα στοιχεία, λύνονται σε μικρό χρονικό διάστημα πλέον προβλήματα που δεν μπορούσαν να αγγίξουν οι επιστήμονες και θεωρούνταν άλυτα. «Η ανάγκη της βιομηχανίας και των προβλημάτων της πράξης, οδήγησε στην ανάπτυξη γραφικών προγραμμάτων, τα οποία συνδέουν την ανάλυση-υπολογισμό που παρέχουν τα πεπερασμένα στοιχεία. Ο συνδυασμός των γραφικών με την ανάλυση-υπολογισμό των πεπερασμένων στοιχείων υψώνουν την επιστήμη, την απλοποιούν, την κάνουν προσιτή και δημιουργική (state of art).

Προϊόν της συστηματικής εργασίας των ερευνητών είναι η ανάπτυξη των εμπορικών προγραμμάτων για τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Τα εμπορικά προγράμματα αποτελούνται από δύο μεγάλα προγράμματα, τα γραφικά και την ανάλυση.

α) Γραφικά προγράμματα

Τα γραφικά προγράμματα χρησιμοποιούνται πριν την ανάλυση (Pre-proccesing) και μετά την ανάλυση (Post-proccesing).

- Pre-proccesing. Με την χρήση του γραφικού προγράμματος το σώμα ή η κατασκευή σχεδιάζεται και κατόπιν διακριτοποιείται στα πεπερασμένα στοιχεία.
- Post-proccesing. Μετά την ανάλυση γίνονται γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων όπως είναι η παραμόρφωση του σώματος, η διανομή των τάσεων εντός του σώματος και άλλων.

β) Προγράμματα για την ανάλυση-υπολογισμό

Το πρόγραμμα της ανάλυσης χρησιμοποιείται για την μελέτη ποικίλων προβλημάτων που μπορεί να αφορούν την μηχανική των στερεών ή των κατασκευών, στα ρευστά, στην θερμότητα, στην ακουστική, στην κατεργασία των μετάλλων, στον ηλεκτρισμό και στον ηλεκτρομαγνητισμό και σε πολλές άλλες περιοχές.

Όλα τα ανώτατα ιδρύματα, τα ερευνητικά κέντρα, η βιομηχανία, οι τεχνικές εταιρίες, οι μηχανικοί της πράξης, οι προ-πτυχιακοί και οι μεταπτυχιακοί φοιτητές χρησιμοποιούν εμπορικά προγράμματα για τον ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπως για παράδειγμα είναι τα παρακάτω: ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, MARC, ADINA, SAP90, COSMOS για την μοντελοποίηση (ή προσομοίωση) προβλημάτων. Τα προγράμματα παρέχουν υπορουτίνες (subroutines), ώστε ο χρήστης να μπορεί να προσθέσει το δικό του πρόγραμμα συνήθως σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN ή C, για να προσθέσει πληροφορίες που δεν υπάρχουν στο εμπορικό πρόγραμμα, όπως για παράδειγμα να τροποποιήσει, να βελτιώσει ή να προσθέσει νέες καταστατικές εξισώσεις (constitutive equations)» (Γκότσης Π., 2013, σ. 18).

2.4 Βασικά στάδια

Για την επιτυχή ολοκλήρωση μιας ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν κάποια στάδια, τα οποία συμβάλλουν στην εξαγωγή όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικών αποτελεσμάτων. Επίσης, με γνώμονα τα αποτελέσματα της ανάλυσης, μπορούν να γίνουν ενέργειες βελτιστοποίησης.

«Η επίλυση ενός προβλήματος, λοιπόν, με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ακολουθεί μια βηματική διαδικασία. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται ως εξής:

1^ο βήμα: Προσομοίωση (διακριτοποίηση) και επιλογή στοιχείου.

Περιλαμβάνει το διαμερισμό του σώματος σε πεπερασμένα στοιχεία που συνδέονται με κόμβους καθώς και την επιλογή του κατάλληλου στοιχείου ώστε να είναι πιο κοντά στην πραγματική φυσική συμπεριφορά. Ο συνολικός αριθμός των στοιχείων που χρησιμοποιούνται, η διακύμανση στο μέγεθος και το είδος του στοιχείου εξαρτάται από την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που θέλουμε. Η επιλογή του μεγέθους γίνεται έτσι ώστε να προσεγγίζουν εντός των απαιτούμενων ορίων την ακριβή λύση σε μικρό υπολογιστικό χρόνο.

Η επιλογή του κατάλληλου στοιχείου εξαρτάται από τη φυσική σύνθεση του σώματος κάτω από πραγματικές συνθήκες φόρτισης και πόσο κοντά στην

πραγματικότητα θέλουμε να είναι. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται πιο συχνά παρουσιάζονται στην ΕΙΚΟΝΑ 2.2.

2^ο βήμα: Επιλογή της συνάρτησης μετατοπίσεων (Συνάρτηση Μορφής-Shape Function).

Όταν η μετατόπιση μιας κατασκευής δεν μπορεί να προβλεφθεί αναλυτικά, γίνεται επιλογή μιας συνάρτησης που θα προσεγγίζει τη μεταβολή της άγνωστης μεταβλητής μέσα σε κάθε στοιχείο. Συνήθως προτιμάται πολυωνυμική συνάρτηση.

3^ο βήμα: Μητρώο δυσκαμψίας και εξισώσεις.

Καθορίζονται οι εξισώσεις του πίνακα που εκφράζουν τις ιδιότητες των στοιχείων σχηματίζοντας ένα πίνακα δυσκαμψίας. Ο καθορισμός του πίνακα δυσκαμψίας μπορεί να γίνει με τις ακόλουθες μεθόδους:

- *Μέθοδος άμεσης ισορροπίας (Direct Equilibrium Method).*

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, το μητρώο δυσκαμψίας εκφράζει τις εξισώσεις ισορροπίας της κατασκευής. Αυτή η μέθοδος είναι πολύ απλή και εφαρμόζεται κυρίως σε ραβδωτά στοιχεία και σε στοιχεία δοκού.

- *Αρχή δυνατών έργων (Work or Energy Method)*

Βασίζεται στον υπολογισμό του έργου των εξωτερικών φορτίων και της εσωτερικής ενέργειας η οποία προκύπτει καθώς ο φορέας υπό την επίδραση των εξωτερικών φορτίων παραμορφώνεται. Η μέθοδος αυτή είναι απλή και εφαρμόζεται πιο εύκολα στα στοιχεία 2- και 3-διαστάσεων.

- *Μέθοδος Σταθμικών Υπολοίπων (Method of Weighted Residuals)*

Επιχειρεί μια προσεγγιστική λύση των διαφορικών εξισώσεων με τη θεώρηση δοκιμαστικών συναρτήσεων για τις χαρακτηριστικές μετατοπίσεις του προβλήματος.

4^ο βήμα: Μετατροπή του μητρώου δυσκαμψίας στο γενικό σύστημα αξόνων και εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών.

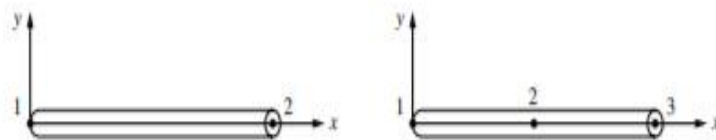
Περιλαμβάνει την μετατροπή του μητρώου δυσκαμψίας από το τοπικό (local) σύστημα συντεταγμένων στο γενικό (Global) σύστημα συντεταγμένων. Κατόπιν καθορίζονται οι συνοριακές συνθήκες όπως μετατοπίσεις, δυνάμεις, θερμοκρασίες κ.λπ.

5^ο βήμα: Επίλυση των άγνωστων βαθμών ελευθερίας.

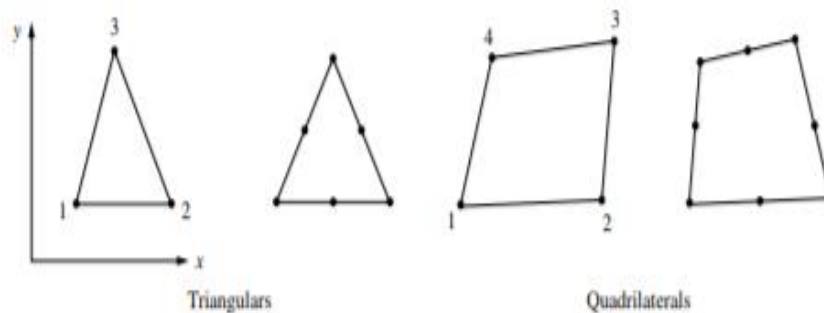
Αφού έχει γίνει ο μετασχηματισμός και έχουν καθοριστεί οι συνοριακές συνθήκες ακολουθεί η επίλυση του συστήματος. Για τον υπολογισμό των άγνωστων βαθμών ελευθερίας γίνεται επίλυση ενός γραμμικού συστήματος που είναι αρκετά εύκολος.

6^ο βήμα: Υπολογισμός των παραμορφώσεων και τάσεων.

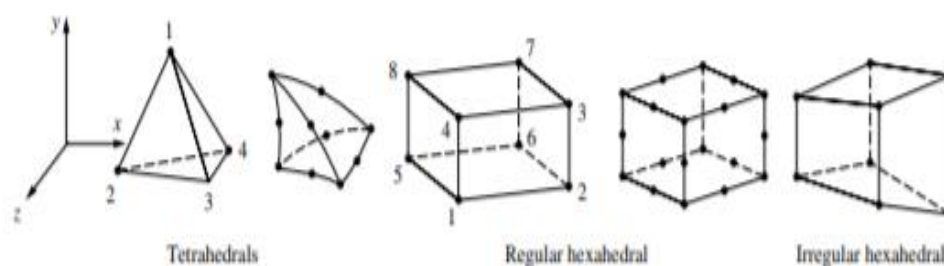
Από τις γνωστές κομβικές μετατοπίσεις, μπορούν να υπολογισθούν οι τάσεις και παραμορφώσεις κάθε στοιχείου χρησιμοποιώντας τις απαραίτητες σχέσεις» (Χριστόδουλος Γ., 2013, σ. 20).



(a) Simple two-noded line element (typically used to represent a bar or beam element) and the higher-order line element



(b) Simple two-dimensional elements with corner nodes (typically used to represent plane stress/strain) and higher-order two-dimensional elements with intermediate nodes along the sides



(c) Simple three-dimensional elements (typically used to represent three-dimensional stress state) and higher-order three-dimensional elements with intermediate nodes along edges

Εικόνα 2.2: Τυπικές Γεωμετρίες Πεπερασμένων Στοιχείων (Logan, 2007)

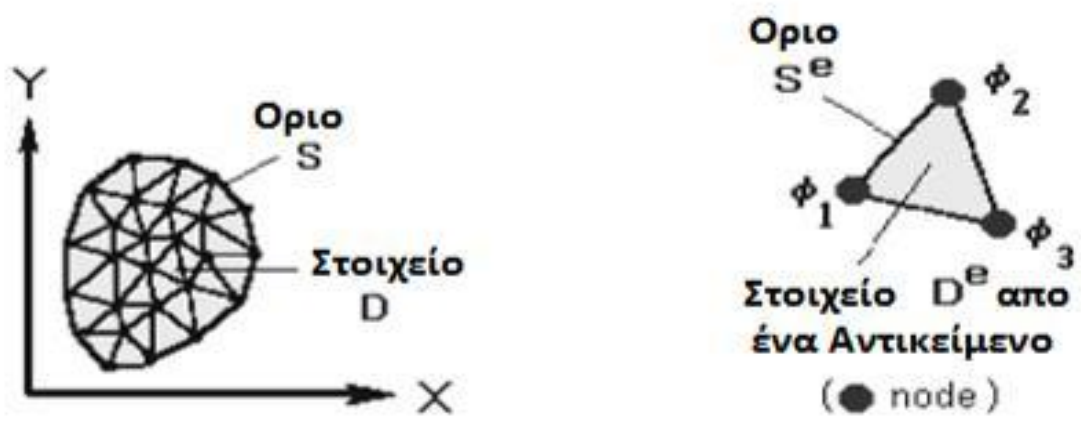
2.5 Διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία

Χρησιμοποιώντας την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, προβληματική περιοχή που τίθεται προς επίλυση διακριτοποιείται σε μικρότερες περιοχές αποκαλούμενες στοιχεία. Η επίλυση καθορίζεται από την εικόνα των ιδιαίτερων τιμών μερικών αρχικών μεταβλητών φ . Ο αριθμός των άγνωστων αρχικών μεταβλητών τομέων σε έναν κόμβο, είναι ο βαθμός ελευθερίας στον κόμβο εκείνο.

Η διαφορική εξίσωση που καθορίζει την περιοχή εφαρμόζεται τώρα στο πεδίο του ενός στοιχείου. Σε επίπεδο στοιχείου, η λύση που διέπει την εξίσωση έχει πάρει την θέση της από μια συνεχή συνάρτηση που προσεγγίζει την κατανομή της φ επί του στοιχείου D^e , που εκφράζεται από την άποψη των άγνωστων κομβικών τιμών φ_1 , φ_2 και φ_3 της λύσης φ .

Ένα σύστημα εξισώσεων από τα φ_1 , φ_2 και φ_3 μπορεί έπειτα να διατυπωθεί για το στοιχείο. Αφού καθοριστούν οι εξισώσεις στοιχείων, τα στοιχεία έπειτα συγκεντρώνονται για να διαμορφώσουν ολόκληρη την περιοχή D . Η λύση $\varphi(x,y)$ στο πρόβλημα παρουσιάζεται ως μια τμηματική προσέγγιση, που εκφράζεται από την άποψη των κομβικών τιμών φ . Το σύστημα των γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων προκύπτει από τη διαδικασία συνδυασμού. Για πρακτικά προβλήματα εφαρμοσμένης μηχανικής, είναι συχνό φαινόμενο να παρουσιάζεται ένα μέγεθος χιλιάδων εξισώσεων, έτσι ώστε να καθιστούν τον υπολογιστή ως το απαραίτητο εργαλείο για την επίλυση τους.

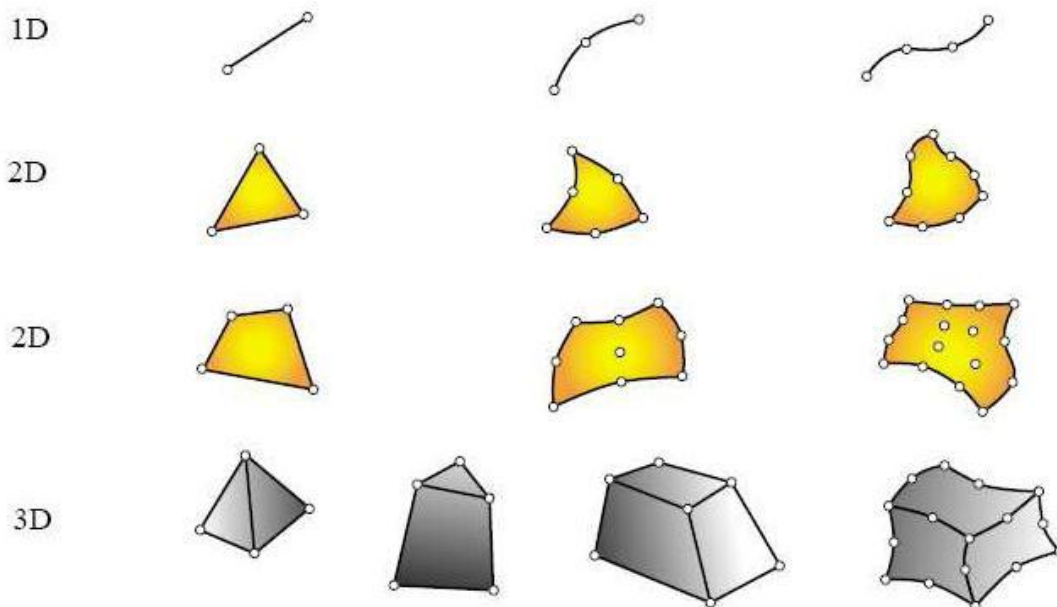
Ένα μονοδιάστατο στοιχείο είναι δυνατόν να αντιπροσωπευθεί από μια ευθεία γραμμή, άκρες της οποίας είναι κομβικά σημεία. Αυτά τα κομβικά σημεία, που αριθμούνται 1 και 2, ονομάζονται εξωτερικοί κόμβοι επειδή αντιπροσωπεύουν σημεία σύνδεσης με τα παρακείμενα στοιχεία. Μερικές εφαρμογές μπορούν να απαιτήσουν πρόσθετα κομβικά σημεία π.χ κόμβοι 3,4,5. Επειδή σε αυτούς τους ενδιάμεσους κόμβους δεν υπάρχει σύνδεση με άλλα στοιχεία, αυτοί καλούνται εσωτερικοί κόμβοι.



Εικόνα 2.3: Διακριτοποίηση με χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων (Ντουφεξής-Αμουργιανός, 2014)

2.6 Μορφές στοιχείων

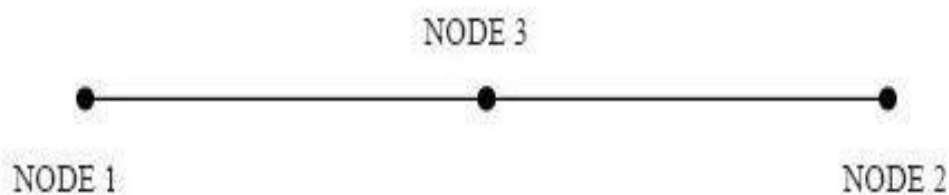
Η διαδικασία της διακριτοποίησης/υποδιαίρεσης είναι μια άσκηση κρίσης. Η πρώτη απόφαση που πρέπει να λάβει ο μηχανικός σχετίζεται με την μορφή ή την διαμόρφωση του βασικού στοιχείου που θα χρησιμοποιήσει στην μετέπειτα ανάλυση. Αυτή η επιλογή εξαρτάται από δύο παράγοντες: την γεωμετρία του σώματος ή της δομής του αντικειμένου και από τον αριθμό των ανεξάρτητων διαστάσεων (π.χ X, Y, ή Z) που είναι απαραίτητες για να περιγράψουν το πρόβλημα. Ένα στοιχείο πεπερασμένων είναι συνήθως μονής -, διπλής -ή τριών διαστάσεων διαμόρφωσης. Τα όρια των στοιχείων είναι τις περισσότερες φορές ευθείες γραμμές, αν και για τα προβλήματα μπορούν να αντιπροσωπευθούν καλύτερα οι καμπυλόγραμμες συντεταγμένες. Είναι συμφέρον να καθοριστούν ομοίως οι μορφές στοιχείων. Τα δισδιάστατα στοιχεία διακρίνονται σε τριγωνικά (τρικομβικά, 6- κομβικά, κυβικά) στοιχεία και τετραπλευρικά (τετραγωνικά, κυβικά) στοιχεία, ενώ τα τρισδιάστατα διακρίνονται σε τετραγωνικά τετραεδρικά στοιχεία και κυβικά τετραεδρικά στοιχεία.



Εικόνα 2.4: Τυπικές γεωμετρίες Πεπερασμένων Στοιχείων (Χριστοφή, 2008)

2.6.1 Μονοδιάστατα στοιχεία

Στην περίπτωση όπου η γεωμετρία, οι υλικές ιδιότητες και οι εξαρτημένες μεταβλητές, όπως η μετατόπιση μπορούν να εκφραστούν επί ενός άξονα ανεξάρτητων συντεταγμένων, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τα μονοδιάστατα στοιχεία. Η διάσταση αυτή μετριέται κατά μήκος του άξονα του αντικειμένου. Αυτός ο τύπος στοιχείου χρησιμοποιείται για τις δομές όπου μπορούν να προσομοιωθούν ως γραμμικά στοιχεία, όπως είναι το πλαίσιο. Ανάλυση πλαισίων γίνεται, όταν θεωρηθούν τα στοιχεία αυτά ως μονοδιάστατα, επειδή η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι τα στοιχεία δύο ή τριών διαστάσεων μπορούν να προσομοιωθούν με ένα σύνολο γραμμικών στοιχείων. Πράγματι, μια προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων στην ανάλυση των δοκών και των δομών πλαισίου παράγει μερικές χρήσιμες ιδέες. Ειδικά όταν ποικίλλουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες της συνεχούς ή ασυνεχούς δομής με τις αξονικές συντεταγμένες. Επιπροσθέτως, τα μονοδιάστατα στοιχεία είναι ένα απλό αλλά χρήσιμο εργαλείο για την κατανόηση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 2.5: Μονοδιάστατο Στοιχείο (Ντουφεξής-Αμουργιανός, 2014)

2.6.2 Δισδιάστατα στοιχεία

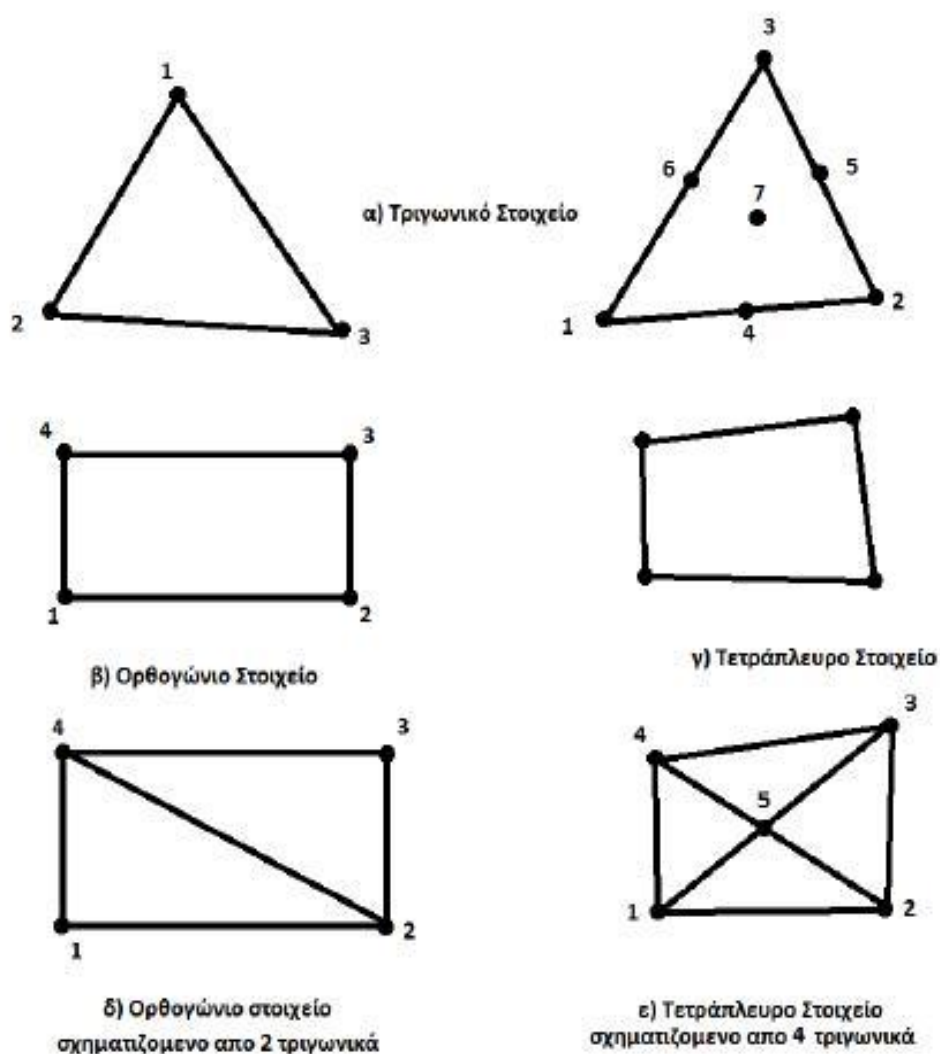
Στην περίπτωση μελέτης των δισδιάστατων προβλημάτων, το τρίγωνο είναι το απλούστερο στοιχείο. Για τα τριγωνικά στοιχεία αυτά, υπάρχουν δυο πιθανοί τύποι εξωτερικών κόμβων:

A) Οι κόμβοι γωνιών που υποδεικνύονται από τους 1, 2, και 3 στην ΕΙΚΟΝΑ 2.6 (α) ονομάζονται αρχικοί εξωτερικοί κόμβοι.

B) Όταν πρόσθετοι κόμβοι εμφανίζονται στις πλευρές του στοιχείου, όπως είναι οι κόμβοι 4, 5 και 6 στην ΕΙΚΟΝΑ 2.6 (α), τότε αυτοί αναφέρονται ως δευτερεύοντες εξωτερικοί κόμβοι.

Η διάκριση αυτή είναι απαραίτητη, καθώς οι δευτερεύοντες κόμβοι μπορούν να έχουν λιγότερες μετατοπίσεις ενδιαφέροντος σε σύγκριση με τους κόμβους γωνιών. Επιπλέον, μερικές φορές χρησιμοποιούνται στα τριγωνικά στοιχεία οι εσωτερικοί κόμβοι, όπως είναι ο κόμβος 7 στην ΕΙΚΟΝΑ 2.6 (α).

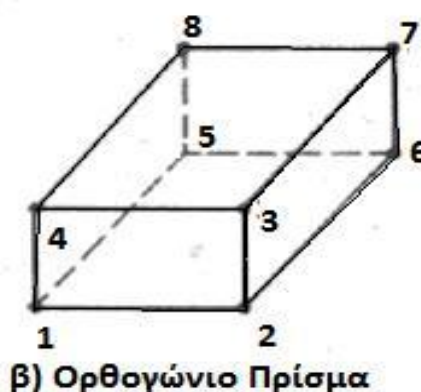
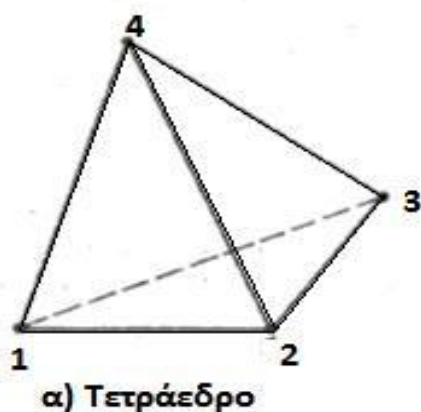
Άλλοι κοινοί τύποι στο δισδιάστατο στοιχείο είναι οι ορθογώνιες και τετράπλευρες μορφές {ΕΙΚΟΝΑ 2.6 (β) και ΕΙΚΟΝΑ 2.6 (γ)}. Τα πρώτα στοιχεία μπορούν να θεωρηθούν ως μια ειδίκευση των τελευταίων. Αν και η σχεδόν δισδιάστατη συνέχεια μπορεί να αντιπροσωπευθεί από μια συνάθροιση των τριγώνων, υπάρχουν ορισμένα προβλήματα για τα οποία τα τετράπλευρα στοιχεία είναι συμφέροντα. Επιπλέον, αντί για την άμεση χρησιμοποίηση των τετράπλευρων στοιχείων, είναι εφικτό να κατασκευαστούν τέτοιες μορφές από δύο ή τέσσερα τριγωνικά στοιχεία, όπως φαίνεται στην ΕΙΚΟΝΑ 2.6 (δ) και στην ΕΙΚΟΝΑ 2.6 (ε). Εκτός από τους αρχικούς εξωτερικούς κόμβους που παρουσιάζονται στην ΕΙΚΟΝΑ 2.6 (β), κάθε ένα από τα τετράπλευρα στοιχεία μπορεί επίσης να έχει δευτεροβάθμιους εξωτερικούς κόμβους και έναν ή περισσότερους εσωτερικούς κόμβους, όπως φαίνεται στην ΕΙΚΟΝΑ 2.6(ε).



Εικόνα 2.6: Δισδιάστατα Στοιχεία (Ντουφεξής-Αμουργιανός, 2014)

2.6.3 Τρισδιάστατα στοιχεία

Όπως και με το τρίγωνο, το τετράεδρο που παρουσιάζεται στην ΕΙΚΟΝΑ 2.7 (β) είναι το βασικό πεπερασμένο στοιχείο για τρισδιάστατα προβλήματα. Το τετράεδρο έχει τέσσερις αρχικούς εξωτερικούς κόμβους. Τα τρισδιάστατα στοιχεία που έχουν οχτώ αρχικούς εξωτερικούς κόμβους, είναι είτε υπό μορφή γενικού εξάεδρου ΕΙΚΟΝΑ 2.7 (β) είτε ορθογώνιου πρίσματος ΕΙΚΟΝΑ 2.7 (α). Σε περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητο, μπορούμε να εισάγουμε δευτεροβάθμιους εξωτερικούς κόμβους ή εσωτερικούς κόμβους για κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία.



Εικόνα 2.7: Τρισδιάστατα Στοιχεία (Ντουφεξής-Αμουργιανός, 2014)

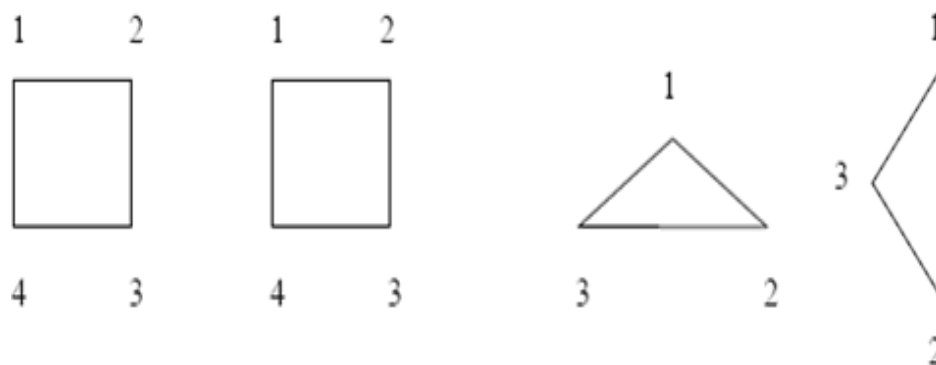
2.6.4 Προσανατολισμός πλέγματος

Στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων το αντικείμενο διακριτοποιείται σε μικρότερα στοιχεία, όπως μια γραμμή, ένα τρίγωνο, ένα τετράγωνο, ένα τετράεδρο, ανάλογα με την κατηγορία του προβλήματος στο οποίο ανήκει (1D ή 2D ή 3D). Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιείται ακόμα και ένας συνδυασμός στοιχείων με βάση την γεωμετρία του αντικειμένου. «Παρά το γεγονός ότι η δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων έχει αναπτυχθεί εδώ και αρκετές δεκαετίες, μια ποικιλία πραγματικών προβλημάτων εφαρμοσμένης μηχανικής επιβάλλουν πρόσθετες απαιτήσεις για τις υπάρχουσες τεχνολογίες παραγωγής πλέγματος, π.χ στις τριγύρω ζώνες προσανατολισμού, όπου είναι αναγκαία η εύρεση της πλέον κατάλληλης τοποθέτησης των στοιχείων του πλέγματος, έτσι ώστε να αποδίδουν πιο ακριβή αποτελέσματα.

Ο προσανατολισμός του πλέγματος δεν παίζει κάποιο ρόλο στην περίπτωση των τετραγωνικών στοιχείων, η γεωμετρία των οποίων παραμένει αμετάβλητη σε κάθε προσανατολισμό τους. Κατά την χρήση όμως τριγωνικών στοιχείων οι

περιπτώσεις αλλαγής της γεωμετρίας και της συνδεσιμότητας μεταξύ των στοιχείων, μπορεί να έχει κάποια επίδραση στα αποτελέσματα. Τώρα, κατά την επίλυση του προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων οι συντεταγμένες του μέλους σύμφωνα με την συνδεσιμότητά του λαμβάνονται υπόψη και τίθενται στον αντίστοιχο τύπο λαμβάνοντας και το σχετικό αποτέλεσμα. Από την ΕΙΚΟΝΑ 2.8 καθίσταται σαφές ότι ο νέος προσανατολισμός δεν θα έχει καμία επίδραση στη συνδεσιμότητα του τετραγωνικού στοιχείου, γεγονός το οποίο δεν θα συνέβαινε όταν θα εξετάζαμε τριγωνικά στοιχεία. Εδώ, με την αλλαγή του προσανατολισμού οι συντεταγμένες θα αλλάξουν και επομένως, τα αποτελέσματα θα ποικίλουν ανάλογα με τον προσανατολισμό.

Όταν η γεωμετρία είναι απλή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε τύπος στοιχείου ανάλογα με το πρόβλημα και σύμφωνα με τη θέληση του αναλυτή. Όταν όμως η περιοχή είναι ακανόνιστη ή ασυνεχής, τότε χρησιμοποιούνται ειδικά τριγωνικά στοιχεία, δεδομένου ότι μπορούν εύκολα να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σχήμα» (Ντουφεξής-Αμουργιανός Κ., 2014, σ. 22).



α) Τετραγωνικό στοιχείο

β) Τριγωνικό στοιχείο

Εικόνα 2.8: Διαφορετικότητα προσανατολισμού τριγωνικών στοιχείων (Ντουφεξής-Αμουργιανός, 2014)

2.7 Σφάλματα ¹

Με τον όρο «σφάλμα» ορίζουμε την ασυμφωνία του αποτελέσματος που υπάρχει μεταξύ της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία και του αποτελέσματος από κάποιο μαθηματικό μοντέλο (Cook, D. R., et al. 2002). Ωστόσο, ο μελετητής είναι σημαντικό να γνωρίζει ποιές είναι οι πηγές των πιθανών σφαλμάτων, έτσι ώστε να ακολουθεί τις κατάλληλες διαδικασίες για την αποφυγή τους. Οι πηγές σφαλμάτων μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

¹ Χριστόδουλος, 2013

Σφάλμα κατά την μοντελοποίηση (Modeling error). Αναφέρεται στο στάδιο μετατροπής του φυσικού προβλήματος σε μοντέλο (μαθηματική διατύπωση του προβλήματος) για την επίλυση του. Το σφάλμα αυτό μπορεί να προκύπτει λόγω των ιδιοτήτων του υλικού, η εφαρμογή των φορτίων και ο καθορισμός των συνοριακών συνθηκών.

Σφάλμα κατά τη διακριτοποίηση (Discretization error). Η επιλογή των διαστάσεων των στοιχείων κατά τη διακριτοποίηση είναι μια διαδικασία πολύ μεγάλης σημασίας για τη δημιουργία του μοντέλου, γιατί είναι ο παράγοντας όπου καθορίζεται η ορθότητα αλλά και η σύγκλιση της ανάλυσης. Αυτό οφείλεται στο ότι οι διαστάσεις των στοιχείων καθορίζουν τον αριθμό των στοιχείων του μοντέλου. Όταν ο αριθμός των στοιχείων είναι μεγάλος τότε η επίλυση συγκλίνει πάρα πολύ κοντά στην πραγματική τιμή. Επιπρόσθετα όσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων αυξάνεται και ο χρόνος ανάλυσης. Ωστόσο, οι διαστάσεις των στοιχείων πρέπει να είναι τέτοιες όπου θα λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος αλλά και η σύγκλιση των αποτελεσμάτων.

Αριθμητικό σφάλμα (Numerical error). Ένα από τα σημαντικότερα στάδια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η επίλυση της μητρωϊκής εξίσωσης $[K]\{D\}=\{R\}$. Σε κάθε υπολογισμό, οι πραγματικοί αριθμοί αποθηκεύονται με ακρίβεια ενός δεδομένου αριθμού ψηφίων, τα οποία όλα συμβάλουν κατά την εκτέλεση των αριθμητικών πράξεων. Ωστόσο, μετά από ένα αριθμό πράξεων η αρχική ακρίβεια δεν θα είναι η ίδια αλλά θα έχει ελαττωθεί, με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα υπολογιστικό σφάλμα.

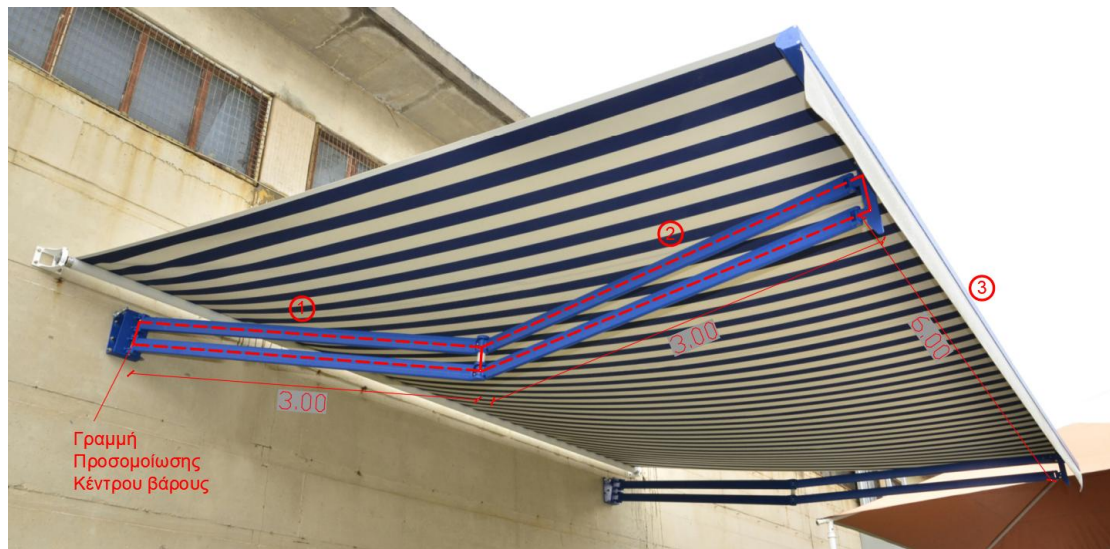
3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

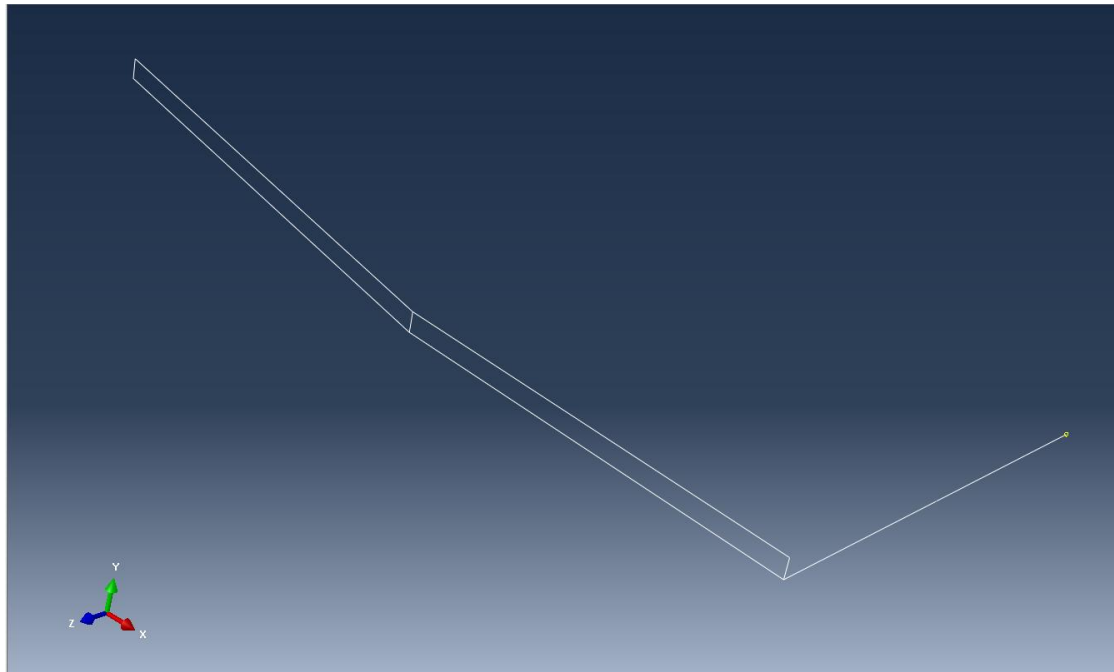
3.1 Επεξεργασία σε περιβάλλον CAD/CAE

Το πρώτο βήμα για την εφαρμογή οποιασδήποτε επεξεργασίας, είναι η κατά το δυνατό λεπτομερέστερη αποτύπωση της γεωμετρίας του υπό εξέταση μοντέλου. Οι ψηφιοποιημένες αξονικές τομογραφίες εισάγονται σε περιβάλλον CAD/CAE για τη μοντελοποίηση της υπό εξέταση δομής και την ανάλυση της. Στο περιβάλλον CAD πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του μοντέλου και η κατασκευή του πλέγματος που οδηγεί στην ακριβή τρισδιάστατη αναπαράσταση της υπό εξέτασης δομής. Στο περιβάλλον CAE πραγματοποιείται η ανάλυση του μοντέλου με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων. Εάν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση δεν ικανοποιούν τις προϋποθέσεις που έχουν τεθεί αρχικά, επαναλαμβάνεται ο κύκλος σχεδιασμού μέχρι να προκύψει η βέλτιστη λύση. Σε διαφορετική περίπτωση μέσω της ταχείας κατασκευής πρωτοτύπου παράγεται το τελικό προϊόν.

3.2 Το μοντέλο της μελέτης

Το σύστημα σκίασης της τέντας με διπλούς βραχίονες αποτελείται από τέσσερα βασικά σημεία. Αυτά περιλαμβάνουν τους διπλούς βραχίονες που βοηθούν στο κατέβασμα ή ανέβασμα της τέντας και μαζί με το αντίβαρο αλουμινίου παραλαμβάνουν το σημαντικότερο φορτίο της κατασκευής. Στην συγκεκριμένη εργασία τα φορτία του ανέμου και του χιονιού με τα οποία θα μελετήσουμε την αντοχή τους. Τον σωλήνα στήριξης ο οποίος συνήθως τοποθετείτε στο τοίχο και στον οποίο τυλίγεται το πανί που βοηθά στην παροχή σκίασης του χώρου. Στην παρούσα εργασία ο σχεδιασμός όπως και η ανάλυση του συστήματος του βραχίονα θα γίνει με το λογισμικό ABAQUS CAE στο οποίο θα εισάγουμε την γεωμετρία της κατασκευής, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών καθώς και τις φορτίσεις που ασκούνται σε αυτό. Το μοντέλο με το οποίο θα γίνει η προσομοίωση είναι γραμμικό και κάθε στοιχείο του θα προσομοιωθεί με ραβδωτά στοιχεία. Τα επιμέρους τμήματα θα προσομοιωθούν κεντροβαρικά.





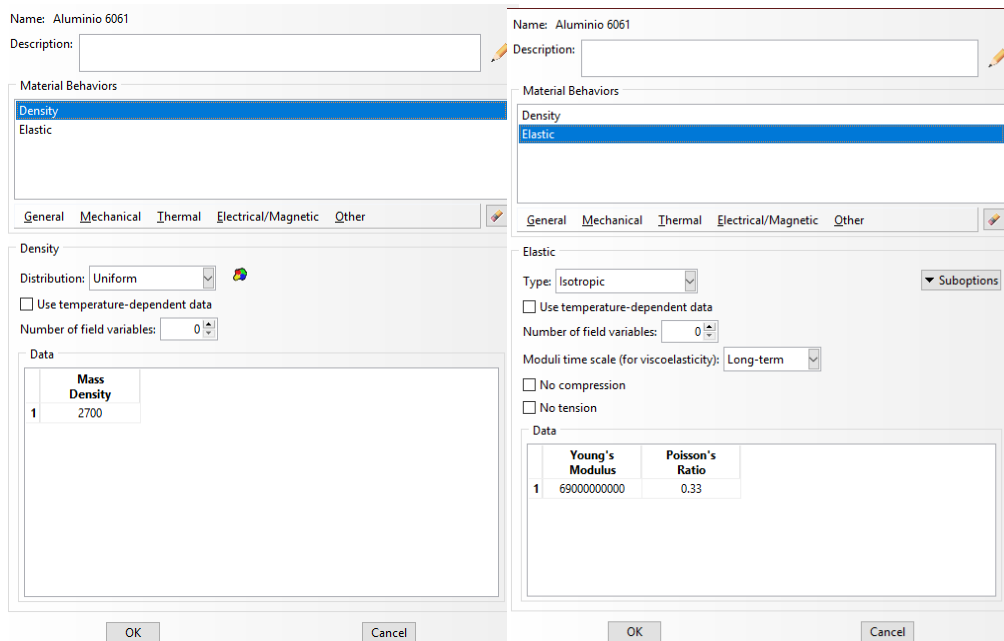
Εικόνα 3.3: Τελική γεωμετρία μοντέλου

3.4 Εισαγωγή Υλικού

Το υλικό από το οποίο αποτελείται η κατασκευή είναι κράμα αλουμινίου 6061(ISO AlMg1SiCu). Οι ιδιότητες του υλικού είναι οι εξής:

- Πυκνότητα : 2700 kg/m³
- Μέτρο ελαστικότητας : 69000 N/mm²
- Λόγος Poisson: 0,33

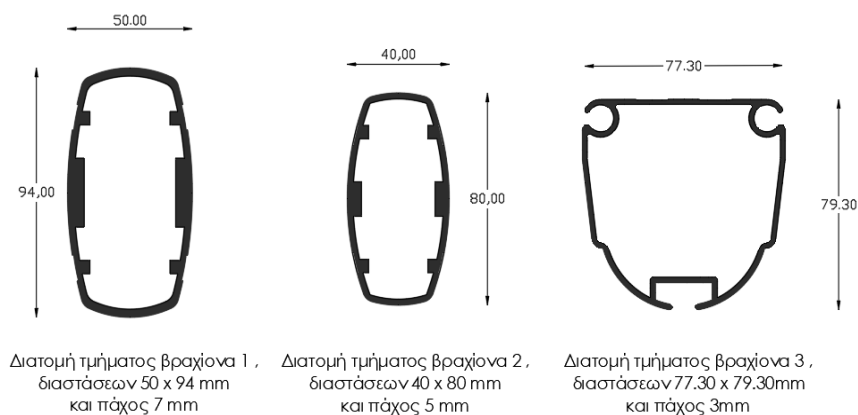
Τις παραπάνω ιδιότητες τις εφαρμόζουμε από την καρτέλα Materials → Create Materials.



Εικόνα 3.4: Εισαγωγή μηχανικών ιδιοτήτων

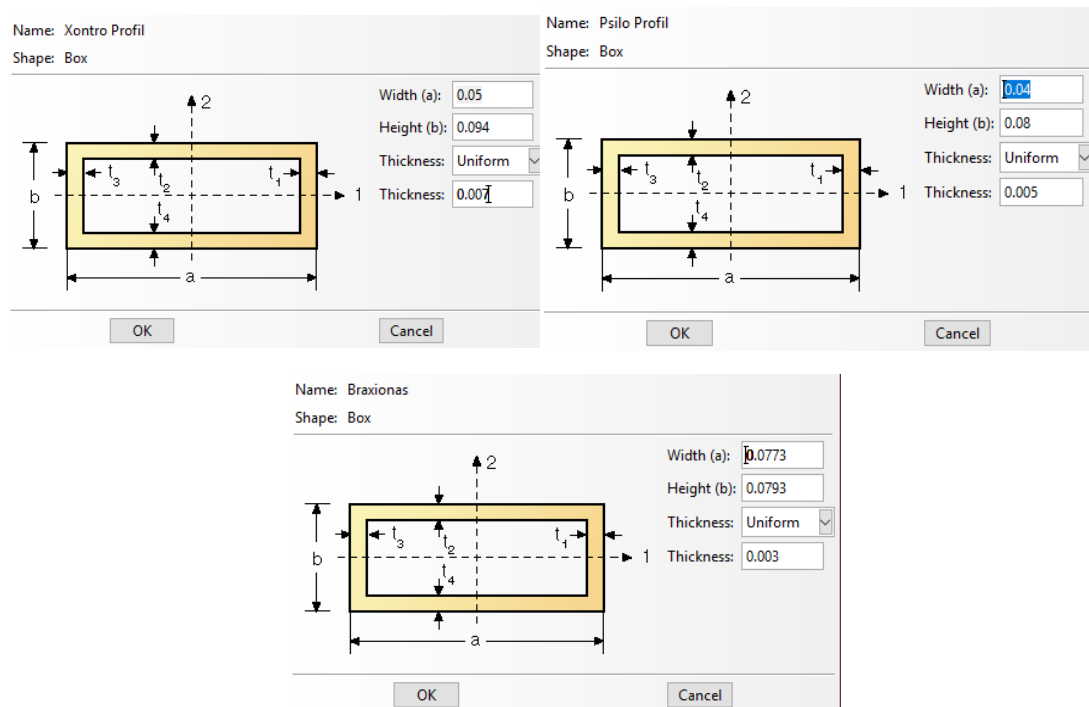
3.5 Εισαγωγή Διατομών Βραχιόνων

Για την κατασκευή των διατομών επιλέγονται ορθογώνιες διατομές με διαστάσεις σύμφωνα με τις πραγματικές που απαρτίζουν το σύστημα.



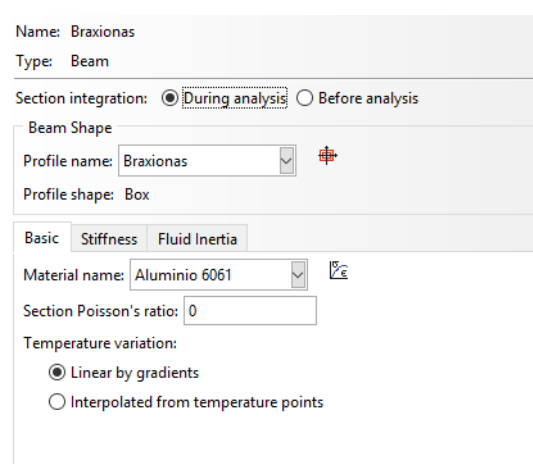
Εικόνα 3.1: Διατομές βραχιόνων

Όπου την γεωμετρία κάθε διατομής την εισάγουμε από την καρτέλα Profiles→ Create Profiles→ Box και εισάγονται οι διαστάσεις.



Εικόνα 3.6: Διατομές που εισάγονται στην ανάλυση (Βραχίονας 1, Βραχίονας 2, Βραχίονας 3)

Στην συνέχεια από την καρτέλα Sections → Create Sections στο Profile name επιλέγω την εκάστοτε διατομή που κατασκευάστηκε στο προηγούμενο βήμα και στο πεδίο Material Name εισάγεται το υλικό που δημιουργήθηκε σε προηγούμενο βήμα (ΕΙΚΟΝΑ 3.7).



Εικόνα 3.7: Κατασκευή διατομών

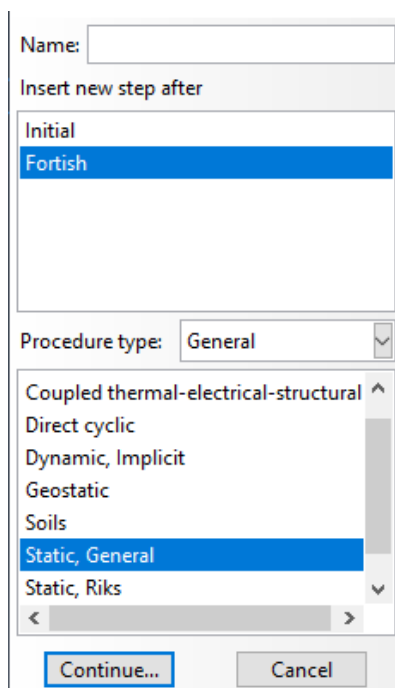
Στην συνέχεια από την επιλογή Assign Section μπορώ να αναθέσω τις διατομές στα αντίστοιχα τμήματα.

3.6 Ορισμός του Assembly και του Step

Ορίζουμε τη γεωμετρία του συναρμολογήματος δημιουργώντας Instances του συστήματος και στη συνέχεια τις τοποθετούμε σε μια Instance που μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε εξαρτημένη και ανεξάρτητη. Το μοντέλο θεωρείται Independent (εξαρτημένο). Ο προσδιορισμός αυτός δίδεται για να διευκρινιστεί ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει η ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή αν κάθε Instance θα αναλυθεί ξεχωριστά από το αρχικό ή θα θεωρηθεί ένα ενιαίο.

Από την καρτέλα Assembly → Create Instance εισάγετε όλη η γεωμετρία του συστήματος, και ως τύπο συστήματος επιλέγεται Independent.

Το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία ενός Step στο οποίο θα εφαρμόζονται οι φορτίσεις, ενώ οι συνοριακές συνθήκες εφαρμόζονται στο Initial Step. Έτσι, από την καρτέλα Step εμφανίζεται το παράθυρο Create Step και επιλέγεται Static, και General ως τύπο της ανάλυσης.

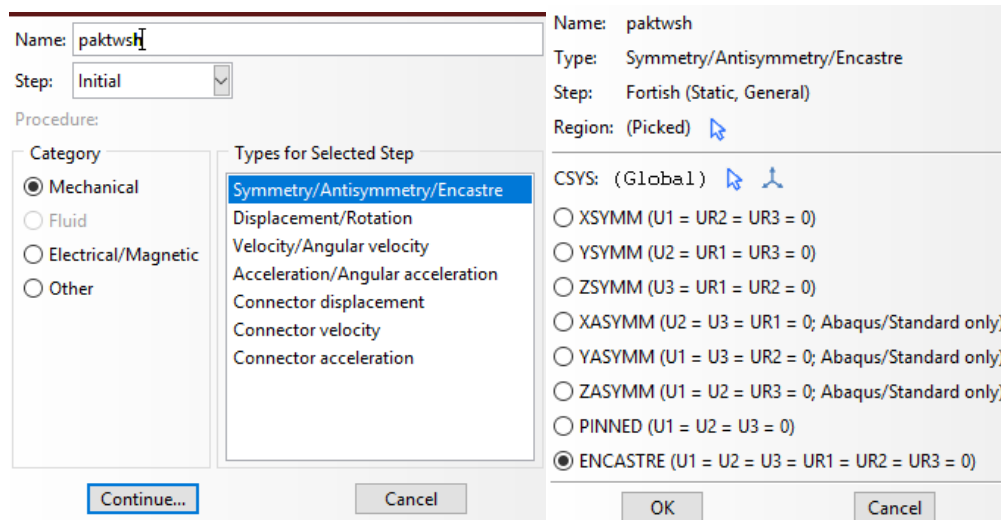


Εικόνα 3.8: Δημιουργία Step

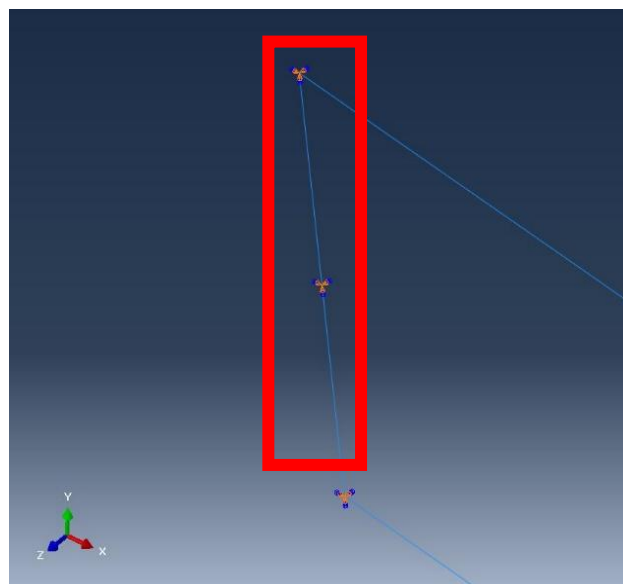
3.7 Εισαγωγή Συνοριακών συνθηκών

Αφού έχει ολοκληρωθεί η γεωμετρία μαζί με όλα τα μηχανικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος, εισάγονται οι δύο βασικές συνοριακές συνθήκες

στο σύστημα. Η πάκτωση η οποία θεωρούμε ότι γίνεται στην βάση της στήριξης του συστήματος και τοποθετείται από την καρτέλα BC → Create Boundary Condition → Symmetry/Antisymmetry/Encastre → Continue, επιλέγεται η περιοχή που εφαρμόζεται η συνθήκη της πάκτωσης και στην συνέχεια επιλέγεται η επιλογή Encastre όπου περιορίζονται όλες οι μετακινήσεις και οι στροφές.

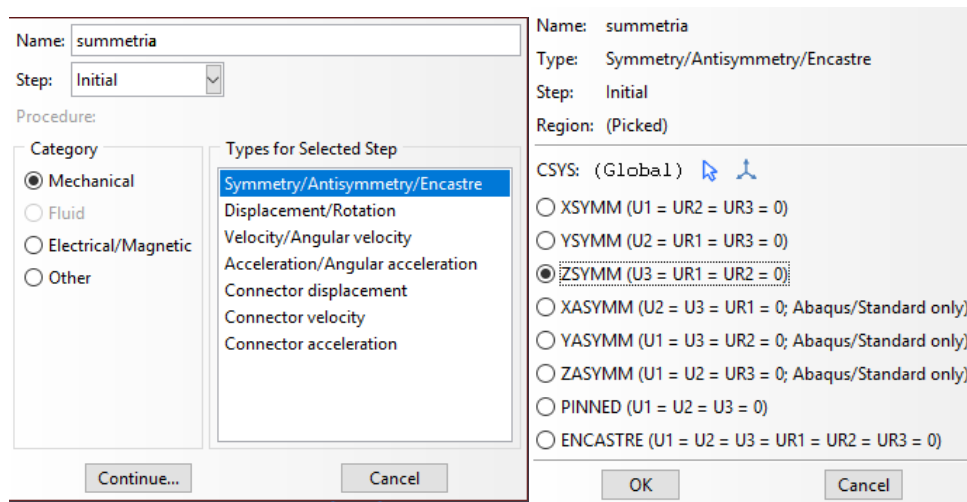


Εικόνα 3.9: Εισαγωγή συνοριακής συνθήκης (πάκτωση)

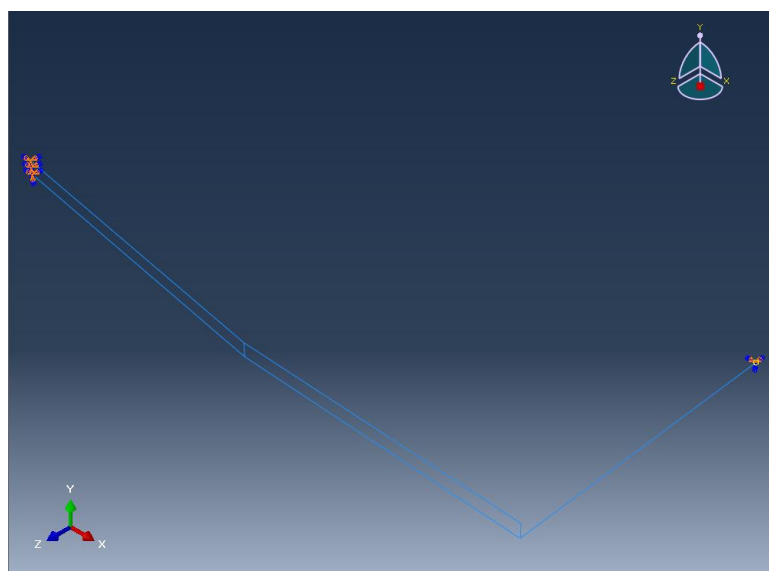


Εικόνα 3.10: Δημιουργία πάκτωσης

Αντίστοιχα για την συνοριακή συνθήκη της συμμετρίας ακολουθείται αντίστοιχη διαδικασία BC → Create Boundary Condition → Symmetry/Antisymmetry/Encastre → Continue, επιλέγεται η περιοχή που εφαρμόζεται η συνθήκη της συμμετρίας και στην συνέχεια επιλέγεται η επιλογή ZSymmetry όπου περιορίζονται όλες οι μετακινήσεις και οι στροφές.



Εικόνα 3.11: Εισαγωγή συνοριακής συνθήκης συμμετρίας



Εικόνα 3.12: Δημιουργία συμμετρίας

3.8 Υπολογισμός και Εισαγωγή φορτίων

3.8.1 Περιπτώσεις φόρτισης & Υπολογισμός δυνάμεων

Ως μέρος της ανάλυσης των δυνάμεων είναι η μελέτη για διάφορες περιπτώσεις φόρτισης που πρόκειται να αντιμετωπίσουν οι διπλοί βραχίονες. Τα φορτία που εφαρμόζονται στην κατασκευή είναι τρία, το ίδιο βάρος των επιμέρους τμημάτων, το φορτίο λόγω χιονιού και η πίεση λόγω ανέμου. Κατά την ομαλή λειτουργία (πρώτη περίπτωση) στην πιο οριζόντια θέση (0°) εφαρμόζονται οι

βαρυτικές δυνάμεις από το βάρος των ίδιων των βραχιόνων και των εξαρτημάτων της τέντας. Η γωνία τοποθέτησης μετράτε από τον άξονα ο οποίος είναι παράλληλος ως προς τον άξονα Χ. Οι διαστάσεις του πανιού δεν αλλάζουν καθώς το πανί τυλίγεται στον άξονα (σωλήνας) και προσαρμόζεται κατάλληλα ώστε να σχηματίζεται η γωνία τοποθέτησης.

Κατά την λειτουργία σε ακραίες συνθήκες, όπως στην δεύτερη περίπτωση έχουμε εφαρμογές φόρτισης σε διάφορες θέσης στήριξης όπου τοποθετείτε συχνότερα η κατασκευή. Σε αυτές τις θέσεις εφαρμόζεται επιπλέον βαρυτική δύναμη από το βάρος πιθανού χιονιού που καλύπτει την επιφάνεια της τέντας.

Στη τρίτη περίπτωση λειτουργίας σε ακραίες συνθήκες, η τέντα βρίσκεται ξανά σε κλίση (30°), (45°) αλλά και στην κάθετη θέση των (60°) και δρα πάνω της ανεμοπίεση. Τα φορτία βάρους και χιονιού παραμένουν τα ίδια όπως και στην περίπτωση μελέτης της ανεμοπίεσης, καθώς οι συντελεστές δεν αλλάζουν για γωνία μεγαλύτερη των 30°. Για τις ανάγκες της εργασίας δημιουργήθηκαν οι παρακάτω περιπτώσεις φόρτισης, σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας και σε έντονα φαινόμενα.

Παρακάτω παρουσιάζονται σε πίνακα οι περιπτώσεις φόρτισης και οι δυνάμεις που εφαρμόζονται.

Κατάλογος Φορτίσεων:

| Θέση τέντας | Φόρτιση | Θέση | Μοίρες |
|-------------|----------------------------------|-----------|---------------|
| 1 | Βαρυτική δύναμη | οριζόντια | 30°/ 45°/ 60° |
| 2 | Βαρυτική δύναμη (+ανεμοπίεση) | υπό γωνία | 30°/ 45°/ 60° |
| 3 | Βαρυτική δύναμη (+χιόνι) | υπό γωνία | 30°/ 45°/ 60° |

3.8.2 Υπολογισμός δύναμης λόγω του βάρους της τέντας & των βραχιόνων

Ξεκινώντας τη μελέτη υπολογίζουμε το βάρος των βραχιόνων και της τέντας που εφαρμόζεται στο στήριγμα. Μελετάμε τον διπλό βραχίονα στο μέγιστο μήκος του (6 μέτρων), άρα σε μια κατασκευή με τέντα 6m x 6m. Αναλυτικά τα βάρη που θα αθροιστούν είναι:

Σωλήνας Φ80 (6m) όπου τυλίγεται το πανί : 21,42 kg

Αντίβαρο αλουμινίου (6m) : 7,5kg

Βάρος πανιού : $0,4\text{kg/m}^2 \times (6\text{ m} \times 6\text{ m}) = 14,4\text{ kg}$

Βάρος βραχίονα: $20 \times 2 = 40\text{kg}$

Επομένως η κατασκευή δέχεται συνολικό βάρος: 83,32 kg.

Στην συνέχεια μετατρέπουμε τα κιλά σε Newton για να δούμε πόση δύναμη δέχεται όλη η κατασκευή μόνο από το βάρος:

$$83,32\text{kg} \times 9,8665\text{m/s}^2 = 822,08 \text{ N.}$$

Η συνολική αυτή δύναμη κατανέμεται ίσα στα 2 στηρίγματα, επομένως εφαρμόζεται σε κάθε στήριγμα:

$$822,08\text{N} \div 2 = 411,04 \text{ N.}$$

Τέλος, μετατρέπουμε την δύναμη που ασκείται ανά m^2 :

$$411,04\text{N} / 0,08342 \text{ m}^2 = 4927 \text{ N/ m}^2$$

3.8.3 Φορτίο λόγω Χιονιού

Θεωρούμε ότι στις περιπτώσεις με κλίση (30°), (45°) και (60°) υπάρχει χιόνι ύψους 5cm. Αυτή η ποσότητα αντιστοιχεί σε:

$0,05\text{τόνοι/m}^2 \times (6 \times 3) \text{ m}^2 = 0,9 \text{ τόνους}$. Το βάρος αυτό αντιστοιχεί στο μισό εμβαδόν της τέντας που μελετάμε λόγω συμμετρίας της κατασκευής. Το οποίο είναι ίσο με 900kg.

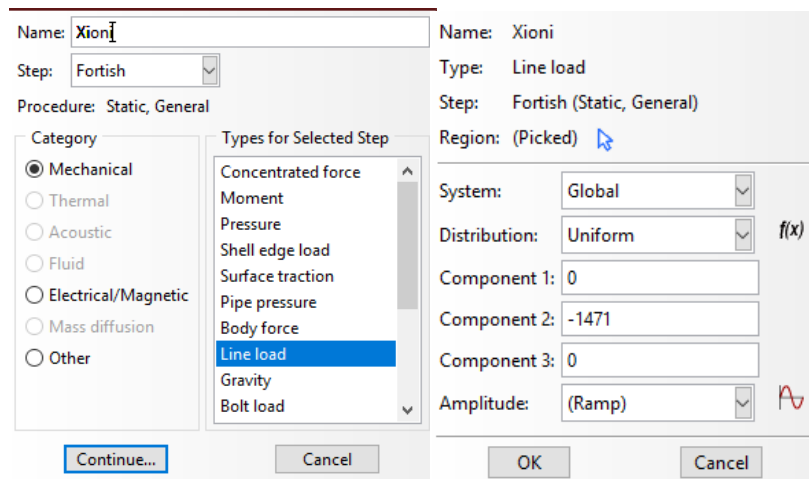
Μετατροπή σε Newton: $900\text{kg} \times 9,8665 \text{ m/s}^2 = 8.826 \text{ N}$ η συνολική δύναμη λόγω χιονιού που εφαρμόζεται στο σύστημα που μελετάμε. Το πανί στηρίζεται εκτός από το αντίβαρο και στην βάση του στον τοίχο. Συνεπώς από την συνολική δύναμη που υπολογίστηκε παραπάνω θεωρούμε ότι η βάση του πανιού στο τοίχο παραλαμβάνει το 50% του φορτίου. Άρα το τελικό φορτίο είναι:

$$8.826 \text{ N} / 2 = 4.413 \text{ N}$$

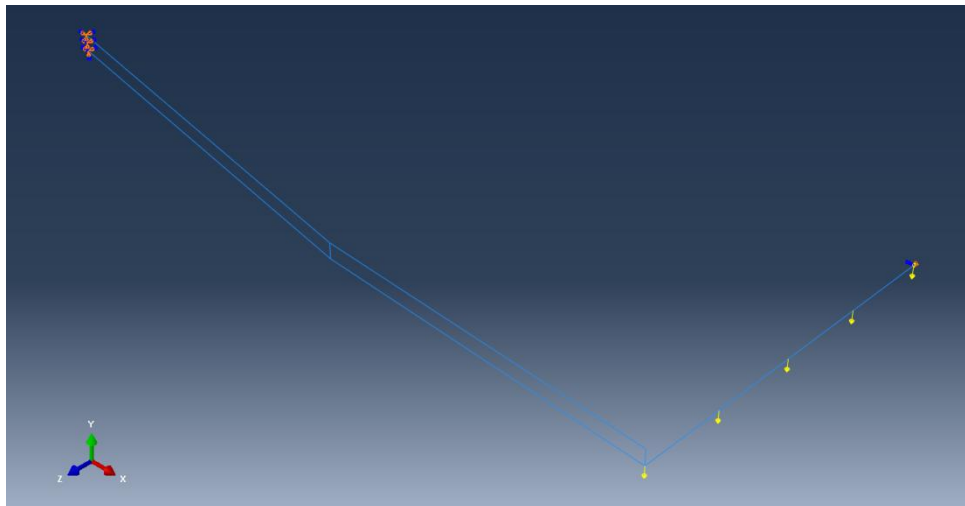
Στην συνέχεια για να μετατρέψουμε το φορτίο από συγκεντρωμένο σε γραμμικό διαιρούμε με το μήκος του αντίβαρου που το παραλαμβάνει (3m). Οπότε:

$$S = 4.413 \text{ N} / 3\text{m} = 1.471 \text{ N/m}$$

Το φορτίο εισάγετε από την καρτέλα Loads → Create Load και στο κελί Step βάζουμε το Step που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα. Στην συνέχεια επιλέγουμε Type for Selected Step → Line Load για την εφαρμογή του το τμήμα του αντίβαρου όπου εφαρμόζεται και τοποθετώ την τιμή που υπολογίστηκε με την σωστή φορά.



Εικόνα 3.13: Εισαγωγή φορτίου χιονιού



Εικόνα 3.14: Φορτίο Χιονιού

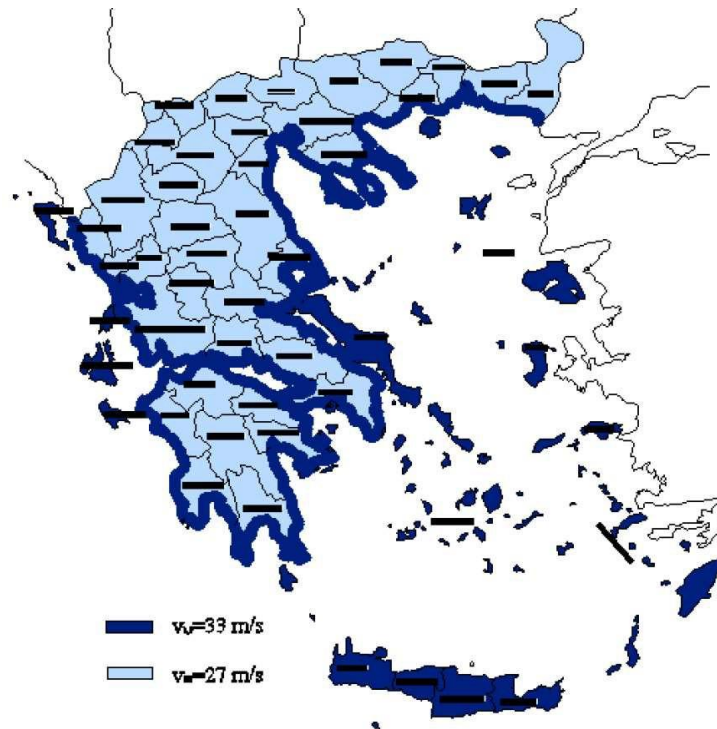
3.8.4 Φορτίο λόγω Ανέμου

Τα φορτία ανέμου υπολογίζονται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1 (EN 1991-1-4:2005). Η θεμελιώδης βασική ταχύτητα ανέμου διακρίνει 2 περιπτώσεις για τον ελλαδικό χώρο.

- $v_{b,0} = 33 \text{ m/s}$: Νησιά & παράκτιες περιοχές ($\leq 10 \text{ km}$ από τη θάλασσα)
- $v_{b,0} = 27 \text{ m/s}$: Υπόλοιπη χώρα ($> 10 \text{ km}$ από τη θάλασσα)

Στην περίπτωση μας, θα λάβουμε υπόψη τις παράκτιες περιοχές (ΕΙΚΟΝΑ 3.15), οπότε:

$$V_{b,0} = 33 \text{ m/s}$$



Εικόνα 3.15: Χάρτης κατανομής βασικών ταχυτήτων ανέμου

Η βασική ταχύτητα ανέμου v_b προσδιορίζεται από τη παρακάτω σχέση λαμβάνοντας υπόψη την διεύθυνση του ανέμου, την εποχικότητα και την θεμελιώδη τιμή του ανέμου όπως προσδιορίστηκε παραπάνω ($v_{b,0}$) :

$$v_b = c_{dir} \times c_{season} \times v_{b,0}$$

Όπου:

v_b : βασική ταχύτητα ανέμου

$v_{b,0}$: θεμελιώδης ταχύτητα ανέμου

c_{dir} : συντελεστής διεύθυνσης

c_{season} : συντελεστής εποχικότητας

Συνεπώς :

$$v_b = 1.0 \times 1.0 \times 33 = 33 \text{ m/s}$$

Το φορτίο ανέμου προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$w_e = q_{ref} \times C_e(z_e) \times [C_{pe} \text{ ή } C_{fe}] \times A$$

Όπου:

q_{ref} : η πίεση αναφοράς που αντιστοιχεί στη μέση ταχύτητα αναφοράς ανέμου

ρ : πυκνότητα αέρα $1,25 \text{ kg/m}^3$

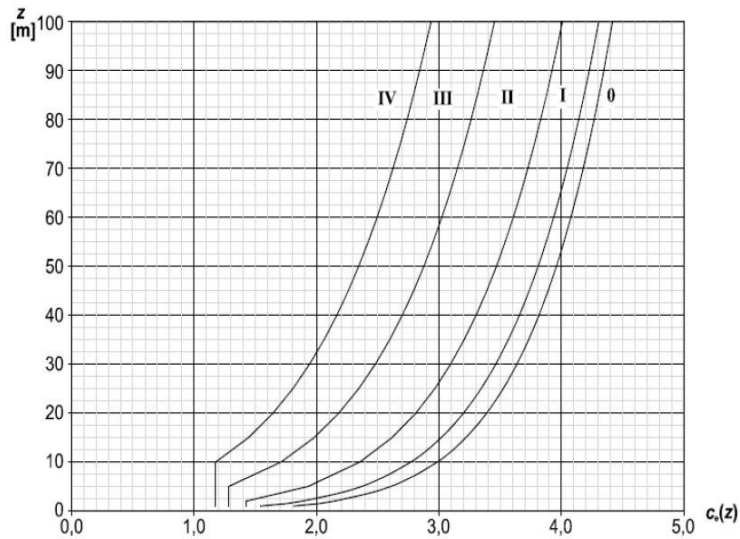
Επομένως:

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \times \rho \times v_b^2 = \frac{1}{2} \times 1,25 \times 33^2 = 680,63 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

$C_e(z_e)$: ο συντελεστής έκθεσης. Ο συντελεστής αυτός σχετίζεται με την κατηγορία εδάφους και με την τραχύτητα. Στην περίπτωση μας η κατηγορία εδάφους λαμβάνεται ως IV και από το διάγραμμα για ύψος κατασκευής περίπου 3m, προκύπτει τιμή συντελεστή = 1,2 (ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1)

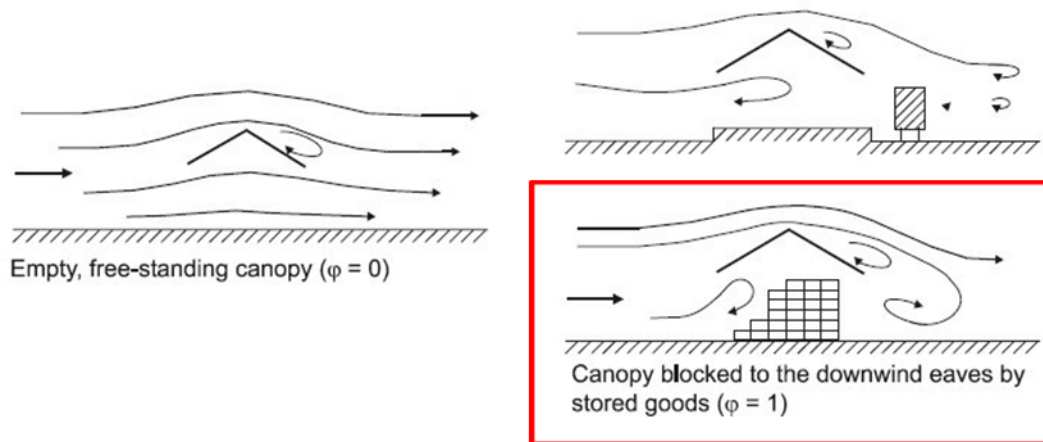
| Κατηγορία εδάφους | | z_o (m) | z_{min} (m) |
|-------------------|--|-----------|---------------|
| 0 | Θάλασσα ή παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα | 0,003 | 1 |
| I | Λίμνες ή επίπεδες και οριζόντιες περιοχές με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια | 0,01 | 1 |
| II | Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτήρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων | 0,05 | 2 |
| III | Περιοχή με κανονική κάλυψη βλάστησης ή με κτήρια ή με μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση) | 0,3 | 5 |
| IV | Περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται με κτήρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15m. | 1,0 | 10 |

Πίνακας 3.1: Κατηγορίες Εδάφους



Εικόνα 3.16: Γράφημα συντελεστή έκθεσης

C_{pe} : είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης, οι τιμές του οποίου λαμβάνονται από τον πιν.6.7 του EC1 για μονοκλινή στέγαστρα και συγκεκριμένα για γωνία $\alpha=(45^\circ)$ και $\varphi=1$



Εικόνα 3.17: Συντελεστής εξωτερικής πίεσης

Σύμφωνα με τον EC1, ο υπολογισμός του φορτίου ανέμου απαιτεί την χρήση συντελεστών C_f ή $C_{p,net}$. Η χρήση του συντελεστή C_f αποτελεί ουσιαστικά την συνολική δύναμη που εφαρμόζεται στην κατασκευή.

| | | | Net Pressure coefficients $c_{p,net}$ | | |
|---------------------|-----------------------|----------------------------------|---|--------|--------|
| | | | Key plan | | |
| Roof angle α | Blockage φ | Overall Force Coefficients c_f | Zone A | Zone B | Zone C |
| 0° | Maximum all φ | + 0,2 | + 0,5 | + 1,8 | + 1,1 |
| | Minimum $\varphi = 0$ | - 0,5 | - 0,6 | - 1,3 | - 1,4 |
| | Minimum $\varphi = 1$ | - 1,3 | - 1,5 | - 1,8 | - 2,2 |
| 5° | Maximum all φ | + 0,4 | + 0,8 | + 2,1 | + 1,3 |
| | Minimum $\varphi = 0$ | - 0,7 | - 1,1 | - 1,7 | - 1,8 |
| | Minimum $\varphi = 1$ | - 1,4 | - 1,6 | - 2,2 | - 2,5 |
| 10° | Maximum all φ | + 0,5 | + 1,2 | + 2,4 | + 1,6 |
| | Minimum $\varphi = 0$ | - 0,9 | - 1,5 | - 2,0 | - 2,1 |
| | Minimum $\varphi = 1$ | - 1,4 | - 2,1 | - 2,6 | - 2,7 |
| 15° | Maximum all φ | + 0,7 | + 1,4 | + 2,7 | + 1,8 |
| | Minimum $\varphi = 0$ | - 1,1 | - 1,8 | - 2,4 | - 2,5 |
| | Minimum $\varphi = 1$ | - 1,4 | - 1,6 | - 2,9 | - 3,0 |
| 20° | Maximum all φ | + 0,8 | + 1,7 | + 2,9 | + 2,1 |
| | Minimum $\varphi = 0$ | - 1,3 | - 2,2 | - 2,8 | - 2,9 |
| | Minimum $\varphi = 1$ | - 1,4 | - 1,6 | - 2,9 | - 3,0 |
| 25° | Maximum all φ | + 1,0 | + 2,0 | + 3,1 | + 2,3 |
| | Minimum $\varphi = 0$ | - 1,6 | - 2,6 | - 3,2 | - 3,2 |
| | Minimum $\varphi = 1$ | - 1,4 | - 1,5 | - 2,5 | - 2,8 |
| 30° | Maximum all φ | + 1,2 | + 2,2 | + 3,2 | + 2,4 |
| | Minimum $\varphi = 0$ | - 1,8 | - 3,0 | - 3,8 | - 3,6 |
| | Minimum $\varphi = 1$ | - 1,4 | - 1,5 | - 2,2 | - 2,7 |
| NOTE | | | + values indicate a net downward acting wind action - values represent a net upward acting wind action | | |

Πίνακας 3.2: Συντελεστής φορτίων ανέμου

$$w_e = 680,63 \text{ kg} \times \text{m} / \text{s}^2 \times 1.2 \times 1.2 \times (3\text{m} \times 6\text{m}) = \mathbf{17.641,80 \text{ N}}$$

Πολλαπλασιάζουμε με την μισή επιφάνεια του πανιού λόγω συμμετρίας. Από την οποία τη μισή δύναμη παραλαμβάνεται από το στήριγμα του πανιού στον τοίχο.

Άρα:

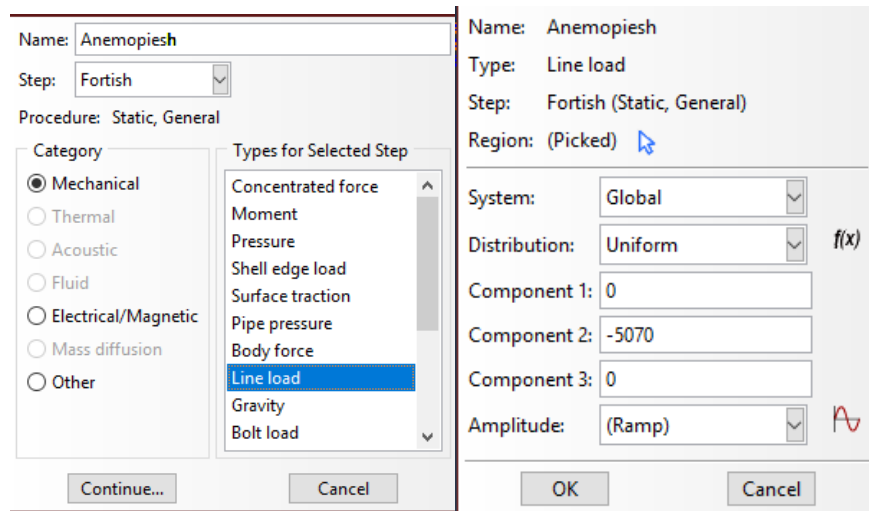
$$w = 17.641,80 \text{ N} / 2 = 8.820.90 \text{ N}$$

Στη συνέχεια για να μετατρέψω την συγκεντρωμένη δύναμη σε γραμμικό φορτίο ώστε να εφαρμοστεί κατά μήκος του αντίβαρου, διαιρώ το φορτίο με το μήκος του αντίβαρου που μελετάω.

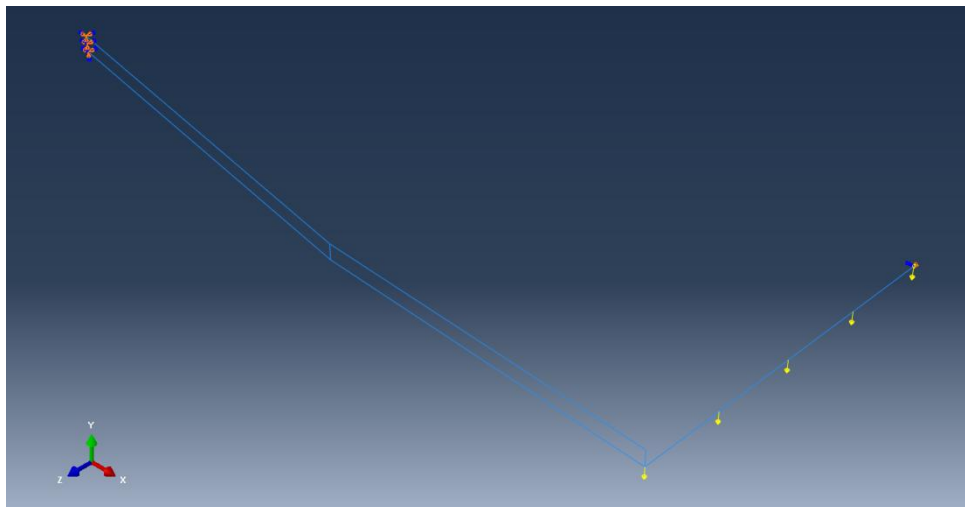
$$W = 8.820,90 \text{ N} / 3\text{m} = \mathbf{2.940 \text{ N/m}}$$

Το φορτίο εισάγετε από την καρτέλα Loads → Create Load στο κελί Step βάζουμε το Step που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα. Στην συνέχεια

επιλέγουμε Type for Selected Step → Line Load για την εφαρμογή του το τμήματος του αντίβαρου όπου εφαρμόζεται και τοποθετώ την τιμή που υπολογίστηκε με την σωστή φορά.



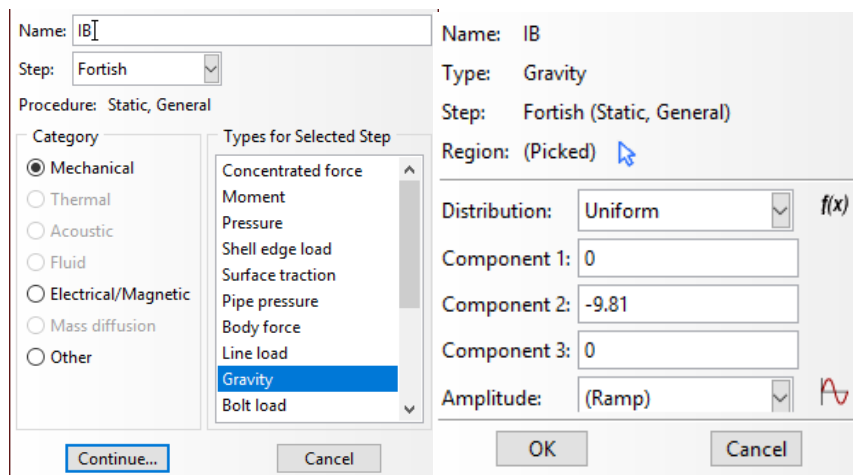
Εικόνα 3.18: Εισαγωγή φορτίο ανέμου



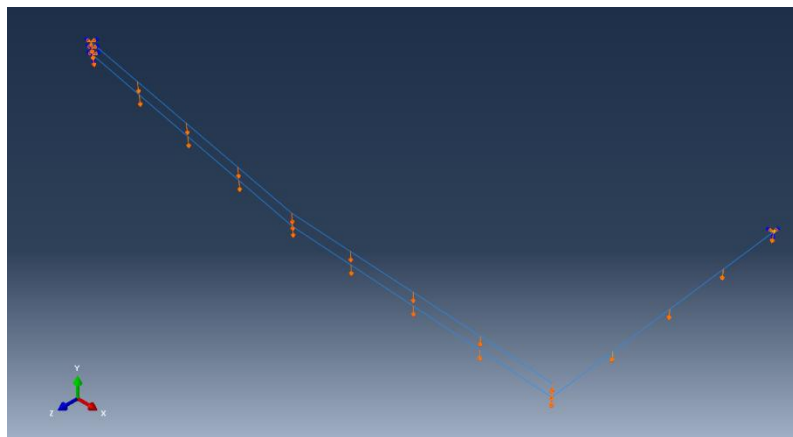
Εικόνα 3.19: Φορτίο ανέμου

Ίδιο βάρος κατασκευής:

Το ίδιο βάρος της κατασκευής εισάγετε από την καρτέλα Loads → Create Load στο κελί Step βάζουμε το Step που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα. Στην συνέχεια Type for Selected Step → Gravity όπου εισάγετε η επιτάχυνση της βαρύτητας με την σωστή φορά έτσι ώστε μαζί με την πυκνότητα και τις διαστάσεις του υλικού που εισήχθησαν στα προηγούμενα βήματα, να έχουμε το ίδιο βάρος τις κατασκευής.



Εικόνα 3.20: Εισαγωγή βάρους κατασκευής



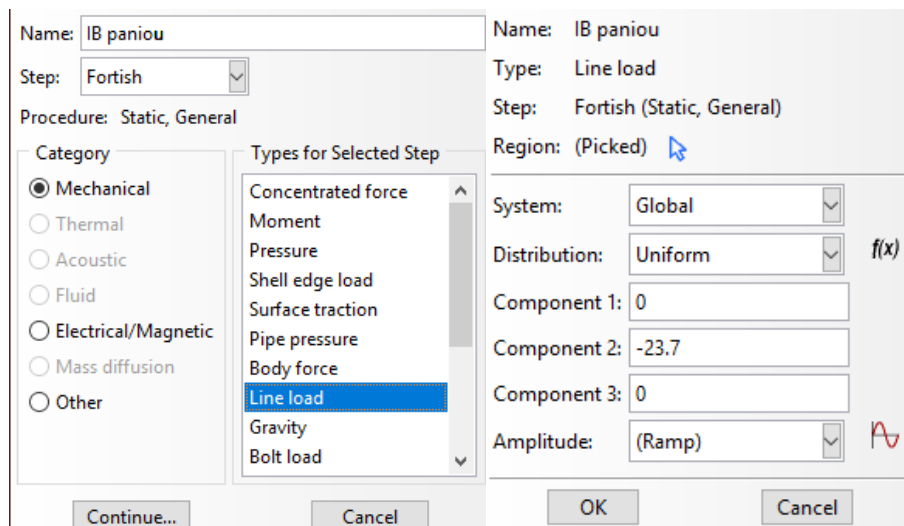
Εικόνα 3.21: Φόρτιση βάρους κατασκευής

Μια επιπλέον φόρτιση που ασκείται είναι το βάρος του πανιού της τέντας. Το πανί όπως είπαμε προηγουμένως έχει διαστάσεις 6m x 6m με πυκνότητα υλικού 0,4kg/m². Δεν στηρίζεται εξ ολοκλήρου στο σύστημα του κάθε βραχίονα αλλά ένα τμήμα του στηρίζεται στο αντίβαρο και το άλλο στηρίζεται στον τοίχο. Συνεπώς το φορτίο που μεταβιβάζεται στο αντίβαρο αντιστοιχεί σε επιφάνεια 3x6.

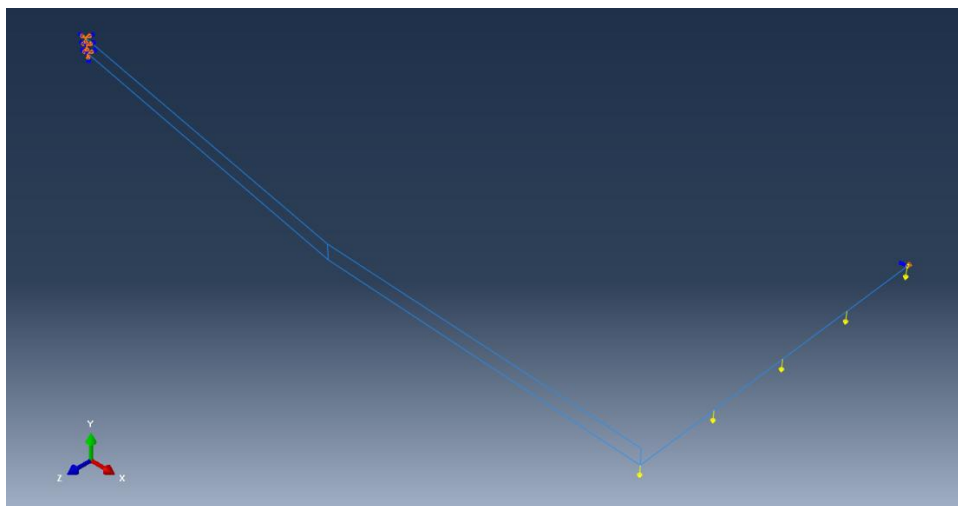
Επομένως:

$$0,4\text{kg/m}^2 \times (3\text{ m} \times 6\text{ m}) = 7,2\text{ kg} \times 9,8665\text{ m/s}^2 = 0.071\text{ kN/3m} = 23,7\text{ kN / m}$$

Το φορτίο εισάγετε από την καρτέλα Loads → Create Load και στο κελί Step βάζουμε το Step που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο βήμα. Στην συνέχεια επιλέγουμε Type for Selected Step → Line Load για την εφαρμογή του, το τμήμα του αντίβαρου όπου εφαρμόζεται και τοποθετώ την τιμή που υπολογίστηκε με την σωστή φορά.



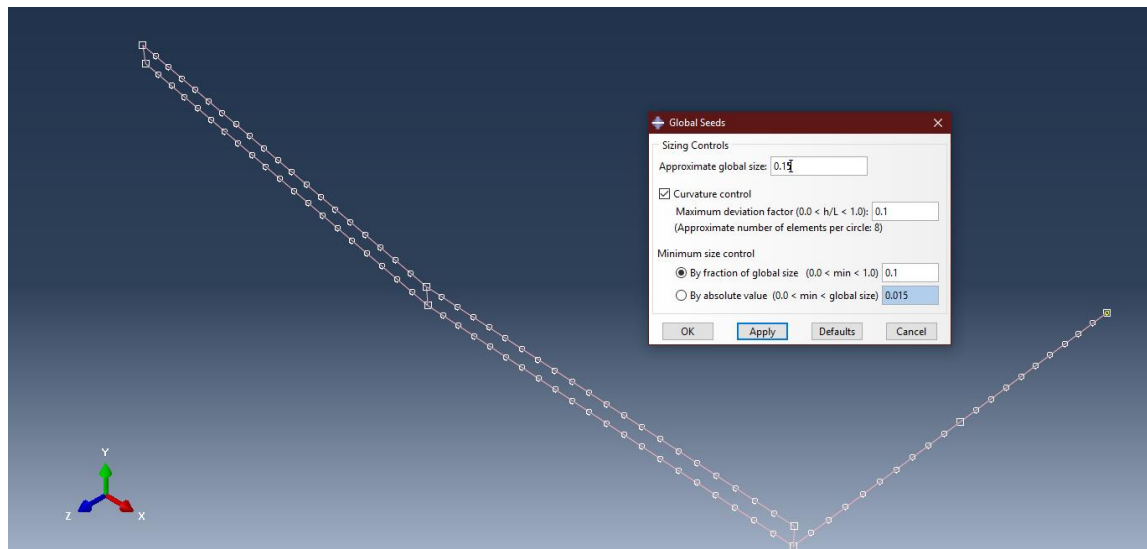
Εικόνα 3.22: Εισαγωγή θάρους πανιού



Εικόνα 3.23: Φόρτιση θάρους πανιού

3.9 Διακριτοποίηση με Πεπερασμένα Στοιχεία

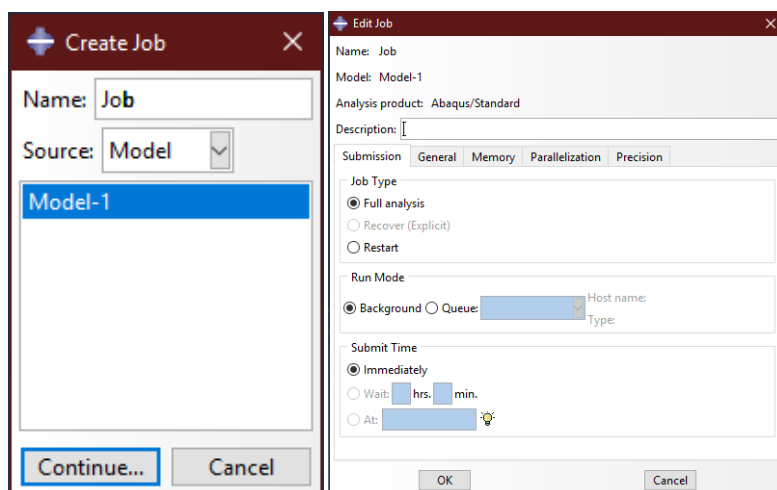
Η διακριτοποίηση των επιμέρους μελών γίνεται από την καρτέλα Mesh και η πυκνότητα της διακριτοποίησης επιλέγεται από το Seed Part Instance. Στο κελί Approximate global size τοποθετείται το μήκος (0,15) των τμημάτων που θέλουμε να έχουν τα στοιχεία της διακριτοποίησης (ΕΙΚΟΝΑ 3.24). Στην περίπτωση που θέλουμε να μειώσουμε την διακριτοποίηση αρκεί να μειώσουμε τον αριθμό αυτό. Ολοκληρώνουμε με OK. Για να δημιουργηθεί πλέον το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων επιλέγουμε το εικονίδιο Mesh Part Instance και επιβεβαιώνουμε από την περιοχή μηνυμάτων.



Εικόνα 3.24: Διακριτοποίηση Συστήματος

3.10 Δημιουργία Ανάλυσης (Job)

Αρχικά δημιουργούμε μια Job από το πεδίο Job → Create Job και επιλέγουμε το μοντέλο το οποίο έχει κατασκευαστεί στα προηγούμενα βήματα. Στην συνέχεια από το παράθυρο Edit Job επιλέγουμε στο πεδίο Job Type → Full Analysis όπως φαίνεται στην ΕΙΚΟΝΑ 3.25.



Εικόνα 3.25: Δημιουργία Εργασίας για επίλυση

Για να ξεκινήσουμε την ανάλυση επιλέγεται η εργασία (Job) που δημιουργήσαμε και στην συνέχεια με την εντολή Submit αρχίζει η διαδικασία της ανάλυσης. Όταν στο κάτω μέρος της οθόνης (Monitor) εμφανιστεί το μήνυμα Job

completed successfully, επιλέγεται πάλι η εργασία (Job) και με την εντολή Results μεταφερόμαστε στην καρτέλα των αποτελεσμάτων όπου εξάγονται οι μετατοπίσεις και οι τάσεις για το μοντέλο.

Η διαδικασία θα εκτελεστεί τρεις φορές, όσες και οι περιπτώσεις φόρτισης που μελετάμε στην συγκεκριμένη εργασία (μόνο το βάρος της τέντας, το βάρος της τέντας με ανεμοπίεση, το βάρος της τέντας με χιόνι).

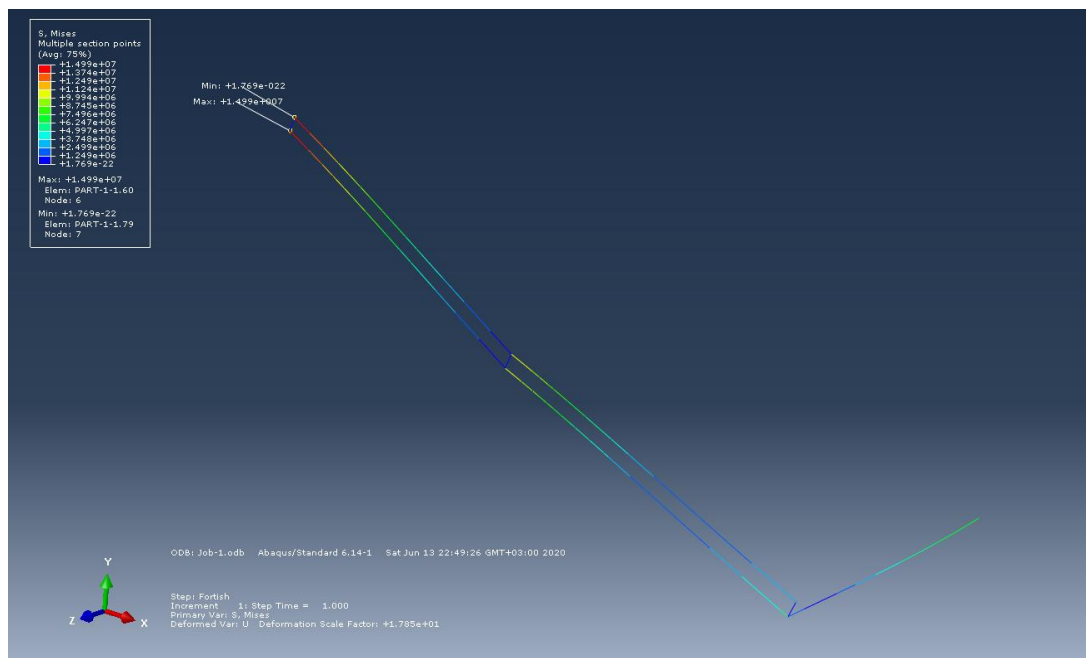
4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 Αποτελέσματα

- *Μελέτη περίπτωσης υπό γωνία 30°:*

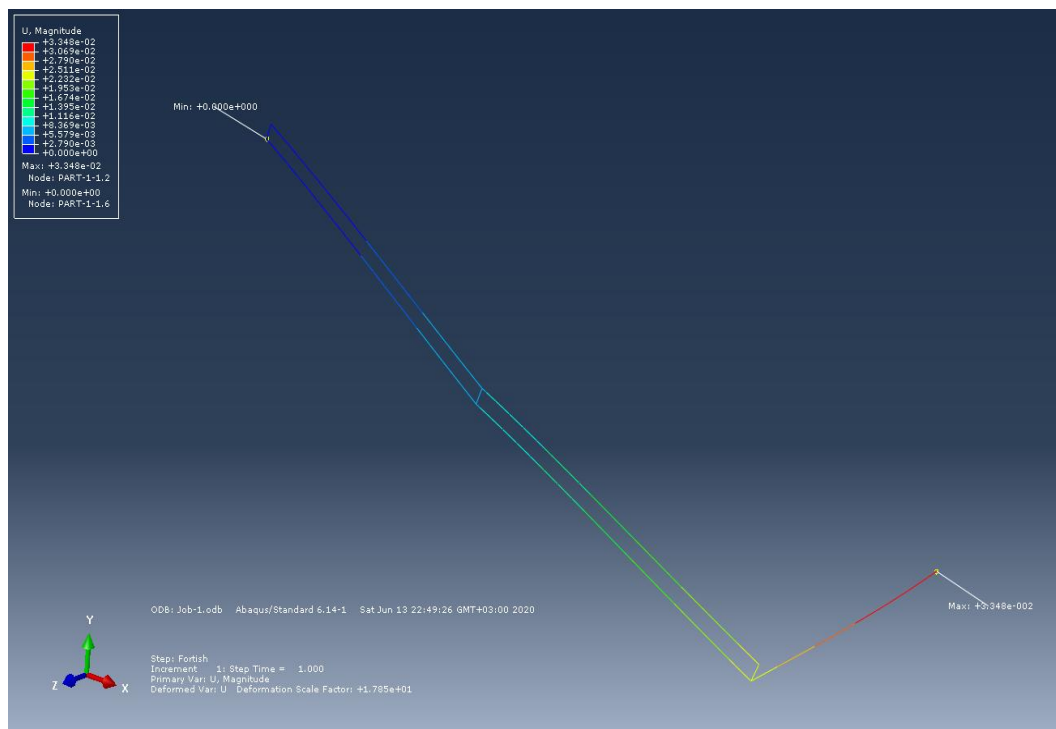
Περίπτωση φόρτισης μόνο με το Ίδιο Βάρος:

Όπως φαίνεται και στην ΕΙΚΟΝΑ 4.1 η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο σύστημα είναι ίση με $1,77 \times 10^7$ Pa, μικρότερη από την τάση διαρροής 69×10^9 Pa. Αυτό σημαίνει πως δεν έχει διαρρεύσει το υλικό, συνεπώς αντέχει το φορτίο του ίδιου βάρους τους συστήματος του βραχίονα και του πανιού. Παρατηρείται, επίσης, πως την μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων την παρουσιάζει στο κάτω μέρος του διπλού βραχίονα, μια λογική συμπεριφορά από την στιγμή που τα κατακόρυφα φορτία παραλαμβάνονται από την στήριξη σαν ζεύγος δυνάμεων με την περισσότερη ένταση να την παραλαμβάνει ο κάτω βραχίονας.



Εικόνα 4.1: Αναπαράσταση Τάσεων (Ίδιο Βάρος)

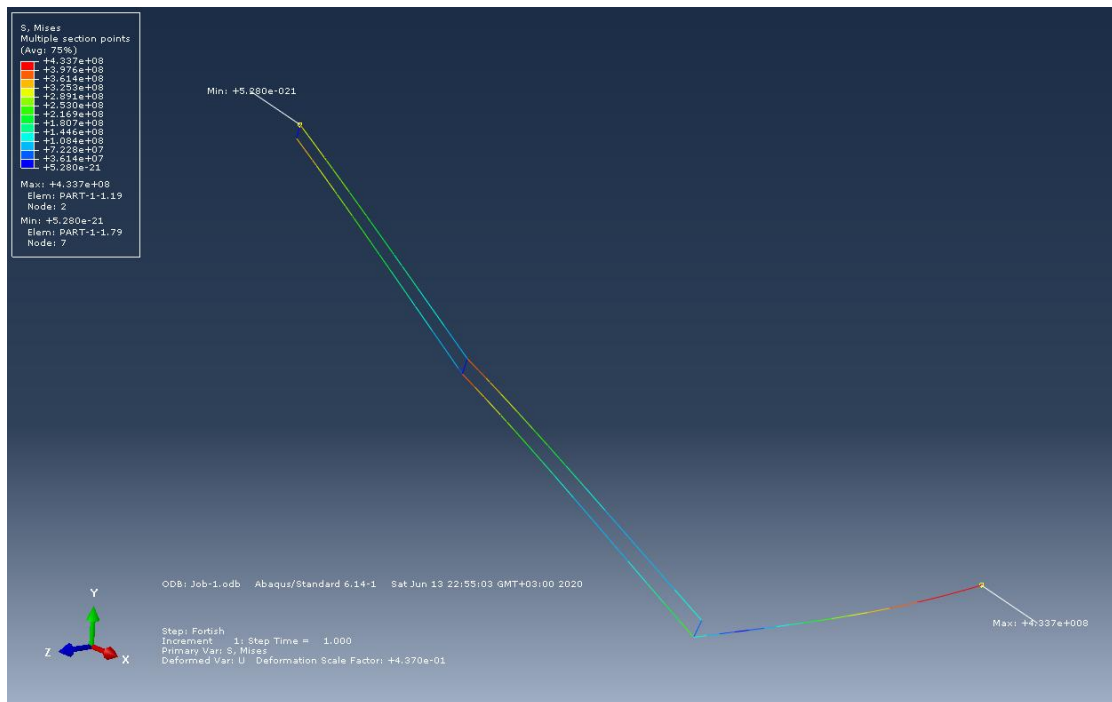
Αντίστοιχα, φαίνονται οι μετατοπίσεις όπου παρατηρείται πως οι μέγιστες 0,03m εμφανίζονται στο σημείο της συμμετρίας της κατασκευής και συγκεκριμένα στο μέσο του αντίβαρου που ασκούνται όλα τα φορτία. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το σημείο αυτό αποτελεί το πιο απομακρυσμένο από την στήριξη, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες ροπές και συνεπώς μετακινήσεις.



Εικόνα 4.2: Αναπαράσταση Μετατοπίσεων

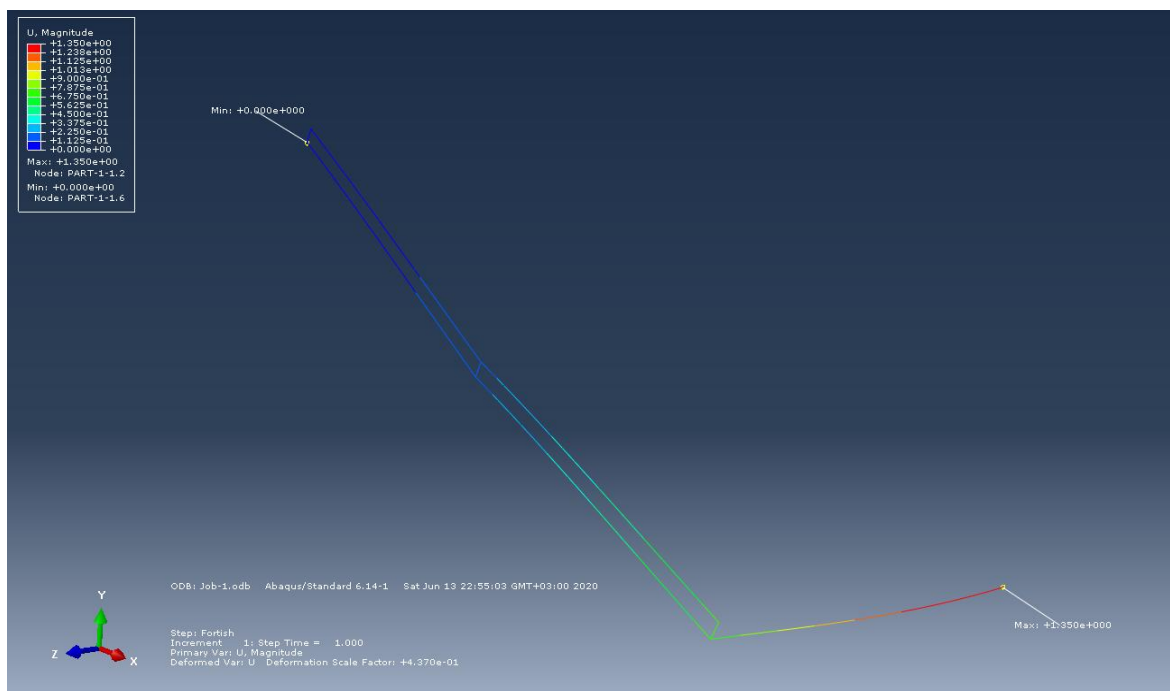
Περίπτωση φόρτισης μόνο με το Ίδιο Βάρος και Ανεμοπίεση:

Όπως φαίνεται και στην ΕΙΚΟΝΑ 4.3 η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο σύστημα είναι ίση με $4,34 \times 10^8$ Pa, μικρότερη από την τάση διαρροής 69×10^9 Pa. Αυτό σημαίνει πως δεν έχει διαρρεύσει το υλικό, συνεπώς αντέχει το φορτίο του ίδιου βάρους τους συστήματος του βραχίονα, του πανιού και την ανεμοπίεση. Από την ΕΙΚΟΝΑ παρατηρείται, ακόμα, πως την μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων την παρουσιάζει στο μέσο του αντίβαρου, το σημείο συμμετρίας αφού το φορτίο της ανεμοπίεσης μεταφέρεται εξ ολοκλήρου στο αντίβαρο.



Εικόνα 4.3: Αναπαράσταση Τάσεων (ανεμοπίεση)

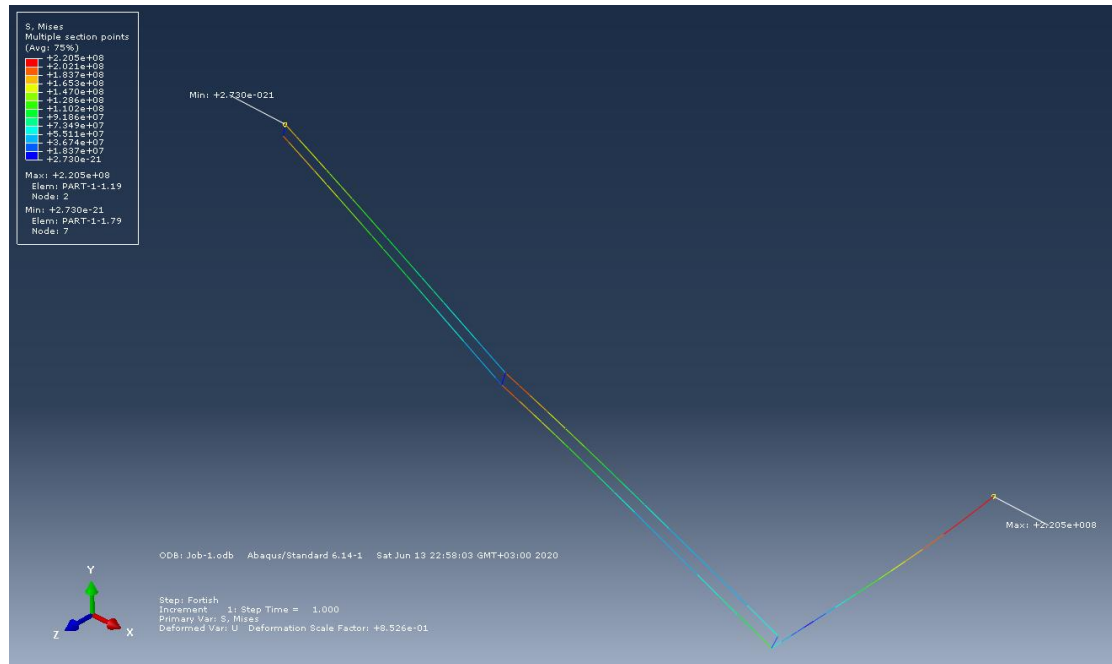
Αντίστοιχα, παρατηρείται πως οι μέγιστες μετατοπίσεις 1,35m εμφανίζονται στο σημείο της συμμετρίας της κατασκευής, και συγκεκριμένα στο μέσο του αντίβαρου που ασκούνται όλα τα φορτία. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το σημείο αυτό αποτελεί το ποιο απομακρυσμένο από την στήριξη με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες ροπές και συνεπώς μετακινήσεις.



Εικόνα 4.4: Αναπαράσταση Μετατοπίσεων

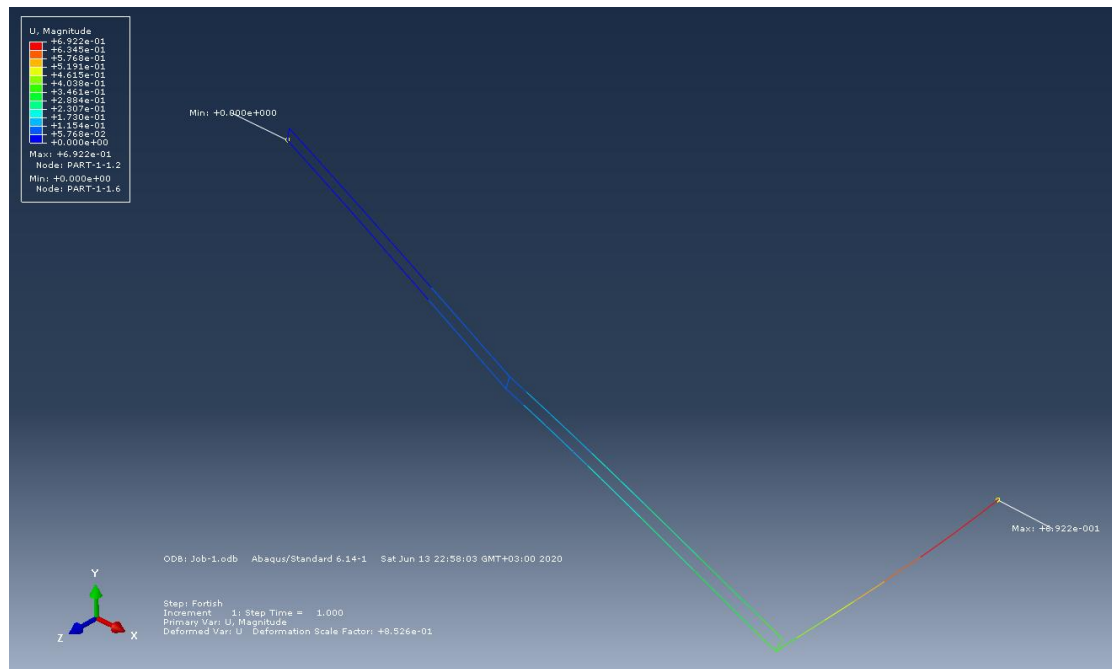
Περίπτωση φόρτισης μόνο με το Ίδιο Βάρος και Χιόνι:

Όπως φαίνεται και στην ΕΙΚΟΝΑ 4.5, η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο σύστημα είναι ίση με $2,21 \times 10^8$ Pa, μικρότερη από την τάση διαρροής 69×10^9 Pa. Αυτό σημαίνει πως δεν έχει διαρρεύσει το υλικό, συνεπώς αντέχει το φορτίο του ίδιου βάρους τους συστήματος του βραχίονα, του πανιού και το φορτίο χιονιού. Παρατηρείται, επίσης, πως την μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων την παρουσιάζει στο μέσο του αντίβαρου, το σημείο συμμετρίας αφού το φορτίο του χιονιού μεταφέρεται εξ ολοκλήρου στο αντίβαρο.



Εικόνα 4.5: Αναπαράσταση Τάσεων (φορτίο χιονιού)

Αντίστοιχα στην ΕΙΚΟΝΑ 4.6 που φαίνονται οι μετατοπίσεις, παρατηρείται πως οι μέγιστες 0,69m εμφανίζονται στο σημείο της συμμετρίας της κατασκευής και συγκεκριμένα στο μέσο του αντίβαρου που ασκούνται όλα τα φορτία. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το σημείο αυτό αποτελεί το πιο απομακρυσμένο από την στήριξη με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες ροπές και συνεπώς μετακινήσεις.

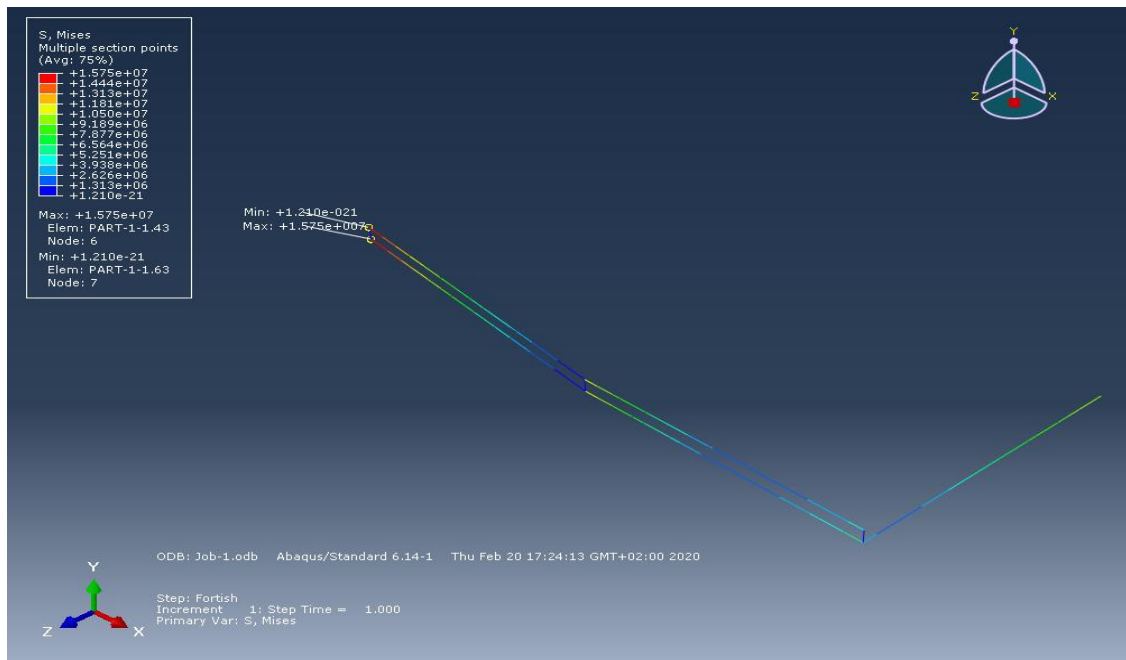


Εικόνα 4.6: Αναπαράσταση Μετατοπίσεων

- **Μελέτη περίπτωσης υπό γωνία 45°:**

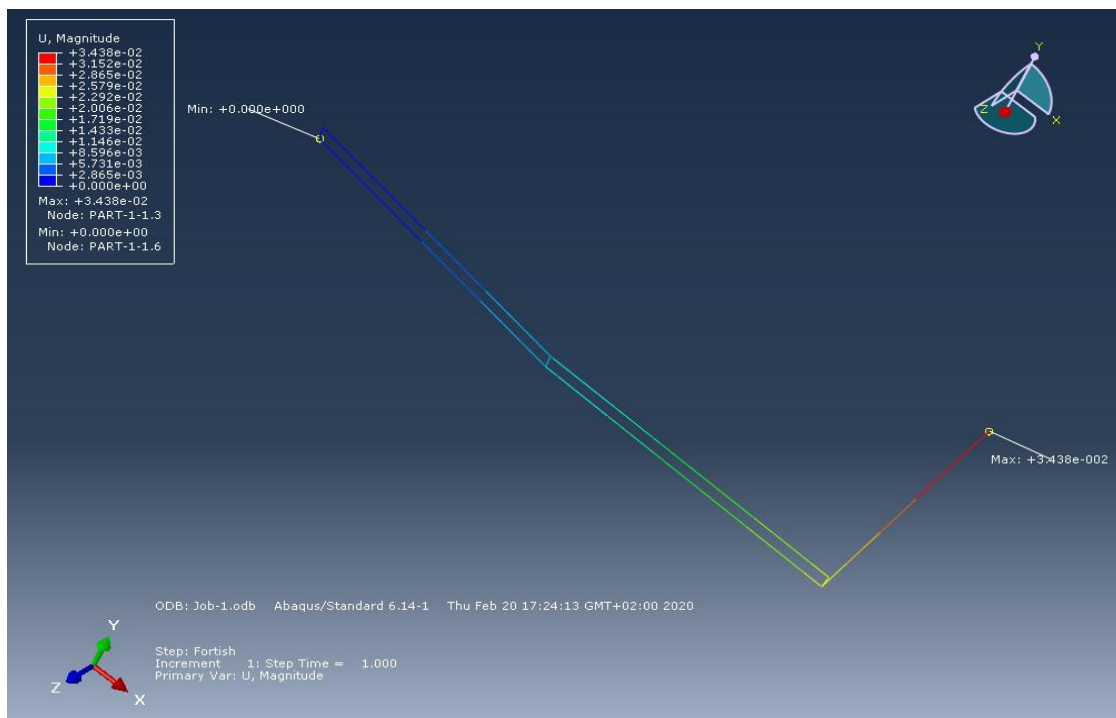
Περίπτωση φόρτισης μόνο με το Ίδιο Βάρος:

Όπως φαίνεται και στην ΕΙΚΟΝΑ 4.7 η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο σύστημα είναι ίση με $1,57 \times 10^7$ Pa, μικρότερη από την τάση διαρροής 69×10^9 Pa. Αυτό σημαίνει πως δεν έχει διαρρεύσει το υλικό, συνεπώς η κατασκευή που μελετάμε αντέχει το φορτίο βάρους του συστήματος του βραχίονα και του πανιού. Παρατηρείται, λοιπόν, πως την μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων την παρουσιάζει στο κάτω μέρος του διπλού βραχίονα. Αυτή είναι μια λογική συμπεριφορά από την στιγμή που τα κατακόρυφα φορτία παραλαμβάνονται από την στήριξη σαν ζεύγος δυνάμεων με την περισσότερη ένταση να την παραλαμβάνει το κάτω μέρος του βραχίονα.



Εικόνα 4.7: Αναπαράσταση Τάσεων (Ιδιο Βάρος)

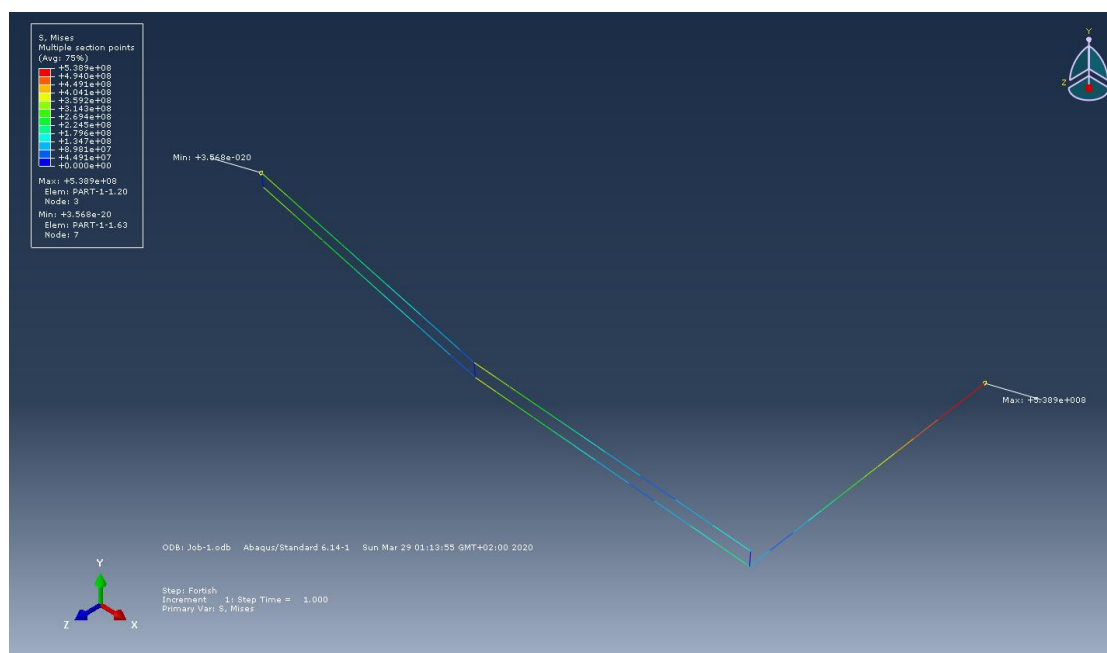
Αντίστοιχα φαίνονται οι μετατοπίσεις, όπου παρατηρείται πως οι μέγιστες 0,03m εμφανίζονται στο σημείο της συμμετρίας της κατασκευής και συγκεκριμένα στο μέσο του αντίβαρου που ασκούνται όλα τα φορτία. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το σημείο αυτό αποτελεί το πιο απομακρυσμένο σημείο από την στήριξη, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες ροπές και συνεπώς μετακινήσεις.



Εικόνα 4.8: Αναπαράσταση Μετατοπίσεων

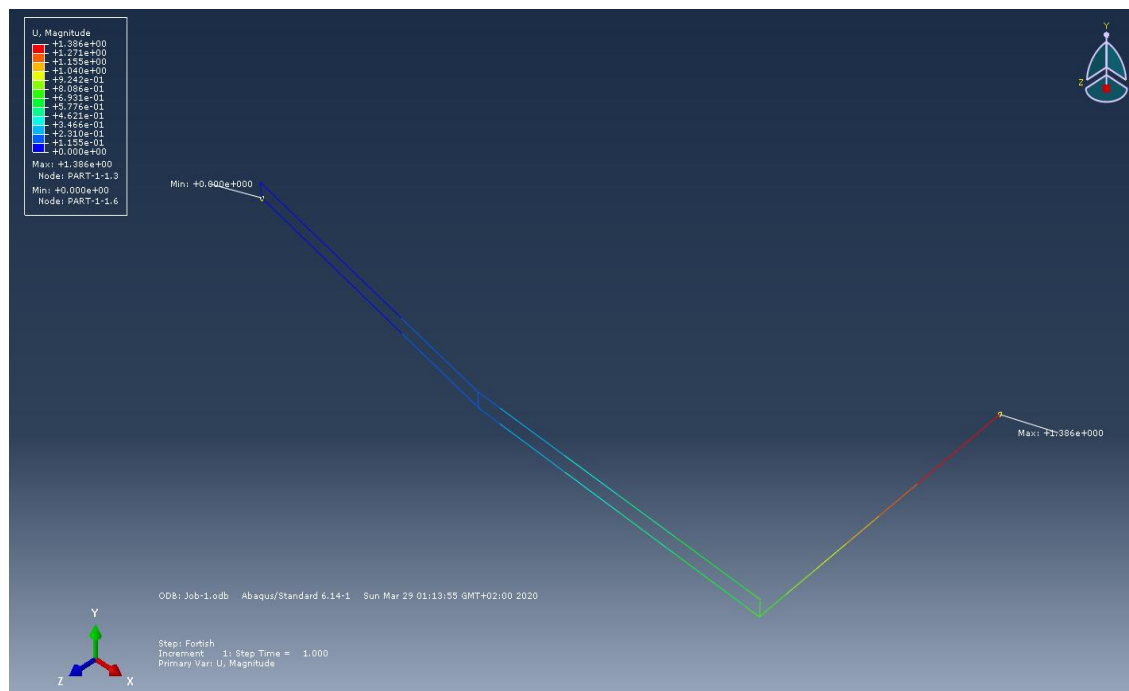
Περίπτωση φόρτισης μόνο με το Ίδιο Βάρος και Ανεμοπίεση:

Όπως παρουσιάζεται και στην ΕΙΚΟΝΑ 4.9 η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο σύστημα είναι ίση με $5,39 \times 10^8$ Pa, δηλαδή μικρότερη από την τάση διαρροής 69×10^9 Pa. Αυτό σημαίνει πως δεν έχει διαρρεύσει το υλικό, συνεπώς αντέχει το φορτίο βάρους του συστήματος του βραχίονα, του πανιού και της ανεμοπίεσης. Παρατηρείται, επίσης, πως την μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων την παρουσιάζει στο μέσο του αντίβαρου, το σημείο συμμετρίας δηλαδή αφού το φορτίο της ανεμοπίεσης μεταφέρεται εξ ολοκλήρου στο αντίβαρο.



Εικόνα 4.9: Αναπαράσταση Τάσεων (Ίδιο βάρος και Ανεμοπίεση)

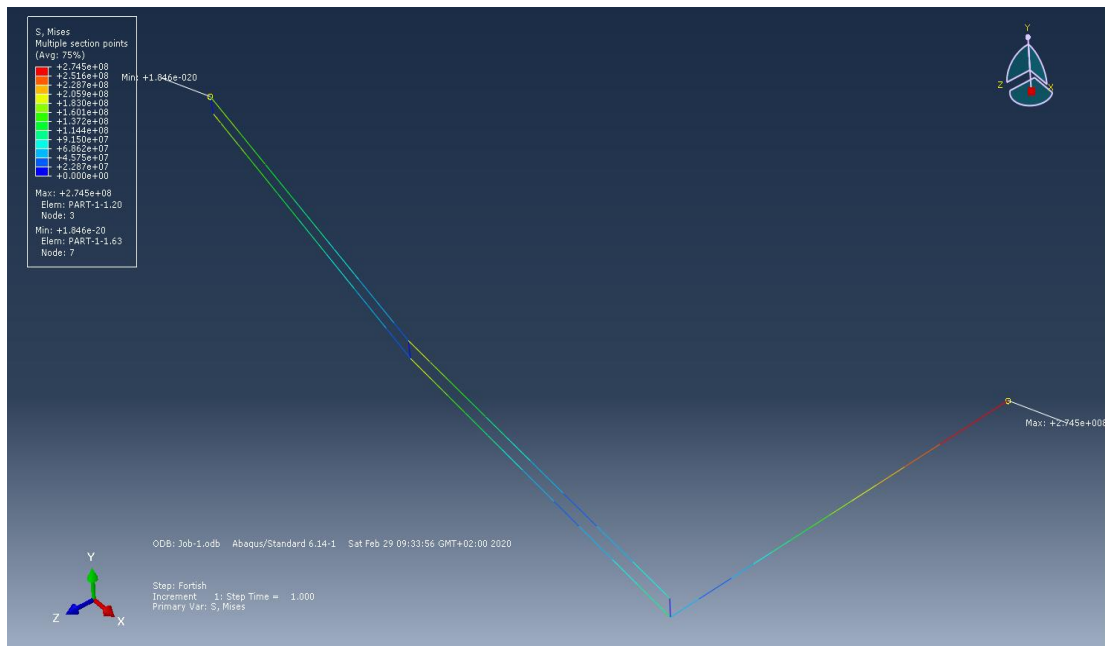
Αντίστοιχα στην ΕΙΚΟΝΑ 4.10 όπου φαίνονται οι μετατοπίσεις, παρατηρείται πως οι μέγιστες (1,38m) εμφανίζονται στο σημείο της συμμετρίας της κατασκευής και συγκεκριμένα στο μέσο του αντίβαρου που ασκούνται όλα τα φορτία. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το σημείο αυτό αποτελεί το πιο απομακρυσμένο σημείο από την στήριξη, με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες ροπές και συνεπώς μετακινήσεις.



Εικόνα 4.10: Αναπαράσταση Μετατοπίσεων (Ιδιο βάρος και Ανεμοπίεση)

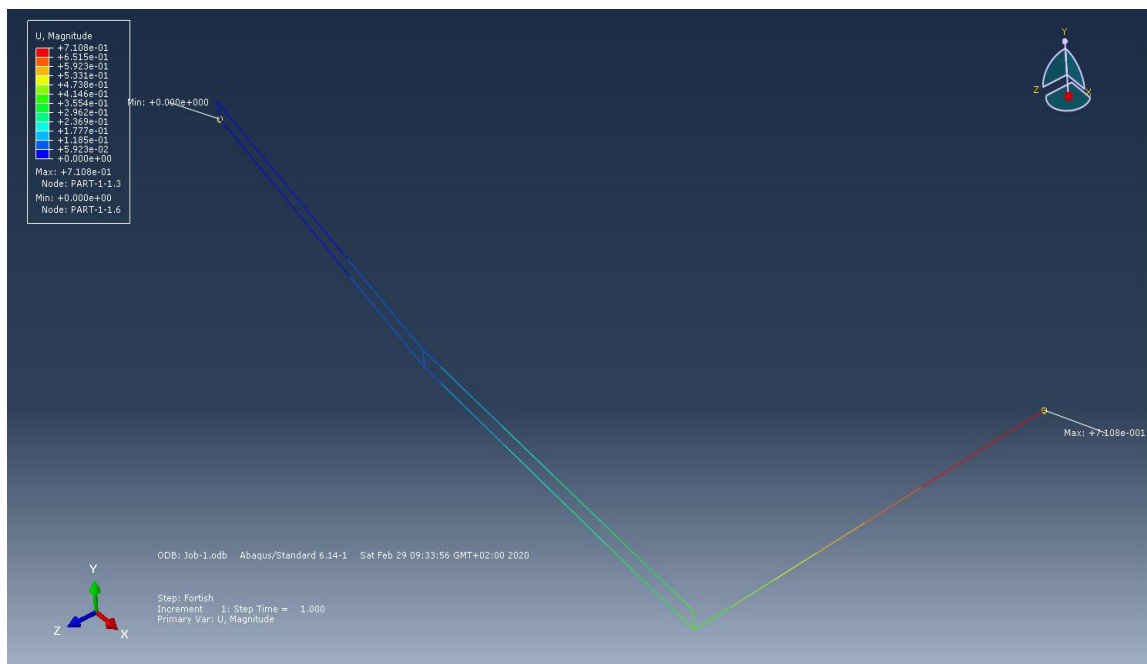
Περίπτωση φόρτισης μόνο με το Ίδιο Βάρος και Χιόνι:

Όπως φαίνεται και στην ΕΙΚΟΝΑ 4.11 η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο σύστημα είναι ίση με $2,75 \times 10^8$ Pa, επομένως μικρότερη από την τάση διαρροής 69×10^9 Pa. Αυτό σημαίνει πως δεν έχει διαρρεύσει το υλικό, συνεπώς αντέχει το φορτίο βάρους του συστήματος του βραχίονα, του πανιού και το φορτίο χιονιού. Παρατηρείται, επίσης, πως την μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων την παρουσιάζει στο μέσο του αντίβαρου, δηλαδή το σημείο συμμετρίας αφού το φορτίο του χιονιού μεταφέρεται εξ ολοκλήρου στο αντίβαρο.



Εικόνα 4.11: Αναπαράσταση Τάσεων (ίδιο βάρος και Ανεμοπίεση)

Αντίστοιχα στην ΕΙΚΟΝΑ 4.12 που φαίνονται οι μετατοπίσεις, παρατηρείται ακόμα πως οι μέγιστες (0,71m) εμφανίζονται στο σημείο της συμμετρίας της κατασκευής και συγκεκριμένα στο μέσο του αντίβαρου που ασκούνται όλα τα φορτία. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το σημείο αυτό αποτελεί το ποιο απομακρυσμένο από την στήριξη με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες ροπές και συνεπώς μετακινήσεις.

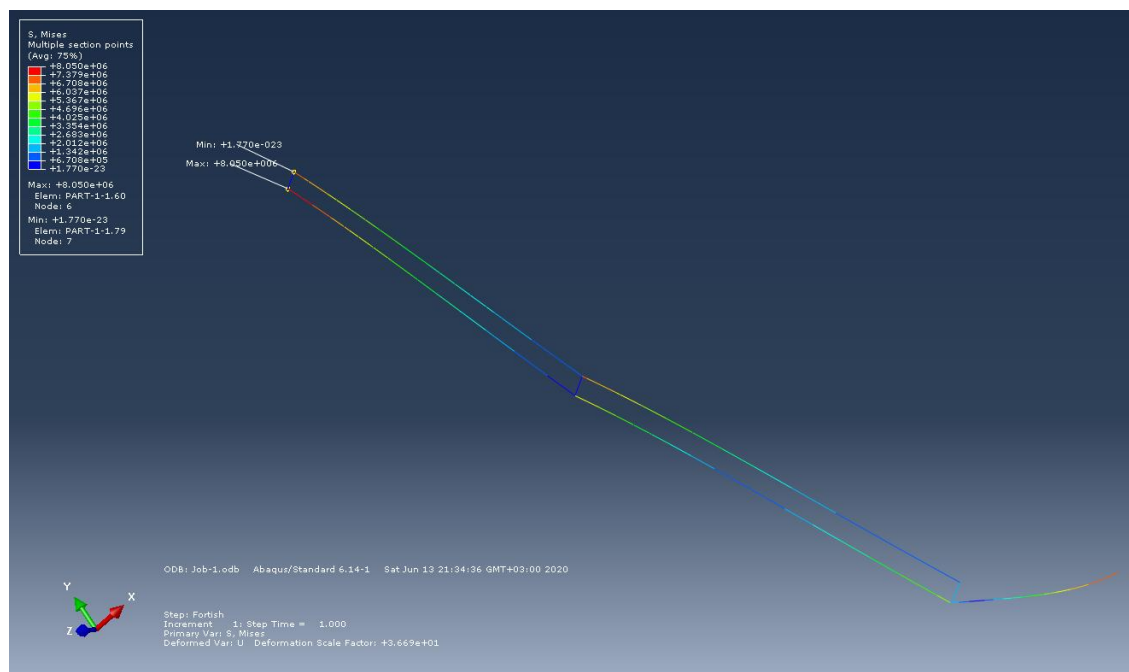


Εικόνα 4.12: Αναπαράσταση Μετατοπίσεων (ίδιο βάρος και Χιόνι)

- *Μελέτη περίπτωσης υπό γωνία 60°:*

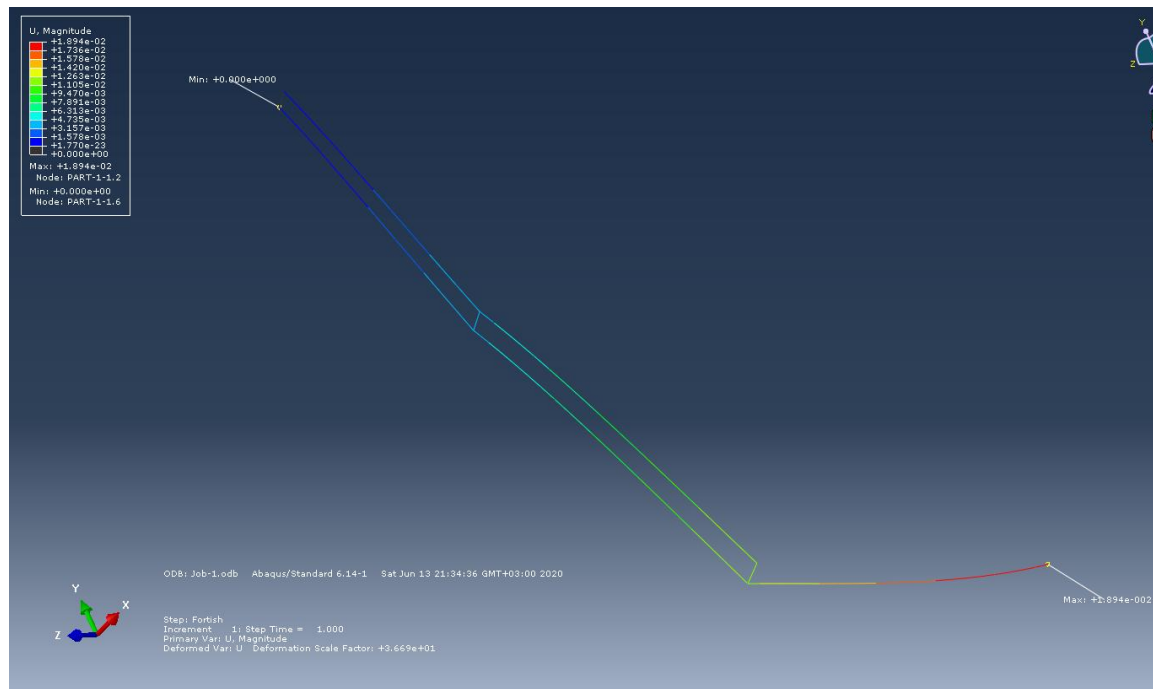
Περίπτωση φόρτισης μόνο με το Ίδιο Βάρος:

Όπως φαίνεται και στην ΕΙΚΟΝΑ 4.13 η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο σύστημα είναι ίση με $8,05 \times 10^6$ Pa, μικρότερη από την τάση διαρροής 69×10^9 Pa. Συνεπάγεται πως δεν έχει διαρρεύσει το υλικό, συνεπώς αντέχει το φορτίο του ίδιου βάρους τους συστήματος του βραχίονα και του πανιού. Από την ΕΙΚΟΝΑ , επιπλέον, παρατηρείται πως την μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων την παρουσιάζει στο κάτω μέρος του διπλού βραχίονα, λογική συμπεριφορά από την στιγμή που τα κατακόρυφα φορτία παραλαμβάνονται από την στήριξη σαν ζεύγος δυνάμεων με την περισσότερη ένταση να την παραλαμβάνει ο κάτω βραχίονας.



Εικόνα 4.13: Αναπαράσταση Τάσεων (Ίδιο Βάρος)

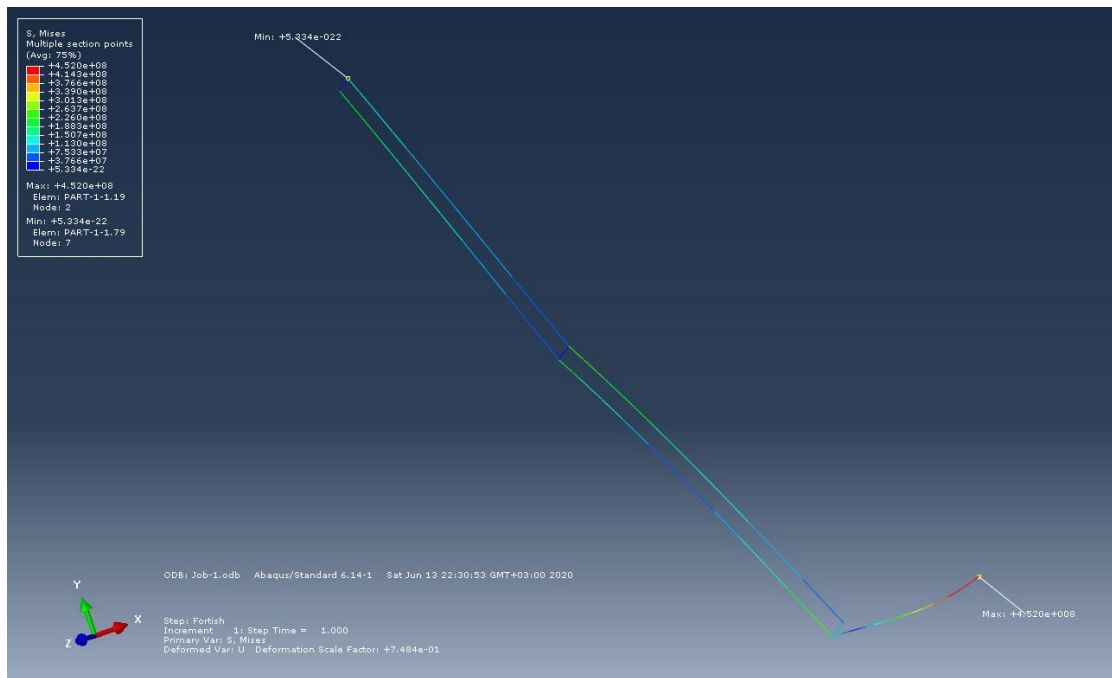
Αντίστοιχα στην ΕΙΚΟΝΑ 4.14 όπου φαίνονται οι μετατοπίσεις, παρατηρείται πως οι μέγιστες 0,02m εμφανίζονται στο σημείο της συμμετρίας της κατασκευής και συγκεκριμένα στο μέσο του αντίβαρου που ασκούνται όλα τα φορτία. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς το σημείο αυτό αποτελεί το πιο απομακρυσμένο από την στήριξη με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες ροπές και συνεπώς μετακινήσεις.



Εικόνα 4.14: Αναπαράσταση Μετατοπίσεων

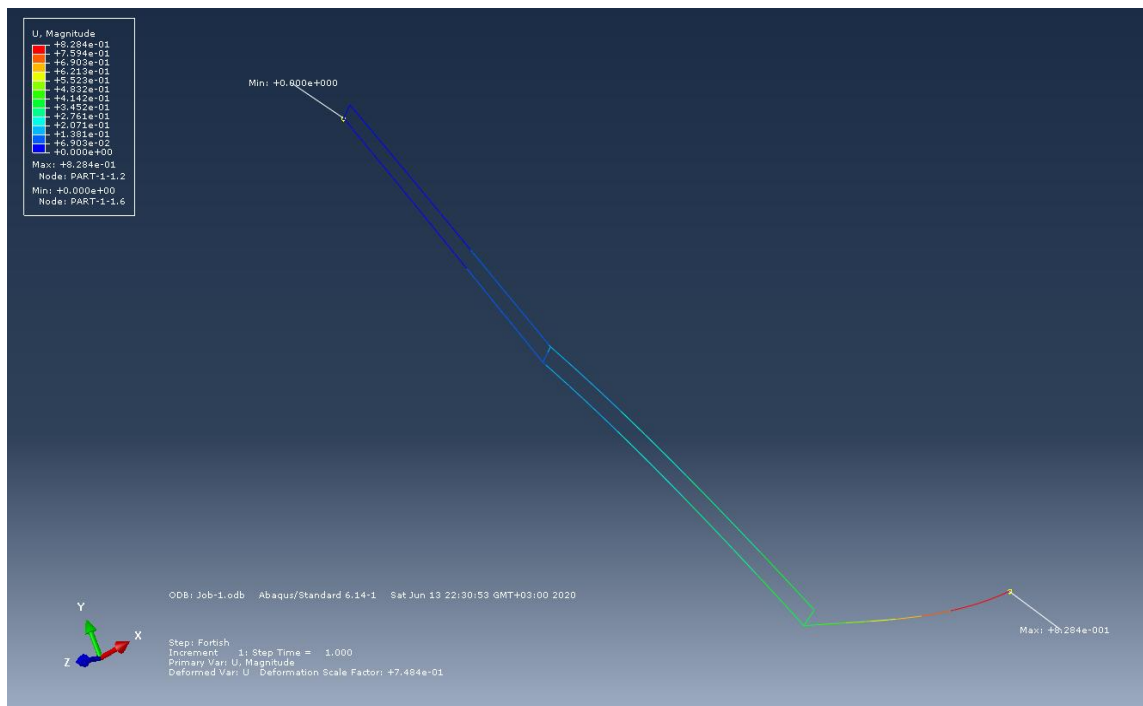
Περίπτωση φόρτισης μόνο με το Ίδιο Βάρος και Ανεμοπίεση:

Όπως φαίνεται και στην ΕΙΚΟΝΑ η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο σύστημα είναι ίση με $4,52 \times 10^8$ Pa. Σαφώς, είναι μικρότερη από την τάση διαρροής 69×10^9 Pa, που σημαίνει ότι δεν έχει διαρρεύσει το υλικό. Επομένως, αντέχει το φορτίο του ίδιου βάρους τους συστήματος του βραχίονα, του πανιού και την ανεμοπίεση. Παρατηρείται, ακόμα, πως την μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων την παρουσιάζει στο μέσο του αντίβαρου, το σημείο συμμετρίας αφού το φορτίο της ανεμοπίεσης μεταφέρεται εξ ολοκλήρου στο αντίβαρο.



Εικόνα 4.15: Αναπαράσταση Τάσεων (ανεμοπίεση)

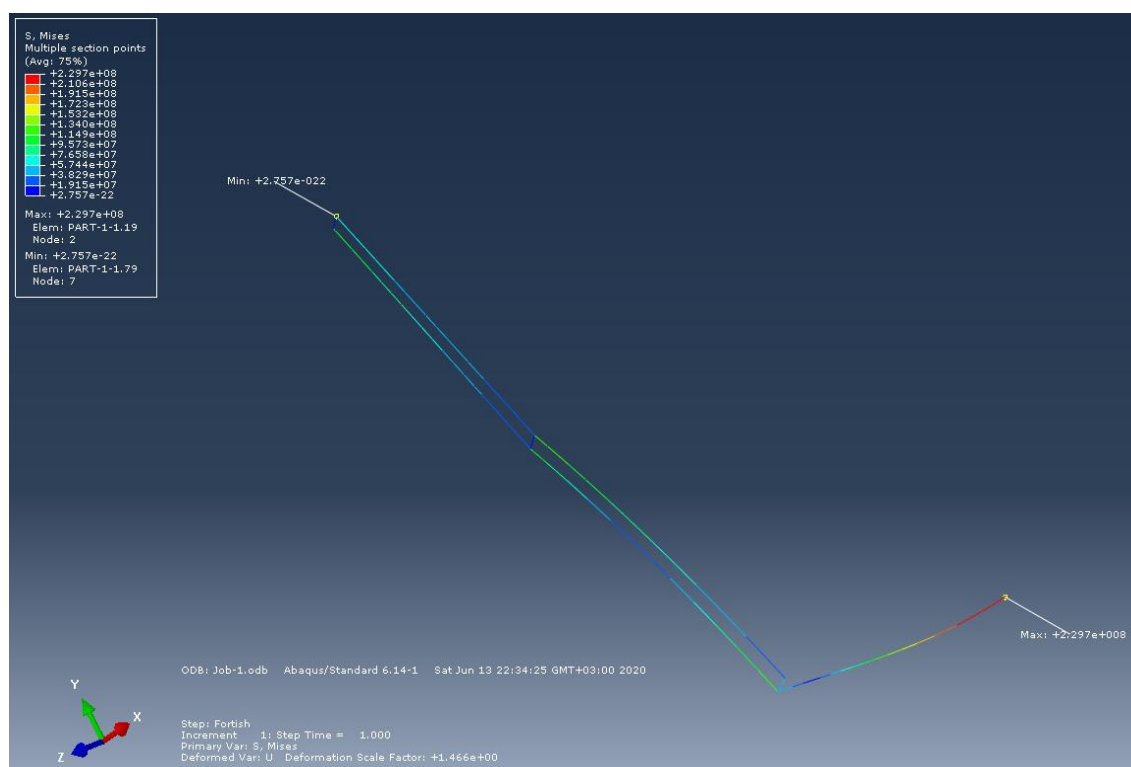
Αντίστοιχα στην ΕΙΚΟΝΑ 4.16 που φαίνονται οι μετατοπίσεις, παρατηρείται πως οι μέγιστες 0,82m εμφανίζονται στο σημείο της συμμετρίας της κατασκευής συγκεκριμένα στο μέσο του αντίβαρου που ασκούνται όλα τα φορτία. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το σημείο αυτό αποτελεί το πιο απομακρυσμένο από την στήριξη με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες ροπές και συνεπώς μετακινήσεις.



Εικόνα 4.16: Αναπαράσταση Μετατοπίσεων

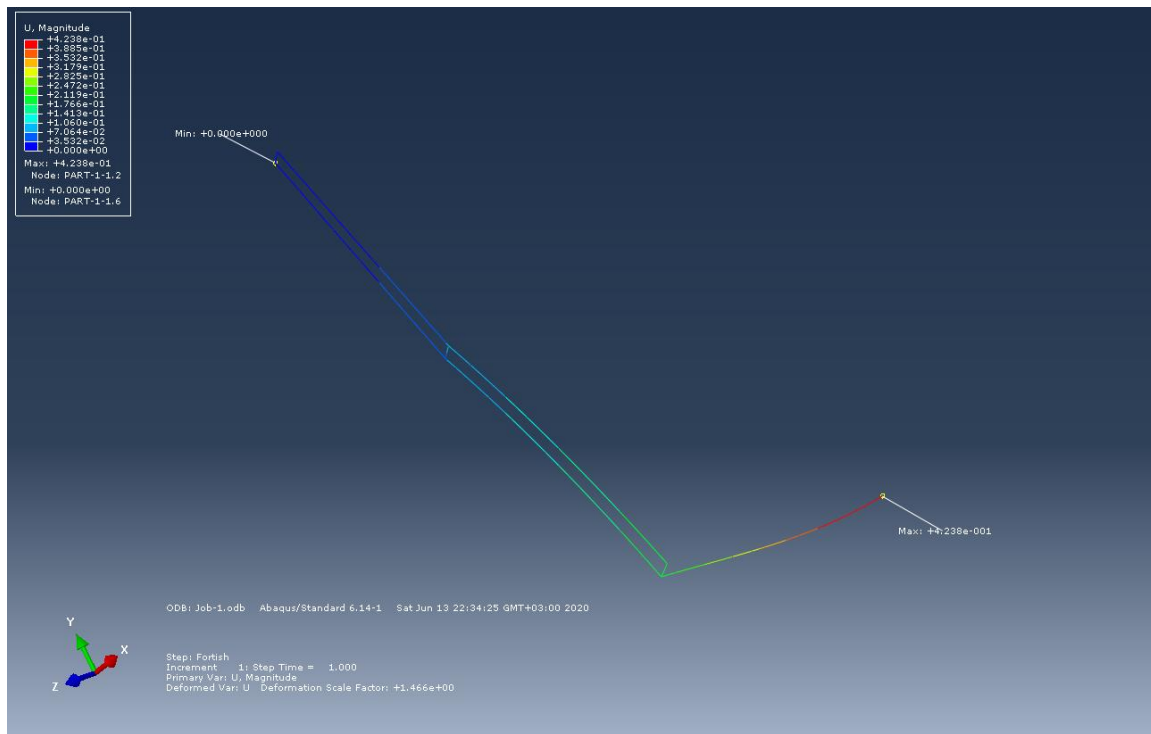
Περίπτωση φόρτισης μόνο με το Ίδιο Βάρος και Χιόνι:

Όπως φαίνεται και στην ΕΙΚΟΝΑ 4.17, η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο σύστημα είναι ίση με $2,30 \times 10^8$ Pa, δηλαδή μικρότερη από την τάση διαρροής 69×10^9 Pa. Επομένως, πως δεν έχει διαρρεύσει το υλικό, άρα η κατασκευή αντέχει το φορτίο του ίδιου βάρους τους συστήματος του βραχίονα, του πανιού και το φορτίο χιονιού. Επιπλέον, παρατηρείται πως την μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων την παρουσιάζει στο μέσο του αντίβαρου, το σημείο συμμετρίας αφού το φορτίο του χιονιού μεταφέρεται εξ ολοκλήρου στο αντίβαρο.



Εικόνα 4.17: Αναπαράσταση Τάσεων (φορτίο χιονιού)

Αντίστοιχα στην ΕΙΚΟΝΑ 4.18, όπου φαίνονται οι μετατοπίσεις παρατηρείται πως οι μέγιστες 0,42m εμφανίζονται στο σημείο συμμετρίας της κατασκευής και συγκεκριμένα στο μέσο του αντίβαρου που ασκούνται όλα τα φορτία. Αποτέλεσμα αναμενόμενο, καθώς το σημείο αυτό αποτελεί το πιο απομακρυσμένο από την στήριξη με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες ροπές και συνεπώς μετακινήσεις.

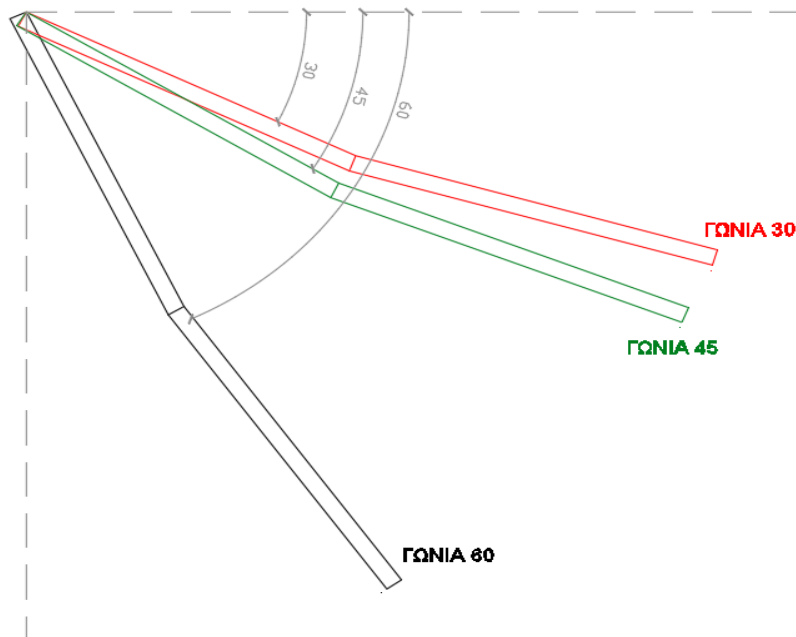


Εικόνα 4.18: Αναπαράσταση Μετατοπίσεων

4.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Το μοντέλο της κατασκευής μελετήθηκε σε ακραίες συνθήκες καιρικών φαινομένων, καθώς και στο μέγιστο πιθανό μήκος παραγωγής του. Στα τρία αυτά σενάρια που αναλύθηκαν, και ο μηχανισμός του διπλού βραχίονα και το αντίβαρο αντέχουν το φορτίο που τους ασκείται, καθόσον δεν υπήρχε αστοχία υλικού.

Και στις τρεις περιπτώσεις, λοιπόν, καθώς και για τις γωνίες που αναλύθηκαν, στο μηχανισμό του διπλού βραχίονα και στο αντίβαρο δεν παρατηρήθηκε αστοχία υλικού, αφού οι τάσεις δεν ξεπέρασαν σε καμία από τις περιπτώσεις το μέτρο ελαστικότητας του.



Εικόνα 4.19: Θέσεις τοποθέτησης της βάσης του διπλού βραχίονα

- 1) **Μελέτη περίπτωσης Ίδιου βάρους κατασκευής:** Για τη περίπτωση φόρτισης μόνο με τα ίδια βάρη (συστήματος βραχίονα, πανιού τέντας) παρατηρούμε πώς η μεγαλύτερη τάση είναι $1,77 \times 10^7$ Pa και εμφανίζεται υπό γωνία κλίσης (30°), ενώ η μικρότερη είναι $8,05 \times 10^6$ Pa και εμφανίζεται υπό γωνία κλίσης (60°). Η μετατόπιση για όλες τις περιπτώσεις της ανάλυσης είναι μεταξύ 0,02 – 0,03 m.
- 2) **Μελέτη περίπτωσης Ανεμοπίεση:** Για την ανάλυση στην περίπτωση της ανεμοπίεσης, παρατηρούμε πως από τις τρεις θέσης μελέτης του συστήματος η δυσμενέστερη θέση, δηλαδή αυτή με τις υψηλότερες τιμές σε επίπεδο τάσεων ($5,39 \times 10^8$ Pa) και μετατοπίσεων (1,38 m) είναι υπό γωνία κλίσης (45°), διότι τα φορτία που εφαρμόζονται στον βραχίονα έχουν μεγαλύτερη απόσταση από την στήριξη της τέντας (μοχλοβραχίονας) με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται μεγαλύτερη ροπή στο σύστημα και συνεπώς μεγαλύτερη μετατόπιση.
- 3) **Μελέτη περίπτωσης Φορτίο Χιονιού:** Για την ανάλυση στην περίπτωση του φορτίου από χιόνι, οι θέσεις τοποθέτησης του συστήματος δεν μας δίνουν τεράστιες διαφορές στο πεδίο των τάσεων. Στο πεδίο των παραμορφώσεων βλέπουμε πως η γωνία των 60° παρουσιάζει την μικρότερη μετατόπιση, αποτέλεσμα, όμως, αναμενόμενο καθώς η ροπή που δημιουργεί το βάρος του χιονιού που μεταφέρετε από το βραχίονα είναι μικρότερη λόγω της μικρής απόστασης από την βάση στήριξης του συστήματος σκίασης (μοχλοβραχίονα).

Οι τιμές των μετατοπίσεων για την μελέτη της πρώτης περίπτωσης είναι αναμενόμενες και λογικές, ενώ στις περιπτώσεις για το φορτίο χιονιού και το φορτίο ανέμου οι τιμές θεωρούνται μεγάλες. Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα το σύστημα του διπλού βραχίονα και για τις δύο περιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων (άνεμος, χιόνι) συμπεριφέρεται καλύτερα υπό γωνία κλίσης (60°). Παρόλα αυτά, ακόμα και στην βέλτιστη θέση οι μετατοπίσεις είναι αρκετά μεγάλες.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, όμως, η τέντα δεν θα ήταν ανοιχτή, καθώς συστήνεται αυστηρά από τους κατασκευαστές σε ακραίες καιρικές συνθήκες να προστατεύεται μένοντας μαζεμένη (κλειστή στο ανώτερο ύψος της). Στην περίπτωση που η τέντα είναι ανοιχτή δεν συμπεριλάβαμε στο μοντέλο την αντοχή του πανιού που μεταφέρει τα φορτία στους βραχίονες.

| Φορτίο Ίδιου Βάρους | | |
|---------------------|--------------------|------------------|
| Γωνίες | Τάσεις (Pa) | Μετατοπίσεις (m) |
| 30° | $1,77 \times 10^7$ | 0,03 |
| 45° | $1,57 \times 10^7$ | 0,03 |
| 60° | $8,05 \times 10^6$ | 0,02 |

| Φορτίο Ανεμοπίεσης | | |
|--------------------|--------------------|------------------|
| Γωνίες | Τάσεις (Pa) | Μετατοπίσεις (m) |
| 30° | $4,34 \times 10^8$ | 1,35 |
| 45° | $5,39 \times 10^8$ | 1,38 |
| 60° | $4,52 \times 10^8$ | 0,82 |

| Φορτίο Χιονιού | | |
|----------------|--------------------|------------------|
| Γωνίες | Τάσεις (Pa) | Μετατοπίσεις (m) |
| 30° | $2,21 \times 10^8$ | 0,69 |
| 45° | $2,75 \times 10^8$ | 0,71 |
| 60° | $2,30 \times 10^8$ | 0,42 |

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα αναλύσεων

4.3 Προτάσεις

Σε γενικές γραμμές οι διπλοί βραχίονες είναι καλά σχεδιασμένοι από τους κατασκευαστές τους και μπορούν να ανταποκριθούν στις ανάγκες ενός συστήματος σκίασης όπως είναι οι τέντες. Οι κλιματολογικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάγκη της εργασίας, όπως αναφέραμε προηγουμένως, είναι ακραίες. Ειδικότερα στην μελέτη περίπτωσης με το φορτίο από χιόνι, είναι καταλληλότερο η τέντα να παραμένει κλειστή (στην ανώτερη θέση της). Ωστόσο, όσον αφορά τις ακραίες συνθήκες που μπορεί να εμφανιστούν υπό προϋποθέσεις, μια πρόταση θα ήταν η κατασκευή μεγαλύτερης διατομής για την αύξηση της δυσκαμψίας του μοντέλου. Επιπρόσθετά, η τοποθέτηση μεγαλύτερου αντίβαρου όπου στηρίζεται το πανί, εκτός των ορίων που ορίζουν τα μπράτσα του συστήματος των βραχιόνων, θα εξασφαλίσει την μείωση των ροπών στο κέντρο του βραχίονα και κατά συνέπεια την μεγάλη μετατόπιση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γεωργίου, Χ., (2013). *Μελέτη ευστάθιας δομικών στοιχείων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων* (Bachelor's thesis, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής, Σχολή Μηχανικής και Τεχνολογίας, Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου).
- Γκότσης Π., (2013). *Πεπερασμένα Στοιχεία*, Αθήνα: ΖΗΤΗ.
- Daryl, L. L., (2007). *A first course in the finite element method. p. cm. Includes bibliographical references and index.*
- Κουμούσης, Β., (1998). *Ανάλυση φορέων με πεπερασμένα στοιχεία. Σημειώσεις, ΕΜΠ, Αθήνα.*
- Κουφόπουλος, Σ. Α., (2017). *Στατική ανάλυση αντοχής σε αυτοφερόμενο πλαίσιο από ανθρακονήματα με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.*
- Λούκας Ν., (2018). *Στατική μελέτη βάσης βραχίονα τέντας με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων* (Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης).
- Ντουφεξής-Αμουργιανός, Κ. Σ., (2014). *Σχεδίαση και βελτιστοποίηση εξαρτήματος επιμήκυνσης οπισθίου κινητηρίου άξονα (μετατροχίου) τετράτροχου οχήματος.*
- Χριστοφή, Σ., (2008). *Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε μοντέλο πλήρους οδοντοστοιχίας με ορθοδοντικά σύρματα* (Bachelor's thesis).

Ηλεκτρονικές πηγές:

- "https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%AD%CE%B8%CE%BF%CE%B4%CE%BF%CF%82_%CF%80%CE%B5%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%B1%CF%83%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CF%89%CE%BD_%CF%83%CF%84%CE%BF%CE%B9%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%89%CE%BD", [Online].
- "<https://www.euroblinds.com.cy/>", [Online].
- "<https://www.tentokalipsi.gr/>", [Online].
- "<https://www.tenteschaniotis.gr/>", [Online].
- "<https://www.daoukliotis.gr/site/>", [Online].
- "<https://tentoepiskevi.gr/>", [Online].
- "<http://lamda.com.gr/>", [Online].
- "<http://www.marlon.gr/>", [Online].
- "<https://www.florosgroup.gr/el/home>", [Online].