



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

**Στατική μελέτη υδραυλικής περιστρεφόμενης
βάσης φωτοβολταϊκών δυο αξόνων**



Επιμέλεια: **Τζεδάκη Αικατερίνη**

Επιβλέπων: **Σταυρουλάκης Γεώργιος**

Χανιά, Οκτώβριος 2011

Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	iii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iv
1. Χρησιμότητα του φωτοβολταϊκού φαινομένου	1
1.1 Τα φωτοβολταϊκά στο ενεργειακό ισοζύγιο	2
2 Πεπερασμένα στοιχεία και προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν.	4
2.1 Ιστορικό πεπερασμένων στοιχείων.....	4
2.2 Μέθοδος Πεπερασμένων στοιχείων.....	5
2.3 Pro / ENGINEER	6
2.4 Comsol Multiphysics.....	7
3 Σχεδιασμός μοντέλου και εισαγωγή δεδομένων στο Comsol	7
3.1 Σχεδιασμός και εισαγωγή μοντέλου στο Comsol Multiphysics, αυτόνομης υδραυλικής περιστρεφόμενης βάσης δύο αξόνων τύπου trackers για φωτοβολταϊκά.	7
3.2 Πρόγραμμα Comsol.....	14
3.3 Υπολογισμός δυνάμεων και τοποθέτησης στο Comsol	15
3.3.1 Υπολογισμός του βάρους των πάνελ	15
3.3.2 Υπολογισμός των δυνάμεων που εφαρμόζονται λόγω του βάρους του χιονιού. 17	
3.3.3 Υπολογισμός ανεμοπίεσης.....	18
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	25
4.1 Μοντέλο χιονιού.	26
4.2 Μοντέλα ανεμοπίεσης.	32
4.3 Τάσεις Von Mises	50
4.3.1 Μοντέλο χιονιού	50
4.3.2 Μοντέλα Ανεμοπίεσης	51
4.4 Παραμορφώσεις.....	53
4.4.1 Μοντέλο χιονιού	53
4.4.2 Μοντέλα ανεμοπίεσης	54
5 Προβλήματα που παρουσιάστηκαν.....	56
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	57
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	58

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία μελετήθηκε μία αυτόνομη υδραυλική περιστρεφόμενη βάση δύο αξόνων για φωτοβολταϊκά τύπου tracker . Τα στοιχεία των διαστάσεων λήφθηκαν από σελίδα του διαδικτύου εταιρείας που προωθεί το συγκεκριμένο είδος κατασκευής. Διαστάσεις οι οποίες έλειπαν από το μηχανολογικό που διέθετε η εταιρεία στο κοινό, υπολογίστηκαν αναλογικά με το σχέδιο, καθώς και από τυποποιημένες διαστάσεις της αγοράς.

Η βάση αυτή σχεδιάστηκε σε περιβάλλον του προγράμματος Pro/ENGINEER και μελετήθηκε στατικά σε περιβάλλον του προγράμματος Comsol Multiphysics.

Μελετήθηκε στατικά προσθέτοντας τα βάρη των πάνελ στην κατασκευή, ενώ παράλληλα συνυπολογίστηκαν φορτίσεις από πιθανές κλιματολογικές συνθήκες και συνθήκες εδάφους. Πραγματοποιήθηκε η στατική του μελέτη υπολογίζοντας φορτίσεις από το βάρος του χιονιού σε οριζόντια θέση της σχάρας καθώς και από τη δύναμη του ανέμου στην πιο ακραία θέση κλίσης της σχάρας.

Τέλος συγκεντρώθηκαν τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα, ενώ σχολιάστηκαν τα προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους αυτούς τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας, καθώς και στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή αυτής της εργασίας, κύριο Γεώργιο Σταυρουλάκη, για την πολύτιμη βοήθειά του όλους αυτούς τους μήνες. Για την καθοδήγησή του, και την δυνατότητα που μου προσέφερε να εκπαιδευτώ στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics, καθώς και για τις γνώσεις που απέκτησα καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου στα Χανιά, αλλά και στο Ρέθυμνο, για την πίστη τους σε εμένα, όλα αυτά τα χρόνια καθώς και για τις υπέροχες στιγμές που περάσαμε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου Στέλλα και τον αδερφό μου Άρη, για την αγάπη τους, την ηθική και υλική υποστήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια. Καθώς και για όλη την προσπάθεια που κατέβαλαν και εκείνοι για εμένα.

1. Χρησιμότητα του φωτοβολταϊκού φαινομένου

Εισαγωγή

Η κατανάλωση Ενέργειας στον κτιριακό τομέα για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό κ.λπ. συμβάλλει σημαντικά στην ατμοσφαιρική ρύπανση, στο Φαινόμενο του Θερμοκηπίου και κατά συνέπεια στα ακραία καιρικά φαινόμενα που παρατηρούνται τελευταία στον πλανήτη. Είναι αξιοσημείωτο ότι το 40% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται στον κόσμο, καταναλώνεται για την ψύξη ή τη θέρμανση, καθώς και το φωτισμό κτιρίων. Καθώς οι απαιτήσεις μας για ποιότητα ζωής αλλάζουν, οι ανάγκες σε ενέργεια συνεχώς αυξάνουν. Η παραγωγή όμως της επιπλέον ενέργειας με συμβατικούς τρόπους επιβαρύνει το περιβάλλον. Η ορθολογική χρήση και εξοικονόμηση Ενέργειας (με βιοκλιματικό σχεδιασμό κτιρίων, παθητικά ηλιακά συστήματα κ.λπ.) είναι καλοί τρόποι για τον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας, αλλά υπάρχουν όρια που καθορίζονται από την ανάγκη μας για υψηλό βιοτικό επίπεδο. Κατά συνέπεια, ο μόνος τρόπος κάλυψης των επιπλέον αναγκών χωρίς να διακυβεύεται η ζητούμενη ποιότητα ζωής, είναι η στροφή σε μορφές ενέργειας που η παραγωγή τους δεν έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Οι κλιματολογικές συνθήκες, ειδικότερα στην περιοχή της Μεσογείου, ευνοούν την εκμετάλλευση ορισμένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι η ηλιακή. Η διάχυτη ακτινοβολία και η απλότητα των φωτοβολταϊκών συστημάτων δίνουν τη δυνατότητα αποκεντρωμένης παραγωγής με μεγάλο αριθμό μικρών, διάσπαρτων στο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μονάδων.

Για να εκμεταλλευτεί λοιπόν κανείς την ηλιακή ακτινοβολία πρέπει κατ' αρχάς να τη μετατρέψει σε κάποια χρησιμοποιήσιμη μορφή ενέργειας. Αυτό μπορεί να γίνει με κάποιο ηλιακό σύστημα που τη μετατρέπει είτε σε θερμική ενέργεια (με παθητικό ή ενεργητικό τρόπο) είτε σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

Το 1839, ο φυσικός Edmund Becquerel παρατήρησε για πρώτη φορά το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή τη δημιουργία διαφοράς δυναμικού σε μια πειραματική διάταξη υπό την επήρεια ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση του φαινομένου (δηλ. ο λόγος της ποσότητας του παραγόμενου ρεύματος προς την προσπίπτουσα ακτινοβολία) ήταν πολύ μικρή για οποιαδήποτε πρακτική εφαρμογή. Μετά την ανακάλυψη των ημιαγωγών, το 1954 στα Bell Laboratories των ΗΠΑ, παρατηρήθηκε ότι σε ημιαγώγιμα υλικά, όπως είναι το πυρίτιο, το φωτοβολταϊκό

φαινόμενο είναι αρκετά έντονο ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρακτικά για την παραγωγή ρεύματος σε περιοχές απομονωμένες από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Οι πρώτες εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων έγιναν στο διάστημα, ενώ οι πρώτες επίγειες εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του '70 κατά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση.

1.1 Τα φωτοβολταϊκά στο ενεργειακό ισοζύγιο

Τα φωτοβολταϊκά σήμερα είναι από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες για την περιβαλλοντικά ήπια παραγωγή ενέργειας και την απεξάρτηση από το πετρέλαιο, ενώ το κόστος τους είναι ήδη ανταγωνιστικό των συμβατικών μεθόδων παραγωγής σε αρκετές εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Αναλυτές υποστηρίζουν ότι μετά το έτος 2100 περισσότερο από το 50% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής στον κόσμο, θα προέρχεται από τον Ήλιο.

Με 30-40 τ.μ. φωτοβολταϊκών πλαισίων μπορούν να καλυφθούν πλήρως οι ανάγκες σε ρεύμα ενός μέσου νοικοκυριού στην Ελλάδα και να αυτονομηθεί, ενώ τα διασυνδεδεμένα συστήματα στον αστικό ιστό ενισχύουν το δίκτυο και μετριάζουν τις αιχμές κατανάλωσης, αφού η μέγιστη κατανάλωση, ειδικά στις μεσογειακές χώρες, παρουσιάζεται τις ώρες μέγιστης ηλιοφάνειας. Παράλληλα, κάθε εγκατεστημένο kW φωτοβολταϊκών συμβάλλει ετησίως στην αποφυγή εκπομπής περίπου 1,5 τόνου διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων, αν η ισόποση ενέργεια παραγόταν με την καύση λιγνίτη.

Πολλές χώρες έχουν δώσει ισχυρά κίνητρα για την εξάπλωση των εφαρμογών φωτοβολταϊκών συστημάτων, τα οποία οδήγησαν και στην ανάπτυξη σχετικής βιομηχανίας και νέων θέσεων εργασίας στον κλάδο. Τα κίνητρα στις περισσότερες περιπτώσεις (Γερμανία, Ισπανία, Ιταλία, Κύπρος, κάποιες πολιτείες των ΗΠΑ κ.λπ.) αφορούν την υψηλή τιμή πώλησης της ενέργειας που παράγεται από φωτοβολταϊκά προς το δίκτυο. Κάτι παρόμοιο ισχύει και στην Ελλάδα από τον Ιούλιο 2006, που ψηφίστηκε ο νόμος 3468/06 για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ).

Απλοί ιδιώτες έχουν κίνητρο να εγκαταστήσουν φωτοβολταϊκά συστήματα σε κτίρια ή άλλες διαθέσιμες επιφάνειες και να αποσβέσουν την επένδυσή τους σε λιγότερο από 10 χρόνια. Αν η επένδυση έχει τις προϋποθέσεις να ενταχθεί στον Αναπτυξιακό Νόμο, μπορεί να επιδοτηθεί κι ο χρόνος απόσβεσης μειώνεται περίπου στο μισό. Παράλληλα, τα φωτοβολταϊκά συμβάλλουν στην ενίσχυση του ηλεκτρικού δικτύου, την αποκεντρωμένη παραγωγή, την ελαχιστοποίηση των απωλειών κατά τη μεταφορά ενέργειας, καθώς η παραγωγή γίνεται κοντά στον τόπο κατανάλωσης, και την

προστασία του περιβάλλοντος από την αποφυγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που ελευθερώνονται κατά την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με συμβατικό τρόπο. Τα φωτοβολταϊκά είναι απολύτως αθόρυβα κατά τη λειτουργία, δεν έχουν κινούμενα μέρη, δεν έχουν απαιτήσεις συντήρησης, είναι επεκτάσιμα κι έχουν εγγυημένη λειτουργία για τουλάχιστον 20-30 χρόνια ενώ η διάρκεια ζωής μπορεί να ξεπερνάει τα 50 χρόνια.

Η χρήση φωτοβολταϊκών και γενικότερα ΑΠΕ θα οδηγήσει σταδιακά στην απεξάρτηση από εισαγωγές πετρελαίου και από ρυπογόνες πηγές, όπως είναι ο λιγνίτης, και στη μεσο-μακροπρόθεσμη μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας.

Στην πορεία μελετάμε στατικά μία στήριξη φωτοβολταϊκών με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 1 Βάση στήριξης φωτοβολταϊκών χωρίς πάνελ.



Εικόνα 2 Βάση στήριξης φωτοβολταϊκών με πάνελ.

2 Πεπερασμένα στοιχεία και προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν.

2.1 Ιστορικό πεπερασμένων στοιχείων

Οι βασικές έννοιες της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων προήλθαν από τις εξελίξεις στη δομική ανάλυση αεροσκαφών. Το 1941, ο Hrenikoff παρουσίασε μία λύση προβλημάτων ελαστικότητας με τη χρήση της ‘‘μεθόδου των δικτυωμάτων’’. Το 1943 δημοσιεύτηκε μία εργασία του Courant, η οποία χρησιμοποιούσε κατά τμήματα τριγωνική παρεμβολή σε τριγωνικές υποπεριοχές για να μοντελοποιήσει προβλήματα στρέψης. Οι Turner και άλλοι, δημιούργησαν μητρώα ακαμψίας για δικτυώματα, δοκούς και άλλα στοιχεία, και παρουσίασαν τα ευρήματά τους το 1956. Ο όρος πεπερασμένα στοιχεία πρωτοεμφανίστηκε και χρησιμοποιήθηκε από τον Clough το 1960.

Στις αρχές του 1960, οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν τη μέθοδο για να δώσουν προσεγγιστικές λύσεις σε προβλήματα ανάλυσης τάσεων, ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας και άλλων τομέων. Ο Αργύρης, το 1955, σε ένα βιβλίο για θεωρήματα ενέργειας και μητρωϊκές μεθόδους, έθεσε τα θέματα για μελλοντική ανάπτυξη στις

μελέτες των πεπερασμένων στοιχείων. Το πρώτο βιβλίο για πεπερασμένα στοιχεία των Zienkiewicz και Chung κυκλοφόρησε το 1967. Στα τέλη της δεκαετίας του 60' και αρχές του 70', η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόστηκε σε μη γραμμικά προβλήματα και άλλες παραμορφώσεις. Οι μαθηματικές βάσεις τέθηκαν στη δεκαετία του 70' και περιλαμβάνουν την ανάπτυξη νέων στοιχείων, μελέτες σύγκλισης και άλλους σχετικούς τομείς. (Tirupathi R. Chandrupatla 2005)

2.2 Μέθοδος Πεπερασμένων στοιχείων

Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων αποτελεί πλέον ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων του μηχανικού. Οι εφαρμογές εκτείνονται από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια και γέφυρες, μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας ροής. Με τις εξελίξεις στην τεχνολογία των Η/Υ και των συστημάτων CAD σύνθετα προβλήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν πολύ εύκολα. Διάφορες εναλλακτικές συνθέσεις μπορούν να δοκιμαστούν σε έναν Η/Υ πριν κατασκευαστεί το πρώτο πρότυπό του. Όλα αυτά υποδεικνύουν την ανάγκη να διατηρήσουμε την επαφή μας με αυτές τις εξελίξεις, κατανοώντας τη βασική θεωρία, τις τεχνικές μοντελοποίησης και τις υπολογιστικές έννοιες της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Σε αυτή τη μέθοδο ανάλυσης, μία περίπλοκη περιοχή, η οποία ορίζει ένα συνεχές, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία(finite elements). Οι ιδιότητες των υλικών και οι διέπουσες σχέσεις υπολογίζονται πάνω σε αυτά τα στοιχεία και εκφράζονται σε όρους των άγνωστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων. Μία διαδικασία σύνθεσης, η οποία καταλλήλως θεωρεί τα φορτία και τους περιορισμούς, έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων. Η λύση αυτών των εξισώσεων δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

1. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο(στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Pro-Engineer).
2. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται pre processor (προεπεξεργαστές).

3. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα που επιλύουν λέγονται solver και χρησιμοποιούν για τις επιλύσεις αριθμητικές μεθόδους.
4. Όταν τελειώσει η επίλυση τα αποτελέσματα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, που αποκαλείται post processor (μετεπεξεργαστής), για να μπορέσει ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα.

2.3 Pro / ENGINEER

Το **Pro/ENGINEER** δημιουργήθηκε από την Parametric Technology Corporations (PTC). Ήταν η πρώτη εταιρεία στην αγορά που αξιοποίησε τον παραμετρικό σχεδιασμό. Η χρήση του προγράμματος αυτού, παρέχει στερεά μοντελοποίηση, μοντελοποίηση συναρμολόγησης και, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Δημιουργήθηκε από τον Δρ Samuel P. Geisberg στα μέσα της δεκαετίας του 1980, το Pro/ENGINEER ήταν η πρώτη επιτυχία του κλάδου η οποία βασίζεται σε κανόνες περιορισμού. Η παραμετρική μοντελοποίηση είναι προσέγγιση που χρησιμοποιεί παραμέτρους τις διαστάσεις, χαρακτηριστικά, και τις μαθηματικές σχέσεις για να συλλάβει τη συμπεριφορά των προϊόντων που προορίζεται και να δημιουργήσει ένα μέσο που επιτρέπει την αυτοματοποίηση του σχεδιασμού και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και των διαδικασιών ανάπτυξης των προϊόντων. Το Pro/ENGINEER παρέχει ένα πλήρες σύνολο του σχεδιασμού, της ανάλυσης και των δυνατοτήτων κατασκευής σε μία, ενσωματωμένη, επεκτάσιμη πλατφόρμα. Οι απαιτούμενες ικανότητες περιλαμβάνουν Στερεά και Επιφανειακή Μοντελοποίηση (Solid-Surface Modeling), δημιουργώντας δεδομένα διαλειτουργικά, τα οποία αξιοποιούνται για τον Σχεδιασμό Συστημάτων, Προσομοίωση, Ανάλυση Αντοχής, καθώς και Σχεδιασμό εργαλείων.

Οι εταιρείες χρησιμοποιούν το Pro/ENGINEER για να δημιουργήσουν ένα πλήρες 3D ψηφιακό μοντέλο των προϊόντων τους. Τα μοντέλα αποτελούνται από 2D και 3D στερεά μοντέλα δεδομένων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, ταχεία προτυποποίηση, σχεδιασμό εργαλείων, και CNC κατασκευές.

2.4 Comsol Multiphysics

Το Comsol Multiphysics, είναι ένα εμπορικό πρόγραμμα το οποίο βοηθά στην επίλυση προβλημάτων εφαρμοσμένης μηχανικής καθώς και την αριθμητική προσέγγιση λύσεων μαθηματικών εξισώσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το περιβάλλον προσομοίωσης του Comsol Multiphysics δίνει τη δυνατότητα υλοποίησης όλων των βημάτων που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη ενός μοντέλου. Καθορίζει τη γεωμετρία, ορίζει σταθερές και συνοριακές συνθήκες, διακριτοποιεί, καθώς και απεικονίζει γραφικά αποτελέσματα.

Παράλληλα έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί διάφορες μελέτες στο ίδιο μοντέλο. Έχει τη δυνατότητα για παράδειγμα να μελετήσει ένα μοντέλο, στη μηχανική της κατασκευής του καθώς και στη μετάδοση θερμότητας, δημιουργώντας διάφορα επίπεδα(layers), τα οποία συνεργάζονται μεταξύ τους για την επίλυση προβλημάτων συνδυασμένων πεδίων.

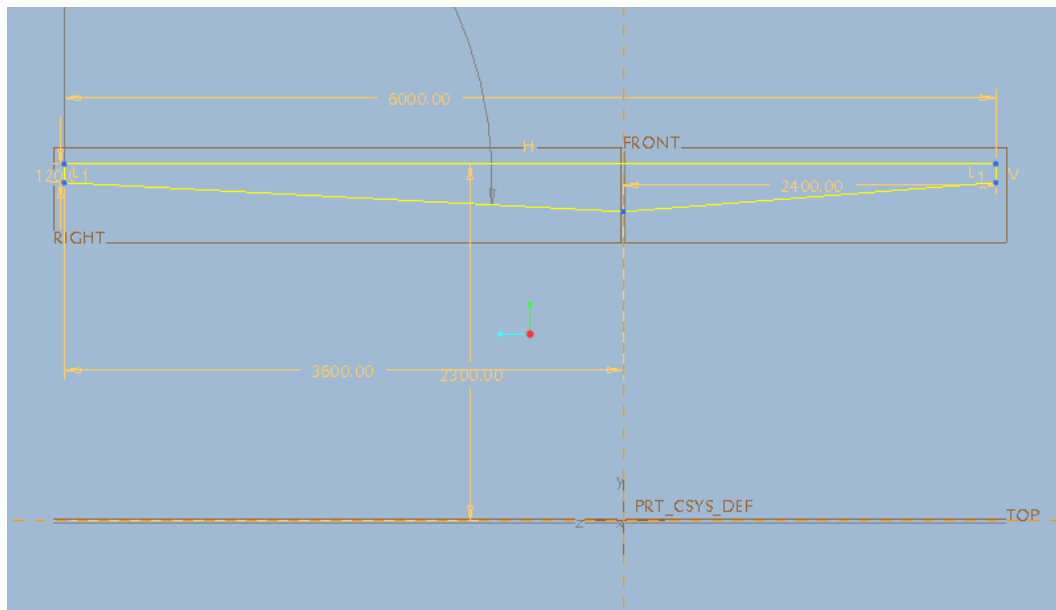
Η δημιουργία του μοντέλου είναι εύκολη και γρήγορη.

3 Σχεδιασμός μοντέλου και εισαγωγή δεδομένων στο Comsol

3.1 Σχεδιασμός και εισαγωγή μοντέλου στο Comsol Multiphysics, αυτόνομης υδραυλικής περιστρεφόμενης βάσης δύο αξόνων τύπου trackers για φωτοβολταϊκά.

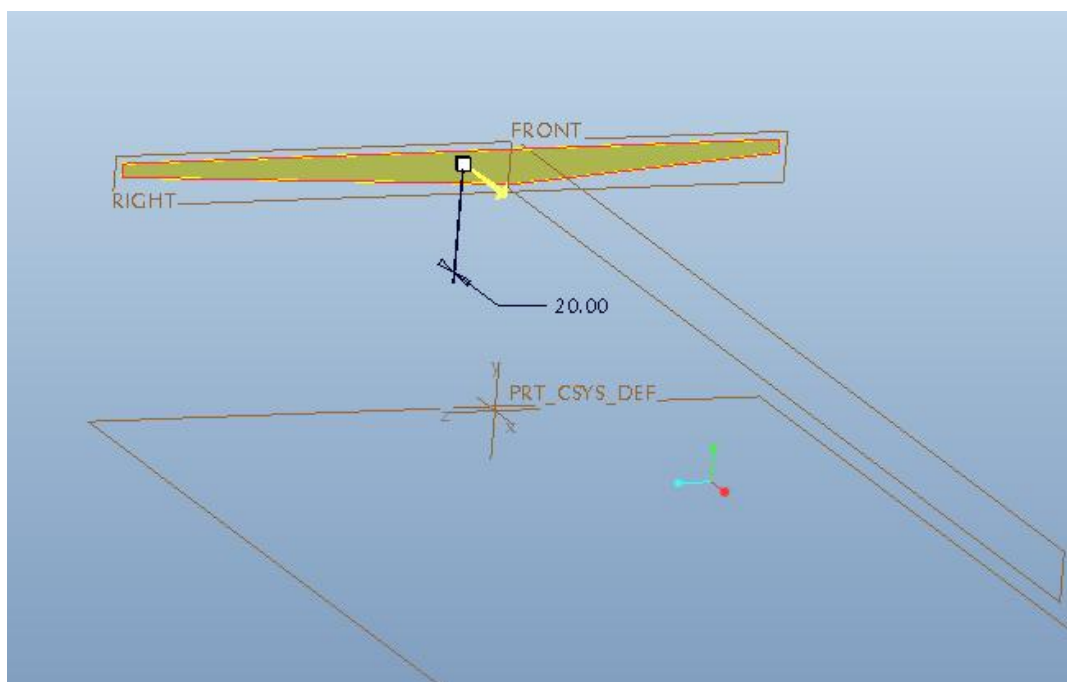
Η βάση σχεδιάστηκε στο περιβάλλον του προγράμματος Pro/ENGINEER. Αρχικά σχεδιάστηκε η σχάρα, όπου για αρχή την ορίσαμε σε οριζόντια θέση.

Στην αρχή σχεδιάσαμε τις δευτερεύουσες φέρουσες δοκούς που βρίσκονται στο κάτω μέρος της κατασκευής της σχάρας με μήκος 6 μέτρα, οριζόντιες στο πάνω μέρος και σχετικά τριγωνικές στο κάτω, για να είναι ανθεκτικές στις φορτίσεις.



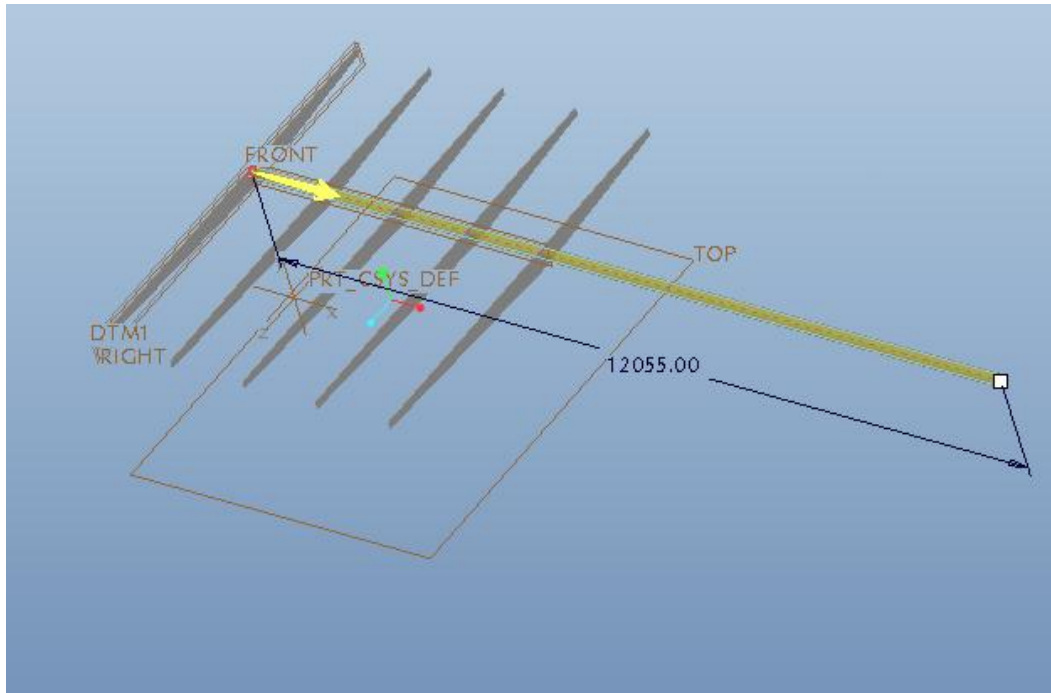
Εικόνα 3 Δευτερεύουσα φέρουσα δοκός.

Στη συνέχεια δίνουμε πάχος στο σχέδιο της δευτερεύουσας φέρουσας δοκού με εντολή extrude και διαμορφώνεται η πρώτη από τις δευτερεύουσες φέρουσες δοκούς.



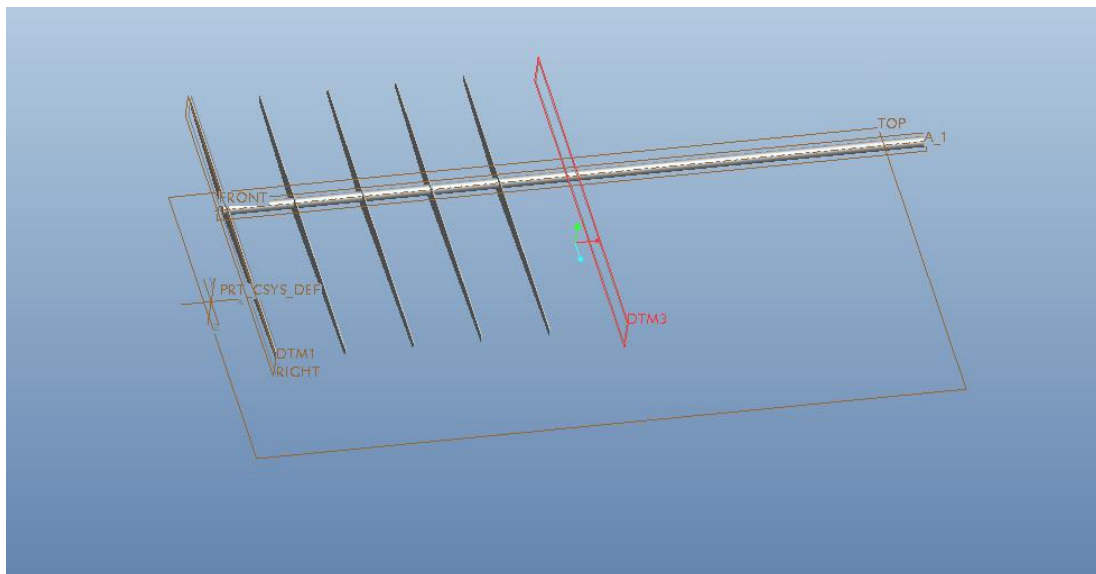
Εικόνα 4 Πρώτη δευτερεύουσα φέρουσα δοκός.

Αυτήν την κάνουμε pattern, ανά 5 δοκούς δηλαδή την αντιγράφουμε ως προς επιφάνεια σχεδιασμού που ορίζουμε εμείς και διαμορφώνονται άλλες 4 δοκοί, συνολικά 5. Στη συνέχεια σχεδιάζουμε την κύρια φέρουσα δοκό, ο οποίος διαπερνά και ενώνει τις 5 προηγούμενες δοκούς μεταξύ τους, όπως και τις επόμενες με μήκος 12 μέτρα και 55 χιλιοστά.



Εικόνα 5 Δευτερεύουσες φέρουσες δοκοί με κύρια φέρουσα δοκό.

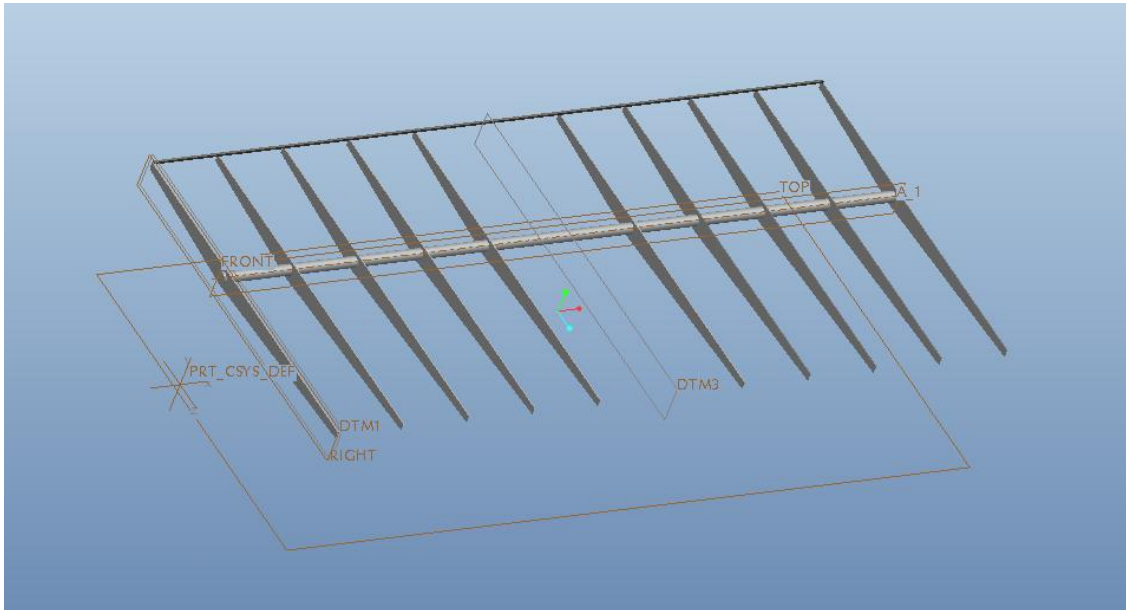
Τέλος αντικατοπτρίζουμε με την εντολή mirror τις 5 δοκούς που έχουμε σχεδιάσει ως προς επιφάνεια που έχουμε ορίσει για να διαμορφωθεί όλο το κάτω μέρος της σχάρας.



Εικόνα 6 Επιφάνεια αναφοράς με κόκκινο χρώμα.

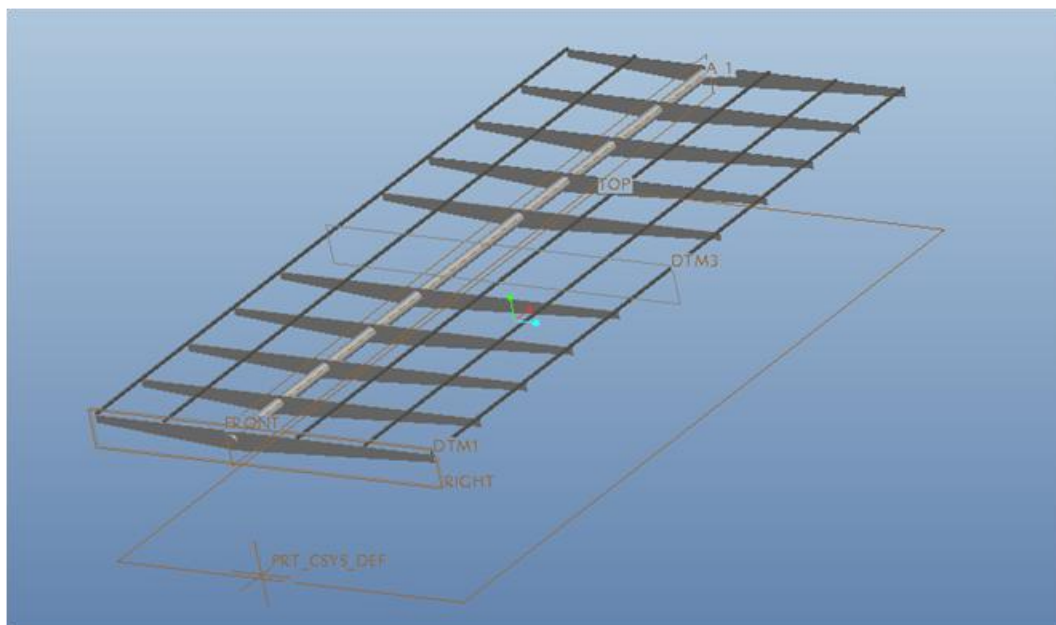
Σχεδιάζουμε την πρώτη από τις δοκούς στήριξης όπου βρίσκονται στο πάνω μέρος της σχάρας(σε μορφή τύπου Π), οι οποίες στηρίζουν και φέρουν στην πάνω επιφάνεια τους τα φωτοβολταϊκά. Με εντολή extrude της δίνουμε μήκος.

Παραθέτονται το σύνολο από τις δευτερεύουσες φέρουσες δοκούς της σχάρας διαμορφωμένοι, μαζί με την πρώτη (Beer/Johnson n.d.) από τις δοκούς στήριξης οι οποίες στηρίζουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ.



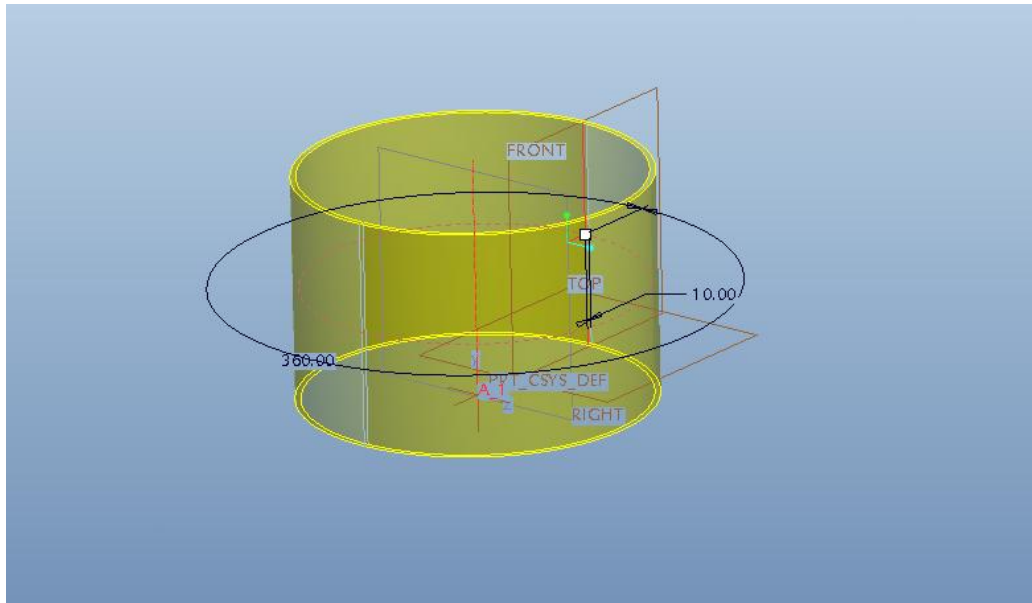
Εικόνα 7 Κάτω μέρος σχάρας.

Την ολοκληρωμένη από τις δοκούς στήριξης την κάνουμε pattern και διαμορφώνεται συνολικά η σχάρα.



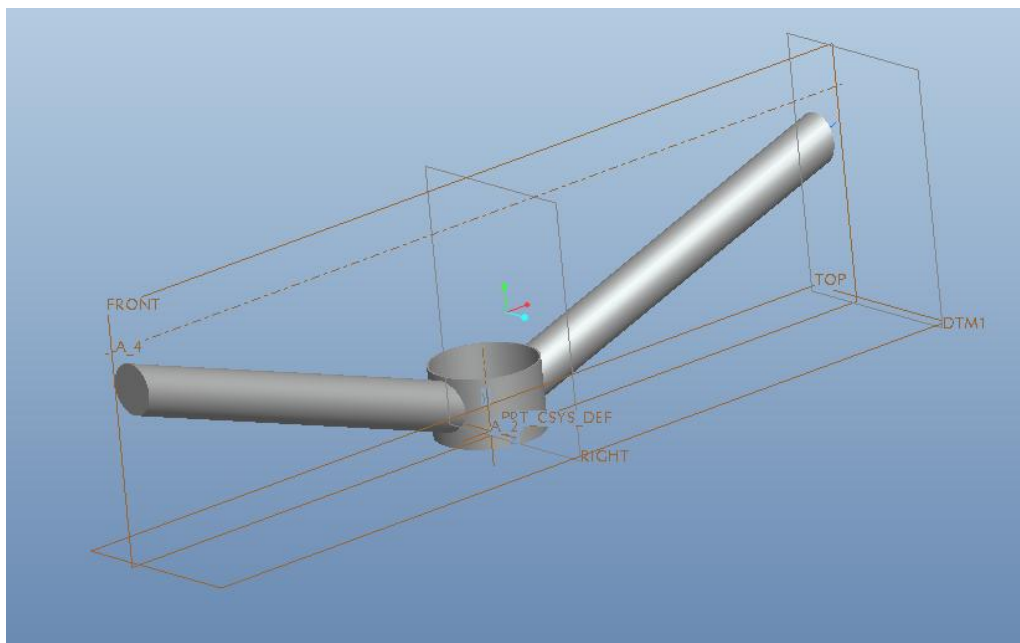
Εικόνα 8 Σχάρα συνολικά διαμορφωμένη.

Σχεδιάστηκε η κάτω βάση η οποία στηρίζει την σχάρα. Διαμορφώθηκε αρχικά ο πυλώνας με εντολή revolve ως προς τον κεντρικό άξονα για 360° δίνοντας του πάχος για να είναι στερεό.



Εικόνα 9 Πυλώνας κάτω βάσης.

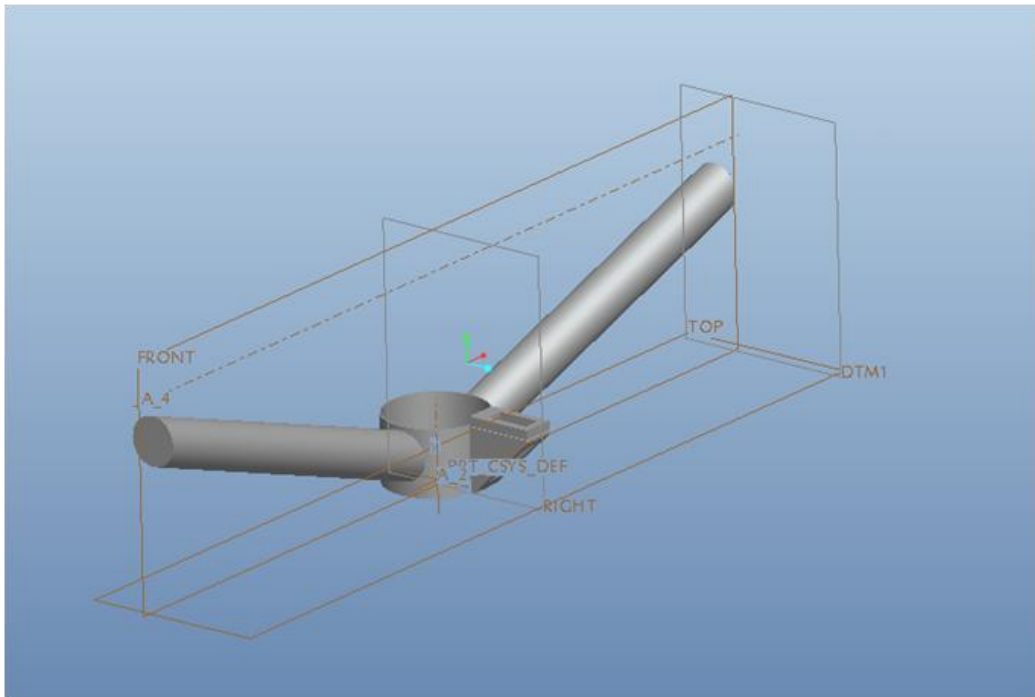
Στη συνέχεια διαμορφώθηκαν οι δύο άξονες που στηρίζουν την σχάρα, υπό κλίση και αντιδιαμετρικά μεταξύ τους.



Εικόνα 10 Αντιδιαμετρικά τοποθετημένοι άξονες, υπό κλίση.

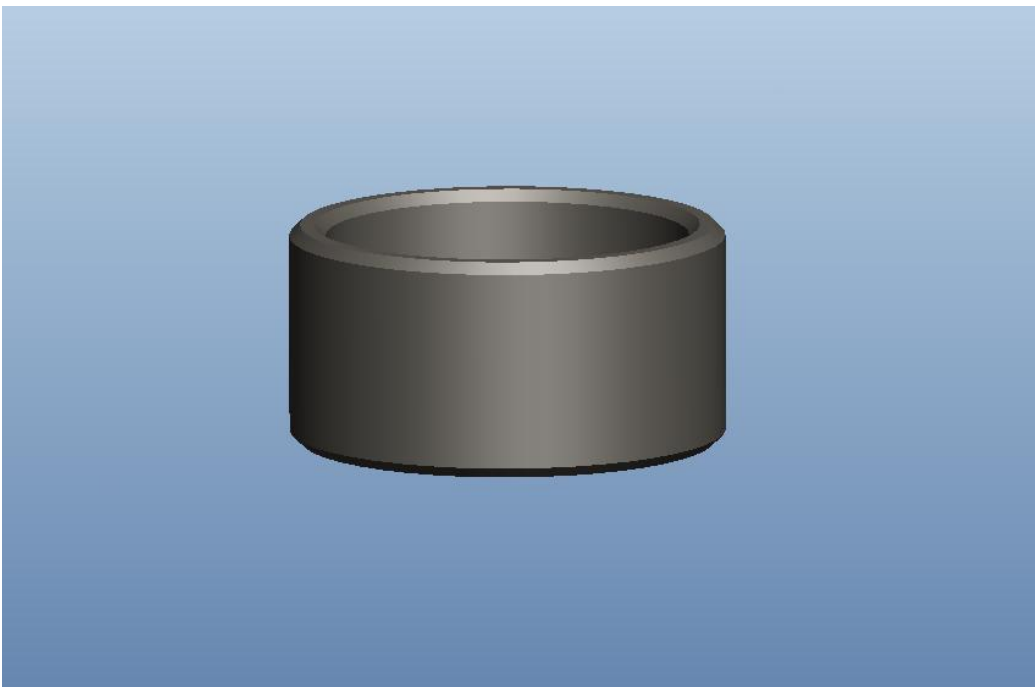
Τέλος σχεδιάστηκε το πίσω μέρος της στήριξης, στο οποίο στηρίζεται ο οδηγός ο οποίος ξεκινάει από την πάνω βάση για να διαμορφώνεται η κλίση που χρειάζεται με στόχο τη βέλτιστη απορρόφηση ηλιακής ενέργειας ανάλογα με την τροχιά του ήλιου.

Παρατίθεται η κάτω βάση, συνολικά διαμορφωμένη.



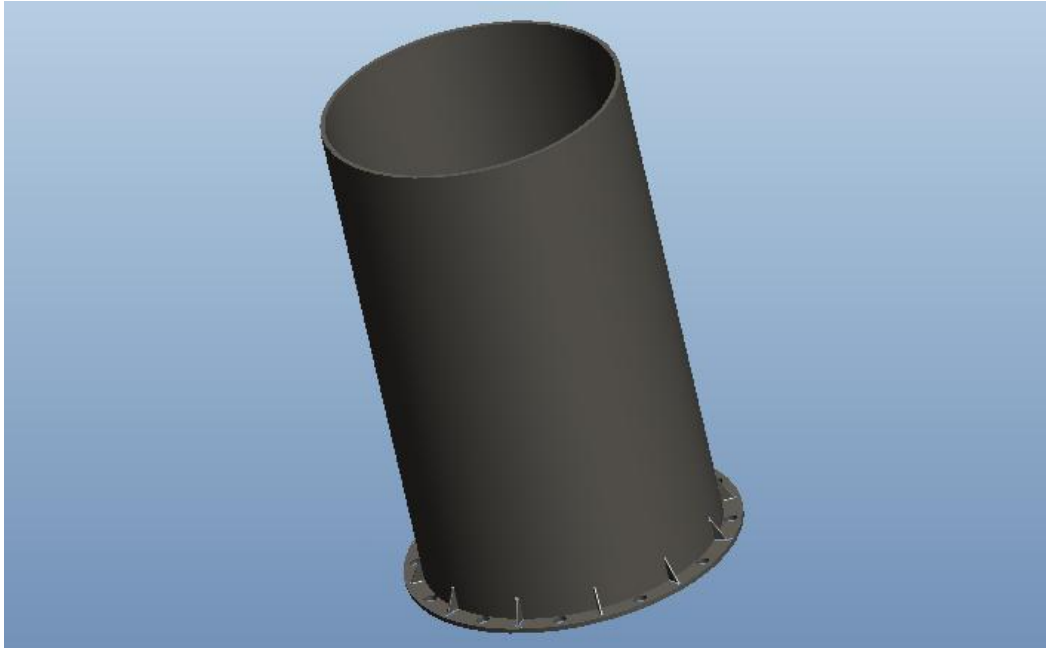
Εικόνα 11 Κάτω βάση.

Σχεδιάστηκε η βάση η οποία περιστρέφει ολόκληρο το πάνω μέρος της κατασκευής με ύψος 300mm, οποία έγινε με εντολή revolve για 360° ως προς κεντρικό άξονα που προσθέσαμε στο σχέδιο(centerline). Διαμορφώθηκαν “σπασίματα” στις γωνίες του με εντολή chamfer, βάση του πρωτότυπου σχεδίου, καθώς και για να διακρίνεται από τα υπόλοιπα εξαρτήματα της κατασκευής.



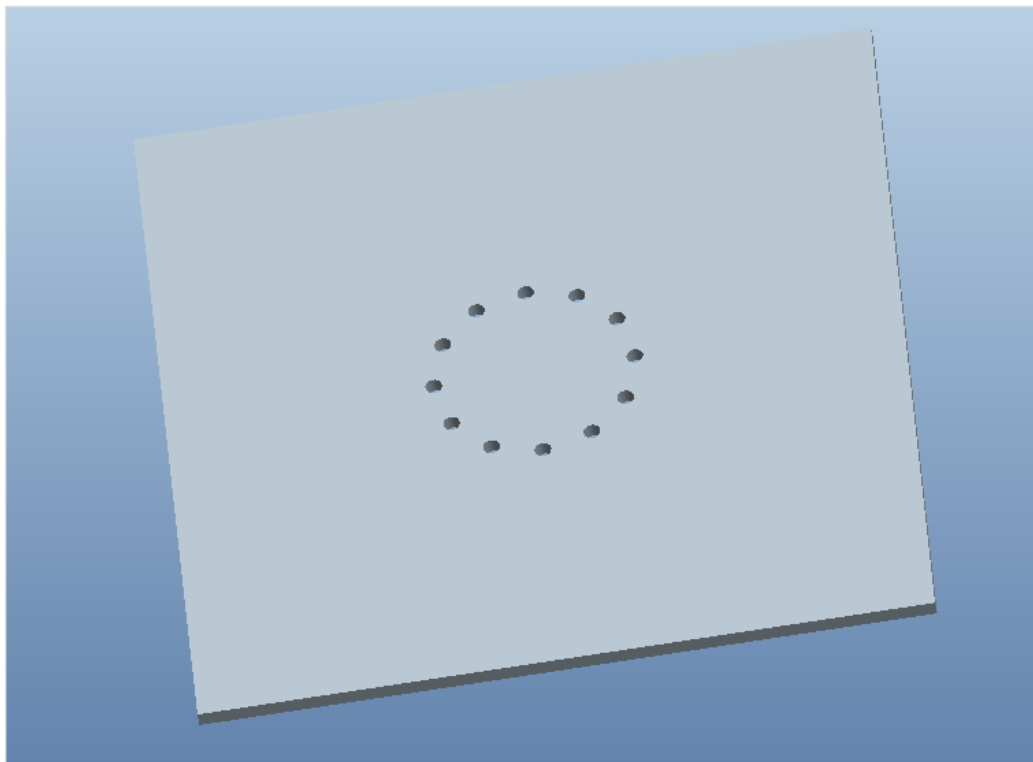
Εικόνα 12 Βάση περιστροφής..

Διαμορφώθηκε η βάση με 12 κατάλληλα διαμορφωμένες οπές για την εισαγωγή βιδών καθώς και περιμετρικά τριγωνικά στηρίγματα.



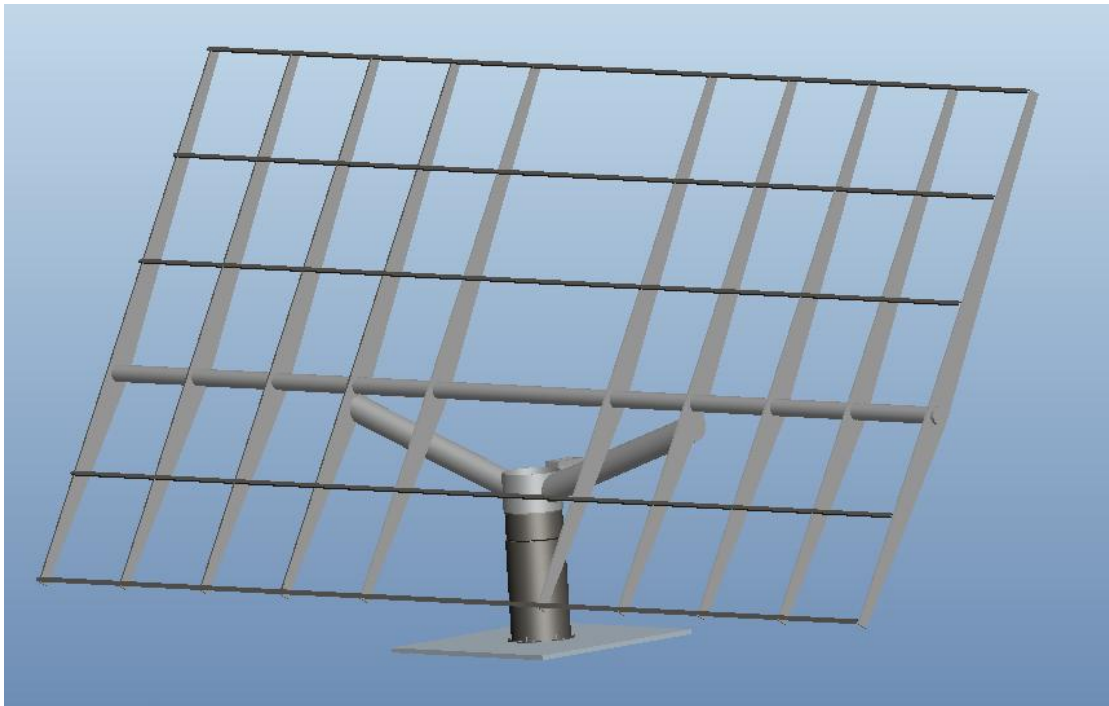
Εικόνα 13 Βάση στήριξης, με οπές.

Τέλος διαμορφώθηκε η βάση η οποία έρχεται σε επαφή με το έδαφος και στηρίζει ολόκληρη την κατασκευή.



Εικόνα 14 Βάση που έρχεται σε επαφή με το έδαφος.

Παρατίθεται η κατασκευή συνολικά διαμορφωμένη.

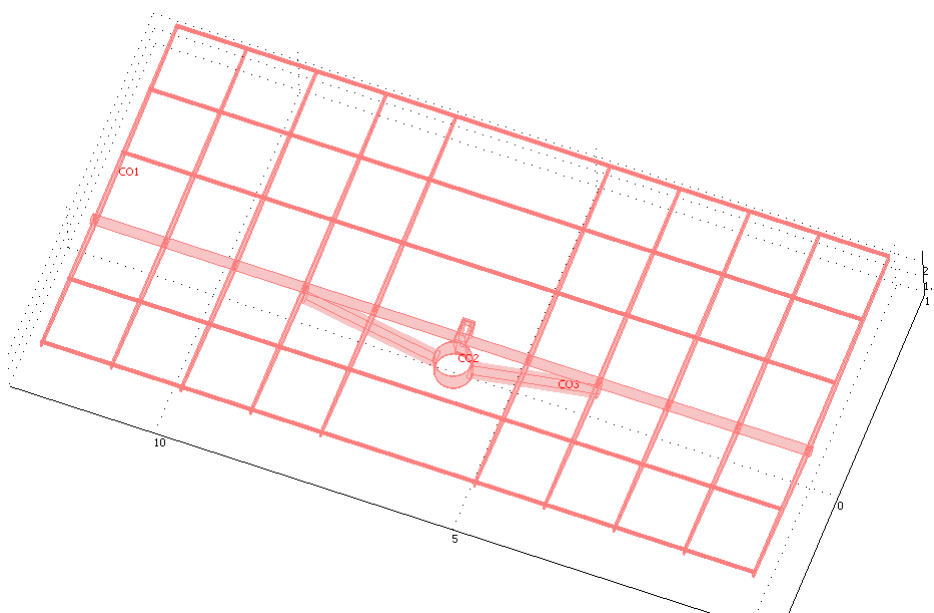


Εικόνα 15 Η βάση στήριξης, φωτοβολταϊκών πάνελ συνολικά διαμορφωμένη.

3.2 Πρόγραμμα Comsol

Εισαγωγή Μοντέλου στο Comsol

Για την εισαγωγή του μοντέλου μας σε οριζόντια θέση στο Comsol πηγαίνουμε στο menu file και επιλέγουμε import και μετά την εντολή CAD Data From File.



Εικόνα 16 Εισαγωγή μοντέλου στο Comsol σε οριζόντια θέση.

3.3 Υπολογισμός δυνάμεων και τοποθέτησης στο Comsol

Υπολογίζουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στην κατασκευή. Όπου είναι οι ακόλουθες:

- 1) Βάρος των πάνελ
- 2) Βάρος του χιονιού, με σχάρα σε οριζόντια θέση
- 3) Ανεμοπιέσεις στην πιο ακραία θέση κλίσης της σχάρας.

3.3.1 Υπολογισμός του βάρους των πάνελ

Ξεκινάμε τη μελέτη μας υπολογίζοντας τα βάρη των πάνελ που εφαρμόζονται στη βάση μας. Γνωρίζουμε ότι η βάση δέχεται συνολικά 45 πάνελ, όπου κάθε πάνελ ζυγίζει 25 κιλά. Επομένως η κατασκευή δέχεται συνολικό βάρος:

$$25kg * 45 = 1125kg$$

Επομένως μετατρέπουμε τα κιλά σε Newton για να δούμε πόση δύναμη συνολικά δέχεται όλη η κατασκευή μόνο από το βάρος των πάνελ. Το οποίο είναι:

$$1125kg * 9.80665m/s^2 = 11032.5N$$

Η συνολική αυτή δύναμη ισοκατανέμεται στις 5 δοκούς στο πάνω μέρος της βάσης, επομένως

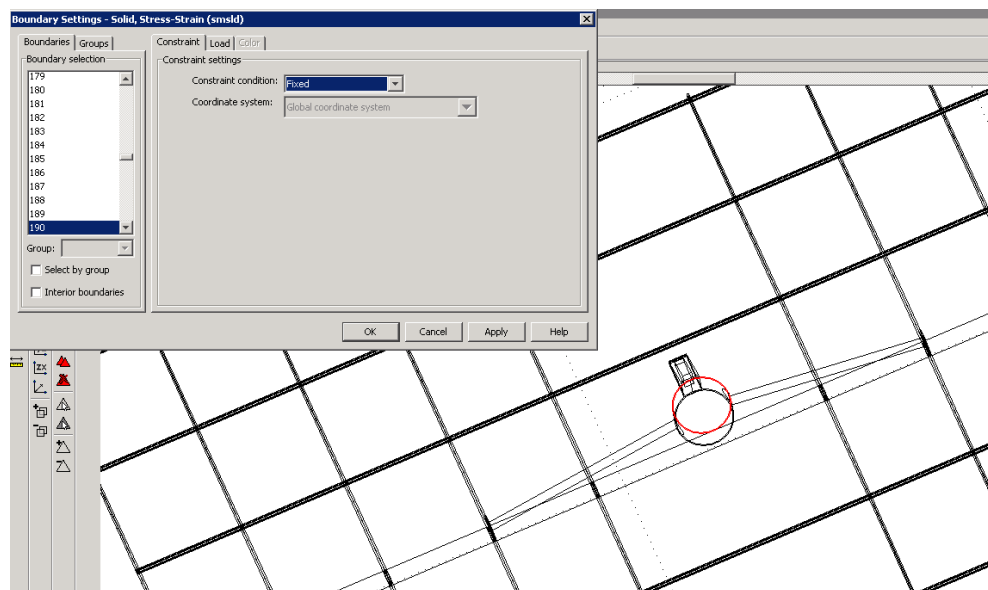
$$11032.5N \div 5 = 2206.5N \text{ εφαρμόζεται σε κάθε δοκό ξεχωριστά.}$$

Όμως στο Comsol Multiphysics η κάθε δύναμη εφαρμόζεται ανά επιφάνεια m^2 . Επομένως, γνωρίζουμε ότι η επιφάνεια της κάθε δοκού είναι $0.48 m^2$, άρα η δύναμη που ασκείται σε κάθε δοκό ανά m^2 είναι:

$$2206.5N \div 0.48m^2 = 4596.87N/m^2$$

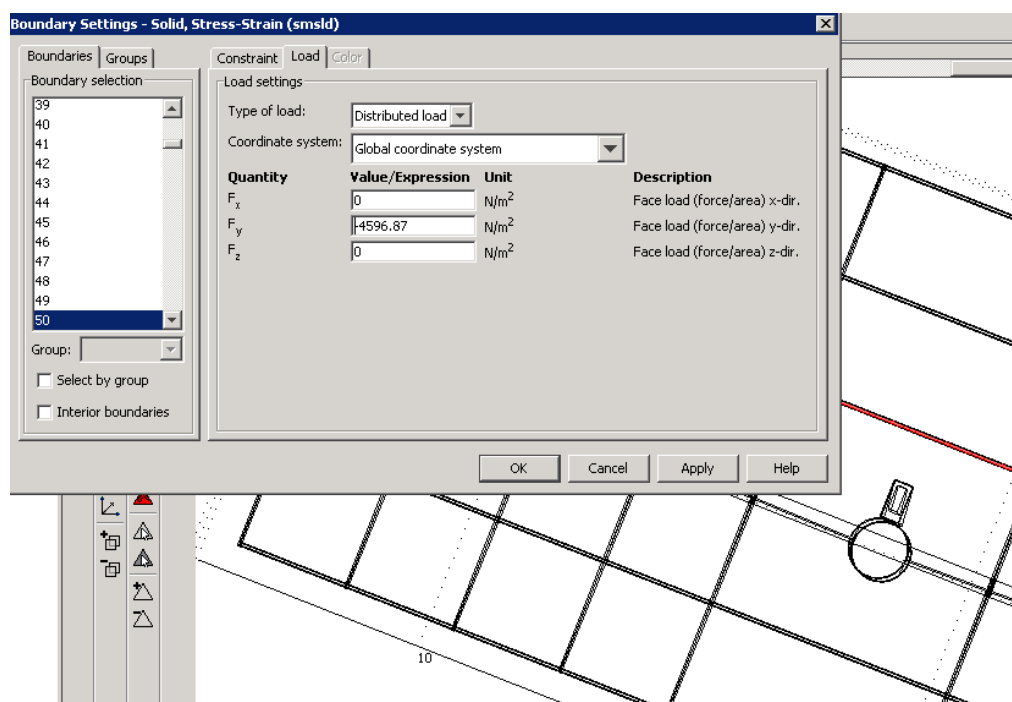
Στη συνέχεια τα τοποθετούμε στο Comsol ως εξής:

Πηγαίνουμε στο menu, πατάμε Physics, Boundary Settings, στην καρτέλα Constraints επιλέγουμε την επιφάνεια της κατασκευής που θεωρούμε σταθερή (fixed), όπου στην προκειμένη είναι η κάτω επιφάνεια της βάσης.



Εικόνα 17 Ορισμός κάτω επιφάνειας της βάσης σταθερή (fixed).

Τα υπόλοιπα στοιχεία της κατασκευής είναι προεπιλεγμένο να θεωρούνται ελεύθερα. Στη συνέχεια επιλέγουμε την καρτέλα Load και κάποια από τις επιφάνειες που θέλουμε να εφαρμόσουμε δύναμη, δηλαδή κάθε μία από τις 5 δοκούς. Στην προκειμένη τοποθετούμε τις τιμές των δυνάμεων στον y άξονα καθώς την σχάρα τη θεωρούμε σε οριζόντια θέση, επομένως θεωρούμε ότι φορτίζεται μόνο από βάρη στον κάθετο άξονα. Επίσης τοποθετούμε πρόσημο μείον, καθώς το βάρος είναι αντίρροπο του y άξονα.



Εικόνα 18 Τοποθέτηση δύναμης βάρους σε δοκό.

3.3.2 Υπολογισμός των δυνάμεων που εφαρμόζονται λόγω του βάρους του χιονιού.

Η συνολική επιφάνεια της σχάρας είναι

$$5.990m * 11.960m = 71.64 m^2.$$

Επομένως θεωρούμε ότι για κάθε m^2 επιφάνειας έχω πάνω στα πάνελ 50cm-60cm χιόνι, στη χειρότερη περίπτωση. Όπου αυτό θα επιβαρύνει την διάταξή μας κατά 0.6 τόνους ανά m^2 . Δηλαδή πάνω στα πάνελ θα έχω σύνολο

$$0.6 \text{ τόνοι}/m^2 * 71.64m^2 = 42.984 \text{ τόνοι}$$

Το οποίο είναι ίσο με 42984kg.

Στη συνέχεια αυτό το μετατρέπουμε σε Newton, δηλαδή:

$$42984 \text{ kg} * 9.80665 \text{ m/s}^2 = 421529N$$

Αυτή εφαρμόζεται στο σύνολο της επιφάνειας, επομένως και στο σύνολο των 5 δοκών. Διαιρούμε την συνολική δύναμη που εφαρμόζεται στο πάνω μέρος της πάνω βάσης διά τις 5 δοκούς στήριξης που εφαρμόζεται και έχουμε:

$$421529N \div 5 = 84305.8N$$

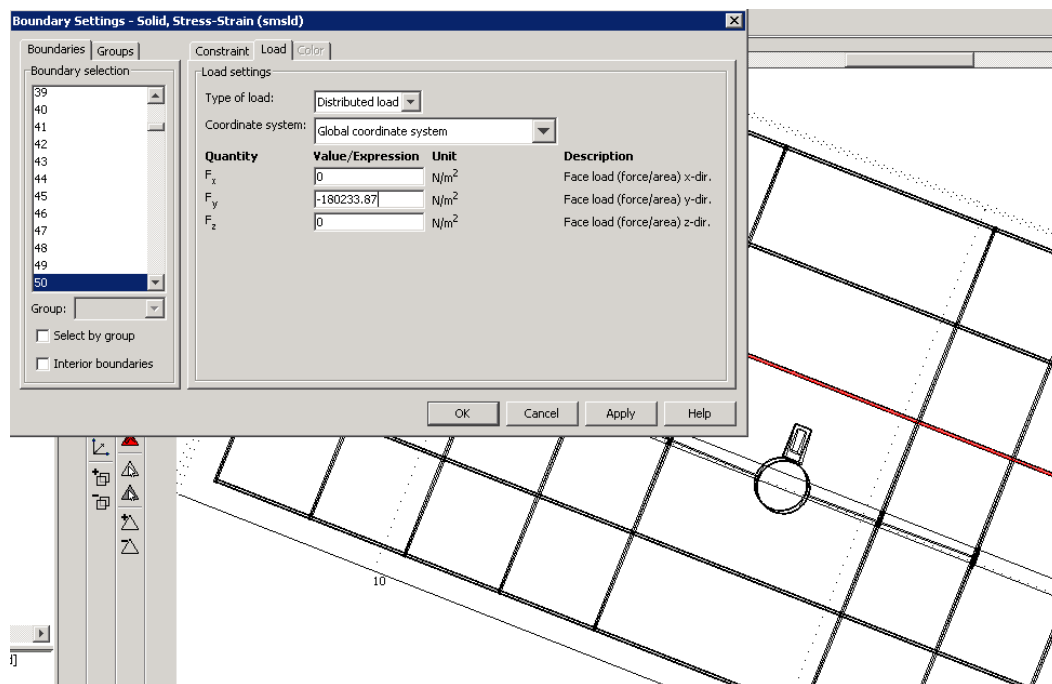
Στη συνέχεια το διαμορφώνουμε ανά μονάδα επιφάνειας m^2 , επομένως:

$$84305.8N \div 0.48m^2 = 175637N/m^2$$

δύναμη εφαρμόζεται σε κάθε δοκό στήριξης λόγω χιονιού.

Τέλος προσθέτουμε τις φορτίσεις που δέχεται η κατασκευή από τα πάνελ σε κάθε δοκό στήριξης, ανά m^2 καθώς εργαζόμαστε στον ίδιο άξονα, και έχουμε:

$$175637N/m^2 + 4596.87N/m^2 = 180233.87N/m^2$$



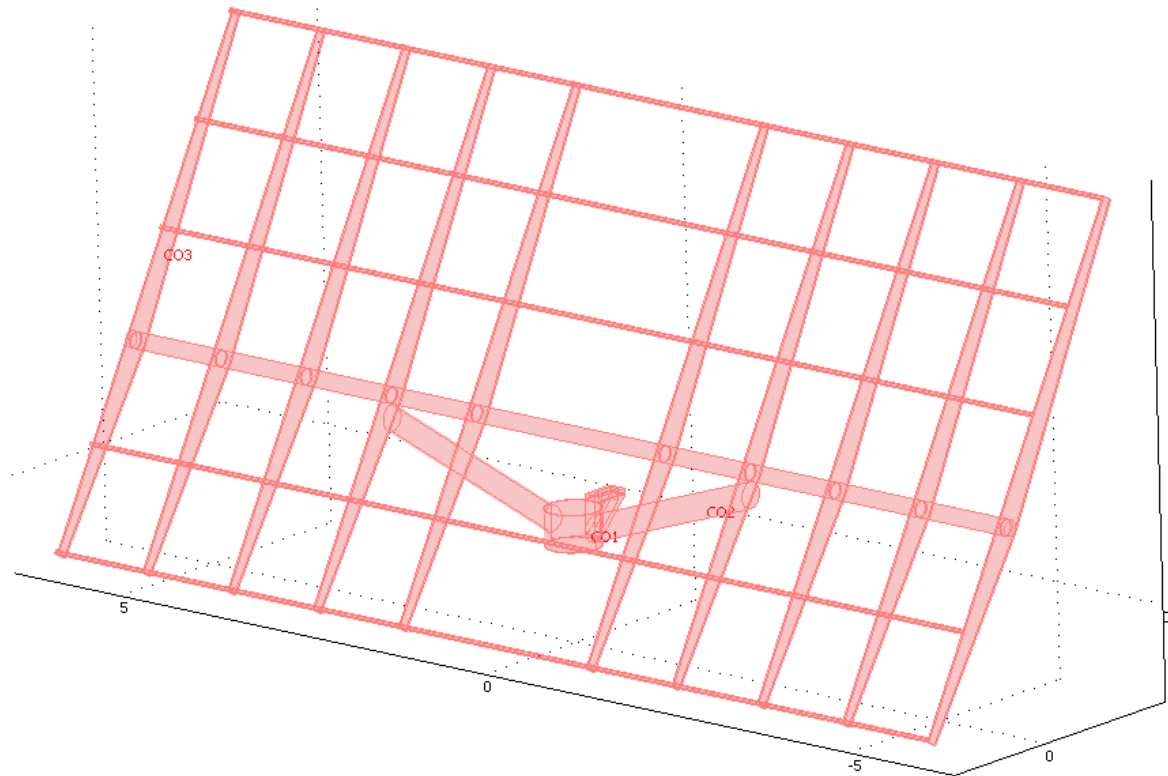
Εικόνα 19 Τοποθέτηση βάρους των πάνελ και χιονιού.

3.3.3 Υπολογισμός ανεμοπίεσης

Υπολογίζουμε την ανεμοπίεση που εφαρμόζεται στη στήριξη, βάση Ευρωκώδικα, με τρεις διαφορετικούς τρόπους, χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους σε κάθε περίπτωση. Αντιμετωπίζεται σαν μονοκλινής στέγη. Η διεύθυνση του ανέμου θεωρούμε πως είναι οριζόντια επομένως η γωνία του ως προς τον οριζόντιο άξονα θεωρούμε πως είναι $\theta = 0^\circ$. Επίσης η γωνία της πάνω βάσης στην ακραία θέση ανύψωσης είναι $\beta = 20^\circ$ ως προς τον κάθετο άξονα. Στη συνέχεια οι τιμές των δεικτών που επιλέγουμε για το έδαφος που τοποθετείται η στήριξη, το υψόμετρο τοποθέτησης της στήριξης, καθώς και η ταχύτητα του ανέμου είναι οι πιο ακραίες που μπορούμε να επιλέξουμε για κάθε περίπτωση. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να μελετήσουμε την ανθεκτικότητα της κατασκευής, καθώς και του υλικού που έχει δοθεί στην κατασκευή στις πιο ακραίες συνθήκες.

Αρχικά εισάγουμε το μοντέλο που διαθέτουμε στην πιο ακραία θέση κλίσης του

Επομένως:



Εικόνα 20 Εισαγωγή μοντέλου, υπό κλίση στο Comsol..

Περίπτωση 1

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούμε σαν παραμέτρους δείκτες που αφορούν το μέγεθος της επιφάνειας της σχάρας, καθώς και δείκτες που αφορούν το έδαφος.

$W = cp * q$ από 5.2.2 εξίσωση 4, (Beton-Kalender 1988, Teil II, 1988)

Όπου $cp = 0.7$ από πίνακα 1 Παραρτήματος περίπτωση 4.3 και

$q = 1.3kN/m^2$, από πίνακα 2 Παραρτήματος

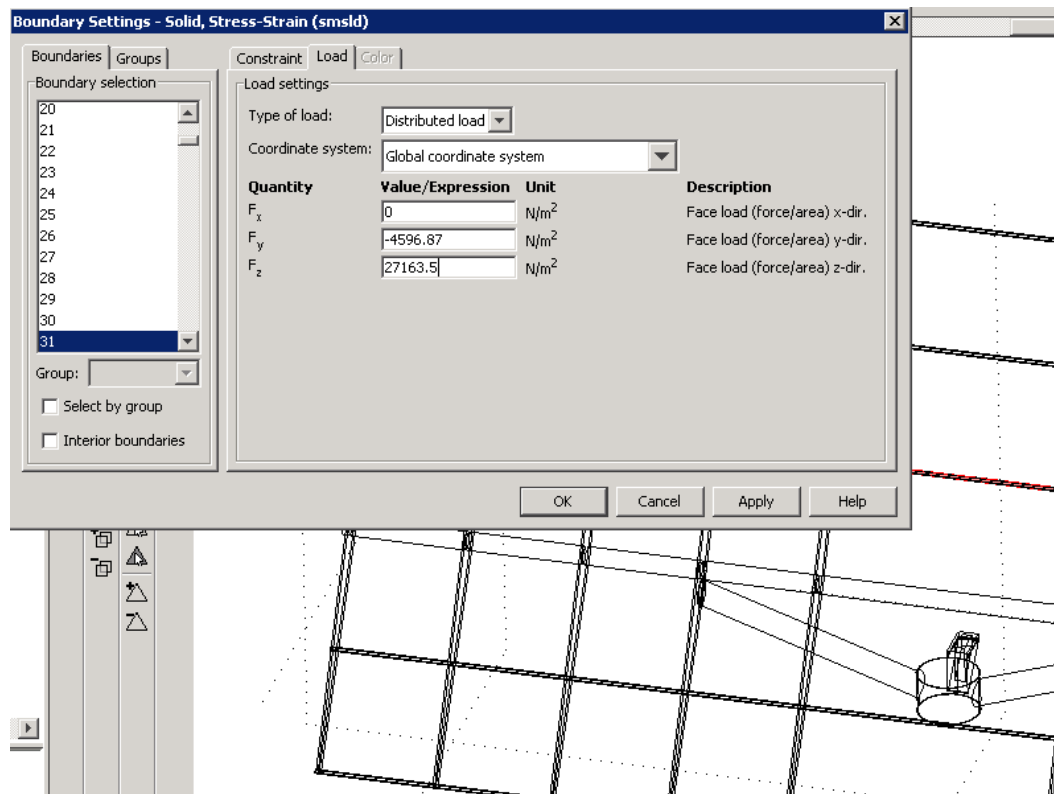
$$W = 910N/m^2 * 71.64m^2 = 65192.4N$$

Σε κάθε δοκό στήριξης εφαρμόζεται δύναμη

$$65192.4N \div 5 = 13038.48N \quad \text{στον } z \text{ άξονα.}$$

$$13038.48N \div 0.48m^2 = 27163.5N/m^2, \text{ ανά } m^2$$

Τέλος εφαρμόζονται δυνάμεις στον y άξονα από τα βάρη των πάνελ, δηλαδή $4596.87N/m^2$ σε κάθε δοκό στήριξης.



Εικόνα 21 Εισαγωγή φορτίσεων ανεμοπίεσης και βάρους των πάνελ Περίπτωσης 1.

Περίπτωση 2

$W = cf * q * A$, από 5.2.1 εξίσωση (3) (Beton-Kalender 1988, Teil II, 1988)
όπου A: διατομή που αντιστέκεται

$cf = 1.3$, από Πίνακα 3 Παραρτήματος επιλέγω μέγιστη τιμή

$q = 1300N/m^2$ από Πίνακα 3 Παραρτήματος επιλέγω μέγιστη τιμή

Επομένως

$$W = 1.3 * 1300N/m^2 * 71.64m^2 = 121071.6N$$

Εφαρμόζεται συνολικά σε ολόκληρη τη σχάρα. Επομένως πρέπει να υπολογίσουμε την κάθε δύναμη που εφαρμόζεται σε κάθε δοκό στήριξης ξεχωριστά. Δηλαδή ισοκατανέμουμε την συνολική δύναμη στις 5 δοκούς στήριξης και έχουμε:

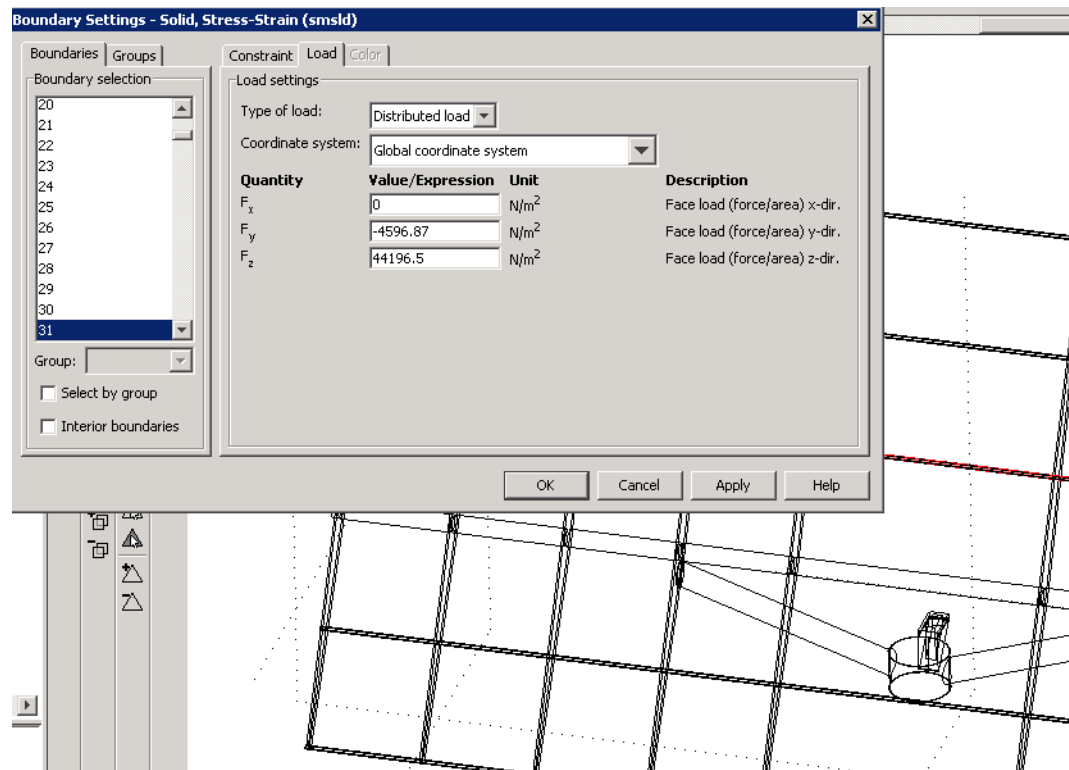
$$121071.6N \div 5 = 24214.32N$$

Η οποία ασκείται σε κάθε δοκό ξεχωριστά. Στη συνέχεια μετατρέπουμε την δύναμη που ασκείται ανά m^2 . Επομένως έχουμε

$$24214.32N \div 0.48m^2 = 44196.5N/m^2$$

Αυτές τις δυνάμεις ανά μονάδα επιφάνειας τις εφαρμόζουμε στις 5 δοκούς στήριξης στον z άξονα.

Επιπλέον εφαρμόζουμε τις δυνάμεις από τα βάρη των πάνελ στον y άξονα όπου τις έχουμε ήδη υπολογίσει και είναι 4596.87N/m^2 .



Εικόνα 22 Εισαγωγή φορτίσεων ανεμοπίεσης και βάρους των πάνελ Περίπτωσης 2.

Περίπτωση 3

Θέλουμε να υπολογίσουμε την εξωτερική πίεση We , όπου στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιούμε και τον παράγοντα της ταχύτητας του ανέμου: (Standarization 1995)

$$We = q_{ref} * c_e * z_e * c_{pe} \text{ εξίσωση 5.1 (Standarization 1995)}$$

Η επιφάνεια της σχάρας είναι $A \geq 10\text{m}^2$, επομένως έχουμε επιλέξει από Πίνακα 4 Παραρτήματος.

$$c_{pe} = c_{pe}, 10.$$

Στη συνέχεια, για κατεύθυνση ανέμου $\theta = 0^\circ$ ως προς το οριζόντιο επίπεδο και κλίση της σχάρας $\alpha = 60^\circ$ ως προς οριζόντιο επίπεδο επιλέγουμε

$$c_{pe} = 0.7, \text{ από Πίνακα 5 Παραρτήματος}$$

Από Πίνακα 6 Παραρτήματος, έχουμε επιλέξει την περίπτωση της μονοκλινής στέγης (περίπτωση α), όπου $z_e = h$, δηλαδή

$$z_e = 5.256\text{m}.$$

$$vref = cdir * ctem * calt * vref \quad \text{εξίσωση 7.2 (Standarization 1995)}$$

Όπου

cdir: παράγοντας κατεύθυνσης ανέμου δοσμένος από παράρτημα Α (Standarization 1995)

ctem: Προσωρινός (εποχιακός) παράγοντας. Λαμβάνεται μονάδα, εκτός εάν προσδιορίζεται διαφορετικά από παράρτημα Α (Standarization 1995).

calt: Παράγοντας υψομέτρου ο οποίος λαμβάνεται μονάδα, εκτός εάν προσδιορίζεται διαφορετικά στο παράρτημα Α (Standarization 1995).

Από παράρτημα Α (Standarization 1995), αυτοί οι δείκτες για τα δεδομένα της Ελλάδας λαμβάνονται σαν μονάδα,

$$cdir = 1, ctem = 1, calt = 1$$

και $vref = 200km/h$ (θεωρούμε την πιο ακραία περίπτωση ανέμου)

$$\text{Όπου } qref = \frac{\rho}{2} * vref^2 \quad , \text{ εξίσωση 7.1 (Standarization 1995)}$$

$$\text{Όπου, } \rho = 1.25kg(m^3) \text{ , πυκνότητα αέρα και } vref = 200km/h, \text{ ταχύτητα ανέμου}$$

Επομένως αντικαθιστώντας στον τύπο, έχουμε

$$qref = \frac{1.25kg(m^3)}{2} 9.80665 * \left(\frac{200000m}{3600s}\right)^2$$

$$qref = 18916.67N$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον συντελεστή τραχύτητας από Πίνακα 7 Παραρτήματος, επιλέγουμε την περίπτωση I,

kT : παράγοντας εδάφους.

zmin : ελάχιστο υψόμετρο

$$\text{Από πίνακα } kT = 0.17, zo = 0.01, zmin = 2, \varepsilon = 0.13$$

Για την περίπτωση I που έχουμε επιλέξει, από Πίνακα 8 Παραρτήματος εντοπίζουμε

$$ce(z) = 2.8,$$

$$z = 5.256 \text{ , ύψος κατασκευής πάνω από το έδαφος}$$

Επομένως αντικαθιστώ,

$$We = qref * ce * ze * cpe$$

$$We = 18916.67 * 2.8 * 5.256 * 0.7$$

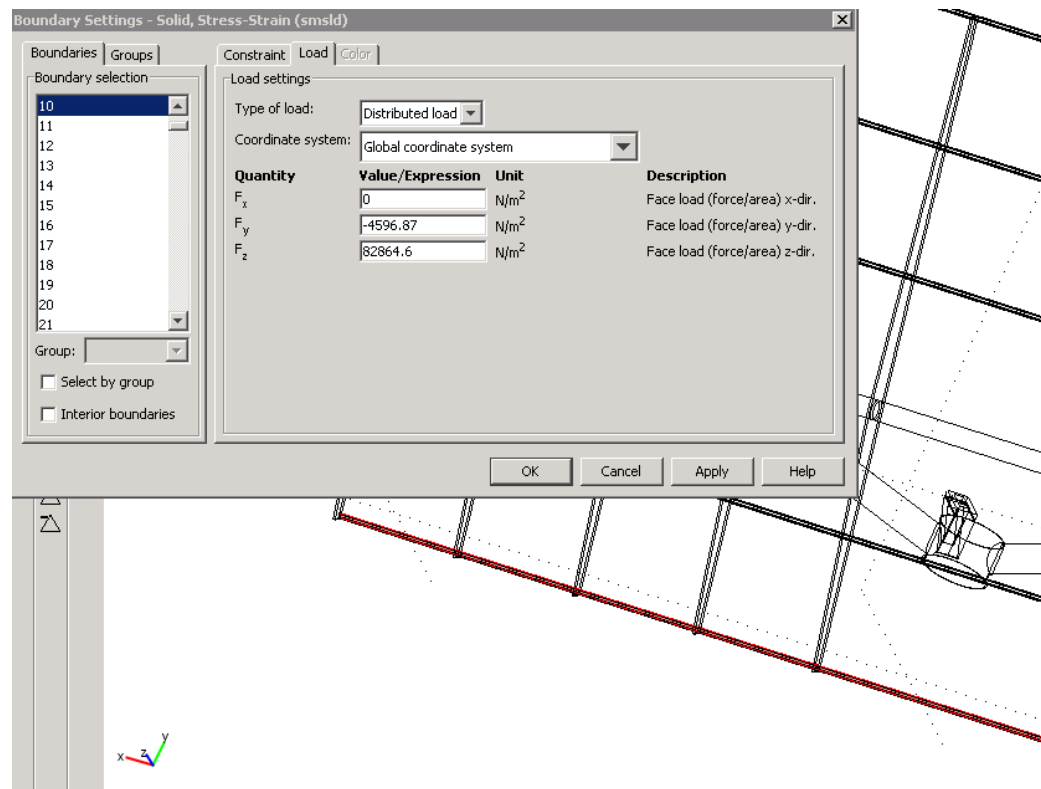
$$We = 198875N$$

Επομένως σε κάθε δοκό στήριξης εφαρμόζεται δύναμη

$$198875N \div 5 = 39775N \text{ στον άξονα των } z,$$

$$39775N \div 0.48m^2 = 82864.6N/m^2$$

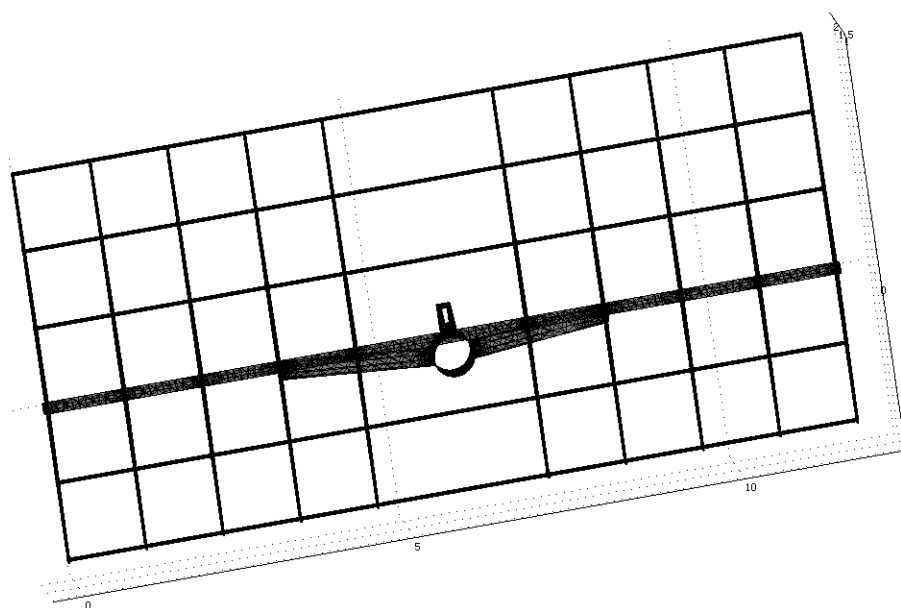
Τέλος στον άξονα των y εφαρμόζεται η δύναμη από τα βάρη των πάνελ, επομένως σε κάθε δοκό στήριξης εφαρμόζονται $4596.87N/m^2$.



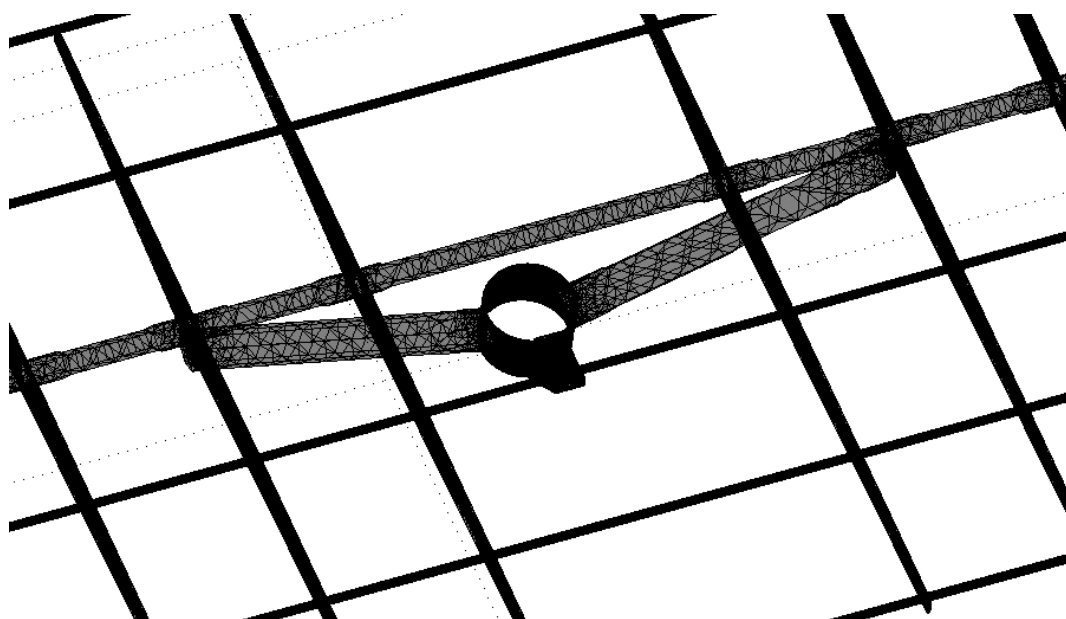
Εικόνα 23 Εισαγωγή φορτίσεων ανεμοπίεσης και βάρους των πάνελ Περίπτωσης 3.

Μετά από την εισαγωγή των φορτίσεων στην κάθε περίπτωση δίνουμε την εντολή Mesh και πλεγματοποιούμε το μοντέλο της εκάστοτε περίπτωσης.

Αυτό εξυπηρετεί την μελέτη του μοντέλου σε οποιοδήποτε σημείο του. Και θα έχει τη μορφή αυτή



Εικόνα 24 Το μοντέλο πλεγματοποιημένο.



Εικόνα 25 Κοντινή όψη πλεγματοποιημένου μοντέλου.

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα σχολιαστούν τα αποτελέσματα των μοντέλων μας στην εκάστοτε περίπτωση. Αυτά τα διακρίνουμε σε

- **Μοντέλο χιονιού:** Θα εμπεριέχει τις επιδράσεις φορτίσεων από τα βάρη των πάνελ, καθώς και την επίδραση των φορτίσεων από το βάρος του χιονιού(μελετάται σε οριζόντια θέση).
- **Μοντέλο ανέμου:** Θα εμπεριέχει τις επιδράσεις των φορτίσεων από τα βάρη των πάνελ, καθώς και την επίδραση των φορτίσεων από την δύναμη του ανέμου στην εκάστοτε περίπτωση(μελετάται σε ακραία θέση κλίσης).

Για να το επιτύχουμε αυτό θα μελετήσουμε τα μοντέλα μας σε διάφορα σημεία τους καθώς και περιοχές τους. Παρατηρούμε τις περιοχές όπου η κατασκευή έχει συγκεντρωμένες περισσότερες φορτίσεις.

Αυτό συμβαίνει σε όλα τα μοντέλα,

1. Στα σημεία σύνδεσης του πυλώνα με τους άξονες στήριξης **.(τομή τύπου a)**
2. Στα σημεία σύνδεσης της σχάρας με τους άξονες στήριξης **(τομή τύπου b)**

Επομένως για να παραθέσουμε τα αποτελέσματά μας θα πρέπει να κάνουμε τομές στο κάθε μοντέλο ξεχωριστά, στις προαναφερθέντες περιοχές.

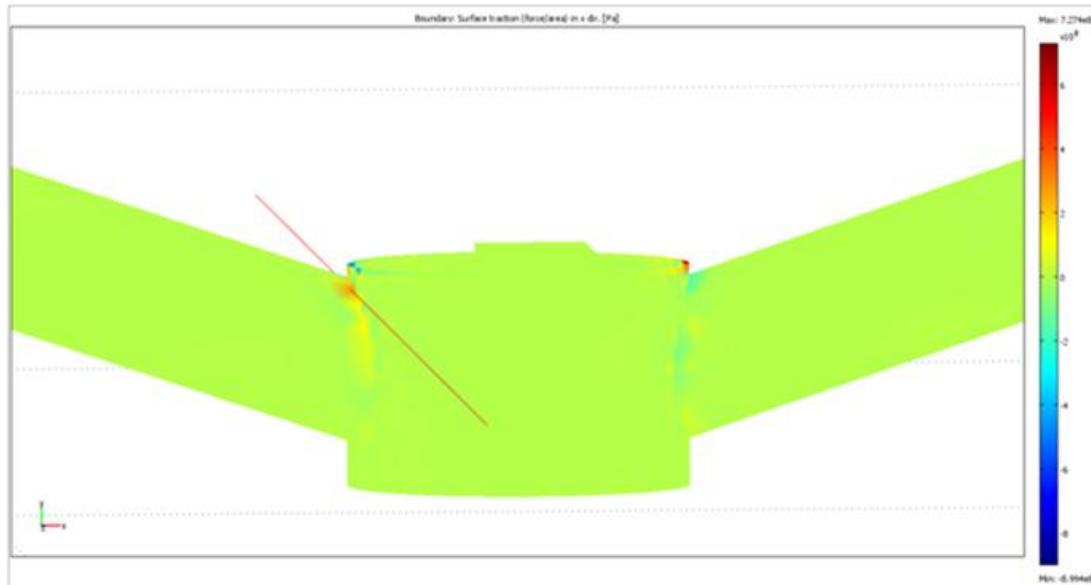
Η διακριτοποίηση που χρησιμοποιήθηκε οδήγησε σε ένα πολύ μεγάλο αριθμητικό μοντέλο (170744 κόμβοι, 2990724 βαθμοί ελευθερίας) το οποίο επιλύεται οριακά με τους χρησιμοποιούμενους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Παρόλα αυτά η διακριτοποίηση του τρισδιάστατου συνεχούς παραμένει αραιή και η αναμενόμενη ακρίβεια στον υπολογισμό των τάσεων δεν είναι πολύ υψηλή. Για τον λόγο αυτό σε επίπεδο προμελέτης χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή οι μέσες τιμές των διαγραμμάτων τάσεων στα κρίσιμα σημεία και διατομές. Η χρήση εξειδικευμένων πεπερασμένων στοιχείων κελύφους ή παραπέρα πύκνωση του μοντέλου αναμένεται να αυξήσουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

4.1 Μοντέλο χιονιού.

Παρατίθενται οι τομές και τα διάγραμμα των τάσεων στους x, y και z άξονες .

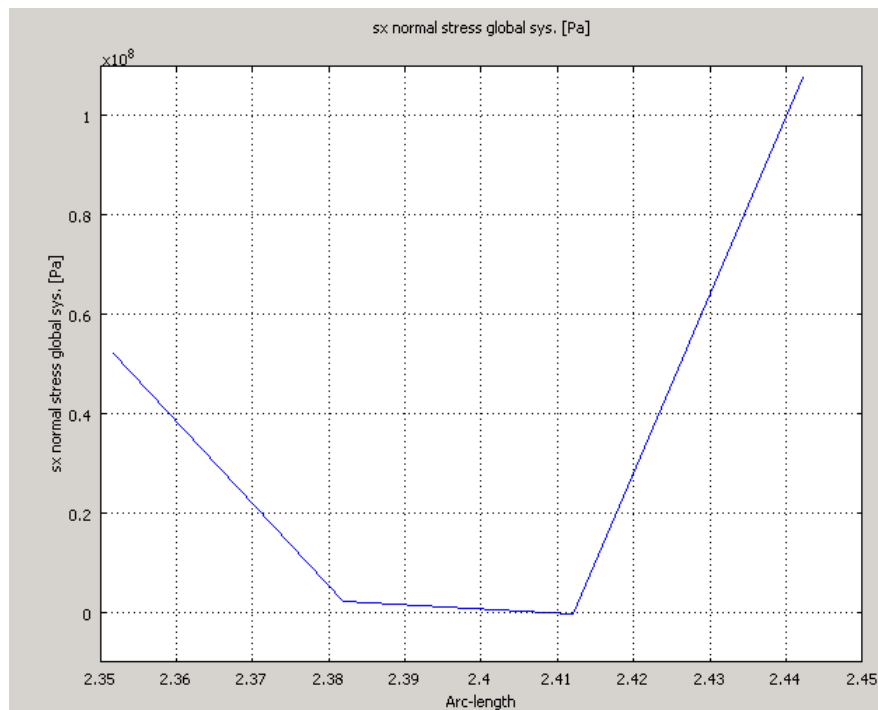
- Τομή στο σημείο σύνδεσης του πυλώνα με τους άξονες στήριξης .

A) Τομή στον x άξονα.



Εικόνα 26 Τομή τύπου a στον x άξονα.

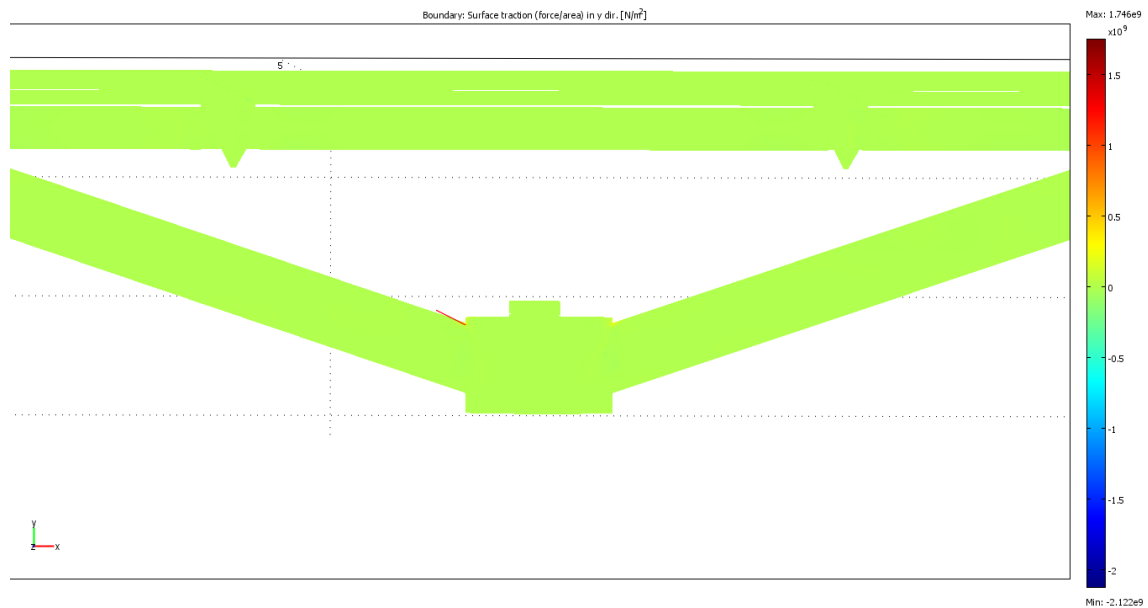
Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα.



Εικόνα 27 Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα.

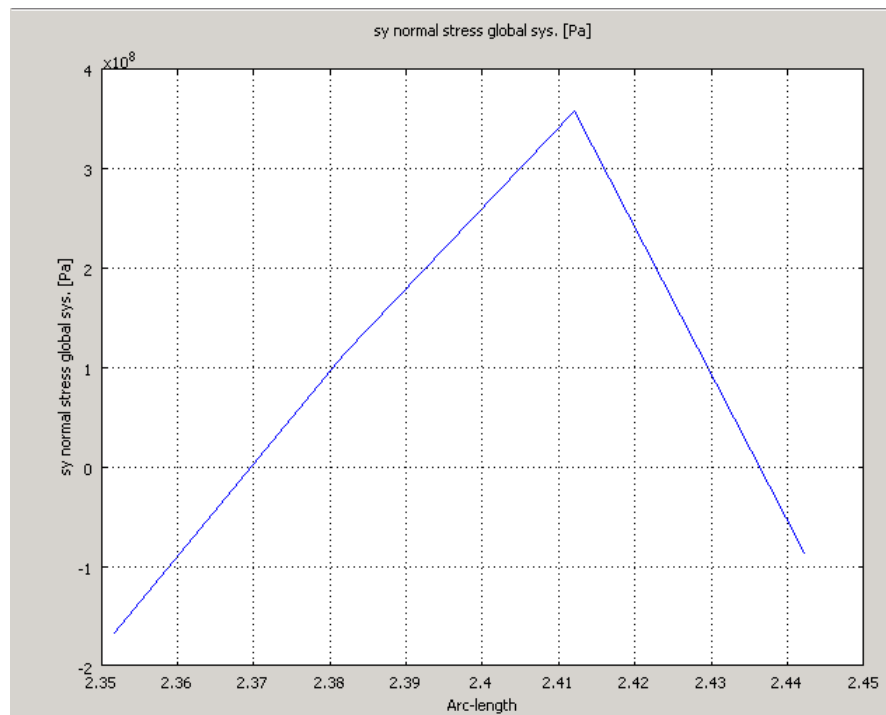
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $0.45 \cdot 10^8 Pa$ στον x άξονα.

Β) Τομή στον y άξονα.



Εικόνα 28 Τομή τύπου α στον y άξονα.

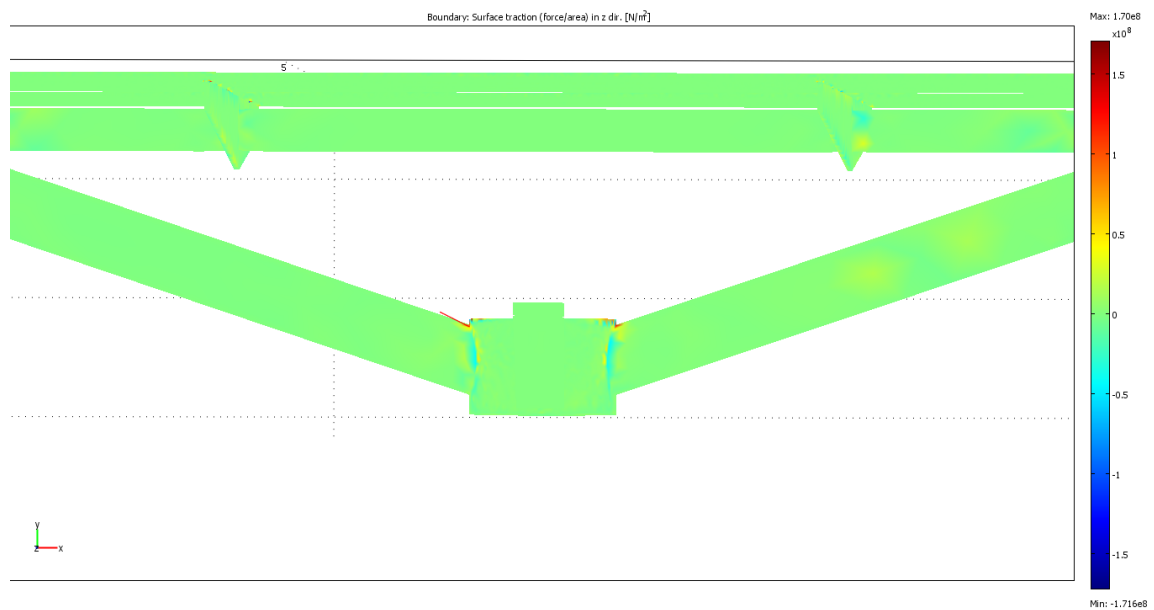
Διάγραμμα τάσεων στον y άξονα.



Εικόνα 29 Διάγραμμα τάσεων στον y άξονα.

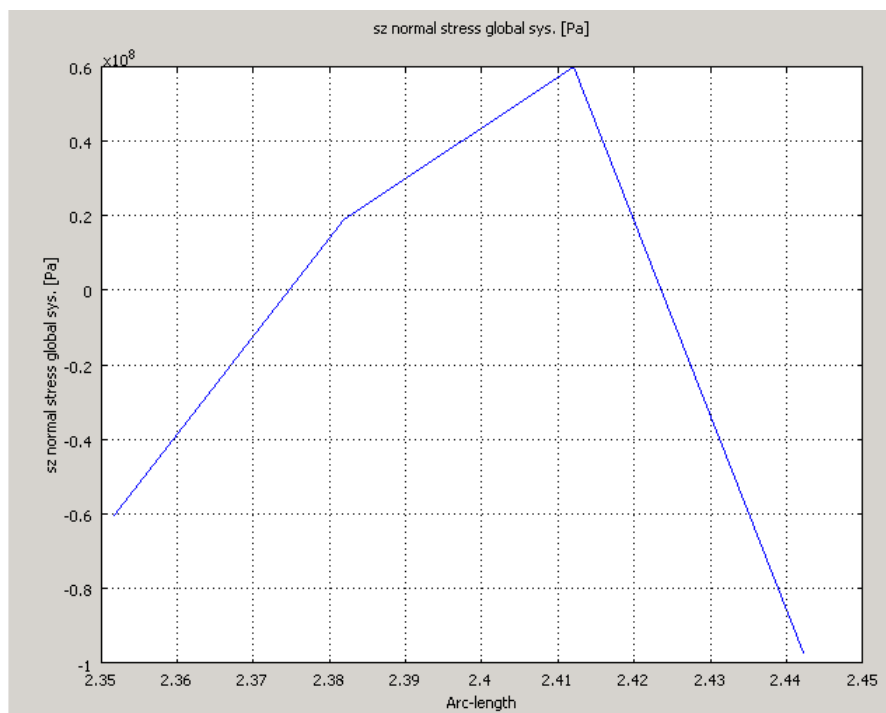
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $1.22 \times 10^8 \text{ Pa}$ στον y άξονα.

Γ) Τομή στον z άξονα.



Εικόνα 30 Τομή τύπου α στον z άξονα.

Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα.

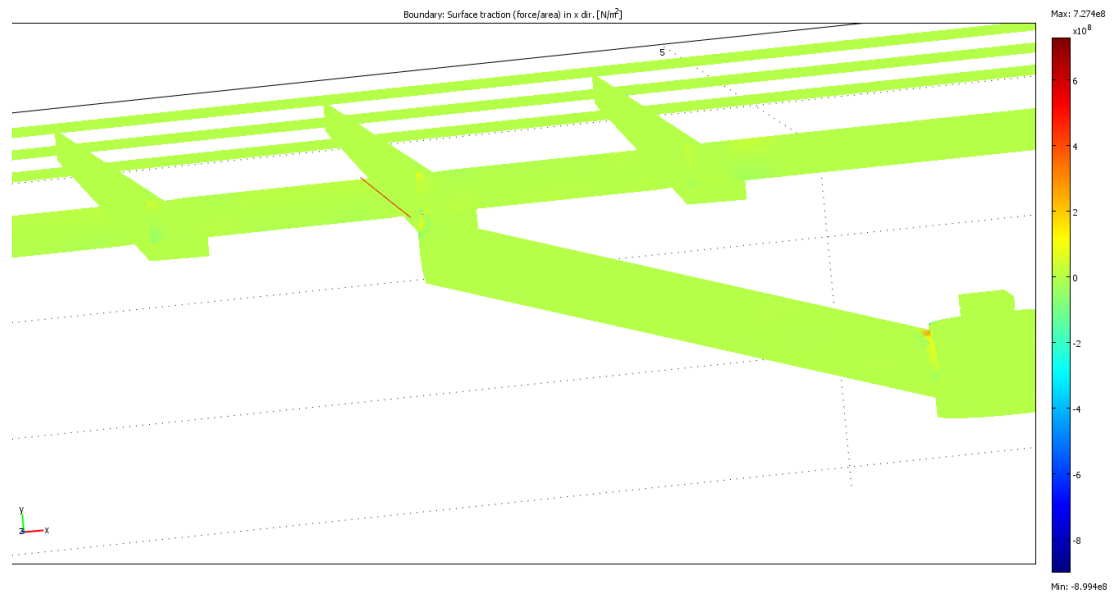


Εικόνα 31 Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα.

Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $-0.16 \times 10^8 \text{ Pa}$ στον z άξονα.

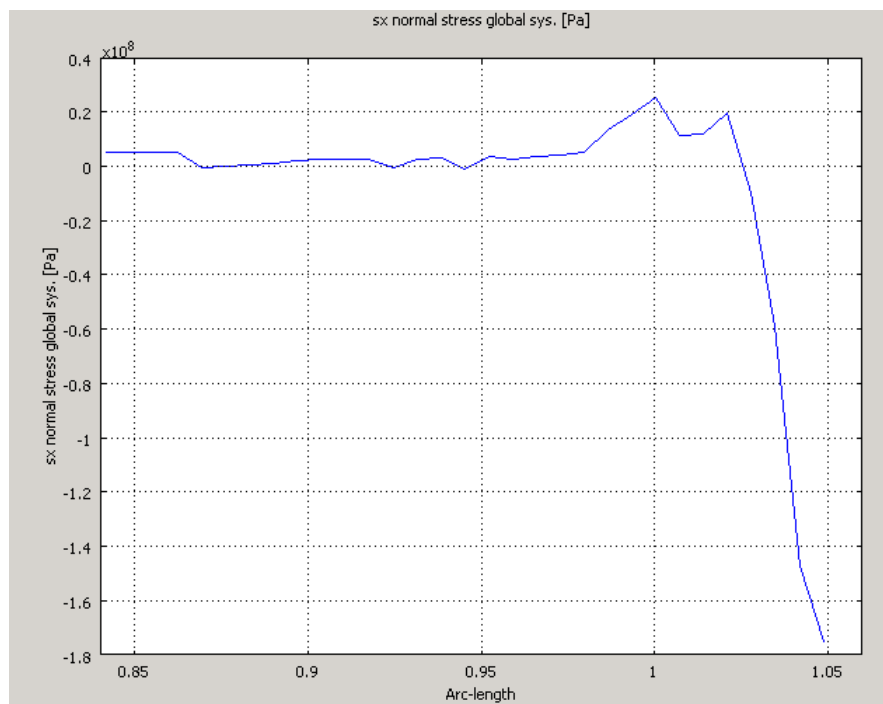
- Τομή στα σημεία σύνδεσης της σχάρας με τους άξονες στήριξης.

A) Τομή στον x άξονα



Εικόνα 32 Τομή τύπου b στον x άξονα.

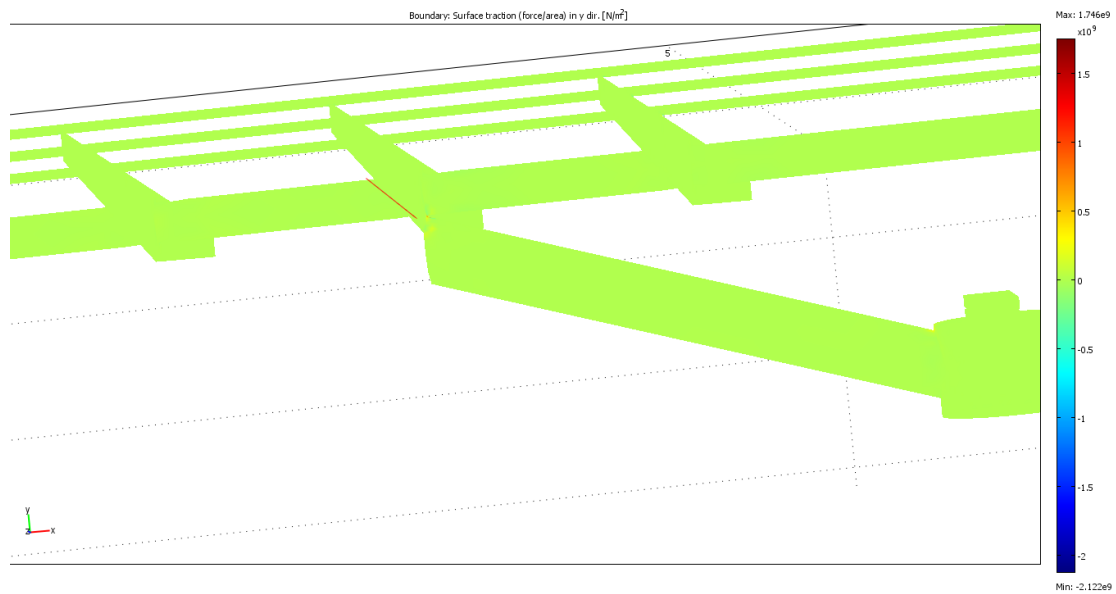
Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα



Εικόνα 33 Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα.

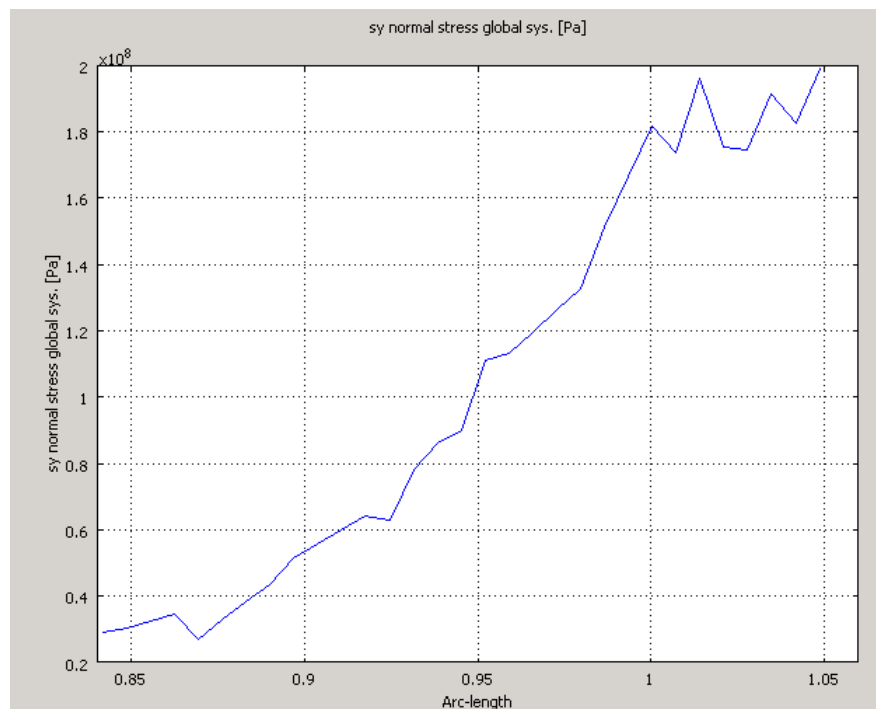
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $-0.66 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ στον x άξονα.

B) Τομή στον y άξονα.



Εικόνα 34 Τομή τύπου b στον y άξονα.

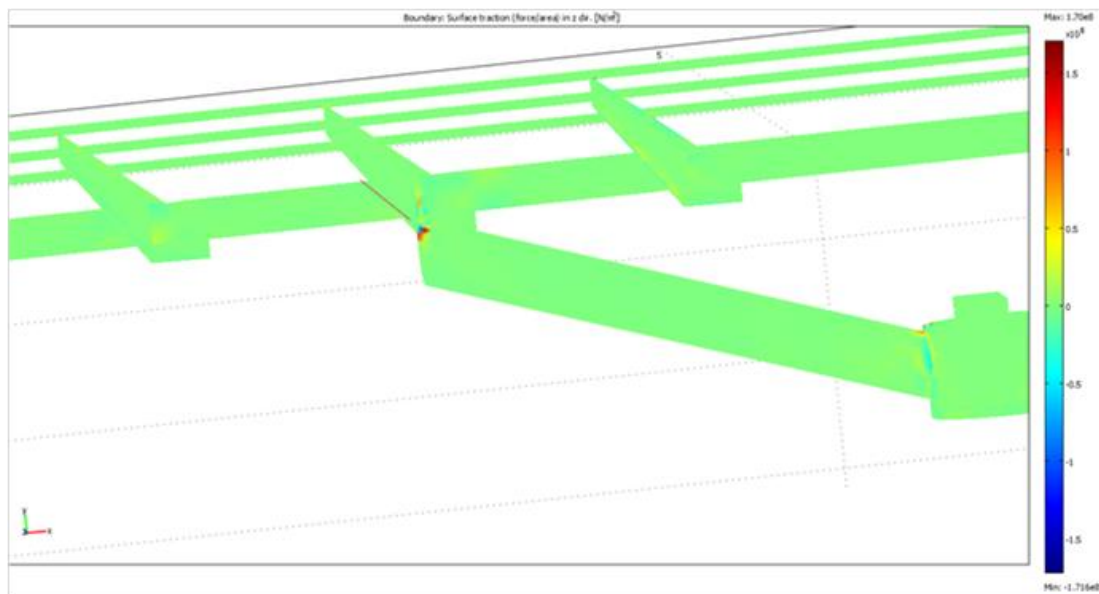
Διάγραμμα τάσεων στον y άξονα.



Εικόνα 35 Διάγραμμα τάσεων στον y άξονα.

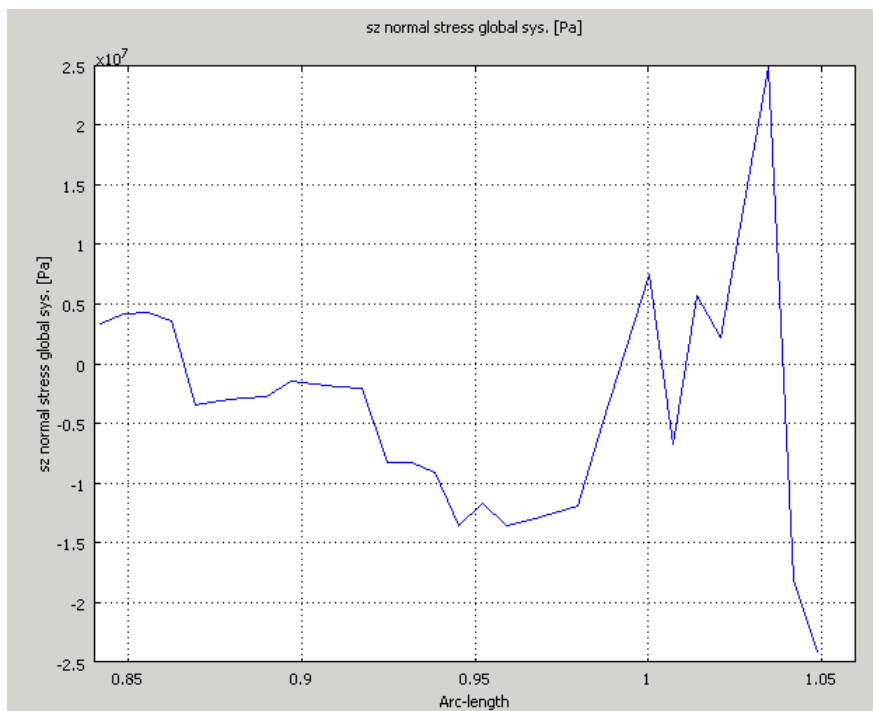
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $1.32 \times 10^8 Pa$ στον y άξονα.

Γ) Τομή στον z άξονα.



Εικόνα 36 Τομή τύπου b στον z άξονα.

Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα



Εικόνα 37 Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα.

Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $0.307 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ στον z άξονα.

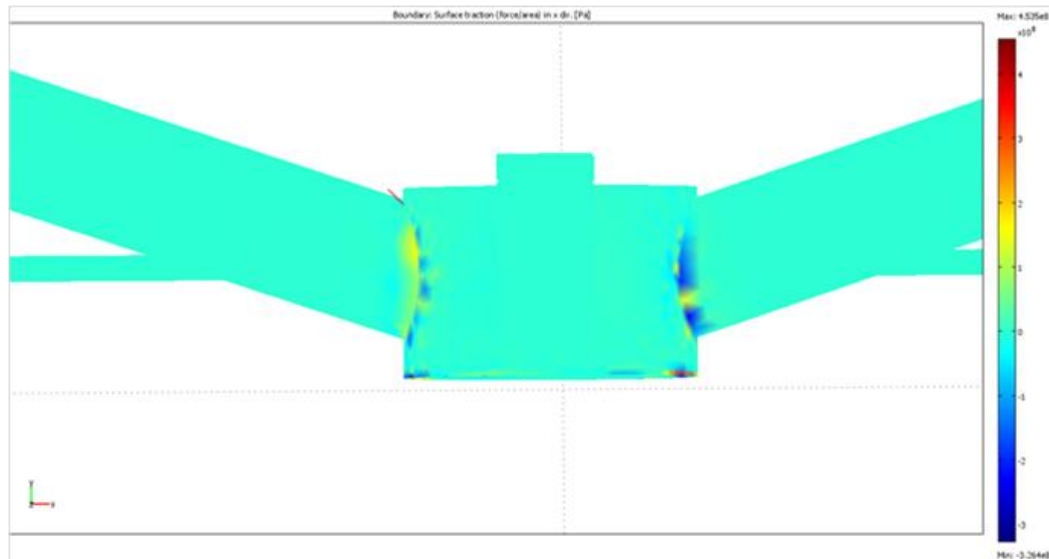
4.2 Μοντέλα ανεμοπίεσης.

Περίπτωση 1

Παρατίθενται οι τομές και τα διάγραμματα των τάσεων στους x, y και z άξονες.

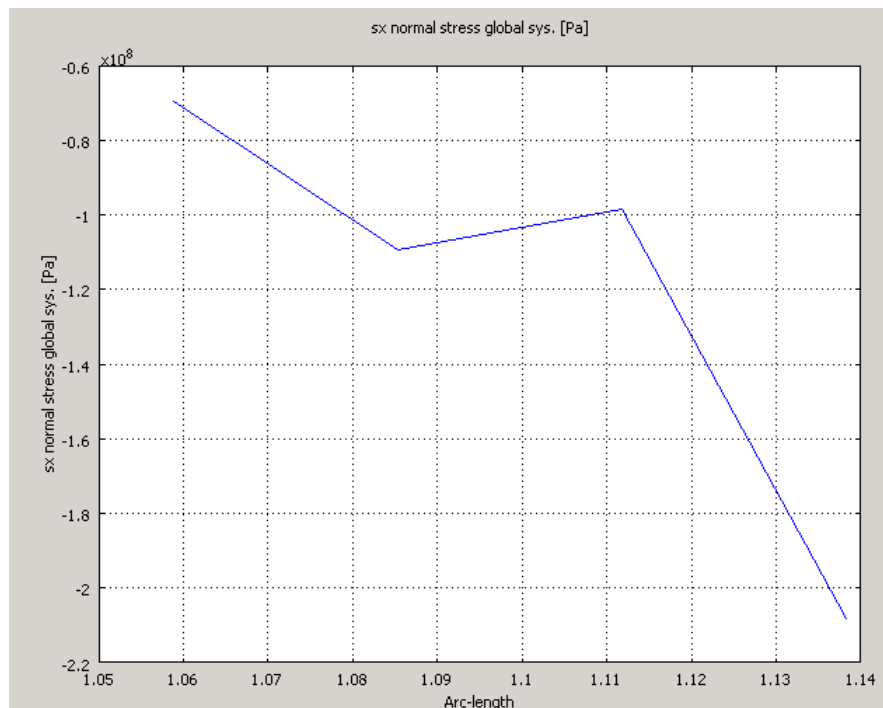
- Τομή στο σημείο σύνδεσης του πυλώνα με τους άξονες στήριξης.

Α) Τομή στον x άξονα.



Εικόνα 38 Τομή τύπου α στον x άξονα.

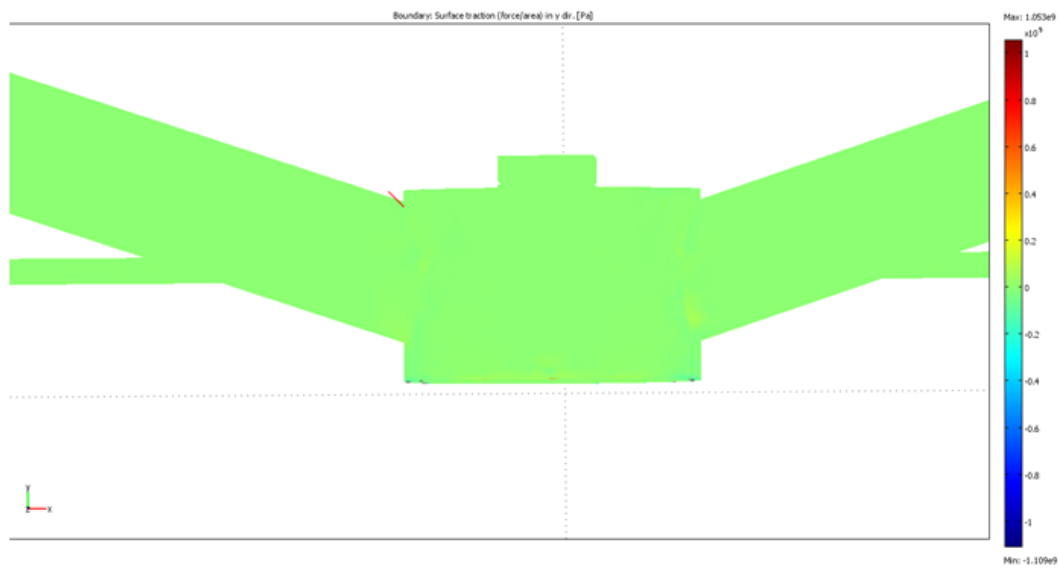
Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα.



Εικόνα 39 Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα.

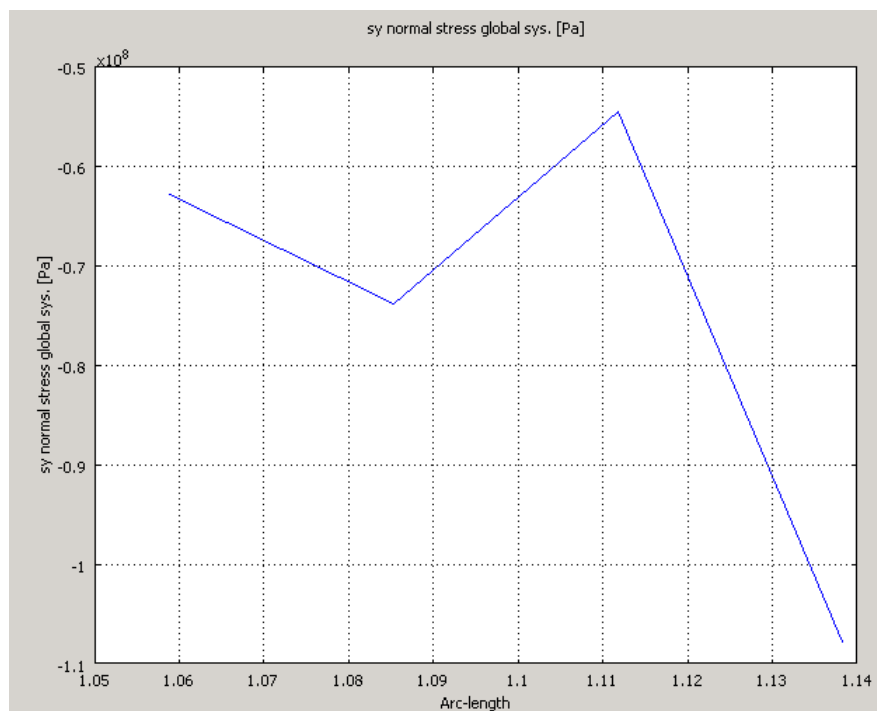
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $-1.35 * 10^8 Pa$ στον x άξονα.

B) Τομή στον y άξονα



Εικόνα 40 Τομή τύπου a στον y άξονα.

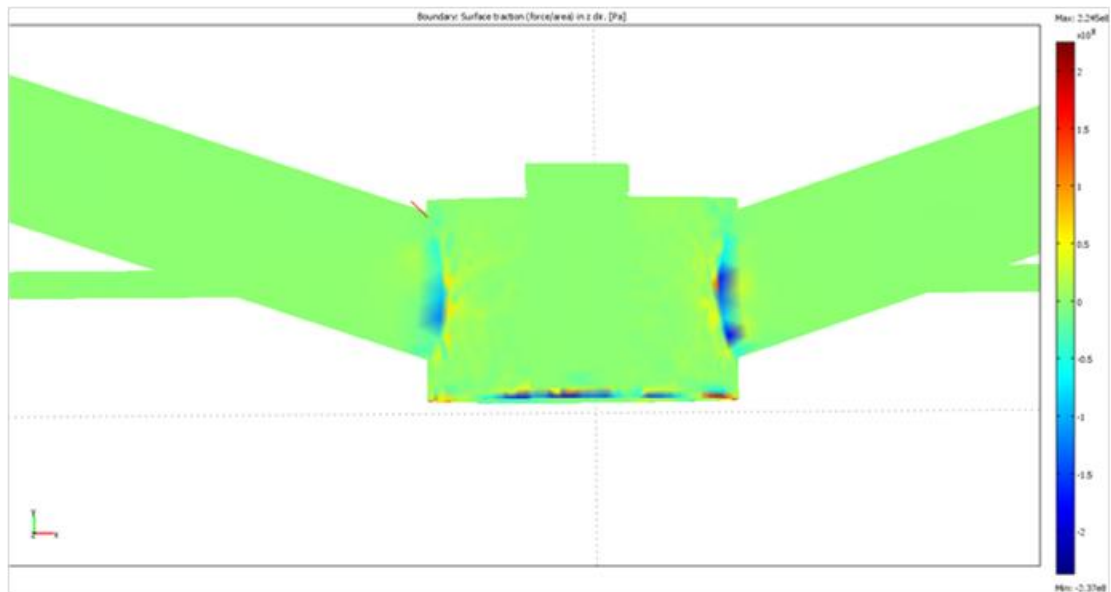
Διάγραμμα τάσεων στον y άξονα.



Εικόνα 41 Διάγραμμα τάσεων στον y άξονα.

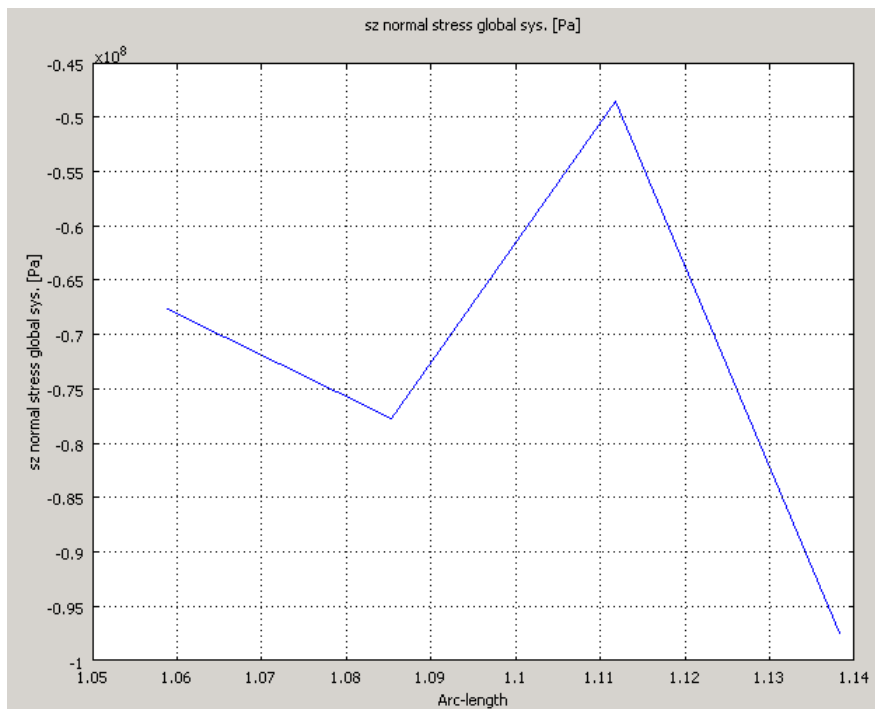
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $-0.788 * 10^8 Pa$ στον y άξονα .

Γ) Τομή στον z άξονα.



Εικόνα 42 Τομή τύπου α στον z άξονα.

Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα

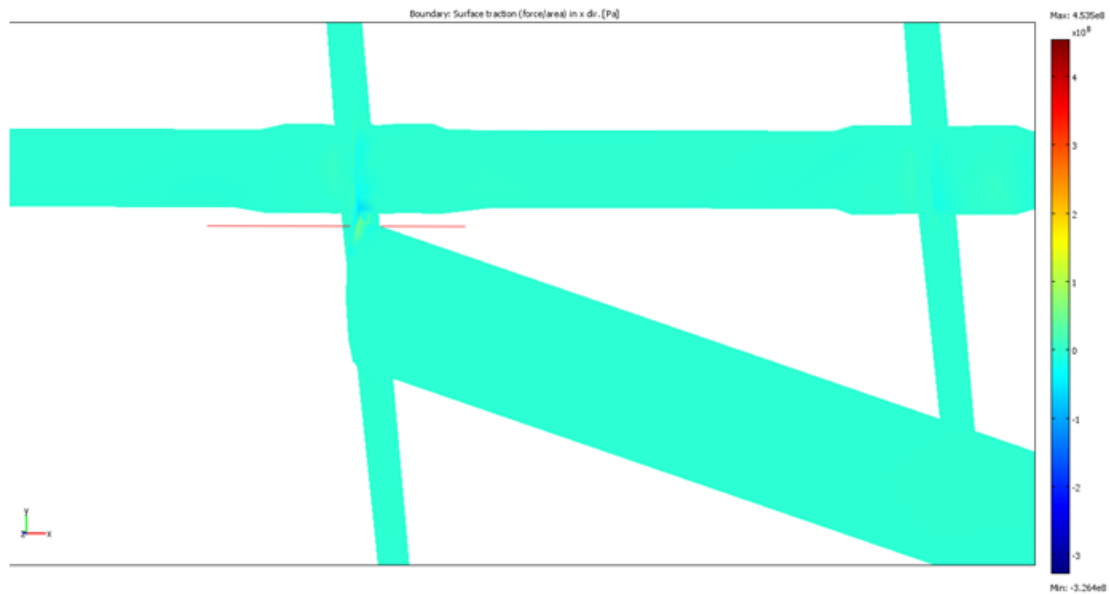


Εικόνα 43 Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα

Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $-0.707 * 10^8 Pa$ στον z άξονα .

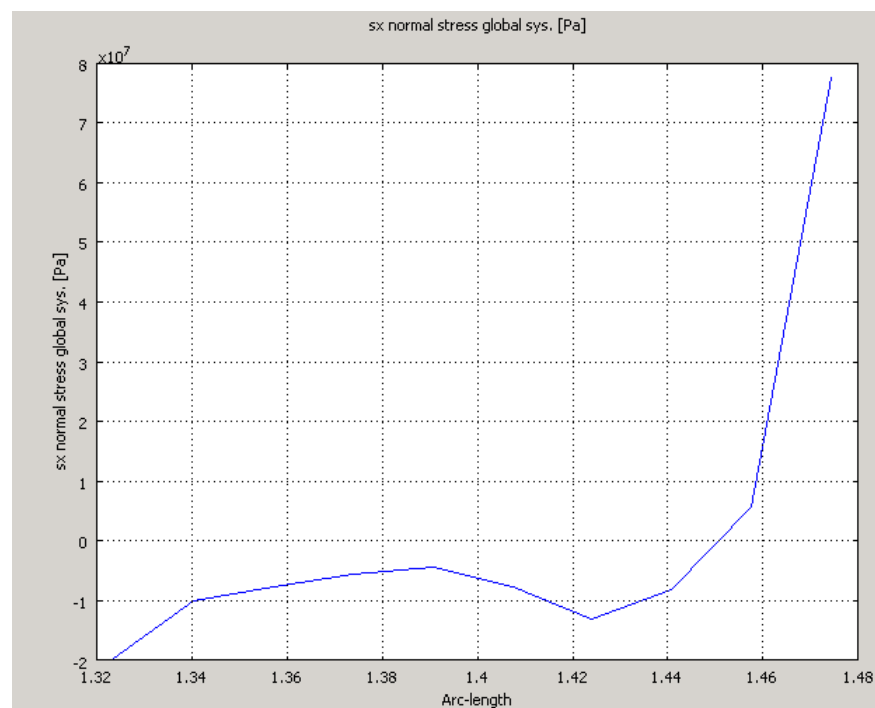
- Τομή στα σημεία σύνδεσης της σχάρας με τους άξονες στήριξης.

A) Τομή στον x άξονα



Εικόνα 44 Τομή τύπου b στον x άξονα.

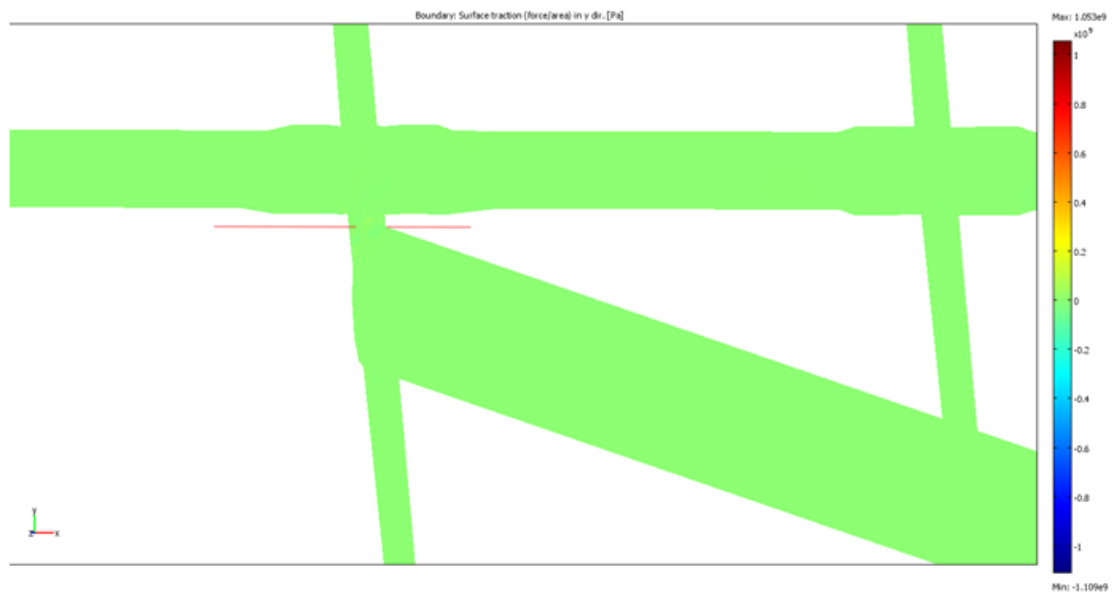
Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα



Εικόνα 45 Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα.

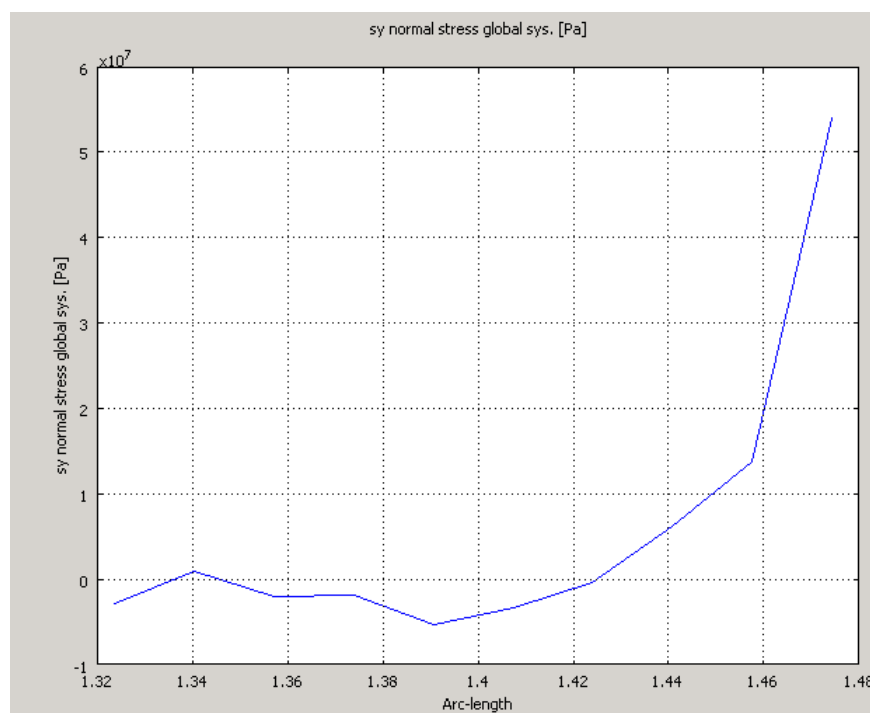
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $1.916 \times 10^7 \text{ Pa}$ στον x άξονα.

B) Τομή στον y άξονα.



Εικόνα 46 Τομή τύπου b στον γ άξονα.

Διάγραμμα τάσεων στον γ άξονα.



Εικόνα 47 Διάγραμμα τάσεων στον γ άξονα.

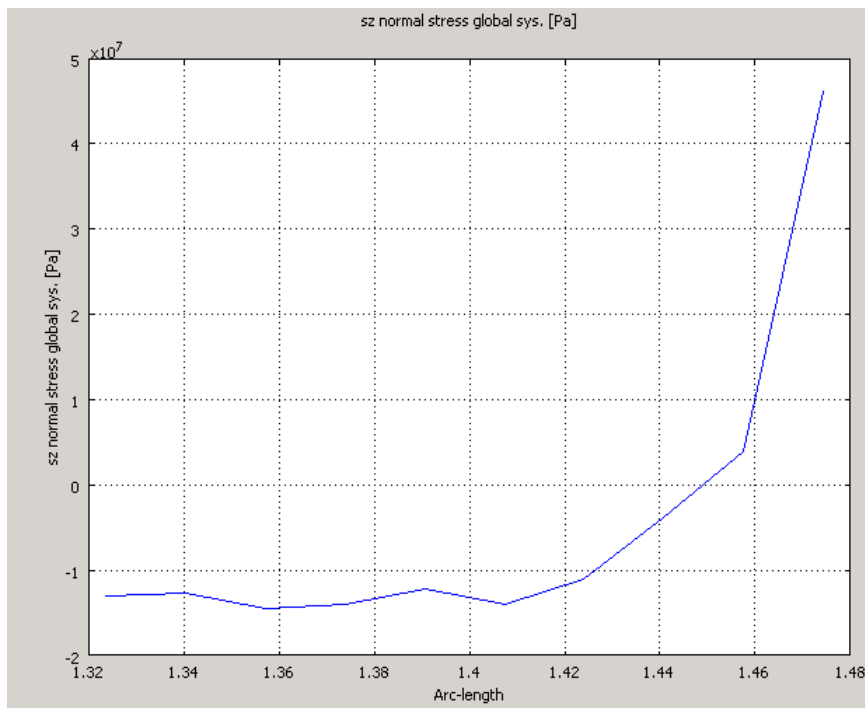
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $2.14 \times 10^7 Pa$ στον γ άξονα.

Γ) Τομή στον z άξονα.



Εικόνα 48 Τομή τύπου b στον z άξονα

Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα.



Εικόνα 49 Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα.

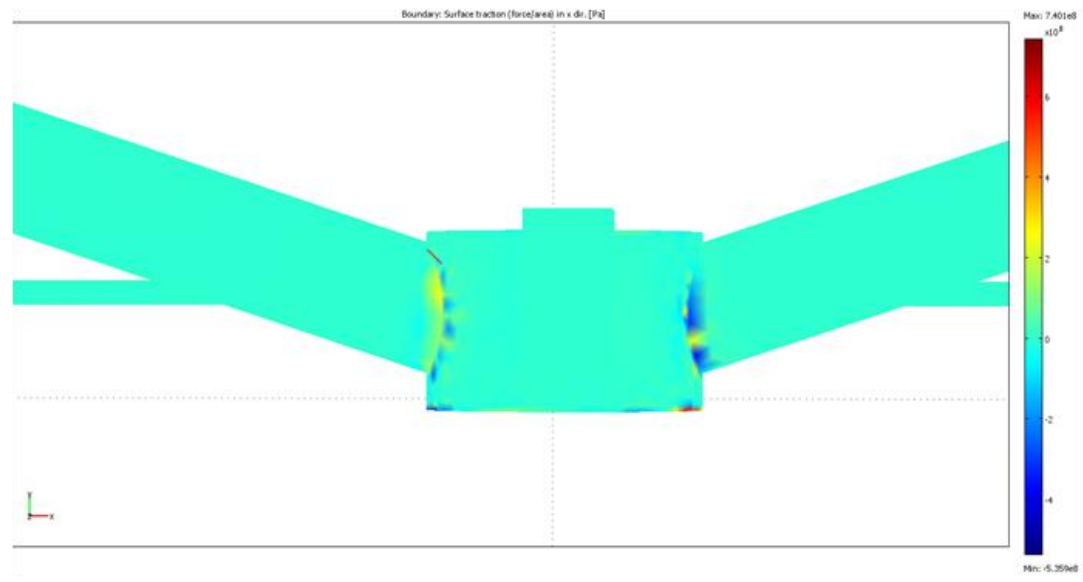
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $1.5 \cdot 10^7 \text{ Pa}$ στον z άξονα.

Περίπτωση 2

Παρατίθενται οι τομές και τα διάγραμματα των τάσεων στους x, y και z άξονες.

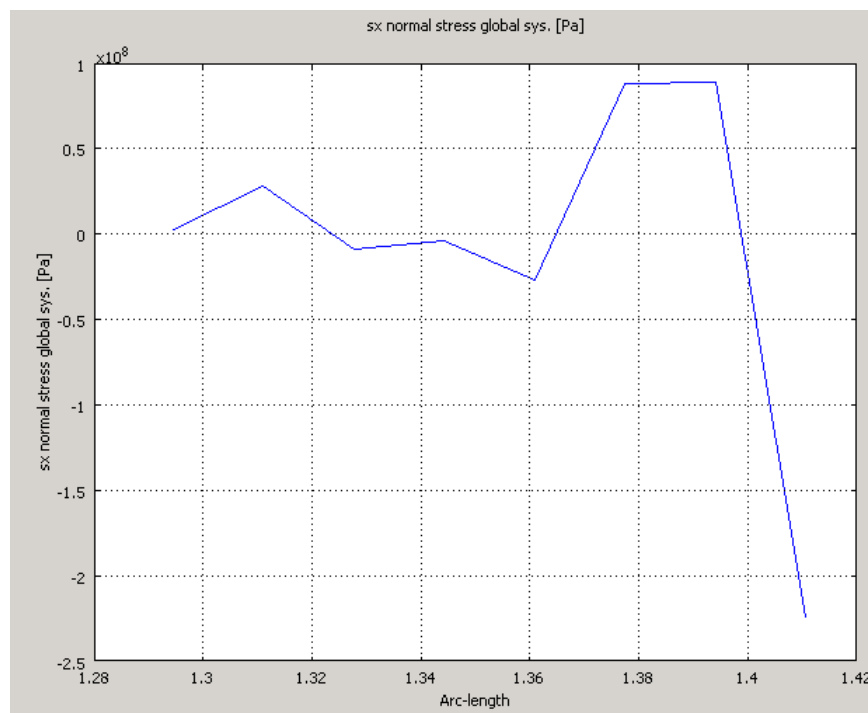
- Τομή στο σημείο σύνδεσης του πυλώνα με τους άξονες στήριξης.

Α) Τομή στον x άξονα



Εικόνα 50 Τομή τύπου α στον x άξονα.

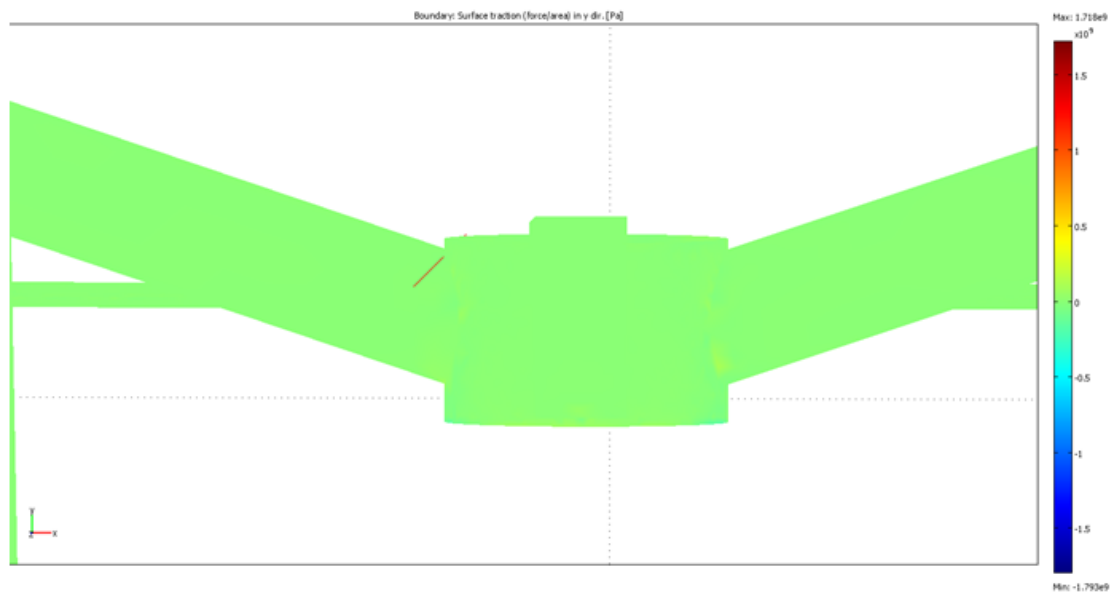
Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα.



Εικόνα 51 Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα.

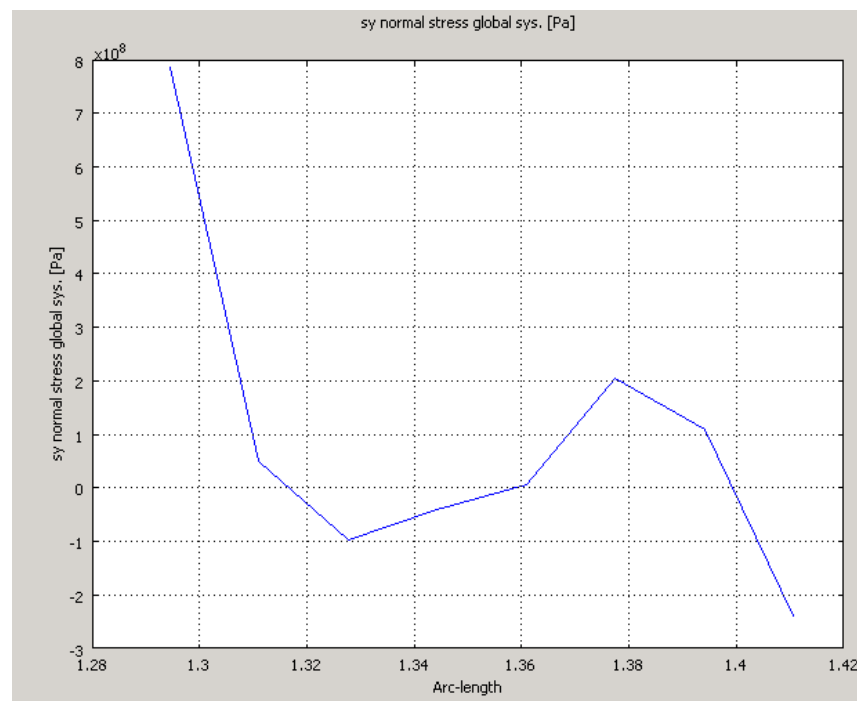
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $-0.4 * 10^8 Pa$ στον x άξονα.

B) Τομή στον y άξονα.



Εικόνα 52 Τομή τύπου a στον y άξονα.

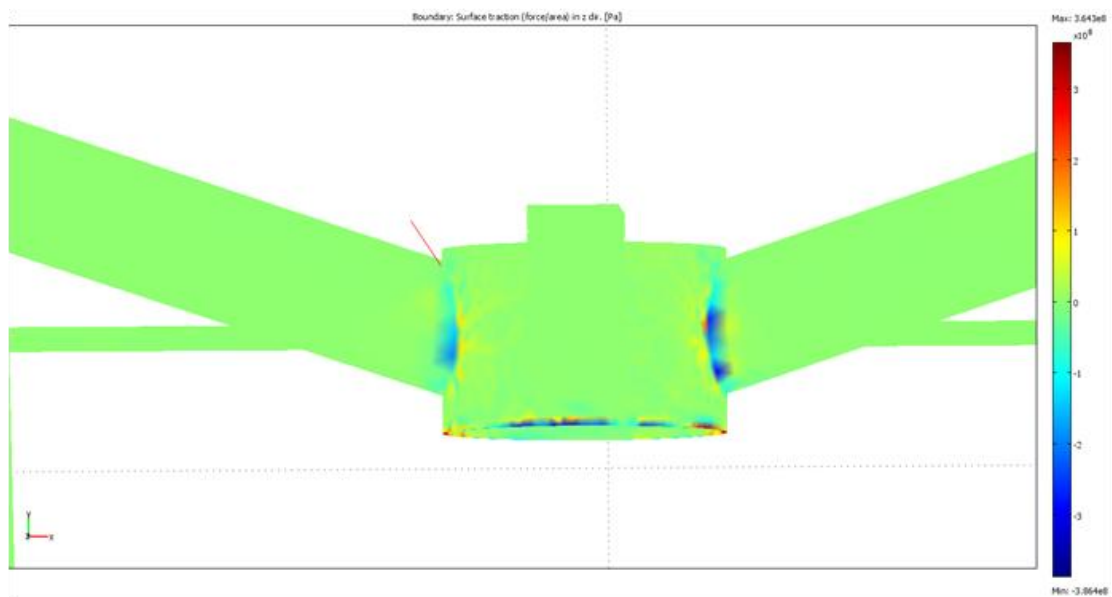
Διάγραμμα τάσεων στον y άξονα.



Εικόνα 53 Διάγραμμα τάσεων στον y άξονα.

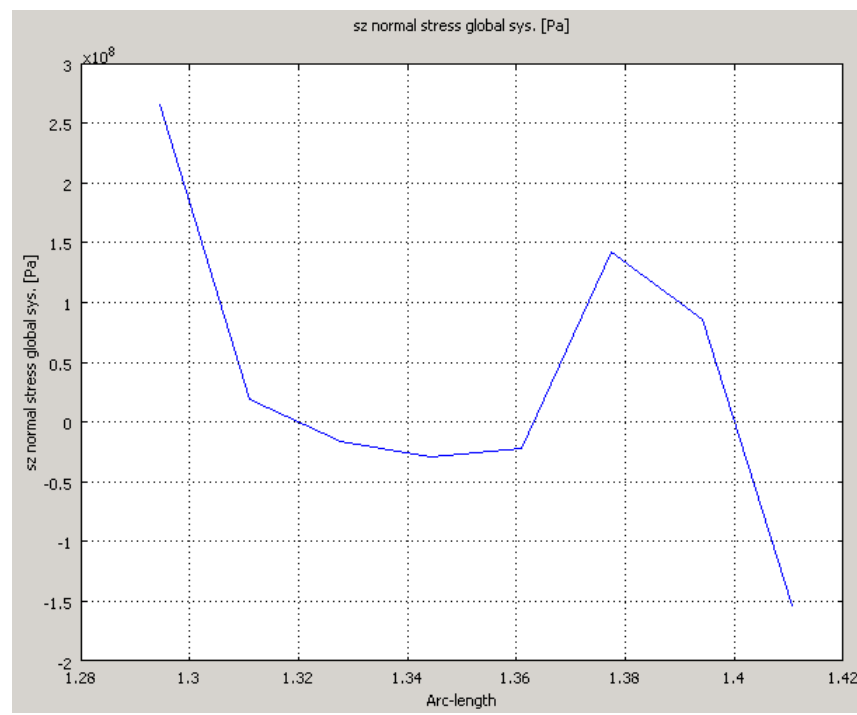
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $2.11 \cdot 10^8 Pa$ στον y άξονα.

Γ) Τομή στον z άξονα.



Εικόνα 54 Τομή τύπου α στον z άξονα

Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα.

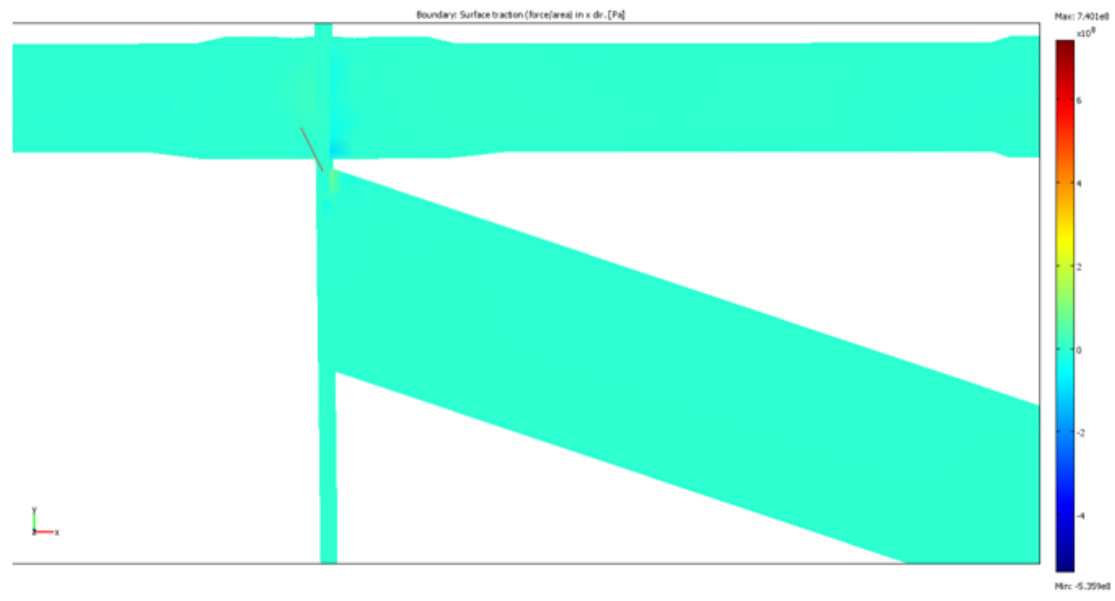


Εικόνα 55 Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα.

Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $0.5 \cdot 10^8 Pa$ στον z άξονα.

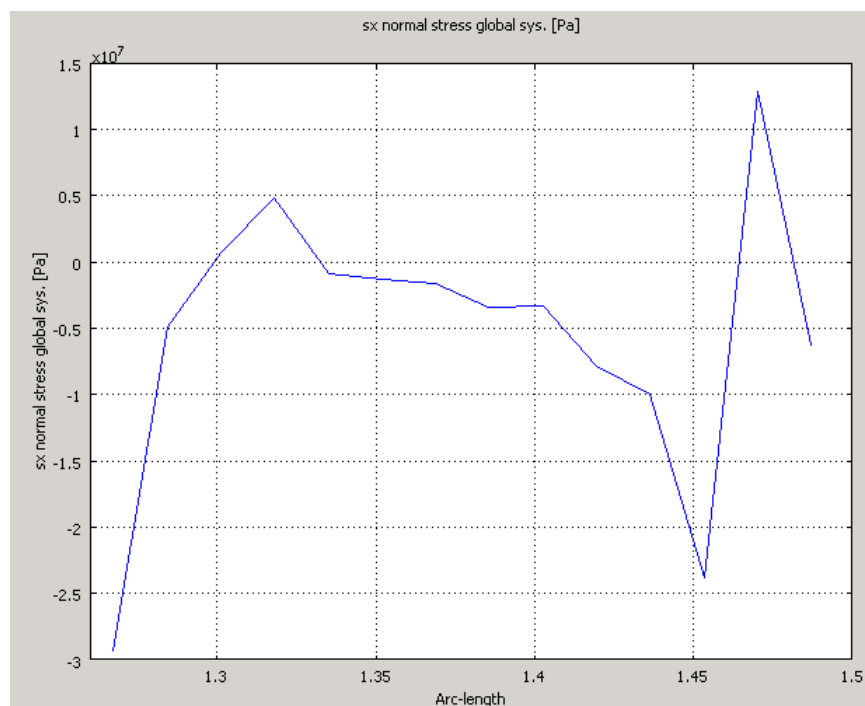
- Τομή στα σημεία σύνδεσης της σχάρας με τους άξονες στήριξης.

A) Τομή στον x άξονα.



Εικόνα 56 Τομή τύπου b στον x άξονα.

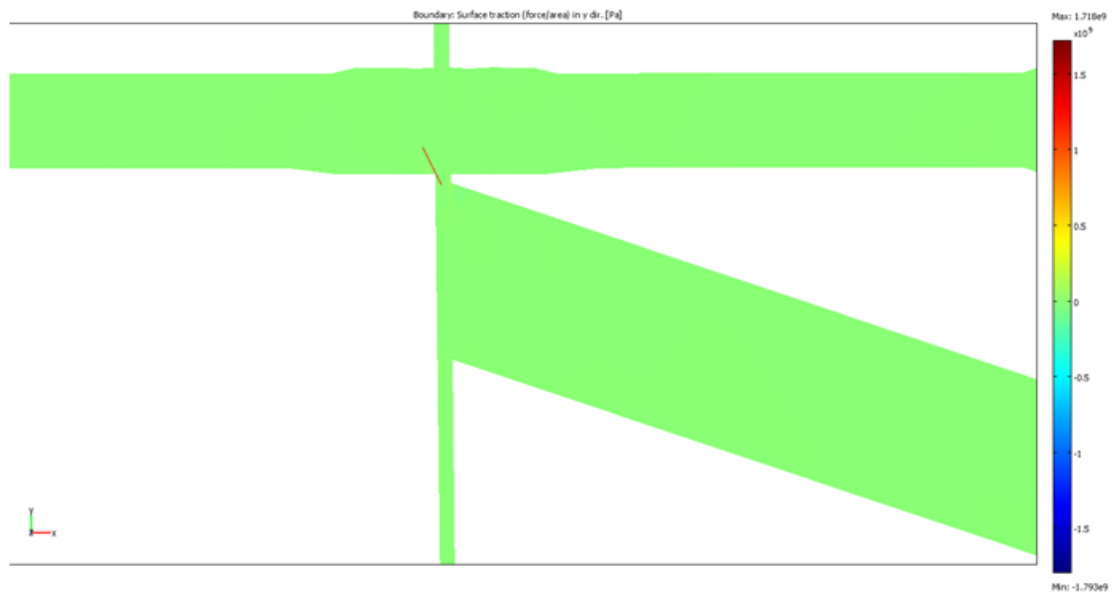
Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα.



Εικόνα 57 Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα.

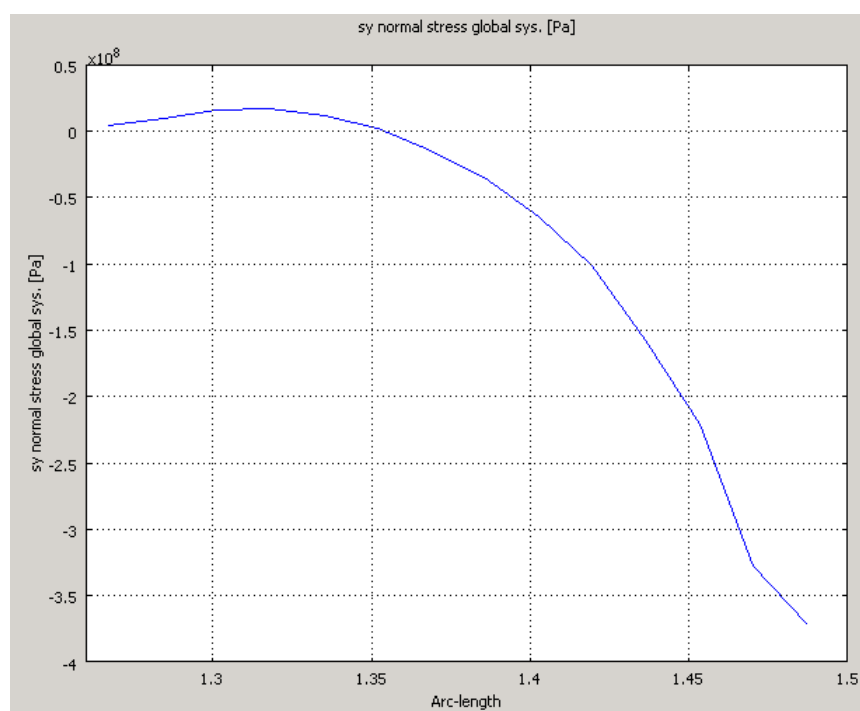
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $-0.659 \times 10^8 Pa$ στον x άξονα.

B) Τομή στον y άξονα.



Εικόνα 58 Τομή τύπου b στον γ άξονα.

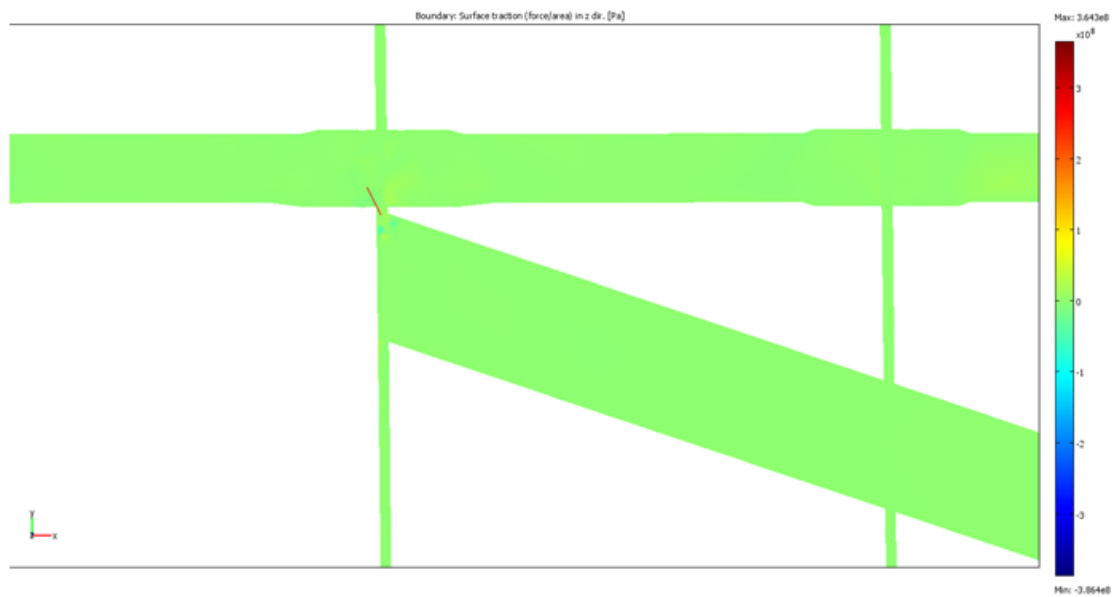
Διάγραμμα τάσεων στον γ άξονα.



Εικόνα 59 Διάγραμμα τάσεων στον γ άξονα.

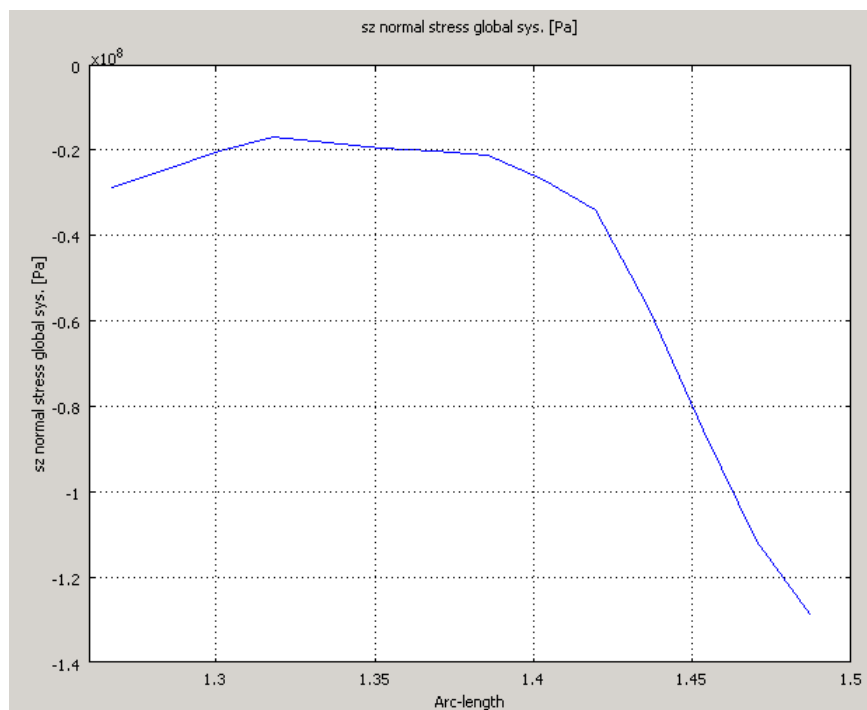
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $-1.75 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ στον γ άξονα.

Γ) Τομή στον z άξονα.



Εικόνα 60 Τομή τύπου b στον z άξονα.

Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα.



Εικόνα 61 Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα.

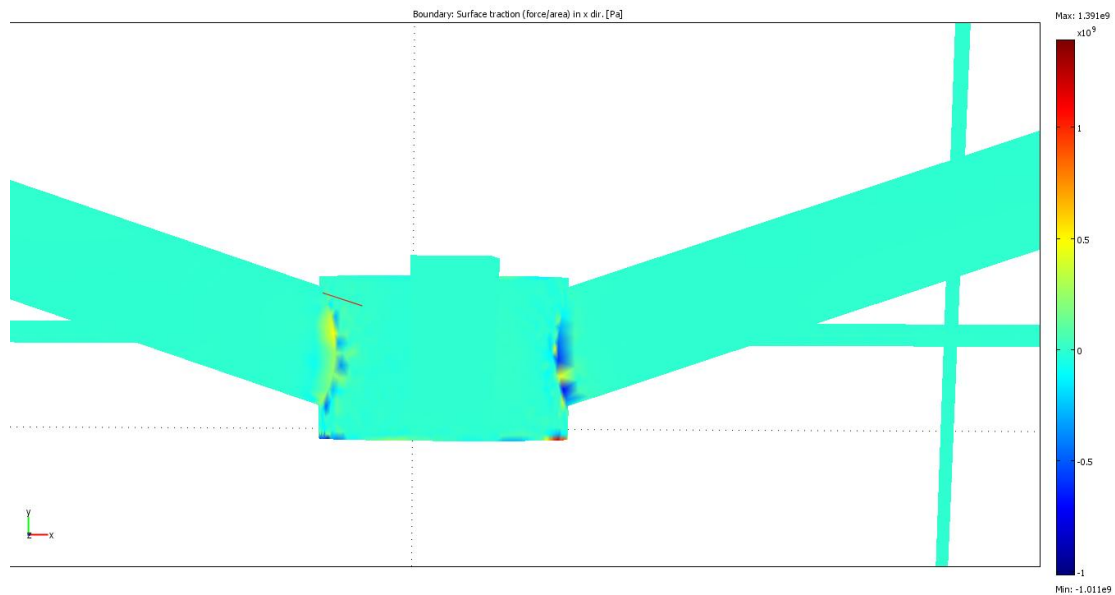
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $-0.628 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ στον z άξονα.

Περίπτωση 3

Παρατίθενται οι τομές και τα διάγραμμα των τάσεων στους x, y και z άξονες .

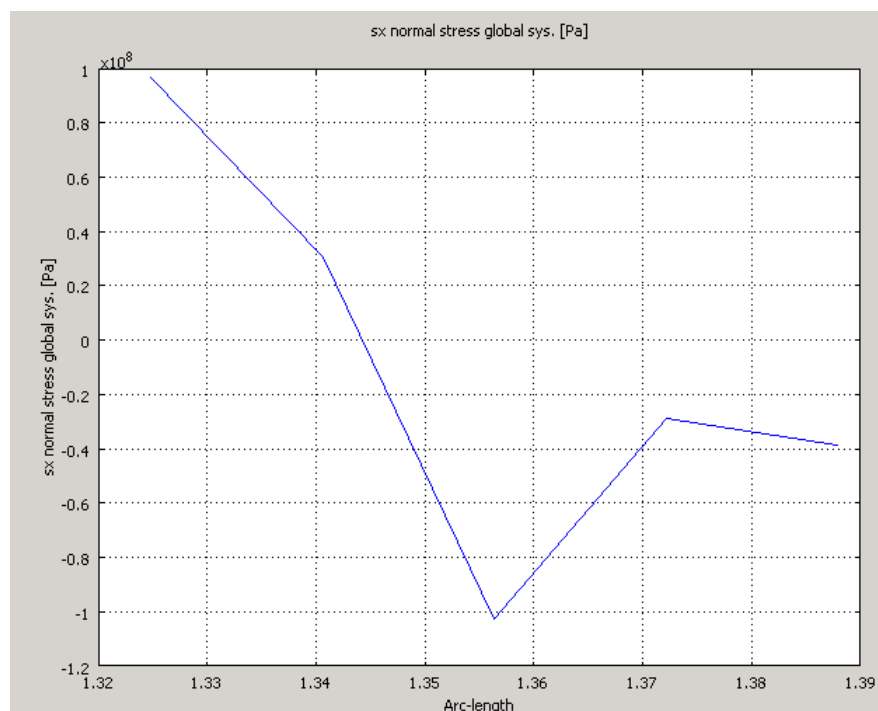
- Τομή στο σημείο σύνδεσης του πυλώνα με τους άξονες στήριξης.

A) Τομή στον x άξονα.



Εικόνα 62 Τομή τύπου a στον x άξονα.

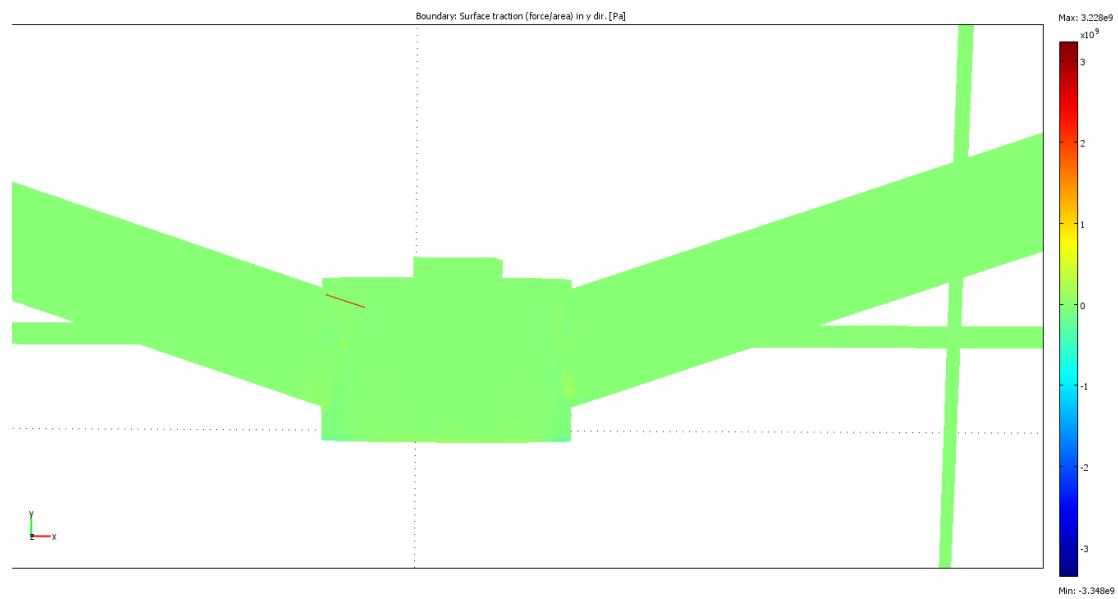
Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα.



Εικόνα 63 Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα.

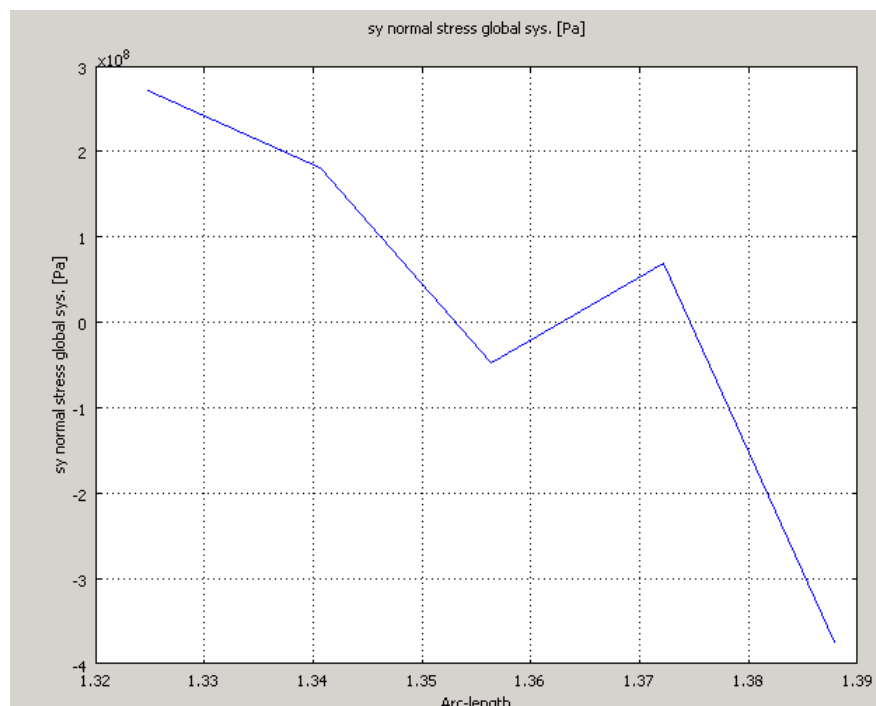
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $-0.17 \times 10^8 Pa$ στον x άξονα.

B) Τομή στον y άξονα.



Εικόνα 64 Τομή τύπου α στον y άξονα.

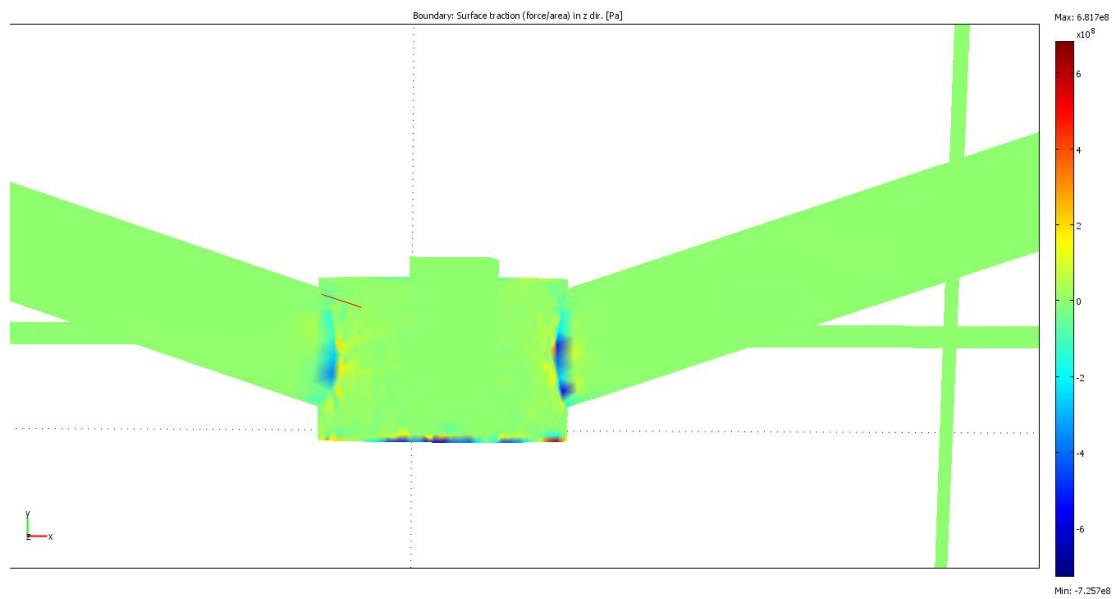
Διάγραμμα τάσεων στον y άξονα.



Εικόνα 65 Διάγραμμα τάσεων στον y άξονα

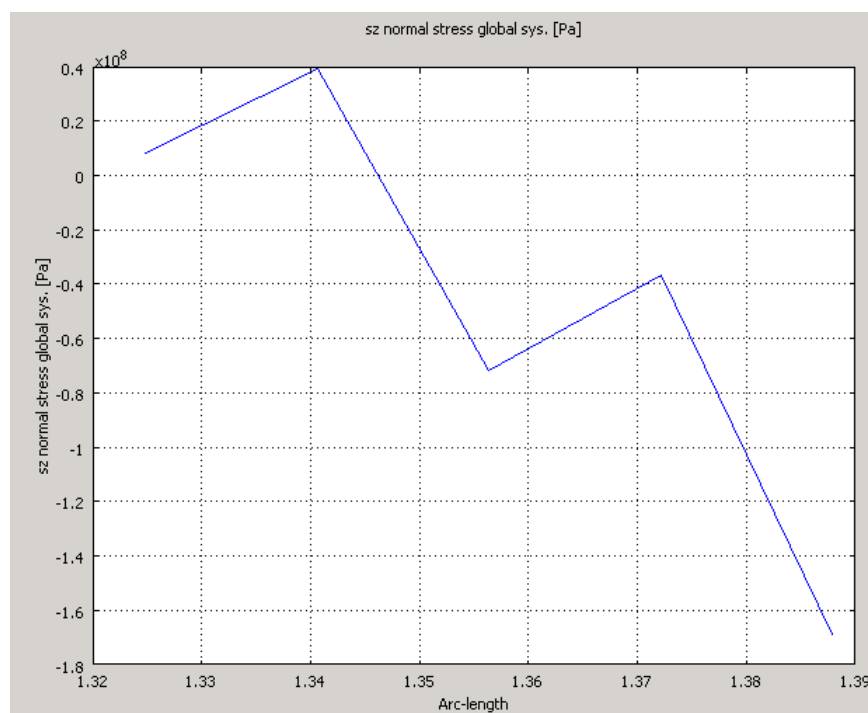
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $-0.375 * 10^8 Pa$ στον y άξονα.

Γ) Τομή στον z άξονα.



Εικόνα 66 Τομή τύπου α στον z άξονα.

Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα.

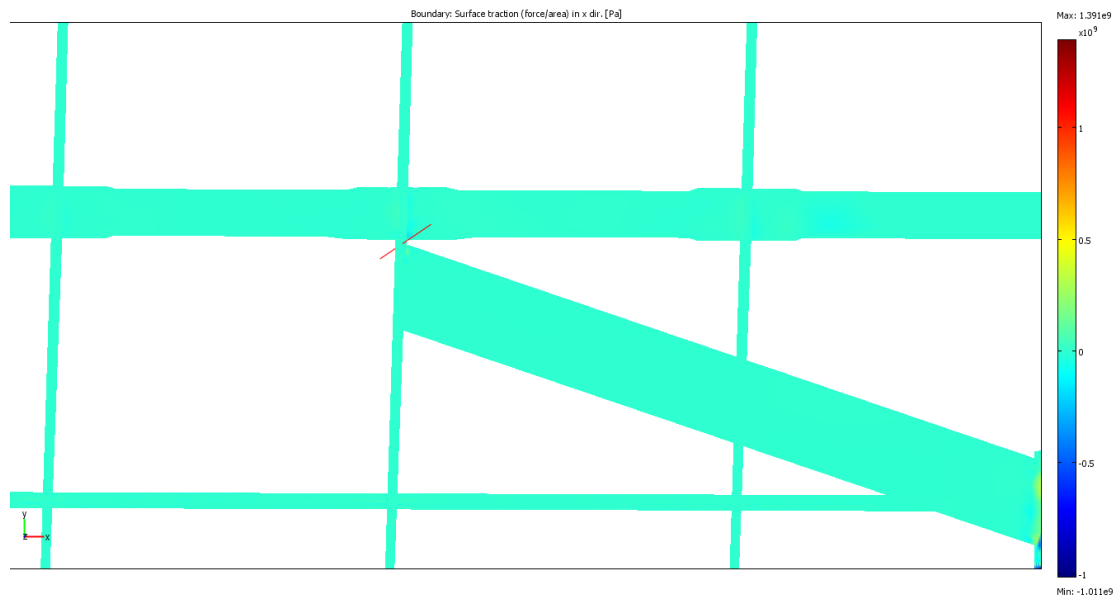


Εικόνα 67 Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα

Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $-0.525 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ στον z άξονα.

- Τομή στα σημεία σύνδεσης της σχάρας με τους άξονες στήριξης

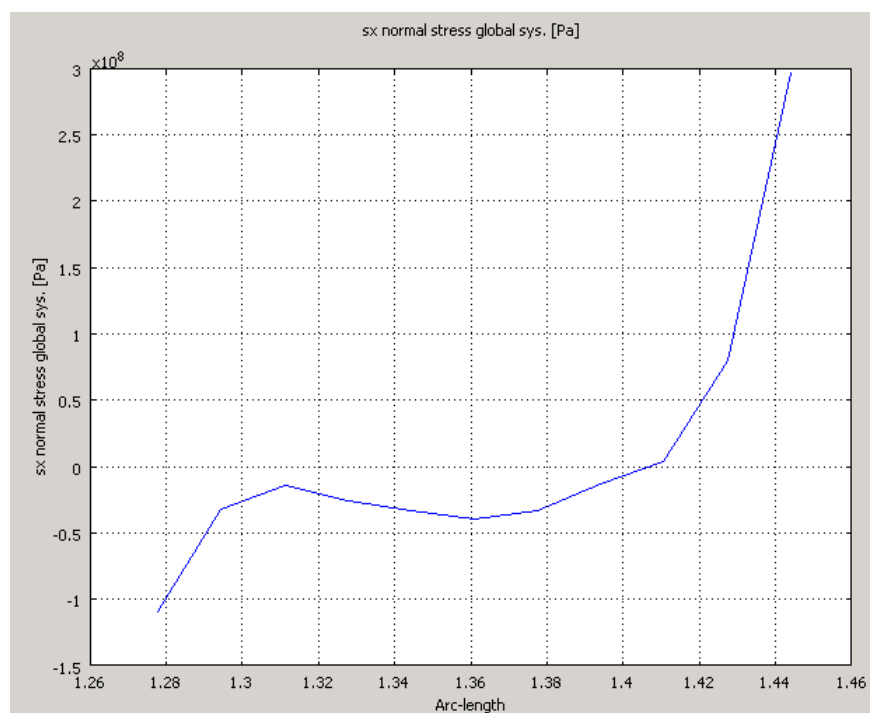
A) Τομή στον x άξονα.



Εικόνα 68 Τομή τύπου b στον x άξονα.

Παρατίθενται τα διάγραμματα των τάσεων στους x, y και z άξονες.

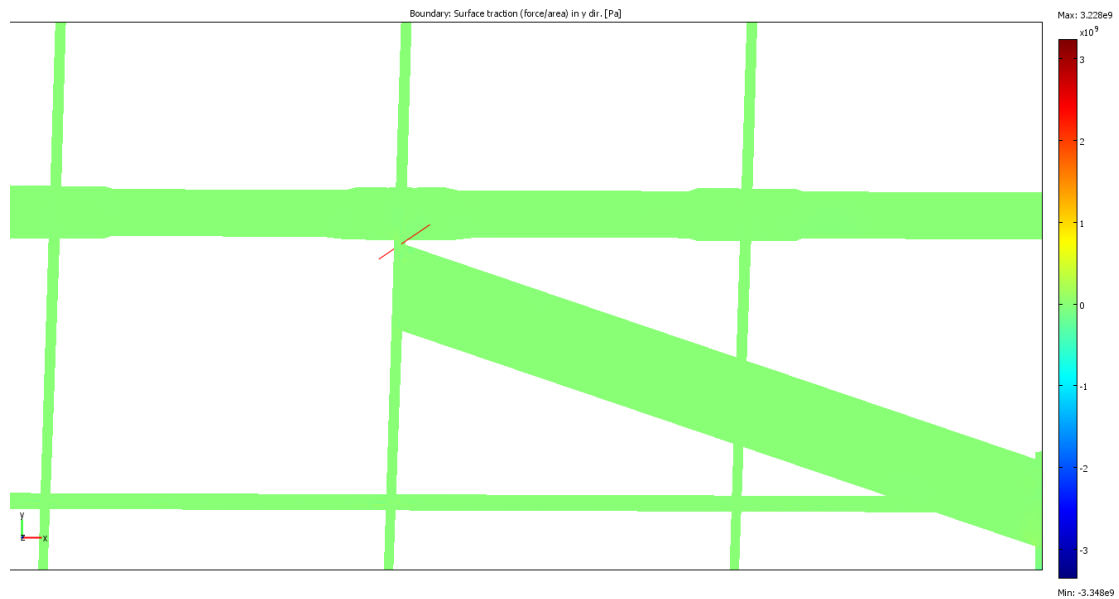
Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα.



Εικόνα 69 Διάγραμμα τάσεων στον x άξονα.

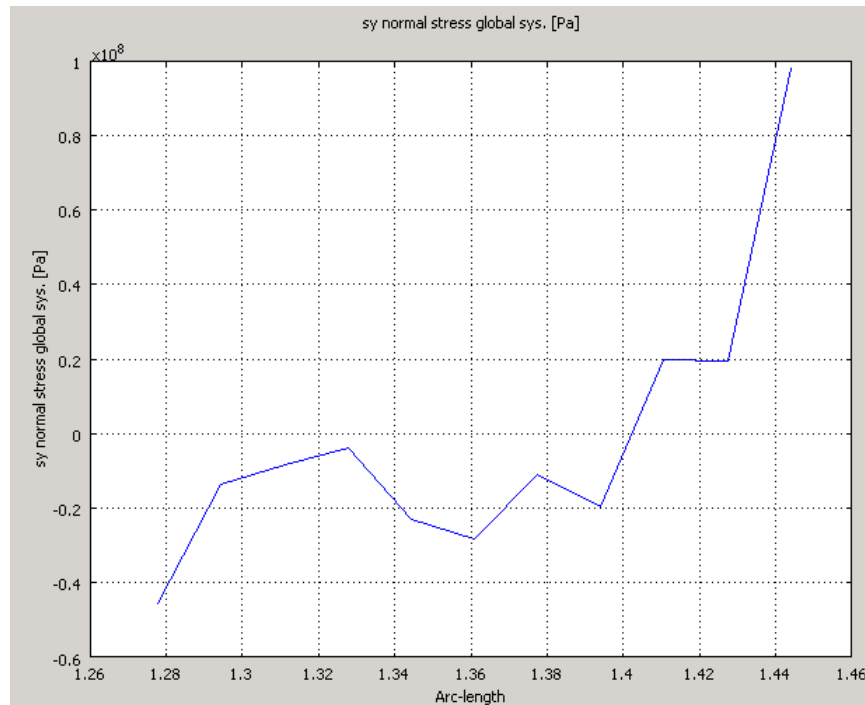
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $0.75 \cdot 10^8 \text{ Pa}$ για τον x άξονα.

Β) Τομή στον y άξονα.



Εικόνα 70 Τομή τύπου b στον y άξονα.

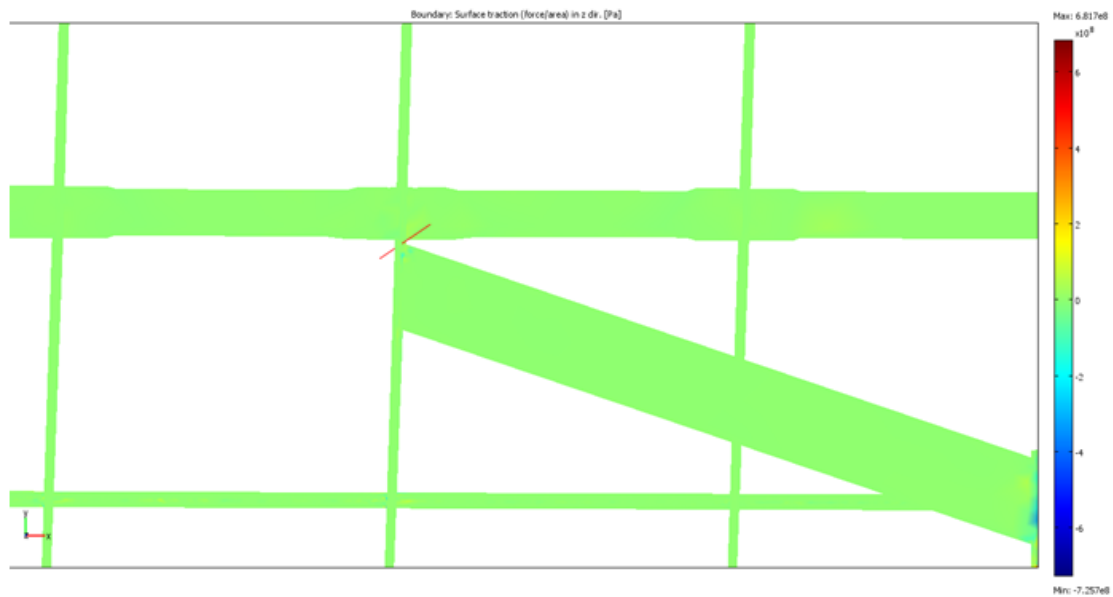
Διάγραμμα τάσεων στον y άξονα.



Εικόνα 71 Διάγραμμα τάσεων στον y άξονα.

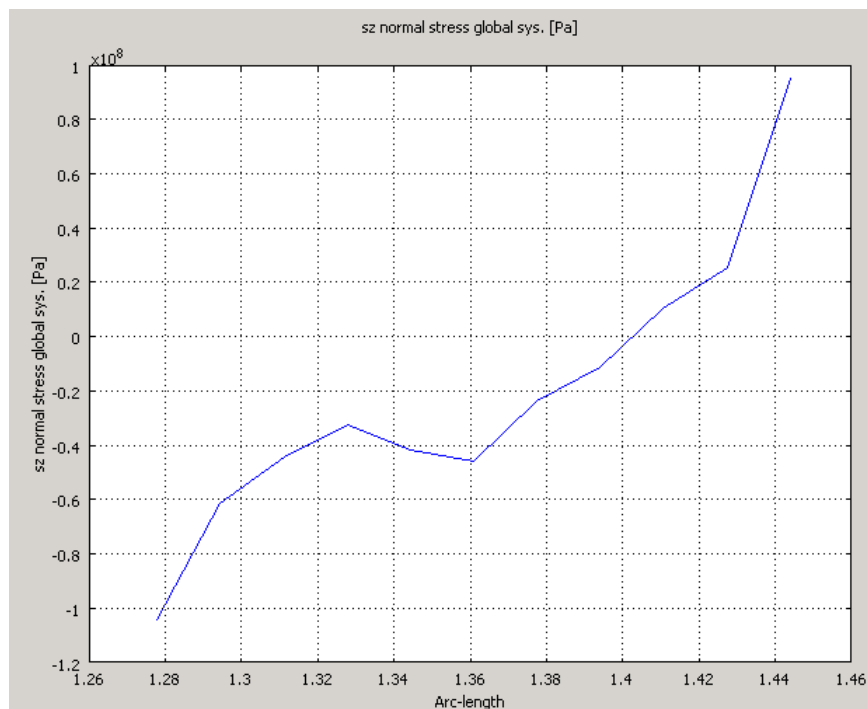
Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $0.08 \times 10^8 Pa$ για τον y άξονα.

Γ) Τομή στον z άξονα.



Εικόνα 72 Τομή τύπου b στον z άξονα.

Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα



Εικόνα 73 Διάγραμμα τάσεων στον z άξονα.

Όπου παρατηρούμε ότι η μέση τάση είναι $-0.15 \cdot 10^8 Pa$ για τον z άξονα.

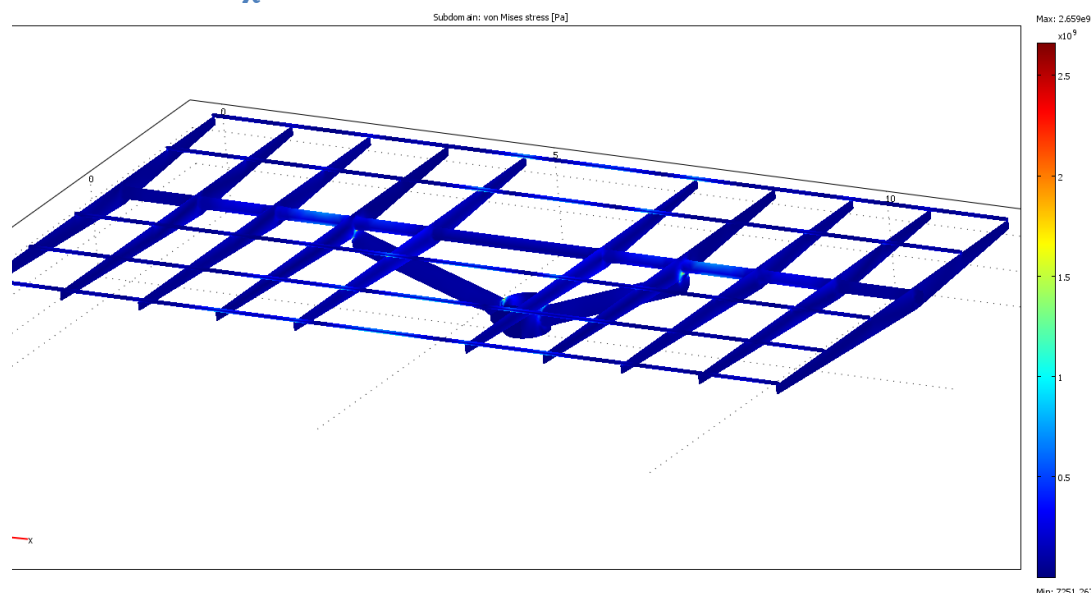
4.3 Τάσεις Von Mises

Οι τάσεις Von Mises χρησιμοποιούνται γενικά ως βάση για την δημιουργία μοντέλων αστοχίας, πλαστικοποίησης. Στην προκειμένη χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό των περιοχών πιθανής αστοχίας. Δεν εισερχόμεθα στην περιοχή μη γραμμικής ανάλυσης, για να μελετήσουμε παραπέρα αστοχία. Επομένως το σημαντικό είναι πως οι τάσεις αυτές είναι ανεξάρτητες του τυχαία επιλεγθέντος συστήματος αναφοράς, κάτι που δεν συμβαίνει για τις τάσεις Σ_x , Σ_y , Σ_z , οπότε αναμένουμε τα αποτελέσματα να είναι ανεξάρτητα του συστήματος αναφοράς, και συνεπώς αντικειμενικά.

Από τα δεδομένα του κατασκευαστή της στήριξης, βάση της οποίας σχεδιάσαμε, το υλικό της στήριξης είναι ατσάλι. Επομένως για την εισαγωγή του υλικού μέσω του Comsol, πάμε στην καρτέλα Subdomain Settings, επιλέγουμε την καρτέλα Material, καθώς και όλα τα στοιχεία της βάσης. Στη συνέχεια πηγαίνουμε στην επιλογή Load, όπου βρίσκονται όλα τα υλικά που διαθέτει το library(βιβλιοθήκη) του προγράμματος, και στην περίπτωση μας επιλέγουμε steel.

- $E=200 \cdot 10^9 \text{ Pa}$, Μέτρο ελαστικότητας (WILLIAM D. CALLISTER 2004)
- $1.64 \cdot 10^9 \text{ Pa}$, Όριο διαρροής (WILLIAM D. CALLISTER 2004)
- $\rho=7850 \text{ kg/m}^3$, Πυκνότητα (WILLIAM D. CALLISTER 2004)

4.3.1 Μοντέλο χιονιού



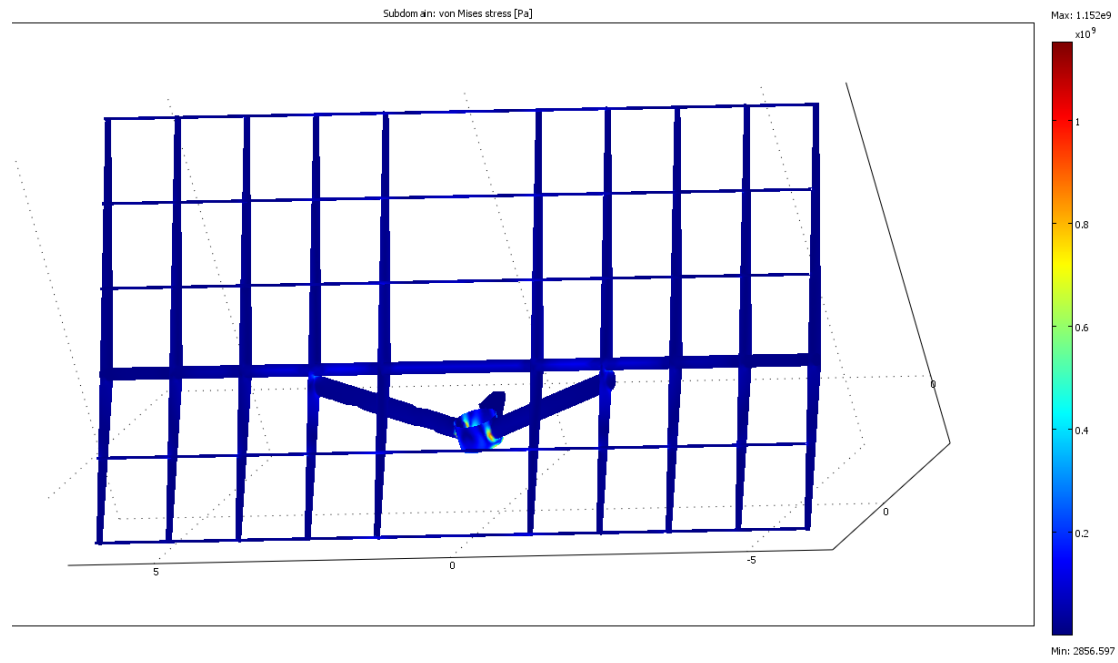
Εικόνα 74 Διάγραμμα Von Mises, μοντέλου χιονιού.

Η μέγιστη τιμή της κλίμακας του διαγράμματος είναι $2.659 \cdot 10^9 \text{ Pa}$, και η ελάχιστη $0.7251 \cdot 10^9 \text{ Pa}$. Οι μέγιστες φορτίσεις παρουσιάζονται στο σημείο ένωσης του πυλώνα με τους άξονες στήριξης, καθώς και στα σημεία σύνδεσης της σχάρας με τα άκρα των αξόνων στήριξης. Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη περιοχή της εγκατάστασής μας έχει μπλε χρώμα. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική κατασκευή

δέχεται φορτίσεις κυρίως μέχρι $1 * 10^9 Pa$ δηλαδή εντός του επιτρεπόμενου ορίου διαρροής. Οι τιμές παρατίθενται στην κλίμακα που παραβάλλεται δεξιά του διαγράμματος

4.3.2 Μοντέλα Ανεμοπίεσης

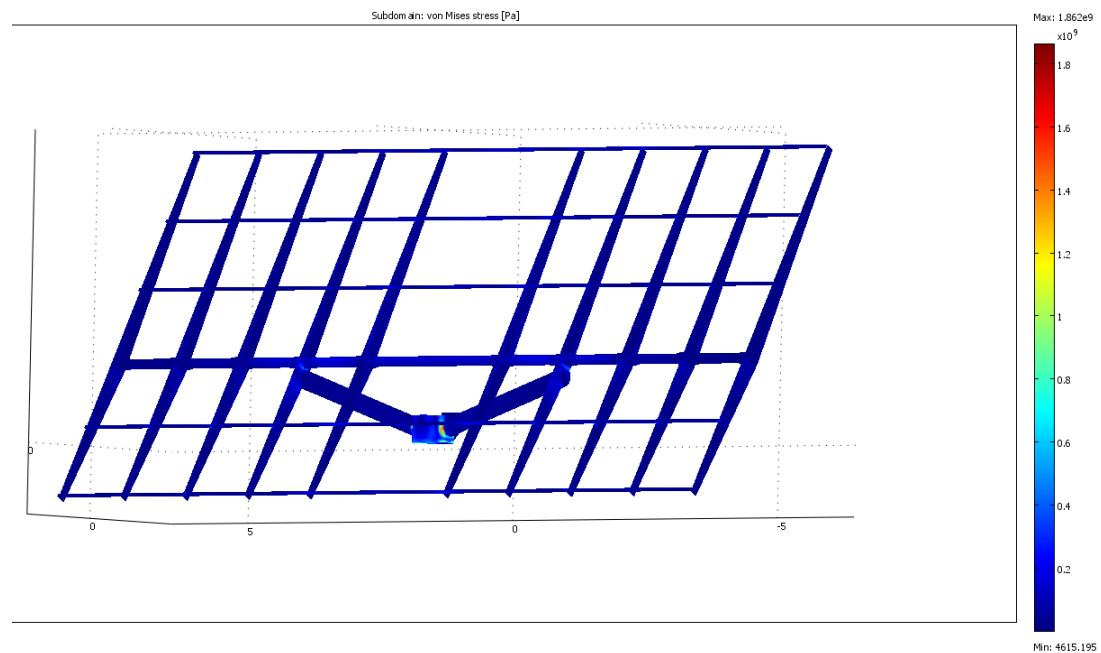
Περίπτωση 1



Εικόνα 75 Διάγραμμα Von Mises ανεμοπιέσεων. Περίπτωση 1.

Η μέγιστη τιμή της κλίμακας του διαγράμματος είναι $1.152 * 10^9 Pa$, και η ελάχιστη $0.2856 * 10^4 Pa$. Οι μέγιστες φορτίσεις παρουσιάζονται στο σημείο ένωσης του πυλώνα με τους άξονες στήριξης. Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη περιοχή της εγκατάστασής μας έχει μπλε χρώμα όπου αυτό σημαίνει ότι η συνολική κατασκευή δέχεται φορτίσεις κυρίως μέχρι $0.4 * 10^9 Pa$ δηλαδή εντός του επιτρεπόμενου ορίου διαρροής. Οι τιμές παρατίθενται στην κλίμακα που παραβάλλεται δεξιά του διαγράμματος

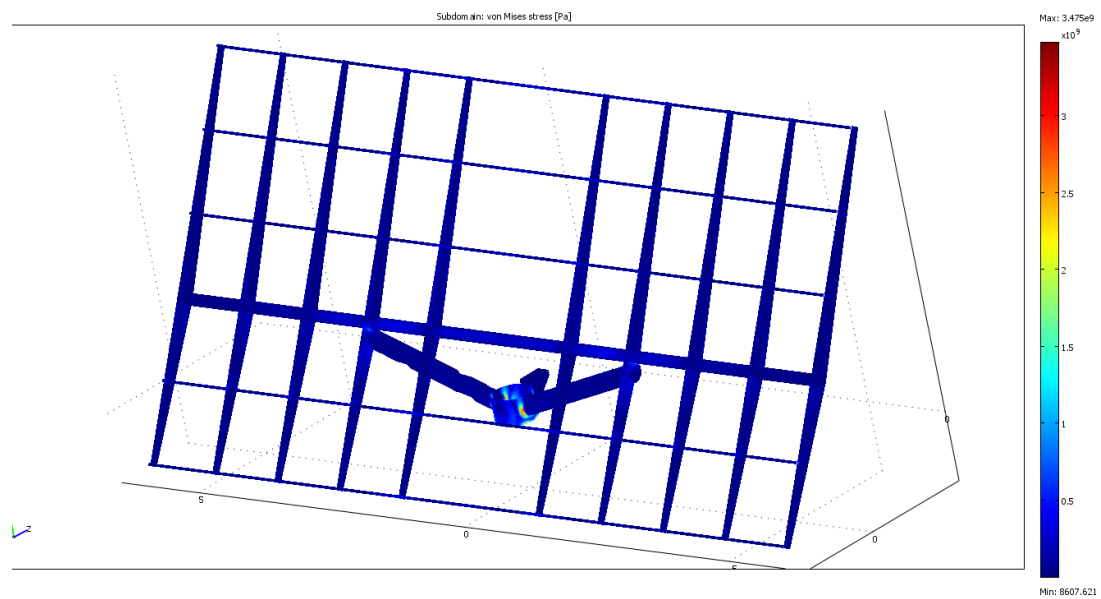
Περίπτωση 2



Εικόνα 76 Διάγραμμα Von Mises ανεμοπιέσεων. Περίπτωση 2.

Η μέγιστη τιμή της κλίμακας του διαγράμματος είναι $1.825 \cdot 10^9$ Pa. Οι μέγιστες φορτίσεις παρουσιάζονται στο σημείο ένωσης του πυλώνα με τους άξονες στήριξης. Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη περιοχή της εγκατάστασής μας έχει μπλε χρώμα όπου αυτό σημαίνει ότι η συνολική κατασκευή δέχεται φορτίσεις κυρίως μέχρι $0.6 \cdot 10^9$ Pa δηλαδή εντός του επιτρεπόμενου ορίου διαρροής. Οι τιμές παρατίθενται στην κλίμακα που παραβάλλεται δεξιά του διαγράμματος.

Περίπτωση 3



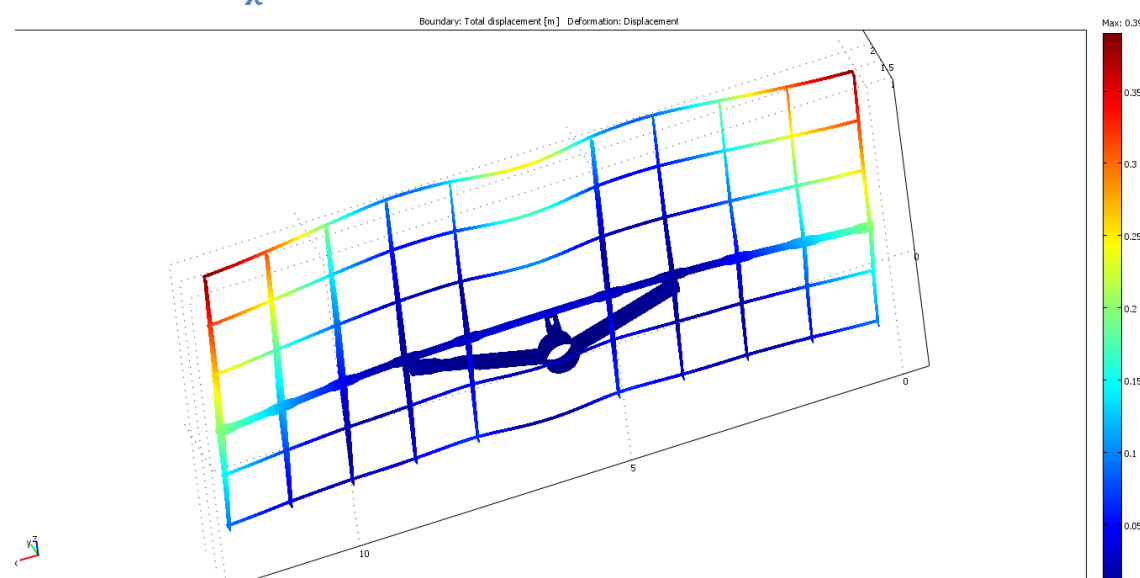
Εικόνα 77 Διάγραμμα Von Mises ανεμοπιέσεων. Περίπτωση 3.

Η μέγιστη τιμή της κλίμακας του διαγράμματος είναι $3.475 * 10^9 Pa$. Οι μέγιστες φορτίσεις παρουσιάζονται στο σημείο ένωσης του πυλώνα με τους άξονες στήριξης. Παρατηρούμε ότι η μεγαλύτερη περιοχή της εγκατάστασής μας έχει μπλε χρώμα, όπου αυτό σημαίνει ότι η συνολική κατασκευή δέχεται φορτίσεις κυρίως μέχρι $1 * 10^9 Pa$ δηλαδή εντός του επιτρεπόμενου ορίου διαρροής. Οι τιμές παρατίθενται στην κλίμακα που παραβάλλεται δεξιά του διαγράμματος.

4.4 Παραμορφώσεις

Θα παρουσιάσουμε τις συνολικές μετακινήσεις που εμφανίζονται στα μοντέλα μας με τις φορτίσεις που έχουμε υποθέσει ότι δέχεται η κατασκευή, στην εκάστοτε περίπτωση.

4.4.1 Μοντέλο χιονιού

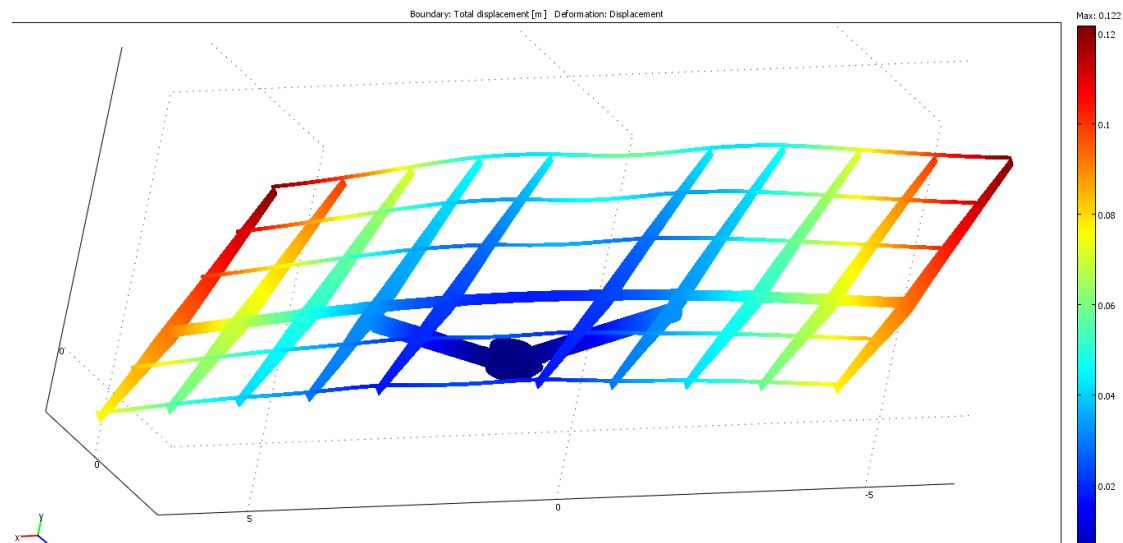


Εικόνα 78 Συνολική παραμόρφωση μοντέλου χιονιού.

Όπου παρατηρούμε από το διάγραμμα , ότι η μέγιστη μετακίνηση στη βάση, εντοπίζεται στα δύο πάνω άκρα της σχάρας, η οποία είναι της τάξης των $0.390m$. Αυτή είναι η πιο ακραία μετακίνηση του μοντέλου μας και οφείλεται στις ακραίες τιμές για τις φορτίσεις που λάβαμε. Στο μεγαλύτερο ποσοστό του μοντέλου οι μετατοπίσεις περιορίζονται μέχρι $0.15m$. Παράλληλα οι φορτίσεις που δέχεται η στήριξη, από τις μέγιστες τιμές στους x, y, z άξονες $7.27 * 10^8 Pa, 1.74 * 10^9 Pa$ και $1.39 * 10^8 Pa$, παρατηρούμε ότι το μοντέλο μένει στην ελαστική περιοχή (WILLIAM D. CALLISTER 2004), επομένως αν και η μέγιστη μετακίνηση του μοντέλου είναι μεγάλη, θα την δεχτεί.

4.4.2 Μοντέλα ανεμοπίεσης

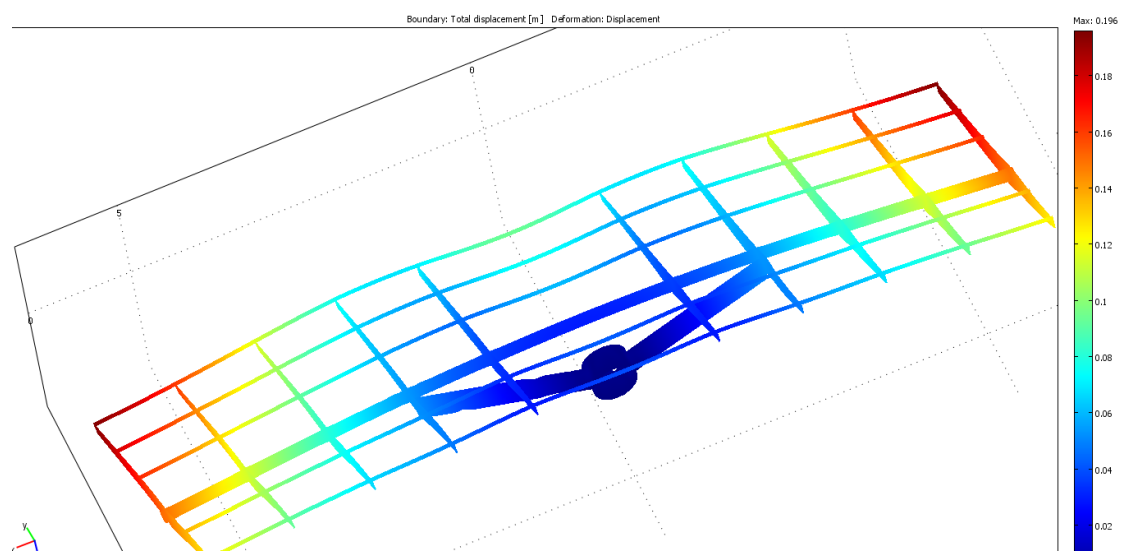
Περίπτωση 1



Εικόνα 79 Συνολική παραμόρφωση μοντέλου ανεμοπίεσης. Περίπτωση 1.

Όπου παρατηρούμε από το διάγραμμα, ότι η μέγιστη μετακίνηση στη βάση, εντοπίζεται στα δύο πάνω άκρα της πάνω βάσης, η οποία είναι της τάξης των $0.122m$. Αυτή είναι η πιο ακραία μετακίνηση του μοντέλου μας και οφείλεται στις ακραίες τιμές για τις φορτίσεις που λάβαμε. Στο μεγαλύτερο ποσοστό του μοντέλου οι μετατοπίσεις περιορίζονται μέχρι $0.04m$. Παράλληλα οι φορτίσεις που δέχεται η βάση, από τις μέγιστες τιμές στους x, y, z άξονες $6.4 * 10^8 Pa, 1.05 * 10^9 Pa$ και $2.24 * 10^8 Pa$, παρατηρούμε ότι το μοντέλο μένει στην ελαστική περιοχή (WILLIAM D. CALLISTER 2004), επομένως αν και η μέγιστη μετακίνηση του μοντέλου είναι μεγάλη, θα την δεχτεί.

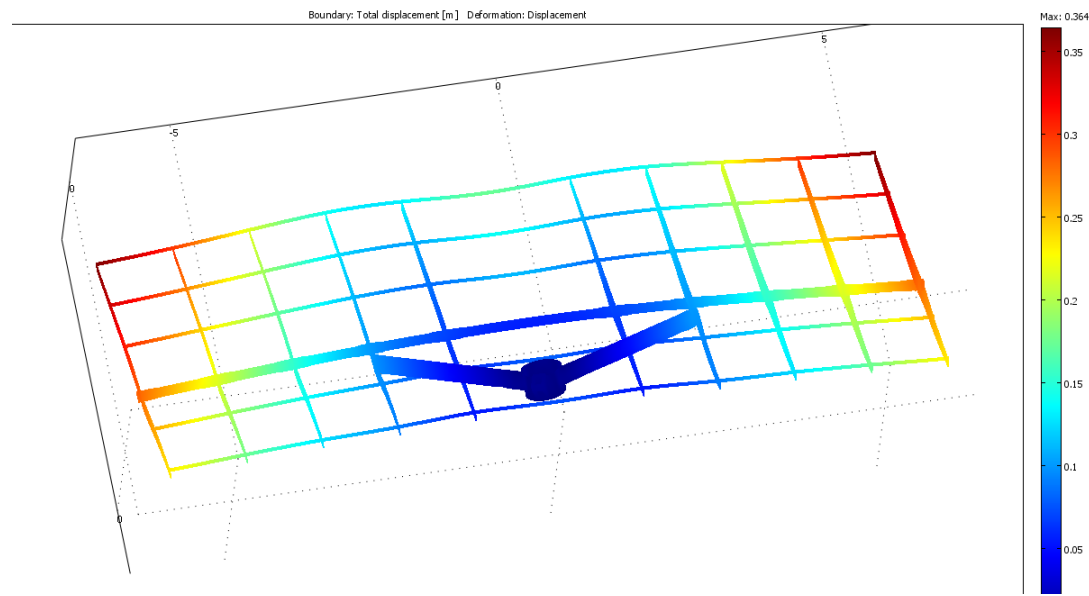
Περίπτωση 2



Εικόνα 80 Συνολική παραμόρφωση μοντέλου ανεμοπίεσης. Περίπτωση 2.

Όπου παρατηρούμε από το διάγραμμα , ότι η μέγιστη μετακίνηση στη βάση, εντοπίζεται στα δύο πάνω άκρα της σχάρας, η οποία είναι 0.196m. Αυτή είναι η πιο ακραία μετακίνηση του μοντέλου μας και οφείλεται στις ακραίες τιμές για τις φορτίσεις που λάβαμε. Στο μεγαλύτερο ποσοστό του μοντέλου οι μετατοπίσεις περιορίζονται μέχρι 0.08m. Παράλληλα οι φορτίσεις που δέχεται η βάση, από τις μέγιστες τιμές στους x, y, z άξονες $7.4 * 10^8 Pa$, $1.82 * 10^9 Pa$ και $3.64 * 10^8 Pa$, παρατηρούμε ότι το μοντέλο μένει στην ελαστική περιοχή (WILLIAM D. CALLISTER 2004), επομένως αν και η μέγιστη μετακίνηση του μοντέλου είναι μεγάλη, θα την δεχτεί.

Περίπτωση 3



Εικόνα 81 Συνολική παραμόρφωση μοντέλου ανεμοπίεσης. Περίπτωση 3.

Όπου παρατηρούμε από το διάγραμμα , ότι η μέγιστη μετακίνηση στη βάση, εντοπίζεται στα δύο πάνω άκρα της σχάρας, η οποία είναι 0.364m. Αυτή είναι η πιο ακραία μετακίνηση του μοντέλου μας και οφείλεται στις ακραίες τιμές για τις φορτίσεις που λάβαμε. Στο μεγαλύτερο ποσοστό του μοντέλου οι μετατοπίσεις περιορίζονται μέχρι 0.15m. Παράλληλα οι φορτίσεις που δέχεται η βάση, από τις μέγιστες τιμές στους x, y, z άξονες $1.39 * 10^9 Pa$, $3.22 * 10^9 Pa$ και $6.81 * 10^8 Pa$, παρατηρούμε ότι το μοντέλο μένει στην ελαστική περιοχή (WILLIAM D. CALLISTER 2004), επομένως αν και η μέγιστη μετακίνηση του μοντέλου είναι μεγάλη, θα την δεχτεί.

5 Προβλήματα που παρουσιάστηκαν

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, παρουσιάστηκαν διάφορα προβλήματα, ως προς την δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ των δύο προγραμμάτων(Pro/ENGINEER και Comsol Multiphysics), καθώς και στην υλοποίηση της πρακτικής διαδικασίας.

- Κατόπιν του συνολικού σχεδιασμού όλου του μοντέλου, χρειάστηκε να γίνει η εισαγωγή του μοντέλου στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics. Όμως για να γίνει αυτή η εισαγωγή έπρεπε πρώτα να δοθεί κάποιο υλικό στο μοντέλο μέσω του Pro/ENGINEER και κατόπιν, εάν ήταν απαραίτητο, εκ νέου εισαγωγή άλλου υλικού στο μοντέλο.
- Παράλληλα, για τον ίδιο λόγο το αρχείο του Pro/ENGINEER, έπρεπε να μετατραπεί σε αρχείο STEP, πάλι μέσω του Pro/ENGINEER, προσφέροντας την δυνατότητα μεταφοράς του μοντέλου στο Comsol Multiphysics.
- Το αρχείο αυτό αποθηκεύτηκε στη μοντελοποίηση σαν solid(στερεό), όπου η διακριτοποίηση του οδήγησε σε ένα πολύ μεγάλο αριθμητικό μοντέλο (170744 κόμβοι, 2990724 βαθμοί ελευθερίας). Με αποτέλεσμα να περιοριζόμαστε στην επίλυσή του. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε να μελετήσουμε το βασικότερο μέρος της κατασκευής, δηλαδή την σχάρα και την κάτω βάση.
- Τέλος κατά τη διάρκεια πλεγματοποίησης(Mesh) του μοντέλου, δηλαδή της πάνω και κάτω βάσης, μαζί με τη στήριξη η οποία ρυθμίζει την κλίση του πάνω μέρους της κατασκευής δεν ήταν δυνατή. Μετά από δοκιμές εντοπίστηκε πως οφειλόταν στον οδηγό που ρύθμιζε την κλίση, επομένως αφαιρέθηκε από το μοντέλο που μελετήθηκε. Υποθέτουμε πως υπαίτια ήταν η πολυπλοκότητα του σχεδίου, το οποίο δεν ήταν δυνατόν να κωδικοποιηθεί από το Comsol Multiphysics.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Beer/Johnson. *ΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ, ΤΟΜΟΣ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ, ΣΤΑΤΙΚΗ*. Αθήνα: Fountas.

Beton-Kalender 1988, Teil II, . Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 1988.

Standarization, European Committee for. *EUROPEAN PRESTANDARD*. Brussels, 1995.

Tirupathi R. Chandrupatla, Asok D. Belegundu. *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ*. ΑΘΗΝΑ: ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, 2005.

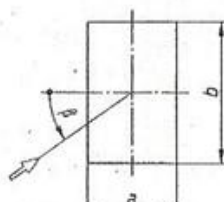
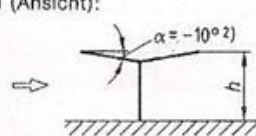
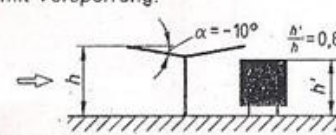
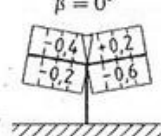
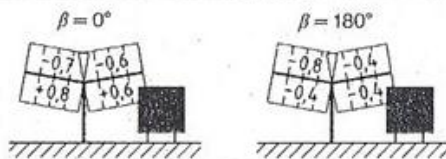
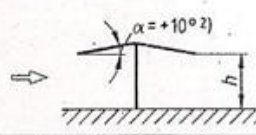
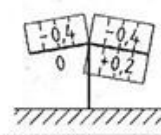
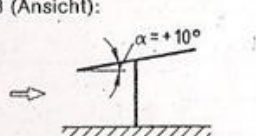
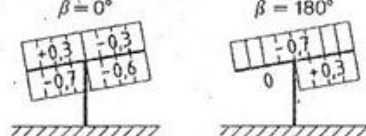
WILLIAM D. CALLISTER, JR. *ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ*. Αθήνα: ΤΖΙΟΛΑ, 2004.

Χρήσιμα site

1. <http://www.eshops.gr/images/ovak-manual.htm>
2. <http://www.michanikos.gr/showthread.php?t=14403>
3. http://en.wikipedia.org/wiki/Creo_Elements/Pro

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

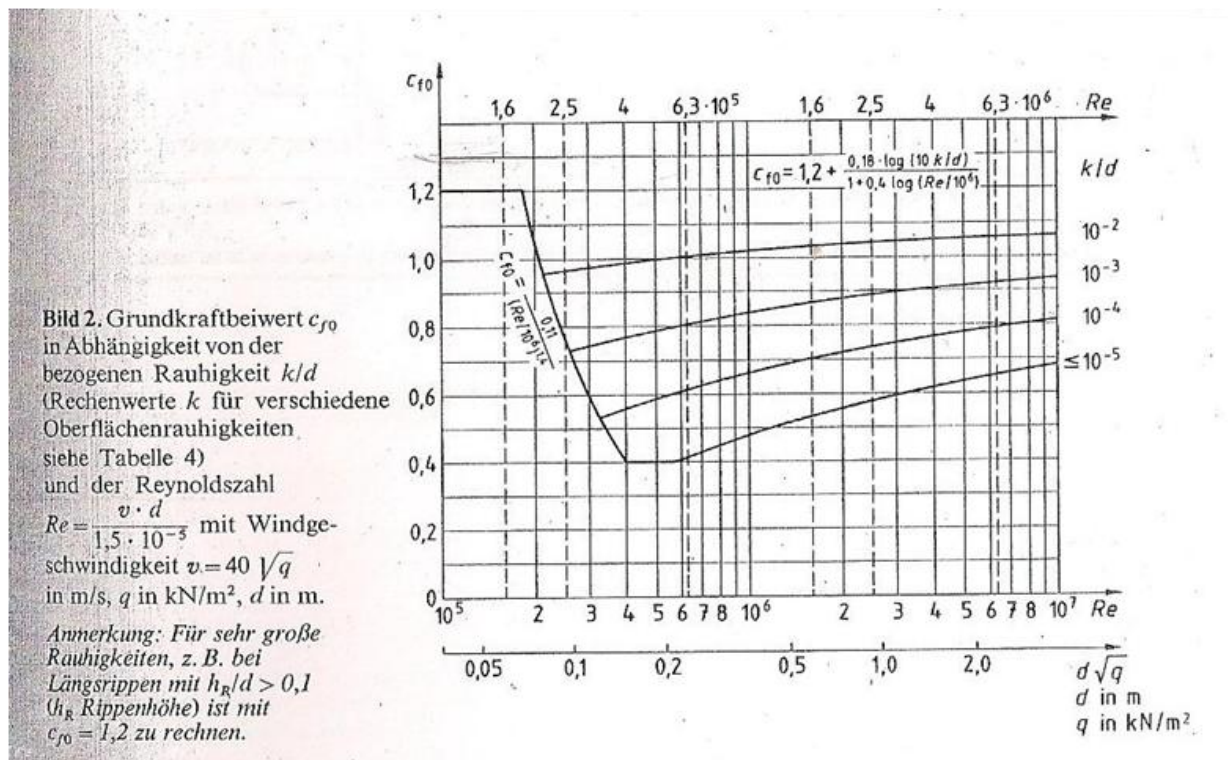
Πίνακας 1

Lfd. Nr	Form und Lage des Baukörpers	Druckbeiwert c_p
	1	2
4	Freistehende Dächer¹⁾ Grundriß:  Abmessungsverhältnisse: $a \leq b \leq 5a$ $0,5 \leq h/a \leq 1$ Querschnittshöhe der Dachscheibe $\leq 0,03a$	
4.1	Typ 1 (Ansicht):  mit Versperrung: 	$\beta = 0^\circ$  $\beta = 0^\circ$ $\beta = 180^\circ$ 
4.2	Typ 2 (Ansicht):  mit Versperrung:	$\beta = 0^\circ$  c_p entsprechend lfd. Nr 4.1
4.3	Typ 3 (Ansicht):  mit Versperrung:	$\beta = 0^\circ$ $\beta = 180^\circ$  c_p entsprechend lfd. Nr 4.1
¹⁾ Bei Anströmung in Richtung der Längsachse des Daches können die zum Dach tangentialen Windkräfte von Bedeutung sein. In Teilbereichen auf das Dach wirkende Sogspitzen können nach Tabelle 12 abgeschätzt werden. ²⁾ Für Dachneigungen $-10^\circ < \alpha < +10^\circ$ darf zwischen den Druckbeiwerten für $\alpha = -10^\circ$ und $\alpha = +10^\circ$ linear interpoliert werden; in den Beiwerten ist eine mögliche Versperrung der durchströmten Fläche unterhalb des Daches bis zu 15% berücksichtigt.		

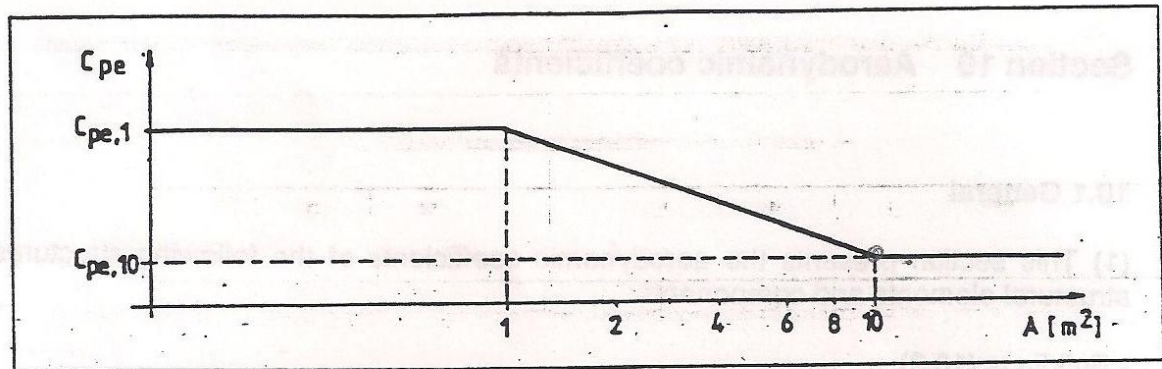
Πίνακας 2

1	2	3
Höhe über Gelände m	Windge- schwindigkeit v m/s	Staudruck q kN/m ²
von 0 bis 8	28,3	0,5
über 8 bis 20	35,8	0,8
über 20 bis 100	42,0	1,1
über 100	45,6	1,3

Πίνακας 3



Πίνακας 4



Note: The figure is based on the following:

$$\begin{aligned}
 C_{pe} &= C_{pe,1} & A \leq 1\text{m}^2 \\
 C_{pe} &= C_{pe,1} + (C_{pe,10} - C_{pe,1}) \log_{10} A & 1\text{m}^2 < A < 10\text{m}^2 \\
 C_{pe} &= C_{pe,10} & A \geq 10\text{m}^2
 \end{aligned}$$

Figure 10.2.1: Variation of external pressure coefficient for buildings with size of the loaded area A .

(2) The values $C_{pe,10}$ and $C_{pe,1}$ in Tables 10.2.1 to 10.2.6 are given for orthogonal wind directions 0° , 90° , 180° but represent the highest values obtained in a range of wind direction $\Theta = \pm 45^\circ$ either side of the relevant orthogonal direction.

Πίνακας 5

Pitch angle α	Zone for wind direction $\Theta = 0^\circ$						Zone for wind direction $\Theta = 180^\circ$					
	F		G		H		F		G		H	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5°	-1,7	-2,5	-1,2	-2,0	-0,6	-1,2	-2,3	-2,5	-1,3	-2,0	-0,8	-1,2
15°	-0,9	-2,0	-0,8	-1,5	-0,3		-2,5	-2,8	-1,3	-2,0	-0,9	-1,2
	+0,2		+0,2		+0,2							
30°	-0,5	-1,5	-0,5	-1,5	-0,2		-1,1	-2,3	-0,8	-1,5	-0,8	
	+0,7		+0,7		+0,4							
45°	+0,7		+0,7		+0,6		-0,6	-1,3	-0,5		-0,7	
60°	+0,7		+0,7		+0,7		-0,5	-1,0	-0,5		-0,5	
75°	+0,8		+0,8		+0,8		-0,5	-1,0	-0,5		-0,5	

Pitch angle α	Zone for wind direction $\Theta = 90^\circ$							
	F		G		H		I	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
5°	-1,6	-2,2	-1,8	-2,0	-0,6	-1,2	-0,5	
15°	-1,3	-2,0	-1,9	-2,5	-0,8	-1,2	-0,7	-1,2
30°	-1,2	-2,0	-1,5	-2,0	-1,0	-1,3	-0,8	-1,2
45°	-1,2	-2,0	-1,4	-2,0	-1,0	-1,3	-0,9	-1,2
60°	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,7	-1,2
75°	-1,2	-2,0	-1,2	-2,0	-1,0	-1,3	-0,5	

Notes: (i) At $\Theta = 0^\circ$ the pressure changes rapidly between positive and negative values around a pitch angle of $\alpha = +15^\circ$ to $+30^\circ$, so both positive and negative values are given.

(ii) Linear interpolation for intermediate pitch angles may be used between values of same sign.

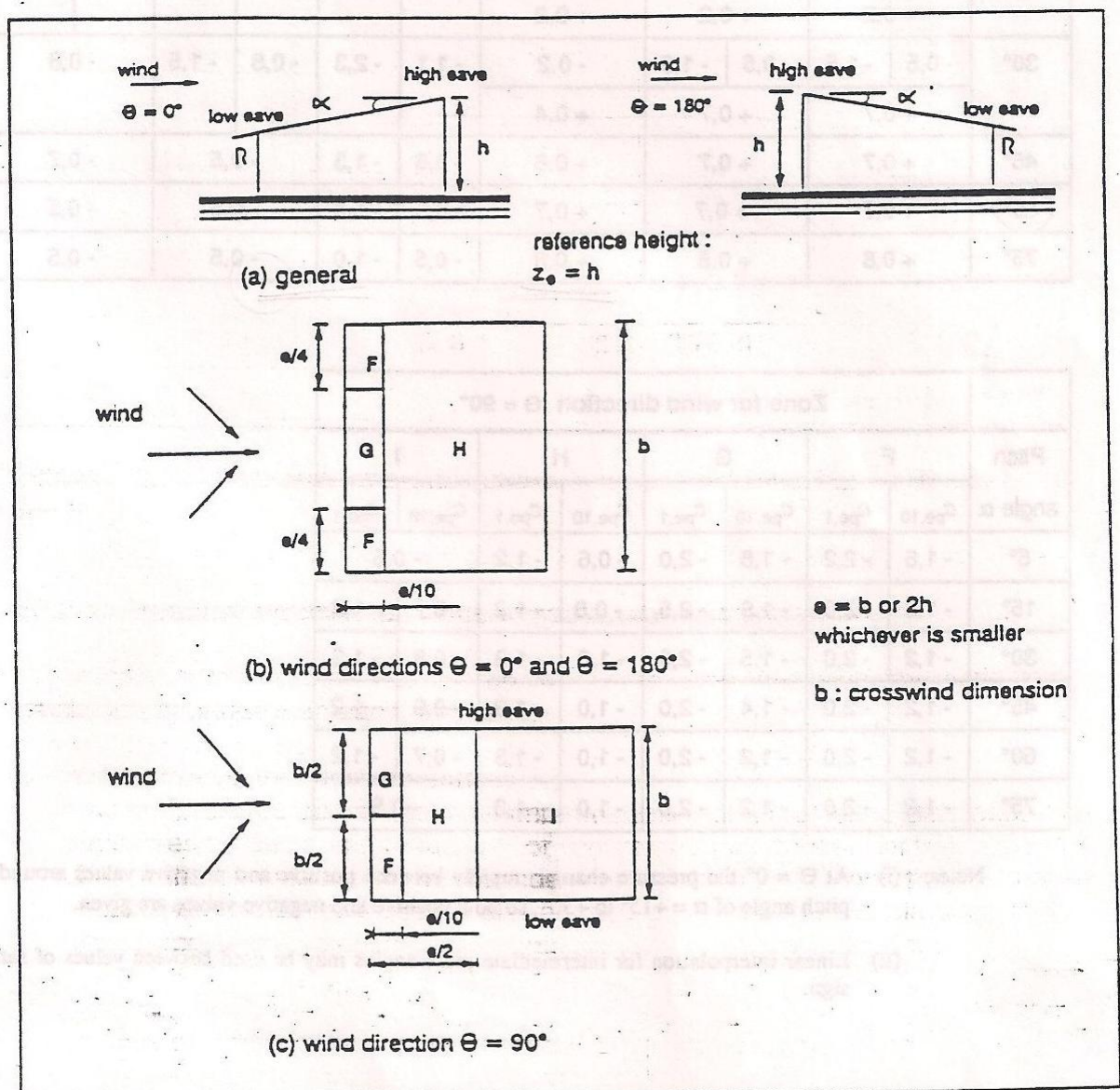


Figure 10.2.5: Key for monopitch roofs

Πίνακας 7

terrain category	k_r	z_0 [m]	z_{min} [m]	ϵ
I Rough open sea, lakes with at least 5 km fetch upwind and smooth flat country without obstacles	0,17	0,01	2	[0,13]
II Farmland with boundary hedges, occasional small farm structures, houses or trees	0,19	0,05	4	[0,26]
III Suburban or industrial areas and permanent forests	0,22	0,3	8	[0,37]
IV Urban areas in which at least 15% of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	0,24	1	16	[0,46]

Note: The parameters of Table 8.1 are calibrated to obtain the best fit of available data. The values k_r , z_0 and z_{min} are used in 8.2, the value ϵ is used in annex B (section 3).

Πίνακας 8

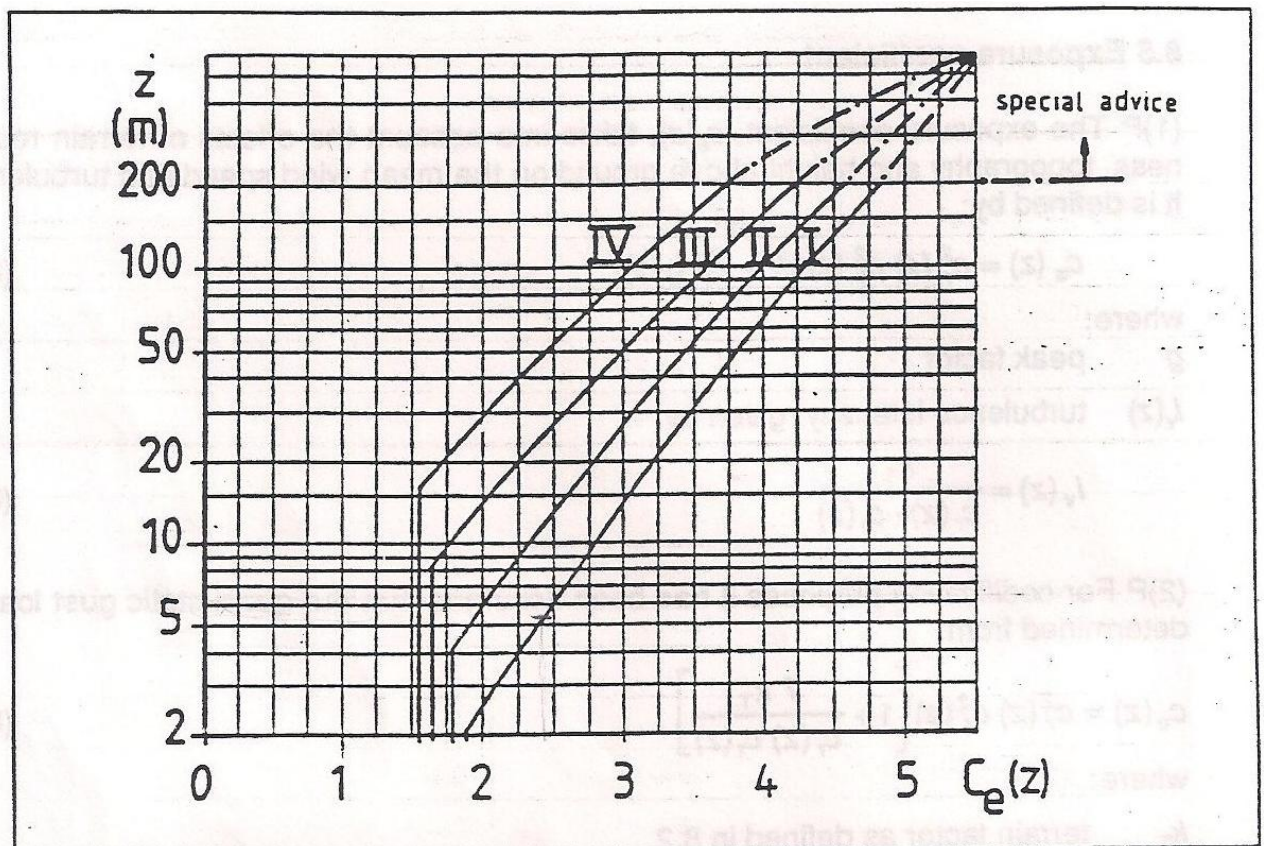


Figure 8.3: Exposure coefficient $c_e(z)$ as a function of height z above ground and terrain categories I to IV (see Table 8.1) for $c_1 = 1$

