



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Σχεδιασμός και ανάλυση ιστών κινητής τηλεφωνίας υπό την επίδραση  
στατικών και αεροδυναμικών φορτίσεων με χρήση CAD-CAE.

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Συγκούνα Ηλία

Επιβλέπων: Βασίλειος Σπιτάς,

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2020

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία έρχεται να επισφραγίσει ένα σπουδαίο κύκλο σπουδών στην Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π., ο οποίος διήρκησε 5 έτη, αλλά εν τέλει μοιάζει σαν να μη πέρασε ούτε μία εβδομάδα από την πρώτη μέρα. Θεωρώ αναγκαίο να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στα πρόσωπα και τους θεσμούς που ήταν δίπλα μου σε αυτό το ταξίδι. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τον καθηγητή μου Δρ. Βασίλη Σπιτά τον οποίο θεωρώ λαμπρό παράδειγμα καθηγητή, αλλά παράλληλα και ανθρώπου. Οι γνώσεις, η απλότητα και η παιδεία του με έκαναν να νιώθω σιγουριά ότι κάνω τα σωστά πρώτα βήματα ως εκκολαπτόμενος Μηχανολόγος Μηχανικός. Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω το διδακτορικό σπουδαστή Βασιλείου Γιώργο για την διάθεση του να ακούει και να επιλύει με τις γνώσεις και την εμπειρία του κάθε απορία και προβληματισμό μου, βοηθώντας τα μέγιστα για την ολοκλήρωση της εργασίας μου. Ευχαριστώ επίσης τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. και την οικογένειά μου, αναγκαίες προϋποθέσεις για να μπορώ αυτή τη στιγμή να βρίσκομαι σε αυτή τη θέση και να τους ευχαριστώ. Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους και συναδέλφους μου Αποστολάκη Μηνά και Σκέρτσο Ηλία για τις ατελείωτες ώρες “παιχνιδιού” στα σχεδιαστικά προγράμματα CAD.

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται ο σχεδιασμός και η ανάλυση ιστών κινητής τηλεφωνίας χωρίς υποστηρίγματα (μεταξύ άλλων εφαρμογών) σε πεδίο ανέμου με σκοπό την δημιουργία μιας βιβλιοθήκης (γκάμας) ιστών, ποικίλων παραμέτρων, όπως οι αεροδυναμικές καταπονήσεις και οι απαιτούμενες συνθήκες εγκατάστασης (ύψος ιστού, εγκατεστημένος εξοπλισμός κλπ). Αρχικά, παρουσιάζεται η αναγκαιότητα μιας τέτοιας μελέτης θίγοντας τα μείζονα ζητήματα που ανακύπτουν κατά τον σχεδιασμό, κατασκευή, εγκατάσταση, συντήρηση και αναβάθμιση των υποδομών αυτών. Στη συνέχεια, ορίζονται οι προδιαγραφές των μελετώμενων ιστών και οι σταθερές, πάνω στις οποίες στήνεται η βιβλιοθήκη χωροδικτυωμάτων και σχεδιάζονται. Γίνεται επιλογή κατάλληλων διατομών εμπορίου των δομικών στοιχείων (κουλοδοκοί) και της γεωμετρίας του ιστού. Έπειτα, υπολογίζονται τα αεροδυναμικά (μέσω Computational Fluid Dynamics) και στατικά φορτία των κατασκευών και ελέγχονται στα μοντέλα μέσω προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis – FEA). Η παραπάνω μελέτη γίνεται συνδυαστικά και σε κάποιες περιπτώσεις συγκριτικά με τα διεθνή πρότυπα (Eurocode) και τα αποτελέσματα που προκύπτουν σχολιάζονται εκτενώς. Τέλος, γίνεται εισαγωγή σε πρωτότυπες τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως προστατευτικά μέσα έναντι υπερφορτίσεων (τεχνολογία ανάκλισης ιστού) είτε με γνώμονα την διευκόλυνση της μεταφοράς και της εγκατάστασης του ιστού (τεχνολογίες αναδιπλούμενων στοιχείων – origami structures). Ο μελλοντικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αφορά στη δημιουργία ενός ημι-αυτοματοποιημένου εργαλείου υπολογισμού και σχεδιασμού εγκαταστάσεων χωροδικτυωμάτων με τυποποιημένα δομικά στοιχεία και στοιχεία μηχανών που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην βιομηχανία με σημαντικό αντίκτυπο στην μείωση του κόστους εγκατάστασης και συντήρησης, με την προσθήκη τεχνολογιών προληπτικής συντήρησης (predictive maintenance tools) και εποπτεία της δομικής ακεραιότητας της εγκατάστασης σε πραγματικό χρόνο (real – time condition monitoring).

## Abstract

The present thesis deals with the design and analysis of self-supporting telecommunication tower masts (among other applications) under the influence of wind, in order to create a library of masts of varying parameters, such as aerodynamic stresses and required installation conditions (mast height, installed equipment etc.). Initially, the necessity of performing such a study is discussed, addressing the major issues arising in the design, construction, installation, maintenance and upgrade of these infrastructures. Next, the specifications of the masts studied and the constants used to design the library are defined. For this, appropriate cross sections of the structural elements and the geometry of the masts are selected. Subsequently, the aerodynamics (via Computational Fluid Dynamics) and static loads of the structures are calculated and tested on the models through a Finite Element Analysis (FEA). The above study is combined and in some cases compared to international standards (Eurocode) and the results are commented extensively. Finally, novel technologies are introduced in order to find use either as overload protection (inclination technology) or to facilitate the transport and installation of the mast (origami structures technologies). The future objective of this thesis is to create a semi-automated tool which assists the design of mast structures using standardized building blocks and machine components that can be used in industry, while reducing the overall installation and maintenance costs. Furthermore, the tool can be extended and coupled with predictive maintenance technologies and real - time condition monitoring of the facility 's structural integrity.

# Περιεχόμενα

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Χρησιμότητα.....	σελ.6
1.2 Κατηγοριοποίηση και υλοποιήσεις.....	σελ.6
1.3 Ύψος.....	σελ.10
1.4 Περιγραφή τυπικής εγκατάστασης ιστού.....	σελ.11
1.5 Κανονισμοί/Πρότυπα.....	σελ.15
1.6 Ερωτήματα.....	σελ.15
1.7 Αστοχίες.....	σελ.16

## Κεφάλαιο 2: Περιγραφή εργασιών.....

σελ.19

2.1 Κριτήρια επιλογής προδιαγραφών .....	σελ.19
2.2 Μέγιστο ύψος ιστού.....	σελ.19
2.3 Διατομή ιστού.....	σελ.20
2.4 Επιλογή μοντέλων διατομής ιστού.....	σελ.22
2.5 Επιλογή διατομής δοκών.....	σελ.24
2.6 Υλικό κατασκευής.....	σελ.24
2.7 Χαρακτηριστικά βιβλιοθήκης.....	σελ.25

## Κεφάλαιο 3: Υπολογισμοί δικτυωμάτων.....

σελ.26

3.1 Πλαίσιο υπολογισμών .....	σελ.26
3.2 Ρευστομηχανική ανάλυση μέσω υπολογιστή (CFD).....	σελ.27
3.2.1 Μοντέλα ιστών και περιφερειακών.....	σελ.28
3.2.2 Διαδικασία υπολογισμών για το μοντέλο 1.....	σελ.30
3.2.3 Αποτελέσματα μοντέλων 2 και 3.....	σελ.40
3.2.4 Σχόλια της ρευστομηχανικής ανάλυσης.....	σελ.40

3.3 Στατική ανάλυση 18m ιστών.....	σελ.41
3.3.1 Πλαίσιο υπολογισμών.....	σελ.41
3.3.2 Αποτελέσματα .....	σελ.43
3.4 Συνολικά αποτελέσματα στατικής ανάλυσης και σχολιασμός.....	σελ.44
3.5 Μελέτη του 2m δομικού στοιχείου της βάσης.....	σελ.45
3.5.1 Μετατόπιση δυνάμεων.....	σελ.45
3.5.2 Αποτελέσματα πεπερασμένων.....	σελ.47
3.5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	σελ.55
3.6 Κοχλιοσυνδέσεις.....	σελ.55
3.7 Έλεγχος σε λυγισμό.....	σελ.68
3.8 Αντισεισμική ανάλυση.....	σελ.70
Κεφάλαιο 4: Εγκατάσταση και μεταφερσιμότητα .....	σελ.74
4.1 Ανάκλιση.....	σελ.74
4.2 Βάση ιστού.....	σελ.75
4.3 Κατασκευή άρθρωσης στο σημείο Pivot .....	σελ.77
4.4 Γάντζος.....	σελ.80
4.5 Μοντέλο αναδιπλούμενης τεχνολογίας.....	σελ.83
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και μελλοντικοί στόχοι.....	σελ.89
5.1 Οργάνωση βιβλιοθήκης.....	σελ.89
5.2 Κοστολόγηση.....	σελ.89
5.3 Μελλοντικοί στόχοι.....	σελ.90
5.3.1 Αύξηση παραμέτρων βιβλιοθήκης .....	σελ.91
5.3.2 Δημιουργία Αντιπροσωπευτικού Δομικού Στοιχείου (RSE).....	σελ.92
5.3.3 Προσθήκη τεχνολογιών προληπτικής συντήρησης.....	σελ.94
Κεφάλαιο 6: Βιβλιογραφία.....	σελ.95
Παράρτημα Α.....	σελ.96
Παράρτημα Β.....	σελ.99

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

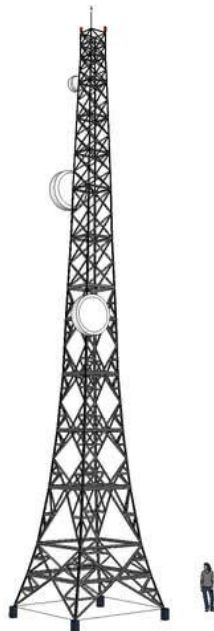
## 1.1 Χρησιμότητα

Η επέκταση των τηλεπικοινωνιών και η παράλληλη αύξηση των συστημάτων μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο είναι οι βασικοί λόγοι για τους οποίους υπάρχει συνεχής ζήτηση για κατασκευή μεταλλικών δικτυωμάτων. Οι πλεγματοειδής χαλύβδινες κατασκευές χρησιμοποιούνται μαζικώς παγκοσμίως για να στηρίζονται σε αυτές κυψελοειδής (cellular) ή μικροκυματικές (microwave) κεραιές κινητής τηλεφωνίας, οι οποίες μεταδίδουν και λαμβάνουν ραδιοκύματα. Η λύση των ιστών προτιμάται από αυτή μιας στιβαρότερης κατασκευής κυρίως για οικονομικούς λόγους. Επίσης, έχουν χαμηλό βάρος καθώς και σύντομες και εύκολες διαδικασίες κατασκευής και εγκατάστασης.

## 1.2 Κατηγοριοποίηση και υλοποιήσεις

Τα μεταλλικά χωροδικτύωματα κατηγοριοποιούνται βάσει:

- Της διατομής τους: Κατασκευάζονται ιστοί με τριγωνική, τετραγωνική, εξαγωνική και πολυγωνική διατομή. Οι τριγωνικοί πύργοι συνήθως ζυγίζουν λιγότερα κιλά, 10%-20% συγκριτικά με τις υπόλοιπες διατομές, αλλά έχουν χαμηλότερη στιβαρότητα στην στρέψη. Επίσης, υπάρχουν ιστοί μεταβλητής και σταθερής διατομής. Στους μεταβλητής διατομής, η βάση ξεκινάει έχοντας ένα τραπεζοειδές σχήμα και καθώς αυξάνεται το ύψος σταθεροποιείται.



Εικόνα 1.1: Ιστός τετραγωνικής και μεταβλητής διατομής.



Εικόνα 1.2: Ιστός τριγωνικής και σταθερής διατομής.

- Της δομικής τους δράσης: Ανάλογα τη δομή τους ταξινομούνται σε:

α) ιστούς χωρίς στήριξη (self-supporting towers): Χρησιμοποιούνται σε μεγάλη γκάμα εφαρμογών για το λόγο πως δεν δεσμεύουν μεγάλο χώρο στη βάση τους, μιας και δεν έχουν υποβοηθήματα.



Εικόνα 1.3: Self-supporting tower στην πλαγιά πάνω από την Κερατέα



β) ιστούς με στήριξη συρματόσχοινων (guyed towers): Είναι ιδανικοί για επίτευξη μεγάλων υψών χρησιμοποιώντας λιγότερο υλικό, όταν δεν υπάρχει περιορισμός χώρου. Επίσης, αντέχουν μεγαλύτερα φορτία αέρα.



Εικόνα 1.4: Guyed tower

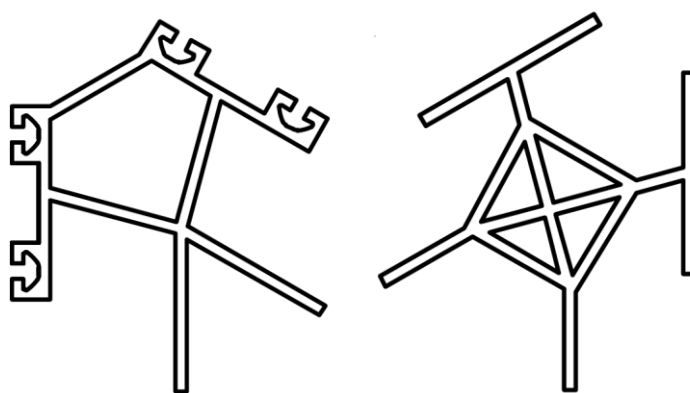
- Του τύπου των διατομών των δοκών : Βάσει των δοκαριών του εμπορίου σε ένα χωροδικτύωμα χρησιμοποιείται συνδυασμός από κοιλοδοκούς και γωνιές (L beams). Σε κάποιες περιπτώσεις, οι κατασκευαστές σχεδιάζουν το δικό τους προφίλ με σκοπό την απλοποίηση κάποιας διαδικασίας, όπως της εγκατάστασης.



Εικόνα 1.5: Ιστός με χρήση L beam



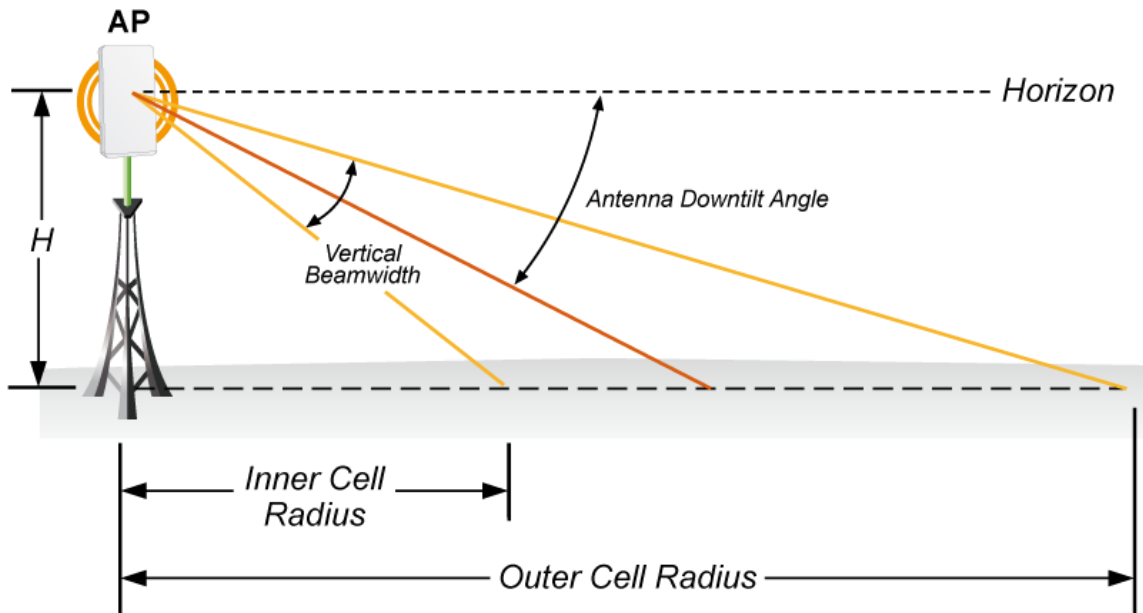
Εικόνα 1.6: Ιστός από τετραγωνικούς κοιλοδοκούς



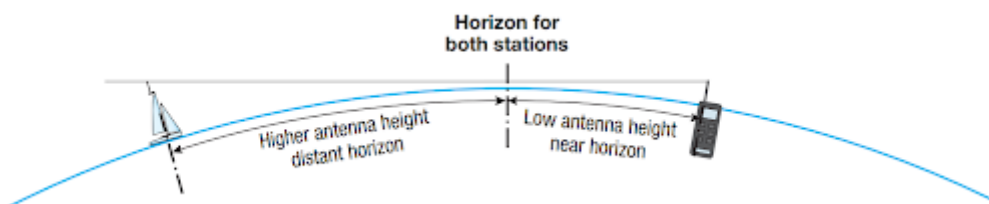
Εικόνα 1.7: Προφίλ δοκαριού από ελληνική εταιρεία κατασκευής ιστών κινητής τηλεφωνίας

### 1.3 Ύψος

Ο στόχος μία τέτοιας κατασκευής είναι να ανυψώνει όσο το δυνατόν περισσότερο τις κεραιές κινητής τηλεφωνίας ώστε να επιτυγχάνεται και μεγαλύτερη κάλυψη. Όπως φαίνεται από στο σχήμα 1.8, αυξάνοντας το  $H$  η διαφορά του ICR (Inner Cell Radius) από το OCR (Outer Cell Radius) μεγαλώνει. Επίσης, μακροσκοπικά εκμεταλλεύεται και η καμπυλότητα της Γης, βοηθώντας την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων (κεραίες).



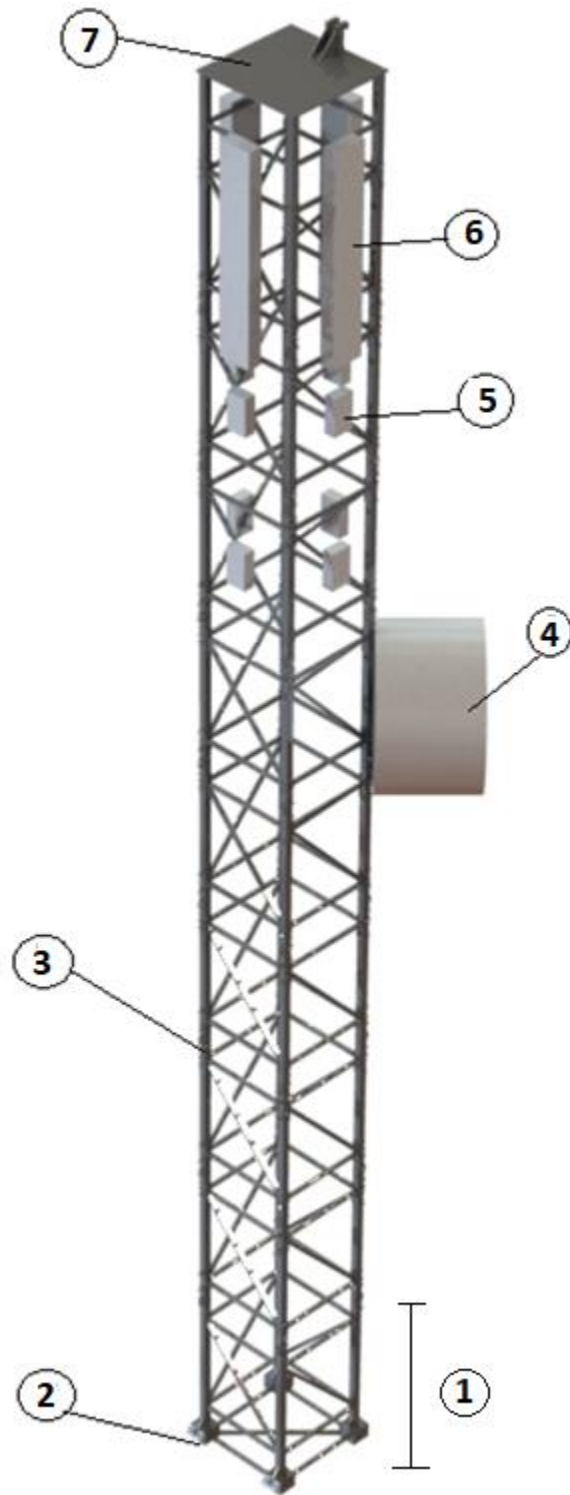
Εικόνα 1.8: Πεδίο κάλυψης κεραίας



Εικόνα 1.9: Ορίζοντας κάλυψης ανάλογα με το ύψος

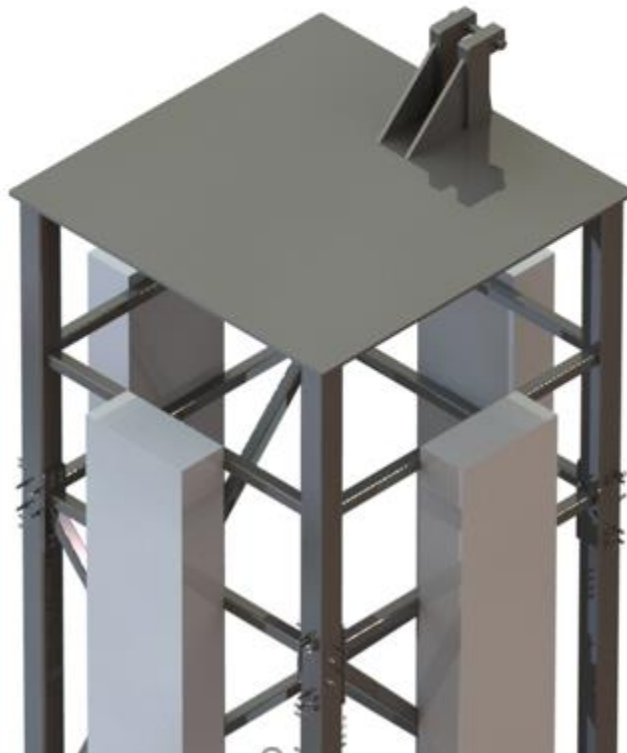
Για τους παραπάνω λόγους οι ιστοί συνήθως τοποθετούνται σε λόφους ή βουνοκορυφές, όταν πρόκειται για επαρχία, ενώ σε αστικές περιοχές στις ταράτσες ψηλών οικημάτων. Το ύψος τους ξεκινάει από τα 5 μέτρα και μπορεί να φτάνει σε ορισμένες περιπτώσεις και τα 60 μέτρα.

1.4 Περιγραφή τυπικής εγκατάστασης ιστού

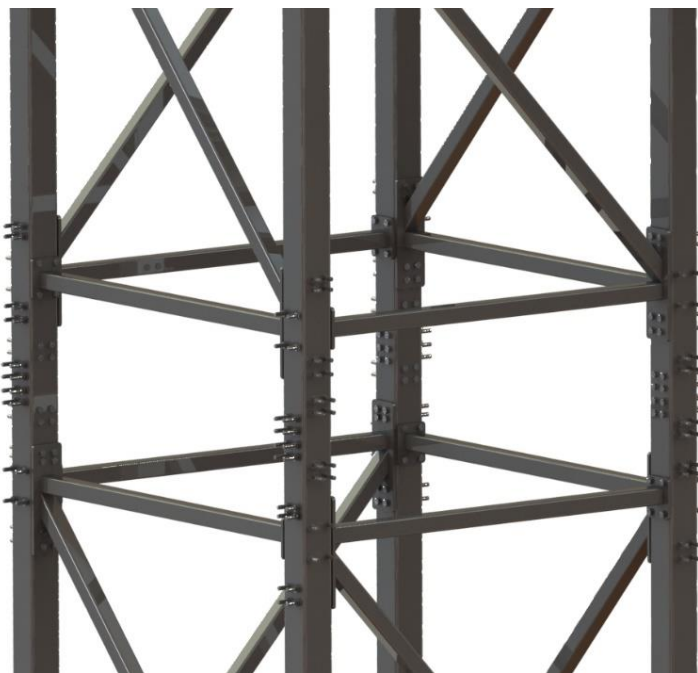


Εικόνα 1.10: Γενική διάταξη ιστού

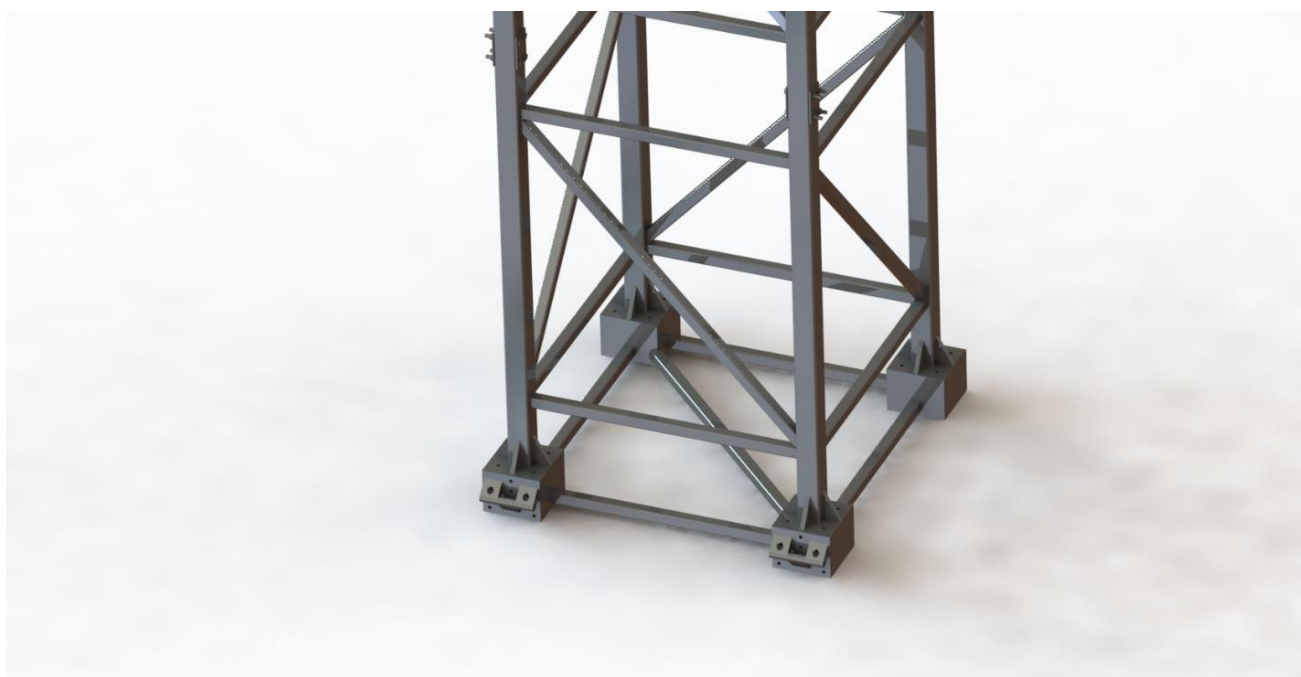
- 1: Ελάχιστο δομικό στοιχείο (2 ή 3 μέτρων) κατασκευής (modular unit)
- 2: Βάση ιστού
- 3: Κοχλιοσυνδέσεις (Bracings)
- 4: Μικροκυματική κεραία με εύρος ρύθμισης συνήθως  $\pm 45^\circ$
- 5: Τα Remote Radio Units (RRUs) ή Remote Radio Heads (RRHs) περιμετρικά τοποθετημένα
- 6: : Οι κεραίες (cellular) περιμετρικά τοποθετημένες
- 7: Στην κορυφή του ιστού κάποιες φορές τοποθετείται μηχανισμός που βοηθάει στην ανάκλισή του



Εικόνα 1.11: Λεπτομέρεια κορυφής ιστού



Εικόνα 1.12: Ενδεικτικές κοχλιοσυνδέσεις



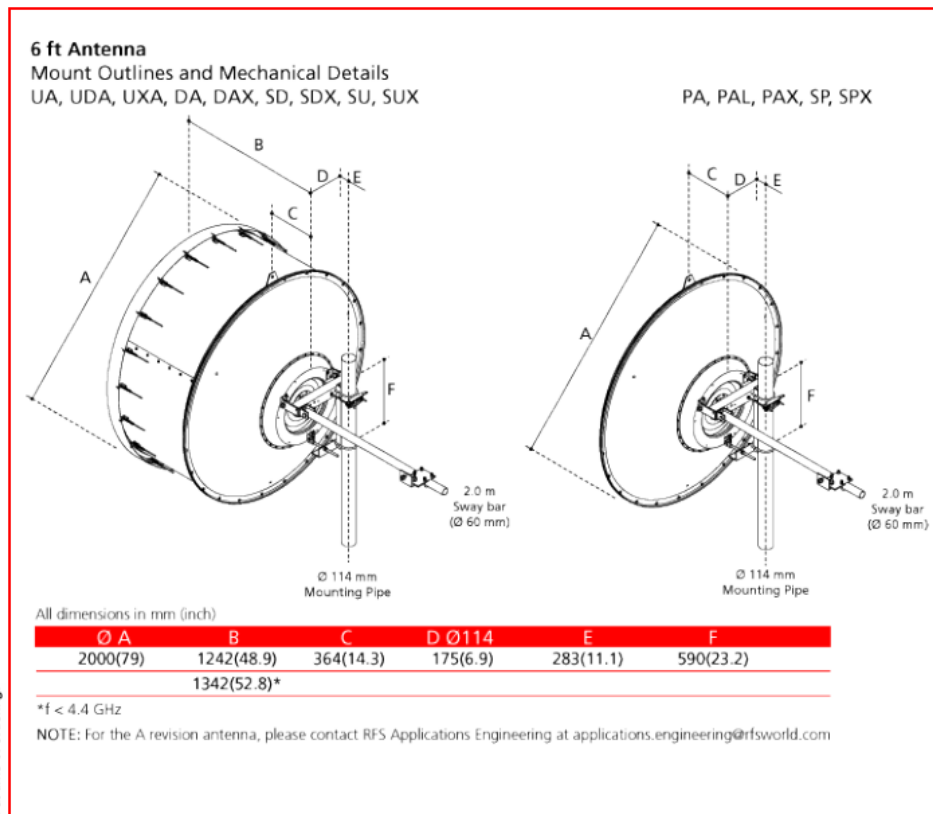
Εικόνα 1.13: Λεπτομέρεια βάσης ιστού

Στις εικόνες 1.14 έως 1.16 φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συστημάτων τηλεπικοινωνιών για εφαρμογές 3G σήματος που εγκαθίστανται στον ιστό και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Mechanical Specifications		Outline Drawing
Dimensions, HxWxD (mm) / (in)	2680x445x192 / 105.5x17.5x7.6	
Shipping Dimensions, HxWxD(mm) / (in)	2950x550x320 / 116.1x21.6x11.6	
Net Weight, Antenna (kg) / (lb)	58.5 / 129.0	
Net Weight, Mounting Kit (kg) / (lb)	6.0 / 13.2	
Shipping Weight (kg) / (lb)	78.5 / 173.1	
Connector Type	16 x 4.3-10 Female	
Connector Location	Bottom	
Radome Material and Color	Fiberglass, Light Grey	
Operational Temperature (°C)	-40 to +60	
Operational Humidity (%)	≤95	
Operational / Max Wind Speed (km/h)	150 / 200	
Wind Load* @150km/h Frontal / Lateral / Rearside (N)	929 / 229 / 1009	

\*Wind Load refer to TIA-222-G standard

Εικόνα 1.14: Χαρακτηριστικά κεραιών Cellular



Εικόνα 1.15: Χαρακτηριστικά κεραιών Micro antenna (100kg) και RRU (25kg)



Εικόνα 1.16: Χαρακτηριστικά RRUs (25kg)

### 1.5 Κανονισμοί/Πρότυπα

Υπάρχουν συγκεκριμένα πρότυπα/κανονισμοί τα οποία καθορίζουν τη σχεδιαστική διαδικασία και παράλληλα προστατεύουν τον εκάστοτε κατασκευαστή από αστοχίες. Αυτά τα πρότυπα είναι:

- TIA-EIA222G, για εγκαταστάσεις στην Αμερική
- Ευρωκώδικας (Eurocode), για ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αν και δεν είναι επαγγελματικού επιπέδου, έχει συμβουλευτεί σε αρκετά σημεία τον Ευρωκώδικα (αναφέρεται όπου αυτό συμβαίνει).

### 1.6 Ερωτήματα

Έχοντας παρουσιάσει αρκετές εφαρμογές, βλέπουμε πώς παρότι υπάρχει μεγάλη γκάμα επιλογών για κάθε περίπτωση, οι κατασκευαστές χωροδικτυωμάτων κινητής τηλεφωνίας βρίσκονται σε σύγχυση για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί γνωστή ελληνική εταιρεία κατασκευής ιστών κινητής τηλεφωνίας η οποία ζήτησε τη βοήθεια του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, μέσω του εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών (MDL), για την κατασκευή ιστού 18 μέτρων για τηλεπικοινωνίες σε χώρα της Νότιας Αμερικής, η οποία μαστίζεται από τυφώνες (ριπές ανέμων που φτάνουν ταχύτητες 150m/sec).



Έτσι, με την βοήθεια του Δρ. Σπιτάς, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ και του κ. Βασιλείου αλλά και από την εμπειρία μου μέσω της πρακτικής μου άσκησης στην συγκεκριμένη εταιρεία, τέθηκαν τα εξής ερωτήματα για τον σχεδιασμό ενός χωροδικτύωματος κινητής τηλεπικοινωνίας, που χρίζουν αποδεδειγμένης απάντησης :

- Ποια είναι η κατάλληλη διατομή που πρέπει να χρησιμοποιηθεί;
- Τί προφίλ δοκαριών είναι το καταλληλότερο;
- Τι υλικό πρέπει να χρησιμοποιηθεί;
- Ποιο θα είναι το ελάχιστο δομικό στοιχείο (μπλοκ) του ιστού;
- Μέχρι τί ύψος ιστού είναι επιτρεπτό, συναρτήσει των αεροδυναμικών φορτίσεων της περιοχής, για την παρούσα εγκατάσταση;
- Πληρούνται οι κανονισμοί;
- Πώς θα γίνουν οι συνδέσεις;
- Πώς θα γίνει η ανάκλιση της κατασκευής;

Τα παραπάνω είναι τα ερωτήματα στα οποία καλείται να απαντήσει η παρούσα διπλωματική εργασία.

### 1.7 Αστοχίες

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες σοβαρές αστοχίες που συμβαίνουν λόγω:

- Έλλειψης τεχνογνωσίας
- Μη συμμόρφωσης στους κανονισμούς
- Αμέλεια καιρικών φαινομένων (κυρίως ανέμων)



Εικόνα 1.16: Αστοχία αλουμινένιων κοιλοδοκών γνωστής ελληνικής εταιρείας κατασκευής ιστών κινητής τηλεφωνίας



Εικόνα 1.17: Αστοχία πυλωνα ανεμογεννήτριας στην Εύβοια, κατά τα ακραία καιρικά φαινόμενα του «Ηφαιστίωνα», στις 09/01/2020



Εικόνα 1.18: Αστοχία πυλωνα ανεμογεννήτριας στην Εύβοια, κατά τα ακραία καιρικά φαινόμενα του «Ηφαιστίωνα», στις 09/01/2020



### High winds win over tower's ability to brace them

December 18, 2009 - Winds estimated to be in excess of 100 mph on December 8 were credited with toppling this 143-foot tall self supporting tower on top of Buck Mountain in Ruidoso, N. Mex. The structure is owned by White Mountain Communications of Roswell.

Carriers on the tower were Alltel Communications, Verizon Wireless, MTD Radio (FM Station) several two way carriers and one LP FM. Restoration work is being done by Greene Tower Services of Tularosa. *Photo Courtesy: Steve Kitchens*

Εικόνα 1.20: Αστοχία ιστού, από αέρα, στη βάση του

## Κεφάλαιο 2: Περιγραφή εργασιών

Η παρούσα διπλωματική σκοπεύει την κατάστρωση μίας βιβλιοθήκης ιστών, βασισμένη σε συγκεκριμένες παραμέτρους προκειμένου να γίνεται ορθή επιλογή μοντέλου. Οι παράμετροι είναι οι εξής:

### 2.1 Κριτήρια επιλογής προδιαγραφών

Σύμφωνα με διασταυρωμένες πηγές έμπειρων Μηχανολόγων Μηχανικών (Δρ. Σπιτάς, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ, Δρ. Τσαπρούνης, Shells & Structures Design Office) αντλήθηκαν οι εξής σημαντικές πληροφορίες, που σχετίζονται με τη βιομηχανία:

- Το κόστος του χάλυβα είναι 0,67€/κιλό.
- Το κόστος των συγκολλητών είναι 70€/μέρα.
- Οι κοιλοδοκοί του εμπορίου έχουν μήκος 6m ή 12m.
- Τα μεταφορικά οχήματα (φορτηγά) έχουν μέγιστο μήκος τα 12m. Σε πιθανή υπέρβαση αυτού του μήκους γίνεται ειδική μεταφορά (επιπλέον κόστος).

Επομένως τα συμπεράσματα που βγαίνουν για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της κατασκευής είναι τα εξής:

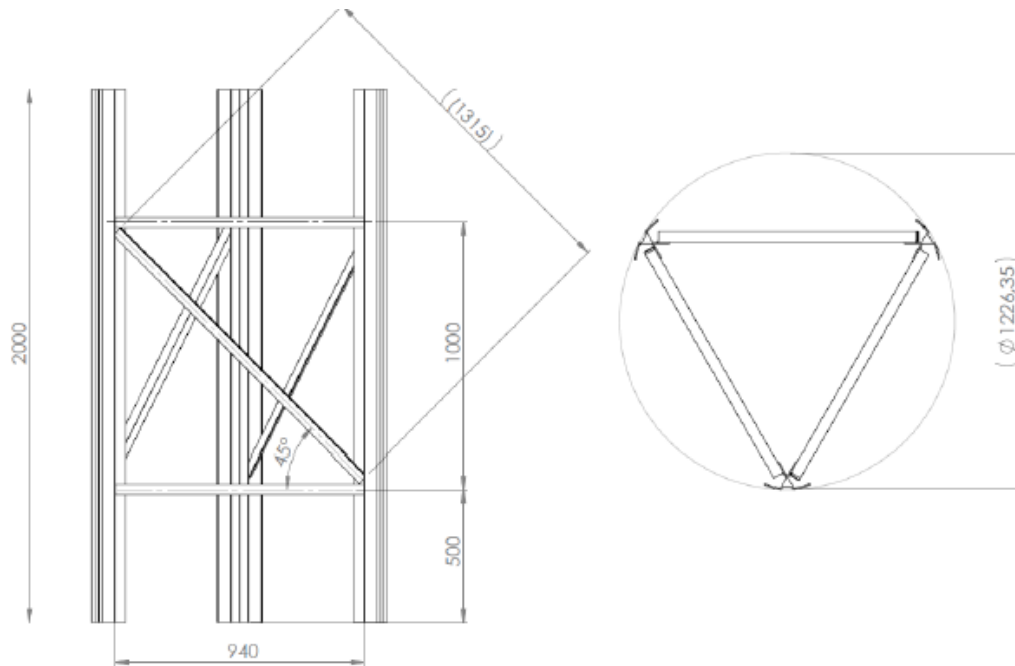
- Εκμετάλλευση του φθηνού υλικού.
- Αποφυγή συγκολλήσεων όπου είναι δυνατόν.
- Χρήση κοιλοδοκών μικρότερων ή ίσων των 6 μέτρων, για μείωση των σκάρτων κομματιών αλλά και τήρηση των μεταφορικών περιορισμών.

### 2.2 Μέγιστο ύψος ιστού

Σύμφωνα με προηγούμενες ερευνητικές και βιομηχανικές μελέτες, που έχουν γίνει στο ΕΣΜ του ΕΜΠ, ο μέσος όρος ιστών που ανεγείρονται στην Ελλάδα φτάνουν τα 18m. Μιας και ο ελλαδικός χώρος είναι κατά κύριο λόγο ορεινός, με ελάχιστες πεδιάδες, η τοποθέτηση των κεραιών κινητής τηλεφωνίας γίνεται σε βουνοκορυφές, προκειμένου να εκμεταλλευτεί το υψόμετρο. Με αυτό τον τρόπο οι ιστοί δεν χρειάζεται να έχουν μεγάλο ύψος, πετυχαίνοντας έτσι και χαμηλότερα κόστη κατασκευής.

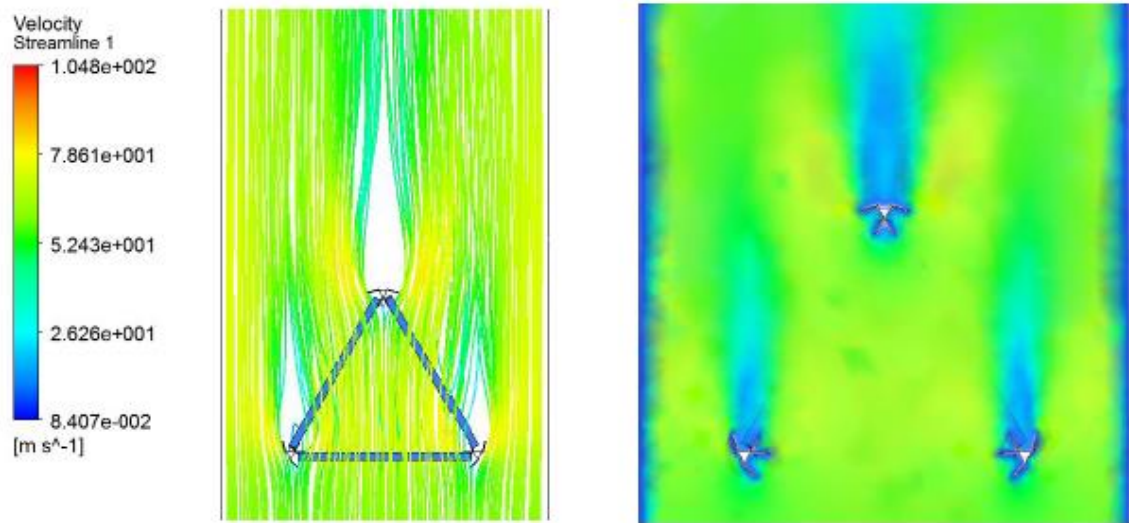
### 2.3 Διατομή ιστού

Η επιλογή είναι μεταξύ τριγωνικής ή τετραγωνικής διατομής ιστού. Η απόφαση βασίστηκε στη μελέτη *“Static study of a 15-meter-high three - dimensional truss structure inside a high velocity air field”* από τον κ.Βασιλείου η οποία έκρινε την τριγωνική διατομή ακατάλληλη σε φορτία ανέμου υψηλών ταχυτήτων. Η προαναφερθείσα μελέτη έγινε πάνω στο μοντέλο που παρουσιάζεται στην εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Μοντέλο που μελετήθηκε από τον κ.Βασιλείου

Το μοντέλο ελέγχθηκε σε αεροδυναμικό φορτίο αέρα ταχύτητας 60 m/sec και εμφάνισε μεγάλες ροπές γύρω από τον κατακόρυφο άξονα Y.



	60 degrees
Fx [N]	-3633.03
Fy [N]	269.41
Fz [N]	89.06
Mx [Nm]	-233.46
My [Nm]	-3633.03
Mz [Nm]	69.33

Εικόνα 2.2: Χειρότερο δυνατό σενάριο

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της ρευστομηχανικής ανάλυσης σε στατική μελέτη ιστού 18m παρατηρήθηκε πολύ μεγάλο βέλος κάμψης (υπερβαίνει τα όρια των αναλύσεων στην περιοχή της ελαστικότητας και απαιτούνται αναλύσεις μεγάλων μετατοπίσεων), γεγονός που θα οδηγήσει την κατασκευή σε καταστροφική αστοχία. Επίσης, παρατηρείται ανισοτροπία ροπών αδράνειας του ιστού στο εγκάρσιο επίπεδο (διατομή κάθετη στο ύψος του). Τέλος, παρατηρείται και χαμηλή στρεπτική δυσκμαψία. Επομένως οι διατομές της συγκεκριμένης βιβλιοθήκης θα αφορούν αποκλειστικά τετραγωνικά μοντέλα.

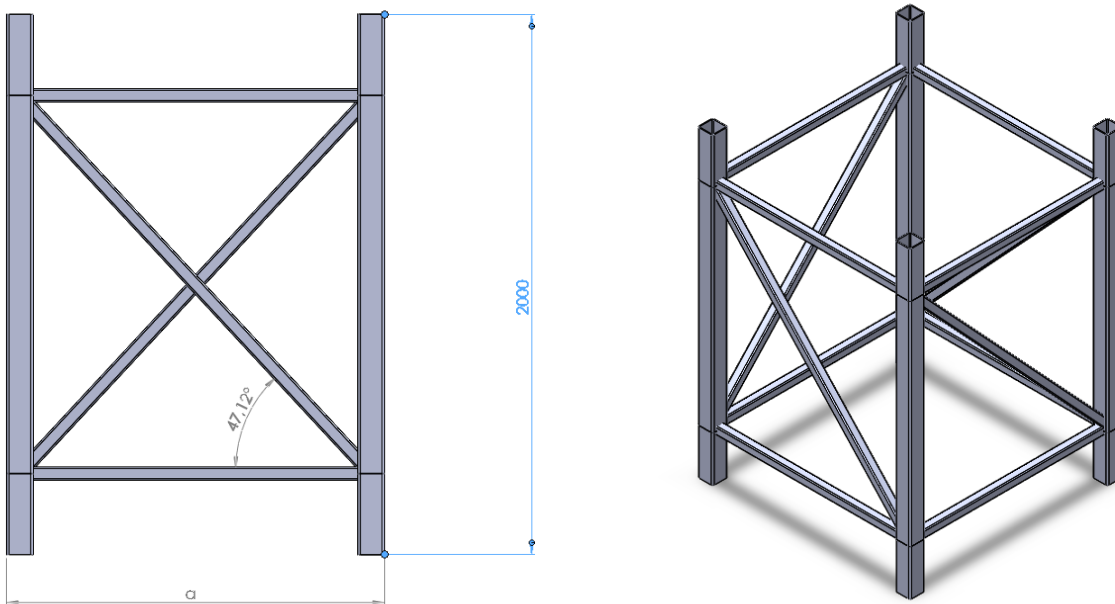
## 2.4 Επιλογή μοντέλων διατομής ιστού

Συνήθως η πρακτική επιλογή του ελάχιστου δομικού στοιχείου στις εφαρμογές είναι τα 2m ή 3m. Τελικώς εκλέγεται να είναι ίσο με 2m προκειμένου να διευκολύνεται η μεταφορά αλλά και η αναρρίχηση των εναέριων τεχνίτων/συντηρητών. Επίσης, όλα τα χωροδικτυώματα θα είναι σταθερής διατομής και όχι αυξανόμενης.

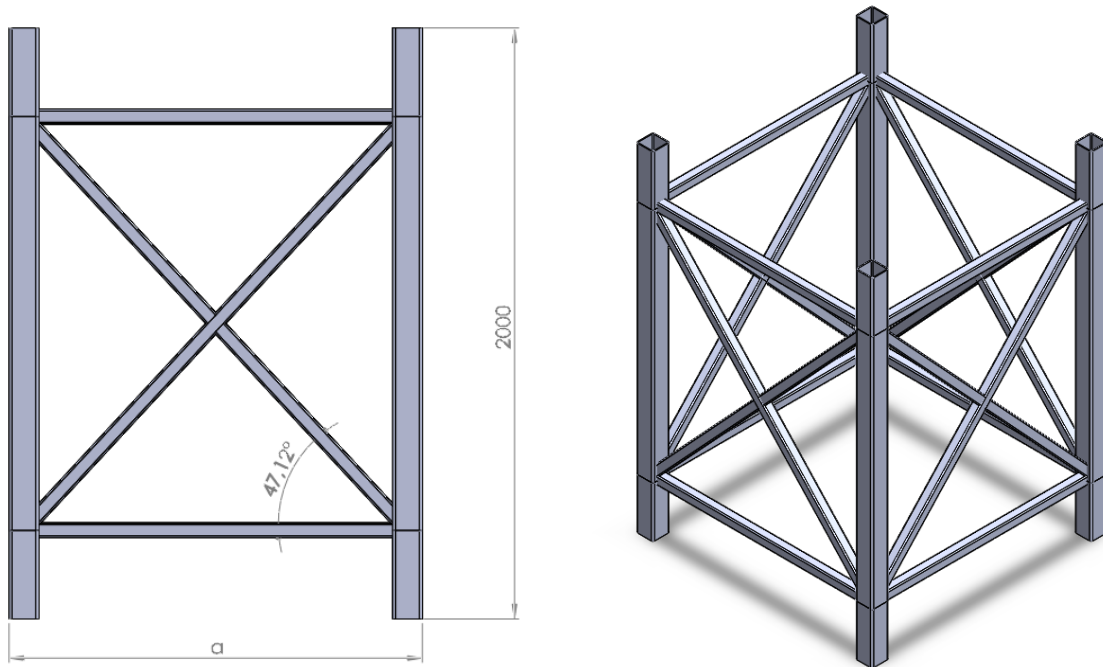
Τα 3 μοντέλα που θα καταρτίσουν τη βιβλιοθήκη, δηλαδή οι διαφορές στην ποσότητα και στη διάταξη των διαδοκίδων, είναι τα 3 συχνότερα που συναντιούνται στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις κεραιών κινητής τηλεφωνίας. Αυτά είναι με:

- Μία διαγώνια διαδοκίδα. (Μοντέλο 1)
- Δύο διαγώνιες συμμετρικά τοποθετημένες διαδοκίδες. (Μοντέλο 2)
- Τέσσερις διαδοκίδες τοποθετημένες στο τετράγωνο πλαίσιο σε σχήμα ρόμβου. (Μοντέλο 3)

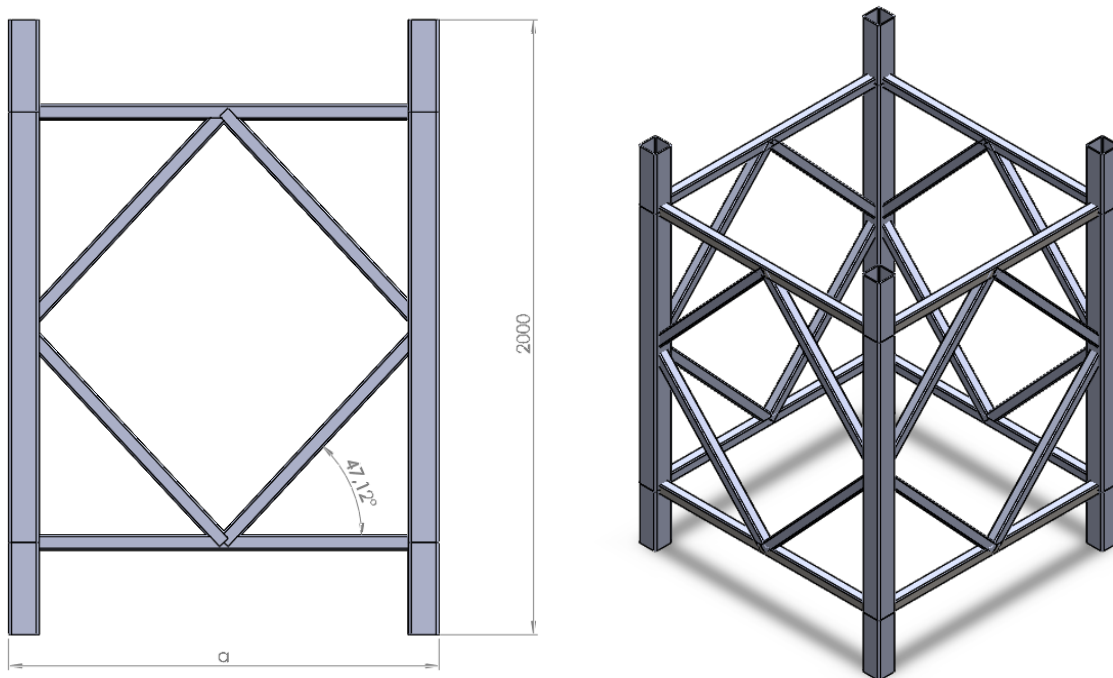
Επίσης, το μήκος της πλευράς της τετραγωνικής διατομής αρχικά τίθεται μεταβλητό, έστω  $a$ , προκειμένου να δοκιμαστούν παραπάνω τιμές.



Εικόνα 2.3: Μοντέλο 1



Εικόνα 2.4: Μοντέλο 2

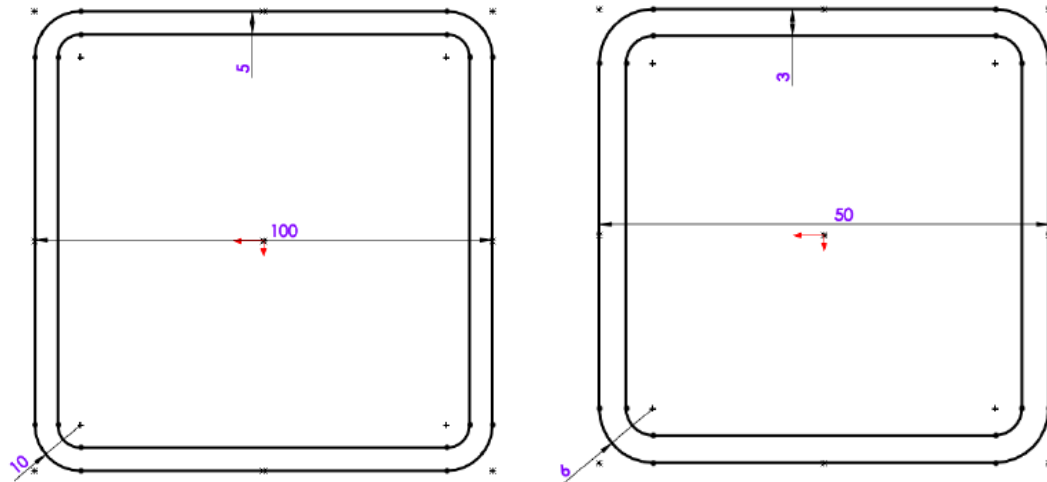


Εικόνα 2.5: Μοντέλο 3



## 2.5 Επιλογή διατομής δοκών

Η επιλογή διατομής γίνεται εξαρχής και θα παραμείνει ως σταθερή επιλογή στη βιβλιοθήκη. Αρχικά, απορρίπτεται οποιαδήποτε ανοιχτή διατομή για λόγους στατικότητας, μιας και είναι λιγότερο στιβαρή σε κάμψη και στρέψη. Επομένως, επιλέγονται κοιλοδοκοί 100x100x5mm κατακόρυφα και 50x50x3mm για τις διαδοκίδες (εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6: Διατομή χρησιμοποιούμενων κοιλοδοκών βιβλιοθήκης (αριστερά για τα κάθετα δομικά στοιχεία, δεξιά για τις διαδοκίδες)

## 2.6 Υλικό κατασκευής

Θα χρησιμοποιηθεί χάλυβας με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στην εικόνα 2.7

Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα	
Μέτρο ελαστικότητας $E$ (Pa)	$2 \cdot 10^{11}$
Λόγος Poisson	0,3
Όριο διαρροής σε εφελκυσμό (MPa)	250

Εικόνα 2.7 Μηχανικές ιδιότητες χρησιμοποιούμενου χάλυβα

## 2.7 Χαρακτηριστικά βιβλιοθήκης

Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να φτιαχτεί μία βιβλιοθήκη η οποία θα περιέχει:

- Όλα τα πολλαπλάσια του 2 ύψη ιστών, μέχρι τα 18m.
- 3 διαφορετικά μοντέλα διάταξης διαδοκίδων,
- 3 διαφορετικές διαστάσεις για το **a**: 0,8m, 1,3m και 2m.
- Ελεγμένα όλα σε μέγιστη ταχύτητα ανέμου 40 m/sec (144 km/h), το οποίο αντιστοιχεί σε ριπή ανέμου σε τυφώνα.
- Αποκλειστική χρήση κοιλοδοκών 100x100x5mm (κάθετα) και 50x50x3mm (διαδοκίδες).

Σταθερά: $u_{max}$ , $h_{max}$	Μοντέλα διάταξης διαδοκίδων
Διαστάσεις <b>a</b> : <ul style="list-style-type: none"><li>• 0,8m</li><li>• 1,3m</li><li>• 2m</li></ul>	Έγκριση/απόρριψη μοντέλου

Εικόνα 2.8: Συνοπτική μορφή βιβλιοθήκης

## Κεφάλαιο 3: Υπολογισμοί δικτυωμάτων

### 3.1 Πλαίσιο υπολογισμών

Σύμφωνα με τον ευρωκώδικα (EC) [2], τα φορτία που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι τα εξής:

- i. Φορτίσεις του κατασκευαστή (π.χ. κεραίες).
- ii. Φορτίσεις αέρα ( $W$ ).
- iii. Σταθερά φορτία (Dead Loads) της κατασκευής, όπως είναι η ίδια της η μάζα.
- iv. Δυναμικές φορτίσεις σε σεισμό.

Για το i έως iii απαιτείται στατική μελέτη, ενώ για το iv δυναμική.

Ο ευρωκώδικας [2], για την ακραία κατάσταση λειτουργίας (Ultimate Limit State), προτείνει τους εξής συνδυασμούς φορτίσεων

- A.  $C1 = 1,35DL + 1,5W$  (Στατική ανάλυση)
- B.  $C2 = 1,35DL$  (Στατική ανάλυση)
- C.  $C3 = DL + Q_x + 0,3Q_y$ ,  
 $Q_x, Q_y$ : οριζόντιες συνιστώσες φορτίσεων σεισμού (Δυναμική ανάλυση)

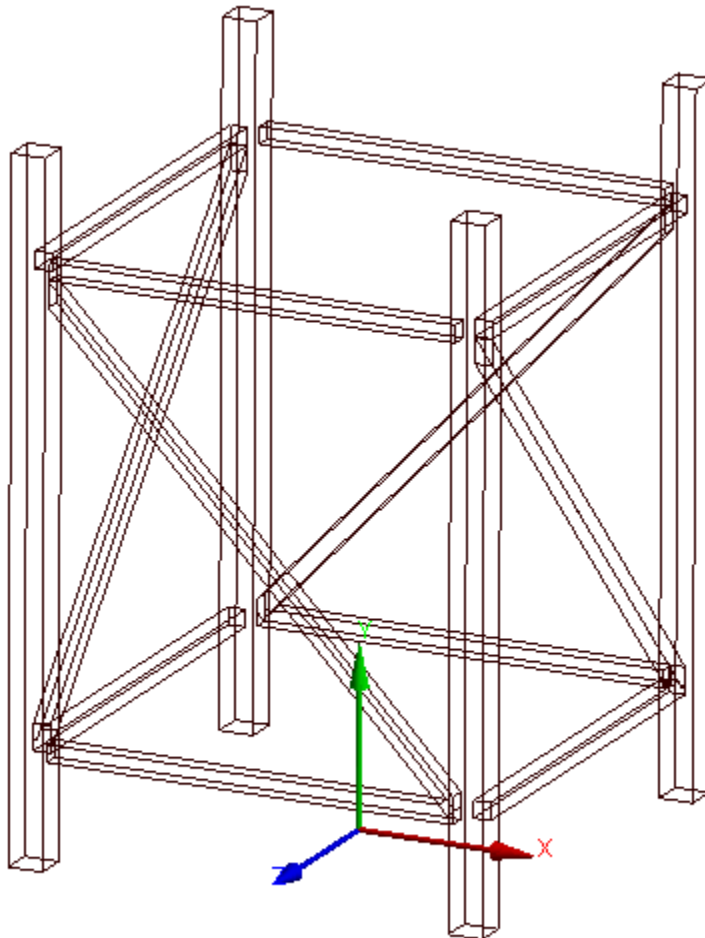
Επίσης, ο ευρωκώδικας [5, 6], χωρίζει τις κοχλιοσυνδέσεις σε 3 κατηγορίες:

- **A:** Κλασικός πείρος.
- **B:** Στην ULS υπάρχει τριβή ολίσθησης.
- **C:** Στην ULS δεν υπάρχει τριβή ολίσθησης (Προένταση ίση με το 0,8 του ULS).

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα γίνει χρήση του συνδυασμού C1 και C3, ενώ οι κοχλιοσυνδέσεις θα είναι τύπου C.

### 3.2 Ρευστομηχανική ανάλυση μέσω υπολογιστή (CFD: Computational Fluid Dynamics)

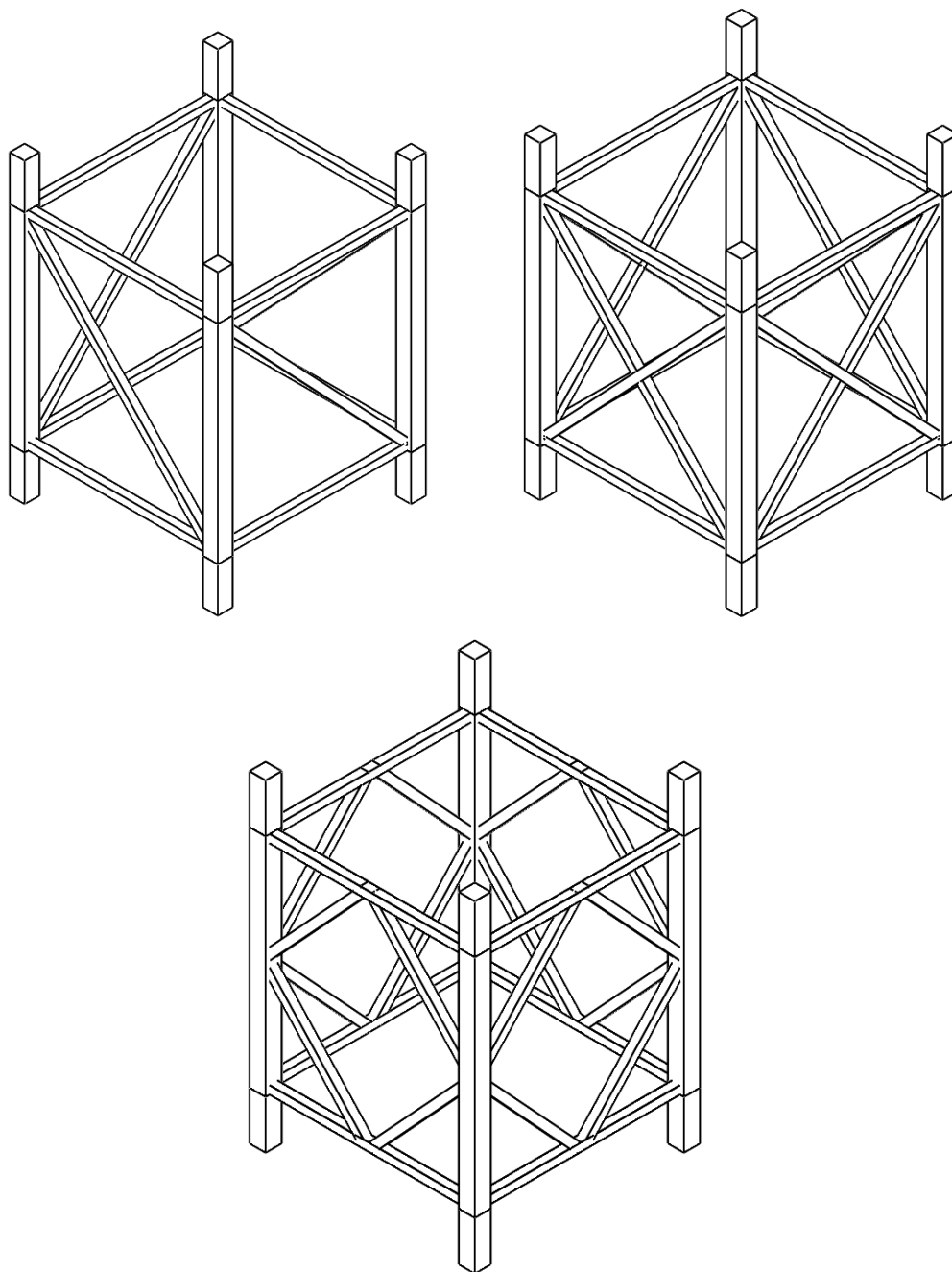
Γίνεται χρήση του προγράμματος ANSYS V.19(CFX), προκειμένου να υπολογιστούν οι ασκούμενες δυνάμεις στους ιστούς, ως αποτέλεσμα του πεδίου αέρος. Η ανάλυση γίνεται κατά τον άξονα X, μιας και η διατομή των ιστών είναι συμμετρική, και μετρούνται δυνάμεις και ροπές ως προς το σύστημα συντεταγμένων, το οποίο φαίνεται στην εικόνα 3.1. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται όταν θεωρείται πως πάνω στον ιστό υπάρχουν κεραιές (cellular ή micro antenna) ή RRU. Η μέγιστη ταχύτητα ανέμου ορίζεται ίση με  $u_{max} = 1,5 * 40 = 60 \text{ m/sec}$ , σύμφωνα με τον ευρωκώδικα [2]. Στα επόμενα κεφάλαια περιγράφεται η διαδικασία.



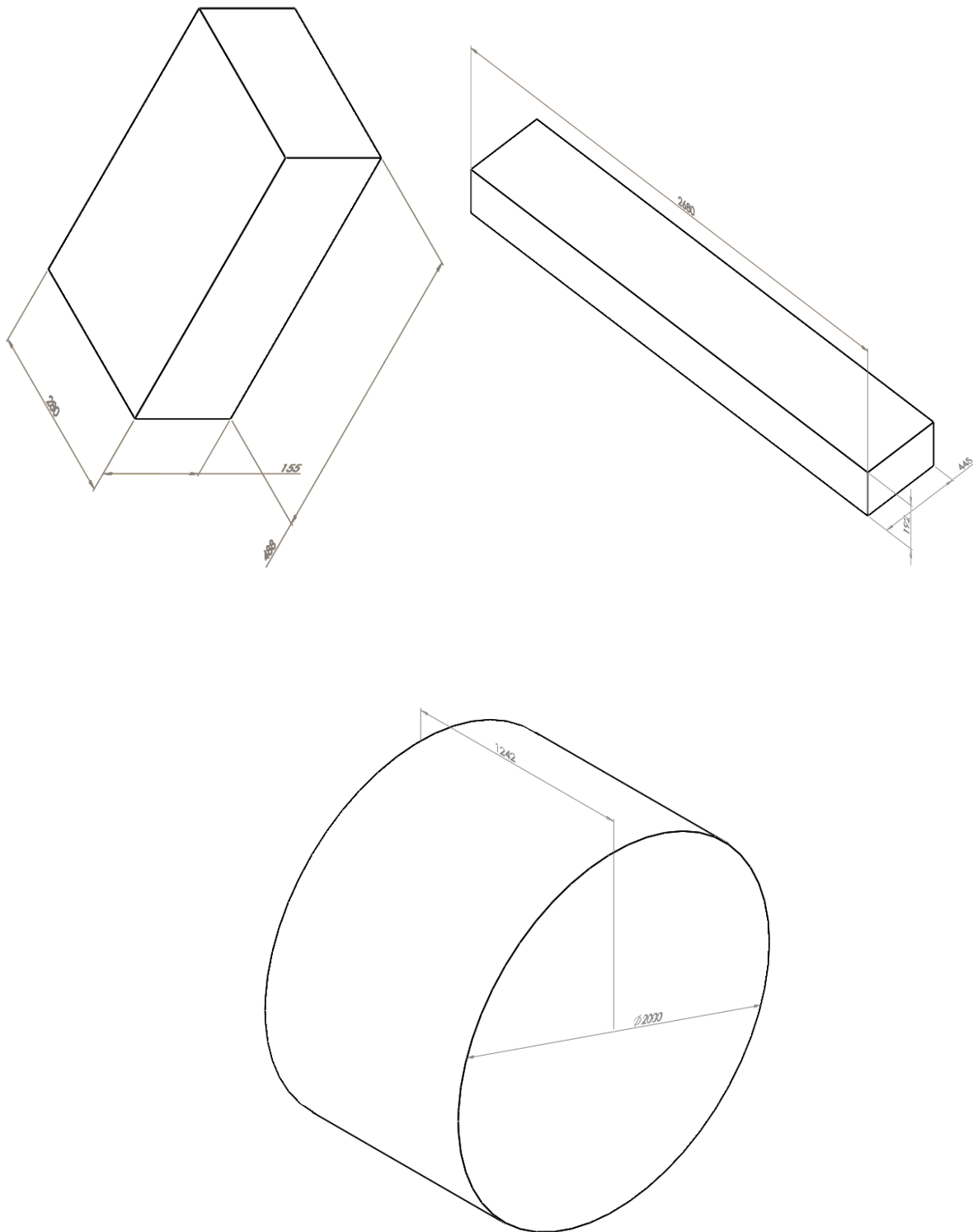
Εικόνα 3.1: Θέση συστήματος συντεταγμένων

### 3.2.1 Μοντέλα ιστών και περιφερειακών

Για όλες τις αναλύσεις χρησιμοποιούνται τα μοντέλα με μήκος πλευράς  $a= 1,3m$ . Οι κοιλοδοκοί των 2m δομικών μονάδων απλοποιήθηκαν, δηλαδή οι κοιλότητες έγιναν γωνίες και στο κενό προστέθηκε υλικό, προκειμένου να ολοκληρωθεί συντομότερα η διαδικασία κατασκευής του πλέγματος. Παρόμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τα περιφερειακά των δικτυωμάτων. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 3.2: Μοντέλο 1, 2, 3 με τη σειρά που παρουσιάζονται από αριστερά προς τα δεξιά.

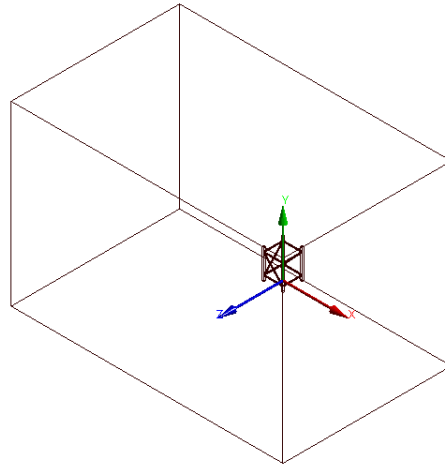


Εικόνα 3.3: Απλοποιημένα μοντέλα κεραιών και RRU

### 3.2.2 Διαδικασία υπολογισμών για το μοντέλο 1

- Οριακές συνθήκες

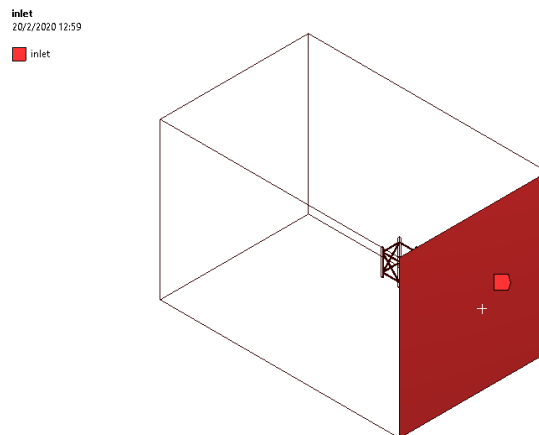
Σχεδιάζεται ένα ορθογωνικό πλαίσιο αέρα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.4. Το μήκος προς την έξοδο είναι μεγαλύτερο προκειμένου η ροή του αέρα να επανέλθει στην αρχική της κατάσταση, αφού περάσει από τον ιστό, προκειμένου να ληφθούν σωστά αποτελέσματα.



Εικόνα 3.4: Πλαίσιο αέρα

Ορίζονται ως εξής:

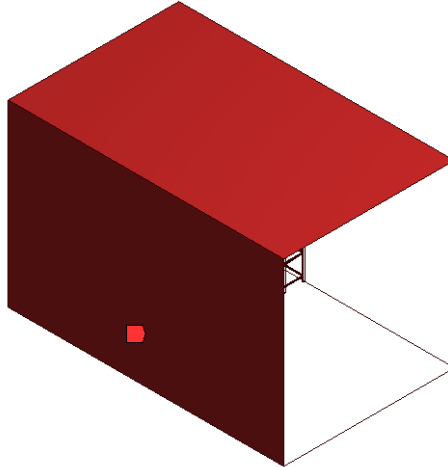
- ✓ Είσοδος (inlet): Ορίζεται αρχική ταχύτητα ροής αέρα ίση με  $V_x = 60$  m/sec κατά τον X άξονα ( $V_y = V_z = 0$ ).



Εικόνα 3.5: Inlet

- ✓ Τοίχος (Wall): Ορίζεται ως ελεύθερη ολίσθηση (free slip wall) η οριακή συνθήκη ρευστού-τοίχου.

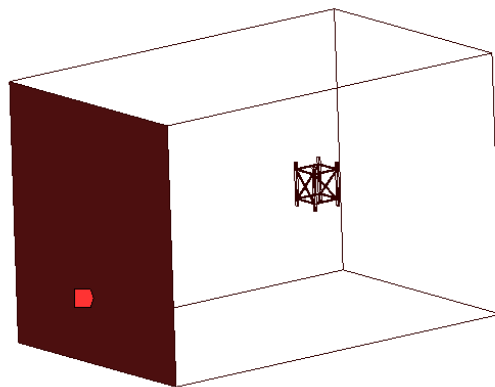
wall  
20/2/2020 13:00  
■ wall



Εικόνα 3.6: Wall

- ✓ Έξοδος (Outlet): Ορίζεται η ατμοσφαιρική πίεση (1 atm) ως πίεση εξόδου του ρευστού.

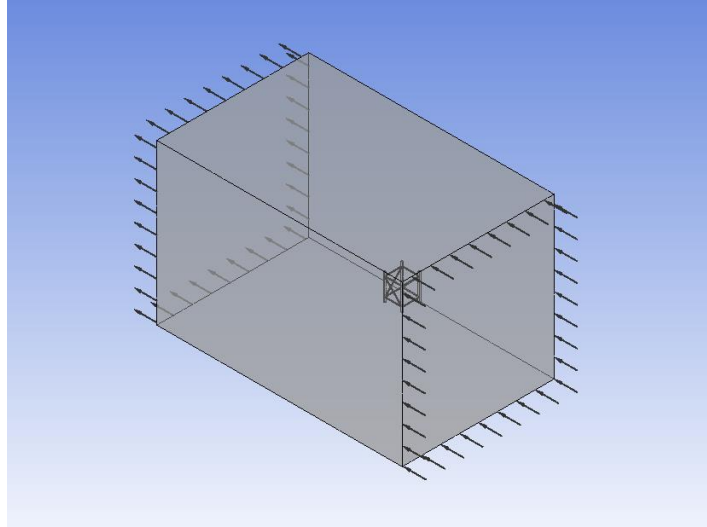
outlet  
20/2/2020 13:01  
■ outlet



Εικόνα 3.7: Outlet

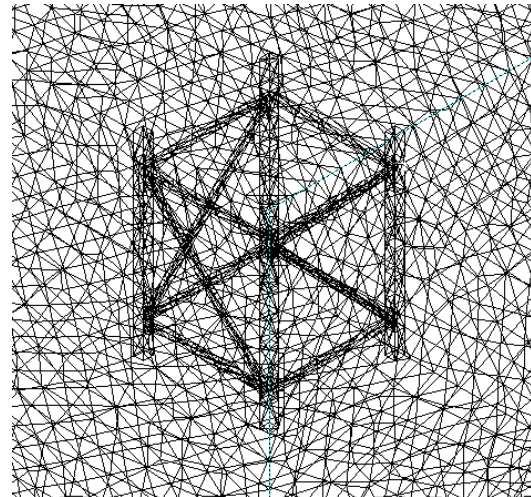
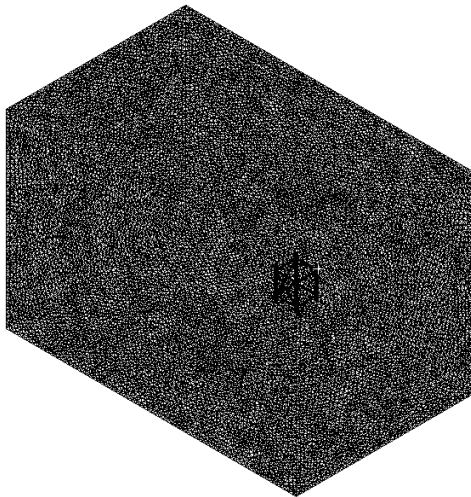


- ✓ Ιστός (Cell): Ορίζεται χωρίς ολίσθηση (no slip wall) η οριακή συνθήκη ρευστού-ιστού.



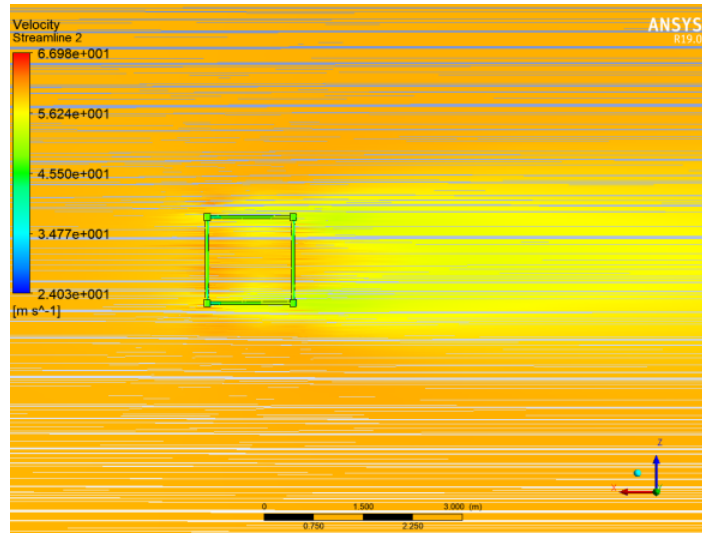
Εικόνα 3.8: Cell

- Πλέγμα

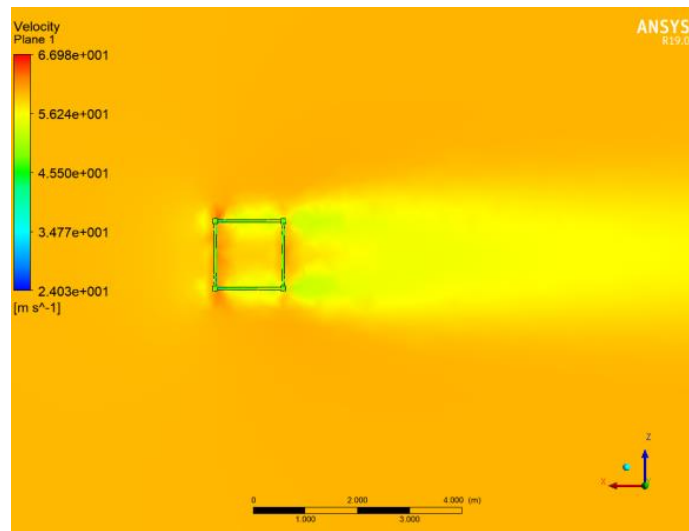


Εικόνα 3.9: Αριθμός στοιχείων: 486355

- Αποτελέσματα  
 Α. Ιστός (Cell)



Εικόνα 3.10: Γραμμές ροής



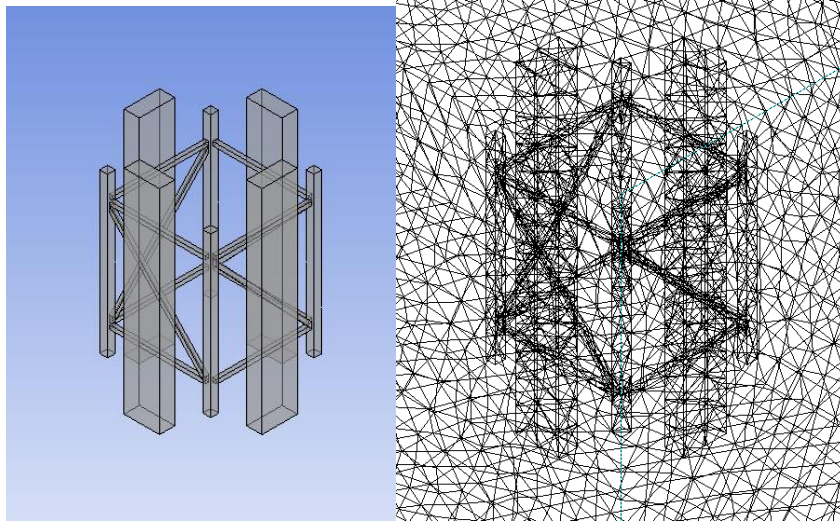
Εικόνα 3.11: Κατανομή ταχυτήτων και όγκου (Volume Rendering)

$U=60\text{m/sec}$	Cell
$F_x (N)$	-1657,5
$F_y (N)$	13,7384
$F_z (N)$	0,491977
$M_x (Nm)$	12,6812
$M_y (Nm)$	-1140,22
$M_z (Nm)$	-1192,06

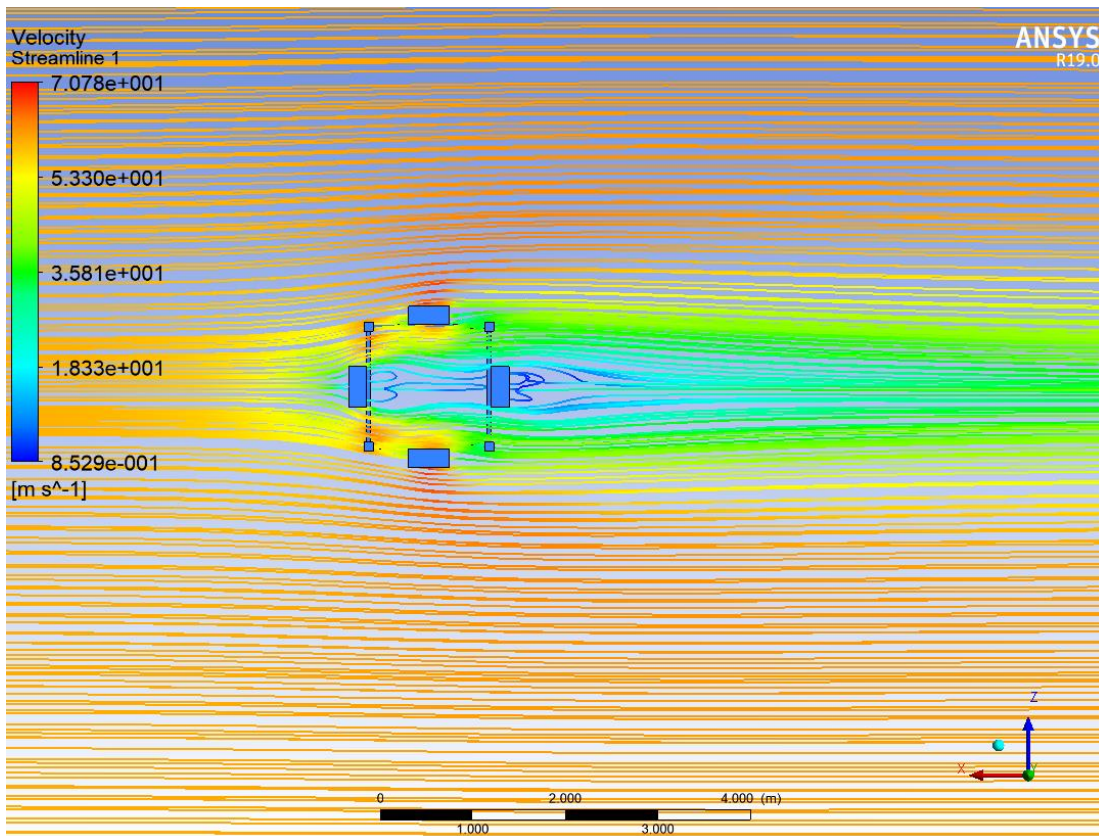
Εικόνα 3.12: Πινακοποιημένα αποτελέσματα

## B. Ιστός με κεραίες (Cell + Cellular)

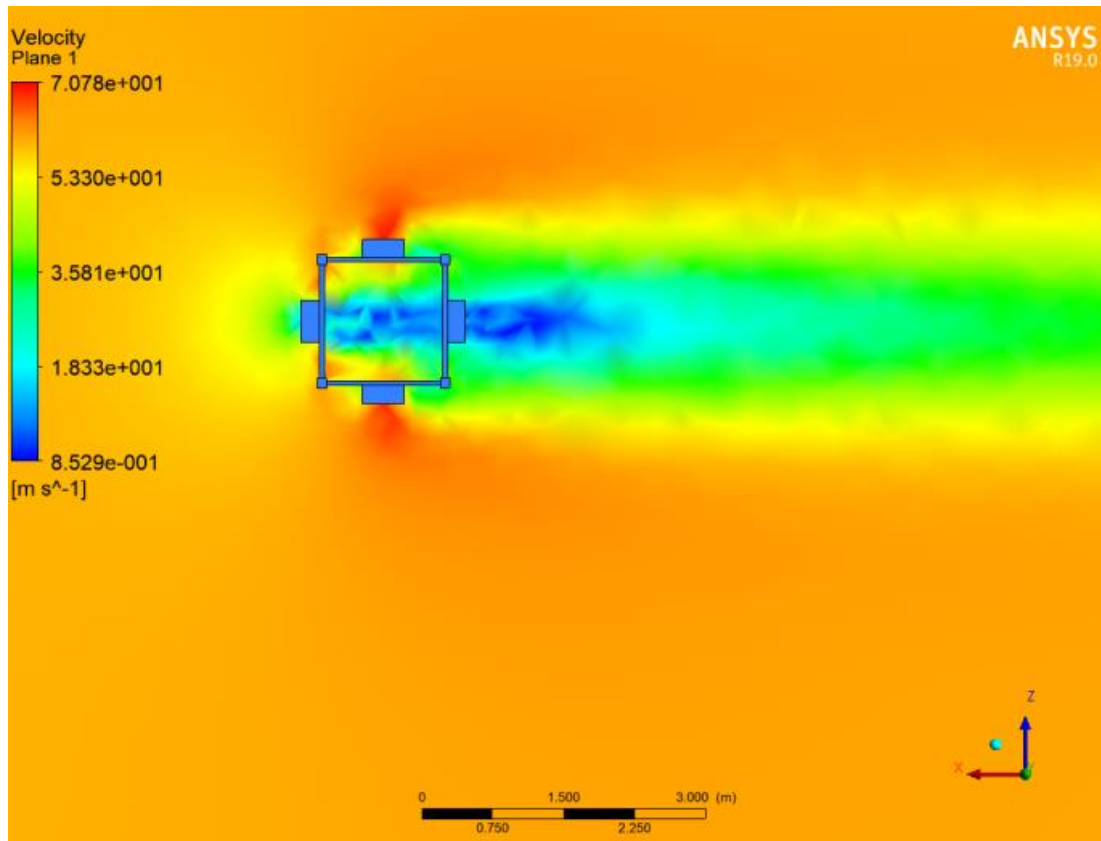
Μελετάται μόνο η συνδεσμολογία με την τοποθέτηση 4 κεραιών περιμετρικά. Υπάρχει και η περίπτωση να είναι τοποθετημένες 4+4 κεραιές στις γωνίες του ιστού, αλλά δεν μελετάται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 3.13: Πλέγμα



Εικόνα 3.14: Γραμμές ροής



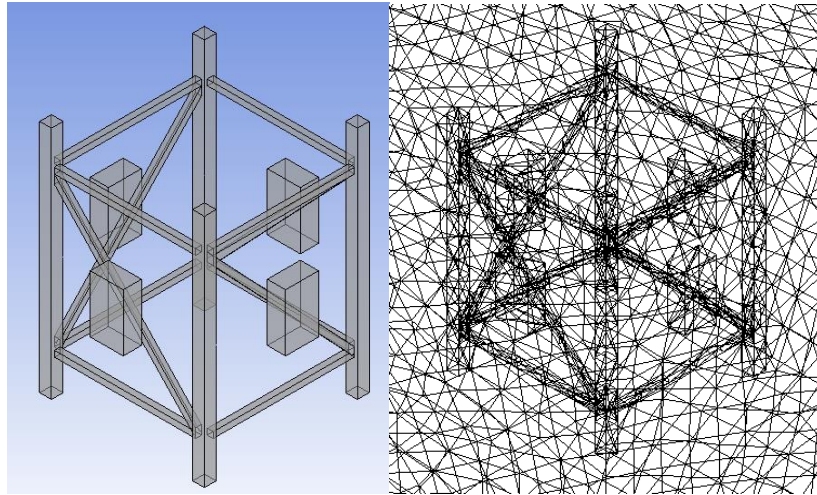
Εικόνα 3.15: Κατανομή ταχυτήτων και όγκου (Volume Rendering)

<i>U=60m/sec</i>	<i>Cell+antenna</i>
<i>F<sub>x</sub> (N)</i>	-7355,69
<i>F<sub>y</sub> (N)</i>	-11,0537
<i>F<sub>z</sub> (N)</i>	123,819
<i>M<sub>x</sub> (Nm)</i>	-51,4203
<i>M<sub>y</sub> (Nm)</i>	-5051,78
<i>M<sub>z</sub> (Nm)</i>	-5217,79

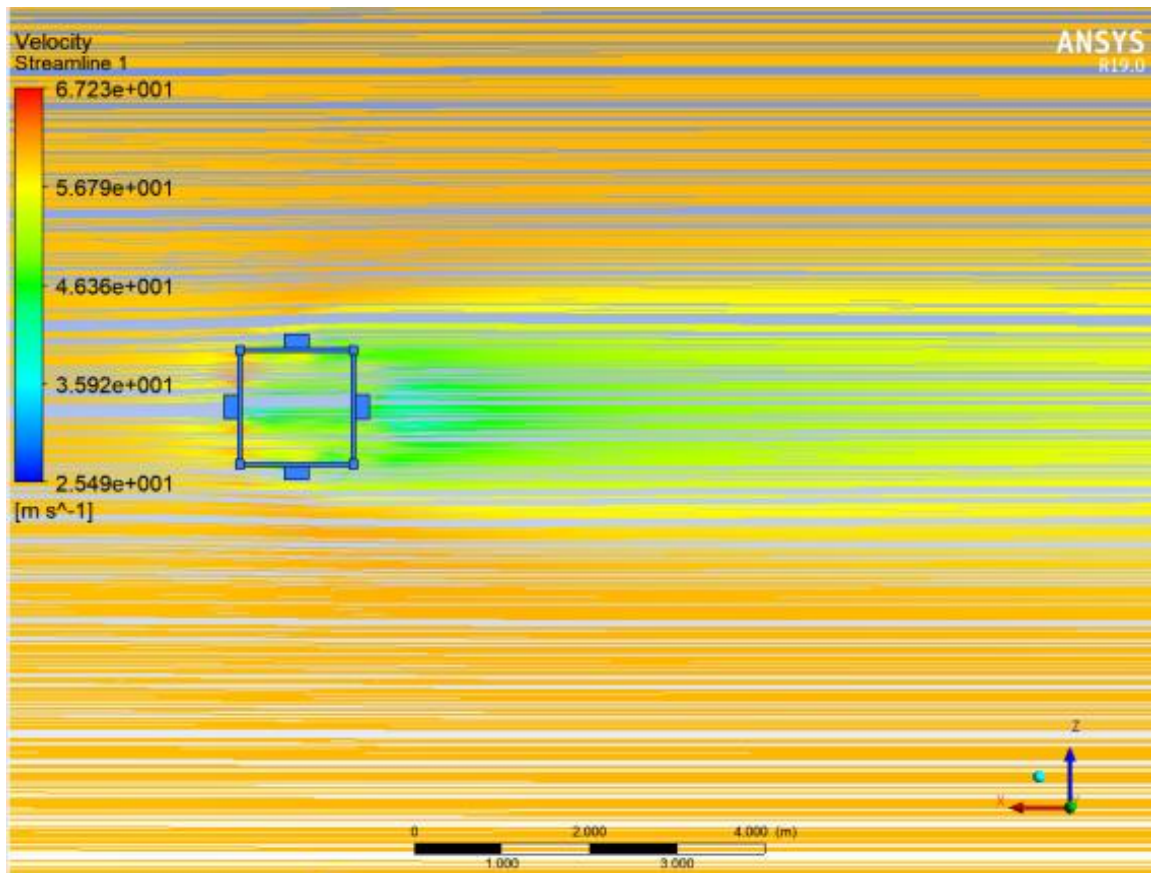
Εικόνα 3.16: Πινακοποιημένα αποτελέσματα

### C. Ιστός με RRU (Cell + RRU)

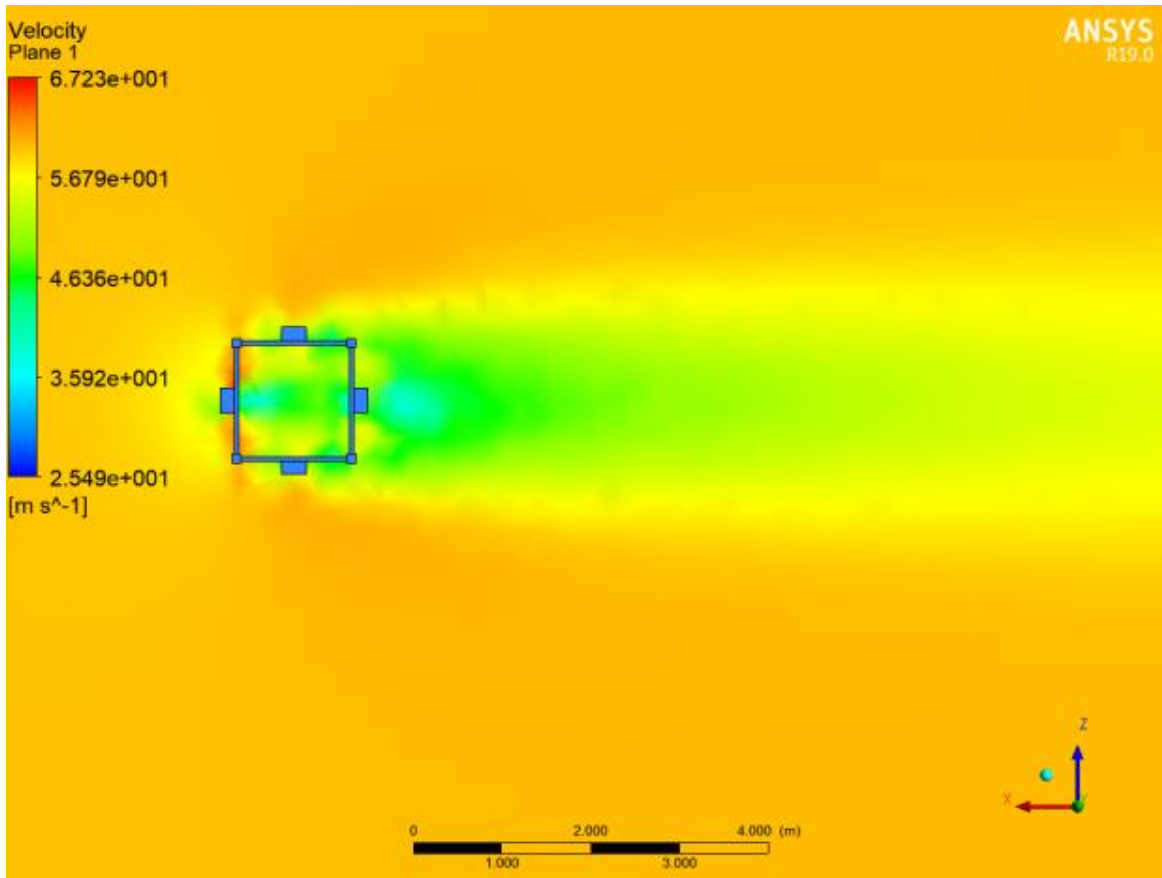
Μελετάται μόνο η συνδεσμολογία με την τοποθέτηση 4 RRU περιμετρικά. Υπάρχει και η περίπτωση να είναι τοποθετημένα 4+4 RRU στις πλευρές του ιστού, αλλά δεν μελετάται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 3.17: Πλέγμα



Εικόνα 3.18: Γραμμές ροής



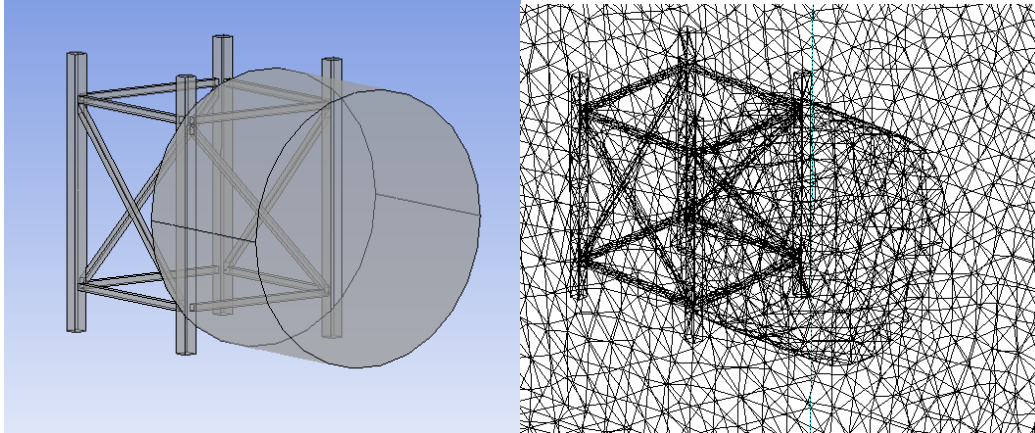
Εικόνα 3.19: Κατανομή ταχυτήτων και όγκου (Volume Rendering)

$U=60\text{m/sec}$	$Cell+RRU$
$F_x (N)$	-2437,75
$F_y (N)$	7,01487
$F_z (N)$	-28,1089
$M_x (Nm)$	30,6791
$M_y (Nm)$	-1727,36
$M_z (Nm)$	-1778,74

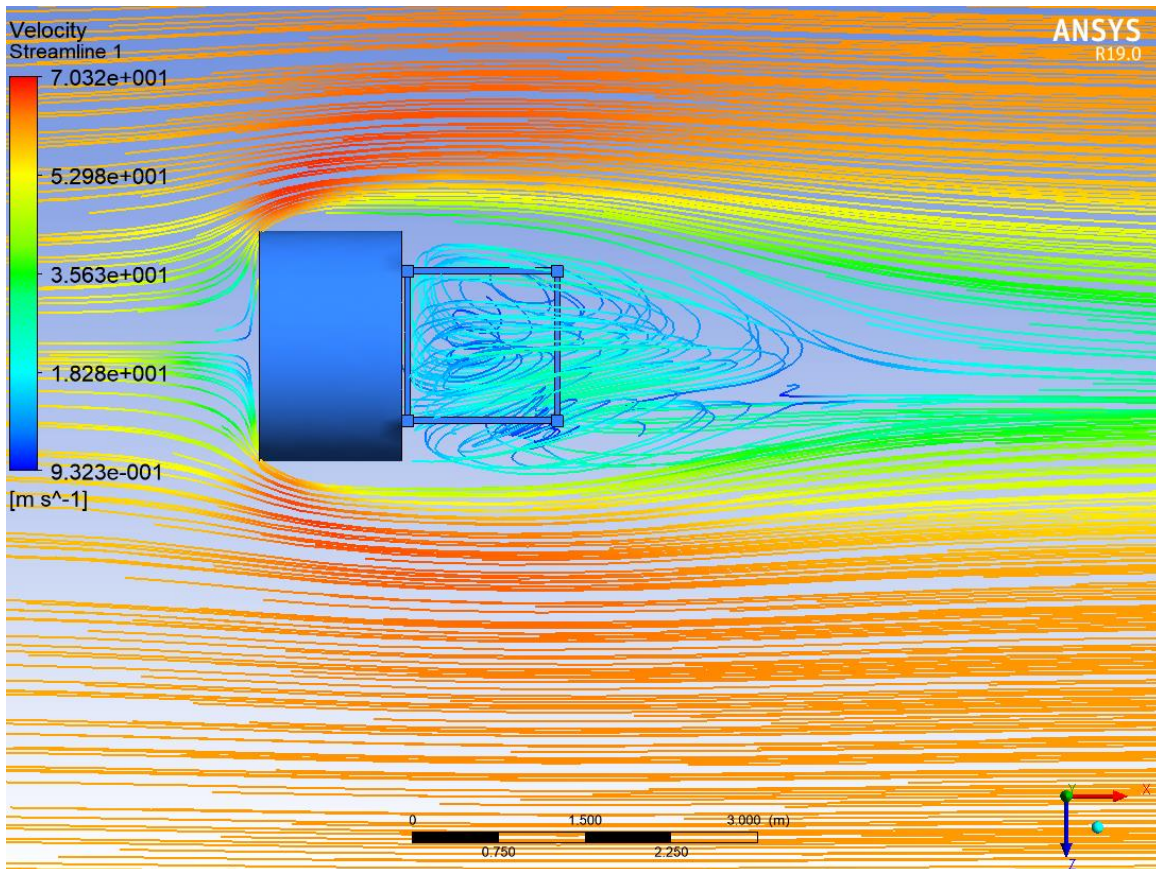
Εικόνα 3.20: Πινακοποιημένα αποτελέσματα

D. Ιστός με κεραία (Cell + micro antenna)

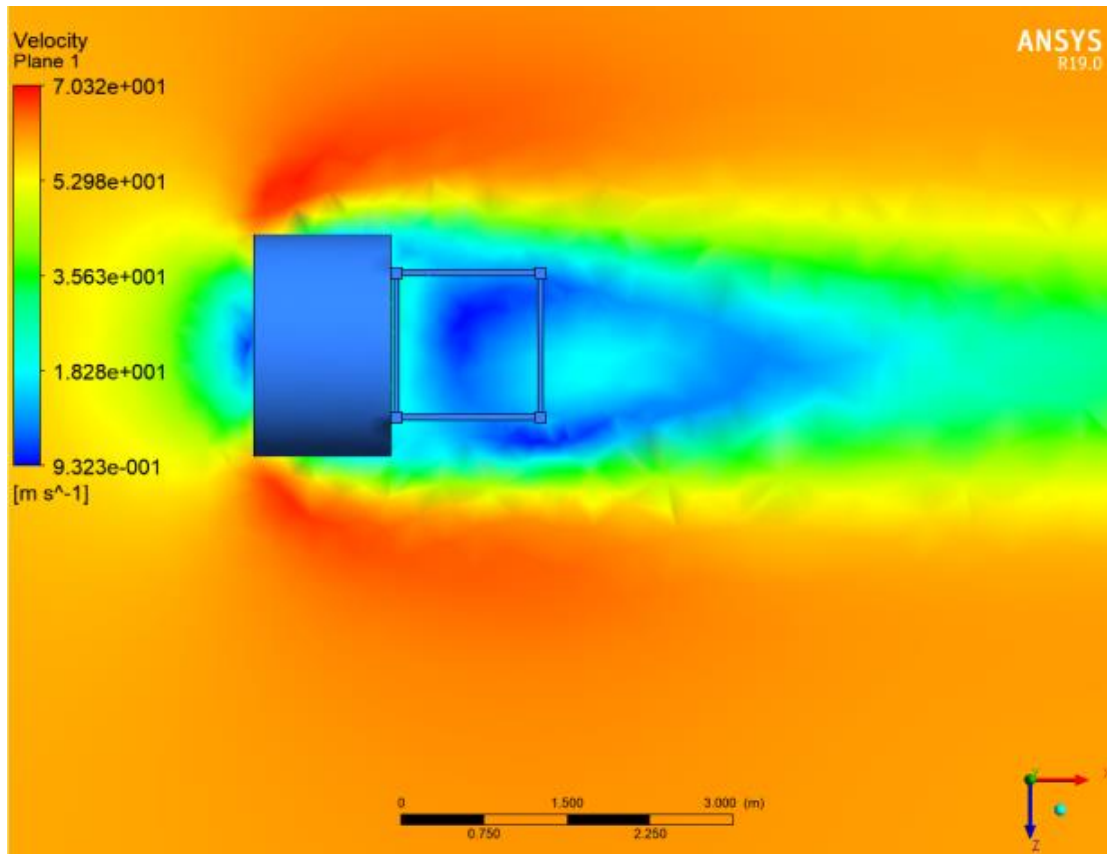
Στην πραγματικότητα η κεραία μικροκυμάτων τοποθετείται στη γωνία του ιστού προκειμένου να μπορεί να περιστρέφεται κατά  $\pm 45^\circ$ . Στην ρευστομηχανική ανάλυση τοποθετείται όπως φαίνεται στην εικόνα 3.19 προκειμένου να ληφθούν αποτελέσματα για το χειρότερο δυνατό σενάριο.



Εικόνα 3.21: Πλέγμα



Εικόνα 3.22: Γραμμές ροής



Εικόνα 3.23: Κατανομή ταχυτήτων και όγκου (Volume Rendering)

$U=60\text{m/sec}$	$Cell+micro$
$F_x (N)$	6445,71
$F_y (N)$	-71
$F_z (N)$	30,6142
$M_x (Nm)$	319,56
$M_y (Nm)$	24921
$M_z (Nm)$	-8093,21

Εικόνα 3.24: Πινακοποιημένα αποτελέσματα



### 3.2.3 Αποτελέσματα μοντέλων 2 και 3

Ακολουθείται παρόμοια διαδικασία όπως στο κεφάλαιο 3.2.2 για το Μοντέλο 1. Στο Παράρτημα Α βρίσκονται εικόνες από την ρευστομηχανική ανάλυση των μοντέλων 2 και 3. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

#### ✓ ΜΟΝΤΕΛΟ 2

<i>U=60m/sec</i>	<i>Cell</i>	<i>Cell+antenna</i>	<i>Cell+RRU</i>	<i>Cell+micro</i>
<i>F<sub>x</sub> (N)</i>	2037,89	7349,52	2703,6	-6124,58
<i>F<sub>y</sub> (N)</i>	6,91135	-3	6,39521	-26,2304
<i>F<sub>z</sub> (N)</i>	-29	-10	23	-2
<i>M<sub>x</sub> (Nm)</i>	31	20,2167	-17	16
<i>M<sub>y</sub> (Nm)</i>	1372,66	5141,99	1888	-4742,92
<i>M<sub>z</sub> (Nm)</i>	1454,94	5189,47	1.964	-4624,11

Εικόνα 3.25: Πινακοποιημένα αποτελέσματα

#### ✓ ΜΟΝΤΕΛΟ 3

<i>U=60m/sec</i>	<i>Cell</i>	<i>Cell+antenna</i>	<i>Cell+RRU</i>	<i>Cell+micro</i>
<i>F<sub>x</sub> (N)</i>	-1984,05	7354,22	1448,13	-6549,72
<i>F<sub>y</sub> (N)</i>	-5	7	-47	18
<i>F<sub>z</sub> (N)</i>	15	-3	-69	-8
<i>M<sub>x</sub> (Nm)</i>	12	45	-54,461	78
<i>M<sub>y</sub> (Nm)</i>	-1385,57	5177,29	2582,36	-4598,1
<i>M<sub>z</sub> (Nm)</i>	-1387,62	5095,77	-1721,87	-4600,79

Εικόνα 3.26: Πινακοποιημένα αποτελέσματα

### 3.2.4 Σχόλια της ρευστομηχανικής ανάλυσης

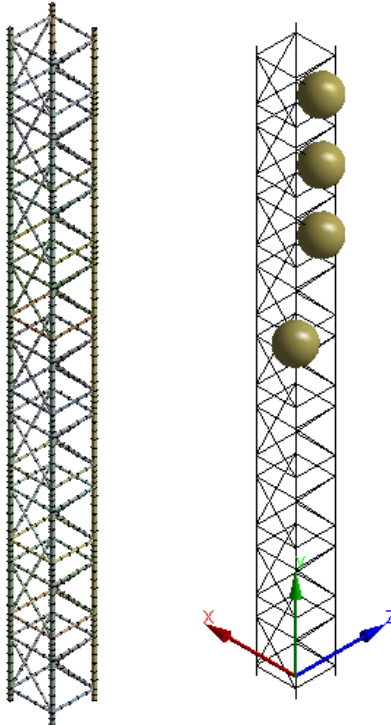
Όπως είναι φανερό, τα αποτελέσματα των τριών διαφορετικών μοντέλων έχουν μικρές αποκλίσεις, κυρίως λόγω της διαφοράς της εκτεθειμένης επιφάνειας στον άνεμο. Για τους υπολογισμούς της στατικότητας των 2m δομικών στοιχείων θα χρησιμοποιηθούν μόνο οι δυνάμεις F<sub>x</sub>, μιας και οι F<sub>z</sub> και F<sub>y</sub> θεωρούνται αμελητέες συγκριτικά με την F<sub>x</sub>.

### 3.3 Στατική ανάλυση 18m ιστών

#### 3.3.1 Πλαίσιο υπολογισμών

Με χρήση των δεδομένων από τη ρευστομηχανική ανάλυση του κεφαλαίου 3.2 γίνεται και η ανάλυση της στατικότητας των δικτυωμάτων. Όλες οι δυνάμεις που υπολογίστηκαν εισάχθηκαν στο 18m ιστό του μοντέλου 1 όπως φαίνεται στην εικόνα 3.28. Οι υποθέσεις που έχουν γίνει είναι οι εξής:

- ✓ Σύμφωνα με τον ευρωκώδικα [2] οι υπολογισμοί πρέπει να γίνουν με το 1,35 του DL. Επομένως θα θεωρήσουμε ελκτική βαρύτητα ίση με 1,35g.
- ✓ Το σύστημα συντεταγμένων φαίνεται στο σχήμα 3.27.
- ✓ Οι συνδέσεις θεωρούνται δεσμοί (πακτώσεις), κατηγορίας C σύμφωνα με τον ευρωκώδικα [6].
- ✓ Θεωρείται η ακραία περίπτωση να είναι τοποθετημένη μόνο μία κεραία, δύο RRU και μία κεραία μικροκυμάτων σε μία πλευρά.
- ✓ Η κεραία τοποθετείται στα 17m, τα RRU στα 15m και 13m και η κεραία μικροκυμάτων στα 11m.
- ✓ Η κεραία μικροκυμάτων τοποθετείται υπό γωνία 45° στην πλευρά του ιστού με συντεταγμένες  $x=-1523\text{mm}$ ,  $y=11000\text{mm}$ ,  $z=-1523\text{mm}$ .
- ✓ Τα φορτία ( $F_x$ ) από τη ρευστομηχανική ανάλυση τοποθετούνται ως ομοιόμορφα γραμμικά κατανεμημένα φορτία (Nmm) στα μέρη του ιστού χωρίς τα περιφερειακά και ως οριζόντιες δυνάμεις σε αυτά με τα περιφερειακά, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.28.
- ✓ Τελικώς, η μέγιστη κλίση του ιστού πρέπει να είναι μικρότερη των 3°, σύμφωνα με τον ευρωκώδικα [5].



Εικόνα 3.27: Πλέγμα από beam elements (αριστερά) και σύστημα συντεταγμένων (δεξιά)

**D: Static Structural**

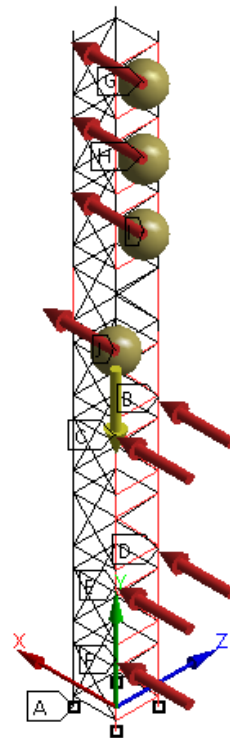
Remote Force 4

Time: 1, s

Items: 10 of 11 indicated

12/2/2020 15:04

- A Fixed Support
- B Line Pressure: 0,22989 N/mm
- C Line Pressure 2: 0,22989 N/mm
- D Line Pressure 3: 0,22989 N/mm
- E Line Pressure 4: 0,22989 N/mm
- F Line Pressure 5: 0,22989 N/mm
- G Remote Force: 7355,7 N
- H Remote Force 2: 2437,8 N
- I Remote Force 3: 2437,8 N
- J Remote Force 4: 6445,7 N

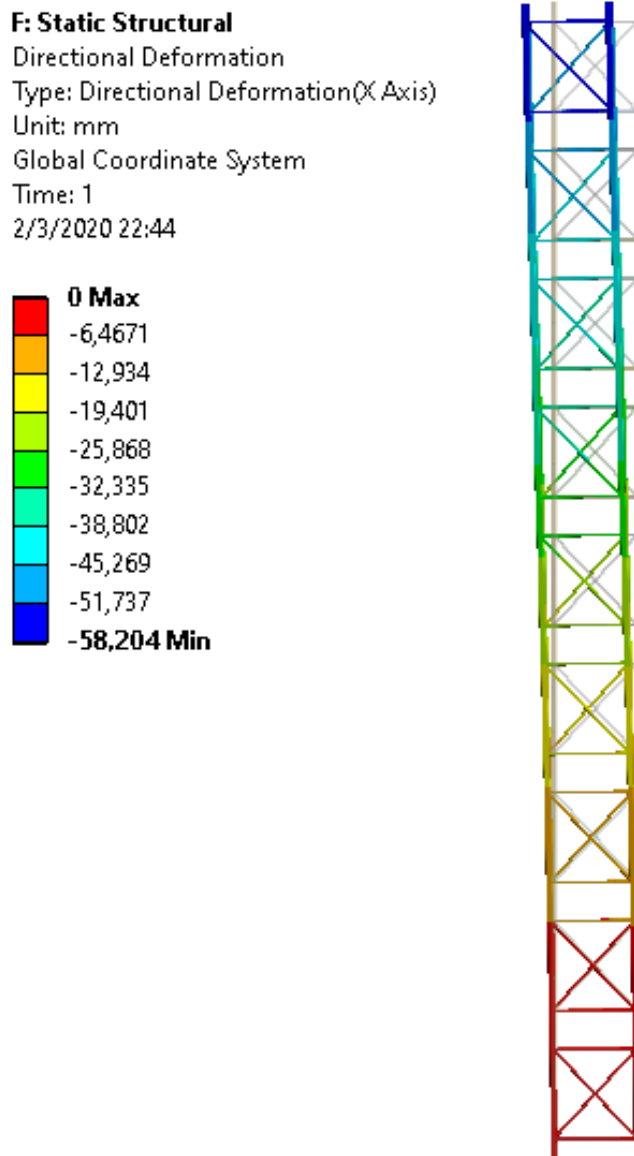


Εικόνα 3.28 Μεταφορά φορτίων στο 18m μοντέλο

### 3.3.2 Αποτελέσματα

Στην εικόνα 3.29 φαίνεται το βέλος κάμψης του 18m ιστού, που χρησιμοποιεί ως δομική μονάδα το μοντέλο 1 με πλευρά  $a=1,3m$ , κατά τον άξονα Χ. Όπως φαίνεται, το μέγιστο βέλος κάμψης του ιστού ισούται με 58,2mm κατά απόλυτη τιμή. Αυτό σημαίνει ότι έχει μέγιστη κλίση ίση με :

$$\kappa\lambda\iota\sigma\eta_{\max} = \tan^{-1} \left( \frac{58,2}{18000} \right) = 0,18^\circ < 3^\circ$$



Εικόνα 3.29: Παραμόρφωση κατά τον άξονα Χ

### 3.4 Συνολικά αποτελέσματα στατικής ανάλυσης και σχολιασμός

Ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία, όπως στα κεφάλαια 3.2 και 3.3, υπολογίζονται τα βέλη κάμψης των υπόλοιπων μοντέλων της βιβλιοθήκης. Οι εικόνες της στατικής ανάλυσης μέσω προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων βρίσκονται στο Παράρτημα Β.

<b>Μέγιστο βέλος κάμψης (mm)</b>	<b>2x0,8</b>	<b>2x1,3</b>	<b>2x2</b>
Μοντέλο 1	160	58,2	30
Μοντέλο 2	142	50	25,8
Μοντέλο 3	140	48,6	25

Εικόνα 3.30: Πινακοποιημένα αποτελέσματα των παραμορφώσεων

<b>Μοίρες</b>	<b>2x0,8</b>	<b>2x1,3</b>	<b>2x2</b>
Μοντέλο 1	0,509282	0,185256	0,095493
Μοντέλο 2	0,451991	0,159155	0,082124
Μοντέλο 3	0,445625	0,154698	0,079577

Εικόνα 3.31: Πινακοποιημένα αποτελέσματα των μεγίστων κλίσεων

Μεταξύ των μοντέλων 1,2 και 3 παρατηρείται μικρή διαφορά στο βέλος κάμψης και στη μέγιστη κλίση. Στα μοντέλα 2 και 3 παρατηρούνται σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα, ενώ το μοντέλο 1 εμφανίζει μεγαλύτερο βέλος κάμψης. Αυτό συμβαίνει γιατί το μοντέλο 1 έχει μόνο μία διαδοκίδα στην σε κάθε του πλευρά.

Μεγάλη διαφορά εμφανίζεται στα αποτελέσματα όταν μεταβάλλεται η διάσταση **a**. Η διάσταση **a=1,3m** φαίνεται να είναι η καταλληλότερη, αφού εμφανίζει κατά 100mm μικρότερο βέλος κάμψης από την **a=0,8m** και μόνο 30mm μεγαλύτερο από την **a=2m**.

### 3.5 Μελέτη του 2m δομικού στοιχείου της βάσης

Είναι αναγκαίο να μελετηθεί η αντοχή του δομικού στοιχείου της βάσης του ιστού, μιας και αυτό κρίνεται το πιο επικίνδυνο σημείο στην κατασκευή για να αστοχήσει. Κρίνεται εύλογο πρώτα να ελεγχθούν τα μοντέλα τα οποία εμφάνισαν μεγαλύτερο βέλος κάμψης, δηλαδή το μοντέλο 1 για  $a=0,8m$  και  $a=1,3m$  και για το μοντέλο 2 τα αντίστοιχα.

#### 3.5.1 Μετατόπιση δυνάμεων

Μεταφέρονται όλες οι δυνάμεις και οι ροπές τους από την ρευστομηχανική ανάλυση ως εξής:

$$F_{xtot} = \sum Fx$$

$$F_{ytot} = \sum Fy + \sum Weight$$

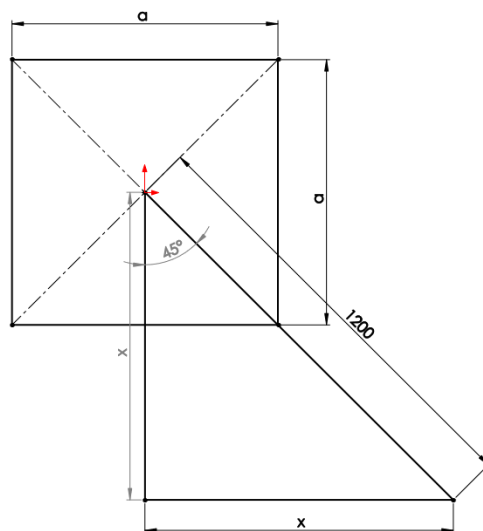
$$F_{ztot} = \sum Fz$$

$$M_{xtot} = (3000 + 5000 + 7000 + 9000)F_{zcell} + 11000F_{zmicro} + (13000 + 15000)F_{zrru} + 17000F_{zant}$$

$$M_{ztot} = (3000 + 5000 + 7000 + 9000)F_{xcell} + 11000F_{xmicro} + (13000 + 15000)F_{xrru} + 17000F_{xant}$$

$$M_{ytot} = 4\frac{a}{2}F_{zcell} + x(F_{xmicro} + F_{zmicro}) + 2\frac{a}{2}F_{zrru} + \frac{a}{2}F_{zant}$$

, όπου  $x$  στην εικόνα 3.32



Εικόνα 3.32: Θέση μικροκυματικής κεραίας πάνω στον ιστό

Τα συνολικά φορτία φαίνονται παρακάτω στις εικόνες 3.33 και 3.34.

	<i>Βάρος (kg)/2m</i>	<i>Force (N)</i>	<i>X</i>	<i>Moment Z (Nmm)</i>	<i>Force Y (N)</i>	<i>Moment X (Nmm)</i>	<i>Force z (N)</i>	<i>Moment Y (Nmm)</i>
<i>M1</i>	147	26.964		303986540	11760	3240536	151,8825	8054625
<i>M2</i>	173	29070,75		316922380	13840	1515500	63	7614991,1
<i>M3</i>	173	9209,545		189999100	13840	16615317	1229,103	9711047,9

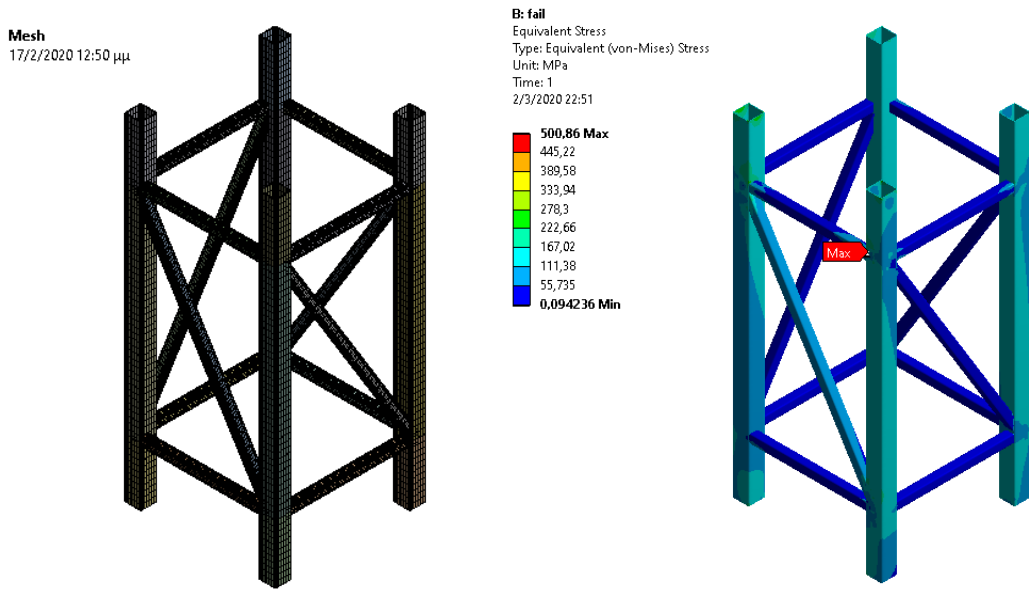
Εικόνα 3.33: Πινακοποιημένα αποτελέσματα για  $a=0,8m$

	<i>Βάρος (kg)/2m</i>	<i>Force (N)</i>	<i>X</i>	<i>Moment Z (Nmm)</i>	<i>Force Y (N)</i>	<i>Moment X (Nmm)</i>	<i>Force z (N)</i>	<i>Moment Y (Nmm)</i>
<i>M1</i>	192	26.964		303986540	15360	3240536	151,8825	9818221,8
<i>M2</i>	224,5	29070,75		316922380	17960	1515500	63,25943	9280394,7
<i>M3</i>	224,5	9209,545		189999100	17960	16615317	1229,103	11818233

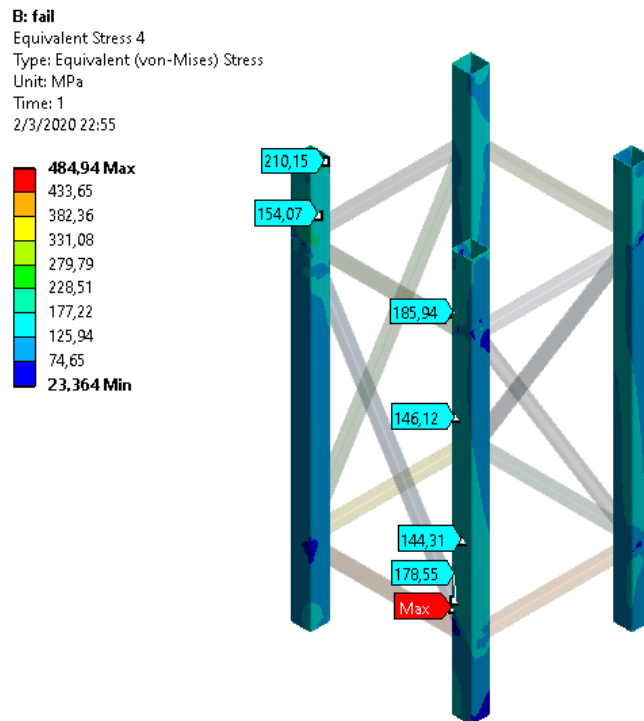
Εικόνα 3.34: Πινακοποιημένα αποτελέσματα για  $a=1,3m$

### 3.5.2 Αποτελέσματα πεπερασμένων

✓ Μοντέλο 1 για  $a = 0,8m$ .

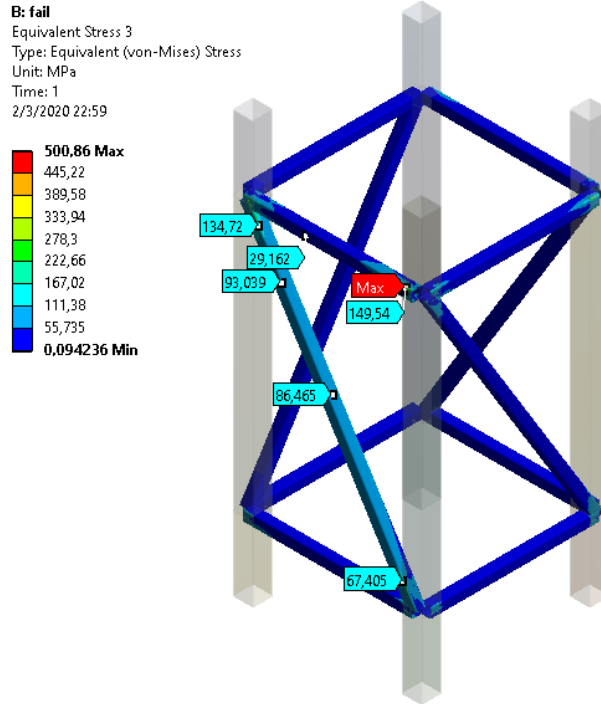


Εικόνα 3.35: Πλέγμα με 23340 στοιχεία (αριστερά) και τάση κατά von-Mises (δεξιά). Οι μέγιστες τιμές δεν είναι πραγματικές, μιας και δημιουργούνται από το γεγονός ότι οι συνδέσεις έχουν οριστεί ως bonded.



Εικόνα 3.36: Ισοδύναμη τάση στους 4 κοιλοδοκούς 100x100x5mm





Εικόνα 3.37: Ισοδύναμη τάση στις διαδοκίδες 50x50x3mm

Σχολιασμός: Θέτοντας τον εξής περιορισμό:

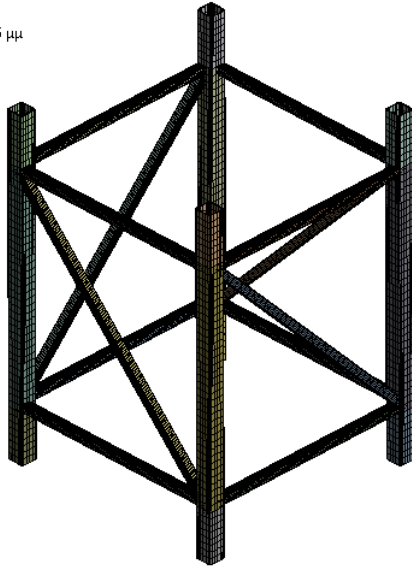
$$\sigma_{\text{επιτ}} = \frac{\sigma_y}{k}, \text{ με } k = 1,5$$

Οι τάσεις είναι κάτω από το όριο διαρροής του υλικού  $\sigma_y$ , όμως σε αρκετά σημεία του 100x100x5mm κοιλοδοκού εμφανίζονται τάσεις που δεν ικανοποιούν τον παραπάνω περιορισμό. Επομένως η διατομή κρίνεται επικίνδυνη να αστοχήσει.

✓ Μοντέλο 1 για  $a=1,3\text{m}$

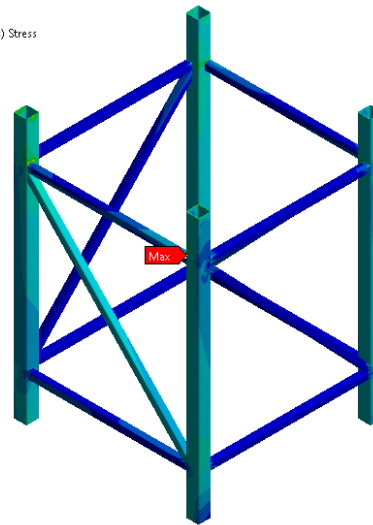
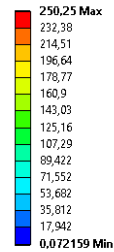
Mesh

17/2/2020 12:55 μμ



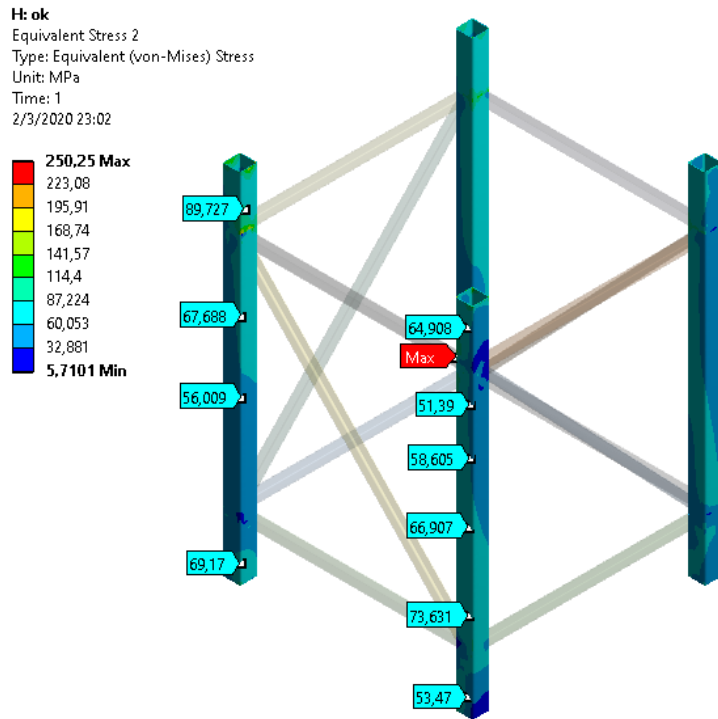
H:ok

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
2/3/2020 23:01

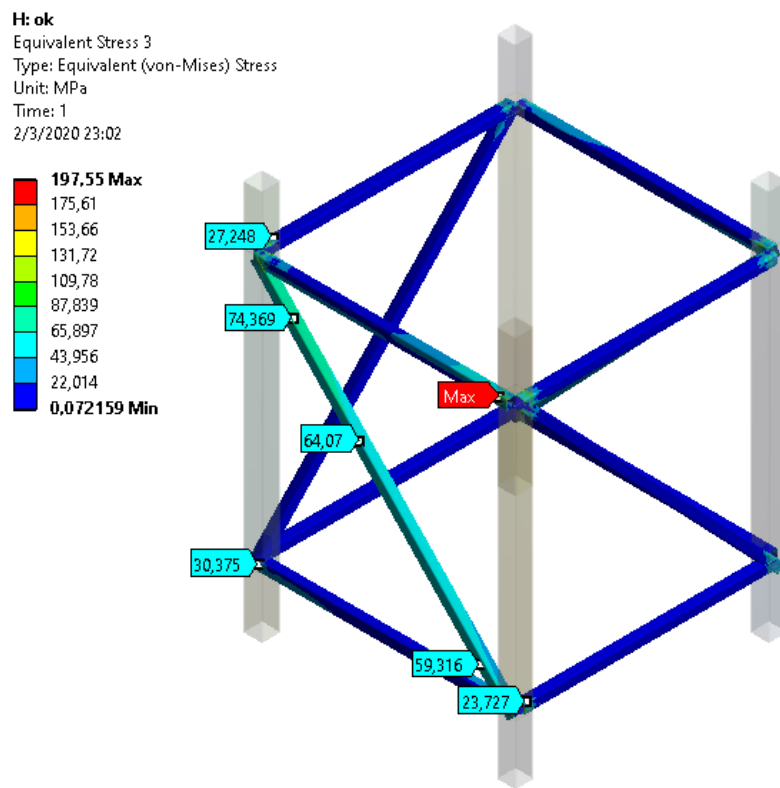


Εικόνα 3.38: Πλέγμα με 17796 στοιχεία (αριστερά) και τάση κατά von-Mises (δεξιά). Οι μέγιστες τιμές δεν είναι πραγματικές, μιας και δημιουργούνται από το γεγονός ότι οι συνδέσεις έχουν οριστεί ως bonded.

Σχολιασμός: Οι τάσεις είναι κάτω από το όριο διαρροής του υλικού  $\sigma_y$  και παράλληλα ικανοποιείται και ο περιορισμός τάσεων που τέθηκε προηγουμένως. Επομένως η διατομή κρίνεται ότι δεν θα αστοχήσει.

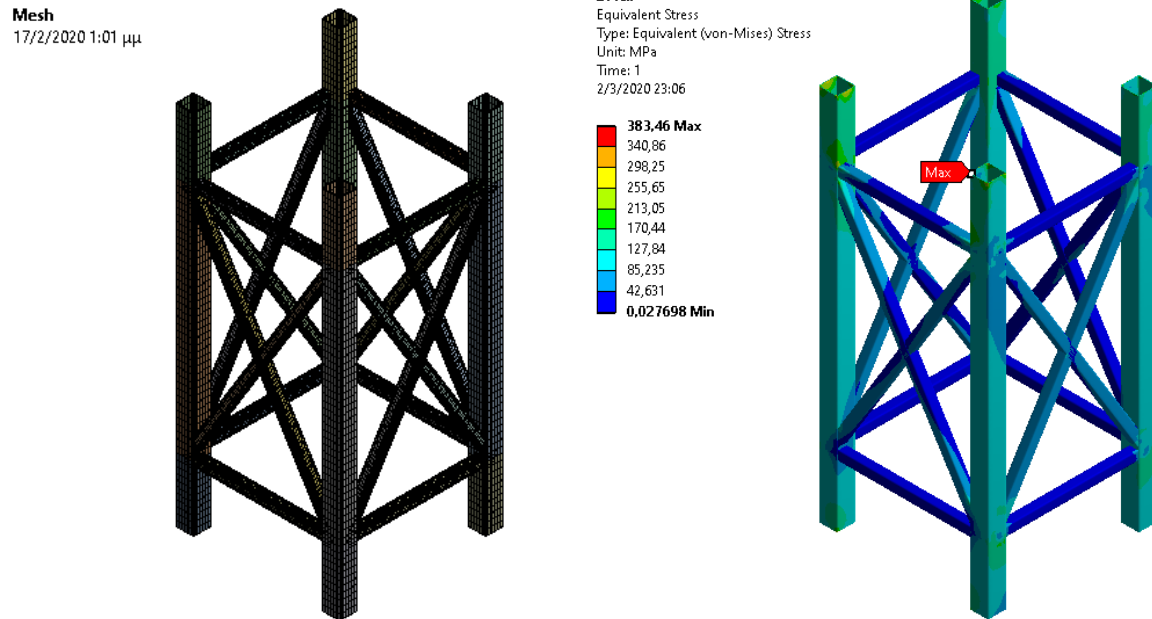


Εικόνα 3.39: Ισοδύναμη τάση στους 4 κοιλοδοκούς 100x100x5mm



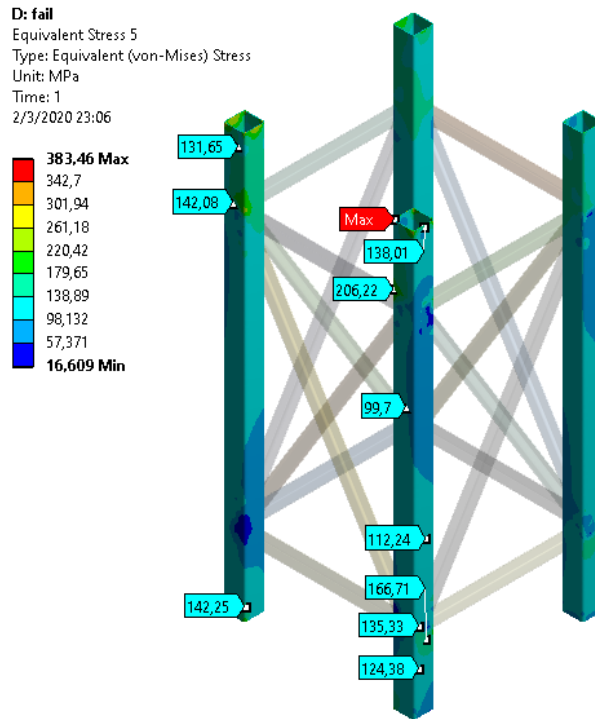
Εικόνα 3.40: Ισοδύναμη τάση στις διαδοκίδες 50x50x3mm

✓ Μοντέλο 2 για  $a=0,8m$

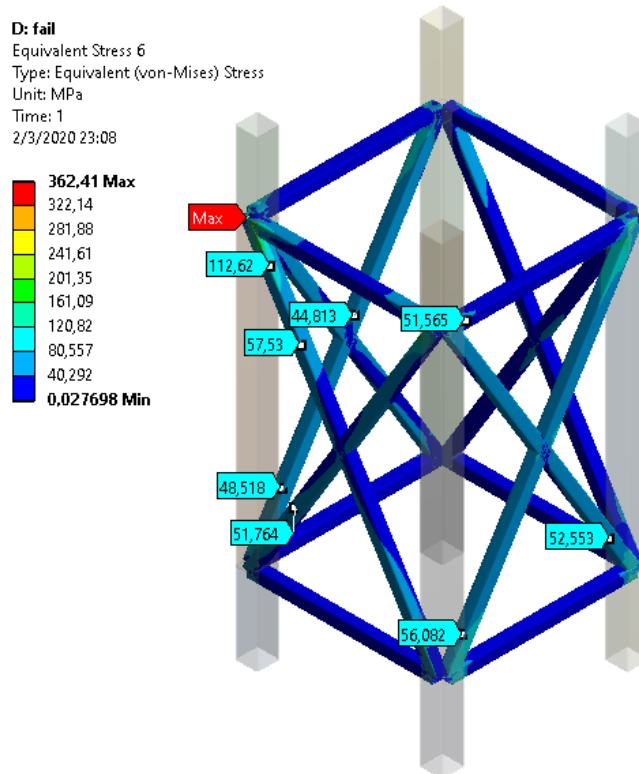


Εικόνα 3.41: Πλέγμα με 29640 στοιχεία (αριστερά) και τάση κατά von-Mises (δεξιά). Οι μέγιστες τιμές δεν είναι πραγματικές, μιας και δημιουργούνται από το γεγονός ότι οι συνδέσεις έχουν οριστεί ως bonded.

Σχολιασμός: Για τους ίδιους λόγους όπως για το *μοντέλο 1* για  $a=0,8m$ , η διατομή κρίνεται επικίνδυνη να αστοχήσει.

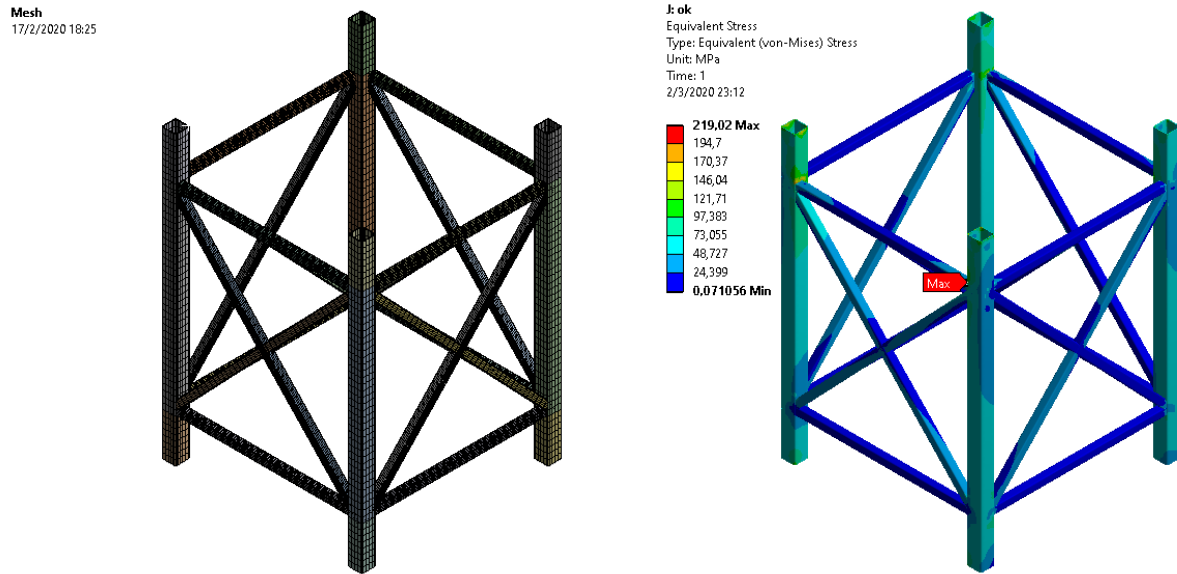


Εικόνα 3.42: Ισοδύναμη τάση στους 4 κοίλοδοκούς 100x100x5mm



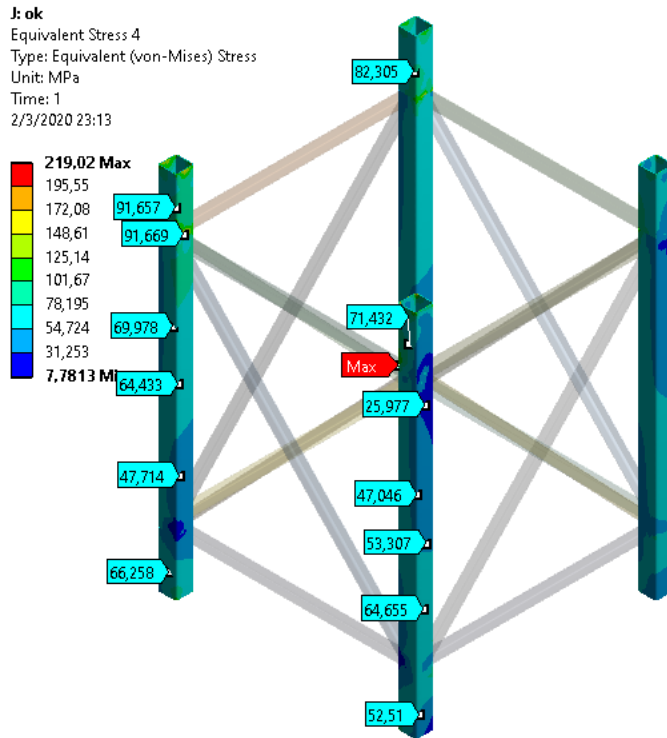
Εικόνα 3.43: Ισοδύναμη τάση στις διαδοκίδες 50x50x3mm

✓ Μοντέλο 2 για  $a=1,3m$

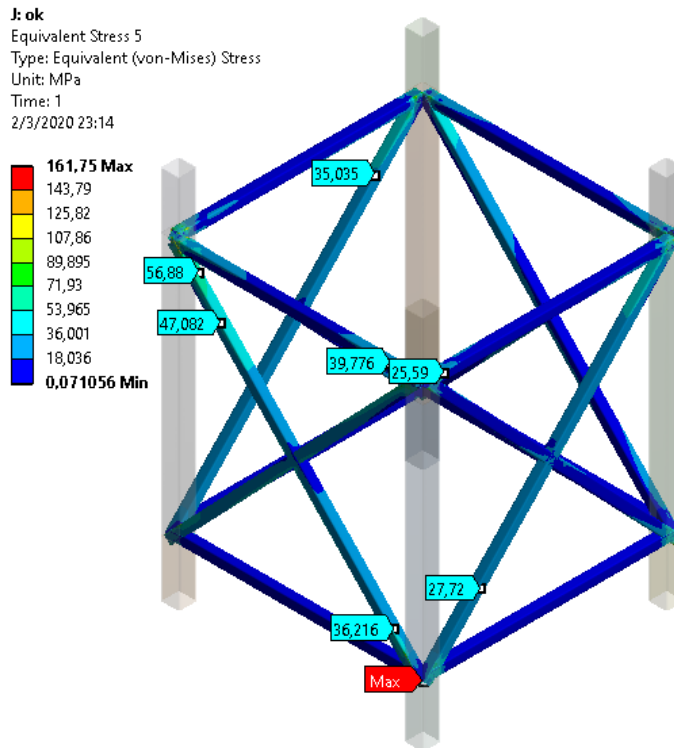


Εικόνα 3.44: Πλέγμα με 29640 στοιχεία (αριστερά) και τάση κατά von-Mises (δεξιά). Οι μέγιστες τιμές δεν είναι πραγματικές, μιας και δημιουργούνται από το γεγονός ότι οι συνδέσεις έχουν οριστεί ως bonded.

Σχολιασμός: Οι τάσεις είναι κάτω από το όριο διαρροής του υλικού  $\sigma_y$  και παράλληλα ικανοποιείται και ο περιορισμός τάσεων που τέθηκε προηγουμένως. Επομένως η διατομή κρίνεται ότι δεν θα αστοχήσει.



Εικόνα 3.45: Ισοδύναμη τάση στους 4 κοιλοδοκούς 100x100x5mm



Εικόνα 3.46: Ισοδύναμη τάση στις διαδοκίδες 50x50x3mm

### 3.5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα μοντέλα 2 και 3 θεωρούνται παρόμοια, μιας και έχουν πολύ κοντινά μέγιστα βέλη κάμψης και αποτελέσματα ρευστομηχανικής ανάλυσης, και για αυτό το λόγο τα συμπεράσματα για το 2 είναι τα ίδια και για το 3.

- ✓ Τα μοντέλα 1 και 2, με διάσταση  $a=0,8m$  παρουσιάζουν τάσεις που δεν ικανοποιούν τη σχέση

$$\sigma_{\varepsilon\pi\tau} = \frac{\sigma_y}{k}, \text{ με } k = 1,5$$

Επομένως απορρίπτονται.

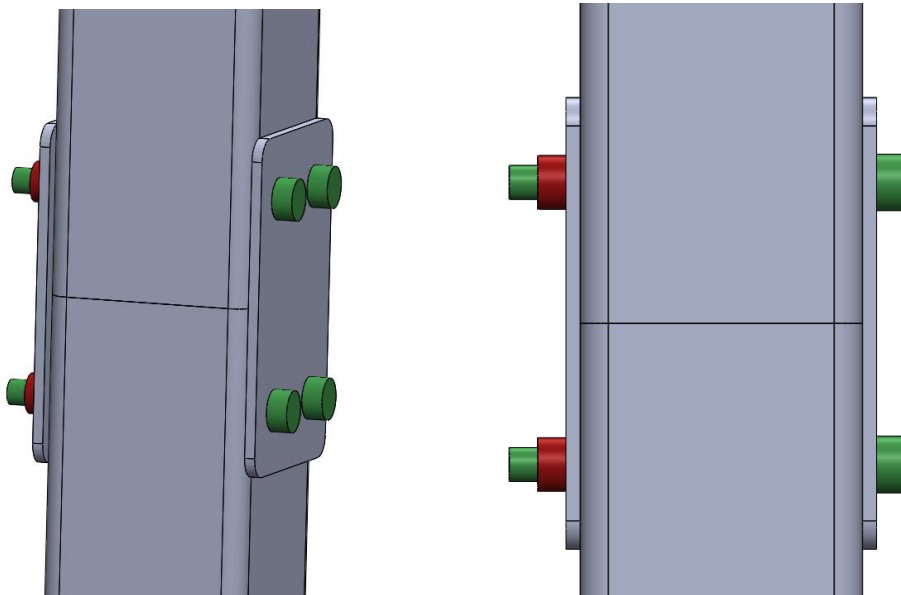
- ✓ Τα μοντέλα 1 και 2, με διάσταση  $a=1,3m$  παρουσιάζουν τάσεις που ικανοποιούν το συντελεστή ασφάλειας 1,5. Επομένως γίνονται αποδεκτά.
- ✓ Η διάσταση  $a=2m$  γίνεται αποδεκτή και για τα τρία μοντέλα, χωρίς να κρίνει περαιτέρω διερεύνηση.

### 3.6 Κοχλιοσυνδέσεις

Σύμφωνα με τον ευρωκώδικα, μία κοχλιοσύνδεση για να ενταχθεί στην κατηγορία **C** (έχει παρουσιαστεί προηγουμένως) πρέπει να εφαρμοστεί στον κοχλία πρόταση ίση με το 0,8 του ULS του. Επίσης, ως περιοχή μεγαλύτερης σπουδαιότητας για μελέτη θεωρείται το 2m δομικό στοιχείο της βάσης (0-2m).

- Μεθοδολογία


Οι συνδέσεις μεταξύ των 2m δομικών μπλοκ γίνονται με 2 μεταλλικά φύλλα, που συνδέονται με 4 ζευγάρια κοχλία-περικοχλίου.



Εικόνα 3.47: Κοχλιοσυνδέσεις

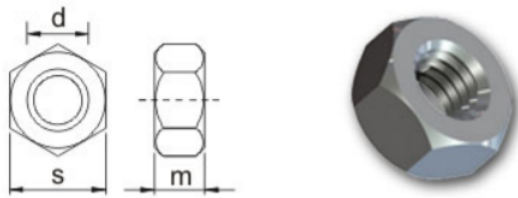


Αρχικά καταστρώνεται ένας υπολογισμός χρησιμοποιώντας 4ΧΜ12 κοχλίες μετρικού σπειρώματος και class 8.8 με μηχανικές ιδιότητες που φαίνονται στην εικόνα 3.48. Τα περικόχλια Μ12 κατά DIN 934 και ISO 4032 φαίνονται στην εικόνα 3.49.

		Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Core Hardness (Rockwell)
	<b>Class 8.8</b> Medium carbon steel, quench and tempered	640	800	C18-31

Εικόνα 3.48: Κοχλίες κλάσης 8.8 κατά ASTM F568M

#### Metric full nuts



DIN 934  
BS 3692  
ISO 4032

#### Materials and Finishes

Steel/Zinc & clear  
Stainless steel/Self colour  
Brass/Self colour

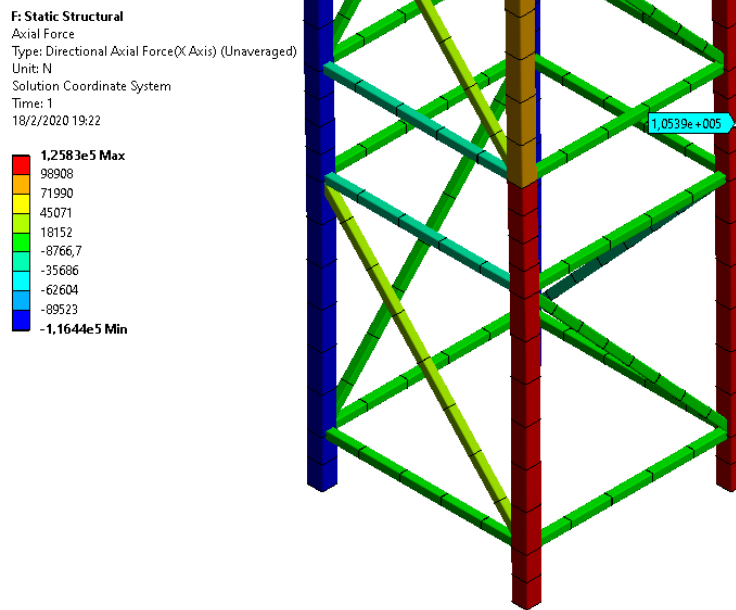
#### Dimensions

	d	M2.5	M3	M3.5	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M20 <sup>1</sup>	M24 <sup>1</sup>
DIN 934	m	5.0	2.4	2.8	3.2	4	5	6.5	8	10	11	13	16	19
BS 3692	s	2	5.5	6	7	8	10	13	17	19	22	24	30	36

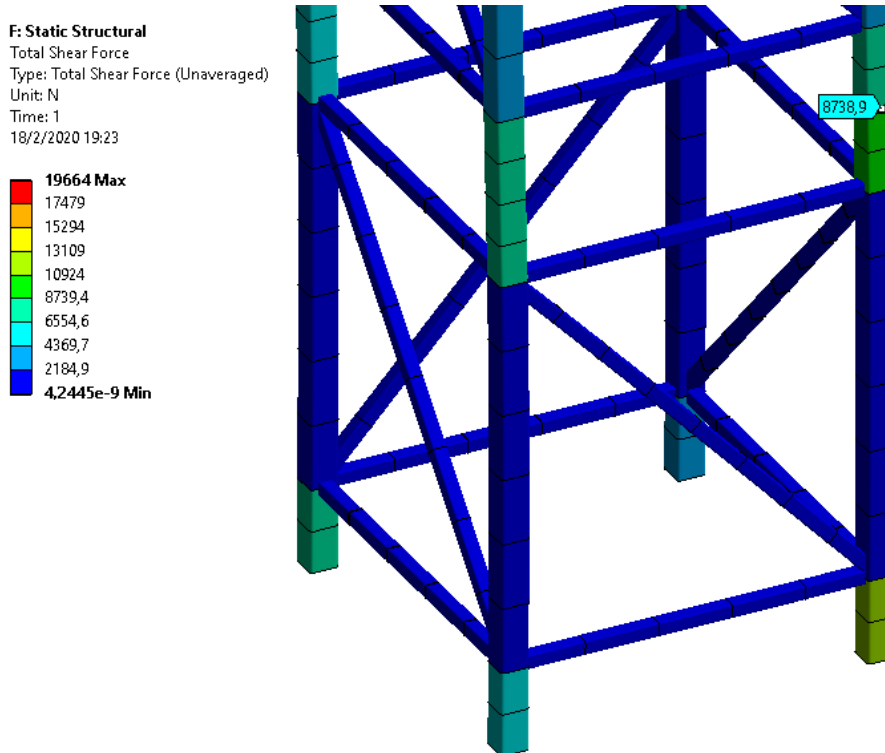
	d	M2.5	M3	M3.5	M4	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M20 <sup>1</sup>	M24 <sup>1</sup>
ISO 4032	m	5.0	2.4	2.8	3.2	4.7	5.2	6.8	8.4	10.4	-	14.8	18	21.5
	s	2	5.5	6	7	8	10	13	16	18	-	24	30	36

Εικόνα 3.49: Περικόχλια Μ12 κατά DIN 934 και ISO 4032

Από τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης, υπολογίζονται οι αξονικές και οι διατμητικές δυνάμεις που δρουν στην περιοχή της ένωσης.



Εικόνα 3.50: Αξονικές δυνάμεις ( $F_x=105300$  N)



Εικόνα 3.51: Διατμητικές δυνάμεις ( $F_y=8739$  N)

Η διατμητική δύναμη που δέχεται κάθε κοχλίας είναι:

$$T = \frac{Fy}{4} = 26325 \text{ N}$$

Άρα και η διατμητική τάση είναι:

$$\tau = \frac{T}{\frac{\pi d^2}{4}} = 232,9 \text{ MPa}$$

Το εφελκυστικό φορτίο που δέχεται κάθε κοχλίας είναι:

$$F\varepsilon = \frac{Fx}{4} = 2184,4 \text{ N}$$

Θεωρώντας την ροπή σύσφιξης  $F_i$  ίση με το 0,8 του ULS (640 MPa) του κοχλίου υπολογίζεται πως:

$$F_i = \frac{\pi d^2 0,8 * 640}{4} = 57876,5 \text{ N}$$

Η συνολική δύναμη που δέχεται κάθε κοχλίας κατά τον εφελκυστικό άξονα X είναι ίση με:

$$F_{\varepsilon x} = cF\varepsilon + F_i = 58313,5 \text{ N}$$

$$c = 0,2 \text{ συντελεστής τριβής}$$

Άρα η αντίστοιχη τάση είναι ίση με:

$$\sigma_{\varepsilon\varphi\lambda} = \frac{F_{\varepsilon x}}{\frac{\pi d^2}{4}} = 515,9 \text{ MPa}$$


Η μέγιστη ορθή τάση λοιπόν είναι:

$$\sigma_{xxmax} = \left(\frac{\sigma_{\varepsilon\varphi\lambda}}{2}\right) + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\varepsilon\varphi\lambda}}{2}\right)^2 + \tau^2} = 605,6 \text{ MPa} > \frac{\sigma_y}{k}$$

$$k = 1,25 \text{ συντελεστής ασφάλειας}$$

Άρα οι κοχλίες M12 θα αστοχήσουν. Επίσης, η διάταξη της εικόνας 3.47 παρουσιάζει μειωμένη αντοχή όταν το επίπεδο φόρτισης είναι παράλληλο με τα φύλλα πάχους 5mm. Επομένως απορρίπτεται και κρίνεται αναγκαίο να γίνουν τα παρακάτω:

- Μείωση του 0,8ULS σε 0,55, μιας και το 0,8 θεωρείται πολύ συντηρητική εκτίμηση. Ο συντελεστής 0,55 εκτιμήθηκε μέσω της εικόνας 3.53
- Μετάβαση από class 8.8 σε class 10.9 με μηχανικές ιδιότητες που φαίνονται στην εικόνα 3.52.
- Χρήση λιπαντικού για πιθανή μείωση του συντελεστή τριβής C.
- Ενίσχυση της κοχλιοσύνδεσης όταν το επίπεδο φόρτισης είναι παράλληλο με τα φύλλα πάχους 5mm.

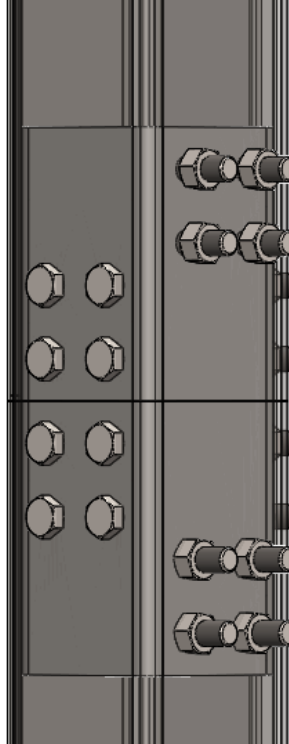
		Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Core Hardness (Rockwell)
	<b>Class 10.9</b> Alloy steel, quench and tempered	940	1040	C32-39

Εικόνα 3.52: Κοχλίες κλάσης 10.9 κατά ASTM F568M

1	2	3	4
<b>Force in N</b>	<b>Nominal diameter in mm</b>		
	<b>Strength class</b>		
	<b>12.9</b>	<b>10.9</b>	<b>8.8</b>
2.500	M3	M3	M4
4.000	M4	M4	M5
6.300	M4	M5	M6
10.000	M5	M6	M8
16.000	M6	M8	M10
25.000	M8	M10	M12
40.000	M10	M12	M14
63.000	M12	M14	M16
100.000	M16	M18	M20
160.000	M20	M22	M24
250.000	M24	M27	M30
400.000	M30	M33	M36
630.000	M36	M39	

Εικόνα 3.53: Δυνάμεις προέντασης για κοχλίες, σύμφωνα με γνωστό κατασκευαστή σπειρωμάτων

Προκειμένου να ενισχυθούν οι συνδέσεις χρησιμοποιείται δοκός διαστάσεων 90x90mm και συνολικού μήκους 260mm, ο οποίος τοποθετείται ενδιάμεσα και εσωτερικά των 100x100x5mm κοιλοδοκών και στερεώνεται με τη βοήθεια 16 κοχλιών τύπου M12 μετρικού σπειρώματος και κλάσης 10.9. Η περιγραφόμενη διάταξη παρουσιάζεται στην εικόνα 3.54.

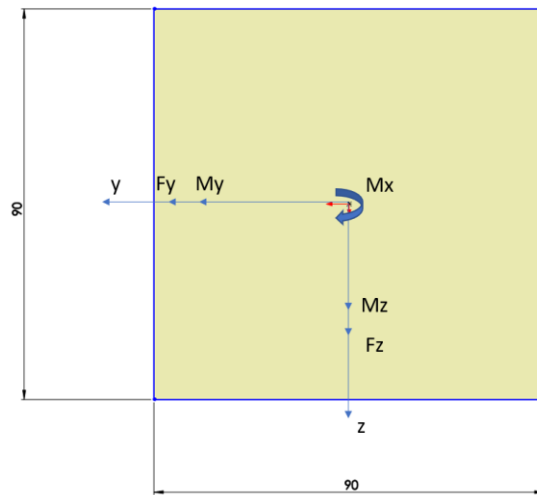


Εικόνα 3.54: Σύνδεση μεταξύ δίμετρων δομικών στοιχείων (Συνδετικό)

Υπολογίζονται οι μέγιστες ορθές και διατμητικές τάσεις τη διατομής για τα φορτία που έχουν υπολογιστεί στο κεφάλαιο 3.6 και εικόνα 3.33, μέσω των τύπων:

$$\sigma_{xxmax} = \frac{Fx}{A} + \frac{My \left(\frac{h}{2}\right)}{I_{yy}} - \frac{Mz \left(-\frac{b}{2}\right)}{I_{zz}} = 38,8 \text{ MPa}$$

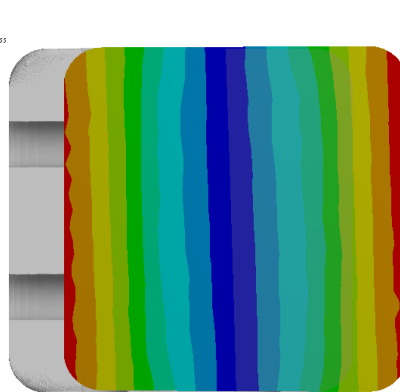
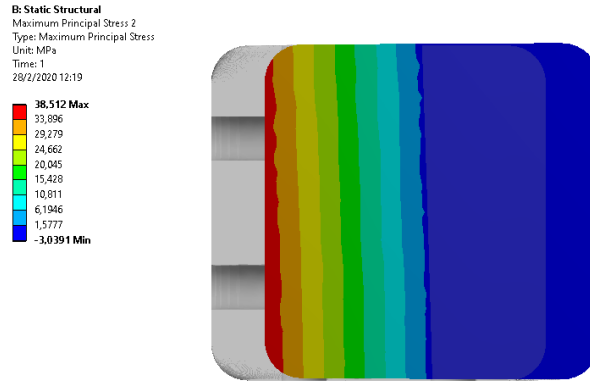
$$\tau_{max} = \frac{FzSy}{bI_{yy}} + \frac{FySz}{bI_{zz}} = 20 \text{ MPa}$$



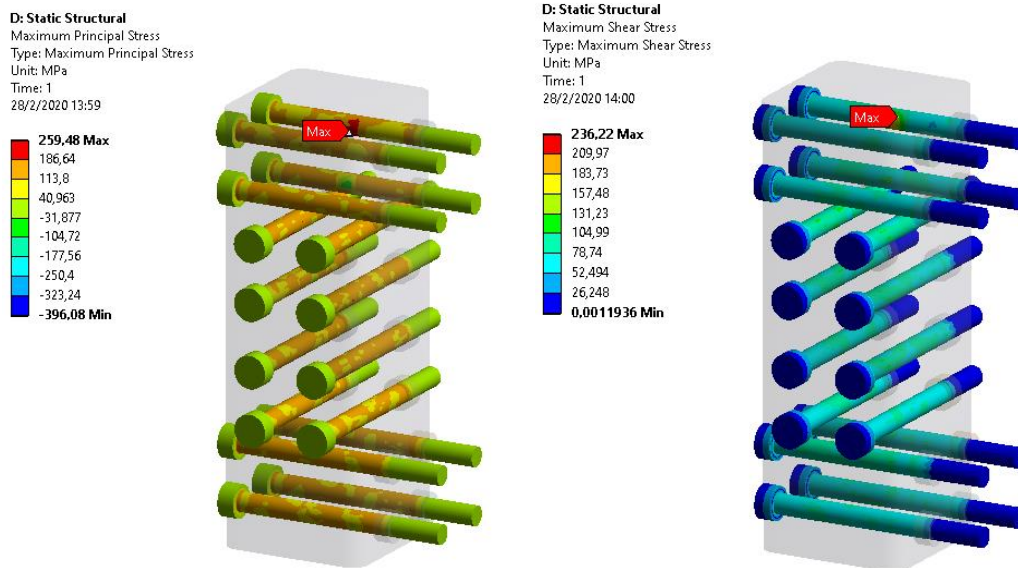
Εικόνα 3.55: Διατομή συνδετικού δοκού

Σχολιασμός: Τα φορτία της εικόνας 3.33 είναι υπολογισμένα ως προς σύστημα συντεταγμένων της εικόνας 3.27. Προκειμένου να μεταφερθούν στη διατομή της εικόνας 3.55 πρέπει να διαιρεθούν ως προς το πλήθος των συνδετικών (4) και το πλήθος των κοχλιών (16).

Προκειμένου να επιβεβαιωθούν οι τιμές που δίνουν οι παραπάνω εξισώσεις, γίνεται έλεγχος της διατομής και των κοχλιών σε πεπερασμένα στοιχεία.



Εικόνα 3.56: Μέγιστη ορθή(πάνω) και διατμητική(κάτω) τάση της διατομής του συνδετικού κολλοδοκού



Εικόνα 3.57: Μέγιστη ορθή(αριστερά) και διατμητική(δεξιά) τάση στους κοχλίες M12

Σχολιασμός: Παρατηρείται ότι συνδετικό και κοχλίες λειτουργούν κάτω από το όριο διαρροής του υλικού, με συντελεστή ασφαλείας  $k=5$  για το συνδετικό και  $k=2,3$  για τους κοχλίες κλάσης 10.9. Επομένως κρίνεται πως δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας.

Στη συνέχεια μελετιούνται οι συνδέσεις των διαδοκίδων πάνω στους κοιλοδοκούς  $100 \times 100 \times 5 \text{ mm}$ . Η συνδεσμολογία γίνεται με χρήση μεταλλικών φύλλων πάχους  $10 \text{ mm}$  στα οποία έχουν συγκολληθεί οι διαδοκίδες. Τα μεταλλικά φύλλα μαζί με τους 3 κοιλοδοκούς  $50 \times 50 \times 3 \text{ mm}$  έχουν συναρμολογηθεί και είναι στην μορφή που φαίνεται στην εικόνα 3.58 πριν τοποθετηθούν πάνω στον ιστό. Όπως και προηγουμένως, από τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης υπολογίζονται οι αξονικές και οι διατμητικές δυνάμεις που δρουν στην περιοχή της ένωσης (εικόνες 3.61 και 3.62) και χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί το ελάχιστο πάχος συγκόλλησης ή ίσο με  $9 \text{ mm}$  μέσω των παρακάτω τύπων:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{καμ}^2 + 1,8\tau^2} \leq \frac{\sigma_y}{k}, \quad k = 2$$

Με

$$\sigma_{καμ} = \frac{6(Fx)e}{Lh^2}$$

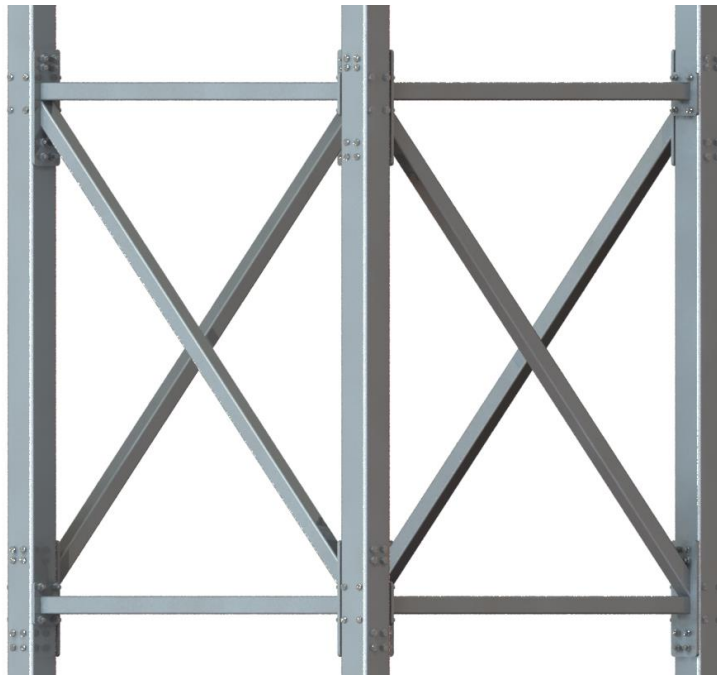
$$\tau = \frac{Fy}{hL}$$



Εικόνα 3.58: Συνδεσμολογία διαδοκίδων συνολικού βάρους  $25 \text{ kg}$



Το συναρμολόγημα προσδένεται στις 4 πλευρές με τη χρήση 24 κοχλίων M12 μετρικού σπειρώματος και κλάσης 10.9. Οι κοχλίες τοποθετούνται όπως φαίνεται στην εικόνα 3.60 μαζί με περικόχλιο M12 και grover.

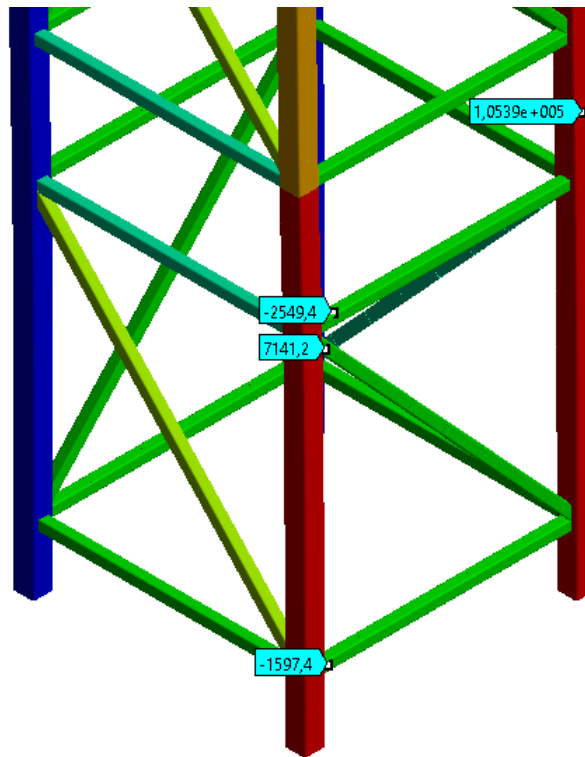
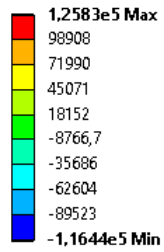


Εικόνα 3.59: Διαδοκίδες τοποθετημένες πάνω στον ιστό



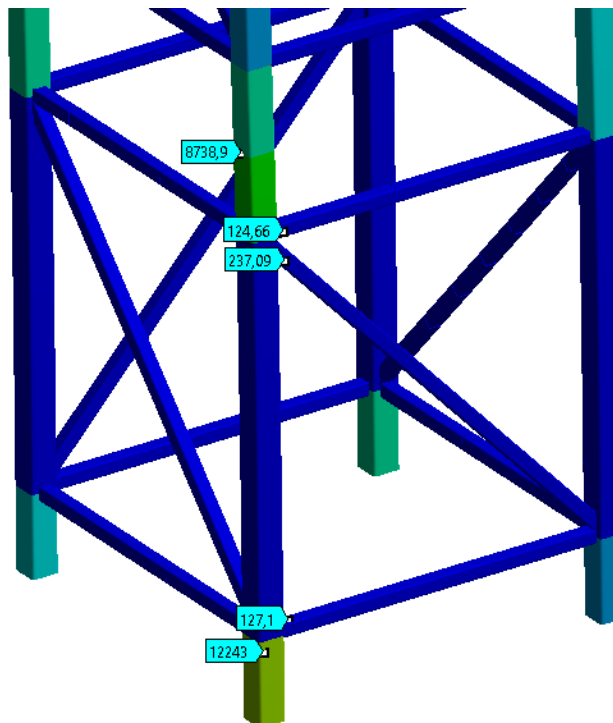
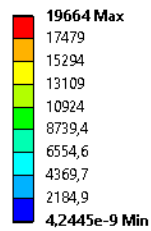
Εικόνα 3.60: Λεπτομέρεια δυνδεσμολογίας διαδοκίδων

**F: Static Structural**  
 Axial Force  
 Type: Directional Axial Force(X Axis) (Unaveraged)  
 Unit: N  
 Solution Coordinate System  
 Time: 1  
 2/3/2020 14:51



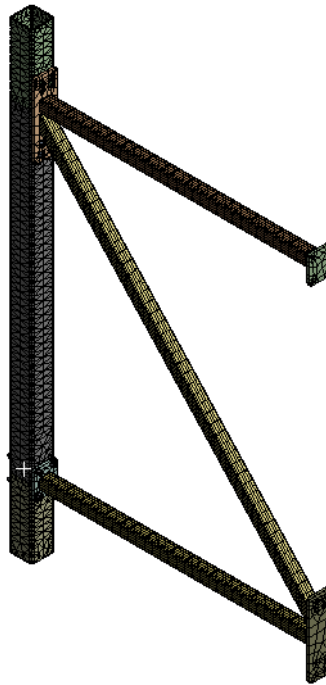
Εικόνα 3.61: Αξονικές δυνάμεις στην περιοχή της σύνδεσης

**F: Static Structural**  
 Total Shear Force  
 Type: Total Shear Force (Unaveraged)  
 Unit: N  
 Time: 1  
 2/3/2020 14:53



Εικόνα 3.62: Διατμητικές δυνάμεις στην περιοχή της σύνδεσης

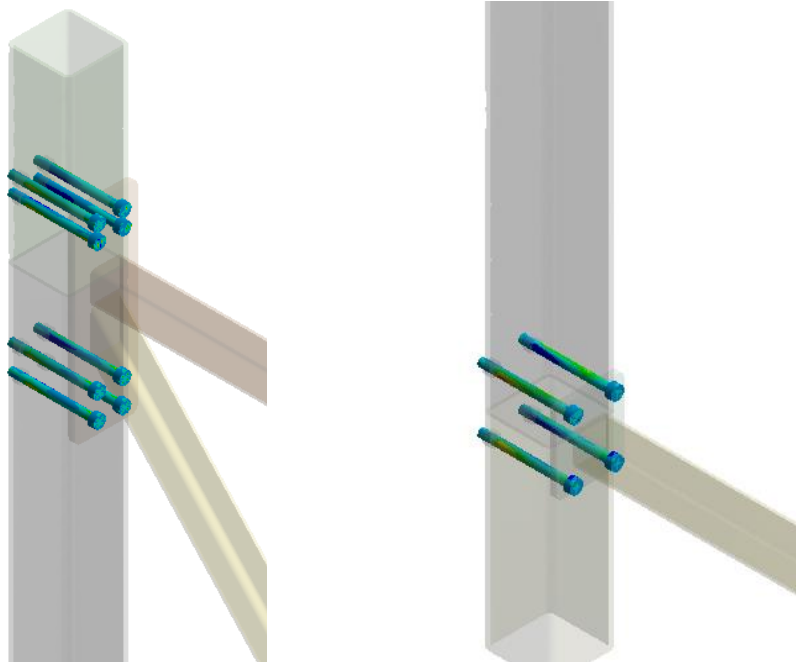
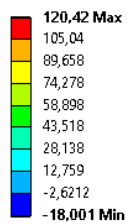
Τέλος, με χρήση πεπερασμένων στοιχείων ελέγχεται η αντοχή των κοχλιοσυνδέσεων



Εικόνα 3.63: Πλέγμα 16749 στοιχείων

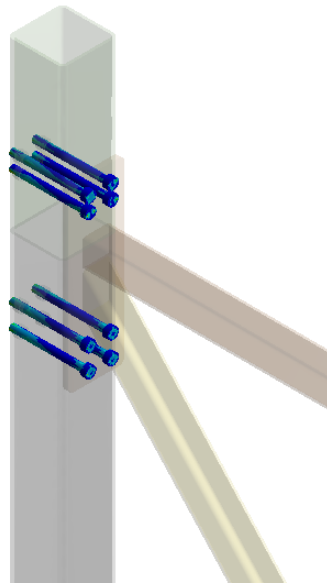
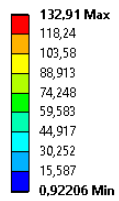
G: Static Structural

Maximum Principal Stress  
Type: Maximum Principal Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
2/3/2020 18:26

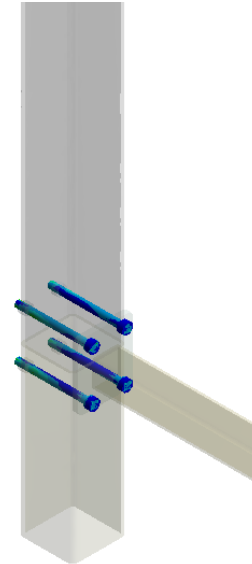
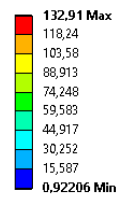


Εικόνα 3.64: Μέγιστη ορθή τάση στους κοχλίες M12

G: Static Structural  
Maximum Shear Stress 2  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
2/3/2020 18:28



G: Static Structural  
Maximum Shear Stress 2  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
2/3/2020 18:28

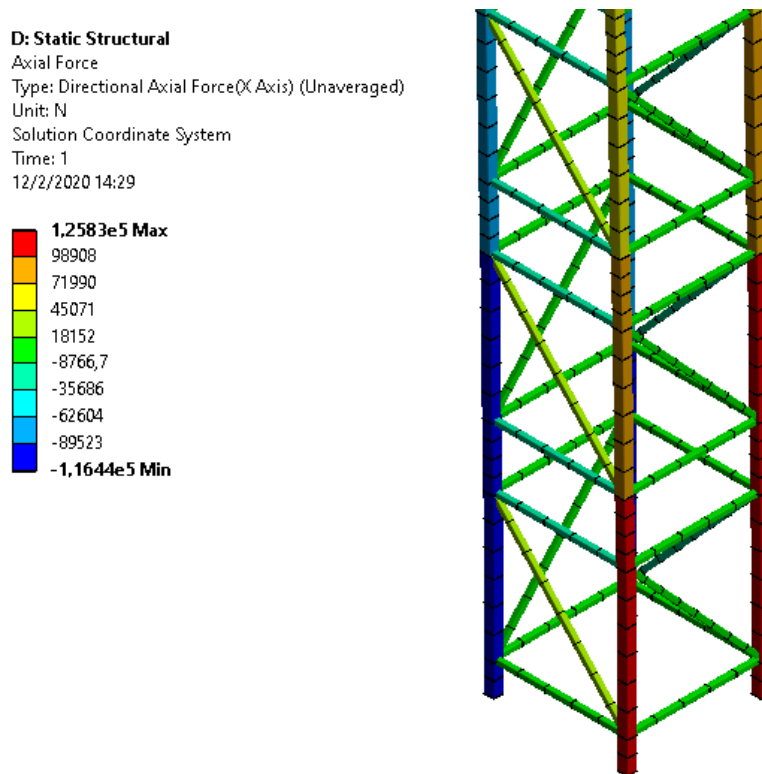


Εικόνα 3.65: Μέγιστη διατμητική τάση στους κοχλίες M12

Σχολιασμός: Παρατηρείται ότι οι κοχλίες κλάσης 10.9 του συναρμολογήματος της εικόνας λειτουργούν κάτω από το όριο διαρροής του υλικού, με συντελεστή ασφαλείας  $k=4,5$ . Επομένως κρίνεται πως δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας.

### 3.7 Έλεγχος σε λυγισμό

Γίνεται έλεγχος σε λυγισμό για τους τέσσερις κοιλοδοκούς διατομής 100x100x5mm του δομικού στοιχείου της βάσης του ιστού (0-2m) του μοντέλου 1 (για  $a=1,3m$ ) για τα αξονικά φορτία που εμφανίζονται στην εικόνα 3.66.



Εικόνα 3.66: Λαμβάνεται η μέγιστη τιμή για τον έλεγχο σε αστοχία λυγισμού

Το ελάχιστο φορτίο πριν την εμφάνιση λυγισμού υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$F_{buck} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2}$$

Όπου

$F_{buck}$ : κρίσιμο φορτίο λυγισμού

$E$ : μέτρο ελαστικότητας

$I$ : ροπή αδράνειας διατομής

$L$ : ελεύθερο μήκος κοιλοδοκού

$K$ : συντελεστής βάσει των οριακών συνθηκών

Αφού οι κοχλιοσυνδέσεις είναι τύπου C, θεωρούμε πως παντού έχουμε πακτώσεις. Άρα επιλέγεται ο συντελεστής  $K=1$ .

Τα δεδομένα και τα αποτελέσματα είναι τα εξής είναι τα εξής:

<i>ΔΕΔΟΜΕΝΑ</i>	
<i><math>I_{xx}=I_{zz} (mm^4)</math></i>	2711020,9
<i><math>I_{yy} (mm^4)</math></i>	5422041,8
<i><math>E(MPa)</math></i>	200000
<i><math>L(mm)</math></i>	2000
<i><math>F_{axial} (N)</math></i>	125000
<i><math>F_{buck}(N)</math></i>	1337835,19

Εικόνα 3.67: Πινακοποιημένα δεδομένα

Παρατηρείται πως  $F_{buck} \gg F_{axial}$  και άρα δεν υπάρχει κίνδυνος για αστοχία σε λυγισμό για κανένα 18m δικτύωμα.

### 3.8 Αντισεισμική ανάλυση

Το σύστημα διαφορικών εξισώσεων που περιγράφει μία σύνθετη δομή, όπως τα δικτυώματα, υπό εδαφική επιτάχυνση είναι της εξής μορφής:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{ku} = -\mathbf{m}\mathbf{1}\ddot{x}_g$$

Όπου

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ \theta \end{Bmatrix}, \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_x & 0 & 0 \\ 0 & m_y & 0 \\ 0 & 0 & I_\theta \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_x & k_{xy} & k_{x\theta} \\ k_{xy} & k_y & k_{y\theta} \\ k_{x\theta} & k_{y\theta} & k_\theta \end{bmatrix}$$

Η επίλυση των παραπάνω διαφορικών εξισώσεων γίνεται με την ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων (Response Spectrum Analysis). Μέσω αυτής της προσέγγισης λαμβάνονται υπόψη οι ιδιομορφές (modes) της κατασκευής. Ουσιαστικά, η απόκριση της κατασκευής ορίζεται ως ο συνδυασμός πολλών ιδιομορφών. Για κάθε ιδιομορφή διαβάζεται η απόκριση από το φάσμα του σεισμού και στη συνέχεια συνδυάζονται για να παραχθεί η συνολική απόκριση της κατασκευής. Το αποτέλεσμα της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι διαφορετικό με το να γίνει γραμμική δυναμική ανάλυση χρησιμοποιώντας τις μετατοπίσεις του εδάφους, μιας και με αυτό τον τρόπο χάνεται η πληροφορία της φάσης (phase).

✓ Κατασκευή σεισμικού φάσματος βάσει EC8 [3, 4]

Οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί, όπως ο ευρωκώδικας 8 [3, 4], λαμβάνουν υπόψη τους τις εξής παραμέτρους:

- Τη σημαντικότητα της κατασκευής
- Τον τύπο του εδάφους
- Ελαστικό ή ανελαστικό πλαστικό φάσμα [4]

Στις εικόνες 3.68 και 3.69 φαίνονται οι παραπάνω κατηγοριοποιήσεις σύμφωνα με τον EC8.

Κατηγορία σπουδαιότητας	Συντελεστής σπουδαιότητας
I (μικρή σπουδαιότητα)	0.8
II (συνήθης σπουδαιότητα)	1.0
III (μεγάλη σπουδαιότητα)	1.2
IV (πολύ μεγάλη σπουδαιότητα)	1.4

Εικόνα 3.68: Σπουδαιότητα κατασκευής σύμφωνα με τον EC8 [3]

**Table 3.1: Ground types**

Ground type	Description of stratigraphic profile	Parameters		
		$v_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ (blows/30cm)	$c_u$ (kPa)
A	Rock or other rock-like geological formation, including at most 5 m of weaker material at the surface.	> 800	–	–
B	Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least several tens of metres in thickness, characterised by a gradual increase of mechanical properties with depth.	360 – 800	> 50	> 250
C	Deep deposits of dense or medium-dense sand, gravel or stiff clay with thickness from several tens to many hundreds of metres.	180 – 360	15 - 50	70 - 250
D	Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil.	< 180	< 15	< 70
E	A soil profile consisting of a surface alluvium layer with $v_s$ values of type C or D and thickness varying between about 5 m and 20 m, underlain by stiffer material with $v_s > 800$ m/s.			
$S_1$	Deposits consisting, or containing a layer at least 10 m thick, of soft clays/silts with a high plasticity index ( $PI > 40$ ) and high water content	< 100 (indicative)	–	10 - 20
$S_2$	Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A – E or $S_1$			

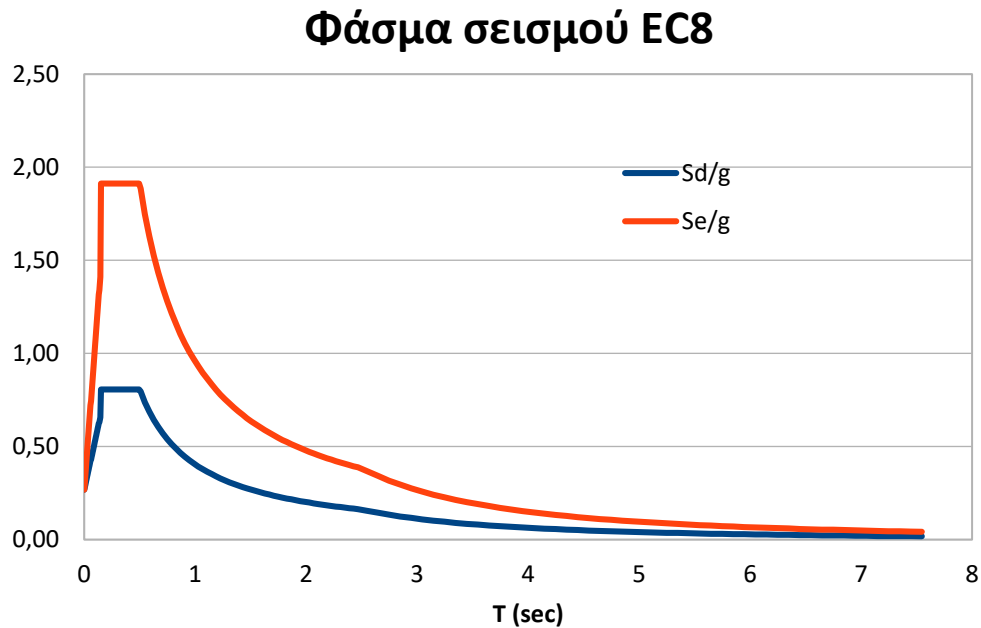
Εικόνα 3.69: Τύπος εδάφους σύμφωνα με EC8 [3]

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, προκειμένου να κατασκευαστεί το φάσμα του σεισμού βάσει του EC8, χρησιμοποιείται κατάλληλο υπολογιστικό φύλλο στο πρόγραμμα excel, κατασκευασμένο από τον κ.Τσαπρούνη. Η δομή του δεν αναλύεται στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας. Επί της ουσίας, χρησιμοποιεί σαν είσοδο την κατηγορία εδάφους και την κατηγορία σπουδαιότητας κατασκευής. Επιλέχθηκαν ως εξής:

- Κατηγορία σπουδαιότητας IV: Τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών είναι μεγάλης σημασίας μιας και σε περίπτωση σεισμού είναι σημαντικό το δίκτυο να συνεχίσει να καλύπτει την περιοχή και να μην δημιουργηθεί επικοινωνιακό πρόβλημα.
- Κατηγορία εδάφους B: Πρόκειται για πυκνή χωμάτινη επιφάνεια, με αρκετά καλές μηχανικές ιδιότητες.
- Επιλογή του ελαστικού φάσματος ( $S_e/g$ ): Δηλαδή δεν επιτρέπονται οι ελαστικές παραμορφώσεις.

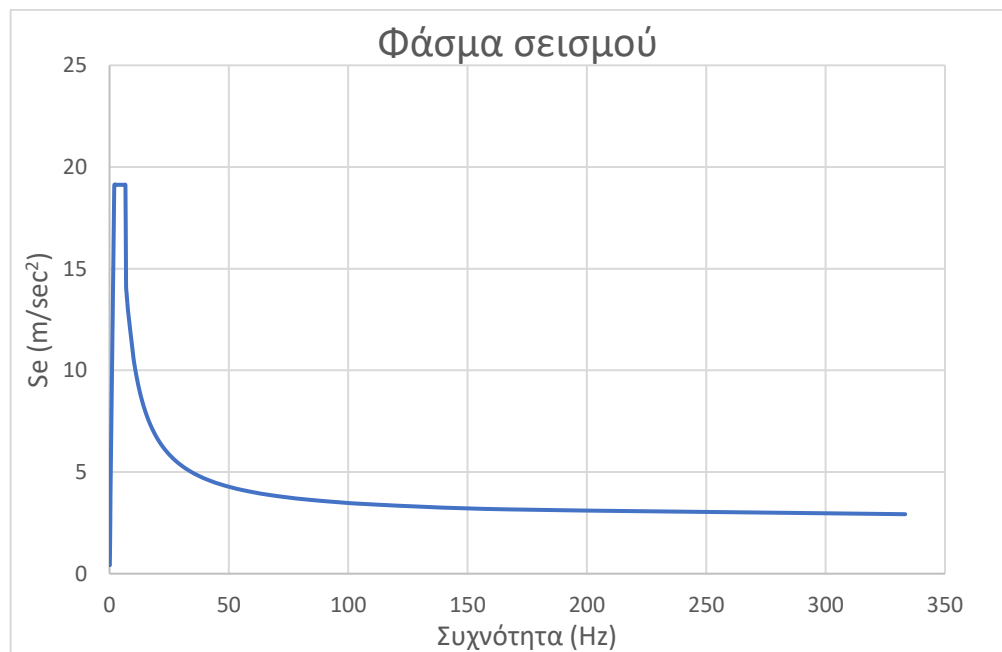


Το φάσμα του σεισμού είναι το εξής:



Εικόνα 3.70: Φάσμα σεισμού (ελαστικό το πορτοκαλί, με μπλε το ανελαστικό)

Στη συνέχεια, γίνεται η απλή μετατροπή των περιόδων σε συχνότητες ( $T=1/f$ ) προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος στο λογισμικό ANSYS, ώστε να υπολογιστεί η απόκριση του χωροδικτύωματος.



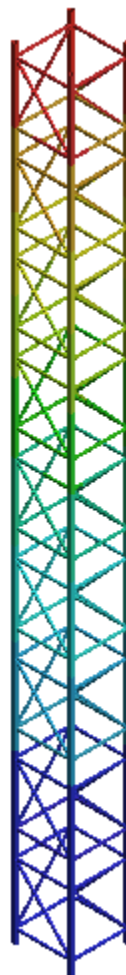
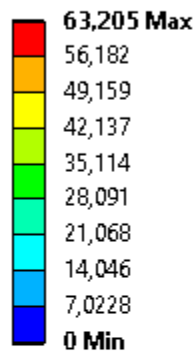
Εικόνα 3.71: Ο κάθετος άξονας πολλαπλασιάστηκε με την επιτάχυνση της βαρύτητας (περίπου  $10\text{m/sec}^2$ ), προκειμένου να μην είναι αδιάστατος.

✓ Απόκριση

Αρχικά, υπολογίζεται η απόκριση του μοντέλου 1, για  $a=1,3m$  μιας και έχει αποδειχθεί αποδεκτό μοντέλο με τη μεγαλύτερη κλίση στην στατική ανάλυση που έχει προηγηθεί. Τα χαρακτηριστικά της απόκρισης είναι τα εξής:

- Γίνεται για τις 6 πρώτες ιδιομορφές της κατασκευής.
- Εφαρμόζεται ο συνδυασμός φορτίσεων **C3** σύμφωνα με τον ευρωκώδικα [2], που έχει περιγράψει προηγουμένως.
- Οι επιταχύνσεις εφαρμόζονται στη βάση του ιστού.

**H: Response Spectrum**  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 0  
2/3/2020 23:33



Εικόνα 3.72: Μέγιστο βέλος κάμψης ίσο με 63,205mm

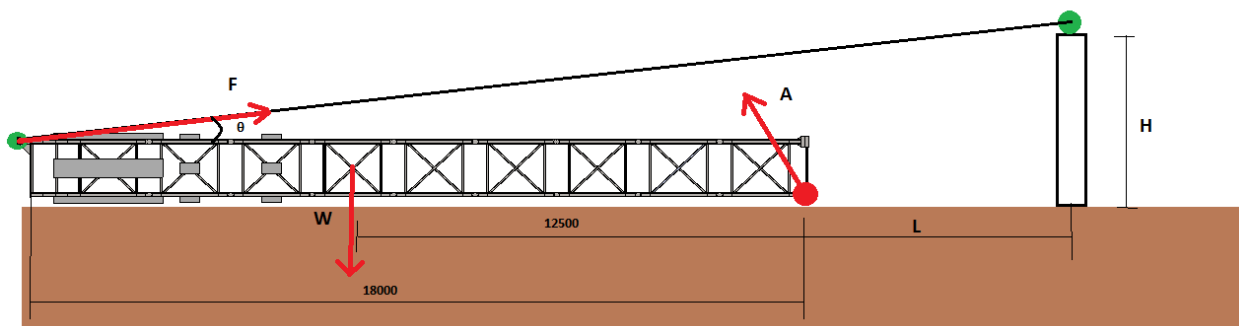
Παρατηρείται αποδεκτή μέγιστη μετατόπιση της κατασκευής. Αυτομάτως, και τα υπόλοιπα αποδεκτά μοντέλα θεωρούνται αντισεισμικά σχεδιασμένα βάσει του EC8.

## Κεφάλαιο 4: Εγκατάσταση και μεταφερισιμότητα

### 4.1 Ανάκλιση

Είναι αναγκαίο να μελετηθεί και μία εγκατάσταση που θα εξυπηρετεί την ανύψωση του δικτυώματος, αφού έχει συναρμολογηθεί στο έδαφος. Επιλέγεται να σχεδιαστεί για την διάσταση  $a=1,3\text{m}$  του μοντέλου 1. Το σύστημα, με τη βοήθεια της εικόνας 4.1, θα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Άρθρωση στο σημείο Pivot (κόκκινο σημείο), προκειμένου να επιτρέπεται η περιστροφή εκεί.
- Χρήση βαρούλκου με συρματόσχοινο.
- Οι εργάτες γυρνάνε το βαρούλκο για την ολοκλήρωση της διαδικασίας.
- Ο βοηθητικός ιστός, που τοποθετείται το βαρούλκο, είναι τοποθετημένος απόσταση  $L$  [mm] από τον ιστό και έχει ύψος  $H=2000\text{mm}$ , αφού ήδη έχουμε μελετήσει το συγκεκριμένο ύψος σαν δομική μονάδα της κατασκευής μας.



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος ιστού και δυνάμεις που δρουν

Εξετάζεται η στιγμή που ξεκινάει η ανάκλιση. Η εξίσωση ισορροπίας των ροπών ως προς το *Pivot Point* είναι η εξής:

$$12500W = F(18000\sin\theta + 1300\cos\theta)$$

Με

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{H}{18000 + L}\right)$$

Το συνολικό βάρος της κατασκευής, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.33, είναι ίσο με 2268kg. Επιλέγοντας  $H=2000\text{ mm}$  και  $L=3500\text{mm}$  καταλήγουμε σε  $F= 47074,3\text{ N}$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η δύναμη στην άρθρωση, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό της. Έστω,  $A_x$  και  $A_y$  η οριζόντια και η κάθετη δύναμη της άρθρωσης.

$$A_x = F \cos \theta$$

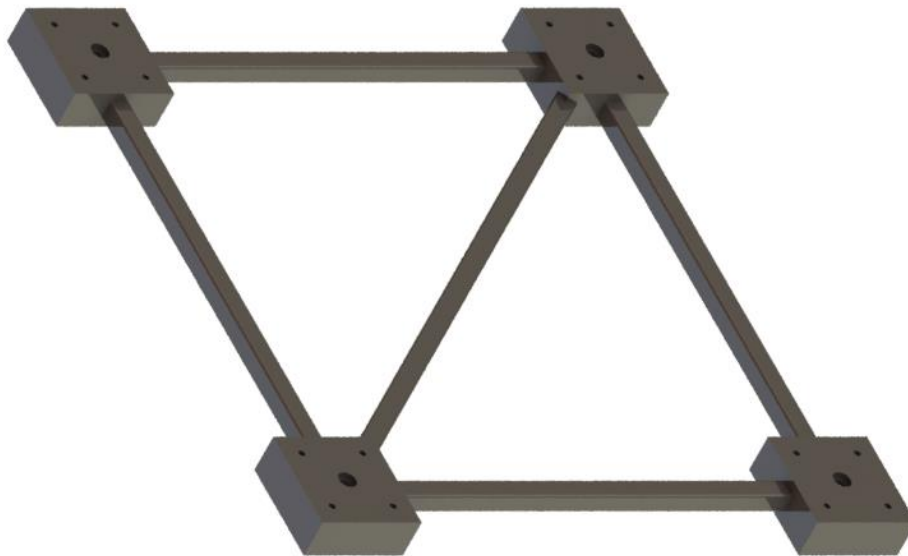
$$A_y = W - F \sin \theta$$

$$A = \sqrt{(A_x)^2 + (A_y)^2} = 47093N$$

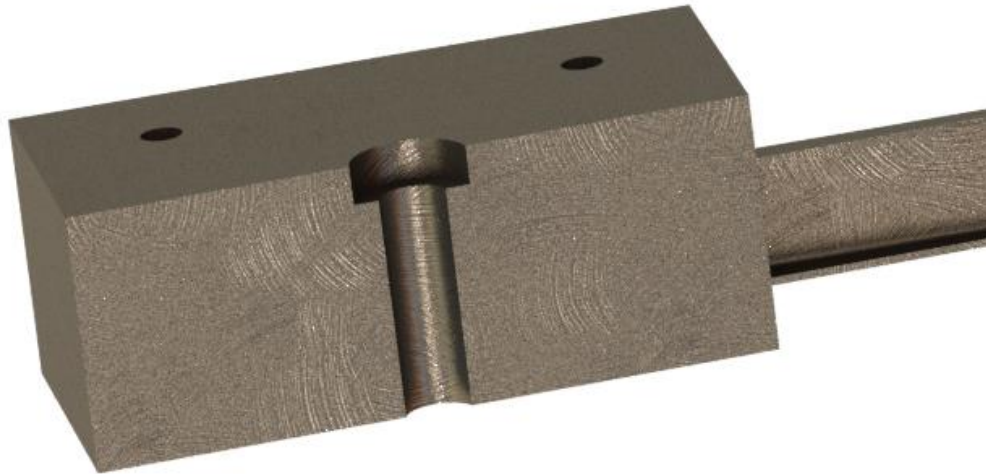
#### 4.2 Βάση ιστού

Κατασκευάζεται το πλαίσιο που φαίνεται στην εικόνα 4.2, προκειμένου πάνω σε αυτό να τοποθετηθεί ο ιστός. Το πλαίσιο αποτελείται από:

- 4x 260x260x60mm μεταλλικά φύλλα τα οποία είναι κατεργασμένα κατάλληλα προκειμένου να συγκολλούνται με τα υπόλοιπα εξαρτήματα. Στο κάθε μεταλλικό φύλλο υπάρχουν 4x κοχλίες M16 και 1x M26 μετρικού σπειρώματος με τους οποίους δένεται στο έδαφος.
- 5x 50x50x3mm κολοδοκούς συγκολλημένους μαζί

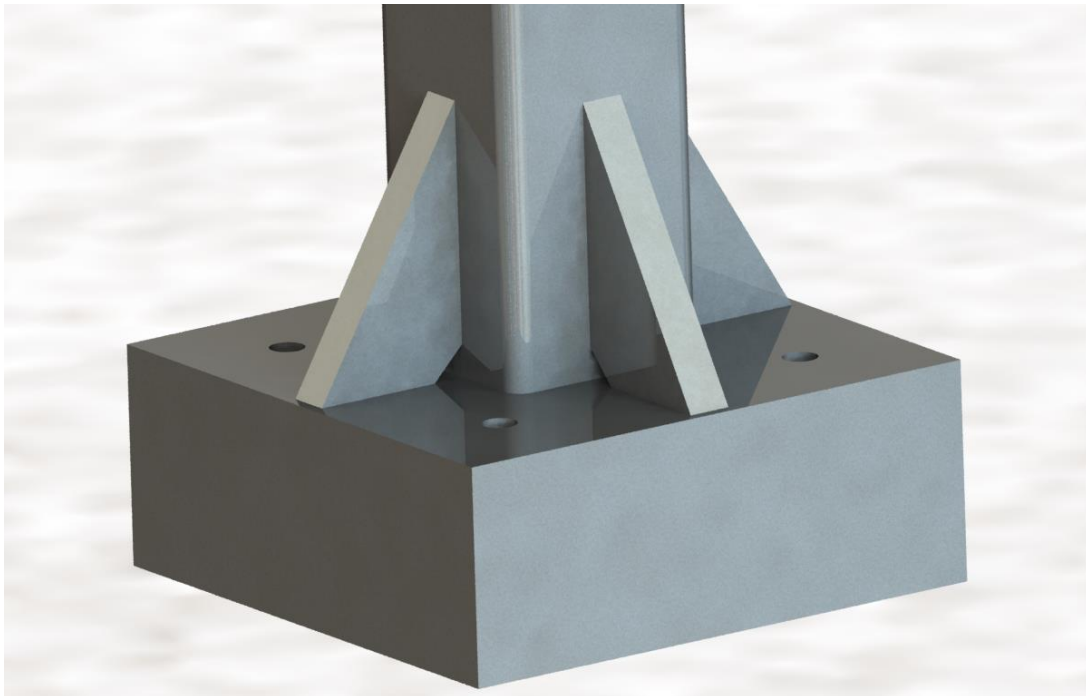


Εικόνα 4.2: Πλαίσιο τοποθέτησης ιστού



Εικόνα 4.3: Λεπτομέρεια 260x260x60mm μεταλλικών φύλλων

Πάνω στη βάση τοποθετείται το πρώτο 2m δομικό στοιχείο του ιστού (0-2m), το οποίο φέρει 16 νεύρα πάχους 20mm. Όλες οι συγκολλήσεις είναι ελάχιστου πάχους 9mm.



Εικόνα 4.4: Λεπτομέρεια νεύρων ποδιού

#### 4.3 Κατασκευή άρθρωσης στο σημείο Pivot

Θα γίνει χρήση ανοξείδωτου χάλυβα 304 με όριο διαρροής σε εφελκυσμό τα 215MPa. Επομένως το όριο διαρροής σε διάτμηση υπολογίζεται ως:

$$\tau_y = \frac{215}{2} = 107,5 \text{ MPa}$$

Και άρα

$$\tau_{max} = \frac{\tau_y}{k} = 53,75 \text{ MPa}$$

$$\text{για } k = 2$$

Πρέπει

$$\tau_{επ} \leq \tau_{max}$$

$$\frac{A}{\frac{\pi d^2}{4}} \leq 53,75$$

$$d \geq 33,4 \text{ mm}$$

Επομένως, επιλέγουμε διάμετρο  $D_{hinge} = 35 \text{ mm}$

Έπειτα, γίνεται ο υπολογισμός του πάχους της συγκόλλησης λαμβάνοντας υπόψιν τη σύνθετη καταπόνηση που δέχεται από κάμψη και διάτμηση. Η δύναμη A είναι διατμητική, επειδή όμως δεν είναι ομοεπίπεδη της συγκόλλησης αλλά παράλληλη στο επίπεδό της, σε απόσταση  $e = 45 \text{ mm}$ , δημιουργείται καμπτική ροπή. Η δύναμη A διαιρείται αρχικά με το 2, μιας και υπάρχουν 2 αρθρώσεις στα πόδια. Σε κάθε άρθρωση τοποθετούνται 3 γάντζοι και σταθεροποιείται με 5 βίδες και 2 συγκολλήσεις, οι οποίες παραλαμβάνουν ομοιόμορφα τη δύναμη A. Τελικά, καταλήγουμε σε δύναμη ίση με το 1/42 της A. Επομένως η διαστασιολόγηση γίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{εq} = \sqrt{\sigma_{καμ}^2 + 1,8\tau^2} \leq \frac{\sigma_y}{k}$$

Με

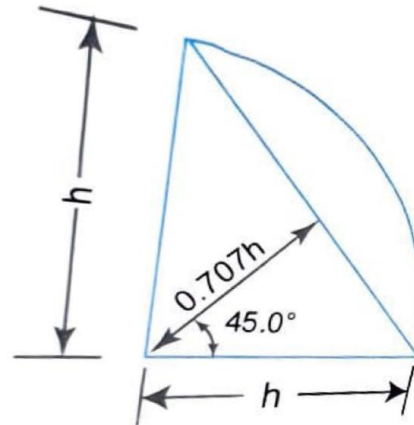
$$\sigma_{καμ} = \frac{6\left(\frac{A}{42}\right)e}{Lh^2}$$

$$\tau = \frac{A}{42hL}$$

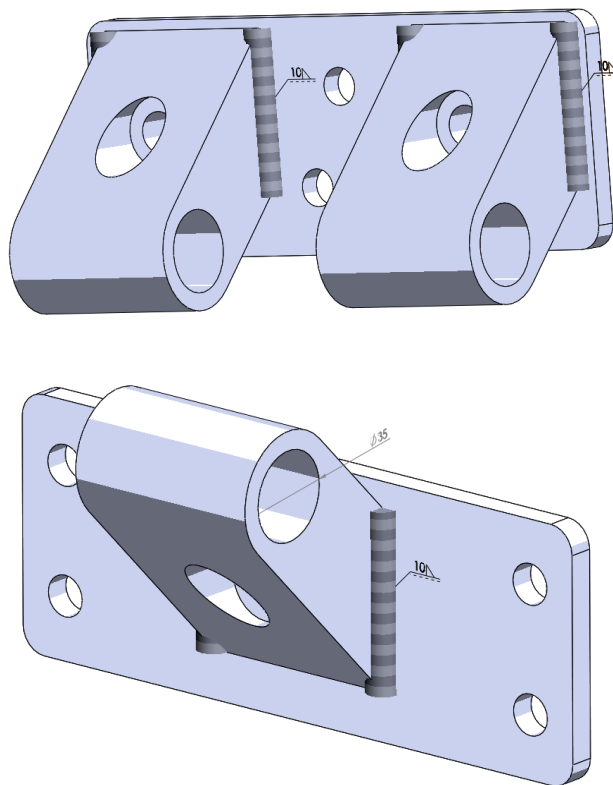
Οι παραπάνω τύποι για  $h=10\text{ mm}$  και  $k=2$  δίνουν  $\sigma_{eq}=14\text{ MPa} \leq 107,5\text{ MPa}$

Τελικά επιλέγεται συγκόλληση πάχους 10 mm.

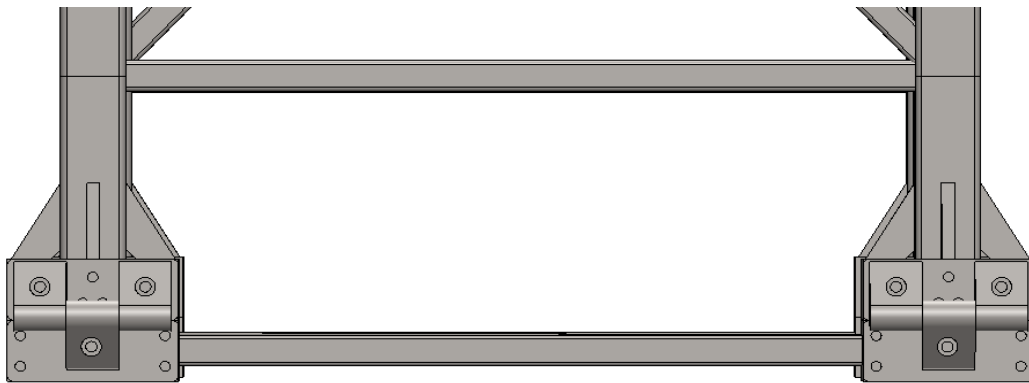
Οι κοχλίες είναι M16, ελεγμένοι ότι δεν αστοχούν στο συγκεκριμένο φορτίο.



Εικόνα 4.5: Γεωμετρία συγκόλλησης

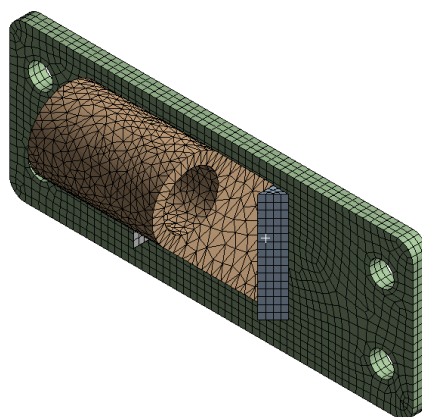


Εικόνα 4.6: Άρθρωση



Εικόνα 4.7: Η άρθρωση τοποθετημένη στη βάση της κατασκευής

- ✓ Έλεγχος άρθρωσης και συγκολλήσεων με πεπερασμένα

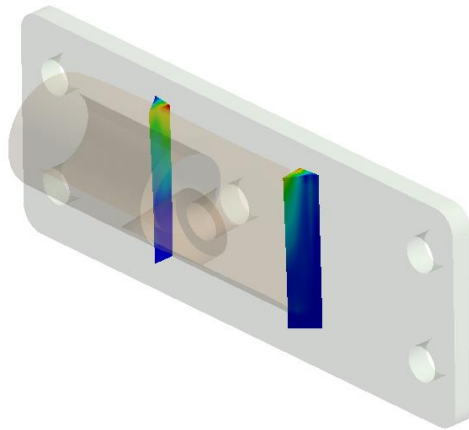


Εικόνα 4.8: Πλέγμα με 10302 στοιχεία



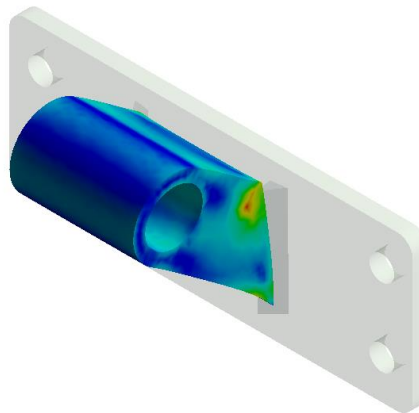
B: Static Structural  
 Equivalent Stress 2  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 24/2/2020 17:47

13,28	Max
11,808	
10,336	
8,8642	
7,3925	
5,9207	
4,4489	
2,9771	
1,5053	
0,033561	Min



B: Static Structural  
 Equivalent Stress 3  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1  
 24/2/2020 17:54

55,922	Max
49,736	
43,55	
37,369	
31,177	
24,991	
18,805	
12,619	
6,4325	
0,24625	Min

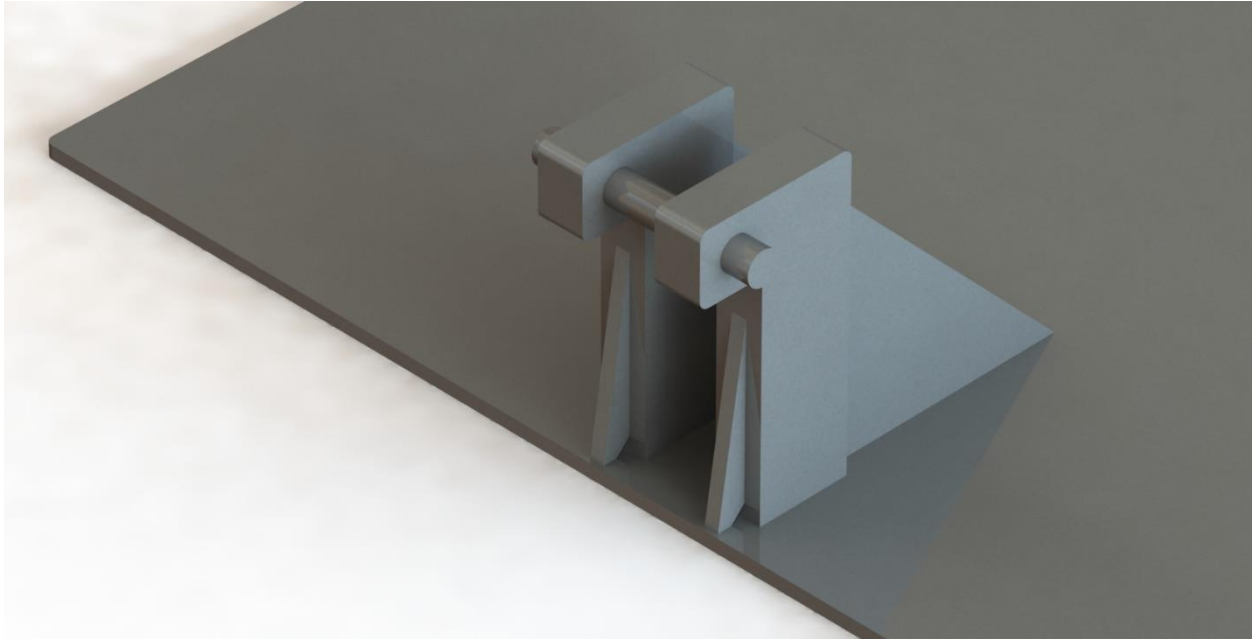


Εικόνα 4.9: Ισοδύναμη τάση κατά von-Mises

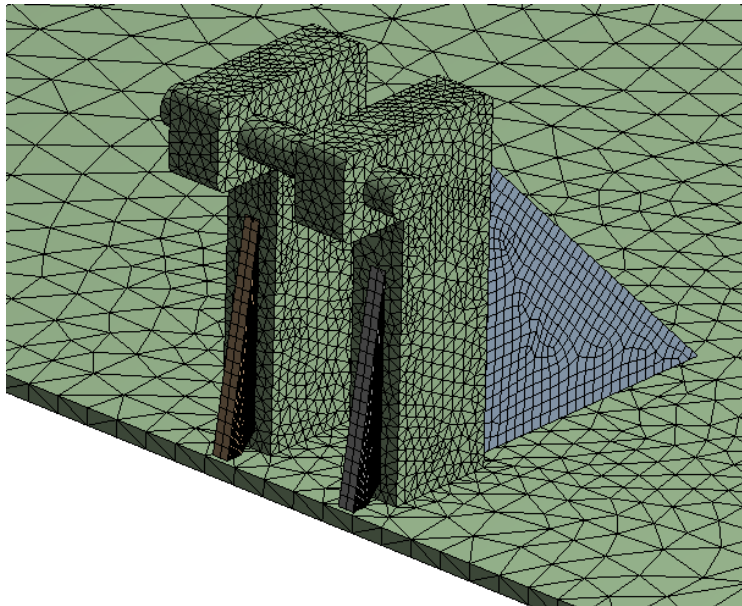
Σχολιασμός: Η άρθρωση λειτουργεί κάτω από το όριο διαρροής του υλικού που είναι φτιαγμένη και παράλληλα εμφανίζει τάσεις συμβατές με συντελεστή ασφαλείας  $K=5$ .

#### 4.4 Γάντζος

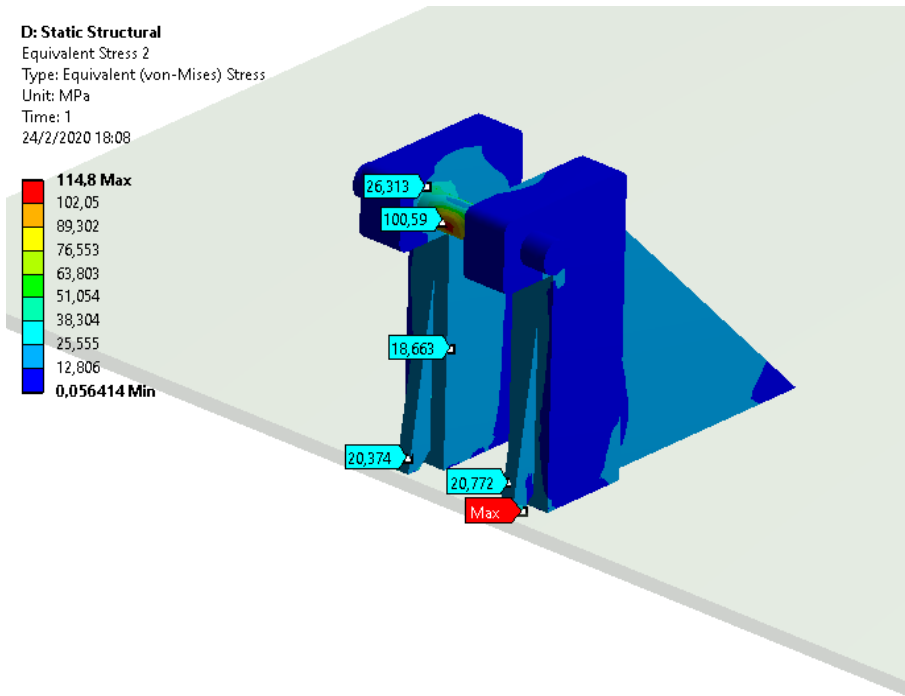
Ο γάντζος είναι μέρος του συστήματος ανάκλισης, το οποίο είναι τοποθετημένο στην κορυφή του 18m ιστού. Η αντοχή του πρέπει να είναι αντίστοιχη της δύναμης που δέχεται από το συρματόσχοινο κατά τη διαδικασία ανάκλισης. Η μεγαλύτερη τιμή της  $F$  έχει υπολογιστεί προηγουμένως ίση με 47074,3 N. Μετά από παρόμοια διαστασιολόγηση όπως στο κεφάλαιο 4.3, σχεδιάζεται ο γάντζος που φαίνεται στην εικόνα 4.10.



Εικόνα 4.10: Γάντζος με πύρο 35mm, ενισχυμένος με 4 νεύρα πάχους 15mm



Εικόνα 4.11: Πλέγμα με 21346 στοιχεία

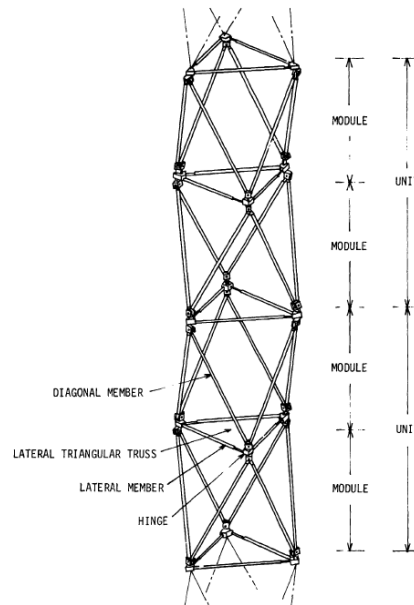


Εικόνα 4.12: Ισοδύναμη τάση κατά von-Mises

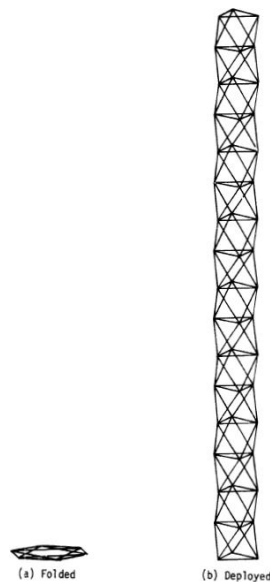
Σχολιασμός: Η άρθρωση λειτουργεί κάτω από το όριο διαρροής του υλικού που είναι φτιαγμένη και παράλληλα εμφανίζει τάσεις συμβατές με συντελεστή ασφαλείας  $K=2$ .

#### 4.5 Μοντέλο αναδιπλούμενης τεχνολογίας

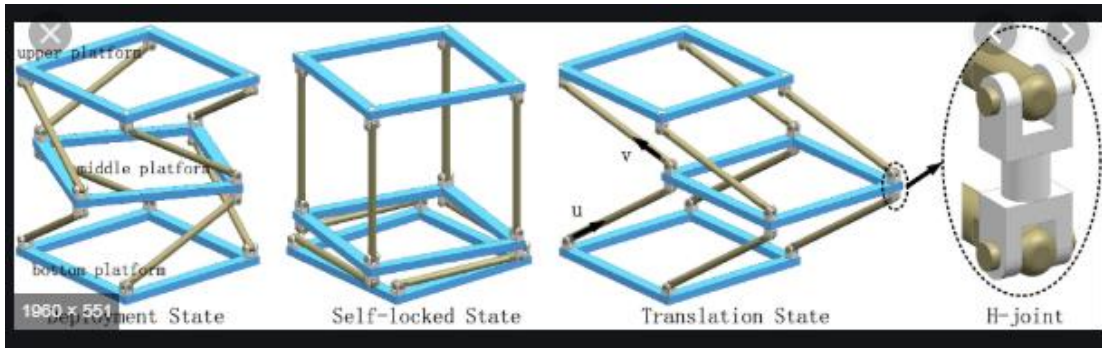
Στο παρόν υποκεφάλαιο θα παρουσιαστεί ένα πειραματικό μοντέλο αναδιπλούμενης τεχνολογίας (origami structure). Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό σε εφαρμογές στο διάστημα [9]. Στην εικόνα 4.13 παρουσιάζεται η λογική πίσω από ένα αναδιπλούμενο μοντέλο ιστού, πάνω στην οποία θα βασιστεί και το μοντέλο που προτείνει η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία και στην εικόνα 4.14 φαίνεται η αρχική (διπλωμένος) και τελική δομή του ιστού (ξεδιπλωμένος).



Εικόνα 4.13: Δομή αναδιπλούμενου ιστού που χρησιμοποιείται σε διαστημικές εφαρμογές [9]



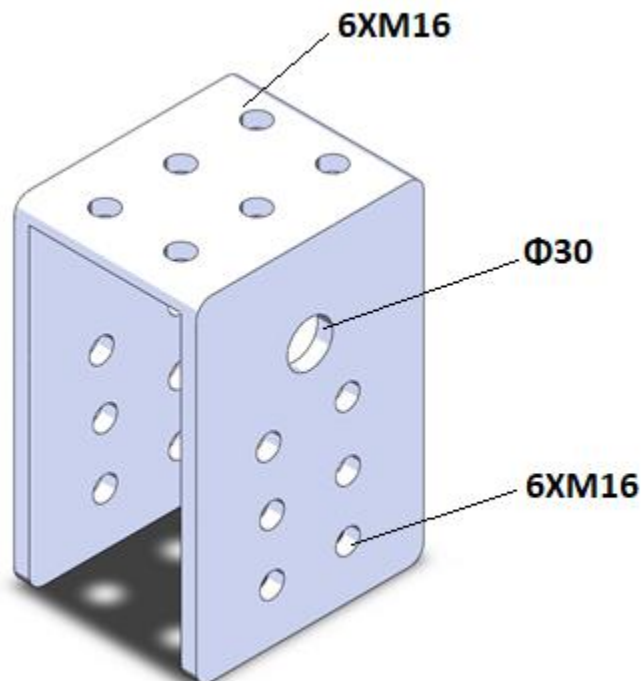
Εικόνα 4.14: Αρχική και τελική μορφή ιστού που χρησιμοποιείται [9]



Εικόνα 4.14: Τρόπος αναδίπλωσης και μορφή άρθρωσης στα 8 άκρα του τετραγωνικού πλαισίου

Βάσει των παραπάνω κατασκευάζεται αναδιπλούμενο μοντέλο ιστού με:

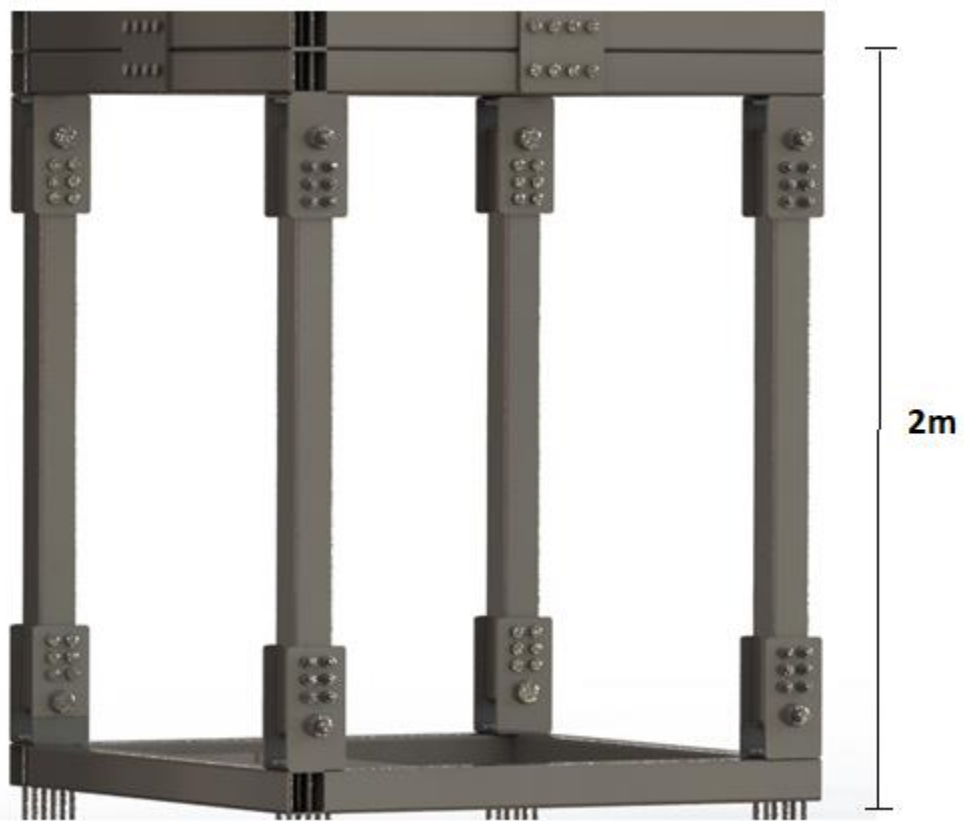
- χαρακτηριστικά
  - ✓ Αντοχή στις αεροδυναμικές καταπονήσεις που υπολογίστηκαν στο κεφάλαιο 3.2.
  - ✓ Μέγιστο ύψος 8m για χρήση σε αστικές εφαρμογές. Ορίζεται κατά αυτό τον τρόπο προκειμένου να είναι εφικτή η κατασκευή ανθεκτικών αρθρώσεων.
  - ✓ Επιτρεπόμενη αναδίπλωση λόγω των ειδικά κατασκευασμένων αρθρώσεων (εικόνα 4.15), οι οποίες ασφαλίζουν μέσω κοχλίας σύσφιξης  $\Phi 30$  και 6 κοχλιών M16 κλάσης 8.8.



Εικόνα 4.15: Άρθρωση που επιτρέπει την αναδίπλωση της κατασκευής.

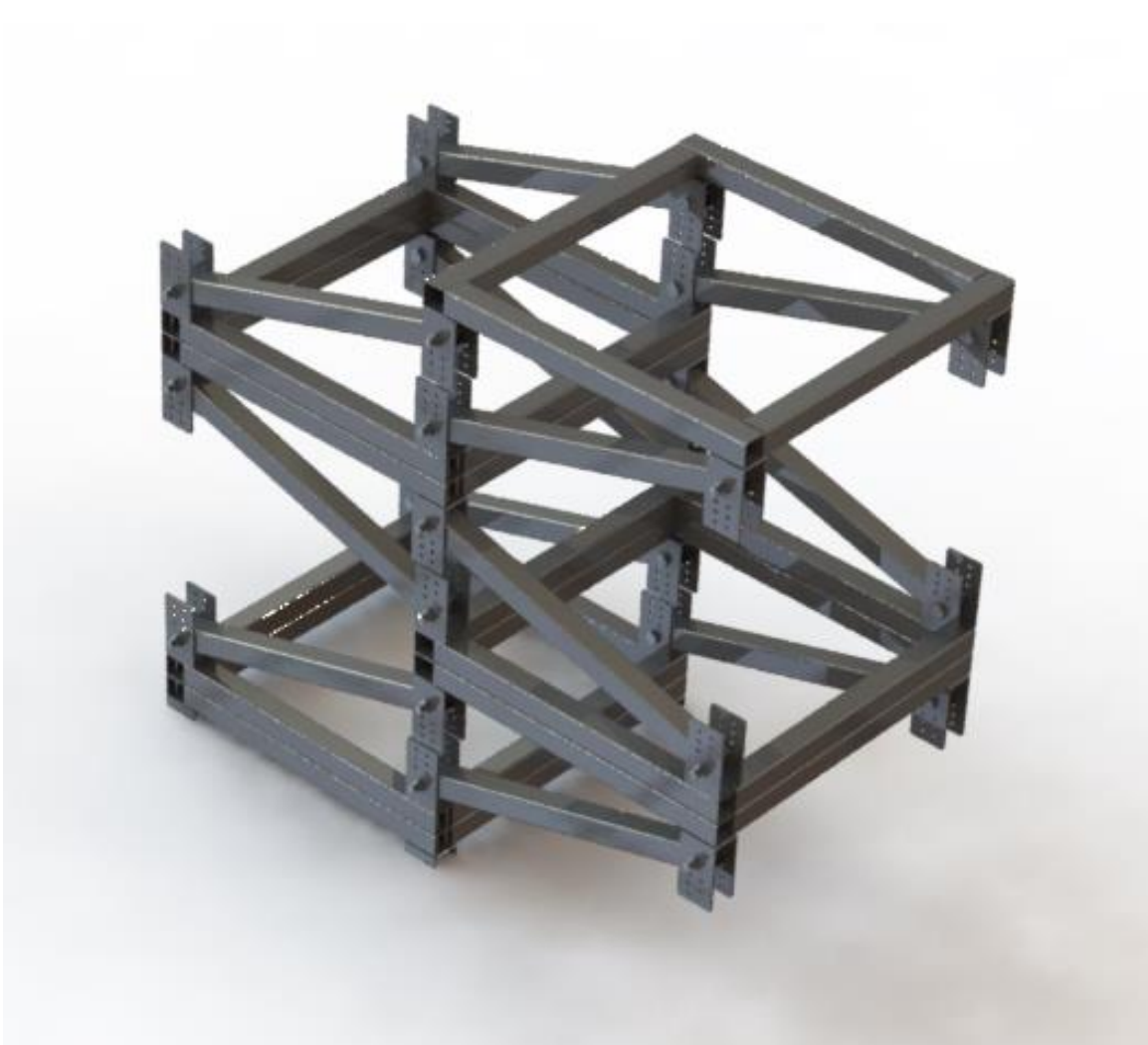


Εικόνα 4.16: Αρθρώσεις ελεύθερες να περιστραφούν περί τον άξονα των κοχλιών Φ30



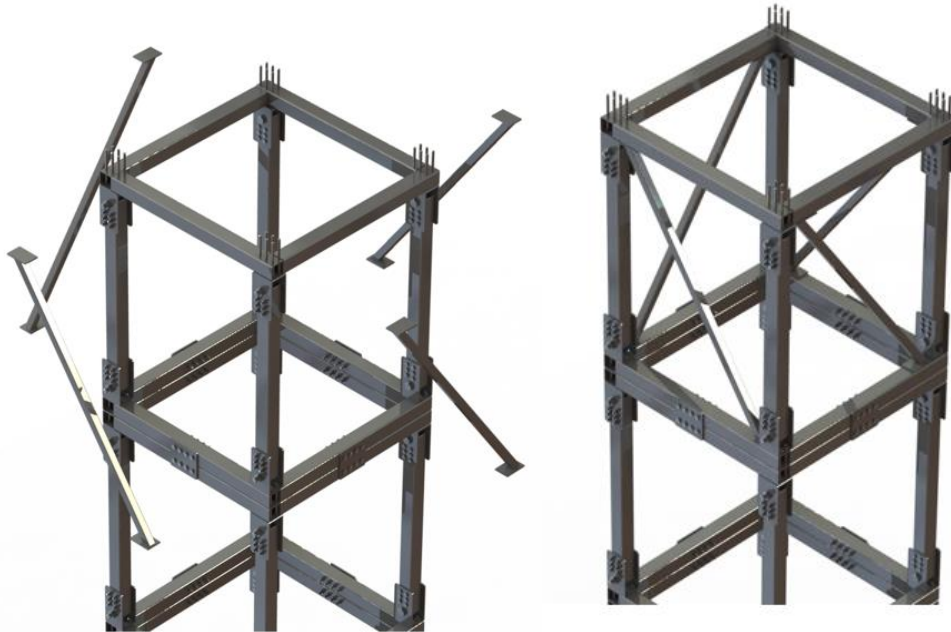
Εικόνα 4.17: Ασφάλιση αρθρώσεων μέσω κοχλία συσφίξεως Φ30 και 6ΧΜ16

- Και μέθοδο εγκατάστασης:
  - ✓ Βήμα 1: Συναρμολόγηση της 8m κατασκευής πριν μεταφερθεί στην τοποθεσία εγκατάστασής της. Ο ιστός μεταφέρεται διπλωμένος εκμεταλλευόμενος την περιστροφή που του επιτρέπουν οι αρθρώσεις στα άκρα των 100X100X5 κοίλοδοκών.



Εικόνα 4.18: Διπλωμένος ιστός με συνολικό ύψος ίσο με 3m

- ✓ Βήμα 2: Ξεδίπλωμα του ιστού στο σημείο εγκατάστασής του μέσω ειδικού μηχανισμού γρύλων ή μικρού γερανού. Αρχικά ξεδιπλώνεται το δομικό στοιχείο της κορυφής (6-8m), ασφαρίζεται και τοποθετούνται οι διαδοκίδες στις 4 πλευρές.



Εικόνα 4.19: Οι 4 διαδοκίδες πριν (αριστερά) και αφού (δεξιά) τοποθετηθούν στις πλευρές του δίμετρου δομικού στοιχείου της κορυφής



Εικόνα 4.20: Οι διαδοκίδες τοποθετημένες.



- ✓ Βήμα 3: Επανάληψη του βήματος 2 και για το υπόλοιπο ξεδιπλωμένο ιστό (0-6m). Έτσι ολοκληρώνεται η διαδικασία συναρμολόγησης και εγκατάστασης του 8m ιστού.



Εικόνα 4.21: Εγκατεστημένος 8m αναδιπλούμενος ιστός

## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και μελλοντικοί στόχοι

### 5.1: Οργάνωση βιβλιοθήκης

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας για την καταλληλότητα των μοντέλων της βιβλιοθήκης χωροδικτυωμάτων βάσει των συνθηκών εγκατάστασης και σταθερών που έχουν παρουσιαστεί εκτενώς στο κεφάλαιο 2.7:

$a(m)$ / Μοντέλα	1	2	3
0,8	X	X	X
1,3	OK	OK	OK
2	OK	OK	OK

Εικόνα 5.1: Αποτελέσματα καταλληλότητας μοντέλων

Σχολιασμός: Οι ιστοί που έχουν  $a = 0,8m$  έχουν απορριφθεί και στα 3 μοντέλα για τις συνθήκες εγκατάστασης που έχουν περιγραφεί στο κεφάλαιο 2 ( $h_{max}=18m$ ,  $u_{max}=40m/sec$ ). Εάν ένα από τα  $h_{max}$  ή  $u_{max}$  ελλατωθεί τότε οι ιστοί με  $a=0,8m$  θα είναι ασφαλείς για χρήση στη βιομηχανία. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία προτείνεται η μείωση του  $h_{max}$  κατά το  $\frac{1}{2}$ .

### 5.2 Κοστολόγηση

Προκειμένου να υπάρχει καλύτερη εικόνα και ένα επιπλέον μέτρο σύγκρισης των κατασκευών γίνεται κοστολόγηση βάσει:

- του συνολικού βάρους μετάλλου που χρησιμοποιήθηκε (0,67 €/κιλό)
- των εργατών και τις εργατοώρες που χρειάζονται για την ολοκλήρωση της εγκατάστασης του ιστού (70€/ μέρα)
- το πλήθος των κοχλιών, περικόχλιων και grover.
  - Τιμή κοχλία M12 κλάσης 10.9: 210€/100τμχ
  - Τιμή κοχλία M16 κλάσης 8.8: 330€/100τμχ
  - Τιμή περικόχλιου M12: 50€/100τμχ
  - Τιμή περικόχλιου M16: 70€/100τμχ
  - Τιμή grover: 10€/100τμχ

<i>Μοντέλο 1</i>	<i>2x0,8</i>	<i>2x1,3</i>	<i>2x2</i>
<i>Χάλυβας [€]</i>	1109,52	1350,72	1569,81
<i>Συγκολλητές [€]</i>	70	70	70
<i>Κοχλίες [€]</i>	2840	2840	2840
<i>Σύνολο [€]</i>	4019,52	4260,72	4479,81

<i>Μοντέλο 2</i>	<i>2x0,8</i>	<i>2x1,3</i>	<i>2x2</i>
<i>Χάλυβας [€]</i>	1248,88	1524,92	1829,1
<i>Συγκολλητές [€]</i>	70	70	70
<i>Κοχλίες [€]</i>	2840	2840	2840
<i>Σύνολο [€]</i>	4158,88	4434,92	4739,1

<i>Μοντέλο 3</i>	<i>2x0,8</i>	<i>2x1,3</i>	<i>2x2</i>
<i>Χάλυβας [€]</i>	1248,88	1524,92	1829,1
<i>Συγκολλητές [€]</i>	70	70	70
<i>Κοχλίες [€]</i>	2840	2840	2840
<i>Σύνολο [€]</i>	4158,88	4434,92	4739,1

Εικόνα 5.2: Πινακοποιημένα συνολικά κόστη μοντέλων ιστών

### 5.3 Μελλοντικοί στόχοι

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία εισαγωγή στη δημιουργία ενός ημι-αυτοματοποιημένου εργαλείου υπολογισμού και σχεδιασμού εγκαταστάσεων χωροδικτυωμάτων με τυποποιημένα δομικά στοιχεία και στοιχεία μηχανών που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην βιομηχανία ασφαλώς. Μελλοντικές μελέτες μπορούν να βασιστούν στη δομή και στη διαδικασία επίλυσης των προβληματισμών της παρούσας εργασίας, με σκοπό τον εμπλουτισμό των μεταβλητών της βιβλιοθήκης δικτυωμάτων κινητής τηλεφωνίας. Ορισμένες ενέργειες προς αυτή την κατεύθυνση είναι οι εξής:

### 5.3.1 Αύξηση παραμέτρων βιβλιοθήκης

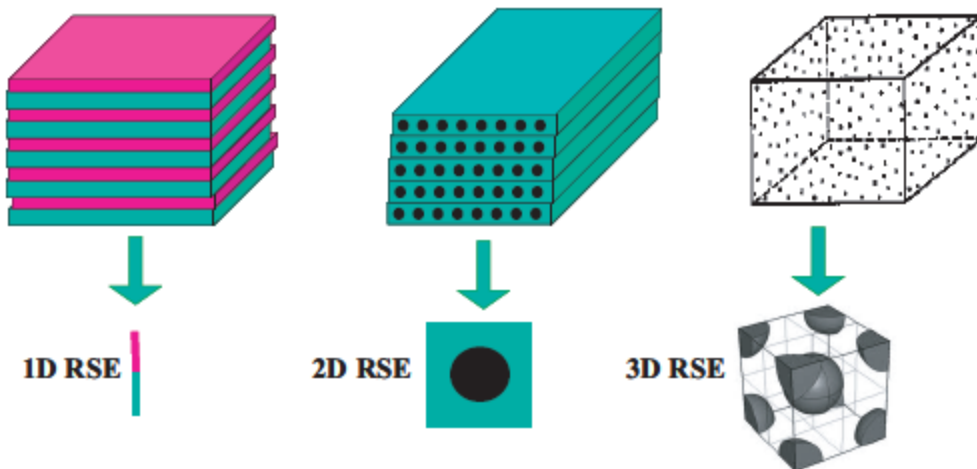
Έτσι επιτυγχάνεται και η παράλληλη μείωση των σταθερών. Νέες παράμετροι είναι:

- ✓ Μεταβλητές διαστάσεις κοιλοδοκών (κάθετων και διαδοκίδων)
- ✓ Χρήση διαφορετικών διατομών όπως είναι οι γωνίες (L beam)
- ✓ Μελέτη ιστών μεταβαλλόμενης διατομής καθώς αυξάνεται το ύψους τους
- ✓ Προθήκη επιπλέον μοντλέλων διάταξης ιστών, όπως για παράδειγμα το προτεινόμενο αναδιπλούμενο μοντέλο του κεφαλαίου 4.6.
- ✓ Ορισμός της μέγιστης ταχύτητας ανέμων βάσει των καιρικών φαινομένων κάθε περιοχής
- ✓ Αύξηση του μέγιστου ύψους του ιστού.
- ✓ Χρήση διαφορετικών υλικών όπως είναι τα συνθετικά πολυμερή υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού

Η προσθήκη των παραπάνω μεταβλητών και σε συνδυασμό τους, οδηγεί στην υλοποίηση μιας πλήρως καταρτισμένης βιβλιοθήκης χωροδικτυωμάτων η οποία θα δίνει τη δυνατότητα να γίνεται η αυτοματοποιημένη επιλογή του κατάλληλου ιστού βάσει των απαιτούμενων συνθηκών εγκατάστασης.

### 5.3.2 Δημιουργία Αντιπροσωπευτικού Δομικού Στοιχείου (RSE: Representative Structural Element)

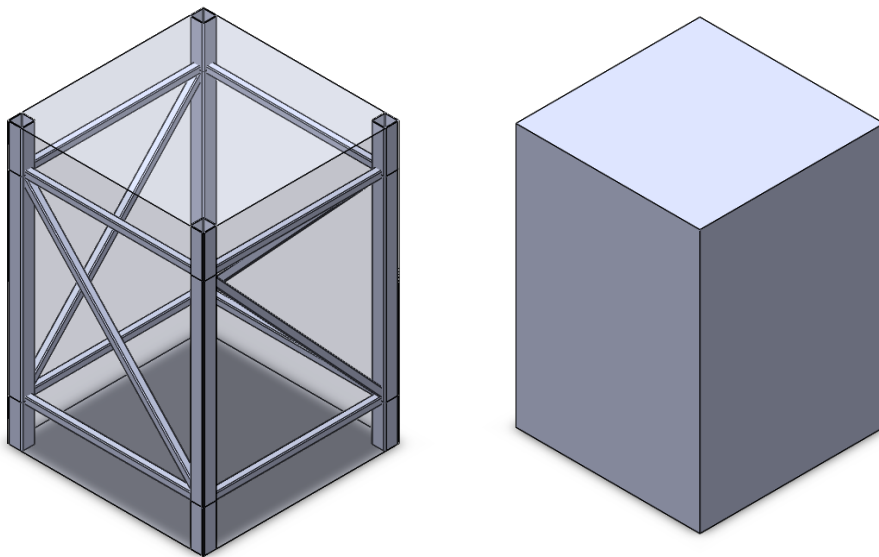
Το Αντιπροσωπευτικό Δομικό Στοιχείο ορίζεται ως το μικρότερο δομικό στοιχείο μιας κατασκευής το οποίο ο αναλυτής θέλει να ορίσει προκειμένου να τον βοηθήσει σε μακροσκοπικό επίπεδο ανάλυσης. Ο εκάστοτε αναλυτής έχει την ελευθερία να επιλέξει ο ίδιος τι θεωρεί αντιπροσωπευτικό για την κατασκευή του. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με τη διαίρεση της κατασκευής σε μικρότερα κομμάτια και την μελέτη των χαρακτηριστικών τους πειραματικά. Εάν δεν είναι δυνατόν να γίνουν φυσικά πειράματα για τον καθορισμό των ιδιοτήτων μιας μονάδας ΑΔΣ, τότε πρόκειται για το μικρότερο μαθηματικό ΑΔΣ.



Εικόνα 5.3: Παραδείγματα εφαρμογών RSE για κατάστρωση αυτοσχέδιου πεπερασμένου στοιχείου

Η μεθοδολογία που προτείνεται για μελλοντική κατασκευή ενός ΑΔΣ για ιστό κινητής τηλεφωνίας είναι η εξής:

- Επιλογή διαστάσεων ελάχιστου αντιπροσωπευτικού όγκου. Σύμφωνα με την ανάλυση που έχει προηγηθεί επιλέγεται ως ελάχιστο ύψος τα 2m.



Εικόνα 5.4: Αντιπροσωπευτικός όγκος RSE

- Υπολογισμός μητρώου δυσκαμψίας  $K$  του ΑΔΣ μέσω προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Με τη χρήση μικρών μετατοπίσεων και περιστροφών δημιουργείται εφελκυσμός και κάμψη στο μοντέλο και στους τρεις άξονες (X, Y, Z). Μετρώντας τις δυνάμεις και τις ροπές που δημιουργούνται ως προς το σύστημα συντεταγμένων και λύνοντας τις εξισώσεις

$$k = \frac{M}{\theta}$$

$$k = \frac{F}{x}$$

παράγεται το συμμετρικό μητρώο στιβαρότητας 6 βαθμών ελευθερίας του ΑΔΣ.

KI	1	2	3	4	5	6
1	■					
2		■				
3			■			
4				■		
5					■	
6						■

Εικόνα 5.5: Μητρώο δυσκαμψία RSE

Με αυτό τον τρόπο έχει οριστεί ένα νέα αυτοσχέδιο πεπερασμένο στοιχείο. Ο πίνακας της εικόνας 5.5 μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παρούσα μορφή ή σαν μητρώο ελαστικότητας στο πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος, η μακροσκοπική ανάλυση (στατικότητα 18m μοντέλου) θα γίνεται με τη χρήση του ΑΔΣ όπως φαίνεται στην εικόνα 5.6



Εικόνα 5.6: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων 18m ιστού με τη χρήση RSE

### 5.3.3 Προσθήκη τεχνολογιών προληπτικής συντήρησης

Με στόχο τη μείωση του κόστους συντήρησης και εποπτείας της δομικής ακεραιότητας της εγκατάστασης προτείνεται η εγκατάσταση ειδικά μελετημένων συστημάτων αισθητήρων και καμερών, με τα οποία θα γίνεται δυνατή η απομακρυσμένη εποπτεία της κατασκευής σε πραγματικό χρόνο. Η συγκεκριμένη ενέργεια αποσκοπεί στην άμεση πρόληψη ανεπιθύμητων γεγονότων, όπως η πτώση του δικτύου κινητής τηλεφωνίας σε μια περιοχή που κάποιος ιστός έχει υποστεί ζημιές, μιας και υπάρχει άμεση ενημέρωση για τη ζημιά και γνώση για την επιδιόρθωσή της βάσει της βιβλιοθήκης.

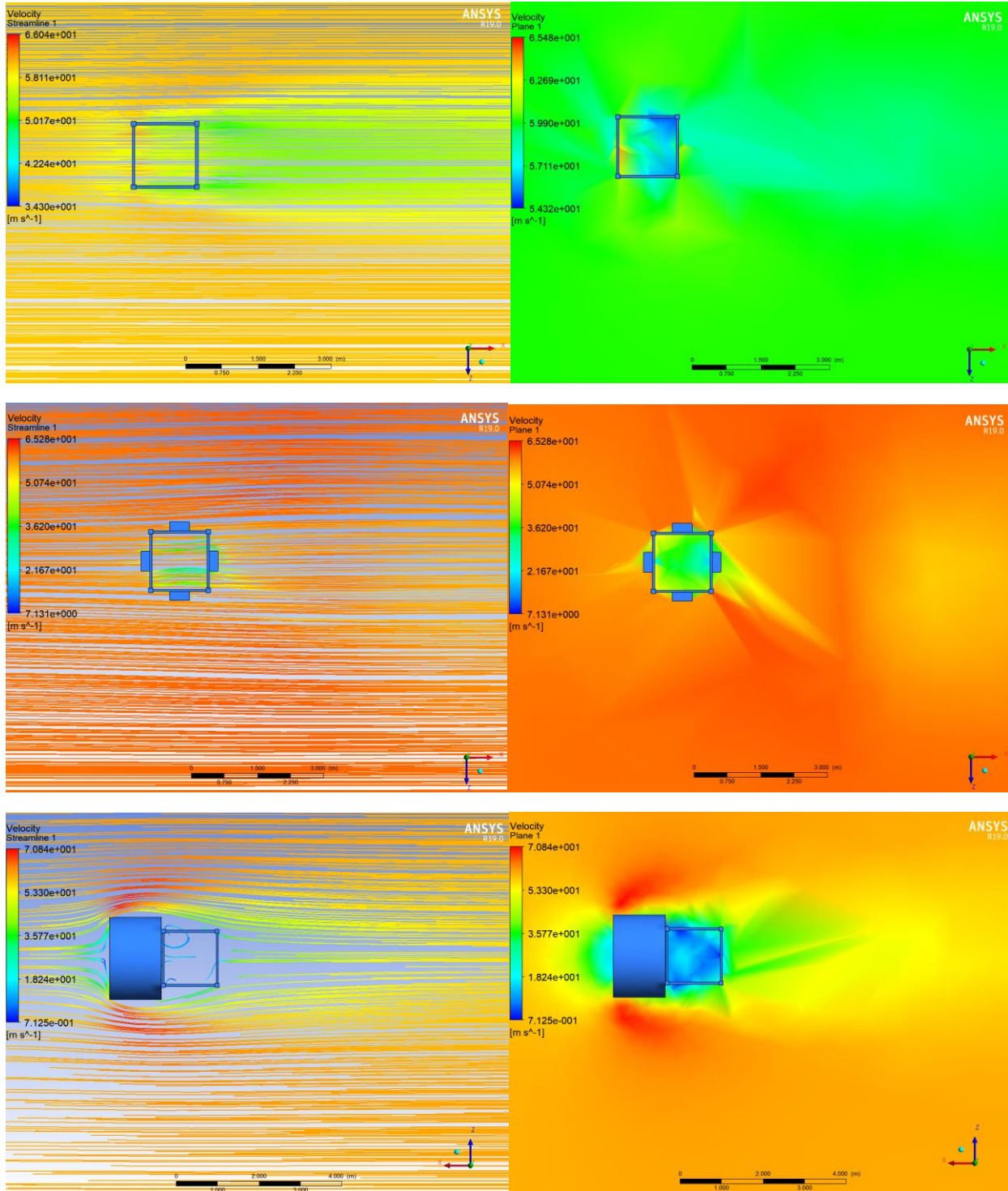
## 6. Βιβλιογραφία

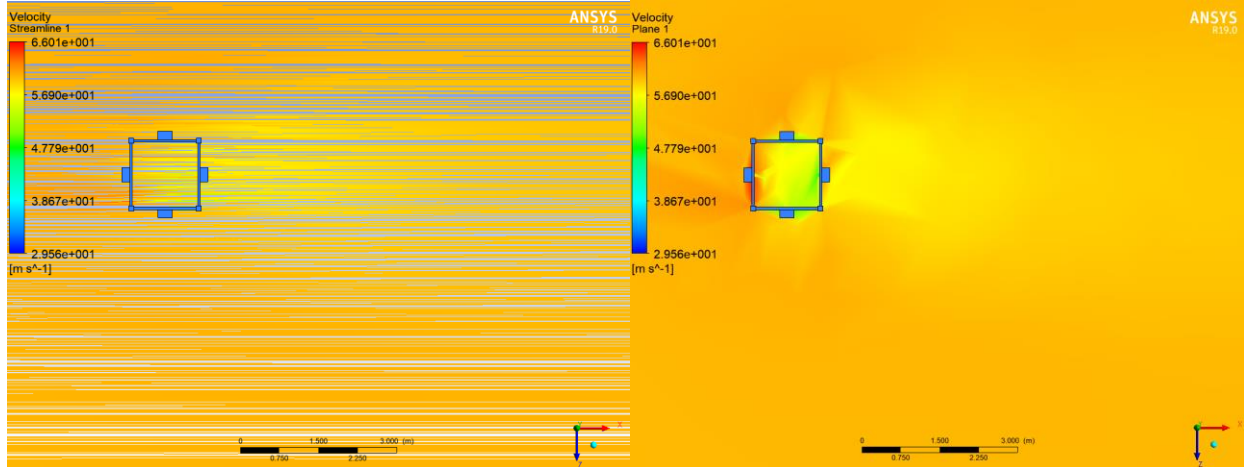
- [1] Παπαδόπουλος Χ., *Στοιχεία Μηχανών*, 2<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Πάτρα Ιούνιος 2012
- [2] EN 1991-1-4:2005+A1, *Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General Actions – Wind actions*, 1<sup>η</sup> έκδοση, Βρυξέλλες Απρίλιος 2010
- [3] EN 1998-1:2004, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance- Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*, 1<sup>η</sup> έκδοση, Βρυξέλλες Δεκέμβριος 2004
- [4] EN 1998-6:2005, *Eurocode 8- Design of structures for earthquake resistance- Part 6: Towers, masts and chimneys*, 1<sup>η</sup> έκδοση, Βρυξέλλες Ιούνιος 2005
- [5] EN 1993-3-1:2006, *Eurocode 3- Design of steel structures- Part 3-2: Towers, masts and chimneys- Towers and masts*, 1<sup>η</sup> έκδοση, Βρυξέλλες Οκτώβριος 2006
- [6] EN 1993-1-7:2007, *Eurocode 3- Design of steel structures- Part 1-7: Plated structures subject to out of plane loading*, 1<sup>η</sup> έκδοση, Βρυξέλλες Απρίλιος 2007
- [7] Παπαδόπουλος Γ.Α, Βαδαλούκα Β.Γ, *Εφαρμοσμένη Μηχανική: Μηχανική των Υλικών, Ελαστικότητα και Αντοχή*, 1<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις ΝΚ, Αθήνα 2014
- [8] Wenbin Yu, *Representative Structural Element: a New Paradigm for Multiscale Structural Modeling*, 54<sup>th</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Βοστώνη Απρίλιος 2013
- [9] Koryo Miura, *DESIGN AND OPERATION OF A DEPLOYABLE TRUSS STRUCTURE*, The institute of space and astronautical science, Τόκυο



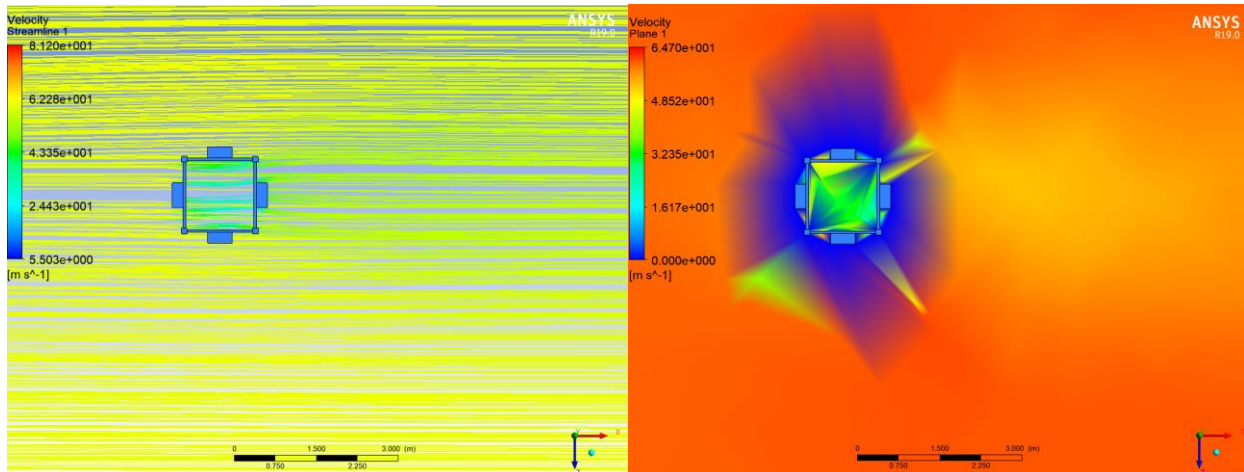
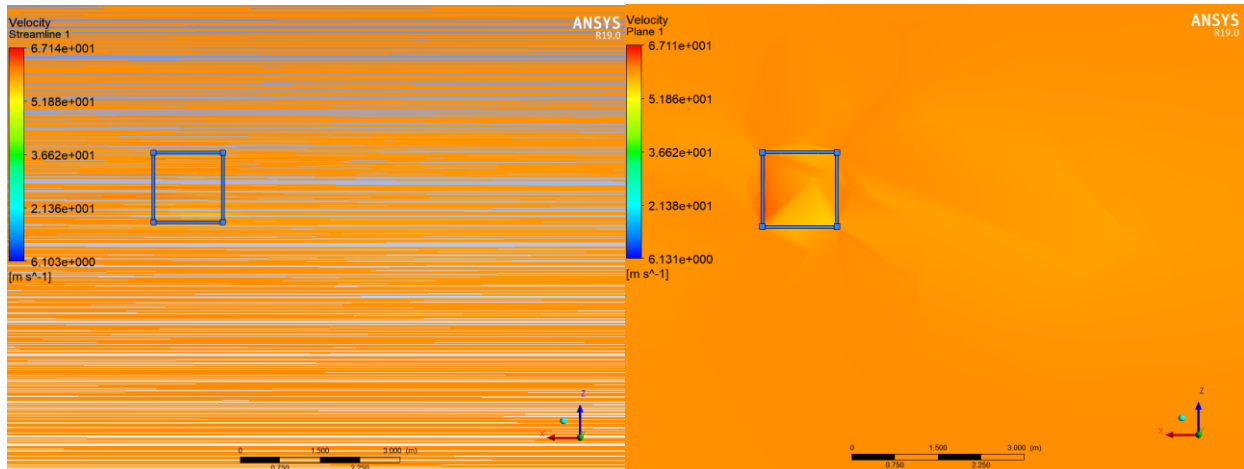
# Παράρτημα Α

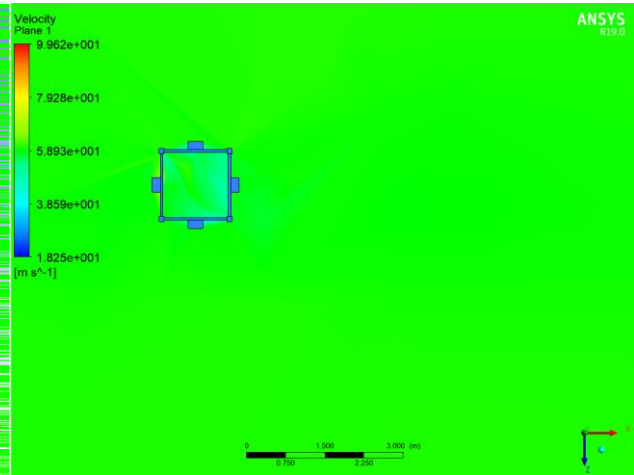
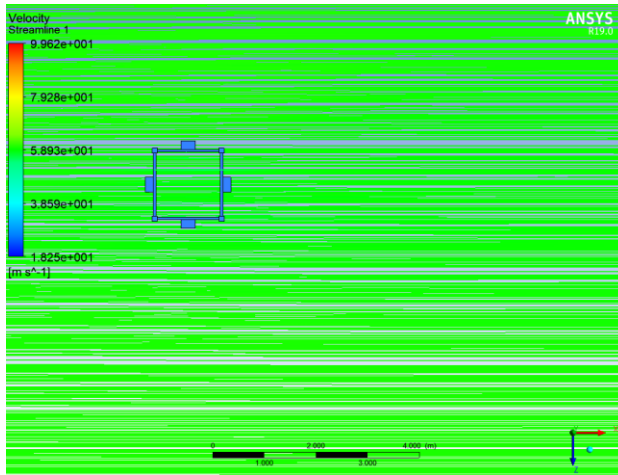
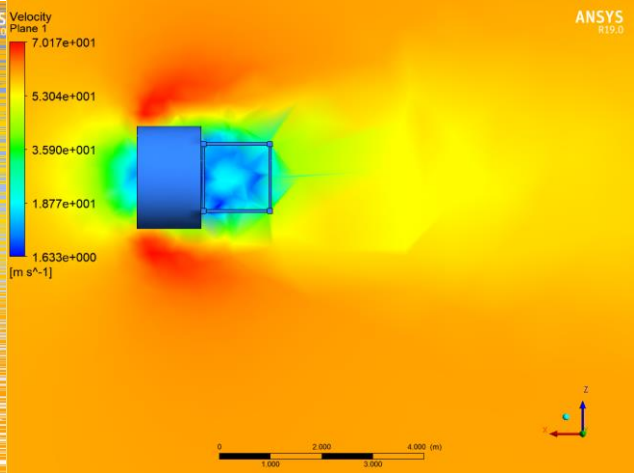
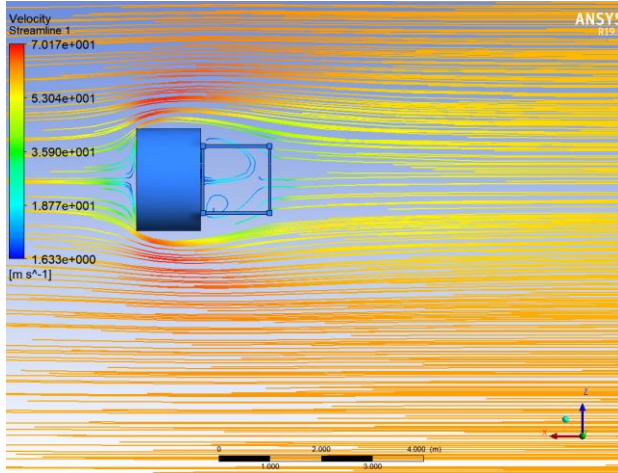
- Μοντέλο 2





- Μοντέλο 3



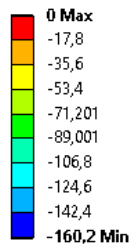


## Παράρτημα Β

- Μοντέλο 1 ( $a=0,8\text{m}$  και  $a=2\text{m}$ )

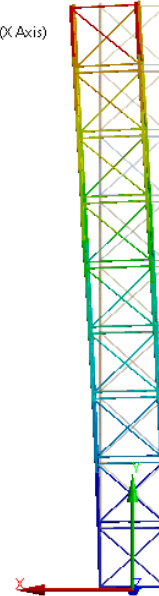
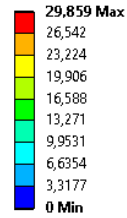
### B: Static Structural

Directional Deformation  
Type: Directional Deformation(X Axis)  
Unit: mm  
Global Coordinate System  
Time: 1  
4/3/2020 14:35



### J: Static Structural

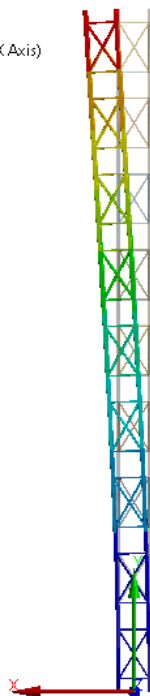
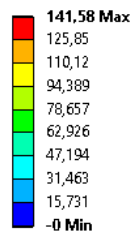
Directional Deformation  
Type: Directional Deformation(X Axis)  
Unit: mm  
Coordinate System  
Time: 1  
4/3/2020 14:37



- Μοντέλο 2 ( $a=0,8\text{m}$ ,  $1,3\text{m}$  και  $2\text{m}$ )

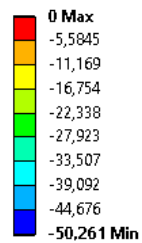
### L: Static Structural

Directional Deformation  
Type: Directional Deformation(X Axis)  
Unit: mm  
Coordinate System  
Time: 1  
4/3/2020 14:39

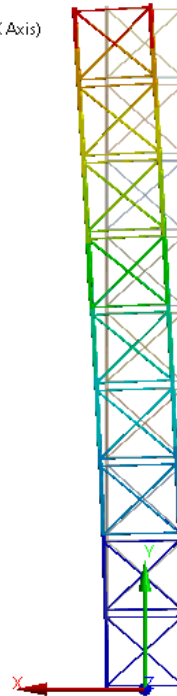
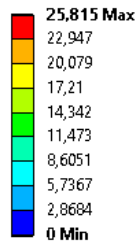


### N: Static Structural

Directional Deformation  
Type: Directional Deformation(X Axis)  
Unit: mm  
Global Coordinate System  
Time: 1  
4/3/2020 14:40

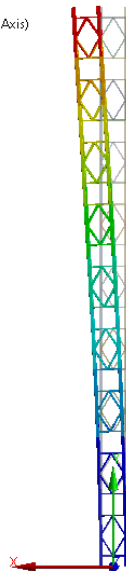
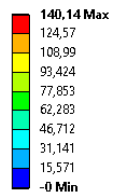


**P: Static Structural**  
 Directional Deformation  
 Type: Directional Deformation(X Axis)  
 Unit: mm  
 Coordinate System  
 Time: 1  
 4/3/2020 14:42

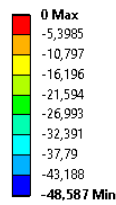


- Μοντέλο 3 (a=0,8,m 1,3m και 2m)

**R: Static Structural**  
 Directional Deformation  
 Type: Directional Deformation(X Axis)  
 Unit: mm  
 Coordinate System  
 Time: 1  
 4/3/2020 14:44



**T: Static Structural**  
 Directional Deformation  
 Type: Directional Deformation(X Axis)  
 Unit: mm  
 Global Coordinate System  
 Time: 1  
 4/3/2020 14:45



**V: Static Structural**  
 Directional Deformation  
 Type: Directional Deformation(X Axis)  
 Unit: mm  
 Coordinate System  
 Time: 1  
 4/3/2020 14:46

