



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Ανάπτυξη μεθοδολογίας για το σχεδιασμό και τον έλεγχο της
αντοχής των πύργων ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα**

Συγγραφέας:

Τζίμα Παναγιώτα

46146530

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Κυριάκος Ρώσσης

Στεργίου Κωνσταντίνος

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

Diploma Thesis

**Development of a methodology for the design and strength
analysis of horizontal axis wind turbine towers**

Student Name:

Tzima Panagiota

46146530

Supervisors:

Kyriakos Rossis

Stergiou Konstantinos

Athens, October 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Ανάπτυξη μεθοδολογίας για το σχεδιασμό και τον έλεγχο της
αντοχής των πύργων ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του
Εισηγητή**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική
Επιτροπή:

| A/A | ΟΝΟΜΑ-ΕΠΩΝΥΜΟ | ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ |
|------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 1 | Στεργίου Κωνσταντίνος | |
| 2 | Ρώσσης Κυριάκος | |
| 3 | Σαγιάς Βασίλειος | |

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Τζίμα Παναγιώτα του Σπυρίδων, με αριθμό μητρώου 46146530 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

Τζίμα Παναγιώτα



Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου κύριο Κυριάκο Ρώσση, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα θέμα το οποίο με ενδιαφέρει αλλά και τους φίλους μου και την οικογένεια μου για την υποστήριξη τους.

Περίληψη

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας αποτελεί μια φιλικότερη προς το περιβάλλον λύση στο φαινόμενο της ενεργειακής κρίσης. Οι ανεμογεννήτριες αποτελούν ένα διαχρονικό μέσο μετατροπής της κινητικής ενέργειας που προέρχεται από τον άνεμο σε ηλεκτρική, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Παρακάτω, παρουσιάζεται μια ιστορική ανασκόπηση της εξέλιξης των πρώιμων ανεμογεννητριών στις σύγχρονες μορφές τους, οι οποίες ταξινομούνται ως προς τον άξονα, τον αριθμό των πτερυγίων και τη μορφολογία των πύργων τους. Η διερεύνηση οικονομικότερων και ασφαλέστερων κατασκευών αποτελεί μια πρόκληση στο σχεδιασμό των σύγχρονων ανεμογεννητριών.

Η συγκεκριμένη εργασία επικεντρώνεται στον σχεδιασμό ενός αριθμητικού μοντέλου πύργου ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα και στη συμπεριφορά αυτού κατά την καταπόνηση του από διάφορα φορτία με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Στόχος της συγκεκριμένης μεθοδολογίας δεν είναι η δημιουργία ενός τέλει πύργου, αλλά η εξέταση της συμπεριφοράς του σε σχέση με διάφορες παραμέτρους όπως είναι η αλλαγή της κατεύθυνσης των φορτίων αλλά και η μεταβολή του πάχους. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και προτείνονται πιθανές βελτιώσεις στο σχεδιασμό που αφορούν μελλοντικά σχέδια.

Λέξεις Κλειδιά: ανεμογεννήτριες, αριθμητικό μοντέλο, πεπερασμένα στοιχεία

Abstract

The utilization of wind energy is a more environmentally friendly solution to the phenomenon of the energy crisis. Wind turbines are a timeless means of converting kinetic energy from the wind into electricity, which can be used in a variety of ways. Below is a historical overview of the evolution of early wind turbines into their modern forms, classified by their axis, number of blades, and tower morphology. Investigating more economical and safer constructions is a challenge in the design of modern wind turbines.

This thesis focuses on the design of a numerical model of a horizontal axis wind turbine tower and its behavior when stressed by various loads using the finite element method.

The aim of this particular methodology is not to create a perfect tower, but to examine its behavior in relation to various parameters such as changing the direction of loads and changing thickness. Finally, the results are presented and possible design improvements for future projects are proposed.

Keywords: wind turbines, numerical model, finite element method

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|--|-----|
| 1. Εισαγωγή..... | 9 |
| 1.1 Ιστορική Ανασκόπηση..... | 10 |
| 2. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες-Ταξινόμηση πύργων..... | 22 |
| 2.1 Τύποι ανεμογεννητριών ως προς την διάταξη του άξονα..... | 22 |
| 2.2 Αριθμός Πτερυγίων Δρομέα..... | 30 |
| 2.3 Κατηγορίες πύργων ανεμογεννητριών (4)..... | 35 |
| 2.4 Μελλοντικά σχέδια..... | 45 |
| 3. Φορτία και αστοχίες στις ανεμογεννήτριες..... | 58 |
| 4. Πεπερασμένα Στοιχεία..... | 64 |
| 5. Σχεδιασμός Αριθμητικού μοντέλου..... | 67 |
| 5.1 Περιγραφή του πύργου..... | 67 |
| 5.2 Μοντέλο αριθμητικής προσομοίωσης..... | 67 |
| 5.3 Δημιουργία πλέγματος..... | 79 |
| 5.4 Αριθμητική προσομοίωση της φόρτισης..... | 84 |
| 5.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων: Ως προς την διεύθυνση του άνεμου..... | 88 |
| 5.6 Ανάλυση των αποτελεσμάτων: Ως προς το πάχος..... | 146 |
| 6. Συμπεράσματα και συζήτηση..... | 161 |
| 7. Βιβλιογραφία..... | 165 |

1. Εισαγωγή

Η αιολική ενέργεια έχει διαδραματίσει σπουδαίο ρόλο στην εξέλιξη του ανθρώπινου πολιτισμού. Η πρώτη εφαρμογή αιολικής ενέργειας που εντοπίζουμε χρονολογείται πριν από 5.000 χρόνια στην Αίγυπτο, με τη χρήση πανιών ως βοηθήματα για την προώθηση των σκαφών (Corke & Nelson, 2018).

Σήμερα μια μεγάλη πρόκληση είναι η παροχή αρκετής ενέργειας, νερού και τροφίμων χωρίς την εξάντληση των πόρων για τις μελλοντικές γενιές και χωρίς να είναι επιβλαβές για το περιβάλλον.

Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών τα τελευταία χρόνια επέτρεψε στην αιολική ενέργεια να γίνει μια βιώσιμη πηγή ενέργειας στην παγκόσμια αγορά ενέργειας. Ωστόσο, οι περαιτέρω εξελίξεις στον αεροδυναμικό σχεδιασμό και τον έλεγχο, έχουν τη δυνατότητα να κάνουν τις ανεμογεννήτριες πιο αποδοτικές, φιλικές προς το περιβάλλον και να αυξήσουν τη διάρκεια ζωής τους.

Υπάρχουν τέσσερις καίριες σημασίας στόχοι για τη λειτουργία των ανεμογεννητριών: (Corke & Nelson, 2018)

1. Να υπάρχει μέγιστη παραγωγή ενέργειας ενώ παράλληλα να διατηρείται η λειτουργία μεταξύ της ταχύτητας και των περιορισμών στα φορτία.
2. Η πρόληψη ακραίων φορτίων και η μείωση της κόπωσης που μπορεί να προκληθεί από την επαναλαμβανόμενη κάμψη εξαιτίας του βάρους του δρομέα και των ασταθών αεροδυναμικών φορτίων.
3. Η παροχή αποδεκτής ποιότητας ισχύος στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο ρεύματος.
4. Η διασφάλιση ασφαλούς λειτουργίας.

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες εξελίχθηκαν από πρώιμα σχέδια και υποδείγματα σε κατασκευές που πλέον μπορούν να ταξινομηθούν ως προς τον άξονα αλλά και τον αριθμό των πτερυγίων τους. Σήμερα, η επιλογή μεταξύ ανεμογεννητριών δύο, τριών ή περισσότερων πτερυγίων είναι θέμα συμβιβασμού μεταξύ αεροδυναμικής απόδοσης, πολυπλοκότητας, κόστους, θορύβου και αισθητικής (Veritas, 2002).

1.1 Ιστορική Ανασκόπηση

Ο άνεμος ως πηγή ενέργειας έχει διαδραματίσει μακρύ και σημαντικό ρόλο στην ιστορία του ανθρώπου (Corke & Nelson, 2018).

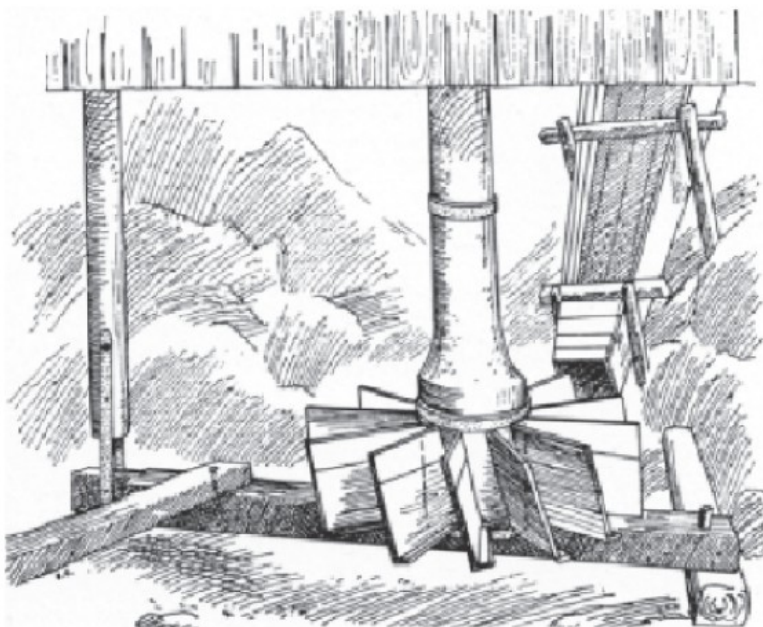
Ο ανεμόμυλος ήταν η πρώτη εμφάνιση της ανεμογεννήτριας, σε εποχές που άλλες πηγές ενέργειας ήταν άγνωστες ή σπάνιες. Η αιολική ενέργεια αντιπροσώπευε ένα επιτυχημένο μέσο για βιομηχανική και οικονομική ανάπτυξη και αποτελούσε μια πηγή φθηνότερη, εύκολα εκμεταλλεύσιμη και εύκολα προσβάσιμη (Beurskens, 2014).

Εξετάζοντας το πως η αιολική ενέργεια έχει συμβάλει στην οικονομική ανάπτυξη μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερις βασικές περιόδους.

- 600-1890: Κλασσική περίοδος
- 1890-1930: Ανάπτυξη ανεμογεννητριών για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- 1930-1960: Πρώτη φάση καινοτομιών
- 1973-Σήμερα: Δεύτερη φάση καινοτομιών και μαζική παραγωγή

600 - 1890: Κλασσική περίοδος, οι πρώτοι ανεμόμυλοι

Οι νερόμυλοι πιθανώς "άνοιξαν τον δρόμο" για τους ανεμόμυλους. Οι πρώτοι, παρήγαγαν κινητική ενέργεια απαραίτητη για την λειτουργία μηχανών όπως για παράδειγμα των μύλων άλεσης του αλευριού. Με το πέρασμα των χρόνων το στοιχείο του νερού αντικαταστάθηκε με εκείνο του αέρα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία των ανεμόμυλων που αποτελούν μια πρώιμη μορφή ανεμογεννήτριας (Beurskens, 2014).



Εικόνα 1.1.1 : Νερόμυλος κάθετου άξονα περιστροφής κοντά στο Göteborg, Σουηδία Mardiska Museet, Stockholm- The Mills of Tjorn (1965) (Beurskens, 2014).

Οι πρώτοι ανεμόμυλοι κάθετου άξονα εντοπίζονται στην Περσία και στην Κίνα. Οι συσκευές που μας είναι γνωστές από ιστορικές πηγές διέθεταν κάθετο κύριο άξονα στον οποίο συνδέονταν εγκάρσιες ράβδοι για την κίνηση αυτού.

Από την άλλη, παρατηρούμε τους πρώτους ανεμόμυλους οριζοντίου άξονα κατά τη διάρκεια των σταυροφοριών στην Εγγύς Ανατολή και αργότερα στη βορειοδυτική Ευρώπη. Αυτοί οι ανεμόμυλοι διέθεταν ένα σταθερό δρομέα που δεν μπορούσε να περιστραφεί προς την κατεύθυνση του ανέμου (καθώς δεν διέθετε μηχανισμό προσανατολισμού). Τα πτερύγια του δρομέα αυτών των ανεμόμυλων ήταν παρόμοια με αυτά που παρατηρούμε σήμερα, σε διάφορα ελληνικά νησιά. Κάποια από αυτά που διακρίνονται για τους ανεμόμυλους τους είναι η Μήλος, η Μύκονος και η Ρόδος.

Με τον συνεχώς αυξανόμενο αριθμό των ανεμομηχανών, η πίεση για πιο αποτελεσματική χρήση αυξήθηκε. Μια βελτίωση ήταν ο αυτόματος μηχανισμός προσανατολισμού του δρομέα προς στον άνεμο με τη βοήθεια ενός ανεμοδείκτη, δηλαδή ενός οργάνου που παρακολουθούσε η διεύθυνση του ανέμου.

Αυτή η ιδέα διατηρήθηκε από τα τέλη του 19ου αιώνα μέχρι και τα τέλη του 20ου. Αργότερα ο ανεμοδείκτης λειτούργησε μόνο ως αισθητήρας για να στέλνει ένα σήμα ελέγχου στον μηχανισμό προσανατολισμού και να “αναγκάζει” τον άξονα περιστροφής να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Beurskens, 2014).



Εικόνα 1.1.2 : Αισθητήρας κατεύθυνσης ανέμου σε μια πρώιμη ανεμογεννήτρια Lagerwey (Beurskens, 2014).

Η αιολική ενέργεια διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο ως πηγή ενέργειας για τη βιομηχανία και την οικονομία, ιδιαίτερα σε περιοχές που δεν υπήρχαν άλλοι εύκολα διαθέσιμοι πόροι ενέργειας όπως το ξύλο και το κάρβουνο. Παρόλα αυτά όμως, κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα, καύσιμα όπως το κάρβουνο και το ξύλο ήταν σχετικά φθηνά με αποτέλεσμα η χρήση των ανεμόμυλων να μειωθεί δραματικά. Έτσι, παρατηρήθηκε ότι ο συνολικός αριθμός των ανεμόμυλων στη βορειοανατολική Ευρώπη μειώθηκε από τους περίπου αρχικά 100.000 στους 2000 (Beurskens, 2014).

1890 - 1930: Ανάπτυξη ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Μετά την ίδρυση των πρώτων ηλεκτρικών σταθμών, η ζήτηση για ενέργεια που παράγεται από ορυκτά καύσιμα και ανανεώσιμες πηγές αυξήθηκε πολύ γρήγορα. Το 1887 ο James Blyth ήταν από τους πρώτους που χρησιμοποίησε έναν ανεμόμυλο για την παραγωγή ενέργειας στη Γλασκώβη. Η ανεμογεννήτρια αυτή είχε ύψος 10 μέτρα,

τα πτερύγια της ήταν καλυμμένα με πανί και χρησιμοποιήθηκε για τη φόρτιση των μπαταριών για το φωτισμό της εξοχικής του κατοικίας.

Το 1888 ο Charles Brush, ιδιοκτήτης μιας εταιρείας εργαλειομηχανών, κατασκεύασε μια ανεμογεννήτρια 12 kW με διάμετρο 17 μέτρων στο σπίτι του στο Κλίβελαντ του Οχάιο (ΗΠΑ). Σε σύγκριση με την ονομαστική της ισχύ, η ανεμογεννήτρια είχε πολύ μεγάλη διάμετρο. Ο δρομέας ήταν καλυμμένος πλήρως από 144 μικρότερα πτερύγια, επομένως η ταχύτητα περιστροφής ήταν αργή.

Η παρακάτω εικόνα δείχνει μέρη αυτής της ανεμογεννήτριας, που δημοσιεύθηκαν στο περιοδικό Scientific American στις 20 Δεκεμβρίου 1890.

SCIENTIFIC AMERICAN

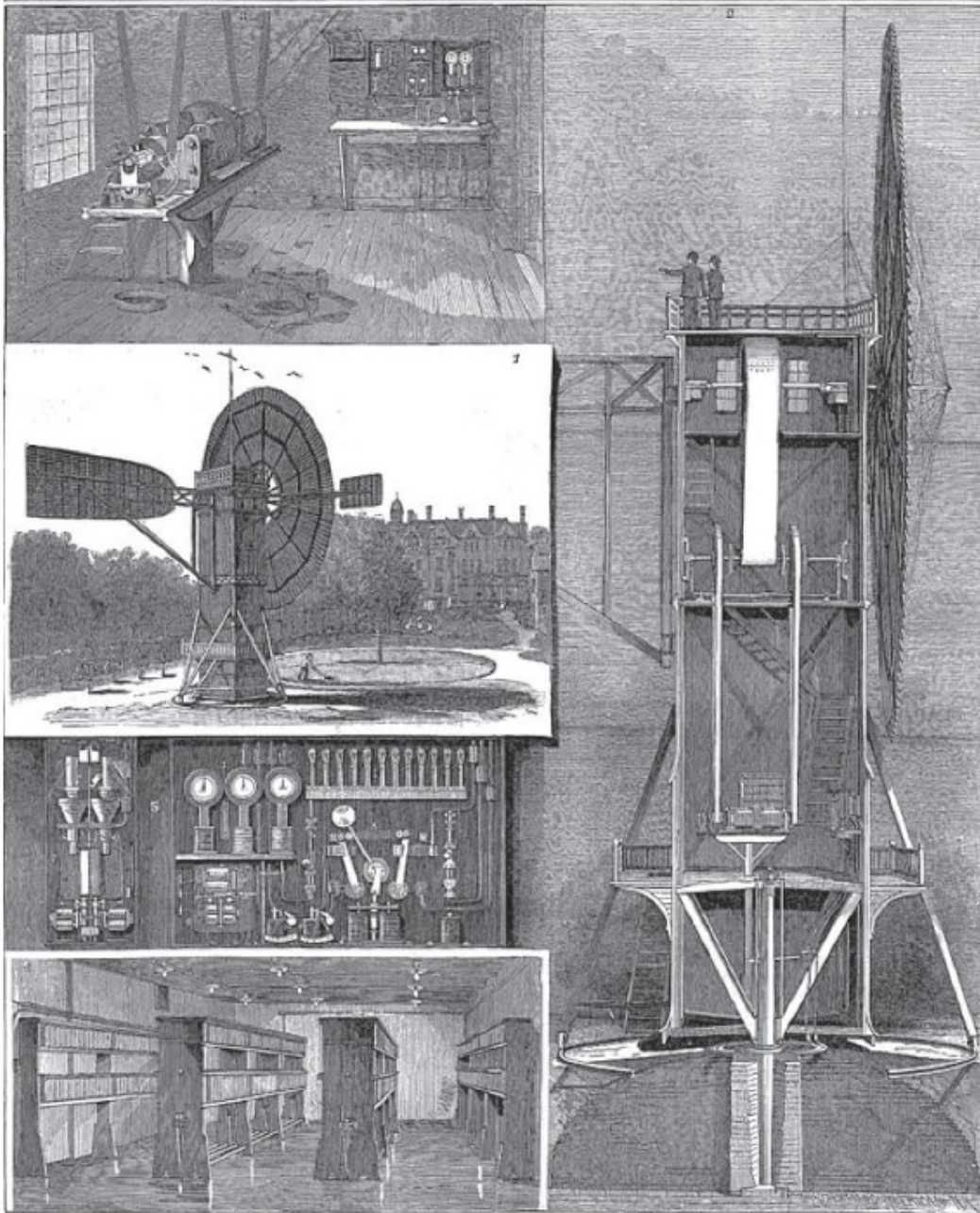
[Printed at the Post Office of New York, N. Y., as Second Class Matter. Copyrighted, 1890, by Munn & Co.]

A WEEKLY JOURNAL OF PRACTICAL INFORMATION, ART, SCIENCE, MECHANICS, CHEMISTRY, AND MANUFACTURES.

Vol. LXIII.—No. 52.—
ESTABLISHED 1845.

NEW YORK, DECEMBER 20, 1890.

[55-CENT A YEAR.
WEEKLY.]



1. Windmill in the park. 2. Vertical section of the tower. 3. Dynamo. 4. Storage batteries. 5. Regulating apparatus.

THE WINDMILL DYNAMO AND ELECTRIC LIGHT PLANT OF MR. CHARLES F. BRUSH, CLEVELAND. O.—[See page 388.]

Εικόνα 1.1.3 : Εικόνες από την ανεμογεννήτρια του Charles Brush (Beurskens, 2014).

Το 1891 ο καθηγητής Poul la Cour κατασκεύασε μια ανεμογεννήτρια στο Askov της Δανίας, προκειμένου να παράγει ενέργεια για προσωπική χρήση. Τα τέσσερα τηλεχειριζόμενα περύγια της ανεμογεννήτριας ήταν συνδεδεμένα με δύο δυναμό 9 kW. Η μέγιστη διάμετρος της ανεμογεννητριας του La-Cour ήταν 20 μέτρα και ήταν εξοπλισμένη με γεννήτρια των 10-35kW (Beurskens, 2014).



Εικόνα 1.1.4 : Δεξιά η δοκιμαστική ανεμογεννήτρια του Poul la Cour το 1891 στη Δανία. Αριστερά μια μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια το 1897 (Beurskens, 2014).

Το 1931 στη Sevastopol της Κριμαίας κατασκευάστηκε μια πειραματική ανεμογεννήτρια η οποία λειτουργούσε παράλληλα με έναν σταθμό ηλεκτρικής ενέργειας 20MW που χρησιμοποιούσε τύρφη (ορυκτός άνθρακας). Η ανεμογεννήτρια WIME D-30 είχε διάμετρο δρομέα 30m και ονομαστική ισχύ 100kW. Παρέμεινε σε λειτουργία μέχρι το 1942 (Beurskens, 2014).



Εικόνα 1.1.5 : Το σχέδιο για την ανεμογεννήτρια στη Sevastopol (Beurskens, 2014).

1930 - 1960: Πρώτη φάση καινοτομιών

Η έρευνα για την ανάπτυξη των ανεμογεννητριών συνεχίστηκε σε πολλές χώρες κατά τη διάρκεια αλλά και αμέσως μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, καθώς οι πόροι όπως τα ορυκτά καύσιμα συνεχώς μειώνονταν.

Οι σημαντικότερες εξελίξεις σημειώθηκαν στη Δανία, τις ΗΠΑ και τη Γερμανία. Κατά τη διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου η F.L. Smidth Company στην Κοπεγχάγη ανέπτυξε ανεμογεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς η Δανία δεν διέθετε δικά της ορυκτά καύσιμα και η αιολική ενέργεια ήταν ο δημοφιλέστερος τρόπος παραγωγής ηλεκτρισμού (Beurskens, 2014).



Εικόνα 1.1.6 : Μια εκτός λειτουργίας Smith ανεμογεννήτρια στη Δανία, με διάμετρο δρομέα 24m και ονομαστική ισχύ περίπου 70 kW. Φωτογραφία του Paul Smulders το 1972 (Beurskens, 2014).

Η πρώτη μεγάλου μεγέθους ανεμογεννήτρια που κατασκευάστηκε ήταν το 1941 η ανεμογεννήτρια Smith-Putnam, που σχεδιάστηκε από τον Palmer C. Putnam και κατασκευάστηκε από την S. Morgan Smith Company (York, Pennsylvania). Η ανεμογεννήτρια εγκαταστάθηκε σε ένα ψηλό λόφο κοντά στο Rutland του Βερμόντ και αποτελούταν από έναν αργό δρομέα με διάμετρο 53,3m. Ήταν εξοπλισμένη με ξεχωριστά ρυθμιζόμενα πτερύγια και η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας ήταν 1,25MW. Παρέμεινε σε λειτουργία μέχρι το 1945 όπου έχασε ένα πτερύγιο και έτσι διακόπηκε η λειτουργία της για οικονομικούς λόγους (Beurskens, 2014).

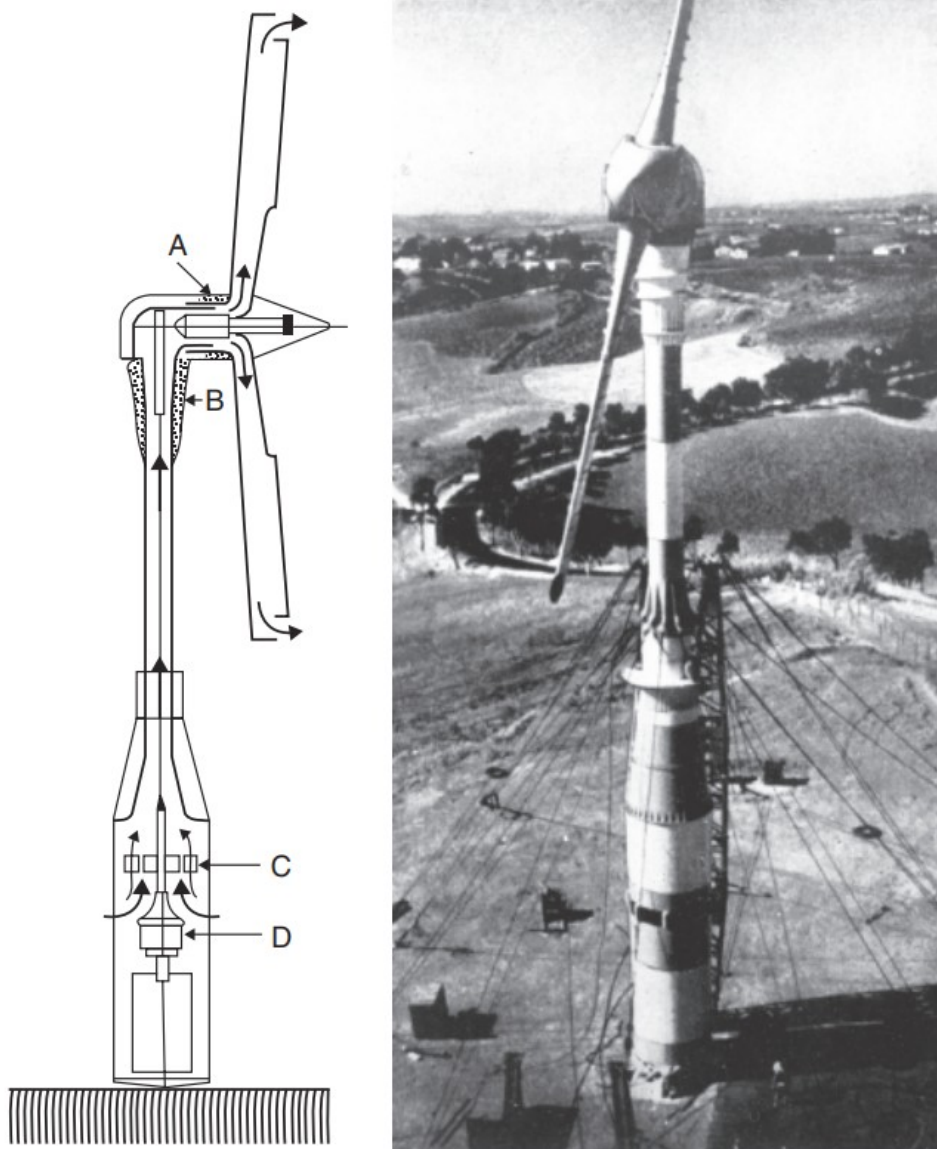


Εικόνα 1.1.7 : Ανεμογεννήτρια Smith-Putnam κοντά στο Rutland, Vermont, US, 1941-1945 (Beurskens, 2014).

Το 1950 η John Brown Company κατασκεύασε μια ανεμογεννήτρια τριών πτερυγίων, ονομαστικής ισχύος 100kW και διαμέτρου δρομέα 15m που λειτουργούσε στα Σκωτσέζικα Νησιά Orkney. Τα πτερύγια του δρομέα ήταν στερεωμένα σε μια πλήμνη μέσω μεντεσέδων με πτερύγια λεπίδας. Ωστόσο, η σύνθετη κατασκευή του δρομέα οδήγησε στην διακοπή της λειτουργίας του σε διάστημα μερικών μηνών.

Ταυτόχρονα, ο Γάλλος μηχανικός Andreau σχεδίασε μια ανεμογεννήτρια δύο πτερυγίων με μια πρωτόγνωρη τεχνολογία μετάδοσης. Τα πτερύγια του δρομέα ήταν κοίλα και είχαν άνοιγμα στα άκρα. Με αυτό τον τρόπο ο δρομέας λειτουργούσε ως φυγοκεντρική αντλία που τραβούσε αέρα μέσα από ένα άνοιγμα στη βάση του πύργου. Ο αέρας περνούσε μέσα από έναν αεροστρόβιλο που ήταν τοποθετημένος στους πρόποδες του πύργου και έθετε σε λειτουργία μια γεννήτρια.

Το 1951, κατασκευάστηκε μια πρωτότυπη ανεμογεννήτρια για την Enfield Cables Ltd. στο St Albans (Hertfordshire, Νότια Αγγλία), αλλά ήταν αδύνατο να λειτουργήσει οικονομικά, λόγω της χαμηλής ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή και της χαμηλής απόδοσης μετάδοσης (μόλις 20%). Έτσι, καταργήθηκε το 1957 και εγκαταστάθηκε εκ νέου στο Grand Vent της Αλγερίας, αλλά τέθηκε ξανά εκτός λειτουργίας μετά από σύντομο χρονικό διάστημα (Beurskens, 2014).



Εικόνα 1.1.8 : Αριστερά: Σκίτσο της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας Andreau-Enfield. Δεξιά: Η Andreau-Enfield ανεμογεννήτρια στην Αλγερία (Beurskens, 2014).

Όπως και ο Andreau, έτσι και αρκετοί άλλοι Γάλλοι μηχανικοί συμμετείχαν στο σχεδιασμό ανεμογεννητριών. Το 1958 ο L. Romani κατασκεύασε κι αυτός μια πρωτοποριακή ανεμογεννήτρια τριών πτερυγίων ισχύος 800 kW και διάμετρο δρομέα 10,1m. στο Nogent-le-Roi κοντά στο Παρίσι. Η λεγόμενη Best-Romani ήταν εξοπλισμένη με μια σύγχρονη γεννήτρια και τέθηκε εκτός λειτουργίας το 1963 όταν έχασε ένα πτερύγιο από το δρομέα.



Εικόνα 1.1.9 : Ανεμογεννήτρια Best-Romani στο Nogent-le-Roi (Eure et Loir), Γαλλία, 1958. (Πηγή: Jos Beurskens – The History of Wind Energy)

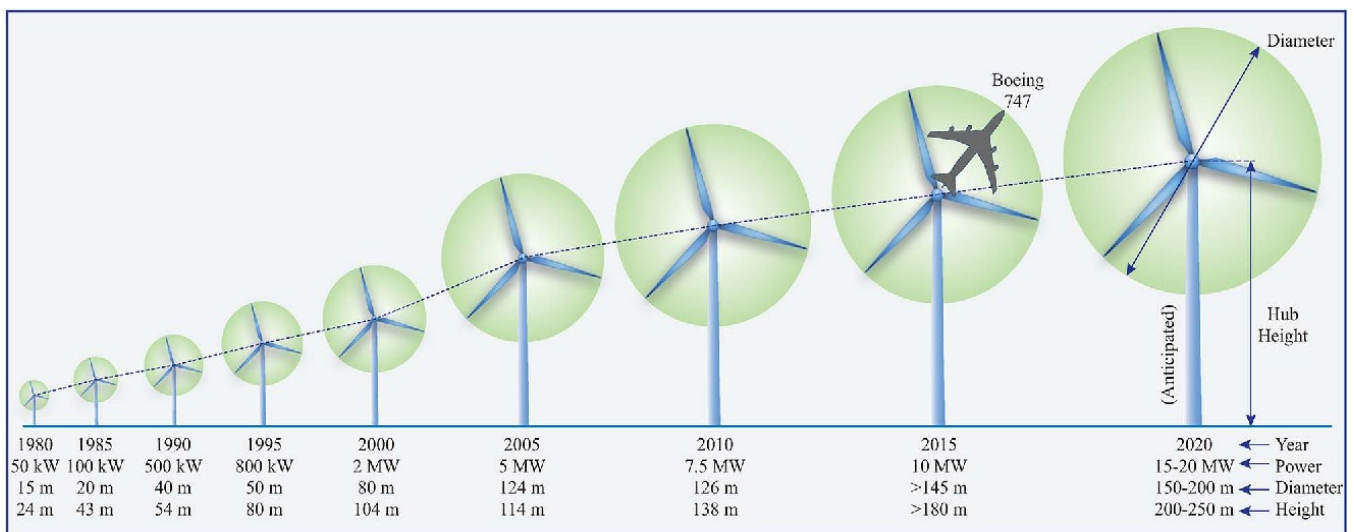
Αν αναλογιστούμε πόσες ανακαλύψεις έγιναν και δοκιμάστηκαν την περίοδο 1930-1960 όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες, δεν γίνεται παρά να θαυμάσουμε την καινοτομία και την εφευρετικότητα που χαρακτήριζε την εποχή. Παρόλα αυτά, οι εξελίξεις βασίστηκαν λιγότερο σε αναλυτικές μεθόδους και κυρίως σε πειράματα, χωρίς προφανώς να είναι όλα επιτυχημένα, καθώς έγιναν πολλά τεχνικά λάθη (Beurskens, 2014).

1973 - Σήμερα: Δεύτερη φάση καινοτομιών και μαζική παραγωγή

Η τεχνολογική πρόοδος στην αιολική ενέργεια περιορίστηκε δραματικά μετά τα μέσα της δεκαετίας του 1960. Τα ορυκτά καύσιμα ήταν σαφώς φθηνότερα και έπειτα η πυρηνική ενέργεια θεωρήθηκε ως η λύση σε όλα τα μελλοντικά ενεργειακά προβλήματα, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη η ασφάλεια και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Περίπου μια δεκαετία αργότερα, οι επιπτώσεις αυτές πήραν την μορφή περιβαλλοντικών καταστροφών εξαιτίας των ρύπων από τα ορυκτά καύσιμα και τα πυρηνικά απόβλητα, με αποκορύφωμα τα πυρηνικά δυστυχήματα όπως εκείνο του Chernobyl. Έτσι ξεκίνησε ένα νέο κύμα ενεργειακής πολιτικής και πολλές χώρες στράφηκαν στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η Δανία και η Ολλανδία ήταν από τις χώρες που επένδυσαν σε μεγάλες ανεμογεννήτριες, οι πρώτες των οποίων μπήκαν σε λειτουργία το 1979 στη Δανία.

Περίπου από το 1988, Ευρωπαϊκά προγράμματα άρχισαν να χρηματοδοτούν την ανάπτυξη μεγάλων ανεμογεννητριών. Σήμερα, οι τεχνικές γνώσεις έχουν αυξηθεί ιδιαίτερα στους τομείς της αεροδυναμικής, της αεροελαστικότητας, της μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων, της δυναμικής κατασκευής, των τεχνικών μέτρησης, της μοντελοποίησης συστημάτων και των τεχνικών ελέγχου (Beurskens, 2014).



Εικόνα 1.1.10 : Η εξέλιξη των ανεμογεννητριών σε διάμετρο, ύψος και προσδιδόμενη ενέργεια ως προς το έτος λειτουργίας. (Πηγή: High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies - V. Yaramasu, B. Wu, P. Sen, S. Kouro, M. Narimani)

Με τη συνεχή πρόοδο της τεχνολογίας, τα αιολικά πάρκα αυξήθηκαν σε τέτοιο βαθμό που η δυναμικότητα τους από περίπου ένα MW σήμερα φτάνει σε αρκετές εκατοντάδες MW.

2. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες-Ταξινόμηση πύργων

Η αιολική ενέργεια, η οποία αξιοποιείται μέσα από τις ανεμογεννήτριες αποτελεί ανεξάντλητη πηγή ενέργειας και έχει μεγάλη σημασία για την βιώσιμη ανάπτυξη και την προστασία του περιβάλλοντος. Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε συνδυασμό με την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής καθιστά την αξιοποίηση του ανέμου ως μια θεμελιώδη λύση για το ενεργειακό μέλλον. Παράλληλα, χάρη στη μείωση των εκπομπών CO₂, παράγεται φθηνότερος ηλεκτρισμός σε σχέση με το σημερινό κόστος ηλεκτροπαραγωγής από φυσικό αέριο ή λιγνίτη.

Οι ανεμογεννήτριες στην Ελλάδα

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Ελληνικής Επιστημονικής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ) για το 2021, στην ελληνική επικράτεια εντοπίζονται 2.720 ανεμογεννήτριες, με τις περισσότερες από αυτές να βρίσκονται στην Κεντρική (Στερεά) Ελλάδα και παράγουν συνολικά 1.837 MW (41%). Ακολουθεί η Πελοπόννησος με 619 MW (14%) και η Ανατολική Μακεδονία – Θράκη όπου παράγονται 501 MW (11%). Το 2022 παρατηρείται αύξηση 5% σε σχέση με το τέλος του 2021, με τη συνολική αιολική ισχύ να ανέρχεται στην Ελλάδα στα 4.681,4 MW. (<https://energyworld.gr/>)

2.1 Τύποι ανεμογεννητριών ως προς την διάταξη του άξονα

Τον 20ό αιώνα, ο σχεδιασμός των πρώιμων ανεμογεννητριών βασίστηκε σε τρία βασικά χαρακτηριστικά: (1) στην αντοχή φορτίων, (2) στην αποφυγή φορτίων και (3) στη διαχείριση φορτίων μηχανικά, ηλεκτρικά, ή και τα δύο. Στα χρόνια αυτά και με την εξέλιξη της τεχνολογίας, ποικίλα σχέδια ανεμογεννητριών ήρθαν στο φως. Η διεθνής αγορά πλέον βασίζεται σε ανεμογεννήτριες που περιστρέφονται ως προς τον οριζόντιο ή κάθετο άξονα και είναι εξοπλισμένες με ένα, δύο, τρία ή και περισσότερα πτερύγια (Veritas, 2002) , (Καλδέλλης, 2005).

Ανεμογεννήτριες Κάθετου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα (VAWT) περιστρέφονται γύρω από έναν άξονα ο οποίος είναι κάθετος στο έδαφος αλλά και στη διεύθυνση του ανέμου. Είναι απλές κατασκευές, σχεδιασμένες ώστε να προσανατολίζονται αυτόματα ως προς την κατεύθυνση του ανέμου (Corke & Nelson, 2018).

Κάποια από τα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι ότι η ηλεκτρική γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων είναι τοποθετημένα στο έδαφος, επομένως είναι εύκολα προσβάσιμα, κάτι που διευκολύνει τη συντήρησή τους. Επιπλέον έχουν σχετικά χαμηλό κόστος, ελαφρύτερο πυλώνα και πιο απλό σύστημα ελέγχου σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα.

Στα μειονεκτήματα περιλαμβάνονται ο συνολικά πολύ χαμηλότερος βαθμός απόδοσης, το γεγονός ότι το πτερύγιο χρειάζεται ολική αποσυναρμολόγηση μόνο για να αντικατασταθεί το κύριο ρουλεμάν και ότι ο δρομέας είναι τοποθετημένος σχετικά κοντά στο έδαφος όπου δεν έχει δυνατούς ανέμους. Επίσης λόγω των μεγάλων φορτίων που συγκεντρώνονται στη βάση, συχνά απαιτείται η χρήση καλωδίων guy για τη στήριξη τους. Για τους παραπάνω λόγους ο συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννητριών συναντάται σε ποσοστό μόλις 2% των συνολικών εφαρμογών (Corke & Nelson, 2018), (Καλδέλλης, 2005), (Veritas, 2002).

Ανεμογεννήτρια Darrieus

Το 1931, ένας Γάλλος μηχανικός κατασκεύασε την ομώνυμη ανεμογεννήτρια Darrieus, η οποία απεικονίζεται στην εικόνα 2.1.1. Αποτελείται από δύο καμπυλωτά πτερύγια και η κινητήρια δύναμη είναι η αεροδυναμική άντωση. Ο δρομέας είναι τοποθετημένος σε ένα έδρανο στην βάση του πυλώνα και καταπονείται από εναλλασσόμενα φορτία ακόμα και σε σταθερές ταχύτητες, γι' αυτό είναι απαραίτητη η στήριξη της μηχανής με καλώδια, τα οποία ξεκινούν από την κορυφή αυτής και καταλήγουν στο έδαφος. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η σταθερή κατακόρυφη θέση της ανεμογεννήτριας. Ο συγκεκριμένος τύπος ανεμογεννήτριας με τα χρόνια έχει την μεγαλύτερη εξέλιξη, γι' αυτό και αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο ανεμογεννήτριας κάθετου άξονα (Corke & Nelson, 2018), (Καλδέλλης, 2005).



Εικόνα 2.1.1 : Ανεμογεννήτρια Darrieus κοντά στο Heroldstatt-Ennabeuren, Γερμανία. (Πηγή Wikimedia Commons)

Ανεμογεννήτρια Giromill

Μια άλλη εφαρμογή ανεμομηχανών κάθετου άξονα είναι η ανεμογεννήτρια Giromill, που απεικονίζεται στην εικόνα 2.1.2. Χρησιμοποιεί κάθετα πτερύγια δρομέα αντί για ενωμένα καμπυλωτά πτερύγια όπως η Darrieus, τα οποία περιστρέφονται γύρω από τον κάθετο πυλώνα. Παρόλο που είναι πιο οικονομική, απλούστερη στην κατασκευή της από μια ανεμογεννήτρια Darrieus και έχει καλό βαθμό απόδοσης, απαιτεί πιο ισχυρούς ανέμους (ή κινητήρια δύναμη) για την έναρξη της περιστροφής της. Παρόμοια με την Darrieus, συχνά απαιτείται η χρήση καλωδίων στήριξης (Corke & Nelson, 2018) , (Καλδέλλης, 2005).

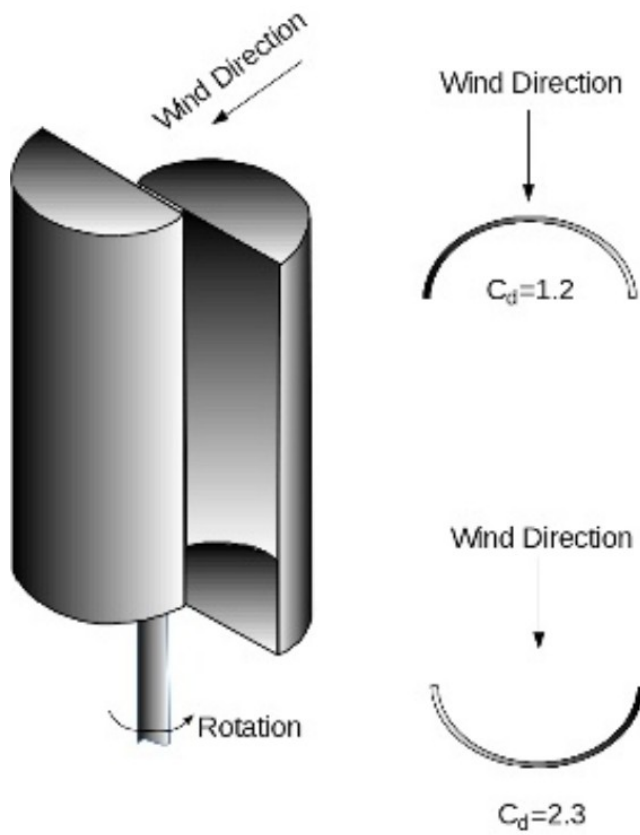


Εικόνα 2.1.2 : Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα τύπου Giromill. (φωτογραφία τραβηγμένη από Stahlkocher – Πηγή Wikimedia Commons)

Ανεμογεννήτρια Savonius

Ένα ακόμη παράδειγμα ανεμογεννήτριας κατάκόρυφου άξονα είναι το σχέδιο του Savonius. Εφευρέθηκε από τον Φινλανδό μηχανικό Savonius το 1922 και βασίζεται πλήρως στην αεροδυναμική οπισθέλκουσα . Αποτελείται από δύο ή και παραπάνω κυλινδρικές επιφάνειες που βρίσκονται σε κατακόρυφο περιστρεφόμενο άξονα, όπως απεικονίζεται στις εικόνες 2.1.3, 2.1.3α. Συχνά λόγω του σχήματος της κάτοψης των πτερυγίων της, ονομάζεται και ανεμογεννήτρια τύπου S. Η διαφορεική οπισθέλκουσα μεταξύ των δύο προσανατολισμών προς την κατεύθυνση του ανέμου περιστρέφει την ανεμογεννήτρια Savonius. Όπως και η Darreus τα όργανα μετατροπής της κινητικής ενέργειας βρίσκονται στο έδαφος και ο πύργος στήριξης είναι απλός, γεγονός που την καθιστά μια οικονομική κατασκευή. Εμφανίζει μεγάλη ροπή εκκίνησης σε σχέση με την ανεμογεννήτρια Darreus γι' αυτό δεν απαιτείται επιπλέον γεννήτρια για την εκκίνηση της. Αποτελεί μια αιολική μηχανή ιδανική για μικρές ισχύεις και επομένως

ενδείκνυται για οικιακή χρήση. Από τα μειονεκτήματά της είναι ο πολύ χαμηλός βαθμός απόδοσης, το μεγάλο βάρος και η μεγάλη επιφάνεια των πτερυγίων σε σύγκριση με μηχανές παρόμοιας ισχύς (Corke & Nelson, 2018) , (Καλδέλλης, 2005).



Εικόνα 2.1.3: Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα τύπου Savonius (Corke & Nelson, 2018).



Εικόνα 2.1.3α: Τέσσερις Windside WS-4B ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα τύπου Savonius που παράγουν ενέργεια για ένα σταθμό ραντάρ στην Κίνα. (Πηγή: <https://windside.com/>)

Ανεμογεννήτρια συνδυασμός Darrieus με Savonius

Ένας σχεδιασμός ανεμογεννητριών που συνδυάζει την Darrieus και την Savonius απεικονίζεται στην εικόνα 2.1.4. Αυτός ο τύπος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως λύση στις αδυναμίες που παρουσιάζουν οι δύο μηχανές, καθώς η ανεμογεννήτρια Savonius με βάση την οπισθέλκουσα καλύπτει την αδυναμία της Darrieus να αρχίσει να περιστρέφεται σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου (Corke & Nelson, 2018).



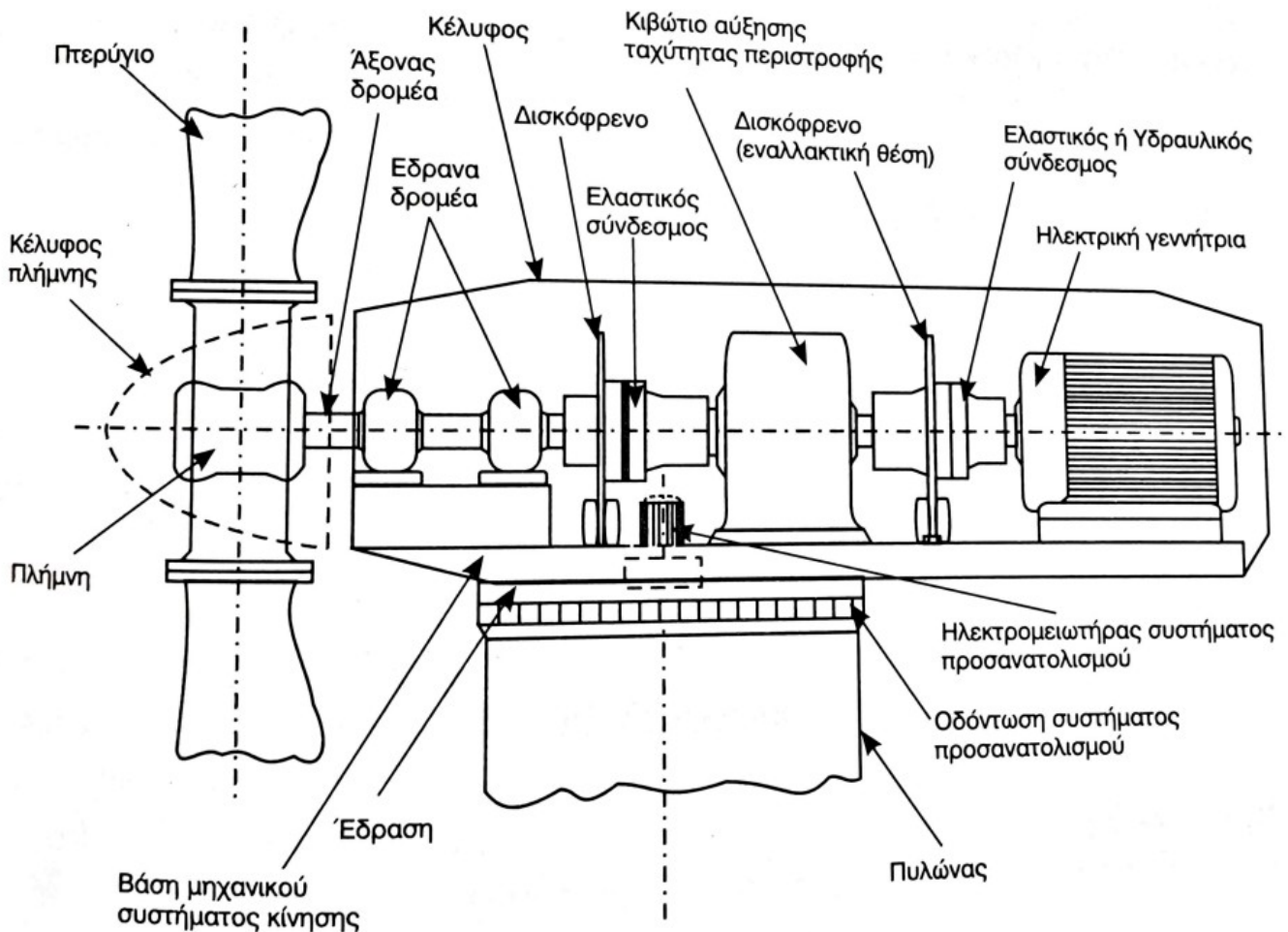
Εικόνα 2.1.4 : Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα τύπου συνδυασμός Darrieus-Savonius (Corke & Nelson, 2018).

Ανεμογεννήτριες Οριζοντίου Άξονα

Ο σχεδιασμός των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα βασίζεται στους ανεμόμυλους όπου ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την επιφάνεια του εδάφους και υπερυψωμένος αρκετά μέτρα από το έδαφος. Η ηλεκτρική γεννήτρια και τα σχετικά εξαρτήματα βρίσκονται στο ύψος της πλήμνης (μεταλλική κατασκευή από χυτοσίδηρο, πάνω στην οποία στερεώνονται τα πτερύγια) σε μια άτρακτο (Corke & Nelson, 2018).

Στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, ο δρομέας περιστρέφεται και προσανατολίζεται προς την κατεύθυνση του ανέμου. Επίσης ο αριθμός των στροφών του δρομέα προσαρμόζεται στις απαιτήσεις λειτουργίας της γεννήτριας και όλο το σύστημα λειτουργεί ώστε να μπορεί να ξεκινάει και να σταματάει με ασφάλεια, είτε για λόγους ασφαλείας, είτε όταν οι ανεμολογικές συνθήκες υπερβαίνουν τα όρια σχεδιασμού (Veritas, 2002) , (Καλδέλλης, 2005).

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι ο ψηλός πύργος επιτρέπει στην ανεμογεννήτρια να φτάσει σε ισχυρότερους και πιο ομοιόμορφους ανέμους που υπάρχουν σε μεγαλύτερα υψόμετρα. Ένα μειονέκτημα των οριζοντίου άξονα ανεμογεννητριών είναι η θέση της ηλεκτρικής γεννήτριας που βρίσκεται στον πύργο και σε μεγάλο υψόμετρο, συνεπώς η συντήρηση καθίσταται πιο δύσκολη και δαπανηρή (Corke & Nelson, 2018).



Εικόνα 2.1.5 : Το εσωτερικό της ατράκτου μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα. (Καλδέλλης, 2005).

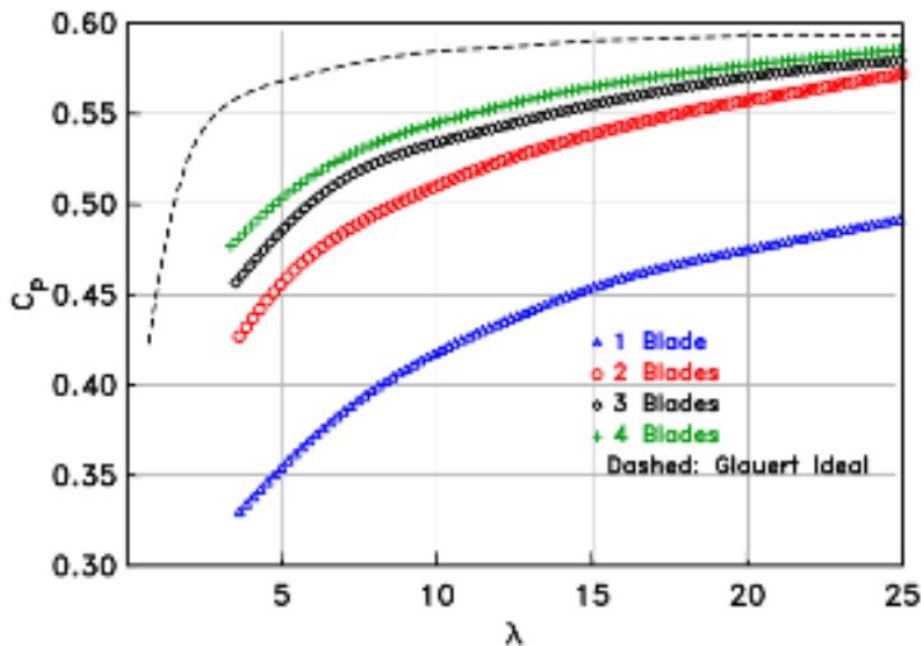
2.2 Αριθμός Πτερυγίων Δρομέα

Η επιλογή του αριθμού των πτερυγίων σε μια ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Αυτοί οι παράγοντες περιλαμβάνουν τον θόρυβο από το δρομέα, τη δυναμική φόρτιση και τις αισθητικές προτιμήσεις. Τα επίπεδα θορύβου που παράγονται από έναν δρομέα τριών πτερυγίων είναι χαμηλότερα από αυτά ενός δρομέα δύο πτερυγίων για την ίδια παραγόμενη ισχύ. Η δυναμική φόρτιση αυξάνεται ως ένα βαθμό με τον αυξανόμενο αριθμό πτερυγίων δρομέα. Ωστόσο, μπορεί ένας δρομέας 4 πτερυγίων να έχει ελαφρώς υψηλότερο συντελεστή ισχύος σε σχέση με αυτόν ενός δρομέα 3 πτερυγίων, όμως η δυναμική φόρτιση είναι μεγαλύτερη στον δρομέα 3 πτερυγίων (Σχήμα 2.2.1) (Corke & Nelson, 2018).

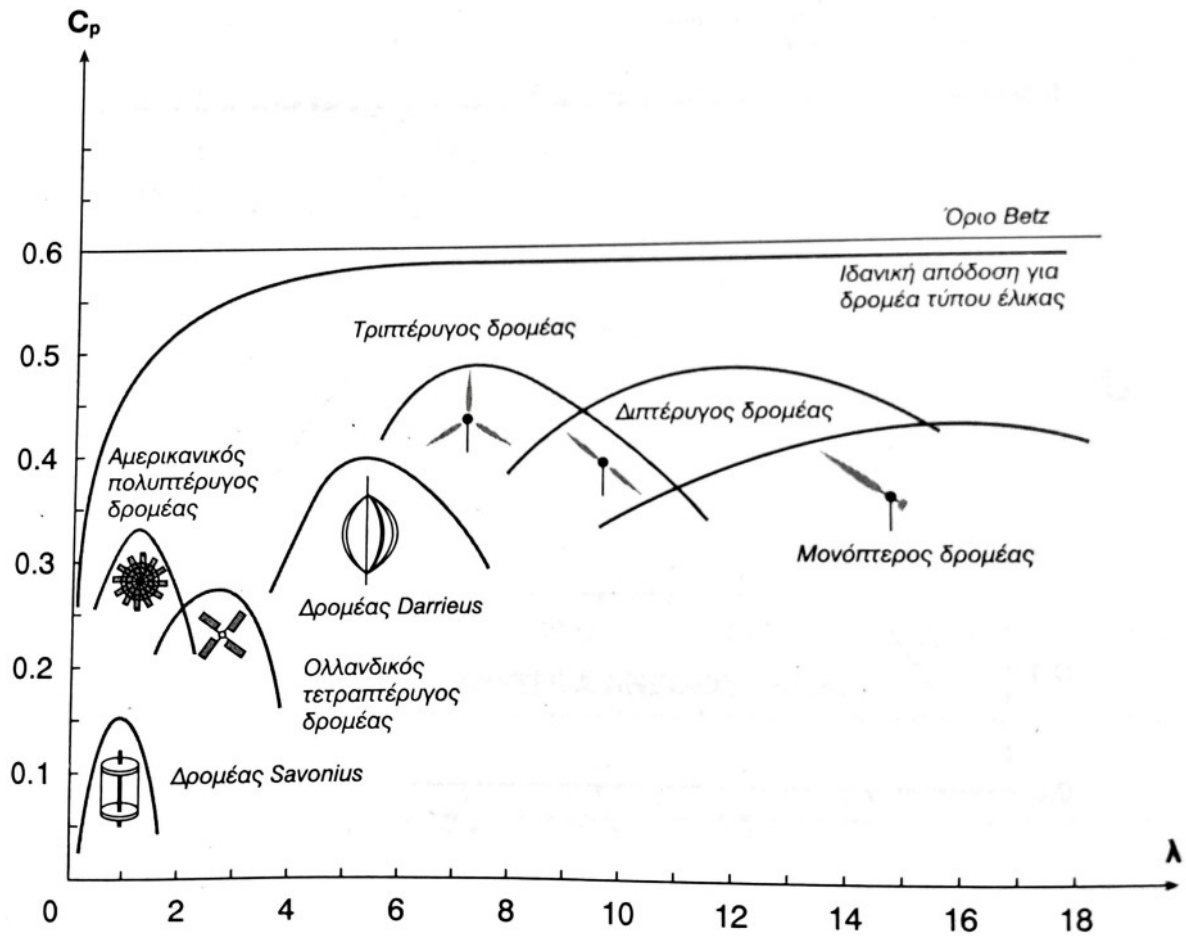
Συνεπώς, ένα πλεονέκτημα του μικρότερου αριθμού πτερυγίων αποτελεί μια πιθανή εξοικονόμηση όσον αφορά το κόστος και το βάρος του δρομέα. Ωστόσο, η χρήση λιγότερων (δύο ή ενός) πτερυγίων δρομέα απαιτεί υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής ή μεγαλύτερο μέγεθος πτερυγίου για παραγωγή ενέργειας αντίστοιχης με μια ανεμογεννήτρια τριών πτερυγίων παρόμοιου μεγέθους (Veritas, 2002).

Οι ανεμογεννήτριες με ένα πτερύγιο είναι λιγότερο διαδεδομένες από τις ανεμογεννήτριες με δύο πτερύγια. Αυτό συμβαίνει επειδή απαιτείται υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής, η οποία δημιουργεί περισσότερο θόρυβο καθώς και προβλήματα οπτικής αισθητικής. Επίσης, απαιτείται η χρήση ενός αντίβαρου για την εξισορρόπηση του πτερυγίου του δρομέα (Veritas, 2002).

Συνδυάζοντας όλους αυτούς τους παράγοντες, το πρότυπο για τις μεγάλες σύγχρονες ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα περιλαμβάνει τρία πτερύγια (Corke & Nelson, 2018).



Σχήμα 2.2.1 : Συντελεστής ισχύος ως συνάρτηση του λόγου ταχύτητας (ο λόγος της ταχύτητας του περυγίου του δρομέα/ ως προς την ταχύτητα του ανέμου) για διαφορετικούς αριθμούς περυγίων (Corke & Nelson, 2018).



Εικόνα 2.2.2 : Συντελεστής ισχύος ως συνάρτηση του λόγου ταχύτητας (ο λόγος της ταχύτητας του περυγίου του δρομέα/ ως προς την ταχύτητα του ανέμου) για διαφορετικούς τύπους ανεμογεννητριών. Στο σχήμα φαίνεται επίσης το όριο Betz που δείχνει τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παράγει μια αιολική μηχανή οριζόντιου άξονα (Καλδέλλης, 2005).



Εικόνα 2.2.3 : Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα με ένα πτερύγιο. (www.wind-energy-the-facts.org/)



Εικόνα 2.2.4 : Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα με δύο πτερύγια στο νησί Oahu της Χαβάης – Φωτογραφία από NASA Glenn Research Center. (<https://commons.wikimedia.org/>)



Εικόνα 2.2.5 : Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα με 3 περύγια. (Πηγή: U.S. Energy Information Administration – Φωτογραφία από Stock photography)

Με το πέρασμα των χρόνων προστέθηκαν και άλλα κριτήρια όσον αφορά αν οι ανεμογεννήτριες βρίσκονται στην ξηρά ή στη θάλασσα και αντίστοιχα ποια είναι τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των πύργων τους.

2.3 Κατηγορίες πύργων ανεμογεννητριών

Ο πύργος μιας ανεμογεννήτριας παρέχει στήριξη στην ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση και παράλληλα συμβάλλει ανύψωση του δρομέα, κρατώντας τον μακριά από το έδαφος στα επίπεδα όπου βρίσκονται οι αιολικοί πόροι.

Οι πύργοι για μεγάλες ανεμογεννήτριες είναι συνήθως σωληνοειδής, κατασκευασμένοι από χάλυβα, αλλά μερικές φορές χρησιμοποιούνται και πύργοι από σκυρόδεμα. Οι πύργοι συνδέονται συνήθως με την υποστηρικτική τους θεμελίωση μέσω βιδωτής σύνδεσης φλάντζας ή μέσω συγκόλλησης. Οι περισσότεροι σύγχρονοι πύργοι είναι σωληνοειδείς, ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και δικτυωτοί πύργοι. Επιπλέον, για σχετικά μικρές ανεμογεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι πύργοι guyed (Veritas, 2002).

Ο πύργος κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού μπορεί να συμβάλλει στην μείωση του κόστους, καθώς η τεχνολογία του είναι σχετικά απλή και αποτελεί αντικείμενο πιθανής βελτίωσης σε σύγκριση με τα υπόλοιπα μέρη της ανεμογεννήτριας. Το οικονομικό όφελος που προκύπτει μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς το κόστος του πύργου συνήθως αποτελεί ένα μεγάλο τμήμα του συνολικού κόστους της κατασκευής (Veritas, 2002).

Χερσαίες Ανεμογεννήτριες

Η μορφολογία των πύργων μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα που βρίσκεται στη ξηρά περιλαμβάνει τις εξής κατηγορίες:



(α)

(β)

(γ)

(δ)

(ε)

Εικόνα 2.3.1 : Οι πιο κοινές κατασκευές πύργων χερσαίων ανεμογεννητριών.

(α) Σωληνοειδής χαλύβδινος πύργος, (β) Σωληνοειδής πύργος από σκυρόδεμα, (γ) Δικτυωτός πύργος, (δ) Πύργος με τρία πόδια, (ε) Πύργος Καλωδίων Guyed

– **Σωληνοειδής πύργος (Tubular towers)**

Οι περισσότερες μεγάλες ανεμογεννήτριες είναι σωληνωτοί χαλύβδινοι πύργοι, οι οποίοι κατασκευάζονται σε τμήματα μήκους 20-30m, με φλάντζες και στα δύο άκρα. Τα τμήματα είναι βιδωμένα μεταξύ τους. Οι πύργοι είναι κωνικοί, δηλαδή οι διάμετροι τους αυξάνονται προς τη βάση, αυξάνοντας έτσι την αντοχή τους προς τη βάση του πύργου όπου χρειάζεται περισσότερο, καθώς σε αυτό το σημείο το φορτίο είναι μεγαλύτερο. Το απαραίτητο πάχος κελύφους μειώνεται όταν αυξάνεται η διάμετρος. Έτσι, το κωνικό σχήμα επιτρέπει την εξοικονόμηση στην κατανάλωση υλικού.

Το μέγιστο μήκος των τμημάτων του πύργου εξαρτάται συνήθως από τον τρόπο μεταφοράς του. Αντίστοιχα, το ανώτατο όριο για την εξωτερική διάμετρο του πύργου εξαρτάται συνήθως για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες από το μέγιστο ύψος των γεφυρών και σηράγγων αυτοκινητοδρόμων (στην Ελλάδα είναι 5 μέτρα). (<https://el.wikipedia.org/>)

Ένα πλεονέκτημα των σωληνοειδών πύργων σε σύγκριση με άλλους πύργους είναι ότι είναι πιο ασφαλείς για το προσωπικό που εισέρχεται και ανεβαίνει σε αυτούς (Veritas, 2002).

– **Δικτυωτός πύργος (Lattice towers)**

Οι δικτυωτοί πύργοι κατασκευάζονται με τη χρήση είτε συγκολλημένων χαλύβδινων δοκών που δημιουργούν χωροδικτυώματα, είτε χαλύβδινων κομματιών διατομής L ή κυκλικής διατομής. Δεδομένου ότι ένας πύργος πλέγματος απαιτεί περίπου το ήμισυ του υλικού από έναν σωληνοειδή πύργο με παρόμοια στιβαρότητα, τα βασικά πλεονεκτήματα των πύργων πλέγματος είναι προφανή, καθώς είναι ελαφρύτεροι και συναρμολογούνται πιο εύκολα. Επιπλέον, δεν προκαλούν αισθητική όχληση λόγω αντανάκλασεων όπως οι σωληνωτοί πύργοι.

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των πύργων πλέγματος είναι ότι δεν προσφέρουν ασφάλεια στο προσωπικό που ανεβαίνει σε αυτούς όταν είναι αναγκαίο και το κόστος είναι μεγάλο, καθώς απαιτείται περισσότερο εργατικό δυναμικό για τη συναρμολόγηση τους. Επίσης, δεν είναι τόσο στιβαροί, είναι εύκαμπτοι και πολύ συχνά δεν προτιμούνται για την οπτική τους εμφάνιση, αν και αυτό είναι υποκειμενικό. Ωστόσο, για αισθητικούς λόγους, οι πύργοι πλέγματος έχουν σχεδόν εξαφανιστεί για τη χρήση μεγάλων, σύγχρονων ανεμογεννητριών (Veritas, 2002).

– **Πύργος Καλωδίων Guyed (Guyed pole towers)**

Πολύ συχνά, μικρές ανεμογεννήτριες είναι κατασκευασμένες με στενούς πύργους που υποστηρίζονται από καλώδια τύπου Guyed. Ένα πλεονέκτημα των κατασκευών αυτών είναι η μείωση του κόστους λόγω της εξοικονόμησης βάρους.

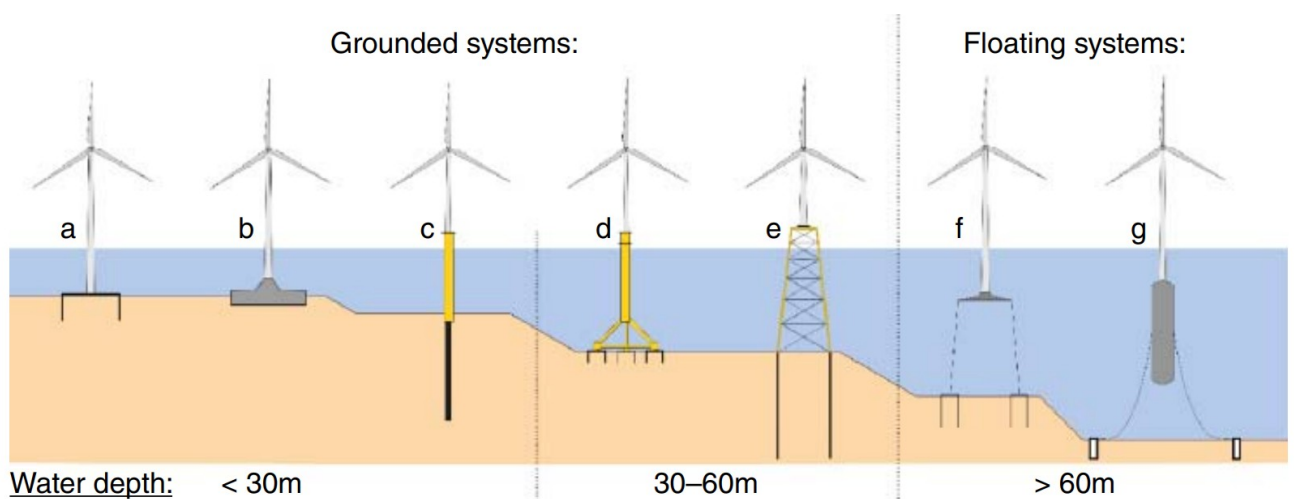
Κάποια από τα μειονεκτήματα τους αποτελούν τη δύσκολη πρόσβαση γύρω από τους πύργους, καθώς και το ότι είναι πιο επιρρεπείς σε βανδαλισμούς, γεγονός που μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τη συνολική ασφάλεια της κατασκευής (Veritas, 2002).

– **Άλλοι Τύποι**

Ορισμένοι πύργοι έχουν σχεδιαστεί συνδυάζοντας χαρακτηριστικά των παραπάνω τύπων, όπως για παράδειγμα ο τρίποδος πύργος για μια τουρμπίνα 95 kW στην Εικόνα 2.3.1(δ).

Υπεράκτιες Ανεμογεννήτριες

Οι χερσαίες και υπεράκτιες ανεμογεννήτριες έχουν πολλές ομοιότητες στον σχεδιασμό τους. Μια από τις βασικές διαφορές αφορά στη θεμελίωση τους, καθώς απαιτείται μια πιο εξειδικευμένη εγκατάσταση, η οποία περιλαμβάνει μια ξεχωριστή δομή για τη μεταφορά φορτίων από τον πυθμένα της θάλασσας μέχρι τη βάση του πύργου της ανεμογεννήτριας. Επιπλέον οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες εκτίθενται σε μεγαλύτερα φορτία από κύματα, ρεύματα, πάγο και γενικά πιο δυσχερείς συνθήκες (Veritas, 2002). Για τους λόγους αυτούς υπάρχουν διαφοροποιήσεις στην μορφολογία των πύργων για τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.



Εικόνα 2.3.2 : Οι πιο κοινές κατασκευές πύργων υπεράκτιων ανεμογεννητριών, για πακτωμένα συστήματα (grounded systems) και για πλωτά συστήματα (floating systems).

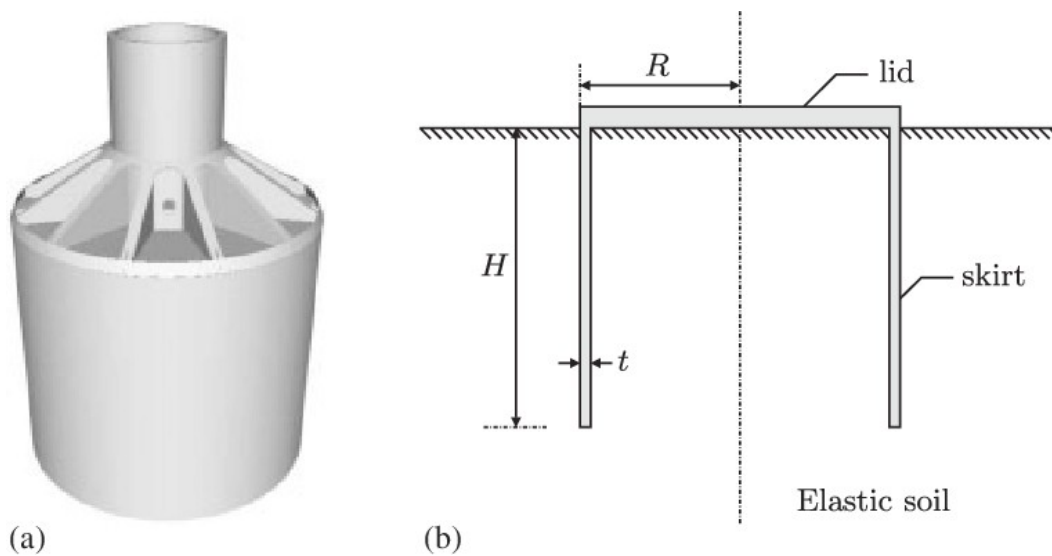
(a) Πύργος με κουβά/κιβώτιο αναρρόφησης, (b) Πύργος με βάση τη βαρύτητα, (c) Μονός Πύργος, (d) Πύργος με τρίποδο σε κουβά/κιβώτιο αναρρόφησης, (e) Πύργος πλαισίου/πλέγματος, (f) Πύργος με πλατφόρμα ποδιών τάσης, (g) Πύργος πλωτού σημαντήρα τύπου spar (Veritas, 2004) , (Bhattacharya, 2019).

– Πύργος με κουβά/κιβώτιο αναρρόφησης (*Bucket/suction caisson*)

Οι κάδοι αναρρόφησης (μερικές φορές αναφέρονται ως κιβώτια αναρρόφησης) έχουν παρόμοια εμφάνιση με τους πύργους με βάση τη βαρύτητα, τους οποίους θα δούμε στη συνέχεια. Η κατασκευή του κάδου αναρρόφησης αποτελείται από μια κεντρική στήλη που συνδέεται με ένα χαλύβδινο κάδο. Ο χαλύβδινος κάδος αποτελείται από κάθετες χαλύβδινες "φούστες" που εκτείνονται κάτω από μια οριζόντια βάση που στηρίζεται στην επιφάνεια του εδάφους (Bhattacharya, 2019).

Τα κιβώτια αναρρόφησης είναι μια αρκετά πρόσφατη εξέλιξη στην υπεράκτια βιομηχανία, καθώς χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά πριν από περίπου 30 χρόνια για τη θεμελίωση υπεράκτιων πλατφόρμων άντλησης πετρελαίου και φυσικού αερίου (Bhattacharya, 2019).

Αυτός ο τύπος δομής προτείνεται για τοποθεσίες που το βάθος του πυθμένα από την επιφάνεια της θάλασσας κυμαίνεται από 0 έως 25 μέτρα (Veritas, 2004).



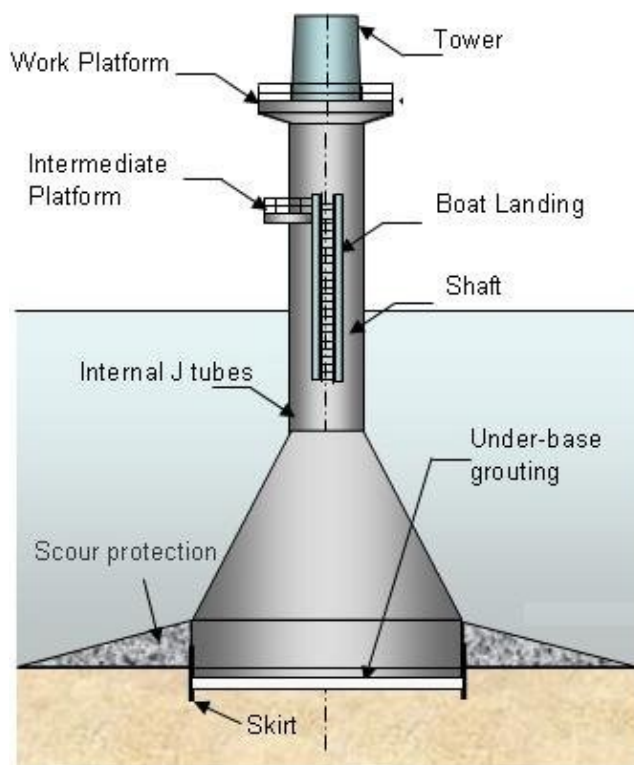
Εικόνα 2.3.3: Βάση πύργου με κουβά/κιβώτιο αναρρόφησης. (Πηγή: Lars Bo Ibsen, Lars Vabbersgaard Andersen, Morten Liingaard - Impedance of flexible suction caissons)

– Πύργος με βάση τη βαρύτητα (*Gravity-based*)

Η βάση στήριξης τύπου βαρύτητας είναι σχεδιασμένη με στόχο την αποφυγή φορτίων εφελκυσμού μεταξύ του πυθμένα της δομής στήριξης και του βυθού και μπορεί να κατασκευαστεί με ή χωρίς μικρές χαλύβδινες ή τσιμεντένιες φούστες. Αυτό επιτυγχάνεται με την παροχή επαρκών νεκρών φορτίων έτσι ώστε η δομή να διατηρεί τη σταθερότητά της σε όλες τις περιβαλλοντικές συνθήκες αποκλειστικά μέσω της δικής της βαρύτητας.

Η δομή αποτελείται από μια επίπεδη βάση (έρμα) και απαιτεί κάποια μορφή προστασίας από την τριβή, η πρόβλεψη της οποίας καθορίζεται έπειτα από λεπτομερή σχεδιασμό (Veritas, 2004). Το έρμα αποτελείται από άμμο, πέτρωμα, σίδηρο ή σκυρόδεμα που γεμίζει τη βάση της δομής στήριξης. Η εγκατάσταση αυτής της θεμελίωσης συχνά απαιτεί μια προεργασία του βυθού για να αποφευχθεί η κλίση. Οι δομές με βάση τη βαρύτητα στις περισσότερες περιπτώσεις είναι προκατασκευασμένες μονάδες σκυροδέματος. Η σύνδεση με τον πύργο της ανεμογεννήτριας επιτυγχάνεται μέσω ενός κεντρικού άξονα από χάλυβα ή σκυρόδεμα (Bhattacharya, 2019).

Αυτοί οι τύποι δομών είναι κατάλληλοι για τοποθεσίες με σταθερά εδάφη και που το βάθος του πυθμένα από την επιφάνεια της θάλασσας κυμαίνεται από 0 έως 25 μέτρα (Veritas, 2004).



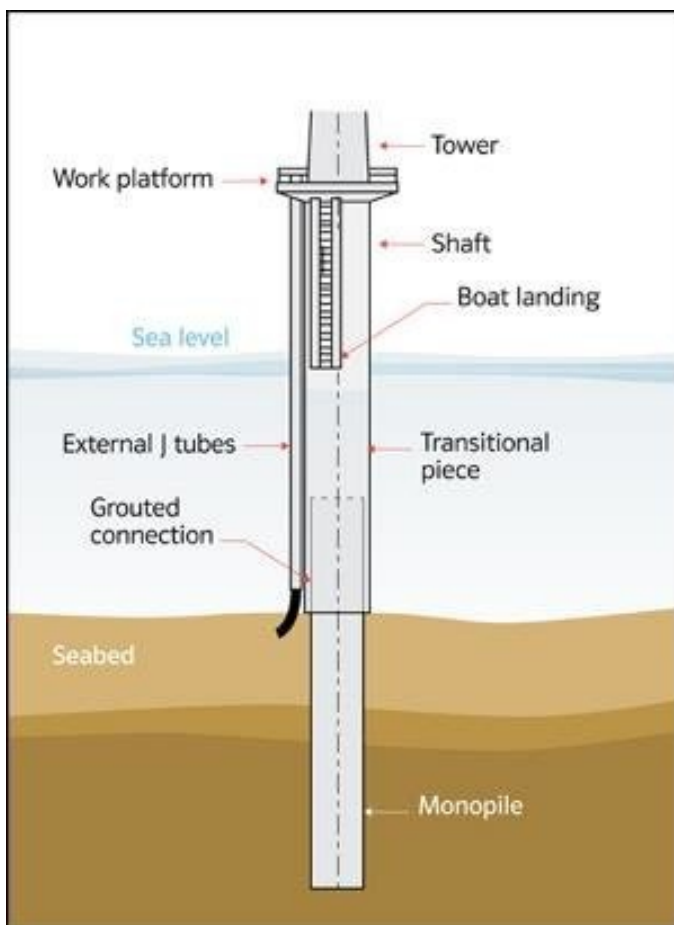
Εικόνα 2.3.4 : Βάση πύργου με βάση τη βαρύτητα. (Πηγή: Wind Energy-The Facts)

– **Μονός Πύργος (Monopile)**

Η δομή στήριξης του μονού πύργου αποτελεί έναν απλό σχεδιασμό κατά τον οποίο ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζεται σε έναν μονό πύργο, είτε άμεσα είτε μέσω ενός μεταβατικού κομματιού. Ο μονός πύργος είναι κατασκευασμένος από κυλινδρικούς χαλύβδινους σωλήνες και η δομή του συνεχίζει κάτω από το έδαφος, το βάθος του οποίου μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τις περιβαλλοντικές και εδαφικές συνθήκες.

Ένα πλεονέκτημα αυτής της μορφής πύργου είναι ότι ενδείκνυται για περιοχές με κινητό βυθό και με μεγάλη τριβή. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη δομή παρουσιάζει πολύ υψηλή ευκαμψία σε βαθιά νερά, γεγονός που δημιουργεί περιορισμούς όπως η εκτροπή και η δόνηση (Veritas, 2004).

Αυτός ο τύπος δομής είναι κατάλληλος για τοποθεσίες που το βάθος του πυθμένα από την επιφάνεια της θάλασσας κυμαίνεται από 0 έως 25 μέτρα (Veritas, 2004).



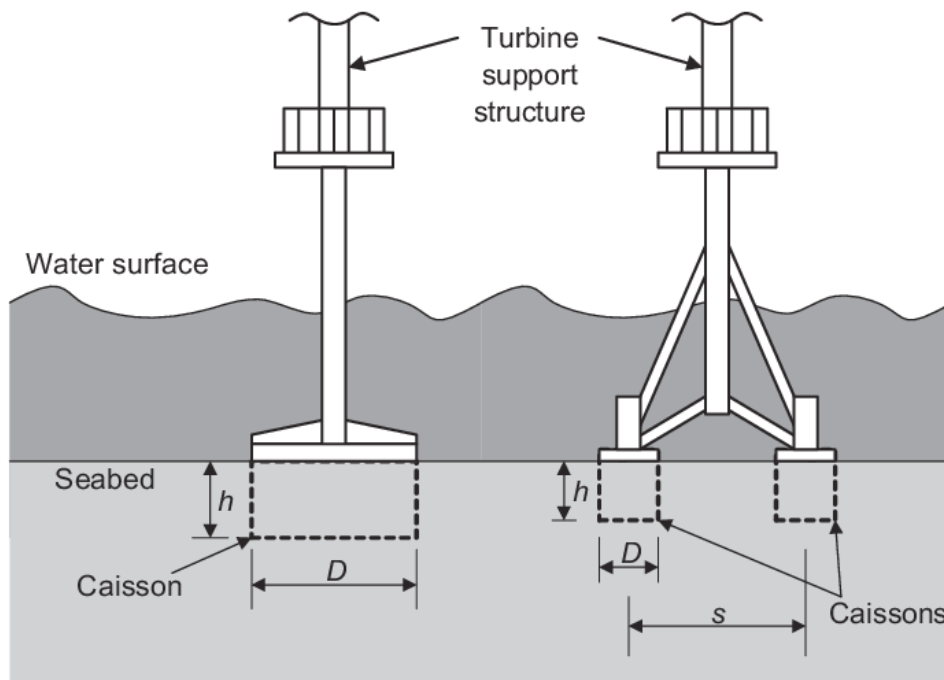
Εικόνα 2.3.5 : Βάση μονού πύργου. (Πηγή: Ömer Faruk Halici, Hillary Mutungi - Assessment of simulation codes for offshore wind turbine foundations)

– **Πύργος με τρίποδο σε κουβά/κιβώτιο αναρρόφησης (Tripod on bucket/suction caisson)**

Η τρίποδη δομή με κιβώτια είναι εξοπλισμένη με άγκυρες κάδου αναρρόφησης σε αντίθεση με τη χερσαία δομή με τρίποδα, που περιλαμβάνει πυλώνες. Μερικά από τα πλεονεκτήματα της δομής αυτής είναι η ευκολία στη μεταφορά και την εγκατάστασή της, καθώς αφενός μπορεί να μεταφερθεί ακέραιη στην περιοχή και αφετέρου κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης, δεν είναι απαραίτητη η χρήση εξοπλισμού βαρέων ανελκυστήρων, διότι κάθε κάδος μπορεί να αδειάσει με ελεγχόμενο τρόπο (Veritas, 2004).

Η δομή στήριξης είναι προτιμότερο να τοποθετείται σε εδάφη που επιτρέπουν στην άγκυρα αναρρόφησης να διεισδύει πιο εύκολα, όπως είναι η άμμος και ο άργιλος, τα οποία είναι λιγότερο επιρρεπή στη τριβή (Veritas, 2004).

Αυτός ο τύπος δομής είναι κατάλληλος για τοποθεσίες που το βάθος του πυθμένα από την επιφάνεια της θάλασσας κυμαίνεται από 20 έως 50 μέτρα (Veritas, 2004).



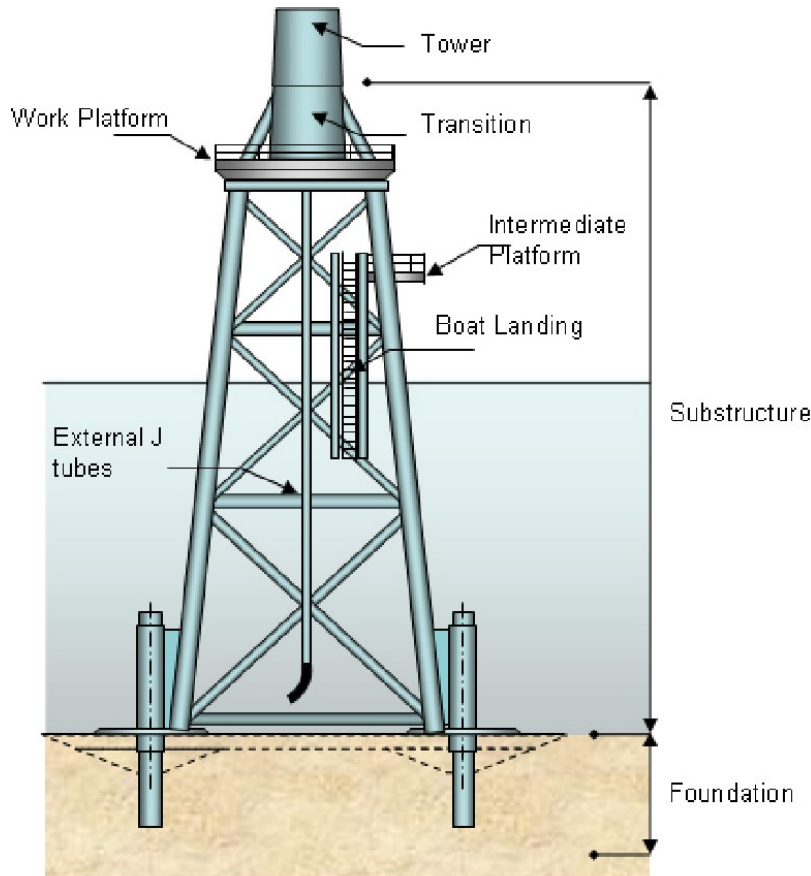
Εικόνα 2.3.6: Αριστερά: βάση πύργου μονή με κουβά/κιβώτιο αναρρόφησης. Δεξιά: βάση πύργου με τρίποδο σε κουβά/κιβώτιο αναρρόφησης. (Πηγή: Byron W. Byrne, Guy Tinnmouth Houlby, Richard Kelly, J. Huxtable - Field Trials of Suction Caissons in Clay for Offshore Wind Turbine Foundations)

– **Πύργος πλαισίου/πλέγματος (Jacket/lattice structure)**

Ο πύργος πλέγματος αποτελείται από τρεις πυλώνες υπό κλίση που συνδέονται με δικτυώματα. Οι πυλώνες εδάφους οδηγούνται μέσα σε θήκες που μπορούν να

οδηγηθούν στο επιθυμητό βάθος για να επιτευχθεί η επαρκής σταθερότητα της δομής. (Veritas, 2004).

Αυτός ο τύπος δομής είναι κατάλληλος για τοποθεσίες που το βάθος του πυθμένα από την επιφάνεια της θάλασσας κυμαίνεται από 20 έως 40 μέτρα (Veritas, 2004).



Εικόνα 2.3.7 : Βάση πύργου πλαισίου/πλέγματος. (Πηγή: Oliver Stettner - Numerical Simulation for Installation of Jacket Foundation of Offshore Wind Turbines)

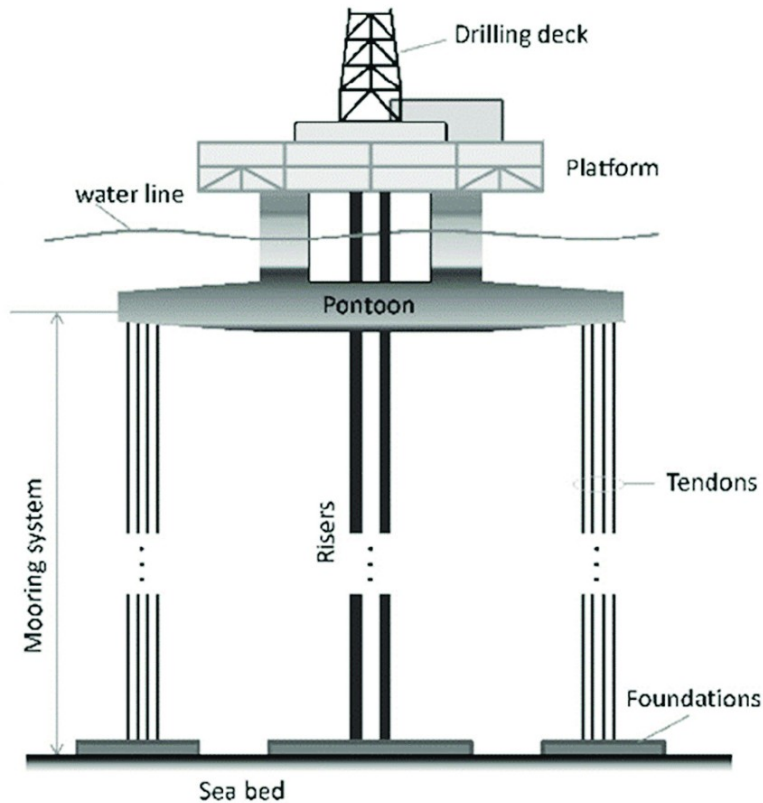
– **Πύργος με πλατφόρμα προεντεταμένων σκελών (*Tension leg platform*)**

Η πλατφόρμα προεντεταμένων σκελών είναι ένας πλωτήρας βυθισμένος μέσω τεντωμένων κατακόρυφων “ποδιών” που λειτουργούν ως άγκυρες και προσφέρουν σταθερότητα στο δομικό σύστημα (Veritas, 2004).

Η εγκατάσταση της γίνεται με απλό τρόπο, καθώς η δομή μπορεί να ρυμουλκηθεί αυτούσια στο χώρο και στη συνέχεια να συνδεθεί με τις άγκυρες. Όταν συνδεθεί με τους πυλώνες αγκύρωσης, και τοποθετηθούν τα χαλύβδινα “πόδια”, γίνεται η εγκατάστασή του καλωδίου σύνδεσης (Veritas, 2004).

Ολόκληρη η κατασκευή μπορεί να αποσυνδεθεί από τις θήκες και να μεταφερθεί στην ακτή σε περίπτωση σημαντικής συντήρησης ή επισκευής της ανεμογεννήτριας (Veritas, 2004).

Αυτή η δομή είναι μια ιδανική λύση για μεγάλα θαλάσσια βάθη (Veritas, 2004).



Εικόνα 2.3.8 : Βάση πύργου με πλατφόρμα προεντεταμένων σκελών . (Πηγή: Felice Rubino, Antonio Nisticò, Fausto Tucci, Pierpaolo Carlone - Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review)

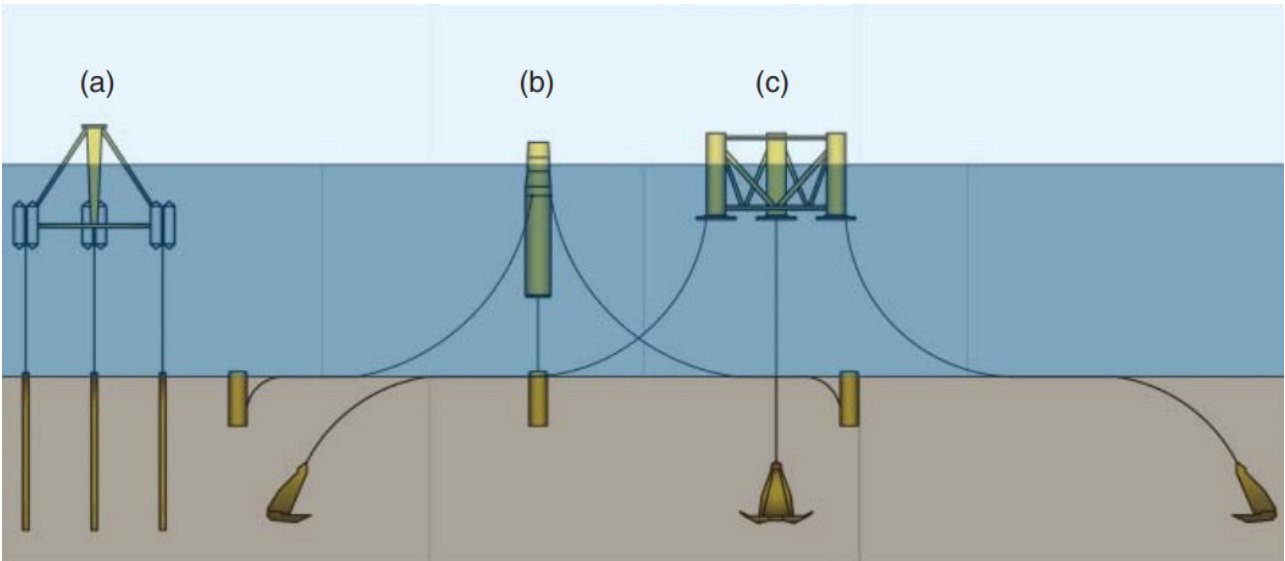
– **Πύργος πλωτού συστήματος τύπου spar (Spar buoy floating concept)**

Οι πλωτές ανεμογεννήτριες μπορούν να επιπλέουν απευθείας σε πλήρως λειτουργική κατάσταση από την κατασκευή τους και είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικές σε μεγάλα βάθη νερού, όπου το βάθος καθιστά τις συμβατικές δομές μη ανταγωνιστικές (Veritas, 2004).

Το πλωτό σύστημα μπορεί να ταξινομηθεί σε τρεις κύριες κατηγορίες (βλέπε εικόνα 2.3.9): (7)

1. Αγκυροβόληση σταθεροποιημένης TLP (πλατφόρμα προεντεταμένων σκελών) . Η συγκεκριμένη δομή σταθεροποιείται με τεντωμένα “πόδια” που λειτουργούν ως άγκυρες στο βυθό για άνωση και σταθερότητα. (Εικόνα 2.3.9a)

2. Σύστημα σταθεροποίησης έρματος Spar με ή χωρίς σταθεροποιητή ελέγχου κίνησης. Αυτή η δομή αποτελείται από μια βαθιά κυλινδρική βάση, της οποίας το κάτω μέρος είναι πολύ βαρύτερο από το πάνω μέρος. Αυτό ανεβάζει το κέντρο πλευστότητας. Ένα πλεονέκτημα αυτών των δομών είναι το χαμηλό τους κόστος, ωστόσο χρειάζονται βαθύτερα νερά. Για τη μείωση της συνολικής κλίσης του συστήματος χρησιμοποιούνται σταθεροποιητές κίνησης. (Εικόνα 2.3.9b)
3. Ημβυθιζόμενο σύστημα. Αυτή η δομή είναι ένας συνδυασμός των δύο παραπάνω και καταναλώνει πολύ χάλυβα. (Εικόνα 2.3.9c)



Εικόνα 2.3.9: Οι τρεις κύριες κατηγορίες πλωτών συστημάτων για την υποστήριξη υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

2.4 Μελλοντικά σχέδια

Μέχρι σήμερα, η ανάπτυξη των ανεμογεννητριών βασιζόταν κυρίως στην βελτίωση/εξέλιξη των ήδη υπαρχόντων σχεδίων και κατασκευών, όμως βλέπουμε ότι με το πέρασμα των χρόνων η ανάγκη για κάλυψη των ενεργειακών αναγκών γίνεται όλο και μεγαλύτερη. Το γεγονός αυτό οδήγησε τους μηχανικούς στην ανάπτυξη καινούριων ιδεών και στη χρήση προηγμένων υλικών (Veritas, 2002).

Σχέδια ανεμομηχανών κάθετου άξονα

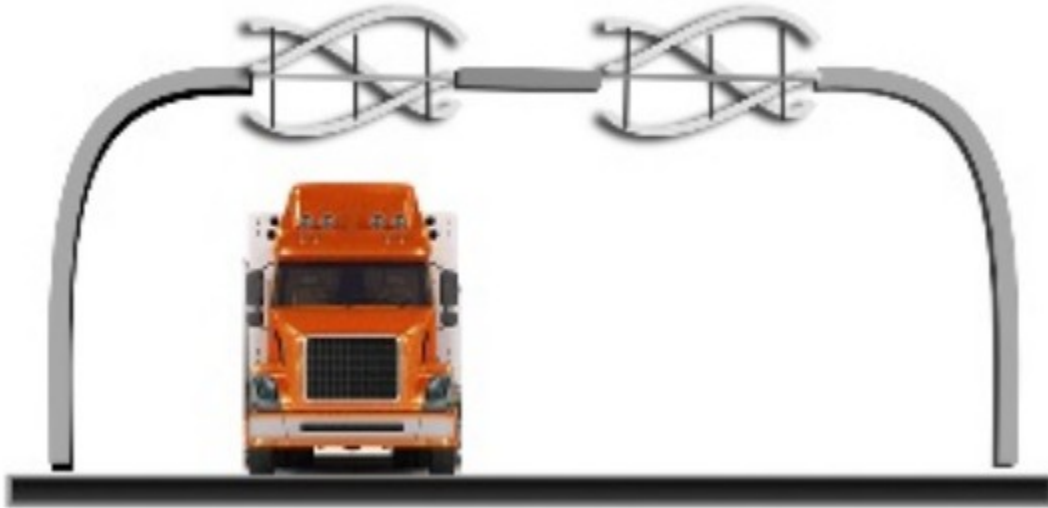
Το ενδιαφέρον κυρίως επικεντρώνεται στην ανάπτυξη των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα. Όπως προαναφέραμε, μερικά από τα πλεονεκτήματα τους αποτελούν ότι δεν εξαρτώνται από την κατεύθυνση του ανέμου και επομένως χωροταξικά μπορούν να τοποθετηθούν πιο κοντά και να αποδώσουν μεγαλύτερη δυναμική σε μια μικρότερη έκταση του αιολικού πάρκου σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Καθώς έχουν τους μηχανισμούς που είναι απαραίτητοι για τη λειτουργία τους στο έδαφος ή στο εσωτερικό του νερού (εάν πρόκειται για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες), έχουν χαμηλότερο κόστος. Επιπλέον, επειδή ο δρομέας τους κινείται με μικρότερες ταχύτητες, θεωρούνται πιο φιλικές προς το περιβάλλον, παράγοντας πολύ λιγότερο αεροδυναμικό θόρυβο και με μικρότερη επιρροή ως προς την τοπική πανίδα (Corke & Nelson, 2018).



Εικόνα 2.4.1 : Παραδείγματα σύγχρονων ανεμογεννητριών κάθετου άξονα. (Πηγή: <https://vatsaaenergy.com/>)

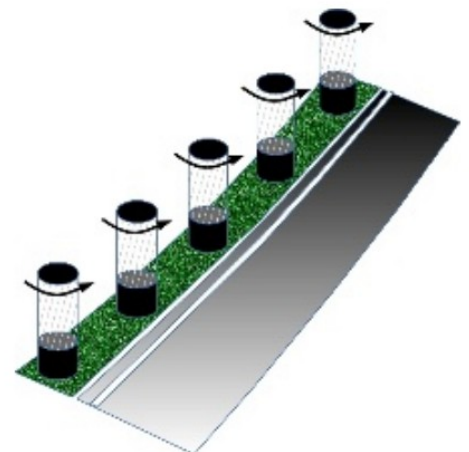
Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά σχέδια που έχουν εμφανιστεί πρόσφατα ή αναμένεται να εμφανιστούν προσεχώς στην αγορά αιολικής ενέργειας.

Μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση αποτελεί αυτή που απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Αφορά μια διάταξη ανεμογεννητριών κάθετου άξονα σε οριζόντια διεύθυνση εγκατεστημένη σε έναν αυτοκινητόδρομο. Τα διερχόμενα με μεγάλη ταχύτητα αυτοκίνητα κινούν με φυσικό τρόπο τις ανεμογεννήτριες με τον αέρα που “παράγουν” και η ενέργεια αυτή θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για το φωτισμό ή για φωτεινές πινακίδες που υπάρχουν σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας (Corke & Nelson, 2018).



Εικόνα 2.4.2 : Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα σε οριζόντια διεύθυνση πάνω από αυτοκινητόδρομο (Corke & Nelson, 2018).

Ένα άλλο παράδειγμα χρήσης των ανεμογεννητριών για το φωτισμό αυτοκινητόδρομων είναι η τοποθέτηση μικρών ανεμογεννητριών κάθετου άξονα στο πλάι του δρόμου, οι οποίες κινούνται όπως και οι παραπάνω από τον αέρα που δημιουργούν τα διερχόμενα αυτοκίνητα (Corke & Nelson, 2018).

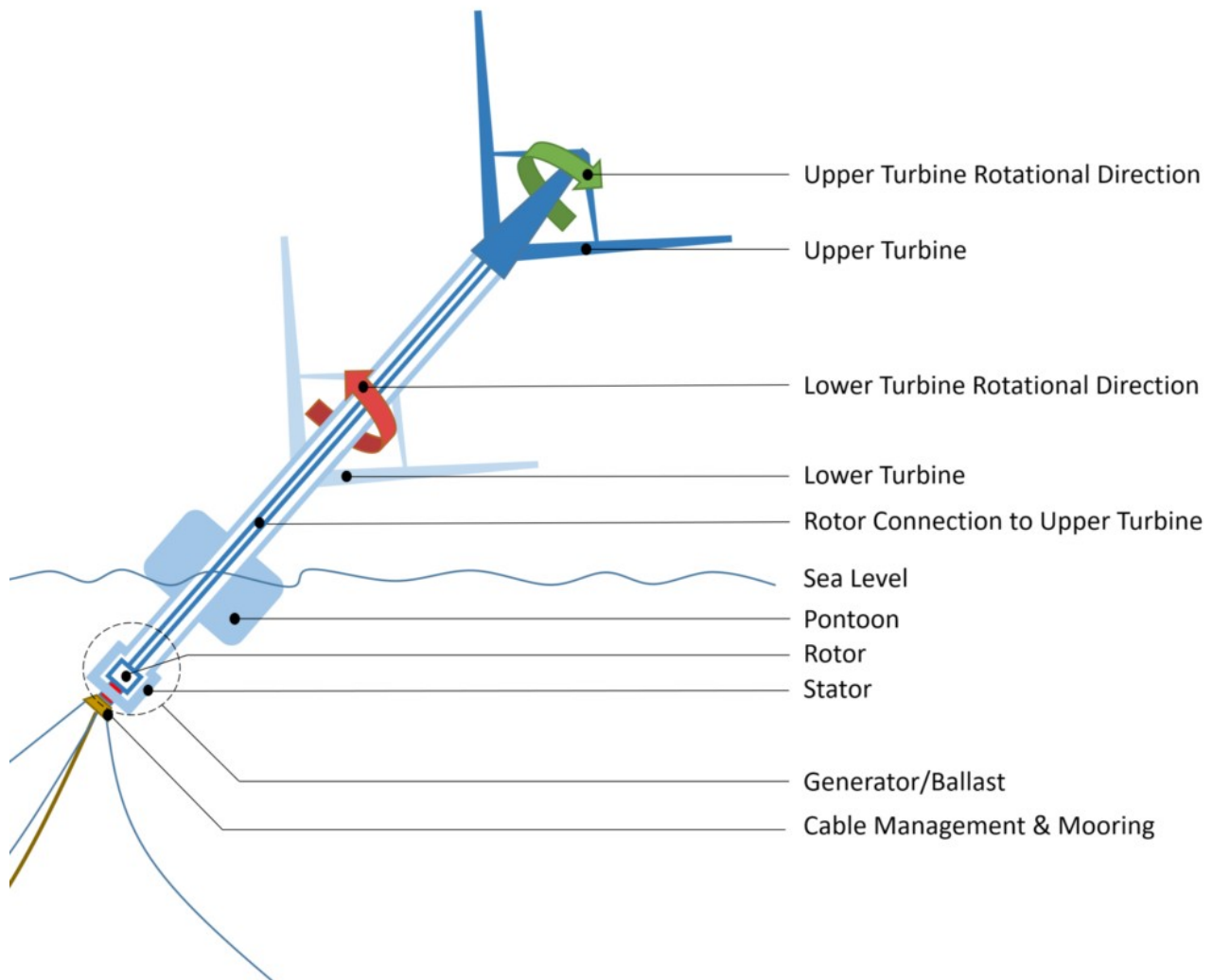


Εικόνα 2.4.3 : Αξιοποίηση μικρών ανεμογεννητριών κάθετου άξονα για το φωτισμό αυτοκινητόδρομων. (<https://www.thepatent.news/>) , (Corke & Nelson, 2018).

Το μέλλον για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα για βάθη μεγαλύτερα των 60 μέτρων είναι οι πλωτές ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα. Παρακάτω, θα αναπτύξουμε τα φιλόδοξα σχέδια δύο εταιριών, από την Νορβηγία και από τη Σουηδία.

Όπως είδαμε και παραπάνω, οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα στην στεριά είναι ασυναγώνιστες σε σχέση με τις κάθετου άξονα. Τα τελευταία χρόνια όμως, είναι προφανή τα πλεονεκτήματα που έχουν οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα στη θάλασσα. Μερικά από αυτά είναι ότι δεν έχουν σύστημα μετάδοσης ή ψύξης, η δυνατότητα μαζικής κατασκευής τους, ότι έχουν πιο ανθεκτικούς δρομείς και με χαμηλότερο κόστος και ότι έχουν τη γεννήτρια τους εγκατεστημένη στο επίπεδο του νερού αντί να είναι σε μεγάλο ύψος μέσα σε άτρακτο, γεγονός που τις καταστεί πιο σταθερές και πιο εύκολες στις συντήρηση αλλά και στην επισκευή τους σε περίπτωση βλάβης.

Επιπλέον, δεν δημιουργούν έντονο φαινόμενο απορροής, γεγονός που επιτρέπει την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα στο ήμισυ της απόστασης σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, επομένως μπορεί να τοποθετηθεί ο διπλάσιος αριθμός ανεμογεννητριών. Η νορβηγική εταιρεία World Wide Wind έχει σχεδιάσει ένα μοντέλο που αποτελείται από δύο δρομείς που κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις ο ένας ως προς τον άλλο και στηρίζεται με σύστημα αντίβαρου τύπου Spar, το οποίο είναι προσδεμένο στον πυθμένα της θάλασσας. (<https://worldwidewind.no/>) , (<https://www.rechargenews.com/>) , (<https://newsbeezer.com/>)



Εικόνα 2.4.4 : Σχηματική απεικόνιση και περιγραφή των επιμέρους στοιχείων ανεμογεννήτριας της εταιρείας World Wide Wind. (<https://newsbeezer.com/>)



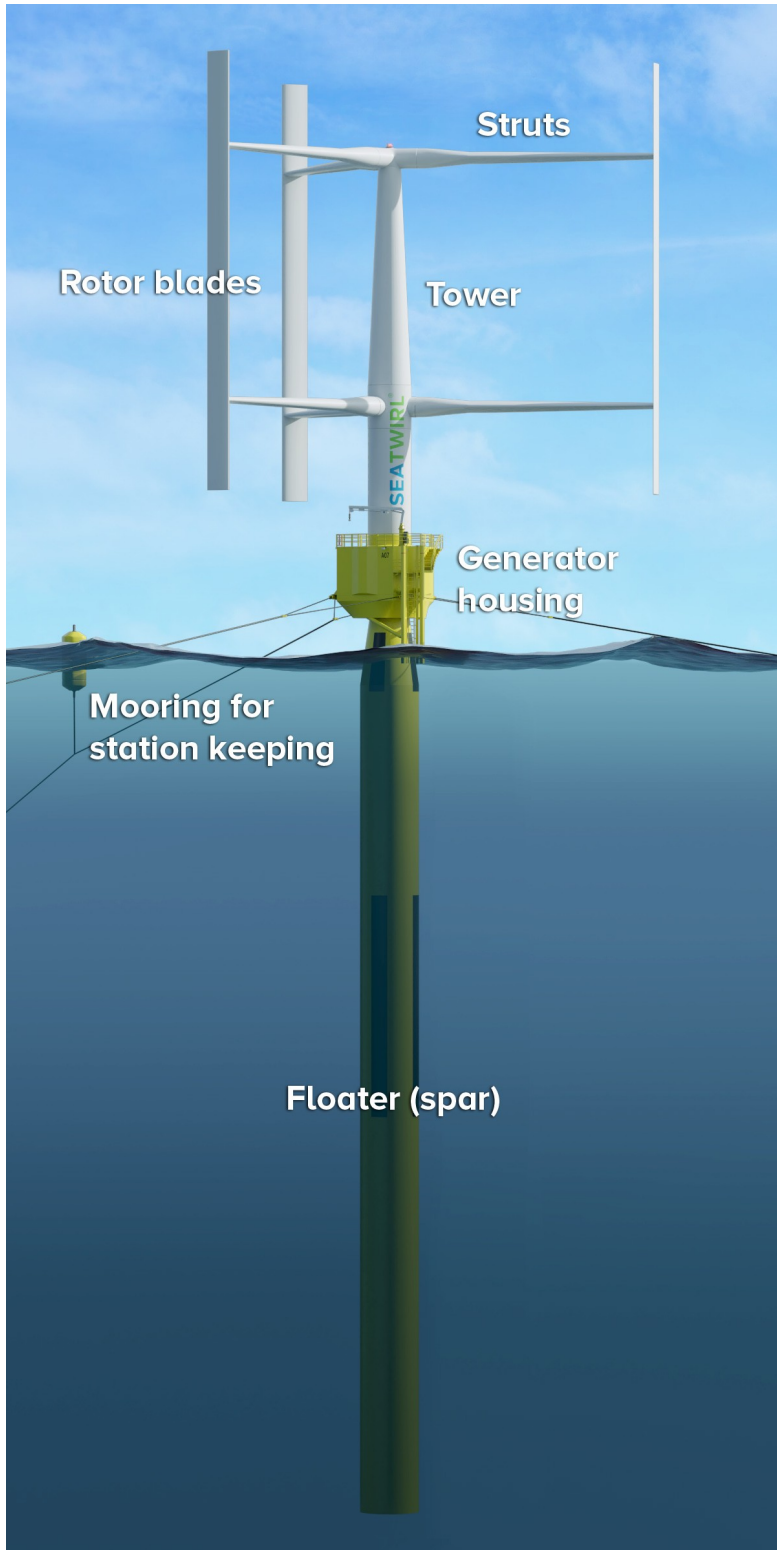
Εικόνα 2.4.5 : Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης της εταιρείας World Wide Wind (WorldWideWind)

Παράλληλα, η σουηδική εταιρεία SeaTwirl έχει θέσει σε λειτουργία μια μικρή ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα, η οποία εκτείνεται 13m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και 18m κάτω από αυτήν, με παραγόμενη ισχύ 30 kW. Αποτελείται από τρία πτερύγια κάθετου άξονα και ένα πύργο με χαμηλό κέντρο βάρους ο οποίος είναι προσδεμένος στον πυθμένα της θάλασσας. Η ανεμογεννήτρια αυτή (S1) έχει αποδείξει ότι μπορεί να αντεπεξέλθει σε τεράστια κύματα και σε αέρα πολλών χιλιομέτρων.

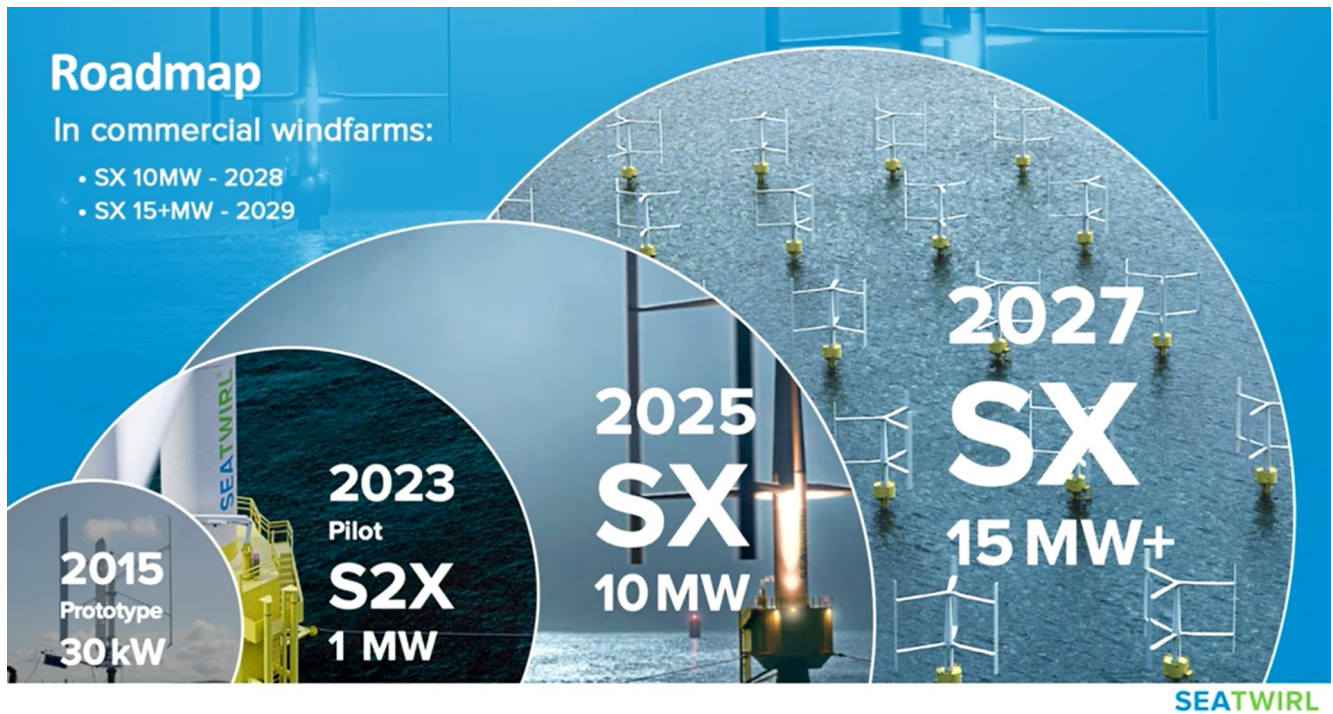
Στο παρόν, η Sea Twirl έχει σχεδιάσει μια μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα που θα τεθεί σύντομα σε πειραματική λειτουργία, με ύψος που φτάνει τα 55m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και τα 80m κάτω από αυτήν και έχει συνολική ισχύ 1 MW. Αυτό προϋποθέτει την τοποθέτησή της σε βάθη μεγαλύτερα των 100m. Παρόλο που η λειτουργία της θα σταματάει σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες των 90 km/h, το μοντέλο (S2x) έχει σχεδιαστεί να αντέχει σε ταχύτητες ανέμου που φτάνουν έως και τα 180 km/h. (<https://newatlas.com/>)



Εικόνα 2.4.6 : Η ανεμογεννήτρια S1 της SeaTwirl σε λειτουργία. (<https://newatlas.com/>)



Εικόνα 2.4.7 : Μια απεικόνιση της ανεμογεννήτρια της εταιρείας SeaTwirl. (<https://seatwirl.com/>)

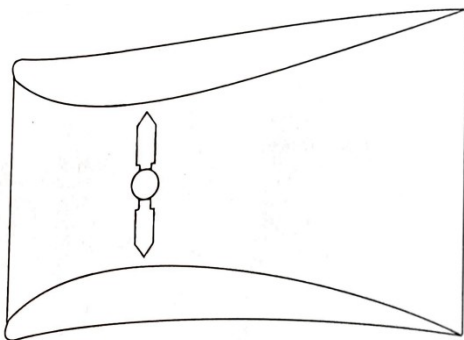


Εικόνα 2.4.8 από βίντεο: Τα φιλόδοξα σχέδια της εταιρείας SeaTwirl για τα επόμενα χρόνια. (<https://seatwirl.com/>)

Σχέδια ανεμομηχανών οριζοντίου άξονα

Εκτός από τις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, με το πέρασμα των χρόνων προκύπτει όλο και μεγαλύτερη η ανάγκη για ανάπτυξη νέων ιδεών αλλά και βελτίωση των ήδη υπάρχοντων ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα.

Μια ιδέα ανεμομηχανής είναι αυτή που παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Η παρακάτω διάταξη αποτελείται από μια έλικα η οποία κινείται μέσα σε ένα περίβλημα. Το περίβλημα μειώνει τις αεροδυναμικές απώλειες, αυξάνοντας την ταχύτητα του αέρα. Τα μειονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι το αρκετά μεγάλο βάρος της, το υψηλό κόστος και το γεγονός ότι πρέπει να είναι διαρκώς προσανατολισμένη στην διεύθυνση του αέρα (Καλδέλλης, 2005) , (Corke & Nelson, 2018).



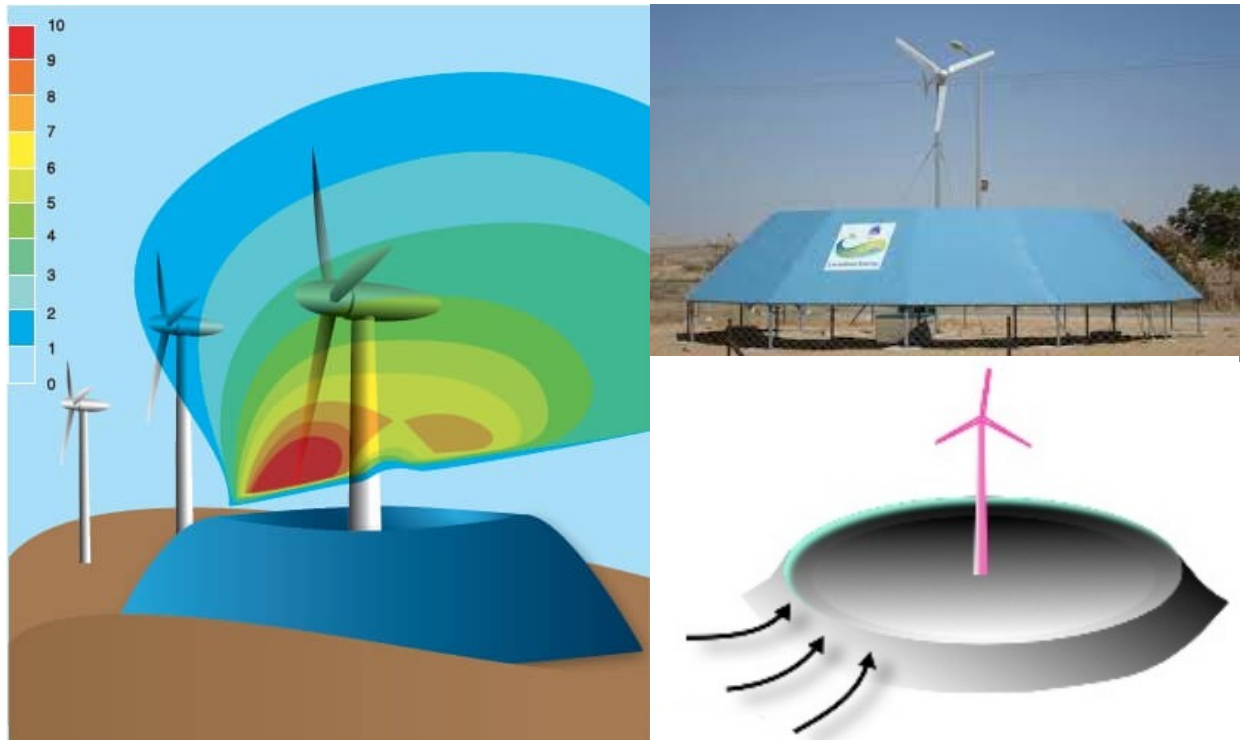
Εικόνα 2.4.9 : Σχηματική απεικόνιση ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα με περίβλημα.

Μια ομάδα στην Ιαπωνία κατασκεύασε μια τέτοια ανεμογεννήτρια, με το όνομα “Wind Lens”. Παρακάτω παρουσιάζεται μια παρόμοια διάταξη που αναπτύχθηκε στο Clarkson University στη Νέα Υόρκη (Corke & Nelson, 2018).



Εικόνα 2.4.10 : Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα με περίβλημα που υποβάλλεται σε τεστ στο Clarkson University (Corke & Nelson, 2018).

Ένας άλλος παρόμοιος τύπος ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα, απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα. Η ανεμογεννήτρια βρίσκεται μέσα σε έναν τεχνητό κοίλο “λόφο” σαν πλατφόρμα και καθώς ο αέρας “χτυπάει” στα τοιχώματα του λόφου αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου ενώ παράλληλα τον κατευθύνει στις κρίσιμες περιοχές των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Συχνά αναφέρεται και με το όνομα Wind Donut λόγω του σχήματος της. Οι σχεδιαστές της ισχυρίζονται, ότι η συγκεκριμένη διάταξη μπορεί να αυξήσει την συνολική ισχύ της ανεμογεννήτριας μέχρι και 15 έως 30%.



Εικόνα 2.4.11 : Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα μέσα σε κοίλο “λόφο”, τύπου Wind Donut. Στο σχήμα απεικονίζεται με χρώματα το μέγεθος της ταχύτητας του αέρα. (<https://www.ubergizmo.com/>) , (<https://www.windpowerengineering.com/>) , (Corke & Nelson, 2018).

Ένας συνδυασμός των δύο παραπάνω τύπων είναι η παρακάτω εικονιζόμενη διάταξη. Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από έναν μεγάλο κωνικό σωλήνα παρόμοιο με τύπου Venturi που συλλέγει τον αέρα και τον παροχετεύει μέσα από ένα μεγάλο περίβλημα όπου βρίσκονται μια ή και παραπάνω ανεμογεννήτριες, αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα του αέρα έως και τέσσερις φορές περισσότερο από το αρχικό μέγεθός της.



Εικόνα 2.4.12 : Φωτογραφία από μια ανεμομηχανή της εταιρείας Sheer Wind 2.2MW τεχνολογίας Invelox υπό κατασκευή στην Κίνα (Corke & Nelson, 2018).

Σχέδια ανεμομηχανών εναέριου τύπου

Ένας νέος τύπος ανεμογεννητριών που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια είναι οι εναέριου τύπου, που στόχο έχουν να φτάνουν σε πολύ μεγάλο υψόμετρο, κοντά στο όριο της ατμόσφαιρας όπου και βρίσκονται οι πιο δυνατοί και σταθεροί άνεμοι. Ένα τέτοιο παράδειγμα απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα, που αφορά μια ανεμομηχανή που αποτελείται από ένα περίβλημα γεμάτο με ήλιο, το οποίο βοηθάει στην ανύψωση, και στο εσωτερικό περιέχει έναν δρομέα. Σύμφωνα με τους δημιουργούς της, ο συγκεκριμένος τύπος μπορεί να φτάσει σε υψόμετρο μέχρι και 600 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. (<https://news.mit.edu/>) , (Corke & Nelson, 2018).



Εικόνα 2.4.13 : Η ανεμογεννήτρια Buoyant ή BAT, της εταιρείας Altaeros Energies. (Πηγή: <https://news.mit.edu/>)

Ένα άλλο παράδειγμα εναέριας ανεμομηχανής είναι η γνωστή ως “energy kite” των σχεδιαστών Makani. Μέχρι τώρα, από 30kW που ξεκίνησε να παράγει στα πρώιμα στάδια λειτουργίας της πριν μερικά χρόνια, μπορεί πλέον να παράγει έως και 600kW ενώ μπορεί να φτάσει σε υψόμετρων 300 μέτρων. Η διάταξη αποτελείται από έναν αριθμό σχοινιών που επιτρέπουν την κίνηση του μέχρι ένα υψόμετρο και στη συνέχεια αυτό κινείται κυκλικά, δημιουργώντας έναν νοητό κύκλο στον αέρα. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης ανεμομηχανής είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει και σε υπεράκτιες περιοχές (<https://x.companny/>) , (Corke & Nelson, 2018).



Εικόνα 2.4.14 : Η πρώτη υπεράκτια εναέρια ανεμογεννήτρια των σχεδιαστών Makani, 2019. (Πηγή: <https://www.tudelft.nl/>)

Αυτά τα μοντέλα αποτελούν μερικά παραδείγματα μελλοντικών σχεδίων ή ήδη υπάρχοντων, που βρίσκονται όμως σε πειραματικό στάδιο. Στόχος αυτών των ανεμογεννητριών είναι να ξεπεράσουν το όριο Betz, μειώνοντας παράλληλα την επίδραση τους ως προς το περιβάλλον (Corke & Nelson, 2018). Η τεχνολογία συνεχώς εξελίσσεται και όλο και περισσότερες ιδέες αναπτύσσονται, επομένως αναμένεται να εμφανιστούν πολλά ακόμα είδη ανεμογεννητριών, φιλικότερα ως προς το περιβάλλον και με τεράστια παραγόμενη ισχύ.

3. Φορτία και αστοχίες στις ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν για τουλάχιστον 20 χρόνια. Κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος, εκτίθενται σε ένα ευρύ φάσμα καιρικών συνθηκών και ανέμου. Ο δομικός σχεδιασμός πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις σταθερές και ασταθείς ταχύτητες ανέμου που οδηγούν σε ακραίες τιμές στα σταθερά και ασταθή αεροδυναμικά φορτία (Corke & Nelson, 2018).

Ο σχεδιασμός μιας ανεμογεννήτριας και τα κατασκευαστικά στοιχεία πρέπει, όσο είναι δυνατόν, να πληρούν τις ακόλουθες προϋποθέσεις: (Veritas, 2004)

- να επιτυγχάνεται αντοχή στις σχετικές μηχανικές, φυσικές και χημικές αλλοιώσεις
- η κατασκευή να συμμορφώνεται με τις σχετικές αναγνωρισμένες τεχνικές και πρακτικές
- να είναι δυνατή η επιθεώρηση, η συντήρηση και η επισκευή.

Κατά τη διάρκεια ζωής της, μια κατασκευή καταπονείται από διάφορα φορτία, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν αλλαγή της κατάστασης της κατασκευής από άθικτη σε κατάσταση φθοράς, ζημιάς ή αστοχίας. Η δομική δυσλειτουργία μπορεί να συμβεί με διάφορους τρόπους. Παρόλο που η μετάβαση σε μια κατάσταση δυσλειτουργίας έχει χρονική συνέχεια, έχει νόημα να υποθέσουμε ότι όλες οι καταστάσεις μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες σε σχέση με τον βαθμό δυσλειτουργίας τους: 1) καταστάσεις που έχουν αποτύχει και 2) καταστάσεις που δεν έχουν αποτύχει αλλά ούτε είναι ασφαλείς. Το όριο που καθορίζει μια κατασκευή ως δυσλειτουργική αναφέρεται ως το σύνολο των οριακών καταστάσεων. Η ασφάλεια ή η αξιοπιστία μιας δομής εξαρτάται το πόσο πιθανό είναι η δομή να φτάσει σε οριακή κατάσταση και να εισέλθει σε κατάσταση αποτυχίας (Veritas, 2002).

Από τους διάφορους τύπους οριακών συνθηκών που συναντάμε, δύο τύποι είναι οι συχνότεροι: 1) τελικές οριακές καταστάσεις και 2) οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας. Οι τελικές οριακές καταστάσεις αντιστοιχούν σε π.χ. πλαστική παραμόρφωση, θραύση, κάταγμα κόπωσης, αστάθεια, λυγισμός και εκτροπή. Οι οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας υποδηλώνουν ότι υπάρχουν παραμορφώσεις που υπερβαίνουν την ανοχή, οι οποίες όμως δεν συνεπάγονται την ολική δυσλειτουργία της δομής, όπως π.χ. είναι οι ρωγμές, η φθορά, η διάβρωση, οι μόνιμες εκτροπές και οι δονήσεις (Veritas, 2002).

Βλάβες-Παραδείγματα

Οι ανεμογεννήτριες Darrius ήταν επιρρεπείς σε δομικές αστοχίες. Μια ανεμογεννήτρια διαμέτρου 12,8 μέτρα της Alcoa κατέρρευσε στις εγκαταστάσεις τους στην Πενσυλβάνια στις 21 Μαρτίου 1980, όταν ο κεντρικός σωλήνας ροπής άρχισε να δονείται και τελικά λύγισε. Τον Απρίλιο του 1981, μια μηχανή διαμέτρου 25 μέτρων

διαλύθηκε ανατολικά του Λος Αντζελες εξαιτίας μιας βλάβης στο λογισμικό που ρύθμιζε την ταχύτητα περιστροφής της τουρμπίνας (Corke & Nelson, 2018).

Τα παραδείγματα από αστοχίες στις ανεμογεννήτριες είναι πολλά και φυσικά δεν λείπουν και τα εγχώρια ατυχήματα.

Στις 9 Ιανουαρίου 2020 στην Εύβοια, ένας αριθμός ανεμογεννητριών σε ένα εγκαταλειμμένο αιολικό πάρκο κοντά στην Κάρυστο, κατέρρευσε εξαιτίας των δυνατών ανέμων. Ευτυχώς δεν υπήρξαν τραυματισμοί, ούτε φυσικές καταστροφές.



Εικόνα 3.1 : Ανεμογεννήτριες υπό κατάρρευση από το εγκαταλειμμένο αιολικό πάρκο στην Εύβοια. (Πηγή: Structural Engineer <https://www.thestructuralengineer.info/news/wind-turbines-destroyed-in-evia-greece>)

Στις 4 Αυγούστου 2022 στην Νάξο, ανεμογεννήτρια πήρε φωτιά σε αιολικό πάρκο στην περιοχή της Κορώνου, η οποία και εξαπλώθηκε λόγω των δυνατών ανέμων που αγγίζανε περίπου τα 70 χλμ/ώρα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να καεί μεγάλη θαμνώδης έκταση και να κινδυνεύσουν πολλά ζώα, τα οποία βοσκούσανε στην ευρύτερη περιοχή.



Εικόνα 3.2 : Φωτογραφία της ανεμογεννήτριας που πήρε φωτιά στην Νάξο. (Πηγή: Naxos Times)

Φορτία λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών

Οφείλουμε να λάβουμε υπόψιν και τα περιβαλλοντικά φορτία τα οποία που μπορεί να ποικίλλουν σε μέγεθος, θέση και κατεύθυνση κατά την υπό εξέταση περίοδο και τα οποία σχετίζονται με τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Τέτοια παραδείγματα είναι: (Veritas, 2004).

- φορτία ανέμου
- υδροδυναμικά φορτία που προκαλούνται από κύματα και ρεύματα, συμπεριλαμβανομένων των δυνάμεων οπισθέλκουσας και των δυνάμεων αδράνειας (στα υπεράκτια αιολικά πάρκα)
- σεισμικά φορτία
- φορτία χιονιού και πάγου
- υψηλή θερμοκρασία



Εικόνα 3.3 : Βλάβες πτερυγίων από κεραύνιο πλήγμα (Πηγή: Γεώργιος Λευθεριώτης - Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας-Πανεπιστήμιο Πατρών)



Εικόνα 3.4 : Φωτογραφίες από κατάρρευση ανεμογεννητριών σε αιολικό πάρκο στην Ιαπωνία και στη Νέα Ζηλανδία. (Πηγή: Mohammad-Amin Asareh - Dynamic behavior of operational wind turbines considering aerodynamic and seismic load interaction)

Για τις κατασκευές σε υπεράκτια αιολικά πάρκα, υπάρχουν τρεις κατηγορίες ασφαλείας:

1) Η χαμηλή κατηγορία ασφαλείας: χρησιμοποιείται για κατασκευές, των οποίων οι αστοχίες συνεπάγονται χαμηλό κίνδυνο για τραυματισμούς, ρύπανση, αμελητέες οικονομικές συνέπειες και αμελητέο κίνδυνο για την ανθρώπινη ζωή.

2) Η κανονική κατηγορία ασφαλείας: χρησιμοποιείται για κατασκευές των οποίων οι αστοχίες συνεπάγονται κίνδυνο για τραυματισμούς, ρύπανση ή πιθανότητα σημαντικών οικονομικών συνεπειών.

3) Η υψηλή κατηγορία ασφαλείας: χρησιμοποιείται για κατασκευές των οποίων οι αστοχίες συνεπάγονται μεγάλες πιθανότητες τραυματισμών ή θανάτων, σημαντικής ρύπανσης ή πολύ μεγάλων οικονομικών συνεπειών (Veritas, 2004).

Η επίδραση του σχεδιασμού των ανεμογεννητριών στα επίπεδα θορύβου

Ο ήχος που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες οφείλεται τόσο σε μηχανικές όσο και σε αεροδυναμικές δυνάμεις. Ως αποτέλεσμα ένας από τους πιο μελετημένους τομείς περιβαλλοντικών επιπτώσεων στη μηχανική αιολικής ενέργειας είναι τα επίπεδα εκπομπής ήχου. Παρόλο που με την εξέλιξη της τεχνολογίας, ο θόρυβος που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες έχει μειωθεί, παραμένει ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη χωροθέτηση των αιολικών πάρκων (Corke & Nelson, 2018).

Λόγω της μεγάλης διακύμανσης των επιπέδων ατομικής ανοχής για το θόρυβο, δεν υπάρχει απόλυτος τρόπος μέτρησης των υποκειμενικών επιπτώσεων του θορύβου ή των αντίστοιχων αντιδράσεων ενόχλησης και δυσανεξίας.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι πηγές ήχου από μια ανεμογεννήτρια μπορούν να χωριστούν σε μηχανικές και αεροδυναμικές.

Οι μηχανικοί ήχοι προέρχονται από εξαρτήματα όπως το κιβώτιο ταχυτήτων, τη γεννήτρια, τους ρυθμιστές στροφών, τους ανεμιστήρες ψύξης και από τον υπόλοιπο βοηθητικό εξοπλισμό. Ο ήχος από αυτά τα εξαρτήματα συνδέεται με την περιστροφή του δρομέα (Corke & Nelson, 2018).

Οι αεροδυναμικές πηγές προκαλούνται από τη ροή του αέρα γύρω από τα πτερύγια και αυτό συνήθως αποτελεί τον μεγαλύτερο παράγοντα πρόκλησης θορύβου των ανεμογεννητριών (Corke & Nelson, 2018).

Πολλές προσπάθειες γίνονται από τους μηχανικούς για τη μείωση του αεροδυναμικού θορύβου της ανεμογεννήτριας, οι οποίες περιλαμβάνουν: (Corke & Nelson, 2018)

- τη χρήση χαμηλότερων αναλογιών ταχύτητας
- τη χρήση χαμηλότερων γωνιών πτερυγίων
- το σχεδιασμό του δρομέα προς τα πάνω
- τη λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας
- τη χρήση ειδικά τροποποιημένων άκρων πτερυγίων

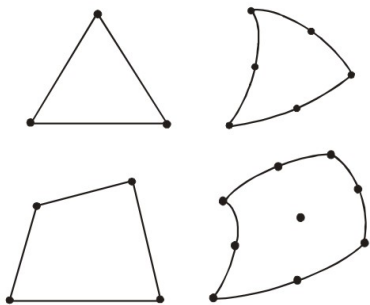
Τέλος, η διατομή του πύργου επηρεάζει την δημιουργία θορύβου, καθώς για παράδειγμα όσο μικρότερη διατομή έχει ένας πύργος, τόσο λιγότερο θόρυβο δημιουργεί όταν ο αέρας προσκρούει σε αυτόν.

Επί του παρόντος, δεν υπάρχουν κοινά διεθνή πρότυπα θορύβου ή κανονισμοί για τις στάθμες ηχητικής πίεσης. Αυτά τα όρια εξαρτώνται από τους κανονισμούς της εκάστοτε χώρας και μπορεί να διαφέρουν κατά τη διάρκεια της ημέρας ή της νύχτας (Corke & Nelson, 2018).

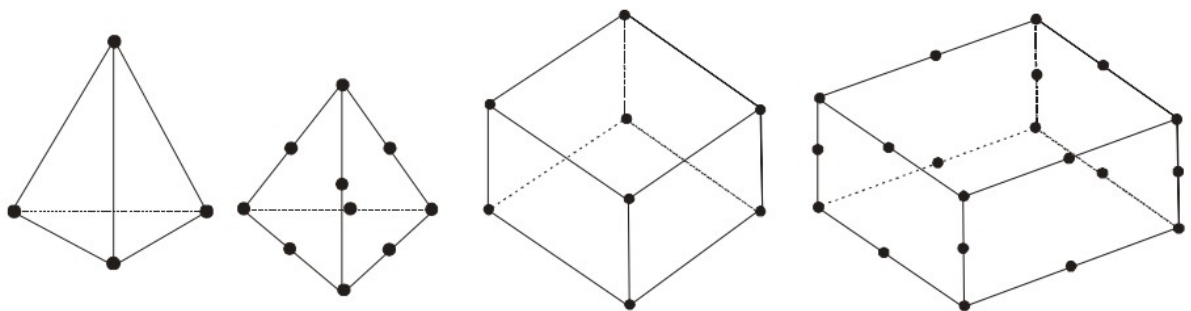
4. Πεπερασμένα Στοιχεία

Μια από τις ισχυρότερες μεθόδους της αριθμητικής ανάλυσης είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία αποτελεί μια φυσική προσέγγιση του προβλήματος. Κατά τη μέθοδο αυτή, ο φυσικός χώρος διαμερίζεται σε επιμέρους διακριτά πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία ορίζονται μέσω εξισώσεων που οδηγούν σε ακριβή αποτελέσματα. Όπως όλα τα προβλήματα του συνεχούς μέσου, έτσι και τα προβλήματα της μηχανικής του παραμορφωσίμου μπορούν να περιγραφούν με διαφορικές εξισώσεις με μερικές παραγώγους και συνεπώς να επιλυθούν με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων.

Ο σχεδιασμός της επίλυσης των πεπερασμένων στοιχείων ξεκινά από τον καθορισμό του πεδίου του προβλήματος, ώστε ο πεπερασμένος όγκος που αρχικά καταλαμβάνει στον χώρο, να χωριστεί σε επιμέρους στοιχεία απλούστερου σχήματος. Τα διάφορα στοιχεία αυτά μπορούν να συναρμολογηθούν με κάποιους κοινούς βαθμούς ελευθερίας (ή κόμβους) και σκοπός είναι να δοθούν τιμές σε αυτούς τους βαθμούς. Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο εντοπίζεται ένας συγκεκριμένος αριθμός κόμβων, για παράδειγμα 8 κόμβοι για ένα απλό κυβικό στοιχείο και ο καθένας από αυτούς έχει κάποιους βαθμούς ελευθερίας (3 μετακινήσεις στους άξονες x,y,z). Συνεπώς σε κάθε κόμβο είναι δυνατό να συνδεθούν 2,3 ή και περισσότερα στοιχεία.



Εικόνα 4.1 : Τα πιο συνήθη δισδιάστατα στοιχεία.



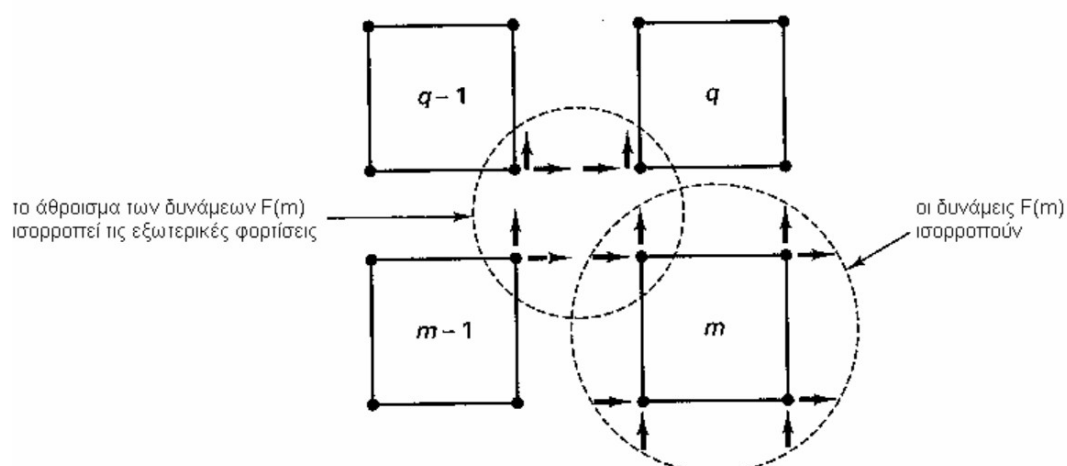
Εικόνα 4.2 : Τα πιο συνήθη τρισδιάστατα στοιχεία.

Ως στοιχεία πρώτου βαθμού ορίζονται εκείνα που διαθέτουν μόνο τους απαραίτητους κόμβους για να οριστούν, για παράδειγμα ένα κυβικό στοιχείο με 8 κόμβους, όσους οι κορυφές του κύβου. Σε περίπτωση ύπαρξης επιπλέον κόμβων, τα στοιχεία ορίζονται ως ανωτέρου βαθμού.

Οι εξισώσεις ισορροπίας στη διαφορική τους μορφή δεν ικανοποιούνται στην μέθοδο των περασμένων στοιχείων, επομένως δεν ισχύουν οι συνθήκες ισορροπίας σε κάθε σημείο του συνεχούς μέσου. Παρόλα αυτά, υπάρχουν, η λύση του προβλήματος προϋποθέτει δύο βασικές συνθήκες, ανεξαρτήτως του αριθμού των επιμέρους στοιχείων που έχουν χρησιμοποιηθεί.

Οι συνθήκες είναι:

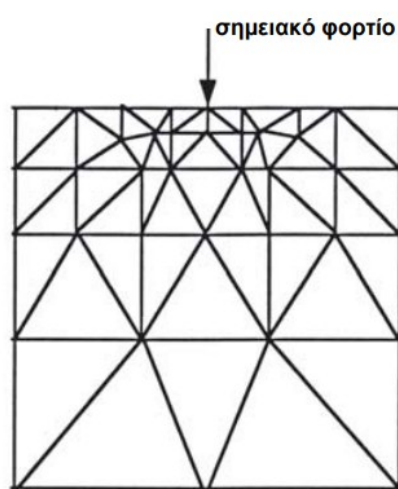
1. Η ισορροπία των δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε κόμβο
2. Η ισορροπία των κομβικών δυνάμεων για κάθε στοιχείο



Εικόνα 4.3 : Ισορροπία δυνάμεων σε κόμβο πλέγματος και στοιχείου.

Ένα από τα προβλήματα που μπορεί να παρουσιαστούν κατά τον σχεδιασμό του θεωρητικού μοντέλου είναι η ευκαμπτότητα της κατασκευής. Αυτή μπορεί να προκύψει εξαιτίας της μη διατύπωσης περιορισμών στις μετατοπίσεις κατά μήκος των ορίων των στοιχείων και της δημιουργίας κενών. Με τη χρήση μικρότερων και περισσότερων στοιχείων, το σφάλμα αυτό μπορεί να περιορισθεί καθώς θα επιτυγχάνεται η ισορροπία με τη δημιουργία περισσότερων κόμβων και επομένως περισσότερων σημείων. Έτσι με τη χρήση μεγαλύτερου αριθμού στοιχείων μπορούμε να περιορίσουμε αυτό το σφάλμα αλλά όχι να το εξαλείψουμε, διότι σε μια προσομοίωση δεν μπορεί να αποδοθεί η απόλυτη ακρίβεια της συμπεριφοράς ενός συνεχούς μέσου.

Συμπερασματικά η υποδιαίρεση/διακριτοποίηση της κατασκευής είναι μια διαδικασία που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς όπως αναφέρθηκε παραπάνω η ακρίβεια της μεθόδου είναι ανάλογη της αύξησης των αριθμών των στοιχείων ή κόμβων. Η αύξηση όμως του αριθμού των στοιχείων συνεπάγεται και αύξηση του χρόνου υπολογισμού και επομένως και του κόστους. Μια πιθανή λύση του ζητήματος του κόστους είναι η βαθμιαία μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων χωρίς να διακυβεύεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Όμως εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας κατασκευών και φορτίσεων είναι δύσκολο να ορισθεί ένας γενικός κανόνας που να καθορίζει τον αριθμό ή το μέγεθος των στοιχείων ή τον τρόπο διακριτοποίησης που απαιτούνται.



Εικόνα 4.4 : Βαθμιαία μεταβολή-ελάττωση του μεγέθους των στοιχείων

Συνοψίζοντας, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στη μελέτη των κατασκευών και ανταποκρίνεται σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Μερικές άλλες εφαρμογές, όσον αφορά το πεδίο της ανάλυσης είναι η χρήση της τόσο στο (συμβατικό) ελαστικό πεδίο (θεωρία μικρών μετατοπίσεων) αλλά και για μη-γραμμικά προβλήματα, λυγισμό, δυναμική συμπεριφορά κ.ά. (Seshu, 2003) , (Καρύδης, 2001) , (Σακελλαρίου & Κοζάνης, 1996).

5. Σχεδιασμός Αριθμητικού μοντέλου

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μοντέλο του πύργου που χρησιμοποιήθηκε για την αριθμητική προσομοίωση. Πιο αναλυτικά, αναφέρονται τα επιμέρους στοιχεία του πύργου και απεικονίζονται στιγμιότυπα του τρισδιάστατου και δισδιάστατου αριθμητικού μοντέλου με τη χρήση του προγράμματος SolidWorks 2022.

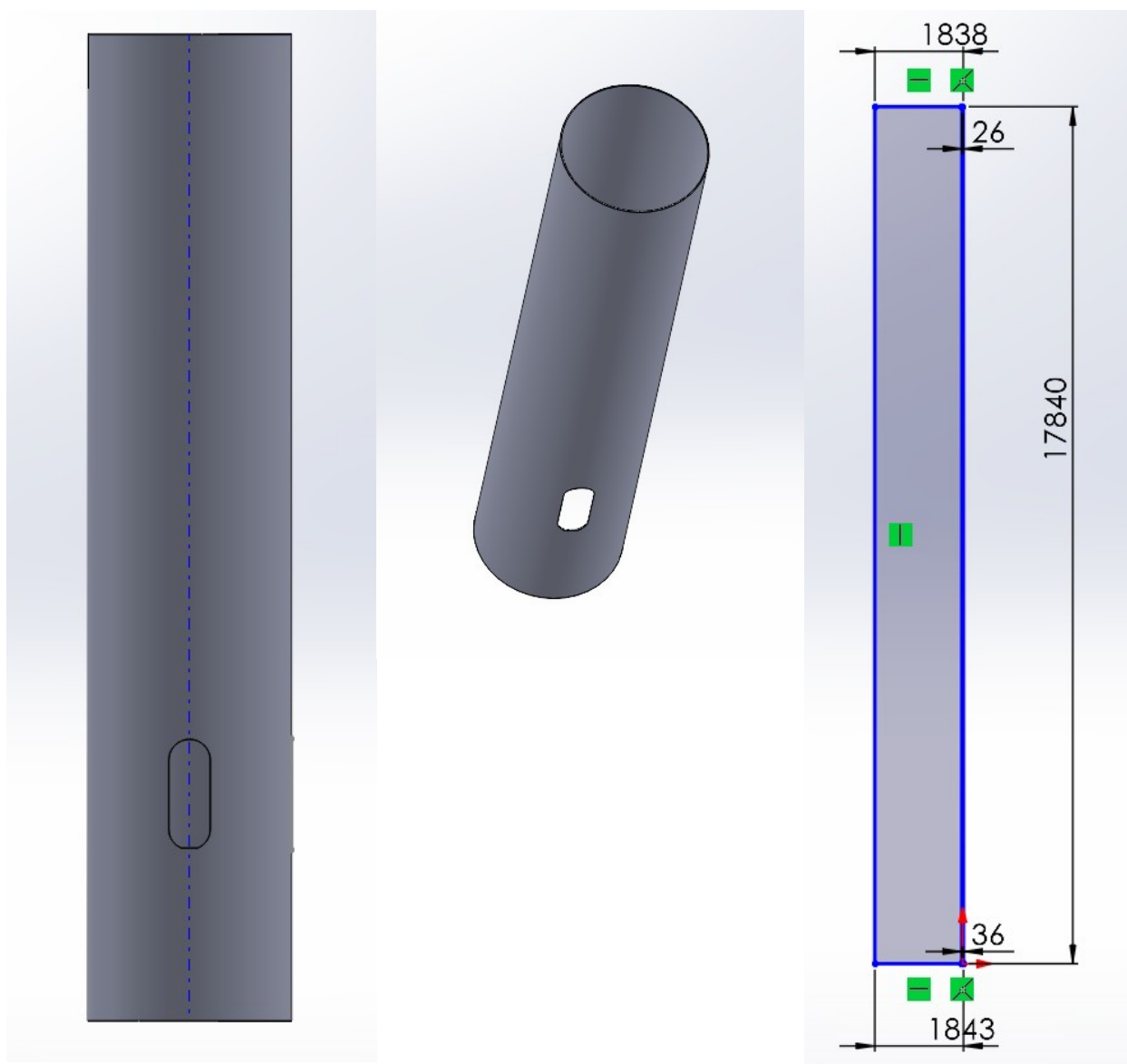
5.1 Περιγραφή του πύργου

Για την εκπόνηση της αριθμητικής προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο πύργου της δανέζικης εταιρείας Vestas. Ο πύργος που θα εξετάσουμε αποτελείται από μια σωληνοειδής κατασκευή κυκλικής μεταβλητής διατομής, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από απλό χάλυβα. Έχει συνολικό ύψος 77,80m και η εξωτερική διάμετρος του αρχίζει στη βάση του πύργου από 3,686m ενώ καταλήγει σε 2,316m. Ο πύργος αποτελείται από τρία τμήματα, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με φλάντζες. Οι φλάντζες είναι πακτωμένες μεταξύ τους με κοχλίες και στα σημεία που έρχονται σε επαφή με τα τμήματα του πύργου συνδέονται με συγκόλληση. Ο πύργος αποτελείται επίσης από δύο ακόμα φλάντζες, μια στη βάση του, που συνδέεται με την διάταξη της θεμελίωσης και μια στην κορυφή του, που συνδέεται με την άτρακτο. Το σύστημα της άτρακτου με τους μηχανισμούς, την πλήμνη και τα πτερύγια έχει θεωρηθεί ότι έχει βάρος 80 τόνους. Το πάχος του κελύφους μεταβάλλεται από 36mm στην βάση έως 22 mm στην κορυφή.

5.2 Μοντέλο αριθμητικής προσομοίωσης

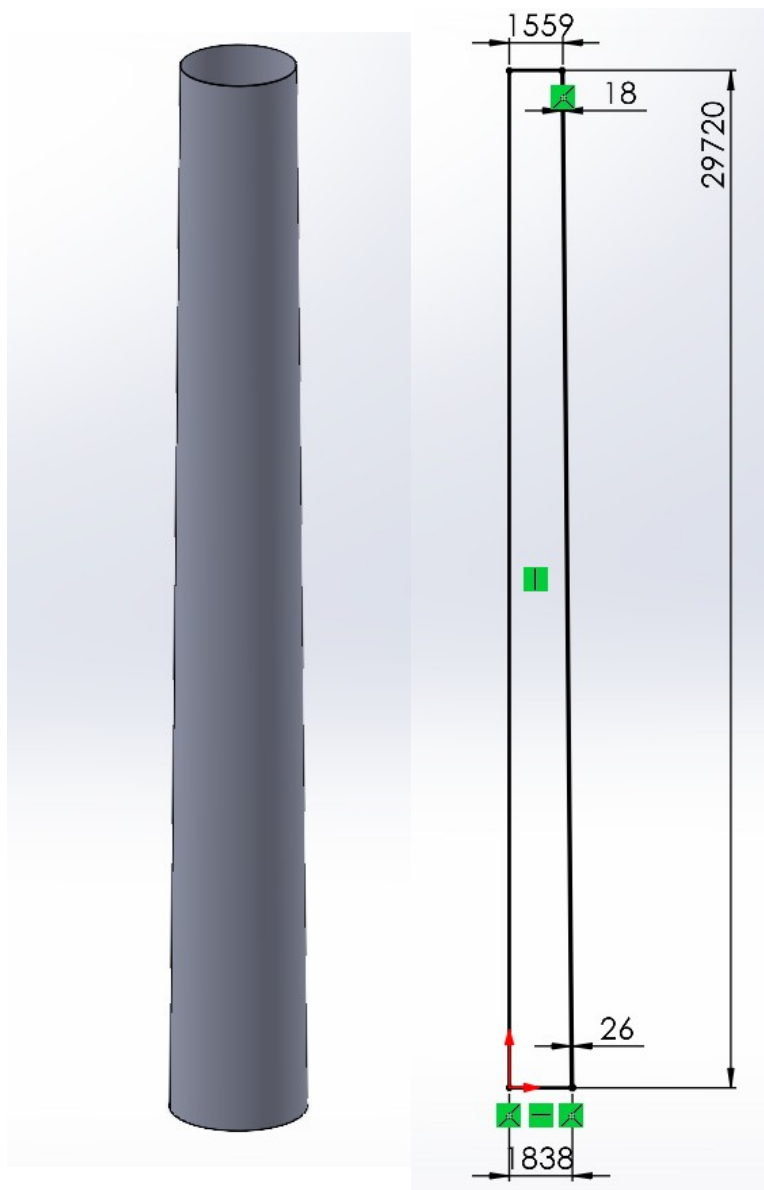
Το μοντέλο προσομοίωσης αποτελείται από τα τρία κομμάτια του πύργου και τις εξι φλάντζες όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Περιλαμβάνει μια πόρτα σχήματος οβάλ, ύψους 1,997m και πλάτους 0,750m. Τα κομμάτια και οι φλάντζες σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα SolidWorks 2022 ξεχωριστά και μετά συναρμολογήθηκαν θεωρώντας ότι είναι πακτωμένα μεταξύ τους. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες εικόνες από το πρόγραμμα κατά την σχεδίασή των διαφόρων τμημάτων.

– Μέρη του πύργου: Κομμάτι 1



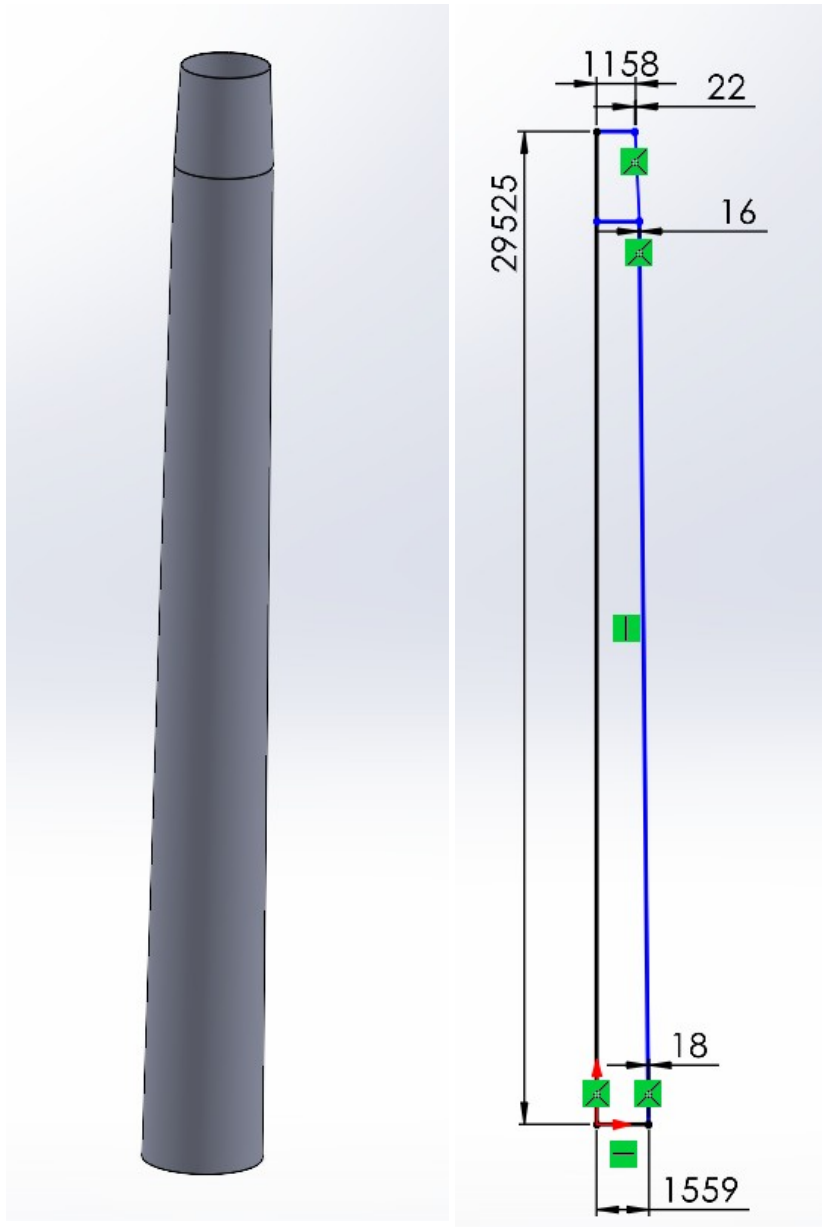
Εικόνα 5.2.1 : Κομμάτι 1. Αριστερά και μέση τρισδιάστατο μοντέλο, δεξιά δισδιάστατο σχέδιο με διαστάσεις.

– *Μέρη του πύργου: Κομμάτι 2*



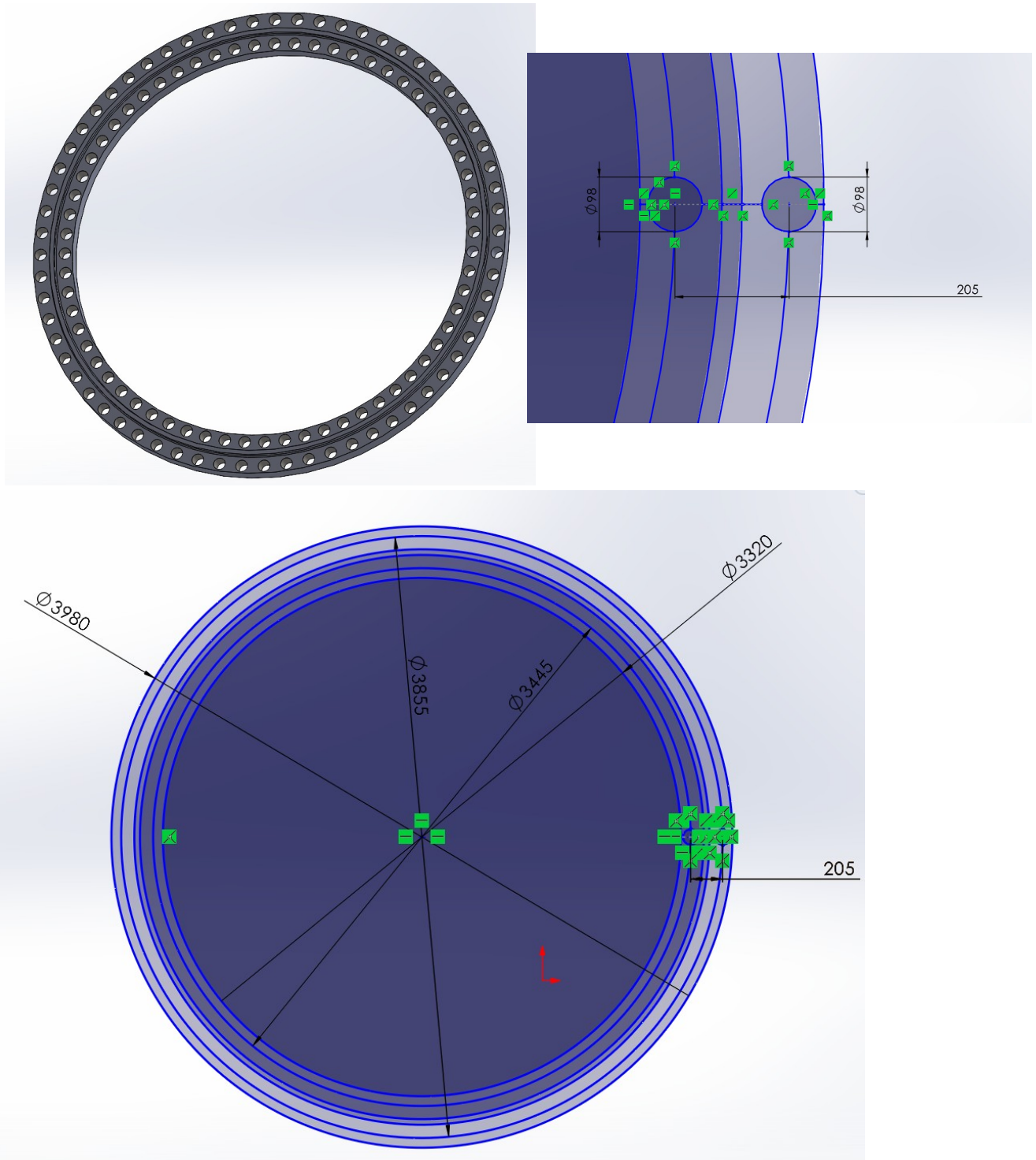
Εικόνα 5.2.2 : Κομμάτι 2. Αριστερά τρισδιάστατο μοντέλο, δεξιά δισδιάστατο σχέδιο με διαστάσεις.

– Μέρη του πύργου: Κομμάτι 3



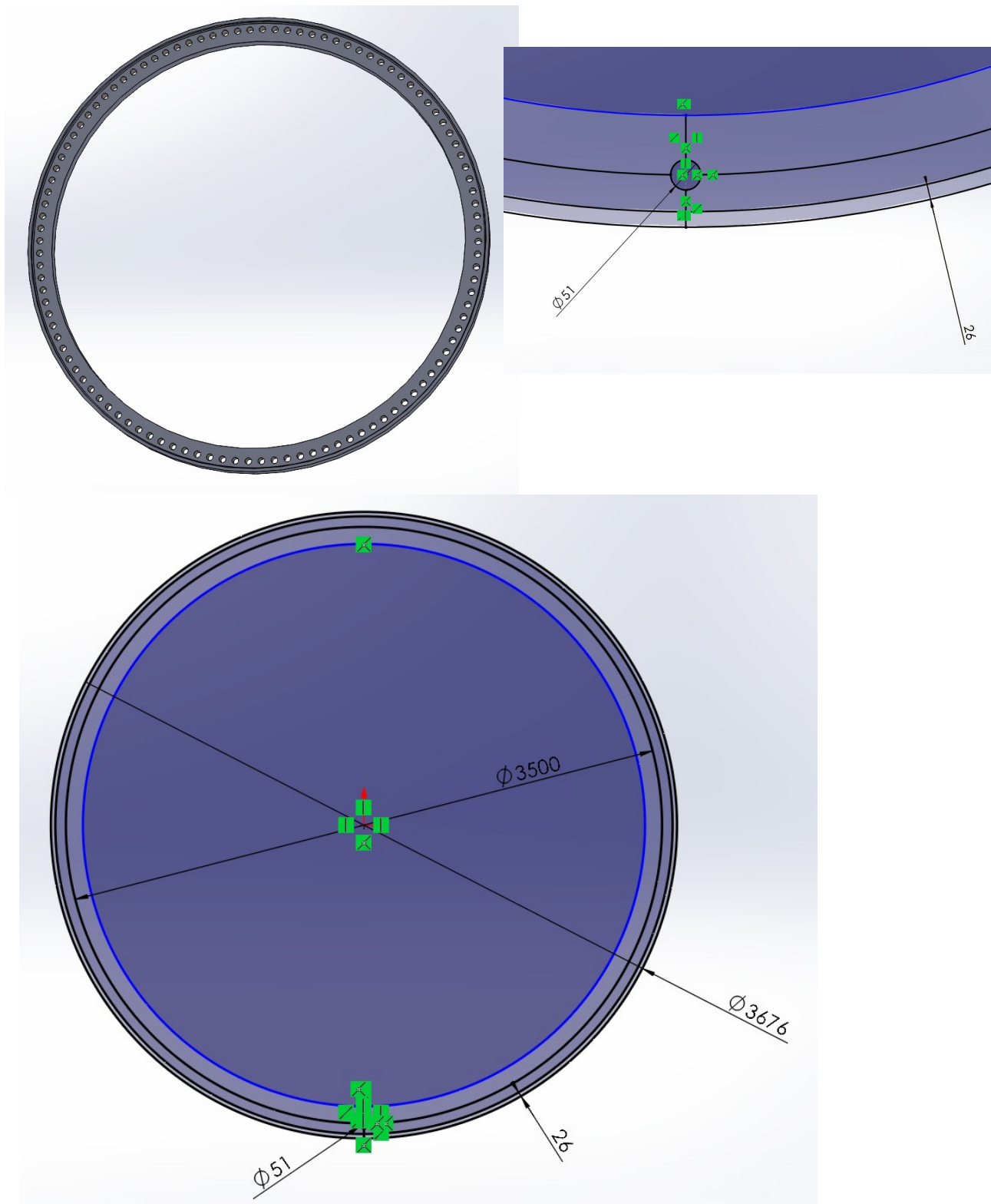
Εικόνα 5.2.3 : Κομμάτι 3. Αριστερά τρισδιάστατο μοντέλο, δεξιά δισδιάστατο σχέδιο με διαστάσεις.

- Μέρη του πύργου: Φλάντζα της βάσης



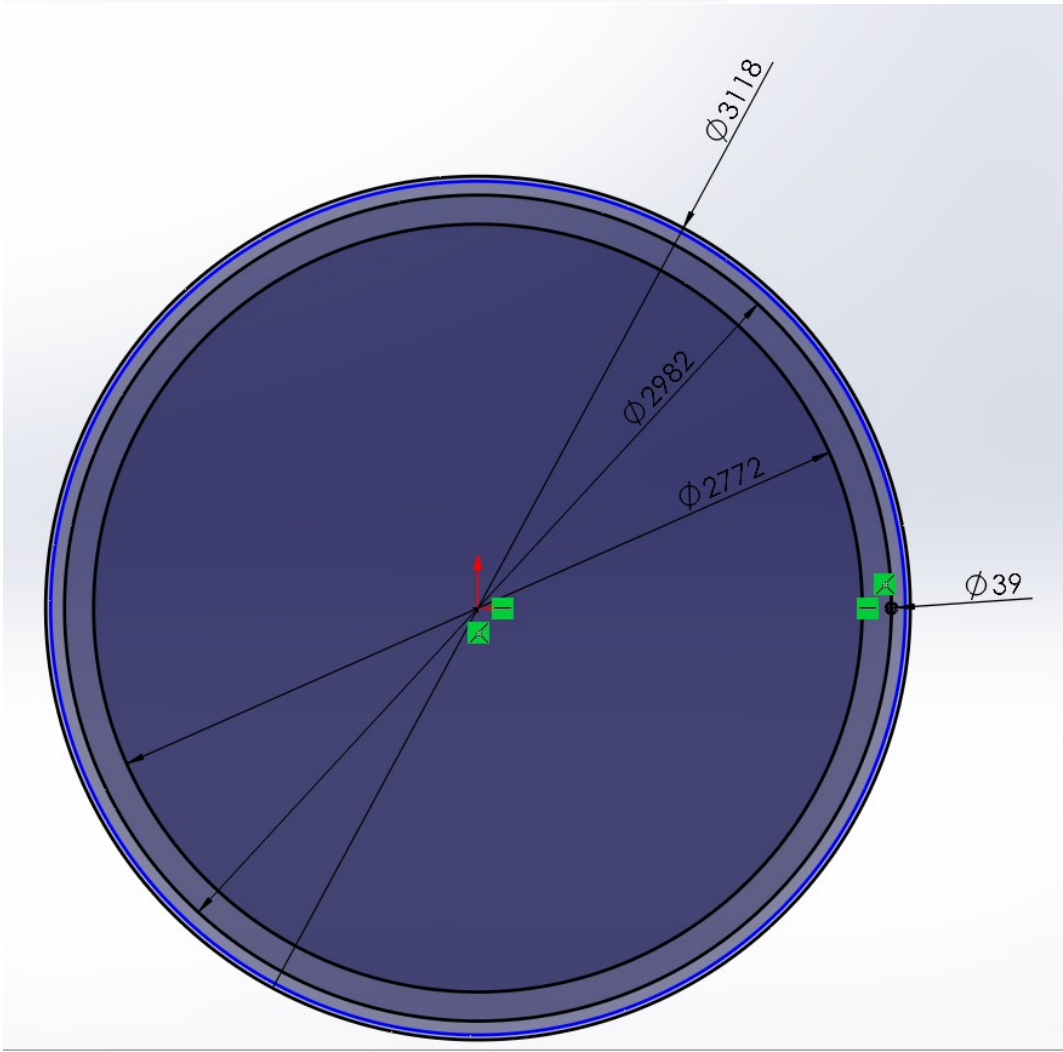
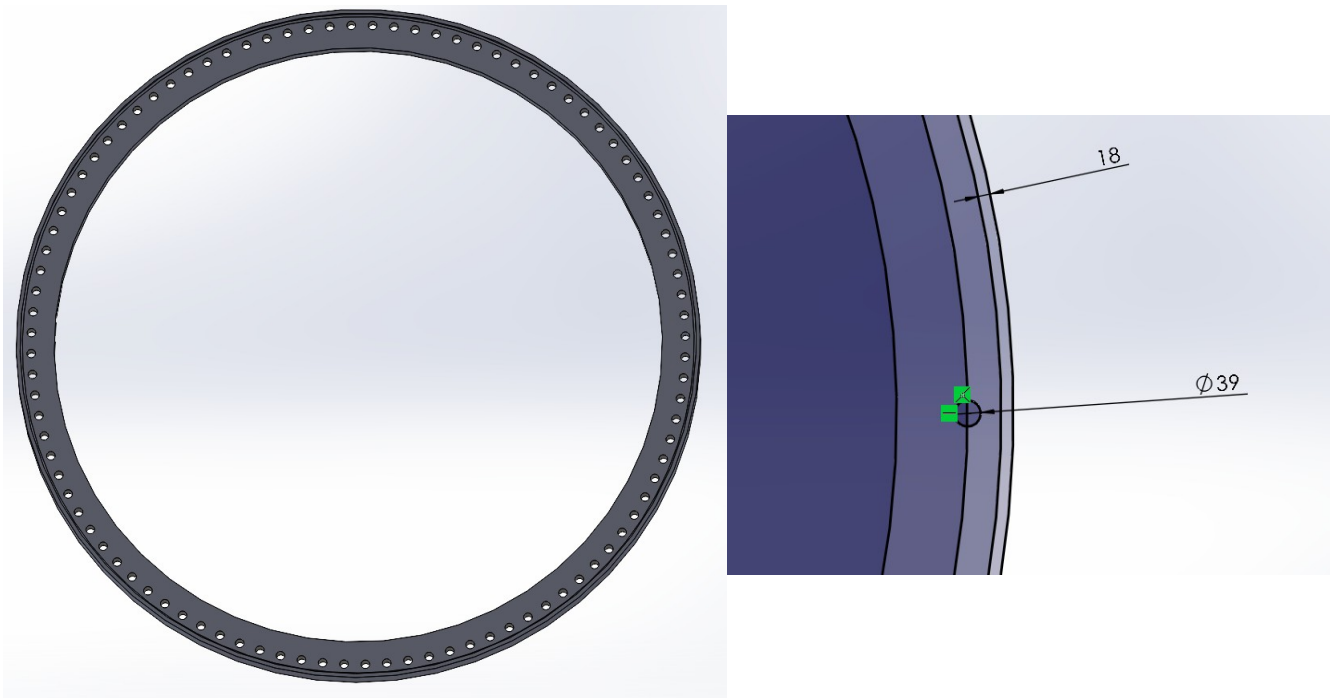
Εικόνα 5.2.4 : Φλάντζα βάσης. Τρισδιάστατο μοντέλο, δισδιάστατο σχέδιο με διαστάσεις και λεπτομέρεια οι σπές με διαστάσεις.

– Μέρη του πύργου: Μεσαία φλάντζα 1



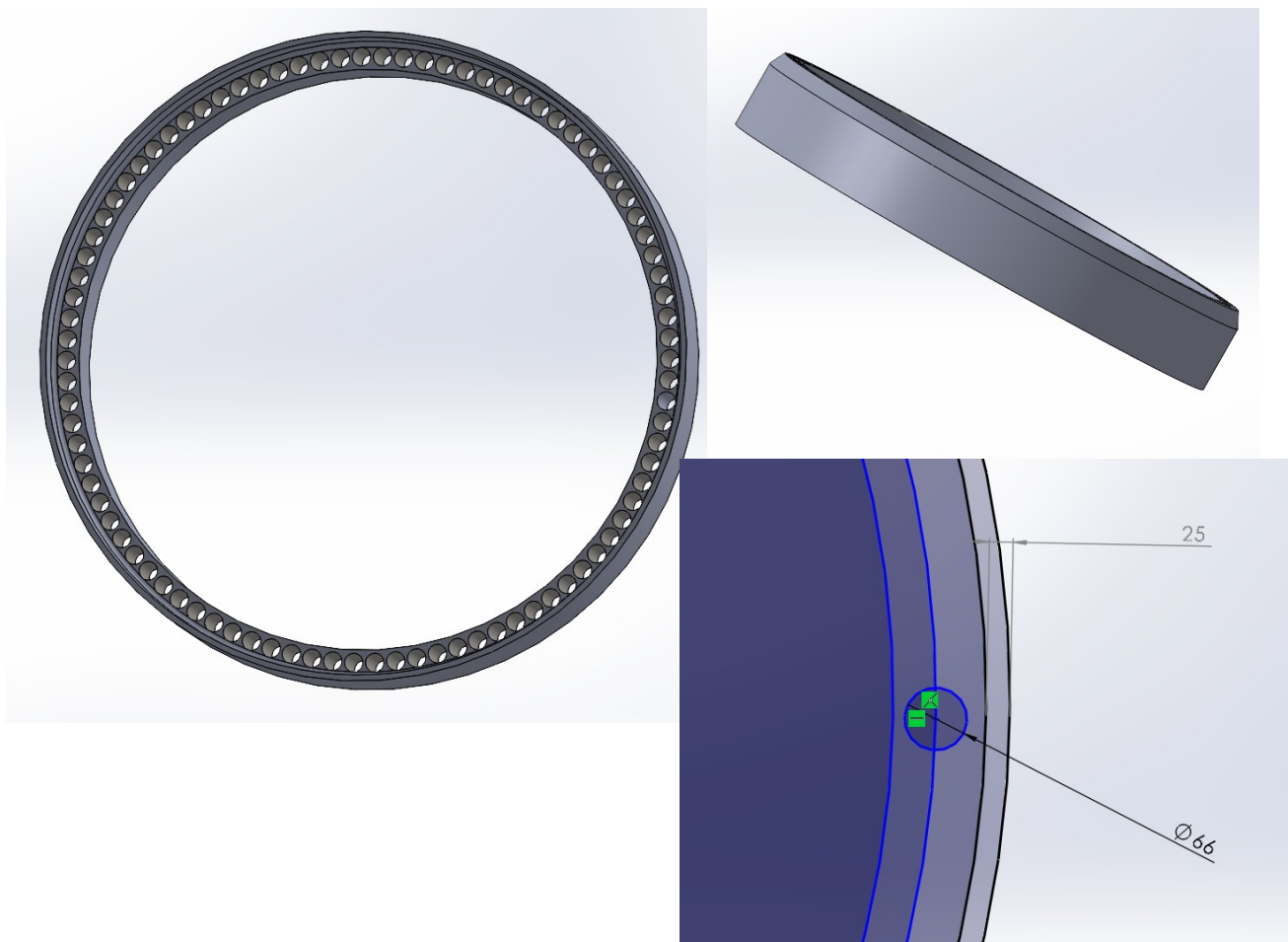
Εικόνα 5.2.5 : Μεσαία φλάντζα 1. Τρισδιάστατο μοντέλο, δισδιάστατο σχέδιο με διαστάσεις και λεπτομέρεια οι οπές με διαστάσεις.

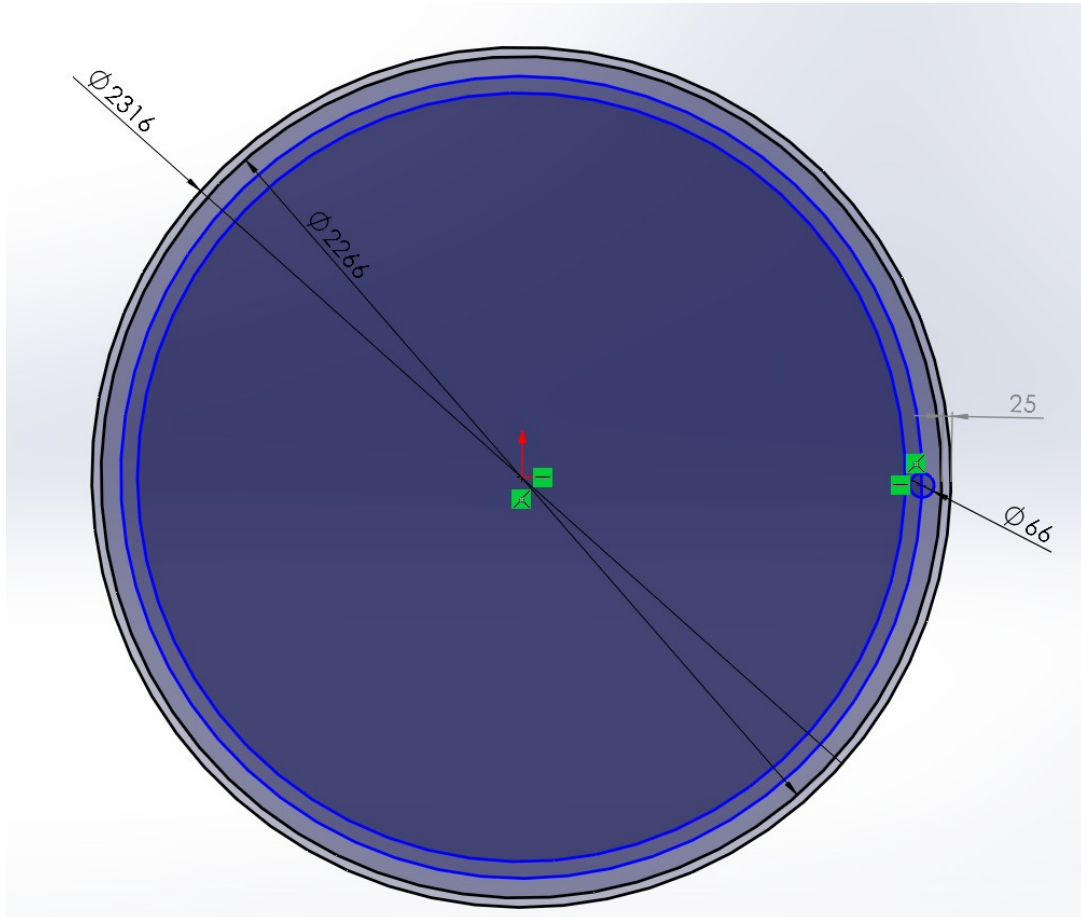
– Μέρη του πύργου: Μεσαία φλάντζα 2



Εικόνα 5.2.6 : Μεσαία φλάντζα 2. Τρισδιάστατο μοντέλο, δισδιάστατο σχέδιο με διαστάσεις και λεπτομέρεια οι οπές με διαστάσεις.

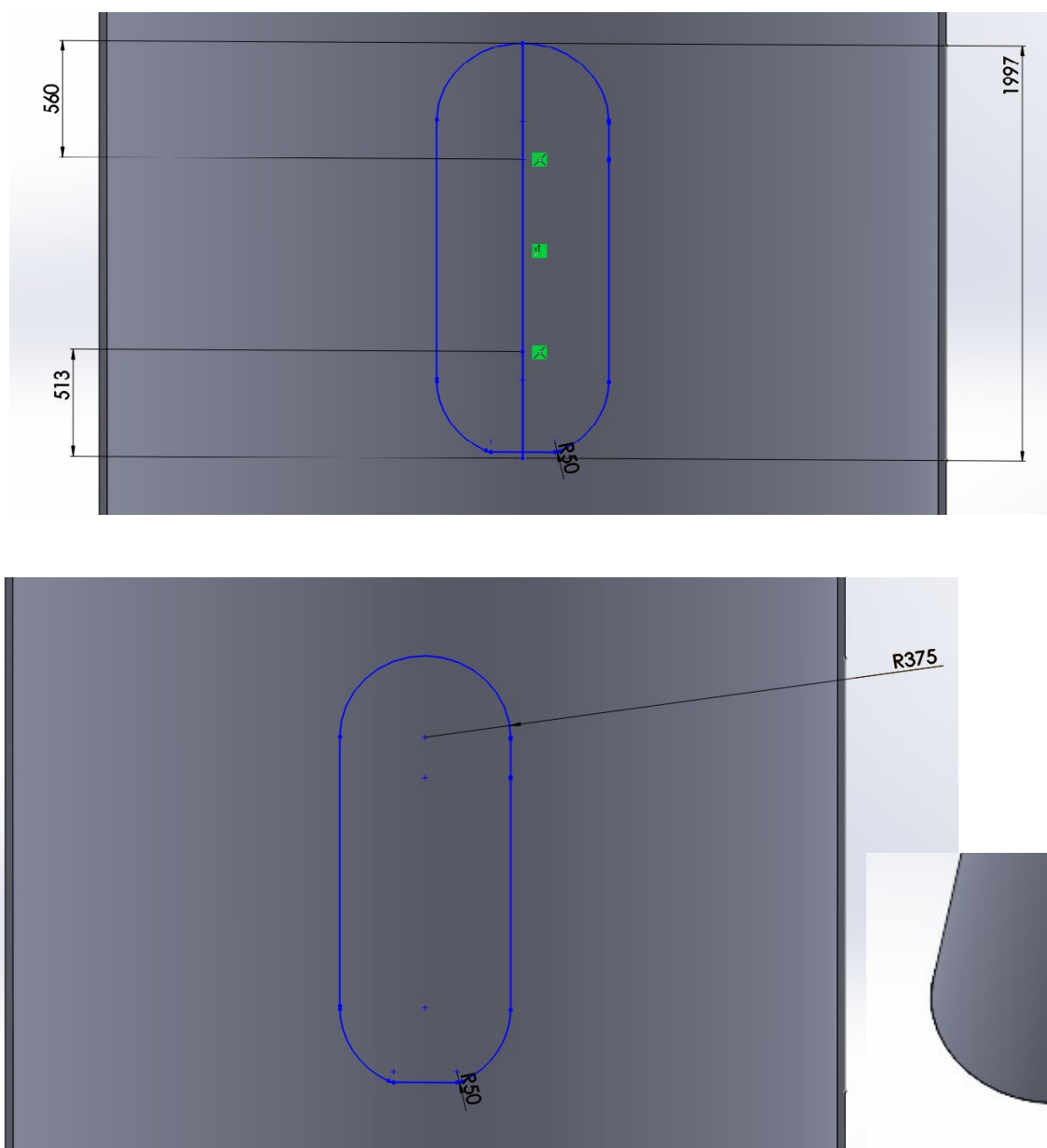
– *Μέρη του πύργου: Φλάντζα της κορυφής*





Εικόνα 5.2.7 : Φλάντζα κορυφής. Τρισδιάστατο μοντέλο, δισδιάστατο σχέδιο με διαστάσεις και λεπτομέρεια οι οπές με διαστάσεις.

– Μέρη του πύργου: Πόρτα πύργου

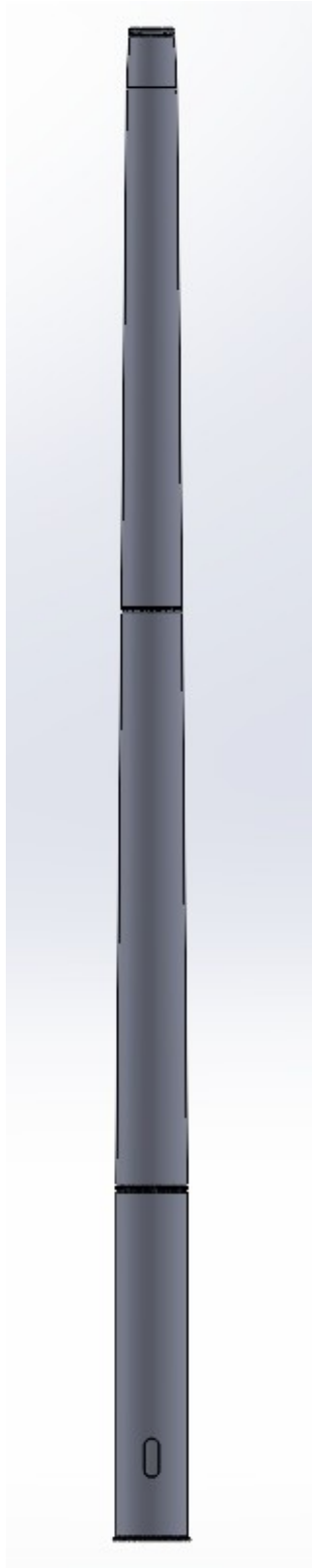


Εικόνα 5.2.8 : Πόρτα πύργου. Δισδιάστατο σχέδιο με διαστάσεις και λεπτομέρεια τρισδιάστατου μοντέλου.

– Συναρμολόγηση του πύργου



Εικόνα 5.2.9 : Τα 3 κομμάτια του πύργου μαζί με τις φλάντζες.



Εικόνα 5.2.10 : Συναρμολόγηση του πύργου, κομμάτια μαζί με τις φλάντζες σε τρισδιάστατο σχέδιο.

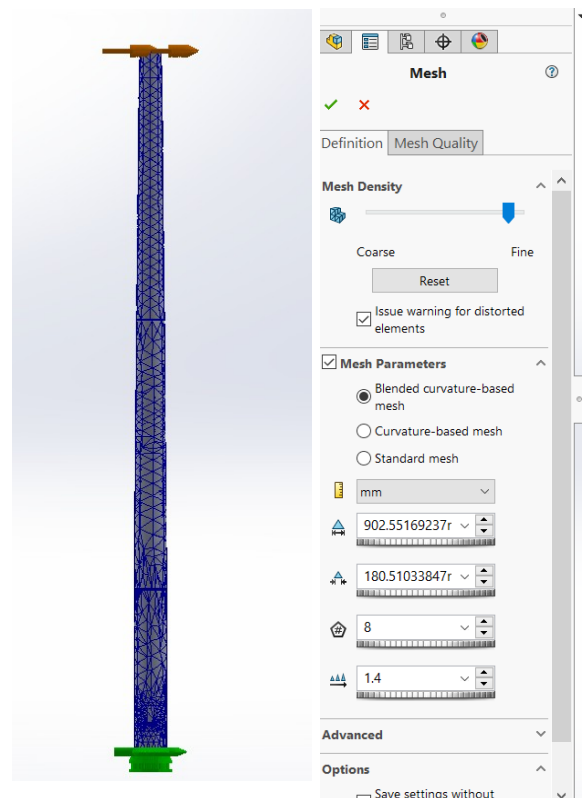
5.3 Δημιουργία πλέγματος

Η αριθμητική προσομοίωση περιλαμβάνει τον διαμερισμό του πύργου σε στοιχεία με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Για την εύρεση των στοιχείων τέθηκε ως περιορισμός ο αριθμός τους να μην ξεπερνάει κατά πολύ τα 100.000, ώστε να μειωθεί η πολυπλοκότητα του μοντέλου και ο χρόνος που απαιτείται για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων. Επομένως, μετά από δοκιμές παρουσιάζονται παρακάτω τα εξής αποτελέσματα.

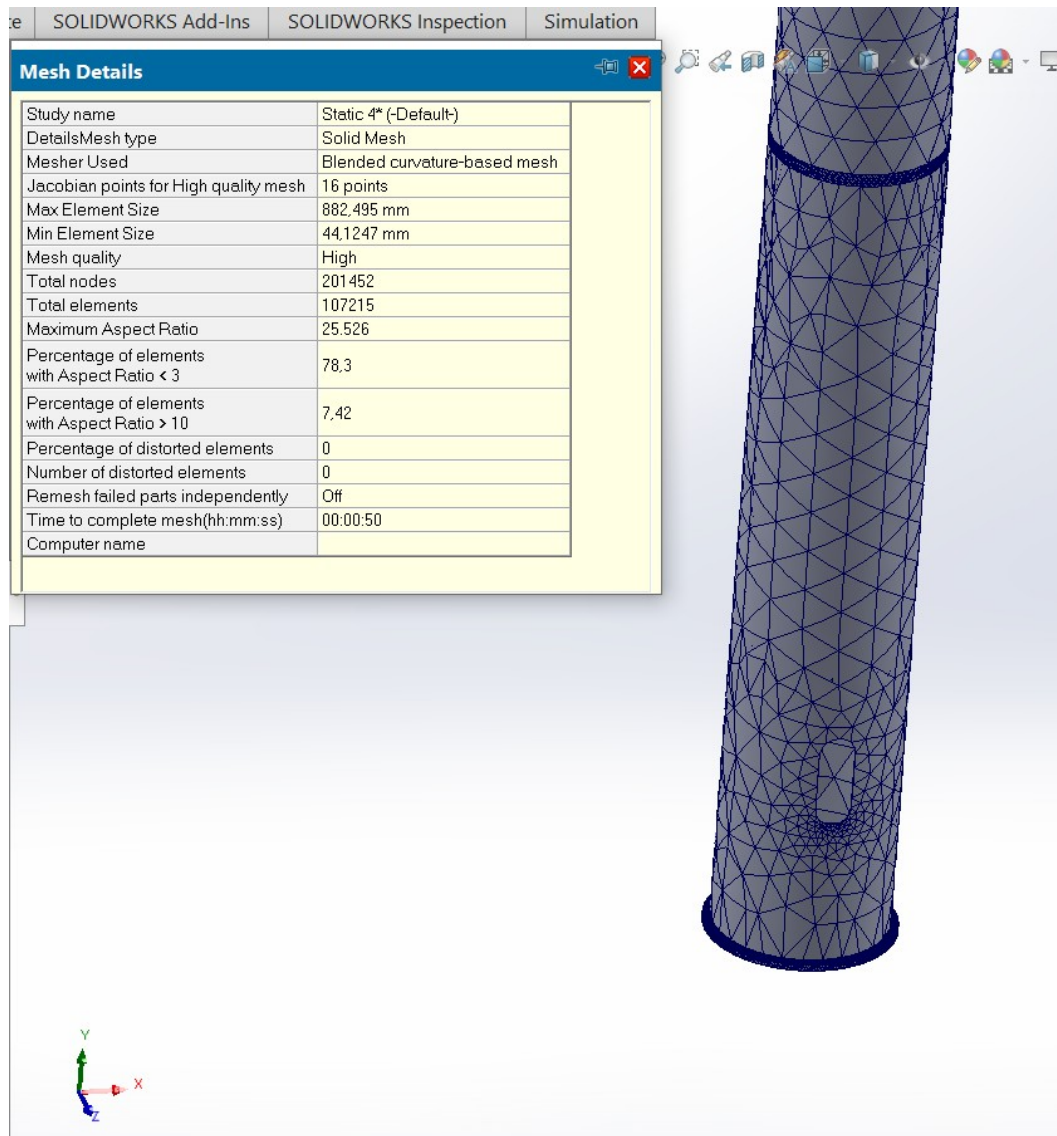
Για τη δημιουργία του πλέγματος αρχικά ως παράμετρος χρησιμοποιήθηκε το standard πλέγμα, αλλά το πρόγραμμα βγάδι σφάλμα λόγω της πολυπλοκότητας του σχήματος και μας προτείνει τη χρήση του blended curvature based πλέγματος. Πριν χρησιμοποιηθεί το blended curvature based πλέγμα, χρησιμοποιήθηκε το curvature based αλλά το πρόγραμμα έβγαζε και σε αυτό το πλέγμα σφάλμα. Έτσι, επιλέχθηκε το blended curvature based πλέγμα ως το πλέον ιδανικό, με το οποίο και έγιναν όλα τα παρακάτω τρεξίματα.

Επόμενο βήμα είναι η εύρεση της πυκνότητας του πλέγματος που δίνει το καλύτερο αποτέλεσμα. Δοκιμάζοντας διάφορες πυκνότητες για blended curvature based πλέγμα και έχοντας την μπάρα κοντά στο “Fine” βγήκαν τα παρακάτω αποτελέσματα και επιλέχθηκε το ιδανικό πλέγμα για τον πύργο του αριθμητικού μοντέλου.

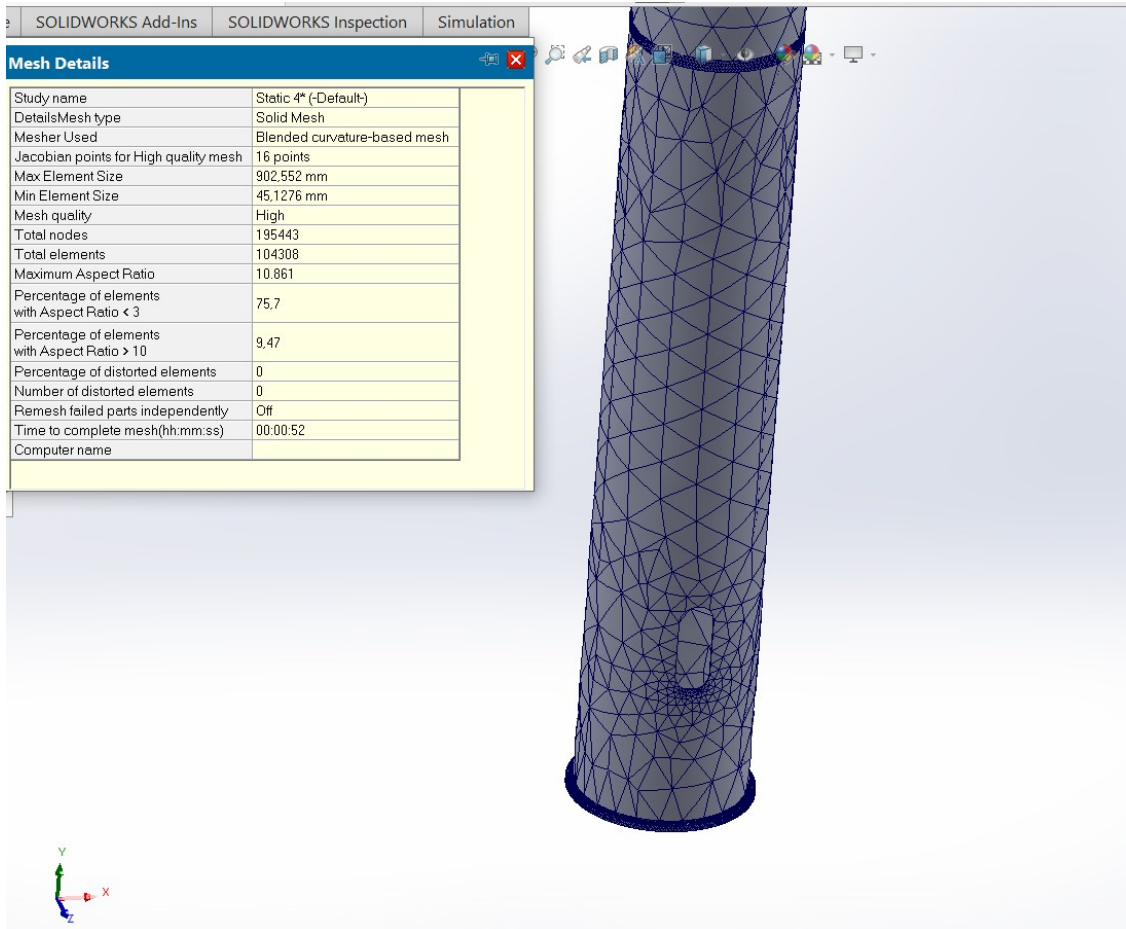
| Mesh Details | |
|---|-------------------------|
| Study name | Static 2* (-Default) |
| DetailsMesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used | Blended curvature-based |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 points |
| Max Element Size | 1.604,54 mm |
| Min Element Size | 80,2268 mm |
| Mesh quality | High |
| Total nodes | 88954 |
| Total elements | 44101 |
| Maximum Aspect Ratio | 9.933,4 |
| Percentage of elements with Aspect Ratio < 3 | 48,8 |
| Percentage of elements with Aspect Ratio > 10 | 10,9 |
| Percentage of distorted elements | 0 |
| Number of distorted elements | 0 |



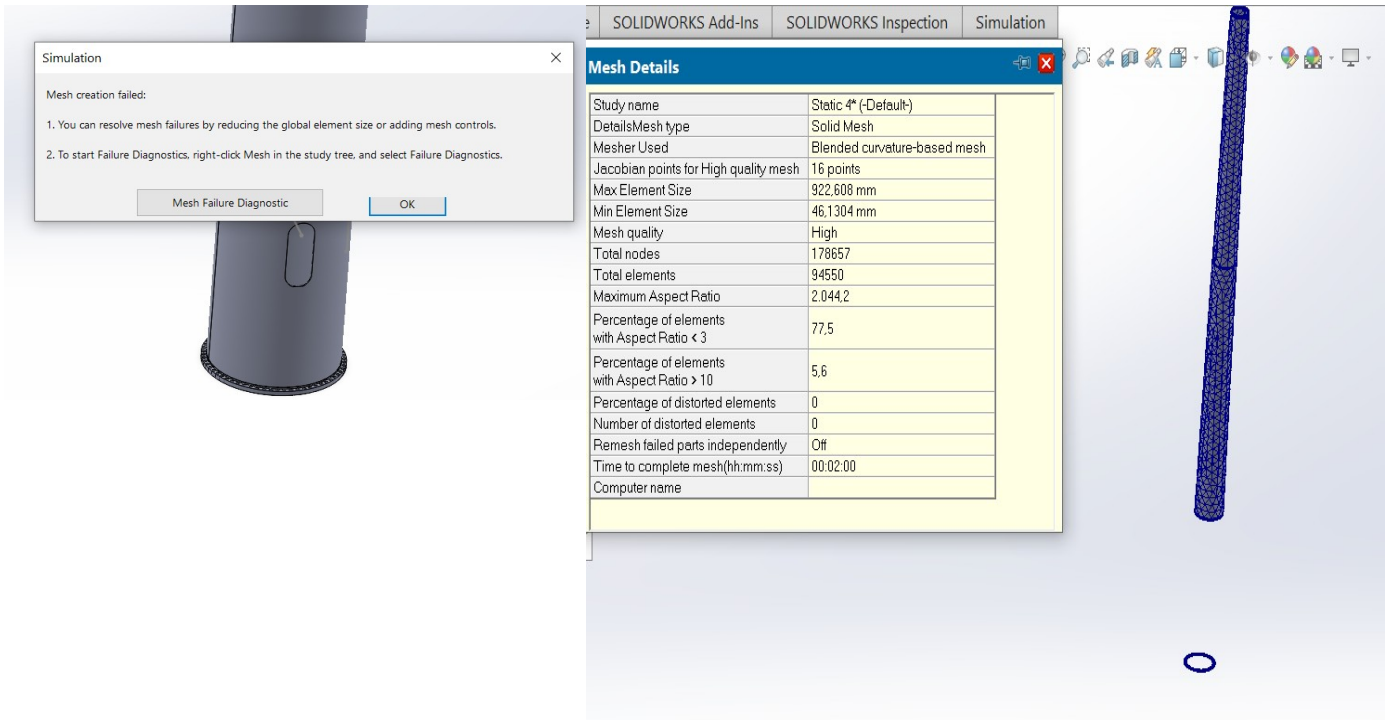
Εικόνα 5.3.1 : 1η Δοκιμή. Blended curvature based πλέγμα με προεπιλεγμένο αριθμό στοιχείων. Total Elements: 44.101.



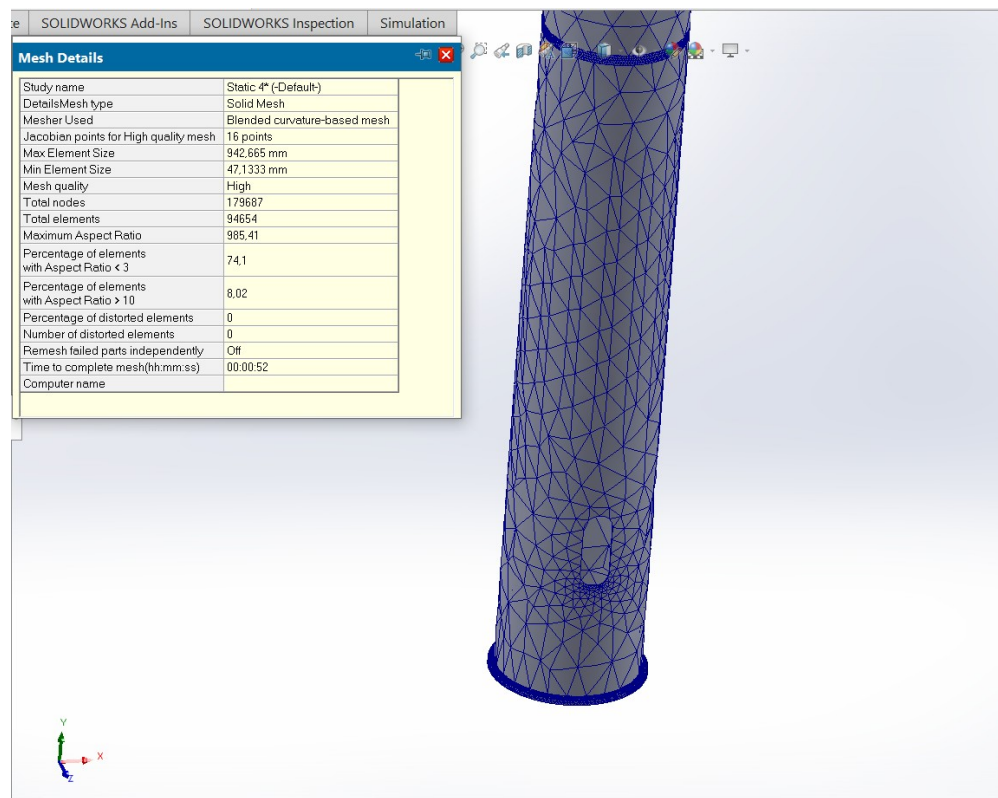
Εικόνα 5.3.2 : 2η Δοκιμή. Blended curvature based πλέγμα με πυκνότητα κοντά στο “Fine”. Total Elements 107.215.



Εικόνα 5.3.3 : 3η Δοκιμή. Blended curvature based πλέγμα με πυκνότητα κοντά στο “Fine”. Total Elements 104.308.



Εικόνα 5.3.4 : 4η Δοκιμή. Blended curvature based πλέγμα με πυκνότητα κοντά στο “Fine”. Total Elements 94.550.



Εικόνα 5.3.5 : 5η Δοκιμή. Blended curvature based πλέγμα με πυκνότητα κοντά στο “Fine”. Total Elements 94.654.

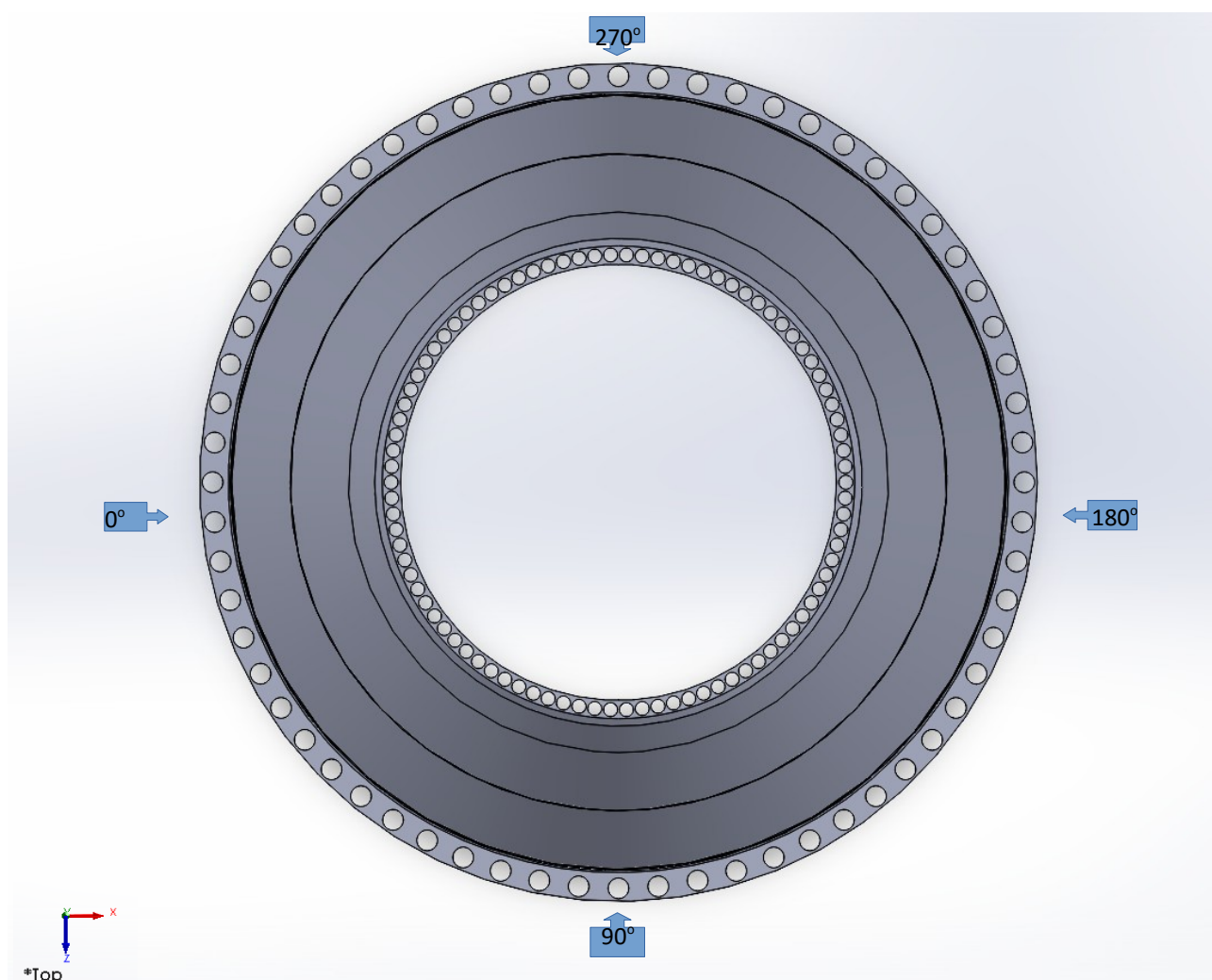
| A/A | Είδος πλέγματος | Total Elements | Σχόλιο |
|-----------|-------------------------|----------------|---|
| 1η δοκιμή | Blended curvature based | 44.101 | Απορρίπτεται ως επιλογή λόγω της αραιής πυκνότητας. |
| 2η δοκιμή | Blended curvature based | 107.215 | Πιθανή επιλογή καθώς είναι πολύ κοντά στα 100.000 στοιχεία. |
| 3η δοκιμή | Blended curvature based | 104.308 | Πολύ καλή επιλογή, κοντά στα 100.000 στοιχεία. |
| 4η δοκιμή | Blended curvature based | 94.550 | Βγάζει σφάλμα και απαιτεί πολύ χρόνο. |
| 5η δοκιμή | Blended curvature based | 94.654 | Καλή επιλογή αλλά θα επιλέγαμε μια με περισσότερα στοιχεία |

Πίνακας 5.3.1: Σύγκριση των αποτελεσμάτων για την επιλογή πλέγματος.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία βλέπουμε ότι πιθανές επιλογές αποτελούν οι δοκιμές 2 και 3. Επιλέγουμε το πλέγμα από τη δοκιμή 2 καθώς έχει μικρότερο μέγιστο μέγεθος στοιχείου (max element size) από την δοκιμή 3 που σημαίνει μικρότερο και πιο πυκνό πλέγμα. Ένα άλλο κριτήριο είναι και ο χρόνος που απαιτείται για να βγάλει το πρόγραμμα τα αποτελέσματα, αλλά στη συγκεκριμένη περίπτωση και στις δύο δοκιμές ο χρόνος είναι 52 δευτερόλεπτα, επομένως διαλέγουμε την δοκιμή 2.

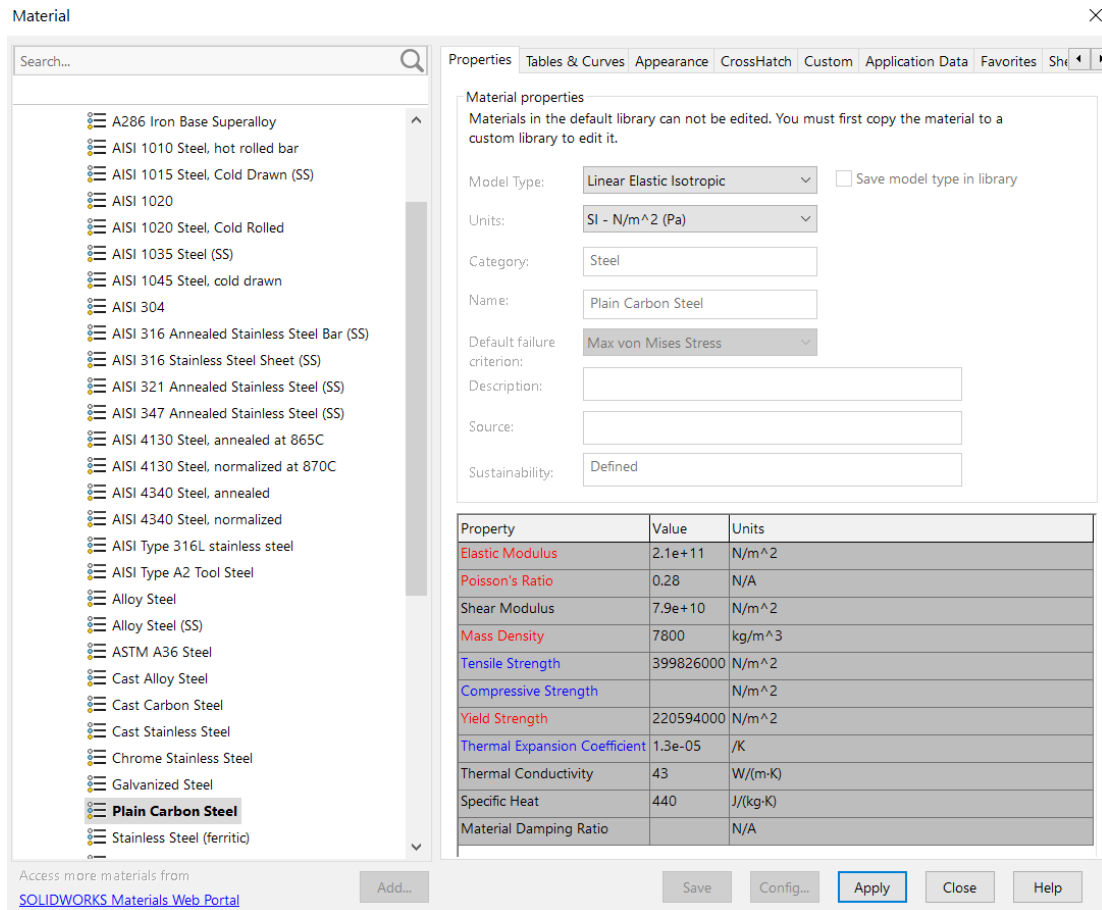
5.4 Αριθμητική προσομοίωση της φόρτισης

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε την αριθμητική προσομοίωση της φόρτισης μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων και η ανάλυση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα SolidWorks 2022. Τα φορτία στα οποία καταπονήθηκε ο πύργος περιλαμβάνουν το πλάγιο φορτίο από 8 κατευθύνσεις (0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 μοίρες) το οποίο προκαλείται από τον άνεμο με μέγιστη ταχύτητα τα 50m/s (390kN) και το κάθετο φορτίο που επιβάλλεται από το σύστημα άτρακτος-δρομέα με βάρος περίπου τους 80tn (800kN). Επιπλέον ο πύργος καταπονήθηκε με τα ίδια φορτία για 3 διαφορετικά πάχη της εξωτερικής διαμέτρου (αρχικό πάχος, αυξημένο κατά 5mm και μειωμένο κατά 5mm).



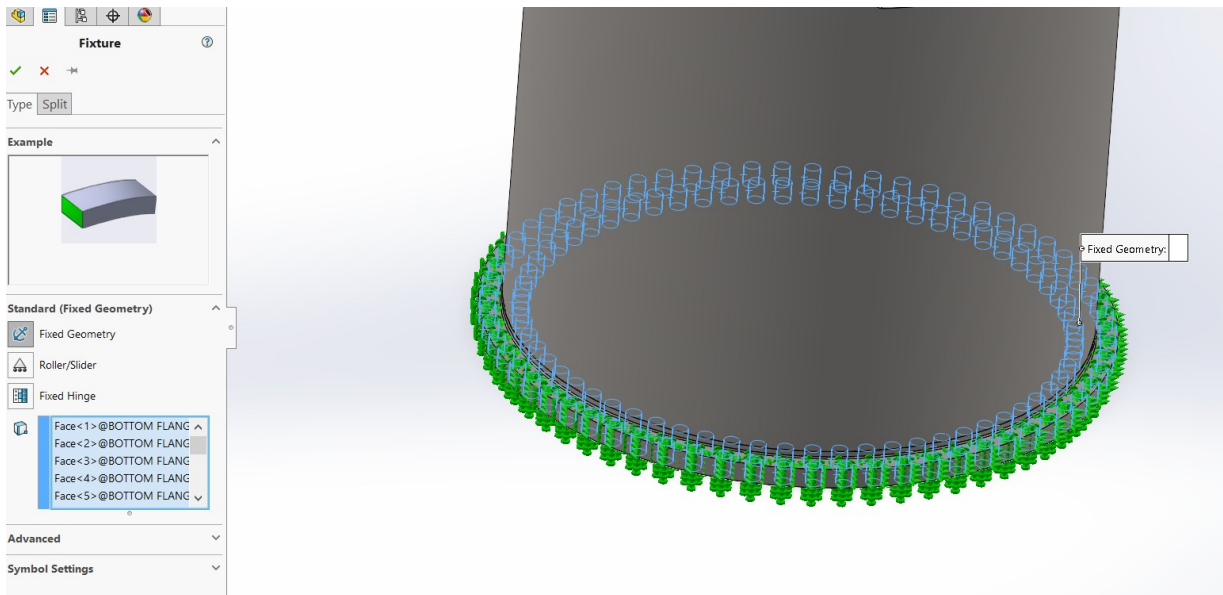
Εικόνα 5.4.1 : Ορισμός σημείου αναφοράς, η πόρτα βρίσκεται στις 90°.

Το πρώτο βήμα της διαδικασίας περιλαμβάνει την επιλογή στατικής φόρτισης και έπειτα, την τοποθέτηση του υλικού. Επιλέχθηκε απλός χάλυβας (plain carbon steel) με πυκνότητα 7.800 kg/m^3 και όριο διαρροής 220.594 kN/m^2 .



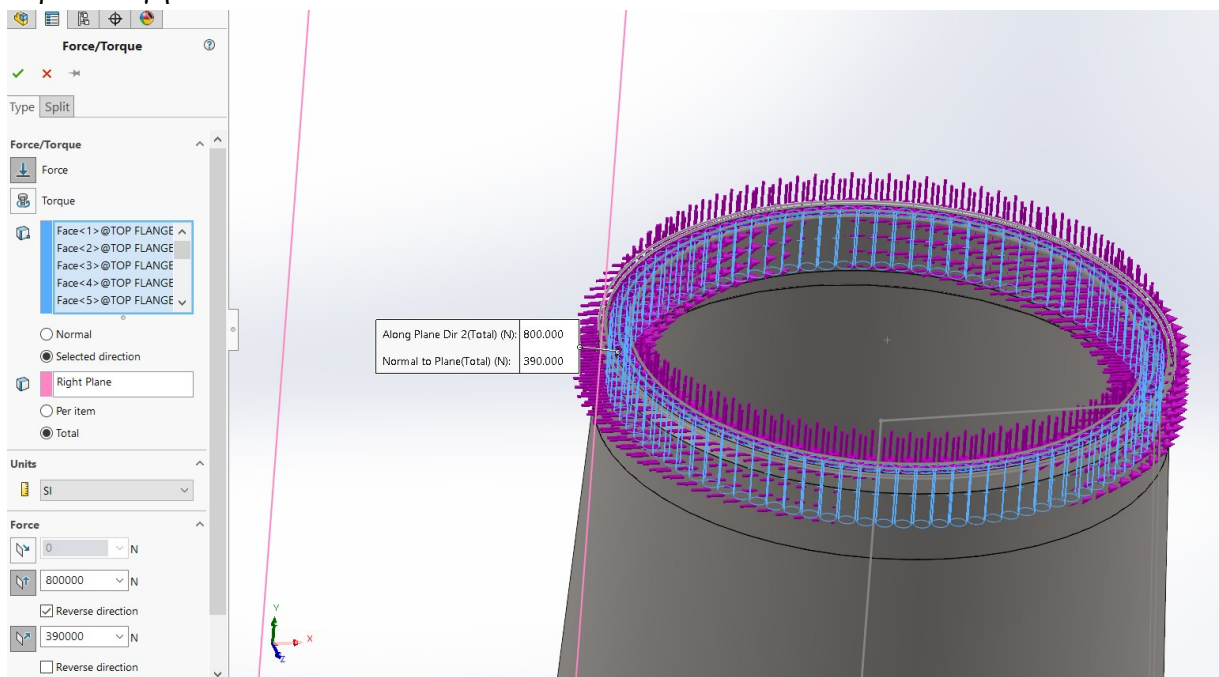
Εικόνα 5.4.2 : Επιλογή υλικού Plain Carbon Steel (Απλός Χάλυβας) και οι ιδιότητες του.

Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν οι στηρίξεις και τα φορτία. Για τις στηρίξεις θεωρήθηκε ότι η βάση του πύργου είναι πακτωμένη (fixed geometry) στη διάταξη θεμελίωσης, ορίζοντας κάθε σπή στη βάση του όπου θα τοποθετηθούν οι κοχλίες.



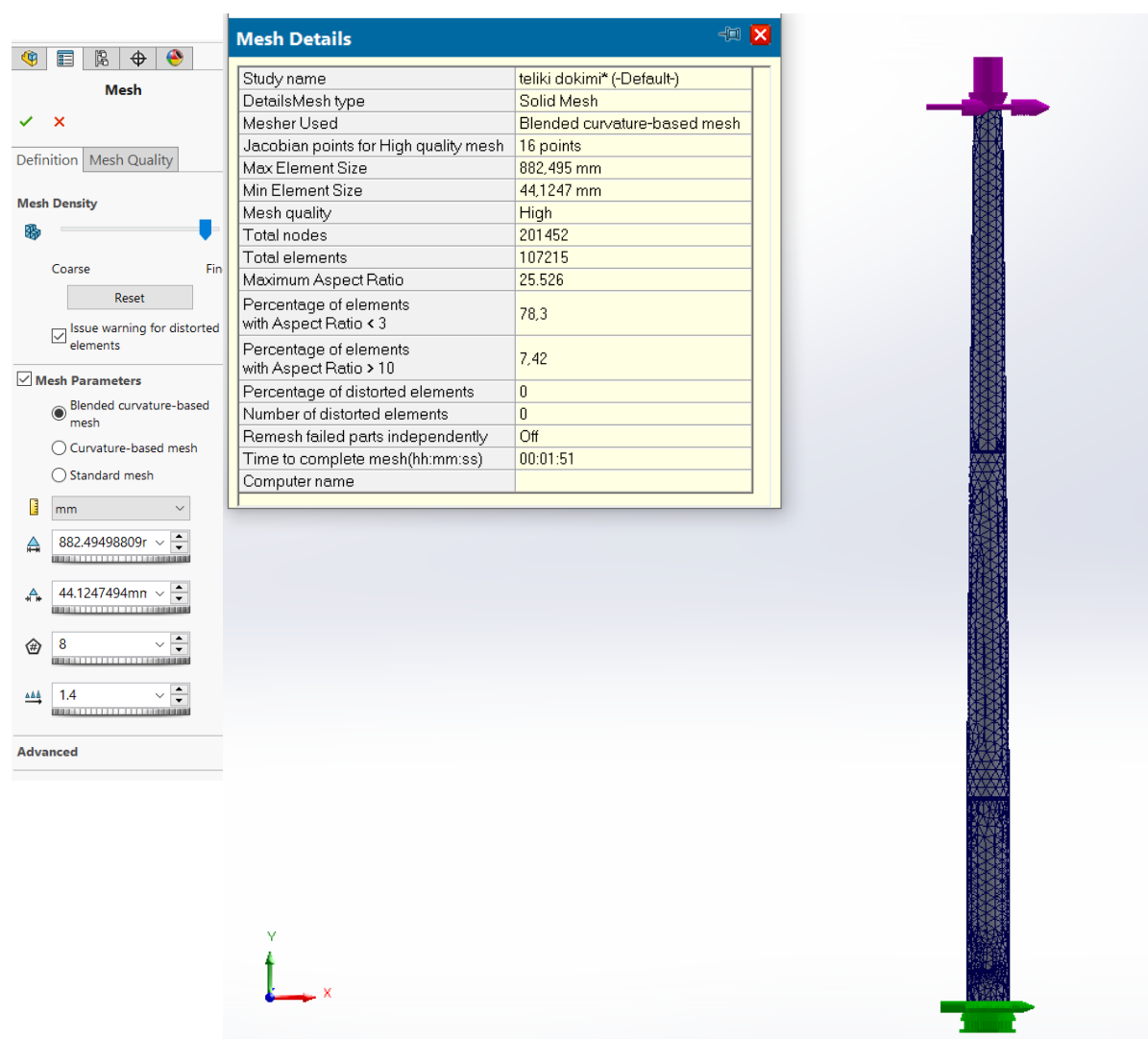
Εικόνα 5.4.3 : Η στήριξη του πύργου περιλαμβάνει την πάκτωση όλων των οπών με κοχλίες στην βάση θεμελίωσης.

Για τα φορτία έγινε η επιλογή “Force” και η “Selected Direction” η οποία δείχνει την διεύθυνση του ανέμου. Η τελευταία, όπως παρουσιάζεται παρακάτω, θα αλλάζει ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του πύργου στις διάφορες διευθύνσεις του ανέμου. Ο πύργος δέχεται τα αξονικά και τα πλάγια φορτία του ανέμου στην κορυφή του, όπου τοποθετείται η άτρακτος. Με την επιλογή “Total” επιλέχθηκαν όλες οι οπές στην κορυφή του πύργου καθώς έχει τεθεί ως προϋπόθεση το φορτίο να είναι κατανεμημένο στην κορυφή αυτού. Όσον αφορά τα φορτία της κατεύθυνσης του ανέμου, από τις επιλογές της “Force” (Δύναμης), επιλέγεται η “Normal To Plane (Total)” δηλαδή να είναι κάθετη στη διεύθυνση που έχει επιλεχθεί στην “Selected Direction”. Για το φορτίο της ατράκτου επιλέχθηκε το “Along Plane (Total)”, στο οποίο η δύναμη είναι παράλληλη στο επίπεδο και επίσης έγινε η επιλογή “Reverse” ώστε το φορτίο να έχει φορά προς τα κάτω, καθώς το πρόγραμμα έδινε ως προεπιλογή το αντίθετο.



Εικόνα 5.4.4 : Η κατανομή των δυνάμεων, με μωβ βελάκια διακρίνονται οι κατευθύνσεις των φορτίων.

Τελευταίο βήμα είναι η δημιουργία πλέγματος. Όπως προαναφέρθηκε μετά από δοκιμές το βέλτιστο πλέγμα είναι αυτό που έχει μέγιστο μέγεθος στοιχείων τα 882,495mm.



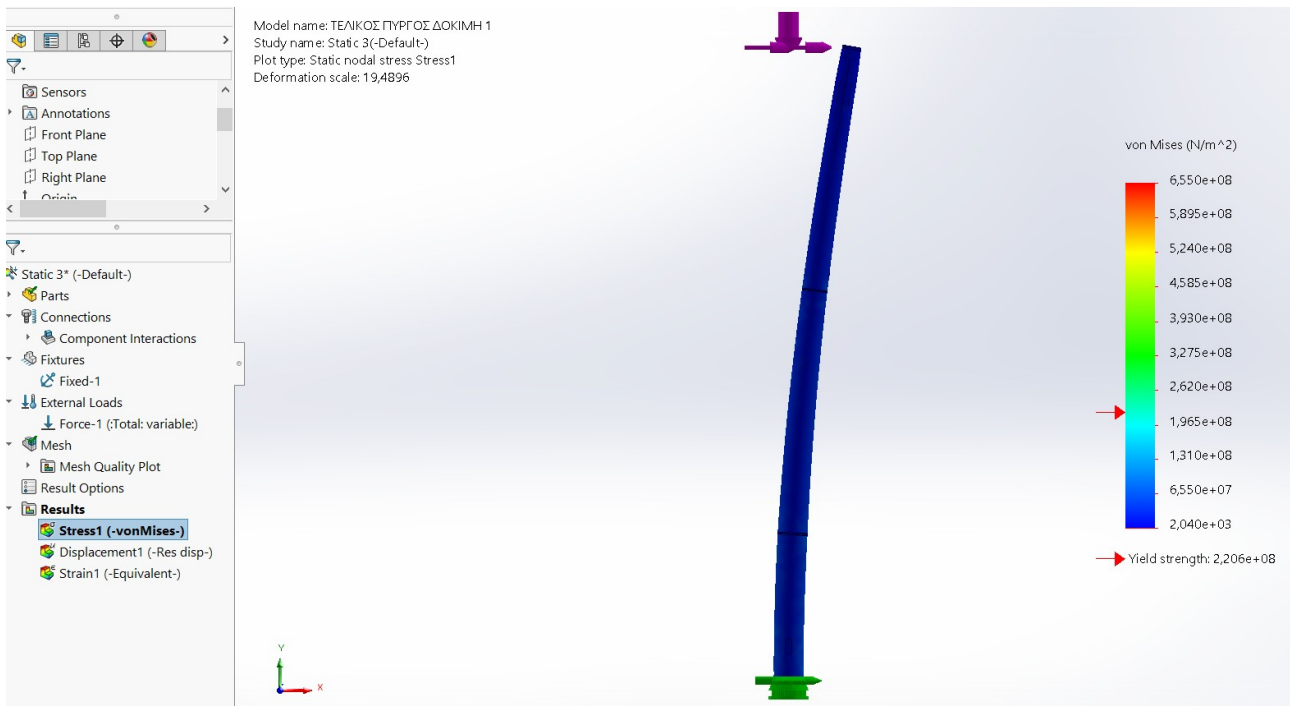
Εικόνα 5.4.5 : Δημιουργία πλέγματος, τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού και η τελική τριδιάστατη μορφή του πύργου.

Εφόσον έχουν πραγματοποιηθεί όλα τα προηγούμενα βήματα, εκτελείται το πρόγραμμα για το οριζόντιο φορτίο του αέρα 390kN και το κάθετο φορτίο ατράκτου-πτερυγίων 800kN και παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε καταπόνηση του πύργου για τις 8 διευθύνσεις ως προς τον άξονα και για τα διαφορετικά πάχη.

5.5 Ανάλυση των αποτελεσμάτων: Ως προς την διεύθυνση του ανέμου

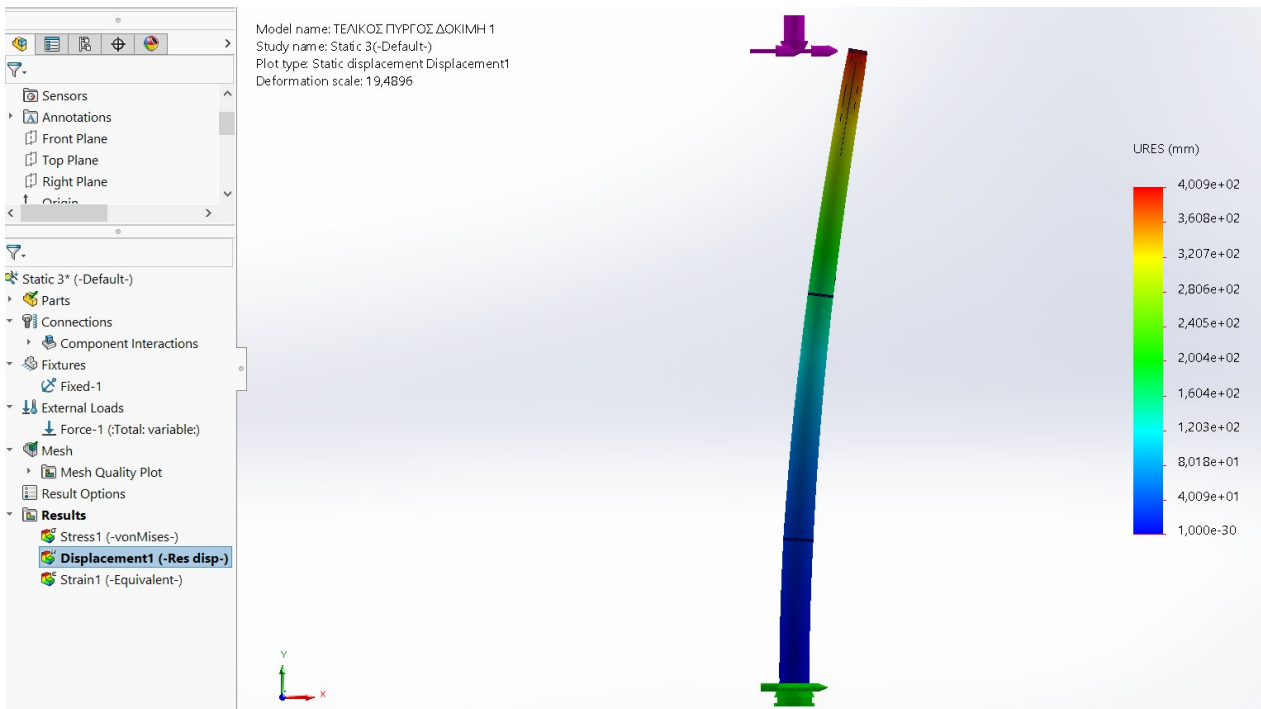
Ο πύργος καταπονήθηκε από το πλάγιο φορτίο του ανέμου για 8 κατευθύνσεις (0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 μοίρες) με μέγιστη ταχύτητα τα 50m/s (390kN) και από το κάθετο φορτίο που επιβάλλεται από το σύστημα άτρακτος-δρομέα με βάρος περίπου τους 80tn (800kN).

- Φορτίο με κατεύθυνση από 0°



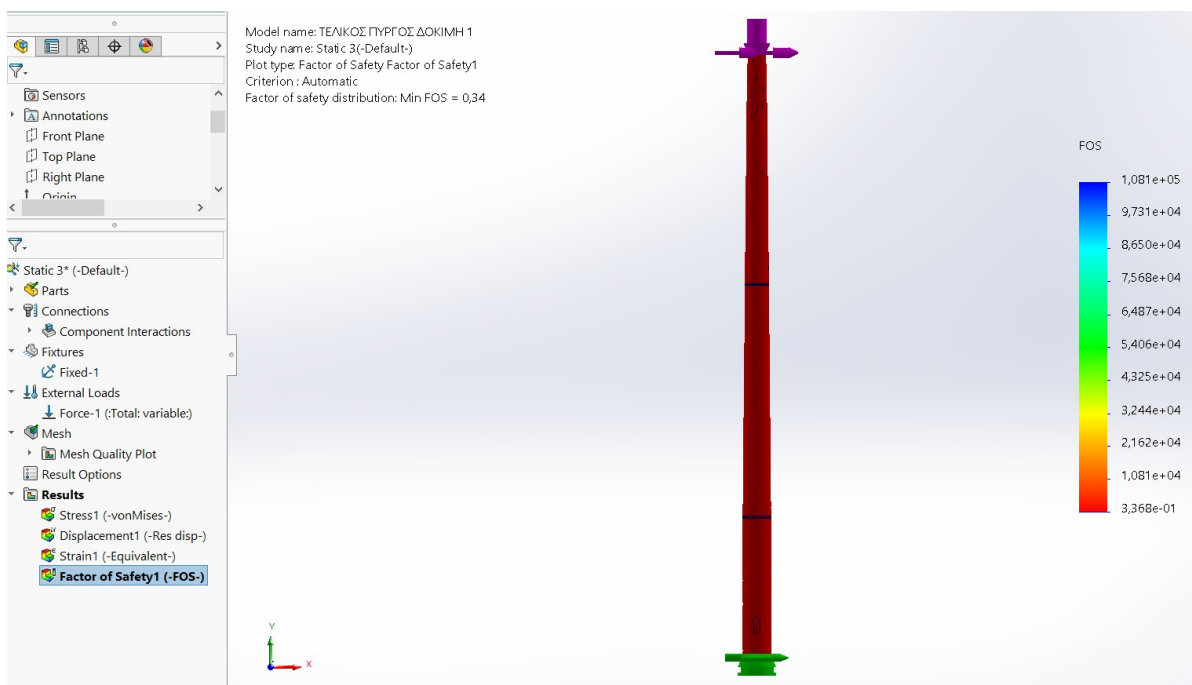
Εικόνα 5.5.1: Κατανομή τάσεων και όριο διαρροής για φόρτιση από 0°.

Παρατηρείται ότι στο διάγραμμα κατανομής τάσεων όλα τα σημεία του πύργου βρίσκονται κάτω από το όριο διαρροής.



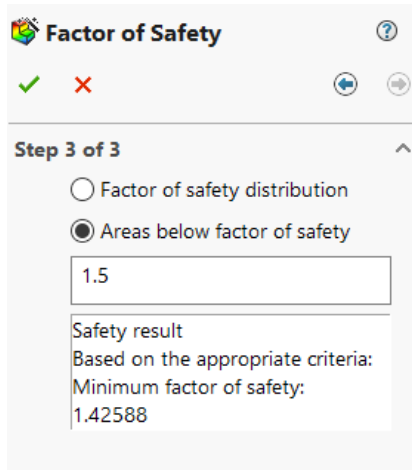
Εικόνα 5.5.2 : Διάγραμμα μετατόπισης και συνολική παραμόρφωση του πύργου για φόρτιση από 0°.

Παρατηρείται από την παραπάνω εικόνα ότι η συνολική μετατόπιση του πύργου είναι 400,9mm (40,1cm) και αποτελεί μια φυσιολογική τιμή σε σχέση με τα 50 km/s του ανέμου.



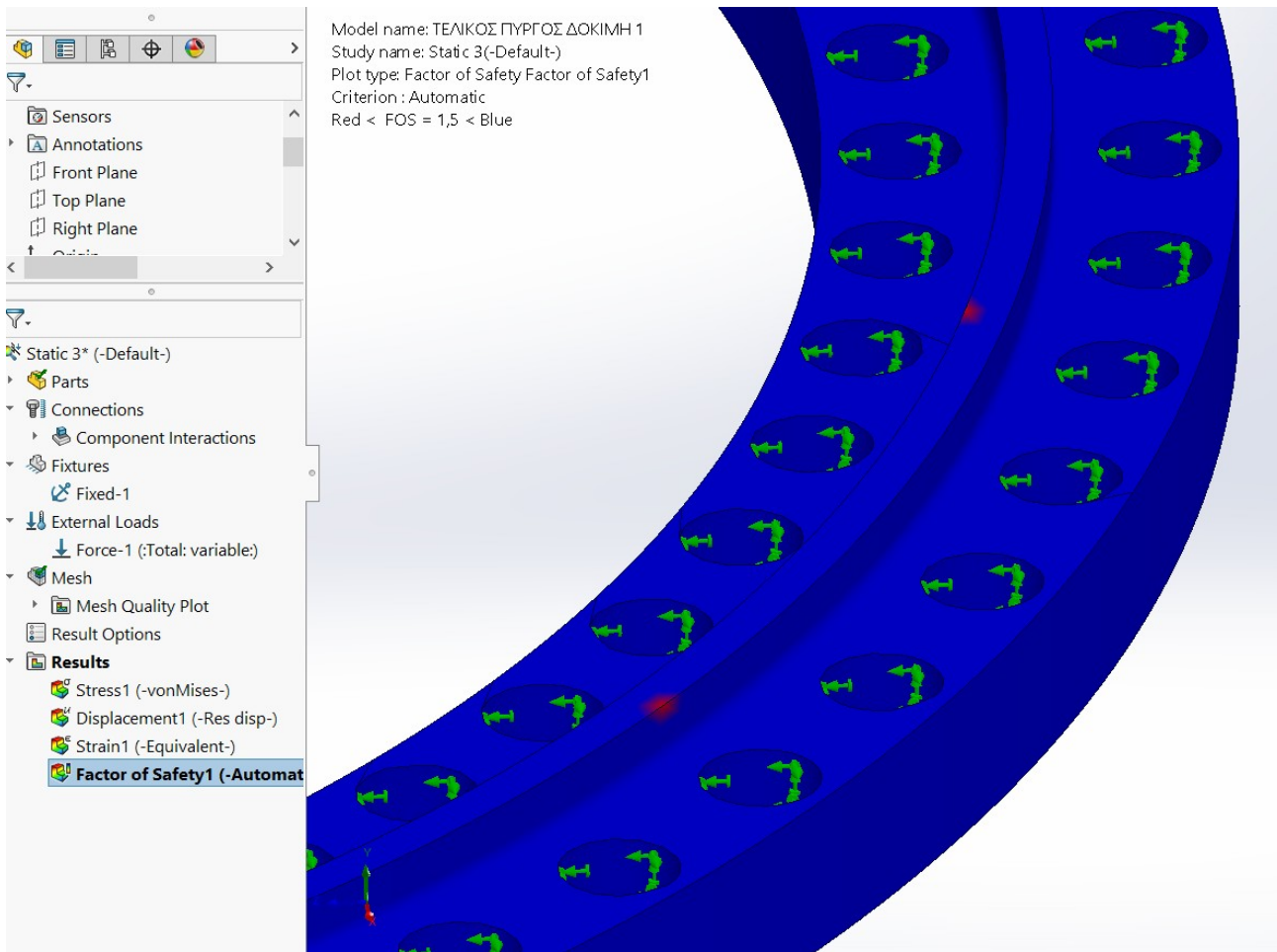
Εικόνα 5.5.3 : Συντελεστής ασφαλείας για φόρτιση από 0°.

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0,34. Όμως όπως παρουσιάζεται παρακάτω αυτή η τιμή ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένα ασθενή σημεία του πύργου.



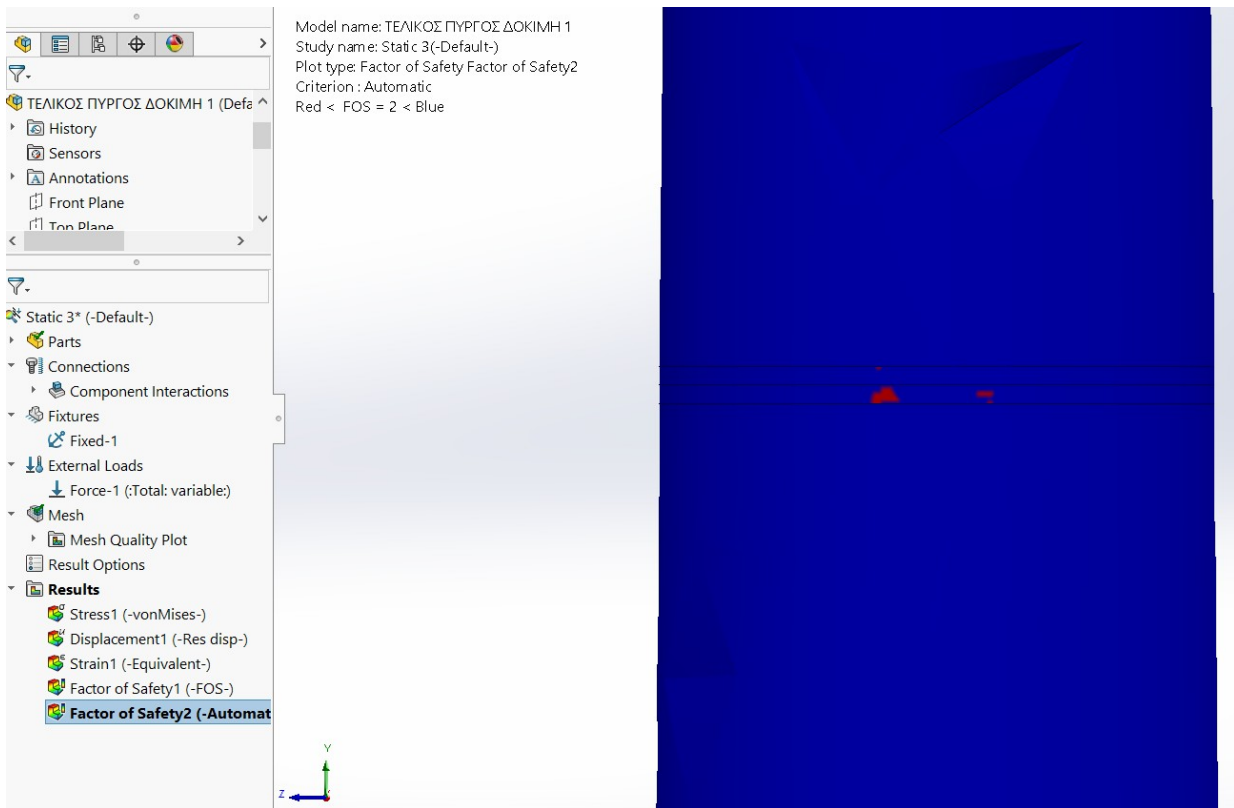
Εικόνα 5.5.4 : Με την επιλογή Factor of safety (Areas below factor of safety=1,5), το πρόγραμμα μπορεί να παρουσιάσει τα σημεία που έχουν συντελεστή ασφαλείας κάτω από 1,5.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα τα σημεία που έχουν συντελεστή ασφαλείας κάτω από 1,5 ενώ με μπλε αυτά που έχουν συντελεστή ασφαλείας πάνω από 1,5.

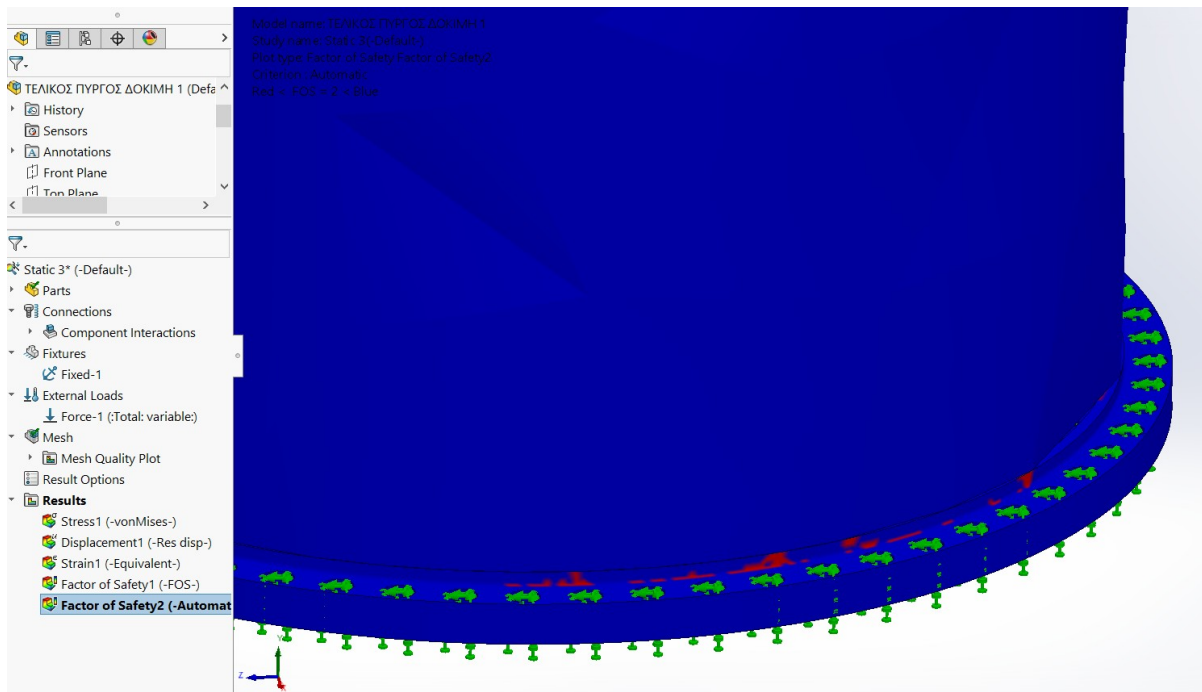


Εικόνα 5.5.5 : Τα σημεία στην φλάντζα της βάσης που έχουν συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 1,5. Έχει απομονωθεί η φλάντζα για να φαίνονται καλύτερα τα αποτελέσματα.

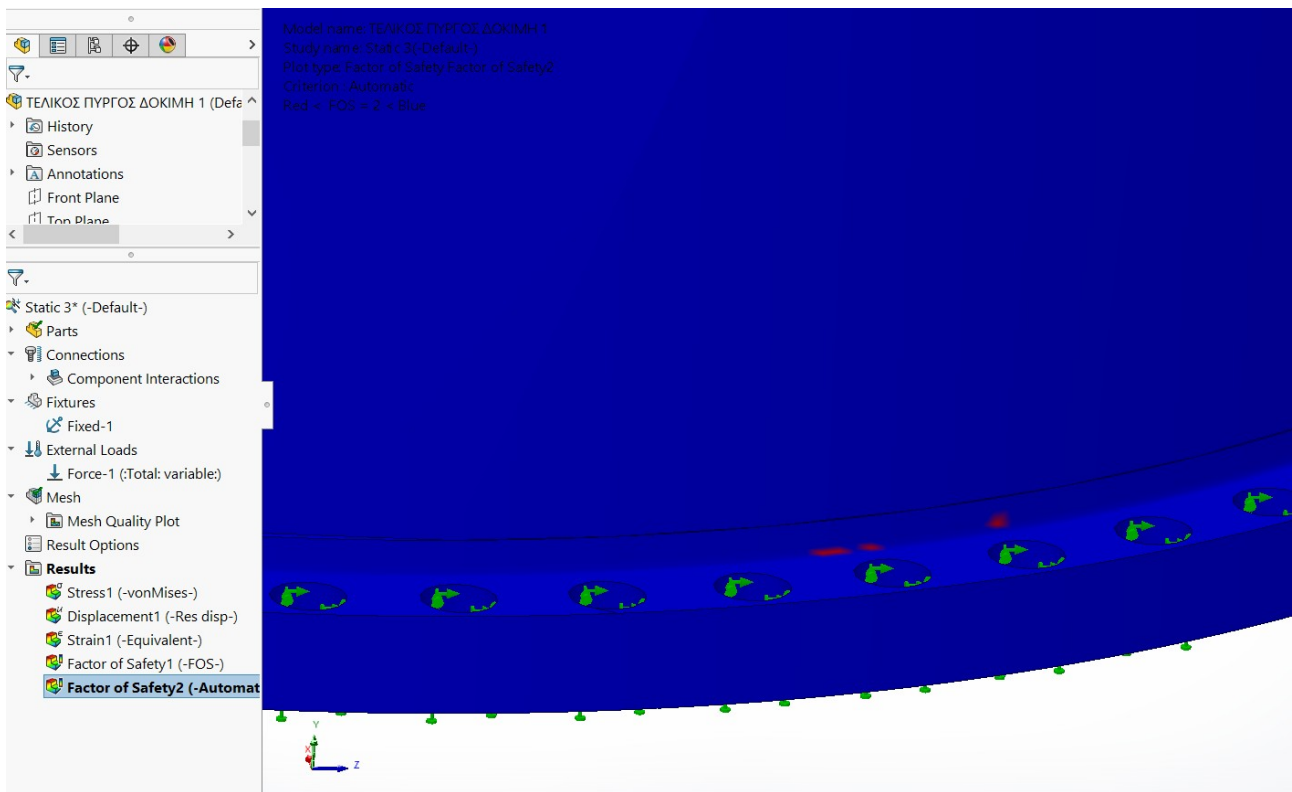
Στη συνέχεια εφαρμόζεται το ίδιο και για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 2. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



Εικόνα 5.5.6 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερος του 2, στην 2η μεσαία φλάντζα.

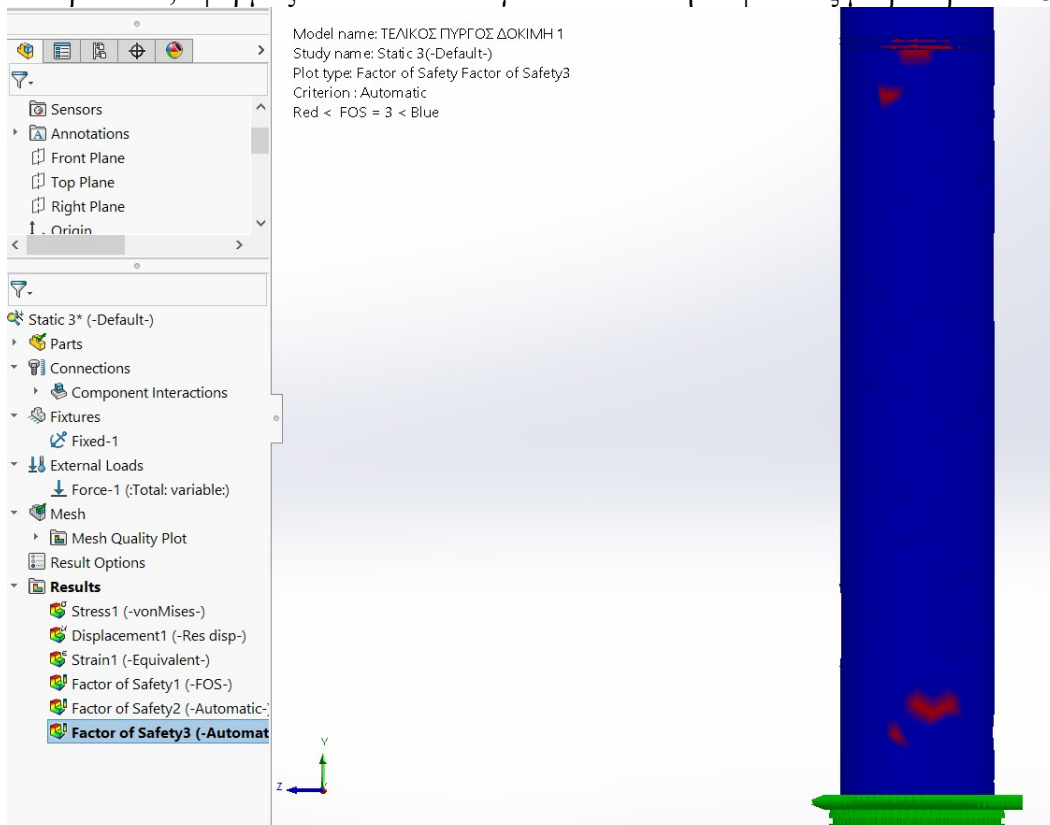


Εικόνα 5.5.7 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην φλάντζα της βάσης από τη δεξιά πλευρά της πόρτας.

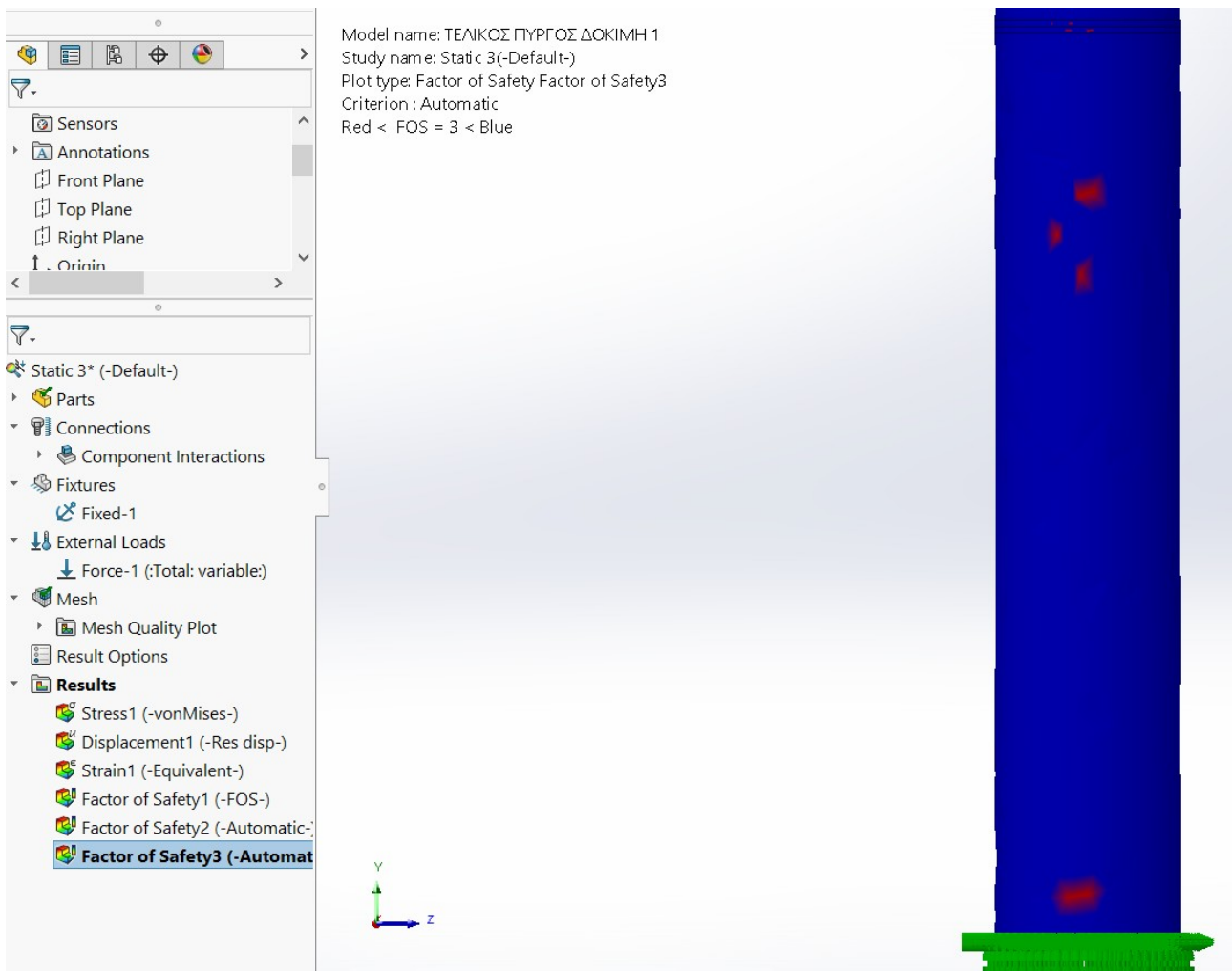


Εικόνα 5.5.8 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην φλάντζα της βάσης από τη αριστερή πλευρά της πόρτας.

Παρακάτω, εφαρμόζεται το ίδιο και για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 3.



Εικόνα 5.5.9 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3, από την δεξιά πλευρά της πόρτας.

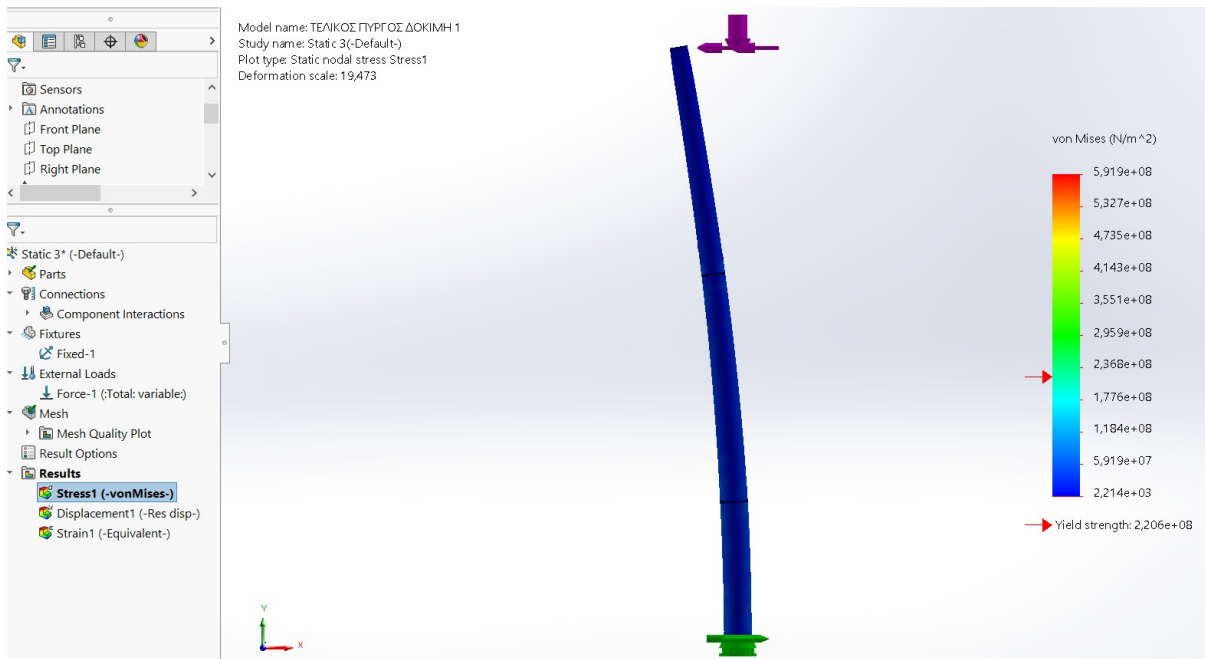


Εικόνα 5.5.10 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3, από την αριστερή πλευρά της πόρτας.

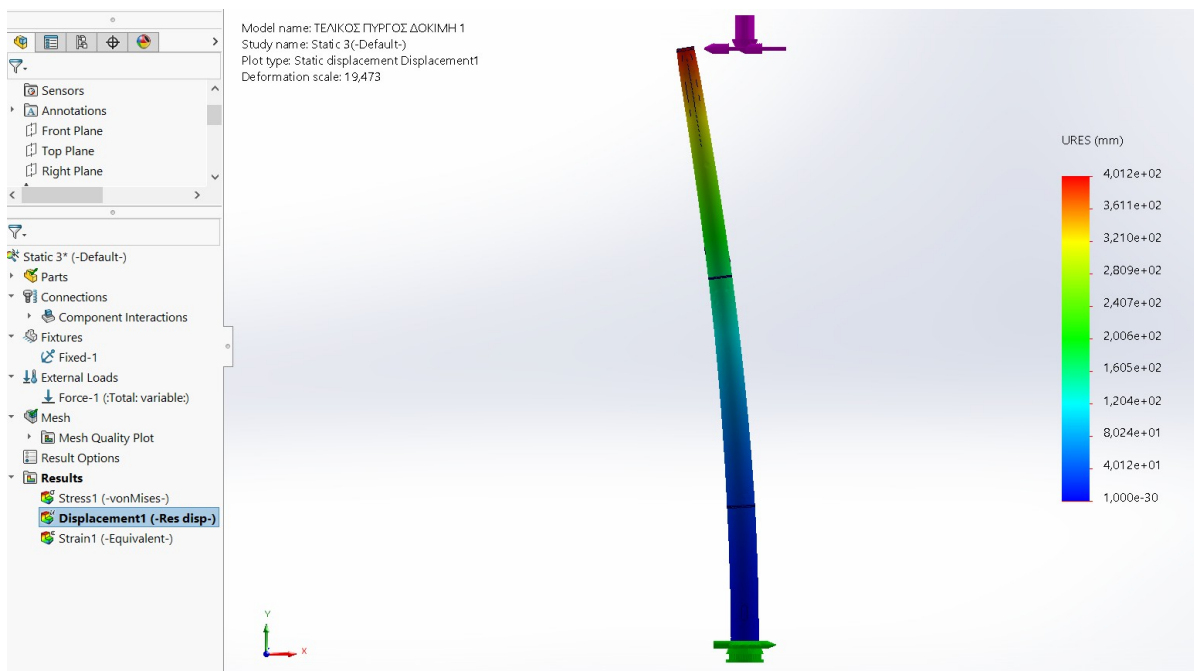
Παρατηρείται ότι υπάρχει μια συμμετρία στα σημεία που έχουν υψηλές τάσεις, από την δεξιά και την αριστερή πλευρά της πόρτας ($0^\circ, 180^\circ$).

Επίσης, παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει ο συντελεστής ασφαλείας τα σημεία με κόκκινο χρώμα (τα πιο δυσχερή) αυξάνονται. Μπορεί να θεωρηθεί ότι παρόλο που ο πύργος έχει συντελεστή ασφαλείας 0,34 αντέχει στα περισσότερα σημεία του καθώς, τα σημεία που έχουν περισσότερο ενδιαφέρον είναι αυτά με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 1,5 όπου παρατηρείται ότι ο πύργος σε αυτή την τιμή δεν εμφανίζει πολλά κόκκινα σημεία.

- Φορτίο με κατεύθυνση από 180°

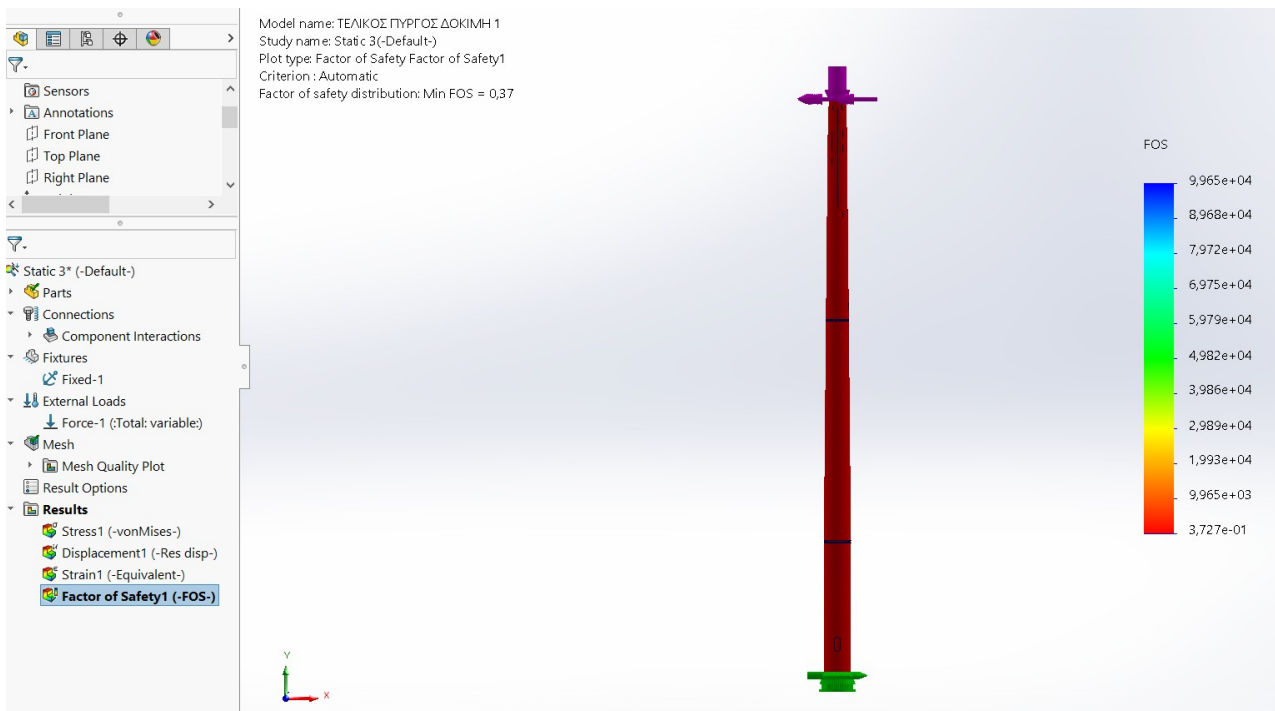


Εικόνα 5.5.11 : Κατανομή τάσεων και όριο διαρροής για φόρτιση από 180°.



Εικόνα 5.5.12 : Διάγραμμα μετατόπισης και συνολική παραμόρφωση του πύργου για φόρτιση από 180°.

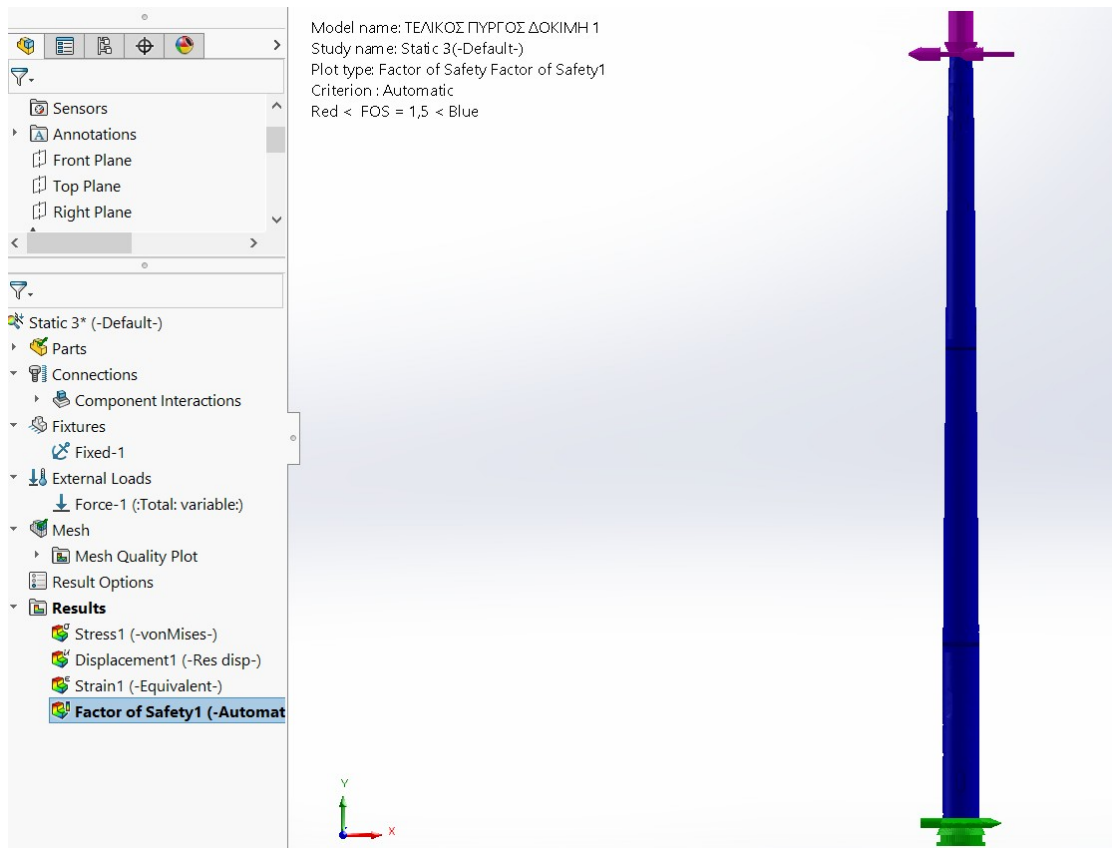
Παρατηρείται από την παραπάνω εικόνα ότι η συνολική μετατόπιση του πύργου είναι 401,2 mm και αποτελεί μια φυσιολογική τιμή σε σχέση με τα 50 km/s του ανέμου.



Εικόνα 5.5.13 : Συντελεστής ασφαλείας για φόρτιση από 180°.

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0,37. Όμως όπως παρουσιάζεται και παρακάτω αυτή η τιμή ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένα ασθενή σημεία του πύργου.

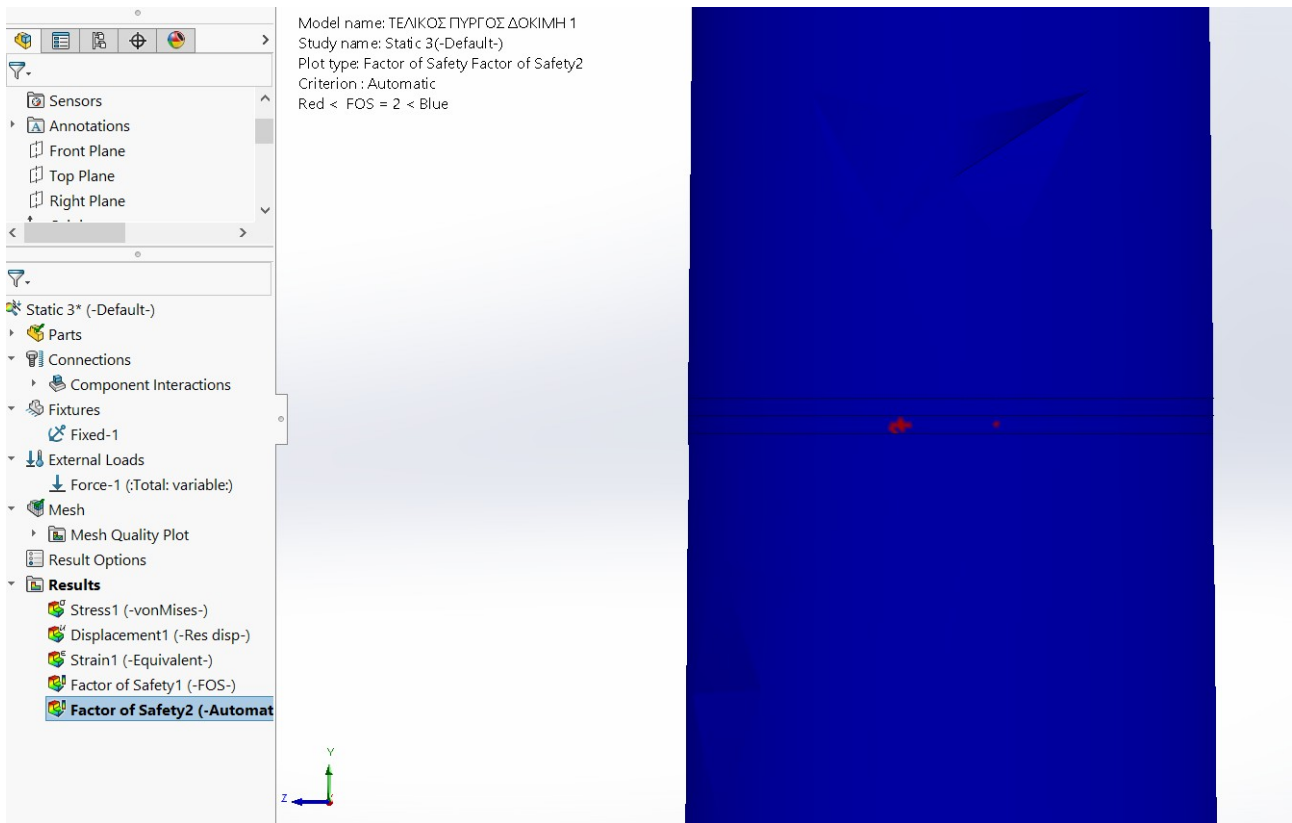
Όπως και παραπάνω τίθεται το πρόγραμμα να παρουσιάσει τα σημεία που έχουν συντελεστή ασφαλείας κάτω από 1,5.



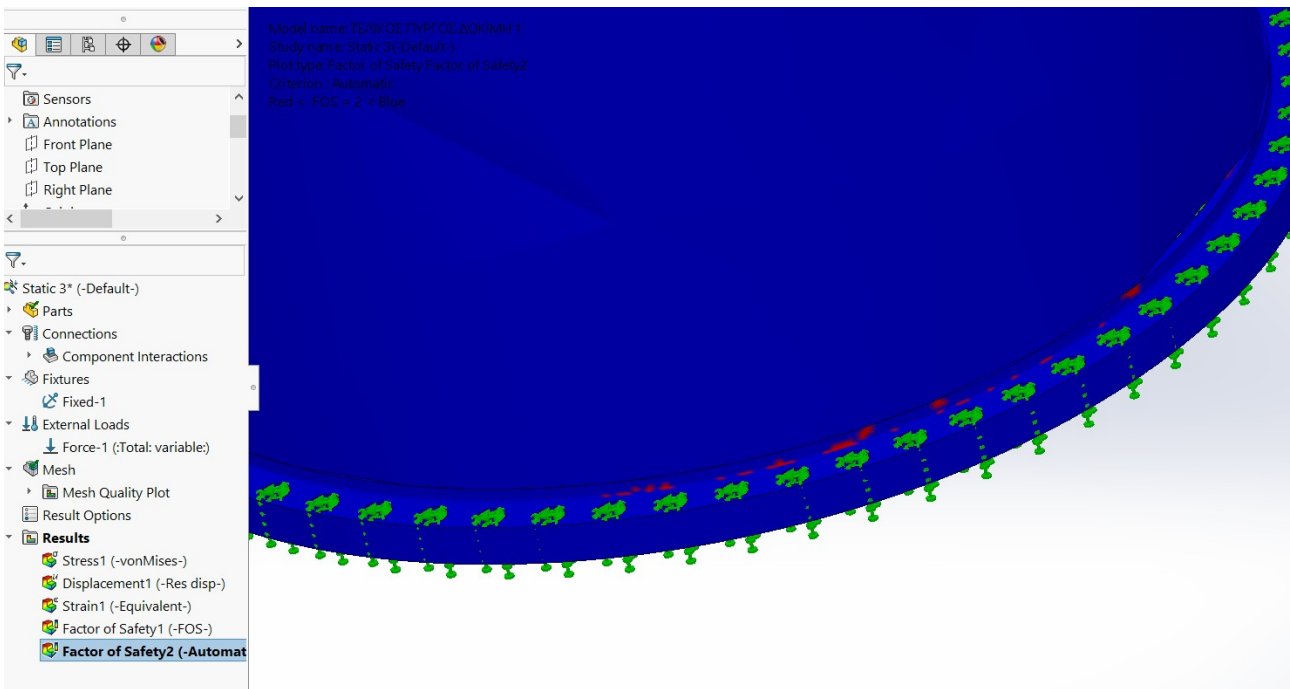
Εικόνα 5.5.14 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 1,5.

Παρατηρείται ότι και μετά από μεγεθύνσεις στον πύργο δεν υπάρχει κάποιο σημείο με κόκκινο χρώμα.

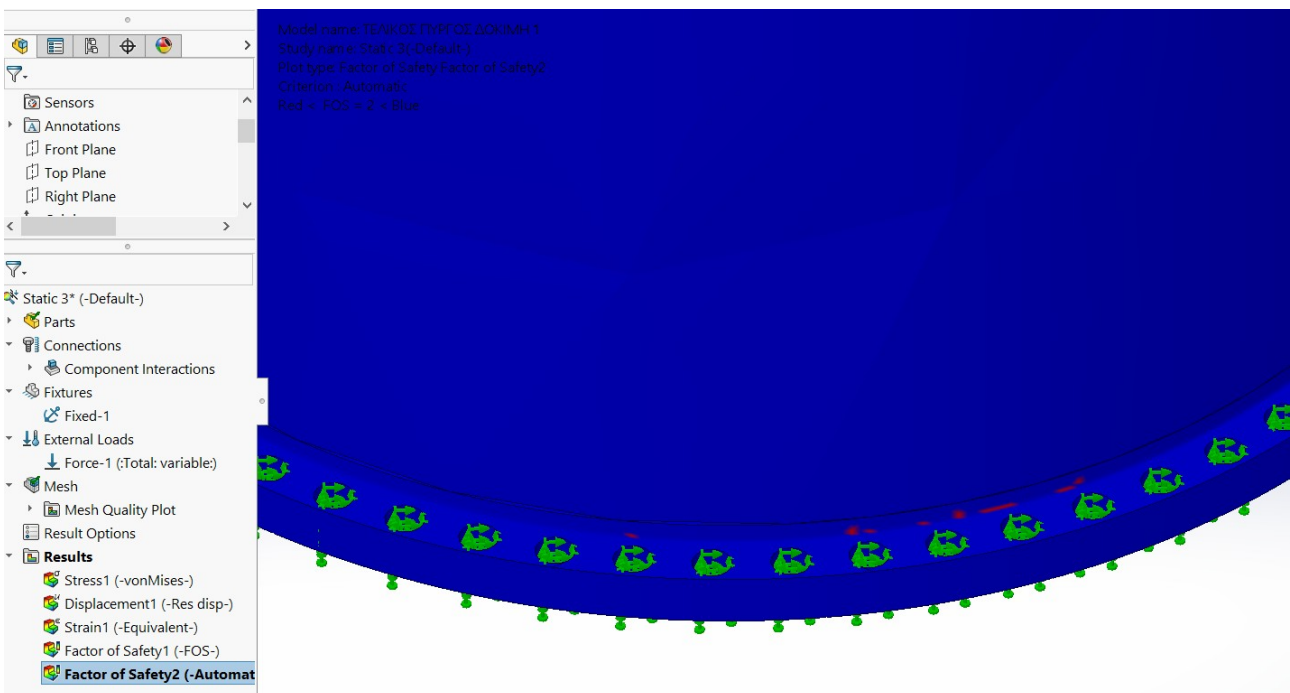
Στη συνέχεια τίθεται το πρόγραμμα να παρουσιάσει τα σημεία που έχουν συντελεστή ασφαλείας κάτω από 2.



Εικόνα 5.5.15 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην 2η μεσαία φλάντζα από τη δεξιά πλευρά της πόρτας.



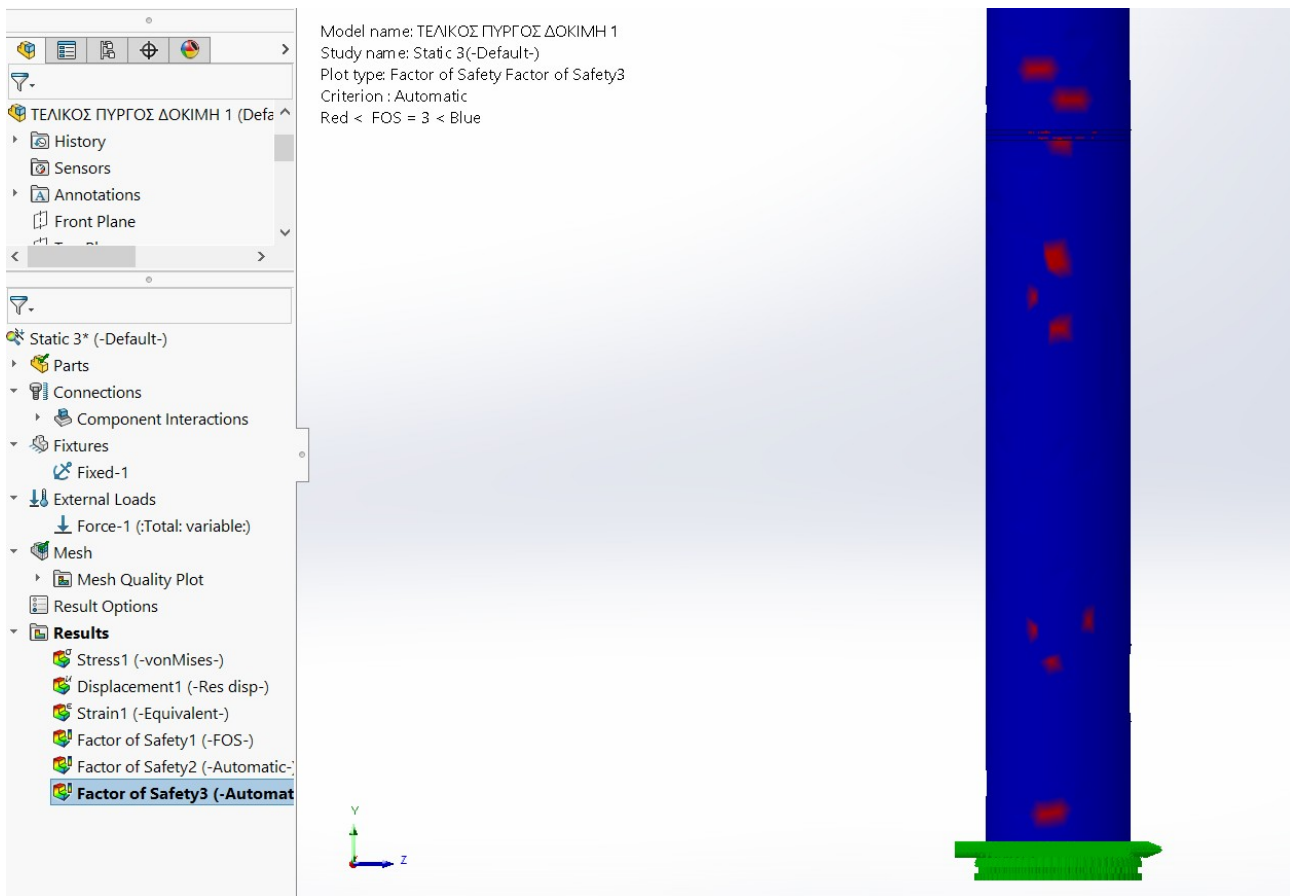
Εικόνα 5.5.16 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην φλάντζα της βάσης από τη δεξιά πλευρά της πόρτας.



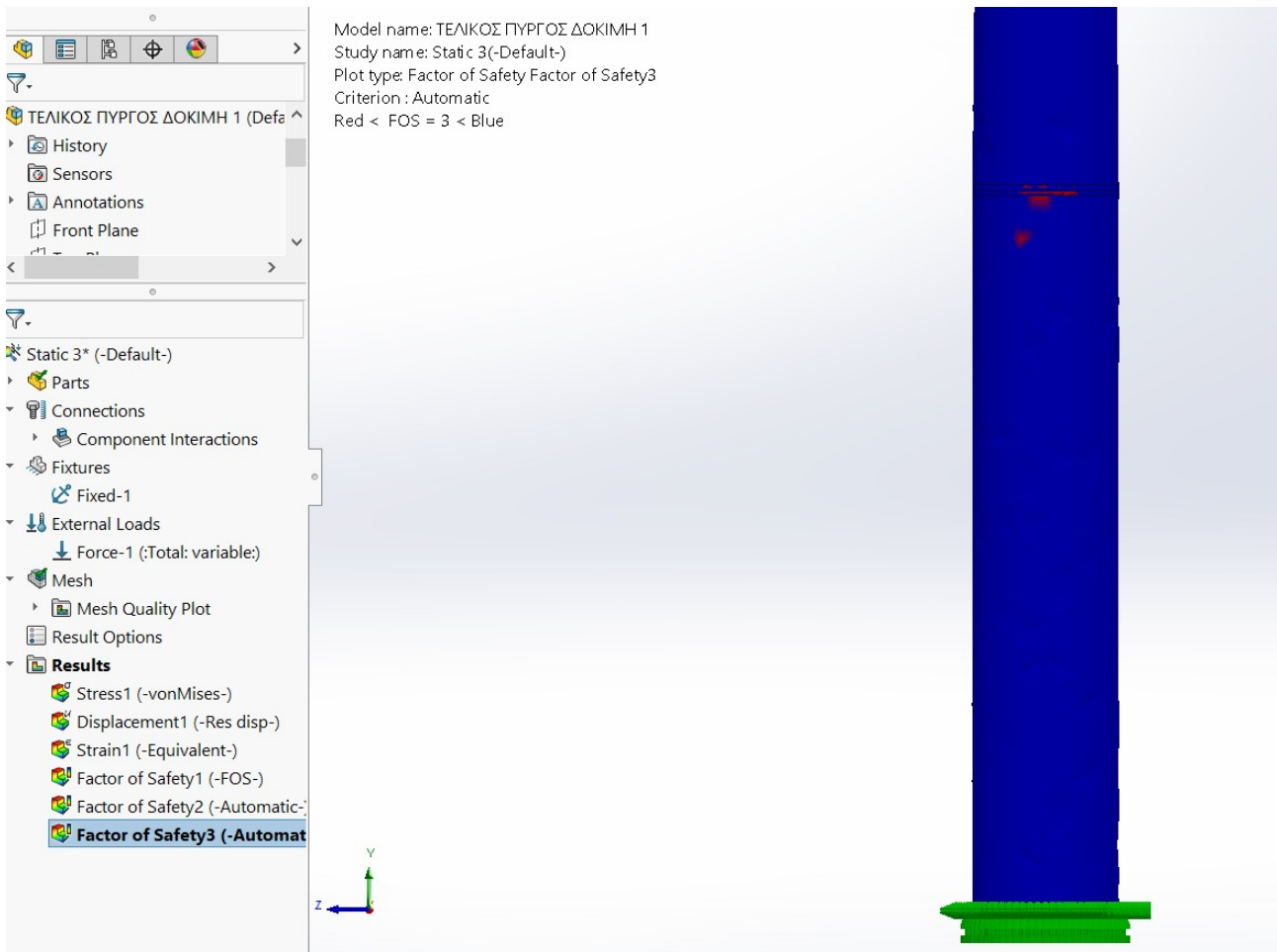
Εικόνα 5.5.17 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην φλάντζα της βάσης από την αριστερή πλευρά της πόρτας.

Για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 2 παρουσιάζονται αρκετά σημεία με κόκκινο χρώμα, τα οποία βλέπουμε ότι βρίσκονται στις φλάντζες. Αυτό δείχνει ότι μάλλον τα δυσχερή σημεία εμφανίζονται εκεί λόγω του πλέγματος, καθώς έχει θεωρηθεί ότι είναι συναρμολόγηση και ο πύργος δεν έχει σχεδιαστεί ως ενιαίος. Επομένως, σε εκείνα τα σημεία το πλέγμα δεν ενώνεται σωστά και εμφανίζονται οι μεγάλες τάσεις.

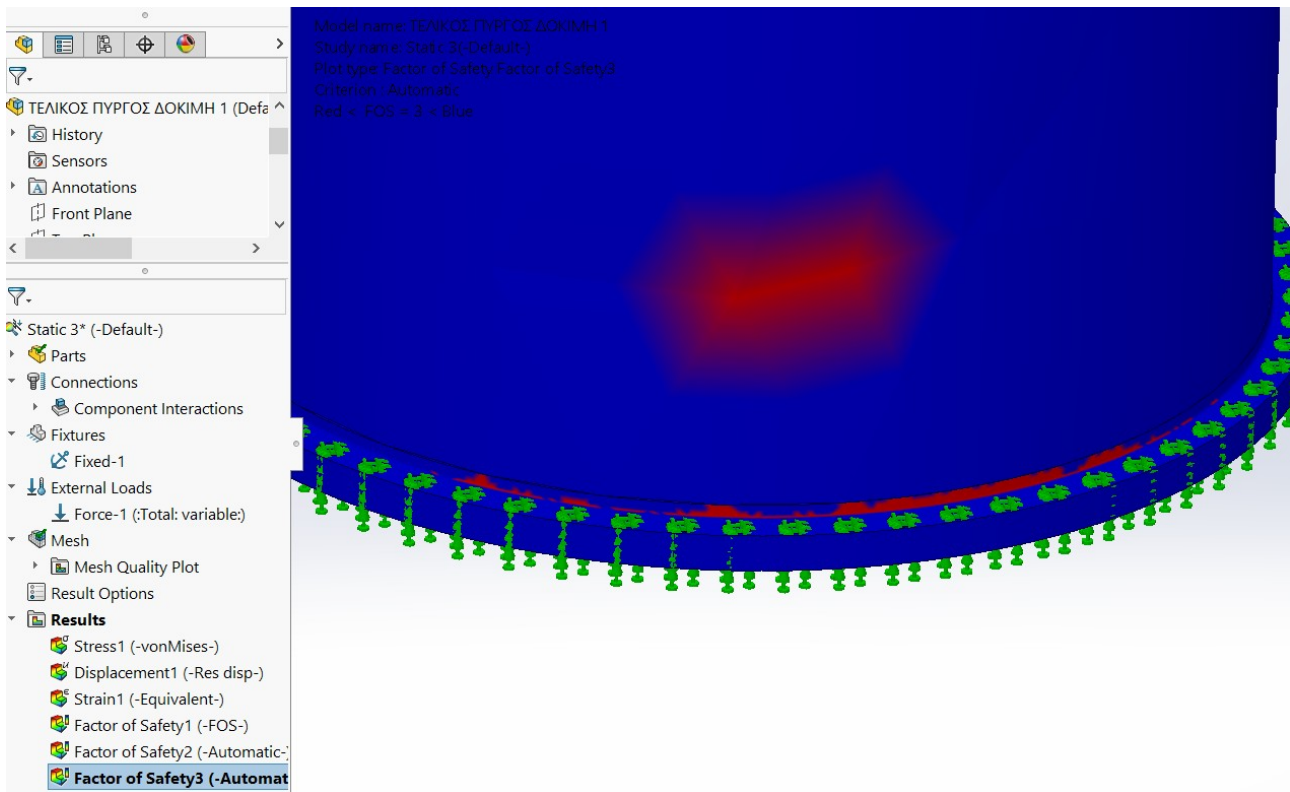
Παρομοίως τίθεται να παρουσιάσει το πρόγραμμα τα σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 3.



Εικόνα 5.5.18 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3, από την αριστερή πλευρά της πόρτας.



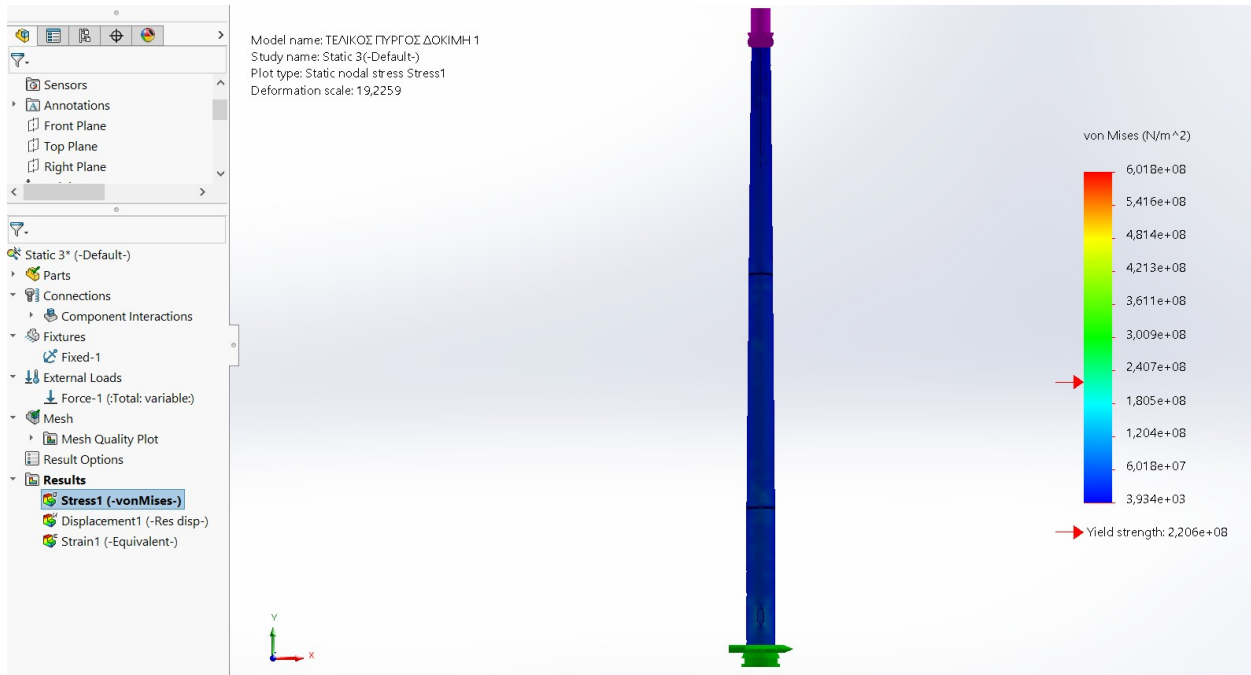
Εικόνα 5.5.19 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3, από την δεξιά πλευρά της πύργου.



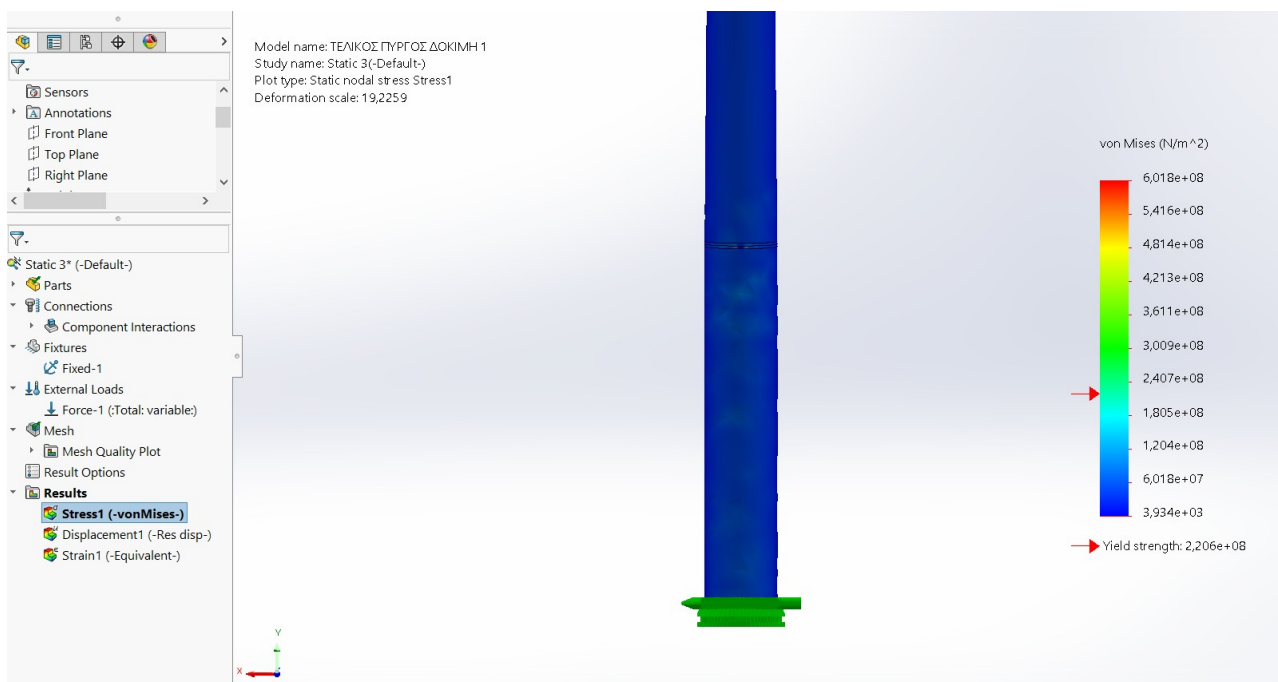
Εικόνα 5.5.20 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3, στην φλάντζα της βάσης από την αριστερή πλευρά της πόρτας.

Παρατηρείται ότι τα δυσχερή σημεία εμφανίζονται εκτός από τις φλάντζες και σε σημεία στη μέση μεταξύ των κομματιών, γεγονός που δείχνει ότι σίγουρα ευθύνεται το πλέγμα καθώς σε εκείνα τα σημεία κάνει ακμές και εμφανίζει υψηλές τάσεις.

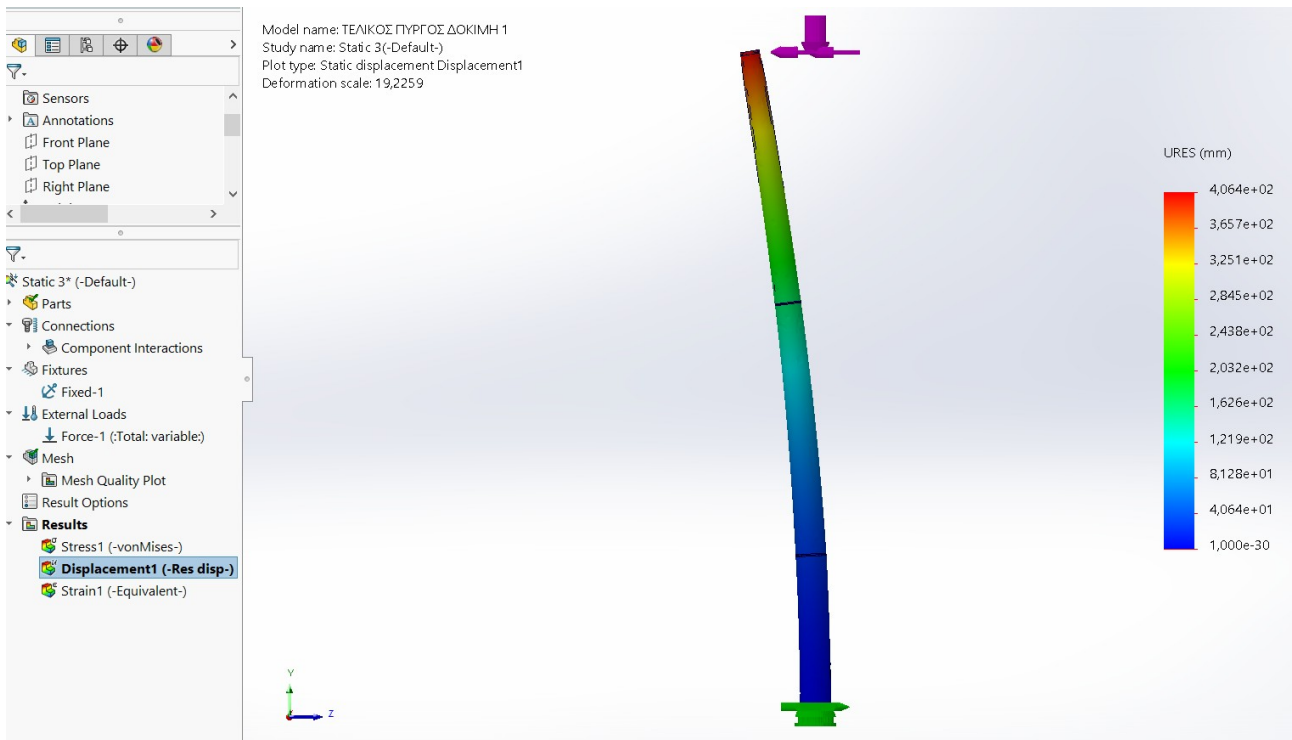
- Φορτίο με κατεύθυνση από τις 90°



Εικόνα 5.5.21 : Κατανομή τάσεων και όριο διαρροής για φόρτιση από 90°.

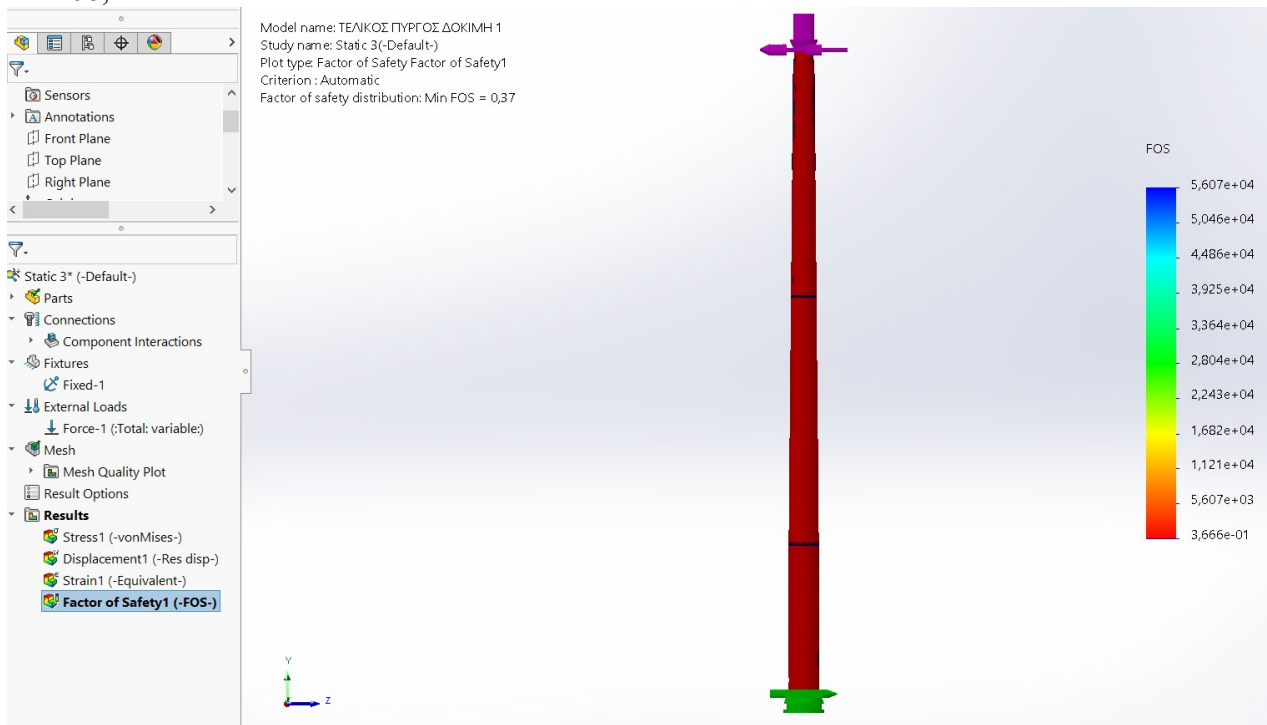


Εικόνα 5.5.22 : Κατανομή τάσεων και όριο διαρροής για φόρτιση από 90° σε μεγέθυνση.



Εικόνα 5.5.23 : Διάγραμμα μετατόπισης και συνολική παραμόρφωση του πύργου για φόρτιση από 90°, στιγμιότυπο από την αριστερή όψη της πόρτας.

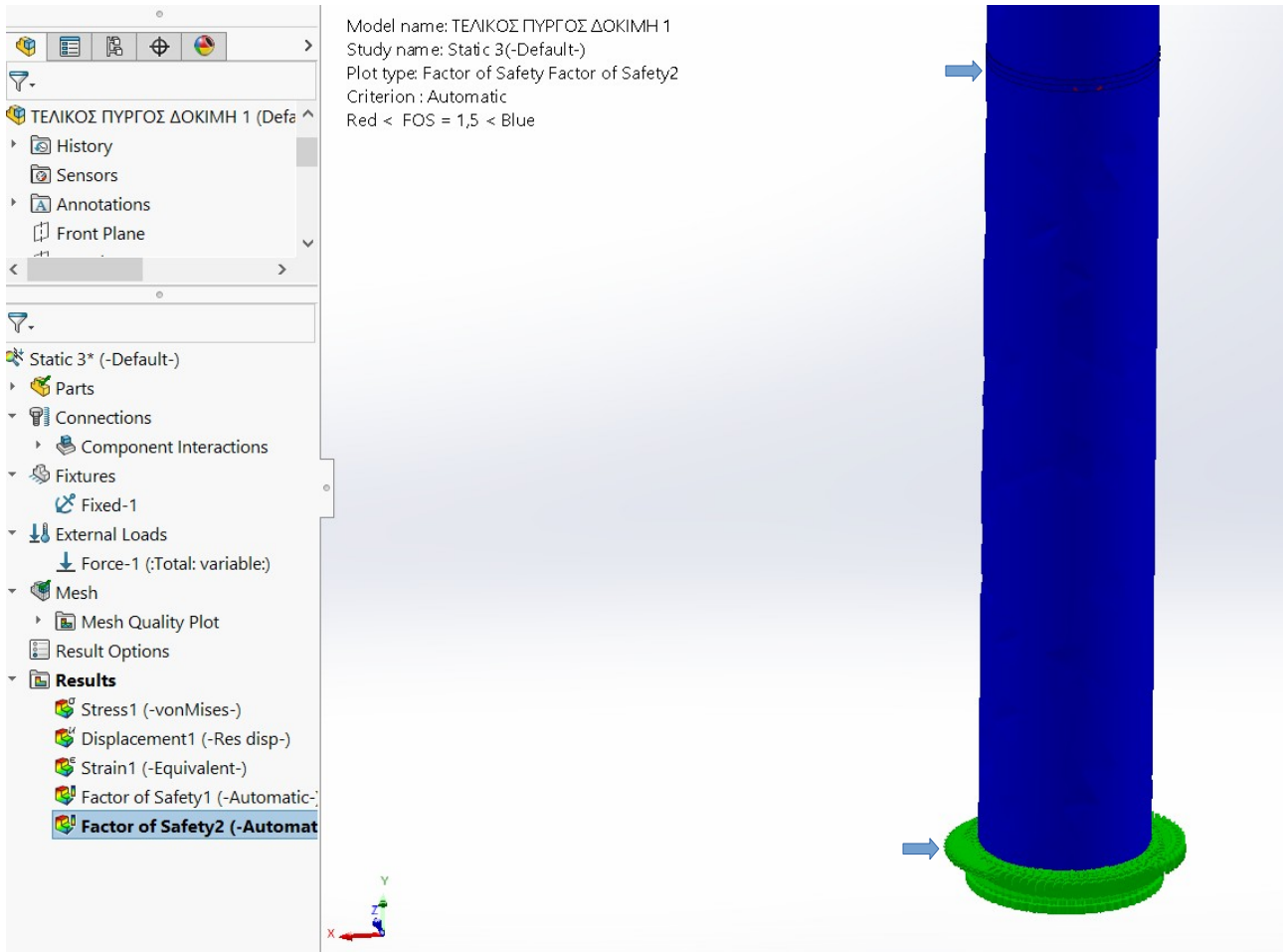
Παρατηρείται από την παραπάνω εικόνα ότι η συνολική μετατόπιση του πύργου είναι 406,4mm.



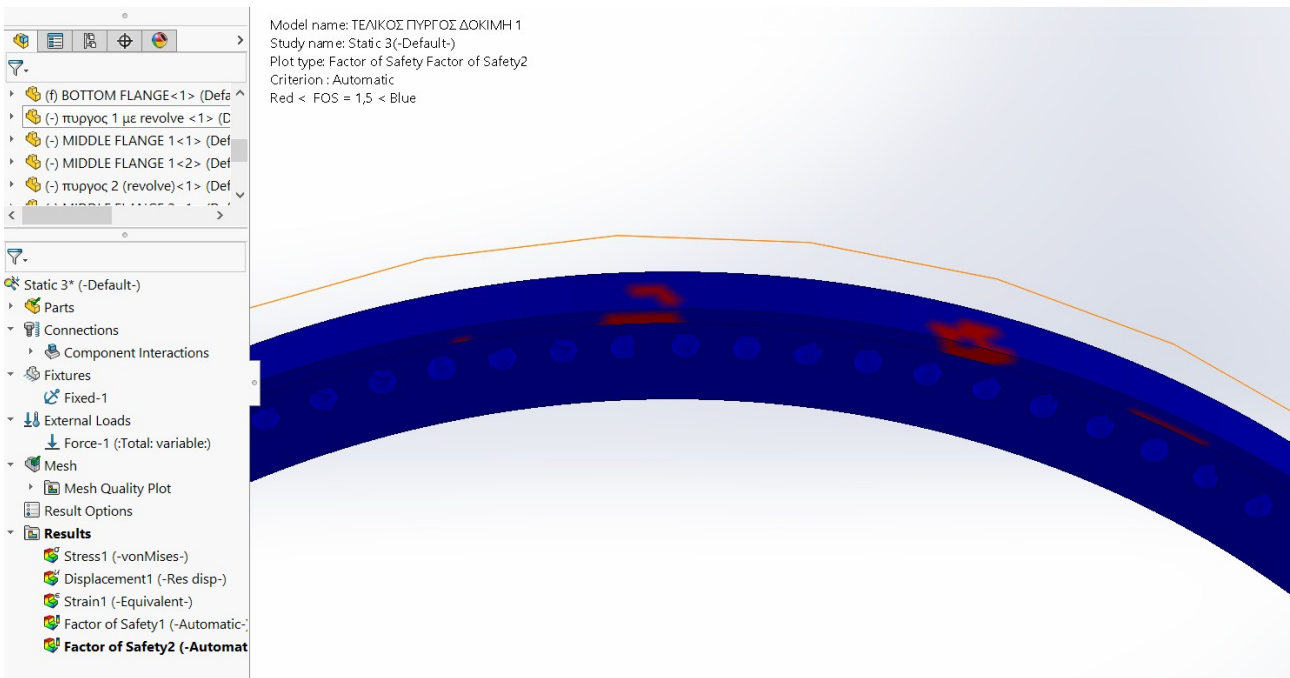
Εικόνα 5.5.24 : Συντελεστής ασφαλείας για φόρτιση από 90°.

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0,37. Όμως όπως παρουσιάζεται και παρακάτω αυτή η τιμή ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένα ασθενή σημεία του πύργου.

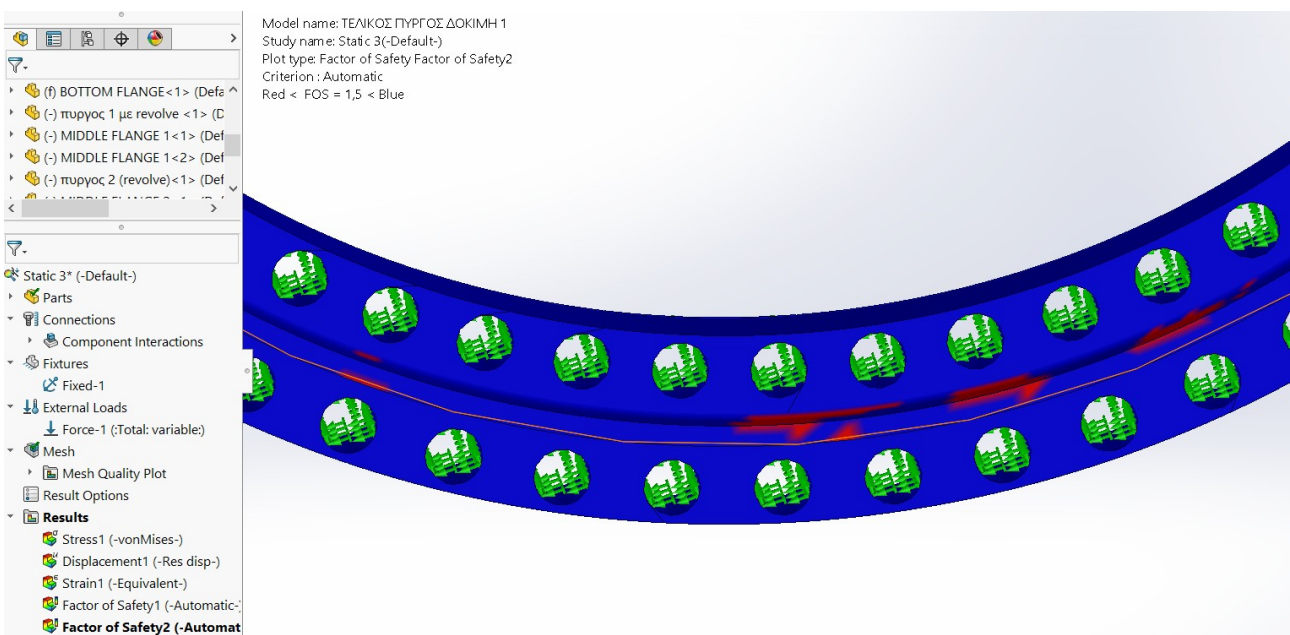
Έτσι τίθεται το πρόγραμμα να παρουσιάσει τα σημεία που έχουν συντελεστή ασφαλείας κάτω από 1,5.



Εικόνα 5.5.25 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 1,5, από την πίσω όψη της πόρτας. Με βελόνες δείχνονται τα δυσχερή σημεία.

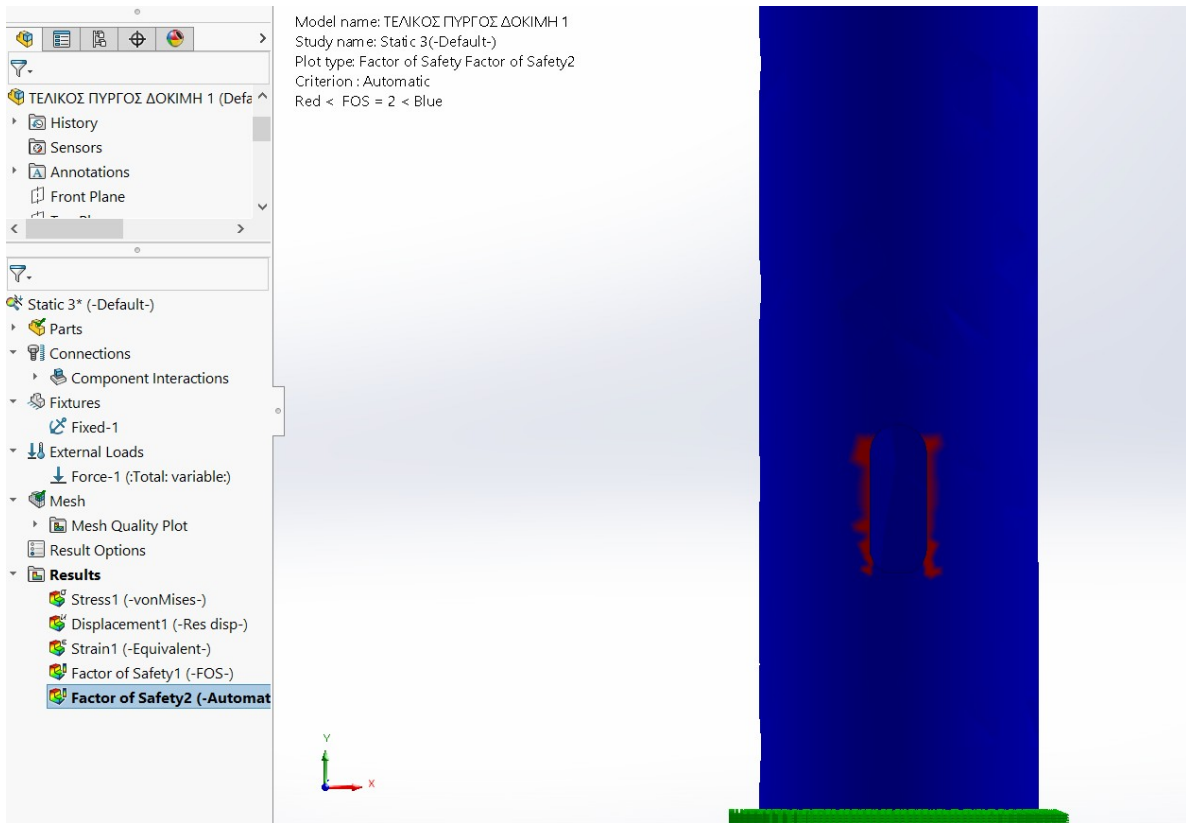


Εικόνα 5.5.26 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 1,5 στην 1η μεσαία φλάντζα, από την πίσω όψη της πόρτας. Έχει απομονωθεί η φλάντζα για να φαίνονται καλύτερα τα αποτελέσματα.

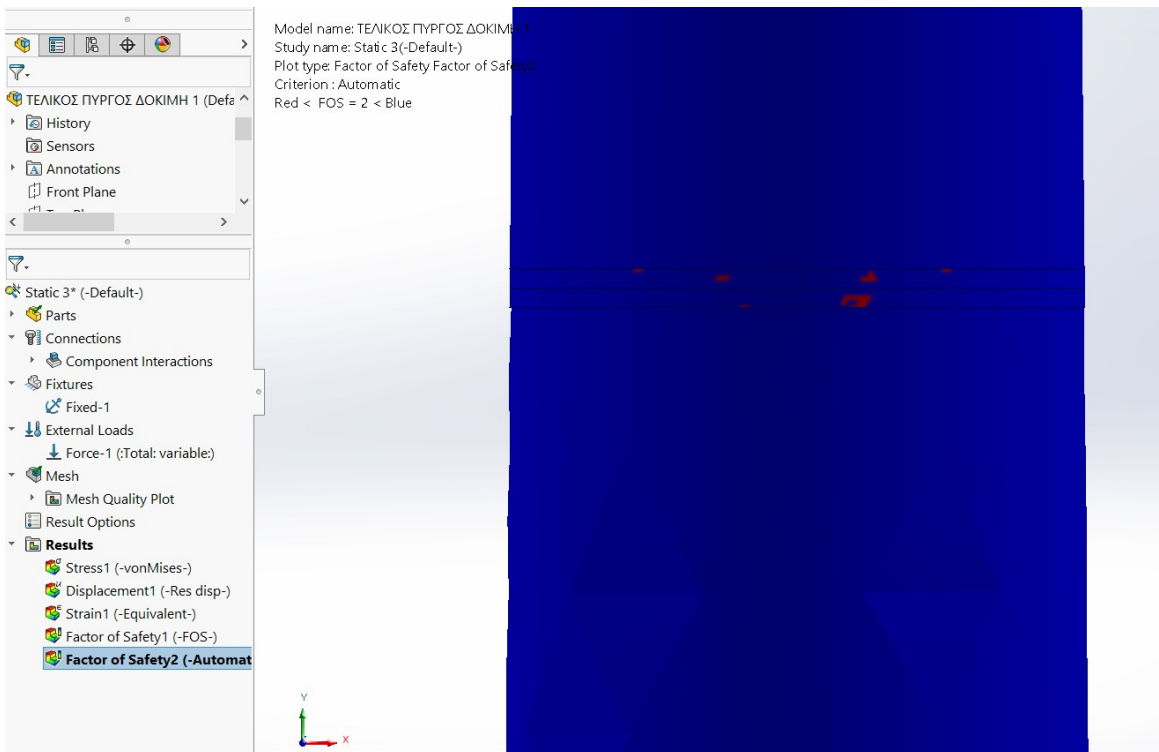


Εικόνα 5.5.27 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 1,5 στην φλάντζα της βάσης, από την πίσω όψη της πόρτας. Έχει απομονωθεί η φλάντζα για να φαίνονται καλύτερα τα αποτελέσματα.

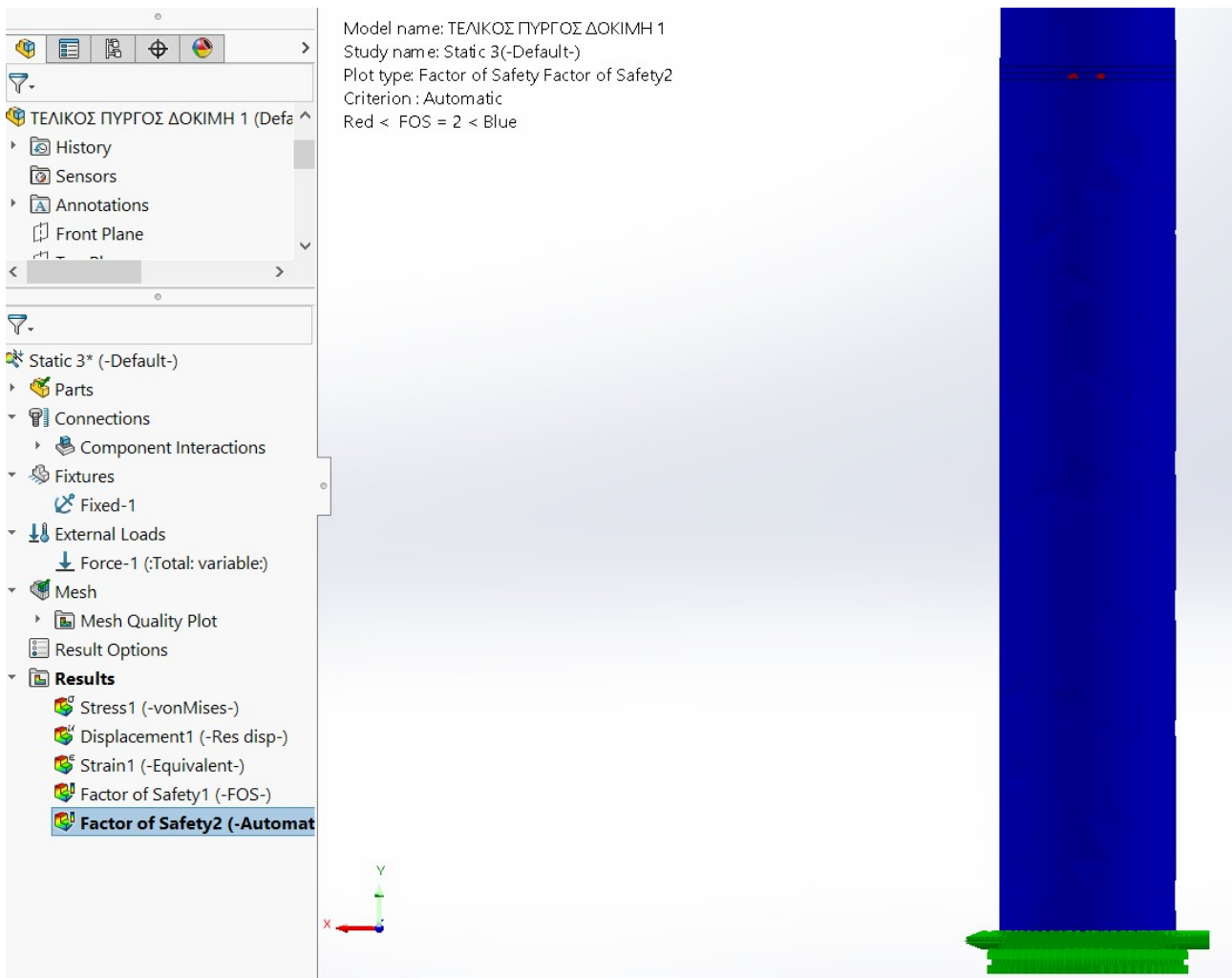
Παρομοίως ακολουθείται η ίδια διαδικασία και για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 2. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



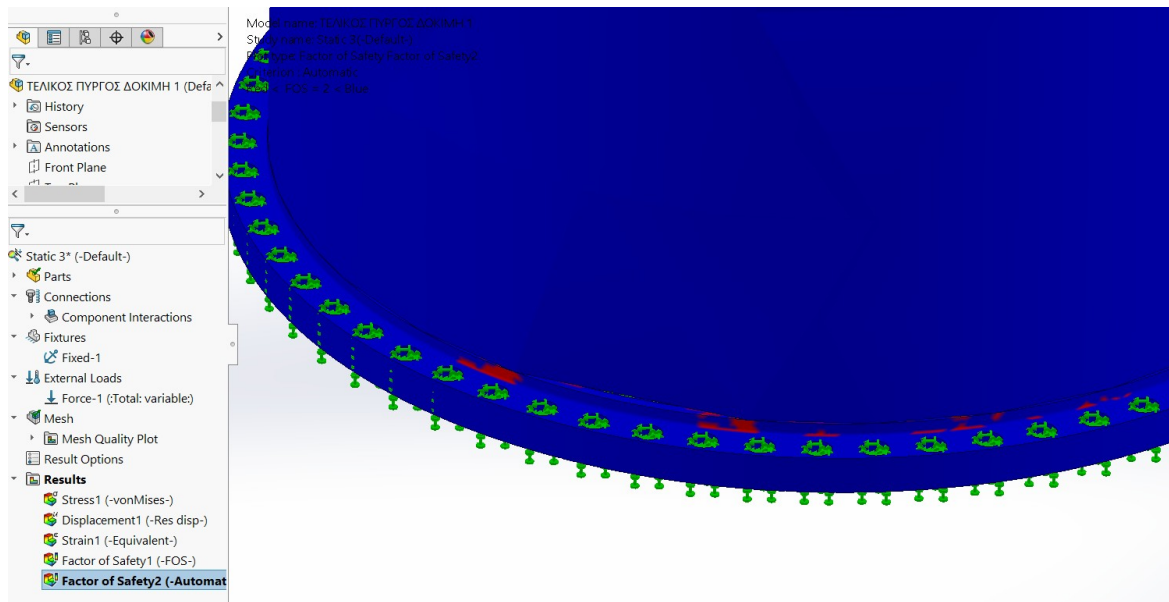
Εικόνα 5.5.28 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην πόρτα.



Εικόνα 5.5.29 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην 2η μεσαία φλάντζα από την μπροστινή πλευρά, την πλευρά της πόρτας.

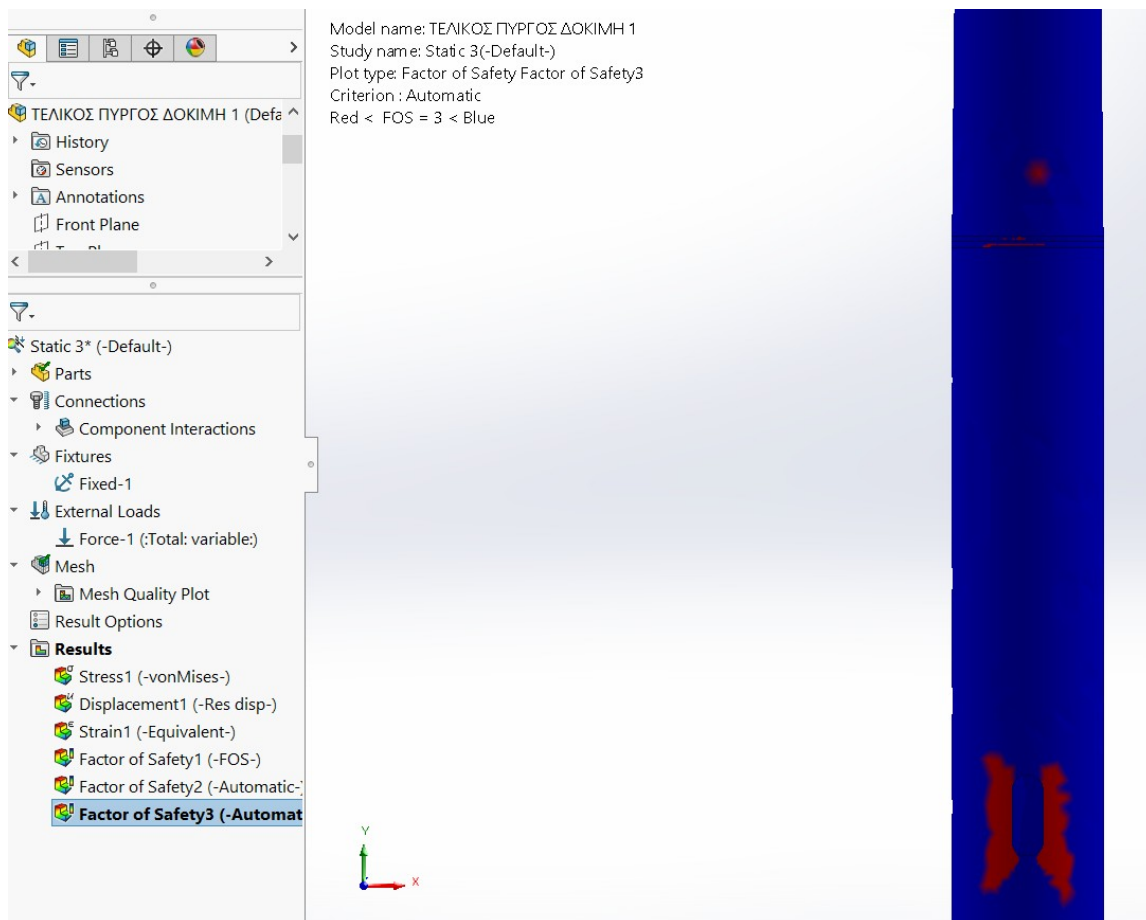


Εικόνα 5.5.30 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην 1η μεσαία φλάντζα από την πίσω πλευρά, την πίσω πλευρά της πόρτας.

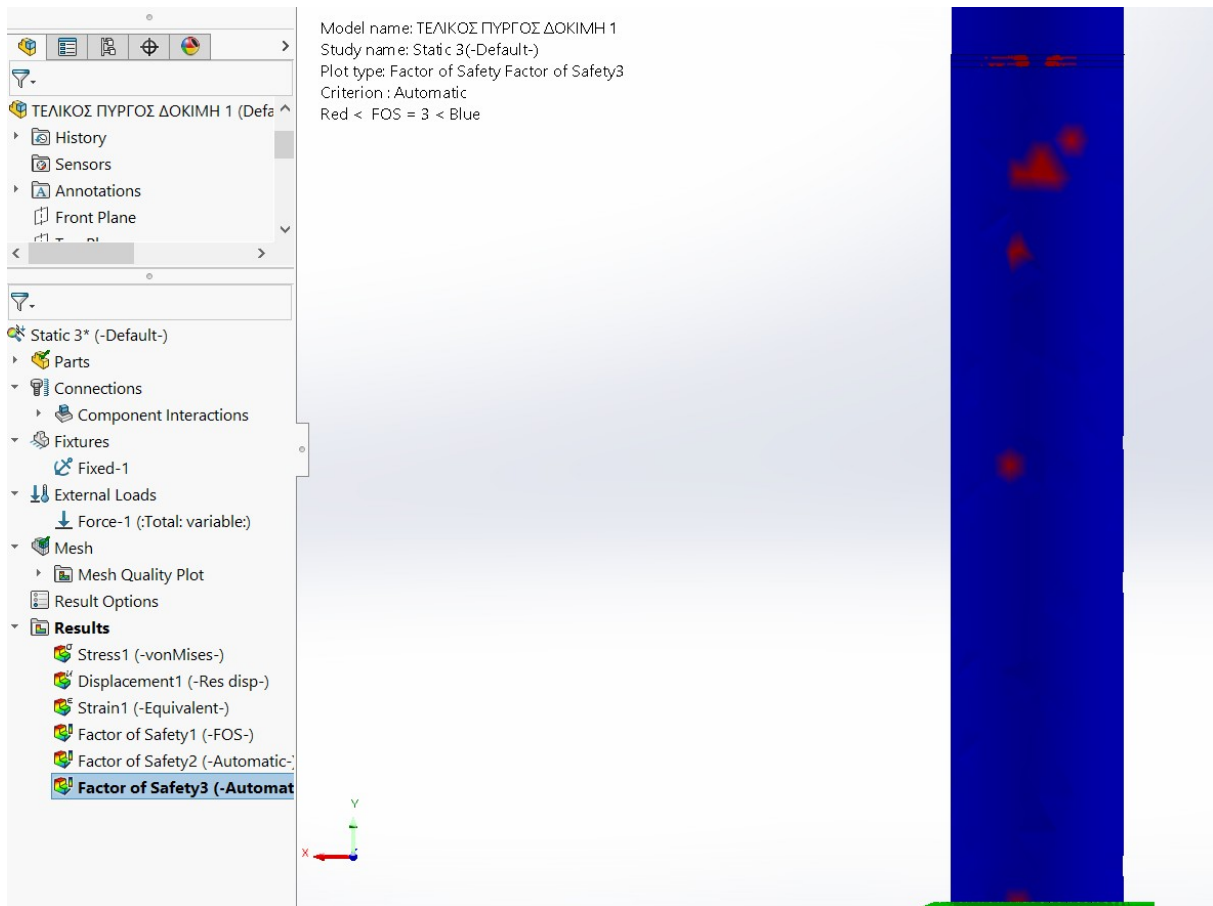


Εικόνα 5.5.31 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην φλάντζα της βάσης από την πίσω πλευρά, την πίσω πλευρά της πόρτας.

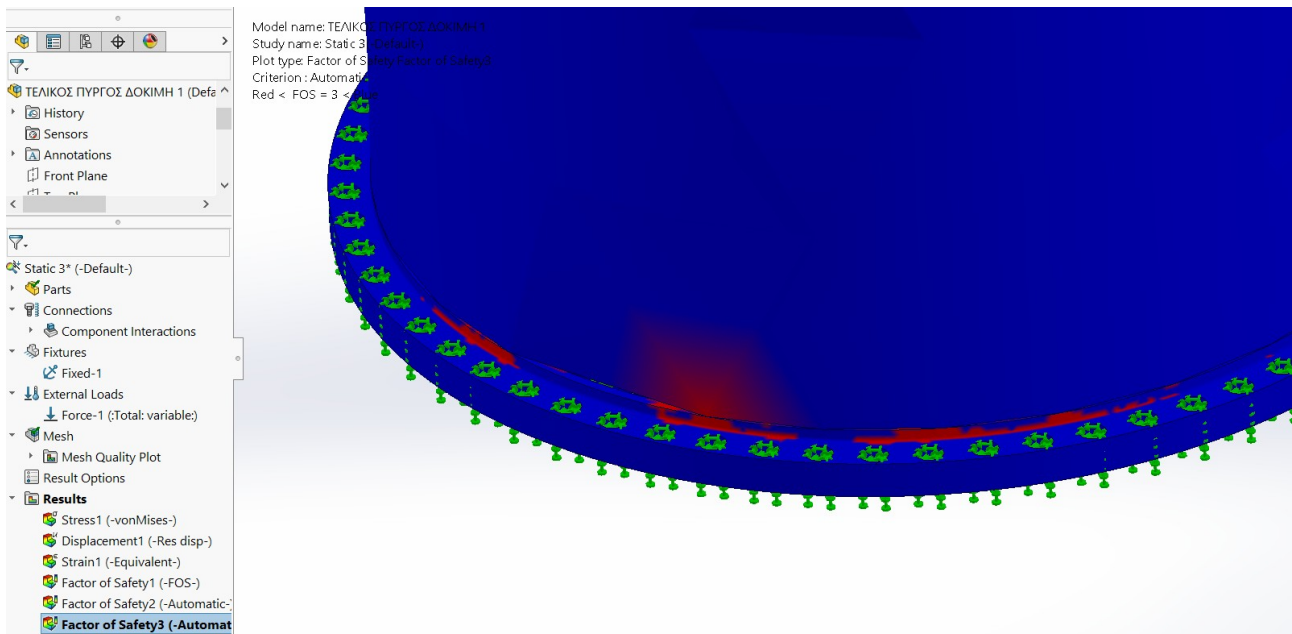
Για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 3, έχουμε τα εξής αποτελέσματα.



Εικόνα 5.5.32 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3, από την όψη της πόρτας.



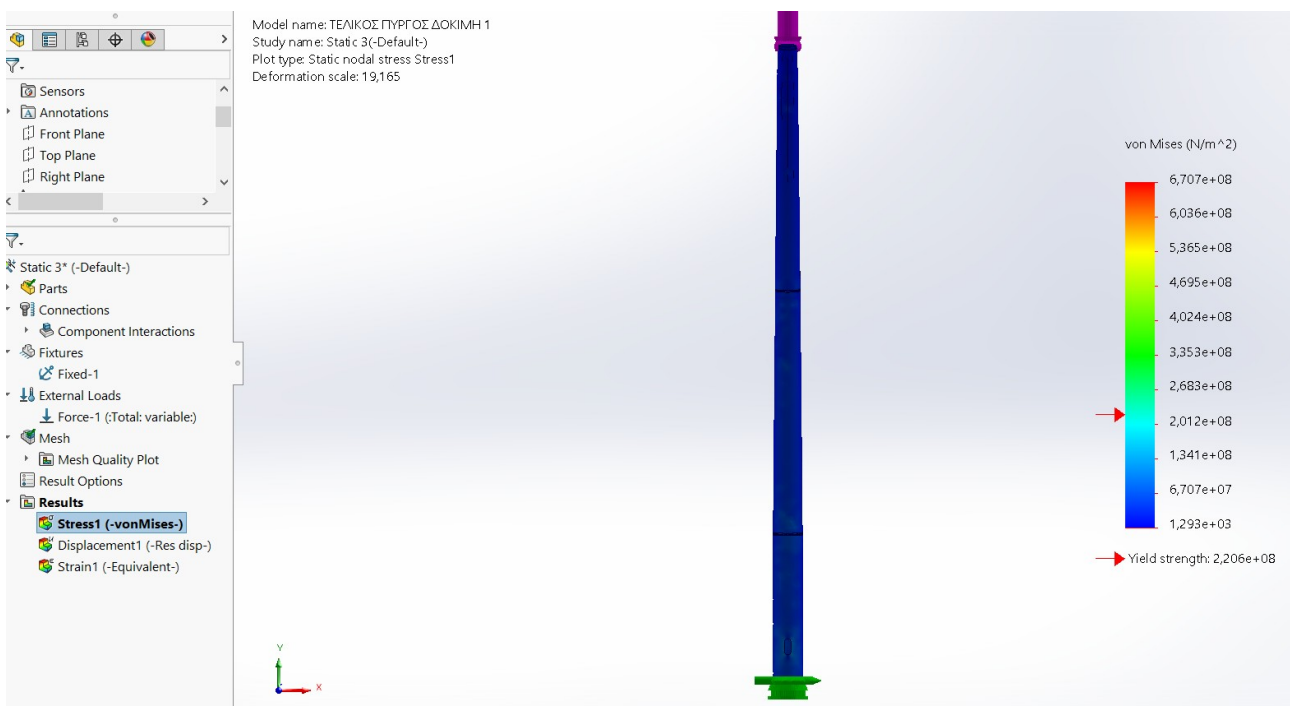
Εικόνα 5.5.33 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3, από την πίσω όψη της πόρτας



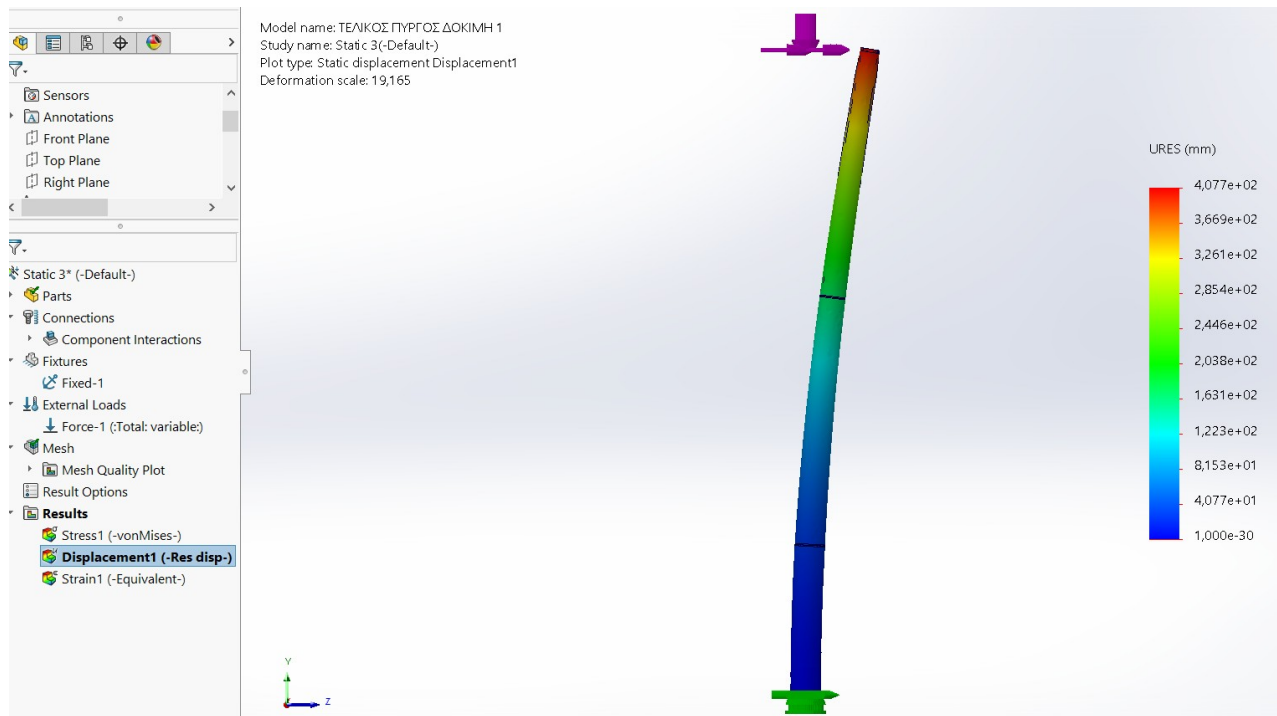
Εικόνα 5.5.34 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3, στην φλάντζα της βάσης και στο 1ο κομμάτι του πύργου, από την πίσω όψη της πόρτας.

Παρατηρείται ότι συγκεντρώνονται υψηλές τάσεις στην πόρτα, που είναι λογικό καθώς είναι η πλευρά από την οποία καταπονείται ο πύργος. Επιπλέον, παρατηρούμε μια συμμετρία στην μπροστά αλλά και στην πίσω όψη της πόρτας, δηλαδή στις 90, 270 μοίρες που σημαίνει ότι ο πύργος έχει σχεδιαστεί με σωστό τρόπο και είναι λογικό εφόσον έχουμε υψηλές τάσεις από την πλευρά που φορτίζεται ο πύργος να έχει παρόμοιες τάσεις και από την πίσω πλευρά του πύργου. Στο σημείο των φλαντζών όπως είδαμε και παραπάνω οι υψηλές τάσεις εμφανίζονται λόγω πλέγματος, όπως το ίδιο συμβαίνει και στην πόρτα λόγω δημιουργίας ακμών και ασυνέχειας.

- Φορτίο με κατεύθυνση από τις 270°

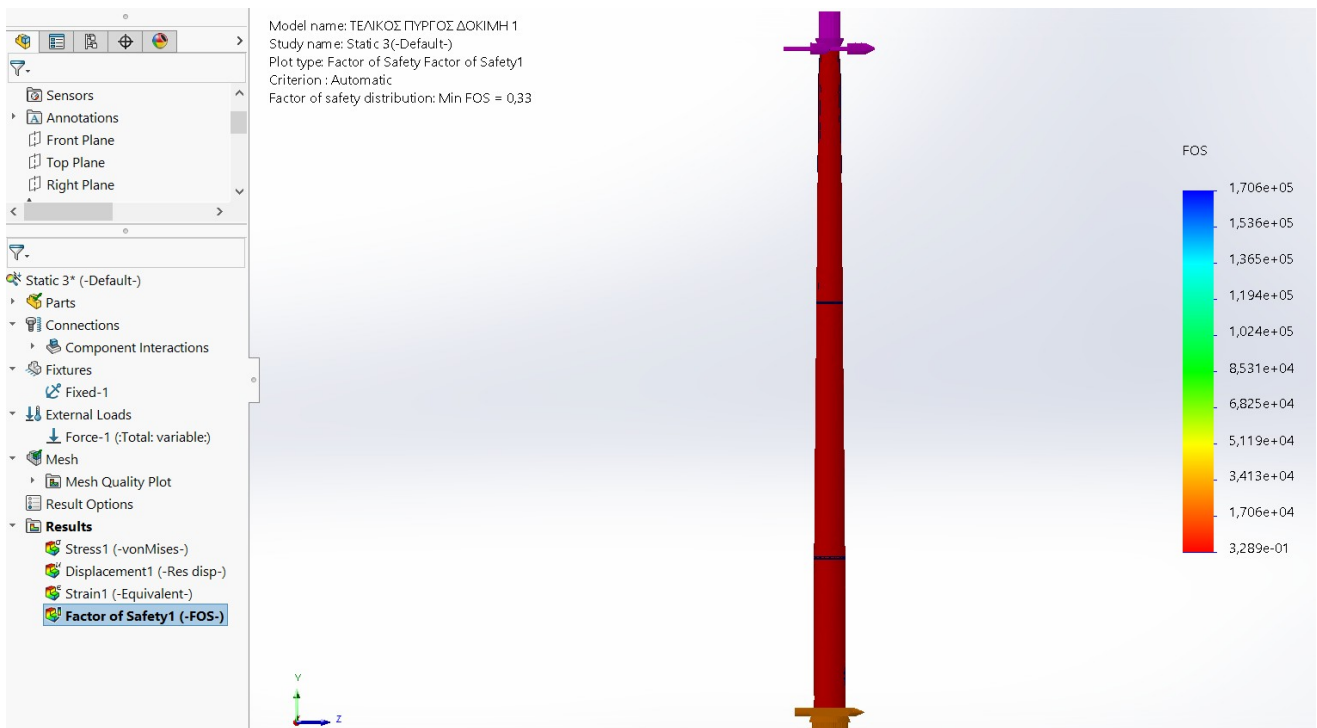


Εικόνα 5.5.35 : Κατανομή τάσεων και όριο διαρροής για φόρτιση από 270°.



Εικόνα 5.5.36 : Διάγραμμα μετατόπισης και συνολική παραμόρφωση του πύργου για φόρτιση από 270°, στιγμιότυπο από την αριστερή όψη της πόρτας.

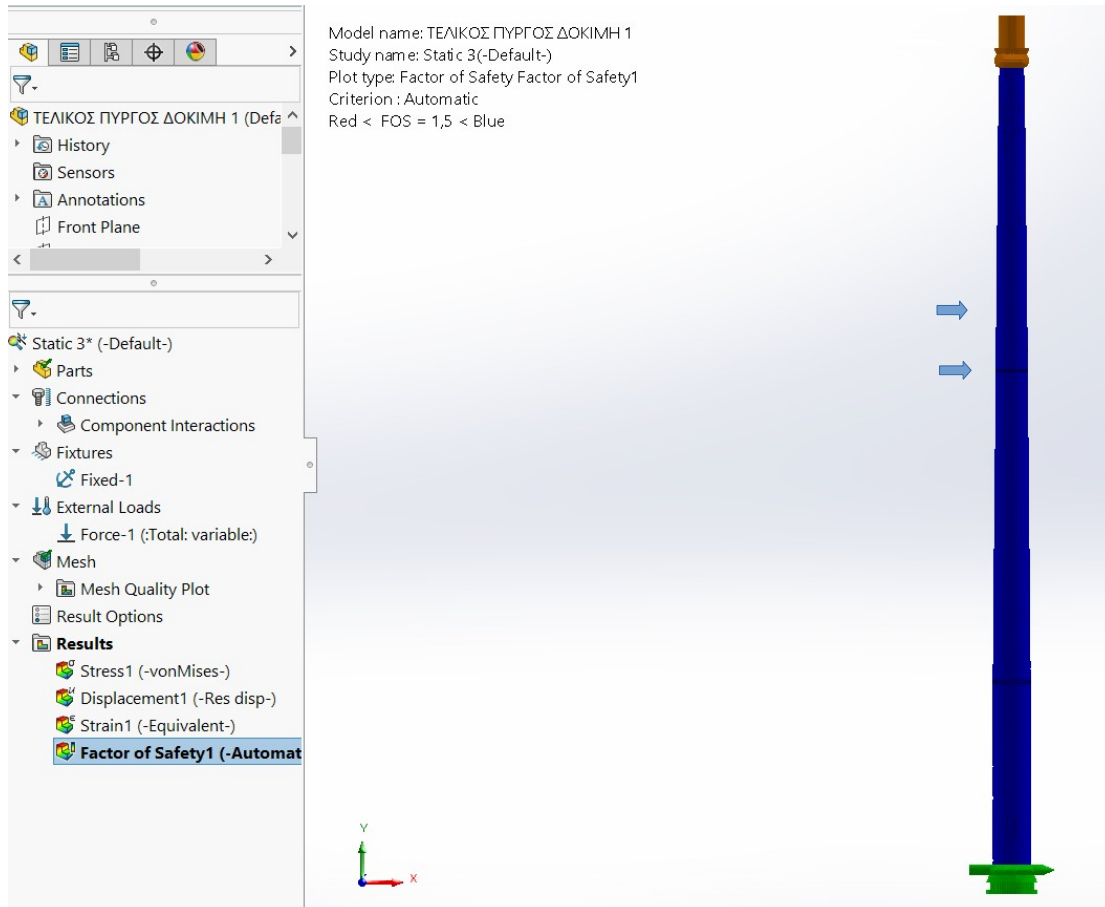
Παρατηρείται από την παραπάνω εικόνα ότι η συνολική μετατόπιση του πύργου είναι 407,7 mm.



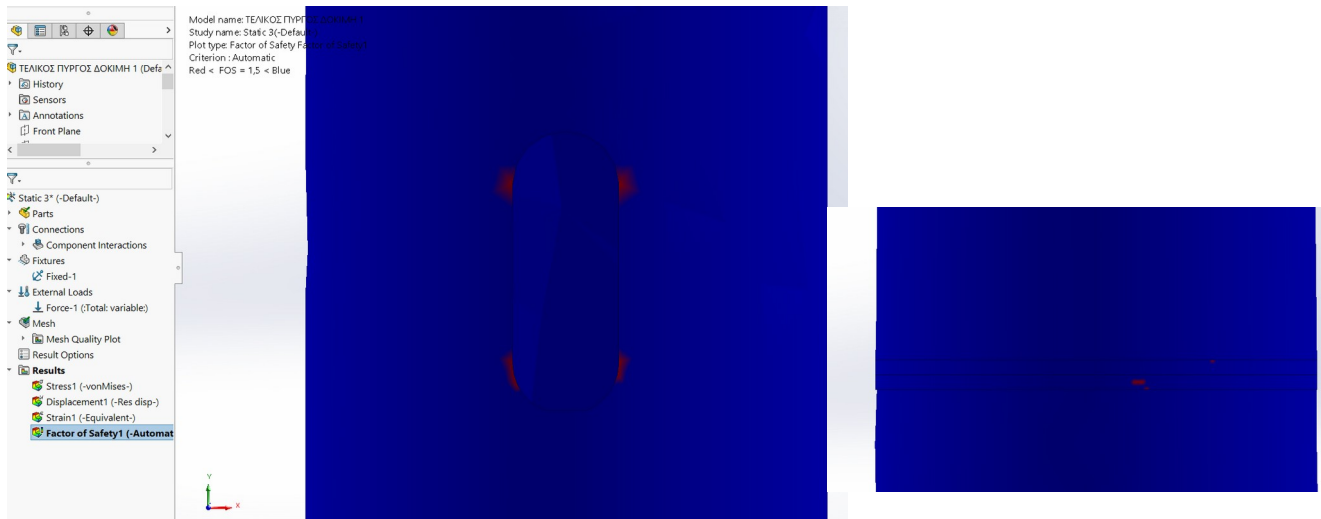
Εικόνα 5.5.37 : Συντελεστής ασφαλείας για φόρτιση από 270°.

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0,33. Όμως όπως παρουσιάζεται και παρακάτω αυτή η τιμή ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένα ασθενή σημεία του πύργου.

Έτσι τίθεται το πρόγραμμα να παρουσιάσει τα σημεία που έχουν συντελεστή ασφαλείας κάτω από 1,5 και παρακάτω παρουσιάζονται τα ασθενή σημεία.



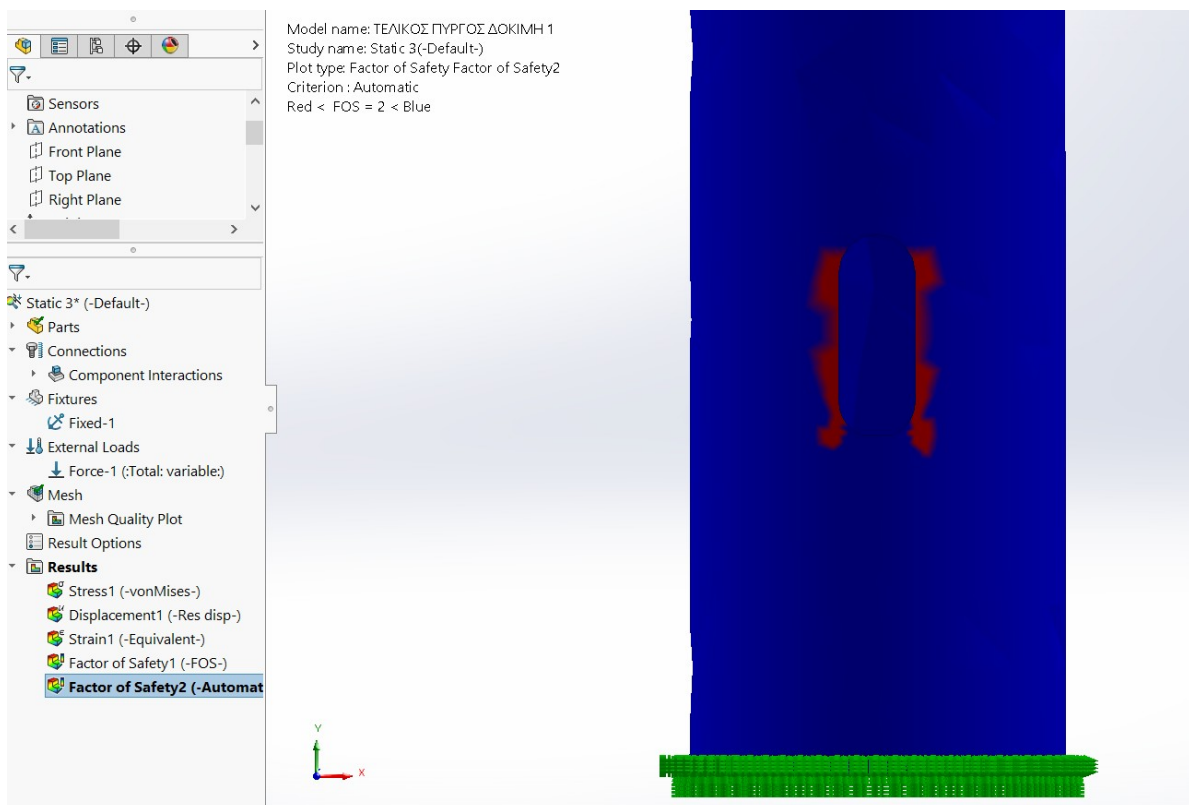
Εικόνα 5.5.38 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 1,5, όψη από τις 90°. Με βελόκια δείχνονται τα ασθενή σημεία.



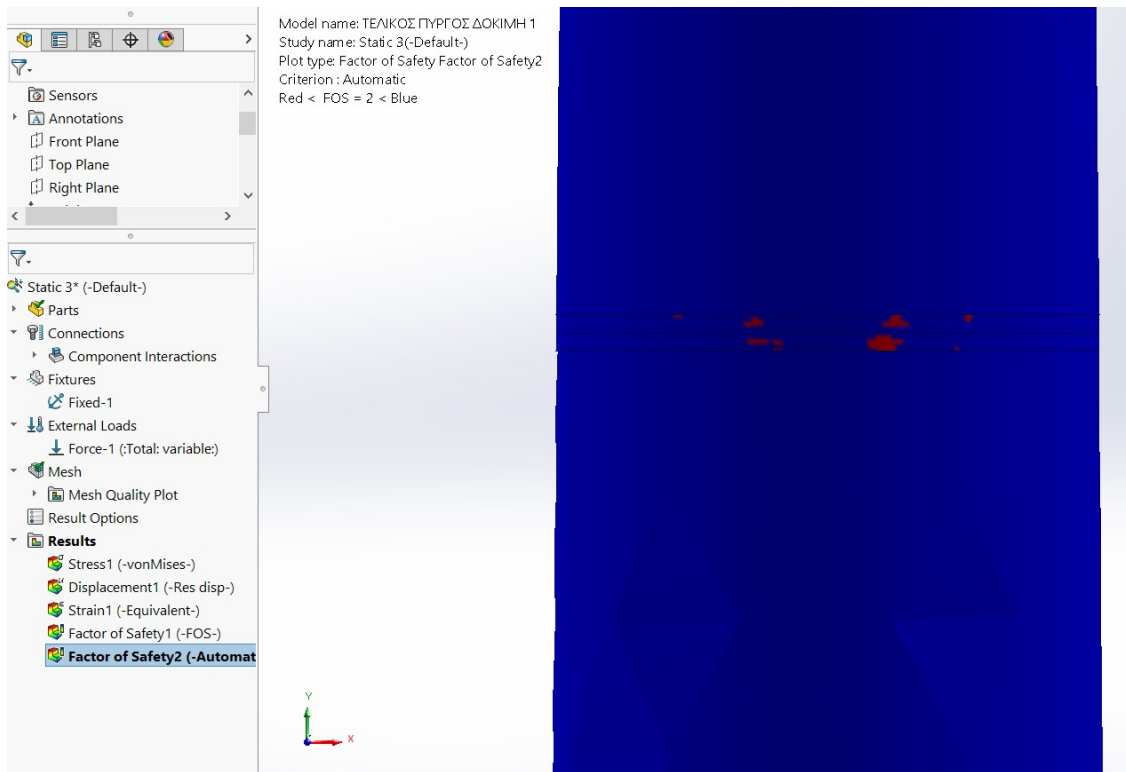
Εικόνα 5.5.39 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 1,5, όψη από τις 90°. Στην εικόνα φαίνονται σε μεγέθυνση τα ασθενή σημεία τα οποία εμφανίζονται στην πόρτα και στην 2η φλάντζα.

Ακόμη, εμφανίζονται υψηλές τάσεις στην φλάντζα της βάσης από την πίσω πλευρά της πόρτας.

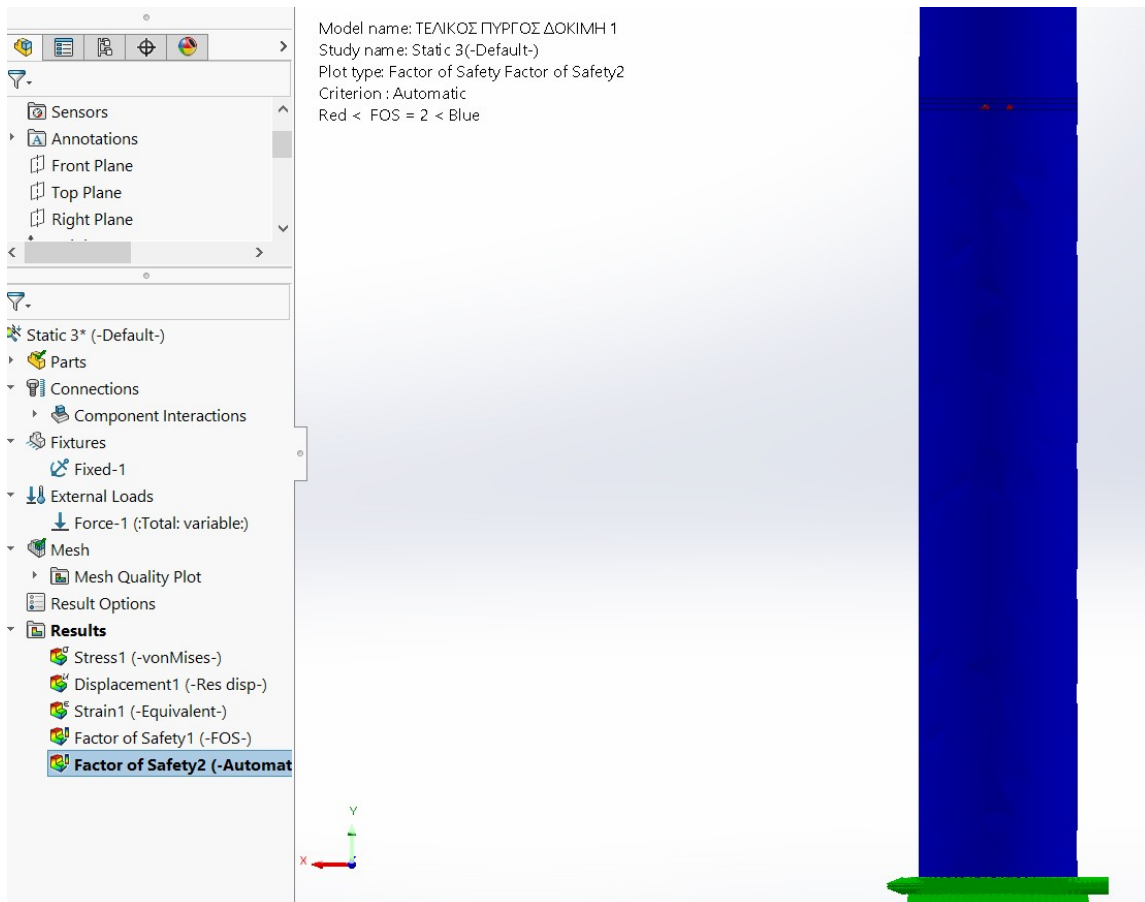
Παρακάτω εφαρμόζεται το ίδιο για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 2.



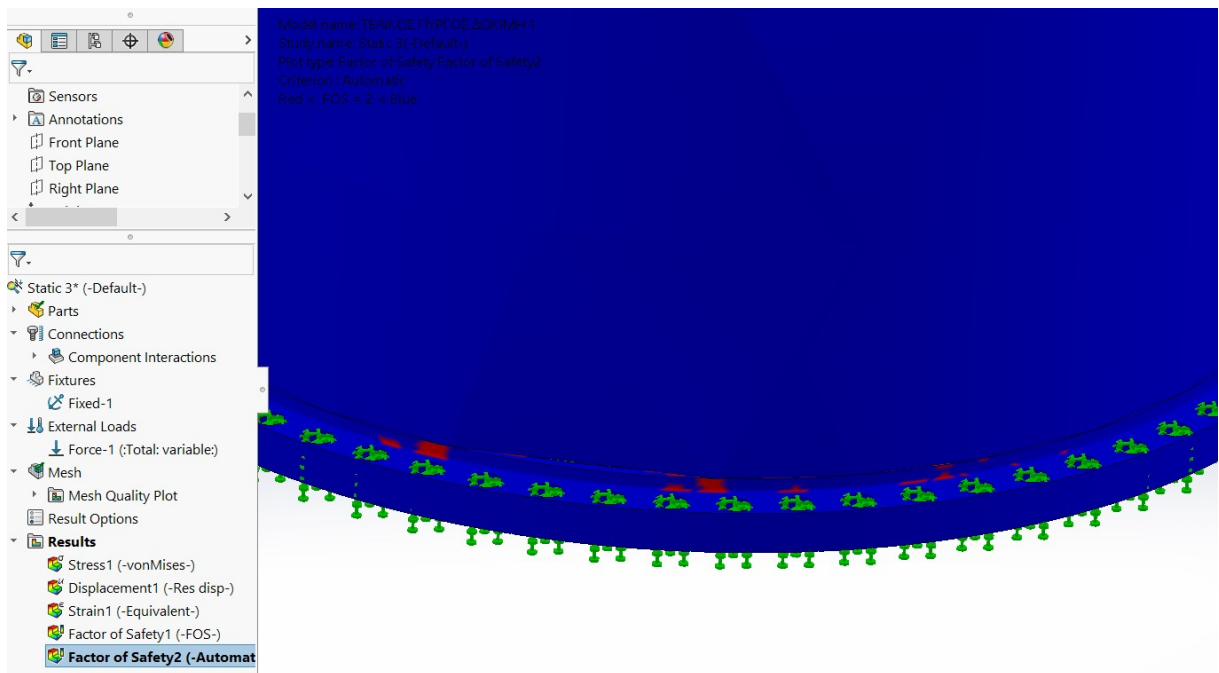
Εικόνα 5.5.40 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην πόρτα.



Εικόνα 5.5.41 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην 2η μεσαία φλάντζα, από την μπροστινή πλευρά της πόρτας.

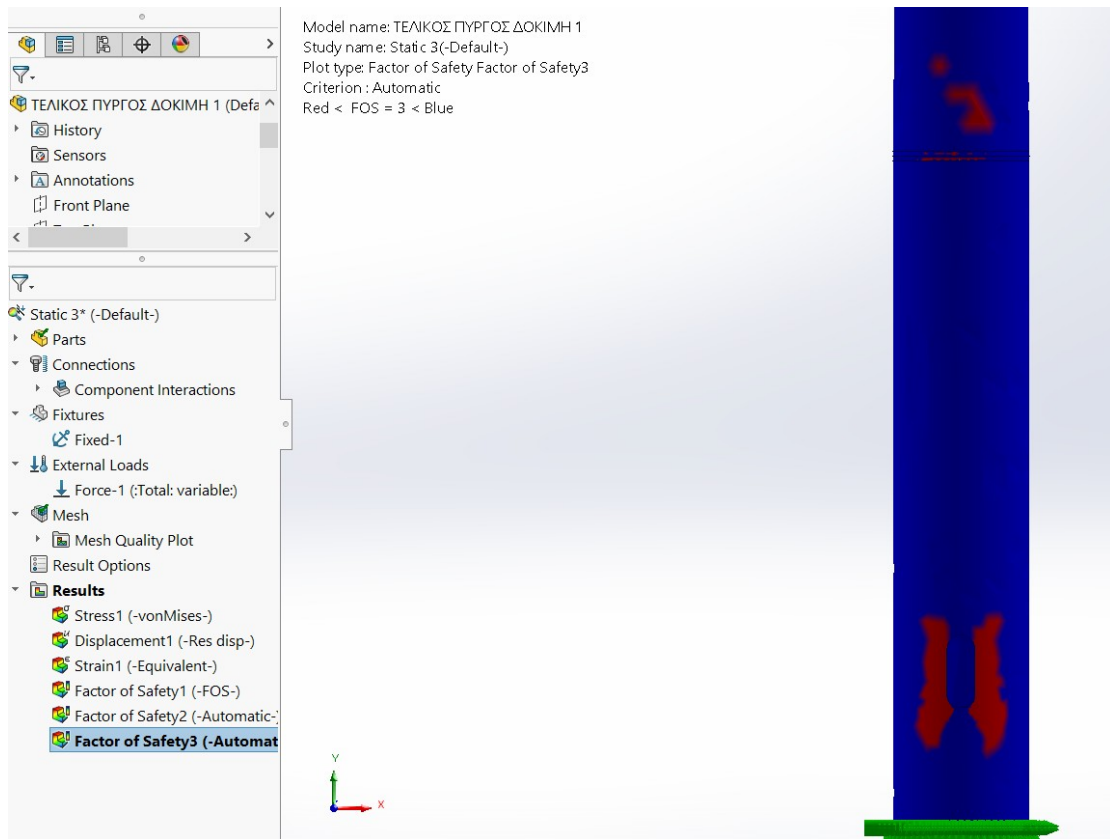


Εικόνα 5.5.42 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην 1η μεσαία φλάντζα, από την πίσω πλευρά της πόρτας.

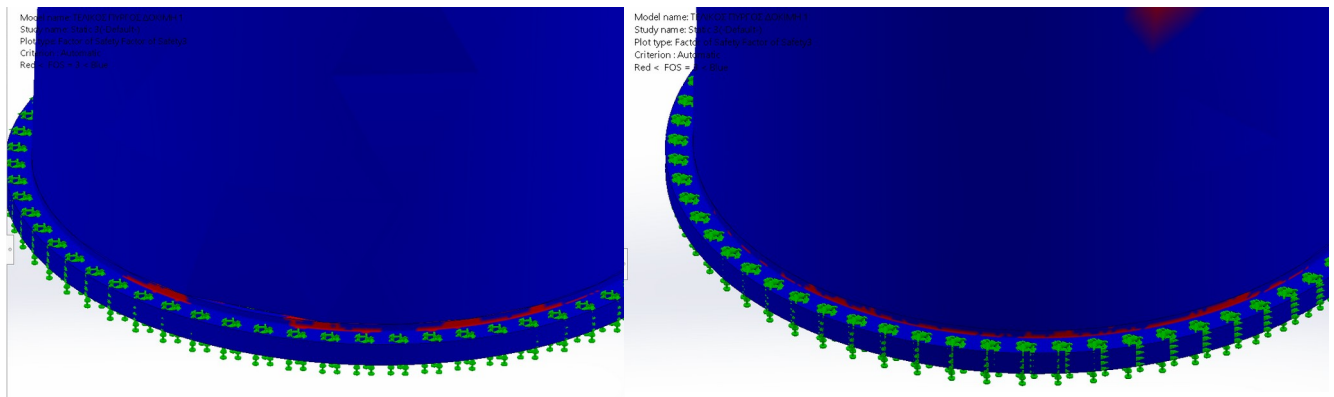


Εικόνα 5.5.43 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην φλάντζα της βάσης, από την πίσω πλευρά της πόρτας.

Με την ίδια μεθοδολογία ελέγχονται οι τάσεις και για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 3.



Εικόνα 5.5.44 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3 από την μπροστινή πλευρά των 90°.

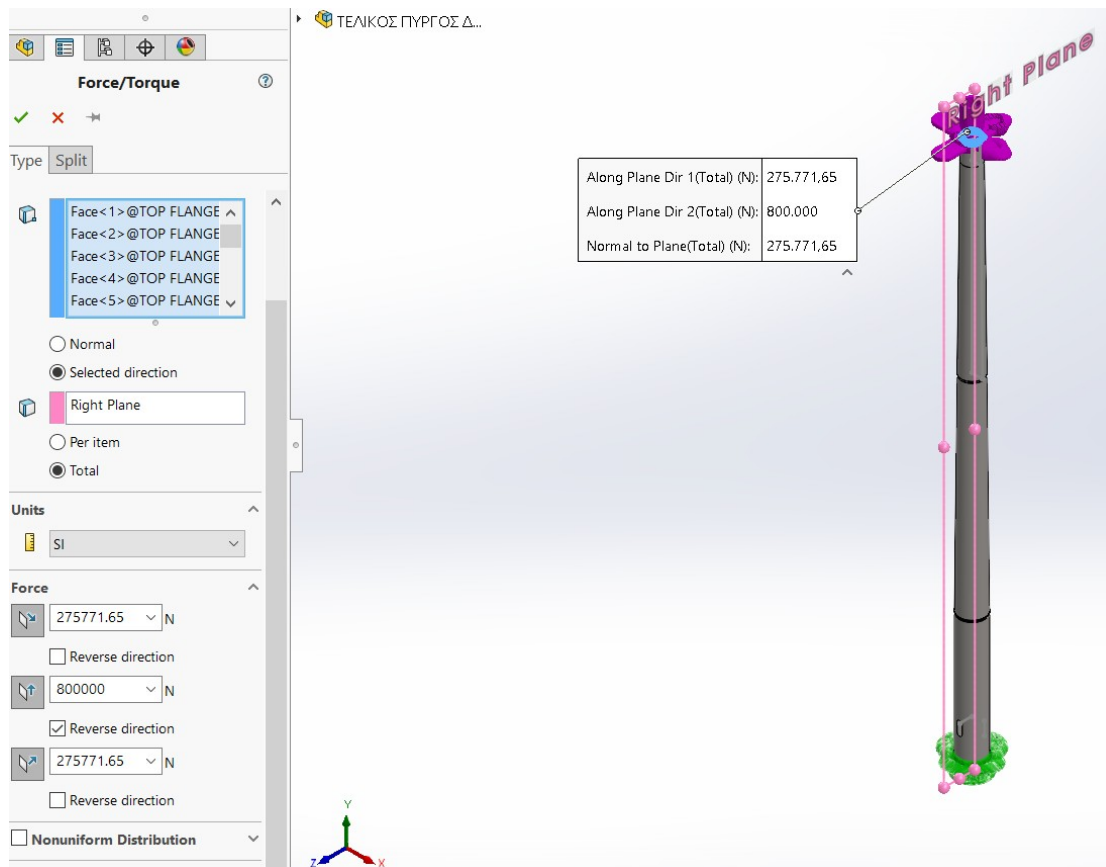


Εικόνα 5.5.45 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3, στην φλάντζα της βάσης. Αριστερή εικόνα από την πίσω πλευρά της πόρτας 270°. Δεξιά εικόνα από την μπροστά πλευρά της πόρτας 90°.

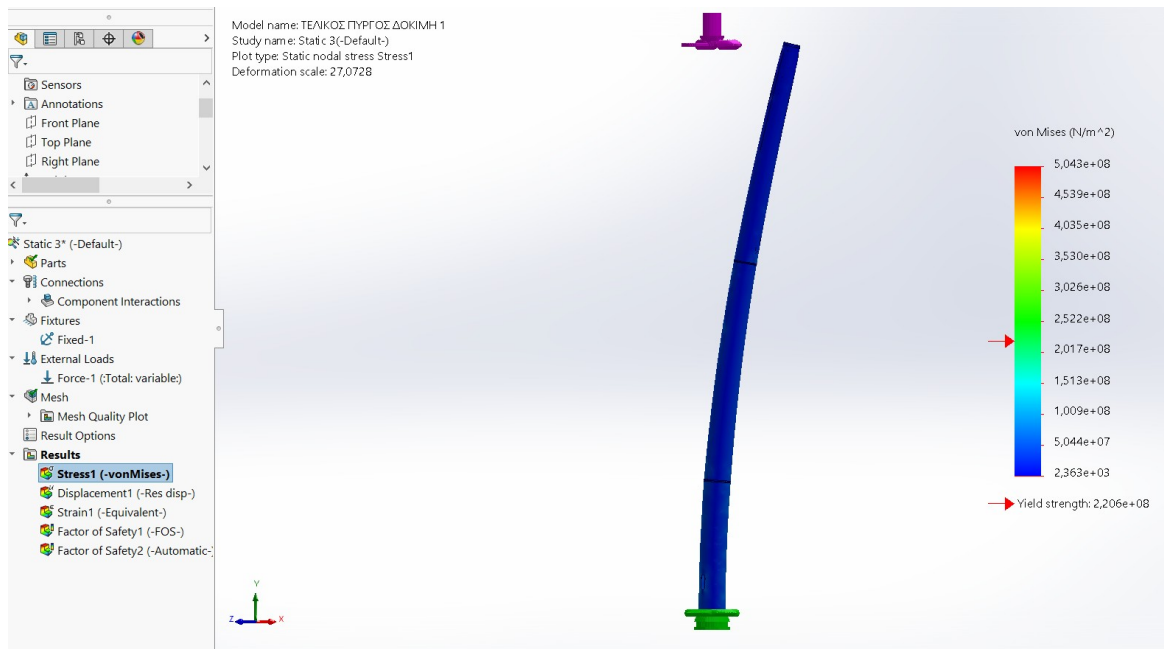
Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας τόσο αυξάνονται οι τάσεις. Επίσης παρατηρείται μια συμμετρία στην φλάντζα της βάσης.

- Φορτίο με κατεύθυνση από τις 45°

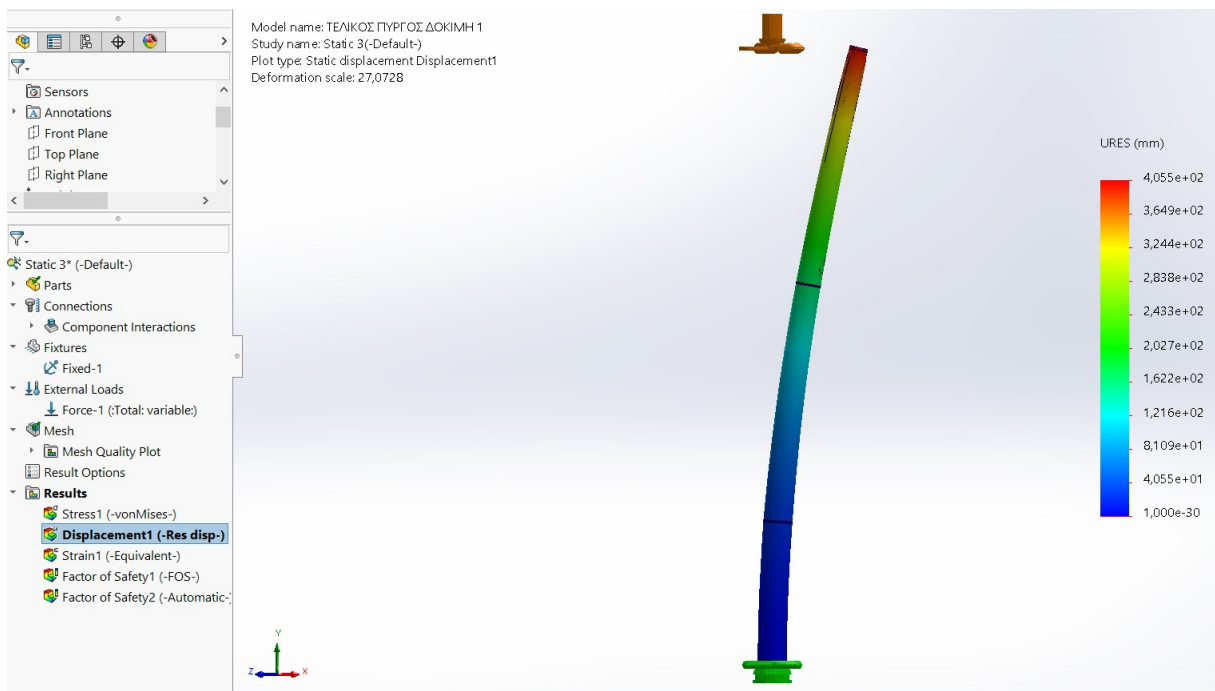
Για τις 45° υπολογίζουμε την συνιστώσα δύναμη όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα μεταξύ του x-z άξονα. Για τον υπολογισμό της συνιστώσας πολλαπλασιάζονται τα 390.000 kN με το ημίτινο των 45°, που ισούται με 275.771,65 kN. Επομένως για να έχουμε φορτίο 390.000 kN σε γωνία 45° αρκεί να τεθούν τα 275.771,65 στις διευθύνσεις του x-z άξονα.



Εικόνα 5.5.46 : Υπολογισμός συνιστώσας δύναμης για φόρτιση από τις 45°.

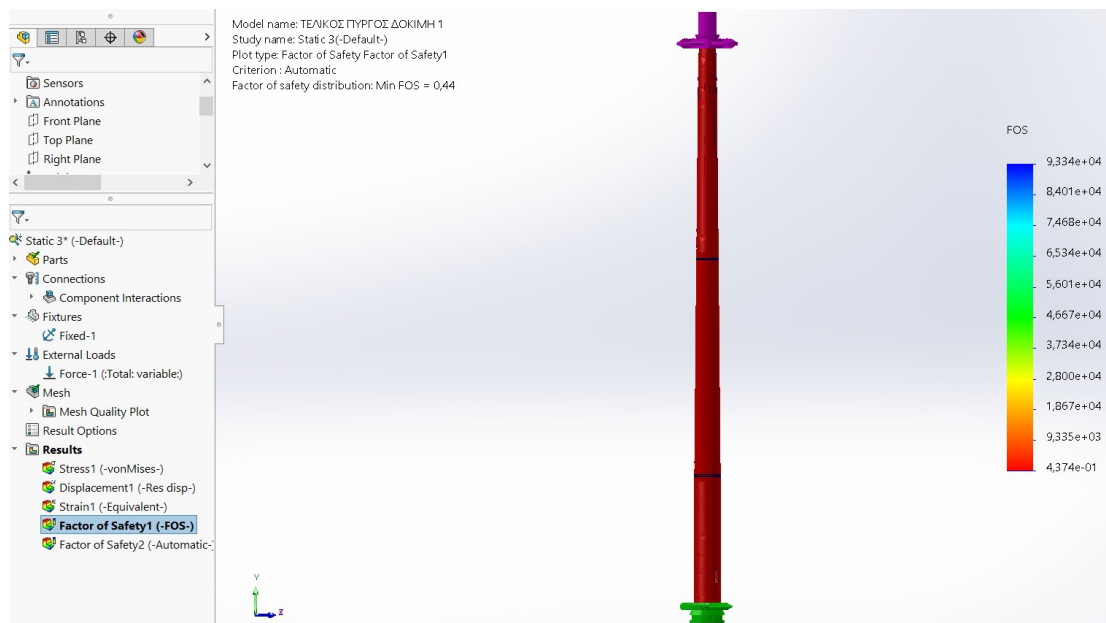


Εικόνα 5.5.47 : Κατανομή τάσεων και όριο διαρροής για φόρτιση από 45°.



Εικόνα 5.5.48 : Διάγραμμα μετατόπισης και συνολική παραμόρφωση του πύργου για φόρτιση από 45°, στιγμιότυπο από την δεξιά όψη της πόρτας.

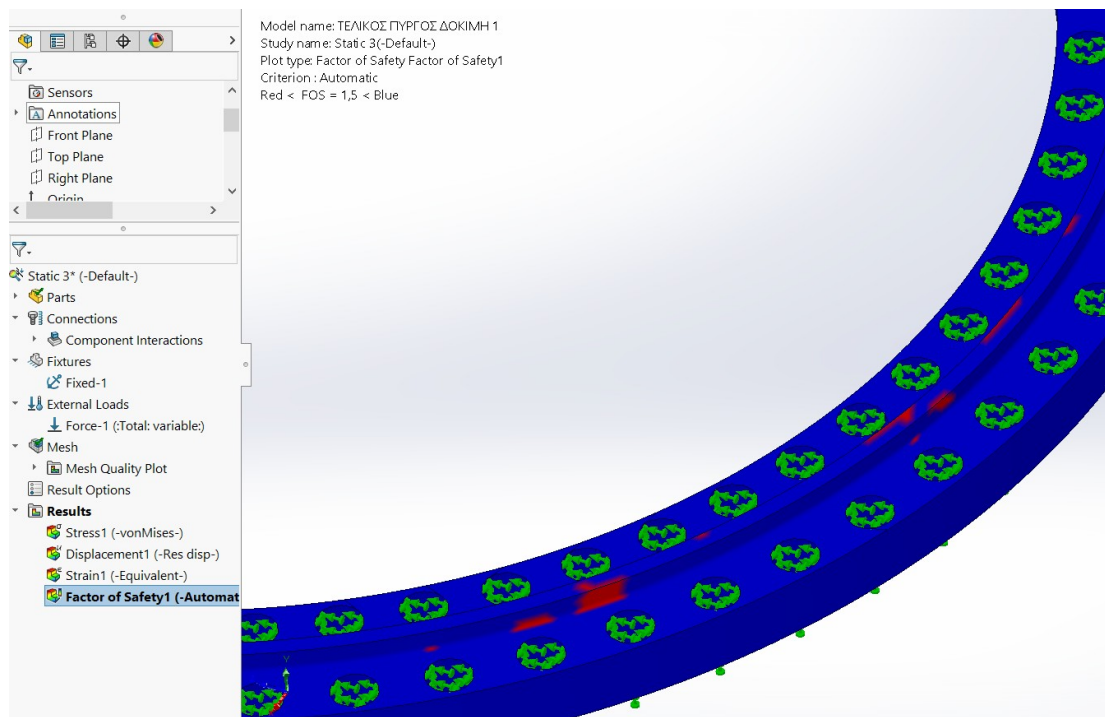
Παρατηρείται από την παραπάνω εικόνα ότι η συνολική μετατόπιση του πύργου είναι 405,5 mm.



Εικόνα 5.5.49 : Συντελεστής ασφαλείας για φόρτιση από 45°.

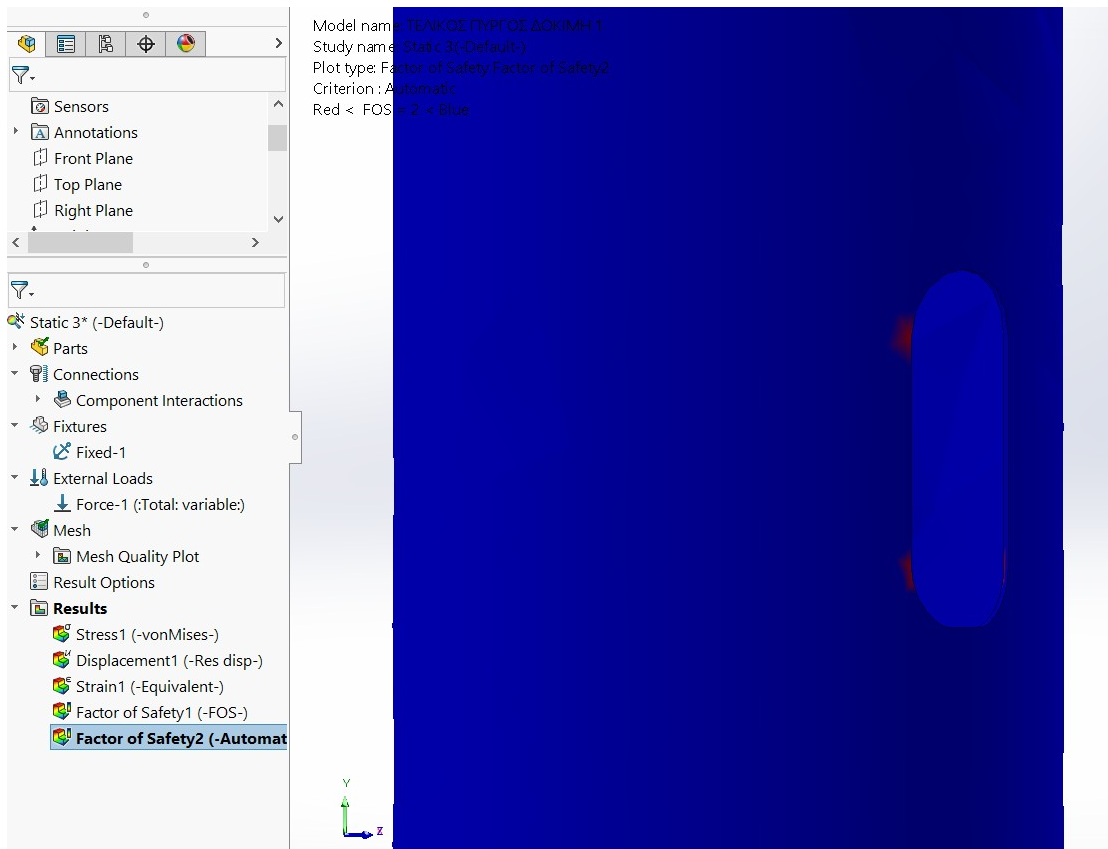
Ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0,44. Όμως αυτή η τιμή ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένα ασθενή σημεία του πύργου.

Έτσι τίθεται το πρόγραμμα να παρουσιάσει τα σημεία που έχουν συντελεστή ασφαλείας κάτω από 1,5 και παρακάτω παρουσιάζονται τα ασθενή σημεία.

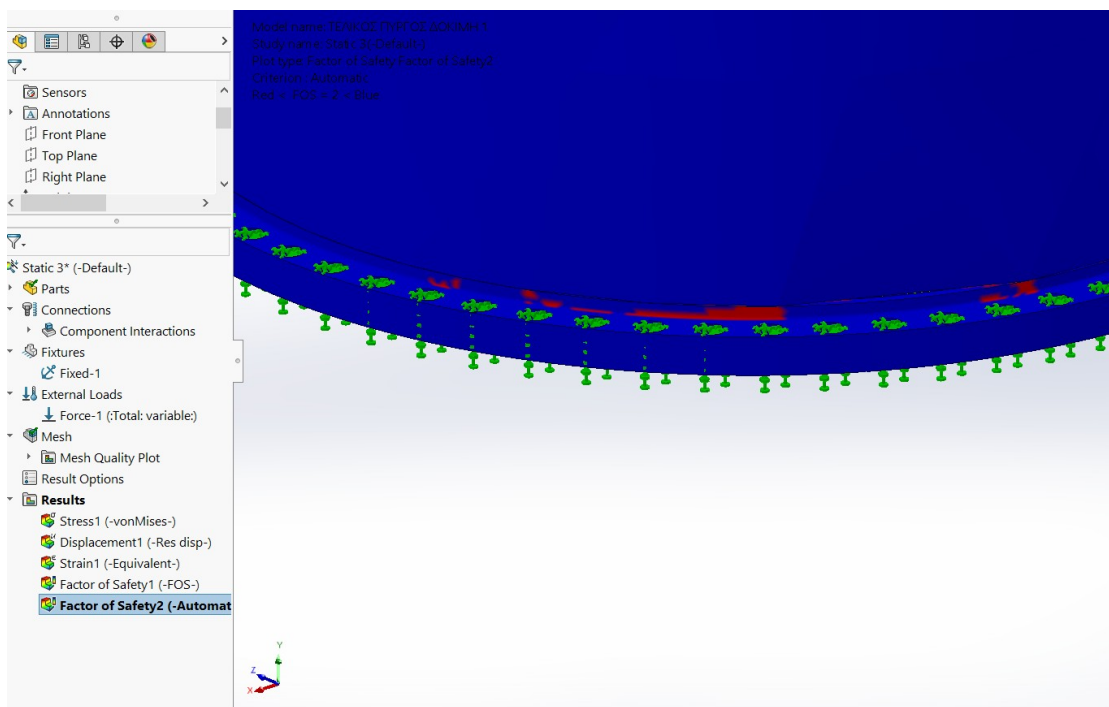


Εικόνα 5.5.50 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 1,5 στην φλάντζα της βάσης, όψη από τις 225°.

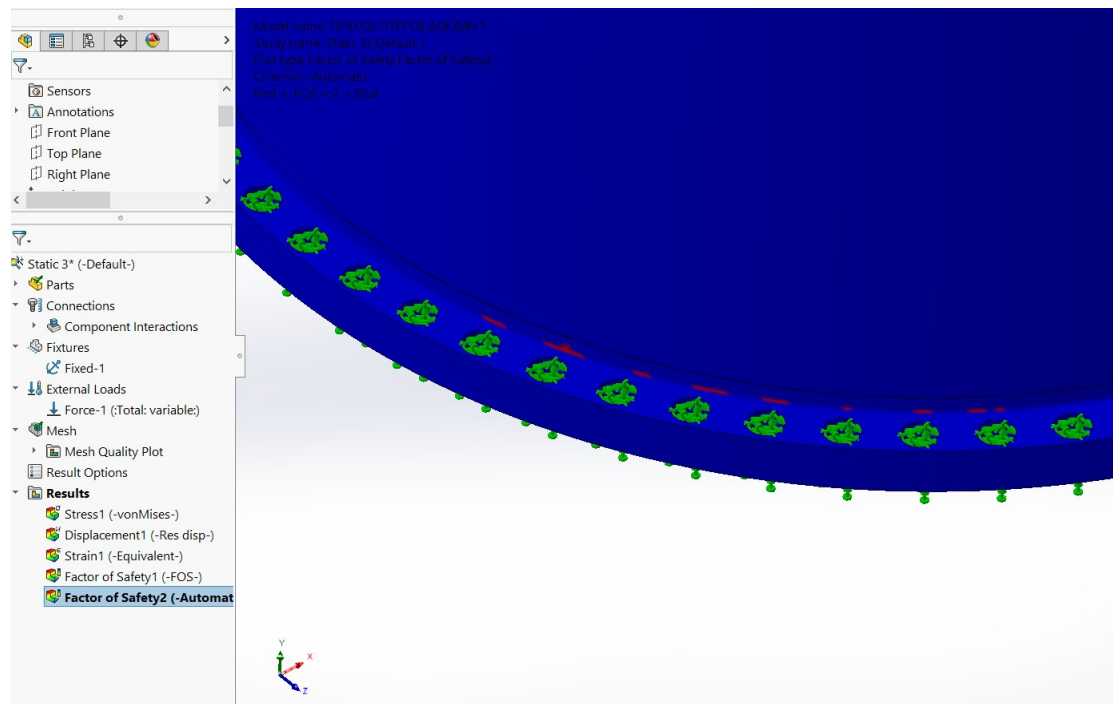
Με τον ίδιο τρόπο γίνεται εύρεση των σημείων που έχουν συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 2.



Εικόνα 5.5.51 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην πόρτα.

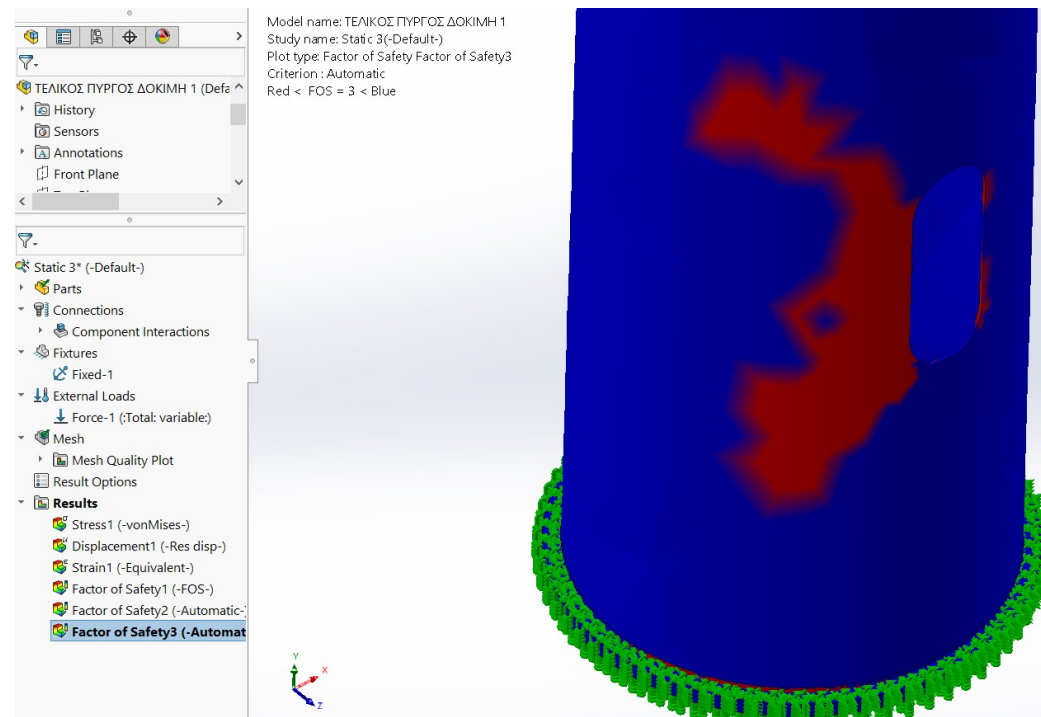


Εικόνα 5.5.52 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην βάση της φλάντζας, όψη από τις 225°.

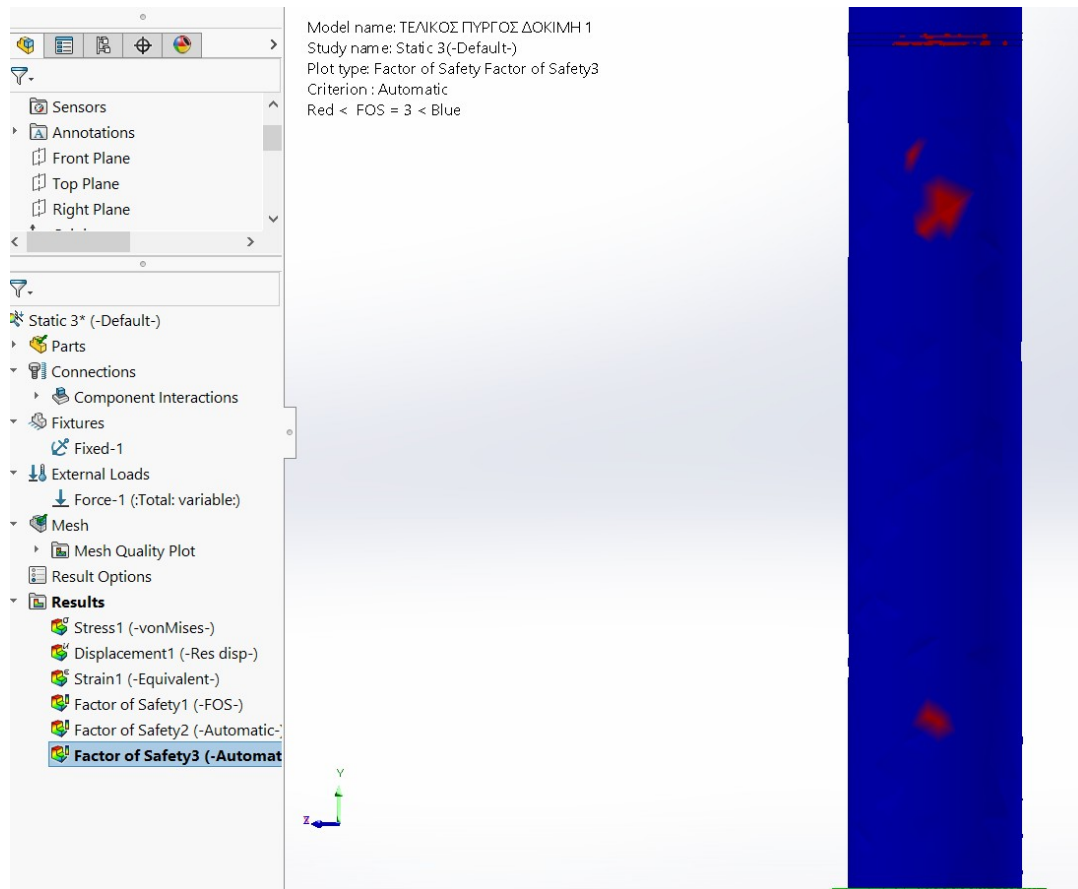


Εικόνα 5.5.53 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην βάση της φλάντζας, όψη από τις 45°.

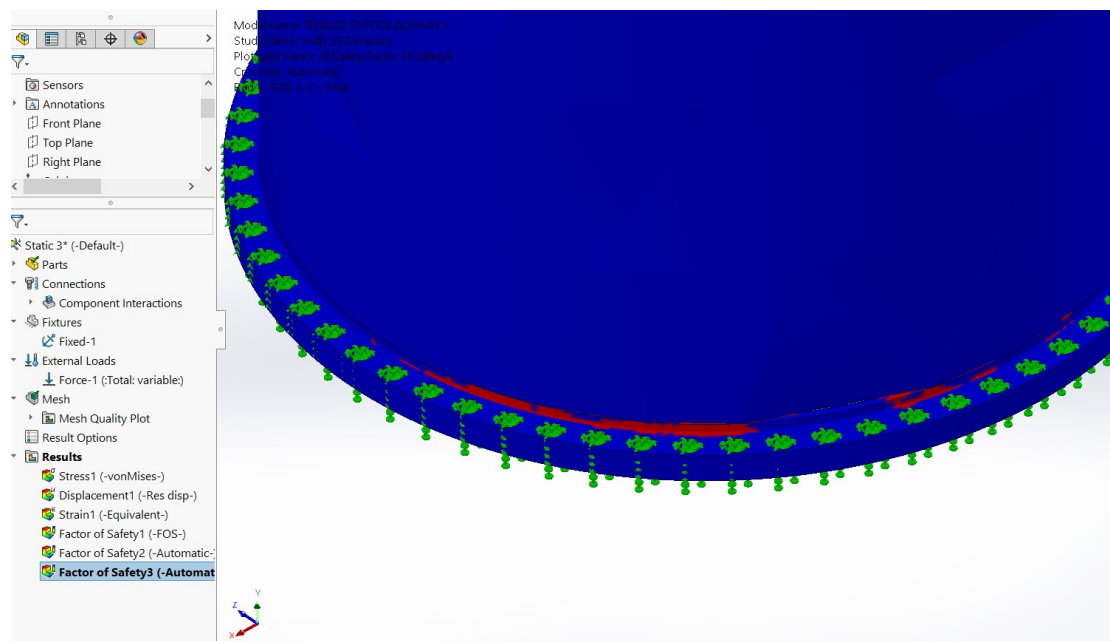
Με παρόμοιο τρόπο γίνεται εύρεση των σημείων για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 3.



Εικόνα 5.5.54 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3, όψη από τις 45°.



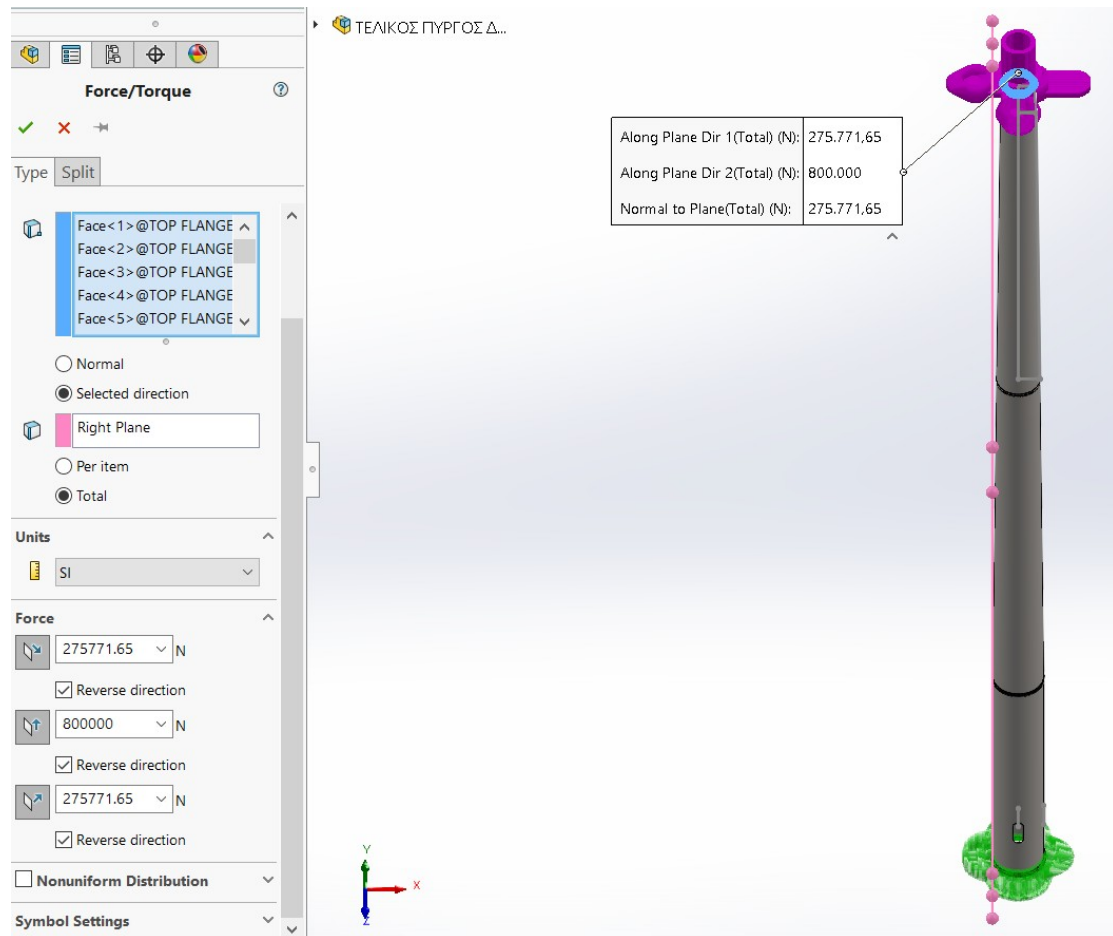
Εικόνα 5.5.55 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3, όψη από τις 225°.



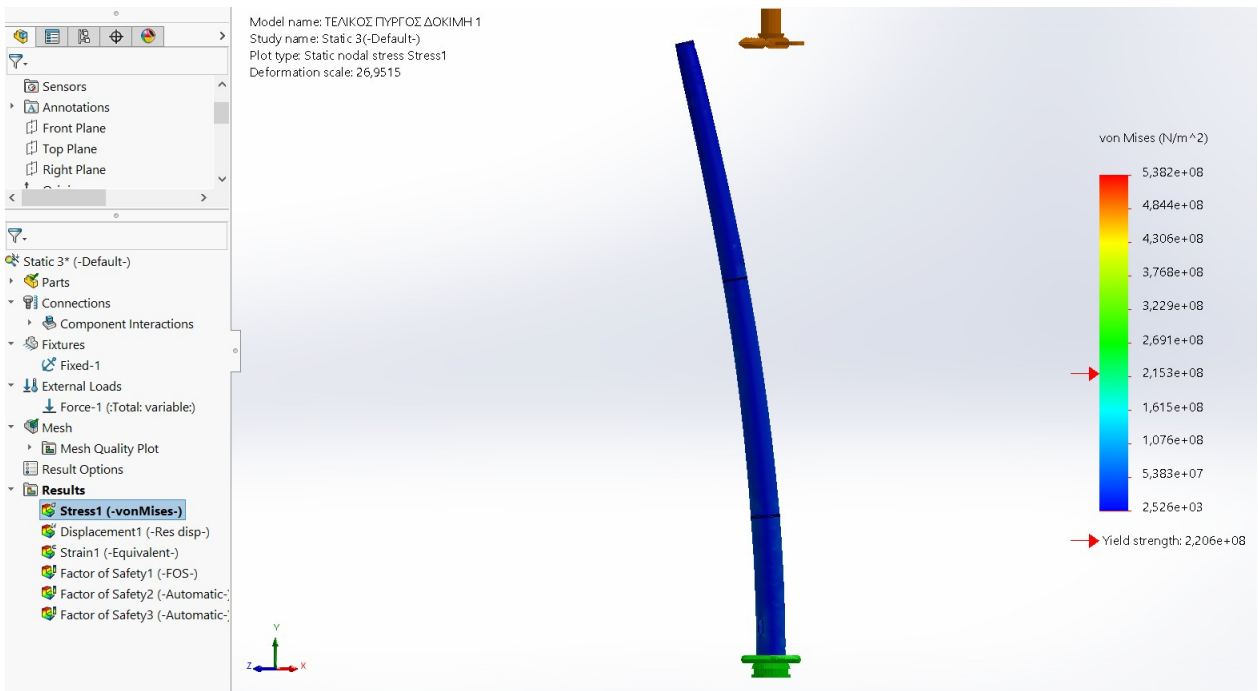
Εικόνα 5.5.56 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3 στην φλάντζα της βάσης, όψη από τις 225°.

- Φορτίο με κατεύθυνση από τις 225°

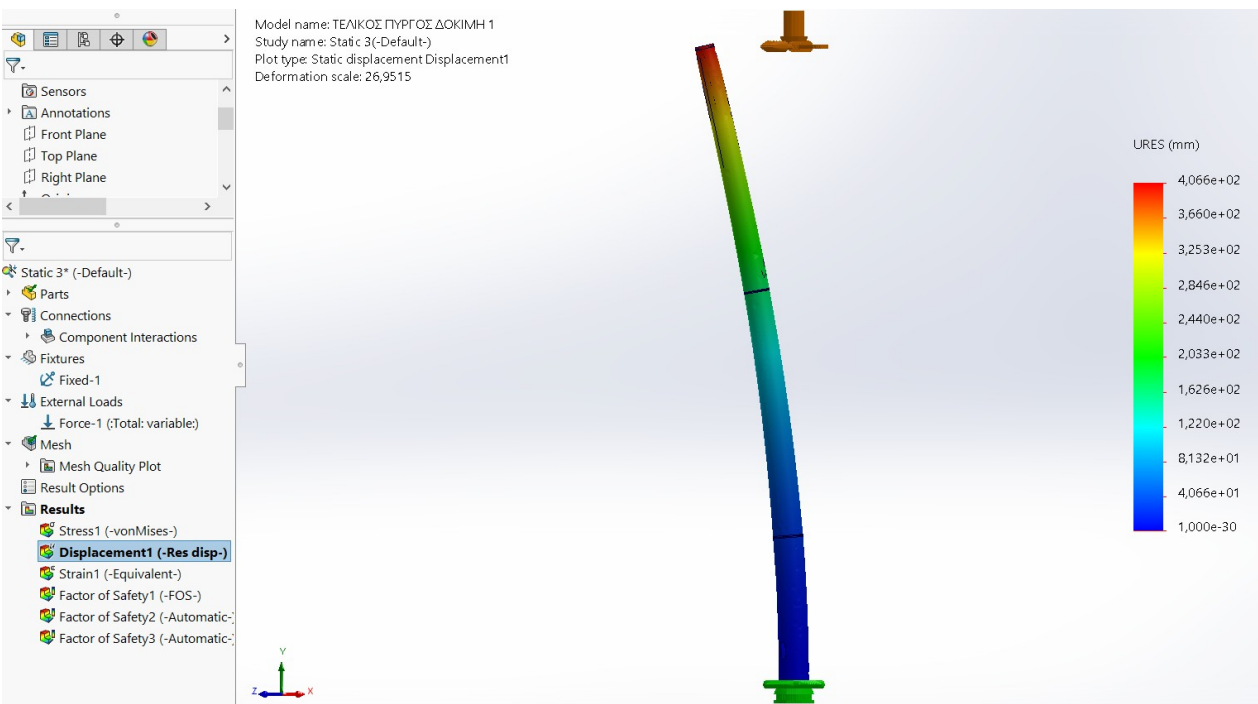
Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται για την αντίθετη γωνία των 225° το φορτίο.



Εικόνα 5.5.57 : Υπολογισμός συνιστώσας δύναμης για φόρτιση από τις 225°.

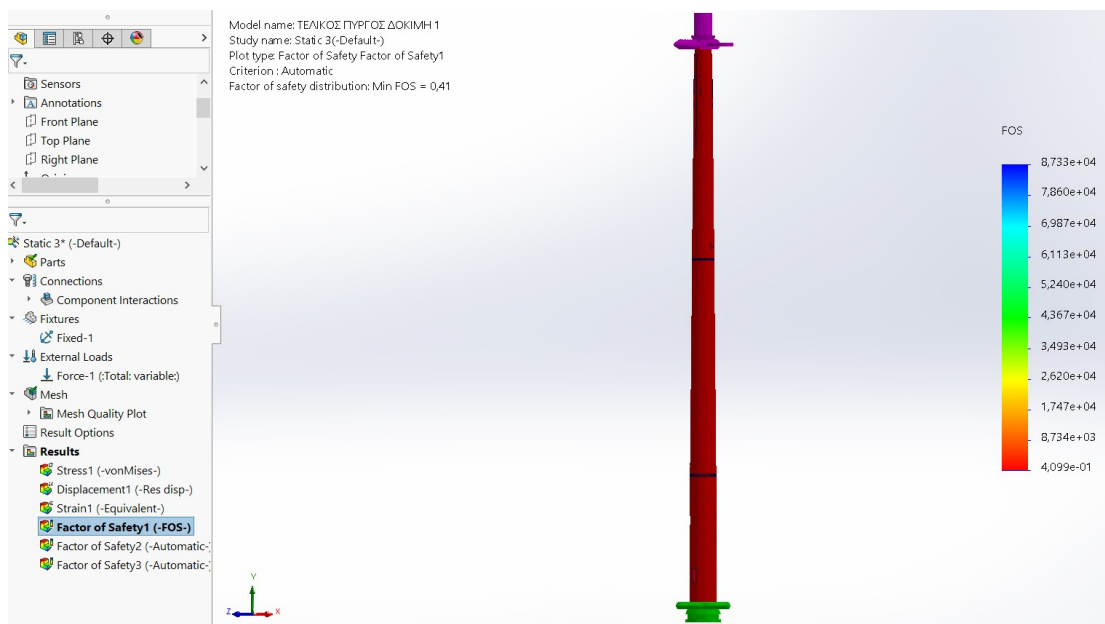


Εικόνα 5.5.58 : Κατανομή τάσεων και όριο διαρροής για φόρτιση από 225°.



Εικόνα 5.5.59 : Διάγραμμα μετατόπισης και συνολική παραμόρφωση του πύργου για φόρτιση από 225°, στιγμιότυπο από την δεξιά όψη της πόρτας.

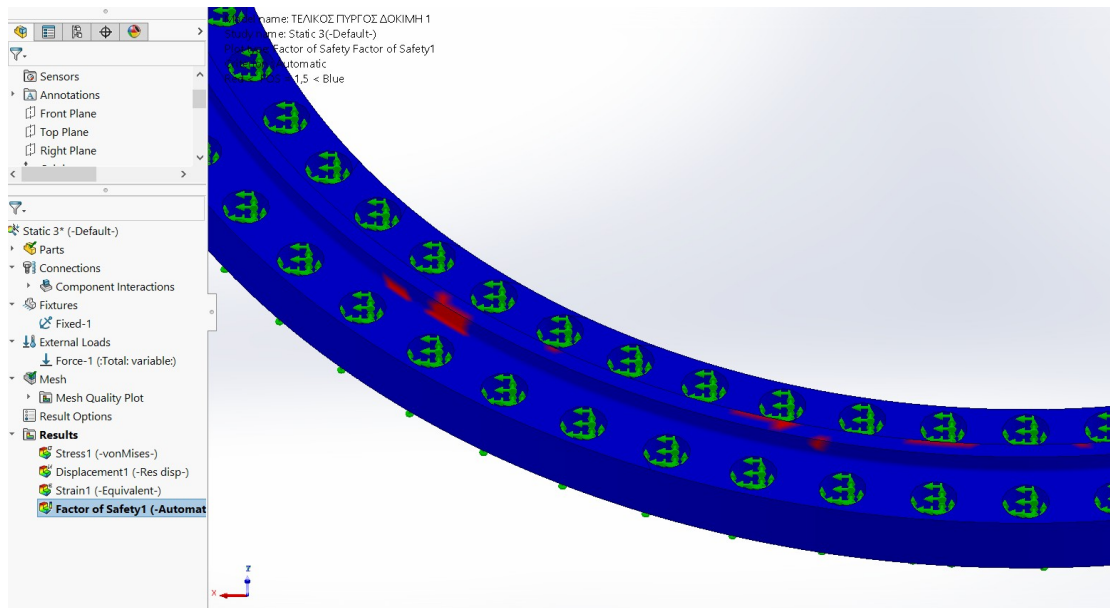
Παρατηρείται από την παραπάνω εικόνα ότι η συνολική μετατόπιση του πύργου είναι 406,6 mm.



Εικόνα 5.5.60 : Συντελεστής ασφαλείας για φόρτιση από 225°.

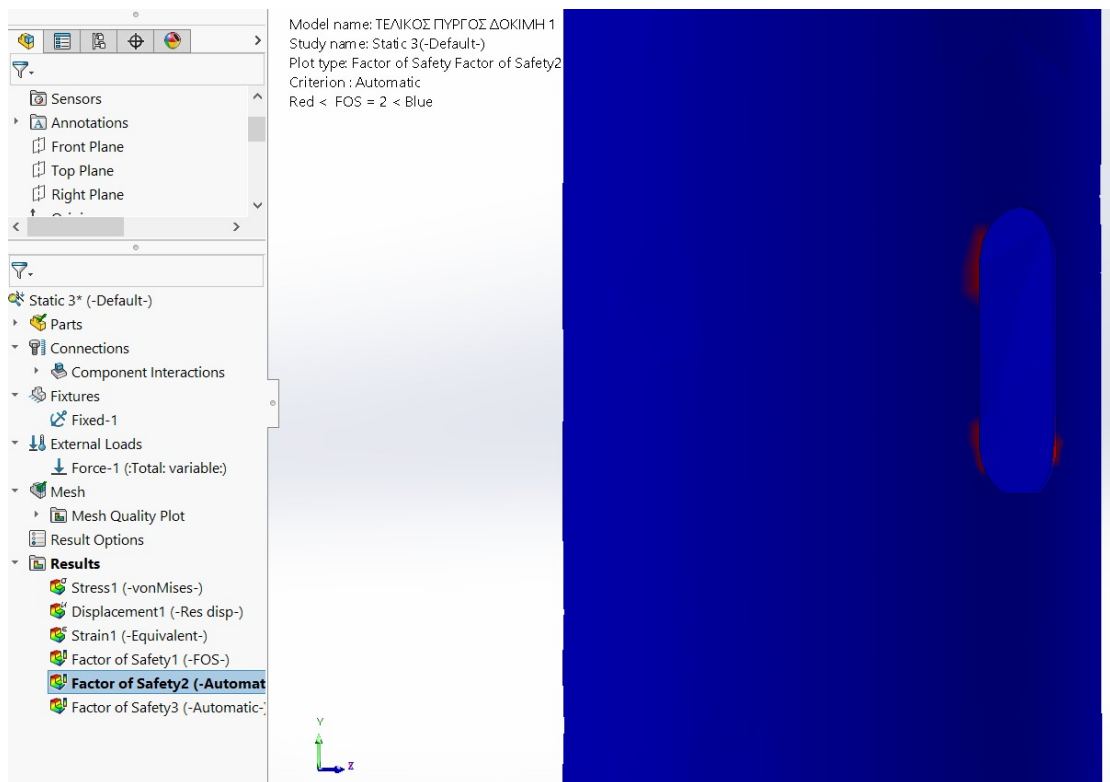
Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0,41. Όμως όπως παρουσιάζεται και παρακάτω αυτή η τιμή ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένα ασθενή σημεία του πύργου.

Έτσι τίθεται το πρόγραμμα να παρουσιάσει τα σημεία που έχουν συντελεστή ασφαλείας κάτω από 1,5 και παρακάτω παρουσιάζονται τα ασθενή σημεία.

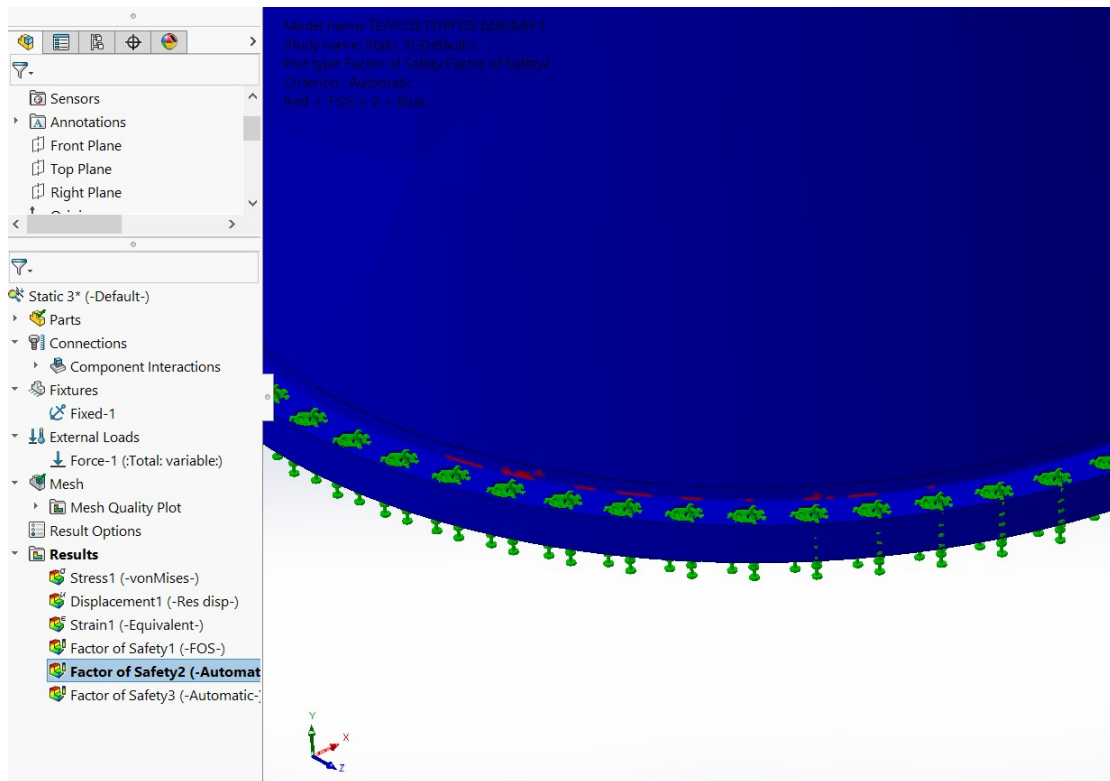


Εικόνα 5.5.61 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 1,5 στην φλάντζα της βάσης, όψη από τις 225°.

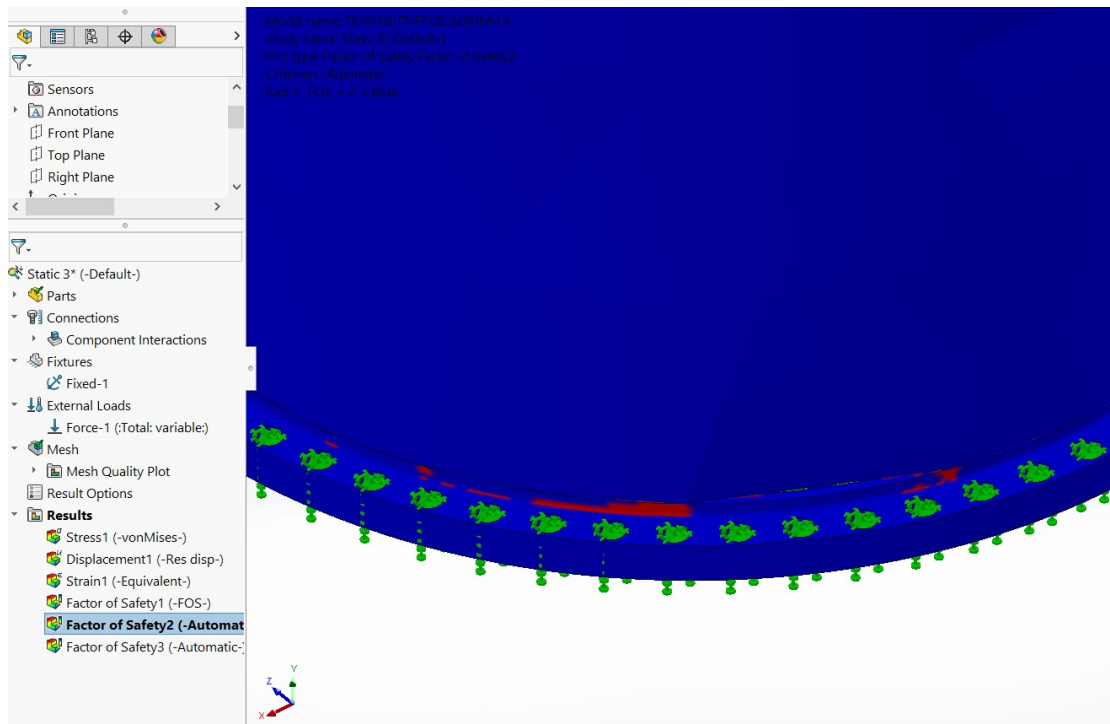
Παρομοίως γίνεται η εύρεση των ασθενών σημείων για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 2.



Εικόνα 5.5.62 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2 στην πόρτα.

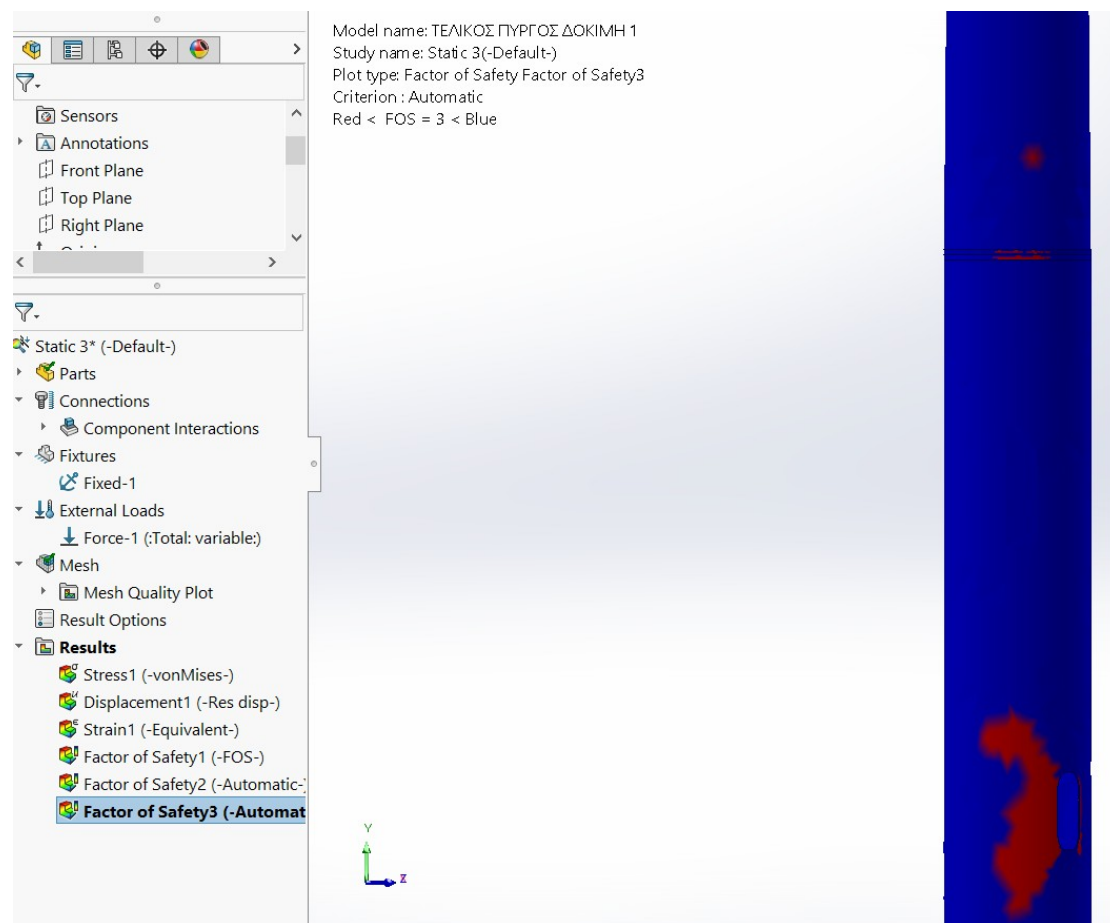


Εικόνα 5.5.63 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2 στην φλάντζα της βάσης, όψη από τις 45°.

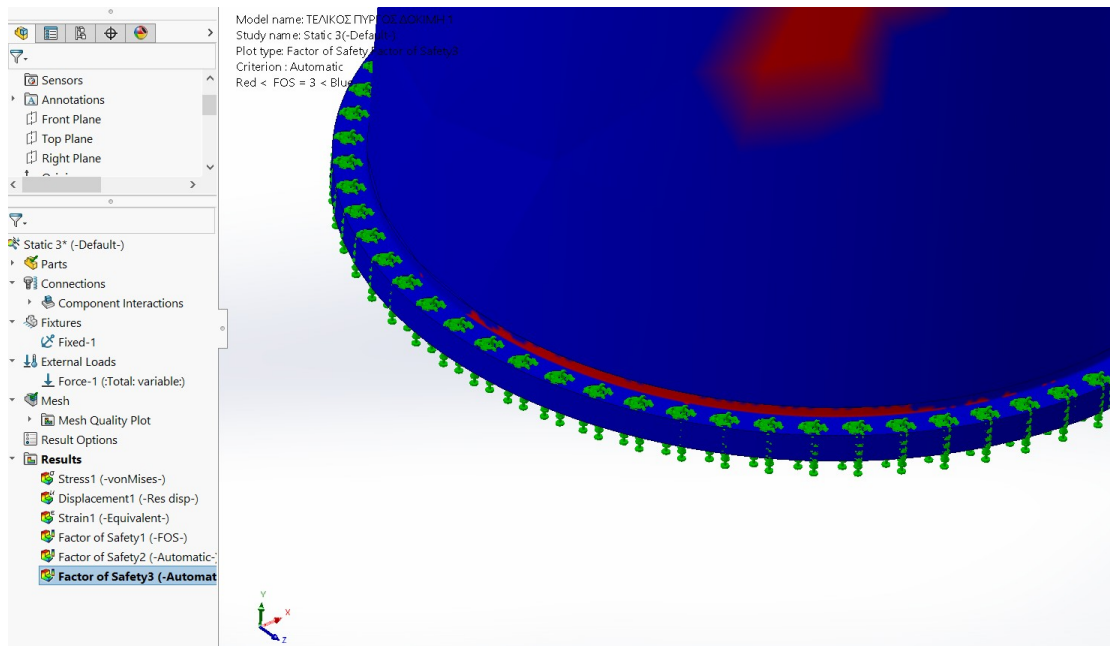


Εικόνα 5.5.64 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2 στην φλάντζα της βάσης, όψη από τις 225°.

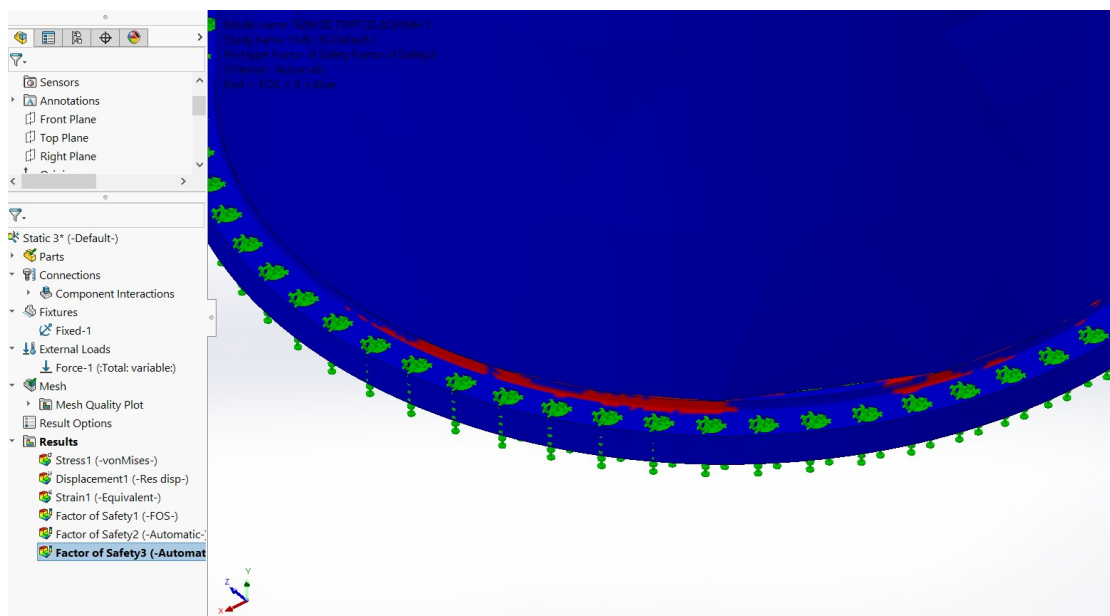
Για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 3 παρουσιάζονται τα παρακάτω αποτελέσματα.



Εικόνα 5.5.65 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3, όψη από τις 45°.



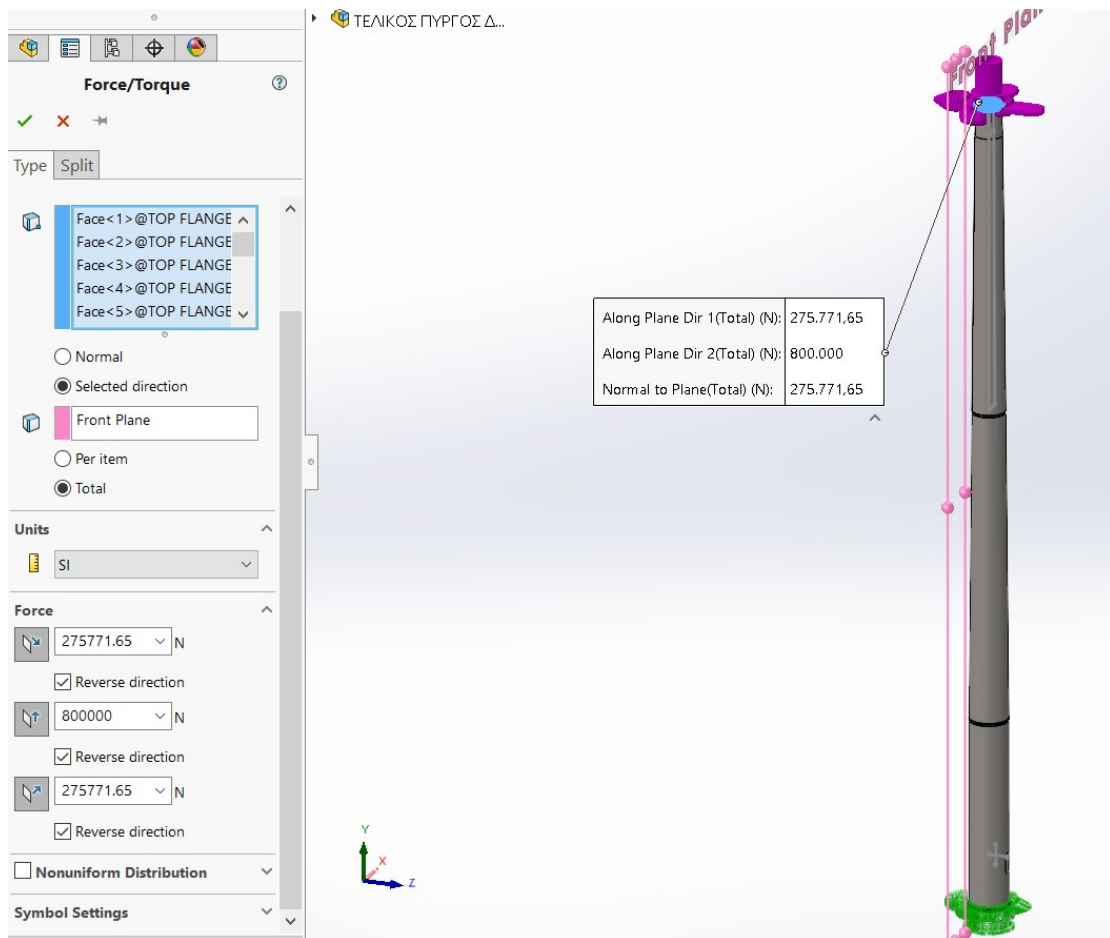
Εικόνα 5.5.66 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3 στην φλάντζα της βάσης, όψη από τις 45°.



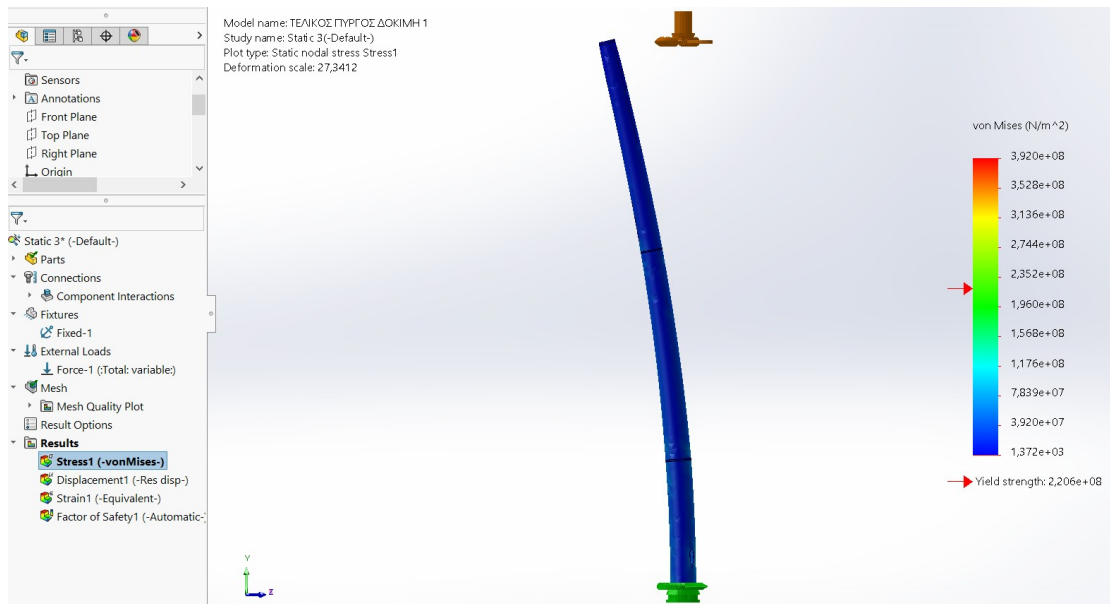
Εικόνα 5.5.67 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3 στην φλάντζα της βάσης, όψη από τις 225°.

Συμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται η τιμή του συντελεστή ασφαλείας, τόσο αυξάνονται και οι τάσεις. Επίσης, υπάρχει μια συμμετρία όταν τα φορτία ασκούνται σε αντιδιαμετρικά σημεία. Έτσι συγκρίνοντας τις 45° με τις 225° φαίνεται ότι εμφανίζουν τις ίδιες τάσεις, με χαρακτηριστικό το παράδειγμα της πόρτας.

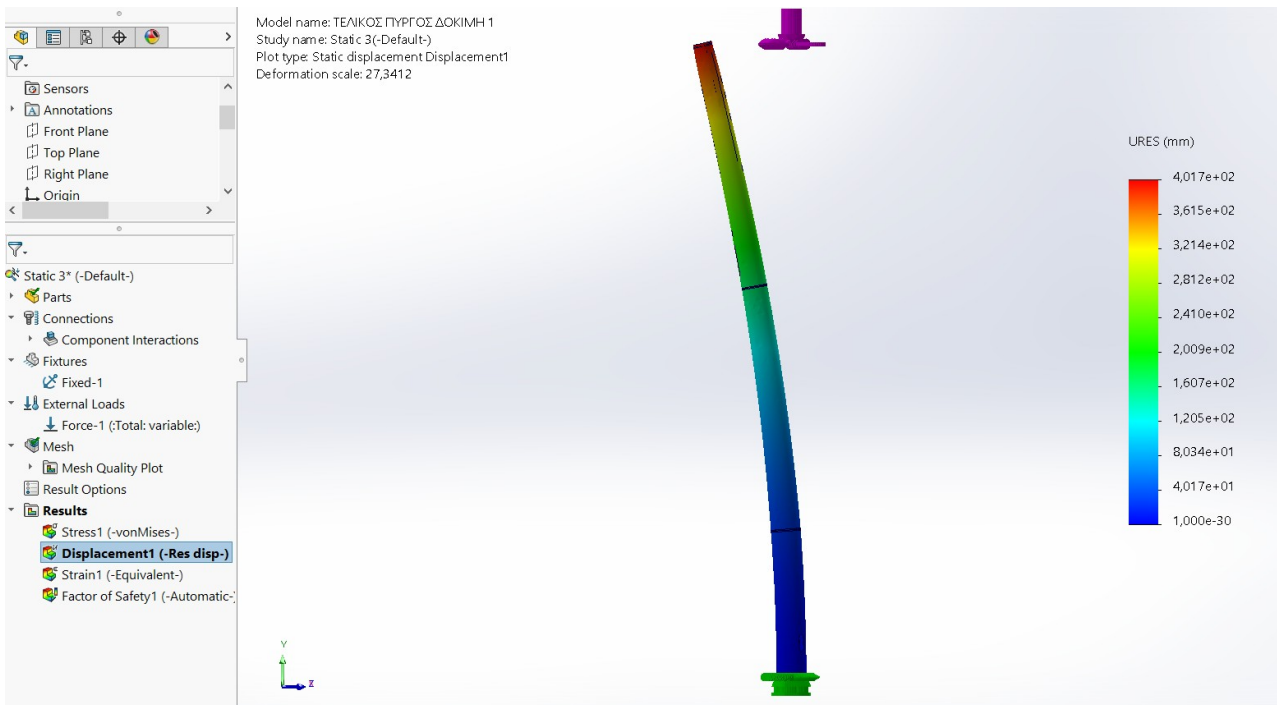
- Φορτίο με κατεύθυνση από τις 135°



Εικόνα 5.5.68 : Υπολογισμός συνιστώσας δύναμης για φόρτιση από τις 135°.

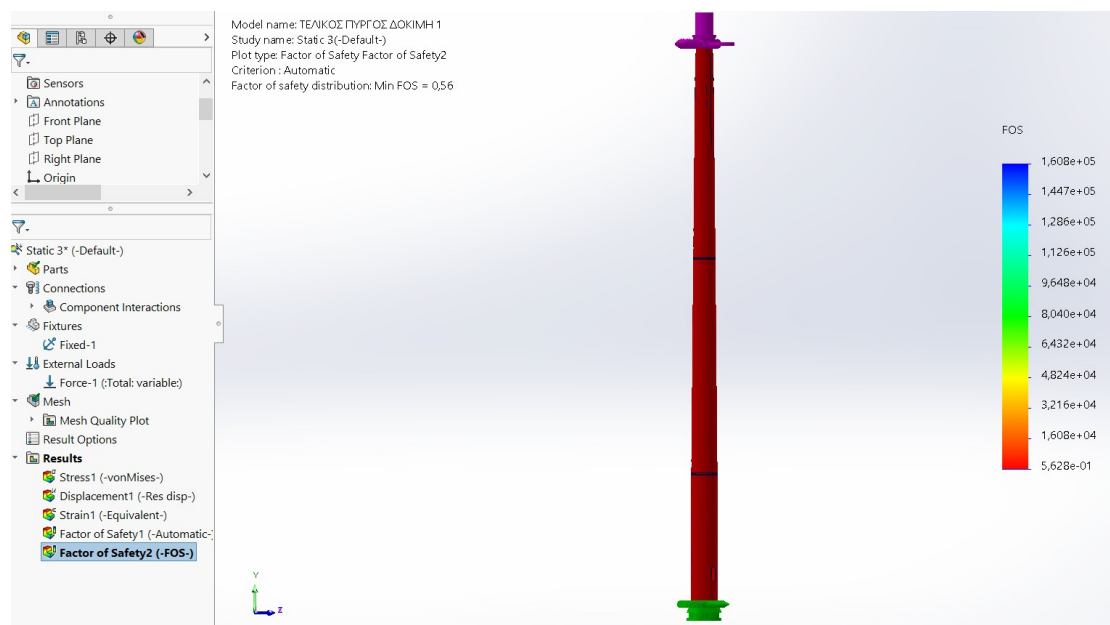


Εικόνα 5.5.69 : Κατανομή τάσεων και όριο διαρροής για φόρτιση από 135°.



Εικόνα 5.5.70 : Διάγραμμα μετατόπισης και συνολική παραμόρφωση του πύργου για φόρτιση από 135°, στιγμιότυπο από την αριστερή όψη της πόρτας.

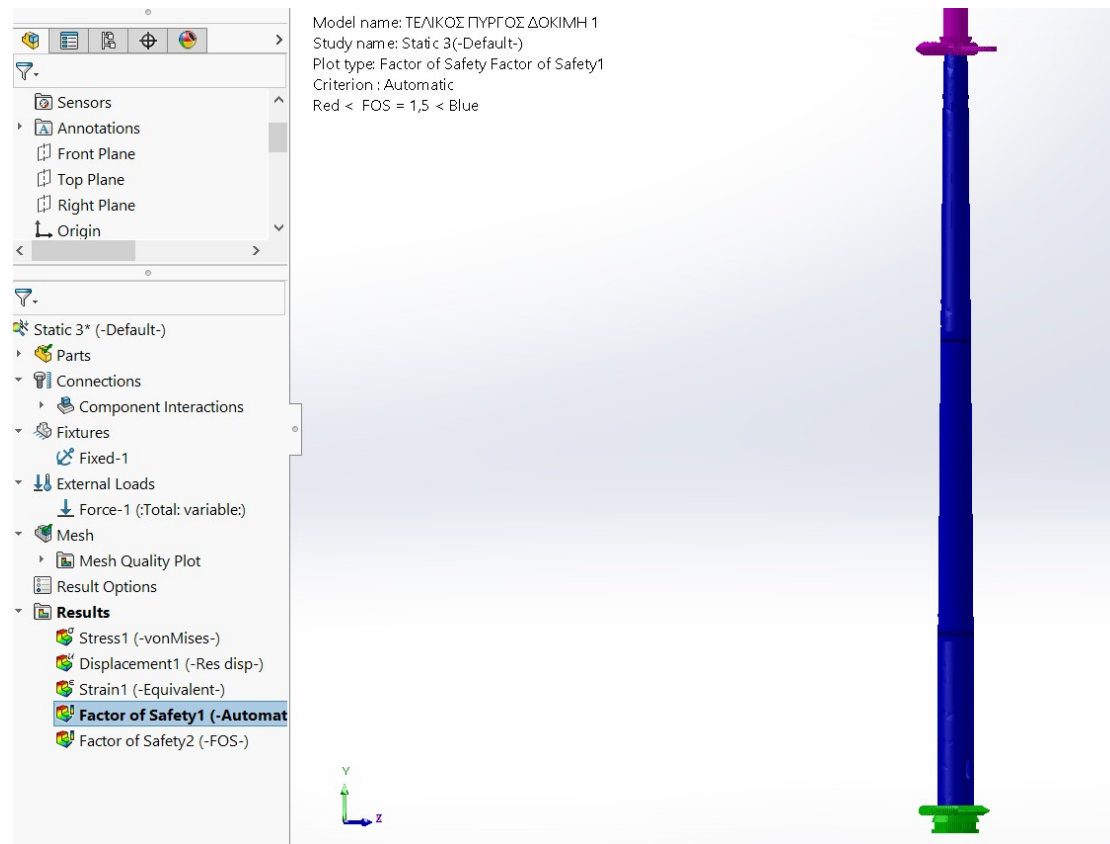
Παρατηρείται από την παραπάνω εικόνα ότι η συνολική μετατόπιση του πύργου είναι 401,7 mm.



Εικόνα 5.5.71 : Συντελεστής ασφαλείας για φόρτιση από 135°.

Ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0,56. Όμως αυτή η τιμή ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένα ασθενή σημεία του πύργου.

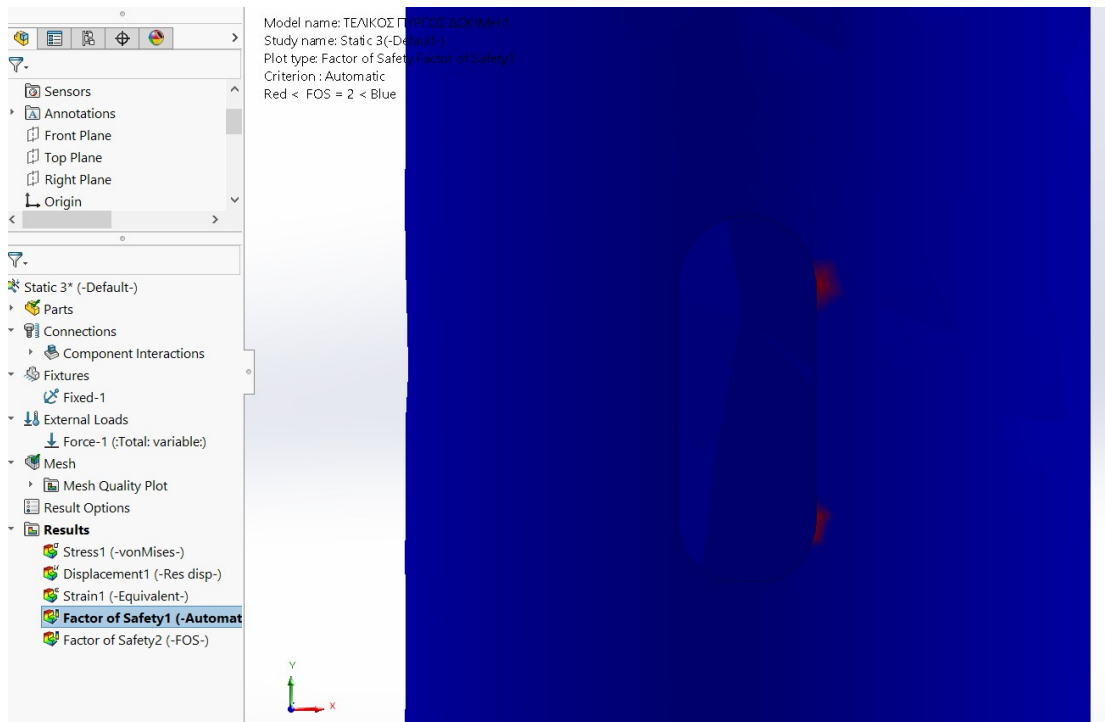
Έτσι τίθεται το πρόγραμμα να παρουσιάσει τα σημεία που έχουν συντελεστή ασφαλείας κάτω από 1,5 και παρακάτω παρουσιάζονται τα ασθενή σημεία.



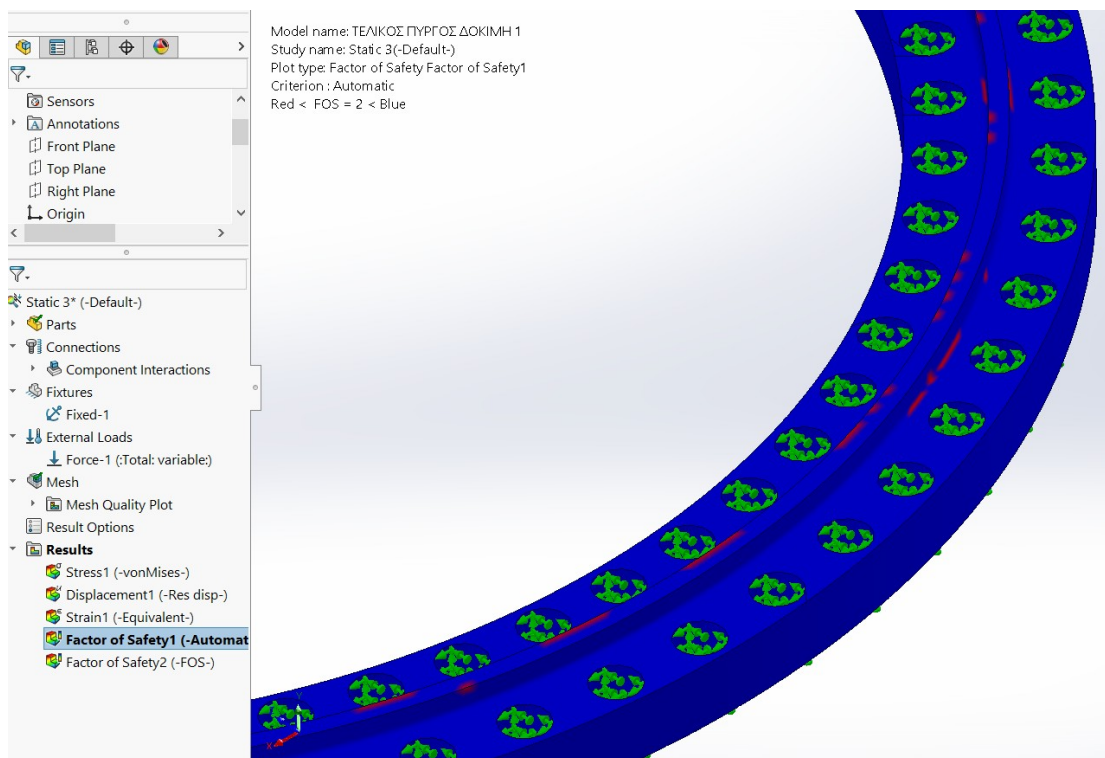
Εικόνα 5.5.72 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 1,5 όψη από τις 135°.

Μετά από πολλές μεγεθύνσεις δεν παρατηρείται κάποιο ασθενές σημείο, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι ο πύργος για φόρτιση από τις 135° δεν εμφανίζει υψηλές τάσεις για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 1,5.

Παρομοίως ακολουθείται η ίδια διαδικασία για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 2 και παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



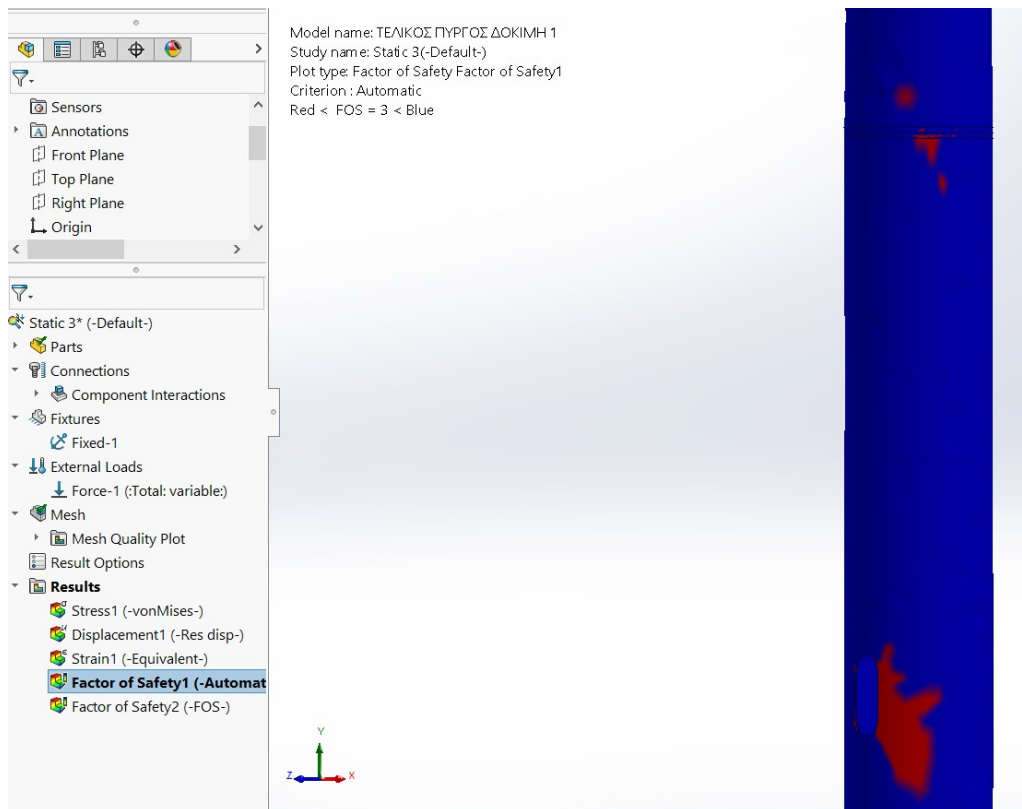
Εικόνα 5.5.73 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2, στην πόρτα.



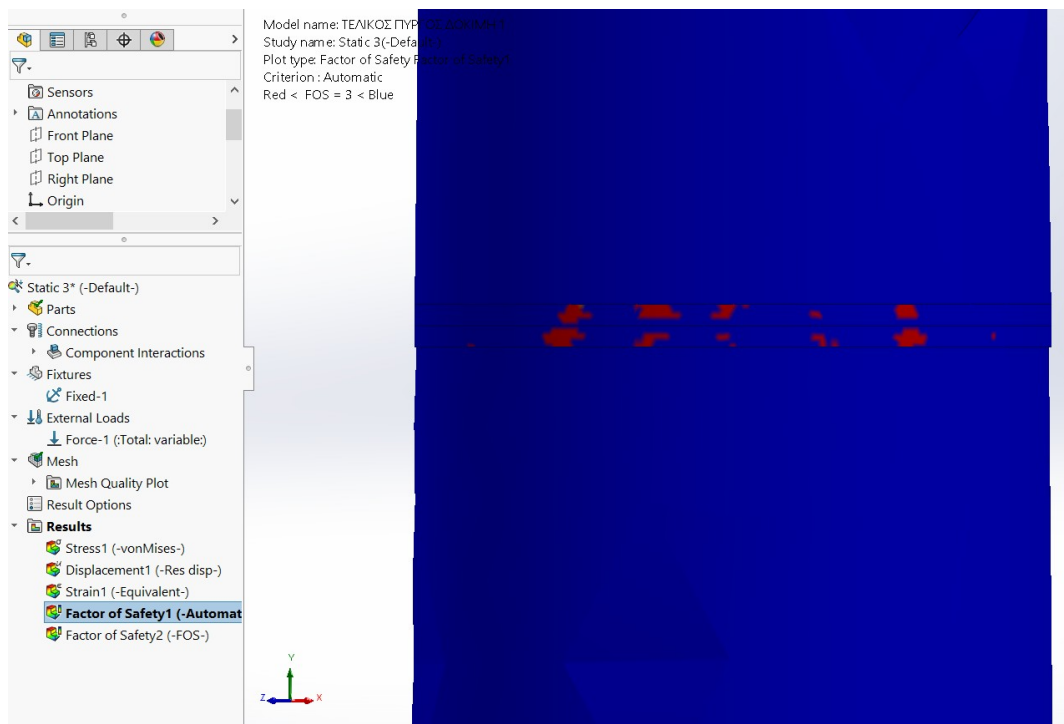
Εικόνα 5.5.74 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2 στην φλάντζα της βάσης, όψη από τις 135°.

Παρατηρείται ότι για φόρτιση από τις 135° και για συντελεστή μικρότερο του 2, ο πύργος δεν εμφανίζει πολύ υψηλές τάσεις.

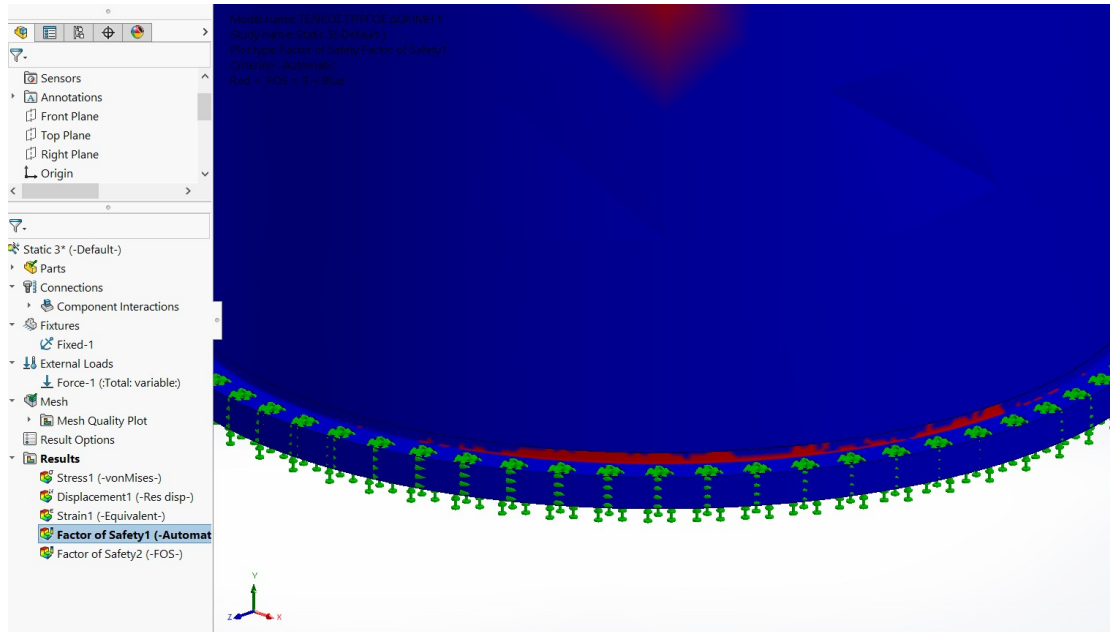
Για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 3, παρατηρείται όπως θα δούμε και παρακάτω ότι οι τάσεις αυξάνονται.



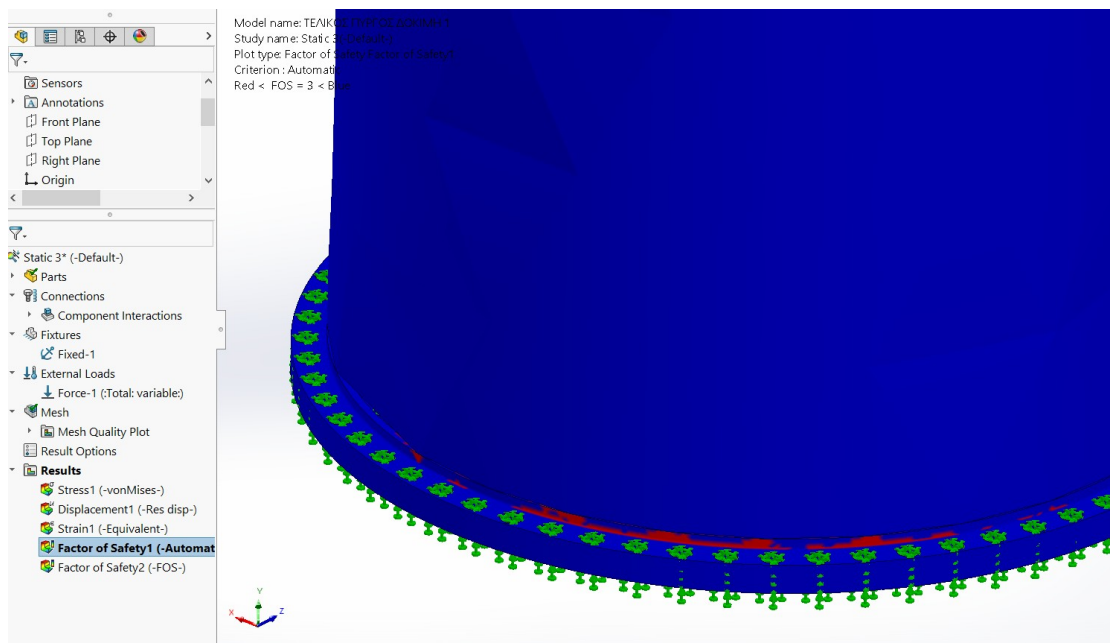
Εικόνα 5.5.75 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3, όψη από τις 135°.



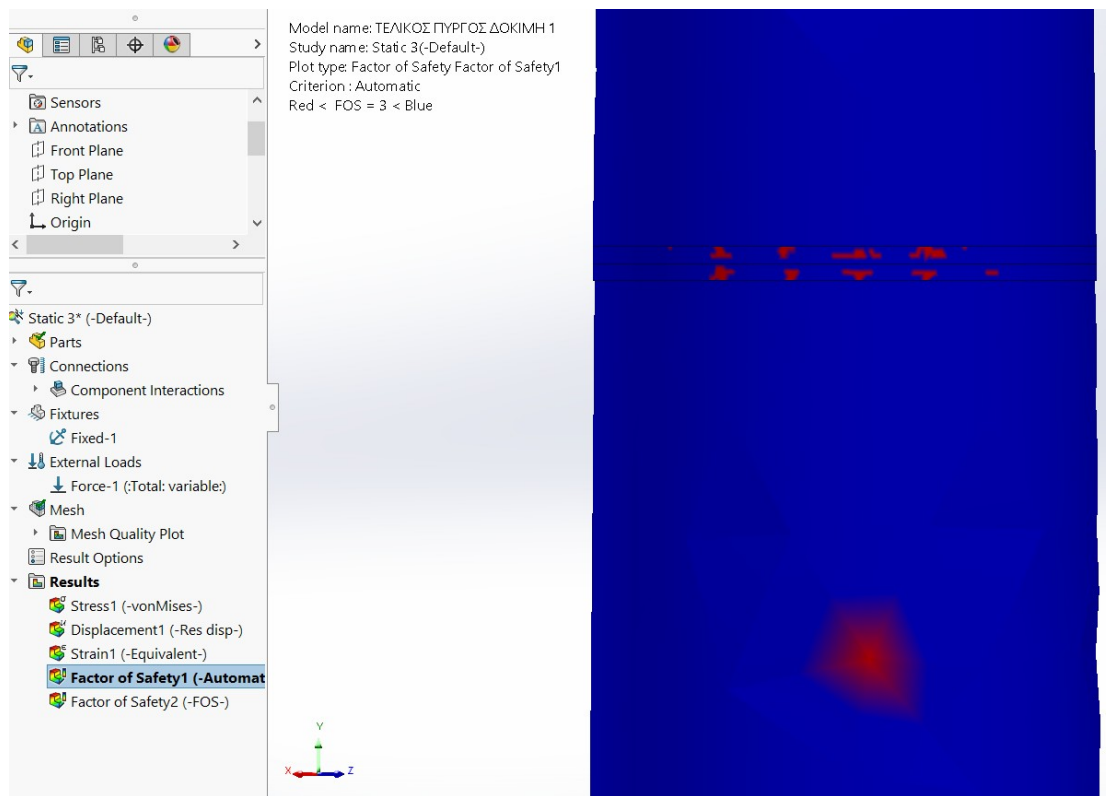
Εικόνα 5.5.76 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3 στην 2η μεσαία φλάντζα, όψη από τις 135°.



Εικόνα 5.5.77 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3 στην φλάντζα της βάσης, όψη από τις 135°.



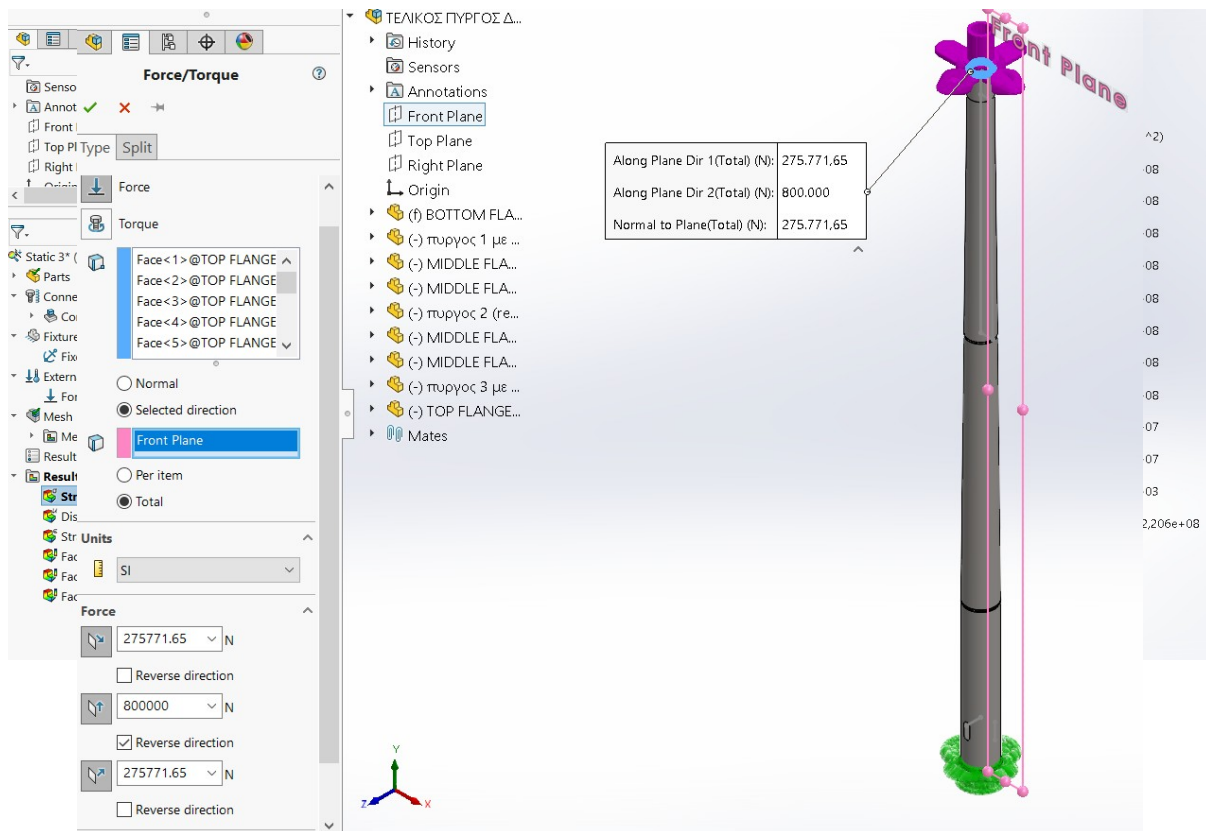
Εικόνα 5.5.78 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3 στην φλάντζα της βάσης, όψη από τις 315°.



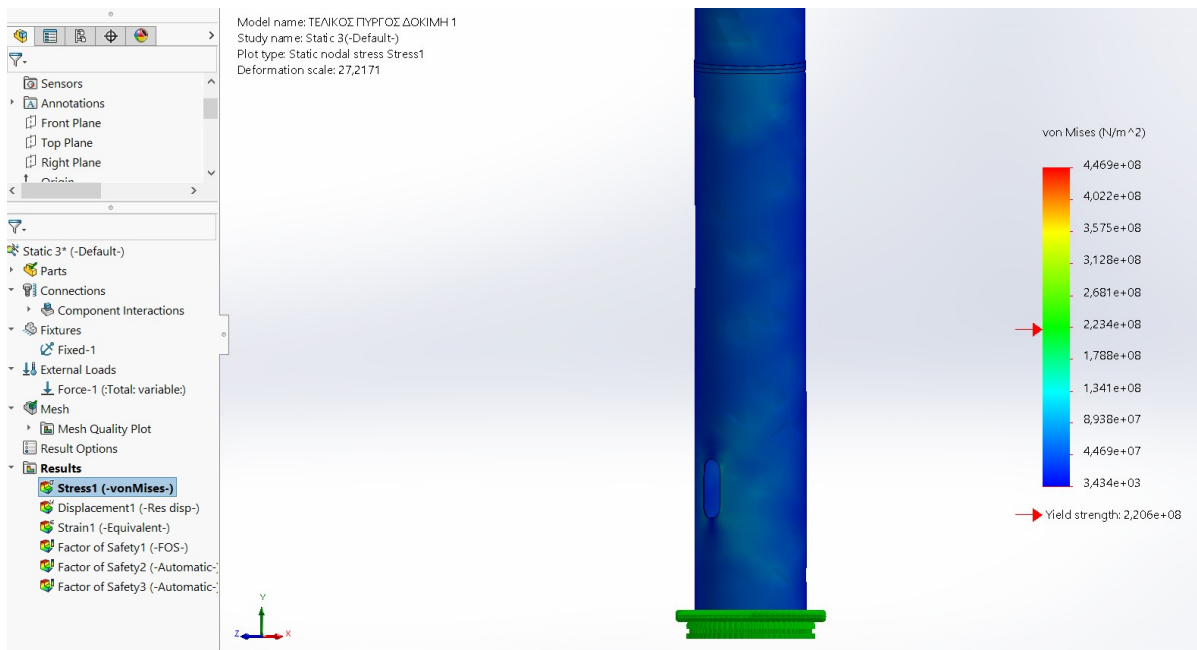
Εικόνα 5.5.79 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3 στην 2η μεσαία φλάντζα , όψη από τις 315°.

Παρατηρείται ότι υπάρχει μια συμμετρία στις τάσεις στις φλάντζες. Τα “άκρα” σημεία όπου εμφανίζονται κάπου στην μέση του πύργου είναι πιθανόν να εμφανίζονται λόγω αιχμών κατά τη δημιουργία του πλέγματος.

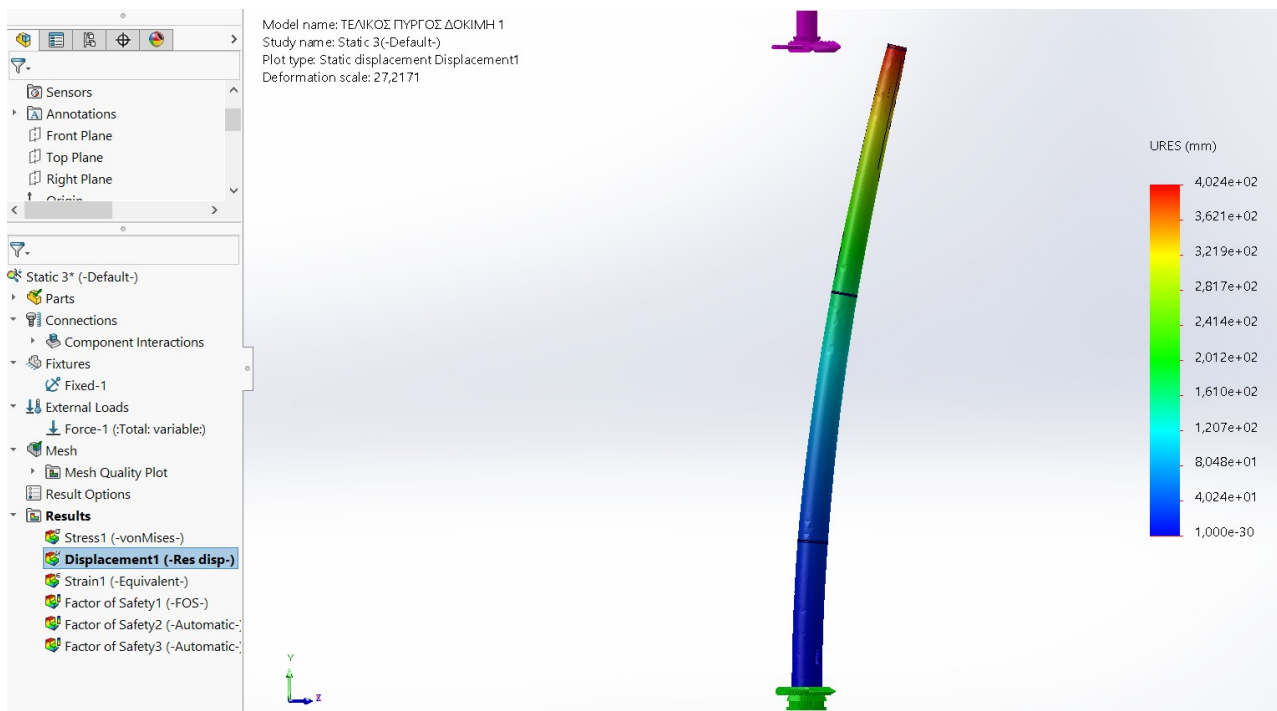
- Φορτίο με κατεύθυνση από τις 315°



Εικόνα 5.5.80 : Υπολογισμός συνιστώσας δύναμης για φόρτιση από τις 315°

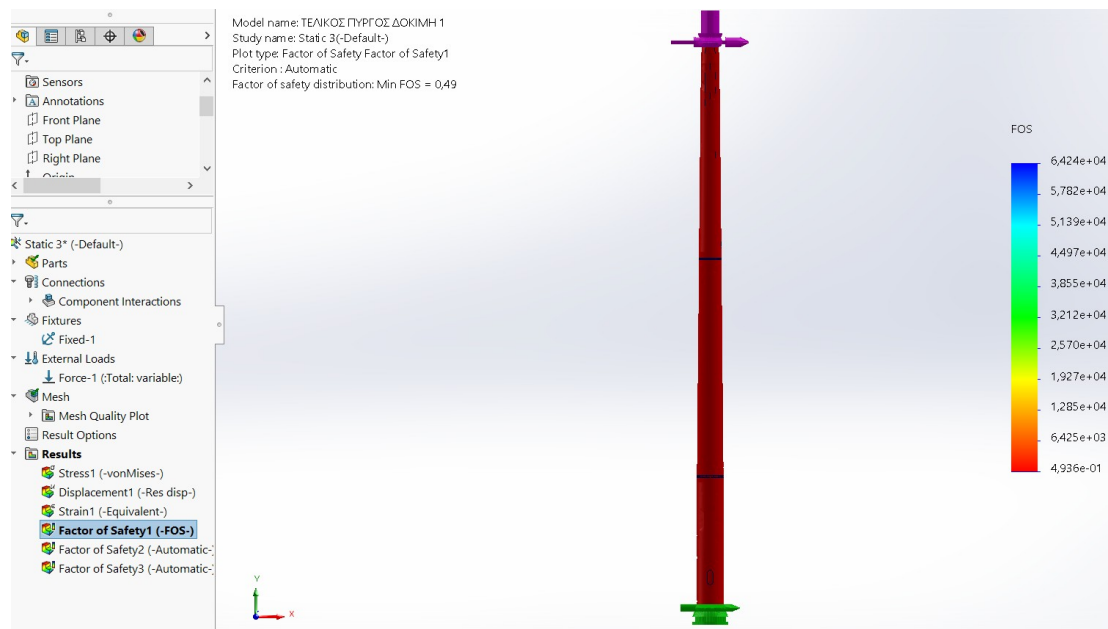


Εικόνα 5.5.81 : Κατανομή τάσεων και όριο διαρροής για φόρτιση από 315°, στιγμιότυπο από τις 135°.



Εικόνα 5.5.82 : Διάγραμμα μετατόπισης και συνολική παραμόρφωση του πύργου για φόρτιση από 315°, στιγμιότυπο από την αριστερή όψη της πόρτας.

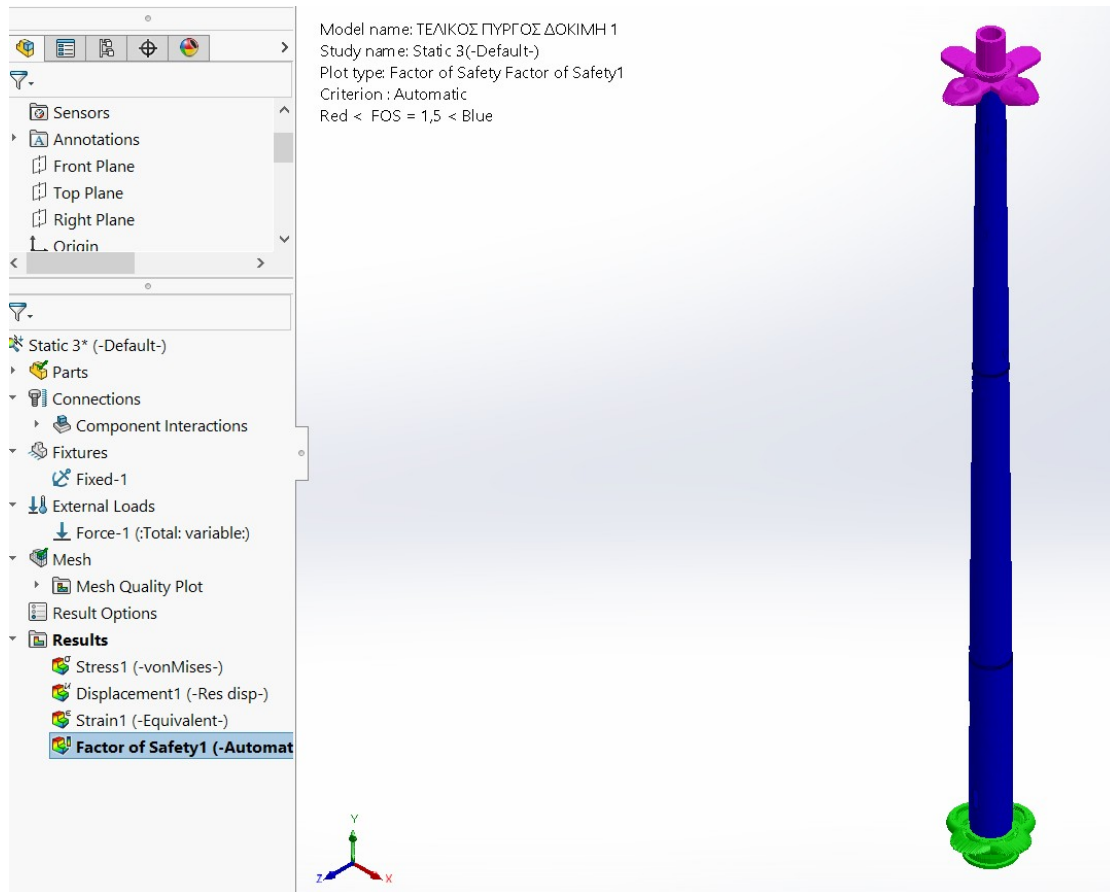
Παρατηρείται από την παραπάνω εικόνα ότι η συνολική μετατόπιση του πύργου είναι 402,4 mm.



Εικόνα 5.5.83 : Συντελεστής ασφαλείας για φόρτιση από 315°.

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0,49. Όμως αυτή η τιμή ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένα ασθενή σημεία του πύργου.

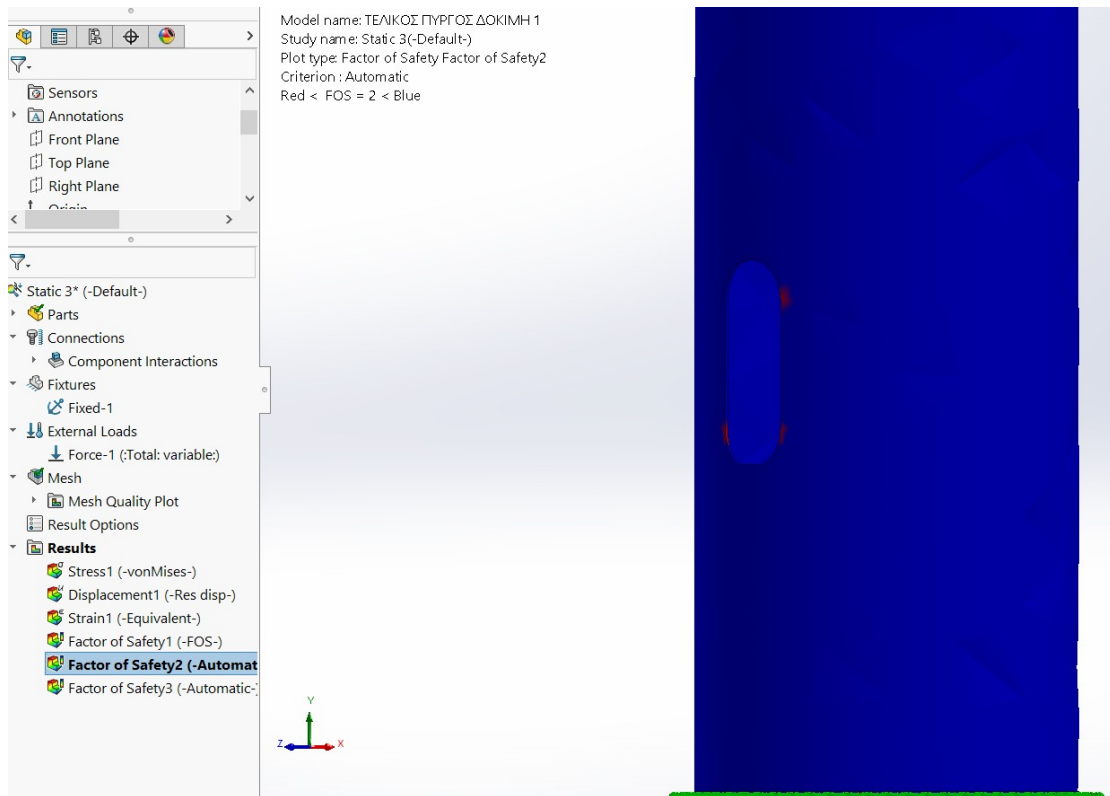
Έτσι τίθεται το πρόγραμμα να παρουσιάσει τα σημεία που έχουν συντελεστή ασφαλείας κάτω από 1,5 και παρακάτω παρουσιάζονται τα ασθενή σημεία.



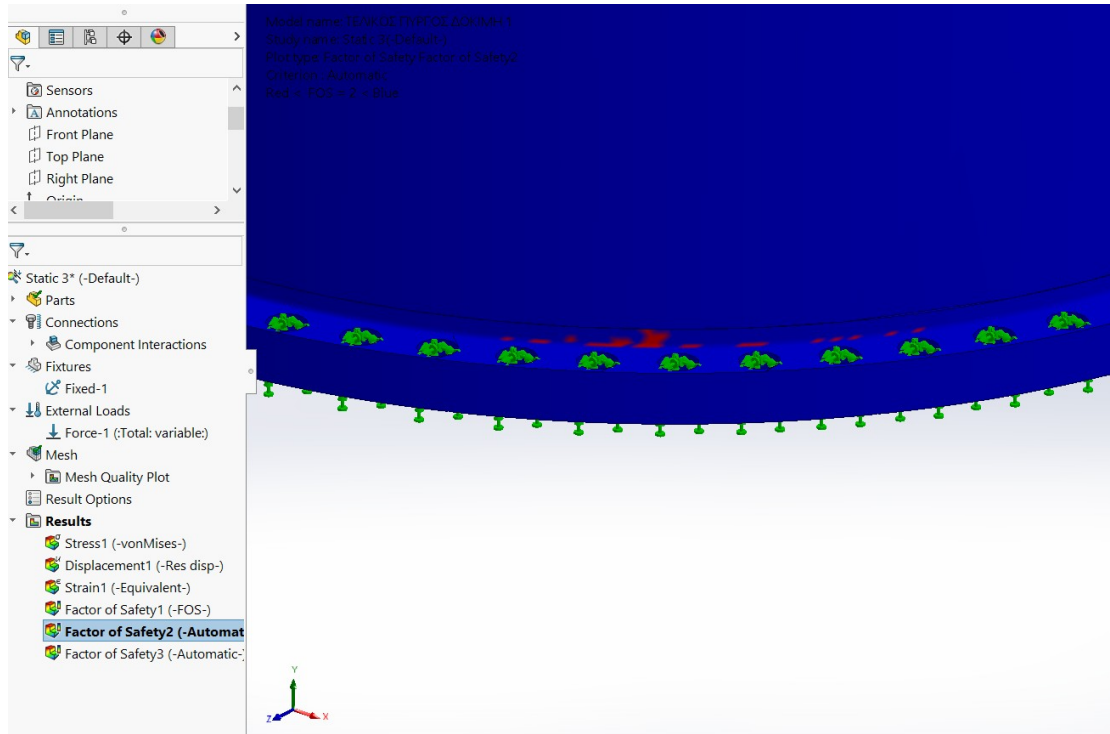
Εικόνα 5.5.84 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 1,5 όψη από τις 135°.

Μετά από πολλές μεγεθύνσεις δεν παρατηρείται κάποιο ασθενές σημείο, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ότι ο πύργος για φόρτιση από τις 315° δεν εμφανίζει υψηλές τάσεις για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 1,5.

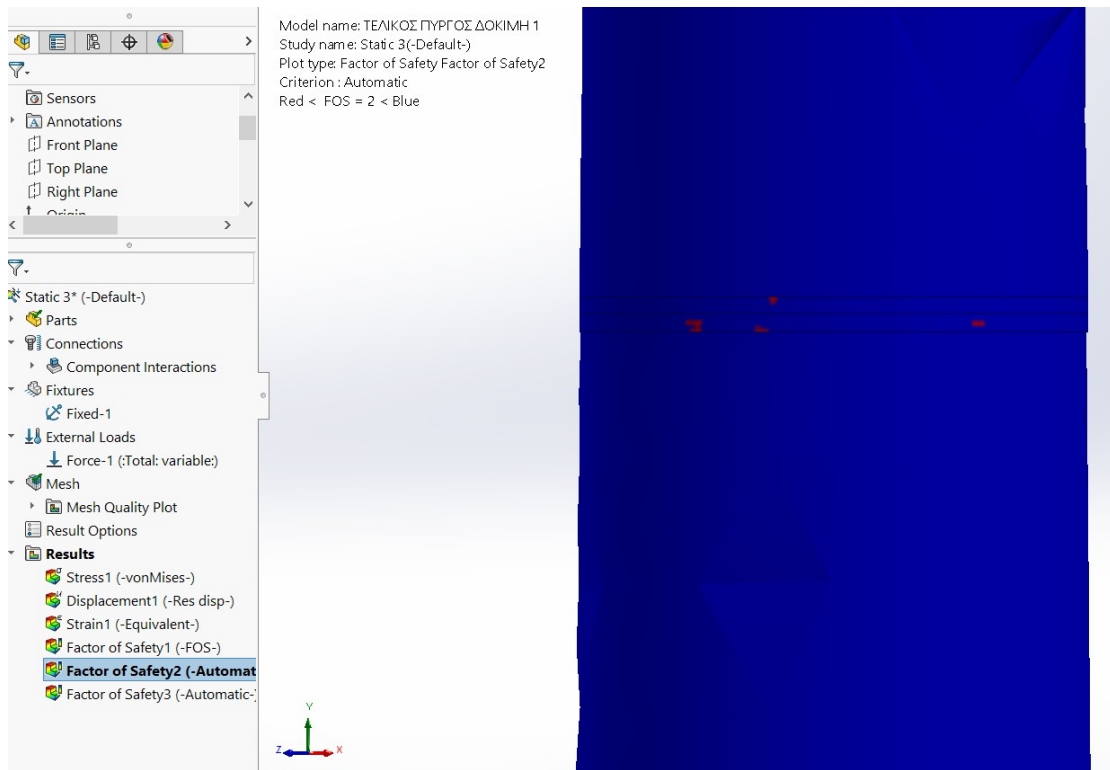
Παρομοίως ακολουθείται η ίδια διαδικασία για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 2 και παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



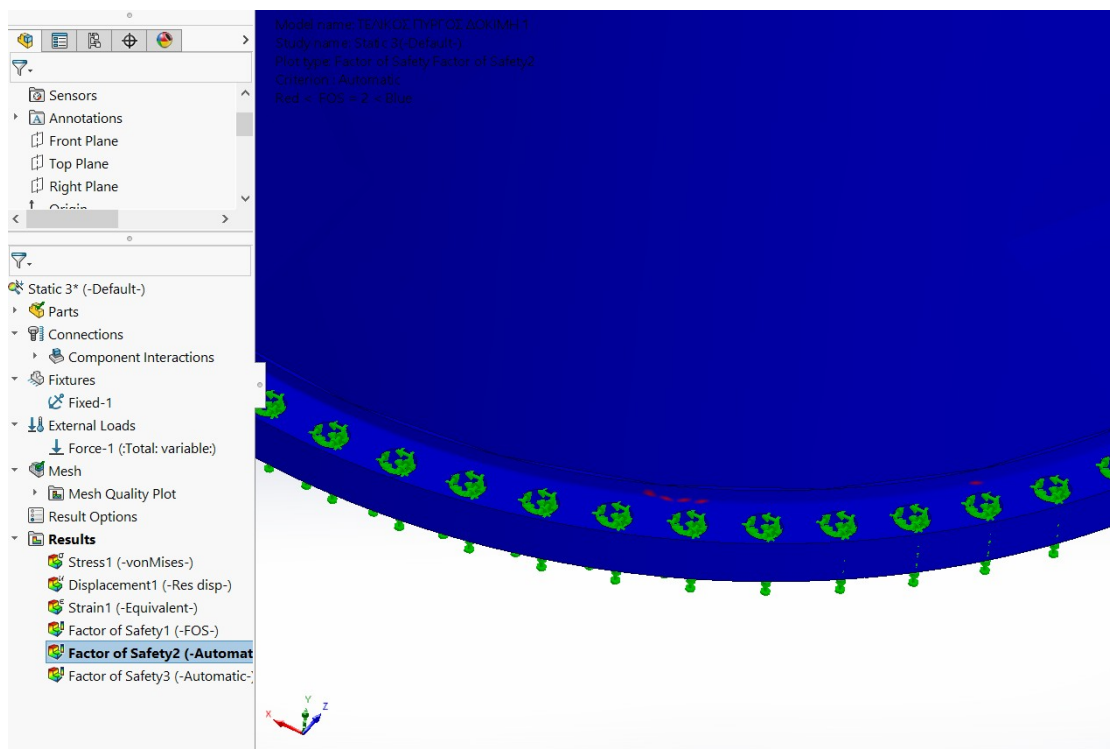
Εικόνα 5.5.85 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2 στην πόρτα, όψη από τις 135°.



Εικόνα 5.5.86 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2 στην φλάντζα της βάσης, όψη από τις 135°.



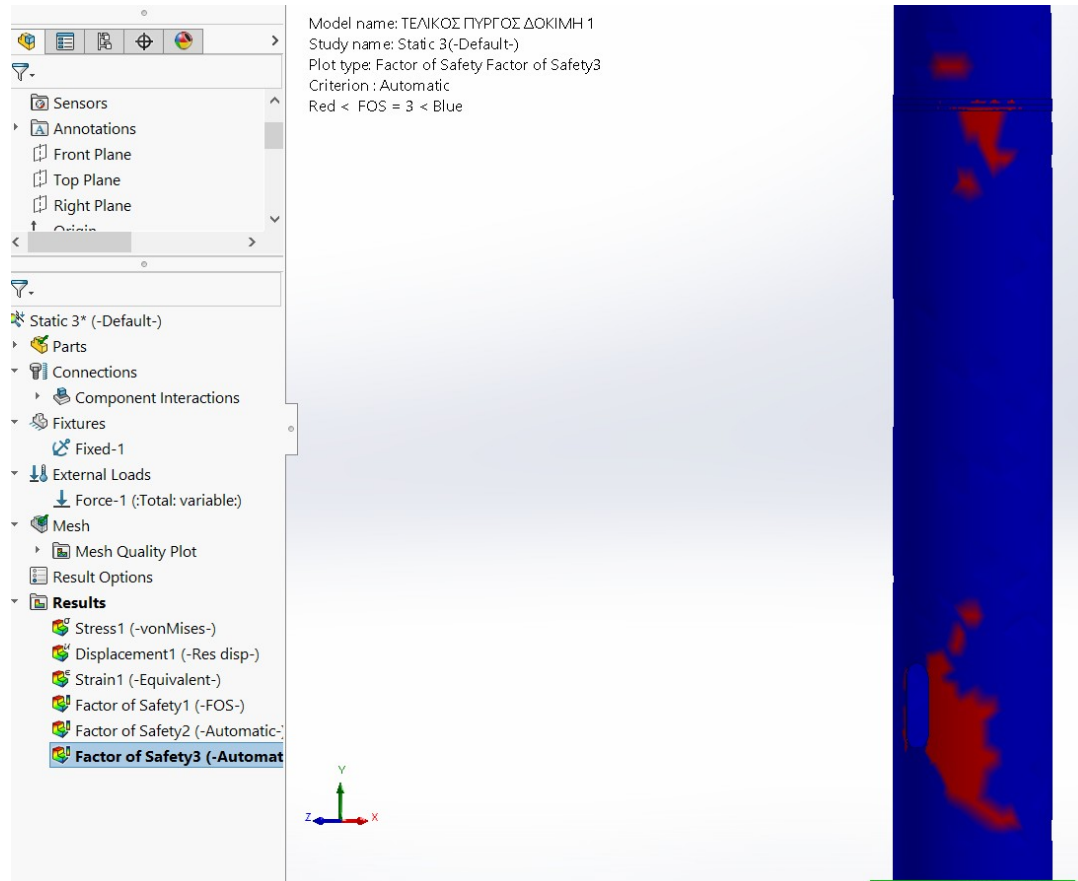
Εικόνα 5.5.87 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2 στην 2η μεσαία φλάντζα, όψη από τις 135°.



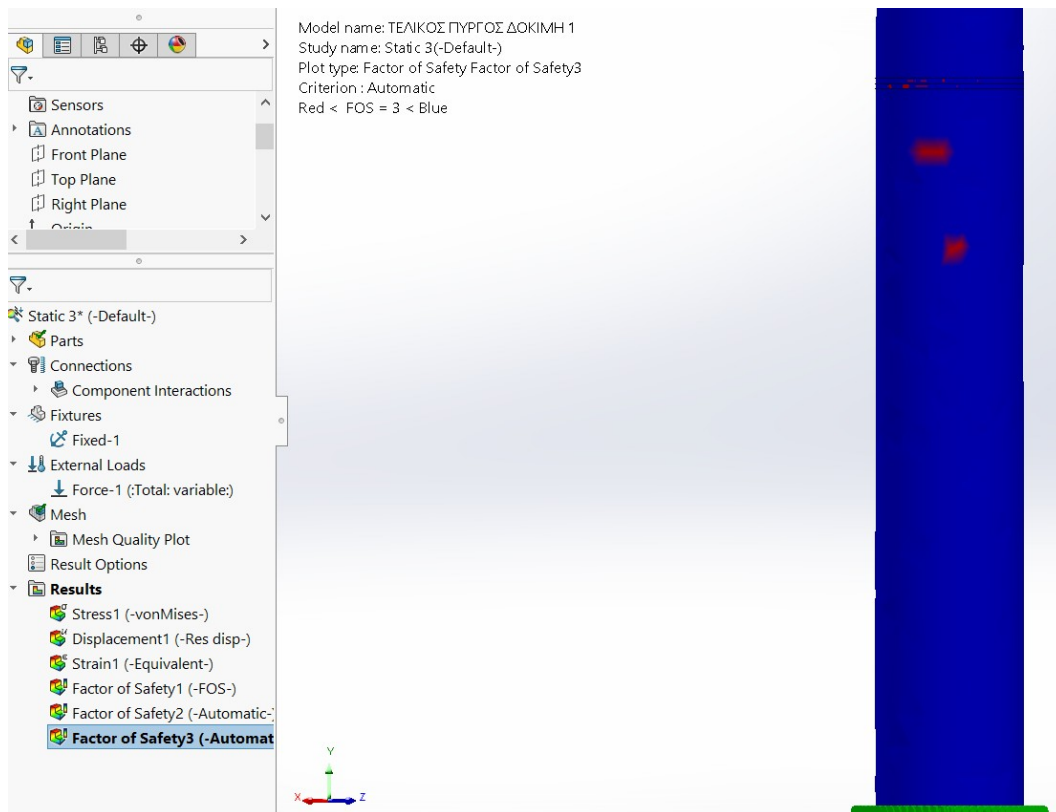
Εικόνα 5.5.88 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 2 στην φλάντζα της βάσης, όψη από τις 315°.

Παρατηρείται ότι από τις 315° τα ασθενή σημεία είναι λίγα και ότι δεν υπάρχουν συμμετρίες στα φορτία πιθανόν λόγω του πλέγματος, καθώς δεν έχουμε τόσο υψηλές τάσεις για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 2.

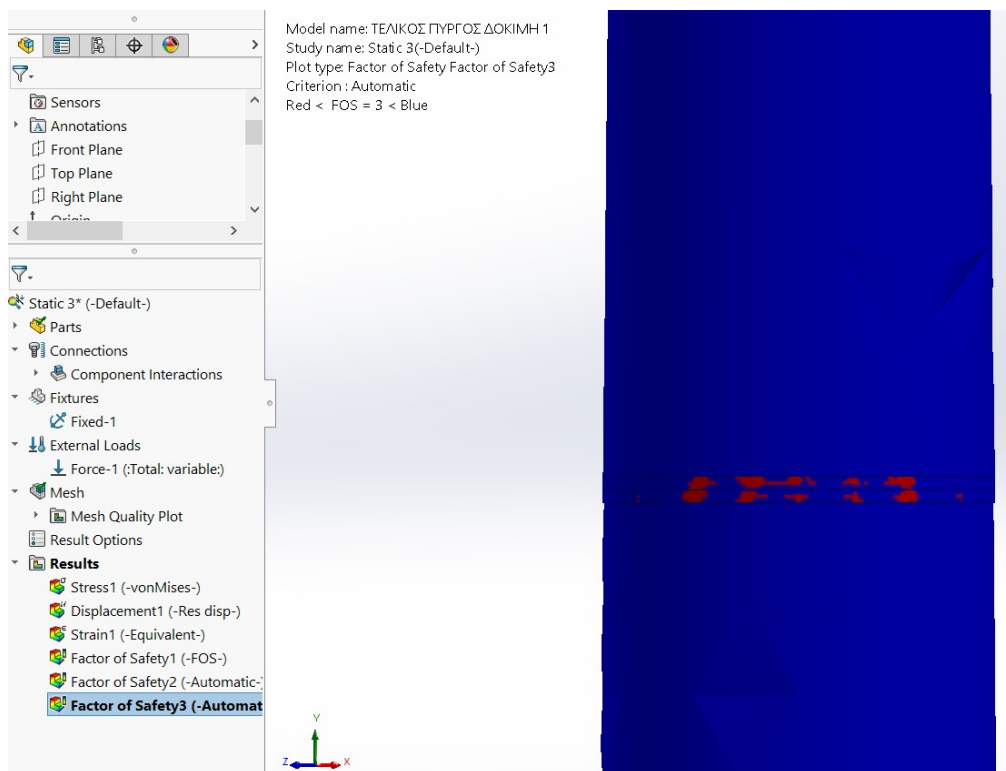
Για συντελεστή μικρότερο του 3 όπως είναι αναμενόμενο εμφανίζονται πολύ πιο υψηλές τάσεις, επίσης παρατηρείται συμμετρία στις τάσεις και παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



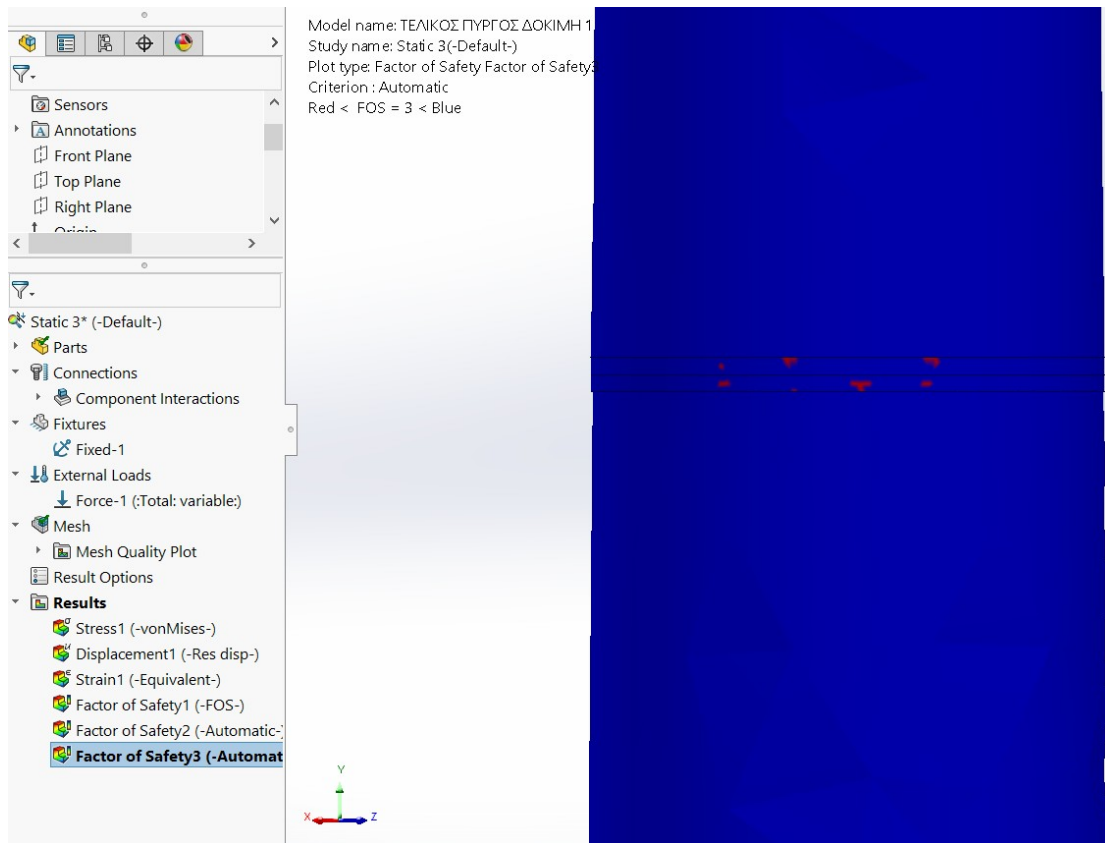
Εικόνα 5.5.89 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3 όψη από τις 135°.



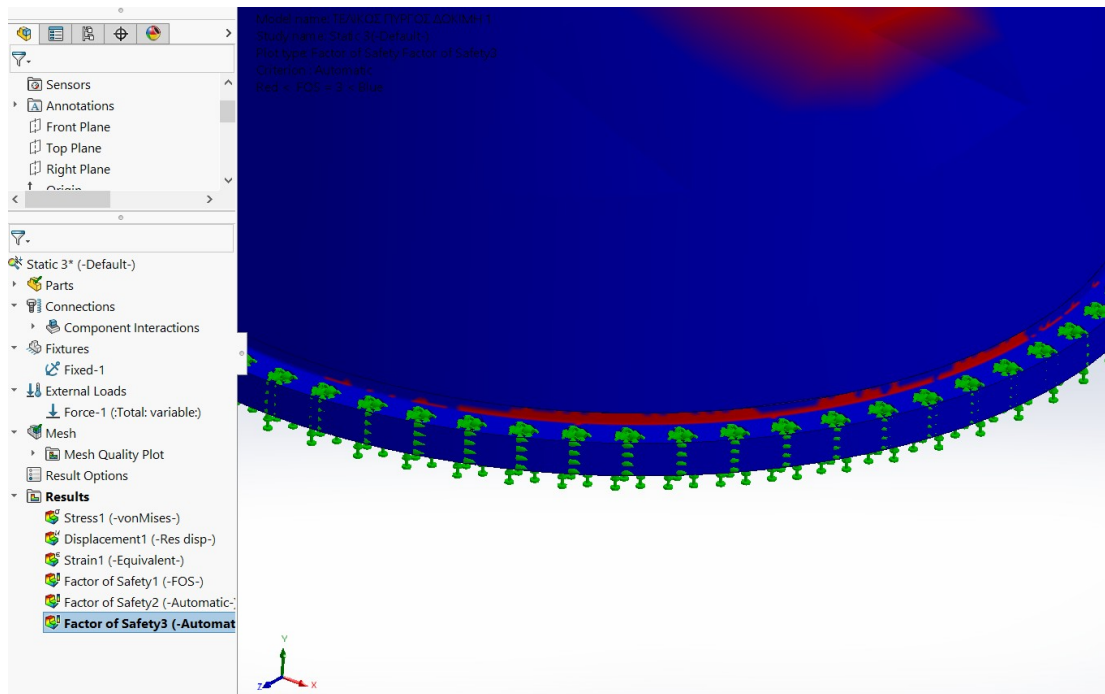
Εικόνα 5.5.90 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3 όψη από τις 315°.



Εικόνα 5.5.91 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3 στην 2η μεσαία φλάντζα, όψη από τις 135°.



Εικόνα 5.5.92 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3 στην 2η μεσαία φλάντζα, όψη από τις 315°.



Εικόνα 5.5.93 : Συντελεστής ασφαλείας μικρότερος του 3 στην φλάντζα της βάσης, όψη από τις 135°.

Παρατηρείται μια συμμετρία στα αντιδιαμετρικά φορτία, φόρτιση από τις 135° και 315°. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα της πόρτας και της φλάντζας της βάσης.

5.6 Ανάλυση των αποτελεσμάτων: Ως προς το πάχος

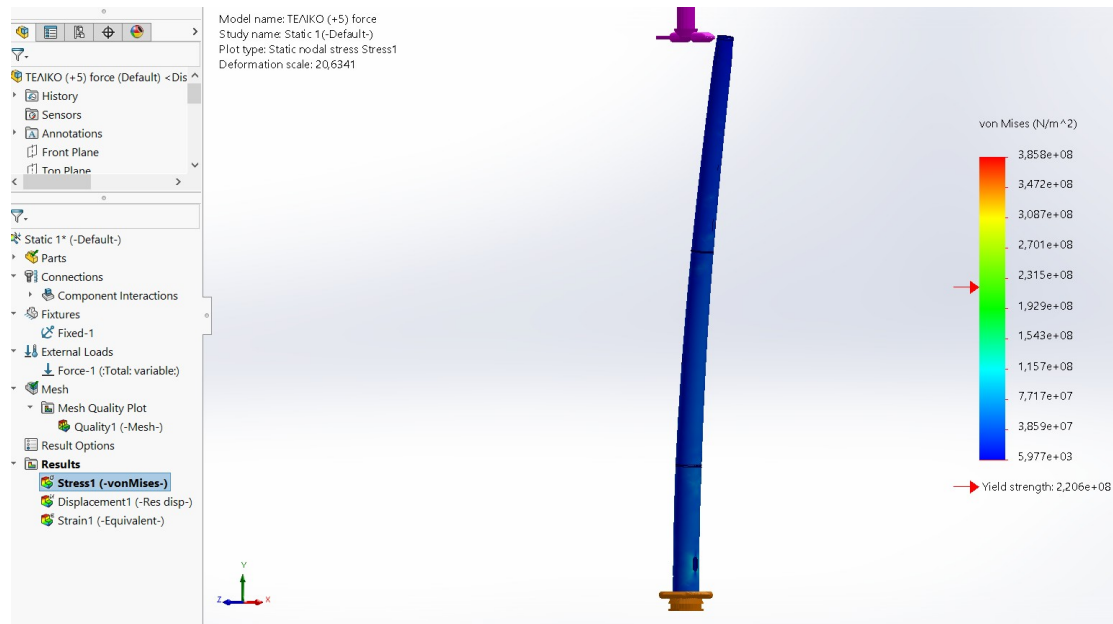
Αφού διερευνήθηκε η συμπεριφορά του πύργου για τις διάφορες κατευθύνσεις, στη συνέχεια θα διερευνηθεί η συμπεριφορά του για διαφορετικά πάχη. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της καταπόνησης του πύργου για πάχος αυξημένο κατά 5mm και μειωμένο κατά 5mm. Τα φορτία της καταπόνησης ορίστηκαν με βάση την δυσμενέστερη περίπτωση του αρχικού πάχους, η οποία αποτελεί την κατεύθυνση του πλάγιου φορτίου του ανέμου από τις 270° καθώς είχε τη μεγαλύτερη μετατόπιση.

- Φορτίο με κατεύθυνση από 270° για πάχος αυξημένο κατά 5mm

Μετά από δοκιμές χρησιμοποιήθηκε πλέγμα μέγιστου μεγέθους στοιχείων 841,1mm.

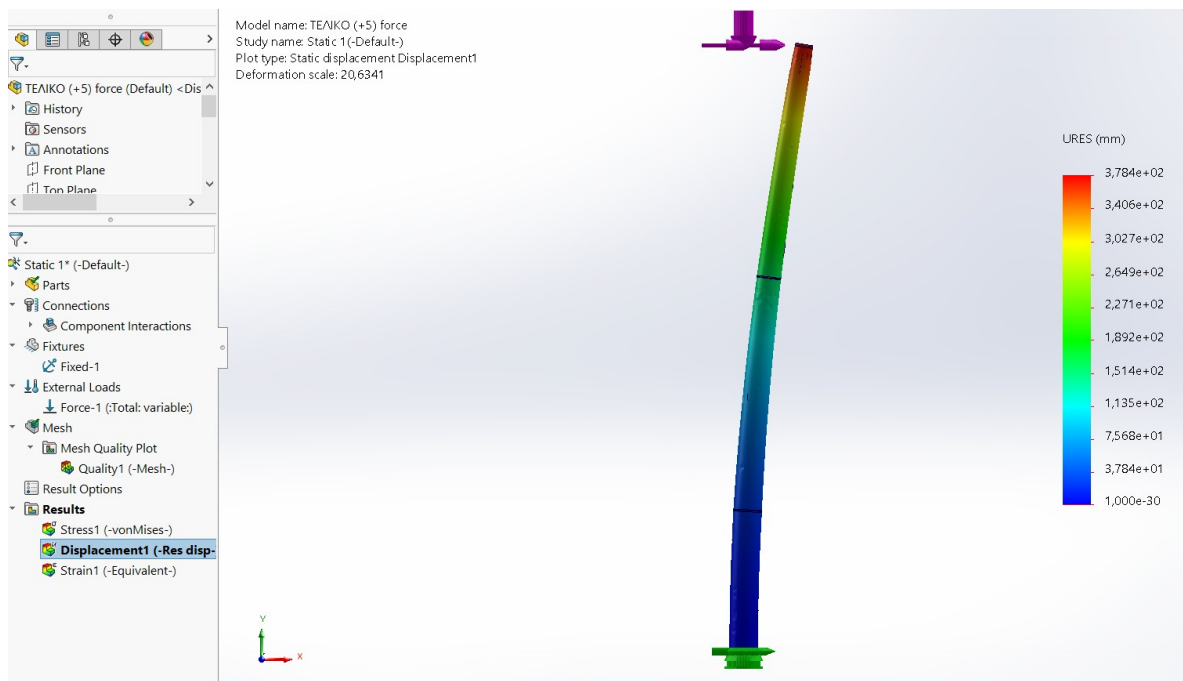
| Mesh Details | |
|---|------------------------------|
| Study name | Static 1* (-Default-) |
| DetailsMesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used | Blended curvature-based mesh |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 points |
| Max Element Size | 841,1 mm |
| Min Element Size | 42,055 mm |
| Mesh quality | High |
| Total nodes | 196671 |
| Total elements | 102343 |
| Maximum Aspect Ratio | 4.551,3 |
| Percentage of elements with Aspect Ratio < 3 | 75,3 |
| Percentage of elements with Aspect Ratio > 10 | 8,28 |
| Percentage of distorted elements | 0 |
| Number of distorted elements | 0 |
| Remesh failed parts independently | Off |
| Time to complete mesh(hh:mm:ss) | 00:01:38 |
| Computer name | |

Εικόνα 5.6.1 : Χαρακτηριστικά πλέγματος για πάχος πύργου αυξημένο κατά 5mm.



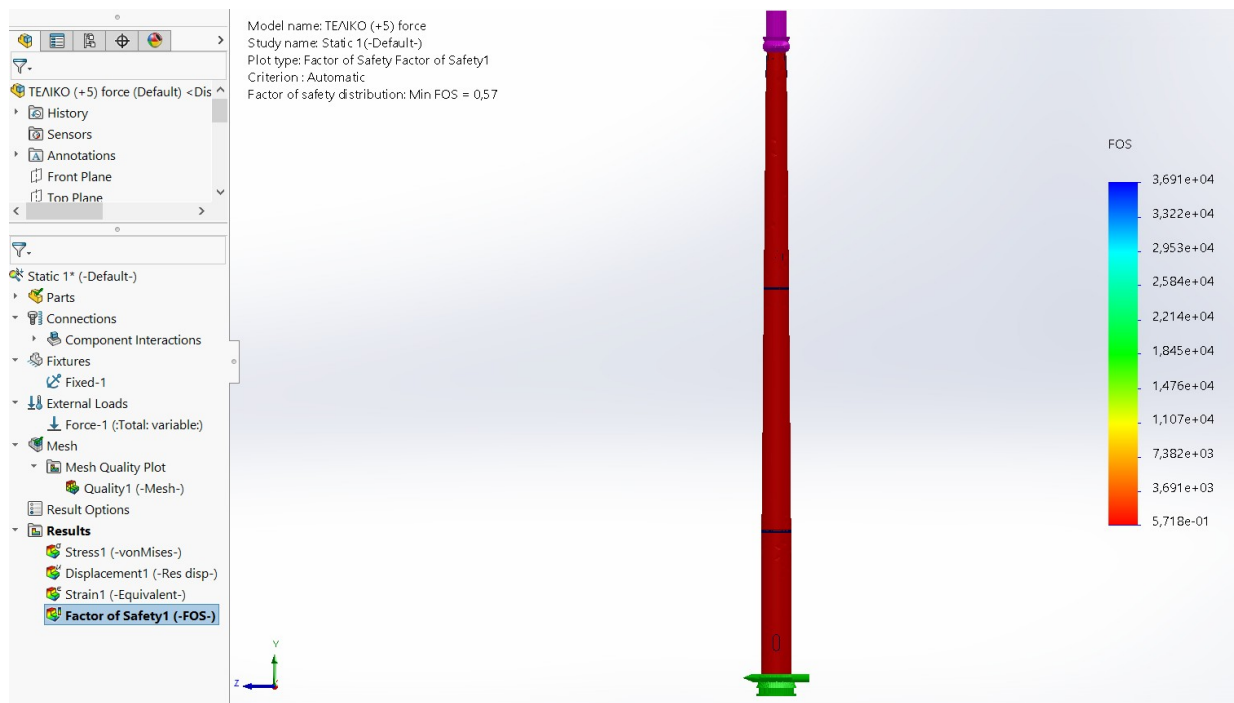
Εικόνα 5.6.2 : Κατανομή τάσεων και όριο διαρροής για φόρτιση από 270°, για πάχος αυξημένο κατά 5mm, όψη από τις 45°.

Παρατηρείται ότι στο διάγραμμα κατανομής τάσεων όλα τα σημεία του πύργου βρίσκονται κάτω από το όριο διαρροής.



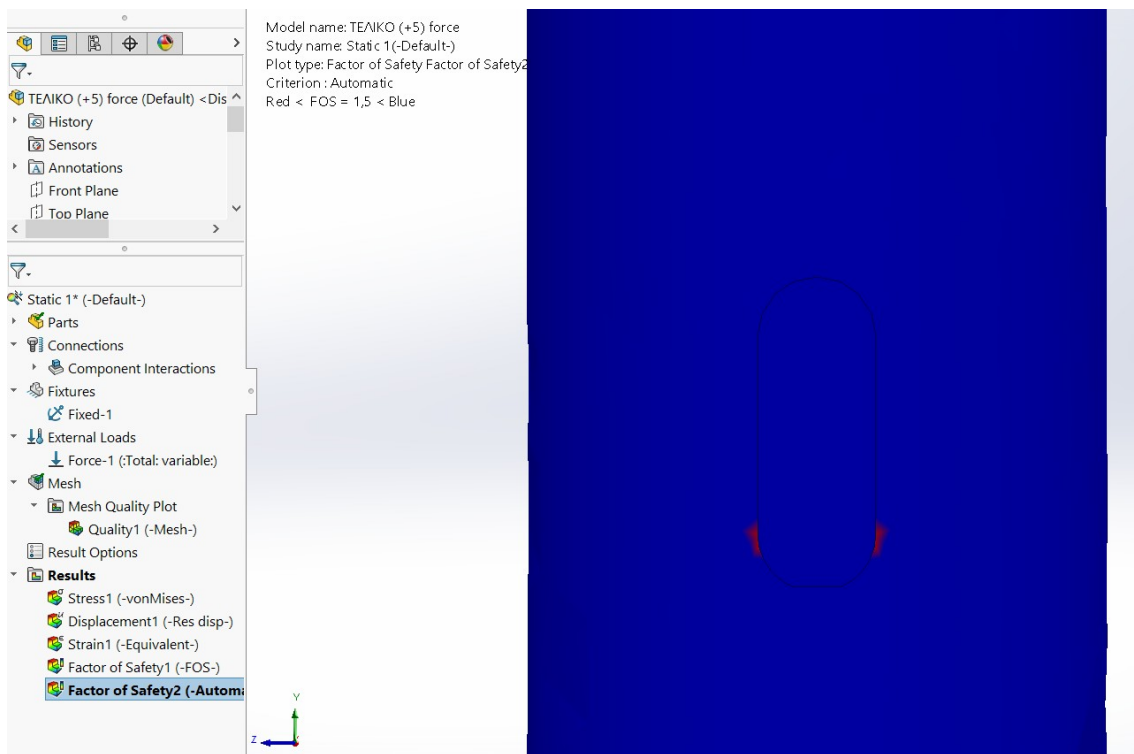
Εικόνα 5.6.3 : Διάγραμμα μετατόπισης και συνολική παραμόρφωση του πύργου για φόρτιση από 270° για πάχος αυξημένο κατά 5mm, όψη από τις 0°.

Παρατηρείται από την παραπάνω εικόνα ότι η συνολική μετατόπιση του πύργου είναι 378,4mm (37,84cm) και αποτελεί την πιο μικρή τιμή μετατόπισης σε σύγκριση με τις υπόλοιπες καταπονήσεις για ταχύτητα ανέμου στα 50 m/s.



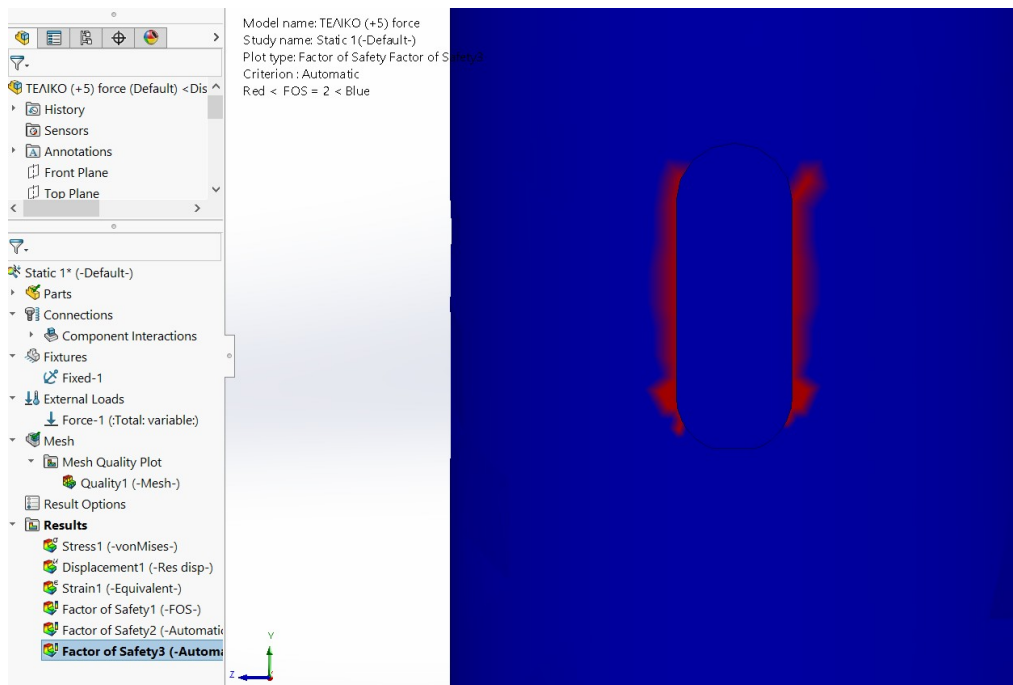
Εικόνα 5.6.4 : Συντελεστής ασφαλείας για φόρτιση από 270° για πάχος αυξημένο κατά 5mm, όψη από τις 90°.

Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0,57. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα ασθενή σημεία (με κόκκινο χρώμα) που ο πύργος έχει συντελεστή ασφαλείας μικρότερο από 1,5.

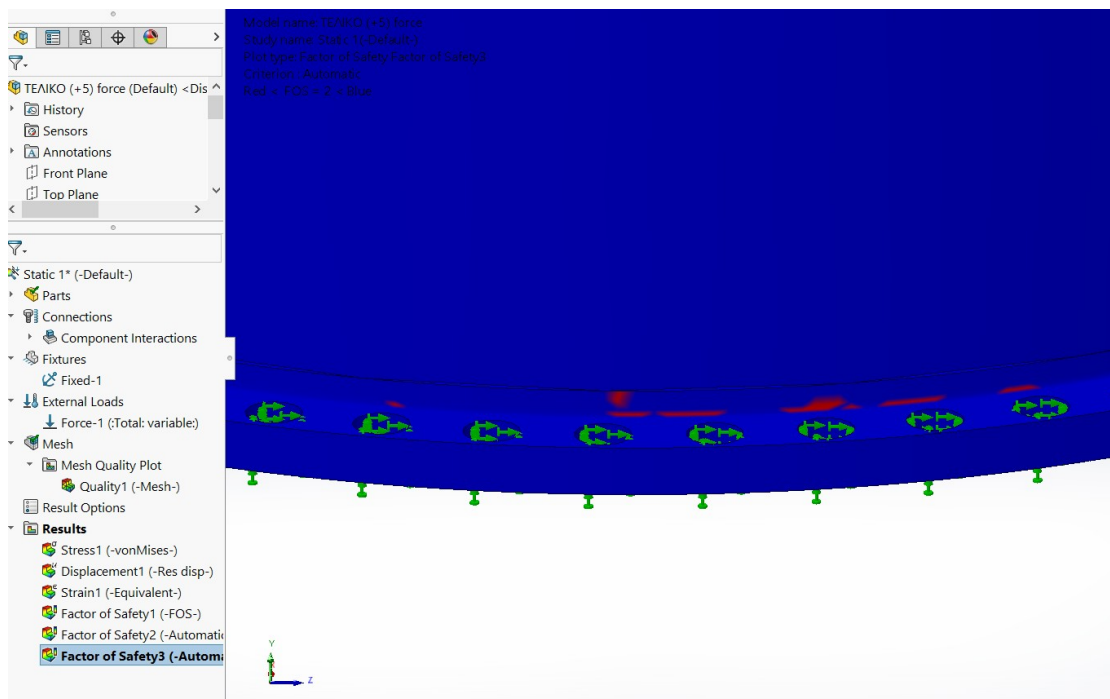


Εικόνα 5.6.5 : Τα σημεία στην πόρτα που έχουν συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 1,5 για πάχος αυξημένο κατά 5mm.

Στη συνέχεια με την ίδια διαδικασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 2.

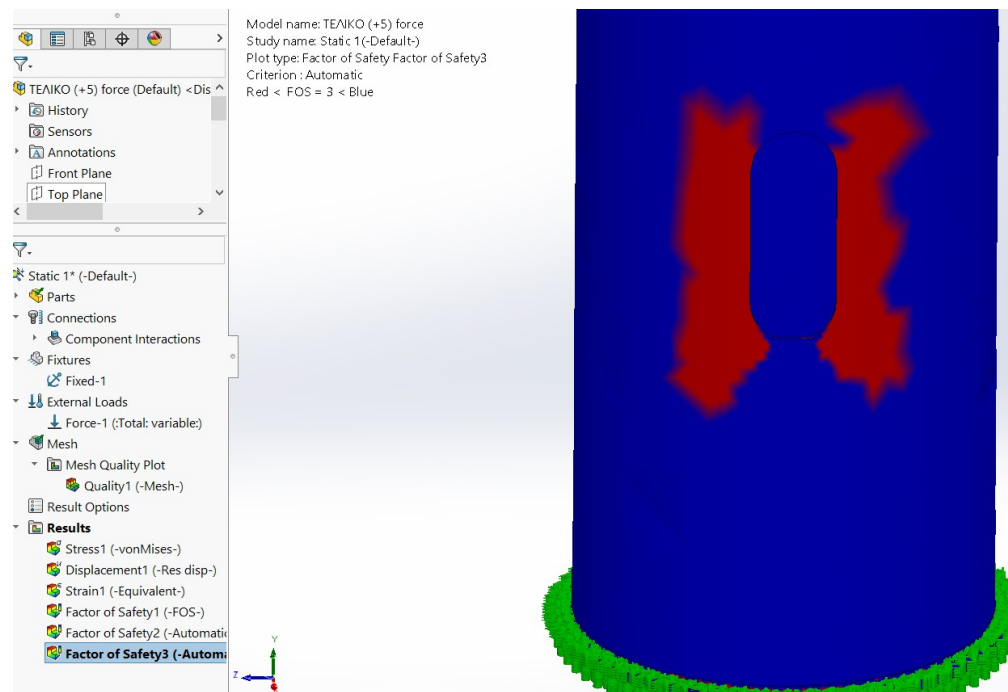


Εικόνα 5.6.6: Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερος του 2, στην πόρτα για πάχος αυξημένο κατά 5mm .

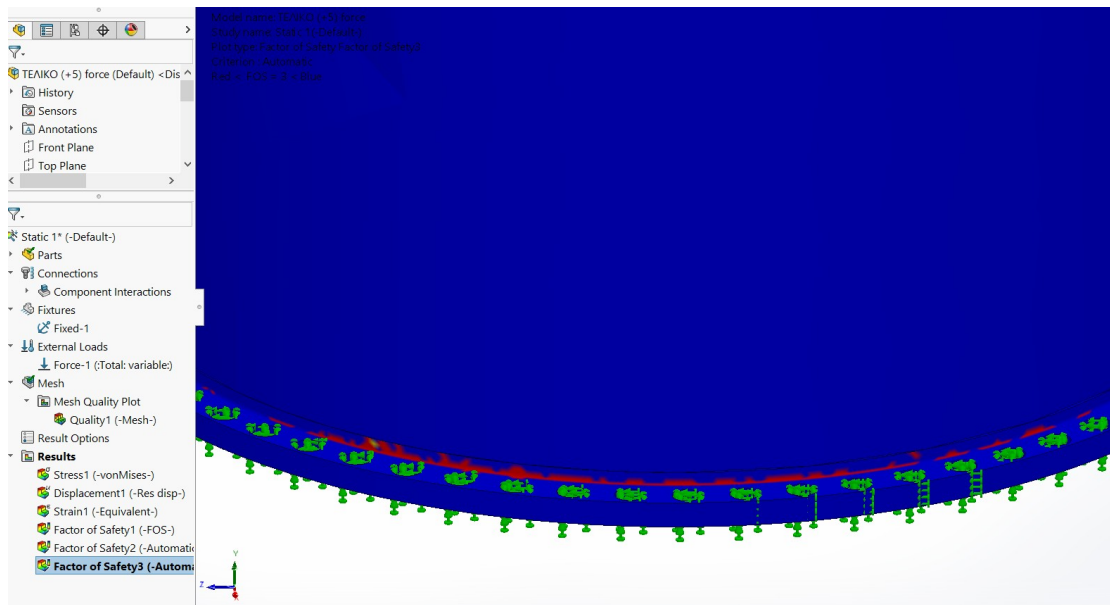


Εικόνα 5.6.7 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερος του 2, στην φλάντζα της βάσης για πάχος αυξημένο κατά 5mm. Όψη από τις 270°.

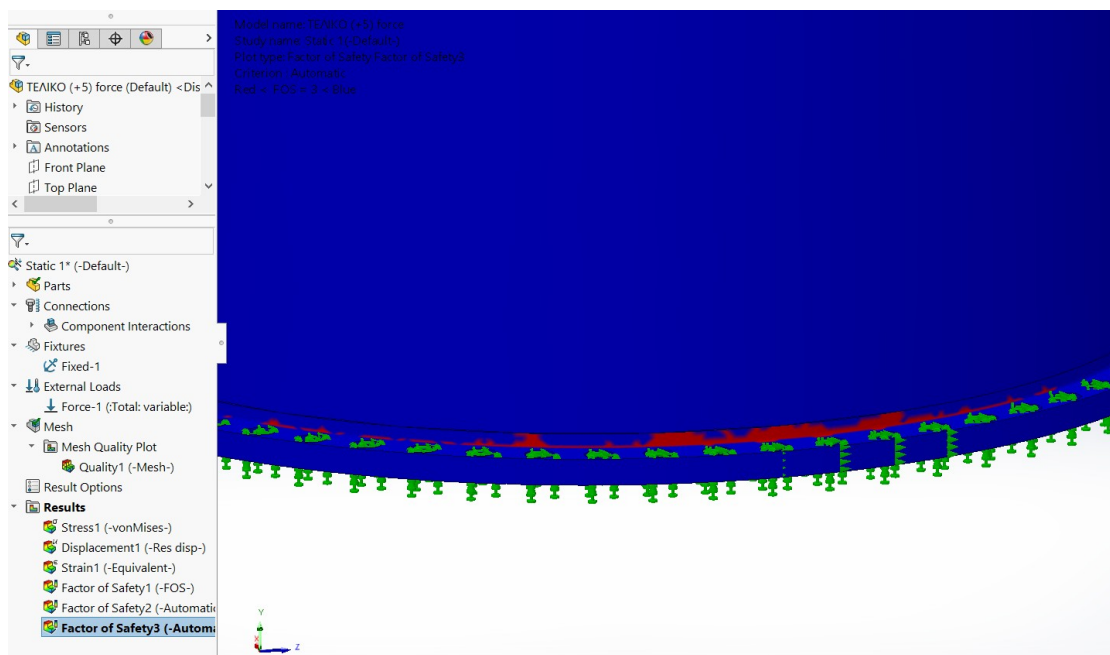
Με την ίδια διαδικασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 3.



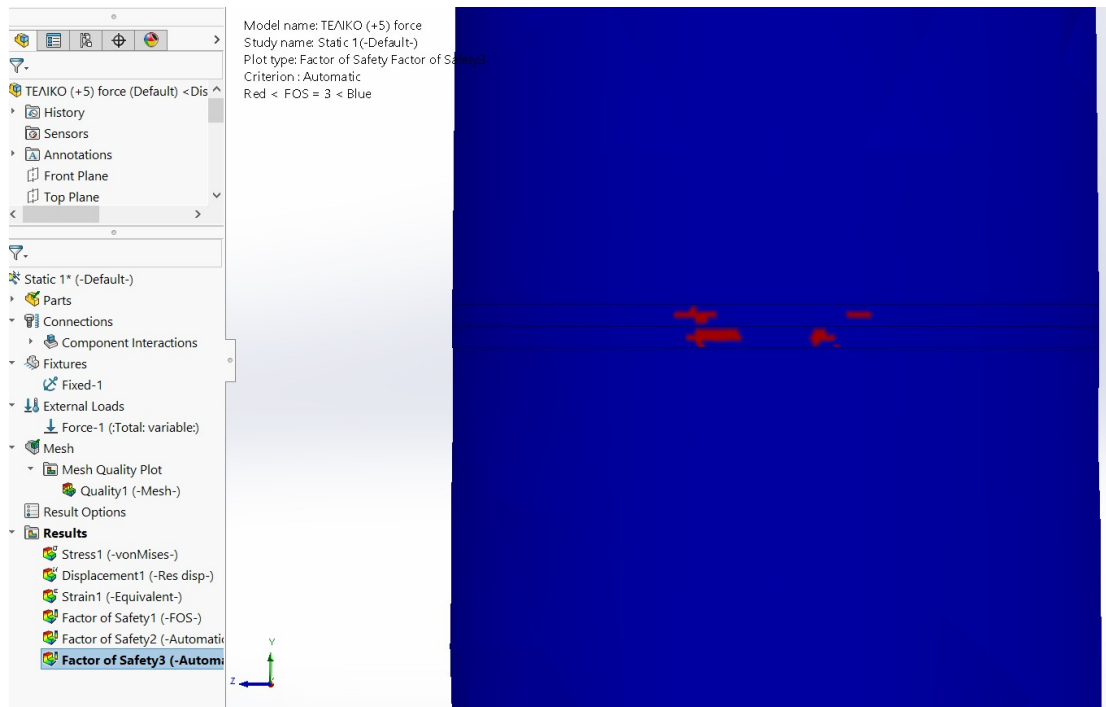
Εικόνα 5.6.8 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερος του 3, στην πόρτα για πάχος αυξημένο κατά 5mm. Όψη από τις 90°.



Εικόνα 5.6.9 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερος του 3, στην φλάντζα της βάσης για πάχος αυξημένο κατά 5mm. Όψη από τις 90°.



Εικόνα 5.6.10 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερος του 3, στην φλάντζα της βάσης για πάχος αυξημένο κατά 5mm. Όψη από τις 270°.



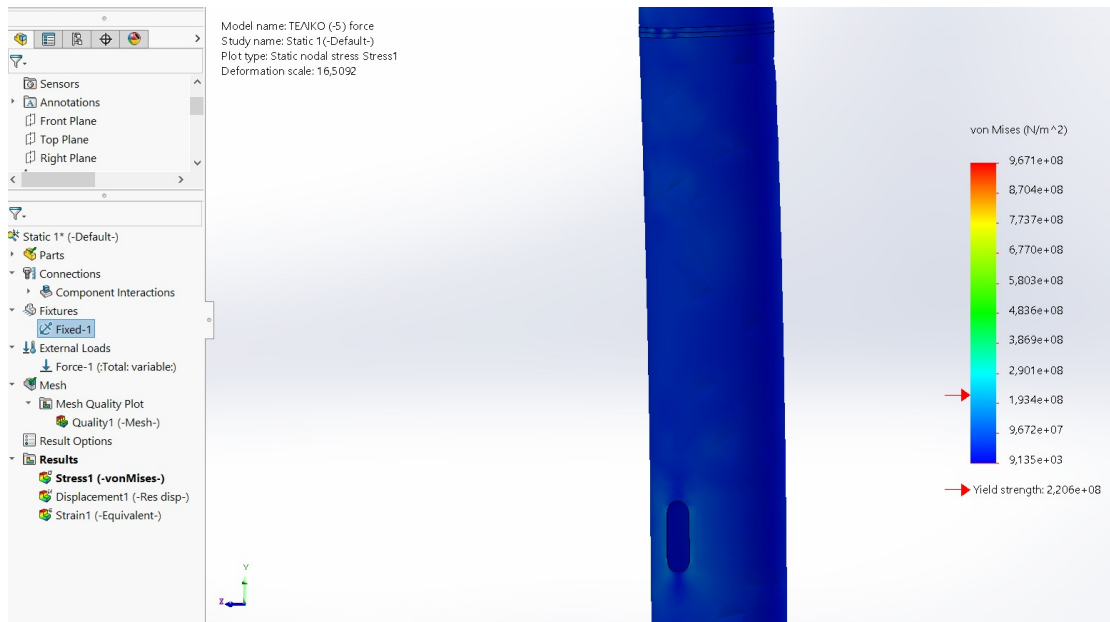
Εικόνα 5.6.11: Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερος του 3, στην 2η μεσαία φλάντζα για πάχος αυξημένο κατά 5mm. Όψη από τις 90°.

- Φορτίο με κατεύθυνση από 270° για πάχος μειωμένο κατά 5mm

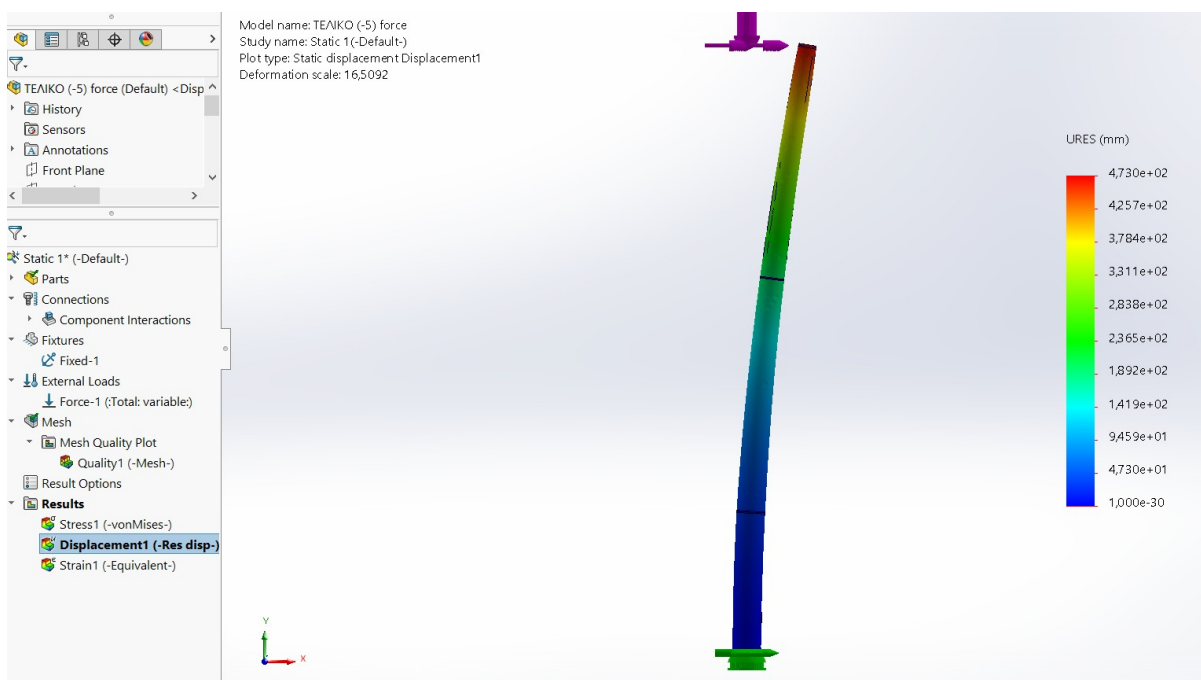
Αντίστοιχα μετά από δοκιμές χρησιμοποιήθηκε πλέγμα μέγιστου μεγέθους στοιχείων 842,197mm.

| Mesh Details | |
|---|------------------------------|
| Study name | Static 1* (-Default-) |
| DetailsMesh type | Solid Mesh |
| Mesher Used | Blended curvature-based mesh |
| Jacobian points for High quality mesh | 16 points |
| Max Element Size | 842,197 mm |
| Min Element Size | 42,1099 mm |
| Mesh quality | High |
| Total nodes | 195191 |
| Total elements | 101610 |
| Maximum Aspect Ratio | 10.012 |
| Percentage of elements with Aspect Ratio < 3 | 73,3 |
| Percentage of elements with Aspect Ratio > 10 | 8,31 |
| Percentage of distorted elements | 0 |
| Number of distorted elements | 0 |
| Remesh failed parts independently | Off |
| Time to complete mesh(hh:mm:ss) | 00:00:51 |
| Computer name | |

Εικόνα 5.6.12: Χαρακτηριστικά πλέγματος για πάχος πύργου μειωμένο κατά 5mm.

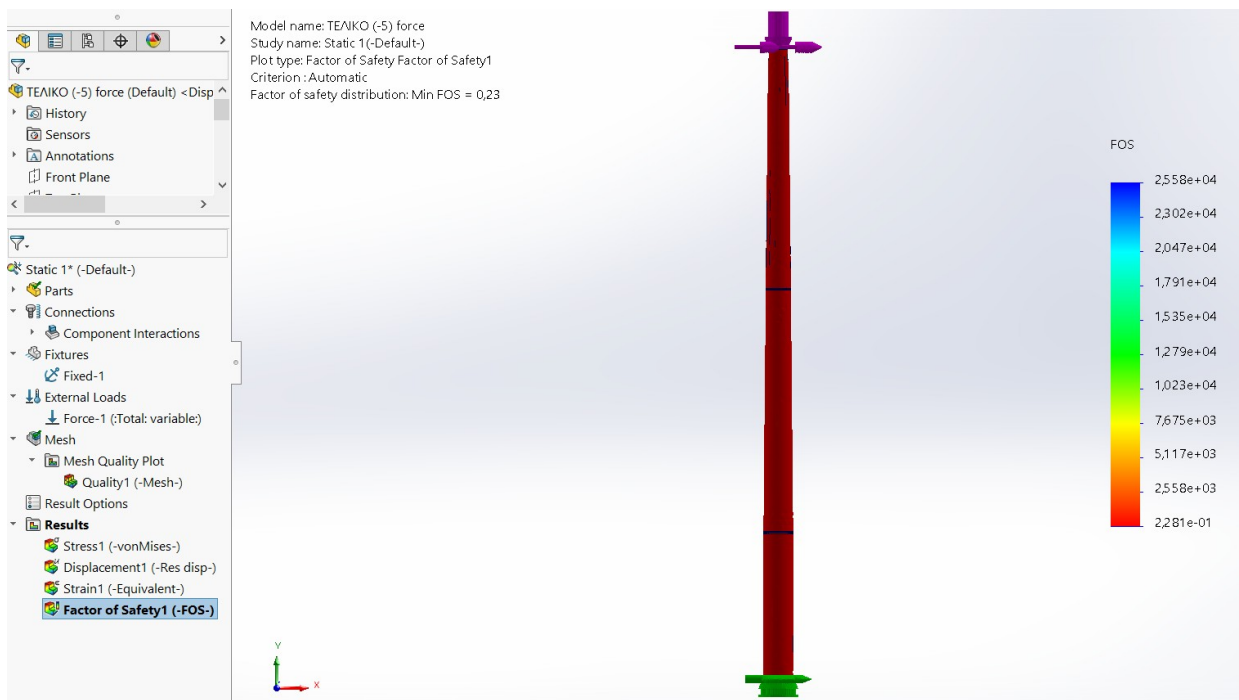


Εικόνα 5.6.13: Κατανομή τάσεων και όριο διαρροής για φόρτιση από 270° για πάχος μειωμένο κατά 5mm, όψη από τις 135°.



Εικόνα 5.6.14 : Διάγραμμα μετατόπισης και συνολική παραμόρφωση του πύργου για φόρτιση από 270° για πάχος μειωμένο κατά 5mm, όψη από τις 0°.

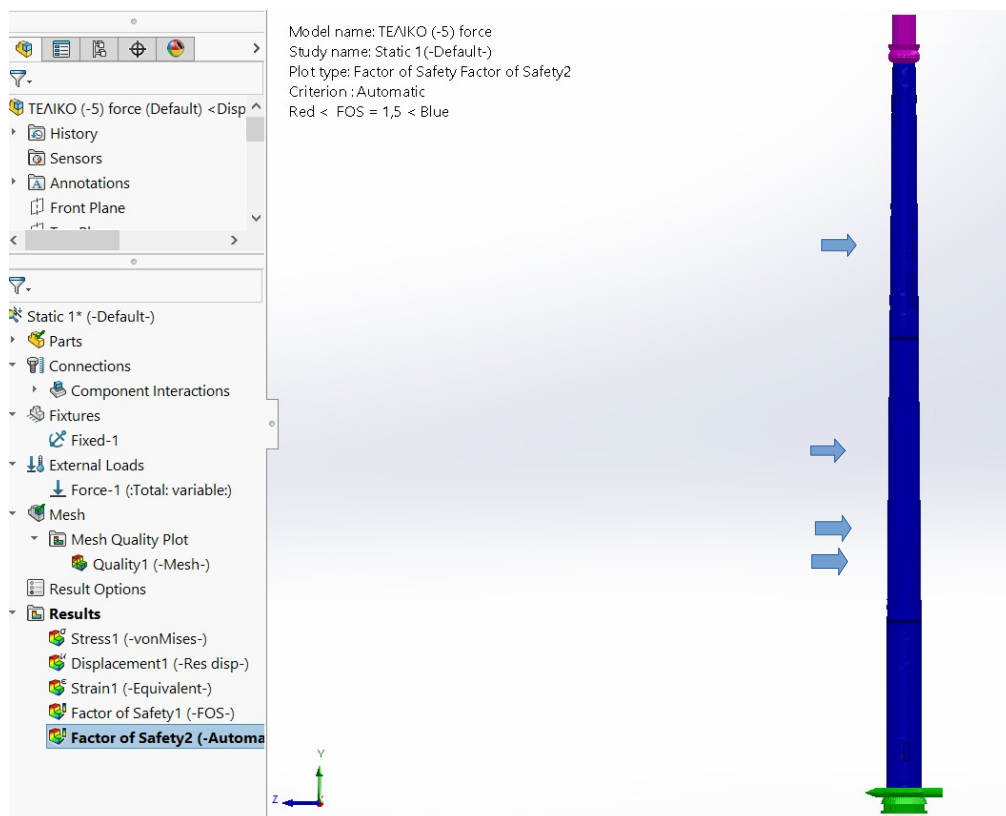
Παρατηρείται από την παραπάνω εικόνα ότι η συνολική μετατόπιση του πύργου είναι 473,0 mm (47,30cm) και αποτελεί μια μεγάλη τιμή σε σύγκριση με τις υπόλοιπες καταπονήσεις για ταχύτητα ανέμου στα 50 m/s.



Εικόνα 5.6.15 : Συντελεστής ασφαλείας για φόρτιση από 270° για πάχος μειωμένο κατά 5mm, όψη από τις 0°.

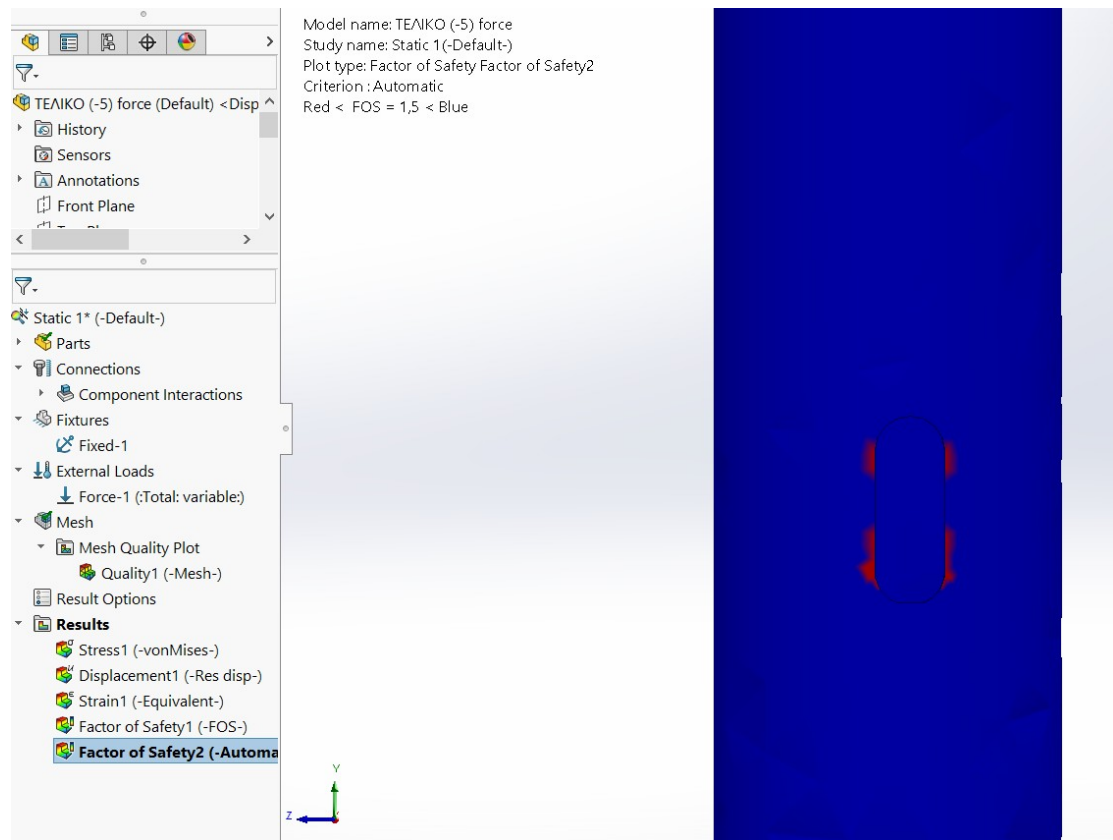
Παρατηρείται ότι ο συντελεστής ασφαλείας είναι 0,23. Όπως είναι αναμενόμενο ο συντελεστής ασφαλείας όσο μειώνεται το πάχος είναι πολύ μικρότερος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ασθενή σημεία (με κόκκινο χρώμα) που ο πύργος έχει συντελεστή ασφαλείας μικρότερο από 1,5.

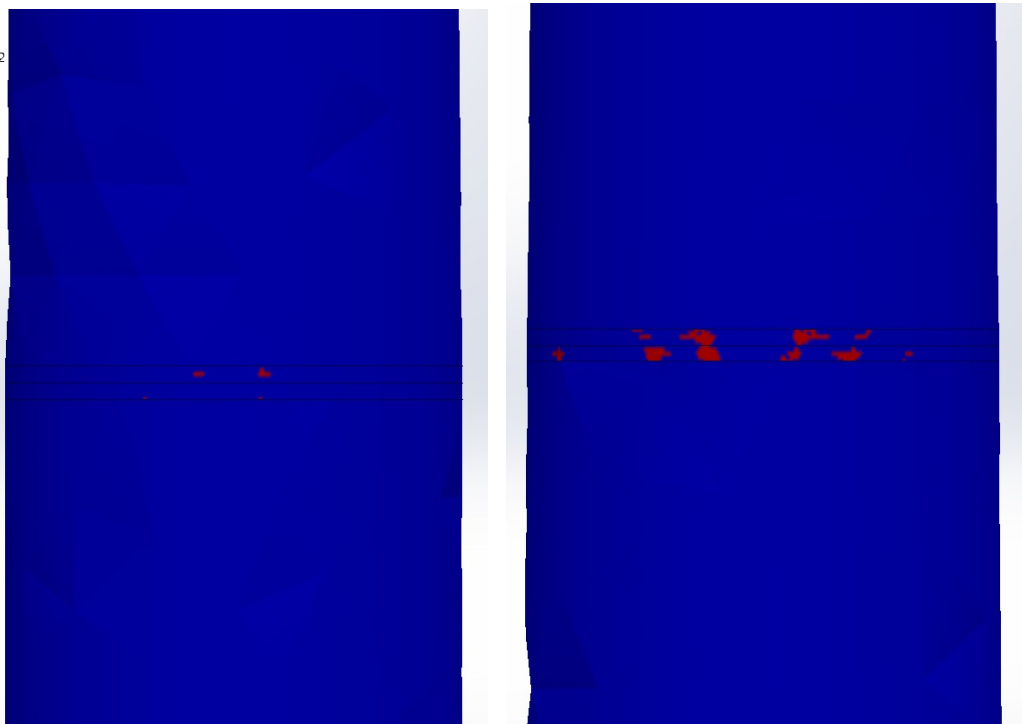


Εικόνα 5.6.16 : Με βέλη φαίνονται τα σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο από 1,5 για πάχος μειωμένο κατά 5mm.

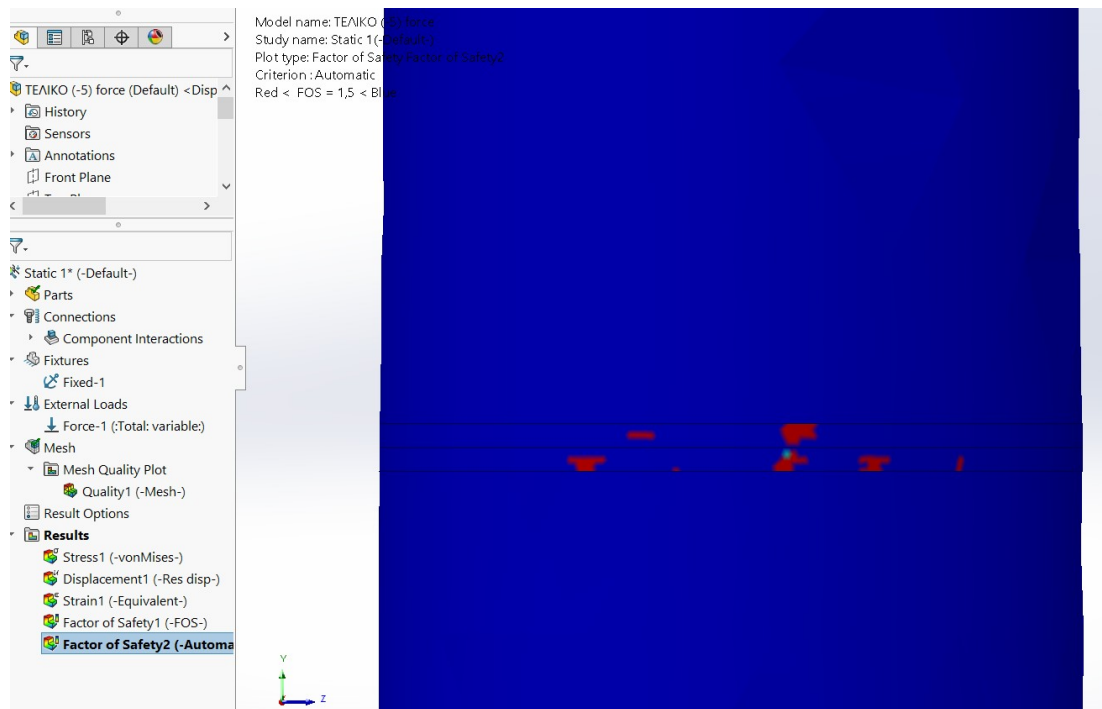
Παρακάτω παρουσιάζονται σε μεγέθυνση αυτά τα σημεία.



Εικόνα 5.6.17 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 1,5, στην πόρτα για πάχος μειωμένο κατά 5mm.

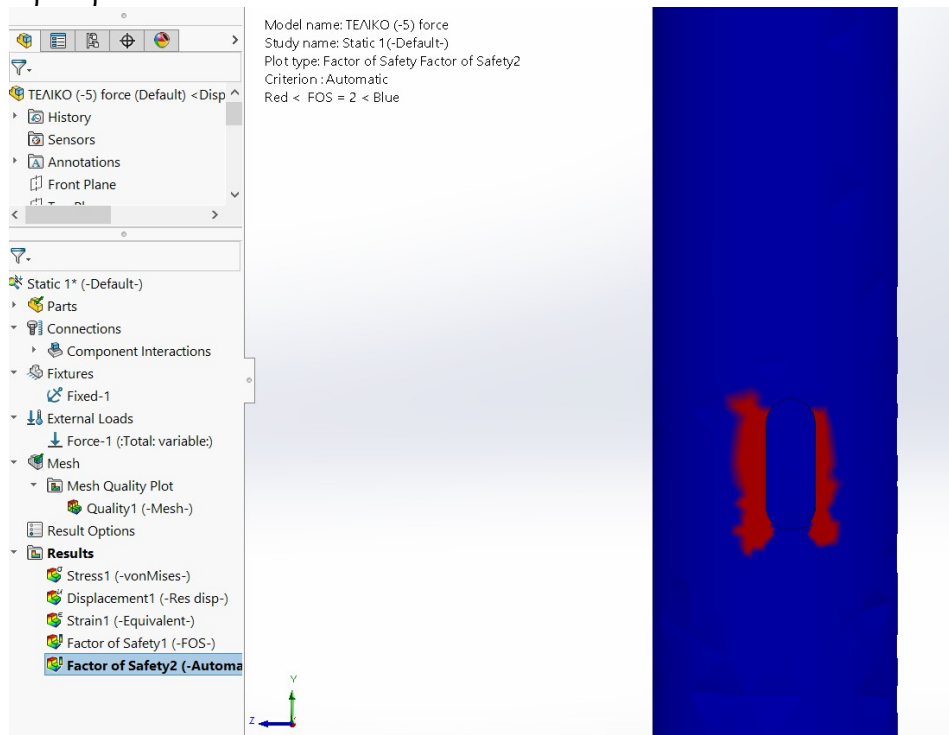


Εικόνα 5.6.18 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 1,5, για πάχος μειωμένο κατά 5mm. Αριστερά 1η μεσαία φλάντζα. Δεξιά 2η μεσαία φλάντζα. Όψεις από τις 90°.

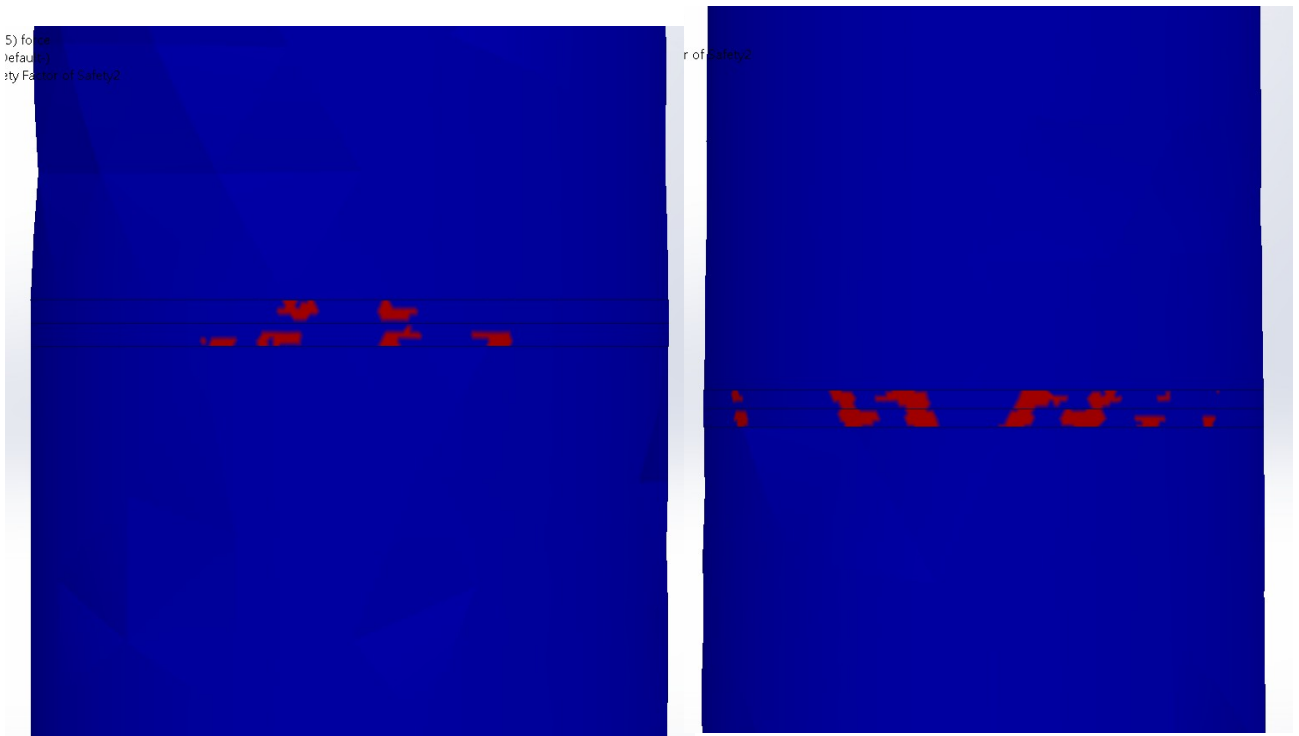


Εικόνα 5.6.19 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 1,5, για πάχος μειωμένο κατά 5mm στην 2η μεσαία φλάντζα. Όψη από τις 270°.

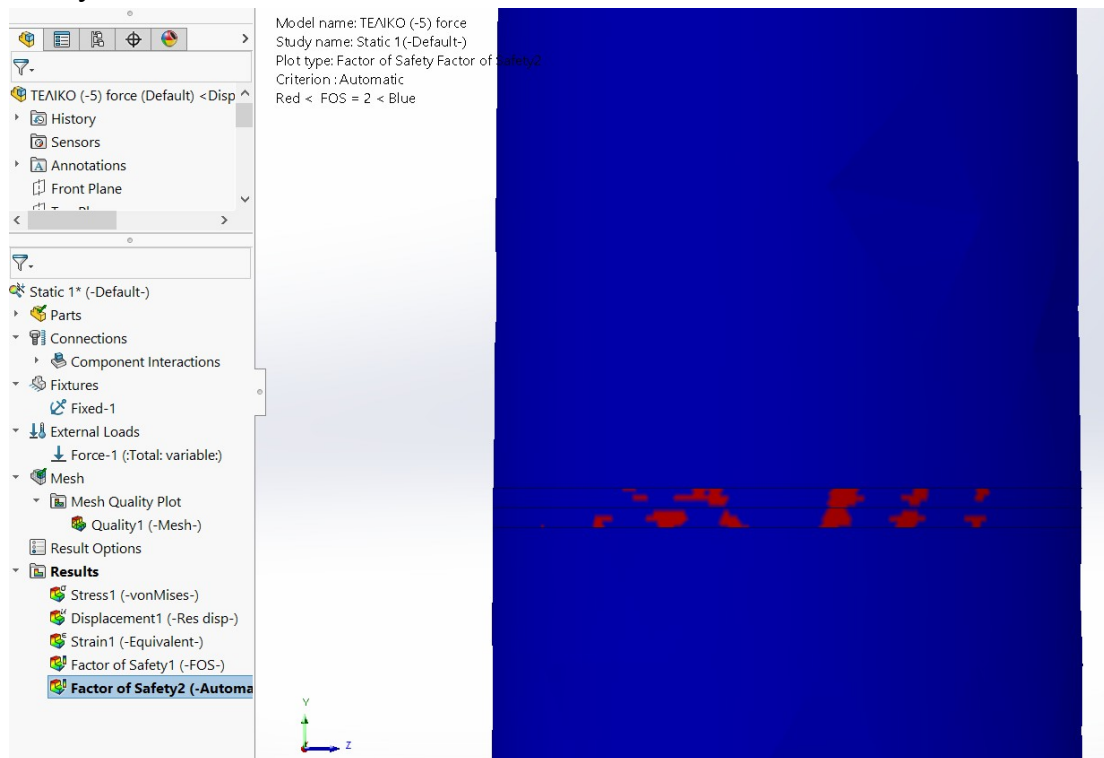
Παρομοίως, παρακάτω παρουσιάζονται τα σημεία που έχουν συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 2.



Εικόνα 5.6.20 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 2, για πάχος μειωμένο κατά 5mm στην πόρτα.

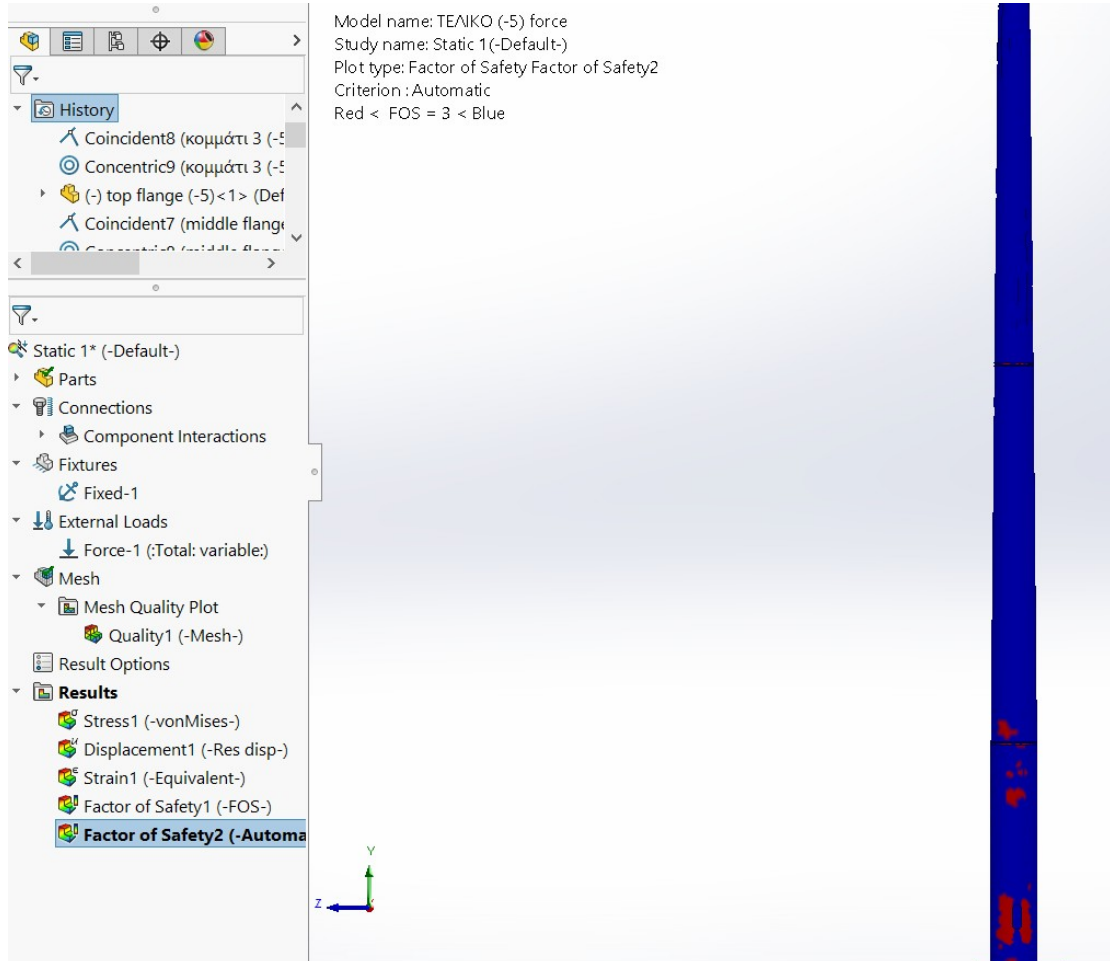


Εικόνα 5.6.21 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 2, για πάχος μειωμένο κατά 5mm. Αριστερά 1η μεσαία φλάντζα. Δεξιά 2η μεσαία φλάντζα. Όψεις από τις 90°.

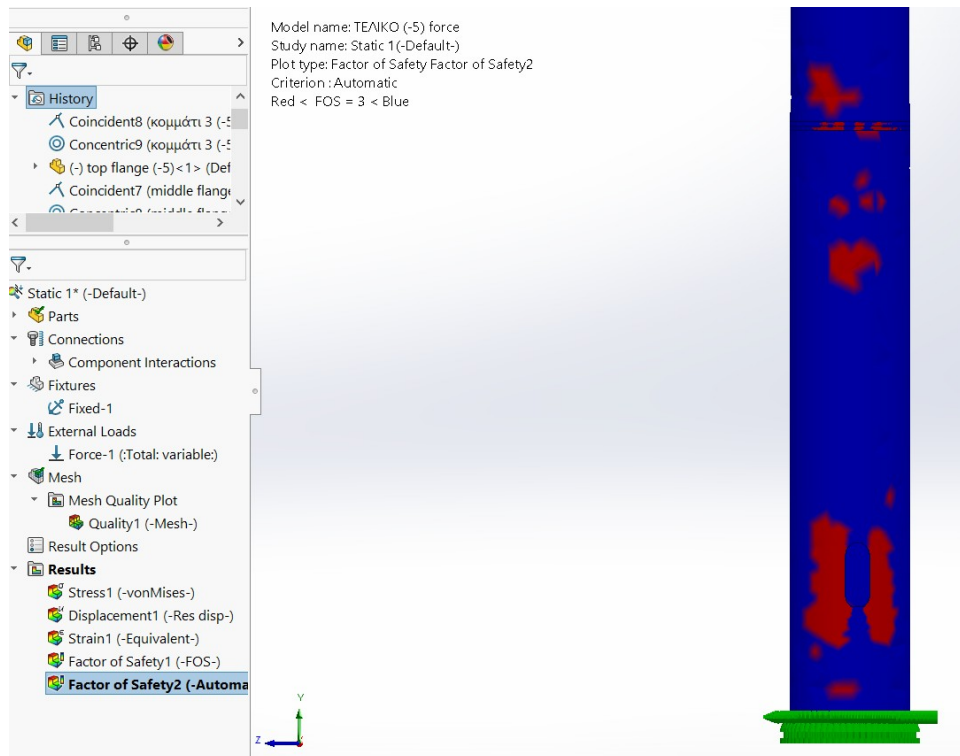


Εικόνα 5.6.22 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 2, για πάχος μειωμένο κατά 5mm στην 2η μεσαία φλάντζα. Όψη από τις 270°.

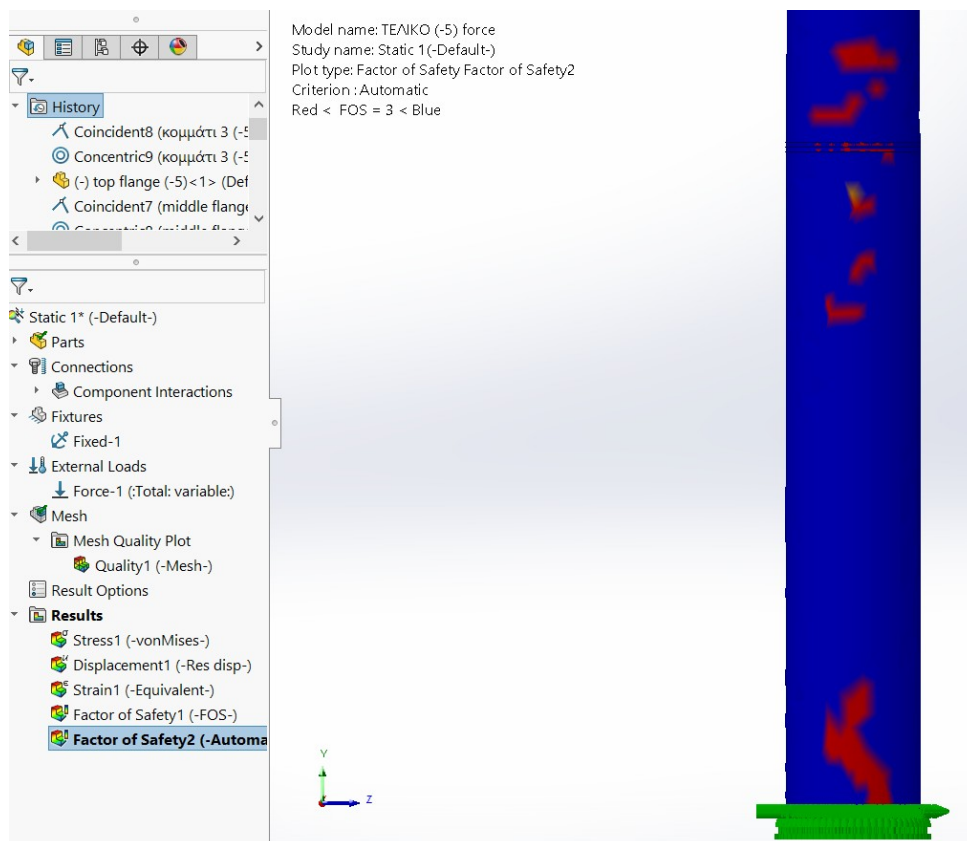
Με τον ίδιο τρόπο παρακάτω παρουσιάζονται και τα σημεία που έχουν συντελεστή ασφαλείας μικρότερο του 3.



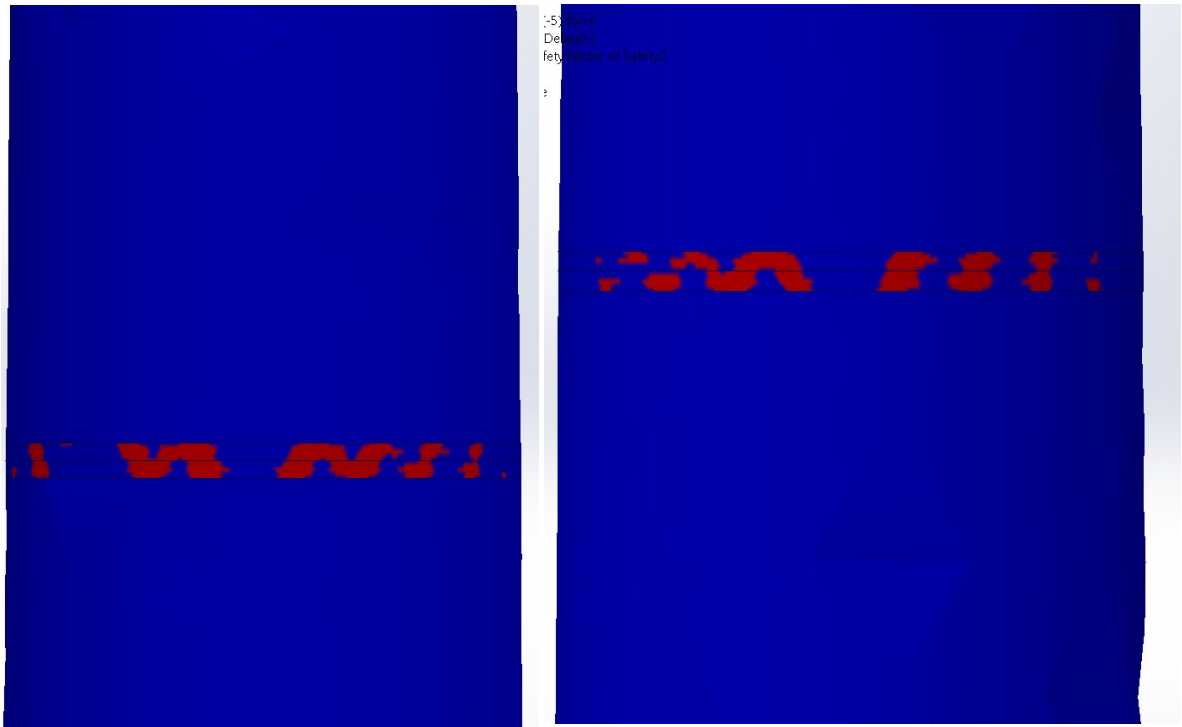
Εικόνα 5.6.23 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο από 3 για πάχος μειωμένο κατά 5mm.



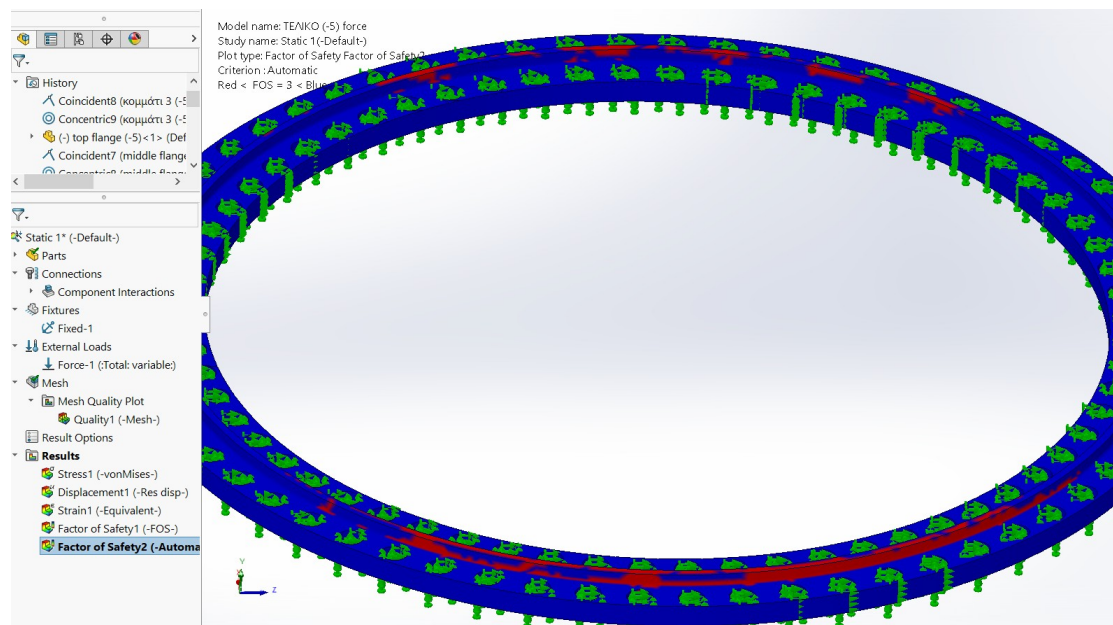
Εικόνα 5.6.24 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο από 3 για πάχος μειωμένο κατά 5mm. Όψη από τις 90°.



Εικόνα 5.6.25 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο από 3 για πάχος μειωμένο κατά 5mm. Όψη από τις 270°.



Εικόνα 5.6.26 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο από 3 για πάχος μειωμένο κατά 5mm στην 2η μεσαία φλάντζα. Αριστερά όψη από τις 90°. Δεξιά όψη από τις 270°.



Εικόνα 5.6.27 : Σημεία με συντελεστή ασφαλείας μικρότερο από 3 για πάχος μειωμένο κατά 5mm στην φλάντζα της βάσης. Όψη από τις 270°.

6. Συμπεράσματα και συζήτηση

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε έρευνα για το πως συμπεριφέρεται ένα αριθμητικό μοντέλο πύργου ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα στις καταπονήσεις που δέχεται από το φορτίου του ανέμου αλλά και από τα υπόλοιπα μέρη της ανεμογεννήτριας όπως είναι το σύστημα της ατράκτου με τους μηχανισμούς, την πλήμνη και τα πτερύγια. Παρακάτω παρουσιάζονται οι παραδοχές που έγιναν ώστε να αποφευχθούν τα πιθανά προβλήματα κατά την προσομοίωση του πύργου, η διαγραμματική απεικόνιση των αποτελεσμάτων και πιθανές προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Προβλήματα – Παραδοχές

Στην παρακάτω ενότητα θα εξεταστούν τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης του αριθμητικού μοντέλου του πύργου, καθώς και τρόποι αντιμετώπισης προς αποφυγή τους.

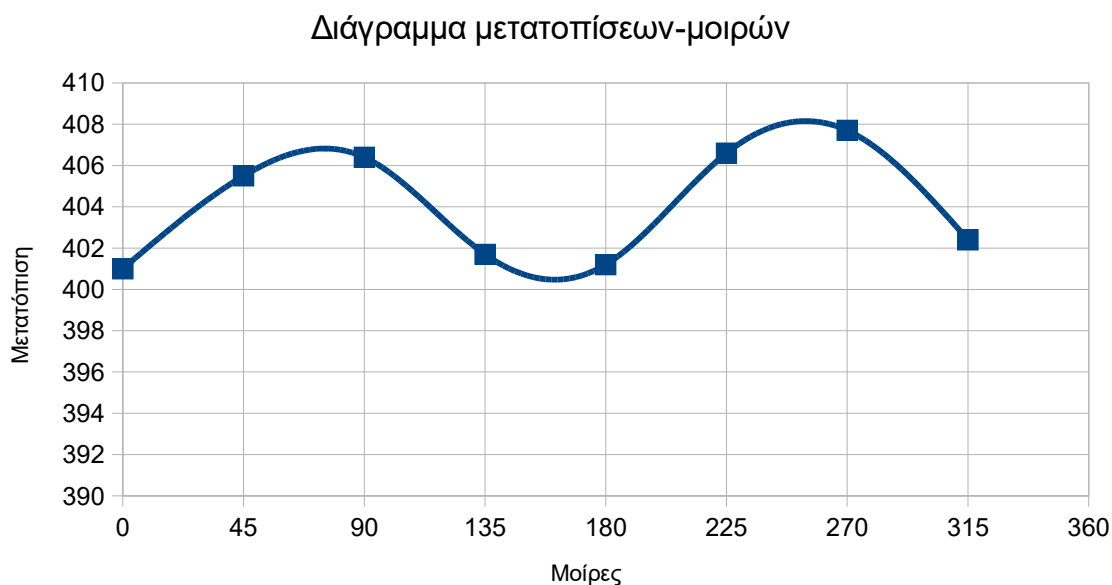
Ένα από τα κύρια προβλήματα που παρουσιάστηκαν ήταν στη δημιουργία πλέγματος. Συγκεκριμένα εξαιτίας της πολυπλοκότητας του πύργου δημιουργήθηκαν κάποιες ανομοιομορφίες και στα σημεία εκείνα παρατηρούνται υψηλές τάσεις.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος έγιναν κάποιες παραδοχές ώστε να απλοποιηθεί σε ένα βαθμό η μορφολογία του πύργου. Θεωρήθηκε, δηλαδή, ότι ο πύργος έχει την ίδια διατομή σε όλο το μήκος του εκάστοτε κομματιού και ότι οι φλάντζες είναι πακτωμένες μεταξύ τους χωρίς να έχουν κάποιο βαθμό ελευθερίας. Ωστόσο, παρατηρείται ότι κατά την προσομοίωση ο πύργος παρουσιάζει κάποια ασθενή σημεία στα οποία δημιουργούνται υψηλές τάσεις, επομένως το πρόβλημα δεν μπορεί να εξαλειφθεί εντελώς.

Επιπλέον, κατά τη δημιουργία του πλέγματος χρησιμοποιήθηκε αρχικά το standard πλέγμα το οποίο όμως έβγαζε σφάλμα και γι' αυτό τον λόγο τελικά χρησιμοποιήθηκε το blended curvature based πλέγμα. Τέλος, η πυκνότητα η οποία επιλέχθηκε ήταν κοντά στο Fine αλλά δεν ήταν αυτή με τα περισσότερα στοιχεία καθώς το πρόγραμμα εμφάνιζε σφάλμα και δεν δημιουργούσε πλέγμα για τα κομμάτια του πύργου αλλά μόνο για τις φλάντζες. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η χρήση εναλλακτικού πλέγματος θα μπορούσε να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα, ειδικά όσον αφορά τα ασθενή σημεία με χαμηλό συντελεστή ασφαλείας.

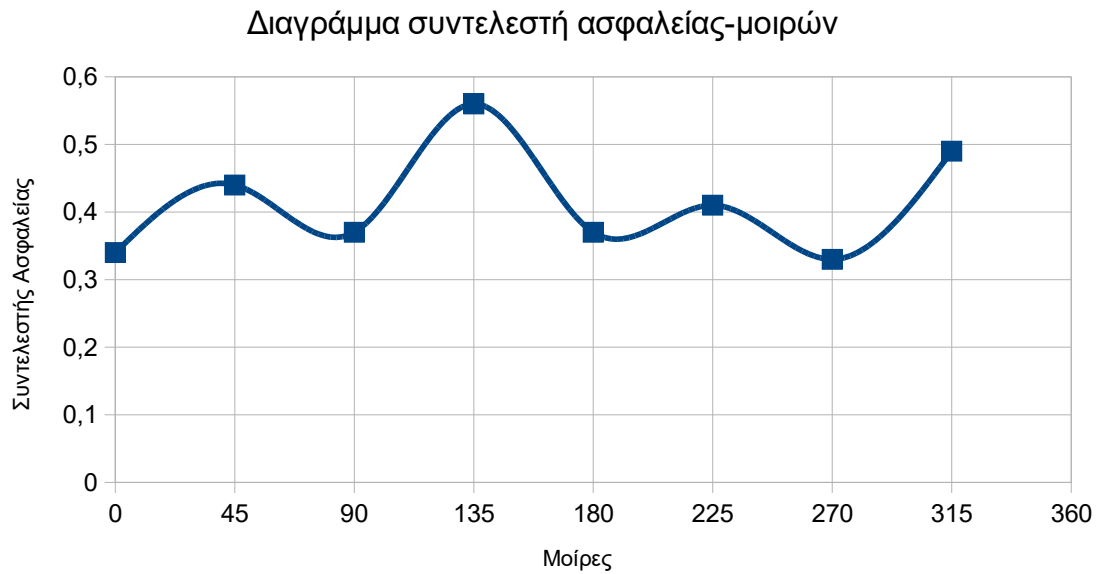
Αποτελέσματα

Κατά την προσομοίωση του αριθμητικού μοντέλου έγινε έλεγχος της συμπεριφοράς του πύργου στις διαφορετικές κατευθύνσεις του ανέμου με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους. Παρακάτω παρουσιάζονται διαγραμματικά τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών όσον αφορά τη μετατόπιση του πύργου και τον συντελεστή ασφαλείας που εμφάνισε το πρόγραμμα για τις διαφορετικές κατευθύνσεις αλλά και για την αλλαγή του πάχους σε καταπόνηση από τις 270°.



Διάγραμμα 1: Διαγραμματική απεικόνιση της μετατόπισης ως προς την κατεύθυνση του ανέμου σε μοίρες.

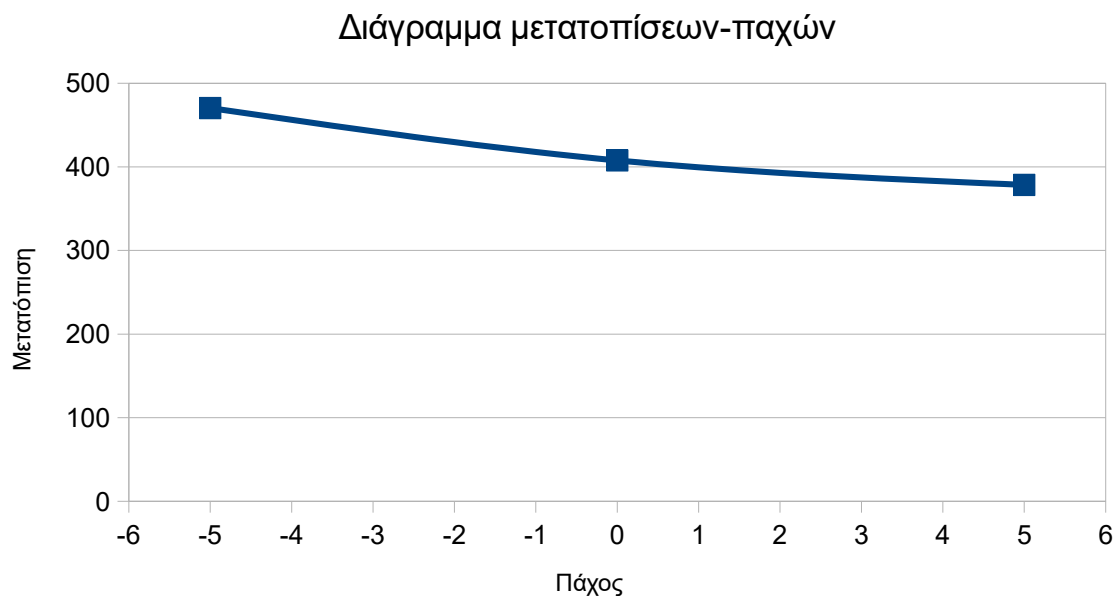
Παρατηρείται ότι ο πύργος παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μετατόπιση στις 270° και τη μικρότερη στις 0°. Αντίστοιχα στα αντιδιαμετρικά σημεία παρουσιάζει μεγάλη μετατόπιση στις 90° και μικρή μετατόπιση στις 180°, επομένως υπάρχει μια συμμετρία και ακολουθεί το διάγραμμα μια κυματοειδή μορφή.



Διάγραμμα 2: Διαγραμματική απεικόνιση του συντελεστή ασφαλείας ως προς την κατεύθυνση του ανέμου σε μοίρες.

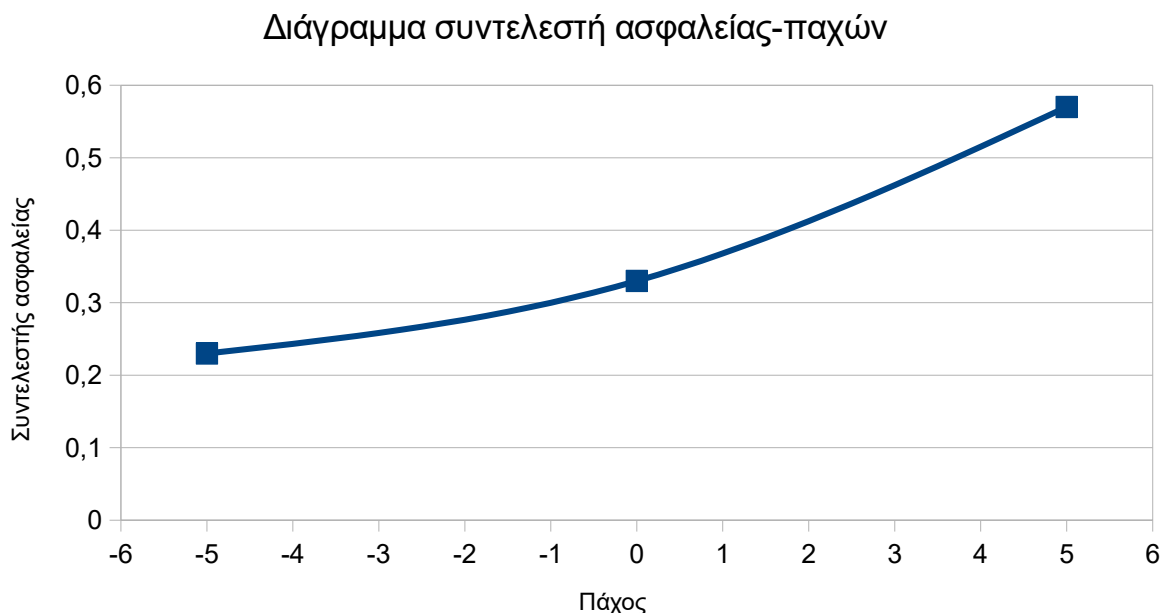
Αντίστοιχα παρατηρείται ότι οι 270° παρουσιάζουν τον χαμηλότερο συντελεστή ασφαλείας όπως και εξίσου χαμηλό συντελεστή ασφαλείας παρουσιάζουν και οι 90° που είναι αντιδιαμετρικό σημείο. Στις 135° εμφανίζεται ο υψηλότερος συντελεστής ασφαλείας και παρομοίως στις 315° εμφανίζεται εξίσου υψηλός συντελεστής.

Για την δυσμενέστερη περίπτωση που είναι η καταπόνηση από τις 270° έγινε δοκιμή για πάχος αυξημένο κατά 5mm και μειωμένο κατά 5mm. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.



Διάγραμμα 3: Διαγραμματική απεικόνιση της μετατόπισης για κατεύθυνση του ανέμου από 270° ως προς πάχος αυξημένο κατά 5mm (+5), αρχικό πάχος (0) και μειωμένο κατά 5mm (-5).

Παρατηρείται ότι για πάχος μειωμένο κατά 5mm παρουσιάζεται η μεγαλύτερη μετατόπιση, ενώ για πάχος μειωμένο κατά 5mm παρουσιάζεται η μικρότερη.



Διάγραμμα 4: Διαγραμματική απεικόνιση του συντελεστή ασφαλείας για κατεύθυνση του ανέμου από 270° ως προς πάχος αυξημένο κατά 5mm (+5), αρχικό πάχος (0) και μειωμένο κατά 5mm (-5).

Παρομοίως, παρατηρείται ότι όσο μικρότερο είναι το πάχος τόσο μικρότερο συντελεστή ασφαλείας εμφανίζει και αντίστοιχα, όσο μεγαλύτερο το πάχος τόσο μεγαλύτερος ο συντελεστής ασφαλείας.

Συμπερασματικά, όσο μειώνεται το πάχος τόσο περισσότερο καταπονείται ο πύργος, ενώ όσο αυξάνεται το πάχος εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα, όμως αυτό προϋποθέτει ένα επιπλέον κόστος.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ολοκληρώνοντας, η δημιουργία ενός αριθμητικού μοντέλου αποτελεί μια διαδικασία που απαιτεί πολύ χρόνο και η συγκεκριμένη ερευνητική διαδικασία δείχνει ότι η διαφοροποίηση του σχεδιασμού αυτού όπως επίσης και η παραμετρική σχεδίαση μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν μια μεγαλύτερη αλλαγή του πάχους, η αλλαγή του ύψους, του βάρους, του υλικού όπως επίσης και η χρήση κάποιων fillet στην πόρτα του πύργου. Ο σχεδιασμός ενός μοντέλου με αυτές τις διαφοροποιήσεις αποτελεί αντικείμενο προς μελλοντική διερεύνηση.

7. Βιβλιογραφία

Corke, T., & Nelson, R. (2018). *Wind energy design*. CRC Press.

Veritas, D. N. (2004). Design of Offshore Wind Turbine Structure. *Offshore Standard DNV-OS-J101*.

Veritas, D. N. (2002). Guidelines for design of wind turbines. (*No Title*).

Bhattacharya, S. (2019). *Design of foundations for offshore wind turbines*. John Wiley & Sons.

Beurskens, J. (2014). The history of wind energy. *Understanding wind power technology: theory, deployment and optimisation*, 1-44.

Seshu, P. (2003). *Textbook of finite element analysis*. PHI Learning Pvt. Ltd..

Καρύδης, Π. Α. (2001). Υπολογιστικές μέθοδοι και εφαρμογές σε λεπτότοιχες κατασκευές. *ΕΜΠ Αθήνα*.

Σακελλαρίου, Μ., & Κοζάνης, Σ. (1996). Ανάπτυξη προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. *TATM-ΕΜΠ, Αθήνα*, 26-06.

Καλδέλλης, Ι. Κ. (2005). *Διαχείριση της αιολικής ενέργειας: θεωρία, υποδειγματικά παραδείγματα, ερωτήσεις κατανόησης-εμβάθυνσης, άλυστα προβλήματα, στοιχεία αγοράς, αιολικές μηχανές, μελέτη αιολικού δυναμικού, ενεργειακή παραγωγή, νομοθετικό πλαίσιο, χρηματοδοτικές ευκαιρίες*. Αθήνα, Σταμούλης.

Λευθεριώτης, Γ. (2015). *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Ενότητα: Εισαγωγή –Γενικά Στοιχεία*. [PowerPoint]. Τμήμα Φυσικής, Σχολή Θετικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Πατρών. https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/PHY1953/%CE%95%CE%BD%CF%8C%CF%84%CE%B7%CF%84%CE%B1_5_%28%CE%91%CE%B9%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%95%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%29.pdf

Dietrich, K. (2014). *Darrieus Rotor Ennabeuren 3256* [Φωτογραφία]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Darrieus-Rotor_Ennabeuren-3256.jpg

Stahlkocher. (2007). *H Darrieus Rotor* [Φωτογραφία]. Wikimedia Commons. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:H-Darrieus-Rotor.jpg>

[Single-bladed wind turbine]. (χ.χ.). [Φωτογραφία]. Ανακτήθηκε από Wind Energy-The Facts. <https://www.wind-energy-the-facts.org/design-styles-7.html>

[Horizontal-axis wind turbines on a wind farm]. (χ.χ.). [Φωτογραφία]. Ανακτήθηκε από U.S. Energy Information Administration.
<https://www.eia.gov/energyexplained/wind/types-of-wind-turbines.php>

NASA Glenn Research Center. (χ.χ.). *Mod 5B Wind turbine* [Φωτογραφία]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mod-5B_Wind_turbine.jpg

Σήραγγα T2 Τεμπών. (2022, Ιανουάριος). Στο *Wikipedia*.
https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CE%AE%CF%81%CE%B1%CE%B3%CE%B3%CE%B1_%CE%A4_%CE%A4%CE%B5%CE%BC%CF%80%CF%8E%CE%BD

Εικόνα 1. (a) Image and (b) geometry of the suction caisson. Από το «Impedance of flexible suction caissons. Earthquake Engineering & Structural Dynamics», Liingaard, Morten & Andersen, Lars & Ibsen, Lars. 2007.
https://www.researchgate.net/figure/a-Image-and-b-geometry-of-the-suction-caisson_fig2_227733854

Houlsby, G. T., Kelly, R. B., Huxtable, J., & Byrne, B. W. (2005). Field trials of suction caissons in clay for offshore wind turbine foundations. *Géotechnique*, 55(4), 287-296.

Lombardi, D. (2010). Dynamics of offshore wind turbines. *University of Bristol: Bristol, UK*.

Stettner, O. (2014). *Numerical Simulation for Installation of Jacket Foundation of Offshore Wind Turbines* (Master's thesis, Institutt for marin teknikk).

Rubino, F., Nisticò, A., Tucci, F., & Carlone, P. (2020). Marine application of fiber reinforced composites: A review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 26.

Ömer Faruk, H., & Mutungi, H. (2016). Assessment of simulation codes for offshore wind turbine foundations.

Wind turbines destroyed in Evia, Greece. (2020, 13 Ιανουαρίου). The Structural Engineer. <https://www.thestructuralengineer.info/news/wind-turbines-destroyed-in-evia-greece>

Asareh, M. A. (2015). *Dynamic behavior of operational wind turbines considering aerodynamic and seismic load interaction*. Missouri University of Science and Technology.

Yaramasu, V., Wu, B., Sen, P. C., Kouro, S., & Narimani, M. (2015). High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies. *Proceedings of the IEEE*, 103(5), 740-788.

ΕΛΕΤΑΕΝ. (2023, 25 Ιανουαρίου). *Δελτίο Τύπου: Η Στατιστική της Αιολικής Ενέργειας για το 2022*. <https://eletaen.gr/deltio-typou-statistiki-aiolikis-energeias-2022/>

ΕΛΕΤΑΕΝ. (2022, 28 Ιανουαρίου). *Δελτίο Τύπου: Η Στατιστική της Αιολικής Ενέργειας για το 2021*. <https://eletaen.gr/dt-eletaen-statistiki-b-examino-2021/>

ΕΛΕΤΑΕΝ: Στα 4,7 GW η συνολική αιολική ισχύς στην Ελλάδα τέλη του 2022. (2023, 25 Ιανουαρίου). EnergyWorld. <https://energyworld.gr/%ce%b5%ce%bb%ce%b5%cf%84%ce%b1%ce%b5%ce%bd-%cf%83%cf%84%ce%b1-47-gw-%ce%b7-%cf%83%cf%85%ce%bd%ce%bf%ce%bb%ce%b9%ce%ba%ce%ae-%ce%b1%ce%b9%ce%bf%ce%bb%ce%b9%ce%ba%ce%ae-%ce%b9%cf%83%cf%87%cf%8d%cf%82/>

The new floating turbine will deliver a huge amount of energy. (2022, 31 Αυγούστου). NewsBeezer. <https://newsbeezer.com/slovakiaeng/the-new-floating-turbine-will-deliver-a-huge-amount-of-energy/>

WorldWideWind. (2022, 31 Οκτωβρίου). *WorldWideWind - Understanding Offshore Wind And Its Importance To Netzero*. <https://worldwidewind.no/blogs/news/worldwidewind-understanding-offshore-wind-and-its-importance-to-netzero>

WorldWideWind. (2022, 29 Αυγούστου). *RECHARGE: 'This is floating wind's Tesla moment'*. <https://worldwidewind.no/blogs/news/offshore-wind-tesla-moment-by-recharge>

1-MW floating vertical axis wind turbine to be deployed off Norway. (2022, 12 Σεπτεμβρίου). New Atlas. <https://newatlas.com/energy/seatwirl-vawt-norway/>

Darius, S. (2022, 9 Αυγούστου). *'Floating wind's Tesla moment' | Supersize tilting turbine targets energy mainstream by 2030*. Recharge. <https://www.rechargenews.com/wind/floating-winds-tesla-moment-supersize-tilting-turbine-targets-energy-mainstream-by-2030/2-1-1284922>

[Four Windside WS-4B wind turbines producing power for a radar station in China]. (χ.χ.). [Φωτογραφία]. Ανακτήθηκε από Windside. <https://windside.com/products/>

[Vertical Axis Wind Turbine]. (χ.χ.). [Φωτογραφία]. Ανακτήθηκε από Vatsaa Energy. <https://vatsaaenergy.com/windenergytechnologies>

Turbine Light: “wind-powered” streetlights for motorways. (2019, 19 Δεκεμβρίου). The Patent Invention Magazine. <https://www.thepatent.news/2019/12/19/turbine-light-wind/>

[Donut Wind Energizer Is More Efficient]. (χ.χ.). [Φωτογραφία]. Ανακτήθηκε από Ubergizmo. <https://www.ubergizmo.com/2009/05/donut-wind-energizer-is-more-efficient/>

Dvorak, P. (2016, 15 Μαρτίου). *Leviathan Energy’s clever wind deflector increases power output of large wind turbines.* Windpower Engineering & Development. <https://www.windpowerengineering.com/leviathan-energys-clever-wind-deflector-increases-power-output-large-wind-turbines/>

Matheson, R. (2014, 15 Μαΐου). *High-flying turbine produces more power.* Mit News. <https://news.mit.edu/2014/high-flying-turbine-produces-more-power-0515>

[Makani M600 offshore in operation.]. (2020, 9 Οκτωβρίου). [Φωτογραφία]. Ανακτήθηκε από Delft University of Technology. <https://www.tudelft.nl/en/2020/lr/13-years-of-makani-airborne-wind-energy-knowledge-available-open-source>

[Harnessing wind energy with kites to create renewable electricity]. (χ.χ.). XCompany. <https://x.company/projects/makani/>