



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Μελέτη συστήματος στήριξης φωτοβολταϊκών πάνελ

Συγγραφέας:
Μήτσας Σταμάτης

Επιβλέπων Καθηγητής:
Σταυρουλάκης Γεώργιος

Φεβρουάριος 2011

Περιεχόμενα

Πρόλογος

Σκοπός της εργασίας.....	1
Ευχαριστίες.....	1

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

Η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια	2
Η ΦΒ ενέργεια παγκοσμίως και στην Ελλάδα.....	3

Κεφάλαιο 2 - Βασικές έννοιες & λογισμικό Comsol multiphysics

Πεπερασμένα στοιχεία.....	5
Λίγα λόγια για το Comsol multiphysics.....	6

Κεφάλαιο 3 - Μελέτη διαξονικού συστήματος στήριξης Φ/Β πάνελ - ΜΟΝΤΕΛΟ Α

Χαρακτηριστικά μοντέλου Α.....	8
Σχεδίαση.....	9
Παράμετροι και τεχνικά χαρακτηριστικά δοκών.....	10
Φορτίσεις.....	15
Βάρος Φ/Β πάνελ.....	15
Φόρτιση λόγω χιονιού – πάγου στα Φ/Β πάνελ.....	15
Φόρτιση λόγω ανέμου.....	15
Δύναμη αδράνειας λόγω φρεναρίσματος.....	16
Σύνολο ασκούμενων εξωτερικών δυνάμεων σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες. (μέγιστη καταπόνηση).....	17
Σύνολο ασκούμενων εξωτερικών δυνάμεων σε φυσιολογικές συνθήκες. (ελάχιστη καταπόνηση).....	18
Προσομοίωση – επίλυση μοντέλου Α.....	19
Περίπτωση μέγιστης φόρτισης (αντίξοες καιρικές συνθήκες).....	20
Περίπτωση ελάχιστης φόρτισης (φυσιολογικές καιρικές συνθήκες).....	22

Κεφάλαιο 4 - Μελέτη διαξονικού συστήματος στήριξης Φ/Β πάνελ - ΜΟΝΤΕΛΟ Β

Χαρακτηριστικά μοντέλου Β.....	24
Σχεδίαση.....	25

Παράμετροι και τεχνικά χαρακτηριστικά δοκών.....	27
Φορτίσεις.....	30
Προσομοίωση – επίλυση μοντέλου B.....	32
Περίπτωση μέγιστης φόρτισης (αντίζοες καιρικές συνθήκες).....	33
Περίπτωση ελάχιστης φόρτισης (φυσιολογικές καιρικές συνθήκες).....	35

Κεφάλαιο 5 – Σύγκριση μοντέλων A και B – Αποτελέσματα

Κατασκευαστικές διαφορές μοντέλων A και B.....	37
Οριζόντιο δικτύωμα περιμετρικά του κύκλου.....	37
Πάχος δοκών.....	37
Στήριξη στο κάθετο επίπεδο.....	38
Σύγκριση μοντέλων A και B σε περίπτωση μέγιστου φορτίου (αντίζοες καιρικές συνθήκες)...	39
Σύγκριση μοντέλων A και B σε περίπτωση ελάχιστου φορτίου (φυσιολογικές καιρικές συνθήκες).....	40
Σύγκριση κυκλικής - περιμετρικής δοκού μοντέλων A και B.....	41
Σύγκριση οριζόντιων δοκών στήριξης Φ/B πάνελ μοντέλων A και B.....	43
1η δοκός.....	44
2η δοκός.....	45
3η δοκός.....	46
4η δοκός.....	47
5η δοκός.....	48
6η δοκός.....	49
Συνολικός όγκος δοκών σε μοντέλα A και B.....	50
Συμπεράσματα.....	51

Παράρτημα	52
-----------------	----

Βιβλιογραφία	56
--------------------	----

Πρόλογος

Σκοπός εργασίας

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας θα μελετηθεί ένα σύστημα περιστρεφόμενης στήριξης φωτοβολταϊκών πάνελ που εγκαταστάθηκε πριν λίγο καιρό σε φωτοβολταϊκό πάρκο στην περιοχή του Ρεθύμνου. Η καθημερινή λειτουργία του συστήματος για παραπάνω από 20 χρόνια στην ύπαιθρο σε συνδυασμό με την ιδιότητα περιστροφής του σε δύο άξονες (οριζόντιο και κάθετο), καθιστούν τον έλεγχο αντοχής αλλά και τη βελτιστοποίηση της στήριξης αναγκαία. Η μεγάλη παραμόρφωση του μετάλλου σε ορισμένα σημεία μπορεί να επηρεάσει τη δυνατότητα κίνησης της κατασκευής και κατά συνέπεια τη λειτουργικότητά της.

Για την καλύτερη μελέτη της ποιότητας της κατασκευής, θα συγκριθούν τα αποτελέσματα παραμόρφωσης με αυτά ενός άλλου μοντέλου στήριξης ίδιου τύπου και πιστοποιημένης αντοχής. Έτσι, στη διάρκεια αυτού του συγγράμματος θα αναλυθούν δύο διαφορετικά μοντέλα συστημάτων στήριξης φωτοβολταϊκών πάνελ. Το μοντέλο που αναπαριστά την ιδιωτική κατασκευή του Ρεθύμνου ονομάστηκε μοντέλο Β, ενώ μοντέλο Α ονομάστηκε η αναπαράσταση ενός γνωστού συστήματος στήριξης που είναι εγκατεστημένο σε πολλά ελληνικά φωτοβολταϊκά πάρκα. Τα δύο συστήματα στήριξης έχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά όπως σχήμα, διαστάσεις, αριθμό Φ/Β πάνελ, υλικό κατασκευής και μπορούν να συγκριθούν κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

Η μελέτη των δύο μοντέλων θα γίνει με το Comsol multiphysics, ένα σύγχρονο λογισμικό για μοντελοποίηση και επίλυση όλων των ειδών επιστημονικών και μηχανικών προβλημάτων, βασισμένο στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η προσομοίωση καταπόνησης των μοντέλων θα γίνει τόσο για φυσιολογικές συνθήκες, όσο και για μεγάλα εξωτερικά φορτία που μπορεί να προκύψουν λόγω υπερβολικά άσχημων καιρικών συνθηκών. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται ο έλεγχος αντοχής της κατασκευής ακόμα και στις χειρότερες περιπτώσεις καταπόνησης.

Η μελέτη των δύο μοντέλων στήριξης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και η σύγκριση των αποτελεσμάτων παραμόρφωσης για όλες τις περιπτώσεις εξωτερικών φορτίων, θα αποδείξουν αν η κατασκευή είναι ικανοποιητικά ανθεκτική και αν θα καλύψει τις ανάγκες του επιχειρηματία.

Ευχαριστίες

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα αυτής της εργασίας, καθηγητή Γεώργιο Ε. Σταυρουλάκη, για την εμπιστοσύνη του, την δυνατότητα που μου έδωσε να εκπαιδευτώ στο Comsol multiphysics και για την άριστη συνεργασία μας τους τελευταίους μήνες.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον κύριο Σταυρουλάκη Ευάγγελο, κατασκευαστή του συστήματος στήριξης φωτοβολταϊκών που μελετήθηκε, για την συνεργασία του και τα σημαντικά δεδομένα που προσέφερε.

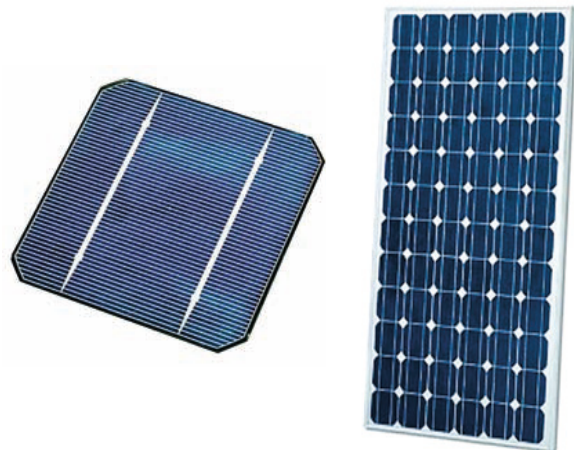
Τέλος θα ήθελα να αφιερώσω τη διπλωματική εργασία στους γονείς μου που μου έδωσαν τη δυνατότητα να σπουδάσω στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η φωτοβολταϊκή ηλεκτρική ενέργεια

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο (*photovoltaic cell*) είναι, γενικά, ένα σύστημα δύο υλικών σε επαφή, το οποίο όταν φωτίζεται εμφανίζει στα άκρα του συνεχή ηλεκτρική τάση. Σήμερα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία των οποίων η βιομηχανική παραγωγή έχει προωθηθεί, είναι αυτά που βασίζονται στη δημιουργία δύο ημιαγωγικών στρωμάτων σε επαφή. Συνήθως, τα δύο στρώματα αποτελούνται από το ίδιο κύριο υλικό, το ένα στρώμα ημιαγωγός τύπου n και το άλλο τύπου p. Εξωτερικά τοποθετούνται κατάλληλα ηλεκτρόδια. Η κατασκευή έχει τη μορφή μιας σχεδόν τετράγωνης πλάκας, ώστε η εσωτερική επαφή των ημιαγωγών να καταλαμβάνει όλη την επιφάνεια του πλακιδίου.



Όταν το Φ/Β στοιχείο φωτίζεται προκαλείται στο εσωτερικό του ηλεκτρικό ρεύμα (φωτόρρευμα), ανάλογο της πυκνότητας ισχύος του ηλιακού φωτός, που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Η αναπτυσσόμενη σε ένα τυπικό Φ/Β στοιχείο, συνεχής ηλεκτρική τάση ανοικτού κυκλώματος, βρίσκεται στην περιοχή $0,5 \div 0,7$ V, ενώ το αντίστοιχο ηλεκτρικό ρεύμα στην περιοχή των $10 \div 40$ mA/cm², για πυκνότητα ισχύος ηλιακού φωτός 1 kW/m².

Η τεχνολογία των Φ/Β στοιχείων αναπτύχθηκε ραγδαία το δεύτερο μισό του 20ου αιώνα, παρ' ότι το ΦΒ φαινόμενο είχε παρατηρηθεί πολύ νωρίτερα από τον Becquerel, το 1839. Το 1954 ανακοινώθηκε η πρώτη κατασκευή ηλιακού στοιχείου Πυριτίου Si, με σχηματισμό επαφής p-n, με διάχυση και με απόδοση 6%, από τους Fuller, Pearson και Chapin. Οι αρχικές εμπορικές κατασκευές, πολύ υψηλού κόστους (1000 \$/Wp το 1956), με σχετικά μικρή απόδοση 5-10 %, παρασκευάστηκαν από κρυσταλλικά υλικά, κυρίως από κρυσταλλικό Πυρίτιο (c-Si). Σήμερα οι αποδόσεις των φωτοβολταϊκών στοιχείων από κρυσταλλικό Πυρίτιο, βρίσκονται περί το 22%, για ΦΒ πλαίσια διαστημικών κατασκευών και στο διάστημα 14-18% για βιομηχανική-οικιακή χρήση, το δε κόστος των τελευταίων κυμαίνεται περί τα 4-5 C/Wp (peak Watt), για εγκαταστάσεις μικρών συστημάτων, μεγέθους μέχρι μερικά kWp. Στις εγκαταστάσεις σχετικά μεγάλης ισχύος αιχμής, το κόστος αγοράς ΦΒ πλαισίων, ανά Wp, μειώνεται σε συνάρτηση με το μέγεθος του συστήματος. Σε μεγάλα συστήματα, άνω του MWp, το κόστος αυτό μειώνεται σχεδόν στο ήμισυ του αντίστοιχου των εγκαταστάσεων μικρής ισχύος.

Κατά τη δεκαετία του 1980, η τάση μείωσης του κόστους βιομηχανικής παραγωγής των Φ/Β στοιχείων, οδήγησε στη χρησιμοποίηση οικονομικότερων μεθόδων παρασκευής του βασικού φωτοαγωγίμου υλικού. Οι μέθοδοι αυτές χαρακτηρίζονται από τη δημιουργία πολύ λεπτών στρωμάτων ή υμενίων υλικού (films), κυρίως πυριτίου, σε επιμελημένα καθαρισμένη επιφάνεια, που επιτρέπει την πρόσφυση του αποτιθέμενου υλικού (άμορφο Πυρίτιο, a-Si). Βασίζονται στη

μεταφορά και εναπόθεση του υλικού, με τη μορφή ατόμων είτε από στερεό στόχο, με κρούσεις επαρκώς επιταχυνθέντων ιόντων πλάσματος (Sputtering), είτε από λιωμένο υλικό σε συνθήκες υψηλού κενού (Εξαέρωση) είτε κατά τη διάρκεια εκκένωσης αερίου ενώσεως του αποτιθέμενου στοιχείου (Glow Discharge, GD), είτε με καταλυτική θερμική διάσπαση υδρογονούχων ενώσεων Πυριτίου (Σιλάνιο).

Οι προσπάθειες μείωσης του κόστους κατασκευής ενός Φ/Β στοιχείου οδήγησαν, τελικά, σε νέες διαφορετικές μεθόδους εναπόθεσης, με πολύ καλά αποτελέσματα. Π.χ. με σχηματισμό ταινιών υλικού, από λιωμένη φάση, παρασκευάστηκαν Φ/Β στοιχεία, με εργαστηριακή απόδοση 15%. Η επιφάνειά τους εμφανίζει μονοκρυσταλλικότητα κατά περιοχές, το δε υλικό ονομάζεται πολύ-κρυσταλλικό. Το πολυ-κρυσταλλικό Πυρίτιο (mc-Si), χρησιμοποιείται για την παρασκευή Φ/Β στοιχείων, που μπορούν να καλύψουν μεγάλη επιφάνεια, με βιομηχανική απόδοση (ΦΒ πλαίσιο) 12-13%, πολύ κοντά στη βιομηχανική απόδοση των ΦΒ στοιχείων κρυσταλλικού Πυριτίου. Οι προηγούμενες τιμές απόδοσης είναι ενδεικτικές, εξαρτώμενες από το βασικό υλικό και τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες της διάταξης.

Πολλά ΦΒ στοιχεία (33÷36) συνδέονται σε σειρά, ώστε, όταν η διάταξη αυτή φωτίζεται, να προκύπτει συνολική τάση ανοικτού κυκλώματος (Open circuit) 17÷22V. Το πλήθος των Φ/Β στοιχείων επιλέγεται έτσι ώστε να ταιριάζει με την απαιτούμενη τάση φόρτισης ενός κοινού ηλεκτρικού συσσωρευτή μολύβδου-θεικού οξέως (Pb/H₂SO₄), ονομαστικής τάσης 12V.

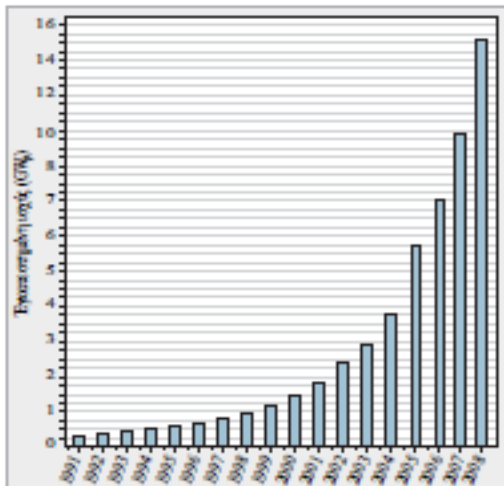
Η ολοκληρωμένη αυτή φωτοβολταϊκή διάταξη ονομάζεται φωτοβολταϊκό πλαίσιο (module), αποτελεί δε τη βασική μονάδα σύνθεσης μεγαλύτερων συστημάτων, που ονομάζονται συστοιχίες. Χρησιμοποιείται επίσης, σπανιότερα, η ορολογία, φωτοβολταϊκή γεννήτρια (Photovoltaic generator), όταν αναφερόμαστε στο κύριο τμήμα του Φ/Β σταθμού, το οποίο παράγει τη Φ/Β ηλεκτρική ενέργεια. Η εμπρός επιφάνεια του πλαισίου προστατεύεται από γυάλινη πλάκα, ενώ η πίσω πλευρά καλύπτεται από υγρομονωτική ουσία, υψηλής αντοχής στο χρόνο. Η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει ένα Φ/Β πλαίσιο, κάτω από δεδομένη πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας, μπορεί να πάρει μέγιστη τιμή, όταν συνδεθεί στα άκρα του καταναλωτής κατάλληλης αντίστασης. Η μέγιστη ισχύς σε καθορισμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας Φ/Β στοιχείου (πρότυπες συνθήκες), αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του και ονομάζεται ισχύς αιχμής. Στο εμπόριο διατίθενται Φ/Β πλαίσια κρυσταλλικού Πυριτίου σε ευρεία περιοχή τιμών ισχύος αιχμής. Μικρές κατασκευές Φ/Β στοιχείων, μερικών W_p, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που δεν απαιτούν υψηλή ηλεκτρική ισχύ, όπως λ.χ. οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές «τσέπης». Σε εφαρμογές αυτόνομων ή συνδεδεμένων στο δίκτυο της ΔΕΗ, Φ/Β συστημάτων, χρησιμοποιούνται, συνήθως, Φ/Β πλαίσια ισχύος αιχμής από 30 έως 200 W_p.

Η ΦΒ ενέργεια παγκοσμίως και στην Ελλάδα.

Η παγκοσμίως εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β συστημάτων, από 313,5 MW_p το 1991, έφτασε τα 15,2 GW_p, στο τέλος του 2008. Απ' αυτά, περίπου 9,5 GW_p αφορούν σε εγκατεστημένη ισχύ στην Ευρώπη, ~1,2 GW_p στις ΗΠΑ και ~2,2 GW_p στην Ιαπωνία. Όπως προκύπτει, η ποσοστιαία ετήσια μεταβολή της εγκατεστημένης ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο, κατά τη χρονική αυτή περίοδο, παρουσίασε ραγδαία αύξηση, από 18,5% το 1992, σε 29,3% το 2002 και έφτασε στο 54% το 2008. Με βάση αυτούς τους ετήσιους ρυθμούς διεύθυνσης των Φ/Β συστημάτων στο ενεργειακό δυναμικό, η εγκατεστημένη ονομαστική ισχύς τους αναμένεται το 2010, να ξεπεράσει τα 30 GW_p (με την επιφύλαξη των πιθανών επιπτώσεων της οικονομικής κρίσης του 2009-2010). Μεγάλοι Φ/Β σταθμοί έχουν εγκατασταθεί στις ΗΠΑ (Hesperia, 1 MW, 1982 – Tuscon, 2,4 MW_p, 2002) και στην Ευρώπη (Ισπανία, 1 MW_p, 1994 – Ιταλία, Vasto, 1MW_p, Serre, 3,3 MW_p, 1994 – Γερμανία, Bustadt 5 MW_p, Bavaria 6,3 MW_p, Pooking 10 MW_p, Waldpolenz 40 MW_p– Πορτογαλία, Sepra 11 MW_p – Ισπανία,

Beneixama 20 MW_p, Puertollano 47 MW_p, Olmedilla 60 MW_p).

Στην Ελλάδα, η εγκαταστημένη ισχύς φωτοβολταϊκών συστημάτων, με στοιχεία του 2008, ανερχόταν σε 18,5 MW_p, με στόχο τα 700 MW_p στο τέλος του 2010 (Εκκρεμούν αιτήσεις αδειοδότησης για ~3700 MW_p). Στο νησιωτικό χώρο υπάρχει σχέδιο εγκατάστασης 200 MW_p, εκ των οποίων 52,5MW_p στην Κρήτη. Μερικά από τα εγκατεστημένα συστήματα αποτελούνται από μικρούς Φ/Β σταθμούς σε συνεργασία με αιολικά συστήματα και ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος, όπως π.χ. στη νήσο Κύθνο (100 kW_p), στη νήσο Γαύδο (30 kW_p) καθώς και Φ/Β αντλητικά συστήματα σε διάφορα νησιά.



Χρονική εξέλιξη της παγκοσμίως εγκατεστημένης ισχύος αιχμής ΦΒ συστημάτων, στο χρονικό διάστημα 1991-2008



Φωτοβολταϊκό πάρκο στο Σιδηρόκαστρο του Νομού Σερρών, ισχύος 100 kW.

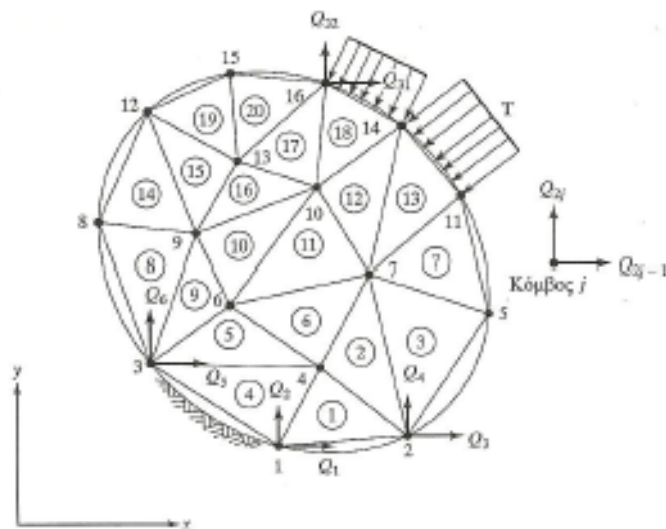
Κεφάλαιο 2

Βασικές έννοιες & λογισμικό *Comsol multiphysics*

Πεπερασμένα στοιχεία

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων αποτελεί πλέον ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων μηχανικού. Οι εφαρμογές εκτείνονται από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια και γέφυρες, μέχρι και την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας, ροής υγρών, μαγνητικής ροής και άλλων προβλημάτων 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 τους. 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, μια περίπλοκη περιοχή, η οποία ορίζει ένα συνεχές, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα (όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα), τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (finite elements). Οι ιδιότητες των υλικών και οι διέπουσες σχέσεις θεωρούνται πάνω σε αυτά τα στοιχεία και εκφράζονται σε όρους των άγνωστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων. Μια 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.



Ένα τέτοιο λογισμικό είναι το *Comsol multiphysics*.

Λίγα λόγια για το Comsol multiphysics

Το Comsol multiphysics είναι ένα ισχυρό διαδραστικό περιβάλλον για τη μοντελοποίηση και επίλυση όλων των ειδών επιστημονικών και μηχανικών προβλημάτων βασισμένων στις μερικές διαφορικές εξισώσεις.

Το περιβάλλον προσομοίωσης COMSOL multiphysics, διευκολύνει όλα τα βήματα που απαιτούνται για την ανάπτυξη ενός μοντέλου. Καθορίζει τη γεωμετρία, διακριτοποιεί, διευκρινίζει τη φυσική, λύνει και τέλος απεικονίζει τα αποτελέσματα.

Επιπλέον έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει διάφορες μελέτες ταυτόχρονα στην ίδια κατασκευή. Μπορεί να μελετήσει για παράδειγμα τη συμπεριφορά μιας κατασκευής ως προς την μηχανική και την 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 χάρη στο μεγάλο αριθμό προκαθορισμένων εφαρμογών που περιλαμβάνουν τη ρευστή μεταφορά ροής και μετάδοσης θερμότητας ως τη δομική μηχανική και ηλεκτρομαγνητική ανάλυση. Δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης μοντέλων, καθορίζοντας φυσικές ποσότητες όπως ιδιότητες των υλικών, φορτία, περιορισμούς, πηγές και ροές χωρίς να καθορίζονται οι εξισώσεις. Το πρόγραμμα από μόνο του συνδυάζει μια σειρά από μερικές διαφορικές εξισώσεις που αντιπροσωπεύουν το μοντέλο. Έτσι λοιπόν δεν απαιτείται η βαθιά γνώση μαθηματικών ή αριθμητικής ανάλυσης.

Τα προκαθορισμένα πρότυπα λύνουν πολλούς κοινούς τύπους προβλημάτων. Δίνεται επίσης η επιλογή να διαλέγουμε διαφορετική φυσική και να καθορίζουμε αλληλεξαρτήσεις οι ίδιοι. Μπορούμε επίσης να καθορίζουμε δικές μας διαφορικές εξισώσεις και να τις συνδέουμε με άλλες ήδη υπάρχουσες. Το Comsol multiphysics λειτουργεί ως κύριο εργαλείο για όλα τα μοντέλα καθώς είναι εύχρηστο και ευέλικτο επιτρέποντας επεκτάσεις ανάλογα με τις ανάγκες μας.

Με το Comsol multiphysics μπορούμε να πραγματοποιήσουμε διάφορους τύπους ανάλυσης:

- μόνιμη και μεταβαλλόμενη ανάλυση
- γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση
- ανάλυση ιδιοσυχνότητας
- στατικού τύπου ανάλυση

Για να λύσει τις μερικές διαφορικές εξισώσεις το Comsol multiphysics χρησιμοποιεί **τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων**. Το λογισμικό τρέχει την ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων με διακριτοποίηση και έλεγχο λαθών χρησιμοποιώντας ποικιλία από αριθμητικές λύσεις. Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις, διαμορφώνουν τη βάση για τους νόμους της επιστήμης και βοηθάνε στη μοντελοποίηση μιας τεράστιας ποικιλίας από επιστημονικά και μηχανικά προβλήματα. Επομένως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το comsol σε διάφορες περιοχές όπως:

- ακουστική
- βιοφυσική
- χημικές αντιδράσεις

- διάχυση
- ηλεκτρομαγνητική
- ρευστομηχανική
- γεωφυσική
- μετάδοση θερμότητας
- μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα
- οπτική
- δομική μηχανική
- κατασκευαστικά μοντέλα.

Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του comsol multiphysics είναι η χρήση μεταβλητών για να συνδέσει τα μοντέλα μερικών διαφορικών εξισώσεων σε διάφορες γεωμετρίες.

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό είναι η ικανότητα του να αναμιγνύει τομείς από διαφορετικό χώρο στο ίδιο πρόβλημα. Αυτή η ευκαμψία, όχι μόνο απλοποιεί την μοντελοποίηση αλλά μειώνει και το χρόνο εκτέλεσης της.

Κεφάλαιο 3

Μελέτη διαξονικού συστήματος στήριξης Φ/Β πάνελ - MONTELO A



Χαρακτηριστικά μοντέλου A

Το διαξονικό τράκερ που θα μελετηθεί είναι ένα σύστημα που προτιμάται τα τελευταία χρόνια για στήριξη φωτοβολταϊκών πάνελ σε αγροτεμάχια. Πρόκειται για ένα μεγάλης έκτασης στρογγυλό – περιστρεφόμενο σύστημα στήριξης που μπορεί να φθάσει τα 49μ διάμετρο και τα 712τ.μ. επιφάνειας Φ/Β πάνελ.

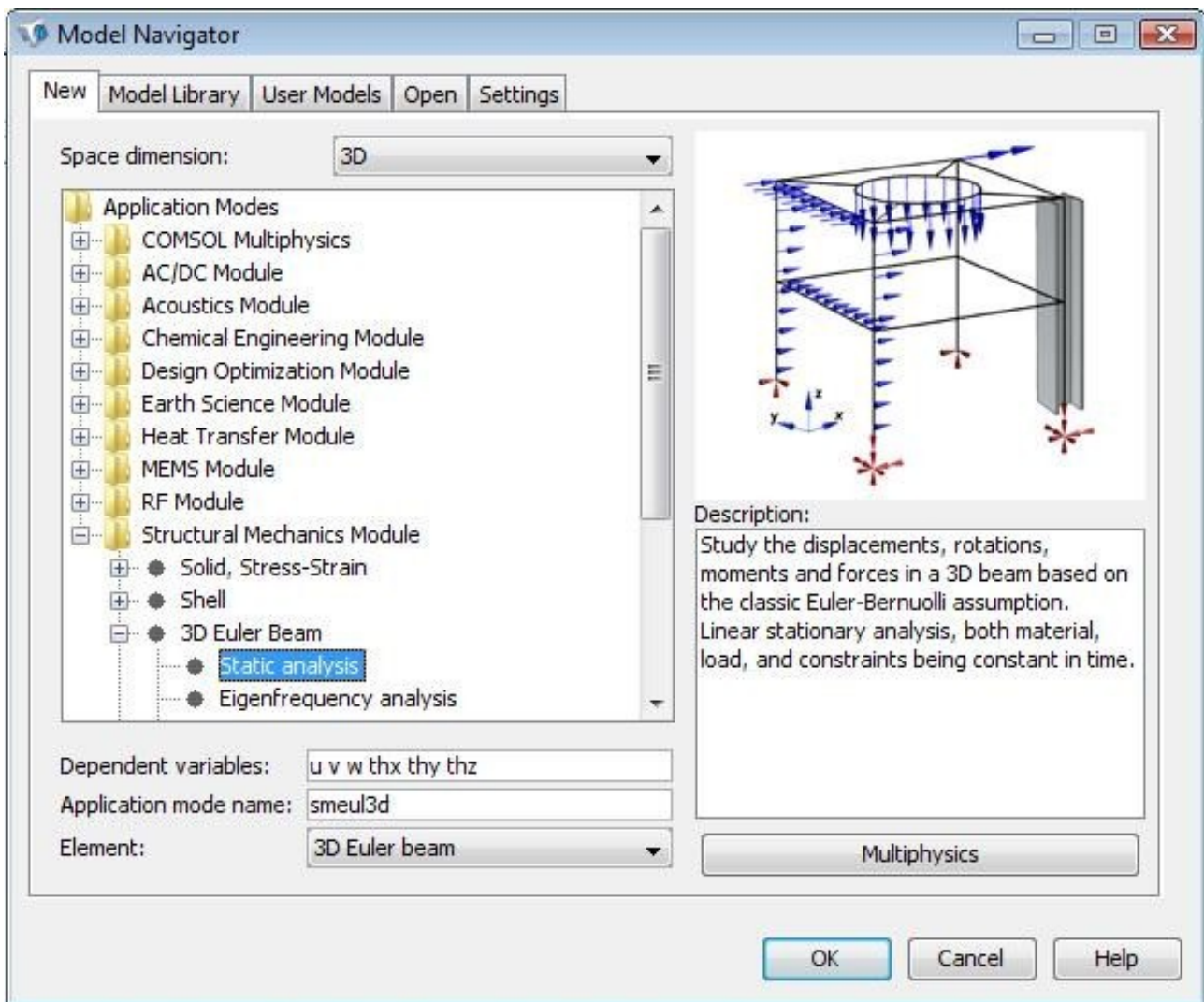
Κυριότερο χαρακτηριστικό γνώρισμα και ταυτόχρονα ασύγκριτο πλεονέκτημα του διαξονικού τράκερ, αποτελεί το γεγονός ότι κάθε μία εκ των πέντε βασικών εκδόσεων (20kWp, 30kWp, 40-60kWp, 80kWp, 100kWp) έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει από μόνη της αυτοτελές και πλήρες σύστημα στήριξης ενός Φ/Β Σταθμού ισχύος από 20 έως 100kWp. Με άλλα λόγια δίνεται η δυνατότητα να εγκατασταθεί ολόκληρο το Φ/Β σύστημα πάνω σε μία μόνο περιστρεφόμενη βάση, πάντοτε ανάλογη της συνολικής ισχύος του Φ/Β σταθμού. Επίσης με την περιστροφή της βάσης αλλά και των Φ/Β πάνελ μεγιστοποιείται ο χρόνος λειτουργίας και η απόδοση του σταθμού.

Με αυτή τη μέθοδο στήριξης εξασφαλίζεται:

1. Οικονομικό όφελος καθώς προϋποθέτει πολύ χαμηλό κόστος αγοράς και εγκατάστασης.
2. Υψηλή αντοχή σε ανέμους ταχύτητας έως και 155 χιλιόμετρα την ώρα.
3. Υψηλή και συνεχόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (ιδιαίτερα σε νησιωτικές και ορεινές περιοχές) με ανέμους ταχύτητας έως και 105 χιλιόμετρα την ώρα.
4. Βέλτιστη κάλυψη της διαθέσιμης επιφάνειας και άρα μεγάλη εξοικονόμηση γης για μελλοντική επέκταση ισχύος.
5. Υψηλή Στατική Επάρκεια εξαιτίας της ισχυρής θεμελίωσης σε πολλά σημεία.
6. Διατήρηση της αισθητικής του τοπίου εξαιτίας του χαμηλού του ύψους χωρίς να προσβάλλει το περιβάλλον.
7. Εύκολο καθαρισμό και συντήρηση διότι η συνολική κατασκευή δεν υπερβαίνει το ανθρώπινο ύψος.
8. Κατανάλωση ελάχιστου ηλεκτρικού ρεύματος για την λειτουργία του.
9. Ελαχιστοποίηση της πιθανότητας άμεσου κεραυνικού πλήγματος λόγω του χαμηλού του ύψους και της αποτελεσματικής γείωσής του.
10. Εύκολη, γρήγορη τοποθέτηση και συντήρηση των Φ/Β πάνελ, χωρίς χρήση γερανού.

Σχεδίαση

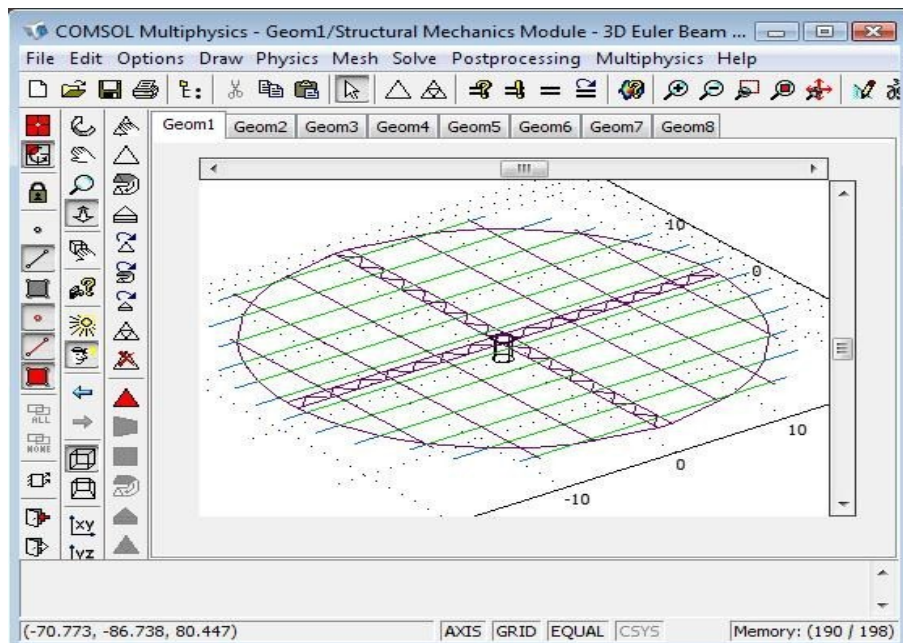
Η σχεδίαση του μοντέλου έγινε στο περιβάλλον του Comsol multiphysics 3.4. Για την σχεδίαση αυτή απαιτούνται κάποιες αρχικές ρυθμίσεις για να καταλάβει το λογισμικό τι είναι αυτό το οποίο καλείται να επιλύσει. Έτσι, δηλώνεται πως το σύστημα στήριξης πρόκειται για μηχανική κατασκευή που αποτελείται από δοκούς και θα μελετηθεί σε 3 διαστάσεις, ή όπως φαίνεται στο σχήμα 1: (3D, Structural Mechanics Module → 3D Euler Beam → Static analysis). Σε αυτήν την εφαρμογή το λογισμικό μελετάει τις παραμορφώσεις, τις ροπές και τις δυνάμεις σε τρισδιάστατες δοκούς βασιζόμενο στην κλασική παραδοχή Euler – Bernulli. Η ανάλυση θα είναι γραμμική με τις ιδιότητες των υλικών, τα φορτία αλλά και τους υπόλοιπους περιορισμούς να είναι χρονικά σταθερά.



Σχήμα 1

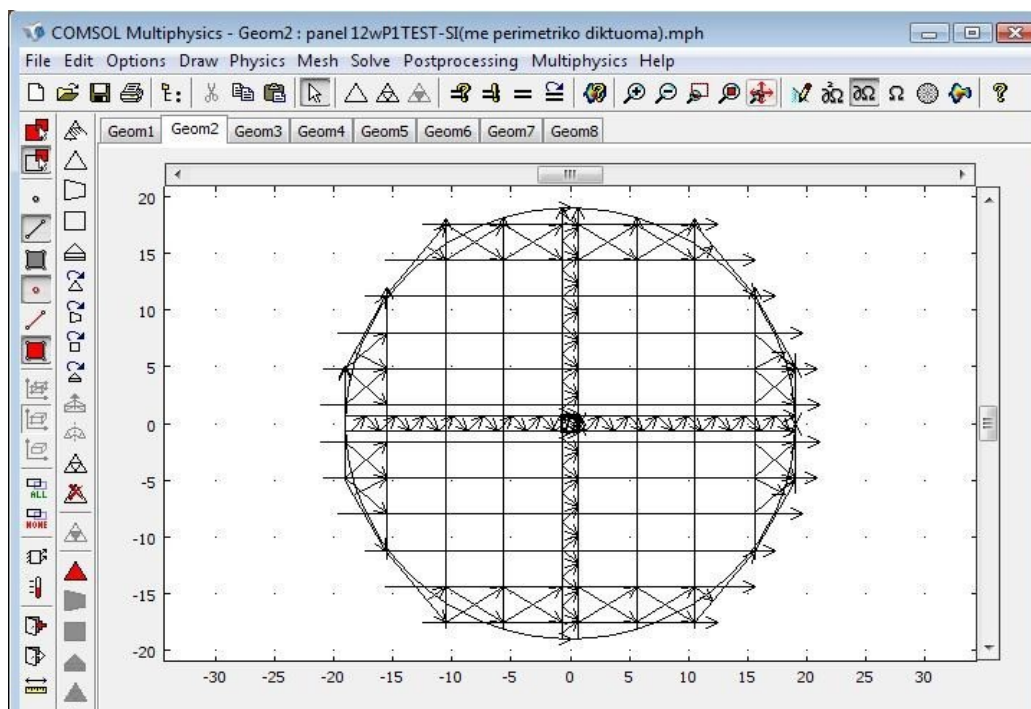
Παρακάτω ακολουθεί μια περιληπτική βηματική παρουσίαση της σχεδίασης του μοντέλου Α στήριξης φωτοβολταϊκών πάνελ.

Με τα εργαλεία σχεδίασης του comsol multiphysics σχεδιάστηκε αρχικά η βάση του συστήματος στήριξης όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Η διάμετρος της κυκλικής βάσης είναι 38 μέτρα ενώ το μέγιστο μήκος κάθετης δοκού (όπου στηρίζονται τα πάνελ) είναι 42 μέτρα.



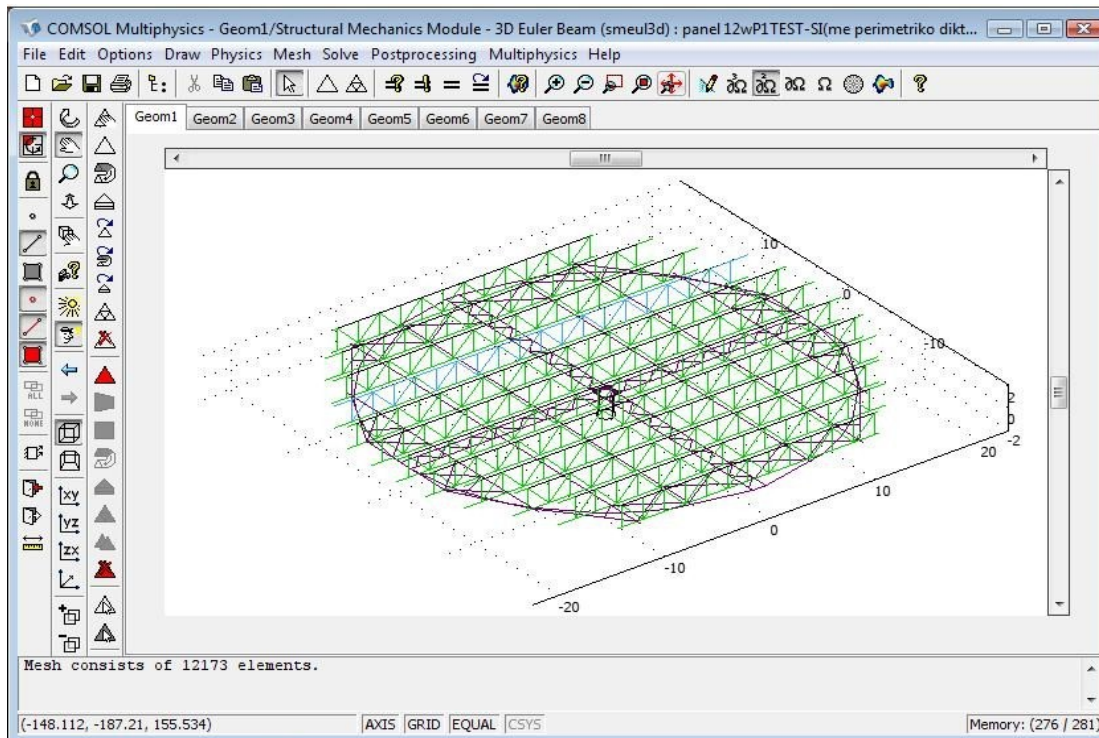
Σχήμα 2

Στη συνέχεια προστέθηκαν κάποια δικτυώματα όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Λόγω της μεγάλης διαμέτρου της βάσης είναι λογικό να απαιτούνται κάποια βοηθητικά δικτυώματα για αποφυγή μεγάλης παραμόρφωσης.



Σχήμα 3

Δικτυώματα επίσης προστέθηκαν στο κάθετο επίπεδο για στήριξη των δοκών πάνω στις οποίες θα τοποθετηθούν τα φωτοβολταϊκά πάνελ. (Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4 με ανοιχτό χρώμα.)



Σχήμα 4

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως σχεδιάστηκαν με ιδιαίτερη προσοχή 24 σημεία στήριξης (τροχοί) ισοκατανεμημένα περιμετρικά του κύκλου και μία στήριξη στο κέντρο. Σε κάθε βήμα σχεδίασης ομαδοποιήθηκαν τα υλικά της κατασκευής ώστε να απλοποιηθεί στην συνέχεια η εισαγωγή παραμέτρων και τεχνικών χαρακτηριστικών. Με την ολοκλήρωση της σχεδίασης μπορεί να συνεχιστεί η μελέτη ενός μοντέλου που στην πραγματικότητα θα έχει περίπου τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 5.



Σχήμα 5

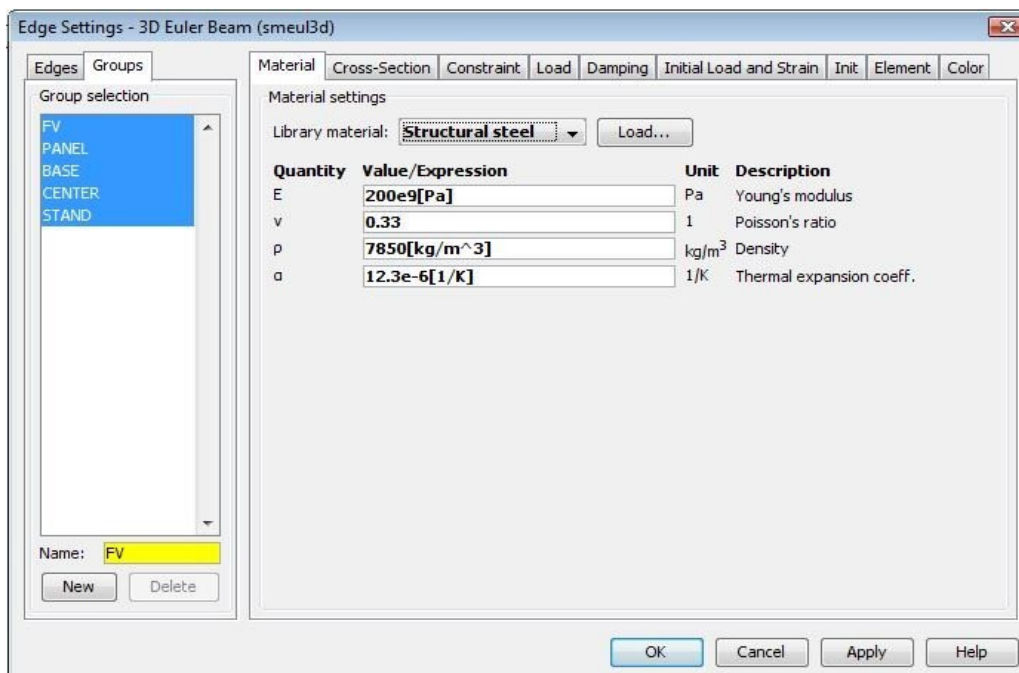
Παράμετροι και τεχνικά χαρακτηριστικά δοκών

Τα δεδομένα αυτά είναι βασικά και αναγκαία για την επίλυση του προβλήματος. Εκτός από την μορφή του συστήματος που εισάγεται κατά τη σχεδίαση, το λογισμικό πρέπει να λάβει υπόψιν τα χαρακτηριστικά κάθε υλικού κατασκευής και το πάχος των δοκών.

Το σύστημα στήριξης είναι κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από χάλυβα γαλβανισμένο εν θερμώ. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του χάλυβα είναι:

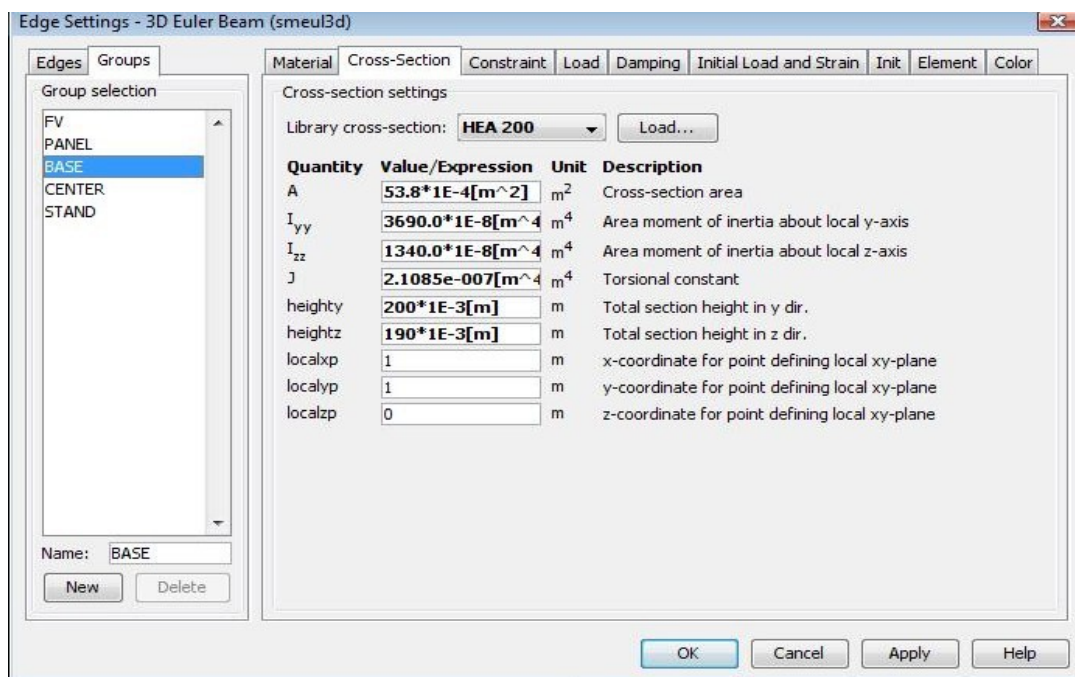
- Συντελεστής ελαστικότητας $E = 200 \cdot 10^9 \text{ Pa}$
- Λόγος Poisson $\nu = 0,33$
- Πυκνότητα $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
- Συντελεστής θερμικής διαστολής $\alpha = 12,3 \text{ ανά } 10^6 \text{ Kelvin}$

Τα δεδομένα του υλικού εισάγονται στο comsol multiphysics για όλη τη βάση στήριξης (όχι για τα Φ/Β πάνελ) καθώς όλες οι δοκοί είναι χαλύβδινες.

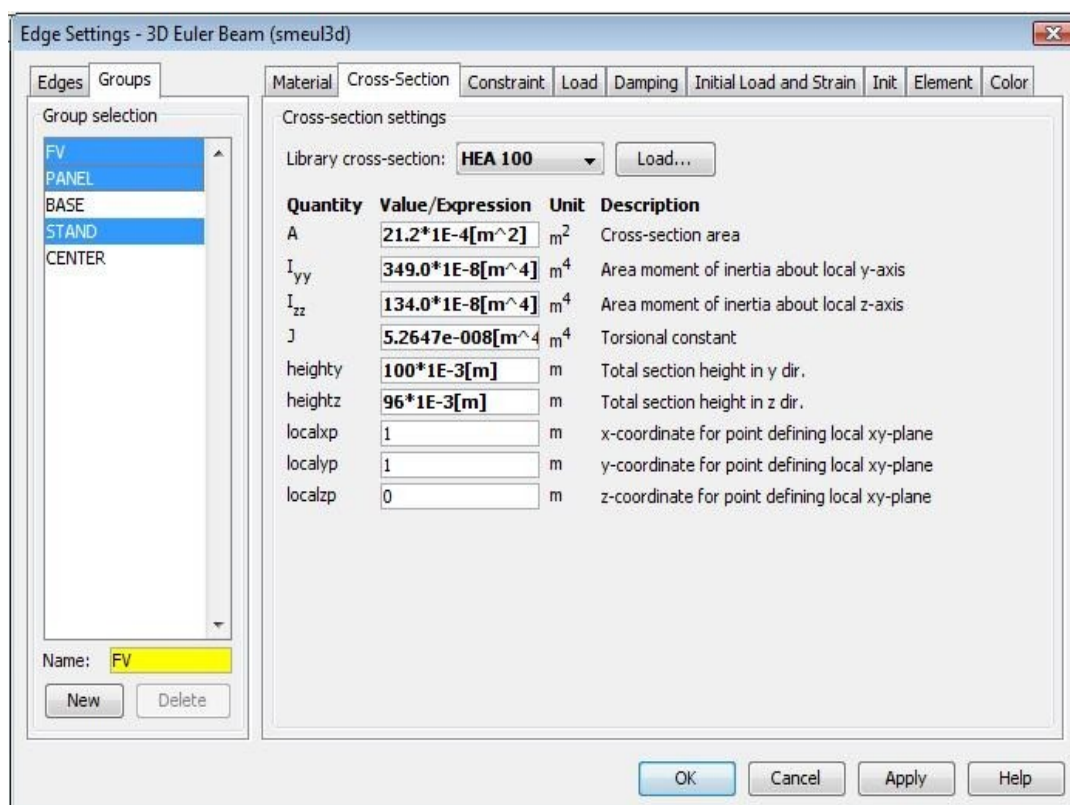


Σχήμα 1

Το υλικό των δοκών μπορεί να είναι το ίδιο, αυτό δεν ισχύει όμως και για τις διαστάσεις τους. Στην κατασκευή παρατηρούνται δύο μεγέθη χαλύβδινων δοκών. Η οριζόντια κυκλική βάση μαζί με τα δικτυώματά της (στο οριζόντιο επίπεδο) είναι κατασκευασμένα από δοκούς τύπου HEA 200, δηλαδή πάχους 200 χιλιοστών, ενώ τα κάθετα δικτυώματα που στηρίζουν τα Φ/Β πάνελ είναι μικρότερα, HEA 100. Τα χαρακτηριστικά των δοκών εισάγονται απλά χάρη στη βιβλιοθήκη τύπων δοκών του comsol multiphysics όπως φαίνεται στα σχήματα 2 και 3. Για να γίνει αυτό εύκολα, τα διαφορετικά είδη δοκών έχουν χωριστεί σε ομάδες κατά τη σχεδίαση. Το λογισμικό καταχωρεί στα δεδομένα του όχι μόνο τις διαστάσεις των δοκών, αλλά και το εμβαδόν διατομής, το βάρος ανά μέτρο και την ροπή αδράνειας ως προς κάθε άξονα. Τα χαρακτηριστικά δοκών τύπου HEA επισυνάπτονται στο παράρτημα.



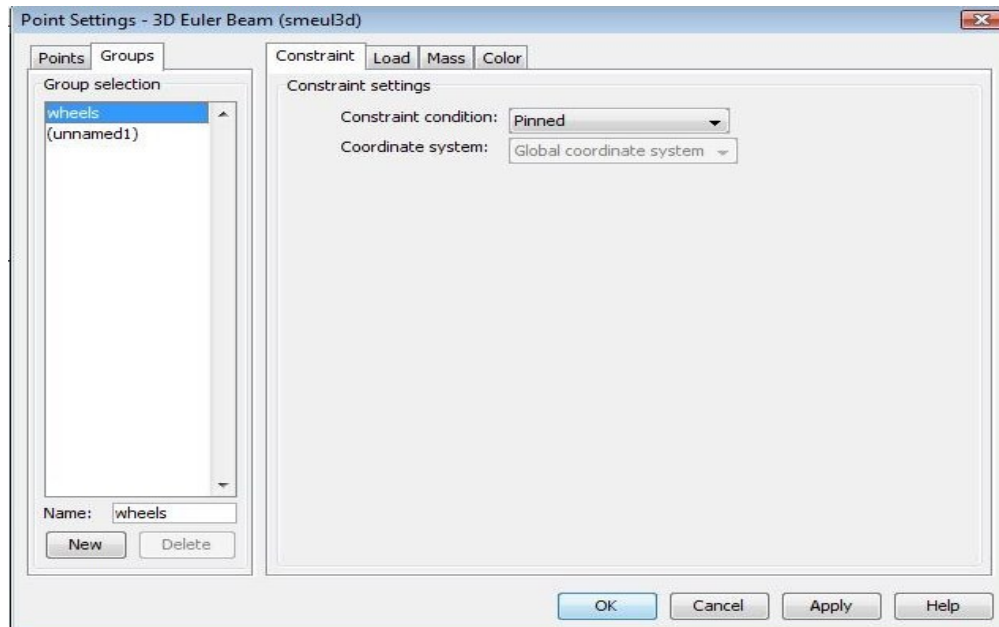
Σχήμα 2



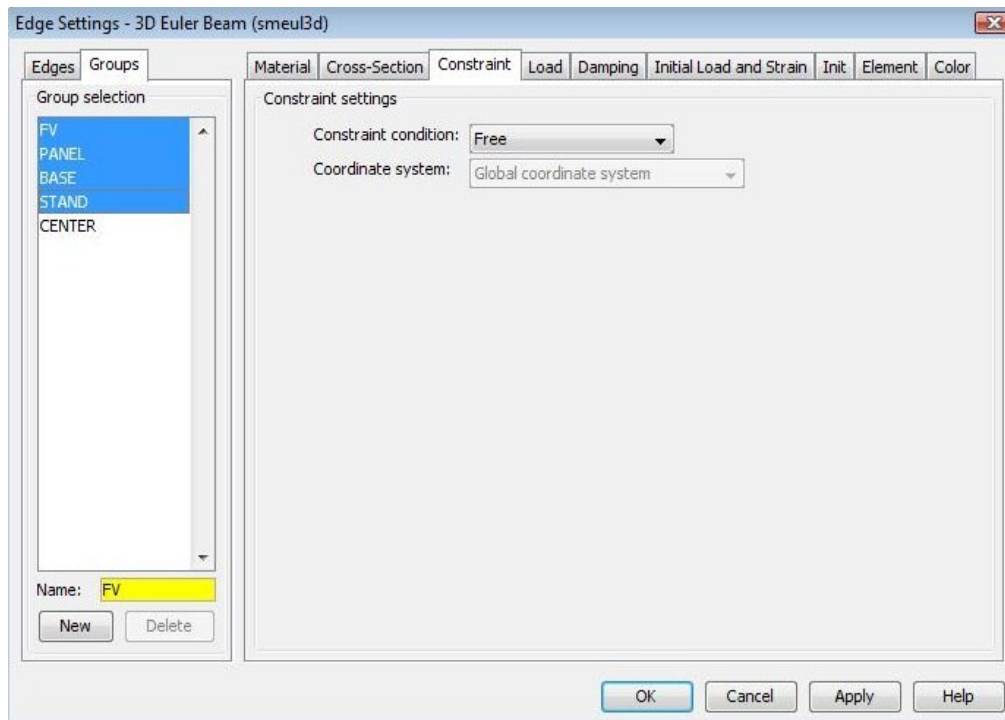
Σχήμα 3

Από τα παραπάνω σχήματα φαίνεται πως η ομάδα δοκών μεγέθους 200mm είναι η “BASE” που αποτελεί την κυκλική βάση του κύκλου. Επίσης οι ομάδες “FV”, “PANEL” και “STAND” είναι μεγέθους 100mm και αποτελούν τις δοκούς των κάθετων δικτυωμάτων, στήριξης πάνελ (οριζόντιοι) και κάθετης στήριξης στον y-z αντίστοιχα.

Στη συνέχεια ορίζονται οι περιοχές του μοντέλου που έρχονται σε επαφή με το έδαφος και κατά συνέπεια δεν θα παρουσιάσουν κάποια μετατόπιση στο χώρο, όπως και οι ελεύθερες περιοχές οι οποίες θα υποστούν κάποια παραμόρφωση. Βάση της ομαδοποίησης που έγινε κατά την σχεδίαση του μοντέλου Α, στα σημεία όπου υπάρχουν οι 24 ρόδες στήριξης περιμετρικά, καθώς και στο στερεό που στηρίζει το κέντρο της κυκλικής βάσης δίνεται η εντολή **pinned** (Σχήμα 4). Οι στηρίξεις έτσι μένουν σταθερές κατά την προσομοίωση της στατικής παραμόρφωσης που θα ακολουθήσει. Στα υπόλοιπα τμήματα της κατασκευής οι δοκοί επιλέγονται ελεύθεροι (**free**) σε κάθε είδους παραμόρφωση (Σχήμα 5).



Σχήμα 4



Σχήμα 5

Φορτίσεις

Πριν την εισαγωγή των φορτίων που καταπονούν το μοντέλο πρέπει να υπάρξει μια συνολική εικόνα - εκτίμηση των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα τέτοιο σύστημα. Εκτός από το ίδιο βάρος των δοκών το οποίο έχει ληφθεί ήδη υπόψιν κατά την εισαγωγή του υλικού, πρέπει να υπολογιστούν τα εξής:

1. βάρος φωτοβολταϊκών πάνελ
2. φόρτιση λόγω χιονιού – πάγου στα πάνελ
3. φόρτιση λόγω ανέμου, με υπόθεση κλίσης 30 μοίρες
4. αδρανειακή δύναμη λόγω φρεναρίσματος.

➤ Βάρος Φ/Β πάνελ.

Κάθε πάνελ φωτοβολταϊκού έχει διαστάσεις 1,50 μέτρα ύψος επί 1,00 μέτρο πλάτος και ζυγίζει 22 κιλά. Η δύναμη λοιπόν που ασκείται λόγω βάρους είναι 212,82 N ανά πάνελ (και κατά συνέπεια ανά μέτρο) κατά την διεύθυνση του άξονα z.

➤ Φόρτιση λόγω χιονιού – πάγου στα Φ/Β πάνελ.

Λαμβάνοντας υπόψη την ακραία - χειρότερη περίπτωση χιονιού – πάγου στα φωτοβολταϊκά πάνελ, θα υπάρξει μια επιπλέον φόρτιση της τάξεως των 20 κιλών ανά πάνελ. Δηλαδή θα προστεθεί στον κατακόρυφο άξονα z μια δύναμη ίση με 196,2 N ανά μέτρο.

➤ Φόρτιση λόγω ανέμου.

Στην χειρότερη δυνατή περίπτωση που ο άνεμος προσκρούει κάθετα στα φωτοβολταϊκά πάνελ, η συνισταμένη δύναμη F που δρά στην επιφάνειά τους υπολογίζεται από τον τύπο:

$$F = 1/2 * \rho * V^2 * C * A$$

όπου:

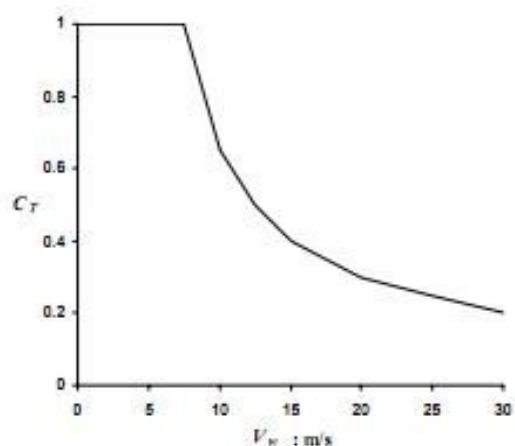
ρ : μέση πυκνότητα του αέρα (= $1,25 \text{ kg/m}^3$)

V: Ταχύτητα ανέμου (σε m/s)

C: αεροδυναμική παράμετρος (βλ. διάγραμμα)

A: εμβαδόν επιφάνειας Φ/Β πάνελ (= $1,5 \text{ m}^2$)

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία της ΕΜΥ, η μέση ταχύτητα ανέμου στις ορεινές περιοχές του Ρεθύμνου είναι 4 m/s. Για έλεγχο της κατασκευής σε εξαιρετικά δύσκολες καιρικές συνθήκες, θα οριστεί η ταχύτητα ανέμου στα 30 m/s, δηλαδή περίπου 11 beaufort (συνθήκες καταιγίδας). Η τιμή της αεροδυναμικής παραμέτρου για αυτή τη ταχύτητα είναι σύμφωνα με το διάγραμμα ίση με 0,2.



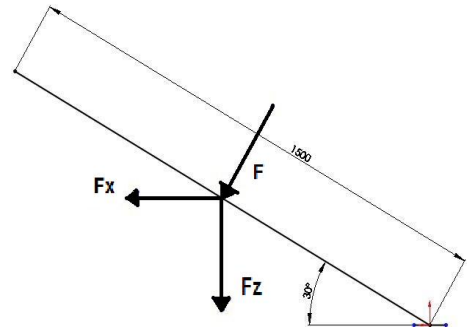
Υπολογίζεται λοιπόν πως με τις χειρότερες δυνατές καιρικές συνθήκες, η δύναμη που θα ασκείται κάθετα στην επιφάνεια κάθε Φ/Β πάνελ θα είναι της τάξης των 168,75 N. Με την υπόθεση ότι τα Φ/Β πάνελ έχουν μια κλίση 30 μοιρών από το οριζόντιο επίπεδο συνεπάγεται πως η δύναμη θα ασκείται στον κάθετο αλλά και στον οριζόντιο άξονα.

Με

$$F_x = F * \sin 30 = 84,375 \text{ N}$$

και

$$F_z = F * \cos 30 = 146,14 \text{ N}$$



➤ Δύναμη αδράνειας λόγω φρεναρίσματος.

Οι δυνάμεις λόγω αδράνειας είναι διαφορετικές για κάθε Φ/Β πάνελ καθώς εξαρτώνται από την απόσταση που έχουν από το κέντρο της βάσης. Δηλαδή σε κάθε σημείο ασκείται δύναμη διαφορετικού μεγέθους με κατεύθυνση ίδια με την ταχύτητα περιστροφής. Μέγιστη δύναμη λόγω αδράνειας ασκείται στα σημεία που βρίσκονται περιμετρικά της κυκλικής βάσης, δηλαδή σε απόσταση 21 μέτρων από το κέντρο. Για να υπολογιστεί αυτή η δύναμη και να ληφθεί υπόψιν κατά την προσομοίωση της κατασκευής θα χρειαστούν μερικοί νόμοι της κινηματικής.

Γνωρίζοντας ότι η ταχύτητα στη ράγα (όπου ακουμπάνε οι ρόδες περιμετρικά της βάσης) είναι 50 cm/min, ($=0,7 \text{ m/s}$) και ότι η ράγα βρίσκεται στα $R=19$ μέτρα από το κέντρο του κύκλου υπολογίζεται η γωνιακή ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται η βάση (πριν αρχίσει να επιβραδύνει):

$$\omega = \frac{V}{R} = \frac{0,7 \text{ m/s}}{19 \text{ m}} = 0,037 \text{ rad/s}$$

Επίσης, αν θεωρηθεί πως το σύστημα ακινητοποιείται σε 1 δευτερόλεπτο, η επιβράδυνσή του υπολογίζεται $\alpha = \frac{0-0,7}{1-0} = -0,7 \text{ m/s}^2$ στη ράγα.

$$\text{Άρα η γωνιακή επιβράδυνση θα είναι } \alpha_{\gamma\omega\nu} = \frac{\alpha}{R} = \frac{-0,7}{19} = -0,037 \text{ rad/s}^2$$

Η ροπή αδράνειας για το πάνελ που βρίσκεται στην άκρη της βάσης είναι: $I = m * r^2$ ενώ η συνισταμένη των ροπών που ασκούνται εκεί ισούται με το γινόμενο της ροπής αδράνειας και της γωνιακής επιτάχυνσης: $\sum \tau = I * \alpha_{\gamma\omega\nu}$

όπου

$m = 22 \text{ kg}$: η μάζα του Φ/Β πάνελ και

$r = 21 \text{ m}$: η απόστασή του από το κέντρο της βάσης

τ = ροπή δύναμης

I = ροπή αδράνειας

Γνωρίζοντας ότι $\sum \tau = \sum F * r$, συνεπάγεται:

$$\sum F * r = m * r^2 * \alpha.γων \rightarrow$$

$$\sum F = m * r * \alpha.γων \rightarrow$$

$$\sum F = 22\text{kg} * 21\text{m} * 0,037\text{rad/s}^2 \rightarrow$$

$$\sum F = 17,094\text{ N}$$

Άρα η δύναμη που ασκείται στο Φ/Β πάνελ που βρίσκεται σε απόσταση 21 μέτρων από το κέντρο της βάσης είναι ίση με 17,094 N και έχει διεύθυνση παράλληλη στο οριζόντιο επίπεδο.

➤ **Σύνολο ασκούμενων εξωτερικών δυνάμεων σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες. (μέγιστη καταπόνηση)**

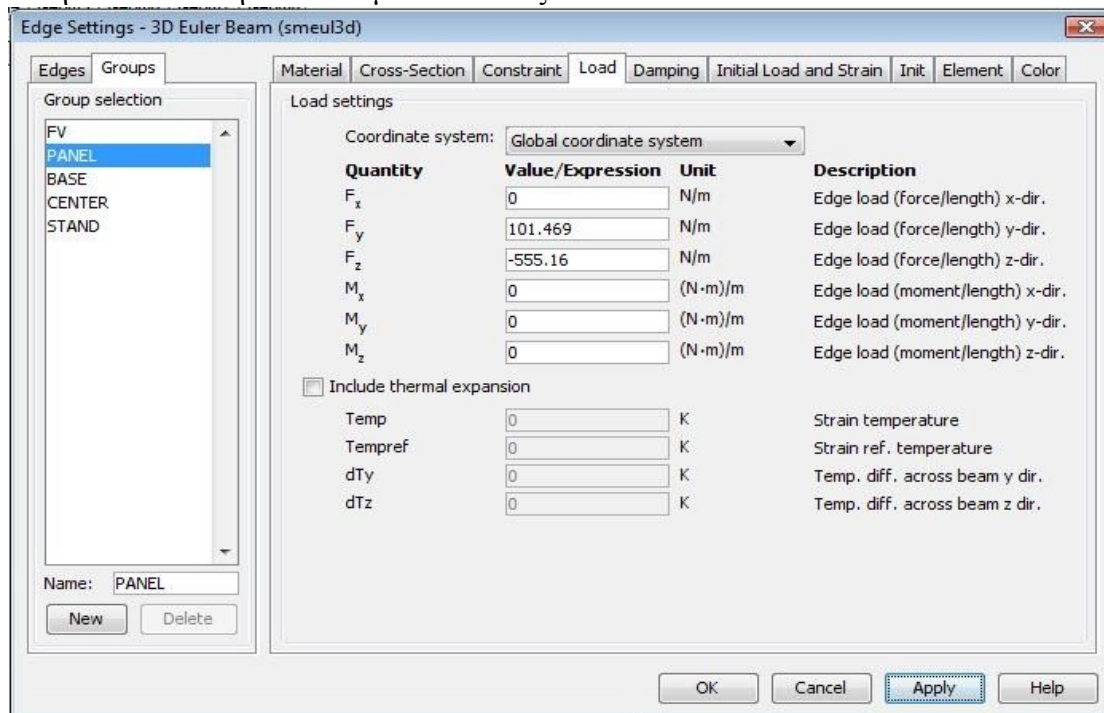
Λαμβάνοντας υπόψη τα χειρότερα πιθανά σενάρια καταπόνησης του μοντέλου, με συνολική φόρτιση λόγω βάρους, χιονιού, ισχυρών ανέμων και φρεναρίσματος, το μέγεθος των δυνάμεων θα είναι:

Κατά μήκος του άξονα z: $\sum F = 212,82 + 196,2 + 146,14 = 555,16\text{ N}$ ανά μέτρο (ανά πάνελ)

Κατά μήκος του οριζοντίου επιπέδου: $\sum F = 84,375 + 17,094 = 101,469\text{ N}$ ανά μέτρο (ανά πάνελ)

Είναι φανερό πως οι δυνάμεις που θα καταπονούν τα Φ/Β πάνελ σε συνήθη χρήση στη πραγματικότητα θα είναι πολύ μικρότερες από τις παραπάνω. Σκοπός είναι να αποδειχθεί η αντοχή του μοντέλου σε ακραίες καταστάσεις.

Η εισαγωγή των φορτίων στα δεδομένα του λογισμικού φαίνεται στο σχήμα 1. Τα πρόσημα δείχνουν την κατεύθυνση των δυνάμεων στον άξονα.



Σχήμα 1

➤ **Σύνολο ασκούμενων εξωτερικών δυνάμεων σε φυσιολογικές συνθήκες. (ελάχιστη καταπόνηση)**

Με την υπόθεση ακινησίας του συστήματος και καλών καιρικών συνθηκών, δηλαδή δεν υπάρχει χιόνι και η ταχύτητα ανέμου φτάνει τα 4 m/s, το σύνολο των εξωτερικών δυνάμεων υπολογίζεται πολύ μικρότερο.

Η φόρτιση λόγω ανέμου σε αυτήν την περίπτωση θα είναι:

$$F = 1/2 * \rho * V^2 * C * A$$

όπου:

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

V: Ταχύτητα ανέμου = 4 m/s (καταγεγραμμένος μέσος όρος στο ορεινό Ρέθυμνο)

C: αεροδυναμική παράμετρος = 1 (βλ. διάγραμμα)

A: εμβαδόν επιφάνειας Φ/Β πάνελ (= $1,5 \text{ m}^2$)

$$\text{Άρα } F = 1/2 * 1,25 \text{ kg/m}^3 * 4^2 (\text{m/s})^2 * 1 * 1,5 \text{ m}^2 \rightarrow$$

$$F = 15 \text{ N ανά πάνελ (ή ανά μέτρο)}$$

Δηλαδή

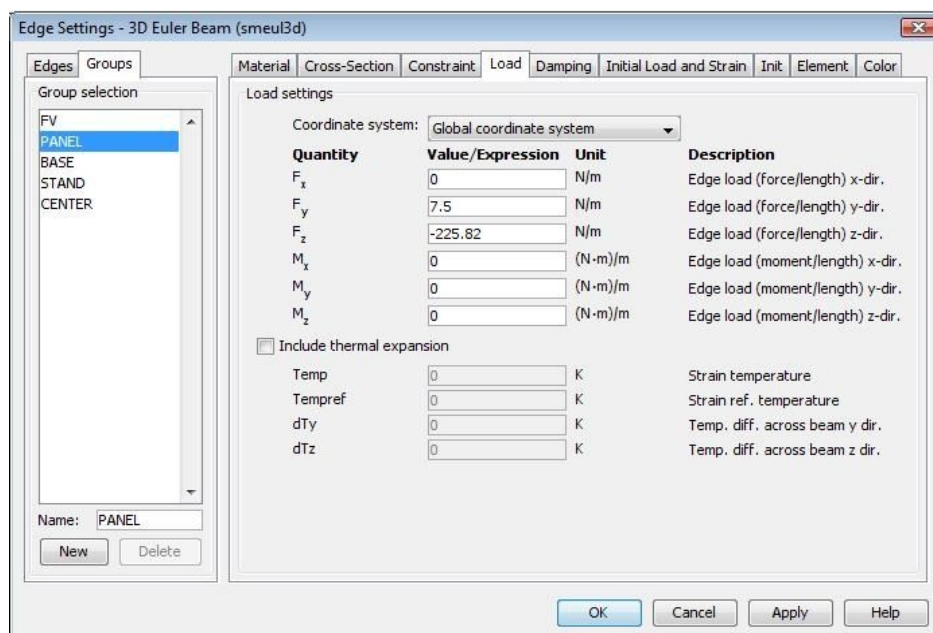
$$F_x = F * \sin 30 = 7,5 \quad \text{και} \quad F_z = F * \cos 30 = 13 \text{ N ανά μέτρο.}$$

Οι δυνάμεις λοιπόν που καταπονούν τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε αυτή τη περίπτωση είναι η δύναμη λόγω βάρους των Φ/Β πάνελ και η δύναμη λόγω ανέμου που μόλις υπολογίσθηκε.

Άρα κατά μήκος του άξονα z: $\sum F = 212,82 \text{ N} + 13 \text{ N} = 225,82 \text{ N ανά μέτρο}$

ενώ κατά μήκος του οριζοντίου επιπέδου: $\sum F = 7,5 \text{ N ανά μέτρο}$

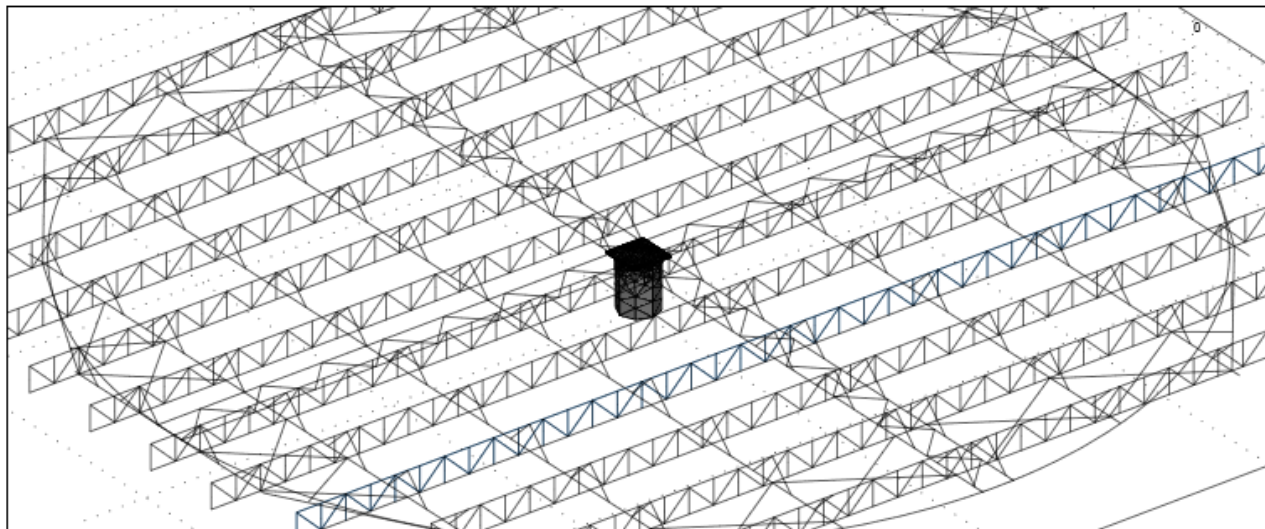
Η εισαγωγή των φορτίων στα δεδομένα του λογισμικού φαίνεται στο σχήμα 2. Τα πρόσημα δείχνουν την κατεύθυνση των δυνάμεων στον άξονα.



Σχήμα 2

Προσομοίωση – επίλυση μοντέλου A

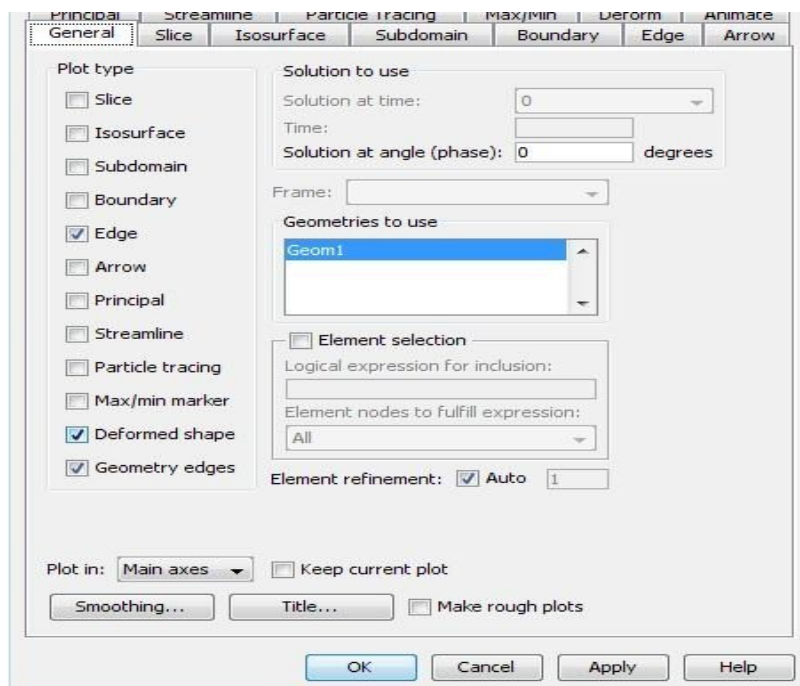
Το μοντέλο είναι ολοκληρωμένο και έτοιμο για επίλυση. Πρώτο βήμα είναι η διακριτοποίηση του συστήματος στήριξης χρησιμοποιώντας την εντολή **Mesh**. (Σχήμα 1)



Σχήμα 1

Στη συνέχεια πρέπει να αποφασιστεί τι πληροφορίες είναι επιθυμητό να επιστρέφει το πρόγραμμα κατά την επίλυση. Για έλεγχο λειτουργικότητας και αντοχής της κατασκευής θα ληφθούν υπόψιν οι τιμές παραμόρφωσής της, καθώς και οι δυνάμεις που την καταπονούν. Για τον λόγο αυτόν επιλέγεται από τις ρυθμίσεις επίλυσης του λογισμικού και συγκεκριμένα:

Postprocessing → **Plot Parameters** → **General** η εντολή **Deformed shape** (Σχήμα 2). Η ρύθμιση αυτή επιτρέπει να παρατηρηθεί από τον χρήστη πως θα παραμορφωθεί το μοντέλο στο τρισδιάστατο επίπεδο.

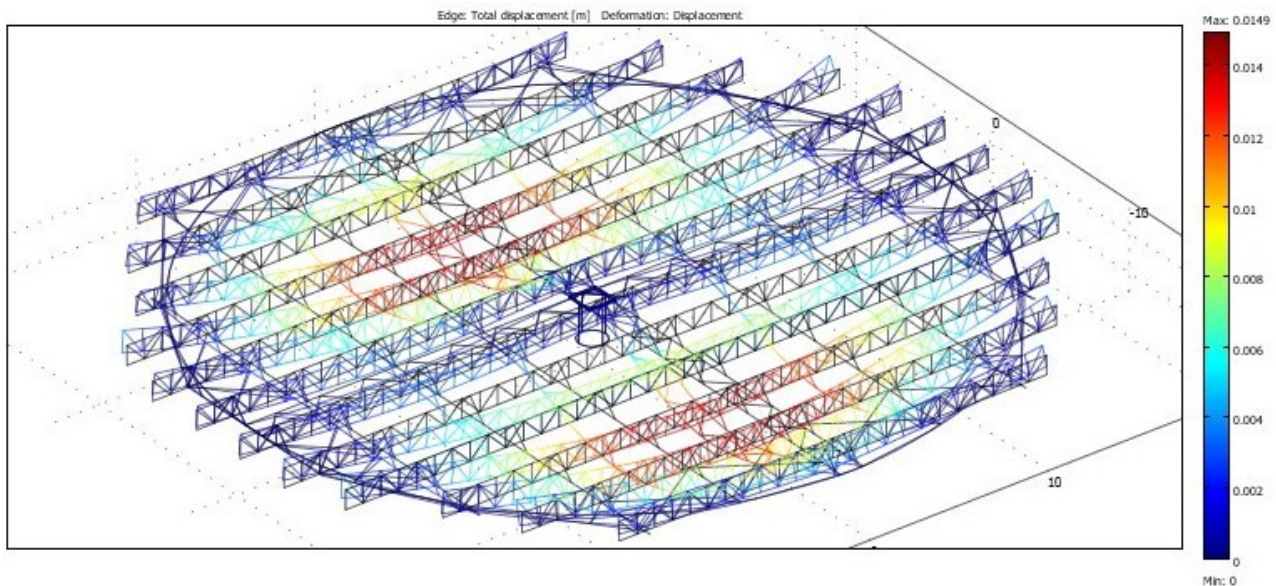


Σχήμα 2

Στη συνέχεια το μοντέλο A θα λυθεί για διαφορετικές περιπτώσεις ασκούμενου φορτίου.

➤ **Περίπτωση μέγιστης φόρτισης (αντίξοες καιρικές συνθήκες)**

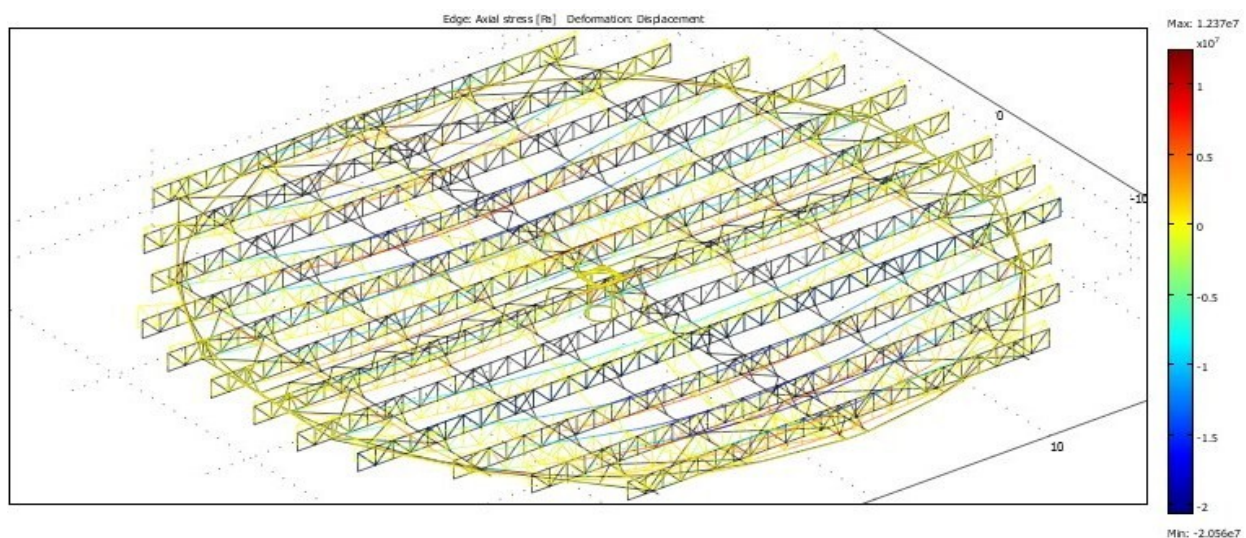
Για τη επίλυση χρησιμοποιείται η εντολή **Solve**. Οι μέγιστες τιμές παραμόρφωσης σε μέτρα, καθώς και πώς παραμορφώνεται το μοντέλο Α στο τρισδιάστατο χώρο απεικονίζεται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3 – Παραμόρφωση (m)

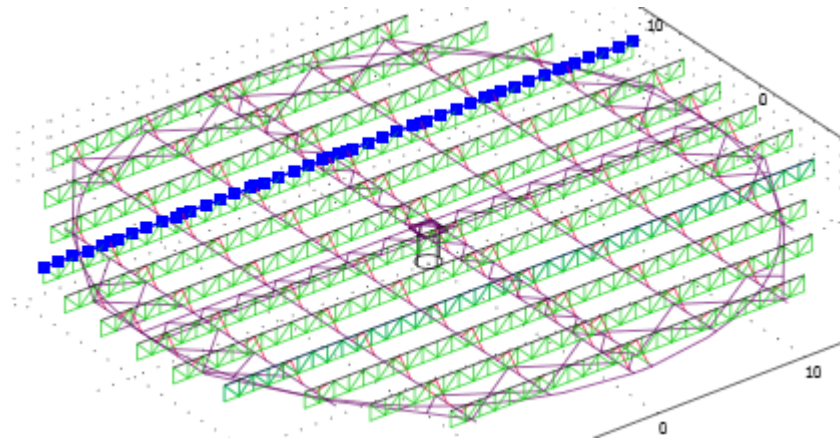
Η μπάρα στα δεξιά του σχήματος 3 δείχνει τις τιμές συνολικής παραμόρφωσης σε μέτρα. Η μέγιστη παραμόρφωση του συστήματος στήριξης είναι περίπου 15mm, και παρατηρείται στα σημεία με κόκκινο χρώμα. Σε κάποια σημεία που εμφανίζονται με κίτρινο χρώμα η παραμόρφωση είναι περίπου 9mm, ενώ σε σημεία με γαλάζιο χρώμα ακόμα μικρότερη, 6mm. Αξίζει να σημειωθεί πως περιμετρικά στη βάση, δηλαδή εκεί που βρίσκονται οι 24 ρόδες στήριξης και είναι κρίσιμο για την λειτουργία – κίνηση του συστήματος, παρουσιάζεται αμελητέα παραμόρφωση (δεν ξεπερνά τα 3mm).

Μια άλλη χρήσιμη επίλυση είναι αυτή που υπολογίζει την πίεση στους άξονες (σχήμα 4). Όπως είναι φυσικό τα σημεία μέγιστης πίεσης συμπίπτουν με τα σημεία μέγιστης παραμόρφωσης (κόκκινο χρώμα). Η μέγιστη πίεση υπολογίσθηκε $1.237 \cdot 10^7$ Pa και εμφανίζεται στο κάτω μέρος της καμπτούμενης δοκού.



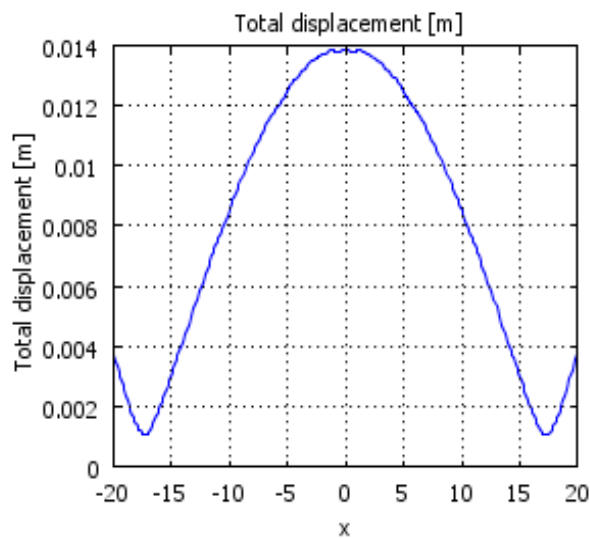
Σχήμα 4 – Πίεση (Pa)

Μεγάλο προτέρημα της προσομοίωσης αποτελεί το γεγονός ότι απομονώνεται και μελετάται με μεγάλη ευκολία κάποιο κομμάτι του μοντέλου. Αν υπήρχε ανάγκη παρατήρησης κάποιας συγκεκριμένης δοκού, αυτή μπορεί να επιλεγεί όπως φαίνεται στο σχήμα 5. Εδώ έχει επιλεγεί η δοκός πάνω στην οποία στηρίζονται τα Φ/Β πάνελ και που παρουσιάστηκε η μεγαλύτερη παραμόρφωση.



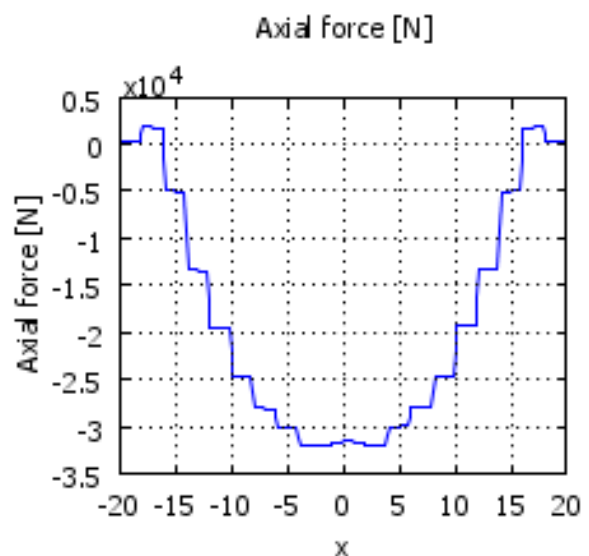
Σχήμα 5

Ρυθμίζοντας τις κατάλληλες παραμέτρους εξάγονται διάφορα διαγράμματα που δείχνουν την συμπεριφορά της δοκού σε κάθε της σημείο. Μερικά από αυτά τα διαγράμματα είναι της παραμόρφωσης που παρουσιάζεται και της δύναμης που την ασκείται κατά μήκος της δοκού.



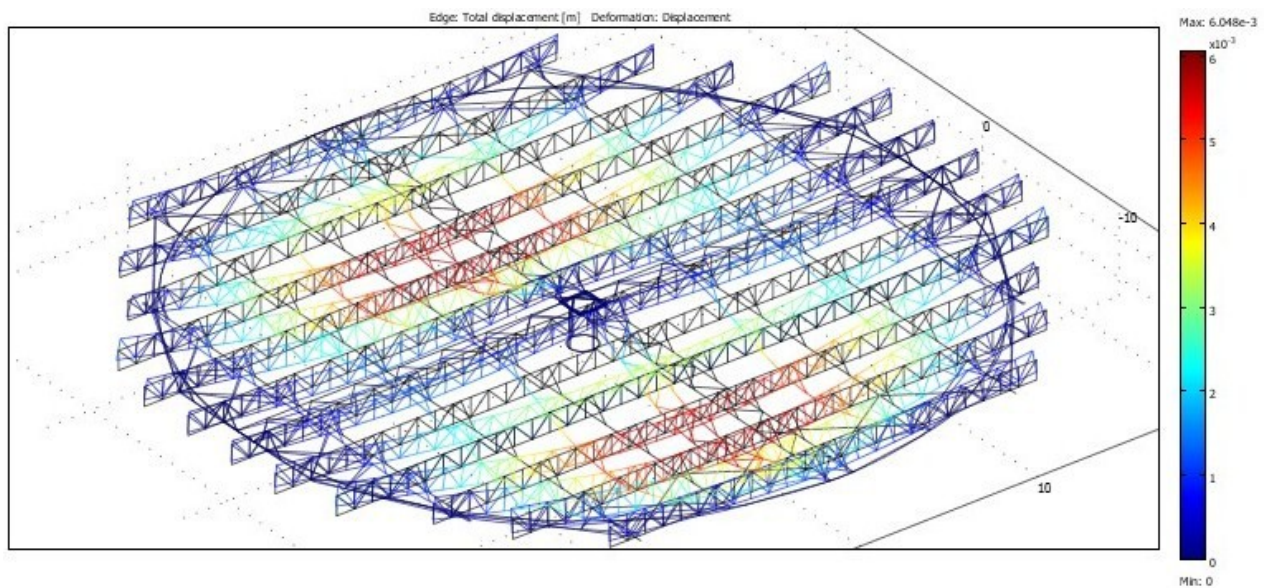
Διάγραμμα παραμόρφωσης ανά σημείο της δοκού (άξονας x)

Διάγραμμα φορτίου ανά σημείο της δοκού (άξονας x)



➤ **Περίπτωση ελάχιστης φόρτισης (φυσιολογικές καιρικές συνθήκες)**

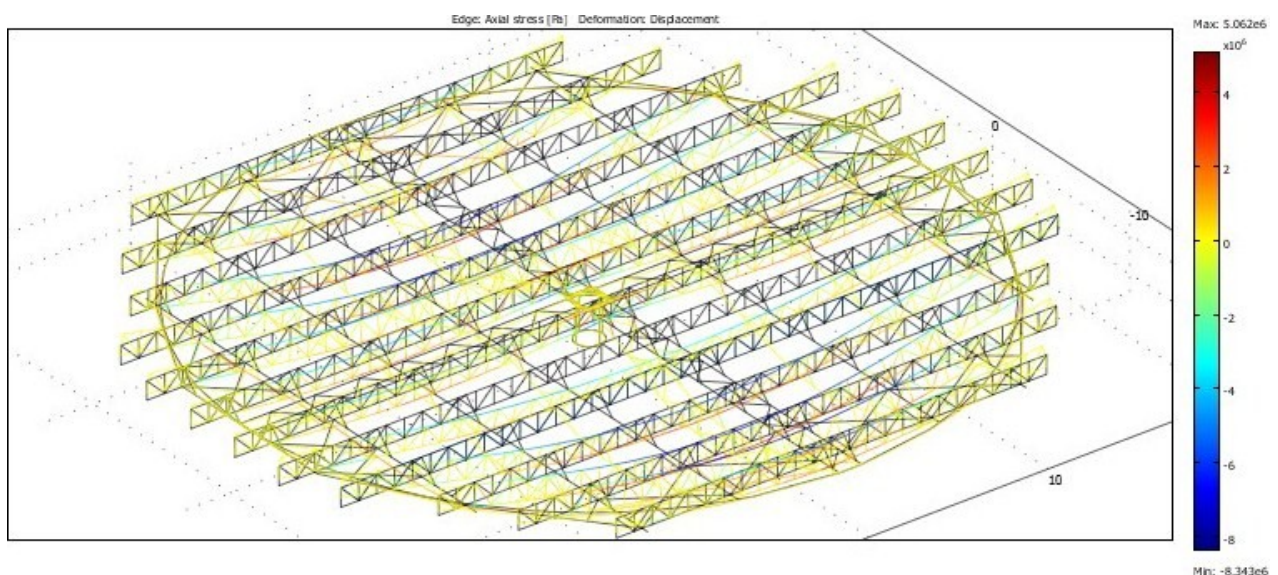
Για τις συγκεκριμένες τιμές φορτίου, η επίλυση θα δώσει τα παρακάτω αποτελέσματα παραμόρφωσης.



Σχήμα 6

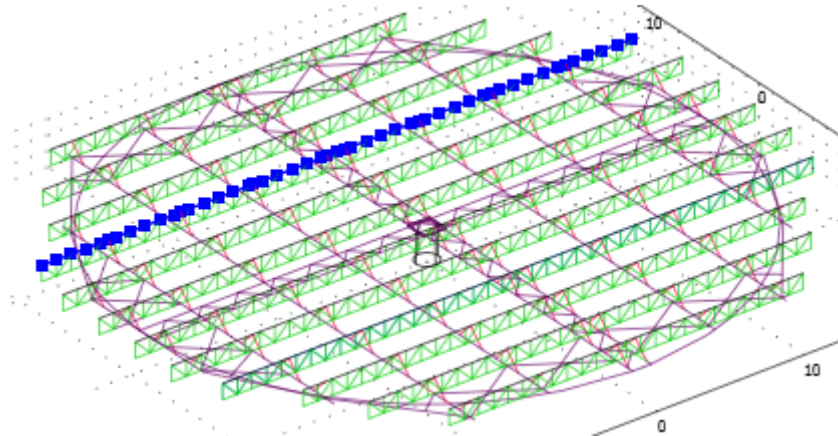
Από το σχήμα 6 εύκολα παρατηρείται πως η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στα ίδια σημεία με την προηγούμενη περίπτωση (μέγιστου φορτίου). Αυτό είναι απολύτως λογικό καθώς το μόνο που άλλαξε είναι οι τιμές των φορτίων και όχι τα σημεία που ασκούνται. Στη μπάρα δεξιά του σχήματος εμφανίζεται η τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης που είναι 6,048 mm. Η τιμή αυτή είναι κατά 60% μικρότερη από την τιμή που υπολογίσθηκε στην περίπτωση μέγιστου φορτίου (15mm). Η ελάχιστη παραμόρφωση δείχνει τη στιβαρότητα και τη καλή ποιότητα της κατασκευής.

Η προσομοίωση της ασκούμενης πίεσης στους άξονες φαίνεται στο σχήμα 7. Η μείωση του φορτίου έχει ως αποτέλεσμα την μικρότερη τιμή πίεσης. Η μέγιστη πίεση που παρατηρείται τώρα στο σύστημα είναι $5,062 \cdot 10^6 Pa$ σε αντίθεση με τα $1,237 \cdot 10^7 Pa$ που υπολογίσθηκαν στην περίπτωση αντίξων καιρικών συνθηκών.



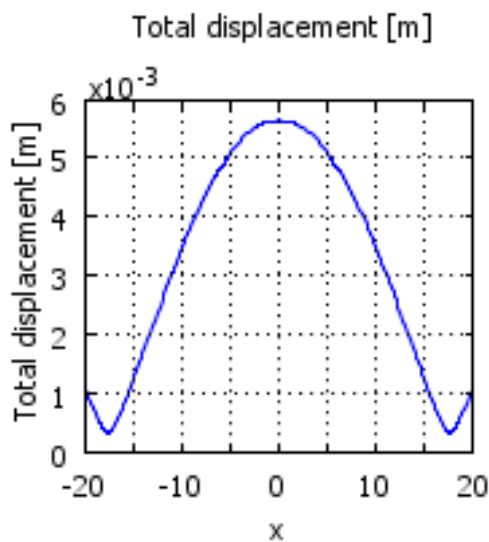
Σχήμα 7

Ακολουθώντας τα βήματα της προηγούμενης περίπτωσης, έτσι κι εδώ επιλέγεται για παρατήρηση η δοκός που φαίνεται στο σχήμα 8. Είναι η παράλληλη στο οριζόντιο επίπεδο δοκός που στηρίζει φωτοβολταϊκά πάνελ και που δέχεται την μεγαλύτερη παραμόρφωση.



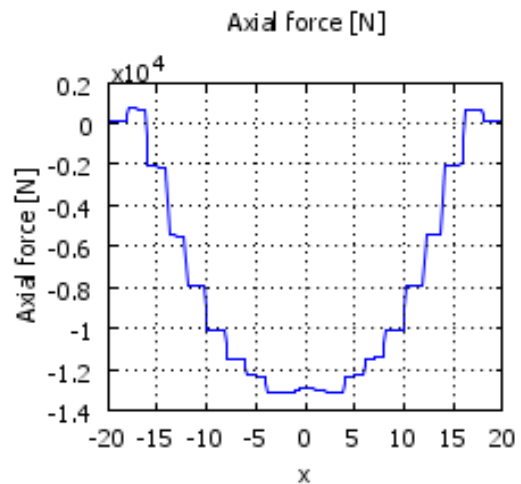
Σχήμα 8

Για άλλη μια φορά εξάγονται διαγράμματα χρήσιμα για την λειτουργία της συγκεκριμένης δοκού. Τα διαγράμματα δείχνουν την παραμόρφωση και το φορτίο, αντίστοιχα, σε όλο το μήκος της.



Διάγραμμα φορτίου ανά σημείο της δοκού (άξονας x)

Διάγραμμα παραμόρφωσης ανά σημείο της δοκού (άξονας x)



Κεφάλαιο 4

Μελέτη διαξονικού συστήματος στήριξης Φ/Β πάνελ - ΜΟΝΤΕΛΟ Β



Χαρακτηριστικά μοντέλου Β

Πρόκειται για ένα διαξονικό τράκερ παρόμοιων ιδιοτήτων και αναλογιών με το μοντέλο Α. Κατασκευάστηκε και εγκαταστάθηκε στην ορεινή περιοχή του Ρεθύμνου στις αρχές του 2011 και αποτελεί κομμάτι μιας επένδυσης που πήρε μέρος σε διάφορα σημεία της περιοχής. Με την επένδυση αυτή ο ιδιώτης σκοπεύει να εκμεταλλευτεί την ηλιοφάνεια της Κρήτης και να προσφέρει μια εναλλακτικής μορφής ενέργεια, συμβάλλοντας παράλληλα στην προστασία του περιβάλλοντος.



Η κατασκευή έχει μέγιστο μήκος 42 μέτρα, ακτίνα 19 μέτρα και μέγιστο ύψος 2,25 μέτρα. Έχει δυνατότητα τοποθέτησης 402 πάνελ διαστάσεων 1,68 x 1,00 m και βάρους 22kg, δηλαδή στηρίζει ένα φωτοβολταϊκό πάρκο ισχύος 80 kWp.

Με αυτή τη μέθοδο στήριξης εξασφαλίζεται:

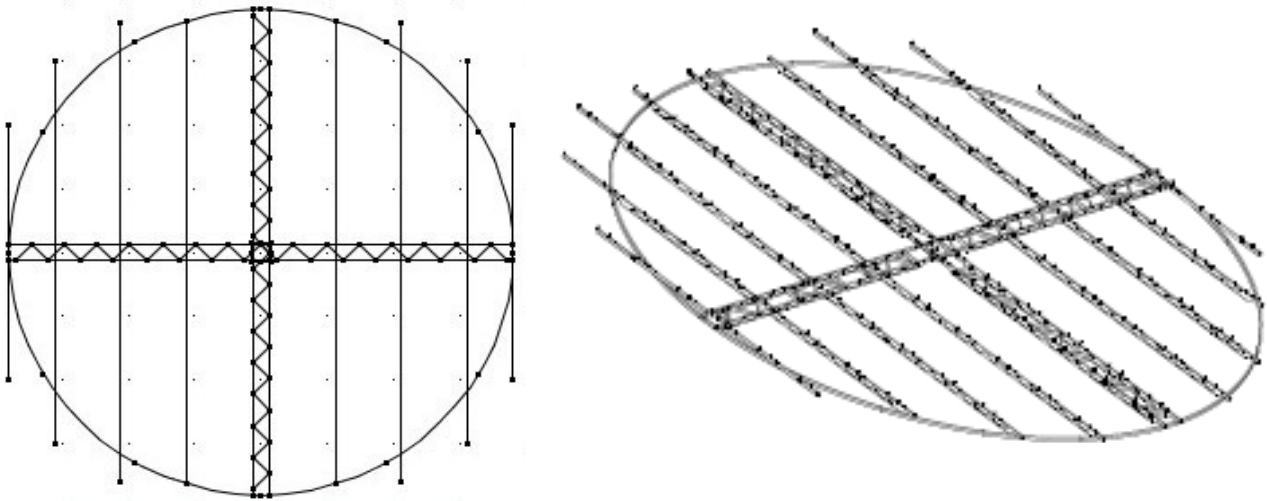
1. Οικονομικό όφελος καθώς προϋποθέτει πολύ χαμηλό κόστος αγοράς και εγκατάστασης.
2. Υψηλή αντοχή σε ανέμους υψηλής ταχύτητας.
3. Υψηλή και συνεχόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Βέλτιστη κάλυψη της διαθέσιμης επιφάνειας και άρα μεγάλη εξοικονόμηση γης για μελλοντική επέκταση ισχύος.
5. Υψηλή Στατική Επάρκεια εξαιτίας της ισχυρής θεμελίωσης σε πολλά σημεία.
6. Διατήρηση της αισθητικής του τοπίου εξαιτίας του χαμηλού του ύψους χωρίς να προσβάλλει το περιβάλλον.
7. Εύκολο καθαρισμό και συντήρηση διότι η συνολική κατασκευή δεν ξεπερνάει τα 2,25 m.
8. Κατανάλωση ελάχιστου ηλεκτρικού ρεύματος για την λειτουργία του.
9. Ελαχιστοποίηση της πιθανότητας άμεσου κεραυνικού πλήγματος λόγω του χαμηλού του ύψους και της αποτελεσματικής γείωσής του.
10. Εύκολη, γρήγορη τοποθέτηση και συντήρηση των Φ/Β πάνελ, χωρίς χρήση γερανού.



Σχεδιασμός

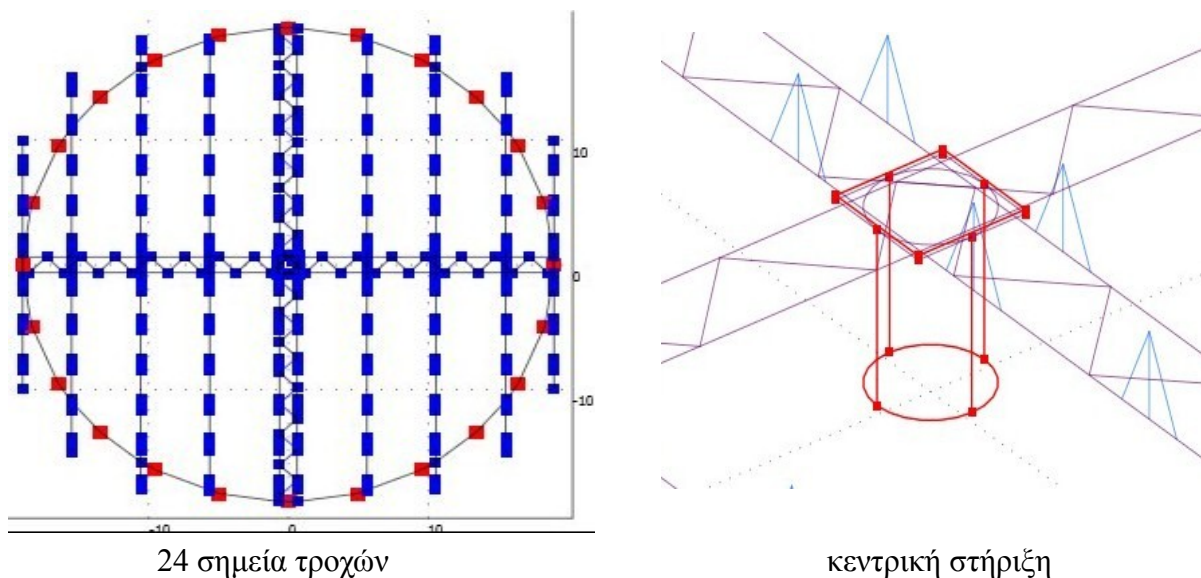
Για την σχεδίαση του μοντέλου θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό comsol multiphysics 3,4. Όμοια με το μοντέλο A, επιλέγεται η κατηγορία της τρισδιάστατης κατασκευής από δοκούς (**3D Euler Beam**). Στη συνέχεια γίνεται η σχεδίαση με τα εργαλεία του λογισμικού έχοντας υπόδειγμα τα μηχανολογικά σχέδια της κατασκευής που επισυνάπτονται στο παράρτημα. Περιληπτικά η σχεδίαση του μοντέλου B περιγράφεται χωρισμένη σε τέσσερα στάδια.

Αρχικά σχεδιάζεται η βάση του μοντέλου (Σχήμα 1). Η βάση σχεδιάζεται στο επίπεδο x-y και αποτελείται από μια κυκλική δοκό ακτίνας 19 μέτρων, έναν σταυρό στο κέντρο του κύκλου με οριζόντια δικτυώματα και 8 κάθετες δοκούς.



Σχήμα 1

Σε δεύτερη φάση εισάγονται 24 σημεία περιμετρικά του κύκλου που αποτελούν τα σημεία των 24 τροχών που στηρίζουν – περιστρέφουν την κατασκευή. Επίσης στο κέντρο του κύκλου σχεδιάζεται μια κυλινδρική στήριξη όπως φαίνεται στο σχήμα 2.

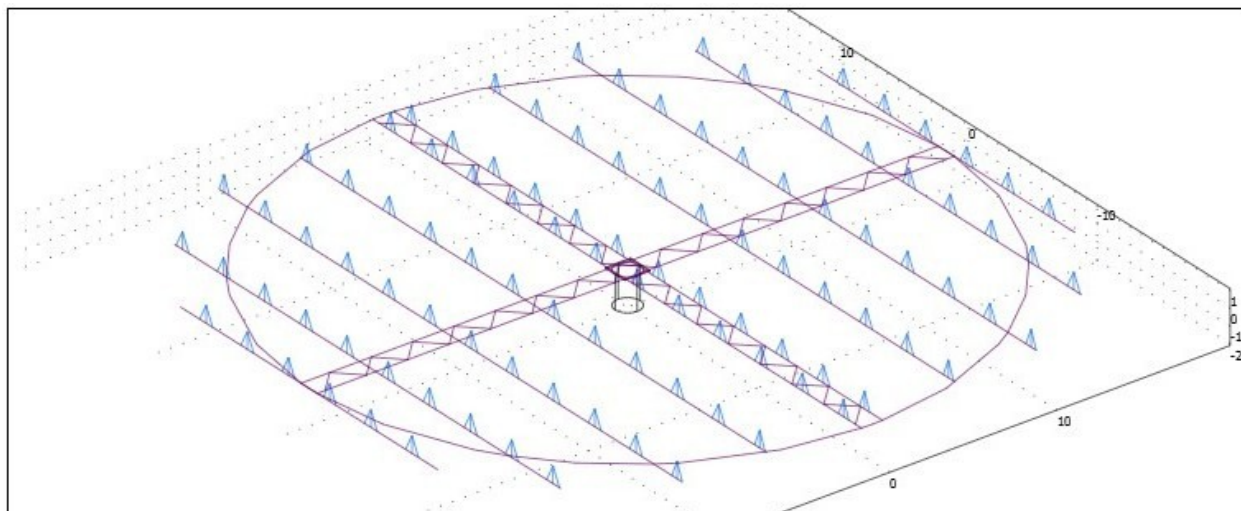


24 σημεία τροχών

κεντρική στήριξη

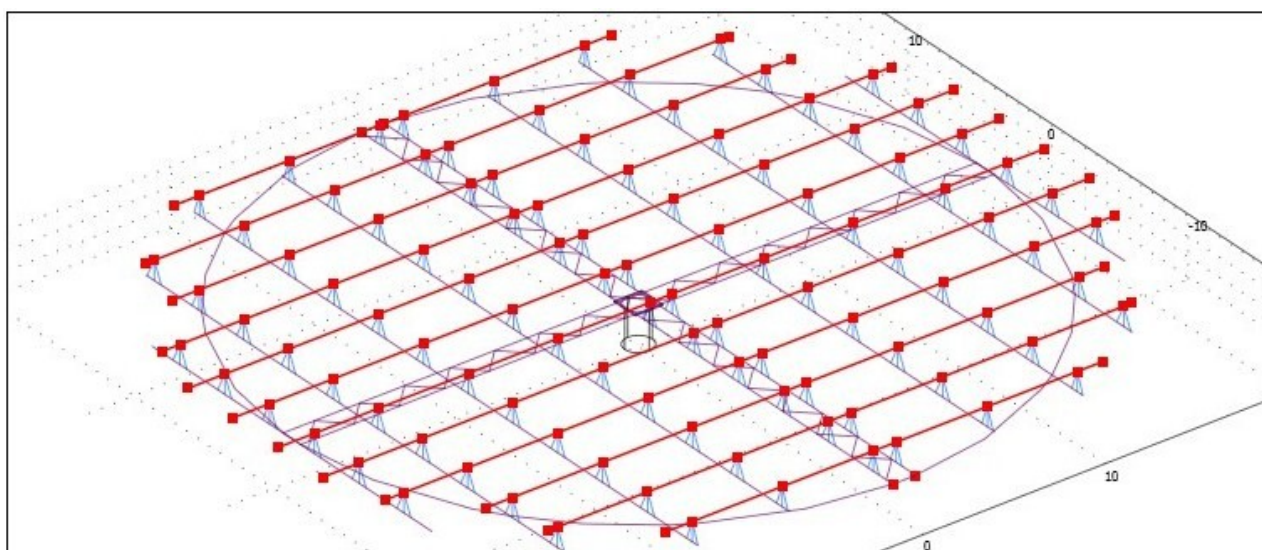
Σχήμα 2

Στη συνέχεια εισάγονται οι κάθετες στηρίξεις των Φ/Β πάνελ. Για να γίνει αυτό θα σχεδιαστούν οι στηρίξεις στο κάθετο επίπεδο y-z. Αφού σχεδιαστούν οι απλής μορφής στηρίξεις θα προστεθούν στο μέχρι τώρα σχέδιο του μοντέλου. Οι κάθετες στηρίξεις φαίνονται στο σχήμα 3 με γαλάζιο χρώμα.



Σχήμα 3

Τέλος, πάνω στις στηρίξεις θα εισαχθούν δοκοί παράλληλοι με το οριζόντιο επίπεδο. Πάνω σε αυτούς τους δοκούς θα εγκατασταθούν στην πραγματικότητα τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Σε αυτή τη προσομοίωση στη θέση των πάνελ θα εισαχθούν αντίστοιχα φορτία. Μετά την εισαγωγή των δοκών (κόκκινο χρώμα) το μοντέλο B θα έχει την παρακάτω μορφή.



Σχήμα 4

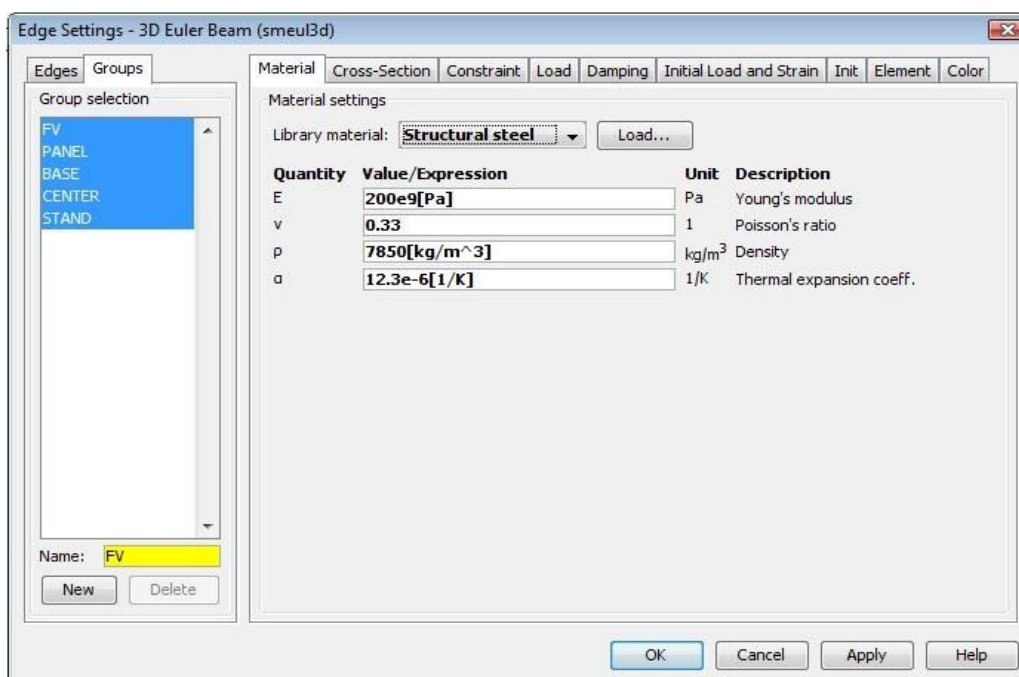
Κατά την σχεδίαση ομαδοποιήθηκαν τα στοιχεία της κατασκευής ανάλογα με την ιδιότητά τους. Οι δοκοί που εισήχθησαν τελευταία για παράδειγμα, που αποτελούν τις δοκούς στήριξης των Φ/Β πάνελ, ονομάστηκαν “FV”. Οι δοκοί που αποτελούν τις κάθετες στηρίξεις των “FV” ονομάστηκαν “STANDS”, τα σημεία των τροχών “WHEELS”, η κεντρική στήριξη “CENTER” και η υπόλοιπη βάση που σχεδιάστηκε στο πρώτο στάδιο ονομάστηκε “BASE”. Η διαδικασία αυτή θα βοηθήσει κατά την εισαγωγή παραμέτρων και τεχνικών χαρακτηριστικών στα δεδομένα του λογισμικού.

Παράμετροι και τεχνικά χαρακτηριστικά δοκών

Όπως το μοντέλο Α που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έτσι και το μοντέλο Β είναι κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από χάλυβα γαλβανισμένο εν θερμώ. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του χάλυβα είναι:

- Συντελεστής ελαστικότητας $E = 200 \cdot 10^9 \text{ Pa}$
- Λόγος Poisson $\nu = 0,33$
- Πυκνότητα $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
- Συντελεστής θερμικής διαστολής $\alpha = 12,3 \text{ ανά } 10^6 \text{ Kelvin}$

Τα δεδομένα του υλικού εισάγονται στο comsol multiphysics για όλη τη βάση στήριξης (όχι για τα Φ/Β πάνελ). Για να γίνει αυτό επιλέγονται όλες οι ομάδες που σχεδιάστηκαν προηγουμένως και στις ρυθμίσεις υλικού καλείται από την βιβλιοθήκη του προγράμματος η κατηγορία **structural steel** (Σχήμα 1).



Σχήμα 1

Το υλικό των δοκών μπορεί να είναι το ίδιο, αυτό δεν ισχύει όμως και για τις διαστάσεις τους. Στην κατασκευή παρατηρούνται δύο μεγέθη χαλύβδινων δοκών. Η οριζόντια κυκλική βάση (“BASE”) μαζί με τα δικτυώματά της στο οριζόντιο επίπεδο (κεντρικός σταυρός) είναι κατασκευασμένα από δοκούς τύπου HEA 400, δηλαδή πάχους 400 χιλιοστών. Οι κάθετες στο οριζόντιο επίπεδο δοκοί στήριξης (“STANDS”), καθώς και οι παράλληλοι δοκοί που στηρίζουν τα Φ/Β πάνελ (“FV”) είναι λεπτότερες, HEA 100. Τα χαρακτηριστικά των δοκών εισάγονται απλά χάρη στη βιβλιοθήκη τύπων δοκών του comsol multiphysics όπως φαίνεται στα σχήματα 2 και 3. Το λογισμικό καταχωρεί στα δεδομένα του όχι μόνο τις διαστάσεις των δοκών, αλλά και το εμβαδόν διατομής, το βάρος ανά μέτρο και την ροπή αδράνειας ως προς κάθε άξονα. Τα χαρακτηριστικά δοκών τύπου HEA επισυνάπτονται στο παράρτημα.

Edge Settings - 3D Euler Beam (smeul3d)

Edges Groups

Group selection

FV
BASE
STAND
CENTER

Name: BASE

New Delete

Material Cross-Section Constraint Load Damping Initial Load and Strain Init Element Color

Cross-section settings

Library cross-section: HEA 400 Load...

Quantity	Value/Expression	Unit	Description
A	$159.0 \cdot 10^{-4} [m^2]$	m^2	Cross-section area
I_{yy}	$45070.0 \cdot 10^{-8} [m^4]$	m^4	Area moment of inertia about local y-axis
I_{zz}	$8560.0 \cdot 10^{-8} [m^4]$	m^4	Area moment of inertia about local z-axis
J	$1.8976e-006 [m^4]$	m^4	Torsional constant
heighty	$300 \cdot 10^{-3} [m]$	m	Total section height in y dir.
heightz	$390 \cdot 10^{-3} [m]$	m	Total section height in z dir.
localxp	1	m	x-coordinate for point defining local xy-plane
localyp	1	m	y-coordinate for point defining local xy-plane
localzp	0	m	z-coordinate for point defining local xy-plane

OK Cancel Apply Help

Σχήμα 2

Edge Settings - 3D Euler Beam (smeul3d)

Edges Groups

Group selection

FV
BASE
STAND
CENTER

Name: FV

New Delete

Material Cross-Section Constraint Load Damping Initial Load and Strain Init Element Color

Cross-section settings

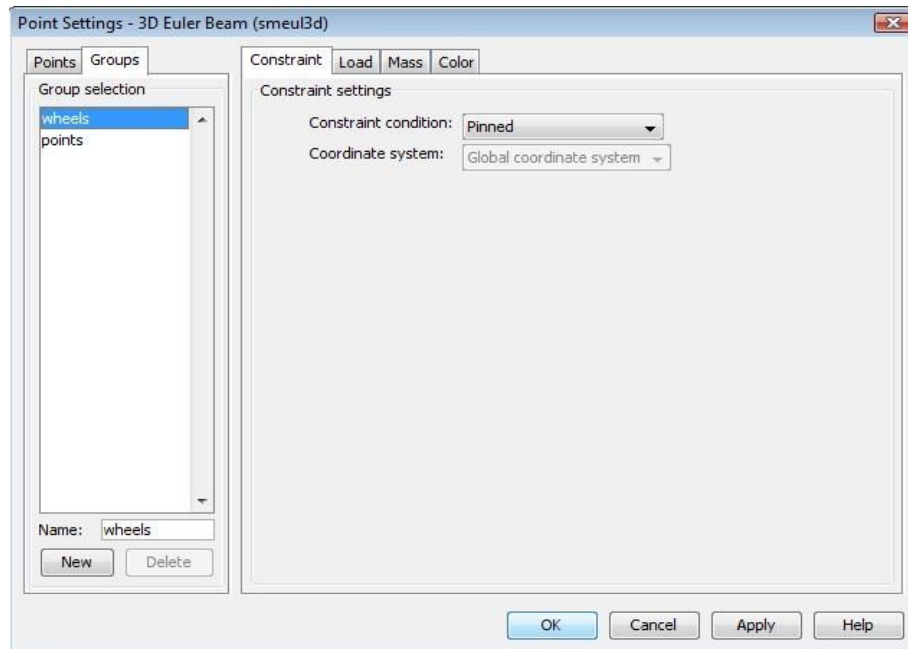
Library cross-section: HEA 100 Load...

Quantity	Value/Expression	Unit	Description
A	$21.2 \cdot 10^{-4} [m^2]$	m^2	Cross-section area
I_{yy}	$349.0 \cdot 10^{-8} [m^4]$	m^4	Area moment of inertia about local y-axis
I_{zz}	$134.0 \cdot 10^{-8} [m^4]$	m^4	Area moment of inertia about local z-axis
J	$5.2647e-008 [m^4]$	m^4	Torsional constant
heighty	$100 \cdot 10^{-3} [m]$	m	Total section height in y dir.
heightz	$96 \cdot 10^{-3} [m]$	m	Total section height in z dir.
localxp	1	m	x-coordinate for point defining local xy-plane
localyp	1	m	y-coordinate for point defining local xy-plane
localzp	0	m	z-coordinate for point defining local xy-plane

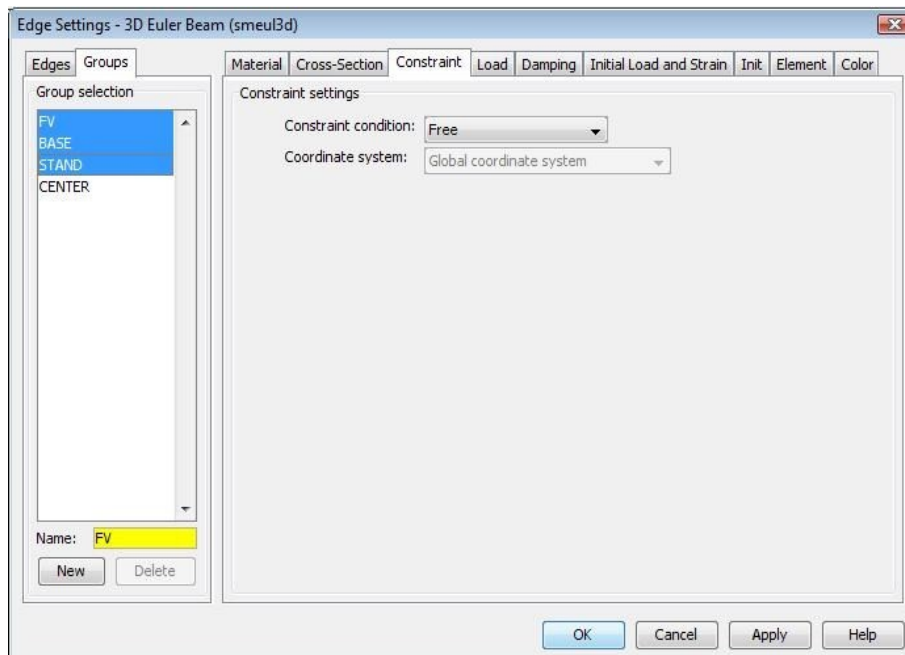
OK Cancel Apply Help

Σχήμα 3

Στη συνέχεια ορίζονται οι περιοχές του μοντέλου που έρχονται σε επαφή με το έδαφος και κατά συνέπεια δεν θα παρουσιάσουν κάποια μετατόπιση στο χώρο, όπως και οι ελεύθερες περιοχές οι οποίες θα υποστούν κάποια παραμόρφωση. Βάση της ομαδοποίησης που έγινε κατά την σχεδίαση του μοντέλου A, στα σημεία όπου υπάρχουν οι 24 ρόδες στήριξης περιμετρικά, καθώς και στο στερεό που στηρίζει το κέντρο της κυκλικής βάσης δίνεται η εντολή **pinned** (Σχήμα 4). Οι στηρίξεις έτσι μένουν σταθερές κατά την προσομοίωση της στατικής παραμόρφωσης που θα ακολουθήσει. Στα υπόλοιπα τμήματα της κατασκευής οι δοκοί επιλέγονται ελεύθεροι (**free**) σε κάθε είδους παραμόρφωση (Σχήμα 5).



Σχήμα 4



Σχήμα 5

Φορτίσεις

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, οι φορτίσεις που θα ληφθούν υπόψη για τη μελέτη του συστήματος στήριξης, εκτός των δυνάμεων λόγω βάρους των δοκών, είναι τέσσερις.

1. βάρος φωτοβολταϊκών πάνελ
2. φόρτιση λόγω χιονιού – πάγου στα πάνελ
3. φόρτιση λόγω ανέμου, με υπόθεση κλίσης 30 μοίρες
4. αδρανειακή δύναμη λόγω φρεναρίσματος.

Γνωρίζοντας πως οι διαστάσεις κάθε πάνελ (1,00 x 1,50 μέτρα) και το βάρος τους (22 kg) είναι ίδια με τα πάνελ του μοντέλου Α, είναι ίδια και η δύναμη που ασκείται στη βάση λόγω αυτών. Επίσης θεωρώντας ίδιες συνθήκες με αυτές του μοντέλου Α, δηλαδή ίδιο βάρος χιονιού στα πάνελ, ίδια ταχύτητα ανέμων και ίδια ταχύτητα περιστροφής συνεπάγεται πως οι φορτίσεις που ασκούνται στα δύο μοντέλα είναι ίσες.

Οι δυνάμεις που καταπονούν το μοντέλο Β στα σημεία που στηρίζονται τα Φ/Β πάνελ θα μελετηθούν και πάλι στις παρακάτω δύο περιπτώσεις:

A) Περίπτωση μέγιστης φόρτισης – αντίξοες καιρικές συνθήκες.

Σε αυτήν την περίπτωση θα ληφθούν υπόψη τα χειρότερα πιθανά σενάρια καταπόνησης του μοντέλου, με συνολική και μέγιστη φόρτιση λόγω βάρους, χιονιού, ισχυρών ανέμων και φρεναρίσματος. Δηλαδή:

Κατά μήκος του άξονα z: $\sum F = 212,82 + 196,2 + 146,14 = 555,16 \text{ N}$ ανά μέτρο (ανά πάνελ)

Κατά μήκος του οριζοντίου επιπέδου: $\sum F = 84,375 + 17,094 = 101,469 \text{ N}$ ανά μέτρο (ανά πάνελ)

B) Περίπτωση ελάχιστης φόρτισης – φυσιολογικές καιρικές συνθήκες.

Οι δυνάμεις που καταπονούν τα φωτοβολταϊκά πάνελ σε αυτή τη περίπτωση είναι η δύναμη λόγω βάρους των Φ/Β πάνελ και η δύναμη λόγω ανέμου ταχύτητας 4 m/s. Όπως υπολογίσθηκαν στο κεφάλαιο 3:

κατά μήκος του άξονα z: $\sum F = 212,82 \text{ N} + 13 \text{ N} = 225,82 \text{ N}$ ανά μέτρο

ενώ κατά μήκος του οριζοντίου επιπέδου: $\sum F = 7,5 \text{ N}$ ανά μέτρο

Όπως έγινε για το μοντέλο Α, έτσι και για το μοντέλο Β θα γίνει μελέτη και για τις δύο αυτές περιπτώσεις.

Η εισαγωγή των φορτίων στα δεδομένα του λογισμικού φαίνεται στα παρακάτω σχήματα με τα πρόσημα να δείχνουν την κατεύθυνση των δυνάμεων στον άξονα.

A) Περίπτωση μέγιστης φόρτισης – αντίξοες καιρικές συνθήκες.

Quantity	Value/Expression	Unit	Description
F_x	0	N/m	Edge load (force/length) x-dir.
F_y	101.469	N/m	Edge load (force/length) y-dir.
F_z	-555.16	N/m	Edge load (force/length) z-dir.
M_x	0	(N·m)/m	Edge load (moment/length) x-dir.
M_y	0	(N·m)/m	Edge load (moment/length) y-dir.
M_z	0	(N·m)/m	Edge load (moment/length) z-dir.

Field	Value	Unit	Description
Temp	0	K	Strain temperature
Tempref	0	K	Strain ref. temperature
dTy	0	K	Temp. diff. across beam y dir.
dTz	0	K	Temp. diff. across beam z dir.

Σχήμα 1

B) Περίπτωση ελάχιστης φόρτισης – φυσιολογικές καιρικές συνθήκες.

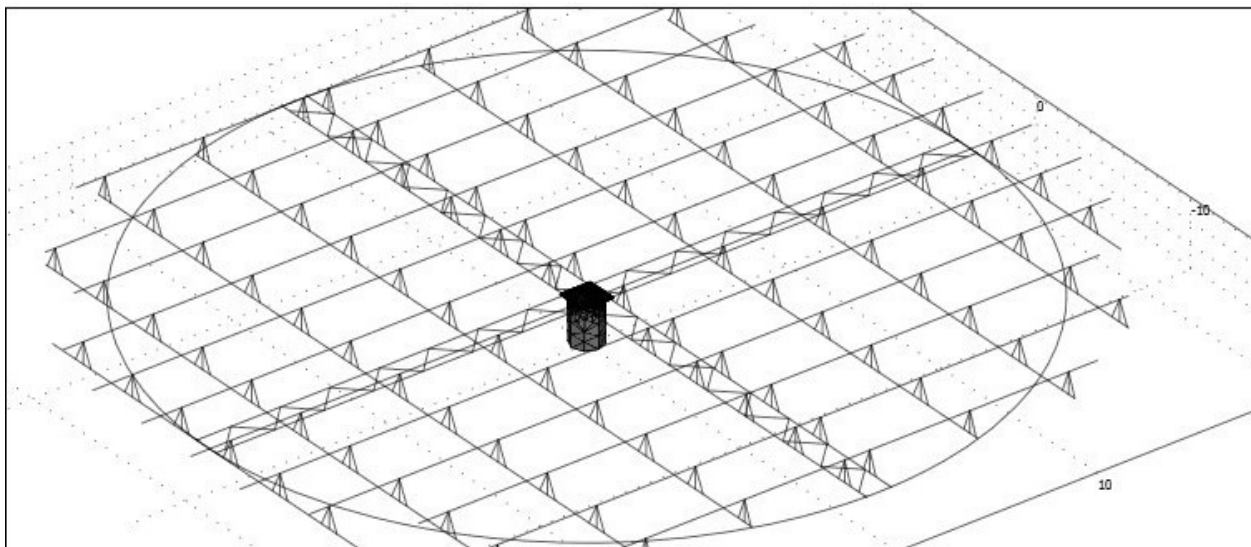
Quantity	Value/Expression	Unit	Description
F_x	0	N/m	Edge load (force/length) x-dir.
F_y	7.5	N/m	Edge load (force/length) y-dir.
F_z	-225.82	N/m	Edge load (force/length) z-dir.
M_x	0	(N·m)/m	Edge load (moment/length) x-dir.
M_y	0	(N·m)/m	Edge load (moment/length) y-dir.
M_z	0	(N·m)/m	Edge load (moment/length) z-dir.

Field	Value	Unit	Description
Temp	0	K	Strain temperature
Tempref	0	K	Strain ref. temperature
dTy	0	K	Temp. diff. across beam y dir.
dTz	0	K	Temp. diff. across beam z dir.

Σχήμα 2

Προσομοίωση – επίλυση μοντέλου B

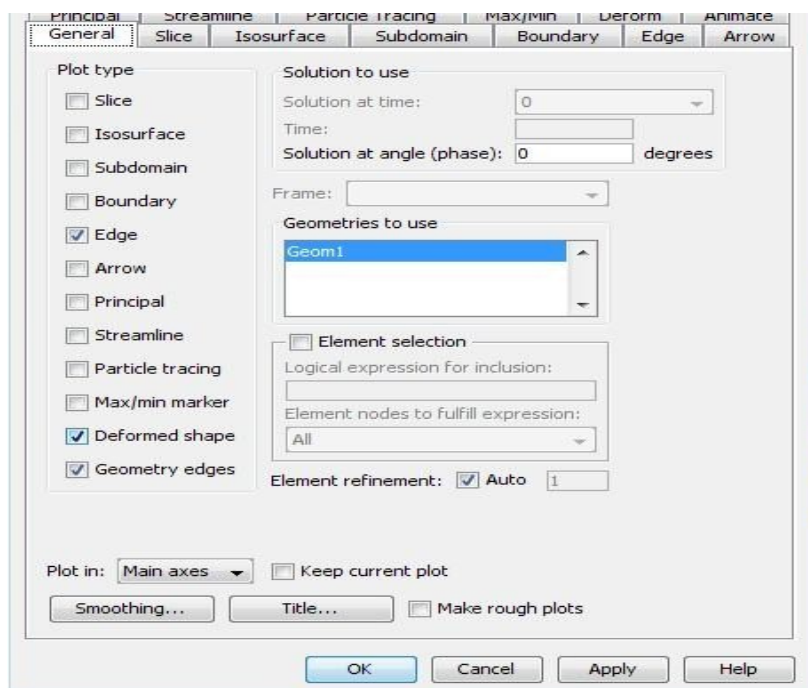
Το μοντέλο είναι ολοκληρωμένο και έτοιμο για επίλυση. Πρώτο βήμα είναι η διακριτοποίηση του συστήματος στήριξης χρησιμοποιώντας την εντολή **Mesh**. (Σχήμα 1)



Σχήμα 1

Στη συνέχεια πρέπει να αποφασιστεί τι πληροφορίες είναι επιθυμητό να επιστρέφει το πρόγραμμα κατά την επίλυση. Για έλεγχο λειτουργικότητας και αντοχής της κατασκευής θα ληφθούν υπόψιν οι τιμές παραμόρφωσής της, καθώς και οι δυνάμεις που την καταπονούν. Για τον λόγο αυτόν επιλέγεται από τις ρυθμίσεις επίλυσης του λογισμικού και συγκεκριμένα:

Postprocessing → **Plot Parameters** → **General** η εντολή **Deformed shape** (Σχήμα 2). Η ρύθμιση αυτή επιτρέπει να παρατηρηθεί από τον χρήστη πως θα παραμορφωθεί το μοντέλο στο τρισδιάστατο επίπεδο.

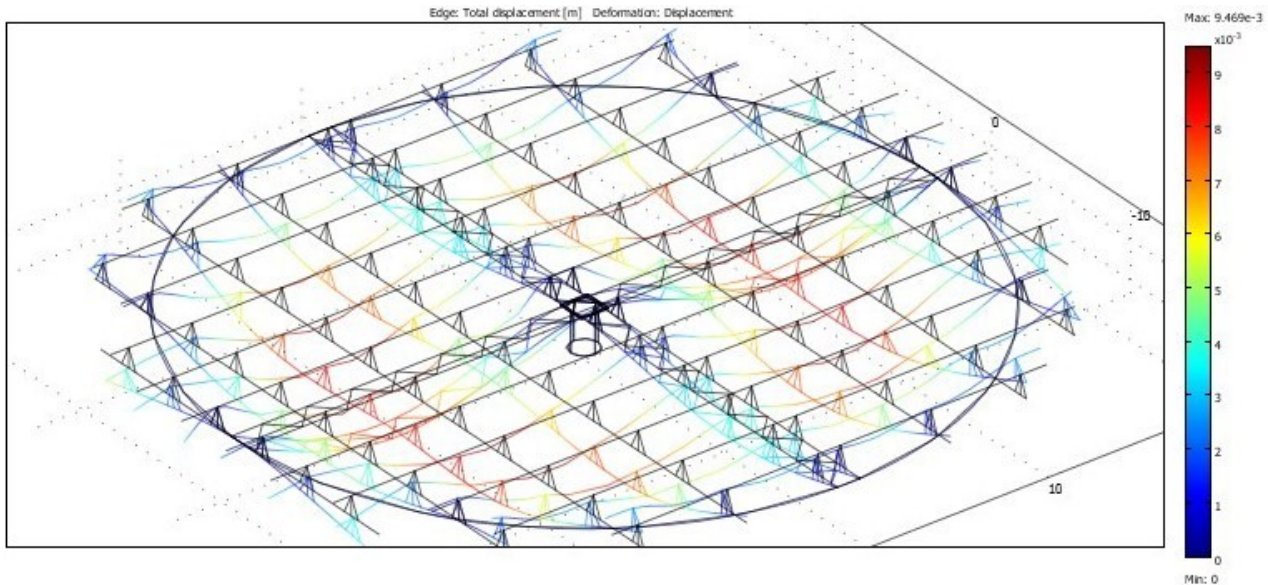


Σχήμα 2

Στη συνέχεια το μοντέλο B θα λυθεί για διαφορετικές περιπτώσεις ασκούμενου φορτίου.

➤ **Περίπτωση μέγιστης φόρτισης (αντίξοες καιρικές συνθήκες)**

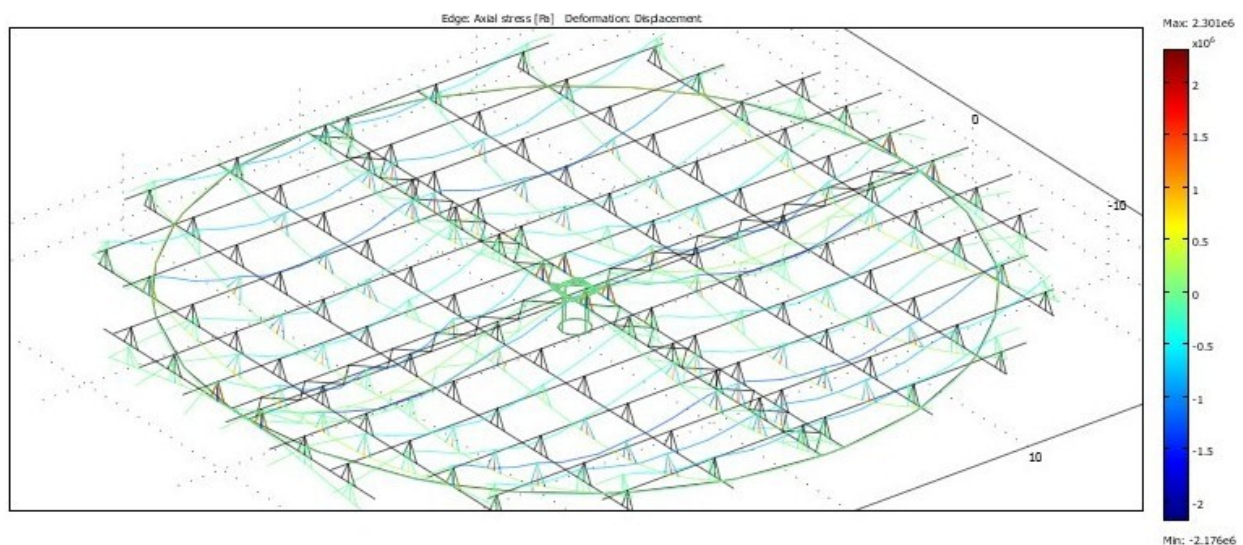
Για τη επίλυση χρησιμοποιείται η εντολή **Solve**. Οι μέγιστες τιμές παραμόρφωσης σε μέτρα, καθώς και πώς παραμορφώνεται το μοντέλο B στο τρισδιάστατο χώρο απεικονίζεται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3 – Παραμόρφωση (m)

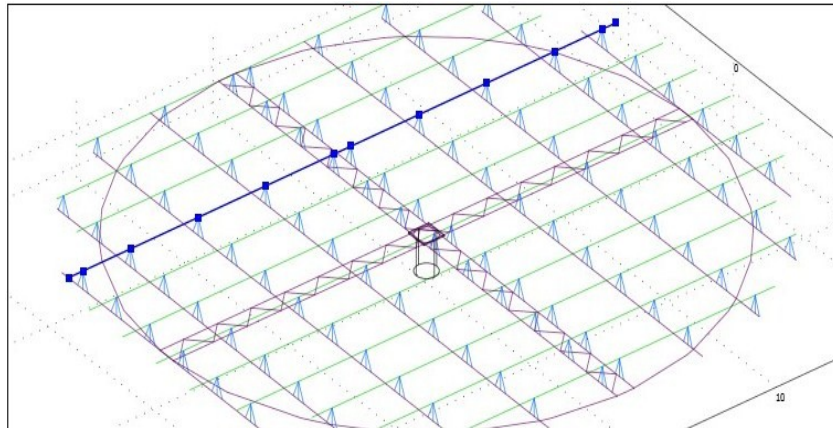
Η μπάρα στα δεξιά του σχήματος 3 δείχνει τις τιμές συνολικής παραμόρφωσης σε μέτρα. Η μέγιστη παραμόρφωση του συστήματος στήριξης είναι περίπου 9,5mm και παρατηρείται στα σημεία με έντονο κόκκινο χρώμα. Σε κάποια σημεία που εμφανίζονται με κίτρινο χρώμα η παραμόρφωση είναι περίπου 6mm, ενώ σε σημεία με γαλάζιο χρώμα ακόμα μικρότερη, 2mm. Αξίζει να σημειωθεί πως περιμετρικά στη βάση, δηλαδή εκεί που βρίσκονται οι 24 ρόδες στήριξης και είναι κρίσιμο για την λειτουργία – κίνηση του συστήματος, παρουσιάζεται αμελητέα παραμόρφωση (δεν ξεπερνά τα 1,5mm).

Μια άλλη χρήσιμη επίλυση είναι αυτή που υπολογίζει την πίεση στους άξονες (σχήμα 4). Η μέγιστη πίεση υπολογίστηκε $2,3 \times 10^6$ Pa και εμφανίζεται στις κάθετες στηρίξεις των Φ/Β πάνελ, ή για την ακρίβεια στην ομάδα “STANDS” που στηρίζει τις δοκούς που βρίσκονται τα πάνελ στο κατακόρυφο y-z επίπεδο.



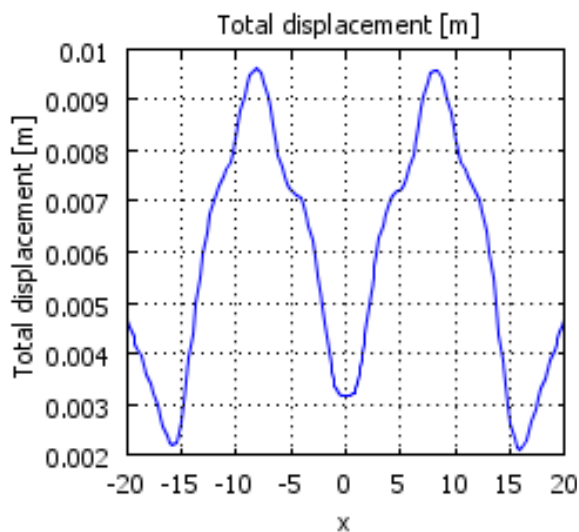
Σχήμα 4 – Πίεση (Pa)

Στη συνέχεια θα απομονωθεί για μελέτη μια δοκός όπως φαίνεται στο σχήμα 5. Επιλέχθηκε η αντίστοιχη δοκός με αυτή του μοντέλου Α που μελετήθηκε στο κεφάλαιο 3. Η δοκός αυτή που ανήκει στην ομάδα “FV” είναι άξια μελέτης διότι στηρίζει σε όλο της το μήκος Φ/Β πάνελ. Η μεγάλη παραμόρφωσή της δηλαδή θα σήμαινε κακή λειτουργία του συστήματος.



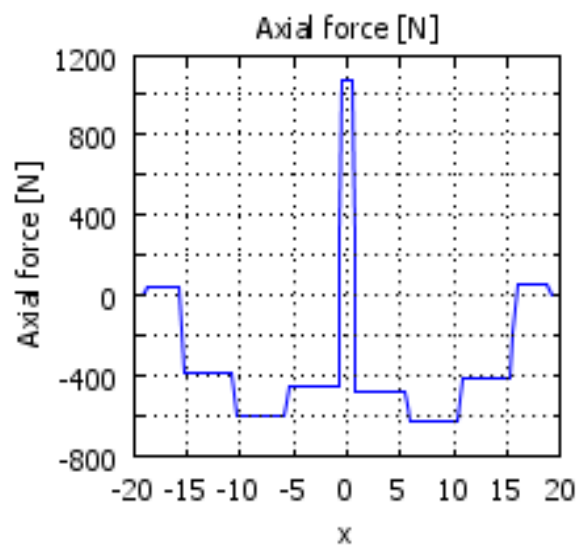
Σχήμα 5

Ρυθμίζοντας τις κατάλληλες παραμέτρους εξάγονται διάφορα διαγράμματα που δείχνουν την συμπεριφορά της δοκού σε κάθε της σημείο. Μερικά από αυτά τα διαγράμματα είναι της παραμόρφωσης που παρουσιάζεται και της δύναμης που την ασκείται κατά μήκος της δοκού.



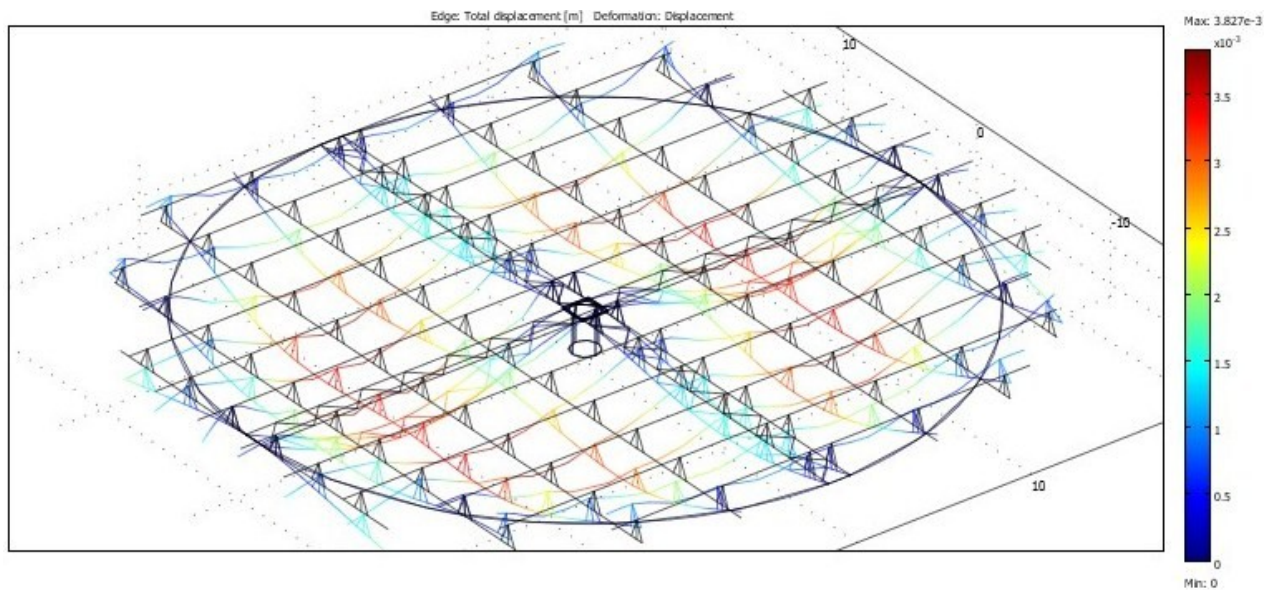
Διάγραμμα φορτίου ανά σημείο της δοκού (άξονας χ)

Διάγραμμα παραμόρφωσης ανά σημείο της δοκού (άξονας χ)



➤ **Περίπτωση ελάχιστης φόρτισης (φυσιολογικές καιρικές συνθήκες)**

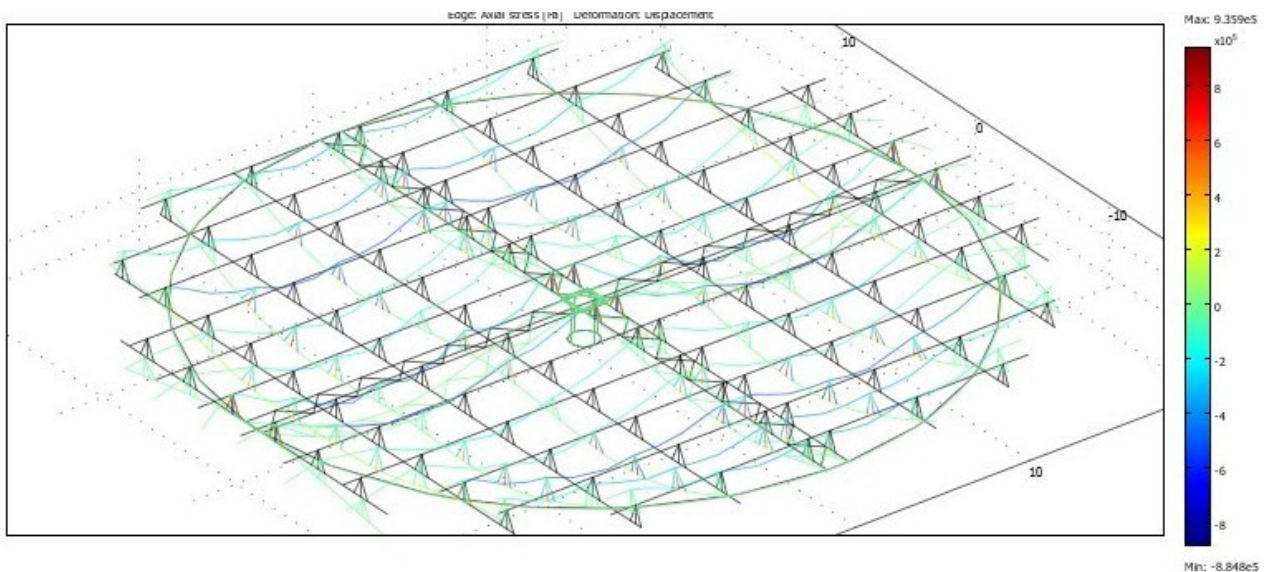
Για τις συγκεκριμένες τιμές φορτίου, η επίλυση θα δώσει τα παρακάτω αποτελέσματα παραμόρφωσης.



Σχήμα 6

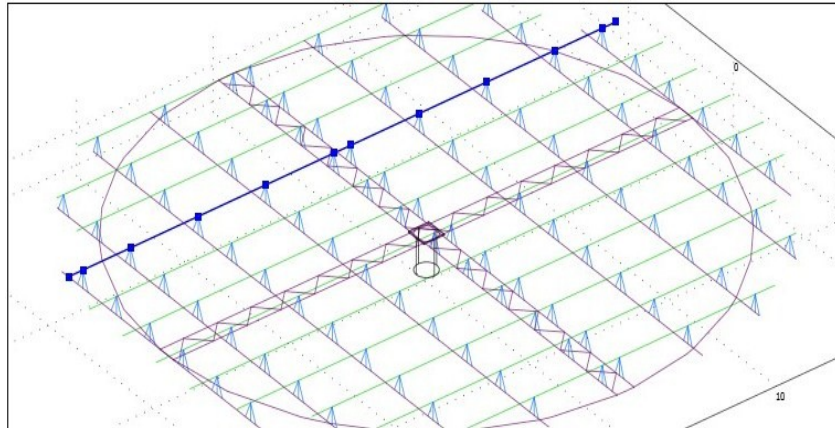
Από το σχήμα 6 εύκολα παρατηρείται πως η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στα ίδια σημεία με την προηγούμενη περίπτωση (μέγιστου φορτίου). Αυτό είναι απολύτως λογικό καθώς το μόνο που άλλαξε είναι οι τιμές των φορτίων και όχι τα σημεία που ασκούνται. Στη μπάρα δεξιά του σχήματος εμφανίζεται η τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης που είναι 3,827 mm. Η τιμή αυτή είναι κατά 60% μικρότερη από την τιμή που υπολογίσθηκε στην περίπτωση μέγιστου φορτίου (9,5mm). Η ελάχιστη παραμόρφωση δείχνει τη στιβαρότητα και τη καλή ποιότητα της κατασκευής.

Η προσομοίωση της ασκούμενης πίεσης στους άξονες φαίνεται στο σχήμα 7. Η μείωση του φορτίου έχει ως αποτέλεσμα την μικρότερη τιμή πίεσης. Η μέγιστη πίεση που παρατηρείται τώρα στο σύστημα είναι $9,359 \times 10^5 Pa$ σε αντίθεση με τα $2,3 \times 10^6 Pa$ που υπολογίσθηκαν στην περίπτωση αντίξων καιρικών συνθηκών.



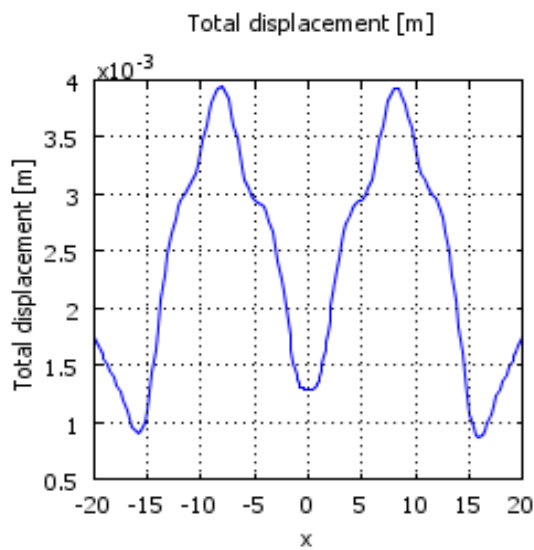
Σχήμα 7

Ακολουθώντας τα βήματα της προηγούμενης περίπτωσης, έτσι κι εδώ επιλέγεται για παρατήρηση η δοκός που φαίνεται στο σχήμα 8. Είναι η παράλληλη στο οριζόντιο επίπεδο δοκός που στηρίζει φωτοβολταϊκά πάνελ.



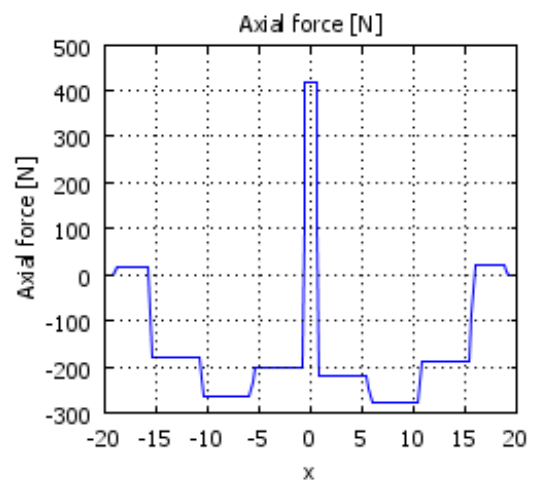
Σχήμα 8

Για άλλη μια φορά εξάγονται διαγράμματα χρήσιμα για την λειτουργία της συγκεκριμένης δοκού. Τα διαγράμματα δείχνουν την παραμόρφωση και το φορτίο, αντίστοιχα, σε όλο το μήκος της.



Διάγραμμα φορτίου ανά σημείο της δοκού (άξονας χ)

Διάγραμμα παραμόρφωσης ανά σημείο της δοκού (άξονας χ)



Κεφάλαιο 5

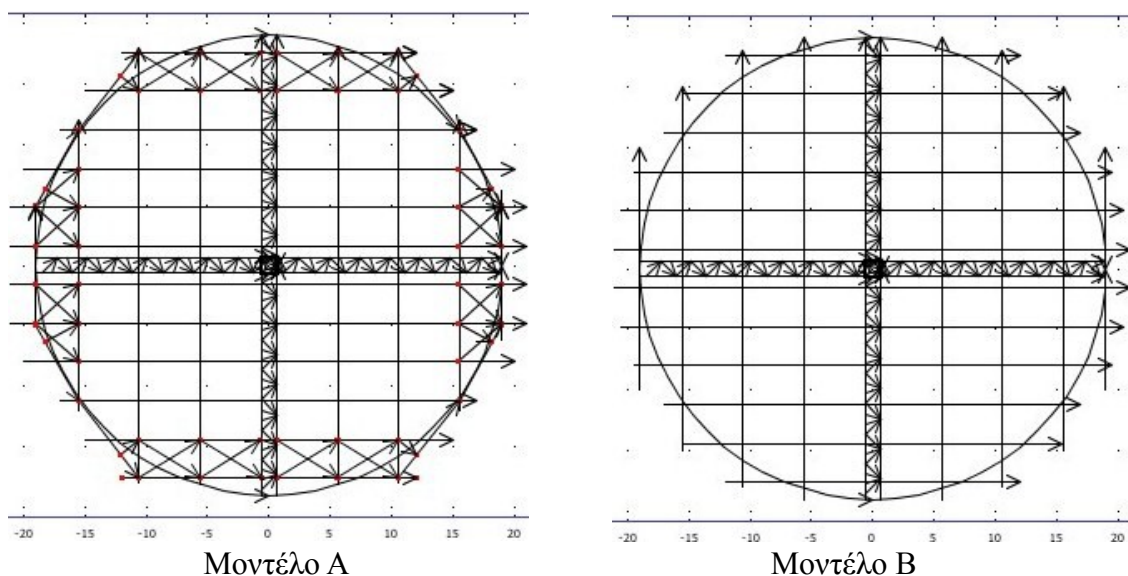
Σύγκριση μοντέλων A και B – Αποτελέσματα.

Κατασκευαστικές διαφορές μοντέλων A και B.

Όπως φαίνεται στα προηγούμενα κεφάλαια τα δύο μοντέλα στήριξης φωτοβολταϊκών είναι παρόμοια. Απόδειξη αποτελούν οι διαστάσεις και τα υλικά των κατασκευών. Οι διαφορές όμως των δύο μοντέλων είναι αυτές που οδήγησαν σε διαφορετικά αποτελέσματα κατά την προσομοίωση τους. Για να γίνει αυτό κατανοητό θα επισημανθούν αρχικά οι διαφορές των μοντέλων A και B. Στην ουσία οι διαφορές εντοπίζονται σε τρία σημεία.

A) Οριζόντιο δικτύωμα περιμετρικά του κύκλου.

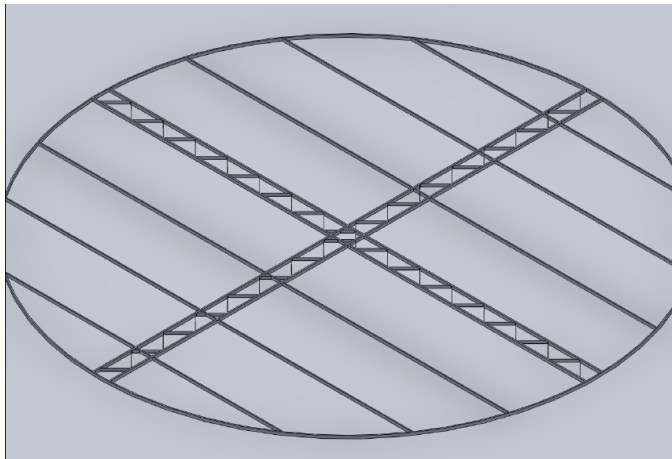
Στο μοντέλο A παρατηρείται ένα επιπλέον οριζόντιο δικτύωμα, σε σχέση με το μοντέλο B, στις δοκούς που βρίσκονται κοντά στη περιφέρεια του κύκλου (σχήμα 1). Ο κατασκευαστής του πρώτου μοντέλου, φοβούμενος την παραμόρφωση στα περιμετρικά σημεία του κύκλου θέλησε να ενισχύσει την κατασκευή εισάγοντας περισσότερες δοκούς. Σε αυτήν την απόφαση έπαιξαν ρόλο η μεγάλη ακτίνα του κύκλου (19 μέτρα) καθώς και η σημαντικότητα αντοχής της περιμέτρου του. Υπενθυμίζεται πως στη περίμετρο υπάρχουν ρόδες που κυλώντας σε μια κυκλική ράγα περιστρέφουν το σύστημα.



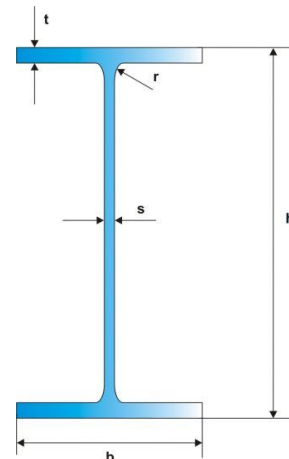
Σχήμα 1

B) Πάχος δοκών

Κύρια διαφορά των δύο μοντέλων αποτελεί το μέγεθος των δοκών. Αν και το υλικό κατασκευής τους είναι ίδιο, ο κατασκευαστής του μοντέλου B έχει χρησιμοποιήσει παχύτερες δοκούς στο μεγαλύτερο μέρος της κατασκευής. Συγκεκριμένα, η κυκλική σιδερένια βάση με το σταυρό στο κέντρο και τις κάθετες δοκούς που φαίνεται στο σχήμα 2 αποτελείται από δοκούς πάχους 200 mm για το μοντέλο A και 400 mm για το μοντέλο B. Τα στοιχεία των δοκών παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα.

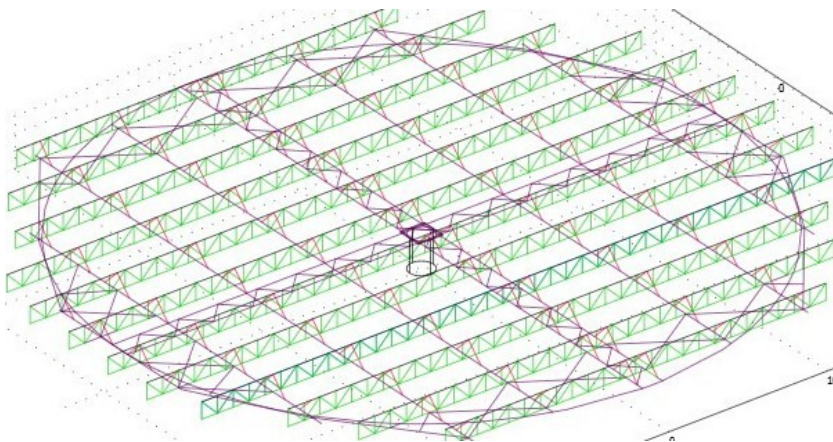


Σχήμα 2



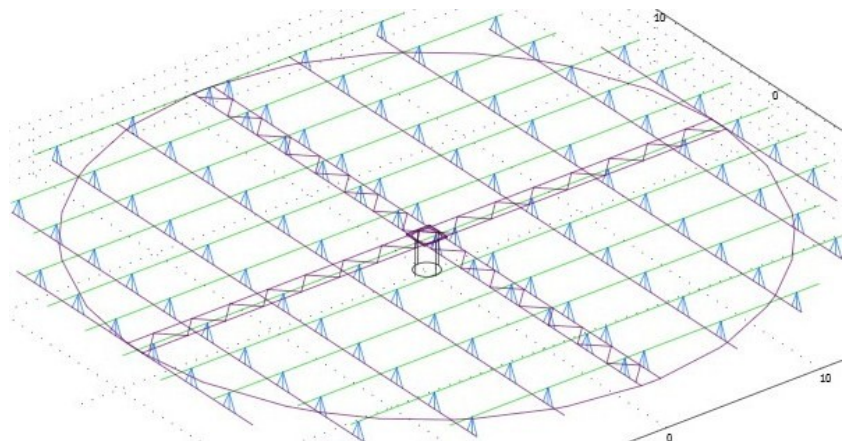
Γ) Στήριξη στο κάθετο επίπεδο

Η μικρή παραμόρφωση των δοκών που στηρίζουν τα Φ/Β πάνελ είναι σημαντική για τη λειτουργία του συστήματος, καθώς αποτελούν και άξονα περιστροφής τους. Είναι οι δοκοί που δέχονται όλες τις φορτίσεις από τα πάνελ, όπως αυτές αναλύθηκαν στα κεφάλαια 3 και 4. Η στήριξη των δοκών αυτών έχει γίνει με διαφορετικό τρόπο στα δύο μοντέλα (σχήμα 3). Στο μοντέλο Α έχει εισαχθεί ένα κάθετο δικτύωμα στο επίπεδο x-z (κατά μήκος των δοκών) από δοκούς HEA 100 [Παράρτημα], ενώ ίδιες δοκοί πλάγιας στήριξης υπάρχουν και στο y-z επίπεδο. Στο μοντέλο Β η στήριξη είναι πιο απλή με δοκούς HEA 100 στον άξονα z.



Μοντέλο Α

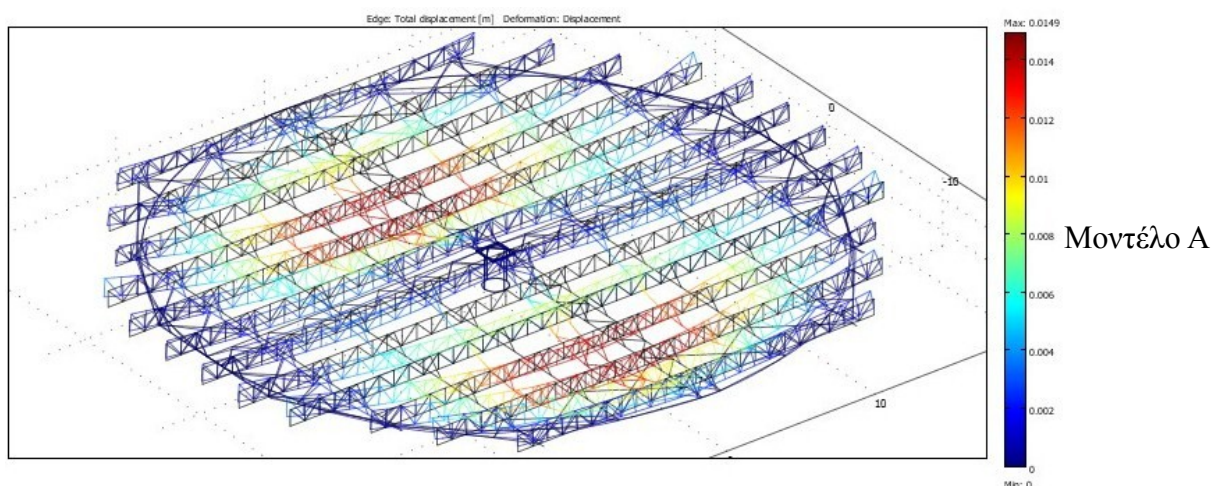
Μοντέλο Β



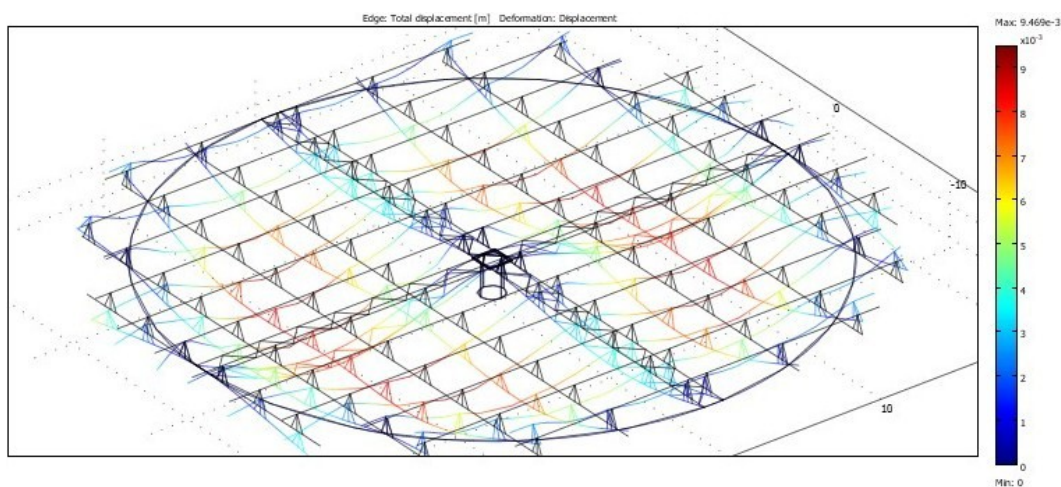
Σχέδιο 3

Σύγκριση μοντέλων A και B σε περίπτωση μέγιστου φορτίου (αντίξοες καιρικές συνθήκες)

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα επίλυσης των μοντέλων A και B, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στα κεφάλαια 3 και 4 αντίστοιχα, μπορούν να βγουν κάποια αρχικά συμπεράσματα. Εξετάζοντας τις παραμορφώσεις των συστημάτων συνολικά, παρατηρείται πως το μοντέλο B παρουσιάζει μέγιστη παραμόρφωση 9,5 mm μικρότερη από την αντίστοιχη 15 mm του μοντέλου A.



Μοντέλο B

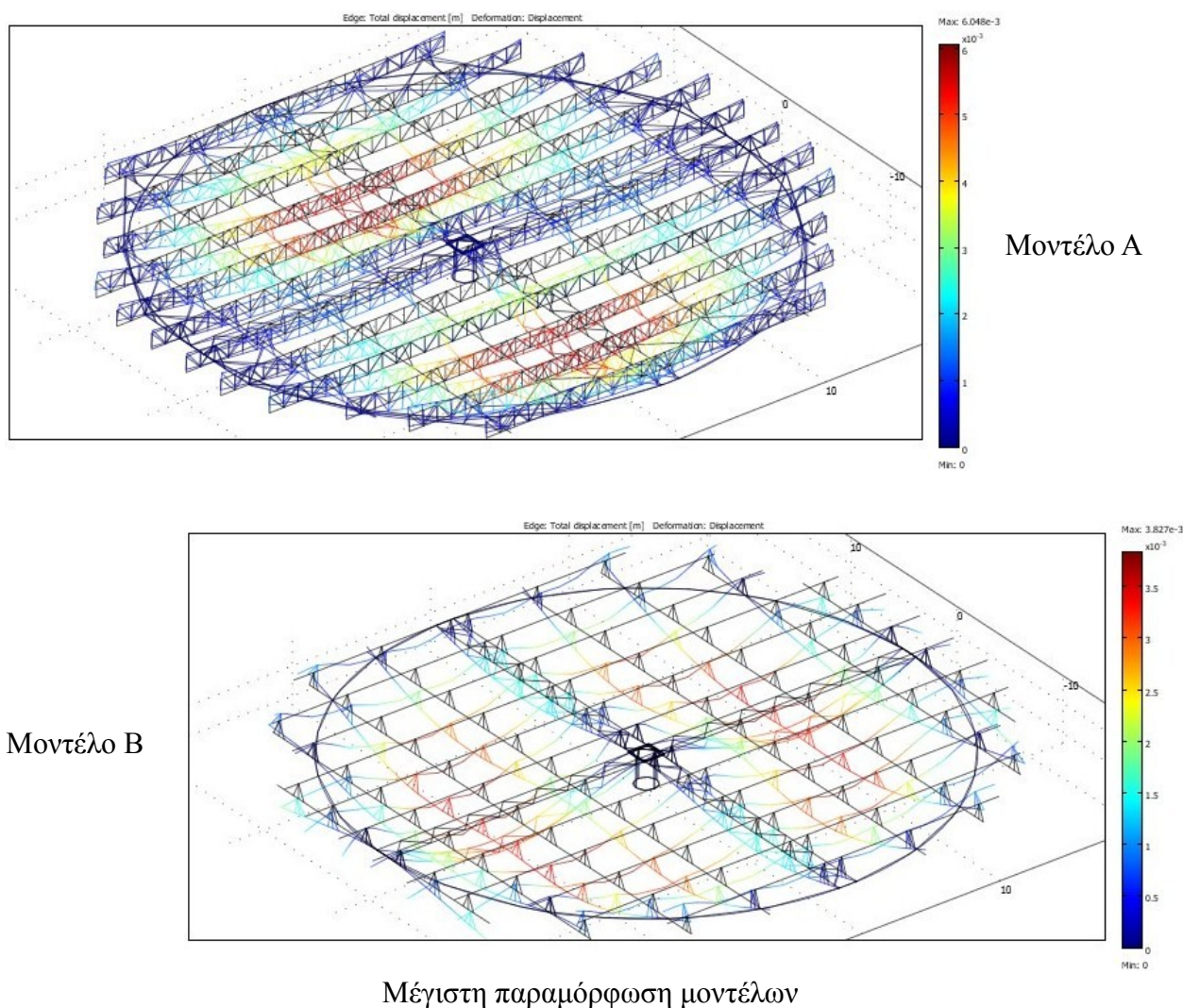


Μέγιστη παραμόρφωση μοντέλων

Η διαφορά αυτή οφείλεται κυρίως στο διαφορετικό μέγεθος δοκών των δύο μοντέλων. Η δοκός πλάτους 400 mm με την οποία είναι κατασκευασμένη η βάση του μοντέλου B έχει κάνει την κατασκευή πιο ανθεκτική στα φορτία που την καταπονούν. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί πως οι παραμορφώσεις αυτές είναι μικρές και εμφανίζονται σε σημεία που δεν είναι κρίσιμα για την περιστροφή του μοντέλου και κατ' επέκταση δεν επηρεάζουν τη σωστή λειτουργία τους.

Σύγκριση μοντέλων A και B σε περίπτωση ελάχιστου φορτίου (φυσιολογικές καιρικές συνθήκες)

Με όμοιο τρόπο συγκρίνονται τα αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης των δύο μοντέλων σε περίπτωση ελάχιστου φορτίου στα Φ/Β πάνελ. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του comsol multiphysics, η μέγιστη παραμόρφωση του μοντέλου A είναι περίπου 6 mm ενώ του μοντέλου B 3,8 mm.

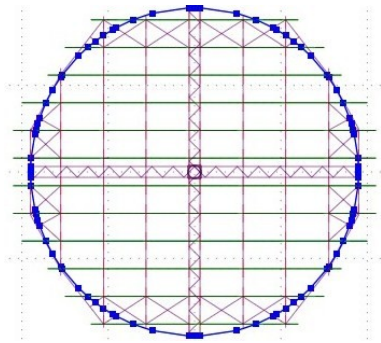


Το μοντέλο B παρουσιάζει μικρότερη συνολική παραμόρφωση για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δηλαδή για την επιλογή δοκού HEA 400 στην κατασκευή της βάσης αντίθετα με την HEA 200 του μοντέλου A.

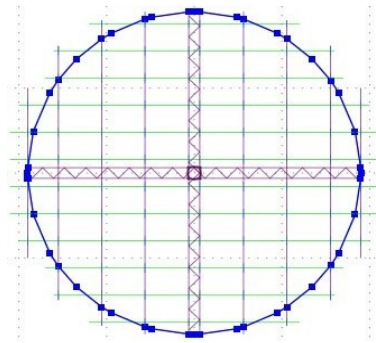
Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν και θα συγκριθούν αποτελέσματα συγκεκριμένων δοκών που θεωρούνται κρίσιμες για την λειτουργία του συστήματος στήριξης. Η απομόνωση των δοκών επιτρέπει μια λεπτομερή ανάλυση που πιθανόν να οδηγήσει σε διαφορετικά συμπεράσματα.

Σύγκριση κυκλικής - περιμετρικής δοκού μοντέλων A και B

Η κυκλική δοκός επιλέγεται για τα δύο μοντέλα όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Η συγκεκριμένη δοκός επιλέχθηκε να αναλυθεί διότι είναι σημαντική για την περιστροφή της βάσης ως προς τον άξονα z (κέντρο το κύκλου). Αυτό διότι κάτω από την δοκό βρίσκονται 24 τροχοί που κυλούν σε μια ίδιου σχήματος ράγα στο έδαφος κατά την περιστροφή. Ως εκ τούτου, μια μεγάλη παραμόρφωση σε αυτή τη δοκό θα επηρέαζε την περιστροφική κίνηση του συστήματος.



Μοντέλο A



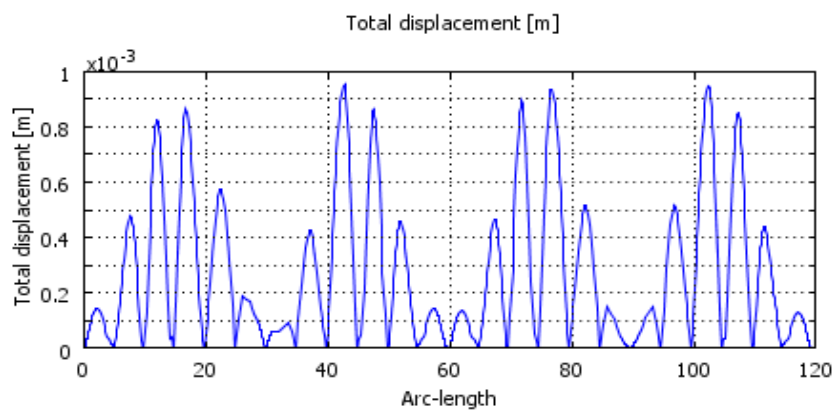
Μοντέλο B

Σχήμα 1

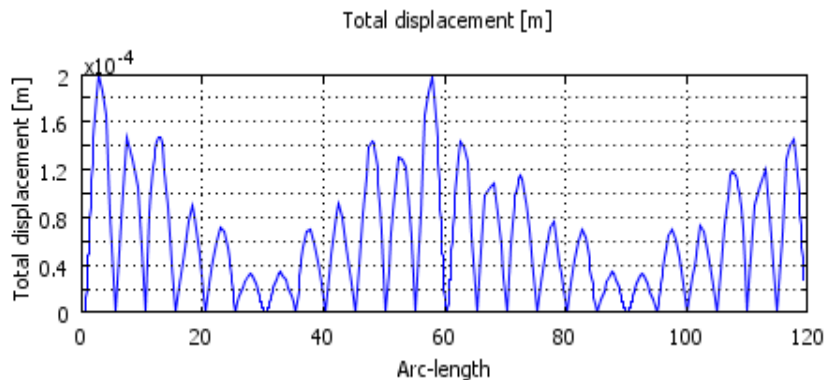
A) Παραμόρφωση σε περίπτωση μέγιστης φόρτισης (αντίξοες καιρικές συνθήκες):

Για μέγιστα δυνατά φορτία στα Φ/Β πάνελ, η παραμόρφωση της περιμετρικής δοκού για τα δύο μοντέλα παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα. Τα διαγράμματα δείχνουν την παραμόρφωση σε μέτρα κατά μήκος της δοκού.

Μοντέλο A:



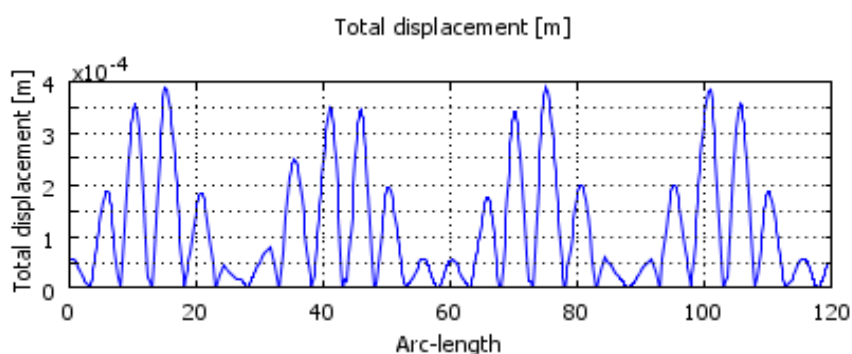
Μοντέλο B:



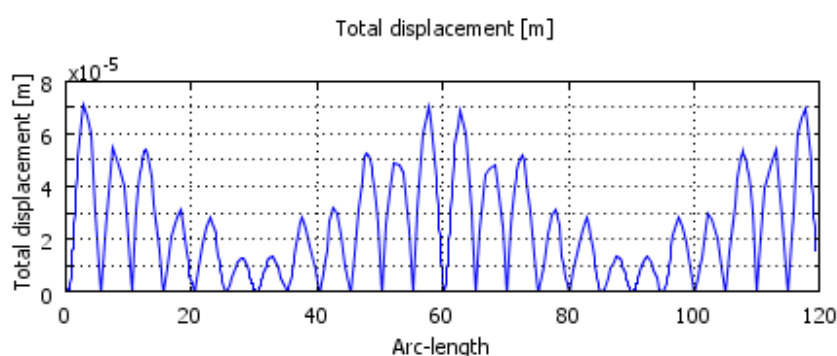
B) Παραμόρφωση σε περίπτωση ελάχιστης φόρτισης (φυσιολογικές καιρικές συνθήκες):

Για ελάχιστα δυνατά φορτία στα Φ/Β πάνελ, η παραμόρφωση της περιμετρικής δοκού για τα δύο μοντέλα παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα. Τα διαγράμματα δείχνουν την παραμόρφωση σε μέτρα κατά μήκος της δοκού.

Μοντέλο A:



Μοντέλο B



Στα διαγράμματα παρατηρείται η παραμόρφωση κατά μήκος της περιμέτρου της βάσης. Στα σημεία όπου η παραμόρφωση μηδενίζεται υπάρχουν ρόδες στήριξης (24 ρόδες).

- ➔ Η μέγιστη παραμόρφωση που παρουσιάζει το μοντέλο A περιμετρικά του κύκλου είναι 1 mm και 0,4 mm για υψηλά και χαμηλά φορτία αντίστοιχα.
- ➔ Η μέγιστη παραμόρφωση που παρουσιάζει το μοντέλο B περιμετρικά του κύκλου είναι 0,2 mm και 0,07 mm για υψηλά και χαμηλά φορτία αντίστοιχα.

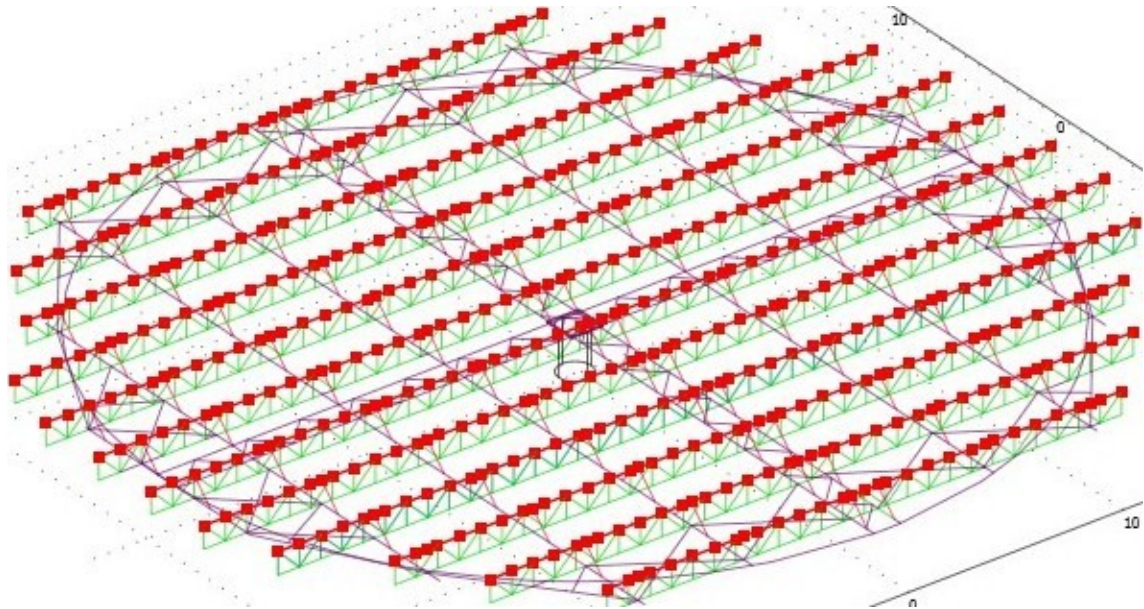
Για μία ακόμη φορά το μοντέλο B παρουσιάζει μικρότερες τιμές παραμόρφωσης και συνεπώς καλύτερη λειτουργία από το μοντέλο A, στο οποίο θα υπάρχουν μεγαλύτερες θεωρητικά τριβές κατά την περιστροφή του συστήματος.

Το αποτέλεσμα αυτής της σύγκρισης ήταν αναμενόμενο γνωρίζοντας ότι στο μοντέλο B η δοκός έχει το διπλάσιο πάχος απ' ό,τι στο A. Η αλήθεια είναι ότι σύμφωνα με τα διαγράμματα, τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν αμελητέα παραμόρφωση σε αυτό το τμήμα και η λειτουργία του συστήματος δεν θα επηρεαστεί.

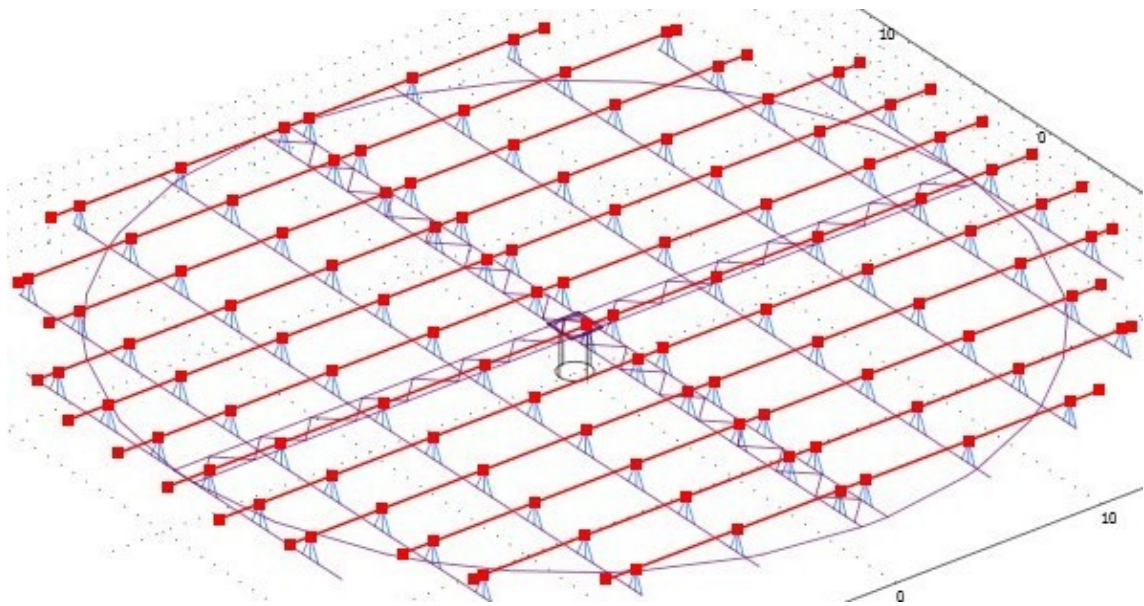
Στη συνέχεια θα συγκριθούν οι δοκοί που στηρίζουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Η παραμόρφωσή τους είναι επίσης κρίσιμη για το σύστημα στήριξης.

Σύγκριση οριζόντιων δοκών στήριξης Φ/Β πάνελ μοντέλων Α και Β

Οι δοκοί που στηρίζουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ παρουσιάζονται για τα μοντέλα Α και Β στο σχήμα 1 με κόκκινο χρώμα. Οι δοκοί έχουν και στα δύο μοντέλα τις ίδιες διαστάσεις, πάχος (100 mm) και υλικό. Η διαφορά βρίσκεται στο πως στηρίζονται οι δοκοί στο κάθετο ως προς το έδαφος επίπεδο. Η αντοχή τους κρίνεται σημαντική διότι δέχονται το φορτίο των Φ/Β πάνελ σε κάθετο και οριζόντιο επίπεδο. Επίσης αποτελούν άξονα περιστροφής των Φ/Β πάνελ (άξονας x).



Μοντέλο Α



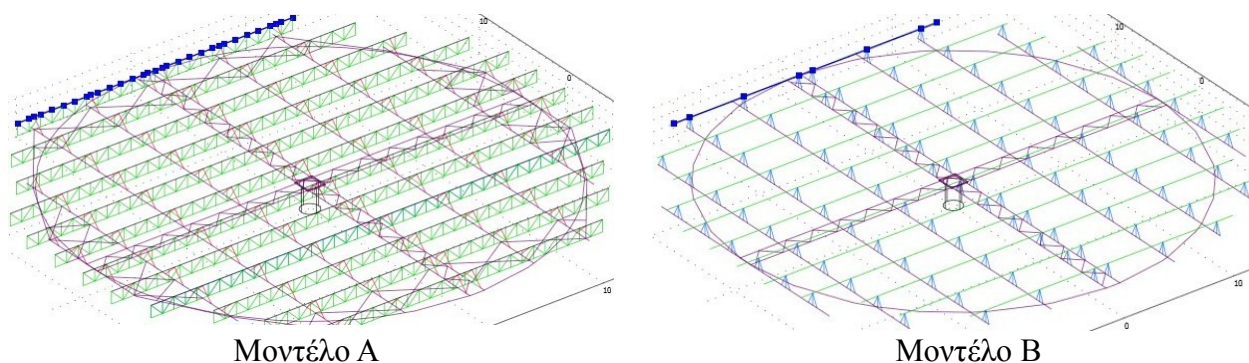
Μοντέλο Β

Σχήμα 1

Κάθε δοκός υπόκειται σε διαφορετική παραμόρφωση και θα μελετηθεί ξεχωριστά.

1η δοκός

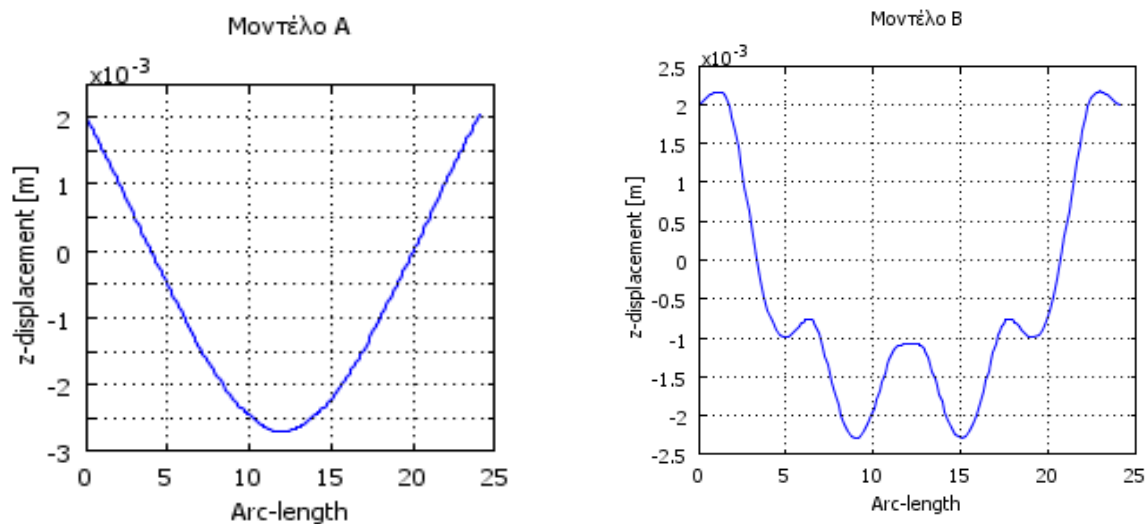
Θεωρώντας ως πρώτη δοκό αυτή που βρίσκεται πιο μακριά από το κέντρο του κύκλου (σχήμα 2),



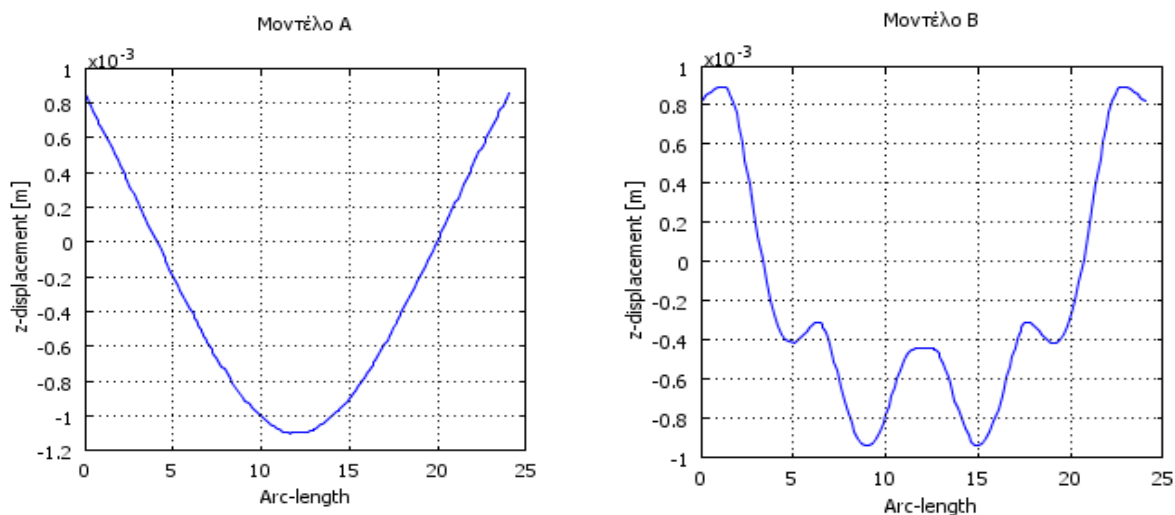
Σχήμα 2

τα διαγράμματα μετατόπισης στον κατακόρυφο άξονα z (λόγω παραμόρφωσης) προς το μήκος της δοκού, θα είναι:

- για μέγιστο φορτίο (αντίξοες καιρικές συνθήκες):

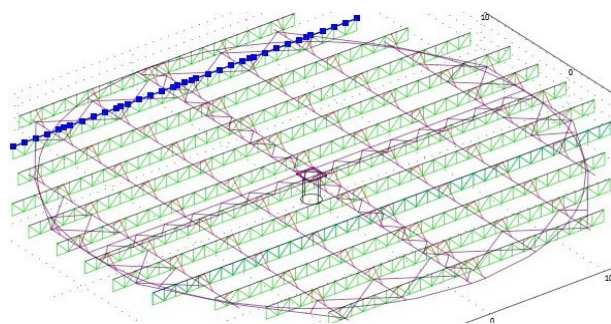


- για ελάχιστο φορτίο (φυσιολογικές καιρικές συνθήκες):

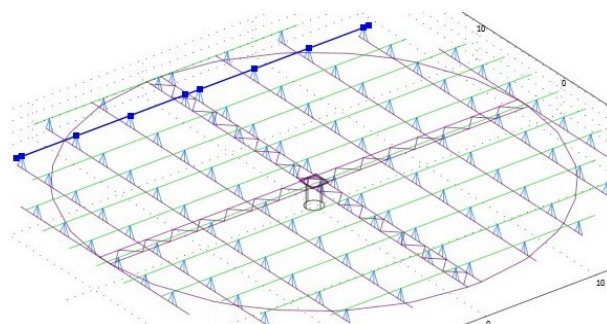


2η δοκός

Θεωρώντας ως δεύτερη δοκό την δεύτερη πιο μακρινή από το κέντρο του κύκλου (σχήμα 3),



Μοντέλο A

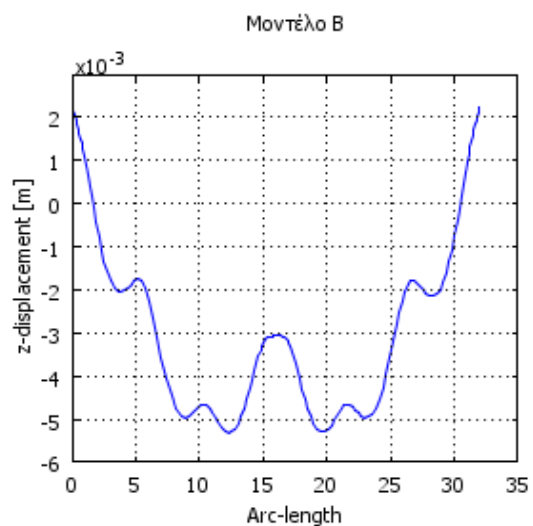
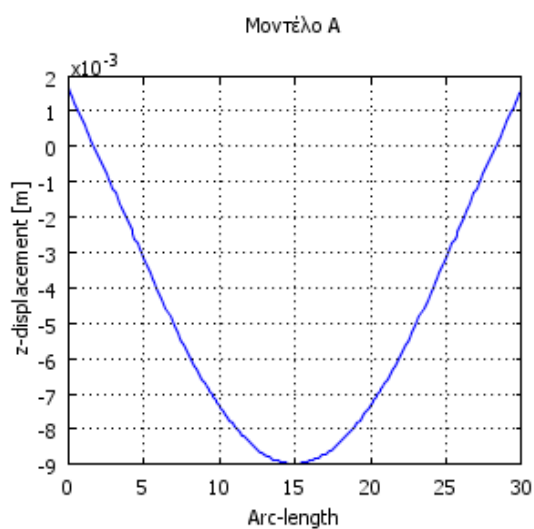


Μοντέλο B

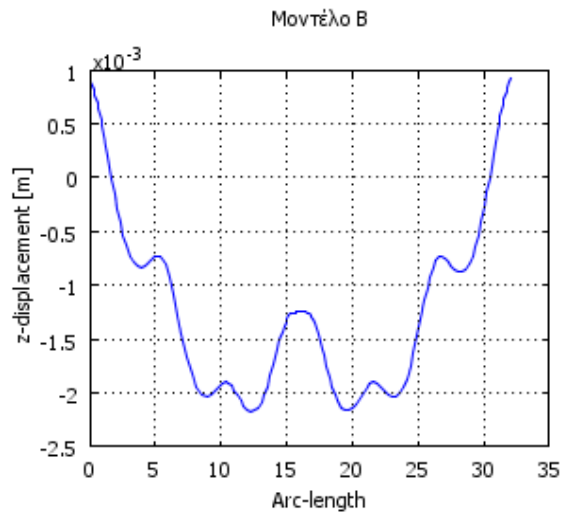
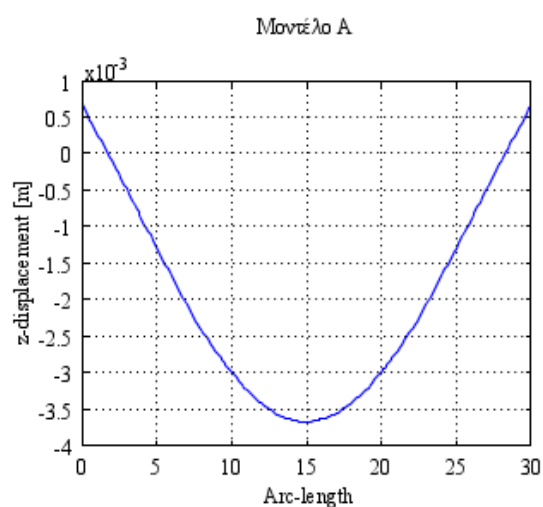
Σχήμα 3

τα διαγράμματα μετατόπισης στον κατακόρυφο άξονα z (λόγω παραμόρφωσης) προς το μήκος της δοκού, θα είναι:

- για μέγιστο φορτίο (αντίξοες καιρικές συνθήκες):

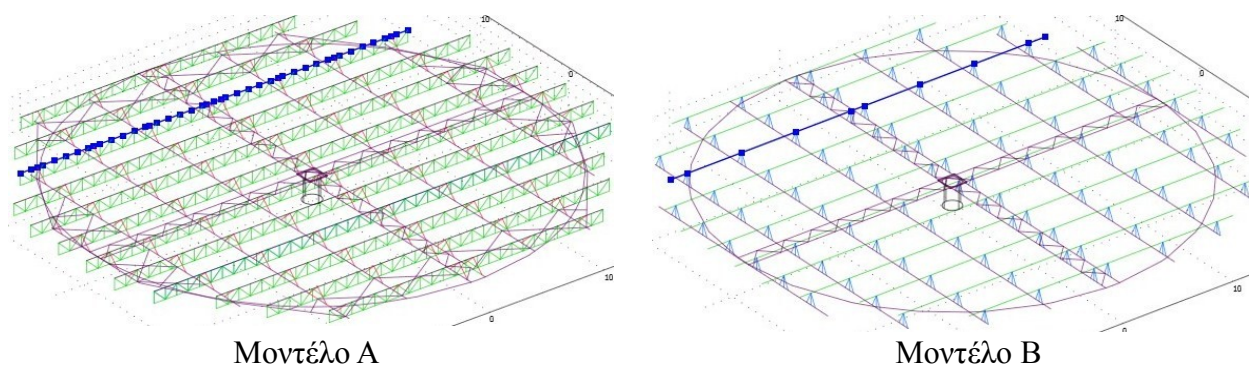


- για ελάχιστο φορτίο (φυσιολογικές καιρικές συνθήκες):



3η δοκός

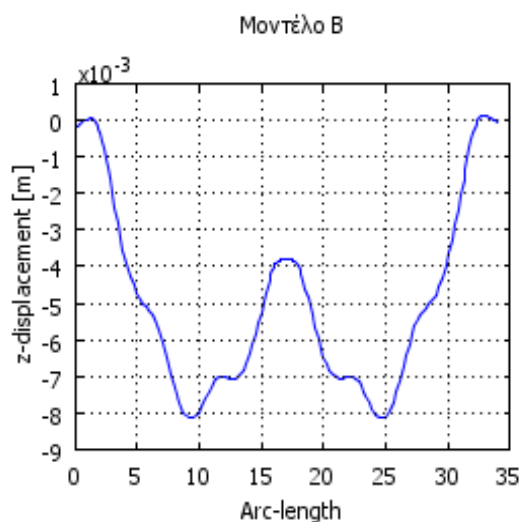
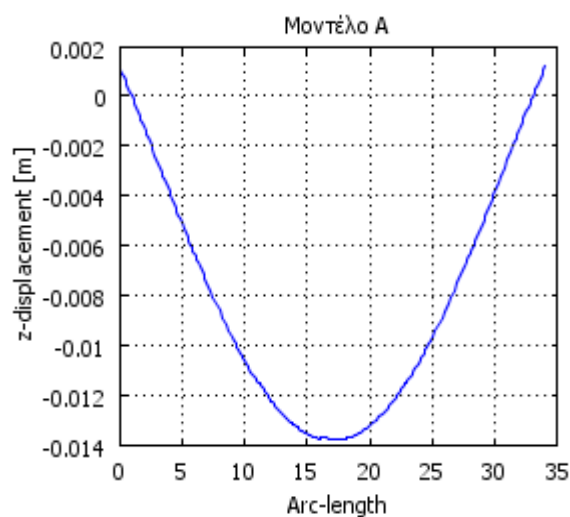
Θεωρώντας ως τρίτη δοκό την τρίτη πιο μακρινή από το κέντρο του κύκλου (σχήμα 4),



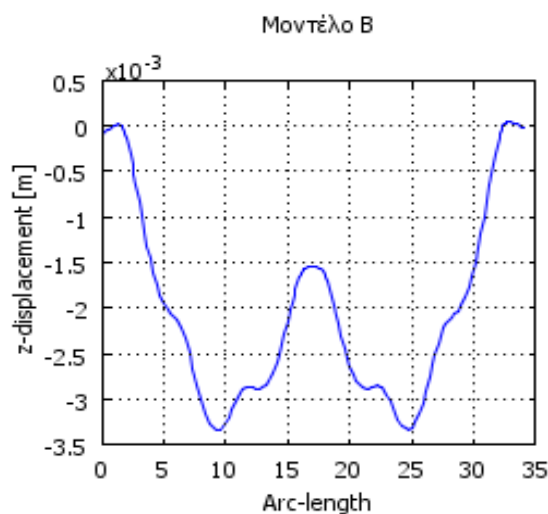
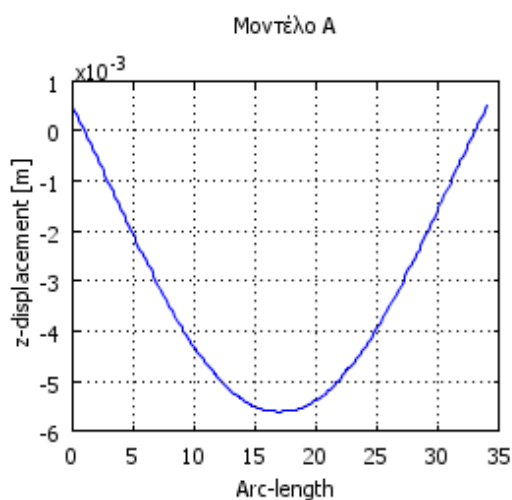
Σχήμα 4

τα διαγράμματα μετατόπισης στον κατακόρυφο άξονα z (λόγω παραμόρφωσης) προς το μήκος της δοκού, θα είναι:

- για μέγιστο φορτίο (αντίξοες καιρικές συνθήκες):

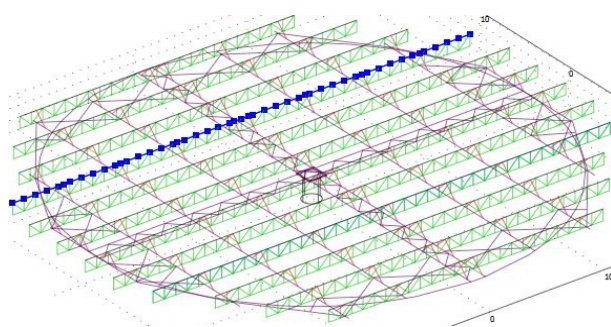


- για ελάχιστο φορτίο (φυσιολογικές καιρικές συνθήκες):

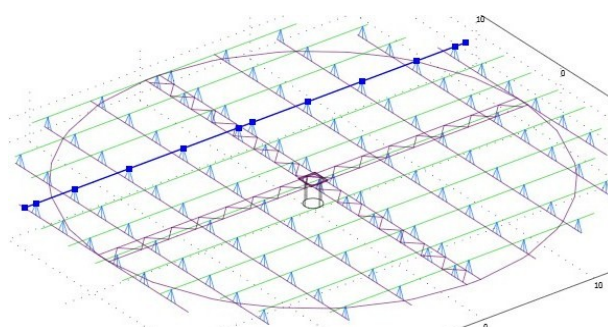


4η δοκός

Θεωρώντας ως τέταρτη δοκό την τέταρτη πιο μακρινή από το κέντρο του κύκλου (σχήμα 5),



Μοντέλο A

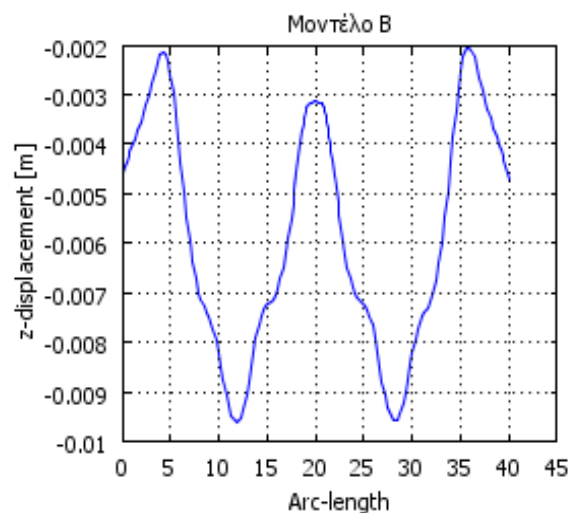
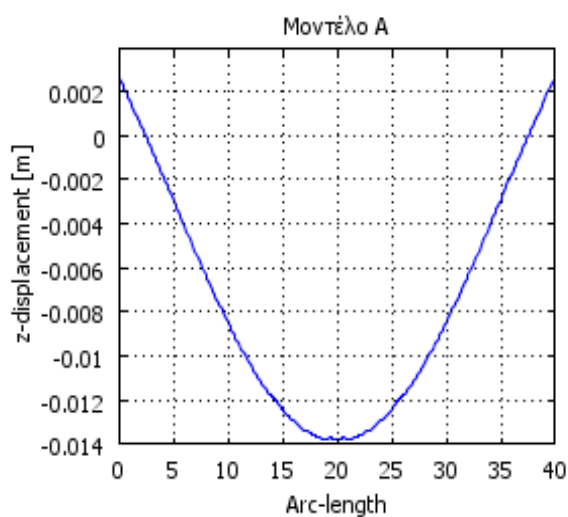


Μοντέλο B

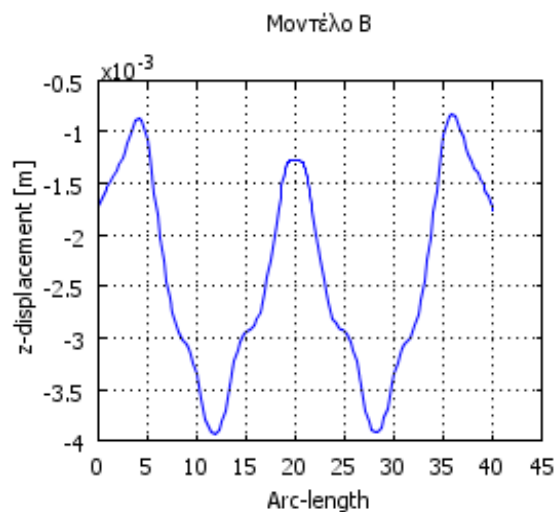
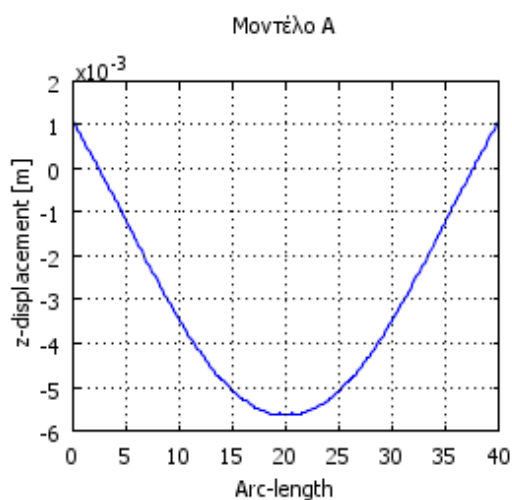
Σχήμα 5

τα διαγράμματα μετατόπισης στον κατακόρυφο άξονα z (λόγω παραμόρφωσης) προς το μήκος της δοκού, θα είναι:

- για μέγιστο φορτίο (αντίξοες καιρικές συνθήκες):

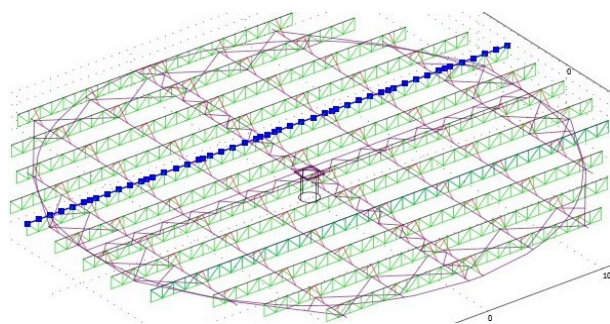


- για ελάχιστο φορτίο (φυσιολογικές καιρικές συνθήκες):

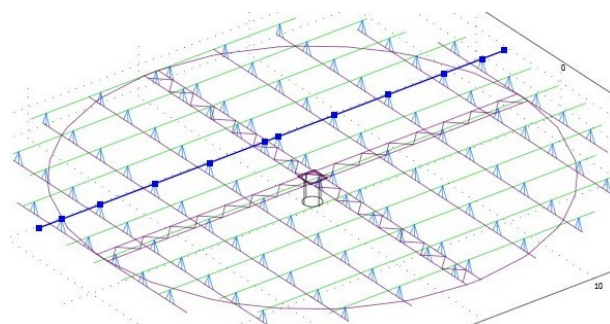


5η δοκός

Θεωρώντας ως πέμπτη δοκό την πέμπτη πιο μακρινή από το κέντρο του κύκλου (σχήμα 6),



Μοντέλο A

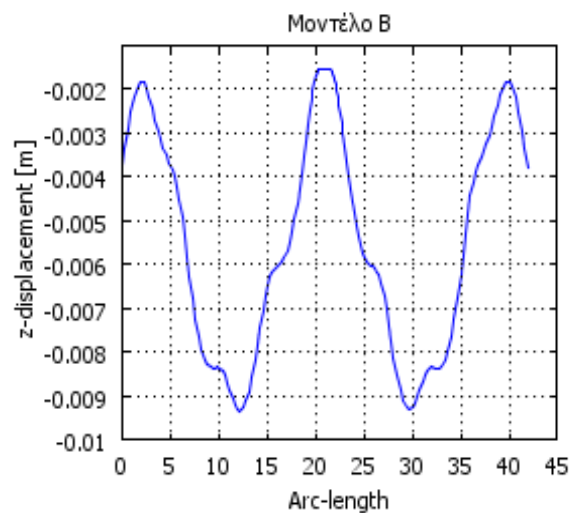
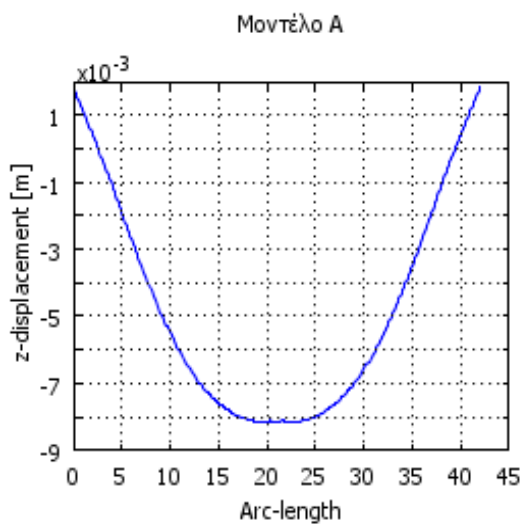


Μοντέλο B

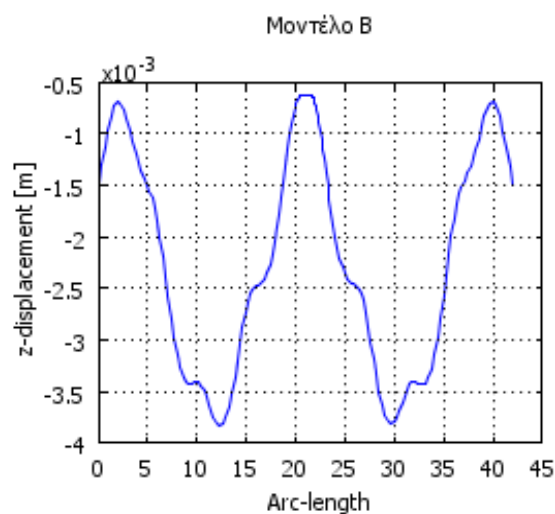
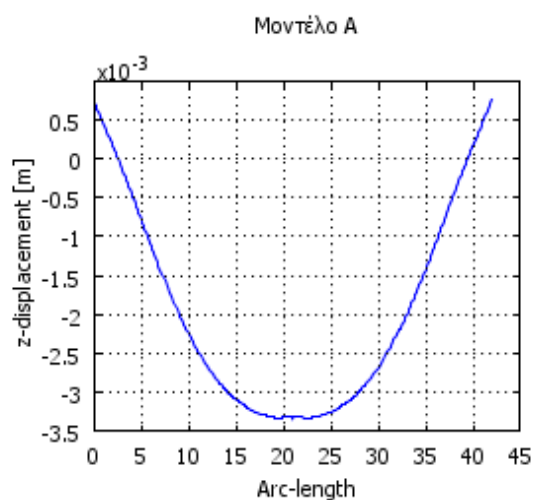
Σχήμα 6

τα διαγράμματα μετατόπισης στον κατακόρυφο άξονα z (λόγω παραμόρφωσης) προς το μήκος της δοκού, θα είναι:

- για μέγιστο φορτίο (αντίξοες καιρικές συνθήκες):

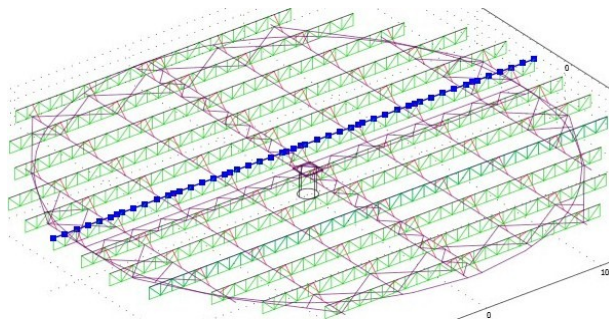


- για ελάχιστο φορτίο (φυσιολογικές καιρικές συνθήκες):

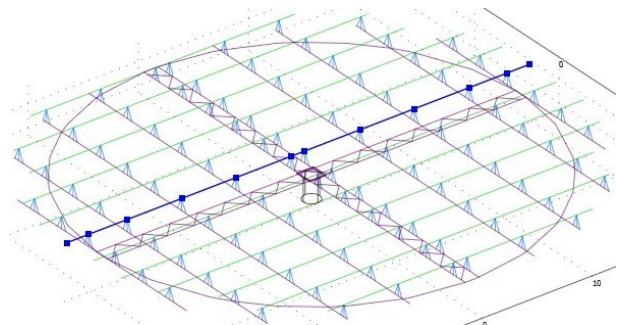


6η δοκός

Θεωρώντας ως έκτη δοκό την έκτη πιο μακρινή από το κέντρο του κύκλου (σχήμα 7),



Μοντέλο A

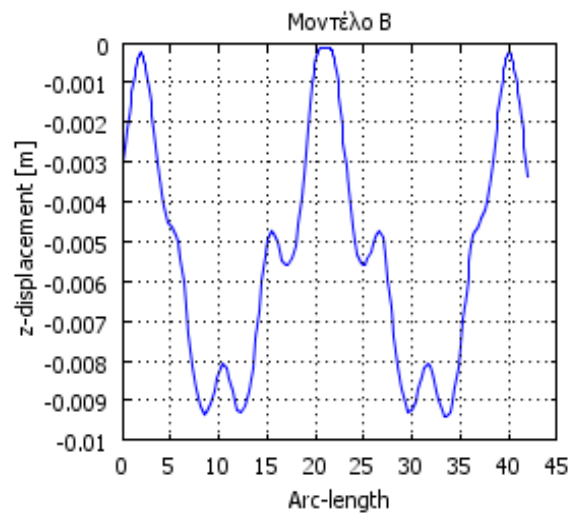
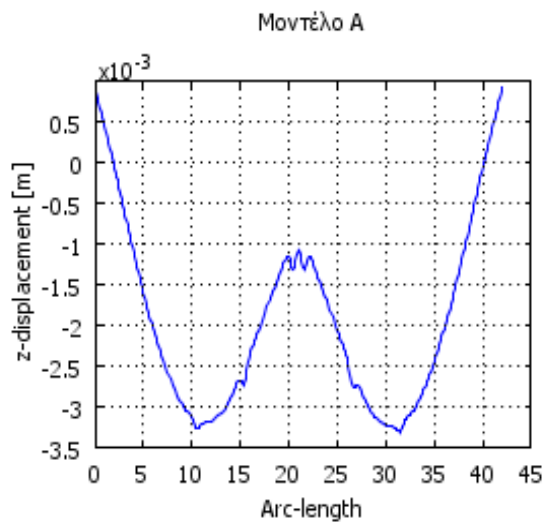


Μοντέλο B

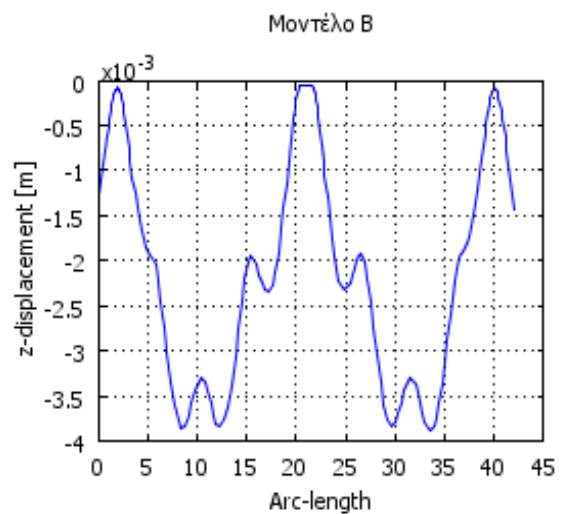
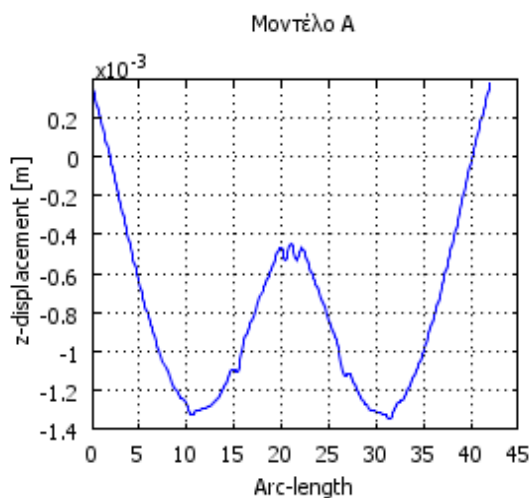
Σχήμα 7

τα διαγράμματα μετατόπισης στον κατακόρυφο άξονα z (λόγω παραμόρφωσης) προς το μήκος της δοκού, θα είναι:

- για μέγιστο φορτίο (αντίξοες καιρικές συνθήκες):



- για ελάχιστο φορτίο (φυσιολογικές καιρικές συνθήκες):



Λόγο συμμετρίας των κατασκευών δεν χρειάζεται να μελετηθούν οι υπόλοιπες έξι δοκοί που στηρίζουν τα Φ/Β πάνελ. Τα αποτελέσματα θα είναι ίδια με τις πρώτες έξι.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη αυτής της ομάδας δοκών είναι πως οι 4 πρώτοι δοκοί (8 σε όλη την κατασκευή) εμφανίζουν μικρότερη μετατόπιση στο μοντέλο Β, ενώ οι 2 δοκοί που βρίσκονται κοντά στο κέντρο του κύκλου (4 σε όλη την κατασκευή) παρουσιάζουν μικρότερη κάμψη στο μοντέλο Α.

Η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση του μοντέλου Α παρατηρείται στις δοκούς 3 και 4 όπου για μέγιστο φορτίο φτάνει τα 14 mm και για ελάχιστο τα 5,5 mm. Αντίστοιχα το μοντέλο Β παρουσιάζει μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση στις δοκούς 4, 5 και 6 που για μέγιστο φορτίο είναι κοντά στα 9,5 mm και για ελάχιστο 4 mm.

Εύκολα παρατηρείται από τα διαγράμματα ο διαφορετικός τρόπος κάμψης των δύο μοντέλων. Φαίνεται στο διάγραμμα κατακόρυφης μετατόπισης ανά μέτρο της δοκού για το μοντέλο Α, πως όλοι οι δοκοί (εκτός από την 6η) παρουσιάζουν μια ελαστική κάμψη στο κέντρο τους. Το παραβολικό αυτό διάγραμμα δεν εμφανίζεται και για το μοντέλο Β. Αυτό διότι το κέντρο των δοκών στηρίζεται καλύτερα απ' ό,τι στο μοντέλο Α. Ο κεντρικός σταυρός στήριξης στις βάσεις είναι από δοκούς πάχους 400 mm για το μοντέλο Β, σε αντίθεση με το μοντέλο Α που είναι από δοκούς 200 mm. Αυτός είναι και ο λόγος που το μοντέλο Β δεν επιτρέπει στις δοκούς του να παρουσιάσουν μεγάλη κάμψη στο κέντρο τους.

Τέλος, η μελέτη των δοκών που στηρίζουν τα Φ/Β πάνελ έδειξε πως και στα δύο μοντέλα θα παρουσιάσουν μικρή κάμψη ακόμα και σε μεγάλα φορτία. Μπορεί να πει κανείς με σιγουριά λοιπόν πως η κάμψη τους δεν θα επηρεάσει τη σωστή λειτουργία των συστημάτων.

Συνολικός όγκος δοκών σε μοντέλα Α και Β

Για να γίνει σωστή σύγκριση των δύο μοντέλων πρέπει γίνει γνωστό το πόσο υλικό χρειάστηκε για την κατασκευή του. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται πως υπολογίζεται ο όγκος της κάθε ομάδας δοκών πολλαπλασιάζοντας το συνολικό μήκος με το εμβαδόν διατομής.

<i>ΜΟΝΤΕΛΟ Α</i>	Μήκος (m)	Εμβαδόν διατομής (m^2)	Όγκος (m^3)
Βάση	940,37	53,8/10 ⁴	5,06
Κάθετα δικτυώματα	1620,22	21,2/10 ⁴	3,43
Δοκοί στήριξης Φ/Β	428	21,2/10 ⁴	0,91
Σύνολο			9,4

<i>ΜΟΝΤΕΛΟ Β</i>	Μήκος (m)	Εμβαδόν διατομής (m^2)	Όγκος (m^3)
Βάση	635,47	159/10 ⁴	10,1 (- 1,03)*=9,07
Κάθετα δικτυώματα	336,55	21,2/10 ⁴	0,71
Δοκοί στήριξης Φ/Β	428	21,2/10 ⁴	0,91
Σύνολο			10,69

*Σε ορισμένες οριζόντιες δοκούς υπάρχουν τρύπες που μειώνουν τον όγκο τους. Αυτός ο όγκος θεωρήθηκε το 20% του όγκου των δοκών αυτών που χωρίς τρύπες θα είχαν όγκο
 $324m * 159/10^4 * m^2 = 5,15 m^3$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για την κατασκευή του μοντέλου Β έχει χρησιμοποιηθεί 12% παραπάνω υλικό απ' ό,τι για το μοντέλο Α. Η κατασκευή δηλαδή του μοντέλου Α είναι οικονομικότερη.

Συμπεράσματα

Σκοπός ανάλυσης και μελέτης των συστημάτων στήριξης φωτοβολταϊκών πάνελ ήταν ο έλεγχος αντοχής και λειτουργικότητας της κατασκευής που αναπαριστά το μοντέλο Β. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ένα μοντέλο στήριξης το οποίο υπάρχει ήδη στην αγορά και έχει πιστοποιημένη αντοχή (μοντέλο Α) ήταν ο καλύτερος τρόπος για να οδηγηθούμε στα σωστά συμπεράσματα.

Όπως φαίνεται λοιπόν από τα αποτελέσματα, στα δύο μοντέλα στήριξης προκύπτουν μικρές τιμές παραμορφώσεων ακόμα και σε περίπτωση μεγάλων φορτίων στα Φ/Β πάνελ. Συμπεραίνεται λοιπόν πως το προς μελέτη σύστημα στήριξης (μοντέλο Β) παρουσιάζει ικανοποιητική αντοχή και πως η λειτουργία του δεν επηρεάζεται από τις μικρές παραμορφώσεις των δοκών.

Μάλιστα, η σκέψη του κατασκευαστή να δημιουργήσει ένα μοντέλο στήριξης (μοντέλο Β) με περισσότερο υλικό, έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία μικρότερης (συνολικής και στα περισσότερα σημεία) παραμόρφωσης σε σχέση με το ήδη υπάρχον σύστημα (μοντέλο Α). Αποδεικνύεται λοιπόν πως το μοντέλο στήριξης του μοντέλου Β, όπως και του Α, μπορεί να θεωρηθεί μια γερή κατασκευή που θα λειτουργήσει χωρίς πρόβλημα ακόμα και σε αντίξοες καιρικές συνθήκες.

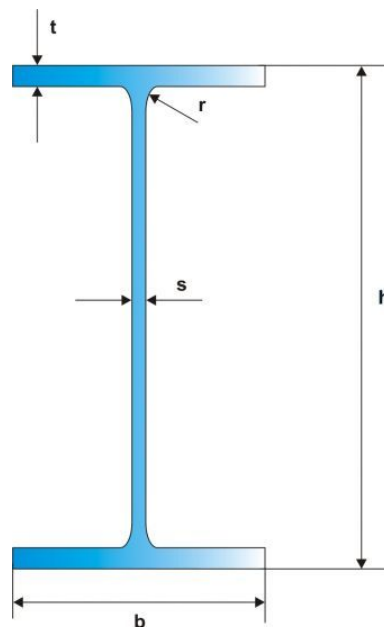
Παρακάτω φαίνεται σε πια σημεία υπερτερεί το κάθε μοντέλο. Υπενθυμίζεται πως οι διαφορές τους σε αυτές τις συγκρίσεις είναι πολύ μικρές.

Σύγκριση	Μοντέλο Α		Μοντέλο Β		Βέλτιστο
Όγκος υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή	9,4 m^3		10,69 m^3		A
Φορτίο (υπό αντίξοες – φυσιολογικές καιρικές συνθήκες)	Max	Min	Max	Min	
Συνολική παραμόρφωση	15 mm	6 mm	9,5 mm	3,8 mm	B
Παραμόρφωση κύκλου που στηρίζεται από τροχούς κύλισης	1 mm	0,4 mm	0,2 mm	0,07 mm	B
Μετατόπιση στον κατακόρυφο άξονα 1ης δοκού στήριξης Φ/Β πάνελ	-3 mm	-1,1 mm	-2,5 mm	-0,9 mm	B
Μετατόπιση στον κατακόρυφο άξονα 2ης δοκού στήριξης Φ/Β πάνελ	-9 mm	-4 mm	-5 mm	-2 mm	B
Μετατόπιση στον κατακόρυφο άξονα 3ης δοκού στήριξης Φ/Β πάνελ	-14 mm	-5,5 mm	-8 mm	-3,5 mm	B
Μετατόπιση στον κατακόρυφο άξονα 4ης δοκού στήριξης Φ/Β πάνελ	-14 mm	-5,5 mm	-9,5 mm	-4 mm	B
Μετατόπιση στον κατακόρυφο άξονα 5ης δοκού στήριξης Φ/Β πάνελ	-8 mm	-3,5 mm	-9,5 mm	-4 mm	A
Μετατόπιση στον κατακόρυφο άξονα 6ης δοκού στήριξης Φ/Β πάνελ	-3,5 mm	-1,4 mm	-9,5 mm	-4 mm	A

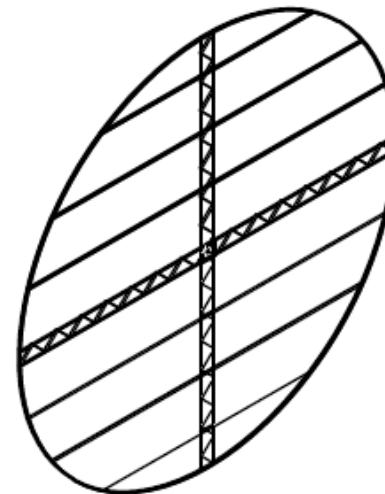
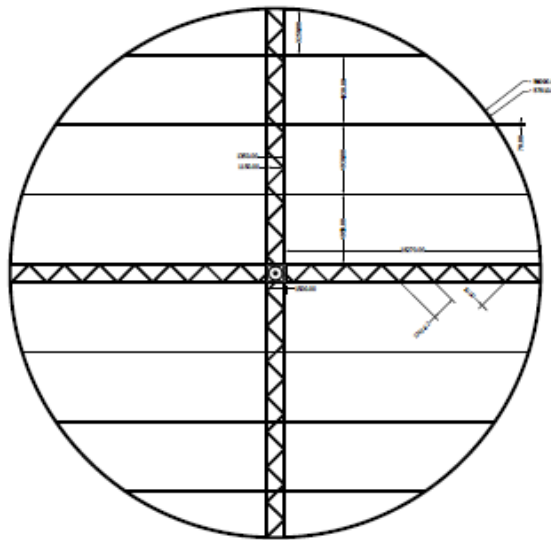
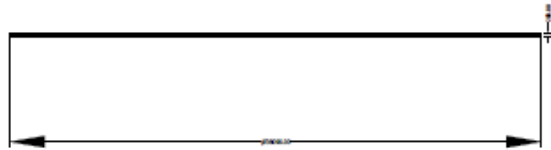
Παράρτημα

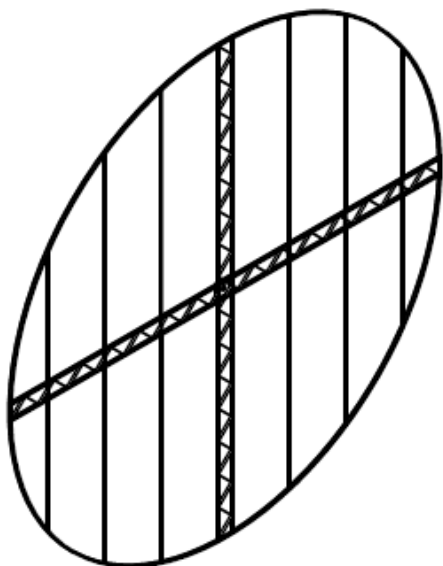
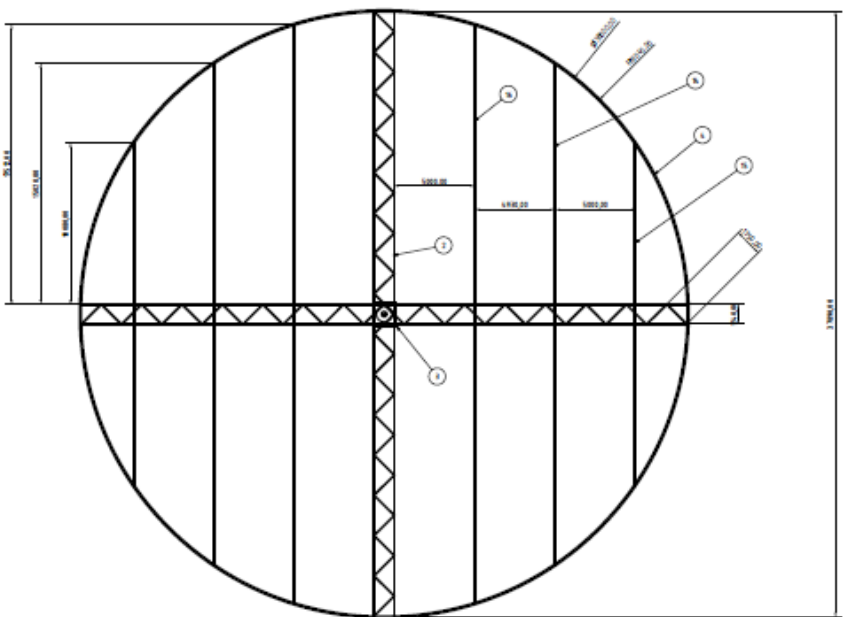
Πίνακας ιδιοτήτων δοκών τύπου HEA

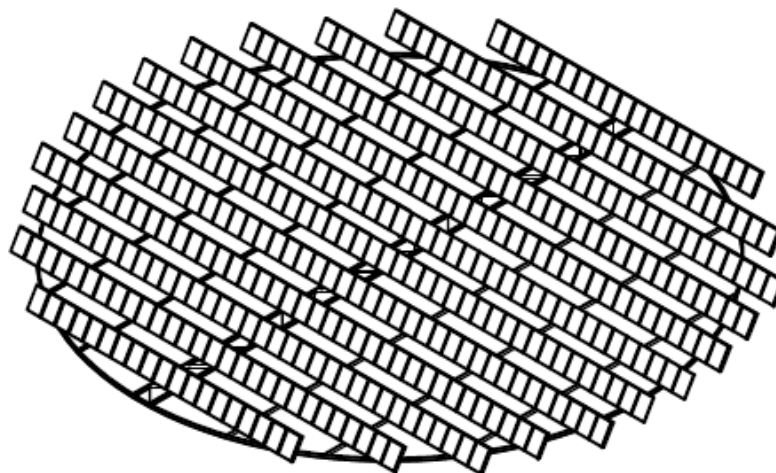
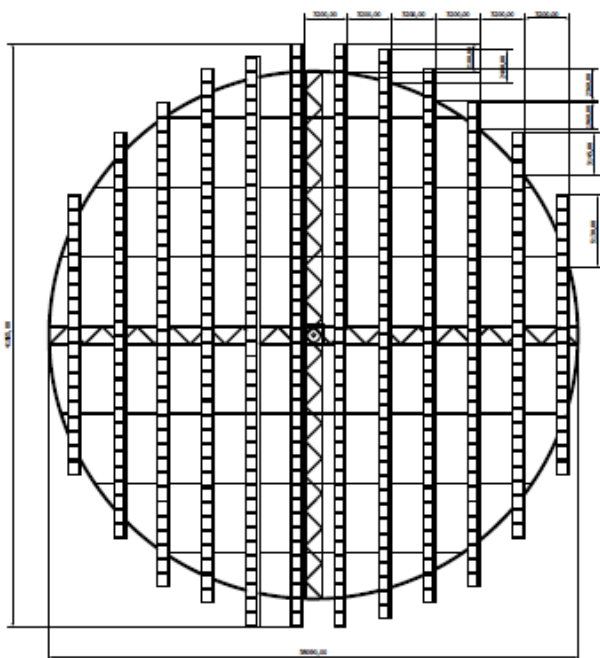
HEA	h mm	b mm	Sa mm	e mm	radius mm	section mm ²	weight kg/m
100	96	100	5	8	12	21,24	16,7
120	114	120	5	8	12	25,34	19,9
140	133	140	5,5	8,5	12	31,42	24,7
160	152	160	6	9	15	38,77	30,4
180	171	180	6	9,5	15	45,25	35,5
200	190	200	6,5	10	18	53,83	42,3
220	210	220	7	11	18	64,34	50,5
240	230	240	7,5	12	21	76,84	60,3
260	250	260	7,5	12,5	24	86,82	68,2
280	270	280	8	13	24	97,26	76,4
300	290	300	8,5	14	27	112,5	88,3
320	310	300	9	15,5	27	124,4	97,6
340	330	300	9,5	16,5	27	133,5	105
360	350	300	10	17,5	27	142,8	112
400	390	300	11	19	27	159,0	125
450	440	300	11,5	21	27	178,0	140
500	490	300	12	23	27	197,5	155
550	540	300	12,5	24	27	211,8	166
600	590	300	13	25	27	226,5	178
650	640	300	13,5	26	27	241,6	190
700	690	300	14,5	27	27	260,5	204
800	790	300	15	28	30	285,8	224
900	890	300	16	30	30	320,5	252
1000	990	300	16,5	31	30	346,8	272



Μηχανολογικά σχέδια μοντέλου Β







Βιβλιογραφία

- (1) Εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία για μηχανικούς (2005). Tirupathi R. Chandrupatla, Ashok D. Belegundu, εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- (2) Στατική μηχανική του απαραμόρφωτου στερεού. Αναστάσιος Χ. Χρυσάκης,, Αθήνα 1999.
- (3) Δυναμική μηχανών. Α. Καναράχος, Ι. Αντωνιάδης, , Αθήνα 1998, εκδόσεις Παπασωτηρίου
- (4) Φωτοβολταϊκά συστήματα. Ι.Ε. Φραγκιαδάκης, 3η έκδοση, εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη (2009).
- (5) Εγχειρίδιο Comsol Multiphysics 3.4. (2009)
- (6) Wind loads on solar energy roofs. Chris P.W. Geurts, Carine A. van Benthum.
- (7) Εκπαιδευτικό υλικό μαθήματος υπολογιστικής μηχανικής, Γ.Ε. Σταυρουλάκης, διαθέσιμο μέσω του www.eclass.tuc.gr

