



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Πολυτεχνική Σχολή  
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Επιστήμης και Τεχνολογίας των Κατασκευών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

# Συγκριτική Ανάλυση Πυλώνων Χερσαίων Ανεμογεννητριών (Α/Γ)

*Comparative Analysis of Onshore Wind Turbine Towers*

## Διπλωματική Εργασία

### Φοιτητές:

Νούσιος Στέργιος	14090
Χατζητόλιος Ειρηναίος Ιωάννης	14093

### Επιβλέπων Καθηγητής:

Ευθυμίου Ευάγγελος	Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.
--------------------	----------------------------

### Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Ευθυμίου Ευάγγελος	Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.
Κοντολέων Κάρολος	Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.
Νικολαΐδης Θεμιστοκλής	ΕΔΙΠ Α.Π.Θ., Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη, Οκτώβριος 2021



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	1
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	4
SUMMARY .....	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	8
1.1 Σκοπός της Εργασίας .....	8
1.2 Δομή της Εργασίας .....	8
2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (WIND ENERGY SUPPORT STRUCTURES).....	10
2.1 Αιολική Ενέργεια .....	10
2.1.1 Αιολική Ενέργεια Παγκοσμίως.....	11
2.1.2 Αιολική Ενέργεια στην Ευρώπη .....	12
2.1.3 Αιολική Ενέργεια στη Ελλάδα .....	13
2.2 Κατασκευές Αιολικής Ενέργειας .....	16
2.2.1 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα.....	17
2.2.2 Ανεμογεννήτριες Οριζοντίου Άξονα.....	20
3. ΕΙΔΗ ΠΥΛΩΝΩΝ .....	28
3.1 Σωληνωτός Μεταλλικός Πύργος .....	28
3.1.1 Συνδέσεις Τριβής .....	30
3.1.2 Σύνδεση με κοιλίωση σε πατούρες.....	32
3.2 Δικτυωτός Μεταλλικός Πύργος.....	33
3.3 Πύργος Σκυροδέματος .....	35
3.3.1 Σκυροδέτηση στο εργοτάξιο .....	35
3.3.2 Συναρμολόγηση στο εργοτάξιο.....	36
3.4 Υβριδικός Πύργος.....	38
3.5 Ξύλινος Πύργος.....	40
4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ – ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ.....	44
4.1 Ευρωκώδικας 0: Βάσεις Σχεδιασμού Φερουσών Κατασκευών (EN 1990).....	45
4.1.1 Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (Ο.Κ.Α.) .....	45

4.1.2	Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (Ο.Κ.Λ.) .....	46
4.2	Ευρωκώδικας 1, Μέρος 1-4: Γενικές Δράσεις – Δράσεις Ανέμου (EN 1991-1-4) .....	46
4.3	Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-6: Αντοχή και Ευστάθεια Κελυφωτών Κατασκευών (EN1993-1-6) .....	50
4.4	Ευρωκώδικας 3, Μέρος 3-1: Πύργοι, Ιστοί και Καμινάδες – Πύργοι και Ιστοί.....	51
4.5	Κανονισμός IEC 61400-1: Προδιαγραφές Σχεδιασμού.....	51
5.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	53
5.1	Επιλογή Μοντέλου Ανεμογεννήτριας.....	53
5.1.1	Χαρακτηριστικά μοντέλου «Α/Γ 5 MW του NREL» .....	53
5.1.2	Βάρος Α/Γ .....	54
5.1.3	Ώθηση του ανέμου στον ρότορα .....	54
5.2	Μοντέλα Πύργων .....	55
5.2.1	Δικτυωτός Πύργος.....	55
5.2.2	Σωληνωτός Πύργος.....	70
6.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ.....	80
6.1	Δικτυωτός Πύργος .....	80
6.1.1	Μετακινήσεις .....	80
6.1.2	Εντατικά μεγέθη.....	85
6.1.3	Αντιδράσεις υποβάθρου .....	88
6.2	Σωληνωτός Πύργος.....	90
6.2.1	Μετακινήσεις .....	90
6.2.2	Τάσεις.....	91
6.2.3	Αντιδράσεις υποβάθρου .....	93
7.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	95
7.1	Σύγκριση .....	95
7.2	Συμπεράσματα .....	97
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	99

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Πρωτίστως, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα της εργασίας, επίκουρο καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ κύριο Ευθυμίου Ευάγγελο, για την πρόταση του ενδιαφέροντος και κυρίως επίκαιρου θέματος το οποίο πραγματεύεται η εργασία. Τον ευχαριστούμε ιδιαίτερα για τη βοήθεια του, την εμπιστοσύνη που μας έδειξε, την ελευθερία που μας παρείχε στη διαμόρφωση του θέματος και την ενθάρρυνση του για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Ευχαριστούμε επίσης θερμά τον υπεύθυνο μηχανικό παραγωγής πυλώνων για ανεμογεννήτριες στην εταιρία μεταλλικών κατασκευών ΕΜΕΚ κύριο Καρρά Χρήστο, για το ενδιαφέρον του και συμβολή του με πολύτιμες πληροφορίες και στοιχεία που μας έδωσαν μια σφαιρική εικόνα σχετικά με την ελληνική αγορά μεταλλικών κατασκευών για εφαρμογές αιολικής ενέργειας.

Τέλος, ευχαριστούμε τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής της εργασίας μας, τον κύριο Ευθυμίου Ευάγγελο, κύριο Κοντολέων Κάρλο και κύριο Νικολαΐδη Θεμιστοκλή για την προθυμία και τη διάθεση του χρόνου τους για την αξιολόγηση της εργασίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αιολική ενέργεια είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη πηγή ενέργειας παγκοσμίως αυτή τη στιγμή. Σε όλο τον κόσμο υπάρχουν εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας με συνολική ισχύ που ξεπερνάει τα 700 GW, αριθμός που συνεχώς αυξάνεται με εκθετικό ρυθμό. Ηγετική θέση όσον αφορά τις εγκαταστάσεις κατέχουν η Κίνα και η Αμερική, ικανοποιητική είναι όμως και η εικόνα για την αιολική ενέργεια στην Ευρώπη. Όσον αφορά την Ελλάδα, το τρέχον δυναμικό ανέρχεται στα 4,114 MW το οποίο αντιστοιχεί στο 15% των συνολικών αναγκών ενέργειας.

Η άνοδος της ζήτησης για αιολική ενέργεια συνοδεύεται από ταυτόχρονες εξελίξεις στον κλάδο των ανεμογεννητριών. Η ανάγκη για την αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση του ανέμου έχει πυροδοτήσει την κατασκευή ανεμογεννητριών με έλικες ολοένα και μεγαλύτερων διαμέτρων και συνεπώς ψηλότερων κατασκευών. Όσο αυξάνονται τα ύψη, τόσο κρισιμότερη θεωρείται η βέλτιστη διαμόρφωση των πυλώνων υποστήριξης. Ζητούμενο δεν αποτελεί μονάχα το μεγαλύτερο μέγεθος, αλλά και η όσο το δυνατόν παράλληλη μείωση του κόστους, με αποτέλεσμα να έχουν προκύψει διάφορα είδη πύργων με πρωταγωνιστή της αγοράς το σωληνωτό. Στην παρούσα εργασία εξετάζονται δυο πρότυπα μοντέλα σωληνωτού και δικτυωτού πυλώνα, με σκοπό την σύγκριση τους και την ανάδειξη των διαφορών τους.

Ο σωληνωτός πύργος κατέχει κυρίαρχη θέση στην παγκόσμια αγορά κυρίως λόγω της ευκολίας και ταχύτητας δόμησης του. Σημαντικό όμως μειονέκτημα του αποτελεί ο περιορισμός στην διάμετρο της βάσης του για λόγους μεταφοράς, γεγονός που δυσχεραίνει το σχεδιασμό, ιδιαίτερα για ψηλότερες κατασκευές. Ο δικτυωτός πυλώνας ξεπερνάει αυτό τον περιορισμό και επιτρέπει την κατασκευή αρκετά ψηλών Α/Γ ενώ παράλληλα λόγω του κατά κανόνα λιγότερου υλικού που χρησιμοποιεί είναι και οικονομικότερος. Υστερεί βέβαια σημαντικά στο αισθητικό κομμάτι και ταυτόχρονα η ανέγερση και συντήρηση του είναι χρονοβόρες διαδικασίες. Στην παγκόσμια αγορά απαντώνται επίσης πύργοι από σκυρόδεμα, υβριδικά μοντέλα χάλυβα – σκυροδέματος καθώς και ξύλινοι πυλώνες. Οι πρώτοι ξεχωρίζουν για το γεγονός ότι εμφανίζουν διπλάσιο προσδόκιμο ζωής έναντι των χαλύβδινων εναλλακτικών. Το υβριδικό μοντέλο επιχειρεί να παντρέψει τα πλεονεκτήματα του σωληνωτού με εκείνα του σκυροδέματος, ενώ το ξύλο ως δομικό στοιχείο ίσως χαίρει μεγαλύτερης απήχησης στο μέλλον λόγω του οικολογικού του προφίλ.

Για να προκύψουν συγκρίσιμα αποτελέσματα από την ανάλυση των δύο πυλώνων χρησιμοποιήθηκε κοινό μοντέλο Α/Γ ισχύος 5 MW, το οποίο καθόρισε το ύψος τους στα 90 μέτρα. Η προσομοίωση και στατική ανάλυση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε στα λογισμικά RFEM και RSTAB της εταιρίας DLUBAL και με τη βοήθεια προσαρτημένου λογισμικού. Τα τελικά μοντέλα προέκυψαν έπειτα από αλληπάλληλες δοκιμές. Ο χάλυβας που επιλέχθηκε και στις δύο κατασκευές ήταν ποιότητας S355 ενώ επιβλήθηκαν οι ίδιοι τύποι φορτίων· το ίδιο βάρος της κατασκευής, το βάρος της Α/Γ και η ώθηση λόγω του ρότορα με τις αντίστοιχες ροπές ανατροπής στην κορυφή και το ξεχωριστά διαμορφωμένο προφίλ πιέσεων ανέμου για κάθε πύργο. Για τους απαραίτητους ελέγχους ακολουθήθηκαν οι σχετικές διατάξεις του Ευρωκώδικα.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης, ο σωληνωτός πύργος προέκυψε όπως ήταν αναμενόμενο βαρύτερος, ενώ εμφάνισε αρκετά μεγαλύτερες μετακινήσεις στην κορυφή του. Στη

βάση του ο δικτυωτός εμφάνισε κατά πολύ μικρότερες ροπές και ως εκ τούτου απαιτεί λιγότερη μέριμνα σχετικά με τη θεμελίωσή του. Από την άλλη, ο μεγάλος αριθμός στοιχείων και η πολυπλοκότητα του δικτύματος καθιστούν τη συναρμολόγηση του χρονοβόρα και την συντήρηση του επικίνδυνη και δύσκολη. Εν κατακλείδι, τα προϊόντα της ανάλυσης σε συνδυασμό με τα ήδη γνωστά χαρακτηριστικά του κάθε μοντέλου αφενός επιβεβαιώνουν την τάση της αγοράς προς το σωληνωτό πυλώνα, ενώ αφετέρου ο δικτυωτός πύργος αποδεικνύεται μια βιώσιμη εναλλακτική με καλές προοπτικές ειδικά όταν το κύριο ζητούμενο είναι η μείωση των δαπανών.

## SUMMARY

Wind is the world's fastest growing energy source today. All over the world there is wind energy infrastructure with capacity that surpasses 700 GW, a figure that constantly rises exponentially. China and U.S.A. have assumed the leading role as far as infrastructure is concerned, while Europe maintains a decent profile. As for Greece, the current power potential amounts to 4,144 MW which accounts for 15% of the total energy needs.

The rise in demand of wind energy is accompanied by simultaneous progress in the wind turbine industry. The need to harness the power of wind more efficiently has propelled the production of rotors with increasingly larger diameter and thus taller structures to accommodate them. With greater heights in play, the need to optimize the supporting structures emerges. Building taller structures is not the only objective, but also the concurrent reduction of cost and as a result various types of towers have emerged, with the tubular model having a leading position in the market. In the present thesis two prototype tower models are examined, tubular and lattice, aiming to compare them and showcase their differences.

The tubular tower dominates the global market, mainly for its convenient and rapid construction. An important drawback is the constraint of its base diameter due to transportation issues which makes the design challenging, especially for taller structures. The lattice one overcomes this obstacle, allowing for higher towers while cutting down on costs because of less material use. They certainly lack in aesthetics while their construction and maintenance are time – consuming procedures. In the global market one can also find towers made of concrete, steel – concrete hybrids and wood. The first one stands out for its life span that is double from that of its steel counterparts. The hybrid model attempts to merge the advantages of a tubular with those of a concrete one, while wood as a structural component might show greater potential in the future considering its environment friendly profile.

For the analysis of the towers to provide comparable results, a common wind turbine model of 5 MW was adopted that determined their height at 90 meters. The simulation and structural analysis were executed using DLUBAL's RFEM and RSTAB software and their included add-on modules. The geometry of each model was finalized after a trial-and-error run. For both models the steel grade used was S355 and the forces acting on each tower were the self – weight of the structure, the weight of the WT and the thrust caused by the rotor and their respective overturning moments at the top and the customized wind pressure profile for each model. The appropriate design checks were performed according to the specifications of Eurocode.

Comparing the results of the analysis, the tubular structure ended up, as expected, heavier than the lattice while the overall translation of its top was significantly greater. As for the lattice model, the moment developed at its base was way lower which alleviates the need for such a robust foundation. On the opposite side, the number of its elements and the complexity of the lattice model, render its construction very time consuming and its maintenance demanding and dangerous. To sum up, the products of the analysis combined with the already known features of each model on one hand confirm the trend of favoring the tubular model while on the other, demonstrate that the



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

lattice tower proves to be a viable alternative with great potential especially when the main concern is minimizing the cost.

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Σκοπός της Εργασίας

Αντιμέτωπη με τις ζοφερές συνέπειες της κλιματικής κρίσης που συντελείται, η ανθρωπότητα έχει στρέψει το ενδιαφέρον της προς καθαρότερες μορφές ενέργειας αξιοποιώντας ανανεώσιμες πηγές με την αιολική ενέργεια να ξεχωρίζει ανάμεσα τους, επιδεικνύοντας καλπάζουσα αύξηση ως προς την εγκατεστημένη ισχύ. Εξετάζοντας την ιστορική πορεία της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, εξάγεται το συμπέρασμα πως διαχρονικά επιθυμητός στόχος υπήρξε η κατασκευή ανεμογεννητριών με μεγαλύτερη διάμετρο ρότορα και ως εκ τούτου ο σχεδιασμός υψηλότερων κατασκευών.

Η αύξηση του ύψους συνοδεύεται από χρήση περισσότερου υλικού που με τη σειρά του συνεπάγεται μεγαλύτερο κόστος και δαπάνες ενέργειας. Έτσι, με στόχο τα μεγαλύτερα ύψη και την ταυτόχρονη μείωση του υλικού, έχει προκύψει πλέον η ανάγκη για την διερεύνηση νέων προτάσεων υποστήριξης χερσαίων Α/Γ από την καθιερωμένο τύπο του σωληνωτού πυλώνα. Πολλά υποσχόμενη λύση είναι ο δικτυωτός πύργος, ο οποίος με το σωστό σχεδιασμό έχει αποδειχθεί ανταγωνιστική εναλλακτική όσον αφορά το απαιτούμενο υλικό, την φέρουσα ικανότητα αλλά και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Stavridou, Koltsakis, & Baniotopoulos, 2020). Η παρούσα εργασία στοχεύει να αναδείξει τα παραπάνω συγκρίνοντας τα δύο προαναφερθέντα μοντέλα. Συγκεκριμένα, έπειτα από αναζήτηση στη σημερινή βιβλιογραφία και τις εξελίξεις στον κλάδο των κατασκευών υποστήριξης της αιολικής ενέργειας, διαμορφώθηκαν δύο πρότυπα μοντέλα πυλώνων, δικτυωτού και σωληνωτού, με σκοπό την σύγκριση τους και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

## 1.2 Δομή της Εργασίας

Η εργασία ξεκινάει εισάγοντας τον αναγνώστη στην αιολική ενέργεια δίνοντας πληροφορίες για τις μεθόδους αξιοποίησης της που χρησιμοποιούνται και τις εξελίξεις στο χώρο. Επίσης, γίνεται η πρώτη γνωριμία με τις κατασκευές με τις οποίες γίνεται η εκμετάλλευση της, τις ανεμογεννήτριες, αναλύοντας τα είδη τους και τα χαρακτηριστικά τους. Από αυτό το σημείο και έπειτα, η εργασία επικεντρώνεται στις κατασκευές πάνω στις οποίες στηρίζονται οι Α/Γ, παρουσιάζοντας ενδελεχώς τους διάφορους τύπους που βρίσκονται σε χρήση σήμερα.

Στη συνέχεια, δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο και οι κανονισμοί πάνω στα οποία στηρίχθηκε ο σχεδιασμός και η ανάλυση των μοντέλων των πύργων που μελετώνται. Στο επόμενο κεφάλαιο, αφού παρατεθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μοντέλου Α/Γ που επιλέχθηκε ώστε να αποτελέσει κοινό σημείο αναφοράς για τους δύο πύργους, ακολουθεί η διαδικασία της διαμόρφωσης των υπολογισμών, και του ελέγχου των μοντέλων.

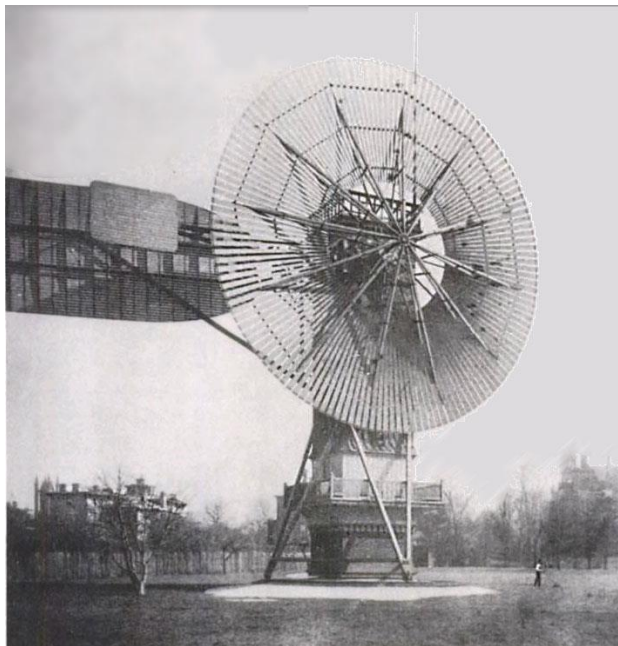
Κλείνοντας, παρατίθενται αναλυτικά και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης, όπως μετακινήσεις, εντατικά μεγέθη και αντιδράσεις υποβάθρου, για κάθε μοντέλο ξεχωριστά και τέλος επιχειρείται μια σύγκριση μεταξύ τους μέσα από την οποία αναδεικνύονται τα σημεία υπεροχής του καθενός και εξάγονται συμπεράσματα για τις εφαρμογές τους.

## 2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (WIND ENERGY SUPPORT STRUCTURES)

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί εισαγωγή στην αιολική ενέργεια και στις κατασκευές αξιοποίησής της. Παρουσιάζεται η ιστορική αναδρομή στις μεθόδους αξιοποίησης της μέχρι και τη σημερινή καθιερωμένη λύση των Α/Γ. Παράλληλα, γίνεται αναφορά στις εξελίξεις της σε παγκόσμιο και πανευρωπαϊκό επίπεδο αλλά και συγκεκριμένα στον ελλαδικό χώρο. Τέλος, γίνεται η διάκριση μεταξύ Α/Γ κατακόρυφου και οριζοντίου άξονα και παρουσιάζονται τα γενικά γνωρίσματα της κάθε μιας από αυτές, με έμφαση στον τελευταίο τύπο, καθώς σε αυτόν ανήκουν οι εξεταζόμενες κατασκευές της εργασίας.

### 2.1 Αιολική Ενέργεια

Η χρήση της δύναμης του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πρωτοεμφανίστηκε στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα όταν κατασκευάστηκαν από διάφορους εφευρέτες μηχανές που μπορούσαν να παράγουν ηλεκτρισμό αξιοποιώντας την κινητική ενέργεια του ανέμου. Η χρήση όμως ανεμογεννητριών για την παραγωγή ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα, δηλαδή για την τροφοδοσία εθνικών δικτύων ηλεκτρισμού ξεκίνησε έναν ολόκληρο αιώνα αργότερα, στα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Σημαντικός αρωγός σε αυτό το επίτευγμα στάθηκε η ραγδαία πρόοδος της τεχνολογίας και των κατασκευών επιτρέποντας την παραγωγή αποδοτικότερων μέσων με ταυτόχρονα μειωμένα κόστη καθώς και το γεγονός ότι αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα της ένταξης της ενέργειας από Α.Π.Ε., η οποία είναι αμφίβολης σταθερότητας, στο δίκτυο.



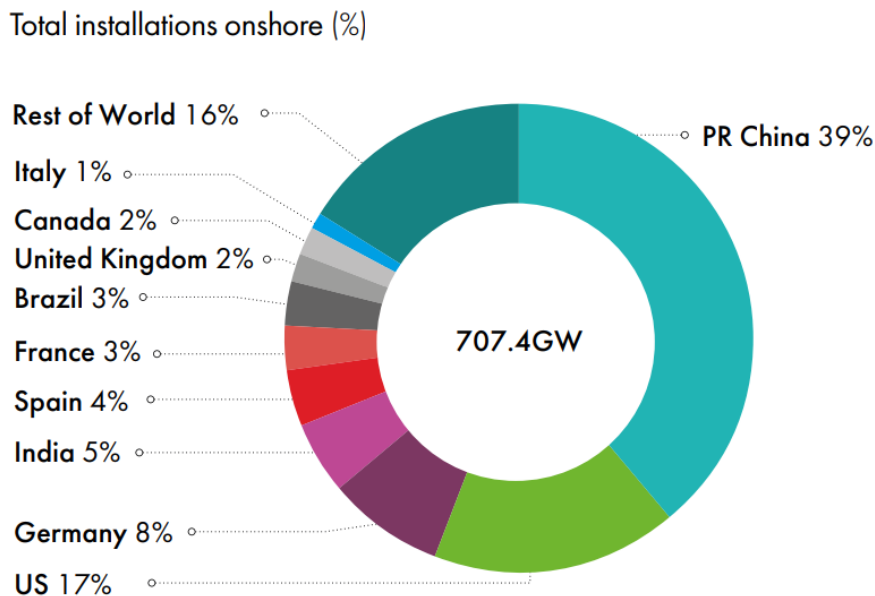
Εικόνα 2.1: Μία από τις πρώτες Α/Γ, του εφευρέτη Charles Brush το 1888 (Richter, 1996).

Η ενέργεια που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές αναμένεται να παρουσιάσει αλματώδη αύξηση την ερχόμενη δεκαετία με στόχο την αντιμετώπιση των πολλαπλών προβλημάτων που προκαλούνται από την παγκόσμια εξάρτηση στα ορυκτά καύσιμα (Stavridou, Koltsakis, & Baniotopoulos, 2020). Ενδεικτικά, μέχρι το τέλος του 2030 οι στόχοι για τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι η ελάττωση κατά 40% τουλάχιστον των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, τουλάχιστον 32.5% βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τουλάχιστον 32% μερίδιο της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (European Commission, 2021).

Η αιολική ενέργεια έχει εδραιώσει την ηγετική θέση της ανάμεσα στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) μέσω της επιταχυνόμενης απόδοσης της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος και της σταθερά ανοδικής της τάσης (Stavridou, Koltsakis, & Baniotopoulos, 2020).

### 2.1.1 Αιολική Ενέργεια Παγκοσμίως

Μέχρι το 2008, πρωτοπόρος στην αγορά της αιολικής ενέργειας ήταν η Ευρώπη, τη θέση της οποίας πήραν η Κίνα και η Αμερική, με την πρώτη να προπορεύεται όλων μέχρι και σήμερα με τις εγκαταστάσεις της για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας να φτάνουν σχεδόν τα 300 GW (Falani, Gonzalez, & Torkomian, 2020). Παρακάτω παρουσιάζεται σε διάγραμμα το ποσοστό που κατέχουν οι 10 πρώτες χώρες σε χερσαίες εγκαταστάσεις, όπου φαίνεται πως οι δύο προαναφερθείσες χώρες ξεχωρίζουν με σημαντική διαφορά.

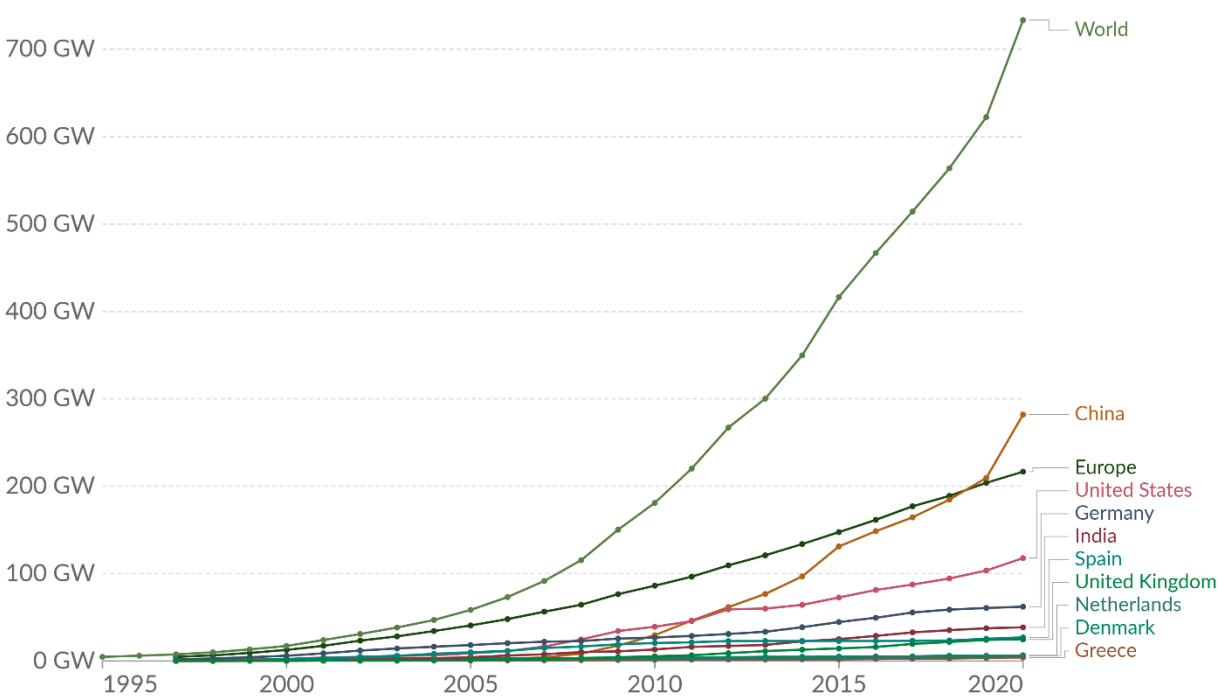


Εικόνα 2.2: Ποσοστά χερσαίων εγκαταστάσεων Α/Γ ανά χώρα (Lee & Zhao, 2021).

Το περασμένο έτος 2020 θεωρήθηκε χρονιά ορόσημο καθώς εγκαταστάθηκαν περισσότερα από 93 GW, αύξηση της τάξης του 53% σε σχέση με το προηγούμενο έτος και συνολική αύξηση του παγκοσμίου δυναμικού κατά 14% (Lee & Zhao, 2021).

## Installed wind energy capacity

Cumulative installed wind energy capacity including both onshore and offshore wind sources, measured in gigawatts (GW).



Source: Statistical Review of World Energy - BP (2021)

OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

Διάγραμμα 2.1: Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας (Ritchie & Roser, 2020).

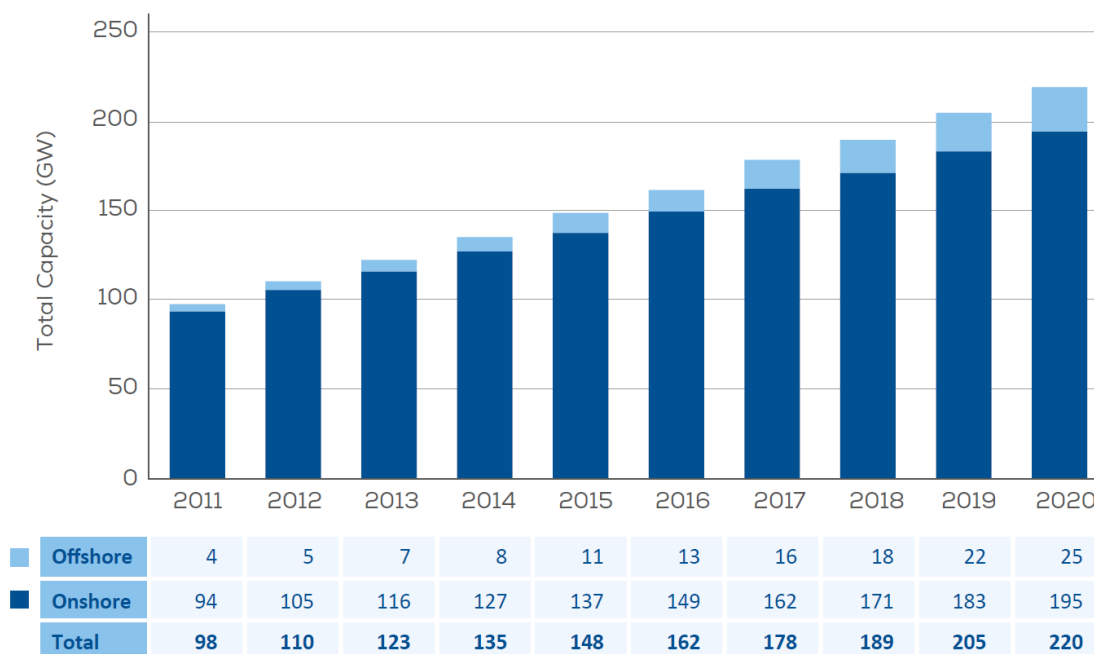
Όπως δείχνει και το παραπάνω διάγραμμα, η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικών εφαρμογών ξεπερνάει πλέον τα 700 GW και η πορεία της διαγράφεται ολοένα και επιταχυνόμενη, ενώ στα τέλη του περασμένου αιώνα ήταν σχεδόν μηδενική.

Με τις ανωτέρω υποδομές, η παγκόσμια κοινότητα κατάφερε να παράγει παραπάνω από 1,500 TWh ενέργειας από αιολικές πηγές κατά το 2020, αυξημένη κατά 12.2% σε σχέση με το προηγούμενο έτος, όμως αυξημένη κατά 358.97% σε σχέση με δέκα χρόνια πριν. Ωστόσο, αυτή η ποσότητα ενέργειας αντιστοιχεί μόνο στο 6.15% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκε παγκοσμίως κατά το ίδιο έτος (Ritchie & Roser, 2020).

### 2.1.2 Αιολική Ενέργεια στην Ευρώπη

Βάσει των δεδομένων για το έτος 2020, οι εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη αντιστοιχούν στο 18.8% της συνολικής εγκατεστημένης ικανότητας παραγωγής ενέργειας. Στη διάρκεια του συγκεκριμένου έτους, κατασκευάστηκαν νέα συστήματα εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας με δυνατότητα παραγωγής ισχύος 14.70 GW, με το 80% των συστημάτων αυτών να τοποθετούνται χερσαία (Wind Europe, 2021). Η αυξητική τάση της αιολικής ενέργειας φαίνεται στο γεγονός ότι οι εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων στο διάστημα από το 2005 μέχρι το 2016

τριπλασιάστηκαν από περίπου 50 GW σε παραπάνω από 150 GW, έχοντας φτάσει σήμερα τα 220 GW (Wind Europe, 2021). Εξ αυτών, 195 GW τοποθετημένα χερσαία και 25 GW θαλάσσια. Παρακάτω, παρουσιάζεται σε διάγραμμα η πορεία της Ευρώπης από το 2011 μέχρι και το 2020 στην εγκατάσταση συστημάτων εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας.



Εικόνα 2.3: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη ανά έτος (Wind Europe, 2021).

Οι πρωτοπόρες χώρες της Ευρώπης στην αιολική ενέργεια είναι η Δανία και η Ιρλανδία, καθώς στην ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατείχαν τα μεγαλύτερα ποσοστά που οφείλονταν στην εκμετάλλευση του ανέμου, 48% και 38% αντίστοιχα (Wind Europe, 2021).

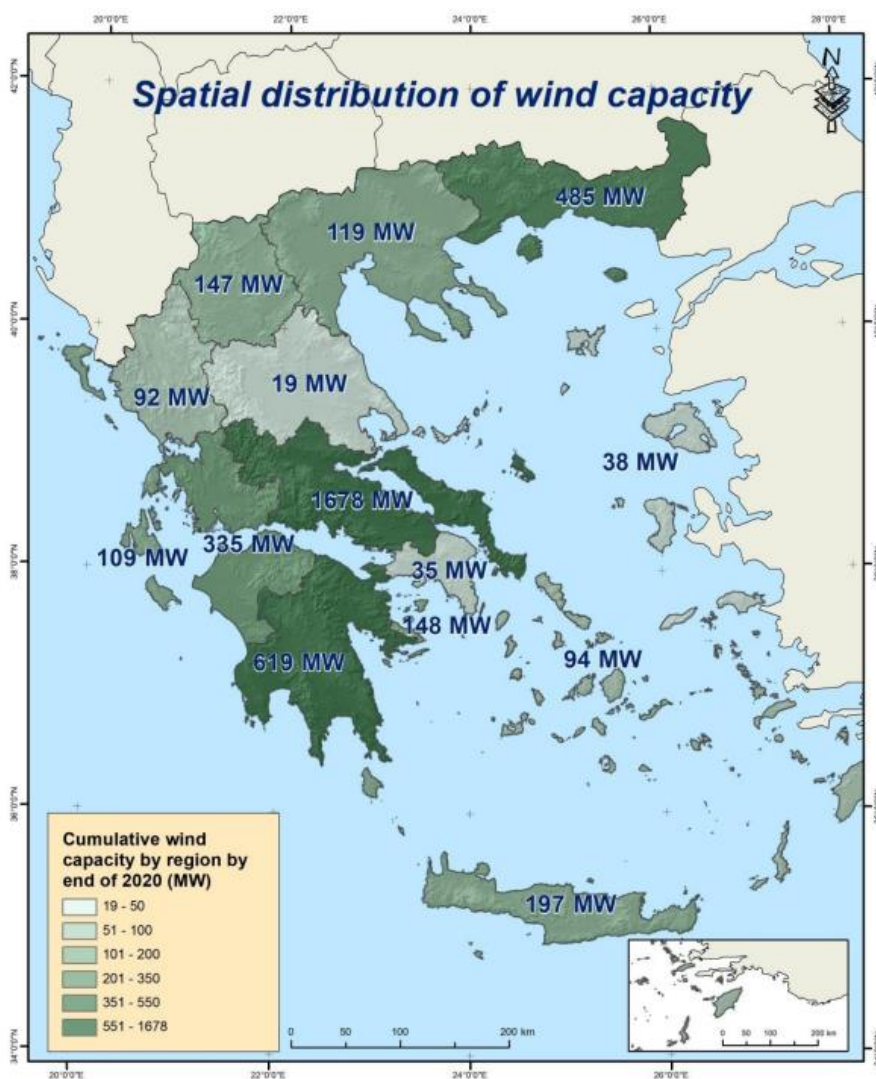
Η αιολική ενέργεια αναμένεται να συνεχίσει να παρουσιάζει αυξητική πορεία στην Ευρώπη καθώς η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει δεσμευθεί μέχρι το 2030 να έχει μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 40%, και το ποσοστό που οφείλεται σε Α.Π.Ε. στην συνολική κατανάλωση ενέργειας να ανέρχεται στο 32% (European Commission, 2021).

### 2.1.3 Αιολική Ενέργεια στη Ελλάδα

Αν και η Ελλάδα δε διαθέτει συγκριτικά με τις υπόλοιπες χώρες της ευρωπαϊκής ένωσης μεγάλο αριθμό εγκατεστημένης ισχύος, κατέχει ικανοποιητική θέση στην αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας αφού στην ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2020 εμφάνισε ποσοστό 15%. Στη διάθεση της η Ελλάδα σήμερα έχει εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας που φτάνουν

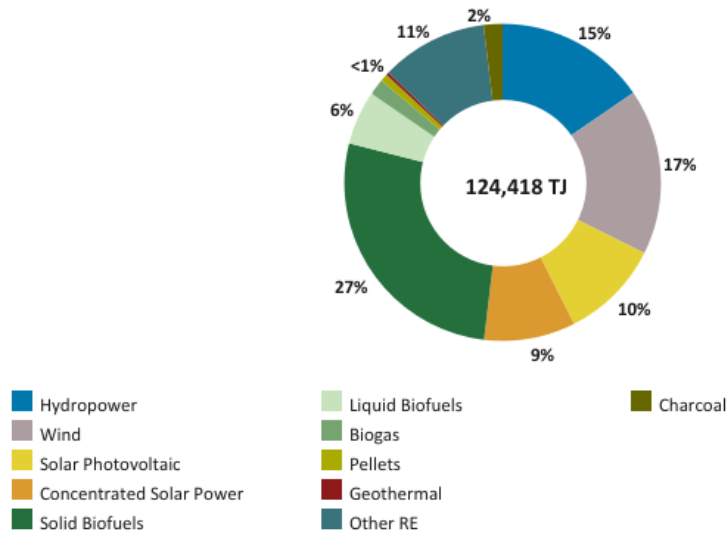
τα 4,114 MW κατακτώντας έτσι την 14<sup>η</sup> θέση ανάμεσα στα 27 κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Wind Europe, 2021).

Επίσης, η αιολική ενέργεια σε σχέση με άλλες Α.Π.Ε κατέχει ποσοστό 17% στην ετήσια κατανάλωση ενέργειας, μόλις δεύτερη των βιοκαυσίμων (International Renewable Energy Agency, 2020). Αναμένονται πολλές εξελίξεις στον κλάδο της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, που αντικατοπτρίζεται στο γεγονός πως, μόνο εντός του 2020, κατασκευάστηκαν στον Ελλαδικό χώρο εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας με συνολική ισχύ 517 MW (Wind Europe, 2021). Παρακάτω βρίσκεται χάρτης της Ελλάδας από την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ), στον οποίο παρουσιάζεται η συνολική ισχύς σε MW που διαθέτει κάθε περιφέρεια, με πρωταγωνίστρια την Στερεά Ελλάδα η οποία παράγει με διαφορά το μεγαλύτερο ποσοστό. Άλλες περιφέρειες που χαρακτηρίζονται από πλούσιο αιολικό δυναμικό είναι η Πελοπόννησος, η Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης και η Δυτικής Ελλάδας.



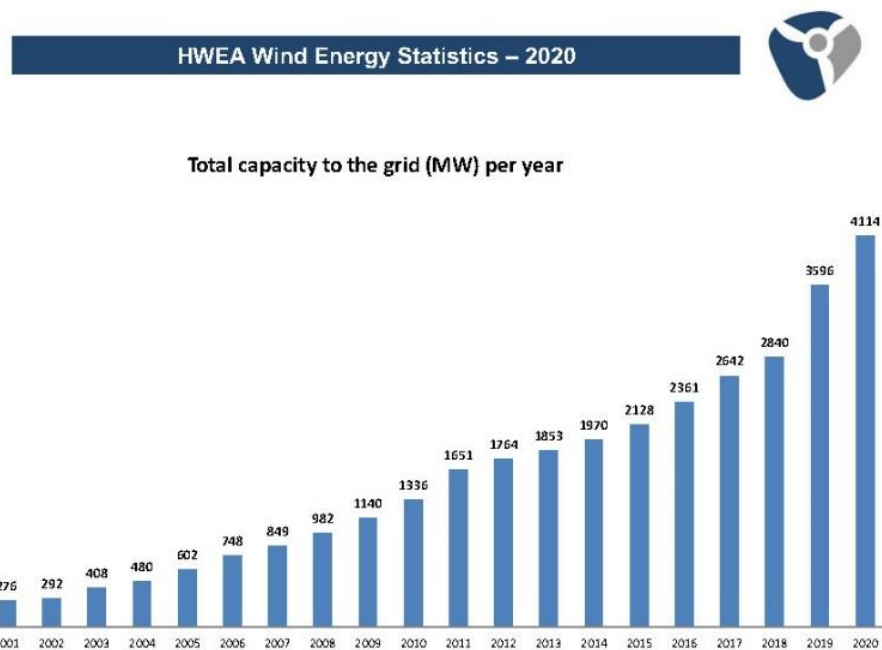
Εικόνα 2.4: Ισχύς σε MW ανά περιφέρεια στην Ελλάδα (ΕΛΕΤΑΕΝ, 2020).





Εικόνα 2.5: Κατανομή ενέργειας από Α.Π.Ε. στην Ελλάδα για το έτος 2018 (International Renewable Energy Agency, 2020).

Στον ελλαδικό χώρο υπάρχουν αρκετές εταιρίες που δραστηριοποιούνται στον χώρο των κατασκευών εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας. Μια εξ αυτών είναι η ΕΜΕΚ (Ελληνικές Μηχανολογικές Κατασκευές και Εξοπλισμός), η οποία αναφορικά με τον τομέα της αιολικής ενέργειας ασχολείται με την κατασκευή πυλώνων Α/Γ. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ζητήθηκε από την εταιρία να παραχωρήσει στοιχεία σχετικά με την δραστηριότητά της αλλά και με την αιολική ενέργεια εν γένει. Στοιχεία και πληροφορίες που δεν υπερβαίνουν το εταιρικό απόρρητο μετέφερε ο κ. Χρήστος Καρράς, υπεύθυνος παραγωγής της εταιρίας, και παρουσιάζονται στη συνέχεια της εργασίας σε σχετικές παραγράφους.

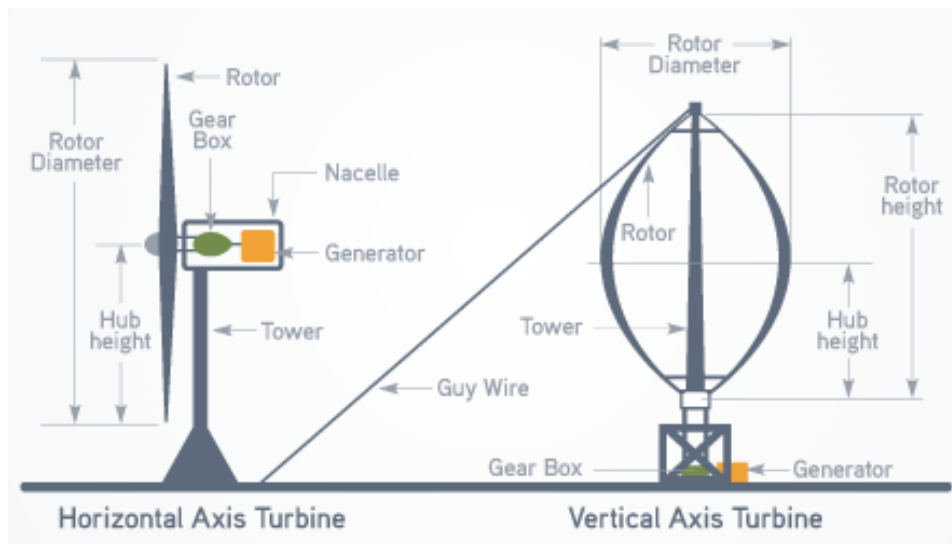


Διάγραμμα 2.2: Συνολική ισχύς (MW) από αιολικές πηγές ανά έτος στην Ελλάδα (ΕΛΕΤΑΕΝ, 2020).

## 2.2 Κατασκευές Αιολικής Ενέργειας

Αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου πως για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας και τη μετατροπή της σε ηλεκτρική χρησιμοποιούνται κατεξοχήν μηχανήματα – κατασκευές που ονομάζονται ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Από τα πρώιμα στάδια τους μέχρι τη σημερινή εκδοχή τους, χάρη στην τεχνολογική εξέλιξη και τις καινοτομίες στην επιστήμη των υλικών και σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ζήτηση που υπάρχει για εκμετάλλευση Α.Π.Ε. οι κατασκευές αυτές έχουν εξελιχθεί σε μεγαθήρια πολύ υψηλών αποδόσεων.

Οι Α/Γ διακρίνονται σε δύο κύριους τύπους με βάση τη διεύθυνση του άξονα περιστροφής τους, στις Α/Γ κατακόρυφου άξονα και σε αυτές οριζόντιου άξονα. Μπορούν επίσης να διακριθούν και ανάλογα με το είδος της αεροδυναμικής δύναμης που τις κινεί σε μηχανές άντωσης και μηχανές αντίστασης. Οι πρώτες αξιοποιούν μέσω αεροτομών τη δύναμη της άντωσης για να κινηθούν το οποίο είναι πάντα προτιμότερο διότι λειτουργούν με καλύτερη απόδοση. Για αυτό το λόγο η πλειονότητα των Α/Γ είναι μηχανές άντωσης. Συναντώνται σε διάφορα μεγέθη και αποδόσεις από μερικά kW έως λίγα MW. Μηχανές απόδοσης κάτω των 25 kW κατηγοριοποιούνται ως μικρές, από 25 έως 100 kW μεσαίες, από 100 έως 1000 kW μεγάλες και πάνω από 1000 kW, δηλαδή 1 MW και πάνω, πολύ μεγάλες μηχανές (Sathyajith, 2006).



Εικόνα 2.6: Α/Γ οριζόντιου άξονα (αριστερά) και κατακόρυφου άξονα (δεξιά).

Μικρές Α/Γ, χρησιμοποιούνται συνήθως μεμονωμένα σε εφαρμογές μικρής κλίμακας και απαιτήσεων ενώ πολύ μεγάλες εγκαθίστανται κατά ομάδες σχηματίζοντας αιολικά πάρκα και προορίζονται για παραγωγή ενέργειας σε βιομηχανικό επίπεδο και ηλεκτροδότηση δικτύων εθνικής κλίμακας. Τα αιολικά πάρκα κατηγοριοποιούνται σε χερσαία (onshore) όταν βρίσκονται επί εδάφους και σε παράκτια (offshore) όταν τοποθετούνται μέσα στη θάλασσα.

### 2.2.1 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα

Οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα λειτουργούν βάσει της ίδιας αρχής λειτουργίας ενός νερόμυλου, δηλαδή η ροή του αέρα είναι εφαπτόμενη με τον άξονα περιστροφής των πτερυγίων ο οποίος είναι κατακόρυφος στο έδαφος. Διακρίνονται κυρίως σε τρεις τύπους ανάλογα με το σχήμα και τη διάταξη των πτερυγίων του έλικα τους, Darrieus, Savonius και Musgrove και ο κάθε τύπος έχει λάβει το όνομα του από τον αντίστοιχο εφευρέτη (Sathyajith, 2006).

Οι Α/Γ Darrieus είναι μηχανές άντωσης αφού λειτουργούν χάρη στη δύναμη άντωσης που προκαλείται από τα πτερύγια με σχήμα αεροτομής. Τα πτερύγια έχουν το σχήμα που παίρνει ένα σχοινί όταν είναι δεσμευμένο στις άκρες του αλλά όχι τεντωμένο και δέχεται περιστροφή γύρω από τον άξονα του με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Σε αυτό το σχήμα τα πτερύγια κατά τη λειτουργία βρίσκονται σε κατάσταση καθαρού εφελκυσμού πράγμα που βοηθάει στην ελαχιστοποίηση των εντάσεων λόγω κάμψης. Ο ρότορας Darrieus είναι ελκυστικός για ηλεκτρογεννήτριες λόγω του ότι λειτουργεί με υψηλό λόγο αιχμής πτερυγίου – ταχύτητας (tip – speed ratio). Αυτός ο λόγος είναι το κλάσμα της εφαπτομενικής ταχύτητας της αιχμής του πτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου και είναι συνυφασμένος με την απόδοση του έλικα. Τα αρνητικά αυτού του ρότορα όμως είναι ότι χρειάζεται εξωτερική διέγερση για την εκκίνηση της περιστροφής του και ότι η ροπή που δημιουργεί κορυφώνεται δύο φορές κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής (Sathyajith, 2006).



Εικόνα 2.7: *Éole*: Η μεγαλύτερη Α/Γ κατακόρυφου άξονα, με ρότορα τύπου Darrieus (Tourisme Gaspésie).

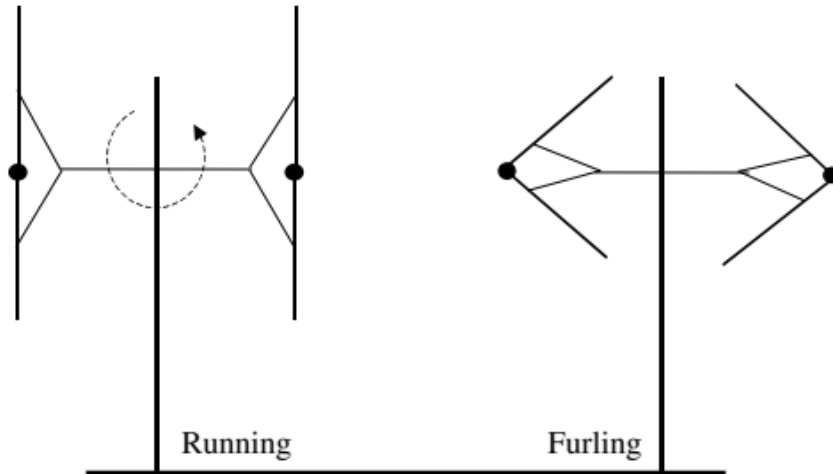
Η Α/Γ κατακόρυφου άξονα με ρότορα τύπου Savonius αποτελείται από δύο μισά κυλινδρικά (ή ελλειπτικά) πτερύγια διατεταγμένα σε σχήμα “S”. Κατά την περιστροφή του κάθε στιγμή το κοίλο τμήμα του ενός ημικυλίνδρου και το κυρτό τμήμα του άλλου ημικυλίνδρου είναι στραμμένα προς τον άνεμο. Άρα, μια Α/Γ Savonius είναι μηχανή αντίστασης διότι ο συντελεστής αντίστασης μιας κοίλης επιφάνειας είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν μιας κυρτής. Έτσι, ο ημικύλινδρος με την κοίλη όψη προς τον αέρα υφίσταται μεγαλύτερη δύναμη αντίστασης από την κυρτή όψη του άλλου με αποτέλεσμα την περιστροφή του έλικα. Σε μερικές Α/Γ αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται δύο ή και περισσότεροι τέτοιας διάταξης, ο ένας πάνω στον άλλο με διαφορά 90° μεταξύ τους ώστε να εξομαλύνονται οι αυξομειώσεις της ροπής κατά την περιστροφή. Το γεγονός ότι οι Α/Γ Savonius είναι μηχανές αντίστασης τις κάνει να έχουν σχετικά χαμηλό συντελεστή ισχύος. Λειτουργούν με χαμηλό συντελεστή αιχμής πτερυγίου – ταχύτητας (tip – speed ratio). Είναι όμως ιδιαίτερα απλό και εύκολο να κατασκευαστούν ακόμα και από κοινότυπα υλικά καθημερινής χρήσης. Σαν αιολικές μηχανές, όχι για παραγωγή ηλεκτρισμού, προτιμώνται για εφαρμογές υψηλών ροπών και χαμηλών ταχυτήτων όπως η άντληση νερού. Σε πολλές περιπτώσεις, οι ρότορες Savonius συνδυάζονται με άλλου είδους όπως Darrieus δημιουργώντας υβριδικά μοντέλα Α/Γ με σκοπό να αυξηθεί η αποδοτικότητα τους. (Sathyajith, 2006).



Εικόνα 2.8: Α/Γ κατακόρυφου άξονα με ελικοειδή ρότορα Savonius (ArchiEXPO, 2021).

Όσο για τις Α/Γ τύπου Musgrove αποτελούν και αυτές μηχανές άντωσης αποτελούμενες από κατακόρυφα πτερύγια σχήματος “Η” και ένα κεντρικό άξονα. Η καινοτομία αυτού του μοντέλου

είναι ότι υπό συνθήκες υψηλών ταχυτήτων ανέμου τα πτερύγια του στρέφονται προς τα εντός (feathering) γυρίζοντας γύρω από έναν οριζόντιο άξονα λόγω κεντρομόλων δυνάμεων μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο υψηλών αεροδυναμικών δυνάμεων στα πτερύγια και την κατασκευή (Sathyajith, 2006).



Εικόνα 2.9: Αρχή λειτουργίας του ρότορα Musgrove. Αριστερά η αρχική κατάσταση και δεξιά η στρέψη των πτερυγίων προς τα εντός για συνθήκες ισχυρού ανέμου (Sathyajith, 2006).

Σε γενικές γραμμές οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα είναι σχετικά μικρού μεγέθους και χρησιμοποιούνται για εφαρμογές μικρότερης κλίμακας καθώς οι επιδόσεις τους είναι κατώτερες σε σχέση με τις Α/Γ οριζόντιου άξονα. Ένα από τα σημαντικά θετικά τους στοιχεία είναι ότι μπορούν να παραλάβουν τον άνεμο από οποιαδήποτε διεύθυνση συνεπώς δεν είναι απαραίτητο να προσανατολιστεί ο ρότορα προς τη διεύθυνση του ανέμου. Επίσης θετικό είναι το γεγονός ότι το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια είναι τοποθετημένα στο έδαφος που τα καθιστά εύκολα προσβάσιμα για έλεγχο και συντήρηση όμως σε περίπτωση που είναι μεγάλου μεγέθους ενδέχεται να είναι απαραίτητα συρματόσχοινα στήριξης τα οποία δημιουργούν πρακτικές δυσκολίες. Τα παραπάνω καθιστούν το σχεδιασμό τους απλό και οικονομικό. Ωστόσο, επειδή κοντά στο έδαφος δεν επικρατούν ισχυροί άνεμοι η χαμηλή τους στάθμη τις κάνει λιγότερο αποτελεσματικές. Επίσης, κατά τη διάρκεια της περιστροφής τους τα πτερύγια αναγκαστικά διασχίζουν αεροδυναμικά νεκρές ζώνες με αποτέλεσμα να μειώνεται η αποδοτικότητά τους ενώ σε άλλες περιπτώσεις υπάρχει ο κίνδυνος ο έλικας να περιστρέφεται με υπερβολική ταχύτητα προκαλώντας την αστοχία του συστήματος. (Sathyajith, 2006).



Εικόνα 2.10: Α/Γ κατακόρυφου άξονα σε εφαρμογή στον κλάδο των συγκοινωνιών (Zotomayor, 2020).

Η μεγαλύτερη Α/Γ κατακόρυφου άξονα που εγκαταστάθηκε ποτέ διέθετε ρότορα τύπου Darrieus, στην πόλη Cap Chat, στο Quebec του Καναδά (Εικόνα 2.7). Το μοντέλο ονομάζεται Éole και ήταν ισχύος 4 MW, με ύψος 96 μέτρα και διάμετρο 64 μέτρα. Λειτουργήσε μόνο 6 χρόνια, από το 1987 μέχρι το 1993 όταν και παρουσιάστηκε βλάβη στο ρουλεμάν της το οποίο ήταν αρκετά μεγάλο και ακριβό για να αντικατασταθεί. Έκτοτε στέκει στο ίδιο σημείο παροπλισμένη και αποτελεί αξιοθέατο ως γλυπτό (Gire, n.d.). Άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής Α/Γ τέτοιου είδους είναι οι μονάδες που έχουν τοποθετηθεί ανάμεσα σε λωρίδες κίνησης λεωφορείων σε αυτοκινητόδρομο στην Κωνσταντινούπολη της Τουρκίας ώστε να κινούνται από το ρεύμα αέρα που προκαλεί το πέρασμά τους. Σε συνδυασμό με το ηλιακό πάνελ που είναι εγκατεστημένο στην κορυφή η κάθε μονάδα είναι ικανή να παράγει αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για να τροφοδοτήσει δύο νοικοκυριά για μία μέρα (Zotomayor, 2020).

## 2.2.2 Ανεμογεννήτριες Οριζοντίου Άξονα

Οι περισσότερες Α/Γ που χρησιμοποιούνται εμπορικώς για ηλεκτροδότηση δικτύων είναι οριζοντίου άξονα καθώς πλεονεκτούν σημαντικά όσον αφορά την απόδοσή τους. Σε αντίθεση με τον προηγούμενο τύπο, ο άξονας περιστροφής είναι οριζόντιος, δηλαδή παράλληλος στη ροή του αέρα και παραλαμβάνει τον άνεμο μετωπικά χάρη στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων τους. Πρόκεινται για μηχανές άντωσης λοιπόν. Μια τυπική κατασκευή ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα αποτελείται από τέσσερα κύρια μέρη, τη θεμελίωση, τον πυλώνα, την άτρακτο, και τον έλικα.

### 2.2.2.1 Θεμελίωση

Το πρόβλημα της θεμελίωσης του πύργου χερσαίας Α/Γ, όπως ισχύει για κάθε κατασκευή δεν έχει συγκεκριμένη λύση και φυσικά η βέλτιστη λύση εξαρτάται από τις γεωτεχνικές και



φορτιστικές συνθήκες του κάθε έργου. Γενικά, στις θεμελιώσεις πύργων Α/Γ ασκούνται ισχυρές ροπές εκτροπής και για αυτό πρέπει να είναι ικανές να παραλάβουν τόσο θλιπτικές όσο και ανυψωτικές δυνάμεις. Απαιτείται λοιπόν να διεξαχθεί μια σειρά από γεωτεχνικούς και στατικούς ελέγχους έτσι ώστε η θεμελίωση να είναι ικανή να αντέξει ακόμα και στο δυσμενέστερο σενάριο φόρτισης. Σε περίπτωση που η φέρουσα ικανότητα του εδάφους είναι ικανοποιητική τότε προτιμάται επιφανειακή θεμελίωση βαρύτητας ενώ σε αντίθετη περίπτωση που τα φορτία χρειάζεται να μεταφερθούν βαθύτερα όπου υπάρχει ισχυρότερο υπόβαθρο χρησιμοποιείται θεμελίωση με πασσάλους (Det Norske Veritas; Risø National Laboratory, 2002).

Για επιφανειακές θεμελιώσεις κατασκευάζεται κυκλικό, ορθογωνικό ή πολυγωνικό πέδιλο από οπλισμένο σκυρόδεμα ανάλογα με το είδος του πυλώνα. Η θεμελίωση προσθέτει βάρος χαμηλά στον κατακόρυφο άξονα της κατασκευής μειώνοντας την εκκεντρότητα των κατακόρυφων φορτίων. Η μάζα και οι διαστάσεις της θεμελίωσης προσδιορίζονται έτσι ώστε το βάρος της ίδιας, του πύργου και της Α/Γ να αντιστέκονται σε ροπές ανατροπής από οριζόντια φορτία στην κατασκευή. Για σωληνωτούς μεταλλικούς πυλώνες, το συνηθέστερο είδος πυλώνα, τα κυκλικά πέδιλα θεωρούνται η αποδοτικότερη λύση επιφανειακής θεμελίωσης καθώς οι μέγιστες ροπές ανατροπής δύναται να εμφανιστούν από οποιαδήποτε διεύθυνση. Για λόγους κατασκευαστικής ευκολίας σε ό,τι αφορά τον ξυλότυπο μπορεί να προτιμηθεί πολυγωνικό πέδιλο. Μια επαρκής λύση είναι οκταγωνική βάση με εμβαδό ίσο με την αντίστοιχη κυκλική που θα απαιτούνταν. Επίσης, στο κέντρο διαμορφώνεται βάθρο πάνω στο οποίο θα πακτωθεί η βάση του πύργου. Η πάκτωση γίνεται με δύο τρόπους, είτε με τοποθέτηση αγκυρίων πριν την έγχυση του σκυροδέματος στα οποία κοχλιώνεται η βάση του πύργου είτε ενσωματώνοντας την ίδια τη βάση στο βάθρο κατά τη σκυροδέτηση (Hernandez-Estrada, et al., 2020).



Εικόνα 2.11: Πέδιλο θεμελίωσης σωληνωτού πυλώνα Α/Γ υπό κατασκευή (Van Wyngaardt, 2014).

Η θεμελίωση δικτυωτού πυλώνα είναι απλούστερη και μικρότερη λόγω των χαρακτηριστικών του. Αντί ενός μεμονωμένου πεδίου κατασκευάζονται τρία ή τέσσερα μικρότερα πέδιλα στα οποία στηρίζονται τα πόδια του πύργου. Εκτενέστερη περιγραφή των χαρακτηριστικών του δικτυωτού πύργου γίνεται παρακάτω.

### 2.2.2.2 Πυλώνας

Ο πυλώνας, ή πύργος, είναι η ψηλή κατασκευή η οποία στηρίζει την άτρακτο και τον έλικα. Οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληροί ένας πυλώνας είναι να είναι όσο γίνεται ψηλότερος ώστε να μεγιστοποιείται η ακτίνα του έλικα, να είναι ικανός να παραλάβει τα φορτία της ατράκτου και του έλικα και να είναι κατά το δυνατό οικονομικότερος. Το κόστος κατασκευής του πυλώνα μπορεί να φτάσει έως το 25% του αρχικού προϋπολογισμού μιας Α/Γ (Stavridou, Koltsakis, & Baniotopoulos, 2020). Δεδομένου ότι τα υπόλοιπα στοιχεία μιας Α/Γ δεν επιδέχονται περαιτέρω μείωση κόστους, η οικονομικότερη λύση για το έργο έγκειται στην ελαχιστοποίηση της δαπάνης για τον πύργο, με άλλα λόγια στην χρήση όσο το δυνατό λιγότερου υλικού. Για την επιλογή του υλικού αλλά και κατά το σχεδιασμό πρέπει να ληφθεί υπόψη η αντοχή του υλικού σε κόπωση, καθότι κατά την προσδοκώμενη 30ετή διάρκεια ζωής της κατασκευής πολλά στοιχεία αναμένεται να καταπονηθούν από εκατομμύρια κύκλους φόρτισης. Για την ακρίβεια αυτός ο αριθμός μπορεί να φθάνει και τάξεις μεγέθους των  $4 \cdot 10^8$  κύκλων. Το υλικό που χρησιμοποιείται στο 98% των πυλώνων Α/Γ είναι ο δομικός χάλυβας (Ancona & McVeigh, 2001).

Για τους λόγους αυτούς έχουν προκύψει αρκετές μορφές πυλώνων οι οποίες είναι οι εξής:

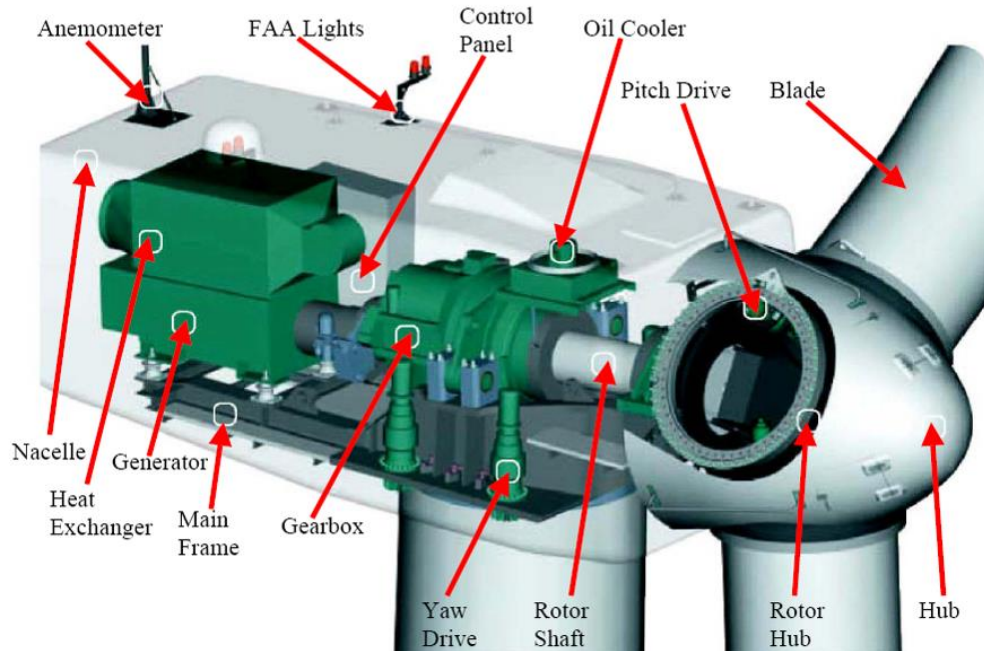
- α) Σωληνωτός μεταλλικός πυλώνας
- β) Δικτυωτός μεταλλικός πύργος
- γ) Υβριδικός πύργος με κάτω τμήμα πύργο σκυροδέματος και άνω τμήμα σωληνωτού μεταλλικού πυλώνα
- δ) Πύργος σκυροδέματος με προεντεταμένους μεταλλικούς τένοντες
- ε) Ξύλινος πύργος

Οι πρώτες δύο μορφές πυλώνα, ο σωληνωτός και ο δικτυωτός, είναι οι επικρατέστερες και αυτές για τις οποίες θα γίνει εκτενής μελέτη στην παρούσα εργασία. Παρακάτω γίνεται μια σύνομη παρουσίαση και των υπόλοιπων μορφών.

### 2.2.2.3 Άτρακτος

Η άτρακτος είναι ο θάλαμος όπου στεγάζονται ο μηχανολογικός εξοπλισμός της Α/Γ και από τον οποίο αναρτάται ο έλικας. Ο μηχανολογικός εξοπλισμός εντός της ατράκτου είναι αυτός που επιτρέπει την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρικό ρεύμα. Ένας στροφαλοφόρος άξονας χαμηλών στροφών συνδέει τον κόμβο του έλικα που περιστρέφεται με το κιβώτιο ταχυτήτων. Η έξοδος του κιβωτίου ταχυτήτων συνδέεται με έναν στροφαλοφόρο άξονα υψηλών στροφών με την γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος. Το κιβώτιο αναλαμβάνει να αυξήσει την ταχύτητα περιστροφής του άξονα υψηλών στροφών κατά 50 φορές περισσότερο για να επιτευχθεί η παραγωγή ρεύματος στη γεννήτρια. Ο άξονας υψηλών στροφών είναι επιπλέον εξοπλισμένος με μηχανικό δισκόφρενο για περίπτωση έκτακτης ανάγκης, δηλαδή για να σταματήσει την περιστροφή σε περίπτωση που το αεροδυναμικό φρένο αποτύχει ή κατά τη διάρκεια επισκευών (Det Norske Veritas; Risø National Laboratory, 2002).





Εικόνα 2.12: Ο μηχανολογικός εξοπλισμός εντός της άτρακτου μιας Α/Γ.

Πέραν αυτού του βασικού μηχανολογικού εξοπλισμού που είναι απαραίτητος για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος η άτρακτος διαθέτει και άλλα συστήματα αναγκαία για την εύρυθμη λειτουργία της Α/Γ. Στην άτρακτο είναι εγκατεστημένος ηλεκτρονικός πίνακας ελέγχου ο οποίος διαδραματίζει ρόλο «εγκεφάλου» της Α/Γ. Επιβλέπει την λειτουργία της, ελέγχει όλα τα συστήματα και ταυτόχρονα παρέχει υπηρεσίες τηλεματικής στον διαχειριστή της Α/Γ. Έξω από την άτρακτο βρίσκεται ένα ανεμόμετρο για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου και τον προσδιορισμό της διεύθυνσης του. Τα δεδομένα από το ανεμόμετρο αναλύονται από τον ηλεκτρονικό πίνακα ελέγχου ο οποίος δίνει εντολή να προσανατολιστεί ο έλικας προς την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του συστήματος οριζόντιας περιστροφής που είναι τοποθετημένο στην ένωση της άτρακτου με τον πυλώνα και λειτουργεί με ηλεκτρικό κινητήρα. Επιπλέον, με βάση την ταχύτητα του ανέμου προσδιορίζεται η κατάλληλη κλίση των πτερυγίων έτσι ώστε να διατηρείται σταθερή η ταχύτητα περιστροφής ή να διακόπτεται σε περίπτωση ισχυρών ανέμων ή κάποιας δυσλειτουργίας. Επιπλέον, επειδή γεννήτρια κατά τη λειτουργία της ανεβάζει υψηλές θερμοκρασίες είναι απαραίτητο υπάρχει σύστημα ψύξης με ηλεκτρικό ανεμιστήρα ενώ κάποιες Α/Γ διαθέτουν συστήματα υδρόψυξης. Για την ψύξη των λαδιών του κιβωτίου ταχυτήτων υπάρχει πρόσθετο σύστημα ψύξης. Τέλος, σε ορισμένες Α/Γ οι οποίες διαθέτουν αεροδυναμικά φρένα, υπάρχει υδραυλικό σύστημα για την επαναφορά τους.

Η άτρακτος με όλα τα συστήματα που διαθέτει συναρμολογείται στο εργοστάσιο και μεταφέρεται ως ένα κομμάτι στο πεδίο τοποθέτησης της Α/Γ όπου ανυψώνεται με γερανό και τοποθετείται στην κορυφή του πυλώνα. Η άτρακτος αποτελεί το βαρύτερο μεμονωμένο εξάρτημα ολόκληρης της εγκατάστασης, για παράδειγμα η άτρακτος μιας Α/Γ ισχύος 3.6 MW ζυγίζει 350 τόνους. Συνεπώς, το βάρος της καθορίζει το γερανό που θα χρησιμοποιηθεί για την συναρμολόγηση της κατασκευής με βάση την ανυψωτική του ικανότητα.

#### 2.2.2.4 Έλικας ή ρότορας

Έλικας, ή αλλιώς ρότορας, είναι το μέρος που περιστρέφεται από τον άνεμο και έτσι μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική που περιστρέφει τον στροφαλοφόρο άξονα χαμηλών στροφών. Αποτελείται από τα πτερύγια και τον κόμβο στον οποίο αυτά συνδέονται. Τα πτερύγια μιας Α/Γ συνήθως αποτελούν το ακριβότερο εξάρτημα ολόκληρης της κατασκευής καθώς ο σχεδιασμός τους λαμβάνει υπόψη πολλαπλές παραμέτρους οι οποίες συνοψίζονται στα εξής (Burton, Jenkins, Sharpe, & Bossanyi, 2011):

- Να διαθέτουν αεροδυναμικό σχήμα ώστε να παράγουν άντωση ικανή να περιστρέψει τον έλικα.
- Να μεγιστοποιούν την ετήσια ενεργειακή απόδοση για την προσδιορισμένη κατανομή ταχύτητας αέρα.
- Να αντέχουν ακραία φορτία και να είναι ανθεκτικά σε κόπωση.
- Να περιορίζεται η εκτροπή της αιχμής ώστε να αποφεύγεται η σύγκρουση με τον πυλώνα της Α/Γ.
- Να αποφεύγονται οι αντηχήσεις.
- Να ελαχιστοποιείται το βάρος τους ώστε να ελαχιστοποιούνται τα φορτία λόγω της περιστρεφόμενης μάζας.

Επομένως τα πτερύγια πρέπει να κατασκευάζονται από ελαφριά αλλά ταυτόχρονα και ιδιαίτερα ανθεκτικά υλικά που να μπορούν να διαμορφωθούν στο πολύπλοκο αεροδυναμικό σχήμα των πτερυγίων. Υλικά που πληρούν τις ανωτέρω προδιαγραφές είναι σύνθετα υλικά (composite materials) και αυτά που χρησιμοποιούνται περισσότερο για την κατασκευή πτερυγίων είναι πολυεστέρας ενισχυμένος με υαλοϋφασμα (Glass Fiber Reinforced Polyester – GFRP) ή με ανθρακονήματα (Carbon Fiber Reinforced Polyester – CFRP) ή Kevlar. Συνηθέστερο υλικό είναι το πρώτο καθώς τα άλλα δύο είναι κοστοβόρα για μεγάλες Α/Γ. Η διαδικασία κατασκευής τους είναι περίπλοκη και γίνεται στο εργοστάσιο όπου το κάθε πτερύγιο κατασκευάζεται ως ένα κομμάτι χωρίς ενώσεις όσο μεγάλο και αν είναι. Για την μεταφορά τους στο εργοτάξιο επιστρατεύονται ειδικά διαμορφωμένα οχήματα (Det Norske Veritas; Risø National Laboratory, 2002).



*Εικόνα 2.13: Μεταφορά πτερυγίου Α/Γ σε πλαγιά βουνού από ειδικά διαμορφωμένο όχημα (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010).*

Η κλίση των πτερυγίων προσδιορίζει τις Α/Γ σε προσήνεμες (upwind) σε περίπτωση που δέχονται τον άνεμο από μπροστά, δηλαδή μπροστά από τον πυλώνα, και σε υπήνεμες (downwind) όταν δέχονται τον άνεμο από πίσω, δηλαδή ανάμεσα στην ροή του αέρα και τον έλικα παρεμβάλλεται ο πυλώνας. Η παρεμβολή του πυλώνα στις υπήνεμες Α/Γ προκαλεί ανεμική «σκίαση» στον έλικα, δηλαδή υπάρχει μια περιοχή μπροστά από τον πυλώνα χωρίς άνεμο. Το θετικό με τις υπήνεμες Α/Γ είναι ότι με κατάλληλο σχεδιασμό μπορούν να προσανατολίζονται παθητικά προς την κατεύθυνση του ανέμου, συνεπώς δεν είναι απαραίτητο το σύστημα οριζόντιας περιστροφής της ατράκτου όπως είναι στις προσήνεμες. Παρ' όλα αυτά οι υπήνεμες Α/Γ παρουσιάζουν άλλα τεχνικά προβλήματα. Συνηθέστερες είναι οι προσήνεμες (Sathyajith, 2006).

Επιπλέον, ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων που έχει ο έλικας η Α/Γ διακρίνεται σε μονόπτερη, δίπτερη, τρίπτερη. Ωστόσο, η τρίπτερη Α/Γ είναι η βέλτιστη για λόγους που διαπιστώνονται εύκολα. Αρχικά, το ενδεχόμενο μια Α/Γ να διαθέτει παραπάνω από τρία πτερύγια μπορεί να αποκλειστεί με ευκολία καθώς το κόστος κατασκευής της ξεφεύγει χωρίς να αυξάνεται σημαντικά η απόδοση της και συνεπώς κάνει την επένδυση λιγότερο συμφέρουσα ενώ ταυτόχρονα εμφανίζονται τεχνικές δυσκολίες ως προς τον σχεδιασμό της. Από την άλλη μια μονόπτερη Α/Γ βγαίνει επίσης εκτός ανταγωνισμού καθώς παρατηρούνται διακυμάνσεις στην ταχύτητα περιστροφής και στα φορτία που προκαλεί κατά την περιστροφή λόγω του ανομοιόμορφα κατανεμημένου βάρους. Καταλήγοντας, μεταξύ της δίπτερης και της τρίπτερης Α/Γ, υπερτερεί η τελευταία εφόσον μία δίπτερη Α/Γ για να αποδώσει το ίδιο με μία τρίπτερη αντίστοιχου μεγέθους χρειάζεται να περιστρέφεται ταχύτερα ή να έχει μεγαλύτερη χορδή αεροτομής (Det Norske Veritas; Risø National Laboratory, 2002).

Τέλος, όσον αφορά τον κόμβο του έλικα, δηλαδή το κεντρικό κομμάτι στο οποίο αναρτώνται τα πτερύγια και συνδέονται με το στροφαλοφόρο άξονα αυτό κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο

λόγω του περίπλοκου σχήματος του και ώστε να είναι ανθεκτικό σε κόπωση. Στο σημείο ένωσης των πτερυγίων με τον κόμβο υπάρχει σύστημα που μπορεί να περιστρέψει τα πτερύγια περί τον άξονα τους αλλάζοντας την γωνία πρόσπτωσης του ανέμου ρυθμίζοντας έτσι την ταχύτητα περιστροφής του έλικα (Det Norske Veritas; Risø National Laboratory, 2002).

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, η συνηθέστερη μορφή μιας Α/Γ μεγάλης κλίμακας έχει καταλήξει να τυποποιηθεί σε μια τρίπτερη Α/Γ οριζόντιου άξονα στηριζόμενη σε σωληνωτό μεταλλικό πυλώνα η οποία αποκαλείται «Δανέζικο πρότυπο». Για αυτή τη μορφή υπάρχει μεγάλη ποικιλία σε μοντέλα, διαστάσεις, αποδόσεις και άλλα χαρακτηριστικά που προσφέρονται από τις πολλές εταιρίες που δραστηριοποιούνται στον κλάδο. Σπάνια συναντάει κανείς Α/Γ με διαφορετική μορφή.

Η ισχυρότερη Α/Γ αυτή τη στιγμή έχει ακριβώς την παραπάνω μορφή. Πρόκειται για την ναυαρχίδα της εταιρίας General Electric, το μοντέλο Haliade-X που προορίζεται για παράκτια αιολικά πάρκα και έχει μέχρι και 14 MW δυνατότητα ισχύος. Διαθέτει τα μακρύτερα πτερύγια Α/Γ που κατασκευάστηκαν ποτέ με μήκος 107 μέτρα και συνολική διάμετρο ρότορα 220 μέτρα με επιφάνεια κάλυψης που αγγίζει τα 38,000 τετραγωνικά μέτρα. Η άκρη των πτερυγίων φτάνει συνολικά σε ύψος τα 248 μέτρα. Μέσα σε ένα έτος μπορεί να παράγει 74 GWh και είναι εντυπωσιακό το γεγονός ότι με μια περιστροφή του ρότορα παράγεται τόση ενέργεια που μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του μέσου νοικοκυριού στο Ηνωμένο Βασίλειο για δύο μέρες (General Electric).



*Εικόνα 2.14: Πρωτότυπο του μοντέλου Haliade-X 14 MW της General Electric εγκατεστημένο στο λιμάνι του Ρότερνταμ για δοκιμές (General Electric).*

Η ισχύς που παράγεται από μία Α/Γ δίνεται από τον εξής τύπο:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^3 \cdot A \cdot C_p \quad (2.1)$$

όπου,

- P η παραγόμενη ισχύς
- $\rho$  η πυκνότητα αέρα
- V η ταχύτητα αέρα
- A η επιφάνεια σάρωσης του έλικα
- $C_p$  ο συντελεστής απόδοσης Α/Γ, δείχνει με τι αποδοτικότητα μετατρέπεται η αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική

Από τον παραπάνω τύπο (2.1) γίνεται αντιληπτό ότι η ισχύς μιας Α/Γ είναι ανάλογη με την επιφάνεια σάρωσης του έλικα και εφόσον η επιφάνεια του έλικα είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ακτίνας του έλικα, από τη σχέση  $A = \pi \cdot R^2$ , συνεπάγεται ότι τελικά και η ισχύς της είναι ανάλογη του τετραγώνου της ακτίνας. Με λίγα λόγια, αν διπλασιαστεί η ακτίνα του έλικα τότε η ισχύς που παράγεται είναι τέσσερις φορές περισσότερη. Επιδιώκεται λοιπόν, η επιφάνεια κάλυψης του έλικα να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερη.

Η ανάγκη για μεγαλύτερους έλικες έχει οδηγήσει σε ψηλότερες κατασκευές που επιτρέπουν την ελεύθερη περιστροφή του έλικα και ταυτόχρονα εκμεταλλεύονται τους ισχυρότερους ανέμους που επικρατούν ψηλότερα από το έδαφος. Ενδεικτικά, σήμερα ο πυλώνας στον οποίο στηρίζεται η μεγαλύτερη Α/Γ έχει ύψος 178 m ενώ κατά την δεκαετία του 1990 το μέγιστο ύψος περιοριζόταν κοντά στα 40 m.

### 3. ΕΙΔΗ ΠΥΛΩΝΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα διάφορα είδη πυλώνων υποστήριξης Α/Γ. Για κάθε είδος πύργου αρχικά παρουσιάζονται γενικές πληροφορίες σχετικές με τις ιδιαιτερότητες του, τους λόγους που οδηγούν στην υιοθέτηση του καθώς και νέες τάσεις στον σχεδιασμό τους. Έπειτα γίνεται λεπτομερής περιγραφή της κάθε κατασκευής ξεχωριστά, από το υλικό που χρησιμοποιείται μέχρι τον τρόπο σύνδεσης των τμημάτων/μελών του. Τέλος, για κάθε μοντέλο πυλώνα παρατίθενται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του έναντι των άλλων επιλογών.

#### 3.1 Σωληνωτός Μεταλλικός Πύργος

Το μοντέλο του σωληνωτού μεταλλικού πύργου είναι αυτό που σχεδόν μονοπωλεί την αγορά έναντι όλων των άλλων επιλογών, κυρίως λόγω της ευκολίας και της ταχύτητας εγκατάστασης τους. Εν έτει 2012, περίπου το 90% των τοποθετημένων Α/Γ στηρίζονταν σε σωληνωτούς πύργους (Way & Van Zul, 2015). Επίσης, όπως επισημάνθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η μεγαλύτερη σε ισχύ Α/Γ σήμερα στηρίζεται σε πυλώνα σωληνωτού τύπου. Οι σωληνωτοί πυλώνες είναι κυλινδρικής διατομής, η διάμετρος και συνεπώς η αντοχή τους αυξάνονται όσο πλησιάζουμε την βάση. Αυτή η αύξηση της διαμέτρου επιτρέπει με τη σειρά της να μειωθεί το πάχος της διατομής και ως εκ τούτου υπάρχει λιγότερη απαίτηση για υλικό.

Η διάμετρος της κορυφής του πυλώνα καθορίζεται από τις διαστάσεις της Α/Γ ενώ η διάμετρος της βάσης περιορίζεται για λόγους που έχουν να κάνουν με τη μεταφορά των τμημάτων. Ο περιορισμός αυτός διαφοροποιείται από χώρα σε χώρα αλλά σε γενικές γραμμές δεν ξεπερνάει τα 4.50 μέτρα για να μην προκύψει δυσκολία κατά τη μετακίνηση των οχημάτων που μεταφέρουν τα τμήματα όταν διέρχονται κάτω από ανοίγματα (π.χ. γέφυρες ή σήραγγες) (Stavridou, Koltsakis, & Baniotopoulos, 2020). Η διάμετρος βάσης των 4.50 μέτρων δυσχεραίνει αρκετά τον σχεδιασμό των πυλώνων Α/Γ μεγάλου ύψους, ιδιαίτερα όταν αυτοί ξεπερνάνε τα 100 μέτρα. Ένας σωληνωτός πύργος ουσιαστικά έχει τη λειτουργία προβόλου και σχεδιάζεται κυρίως έναντι λυγισμού, με δεσπόζοντα φορτία την πίεση του ανέμου κατά το ύψος του, τη ροπή και τέμνουσα που προκαλεί η λειτουργία του ρότορα και το βάρος του ρότορα (Stavridou, Koltsakis, & Baniotopoulos, 2020). Είναι δυνατόν σε ορισμένους να συναντώνται στο εσωτερικό τους δακτύλιοι ακαμψίας (stiffening rings) σε κοντινές αποστάσεις για αποφυγή τοπικού λυγισμού (Lavassas, et al., 2003).





*Εικόνα 3.1: Τυπική A/G με σωληνωτό πύλωνα (Agbayani & Vega, 2013).*

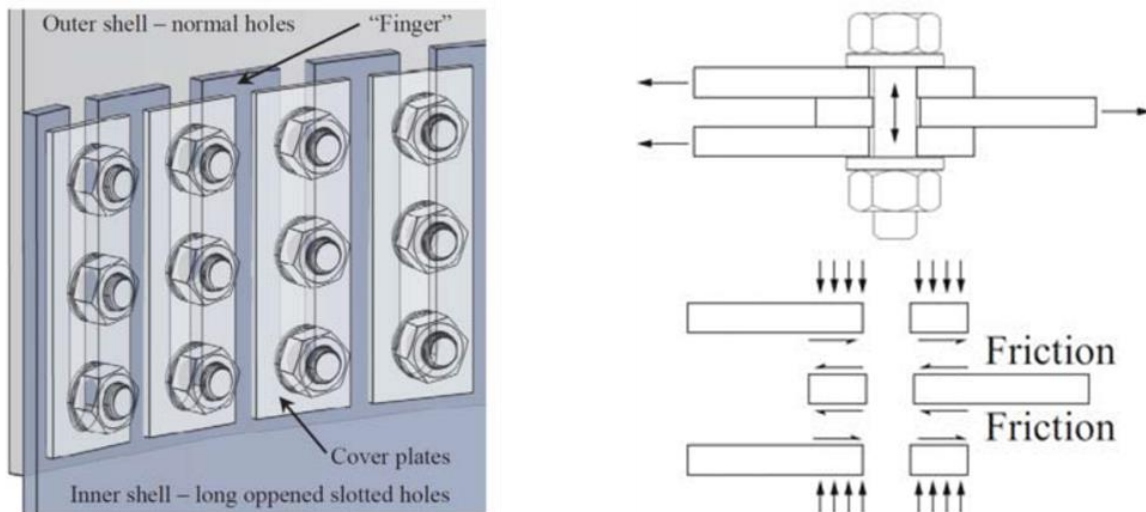
Η ποιότητα του χάλυβα που χρησιμοποιείται συνήθως είναι S355 σύμφωνα με τα πρότυπα του Ευρωκώδικα (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010). Αξίζει να σημειωθεί πως καλύτερης ποιότητας χάλυβες μπορούν να οδηγήσουν σε ελαφρύτερους και ψηλότερους πύλωνας. Παραδείγματος χάριν, με την βελτίωση της ποιότητας από χάλυβα S355 σε S500, μπορεί να προκύψει μείωση στο βάρος του πύργου έως και 30%. Ενώ μια τέτοιου είδους αναβάθμιση στην ποιότητα σημαίνει την αύξηση του κόστους κατά 20-25% ανά τόνο υλικού, η μείωση του απαιτούμενου υλικού και ενδεχομένως των δαπανών μεταφοράς και εγκατάστασης μπορούν να επιφέρουν σημαντική πτώση στο τελικό συνολικό κόστος (World Steel Association, 2012). Ενδεικτικά αναφέρεται πως σύμφωνα με τον κ. Χρήστο Καρρά, το κόστος κατασκευής ενός μέσου πύλωνα ύψους 80 – 90 μέτρων, από τη προμήθεια δηλαδή των πρώτων υλών, την διαδικασία παραγωγής στο εργοστάσιο μέχρι και την τελική τοποθέτηση του στο πεδίο, υπολογίζεται γύρω στις 300.000 €.

Ένας σωληνωτός πύλωνας αποτελείται από προκατασκευασμένα τμήματα κυλινδρικής διατομής, συνήθως σε κομμάτια μήκους 20 έως 30 μέτρων, τα οποία μεταφέρονται και συναρμολογούνται στο πεδίο τοποθέτησης της A/G με τη βοήθεια γερανών (Det Norske Veritas; Risø National Laboratory, 2002). Σύμφωνα με την εμπειρία του κ. Καρρά, τα συνήθη συνολικά ύψη τους στην αγορά κυμαίνονται από 21 έως 145 μέτρα και αποτελούνται από ένα έως έξι τμήματα. Το πάχος του κάθε τμήματος μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τα φορτία που φέρει και την ποιότητα του χάλυβα κατασκευής, λαμβάνοντας τιμές από 8mm στην κορυφή έως και 65mm στη βάση (World Steel Association, 2012). Η παραγωγή τους πραγματοποιείται στο εργοστάσιο όπου μεταλλικές πλάκες περίπου κάμπτονται σε κυλινδρικό σχήμα και συγκολλούνται κατά μήκος απαρτίζοντας ένα προκατασκευασμένο «δοχείο» ύψους 2-3 μέτρων. Τα δοχεία αυτά με τη σειρά τους

συγκολλούνται εκ νέου μεταξύ τους και τελικά προκύπτουν τα κομμάτια που θα μεταφερθούν στο εργοτάξιο. (Engström, Lyner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010). Η συνήθης μέθοδος στο εργοτάξιο προβλέπει τη σύνδεση δύο τμημάτων συνήθως να πραγματοποιείται με κοχλιώσεις μεταξύ των πατουρών που φέρουν τα κομμάτια στα άκρα τους. Παρόλα αυτά, τελευταία πρόσφατες μελέτες έχουν αναπτύξει μια ανταγωνιστική εναλλακτική μέθοδο, τις συνδέσεις τριβής (Veljkovic, et al., 2015). Στη συνέχεια θα γίνει ξεχωριστή περιγραφή των δύο μεθόδων.

### 3.1.1 Συνδέσεις Τριβής

Όπως προαναφέρθηκε, ο περιορισμός των 4,5 μέτρων της διαμέτρου βάσης λειτουργεί ως τροχοπέδη στο σχεδιασμό ψηλών σωληνωτών Α/Γ. Ένας τρόπος να προσπεραστεί αυτό το εμπόδιο διατηρώντας την διατομή κυλινδρική, είναι η εφαρμογή συνδέσεων τριβής. Με αυτή τη μέθοδο λοιπόν, στα άκρα των τμημάτων που θα συνδεθούν μεταξύ τους δε συναντώνται πατούρες και έτσι εκλείπουν οι διαδικασίες συγκολλήσεων στο εργοτάξιο που από τη φύση τους αλλοιώνουν την αντίσταση σε κόπωση του χάλυβα. Στα άκρα πλέον υπάρχουν περιμετρικά της κυκλικής διατομής υπάρχουν εγκοπές στις οποίες θα πραγματοποιηθεί η κοχλιωτή σύνδεση (Engström, Lyner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010). Παρομοίου τύπου συνδέσεις χρησιμοποιούνται ήδη δεκαετίες τώρα σε μεταλλικές κατασκευές, έχουν υπάρξει αντικείμενο ενδελεχούς μελέτης και ονομάζονται αντιολισθητικές. Ο μηχανισμός τους βασίζεται ουσιαστικά στο φαινόμενο της τριβής για μεταφορά φορτίων μεταξύ των συνδεόμενων στοιχείων και εξασφαλίζεται από τη σύσφιξη που προκαλούν οι προεντεταμένοι κοχλίες υψηλής αντοχής. Οι συνδέσεις αυτές είναι πολύ αποτελεσματικές έναντι των φορτίων ανέμου που εναλλάσσονται μεταξύ εφελκυστικών και θλιπτικών ενώ επίσης λόγω του μηχανισμού τους εκμηδενίζουν τις συγκεντρώσεις τάσεων (Veljkovic, et al., 2015). Η συγκεκριμένη σύνδεση αν και όπως αναφέρθηκε ξεπερνάει τον περιορισμό της διαμέτρου βάσης, συνοδεύεται από το βασικό μειονέκτημα του ότι ο μεγάλος αριθμός κοχλιών προϋποθέτει κοστοβόρα εργασία στο πεδίο και απαιτεί συχνές επισκέψεις για τον έλεγχο της προέντασής τους.



Εικόνα 3.2: Λεπτομέρεια αντιολισθητικών συνδέσεων (αριστερά). Μηχανισμός μεταφοράς φορτίων (δεξιά).  
(Veljkovic, et al., 2015)



Ανεξάρτητα από τον τρόπο σύνδεσης των τμημάτων του, ζωτικής σημασίας ρόλο κατά τον σχεδιασμό του σωληνωτού πύργου κατέχει το άνοιγμα για την θύρα στη βάση, αφού ως οπή, θα προκαλεί στην επιφάνεια γύρω της συγκέντρωση τάσεων. Η θύρα υπάρχει αφενός για να επιτρέπει την είσοδο σε εργάτες και προσωπικό και αφετέρου για λόγους εξαιρισμού των μηχανημάτων. Για την ενίσχυση της λοιπόν είτε τοποθετούνται κατακόρυφες δοκίδες ακαμψίας είτε αυξάνεται το πάχος της διαμέτρου κοντά στο άνοιγμα (Veljkovic, et al., 2015). Η επιλογή της πρέπει να γίνεται με προσοχή, δίνοντας μέριμνα στο σχήμα, το ύψος και το πλάτος της. Σύμφωνα με την εργασία (Sahin, 2016) εξετάστηκαν διαφορετικά προφίλ θυρών, με και χωρίς δοκίδες ακαμψίας, και τελικά προέκυψε βέλτιστη διαμόρφωση.

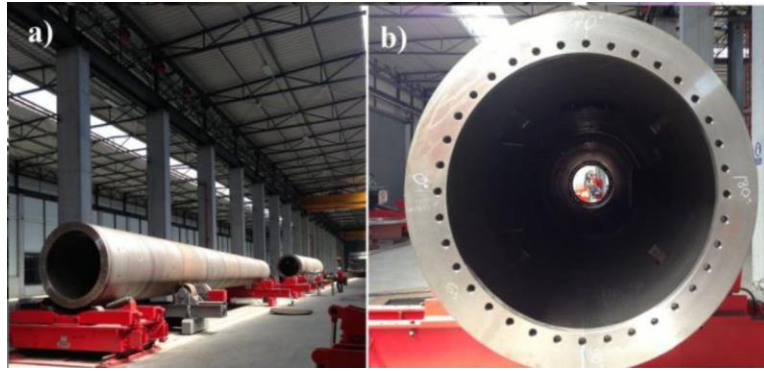
Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του σωληνωτού πυλώνα όπως περιγράφηκε παραπάνω εμφανίζεται σε ύψη άνω των 100 μέτρων και είναι αυτό του περιορισμού της διαμέτρου βάσης. Αυτό βέβαια αντισταθμίζεται από τον λιγότερο χρόνο που απαιτείται για να συναρμολογηθούν τα προκατασκευασμένα κομμάτια που μεταφέρονται στο εργοτάξιο. Πέραν τούτου όμως, φέρουν και άλλα θετικά γνωρίσματα. Πρωτίστως, κατά γενική ομολογία είναι προτιμητέο από άποψη αισθητικής, χαρακτηριστικό σημαντικό καθώς είναι μία επιβλητική κατασκευή που τοποθετείται σε φυσικά τοπία και είναι επιθυμητό να βρίσκεται όσο το δυνατό γίνεται σε αρμονία με αυτά (Sahin, 2016). Επιπρόσθετα, λόγω του μικρού αριθμού κοχλιώσεων που φέρουν δε χρειάζονται τόσο συχνή επίσκεψη για ποιοτικούς ελέγχους. Ακόμη, οι έλεγχοι και οι τυχόν εργασίες συντήρησης διευκολύνονται αλλά πραγματοποιούνται και ασφαλέστερα λόγω του ότι η σκάλα για την ανάβαση στεγάζεται στο εσωτερικό της κοίλης διατομής (Det Norske Veritas; Risø National Laboratory, 2002).



Εικόνα 3.3: Ανέγερση σωληνωτού πύλωνα (Lotfy, 2012).

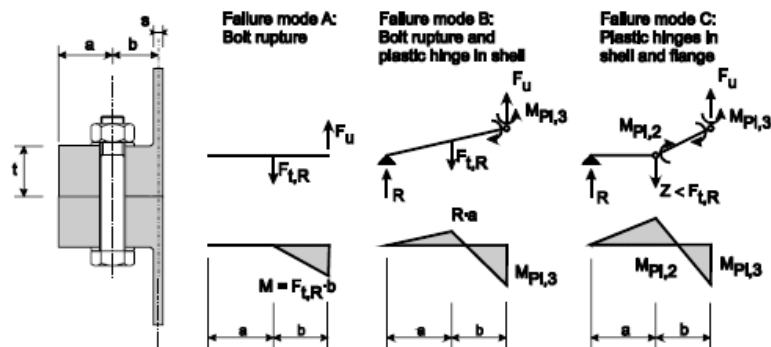
### 3.1.2 Σύνδεση με κοχλίωση σε πατούρες

Αν ακολουθηθεί αυτή η μέθοδος τότε στο εργοστάσιο, στα άκρα των τμημάτων και στην εσωτερική τους πλευρά, συγκολλάται κυκλικά μια επίπεδη επιφάνεια, έτσι ώστε να δημιουργηθεί η επιθυμητή δακτυλική πατούρα. Αυτή φέρει οπές όπου τοποθετούνται κοχλίες, οι οποίοι πριν τη τελική τους κοχλίωση στο εργοτάξιο, θα υποβληθούν σε προένταση (Sahin, 2016). Κατά αυτόν το τρόπο θα πραγματοποιηθεί η συναρμολόγηση κάθε τμήματος με αυτό που βρίσκεται υπό του και άνω του. Το κατώτερο τμήμα κοχλιώνεται στη θεμελίωση της κατασκευής ενώ στην κορυφή του ανώτερου τοποθετείται η Α/Γ.



Εικόνα 3.4: Τα προκατασκευασμένα τμήματα στο εργοστάσιο στα αριστερά και η πατούρα με τις οπές στα δεξιά (Sahin, 2016).

Η σύνδεση με κοχλιώσεις στη πατούρα είναι συνήθως της μορφής L, και σπανιότερα σε περιπτώσεις ψηλών πύργων λαμβάνει τη μορφή T. Η σύνδεση πρέπει να σχεδιάζεται με τρόπο τέτοιο ώστε να μην εμφανιστεί κενό υπό συνθήκες λειτουργίας και τα φορτία να μεταβιβάζονται επιτυχώς προς την θεμελίωση. Σε περίπτωση που οι πατούρες δύο τμημάτων χωρισθούν, τότε οι πιθανές μορφές αστοχίας είναι τρεις, είτε απόσχιση των κοχλιών είτε δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στο κέλυφος είτε δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων σε κέλυφος και πατούρα (Veljkovic, et al., 2015).



Εικόνα 3.5: Λεπτομέρεια της κοχλιωτής σύνδεσης τύπου L και των πιθανών μορφών αστοχίας (Sahin, 2016).

### 3.2 Δικτυωτός Μεταλλικός Πύργος

Αυτό το μοντέλο πρόκειται για πύργο που προκύπτει από τη σύνθεση δικτυωμάτων που συνδέονται μεταξύ τους με κοχλιώσεις. Τα μέλη του πύργου μεταφέρονται στο πεδίο όπου συναρμολογούνται σε τμήματα και ανυψώνονται προς ένωση στον πύργο. Το κάθε μεταλλικό στοιχείο του πύργου είναι προφίλ διατομής εμπορικά διαθέσιμο, συνήθως γωνιακών προφίλ “L” και η διάταξη τους σε μορφή δικτυώματος γίνεται για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο του λυγισμού του κάθε μέλους (Sahin, 2016). Δηλαδή, σε αυτό το μοντέλο δεν υπάρχει ο κίνδυνος αστοχίας σε λυγισμό ολόκληρης της κατασκευής, όπως στο σωληνωτό μοντέλο, αλλά κινδυνεύουν να αστοχήσουν τα επιμέρους μέλη του. Όσο αφορά τη μορφή, δεν υπάρχει κάποια προκαθορισμένη διάταξη για

δικτυωτούς πύργους αλλά εναπόκειται στο μελετητή. Για κωνικούς δικτυωτούς πύργους, η διάταξη σχήματος V αποδεικνύεται η πιο οικονομική, καθώς τα διαγώνια μέλη του έχουν το μικρότερο μήκος (Stavridou, Koltsakis, & Baniotopoulos, 2020).

Γνώριμα παραδείγματα αυτού του μοντέλου κατασκευής είναι οι πύλones του δικτύου ηλεκτρικού ρεύματος όπου στηρίζονται καλώδια υψηλής τάσης και ο πύργος του Eiffel. Οι ψηλότερες Α/Γ με δικτυωτό πύργο είναι το ζευγάρι Α/Γ Nowy Tomysί στην Πολωνία και κάποτε ήταν οι ψηλότερες Α/Γ στον κόσμο με ύψος 160 μέτρων. Ο ρότορας τους έχει διάμετρο 100 μέτρων και έχουν ισχύ 2.5 MW.



Εικόνα 3.6: Δικτυωτός πύργος Α/Γ στη Γερμανία (SPBer, 2007).

Ο δικτυωτός πύργος φέρει πολλά πλεονεκτήματα. Το βασικότερο από αυτά, και ο κύριος λόγος που μπορεί να προτιμηθεί έναντι άλλων λύσεων είναι το μικρότερο βάρος του σε σχέση με το σωληνωτό μοντέλο, λόγω του ότι απαιτεί λιγότερο υλικό, και κατά συνέπεια το μικρότερο του κόστος. Ένας δικτυωτός πύργος, με κατάλληλο σχεδιασμό, έχει βρεθεί ότι μπορεί να είναι έως και 40% ελαφρύτερος από έναν αντίστοιχο σωληνωτό και ως εκ τούτου 15% οικονομικότερος (Stavridou, Koltsakis, & Baniotopoulos, 2020). Μείωση του κόστους επιφέρει επίσης το γεγονός ότι στη θεμελίωση μεταβιβάζεται μικρότερη ροπή με αποτέλεσμα να μειώνονται οι απαιτήσεις σχεδιασμού της. Η δικτυωτή μορφή του πύργου, δηλαδή η απουσία μεγάλων επιφανειών, επιτρέπουν τη διέλευση του ανέμου οπότε και η ανεμική πίεση στην κατασκευή είναι μηδαμινή. Ακόμα, κατά τη μεταφορά των στοιχείων του πύργου στο πεδίο δεν παρουσιάζονται προβλήματα ή

περιορισμοί στις διαστάσεις της βάσης όπως στην περίπτωση του σωληνωτού μοντέλου διότι η συναρμολόγηση γίνεται επί τόπου από τυποποιημένα προφίλ διατομών. Επιπρόσθετα, λόγω της ευκολίας της μεταφοράς των στοιχείων στο εργοτάξιο δεν απαιτείται και εκτεταμένη επέμβαση στο φυσικό τοπίο για την διέλευση των οχημάτων (World Steel Association, 2012).

Κυριότερο μειονέκτημα του δικτυωτού μοντέλου είναι ότι υστερεί αισθητικά και για αυτό δεν προτιμάται ως λύση. Από άποψη σχεδιασμού, η συμπεριφορά του σε δυναμικά φαινόμενα μπορεί να είναι προβληματική. Η δικτυωτή μορφή του πύργου, παρά τα πολλά οικονομοτεχνικά οφέλη της, δημιουργεί και πολλά προβλήματα. Αρχικά, η συναρμολόγηση του πύργου στο πεδίο απαιτεί αρκετά μεγάλη ελεύθερη έκταση και είναι χρονοβόρα λόγω του πλήθους των μελών του και του μεγάλου αριθμού κοχλιωτών συνδέσεων. Γενικά, σε πύργους μεγάλων μεγεθών, καθοριστικής σημασίας είναι ο έλεγχος όλων των συνδέσεων των στοιχείων, συγκολλήσεων και κοχλιώσεων ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Σε γενικές γραμμές, μια Α/Γ χρειάζεται μια ολική αναβάθμιση κάθε 3 με 5 έτη. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις είναι δυνατό να επιτευχθούν επίπεδα ικανοποιητικής λειτουργίας μιας Α/Γ της τάξεως του 98% κατά τη διάρκεια ζωής της (van Bussel & Zaaijer, 2001). Συγκεκριμένα ο δικτυωτός πύργος, ως μια ανοιχτή κατασκευή εκτεθειμένη στα καιρικά φαινόμενα, φέρει μέλη που είναι πιο ευάλωτα σε παγετό. Έτσι, το έργο της συντήρησης αυτού του μοντέλου είναι κατά πολύ δυσμενέστερο καθώς αφενός απαιτείται να ελέγχονται και να επανασφίγγονται όλες οι κοχλιώσεις συχνότερα, αφετέρου η ανάβαση στον πύργο από τους συντηρητές είναι κατά πολύ δυσκολότερη και επικινδυνότερη. Αξίζει να αναφερθεί πως η διαδικασία συντήρησης αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην επιλογή του τύπου πυλώνα υποστήριξης καθώς είναι αρκετά κοστοβόρα. Προσεγγιστικά ανέρχεται στα 35,000 – 40,000 € ανά έτος, ποσό που κατά κανόνα αυξάνεται όσο μεγαλώνει η ζωή της Α/Γ λόγω της συνεχούς καταπόνησης και διαρκών φθορών που υφίστανται. (Blewett, 2020).

### 3.3 Πύργος Σκυροδέματος

Οι πύργοι από σκυρόδεμα εμφανίστηκαν για να διαχειριστούν το βασικό πρόβλημα μεταφοράς που χαρακτηρίζει τις διατομές των ψηλών σωληνωτών πυλώνων, αν και πέραν αυτού, προσφέρουν λύσεις και σε άλλα ζητήματα. Αναφορικά με την κατασκευή τους, ακολουθούνται δύο βασικές μέθοδοι που ανάλογα με τον κατασκευαστή διαφοροποιούνται σε σημεία. Το σκυρόδεμα λοιπόν είτε σκυροδετείται στο εργοτάξιο και σταδιακά κατασκευάζεται ο πύργος, είτε προκατασκευάζεται σε τμήματα στο εργοτάξιο και συναρμολογείται στο πεδίο (Von Der Haar & Marx, 2015).

#### 3.3.1 Σκυροδέτηση στο εργοτάξιο

Σε αυτή τη μέθοδο ακολουθείται η τυποποιημένη διαδικασία σκυροδέτησης με αναρριχόμενο ξυλότυπο, όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις δόμησης γεφυρών. Πρόκειται για μια συνεχόμενη

διαδικασία που απαιτεί διαρκή έλεγχο, ιδιαίτερη προσοχή στις κλιματολογικές συνθήκες και υψηλής τεχνογνωσίας εργασία μέχρι την ολοκλήρωση του πύργου (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010). Αν όλα τα προαναφερθέντα τηρούνται, περίπου 4 μέτρα του πυλώνα μπορούν να δομούνται στη διάρκεια μιας ημέρας (Von Der Haar & Marx, 2015). Λόγω της φύσης του τρόπου σκυροδέτησης, το τελικό αποτέλεσμα είναι μια μονολιθική κατασκευή που συνήθως της ασκείται προένταση εξωτερικά (όπως σε περιπτώσεις γεφυρών) και συνεπώς δεν χρησιμοποιούνται αγωγοί για να περάσουν οι τένοντες στο τέλος της σκυροδέτησης (Von Der Haar & Marx, 2015).



Εικόνα 3.7: Τοποθέτηση αναρριχόμενου ξυλότυπου (Von Der Haar & Marx, 2015)

### 3.3.2 Συναρμολόγηση στο εργοτάξιο

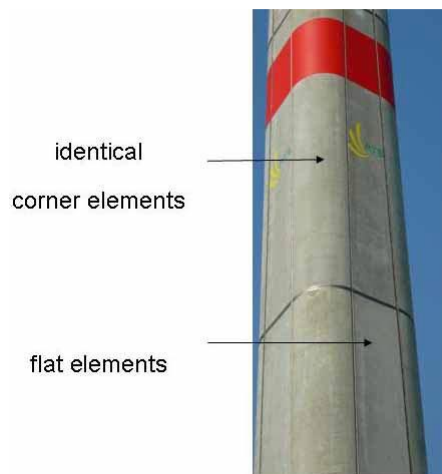
Με τη συναρμολόγηση προκατασκευασμένων τμημάτων είναι δυνατό να υπάρξουν πιο σταθερές και γρήγορες συνθήκες εργασίας και τελικά όχι μόνο το αποτέλεσμα να είναι πιο ποιοτικό, αλλά και να περιορισθούν τα επιπλέον κόστη που σχετίζονται με τις εργασίες στο εργοτάξιο (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010). Η βασική μέθοδος για την κατασκευή κωνοειδούς πύργου είναι να φθάνουν στο πεδίο κυλινδρικές διατομές, είτε ολόκληρες είτε χωρισμένες σε δύο με τρία κομμάτια για λόγους μεταφοράς, και να τοποθετούνται η μια πάνω στην άλλη με τη βοήθεια γερανών. Αυτή η μέθοδος δημιουργεί την ανάγκη για ύπαρξη πολλών καλουπιών έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η σταδιακή μείωση της διατομής (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010). Οι διατομές που είναι χωρισμένες σε δυο ή τρία κομμάτια, εκτός από το ότι κοχλιώνονται μεταξύ τους, φέρουν εντός τους οριζόντιες χαλύβδινες ράβδους που καταλήγουν σε αγκύρια τύπου γάντζου στο εξωτερικά για να δύναται να συναρμολογηθούν με τα υπόλοιπα τμήματα. Μεταξύ των αγκυριών αυτών τοποθετούνται επιπλέον κατακόρυφες χαλύβδινες ράβδοι για να διασφαλιστεί η ένωση τους (Von Der Haar & Marx, 2015).





Εικόνα 3.8: Τμήμα κυλινδρικής διατομής σκυροδέματος όπου φαίνονται τα οριζόντια αγκύρια (Von Der Haar & Marx, 2015).

Εναλλακτικά, ο πύργος δομείται από πανομοιότυπα γωνιακά στοιχεία από σκυρόδεμα που ενώνονται μεταξύ τους με επίπεδες επιφάνειες σκυροδέματος διαφόρου πλάτους. Με αυτόν τον τρόπο, η τοποθέτηση επιφανειών συνεχώς μειούμενου πλάτους προσδίδει το τελικό επιθυμητό κωνοειδές σχήμα στον πύργο και μειώνει την απαίτηση για πολλαπλά καλούπια στο εργοστάσιο (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010).



Εικόνα 3.9: Πύργος σκυροδέματος με γωνιακά και επίπεδα στοιχεία (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010).

Είτε πρόκειται για συναρμολόγηση προκατασκευασμένων στο εργοστάσιο τμημάτων είτε για διαδικασία σκυροδέτησης στο εργοτάξιο, οι τένοντες συμφέρει να τοποθετούνται από κάτω προς τα πάνω για να επιτευχθεί η προένταση, έτσι ώστε να μην χρειάζεται να υψωθούν τα ογκώδη χαλύβδινα ρολά μεγάλου βάρους. Αυτό βέβαια προϋποθέτει ειδική διαμόρφωση της βάσης

θεμελίωσης. Σε οποιαδήποτε πάντως περίπτωση, σκυροδέματα ποιότητας C40/50 θεωρούνται επαρκή (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010).

Το σκυρόδεμα για τους πύργους Α/Γ στη πραγματικότητα συνιστά μια πρόταση που φέρει αρκετά θετικά χαρακτηριστικά. Πρωτίστως, είναι ένα αρκετά φθηνότερο και ανθεκτικότερο υλικό συγκρινόμενο με τον χάλυβα, που διατηρεί τις ιδιότητες του ακόμα και υπό δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Η βαφή του χάλυβα αποτελεί απαραίτητο μέτρο πρόληψης ενάντια στην οξείδωση, ενώ το αν θα βαφτεί ή όχι το σκυρόδεμα είναι καθαρά θέμα αισθητικής. Απαιτεί ελάχιστη έως και μηδαμινή συντήρηση και η διάρκεια ζωής του μπορεί να φθάσει μέχρι και τα 60 έτη, δηλαδή παραπάνω από δύο γενιές Α/Γ (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010). Επίσης, αν και πρόκειται για κατασκευή με μεγαλύτερο συνολικό βάρος από τις μεταλλικές εναλλακτικές του, δεν απαιτούνται ισχυρότεροι γερανοί για την δόμησή της, καθώς η ισχύς τους καθορίζεται μονάχα από το βαρύτερο στοιχείο που είναι η άτρακτος. Ακόμα, σε περιπτώσεις που πρόκειται να τοποθετηθούν πολλές Α/Γ, δύναται να στηθεί προσωρινή βάση κατασκευής σκυροδέματος στο πεδίο και να εξαλειφθεί η ανάγκη για μεταφορές στοιχείων (Lotfy, 2012). Όλα τα προαναφερθέντα είναι προφανές πως συμβάλλουν στην εξοικονόμηση πολλών εξόδων. Επιπρόσθετα στα θετικά του, η μεγάλη μάζα πέρα από την αύξηση της δυσκαμψίας της κατασκευής, ανακουφίζει την θεμελίωση αφού χρειάζεται λιγότερο βάρος για την διαμόρφωσή της. Σχετικά με το στατικό του προφίλ, το σκυρόδεμα δεν είναι ευεπίφορο σε φαινόμενα τοπικού λυγισμού ή κόπωσης και ως εκ τούτου δεν παρουσιάζει ψαθυρή συμπεριφορά αστοχίας όπως ο χάλυβας. Τέλος, η προένταση προσδίδει υψηλή αντοχή σε δυναμικές φορτίσεις λόγω του μεγάλου συντελεστή απόσβεσης (Lotfy, 2012).

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του σκυροδέματος εντοπίζεται κατά την κατασκευή του καθώς σε σύγκριση με τον σωληνωτό πυλώνα, χρειάζεται πιο περίπλοκες εργασίες και ελέγχους ποιότητας. Συγκεκριμένα, οι διαδικασίες όπως η τοποθέτηση των οπλισμών και η προένταση, το καλούπωμα, η έγχυση του σκυροδέματος, η αναμονή της πήξης του και η συνεχής επίβλεψη των εργασιών, απαιτούν την απασχόληση πολλών εργατών και καθυστερούν κατά πολύ την ανέγερση του πύργου (Mathern, von der Haar, & Marx, 2021). Επίσης ενώ το σκυρόδεμα ως υλικό εμφανίζει εν γένει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από το χάλυβα, πλήττεται από την άλλη από φαινόμενα όπως αυτά του ερπυσμού και της θερμικής πυρόλυσης, φαινόμενα που μπορούν να έχουν καταστροφικές συνέπειες στην κατασκευή. Τέλος, όσον αφορά την τοποθέτηση Α/Γ σε παραθαλάσσιο περιβάλλον, οι πύργοι από σκυρόδεμα αποτελούν μια δυσμενή προσέγγιση καθώς ο οπλισμός του χάλυβα είναι ευάλωτος στην διείσδυση του χλωρίου του θαλασσινού νερού και επιπλέον μέτρα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν για την αποφυγή της οξείδωσης του (Mathern, von der Haar, & Marx, 2021).

### 3.4 Υβριδικός Πύργος

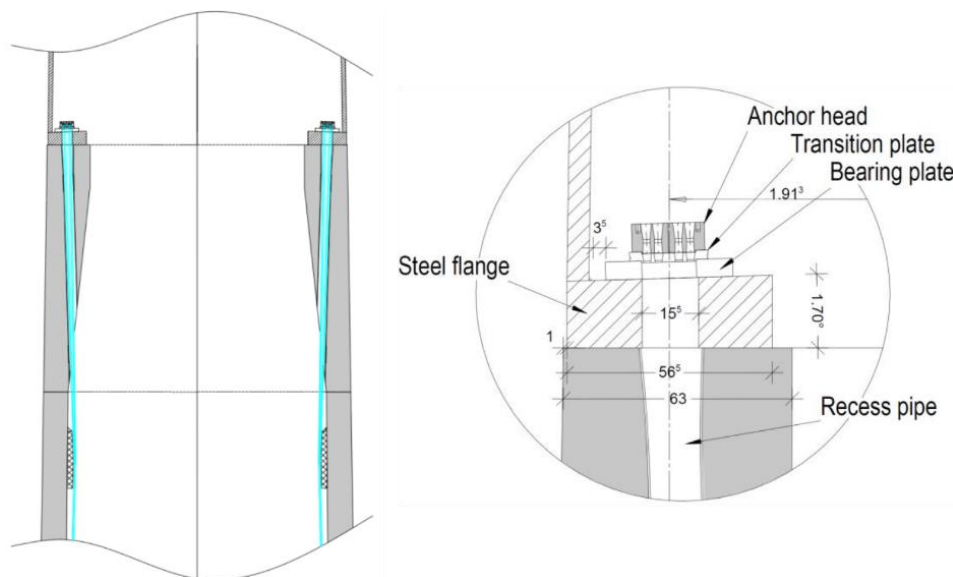
Το μοντέλο αυτό προέκυψε από την ανάγκη αφενός να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο μεγάλων ταλαντώσεων που εμφανίζουν οι σωληνωτοί πύργοι ύψους άνω των 100 μέτρων, αφετέρου δε για να δοθεί μια λύση στους περιορισμούς και στις δυσκολίες που προκύπτουν κατά τη μεταφορά των ογκωδών τμημάτων των πύργων αυτών στο πεδίο. Από το 2017 ο εν λόγω πύργος βρήκε ευρεία



απήχηση στην Κίνα όπου εγκαταστάθηκαν εκατοντάδες τέτοιου τύπου Α/Γ (Junling, Jinwei, & Xinheng, 2020). Ο υβριδικός πύργος έχει κυλινδρικό σχήμα σε όλο του το ύψος, η διάμετρος μειώνεται γραμμικά κατά το ύψος και αποτελείται από δύο τμήματα· το κάτω μέρος φέρει προεντεταμένο σκυρόδεμα ύψους που κυμαίνεται από 40 έως 80 μέτρα, ενώ στο άνω μέρος βρίσκεται χαλύβδινη διατομή όπως αυτή ενός συμβατικού σωληνωτού πύργου. Το σκυρόδεμα μπορεί να χυθεί στο εργοτάξιο και έπειτα να ασκηθεί ένταση στους τένοντες του, αλλά συνήθως πρόκειται για προκατασκευασμένα στο εργοστάσιο τμήματα που μεταφέρονται στο πεδίο για να δομήσουν τον πύργο (Way & Van Zul, 2015). Η σύνδεση των δύο τμημάτων επιτυγχάνεται με την αγκύρωση και έπειτα κοχλίωση των τενόντων του σκυροδέματος σε οπές που βρίσκονται στην πατούρα εσωτερικά της μεταλλικής σωληνωτής διατομής (Pires, 2013). Πριν βέβαια ασκηθεί δύναμη στους τένοντες και δημιουργηθεί προένταση, το κενό στους αγωγούς ανάμεσα σε τένοντες και περιβάλλοντα χώρο πληρώνεται με υψηλής ποιότητας ένεμα για να εξασφαλισθεί η πλήρης συνάφεια (National Renewable Energy Laboratory, 2005).



*Εικόνα 3.10: Υβριδικός Πύργος Α/Γ (Engström, Lyrner, Hassanzadeh, Stalin, & Johansson, 2010).*



Εικόνα 3.11: Εξωτερική τοποθέτηση των τενόντων (αριστερά) – λεπτομέρεια της κοχλίωσης (δεξιά) (Pires, 2013).

Η λογική που διέπει αυτό το μοντέλο είναι να συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του σωληνωτού με εκείνα του πύργου σκυροδέματος. Ειδικότερα, το άνω τμήμα, ως προϊόν κατασκευής εργοστασίου, δεν απαιτεί καμία διεργασία στο πεδίο ενώ όπως αναφέρθηκε και στη περίπτωση του σωληνωτού, η συναρμολόγηση του είναι εύκολη και γρήγορη. Το κάτω τμήμα από σκυρόδεμα, συμβάλλει στο να χαμηλώσει το κέντρο βάρους της κατασκευής και της προσδώσει μεγαλύτερη δυσκαμψία, βελτιώνοντας συνεπώς τη δυναμική της συμπεριφορά. (Junling, Jinwei, & Xinheng, 2020). Επίσης, εν γένει στους υβριδικούς πύργους δεν παρατηρούνται φαινόμενα τοπικού λυγισμού στη διατομή του προεντεταμένου σκυροδέματος, φαινόμενα που χρήζουν κρίσιμου ελέγχου στους συμβατικούς σωληνωτούς πύργους. Τέλος, το κόστος για τα υλικά έναν υβριδικού πύργου είναι μικρότερο σε σύγκριση με ενός σωληνωτού, ειδικότερα σε πυλώνες ύψους μεγαλύτερου των 110 μέτρων (Way & Van Zul, 2015).

### 3.5 Ξύλινος Πύργος

Μια πολύ ιδιαίτερη πρόταση στο πρόβλημα των πύργων Α/Γ αποτελεί η χρήση ξύλου για την κατασκευή τους. Τον Δεκέμβριο του 2012 στο Αννόβερο της Γερμανίας τέθηκε σε λειτουργία τουρμπίνα Α/Γ 1.5 MW με διάμετρο ρότορα 77 μέτρων, η οποία ήταν η πρώτη παγκοσμίως που εδραζόταν σε πύργο κατασκευασμένο από ξύλο ύψους 100 μέτρων (Quick, 2012). Για την κατασκευή τέτοιων πύργων, η τελική κοίλη ξύλινη διατομή προκύπτει από φύλλα ξύλου τα οποία συναρμολογούνται στο πεδίο γύρω από τον ξύλινο σκελετό, ο οποίος μπορεί να έχει εξαγωνικό, οκταγωνικό ή δωδεκαγωνικό σχήμα. Εναλλακτικά, ο εσωτερικός σκελετός μπορεί να λείπει, τα φύλλα ξύλου να έχουν καμπύλο σχήμα και να συναρμολογηθούν μεταξύ τους σε επιμέρους κυλίνδρους 16 - 24 μέτρων, οι οποίοι έπειτα τοποθετούνται ο ένας επάνω στον άλλο (Modvion, 2020).



*Εικόνα 3.12: Ξύλινος πύργος ύψους 100 μέτρων στο Αννόβερο Γερμανίας.*

Η χρήση ξύλου, συγκεκριμένα συγκολλημένων φύλλων LVL (Laminated Veneer Lumber), για την κατασκευή των πυλώνων δεν αποτέλεσε απλώς ένα μηχανικό επίτευγμα, αλλά συνοδεύεται από ποικίλα πλεονεκτήματα. Το κυριότερο ίσως αυτών είναι το φιλικό προς το περιβάλλον προφίλ της έναντι των εναλλακτικών χαλύβδινων λύσεων. Καταρχάς, η παραγωγή των ξύλινων διατομών απαιτεί πολύ μικρότερα ποσά ενέργειας σε σχέση με τα αντίστοιχα ποσά που χρειάζονται για την παραγωγή των χαλύβδινων διατομών. Αρκεί να αναλογιστεί κανείς, πως ο εν λόγω ξύλινος πύργος ζυγίζει μόλις περίπου 100 τόνους, 300 τόνους ελαφρύτερος από έναν αντίστοιχο μεταλλικό λόγω λιγότερης χρήσης υλικού. Έτσι τελικά αποφεύχθηκε η εκπομπή περίπου 400 τόνων διοξειδίου του άνθρακα ενώ υπολογίζεται πως, συμπεριλαμβανομένης και της απόσυρσης της Α/Γ, μπορεί να αποτραπεί εκπομπή μέχρι και 2000 τόνων διοξειδίου του άνθρακα (Yang, 2021). Το ξύλο έχει την ιδιότητα να αποθηκεύει στη μάζα του διοξείδιο του άνθρακα και εκτιμάται πως κάθε τόνος ξύλου της κατασκευής μπορεί να αποθηκεύσει περίπου 1.80 τόνους διοξειδίου του άνθρακα. Με άλλα λόγια, ένας ξύλινος πύργος ύψους 110 μέτρων βάρους 180-300 τόνων (καθορίζεται από το βάρος της τουρμπίνας), μπορεί όχι μόνο να είναι φιλικότερος προς το περιβάλλον λόγω της οικολογικότερης διαδικασίας παραγωγής του, αλλά και διότι μπορεί να αποθηκεύει μέχρι και 540 τόνους διοξειδίου του άνθρακα. Το ξύλινο υλικό επίσης μπορεί να παραχωρηθεί για ανακύκλωση στο τέλος της διάρκειας της λειτουργίας της τουρμπίνας Α/Γ, η οποία είναι συνήθως πιστοποιημένη

για 20 έτη σε αντίθεση με τον ξύλινο πύργο του οποίου το προσδόκιμο ζωής υπολογίζεται να φθάσει έως και τα 30 έτη (Modvion, 2020) (Modvion, 2021).



*Εικόνα 3.13: Τοποθέτηση των φύλλων περιμετρικά του σκελετού σε ξύλινο πύργο (Quick, 2012).*



Εικόνα 3.14: Το εσωτερικό ενός ξύλινου πύργου χωρίς την ύπαρξη σκελετού (Modvion, 2020).

Ένα περισσότερο πρακτικό αλλά μείζονος σημασίας πλεονέκτημα, είναι αυτό της μεταφοράς των μελών στο εργοτάξιο. Οι ψηλοί πύργοι σήμερα, ύψους άνω των 100 μέτρων, προϋποθέτουν την ύπαρξη βάσης διαμέτρου μεγαλύτερης των 4.30 μέτρων που όμως αποτελεί την συνηθέστερη τιμή σε περιπτώσεις σωληνωτών πύργων, αφού όπως προαναφέρθηκε αποτελεί το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο για λόγους μεταφοράς. Η ύπαρξη μελών και όχι ενιαίας διατομής διευκολύνει αφενός την μεταφορά στο πεδίο και αφετέρου την κατασκευή βάσεων που ξεπερνούν διαμέτρους 4.30 μέτρων επιτρέποντας έτσι μεγαλύτερα ύψη πύργων Όσον αφορά τις ιδιότητες του υλικού, πέραν των γνωστών (αντοχή σε λυγισμό και φαινόμενα κόπωσης), τα συγκολλημένα φύλλα ξυλείας LVL παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή και ανά μονάδα βάρους αλλά και ανά μονάδα κόστους σε σύγκριση με το χάλυβα, ο οποίος υπερέχει του ξύλου σε αντοχή ανά μονάδα όγκου. Αυτό σημαίνει πώς όσο μεγαλώνουν τα ύψη των Α/Γ, τόσο πιο συμφέρουσα γίνεται η λύση του ξύλινου πύργου. Ένα ακόμα πρόβλημα που εντοπίζουμε στους χαλύβδινους πύργους και φαίνεται να αντιμετωπίζεται με τη χρήση ξύλου είναι αυτό της οξειδωσης. Τα ξύλινα φύλλα βάφονται με παχιές στρώσεις βαφής και δημιουργείται μεταξύ ξύλου και βαφής ένα διάκενο αέρα που λειτουργεί ως προστατευτικό στρώμα έναντι της υγρασίας (Modvion, 2020).

Η χρήση ξύλινων πυλώνων ως πύργων τουρμπινών ανεμογεννητριών φαίνεται να είναι ένας πολλά υποσχόμενος κλάδος, λόγω της οικολογικής φύσης του. Ήδη εταιρίες κολοσσοί στο τομέα της αιολικής ενέργειας, γνωρίζοντας ότι ο χάλυβας, το πρωταγωνιστικό υλικό στις Α/Γ σήμερα, ευθύνεται για το 7% της παγκόσμιας εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου (Mathis, 2020) έχουν δεσμευθεί για πιο πράσινες εφαρμογές στο προσεχές μέλλον και οι ξύλινοι πυλώνες αποτελούν αναμφίβολα μια πολύ ελκυστική λύση. Πιο συγκεκριμένα, η εταιρία Vestas Venture ήδη συνεργάζεται με εταιρία κατασκευής ξύλινων πυλώνων, της οποίας ο πρώτος εμπορικά διαθέσιμος πύργος θα εγερθεί το 2022 (Modvion, 2021).

## 4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ – ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν εκδοθεί διάφοροι κανονισμοί σχετικά με το σχεδιασμό Α/Γ καθώς και των κατασκευών υποστήριξης αιολικής ενέργειας. Η πλειονότητα των κανονισμών για το σχεδιασμό των Α/Γ στηρίζονται στις προτάσεις της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (International Electrotechnical Commission – IEC). Πρόκειται για έναν διεθνή κανονισμό που περιέχει προτάσεις/οδηγίες σχετικές με την ασφάλεια και την φιλοσοφία του σχεδιασμού των Α/Γ. Καλύπτει θέματα από τον σχεδιασμό και την εγκατάσταση μέχρι την λειτουργία και την συντήρησή τους και συνιστάται να χρησιμοποιείται παράλληλα με άλλους κανονισμούς οπότε ορισμένες προδιαγραφές δύναται να τροποποιούνται και να συμπληρώνονται από τα εθνικά προσαρτήματα της κάθε χώρας (Det Norske Veritas; Risø National Laboratory, 2002). Το ίδιο ισχύει και σε ό,τι αφορά το σχεδιασμό των πυλώνων. Φυσικά, ο δομικός σχεδιασμός μεταλλικών διατομών για πύργους βασίζεται στις αρχές της μηχανικής οπότε το εθνικό προσαρτήματα της εκάστοτε χώρας επηρεάζει αποκλειστικά τα φορτία και τους συντελεστές ασφάλειας των κατασκευών.

Ο σχεδιασμός πύργων για Α/Γ, όπως σε όλες τις κατασκευές, βασίζεται στη διασφάλιση της στατικής επάρκειας κάθε μέρους της κατασκευής. Αρχικά, πραγματοποιείται ο υπολογισμός της εντατικής κατάστασης κάθε μέλους λαμβάνοντας υπόψη διάφορα σενάρια φόρτισης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συγκρίνονται με τα επιτρεπτά όρια αντοχής του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για το κάθε μέλος.

Στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης ο κανονισμός που ισχύει για το σχεδιασμό κτιρίων και έργων πολιτικού μηχανικού από χάλυβα είναι ο Ευρωκώδικας 3: Σχεδιασμός Φερούσων Κατασκευών από Χάλυβα (EN 1993). Ο Ευρωκώδικας 3 χωρίζεται περαιτέρω σε έξι μέρη τα οποία εξειδικεύουν τους κανονισμούς για κάθε τύπο μεταλλικής κατασκευής. Ο σχεδιασμός όμως οποιασδήποτε κατασκευής απαιτεί το συνδυασμό διατάξεων από διάφορα μέρη του Ευρωκώδικα.

Κατά το σχεδιασμό κατασκευών υποστήριξης αιολικής ενέργειας ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να δοθεί στις δράσεις του ανέμου που τις καταπονούν. Επειδή πρόκειται για ιδιόμορφες κατασκευές που ο στόχος τους είναι να εκμεταλλευτούν τη δύναμη του ανέμου κατασκευάζονται συνήθως σε μέρη με ισχυρούς ανέμους και το ύψος τους φτάνει σε ψηλό υψόμετρο από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό τις εκθέτει μονίμως σε πολύ ισχυρά φορτία λόγω της πίεσης του ανέμου ο οποίος προσπίπτει στην επιφάνεια τους. Επίσης, ο δίσκος του ρότορα λόγω της περιστροφής του δημιουργεί μία επιπλέον δύναμη ανατροπής στην κορυφή του πύργου. Ο υπολογισμός των φορτίων του ανέμου λοιπόν, έχει αποτελέσει αντικείμενο ενδελεχούς έρευνας και για αυτό το λόγο υπάρχουν πολλοί κανονισμοί που προτείνουν διαφορετικά μοντέλα για την εύρεση τους, ανάλογα με την ακρίβεια που επιθυμεί ο μελετητής και τα δεδομένα που έχει στη διάθεσή του (Det Norske Veritas; Risø National Laboratory, 2002).

Για τις ανάγκες σχεδιασμού της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω κανονισμοί:

- Ευρωκώδικας 0: Βάσεις Σχεδιασμού Φερούσων Κατασκευών (EN 1990)
- Ευρωκώδικας 1: Δράσεις στις Φερούσες Κατασκευές, Μέρος 1-4: Γενικές Δράσεις – Δράσεις Ανέμου (EN 1991-1-4)

- Ευρωκώδικας 3: Σχεδιασμός Φερούσων Κατασκευών από Χάλυβα, Μέρος 1-1: Γενικοί Κανονισμοί και Κανονισμοί για Κτίρια (EN 1993-1-1)
- Ευρωκώδικας 3: Σχεδιασμός Φερούσων Κατασκευών από Χάλυβα, Μέρος 1-6: Αντοχή και Ευστάθεια Κελυφωτών Κατασκευών (EN 1993-1-6)
- Ευρωκώδικας 3: Σχεδιασμός Φερούσων Κατασκευών από Χάλυβα, Μέρος 3-1: Πύργοι Ιστοί και Καμινάδες – Πύργοι και Ιστοί (EN 1993-3-1)
- IEC 61400-1: Προδιαγραφές Σχεδιασμού

## 4.1 Ευρωκώδικας 0: Βάσεις Σχεδιασμού Φερούσων Κατασκευών (EN 1990)

### 4.1.1 Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (Ο.Κ.Α.)

Ο έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (Ο.Κ.Α.) προσδιορίζει τις οριακές καταστάσεις για τις οποίες ενδέχεται να τεθεί σε κίνδυνο η ασφάλεια της κατασκευής ή η ανθρώπινη ζωή. Οι οριακές καταστάσεις που διερευνώνται εν γένει σχετίζονται με την απώλεια στατικής ισορροπίας σε οποιοδήποτε τμήμα της κατασκευής (EQU), με την υπέρβαση της αντοχής των δομικών στοιχείων ή την υπερβολική τους παραμόρφωση (STR), με την υπέρβαση της αντοχής ή την υπερβολική παραμόρφωση του εδάφους (GEO), με την αστοχία λόγω κόπωσης των δομικών στοιχείων (FAT), με την απώλεια ευστάθειας της κατασκευής ή του εδάφους λόγω δυνάμεων άνωσης (UPL), με την αστοχία του εδάφους λόγω υδραυλικής κλίσης (HYD). Στην παρούσα εργασία δόθηκε έμφαση στην κατάσταση STR καθώς επιδιώκεται να εξεταστεί η στατική επάρκεια των δομικών στοιχείων της κατασκευής.

Για των έλεγχο των κατασκευών σε Ο.Κ.Α. δίνονται από τον Ευρωκώδικα 0 οι συνδυασμοί των δράσεων που πρέπει να ληφθούν υπόψη ανάλογα με την κατάσταση για την οποία γίνεται ο σχεδιασμός. Οι καταστάσεις σχεδιασμού μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες ως εξής. Μόνιμες, προσωρινές, τυχηματικές και σεισμικές. Η ονομασία κάθε κατηγορίας εξηγεί από μόνη της και τη φύση των συνθηκών που επικρατούν κατά τον αντίστοιχο σχεδιασμό. Ο συνδυασμός φόρτισης που προτείνεται από τον Ευρωκώδικα συγκεκριμένα για μόνιμες και προσωρινές καταστάσεις σχεδιασμού είναι ο παρακάτω:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.1)$$

όπου,

$\gamma_{G,j}$	συντελεστής ασφαλείας μόνιμων δράσεων
$G_{k,j}$	χαρακτηριστική τιμή μόνιμων δράσεων
$\gamma_P$	συντελεστής ασφαλείας δράσεων προέντασης
$P$	δράσεις προέντασης



$\gamma_{Q,1}$	συντελεστής ασφαλείας κύριας μεταβλητής δράσης
$Q_{k,1}$	κύρια μεταβλητή δράση
$\gamma_{Q,i}$	συντελεστής ασφαλείας δευτερευουσών μεταβλητών δράσεων
$\psi_{0,i}$	συντελεστής σπουδαιότητας κατασκευής
$Q_{k,i}$	δευτερεύουσες μεταβαλλόμενες δράσεις

Οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας ( $\gamma$ ) για την οριακή κατάσταση STR που προτείνονται από τον Ευρωκώδικα δίνονται στον πίνακα A1.2(B) του παραρτήματος Α του Ευρωκώδικα 0. Εναλλακτικά, μπορούν να οριστούν από το εθνικό προσάρτημα της εκάστοτε χώρας. Το ίδιο ισχύει και για τους συντελεστές σπουδαιότητας κατασκευής ( $\psi$ ), για τους οποίους οι συνιστώμενες τιμές από τον Ευρωκώδικα δίνονται στον πίνακα A1.1 του παραρτήματος Α.

#### 4.1.2 Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (Ο.Κ.Λ.)

Ο έλεγχος Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας (Ο.Κ.Λ.) λαμβάνει υπόψιν τις συνθήκες που επικρατούν στην κατασκευή κατά την κανονική της χρήση. Αυτές σχετίζονται με την άνεση των ανθρώπων, την εμφάνιση της κατασκευής και την λειτουργία της ίδιας της κατασκευής ή μηχανών που αυτή στεγάζει. Στον Ευρωκώδικα 0 αναφέρεται πως για το εκάστοτε έργο υπό κατασκευή, οι προϋποθέσεις του ελέγχου Ο.Κ.Λ. διαμορφώνονται σύμφωνα με την φύση και τις ανάγκες του.

Συνήθως για την περίπτωση των Α/Γ, για τον έλεγχο Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας (Ο.Κ.Λ.) διερευνάται η μετατόπιση της κορυφής του πύργου καθώς και η ανατροπή της θεμελίωσης του (Baniotopoulos, Lavassas, Nikolaidis, & Zervas, 2011). Όσον αφορά το πρώτο, οι επιτρεπόμενες οριζόντιες μετατοπίσεις στην κορυφή του συνήθως καθορίζονται από τον κατασκευαστή της Α/Γ για την ομαλή λειτουργία της και την αποφυγή βλαβών.

## 4.2 Ευρωκώδικας 1, Μέρος 1-4: Γενικές Δράσεις – Δράσεις Ανέμου (EN 1991-1-4)

Οι διατάξεις του Ευρωκώδικα 1, Μέρος 1-4: Γενικές Δράσεις – Δράσεις Ανέμου καλύπτουν τον προσδιορισμό των δράσεων του ανέμου που πρέπει να ληφθούν υπόψιν για τον σχεδιασμό κατασκευών πολιτικού μηχανικού. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που ορίζεται στην παράγραφο 7.9 για τον υπολογισμό του φορτίου ανέμου που αναπτύσσεται στην περίπτωση κυκλικών κυλίνδρων.

Αρχικά, υπολογίζεται το εμβαδόν αναφοράς  $A_{ref}$  για το οποίο η παράγραφος EN 1991-1-4 §7.9.2(4) ορίζει να προσδιορισθεί ως η προβαλλόμενη επιφάνεια της διατομής σύμφωνα με τη σχέση:

$$A_{ref} = b \cdot l \quad (4.2)$$

όπου  $b$  και  $l$  το πλάτος και το ύψος της κατασκευής αντίστοιχα.

Η βασική ταχύτητα ανέμου  $v_b$  ως συνάρτηση της διεύθυνσης του ανέμου και της εποχής του χρόνου δίδεται από τη σχέση:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \quad (4.3)$$

όπου,

$c_{dir}$  ο συντελεστής διεύθυνσης ανέμου

$c_{season}$  ο συντελεστής εποχής

$v_{b,0}$  η θεμελιώδης ταχύτητα του ανέμου

Η τιμή των συντελεστών  $c_{dir}$  και  $c_{season}$  σύμφωνα με τον EN 1991-1-4 §4.2(2)P συνήθως ορίζεται ίση με  $c_{dir} = c_{season} = 1.0$ .

Ο συντελεστής εδάφους  $k_r$  δίδεται σύμφωνα με τη σχέση (4.5) του EN 1991-1-4:

$$k_r = 0.19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07} \quad (4.4)$$

όπου,  $\frac{z_0}{z_{0,II}}$  ο λόγος του μήκους τραχύτητας του εδάφους τοποθέτησης της κατασκευής  $z_0$  προς το μήκος τραχύτητας του εδάφους κατηγορίας II  $z_{0,II} = 0.05$  από τον πίνακα 4.1 του EN 1991-1-4.

Κατηγορία Αναγλύφου		$z_0$ m	$z_{min}$ m
0	Θάλασσα ή παραθαλάσσια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοιχτή θάλασσα	0.003	1
I	Λίμνες ή επίπεδες και οριζόντιες περιοχές με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια	0.01	1
II	Περιοχή με ελάχιστη βλάστηση όπως χλόη και απομονωμένα εμπόδια (δένδρα, κτίρια) με αποστάσεις τουλάχιστον 20 υψών εμποδίων	0.05	2
III	Περιοχή με κανονική κάλυψη βλάστησης ή κτιρίων ή απομονωμένων εμποδίων με αποστάσεις το πολύ 20 υψών εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, δασική έκταση)	0.3	5
IV	Περιοχή στην οποία τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται από κτίρια με μέσο ύψος που ξεπερνά τα 15 m	1.0	10

Πίνακας 4.1: Κατηγορίες και παράμετροι αναγλύφου - Πίνακας 4.1 EN 1991-1-4.

Η μέση ταχύτητα ανέμου  $v_m(z)$  συναρτήσει του ύψους δίδεται σύμφωνα με τη σχέση (4.3) του EN 1991-1-4:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b \quad (4.5)$$

όπου,

$c_0(z)$  ο συντελεστής ανάγλυφου που λαμβάνει υπόψιν τις πιθανές αυξήσεις της ταχύτητας ανέμου λόγω ύπαρξης πεδιάδων ή βουνών

$c_r(z)$  ο συντελεστής τραχύτητας

Ο συντελεστής τραχύτητας χρησιμοποιείται για να ληφθούν υπόψη οι διακυμάνσεις της μέσης ταχύτητας του ανέμου στο πεδίο της κατασκευής που οφείλονται στο ύψος από την επιφάνεια του εδάφους και στην τραχύτητα του εδάφους της προσήνεμης περιοχής της κατασκευής. Δίνεται από τη σχέση (4.4) του EN 1991-1-4:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln \frac{z}{z_0} \quad (4.6)$$

όπου,  $z_e$  το ύψος αναφοράς για εξωτερική δράση ανέμου και για το οποίο πρέπει να ισχύει  $z_e \geq z_{min}$ . Το  $z_{min}$  είναι το ελάχιστο ύψος που ορίζεται από τον πίνακα 4.1 του Ευρωκώδικα EN 1991-1-4 ανάλογα με την κατηγορία του αναγλύφου.

Η ένταση των αναταραχών του ανέμου  $I_V(z)$  στο ύψος αναφοράς  $z_e$  για  $z_e \geq z_{min}$  δίδεται σύμφωνα με τη σχέση (4.7) του EN 1991-1-4 §4.4(1):

$$I_V(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln \frac{z}{z_0}} \quad (4.7)$$

όπου,  $k_I$  ο συντελεστής αναταραχών η τιμή του οποίου δύναται να καθορίζεται από το εθνικό προσάρτημα, ενώ σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα η προτεινόμενη τιμή είναι  $k_I = 1.0$ .

Η πίεση μέγιστης ταχύτητας  $q_p(z)$ , η οποία συνυπολογίζει μέσες και βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις της ταχύτητας, υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.8) του EN 1991-1-4 §4.5(1):

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_V(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m(z)^2 \quad (4.8)$$

όπου,  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα, η οποία εξαρτάται από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και τη βαρομετρική πίεση που αναμένονται να επικρατούν στην περιοχή κατά τη διάρκεια θυελλωδών ανέμων. Η τιμή της δύναται να καθορίζεται από το εθνικό προσάρτημα ενώ η προτεινόμενη τιμή είναι  $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ .

Η ταχύτητα ανέμου που αντιστοιχεί στην πίεση μέγιστης ταχύτητας  $v(z)$  είναι:

$$v(z) = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p(z)}{\rho}} \quad (4.9)$$

Για τον υπολογισμό του φορτίου ανέμου χρειάζονται επιπλέον ο δομικός συντελεστής  $c_s c_d$ , ο αριθμός Reynolds  $Re$ , η ενεργός λυγηρότητα  $\lambda$ , ο συντελεστής end effect  $\psi_\lambda$ , η ισοδύναμη

τραχύτητα επιφάνειας  $k$ , ο ισοδύναμος συντελεστής φορτίου free end flow  $c_{f,0}$  και ο συντελεστής ισοδύναμου φορτίου  $c_f$ .

Όσον αφορά τον δομικό συντελεστή  $c_s c_d$ , πρόκειται για συντελεστή που λαμβάνει υπόψιν την επίδραση του μεγέθους της κατασκευής στις μέγιστες πιέσεις που αυτή δέχεται αλλά και τα δυναμικά φαινόμενα λόγω αναταραχής.

Ο αριθμός Reynolds, που χαρακτηρίζει την κίνηση του αέρα σε σχέση με την κατασκευή, για κυλινδρικές διατομές σύμφωνα με τον EN 1991-1-4 §7.9.1(1) δίνεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{v} \quad (4.10)$$

όπου,

$b$  η διάμετρος της κατασκευής

$v(z_e)$  η μέγιστη ταχύτητα ανέμου στο ύψος αναφοράς  $z_e$

$v$  το κινηματικό ιξώδες του αέρα  $v = 15.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Η ενεργός λυγηρότητα  $\lambda$  εξαρτάται από τον λόγο διαστάσεων και την θέση της κατασκευής. Για κυλίνδρους μήκους μεγαλύτερου ή ίσου με 50 m σύμφωνα με τον EN 1991-1-4 §7.13(2) και το Ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα η ενεργός λυγηρότητα δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = \lambda_{50} = \min\left(0.7 \cdot \frac{l}{b}, 70\right) \quad (4.11)$$

Ο συντελεστής end effect  $\psi_\lambda$  χρησιμοποιείται για να μειώσει την αντίσταση της κατασκευής στην κίνηση του αέρα λόγω του φαινομένου end effect. Ο συντελεστής end effect προσδιορίζεται από τον EN 1991-1-4 §7.13(2) και το Ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα ως συνάρτηση της ενεργούς λυγηρότητας. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η τιμή  $\psi_\lambda = 0.745$ .

Η ισοδύναμη τραχύτητα επιφάνειας  $k$  προκύπτει από τον τύπο της επιφάνειας της κατασκευής και δίνεται από τον πίνακα 7.13 του EN 1991-1-4. Για μεταλλικές επιφάνειες που έχουν χρωματιστεί με προστατευτική βαφή η προτεινόμενη τιμή για την τραχύτητα είναι  $k = 0.02 \text{ mm}$ .

Ο ισοδύναμος συντελεστής φορτίου χωρίς free end flow  $c_{f,0}$  εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds  $Re$  και την ομαλοποιημένη ισοδύναμη τραχύτητα επιφάνειας  $k/b$  και υπολογίζεται σύμφωνα με το σχήμα 7.28 του EN 1991-1-4.

Ο συντελεστής ισοδύναμου φορτίου  $c_f$  για κυκλικούς κυλίνδρους δίνεται από τη σχέση EN 1991-1-4 §7.9.2(1):

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \quad (4.12)$$

Τελικά, το καταναμημένο φορτίο ανέμου στην κατασκευή  $F_w$  δίνεται από την σχέση:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (4.13)$$

### 4.3 Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-6: Αντοχή και Ευστάθεια Κελυφωτών Κατασκευών (EN1993-1-6)

Οι σωληνωτοί πύργοι αποτελούνται από διατομές μεγάλου μεγέθους με προσαρμοσμένα χαρακτηριστικά για την εκάστοτε κατασκευή και όχι από τυποποιημένες διατομές του εμπορίου συμμορφωμένες με τα κατασκευαστικά πρότυπα. Για το λόγο αυτό τέτοιου είδους κατασκευές μελετώνται ως κελυφωτά στοιχεία και ως τούτου χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις του μέρους 1-6 του Ευρωκώδικα 3 για τον σχεδιασμό του κυλινδρικού πυλώνα. Το εν λόγω κομμάτι του Ευρωκώδικα 3 προτείνει τον έλεγχο μόνο σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (Ο.Κ.Α.) και συγκεκριμένα ορίζει τέσσερις διαφορετικές οριακές καταστάσεις αστοχίας προς διερεύνηση:

#### 1. Πλαστικό Όριο (LS1: Plastic Limit)

Θεωρείται η κατάσταση εκείνη στην οποία η ικανότητα της κατασκευής να παραλάβει τα φορτία που της επιβάλλονται εξαντλείται λόγω της διαρροής του υλικού του χάλυβα.

#### 2. Κυκλική Πλαστικότητα (LS2: Cyclic Plasticity)

Θεωρείται η κατάσταση εκείνη κατά την οποία επανειλημμένοι κύκλοι φόρτισης και αποφόρτισης προκαλούν διαρροή σε εφελκυσμό και θλίψη ταυτόχρονα, προκαλώντας έτσι πλαστικές αρθρώσεις στην κατασκευή, με αποτέλεσμα τοπικές σχισμές λόγω εξάντλησης της δυνατότητας του υλικού να απορροφά ενέργεια.

#### 3. Λυγισμός (LS3: Buckling)

Θεωρείται η κατάσταση εκείνη κατά την οποία ολόκληρη η κατασκευή ή ένα μέρος της εμφανίζουν απότομα μεγάλες μετατοπίσεις λόγω της ύπαρξης τάσεων στην επιφάνεια του κελύφους, ικανών να προκαλέσουν κατάρρευση στην κατασκευή.

#### 4. Κόπωση (LS4: Fatigue)

Θεωρείται η κατάσταση εκείνη στην οποία επανειλημμένοι κύκλοι αύξησης και μείωσης των τάσεων οδηγούν στην δημιουργία ρωγμών κόπωσης.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος της οριακής κατάστασης αστοχίας πλαστικού ορίου (LS1). Ουσιαστικά, ο συγκεκριμένος έλεγχος απαιτεί οι τάσεις που αναπτύσσονται να μην ξεπερνούν την αντοχή του χάλυβα σε κανένα σημείο της κατασκευής. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τις τιμές σχεδιασμού των τάσεων  $\sigma_{eq,Ed}$  που αναπτύσσονται, αυτές θα πρέπει να λαμβάνονται σε οποιοδήποτε σημείο της κατασκευής ως οι μεγαλύτερες κύριες τάσεις. Οι τιμές σχεδιασμού της αντίστασης  $f_{eq,Ed}$  είναι η αντοχή του χάλυβα:

$$f_{eq,Ed} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M_0}} \quad (4.14)$$

όπου, η συνιστάμενη τιμή για το συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_{M_0}$  κατά Ευρωκώδικα 3 είναι  $\gamma_{M_0} = 1.0$ .

Τελικά, για να θεωρηθεί ότι ικανοποιείται ο έλεγχος LS1 θα πρέπει σε κάθε σημείο του πυλώνα να ισχύει:

$$f_{eq,Ed} \leq \sigma_{eq,Ed} \quad (4.15)$$

#### 4.4 Ευρωκώδικας 3, Μέρος 3-1: Πύργοι, Ιστοί και Καμινάδες – Πύργοι και Ιστοί

Το Μέρος 3-1 του Ευρωκώδικα 3 απευθύνεται στο δομοστατικό σχεδιασμό δικτυωτών πύργων και ιστών με αγκύρια. Οι διατάξεις του έρχονται να συμπληρώσουν τις γενικές οδηγίες που δίνονται στο Μέρος 1 του Ευρωκώδικα 3 και στις οποίες πρέπει να συμμορφώνονται όλες οι μεταλλικές κατασκευές. Γενικά, το Μέρος 3-1 παραπέμπει σε άλλα μέρη από Ευρωκώδικες δίνοντας όμως παράλληλα εξειδικευμένες οδηγίες στοχευμένα για δικτυωτούς πύργους ενώ στα παραρτήματα του δίνονται προτεινόμενες τιμές για τους διάφορους συντελεστές που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς.

Σε ό,τι αφορά τη δομική ανάλυση των δικτυωτών πύργων σύμφωνα με το Μέρος 3-1 οι εσωτερικές δυνάμεις και ροπές της κατασκευής πρέπει να υπολογίζονται χρησιμοποιώντας καθολική ελαστική ανάλυση και τα χαρακτηριστικά της συνολικής διατομής των στοιχείων. Σε περίπτωση που οι μετατοπίσεις έχουν σημαντικές συνέπειες, όπως για παράδειγμα σε πύργους με μεγάλα φορτία κεφαλής, πρέπει να διεξαχθεί ανάλυση δευτέρας τάξης. Ωστόσο, σε σημείωση διευκρινίζεται ότι οι δικτυωτοί πύργοι δύναται να αναλυθούν αρχικά λαμβάνοντας υπόψη την αρχική γεωμετρία.

#### 4.5 Κανονισμός IEC 61400-1: Προδιαγραφές Σχεδιασμού

Ο κανονισμός IEC 61400-1: Προδιαγραφές Σχεδιασμού περιλαμβάνει μηχανολογικά ζητήματα, εξειδικευμένα για Α/Γ, τα οποία οι Ευρωκώδικες δεν καλύπτουν στις διατάξεις του καθώς επικεντρώνονται σε θέματα κατασκευών πολιτικού μηχανικού. Στα μηχανολογικής φύσης ζητήματα συγκαταλέγεται η ώθηση του ρότορα, φορτίο ιδιαίτερο λόγω του ότι δεν εξαρτάται εξ ολοκλήρου από τα χαρακτηριστικά του ανέμου, αλλά απαιτείται και η γνώση των χαρακτηριστικών της Α/Γ για τον υπολογισμό του, συγκεκριμένα η επιφάνεια σάρωσης του ρότορα και η ονομαστική ταχύτητά της.

Η στροφική κίνηση του ρότορα δημιουργεί μια κυκλική επιφάνεια στην οποία ο αέρας ασκεί πίεση. Η επιφάνεια αυτή δε θεωρείται συμπαγής, αλλά ως ένας πορώδης δίσκος από τον οποίο διέρχεται ο αέρας, γεγονός το οποίο διευκολύνει τον υπολογισμό της ώθησης. Η σχέση που ορίζει ο IEC 61400 για την υπολογισμό της όταν ο ρότορας βρίσκεται σε κίνηση είναι (Hernandez-Estrada, et al., 2020):

$$F_R = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot A \cdot C_T \cdot V_{nom}^2 \quad (4.16)$$

όπου,

- $\rho_w$  η πυκνότητα του αέρα  $\rho_w = 1.225 \text{ kg/m}^3$   
 $A$  η επιφάνεια σάρωσης του ρότορα  
 $V_{nom}$  η ονομαστική ταχύτητα της Α/Γ  
 $C_T$  ο συντελεστής ώθησης 0.89

Ο συντελεστής ώθησης είναι ένας συντελεστής που σχετίζεται με την απόδοση της Α/Γ και είναι η πιο σημαντική παράμετρος, αλλά παράλληλα και η δυσκολότερη να προσδιορισθεί. Σύμφωνα με τη μηχανική ρευστών, θεωρείται πως αν ο ρότορας της Α/Γ ήταν τελείως συμπαγής δίσκος, τότε η τιμή του συντελεστή ώθησης για χαμηλές ταχύτητες θα έφτανε μέχρι και την τιμή 1.50. Για την περίπτωση Α/Γ, η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.10 και 0.90 και δίνεται από την σχέση:

$$C_T = 4 \cdot a \cdot (1 - a) \quad (4.17)$$

Έχει αποδειχθεί ότι για μια ιδεατή Α/Γ οριζοντίου άξονα η μέγιστη απόδοση προκύπτει για τιμή της παραμέτρου  $a = 1/3$ , για την οποία ο συντελεστής ώθησης παίρνει τιμή  $C_T = 0.89$  (Hansen, 1998).



## 5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθεται το πρακτικό μέρος της παρούσας εργασίας. Αρχικά παρουσιάζεται το μοντέλο της Α/Γ που επιλέχθηκε κοινό για τα δύο είδη πύργου που προσομοιώθηκαν καθώς και οι παραδοχές που ελήφθησαν κατά την ανάλυση τους. Εν συνεχεία, αναλύεται λεπτομερώς η διαδικασία προσομοίωσης των δύο πυλώνων, παρουσιάζεται η πορεία υπολογισμού των φορτίων που τους επιβλήθηκαν καθώς και οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν για την διερεύνηση της στατικής τους επάρκειας.

### 5.1 Επιλογή Μοντέλου Ανεμογεννήτριας

#### 5.1.1 Χαρακτηριστικά μοντέλου «Α/Γ 5 MW του NREL»

Το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμης Ενέργειας (National Renewable Energy Laboratory – NREL) του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ έχει χρηματοδοτήσει αρκετές έρευνες σχετικά με την αποτίμηση της τεχνολογίας αιολικής ενέργειας. Για την άντληση χρήσιμων πληροφοριών από αυτές τις έρευνες είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν ρεαλιστικά και τυποποιημένα δεδομένα. Για το λόγο αυτό επινοήθηκε το εξής μοντέλο αποκαλούμενο «Α/Γ 5 MW του NREL». Ο σκοπός ήταν να καθιερωθούν τα λεπτομερή χαρακτηριστικά μιας μεγάλης Α/Γ που να αντιπροσωπεύει Α/Γ που χρησιμοποιούνται σε υπεράκτιες και χερσαίες εφαρμογές μεγάλης κλίμακας όπως ΥΚΩ (Jonkman, Butterfield, Musial, & Scott, 2009).

Στην παρούσα εργασία, η οποία επίσης προορίζεται εξ ολοκλήρου για ερευνητικούς σκοπούς, θα γίνει χρήση του εν λόγω μοντέλου Α/Γ. Τα χαρακτηριστικά της συγκεντρωμένα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

<b>Ισχύς</b>	5 MW
<b>Διάμετρος ρότορα, Διάμετρος κόμβου</b>	126.00 m, 3.00 m
<b>Ύψος άξονα περιστροφής</b>	90.00 m
<b>Επιφάνεια σάρωσης ρότορα</b>	12,445.30 m <sup>2</sup>
<b>Cut-in, Ονομαστική, Cut-out ταχύτητες ανέμου</b>	3.00 m/s, 11.40 m/s, 25.00 m/s
<b>Cut-in, Ονομαστική ταχύτητες ρότορα</b>	6.90 rpm, 12.10 rpm
<b>Τυπική ταχύτητα άκρων πτερυγίων</b>	80.00 m/s
<b>Μάζα ρότορα</b>	110,000 kg
<b>Μάζα ατράκτου</b>	240,000 kg
<b>Θέση κέντρου μάζας Α/Γ</b>	1.75 m άνω της κορυφής του πύργου 1.90 m προσήνεμα του άξονα περιστροφής

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά μοντέλου Α/Γ 5 MW του NREL.

### 5.1.2 Βάρος Α/Γ

Τα φορτία βαρύτητας θα προέλθουν από τις μάζες τα τριών βασικών τμημάτων που απαρτίζουν την κατασκευή, δηλαδή τον ρότορα, την άτρακτο και τον πύργο. Χάριν απλοποίησης των υπολογισμών και της προσομοίωσης, στην παρούσα εργασία θα γίνει η παραδοχή πως οι μάζες του ρότορα και της ατράκτου έχουν κοινό σημείο εφαρμογής στην κορυφή του πύργου.

Η συνολική μάζα του συστήματος Α/Γ – ρότορα του μοντέλου «Α/Γ 5 MW του NREL» ανέρχεται στα 350,000 kg. Οπότε, τελικά το ζητούμενο συνολικό βάρος της Α/Γ που τοποθετείται στην κορυφή του πύργου είναι:

$$W_{WT} = m_{WT} \cdot g = 350000 \cdot 9.81 = 3433.50 \text{ kN} \quad (5.1)$$

Από τα δεδομένα του μοντέλου επίσης προκύπτει ότι το κέντρο μάζας της Α/Γ βρίσκεται εκκεντρα του κάθετου άξονα του πύργου κατά 1.90 m στην υπήνεμη πλευρά. Συνεπώς για τη μεταφορά του φορτίου βαρύτητας στον κάθετο άξονα του πύργου, απαιτείται η προσθήκη μιας ροπής εκκεντρότητας για την δεδομένη εκκεντρότητα των 1.90 μέτρων. Τελικά στην κορυφή των πύργων και κατά μήκος του κάθετου άξονα θα εφαρμοσθούν τα εξής φορτία για την προσομοίωση του βάρους της Α/Γ.

$$M_{WT} = W_{WT} \cdot e = 3433.50 \cdot 1.90 = 6523.65 \text{ kNm} \quad (5.2)$$

### 5.1.3 Ωθηση του ανέμου στον ρότορα

Η δύναμη της ώθησης που προκαλεί ο ρότορας μιας Α/Γ σε κίνηση  $F_R$  έχει δοθεί στην παράγραφο 4.5 από τη σχέση (4.16). Για τον υπολογισμό της χρειάζονται οι εξής τιμές. Η πυκνότητα του αέρα λαμβάνεται ως σταθερά με τιμή  $\rho_w = 1.225 \text{ kg/m}^3$ . Η επιφάνεια σάρωσης του ρότορα  $A = 12445.30 \text{ m}^2$  και η ονομαστική ταχύτητα  $V_{nom} = 11.40 \text{ m/s}$  της Α/Γ δίνονται στα χαρακτηριστικά του μοντέλου που βρίσκονται συγκεντρωμένα στον Πίνακα 5.1. Και τέλος ο συντελεστής ώθησης  $C_T$  δίνεται από τη σχέση (4.17) όπου η παράμετρος  $a$  για Α/Γ οριζοντίου άξονα παίρνει την τιμή  $a = 1/3$  και για την οποία τελικά ο συντελεστής ώθησης υπολογίζεται  $C_T = 0.89$ . Με τα παραπάνω δεδομένα η δύναμη της ώθησης υπολογίζεται ως:

$$F_R = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot 12,445.3 \cdot 0.88 \cdot 11.4^2 = 871.773 \text{ kN} \quad (5.3)$$

Το φορτίο της ώθησης του ανέμου ασκείται στον άξονα περιστροφής του ρότορα, ο οποίος από τα δεδομένα βρίσκεται 1.75 m ψηλότερα από την κορυφή του πύργου. Το φορτίο αυτό θα μεταφερθεί στο οριζόντιο επίπεδο της κορυφής του πύργου, συνοδευόμενο από την αντίστοιχη ροπή εκκεντρότητας, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$M_{FR} = F_R \cdot e = 871.773 \cdot 1.75 = 1525.602 \text{ kNm} \quad (5.4)$$

## 5.2 Μοντέλα Πύργων

Λόγω του ότι η διαστασιολόγηση και κατασκευή μιας Α/Γ είναι μια αρκετά περίπλοκη, χρονοβόρα και απαιτητική σε γνώσεις διαδικασία, έγιναν ορισμένες παραδοχές χάριν απλοποίησης της ανάλυσης. Αυτές συνοπτικά παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η Α/Γ θεωρείται πως θα κατασκευασθεί στην ευρύτερη περιοχή του Νομού Θεσσαλονίκης, σε βραχώδες έδαφος και βάσει αυτής της παραδοχής επιλέχθηκαν ορισμένοι συντελεστές και τιμές που ορίζουν οι Ευρωκώδικες.
- Θεωρείται πως οι μάζες του ρότορα και της ατράκτου είναι μια ενιαία μάζα και συνεπώς θα έχουν κοινό σημείο εφαρμογής το κέντρο μάζας της Α/Γ.
- Δεν θα πραγματοποιηθεί ανάλυση για σεισμική δράση.
- Ο άνεμος θα προσομοιωθεί ως στατικό κατανεμημένο φορτίο και όχι ως δυναμικό.
- Τα δυναμικά φορτία λόγω της περιστροφής του ρότορα αμελούνται.
- Δεν θα ληφθούν υπόψιν φορτία λόγω χιονιού και παγετού.
- Δεν θα σχεδιαστεί η θεμελίωση τους αλλά οι δύο πύργοι θα θεωρηθούν πακτωμένοι στις βάσεις τους.
- Δεν θα γίνει διερεύνηση της αντοχής των πύργων σε διάβρωση και κόπωση.
- Ο σωληνωτός πυλώνας δε θα διαθέτει άνοιγμα στο κέλυφος του για θύρα πρόσβασης.

Για τη διεξαγωγή της ανάλυσης των δύο πύργων που πρόκειται να συγκριθούν χρησιμοποιήθηκε λογισμικό ανάλυσης από την εταιρία DLUBAL. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα RSTAB και RFEM. Το πρώτο πρόκειται για πρόγραμμα ανάλυσης τρισδιάστατων δομικών πλαισίων και δικτυωμάτων ενώ το δεύτερο πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για επιφανειακά και γραμμικά στοιχεία. Τα δύο προγράμματα είναι αρκετά όμοια μεταξύ τους και διαθέτουν αμφότερα ποικιλία από προσαρτημένο λογισμικό (add-on modules) που βοηθούν τον σχεδιασμό και την ανάλυση.

### 5.2.1 Δικτυωτός Πύργος

Ο δικτυωτός πύργος σχεδιάστηκε και αναλύθηκε με το πρόγραμμα RSTAB αφού πρόκειται για κατασκευή αποτελούμενη από γραμμικά δομικά στοιχεία σε διάταξη δικτυωμάτων. Ο πύργος σχεδιάστηκε ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω. Σχεδιάστηκαν και αναλύθηκαν αρκετά μοντέλα από τα οποία μέσω διαδικασίας βελτιστοποίησης προέκυψε το μοντέλο που περιγράφεται παρακάτω και το οποίο είναι το κατασκευαστικά επαρκέστερο.

### 5.2.1.1 Δημιουργία μοντέλου – TOWER Structure

Για τη δημιουργία του μοντέλου του δικτυωτού πύργου χρησιμοποιήθηκε το προσαρτημένο λογισμικό TOWER Structure. Στο πρώτο βήμα που εμφανίζεται ζητούνται γενικά χαρακτηριστικά για τον τύπο του πύργου που θα διαμορφωθεί μέσω του προγράμματος. Ο πύργος είναι τετράγωνος σε κάτοψη, οι στηρίξεις του είναι πακτωμένες στο υπόβαθρο και επιλέχθηκε να διαθέτει και εσωτερικούς συνδέσμους ενίσχυσης στα τμήματα των οποίων οι σύνδεσμοι το απαιτούν.

Στο επόμενο βήμα εισήχθησαν σε πίνακα οι μεταλλικές διατομές που θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή. Οι διατομές αντλήθηκαν από τις βάσεις δεδομένων του προγράμματος. Για όλες τις διατομές χρησιμοποιήθηκε δομικός χάλυβας κλάσης S 355 J0 σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 10025-2: 2019-10. Για τα «πόδια» του πύργου χρησιμοποιήθηκαν κοίλες κυκλικές διατομής θερμής έλασης σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 10210-2:2006 ενώ για όλα τα υπόλοιπα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν γωνιακές διατομές, σχήματος L, με ίσα πλάτη, θερμής έλασης σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 10056-1:1998. Συγκεκριμένα, οι διατομές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι παρακάτω:

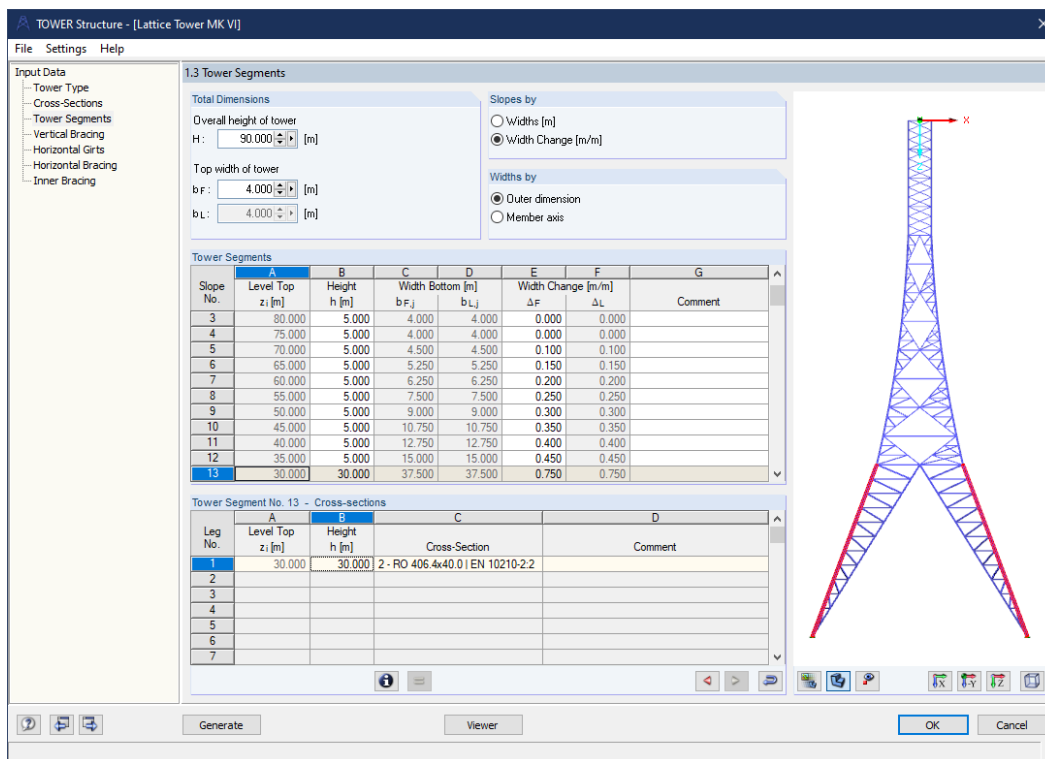
- RO 406.4 x 40.0 mm | EN 10210-2:2006
- RO 355.6 x 25.0 mm | EN 10210-2:2006
- RO 273.0 x 25.0 mm | EN 10210-2:2006
- L 250 x 250 x 28 mm | EN 10056-1:1998
- L 180 x 180 x 18 mm | EN 10056-1:1998
- L 150 x 150 x 15 mm | EN 10056-1:1998

Στα επόμενα βήματα προσδιορίστηκε οι διάταξη των στοιχείων του πύργου. Πρώτα απ' όλα καθορίστηκε το ύψος του πύργου στα 90.00 m και το πλάτος στην κορυφή του πύργου στα 4.00 m, όπως απαιτείται για την τοποθέτηση και τη λειτουργία του μοντέλου A/Γ που επιλέχθηκε. Ο πύργος χωρίστηκε σε 13 τμήματα κατά ύψος, εκ των οποίων το κατώτερο έχει ύψος 30.00 μέτρων ενώ τα υπόλοιπα 12 από 5.00 m. Για λόγους κατασκευαστικής επάρκειας αλλά και εξοικονόμησης υλικού και κατ' επέκταση κόστους της κατασκευής, η κλίση του πύργου σε κάθε ανώτερο τμήμα γίνεται πιο απότομη και ταυτόχρονα γίνεται μείωση των διατομών που χρησιμοποιούνται. Ξεκινώντας από την κορυφή με πλάτος 4.00 m, τα τέσσερα πρώτα τμήματα έχουν σταθερό πλάτος και χρησιμοποιείται η ίδια διατομή. Από εκεί και κάτω έγινε ρύθμιση ώστε το πλάτος του επόμενου τμήματος να αυξηθεί κατά 0.10 m ανά μέτρο ύψους και σε κάθε επόμενο τμήμα η αύξηση του πλάτους θα αυξάνεται κατά 0.05 m, δηλαδή το μεθεπόμενο τμήμα θα αυξηθεί κατά 0.15 m/m, έπειτα 0.20 m/m κ.ο.κ. Έτσι, η κατασκευή καταλήγει να έχει πλάτος στη βάση της 37.50 m ενώ στο ύψος των 30 μέτρων όπου βρίσκεται η κορυφή του κατώτερου τμήματος έχει πλάτος 15.00 m.

Σε αυτό το σημείο, επιλέχθηκε και η διατομή που θα χρησιμοποιηθεί για τα «πόδια» (legs) κάθε τμήματος. Σε δοκιμές που έγιναν σε προηγούμενα μοντέλα διαπιστώθηκε ότι ακόμα και η μεγαλύτερη διαθέσιμη γωνιακή διατομή «L» δεν ήταν επαρκής για το φορτίο που καλούνται να μεταφέρουν τα «πόδια». Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι κοίλες κυκλικές διατομές λόγω της μεγαλύτερης αντοχής τους. Μετά από διαδικασία βελτιστοποίησης προέκυψε ότι η βέλτιστη λύση είναι να τοποθετηθούν με τη σειρά οι εξής διατομές. Στο τμήμα από τη βάση του πύργου ως

τα 30.00 m διατομή RO 406.6 x 40.0 mm, στα τμήματα από τα 30.00 m ως τα 70.00 m διατομή RO 355.6 x 25.0 mm και στα υπόλοιπα τμήματα μέχρι την κορυφή του πύργου διατομή RO 273.0 x 25.0 mm. Στα επόμενα παράθυρα του λογισμικού διαμορφώθηκε η διάταξη με την οποία θα τοποθετηθούν οι σύνδεσμοι στο κάθε τμήμα του πύργου.

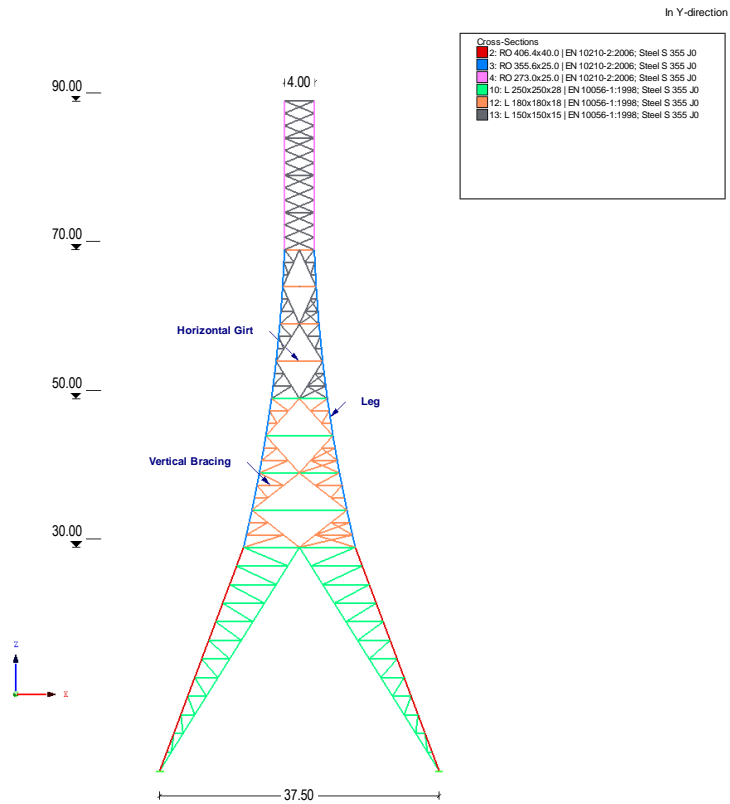
Οι πλευρικοί σύνδεσμοι στα τέσσερα κατακόρυφα τμήματα της κορυφής τοποθετήθηκαν σε διάταξη τριών διαγώνιων σχήματος «X». Στα παρακάτω τμήματα τοποθετήθηκαν διαγώνιοι σχήματος «K» με περαιτέρω κάθετους και διαγώνιους συνδέσμους και επιπρόσθετη ενίσχυση εσωτερικά. Η εν λόγω διάταξη των εσωτερικών συνδέσμων επιλέχθηκε να γίνει κατά αυτό τον τρόπο καθώς έτσι μειώνονται τα μήκη των στοιχείων για την αποτροπή του λυγισμού τους ενώ ταυτόχρονα δημιουργούνται τέσσερα μεγάλα κενά σχήματος ρόμβου στις προσόψεις του πύργου τα οποία ευνοούν την διέλευση του ανέμου με αποτέλεσμα να μειώνονται οι δυνάμεις που προκαλεί στην κατασκευή. Στο κατώτερο τμήμα, το οποίο έχει από μόνο του 30.00 m ύψος, τοποθετήθηκαν επίσης διαγώνιοι σχήματος «K» έτσι ώστε να διαμορφωθούν στη βάση τέσσερα ψηλά πόδια με μεγάλο άνοιγμα μεταξύ τους.



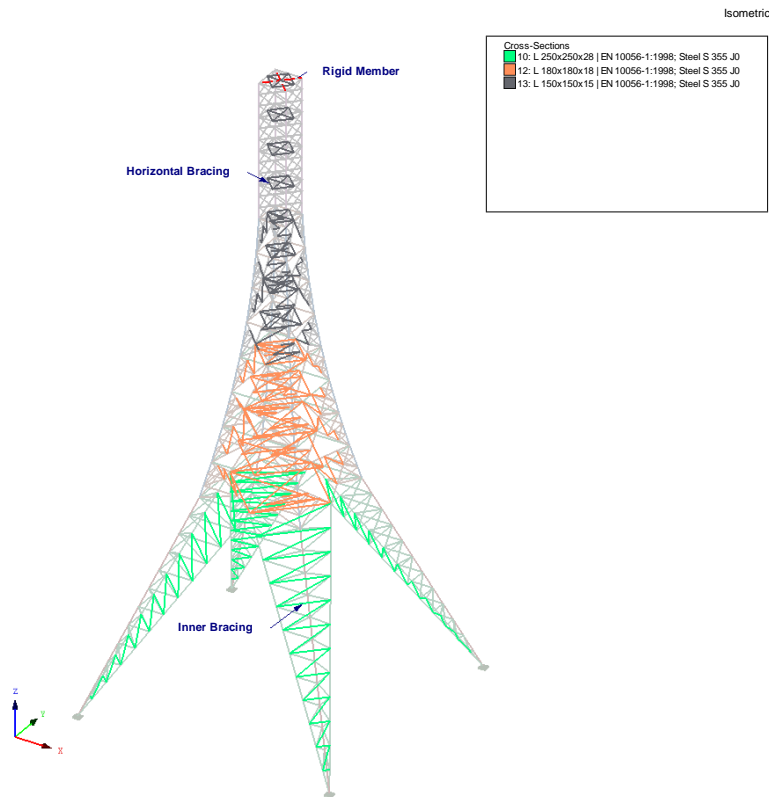
Εικόνα 5.1: Χωρισμός του πύργου σε τμήματα κατά ύψος.

Έπειτα από την τελική διαμόρφωση των στοιχείων δόθηκε στο λογισμικό TOWER Structure η εντολή να δημιουργήσει το μοντέλο. Έτσι, το λογισμικό ανέλαβε να δημιουργήσει κόμβους στα κατάλληλα σημεία, να προσδιορίσει τη θέση, τη διάσταση και τον προσανατολισμό κάθε δομικού στοιχείου με την επιλεχθείσα διατομή και να αναθέσει σύνδεσμο άρθρωσης στις ενώσεις των κατάλληλων στοιχείων ώστε να επιτευχθεί η δικτυωτή λειτουργία του μοντέλου για την ανάλυση. Μετά από έναν γρήγορο έλεγχο ότι η διαμόρφωση του πύργου έγινε σωστά δόθηκε η εντολή να εξαχθεί το μοντέλο στο κυρίως λογισμικό RSTAB. Το τελικό μοντέλο αποτελείται από 1528

στοιχεία. Οι διατομές που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε τμήμα για την ενίσχυση του φαίνονται στα παρακάτω σχέδια (Εικόνα 5.2, Εικόνα 5.3).



Εικόνα 5.2: Πρόσοψη του δικτυωτού πύργου.



Εικόνα 5.3: Οριζόντιοι (*horizontal bracing*) και εσωτερικοί (*inner bracing*) σύνδεσμοι ενίσχυσης και άκαμπα στοιχεία (*rigid members*).

### 5.2.1.2 Υπολογισμός & επιβολή φορτίων στην κατασκευή – TOWER Loading

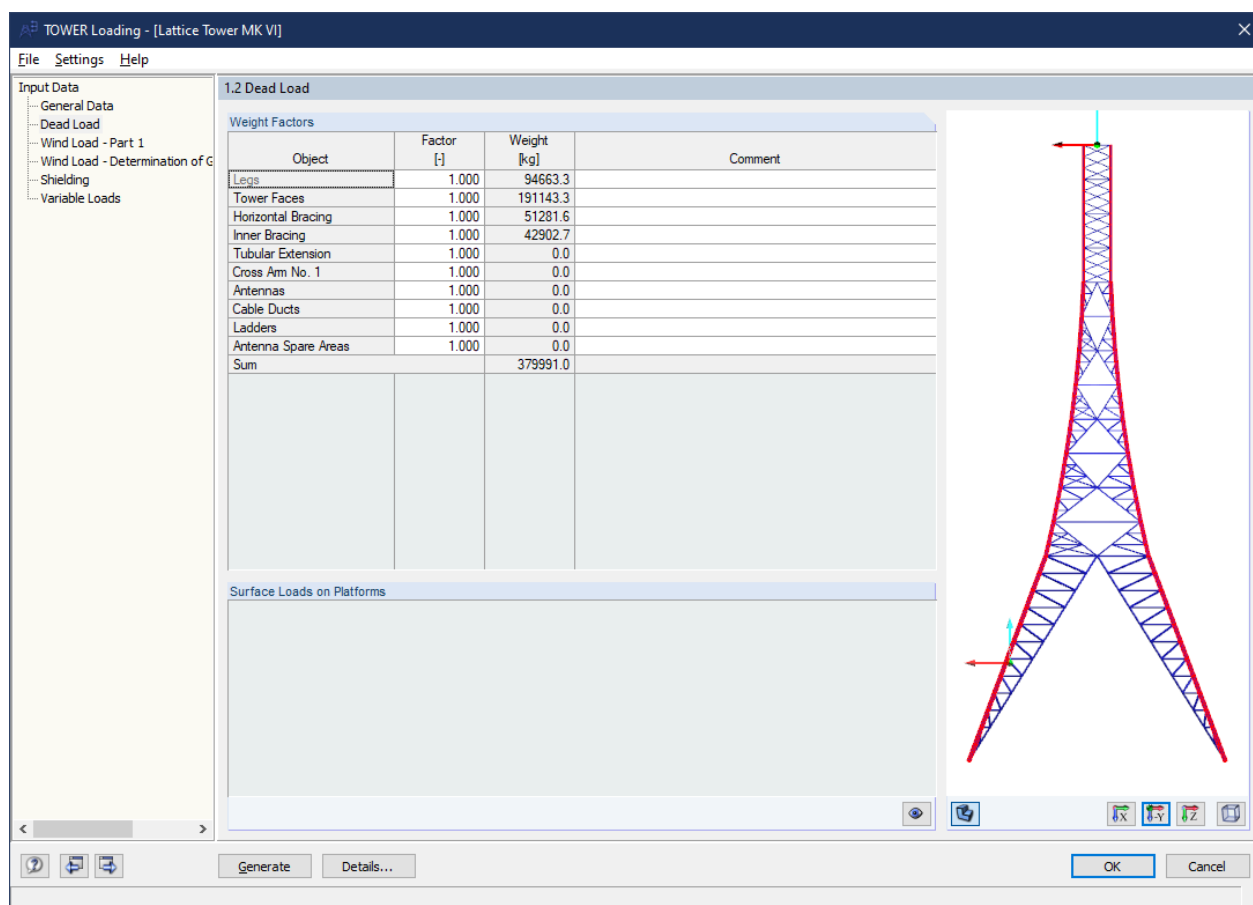
Εντός του λογισμικού RSTAB περιέχεται επιπλέον το προσαρτημένο λογισμικό TOWER Loading το οποίο βοηθάει στον υπολογισμό των φορτίων που επιβάλλονται σε δικτυωτούς πύργους. Κατά την εκκίνηση του TOWER Loading ζητείται να δοθούν τα γενικά δεδομένα του πύργου στον οποίο πρόκειται να επιβληθεί η φόρτιση. Απαιτείται να επιλεγθούν ξεχωριστά τα στοιχεία που αποτελούν το κάθε πόδι του πύργου, την κάθε πρόσοψη του πύργου, τους οριζόντιους και τους εσωτερικούς συνδέσμους.

#### I. Ίδιο βάρος πύργου

Το ίδιο βάρος του πύργου υπολογίζεται αυτόματα από το λογισμικό. Από τους πίνακες των διατομών είναι γνωστή η τιμή της μάζας ανά μέτρο κάθε διατομής. Για κάθε στοιχείο του πύργου υπολογίζεται η μάζα ανάλογα με το μήκος του και τη διατομή του. Στη συνέχεια η μάζα, πολλαπλασιαζόμενη με την επιτάχυνση της βαρύτητας, μετατρέπεται σε δύναμη η οποία επιβάλλεται στο εκάστοτε στοιχείο ως κατανεμημένο φορτίο κατά το μήκος της του και με κατεύθυνση



προφανώς προς τα κάτω. Στο ίδιο βάρος της κατασκευής δε λήφθηκε υπόψη τυχόν εξοπλισμός του πύργου όπως σκάλες, αγωγοί καλωδίων, πλατφόρμες κ.α. Το συνολικό βάρος του πύργου υπολογίστηκε στα 379,991.00 kg ή αλλιώς περίπου 380.00 tn.



Εικόνα 5.4: Υπολογισμός του ίδιου βάρους της κατασκευής.

Για το φορτίο του ίδιου βάρους του πύργου δημιουργήθηκε η κατάσταση φόρτισης LC1 – Self-weight η οποία κατατάσσεται στις μόνιμες δράσεις ( $G$ ) που ασκούνται στην κατασκευή.

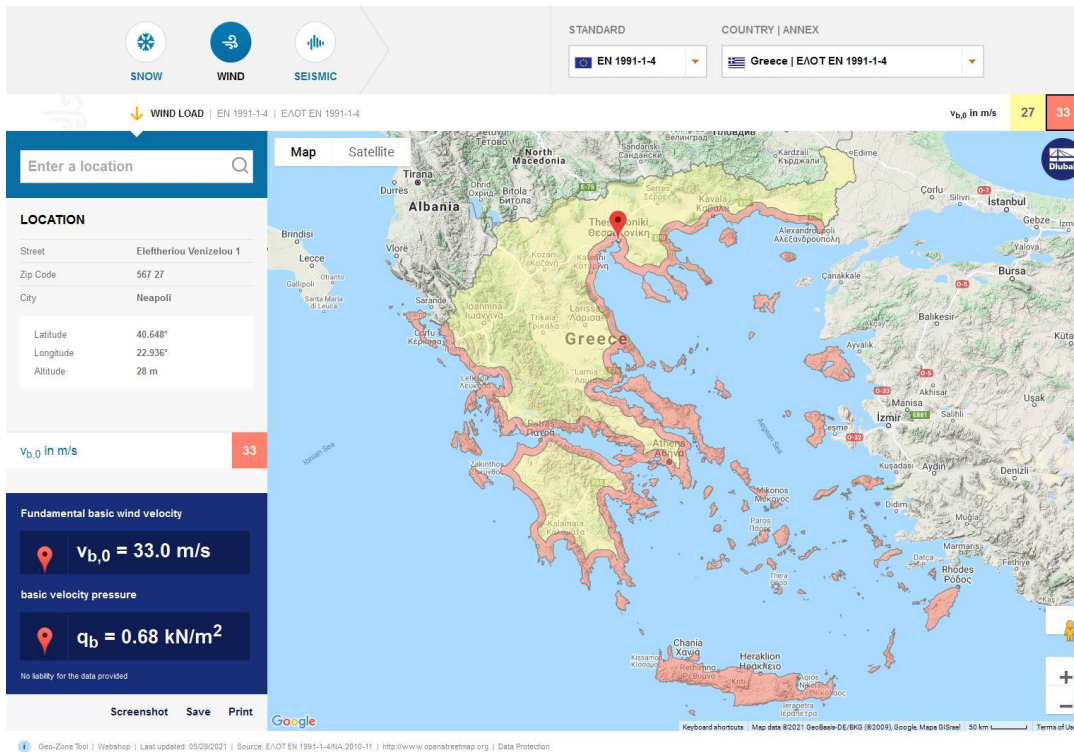
## II. Φορτίο ανέμου στον πύργο

Το λογισμικό TOWER Loading έχει τη δυνατότητα να υπολογίσει και τα φορτία του ανέμου που ασκούνται στον πύργο σύμφωνα με τις διατάξεις του EN 1991-1-4. Ως εθνικό παράρτημα επιλέχθηκε το παράρτημα της Ευρωπαϊκής Ένωσης καθώς στο λογισμικό δεν υπήρχε διαθέσιμο το εθνικό παράρτημα της Ελλάδας ΕΛΟΤ EN 1991-1-4.

Για τη διενέργεια των υπολογισμών είναι απαραίτητο να δοθεί η θεμελιώδης ταχύτητα του ανέμου  $v_{b,0}$  στην περιοχή όπου θα κατασκευαστεί το έργο και δίνεται από το εθνικό παράρτημα κάθε χώρας. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η κατασκευή των δύο μοντέλων υπό εξέταση θα θεωρηθεί ότι θα γίνει κοντά στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Για την εύρεση λοιπόν της ζητούμενης

ταχύτητας ανέμου χρησιμοποιήθηκε το διαδικτυακό εργαλείο της εταιρίας DLUBAL που παρέχει χάρτες για φορτία χιονιού, ταχύτητες ανέμου και σεισμικά φορτία. Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, η Ελλάδα είναι χωρισμένη σε δύο ζώνες σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου. Εύκολα διαπιστώνεται πως οι περιοχές κοντά σε ολόκληρη την ακτογραμμή και η νησιωτική Ελλάδα ανήκουν στη ζώνη ισχυρών ανέμων όπου η θεμελιώδης ταχύτητα δίνεται ίση με 33.0 m/s ενώ η ενδοχώρα ανήκει στη ζώνη ασθενέστερων ανέμων με ταχύτητα 27.0 m/s. Η περιοχή της Θεσσαλονίκης καθότι παραθαλάσσια εμπίπτει στη ζώνη ισχυρών ανέμων οπότε η θεμελιώδης ταχύτητα του ανέμου για το παρόν έργο θα είναι:

$$v_{b,0} = 33.0 \text{ m/s} \quad (5.5)$$

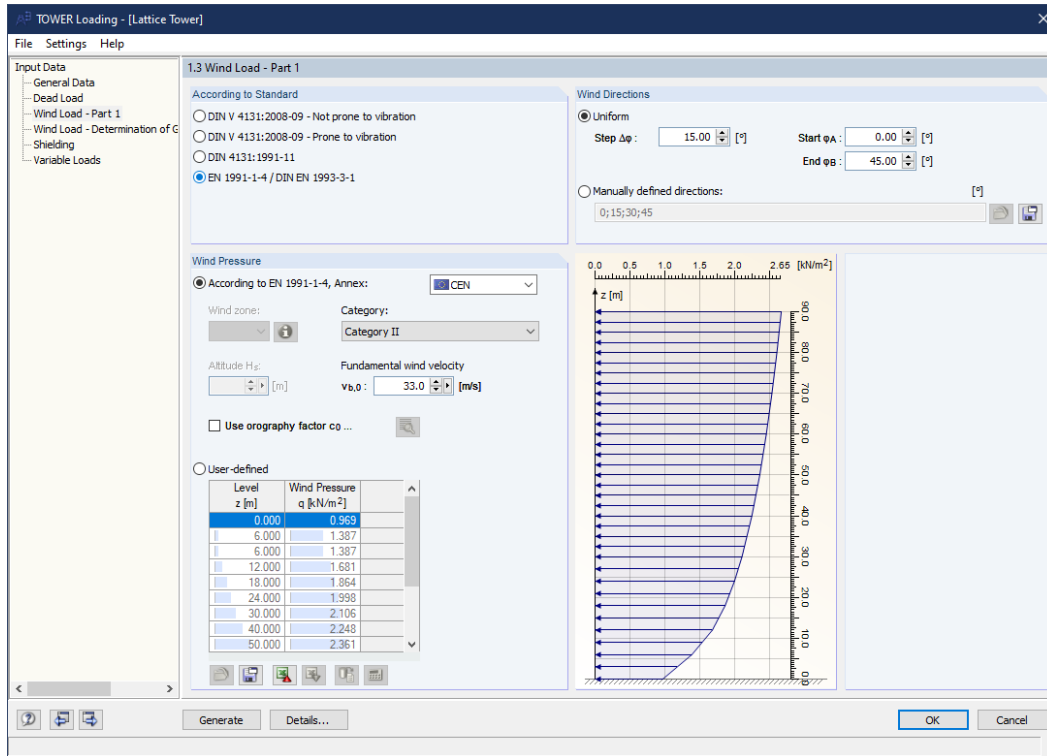


Εικόνα 5.5: Εύρεση θεμελιώδους ταχύτητας ανέμου για την περιοχή της Θεσσαλονίκης μέσω του διαδικτυακού εργαλείου της DLUBAL (Dlubal, 2021).

Το έδαφος όπου θα κατασκευαστεί το έργο θεωρήθηκε ότι είναι κατηγορίας II σύμφωνα με τον πίνακα 4.1 του EN 1991-1-4 (Πίνακας 4.1). Η περιγραφή που δίνεται στον πίνακα εξηγεί πως, πρόκειται για περιοχή με χαμηλή βλάστηση, όπως χόρτα, και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) με διαχωρισμό τουλάχιστον 20 ύψη εμποδίων. Η εν λόγω επιλογή έγινε καθώς το έδαφος κατηγορίας II πρόκειται για μια μέση κατάσταση από τις 5 κατηγορίες που περιγράφονται και ταυτόχρονα περιγράφει ικανοποιητικά την υποτιθέμενη περιοχή για το έργο κοντά στην πόλη της Θεσσαλονίκης.

Ο συντελεστής ορογραφίας, δηλαδή η επιρροή του ανάγλυφου της περιοχής όπως για παράδειγμα λόφοι, γκρεμοί κτλ. αγνοήθηκε. Θεωρείται ότι ο πύργος θα τοποθετηθεί σε περιοχή με σχετικά επίπεδο ανάγλυφο.

Σχετικά με τη διεύθυνση από την οποία ο άνεμος προσβάλλει την κατασκευή λήφθηκε υπόψη το γεγονός ότι η κατασκευή είναι συμμετρική σε κάτοψη τόσο κατά τους δύο κύριους άξονες X και Y όσο και διαγώνια. Κατά συνέπεια, θεωρήθηκε επαρκές να εξεταστούν τέσσερα σενάρια πρόσπτωσης του ανέμου από μηδενική γωνία μέχρι 45° με βήμα γωνίας 15°, δηλαδή άνεμο υπό γωνίες 0°, 15°, 30° και 45°.



Εικόνα 5.6: Υπολογισμός προφίλ ανέμου σύμφωνα με EN 1991-1-4.

Στο επόμενο βήμα δίνονται δεδομένα στο λογισμικό ώστε να υπολογιστεί ο δομικός συντελεστής της κατασκευής για τα φορτία ανέμου σύμφωνα με το παράρτημα F του EN 1991-1-4. Αρχικά η παράμετρος ζ για δικτυωτούς μεταλλικούς πύργους δίνεται ίση με 2.50 (άρθ. 1, παρ. F.3). Στη συνέχεια, καλείται να υπολογιστεί η λογαριθμική ελάττωση της απόσβεσης δ για τη θεμελιώδη καμπτική ιδιομορφή η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (5.6)$$

όπου,

$\delta_s$  η λογαριθμική ελάττωση της δομικής απόσβεσης

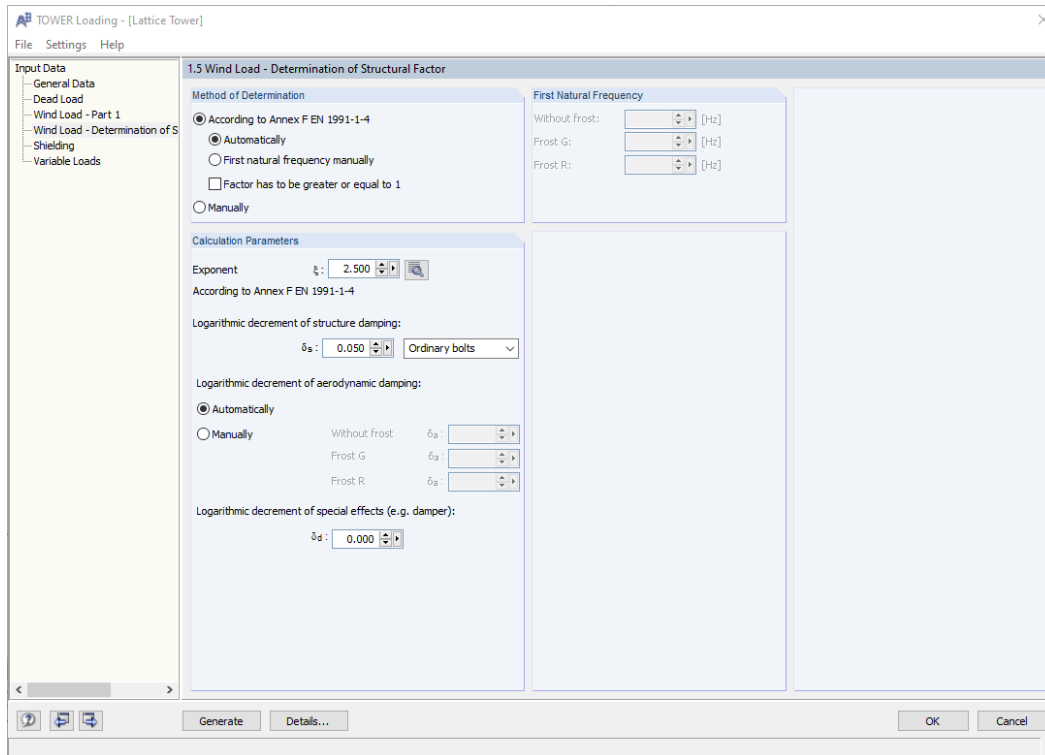
$\delta_a$  η λογαριθμική ελάττωση της αεροδυναμικής απόσβεσης για τη θεμελιώδη ιδιομορφή

$\delta_d$  η λογαριθμική ελάττωση της απόσβεσης λόγω ειδικών συσκευών

Ο πρώτος όρος  $\delta_s$  της παραπάνω σχέσης δίνεται από τον πίνακα F.2 του EN 1991-1-4. Για δικτυωτούς μεταλλικούς πύργους με απλούς κοχλίες η τιμή του όρου είναι 0.05 όπως δίνεται και αυτόματα από το λογισμικό. Ο δεύτερος όρος για την αεροδυναμική απόσβεση υπολογίζεται

αυτόματα από το λογισμικό ενώ ο τελευταίος παίρνει τιμή 0 αφού η κατασκευή δε διαθέτει κάποια ειδική συσκευή για απόσβεση ταλάντωσης.

Τελευταίο βήμα σχετικά με τα φορτία ανέμου είναι να οριστεί ο συντελεστής ανεμικής σκίασης για τα εσωτερικά στοιχεία του πύργου. Το φορτίο του ανέμου που ασκείται στα εσωτερικά στοιχεία, δηλαδή αυτά που καλύπτονται από άλλα στοιχεία που βρίσκονται μπροστά τους κατά την πτώση του ανέμου, λαμβάνεται μειωμένο κατά 20%. Το λογισμικό αυτόματα όρισε συντελεστή σκίασης 0.80, ίσο για όλες τις διευθύνσεις του ανέμου και για όλα τα εσωτερικά στοιχεία και διατηρήθηκε ως έχει.



Εικόνα 5.7: Προσδιορισμός του δομικού συντελεστή για φορτία ανέμου.

Για το κάθε σενάριο πρόσπτωσης του ανέμου υπό γωνία δημιουργήθηκε ξεχωριστή κατάσταση φόρτισης. Οι τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις φόρτισης ονομάστηκαν ως εξής: LC6: Wind 0°, LC7: Wind 15°, LC8: Wind 30° και LC9: Wind 45°. Οι δράσεις του ανέμου στην κατασκευή θεωρούνται το κύριο μεταβλητό φορτίο ( $Q_w$ ) που ασκείται στην κατασκευή.

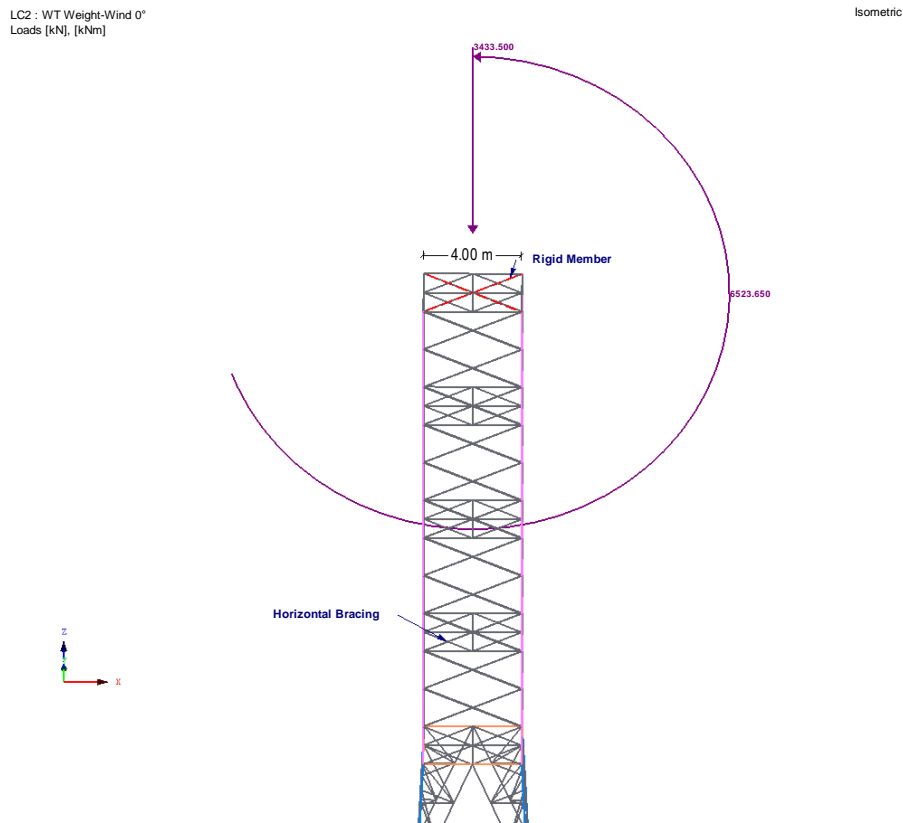
### III. Βάρος Α/Γ

Η προσομοίωση της επίδρασης του βάρους της Α/Γ, δηλαδή της απράκτου και του ρότορα, γίνεται με την ανάλυση του σε ένα συγκεντρωμένο φορτίο δύναμης και ένα φορτίο ροπής. Η δύναμη ασκείται στο κέντρο της κορυφής του πύργου κατά τη διεύθυνση του άξονα του και με φορά προς τα κάτω ενώ η τιμή της, όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση (5.1), είναι  $W_{WT} = 3433.50 \text{ kN}$ . Η ροπή επιβάλλεται με σκοπό να προσομοιωθεί το αποτέλεσμα που προκαλεί η

εκκεντρότητα του κέντρου μάζας της Α/Γ σε σχέση με τον άξονα του πύργου. Επιβάλλεται ομοίως στο κέντρο της κορυφής του πύργου και η φορά της τείνει να στρέψει την κορυφή του πύργου προς την προσήνεμη πλευρά. Η τιμή της όπως προέκυψε από την εξίσωση (5.2) είναι  $M_{WT} = 6523.65 \text{ kNm}$ .

Για την επιβολή των παραπάνω φορτίων στο κέντρο της κορυφής του πύργου τοποθετήθηκαν σε σχήμα σταυρού δύο άκαμπτα μέλη (rigid type members). Επιλέχθηκαν άκαμπτα μέλη ώστε να μπορούν να μεταφέρουν φορτία δίχως να μετακινούνται τα ίδια. Τα φορτία επιβλήθηκαν στον κόμβο της συμβολής των δύο άκαμπτων μελών.

Όπως σημειώθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, λόγω της συμμετρίας της κατασκευής λήφθηκε η απόφαση για χάρη της μελέτης ο άνεμος να προσβάλει την κατασκευή από τέσσερις διαφορετικές διευθύνσεις. Χάρη στο μηχανισμό περιστροφής της Α/Γ η διεύθυνση του ανέμου καθορίζει και τον προσανατολισμό της Α/Γ. Αυτό συνεπάγεται και την περιστροφή του κέντρου μάζας της Α/Γ γύρω από τον άξονα του πύργου για αυτό και για κάθε σενάριο διεύθυνσης του ανέμου η ροπή που επιβάλλει η Α/Γ στον πύργο να περιστρέφεται αναλόγως.

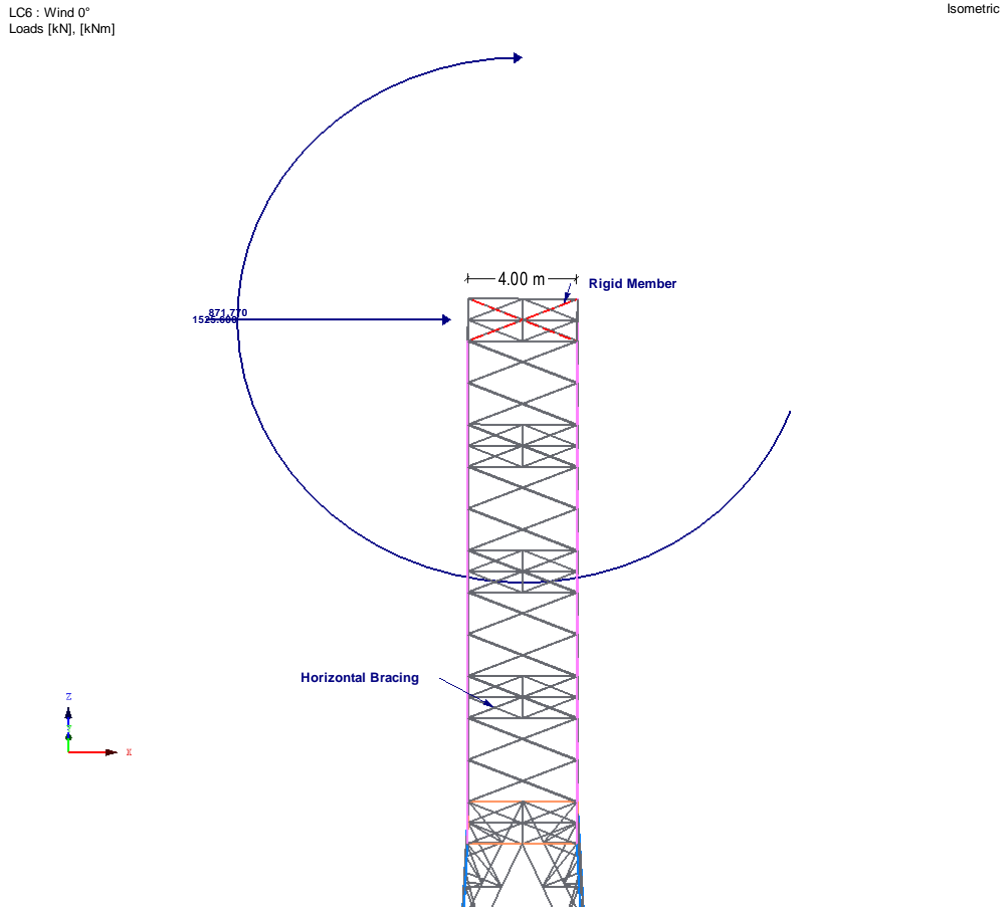


Εικόνα 5.8: Η δύναμη και ροπή λόγω του βάρους της Α/Γ στην κατασκευή για διεύθυνση ανέμου 0°.

Το φορτίο του βάρους της Α/Γ θεωρείται, όπως το ίδιο βάρος του πύργου, μόνιμο φορτίο ( $G$ ) και για να μπορέσει να ληφθεί ξεχωριστά υπόψη κάθε φορά ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου δημιουργήθηκαν πάλι τέσσερις ξεχωριστές καταστάσεις φόρτισης: LC2: WT Weight - Wind 0°, LC3: WT Weight - Wind 15°, LC4: WT Weight - Wind 30° και LC5: WT Weight - Wind 45°.

#### IV. Ωθηση ρότορα

Ακολουθώντας την ίδια λογική που ακολουθήθηκε για το βάρος της Α/Γ, θα επιβληθούν στην κατασκευή και τα φορτία λόγω της ώθησης που δημιουργεί η περιστροφή του ρότορα. Δηλαδή, στον κόμβο στο κέντρο της κορυφής θα επιβληθούν μια οριζόντια δύναμη  $F_R = 871.77 \text{ kN}$  κατά τη διεύθυνση του ανέμου και με ίδια φορά καθώς και μία ροπή  $M_{FR} = 1525.60 \text{ kNm}$  της οποίας το διάνυσμα είναι κάθετο στη διεύθυνση του ανέμου και η φορά της είναι τέτοια ώστε να τείνει να στρέψει την κορυφή του πύργου προς την υπήνεμη πλευρά.



Εικόνα 5.9: Τα φορτία δύναμης και ροπής λόγω της ώθησης του ρότορα στην κατασκευή για διεύθυνση ανέμου  $0^\circ$ .

Η δράση της ώθησης του ρότορα θεωρήθηκε μεταβλητό φορτίο ( $Q_w$ ) και ότι επιδρά στην κατασκευή με την ίδια συχνότητα με την οποία δρα ο άνεμος κατευθείαν πάνω στον πύργο. Για αυτό το λόγο οι δράσεις του ρότορα συμπεριλήφθηκαν κατευθείαν στις καταστάσεις φόρτισης λόγω ανέμου, LC6, LC7, LC8, LC9 που δημιουργήθηκαν από το υποπρόγραμμα TOWER Loading προηγουμένως.

### 5.2.1.3 Συνδυασμοί φόρτισης

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.1.1 στην παρούσα εργασία δόθηκε έμφαση στον έλεγχο Οριακής Κατάστασης Αστοχίας για την οριακή κατάσταση STR που αφορά την στατική επάρκεια των δομικών στοιχείων της κατασκευής. Οι υπόλοιπες οριακές καταστάσεις που προτείνονται από τον Ευρωκώδικα 0 είτε αγνοούνται καθώς απέχουν από το αντικείμενο μελέτης, όπως η κατάσταση FAT, είτε είναι αδύνατο να εξεταστούν λόγω των απλοποιητικών παραδοχών που έγιναν κατά τη δημιουργία των μοντέλων. Για παράδειγμα θα ήταν αδύνατο να εξεταστεί η οριακή κατάσταση EQU που εξετάζει τον κίνδυνο ανατροπής ολόκληρης της κατασκευής από τη στιγμή που δεν έχει σχεδιαστεί η θεμελίωση του πύργου.

Ο έλεγχος σε Ο.Κ.Α. για τον πύργο έγινε για τον συνδυασμό φόρτισης που προτείνεται από τον Ευρωκώδικα για μόνιμες και προσωρινές καταστάσεις σχεδιασμού όπως ορίζει η εξίσωση (4.1). Οι μόνιμες δράσεις που ασκούνται στην κατασκευή είναι το ίδιο βάρος του πύργου και το βάρος της Α/Γ ενώ απουσιάζουν δυνάμεις προέντασης. Όσον αφορά τις μεταβλητές δράσεις, μοναδική δράση είναι η δράση του ανέμου ( $Q_w$ ) και κατά συνέπεια αποτελεί την κύρια μεταβλητή δράση που ασκείται. Επιπλέον, σύμφωνα με τον πίνακα A1.2(B) του παραρτήματος Α του Ευρωκώδικα 0 οι τιμές των συντελεστών ασφαλείας ( $\gamma$ ) για οριακή κατάσταση STR λαμβάνονται  $\gamma_G = 1.35$  για δυσμενείς μόνιμες δράσεις και  $\gamma_{Q,1} = 1.50$  για δυσμενείς μεταβλητές δράσεις. Με βάση, λοιπόν τα παραπάνω η εξίσωση (4.1) απλοποιείται στην παρακάτω σχέση:

$$1.35 \cdot G + 1.50 \cdot Q_w \quad (5.7)$$

Συγκεκριμένα για το μοντέλο του δικτυωτού πύργου, εφόσον θεωρήθηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια πρόσπτωσης του ανέμου στην κατασκευή, δημιουργήθηκαν και τέσσερις αντίστοιχοι συνδυασμοί φόρτισης για κάθε γωνία πρόσπτωσης του ανέμου. Η ονομασία των συνδυασμών έγινε ως εξής. CO1:  $1.35 \cdot G + 1.50 \cdot Q_w$  – Wind  $0^\circ$ , CO2:  $1.35 \cdot G + 1.50 \cdot Q_w$  – Wind  $15^\circ$ , CO3:  $1.35 \cdot G + 1.50 \cdot Q_w$  – Wind  $30^\circ$  και CO4:  $1.35 \cdot G + 1.50 \cdot Q_w$  – Wind  $45^\circ$ .

Η κατασκευή δεν υποβλήθηκε σε έλεγχο Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας. Όπως σημειώνεται στην παράγραφο στους πύργους για Α/Γ συνήθως ο έλεγχος Ο.Κ.Α. γίνεται είτε σχετικά με τις μετακινήσεις οι οποίες καθορίζονται από τον κατασκευαστή για την ομαλή λειτουργία της Α/Γ είτε σχετικά με την ανατροπή της κατασκευής. Στην πρώτη περίπτωση οι προδιαγραφές ομαλής λειτουργίας της Α/Γ δεν είναι γνωστές και παρεκκλίνουν από το αντικείμενο της εργασίας ενώ στη δεύτερη περίπτωση ο έλεγχος δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί καθώς δεν έχει σχεδιαστεί θεμελίωση για τον πύργο.

### 5.2.1.4 Σχεδιασμός κατά Ευρωκώδικα 3 – TOWER Design

Το επόμενο βήμα μετά την δημιουργία του μοντέλου και την επιβολή των φορτίων σε αυτό είναι να επαληθευτεί αν η κατασκευή πληροί τα κριτήρια που τίθενται από τον Ευρωκώδικα 3. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με τη βοήθεια άλλου ενός προσαρτημένου λογισμικού που



λέγεται TOWER Design. Αυτό το λογισμικό αναλαμβάνει να διενεργήσει όλους τους απαραίτητους ελέγχους που απαιτούνται από τον Ευρωκώδικα τόσο σε κάθε στοιχείο της κατασκευής ξεχωριστά όσο και κατά μήκος του κάθε στοιχείου ανά τακτά διαστήματα. Χάρη στο εν λόγω λογισμικό λοιπόν, η διαδικασία ελέγχου που πρέπει να πραγματοποιηθεί και για τα 1528 στοιχεία της κατασκευής απλοποιείται σημαντικότερα από άποψη χρόνου αλλά και υπολογισμών.

Το λογισμικό εκτέλεσε το σχεδιασμό βάσει των διατάξεων του EN 1993-3-1 για έλεγχο σε Ο.Κ.Α. και για τους τέσσερις συνδυασμούς φόρτισης που δημιουργήθηκαν για κάθε σενάριο πρόσπτωσης του ανέμου. Το κριτήριο για τον επιτυχή σχεδιασμό του πύργου είναι κανένα από τα ποσοστά εξάντλησης αντοχής του υλικού οποιασδήποτε διατομής να μη ξεπερνάει την τιμή της μονάδας. Επιθυμητές τιμές των ποσοστών εξάντλησης είναι εκείνες που σίγουρα είναι μικρότερες της μονάδας όμως ταυτόχρονα δεν πλησιάζουν υπερβολικά στο μηδέν καθώς αυτό υποδεικνύει ότι έχει γίνει υπερδιαστασιολόγηση του έργου με σπατάλη υλικού και κατά επέκταση εκτίναξη του κόστους. Το ιδανικότερο εύρος τιμών για ποσοστά εξάντλησης είναι μεταξύ 0.70 και 0.90.

Όπως αναφέρθηκε, η τελική μορφή του πύργου προέκυψε έπειτα από αρκετές επαναλήψεις σχεδιασμού του μοντέλου, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπήρχε διαθέσιμο κάποιο πρότυπο μοντέλο για να λειτουργήσει ως οδηγός. Κατά τις πρώτες προσπάθειες διαμόρφωσης του πύργου, χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα μέλη γωνιακές διατομές “L” με ίσες πλευρές και οι πλάγιοι σύνδεσμοι ενίσχυσης τοποθετήθηκαν σε σχετικά αραιή διάταξη. Τα μοντέλα αυτά αποδείχθηκαν ανεπαρκή ακόμα και μετά από πύκνωση των πλάγιων συνδέσμων και αύξηση του μεγέθους των διατομών. Το πρόβλημα εντοπιζόνταν κυρίως στα στοιχεία από τα οποία αποτελούνταν τα «πόδια» της κατασκευής και παραλάμβαναν μεγάλο μέρος των φορτίων.

Επομένως, η λύση του προβλήματος αναζητήθηκε άλλου και αυτή που δόθηκε ήταν να αντικατασταθεί το είδος των διατομών στα μέλη που κρίνονταν ανεπαρκή. Οι γωνιακές διατομές των «ποδιών», αντικαταστάθηκαν με κοίλες κυκλικές διατομές ίδιας ποιότητας χάλυβα. Με την αλλαγή αυτή το ποσοστό εξάντλησης της αντοχής του πύργου προέκυπτε εντός ορίων όμως αρκετά μικρότερο της μονάδας υποδηλώνοντας υπερδιαστασιολόγηση. Τότε, δόθηκε η εντολή στο πρόγραμμα να εκτελέσει διαδικασία βελτιστοποίησης με βάση τις διατομές και από αυτή τη διαδικασία προέκυψε τελικά το μοντέλο όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 5.2.1.1 με άριστα ποσοστά εξάντλησης που κυμαίνονται από 0.80 έως 0.88 για όλα τα σενάρια φόρτισης όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 5.10.

**2.1 Design by Load Case**

Load- ing	Description	Member No.	Location x [m]	Design Ratio	Design According to Formula	DS
Ultimate Limit State Design						
CO1	1.35*G+1.5*Qw - Wind 0°	815	1.830	0.80	≤ 1 ST314) Stability analysis - Flexural buckling about v-axis acc. to 6.3.1.1 and 6.3.1.2 - Class	PT
CO2	1.35*G+1.5*Qw - Wind 15°	360	1.830	0.85	≤ 1 ST314) Stability analysis - Flexural buckling about v-axis acc. to 6.3.1.1 and 6.3.1.2 - Class	PT
CO3	1.35*G+1.5*Qw - Wind 30°	957	2.727	0.88	≤ 1 ST314) Stability analysis - Flexural buckling about v-axis acc. to 6.3.1.1 and 6.3.1.2 - Class	PT
CO4	1.35*G+1.5*Qw - Wind 45°	957	2.727	0.88	≤ 1 ST314) Stability analysis - Flexural buckling about v-axis acc. to 6.3.1.1 and 6.3.1.2 - Class	PT

Max: 0.88 ≤ 1

**Details - Member 815 - x: 1.830 m - CO1**

- Material Properties - Steel S 355 J0 | EN 10025-2:2019-10
- Cross-Section Properties - L 150x150x15 | EN 10056-1:1998
- Design Internal Forces
- Cross-Section Classification - Class 4
- Effective Cross-Section Properties
- Member Type - Secondary Bracing
- Design Ratio
 

Modulus of Elasticity	E	21000.00	kN/cm <sup>2</sup>	
Moment of Inertia	I <sub>v</sub>	370.00	cm <sup>4</sup>	
Effective Member Length	L <sub>cr,v</sub>	1.830	m	
Elastic Flexural Buckling Force	N <sub>cr,v</sub>	2291.05	kN	
Cross-Sectional Area	A <sub>eff</sub>	43.00	cm <sup>2</sup>	
Yield Strength	f <sub>y</sub>	35.50	kN/cm <sup>2</sup>	3.2.1
Effective Slenderness Ratio	λ <sub>eff,v</sub>	0.921		EN 1993-1-1
Axial Force (Compression)	N <sub>Ed</sub>	792.18	kN	
Criterion N <sub>Ed</sub> / N <sub>cr,v</sub>	η <sub>N,cr</sub>	0.346	> 0.04	6.3.1.2(4)
Buckling Curve	BC <sub>v</sub>	b		Tab. 6.2
Imperfection Factor	α <sub>v</sub>	0.340		Tab. 6.1
Auxiliary Factor	Φ <sub>v</sub>	1.047		6.3.1.2(1)
Reduction Factor	χ <sub>v</sub>	0.647		Eq. (6.49)
Partial Factor	γ <sub>M1</sub>	1.000		6.1
Flexural Buckling Resistance	N <sub>b,v,Rd</sub>	988.29	kN	Eq. (6.48)

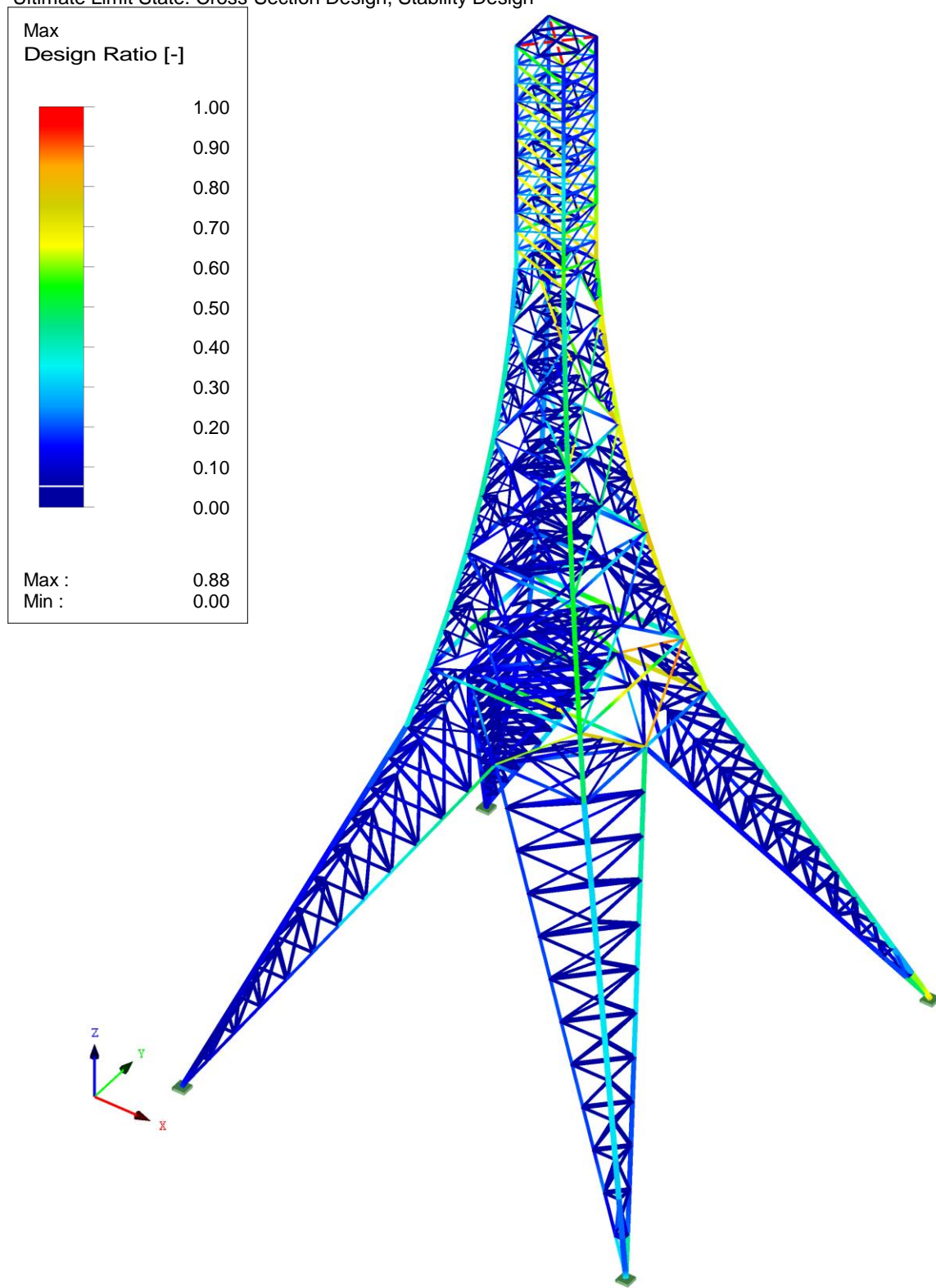
13 - L 150x150x15 | EN 10056-1:1998

Εικόνα 5.10: Το μέγιστο ποσοστό εξάντλησης της κατασκευής κατά EN 1993 για κάθε φορτιστικό συνδυασμό.

Το ποσοστό εξάντλησης του κάθε συνδυασμού φόρτισης είναι απλά το μέγιστο που εμφανίζεται στον αντίστοιχο συνδυασμό ανάμεσα στα ποσοστά εξάντλησης όλων των μελών της κατασκευής. Στο διάγραμμα της Εικόνα 5.11 φαίνεται το μέγιστο ποσοστό εξάντλησης για κάθε στοιχείο και για τους τέσσερις συνδυασμούς φόρτισης. Ο έλεγχος από τον οποίο προέκυψαν αυτά τα ποσοστά είναι έλεγχος σε Ο.Κ.Α. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η αντοχή των διατομών εξαντλείται περισσότερο σε στοιχεία των «ποδιών» της κατασκευής και σε οριζόντιους συνδέσμους ενώ αυτό συμβαίνει ελάχιστα στα στοιχεία πλάγιων συνδέσμων. Παρ' όλα αυτά το στοιχείο του οποίου η αντοχή εξαντλείται περισσότερο αγγίζοντας ποσοστό 0.88 είναι πλάγιος σύνδεσμος ο οποίος κατά πάσα πιθανότητα επιβαρύνεται περισσότερο κατά την κατά την καταπόνηση του πύργου από τον άνεμο υπό γωνία 45°.

TOWER Design CA5  
Ultimate Limit State: Cross-Section Design, Stability Design

Isometric



Max Design Ratio: 0.88

Εικόνα 5.11: Ποσοστά εξάντλησης αντοχής για κάθε στοιχείο.

## 5.2.2 Σωληνωτός Πύργος

Για την προσομοίωση του σωληνωτού πύργου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RFEM της DLUBAL καθώς η κυλινδρική διατομή προσομοιώθηκε με επιφανειακά στοιχεία (shell elements), τα οποία ήταν διαθέσιμα στο συγκεκριμένο πρόγραμμα. Παράλληλα, καθώς ο έλεγχος που πραγματοποιήθηκε στο εν λόγω μοντέλο αφορούσε στο προφίλ των πιέσεων, η προσομοίωση με επιφανειακά στοιχεία είναι ακριβέστερη.

### 5.2.2.1 Δημιουργία μοντέλου

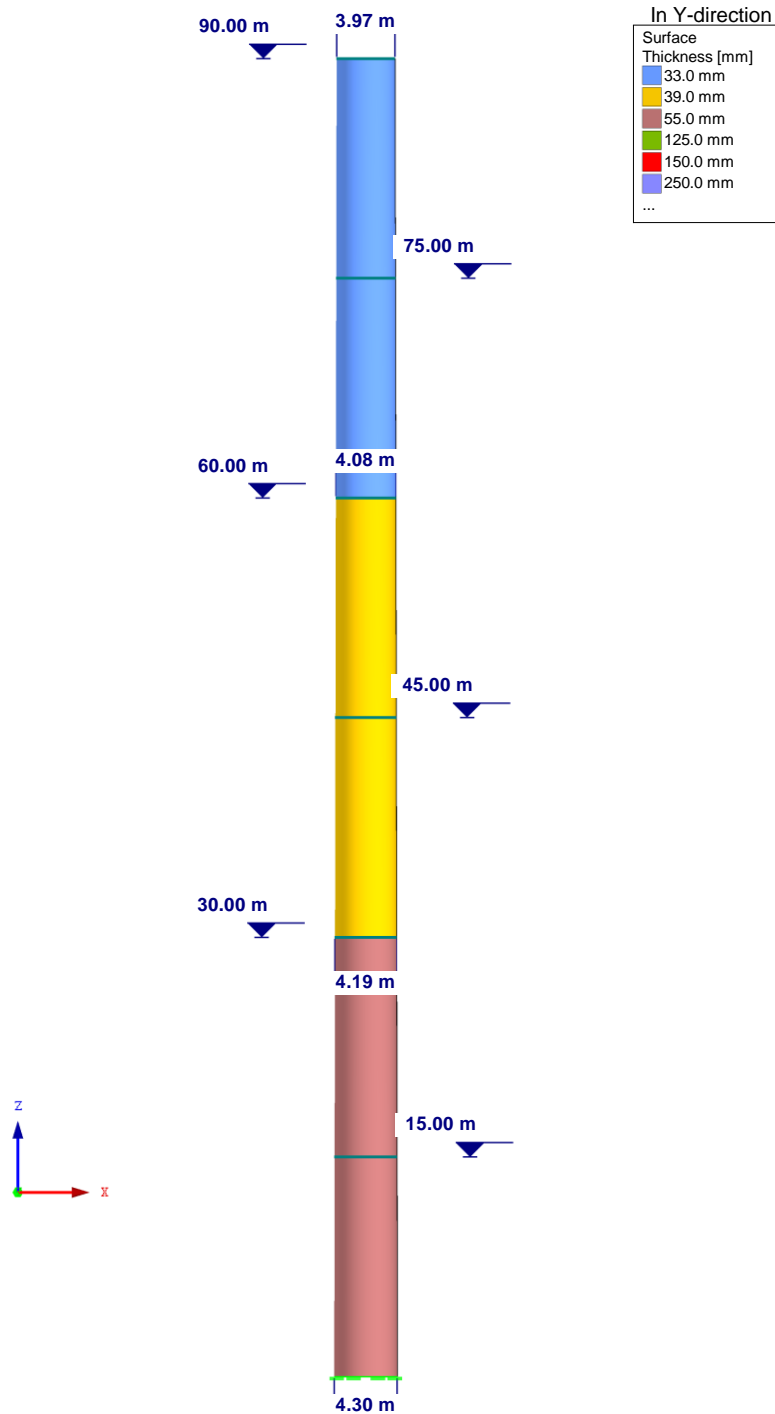
Στη διαμόρφωση του μοντέλου του σωληνωτού πυλώνα, ο υπάρχον πύργος από το μοντέλο «Α/Γ 5 MW του NREL» λειτούργησε ως οδηγός. Ο συγκεκριμένος πυλώνας έχει διάμετρο βάσης 6.00 m και διάμετρο κορυφής 3.87 m και πάχη διατομών 27 mm και 19 mm αντίστοιχα. Όπως προαναφέρθηκε, η μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος βάσης στην Ευρώπη είναι 4.30 m για λόγους ασφαλούς μεταφοράς των τμημάτων του πυλώνα στο πεδίο. Επίσης, δεδομένη από το μοντέλο Α/Γ του NREL θεωρήθηκε και η ελάχιστη δυνατή διάμετρος της κορυφής καθώς αυτή καθορίζεται από τις διαστάσεις της Α/Γ. Έτσι σε πρώτη φάση, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο με τα χαρακτηριστικά του πύργου του NREL. Στη συνέχεια, με γνώμονα τον περιορισμό των διαμέτρων βάσης και κορυφής και έπειτα από δοκιμές, διαμορφώθηκε το τελικό μοντέλο.

Αναφορικά με τη γεωμετρία του μοντέλου, πρόκειται για πύργο με ύψος 90.00 m, για την προσομοίωση του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές κυλινδρικές διατομές ύψους 30.00 μέτρων, με διαφορετικό πάχος η καθεμία και γραμμικά μειούμενη κατά ύψος διατομή όπως φαίνονται στην Εικόνα 5.12. Η επιλογή αυτή πέραν του ότι διευκολύνει την προσομοίωση, ανταποκρίνεται παράλληλα και στη πραγματικότητα, καθώς, όπως προαναφέρθηκε, οι κυλινδρικές διατομές κατασκευάζονται σε τμήματα τέτοιου ύψους τα οποία συναρμολογούνται στο πεδίο. Πιο συγκεκριμένα αναφορικά με τη γεωμετρία, η διατομή της βάσης έχει πάχος 55.00 mm, η ενδιάμεση διατομή 39.00 mm ενώ η διατομή της κορυφής 33.00 mm. Το κέντρο μάζας της κατασκευής βρίσκεται στα 39.617 m από το έδαφος στο κέντρο της κυκλικής διατομής ενώ στη βάση της επίσης στο κέντρο του κυλίνδρου έχει οριστεί να βρίσκεται και η αρχή των καθολικών αξόνων XYZ.

Επίσης, σε υψόμετρα 15.00, 45.00 και 75.00 μέτρων, δηλαδή στο μέσο κάθε τμήματος, έχουν τοποθετηθεί προσομοιώσεις δακτυλίων ακαμψίας με την μορφή κοίλων διατομών ύψους 15.00 εκατοστών και πάχους επίσης 15.00 εκατοστών. Οι δακτύλιοι ακαμψίας προσομοιώθηκαν και αυτοί ως επιφανειακά στοιχεία ενώ χρησιμοποιήθηκε η ίδια ποιότητα χάλυβα με αυτή του πύργου. Ουσιαστικά, επιλέχθηκε να τοποθετηθούν στα συγκεκριμένα σημεία κατά το ύψος του πυλώνα για να ενισχύσουν τη διατομή με το πρόσθετο πάχος τους και να μειώσουν τα μήκη λυγισμού.

Τέλος, στα υψόμετρα 30.00, 60.00 και 90.00 μέτρων, τοποθετήθηκαν κυκλικές επιφάνειες ύψους 25.00 εκατοστών (περίπου 12.50 cm στο πέρασ του ενός τμήματος και 12.50 cm στην αρχή του επόμενου) και πάχους 15.00 εκατοστών για να προσομοιώσουν τις επιφάνειες σύνδεσης (πατούρες) των τριών τμημάτων του πυλώνα μεταξύ τους αλλά και του τμήματος της κορυφής με την

Α/Γ. Σημειώνεται πως δεν πραγματοποιήθηκε έλεγχος της συνδεσμολογίας των τμημάτων αυτών και ούτε προσομοιώθηκε κάποια μορφή σύνδεσης, αλλά ο πύργος θεωρείται συνεχής στα σημεία αυτά. Η επιλογή των διαστάσεων τόσο των δακτυλίων ακαμψίας όσο και των πατουρών έγινε βασιζόμενη σε μοντέλα άλλων επιστημονικών ερευνών (Hu, Baniotopoulos, & Yang, 2014). Είναι προφανές πως και αυτές οι επιφάνειες συμβάλλουν στην μείωση των μηκών λυγισμού.



Εικόνα 5.12: Γεωμετρία σωληνωτού πύργου.

Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 13256 επιφανειακά στοιχεία σε όλο την επιφάνεια του πύργου. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις διατομές του πυλώνα είναι χάλυβας ποιότητας S355 J0 σύμφωνα με το πρότυπο EN 10025-2: 2019-10. Τέλος, η κατασκευή είναι πακτωμένη στη βάση της σε όλη τη διάμετρο της βάσης της.

### 5.2.2.2 Υπολογισμός & επιβολή φορτίων στην κατασκευή

#### I. Ίδιο βάρος πύργου

Το πρόγραμμα RFEM δίνει την δυνατότητα ανάλογα με την επιλεγθείσα διατομή και υλικό να υπολογίσει το συνολικό βάρος του μοντέλου εκμεταλλευόμενο την πυκνότητα του υλικού. Για τον συγκεκριμένο πύργο το συνολικό βάρος του ανέρχεται στους 405.776 tn και προσομοιώνεται από το πρόγραμμα ως κατανεμημένο φορτίο σε κάθε επιφανειακό στοιχείο του πυλώνα. Το φορτίου του ίδιου βάρους του πύργου συμπεριλήφθηκε στις μόνιμες δράσεις ( $G$ ).

#### II. Φορτίο ανέμου στον πύργο

Όπως προαναφέρθηκε, για τον υπολογισμό του φορτίου ανέμου για τον σωληνωτό πύργο χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις του Ευρωκώδικα 1, Μέρος 1-4: Γενικές Δράσεις – Δράσεις Ανέμου.

Όσον αφορά το εμβαδόν αναφοράς  $A_{ref}$ , επειδή ο EN 1991-1-4 ορίζει την περίπτωση κυλίνδρων με σταθερή διάμετρο και η εν λόγω κατασκευή διαθέτει διατομή με μεταβαλλόμενη διάμετρο, έγινε η παραδοχή πως η διάμετρος είναι ίση με τη μέση τιμή της, δηλαδή  $b = 4.135 \text{ m}$  με μήκος  $l = 90 \text{ m}$ . Συνεπώς, το εμβαδόν αναφοράς υπολογίστηκε ως:

$$A_{ref} = b \cdot l = 372.15 \text{ m}^2 \quad (5.8)$$

Όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο 5.2.1.2 (II) λόγω της παραδοχής που έγινε σχετικά με την περιοχή τοποθέτησης της κατασκευής θεωρήθηκε ότι το έδαφος εμπίπτει στην κατηγορία II σύμφωνα με τον πίνακα 4.1 του EN 1991-1-4 ενώ η τιμή της θεμελιώδους ταχύτητας του ανέμου  $v_{b,0}$  της περιοχής αντλήθηκε από το διαδικτυακό εργαλείο της DLUBAL ίση με:

$$v_{b,0} = 33.0 \text{ m/s} \quad (5.9)$$

Από τη θεμελιώδη ταχύτητα του ανέμου για συντελεστές διεύθυνσης ανέμου και συντελεστή εποχής  $c_{dir} = c_{season} = 1.0$  προκύπτει η βασική ταχύτητα ανέμου:

$$v_b = 1.0 \cdot 1.0 \cdot 33.0 = 33.0 \text{ m/s} \quad (5.10)$$

Στη συνέχεια, ακολουθώντας την πορεία των υπολογισμών που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.2, προέκυψαν οι εξής τιμές.

Για μήκος τραχύτητας εδάφους κατηγορίας II  $z_0 = 0.05$  ο συντελεστής εδάφους παίρνει την τιμή:

$$k_r = 0.19 \cdot \left(\frac{0.05}{0.05}\right)^{0.07} = 0.19 \quad (5.11)$$

Για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας του ανέμου στο ύψος αναφοράς της κατασκευής υπολογίζεται πρώτα ο συντελεστής τραχύτητας η τιμή του οποίου για ύψος αναφοράς  $z_e = l = 90.0 \text{ m} \geq z_{min} = 2.0 \text{ m}$  προκύπτει:

$$c_r(z_e) = 0.19 \cdot \ln \frac{90}{0.05} = 1.4242 \quad (5.12)$$

Θεωρώντας ότι το ανάγλυφο της περιοχής είναι ομαλό στον συντελεστή ανάγλυφου δίνεται η τιμή  $c_0(z_e) = 1.0$ . Έτσι, η τιμή της μέσης ταχύτητας του ανέμου στο ύψος αναφοράς  $z_e$  προκύπτει:

$$v_m(z_e) = 1.4242 \cdot 1.0 \cdot 33.0 = 47.0 \text{ m/s} \quad (5.13)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ένταση των αναταραχών του ανέμου στο ύψος αναφοράς  $z_e$  λαμβάνοντας την τιμή του συντελεστή αναταραχών  $k_I = 1.0$ :

$$I_V(z_e) = \frac{1.0}{1.0 \cdot \ln \frac{90}{0.05}} = 0.1334 \quad (5.14)$$

Η πίεση μέγιστης ταχύτητας στο ύψος αναφοράς  $z_e$  υπολογίζεται ως εξής:

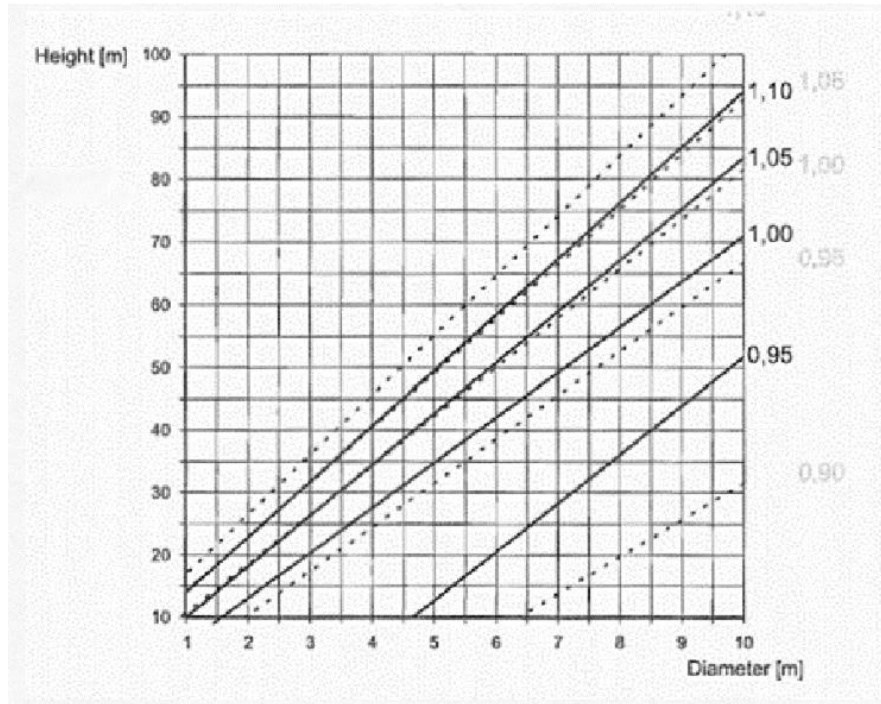
$$q_p(z_e) = (1 + 7 \cdot 0.1334) \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.25 \cdot 47^2 = 2.67 \text{ kN/m}^2 \quad (5.15)$$

Η ταχύτητα ανέμου που αντιστοιχεί στην πίεση μέγιστης ταχύτητας για το ύψος  $z_e = 90.0 \text{ m}$

$$v(z_e) = \sqrt{\frac{2 \cdot 2.67 \cdot 10^3}{1.25}} = 65.36 \text{ m/s} \quad (5.16)$$

Αναφορικά με τον δομικό συντελεστή  $c_s c_d$ , σύμφωνα με την παράγραφο 6.2 του EN 1991-1-4, ο σωληνωτός πύργος εμπίπτει στις κατασκευές για τις οποίες ο συντελεστής υπολογίζεται είτε μέσω της λεπτομερούς διαδικασίας που παρουσιάζεται στην παράγραφο 6.3.1 ή μέσω νομογραφημάτων του παραρτήματος D. Συγκεκριμένα, για μεταλλική κατασκευή τύπου καμινάδας χωρίς καπναγωγούς χρησιμοποιείται το νομογράφημα D.3 που παρατίθεται παρακάτω. Όπως φαίνεται, η περίπτωση πύργου ύψους  $H = 90 \text{ m}$  και διαμέτρου  $D = 4.135 \text{ m}$  δεν καλύπτεται στο νομογράφημα και η τιμή για αυτή την περίπτωση φαίνεται ότι ξεπερνάει το 1.10. Ως εκ τούτου, σύμφωνα με τη σημείωση του νομογραφήματος, για τιμές που ξεπερνούν το 1.10 πρέπει να ακολουθηθεί η διαδικασία της παραγράφου 6.3.1. Η συγκεκριμένη διαδικασία όμως απαιτεί την γνώση δεδομένων

που δεν εξετάζονται στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Για το λόγο αυτό, έγινε η παραδοχή πως ο δομικός συντελεστής  $c_s c_d$  λαμβάνει την τιμή 1.10.



Διάγραμμα 5.1: Δομικός συντελεστής  $c_s c_d$  για μεταλλικές καμινάδες χωρίς καπναγωγούς - Νομογράφημα D.3 EN 1991-1-4.

Επίσης, όπως αναφέρθηκε, το φορτίο του ανέμου στον πύργο δίνεται από τη σχέση (4.13, στην παράγραφο 4.2. Ο αριθμός Reynolds προέκυψε  $Re = 18.0165 \cdot 10^6$  οπότε για λόγο  $k/b = 0.000005$  και για τον συγκεκριμένο αριθμό Reynolds ήταν δυνατή η εύρεση του συντελεστή ισοδύναμου φορτίου χωρίς end flow η τιμή του οποίου εκτιμήθηκε ως  $c_{f,0} = 0.721$ .

Άρα ο συντελεστής ισοδύναμου φορτίου προέκυψε:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 0.721 \cdot 0.745 = 0.537 \quad (5.17)$$

Το φορτίο ανέμου στην κατασκευή  $F_w$  δίνεται από την σχέση:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} = 1.1 \cdot 0.537 \cdot 2.67 \cdot 372.15 = 587.15 \text{ kN} \quad (5.18)$$

Τελικά, η συνολική πίεση λόγω ανέμου  $w_{eff}$  στην κατασκευή υπολογίζεται ως:

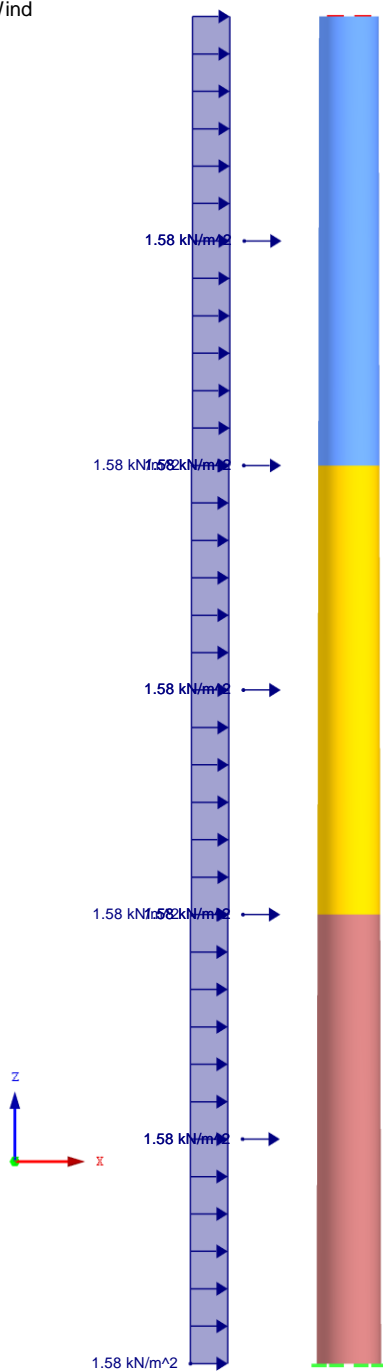
$$w_{eff} = \frac{F_w}{A_{ref}} = 1.58 \text{ kN/m}^2 \quad (5.19)$$

Το παραπάνω φορτίο προσομοιώνεται ως ομοιόμορφο κατανεμημένο σε όλο το ύψος του πύργου με φορά παράλληλη στον καθολικό άξονα X όπως φαίνεται παρακάτω στο σχήμα ενώ συμπεριλαμβάνεται στις μεταβλητές δράσεις ( $Q_w$ ).



LC2 : Wind

In Y-direction

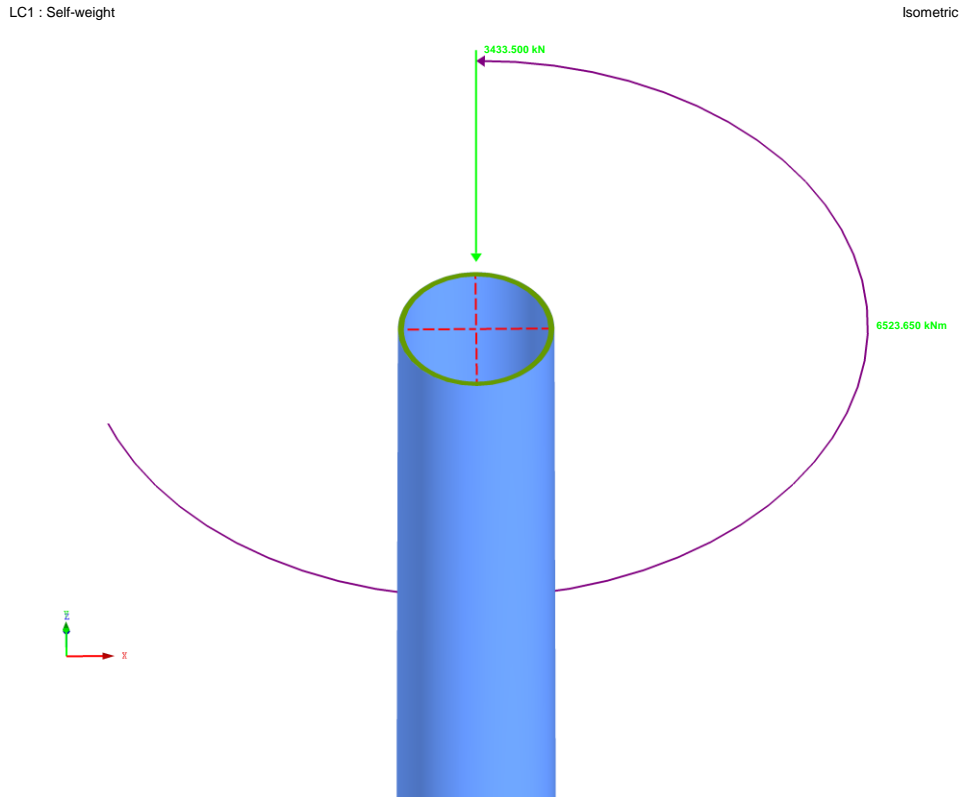


Εικόνα 5.13: Κατανομή πιέσεων ανέμου κατά το ύψος του πύργου.

### III. Βάρος Α/Γ

Η μάζα του ρότορα και της ατράκτου τοποθετούνται στην κορυφή του πύργου ως ένα συγκεντρωμένο φορτίο και ροπή στον κατακόρυφο άξονα περιστροφής, δηλαδή τον κόμβο που

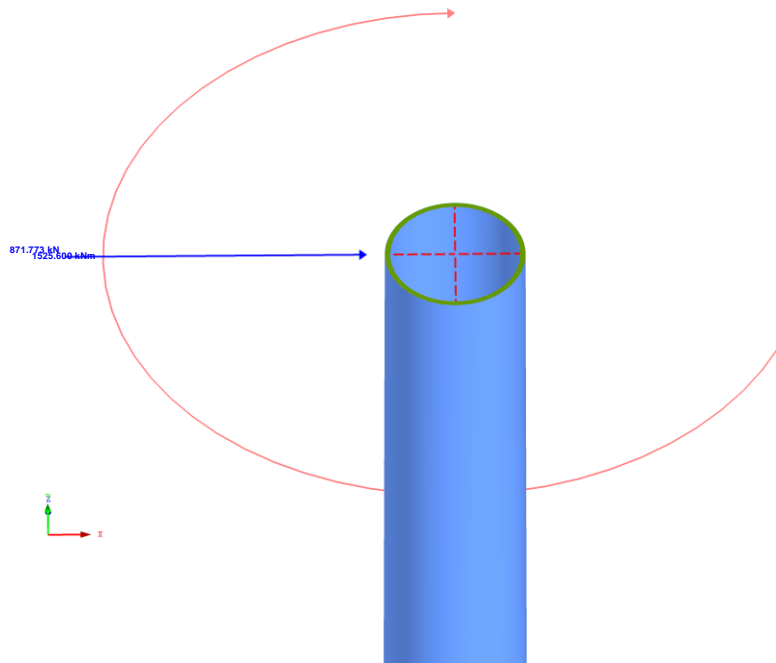
βρίσκεται στα 90.00 m ύψος και στο κέντρο της κυκλικής διατομής. Λόγω του ότι η διατομή είναι κοίλη και δεν θα ήταν δυνατό να εφαρμοσθεί στον συγκεκριμένο κόμβο το φορτίο και η ροπή, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα άκαμπτα στοιχεία (rigid type members) σε σχήμα με κοινό κόμβο αρχής το σημείο εφαρμογής του φορτίου βάρους και πέρατα σημεία της περιμέτρου της κυκλικής διατομής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Το κατακόρυφο φορτίο καθώς και η ροπή συγκαταλέγονται και αυτά στις μόνιμες δράσεις (G).



Εικόνα 5.14: Φορτία λόγω βάρους της Α/Γ στην κορυφή του πύργου που επιβάλλονται στο κέντρο μέσω των άκαμπτων στοιχείων.

#### IV. Ώθηση ρότορα

Το συγκεκριμένο φορτίο προσομοιώθηκε ως συγκεντρωμένο στον ίδιο κόμβο που εφαρμόστηκε το ίδιο βάρος ρότορα και ατράκτου με διεύθυνση παράλληλη στον άξονα X όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα και αποτελεί και αυτό, ως φορτίο ανέμου, μεταβλητή δράση ( $Q_w$ ).



Εικόνα 5.15: Ωθηση ρότορα στην κορυφή του πύργου.

### 5.2.2.3 Συνδυασμοί Φόρτισης

Όπως και στην περίπτωση του δικτυωτού πύργου πραγματοποιήθηκε έλεγχος Οριακής Κατάστασης Αστοχίας για την οριακή κατάσταση STR για τον συνδυασμό φόρτισης που προτείνεται από τον Ευρωκώδικα για μόνιμες και προσωρινές καταστάσεις σχεδιασμού όπως ορίζει η εξίσωση (4.1), η οποία και στην περίπτωση του σωληνωτού πύργου παίρνει την μορφή,

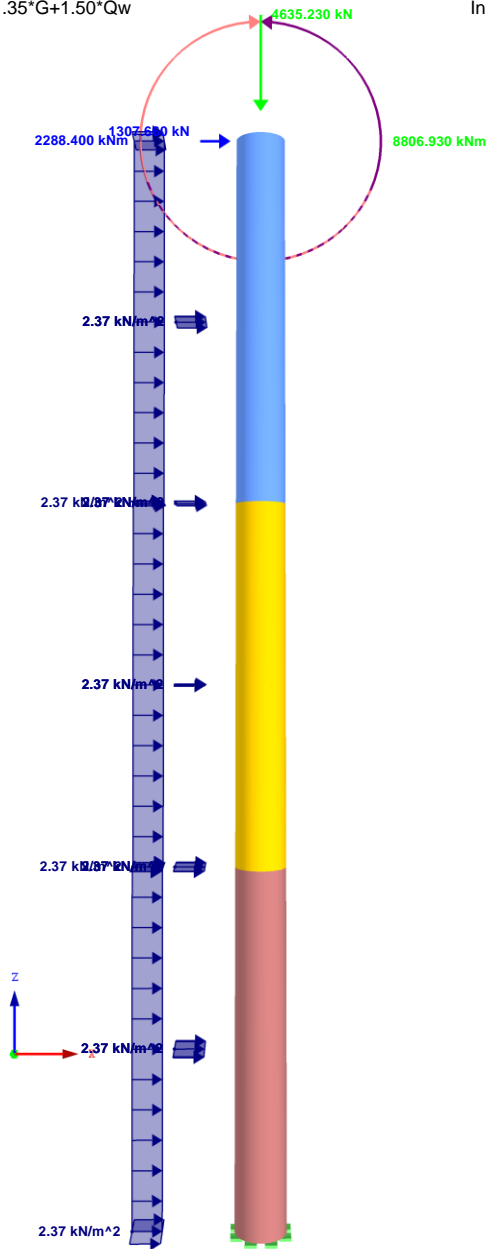
$$1.35 \cdot G + 1.50 \cdot Q_w \quad (5.20)$$

με τις μόνιμες και μεταβλητές δράσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Λόγω του κυκλικού σχήματος του σωληνωτού πύργου, το φορτίο του ανέμου προκαλεί την ίδια καταπόνηση στον πύργο ανεξάρτητα από την διεύθυνση του. Για το λόγο αυτό οι ωθήσεις λόγω του ανέμου τοποθετήθηκαν στην ίδια διεύθυνση και απαιτείται η διερεύνηση του συνδυασμού φόρτισης μονάχα σε αυτή τη διεύθυνση. Ο συνδυασμός φόρτισης για τον έλεγχο σε Ο.Κ.Α. με την ταυτόχρονη δράση μόνιμων και μεταβλητών φορτίων με τους αντίστοιχους συντελεστές τους φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

CO1 : 1.35\*G+1.50\*Qw

In Y-direction



Εικόνα 5.16: Ταυτόχρονη δράση φορτίων για συνδυασμό  $1.35 \cdot G + 1.50 \cdot Q_w$ .

#### 5.2.2.4 Σχεδιασμός κατά Ευρωκώδικα 3 – RF-STEEL Surfaces

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο του θεωρητικού υποβάθρου, για τον έλεγχο LS1 κυλινδρικών διατομών εξετάζεται η διαρροή του χάλυβα. Το λογισμικό RFEM διαθέτει το προσαρτημένο λογισμικό RF-STEEL Surfaces, το οποίο δίνει την δυνατότητα στον χρήστη έπειτα από την επιλογή της διατομής, να υπολογίσει το πάχος κάθε τμήματος ανάλογα με ένα εύρος ποσοστού εξάντλησης που θα ορίσει, διευκολύνοντας έτσι σημαντικά την επιλογή της βέλτιστης λύσης. Για να ξεκινήσει

τη συγκεκριμένη διαδικασία το λογισμικό απαιτείται η επιλογή κριτηρίου διαρροής του χάλυβα. Για τις ανάγκες του ελέγχου LS1 επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν οι ισοδύναμες τάσεις von Mises, αφού σύμφωνα με το συγκεκριμένο κριτήριο ότι αρκεί η σύγκριση τους με το όριο διαρροής του χάλυβα για να εξεταστεί η πιθανότητα αστοχίας. Επιλέχθηκε λοιπόν μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό εξάντλησης 0.85 και αφού επιβλήθηκε ο προαναφερθείς συνδυασμός φόρτισης, τα πάχη των διατομών προέκυψαν μαζί με τα ποσοστά εξάντλησης τους όπως παρουσιάζονται σε παρακάτω πίνακα, ξεπερνώντας το επιθυμητό ποσοστό μόνον στο τμήμα των 0-30 μέτρων όπου και αναμένονταν η μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων.

<b>Επιφάνεια</b>	<b>Πάχος d (mm)</b>	<b>Ποσοστό εξάντλησης τάσεων (-)</b>
Τμήμα 0.00 – 30.00 m	55.00	0.88
Τμήμα 30.00 – 60.00 m	39.00	0.68
Τμήμα 60.00 – 90.00 m	33.00	0.55
Πατούρα 30.00 m	250.00	0.08
Πατούρα 60.00 m	250.00	0.04
Πατούρα 90.00 m	125.00	0.56
Δακτύλιος 15.00 m	150.00	0.12
Δακτύλιος 45.00 m	150.00	0.07
Δακτύλιος 75.00 m	150.00	0.05

Πίνακας 5.2: Πάχη και ποσοστά εξάντλησης επιφανειών σωληνωτού πύργου.

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση των μοντέλων του δικτυωτού και του σωληνωτού πυλώνα τα οποία σχεδιάζονται ώστε στην κορυφή τους να φέρουν Α/Γ. Πρώτα παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα για κάθε μοντέλο ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται έχουν να κάνουν με τις μετακινήσεις που εμφανίζουν οι κατασκευές, τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στα επιμέρους στοιχεία τους καθώς και οι δυνάμεις και οι ροπές που μεταβιβάζουν στο υπόβαθρο όπου εδράζονται. Σε αυτό το σημείο τονίζεται ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα της ανάλυσης κάθε μοντέλου ισχύουν για πύργους αντίστοιχης μορφής και για το συγκεκριμένο ύψος των 90 μέτρων.

### 6.1 Δικτυωτός Πύργος

Η ανάλυση του δικτυωτού πύργου έχει την ιδιαιτερότητα ότι διεξήχθη για τέσσερα διαφορετικά σενάρια τα οποία λαμβάνουν υπόψη διαφορετικές διευθύνσεις πρόσπτωσης του ανέμου στην κατασκευή. Στο κάθε σενάριο δεν αλλάζει μόνο το φορτίο του ανέμου που ασκείται στην κατασκευή αλλά η διεύθυνση του ανέμου αναγκάζει και την Α/Γ να περιστραφεί γύρω από τον κατακόρυφο άξονα της κατασκευής. Έτσι, η δύναμη της ώθησης του ρότορα, η αντίστοιχη ροπή που προκαλεί καθώς και η ροπή που προκαλεί η δύναμη του βάρους της Α/Γ έχουν διαφορετικό προσανατολισμό σε κάθε περίπτωση.

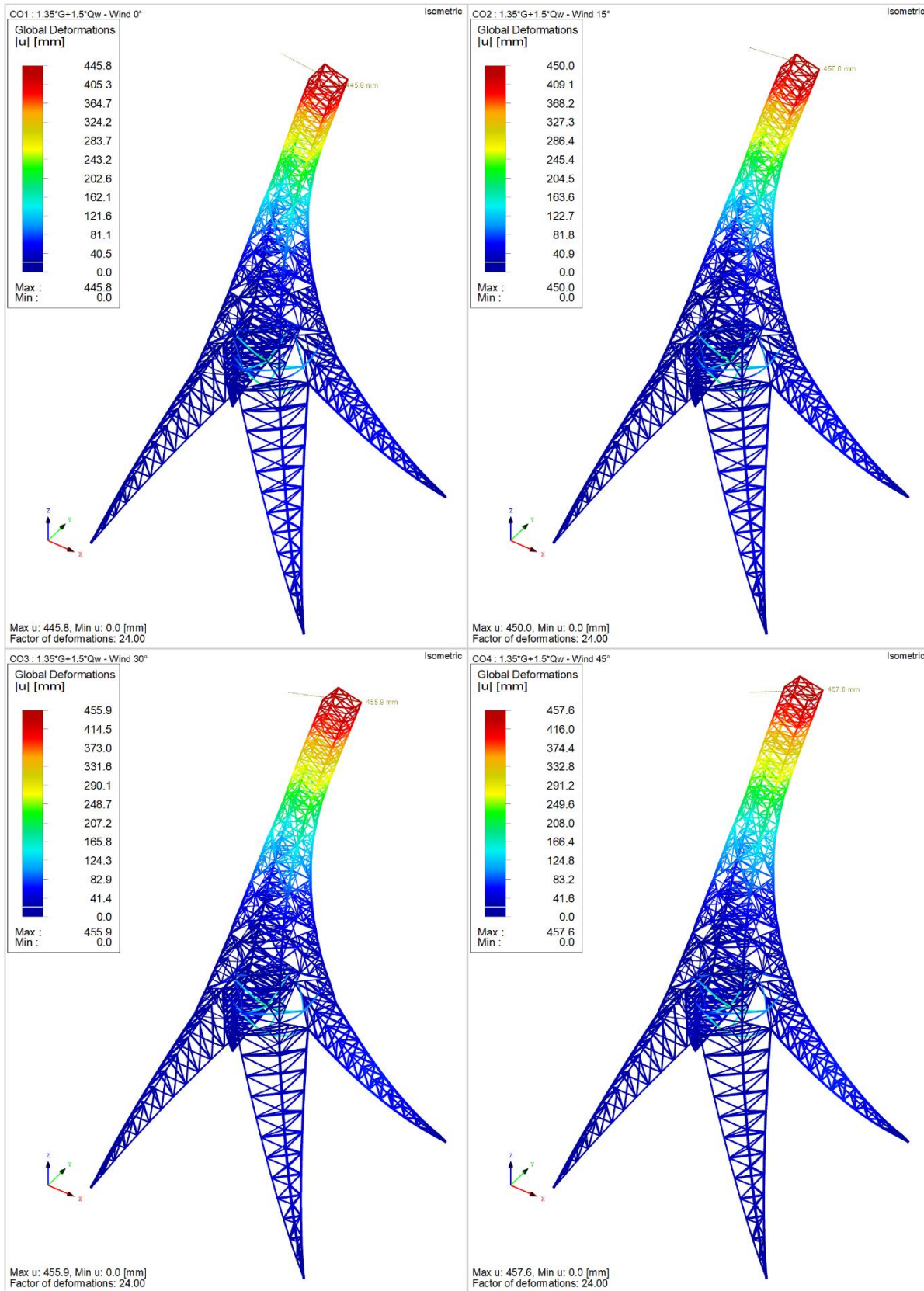
#### 6.1.1 Μετακινήσεις

Σύμφωνα με την ελαστική γραμμή του πύργου, η επίδραση των φορτίων της ώθησης ανέμου και του βάρους της Α/Γ φαίνεται να γέρνει τον πύργο κατά τη διεύθυνση του ανέμου προς την υπήνεμη πλευρά. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι το φορτίο του ανέμου υπερισχύει σημαντικά σε σχέση με το φορτίο του βάρους της ατράκτου και του ρότορα που τείνουν να στρέψουν την κατασκευή προς την αντίθετη κατεύθυνση. Βέβαια, σε αυτό το σημείο να επισημανθεί ότι τα φορτία σχετικά με τον άνεμο πολλαπλασιάστηκαν με μεγαλύτερο συντελεστή ασφαλείας ( $\gamma_Q = 1.50$ ) ως κινητά φορτία σε σχέση με τα φορτία βαρύτητας τα οποία είναι μόνιμα ( $\gamma_G = 1.35$ ). Τα διαγράμματα των ελαστικών γραμμών του πύργου για τα τέσσερα σενάρια παρατίθενται παρακάτω στην Εικόνα 2.1.

Παρατηρείται ότι η μέγιστη συνισταμένη μετακίνηση συμβαίνει για κάποιο σημείο στην κορυφή του πύργου. Για τον συνδυασμό φόρτισης με διεύθυνση ανέμου  $0^\circ$  η μετακίνηση της κορυφής είναι παράλληλη στη διεύθυνση του ανέμου και είναι η μικρότερη από τις υπόλοιπες περιπτώσεις με τιμή  $u = 445.80 \text{ mm}$ . Η δυσμενέστερη περίπτωση μετακινήσεων συμβαίνει για  $45^\circ$  διεύθυνση ανέμου όπου η μέγιστη μετακίνηση είναι και πάλι παράλληλη στη διεύθυνση του και έχει τιμή  $u = 457.60 \text{ mm}$ . Διαπιστώνεται λοιπόν, ότι η απόκλιση των μέγιστων συνισταμένων

μετακινήσεων μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων είναι μικρή και περιορίζεται στα 11.60 mm ενώ σε όλα τα σενάρια η μετακίνηση είναι κοντά στα 450.00 mm. Όπως είναι φυσικό, στα μικρότερα ύψη του πύργου οι τιμές των μετακινήσεων γίνονται όλο και πιο μικρές. Ειδικότερα, από το ύψος των 55.00 μέτρων και χαμηλότερα οι τιμές των μετακινήσεων, τουλάχιστον επί του οριζοντίου επιπέδου, δεν ξεπερνούν τα 90 mm.

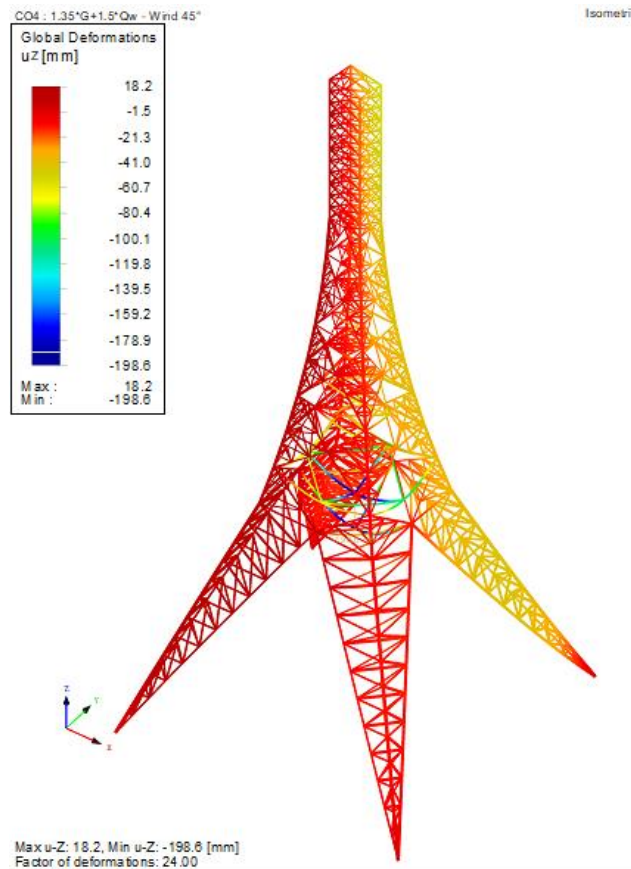
Όσον αφορά τις κατακόρυφες μετακινήσεις, αυτές επηρεάζονται κυρίως από το ίδιο βάρος του πύργου και της Α/Γ η οποία είναι ένα αρκετά υπολογίσιμο φορτίο. Το διάγραμμα των κατακόρυφων μετακινήσεων για γωνία διεύθυνσης ανέμου  $45^\circ$  παρατίθεται παρακάτω (Εικόνα 6.2) όπου φαίνεται ότι τα μέλη των προσήνεμων πλευρών παρουσιάζουν μία ελάχιστη ανύψωση μερικών χιλιοστών με μέγιστη τιμή 18.20 mm. Αυτό το γεγονός λογικά οφείλεται στις δυνάμεις ανατροπής και στις ροπές που δημιουργούνται από τον άνεμο και το ρότορα. Αντιθέτως, τα μέλη των υπήνεμων πλευρών εμφανίζουν έντονες βυθίσεις που κυμαίνονται από 10.00 έως 60.00 mm.



Εικόνα 6.1: Οι συνισταμένες μετακινήσεις του δικτυωτού πύργου για κάθε συνδυασμό φόρτισης (mm).

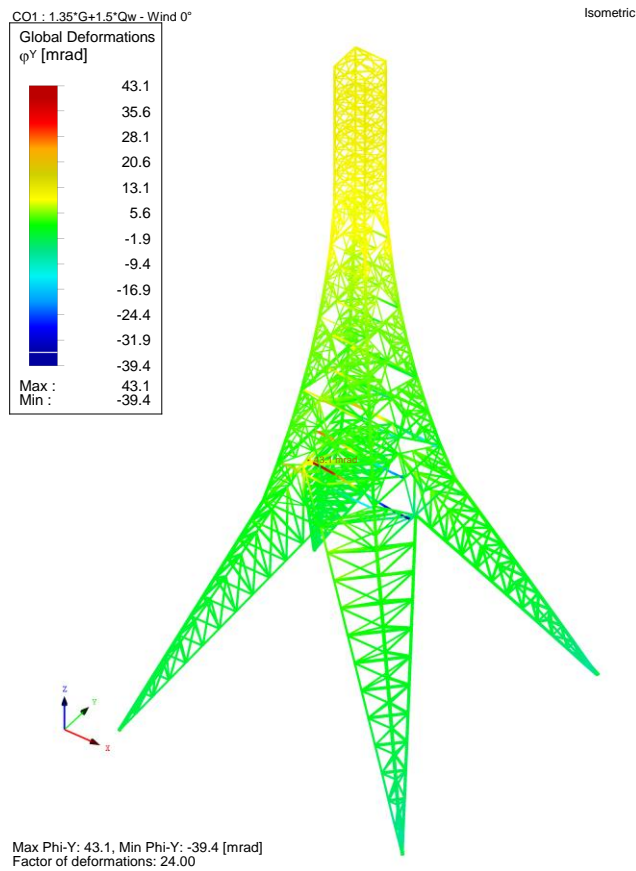


Ενδιαφέρον παρουσιάζει, η μέγιστη βύθιση σε ολόκληρη την κατασκευή που προκαλείται στο μέσο του κατώτερου οριζοντίου συνδέσμου ενίσχυσης η οποία αγγίζει την  $u_z = -198.60 \text{ mm}$  παρότι τα στοιχεία αυτά δεν φέρουν κανένα οριζόντιο φορτίο και ο ρόλος τους είναι να περισφίξουν την κατασκευή. Τα εν λόγω στοιχεία εμφανίζουν τέτοια βύθιση εξ αιτίας του ίδιου βάρους τους και του μεγάλου ελεύθερου μήκους τους. Αυτή η βύθιση μπορεί να μοιάζει μεγάλη σε σύγκριση με άλλα σημεία της κατασκευής όμως αντιστοιχεί στο 2.65% του ελεύθερου μήκους του στοιχείου το οποίο είναι 7.50 m. Αυτή η παρατήρηση για τη βύθιση, εξηγεί μερικώς το λόγο που επιλέγεται να μην τοποθετούνται επιπλέον οριζόντιοι σύνδεσμοι σε κατώτερα ύψη όπου το άνοιγμα μεταξύ των «ποδιών» της κατασκευής είναι ακόμα μεγαλύτερο. Αν υπήρχαν σύνδεσμοι με μεγαλύτερο άνοιγμα, η βύθιση τους θα ήταν υπερβολικά μεγάλη και τα στοιχεία δε θα εξυπηρετούσαν το σκοπό για τον οποίο τοποθετούνται.

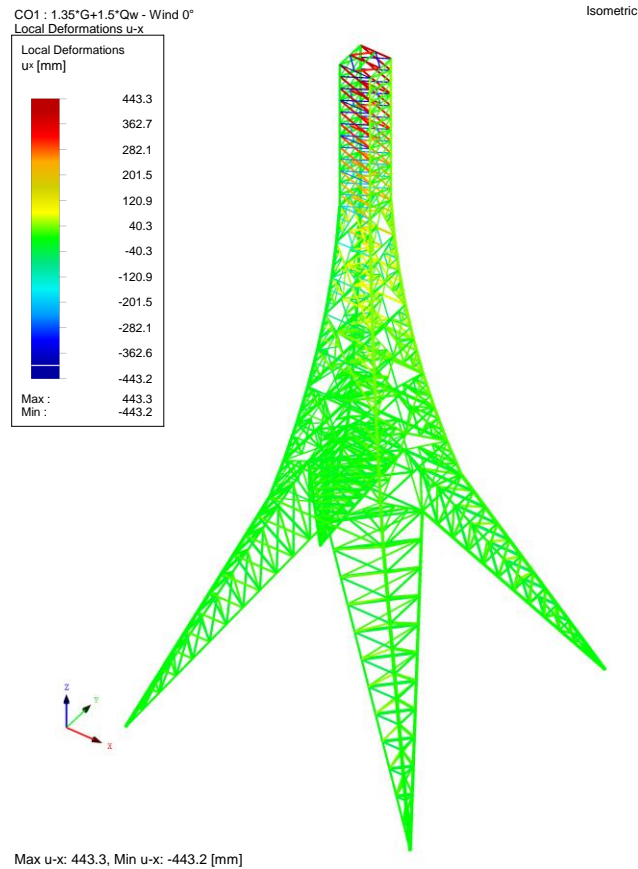


Εικόνα 6.2: Κατακόρυφες μετακινήσεις δικτυωτού πύργου για διεύθυνση ανέμου  $45^\circ$  (mm).

Οι στροφικές μετακινήσεις του πύργου δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς οι τιμές τους είναι αρκετά μικρές. Ειδικότερα, οι στροφές του πύργου περί τους καθολικούς άξονες X και Z είναι σχεδόν μηδενικές όπως αναμενόταν λόγω της απουσίας ροπών. Εντονότερες στροφές εμφανίζονται περί του άξονα Y κυρίως στα ψηλότερα μέλη της κατασκευής με τιμές της τάξεως των 12.00 mm και φυσικά είναι δυσμενέστερες για την περίπτωση που ο άνεμος είναι παράλληλος στον άξονα X, δηλαδή με  $0^\circ$  γωνία (Εικόνα 6.3).



Εικόνα 6.3: Στροφικές μετακινήσεις περί τον καθολικό άξονα Y για  $0^\circ$  διεύθυνση ανέμου (mrad).



Εικόνα 6.4: Μετακινήσεις κατά τον τοπικό άξονα x των στοιχείων (mm).

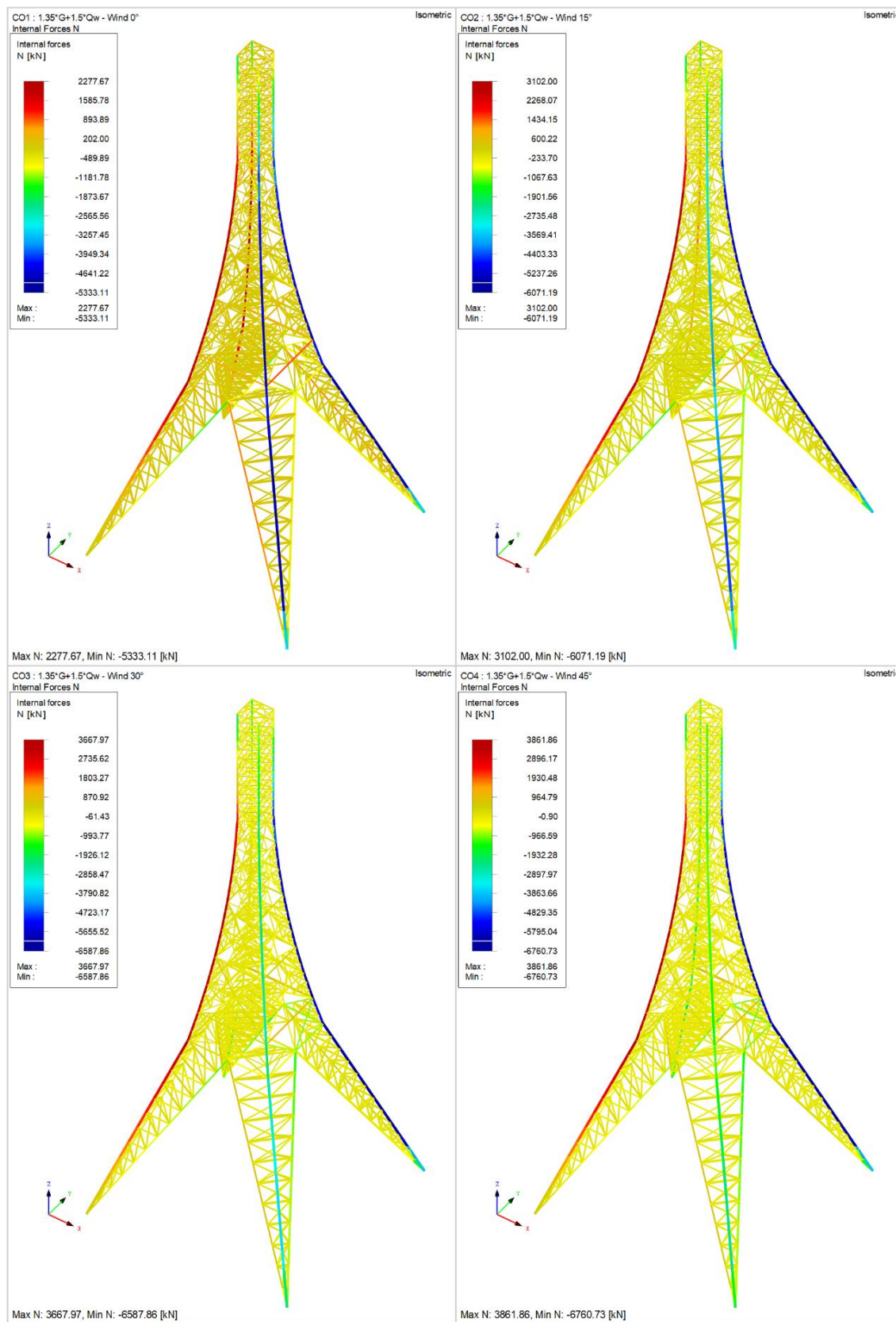
### 6.1.2 Εντατικά μεγέθη

Σε ό,τι αφορά τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στο δικτυωτό πύργο ενδιαφέρον έχει να εξεταστούν μόνο οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα μέλη του καθώς πρόκειται για δικτυωτή κατασκευή. Οι τιμές των υπόλοιπων εντατικών μεγεθών που αναπτύσσονται, δηλαδή διατμητικές δυνάμεις και ροπές, είναι πολύ μικρότερες σε σύγκριση με τις αξονικές οπότε και πρακτικά αμελητέες. Τα διαγράμματα των αξονικών δυνάμεων του πύργου για τις τέσσερις περιπτώσεις διεύθυνσης ανέμου παρατίθενται παρακάτω (Εικόνα 6.5).

Παρατηρώντας τα διαγράμματα λοιπόν, είναι ολοφάνερο ότι το μεγαλύτερο μέρος των φορτίων παραλαμβάνεται από τα «πόδια» του πύργου για τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κοίλες κυκλικές διατομές που έχουν μεγαλύτερη αντοχή ιδίως σε θλίψη. Σε κάθε σενάριο διεύθυνσης ανέμου, τα «πόδια» της προσήνεμης πλευράς υπόκεινται σε εφελκυσμό ενώ στην υπήνεμη θλίβονται. Αυτό το φαινόμενο γίνεται ακόμα πιο έντονο στο σενάριο της διεύθυνσης ανέμου 45° όπου εμφανίζονται η μέγιστη θετική τιμή (εφελκυσμός)  $N_{max} = 3861.86 \text{ kN}$  και η μέγιστη αρνητική τιμή (θλίψη)  $N_{min} = -6760.73 \text{ kN}$  στο μπροστά αριστερό και στο πίσω δεξί «πόδι» αντίστοιχα, αν θεωρηθεί ότι η μπροστινή όψη του πύργου είναι η προβολή του πύργου στο καθολικό επίπεδο XZ. Τα

εκατέρωθεν «πόδια» στην εν λόγω περίπτωση καταπονούνται από σημαντικά μικρότερες δυνάμεις όμως και αυτά βρίσκονται σε θλίψη.

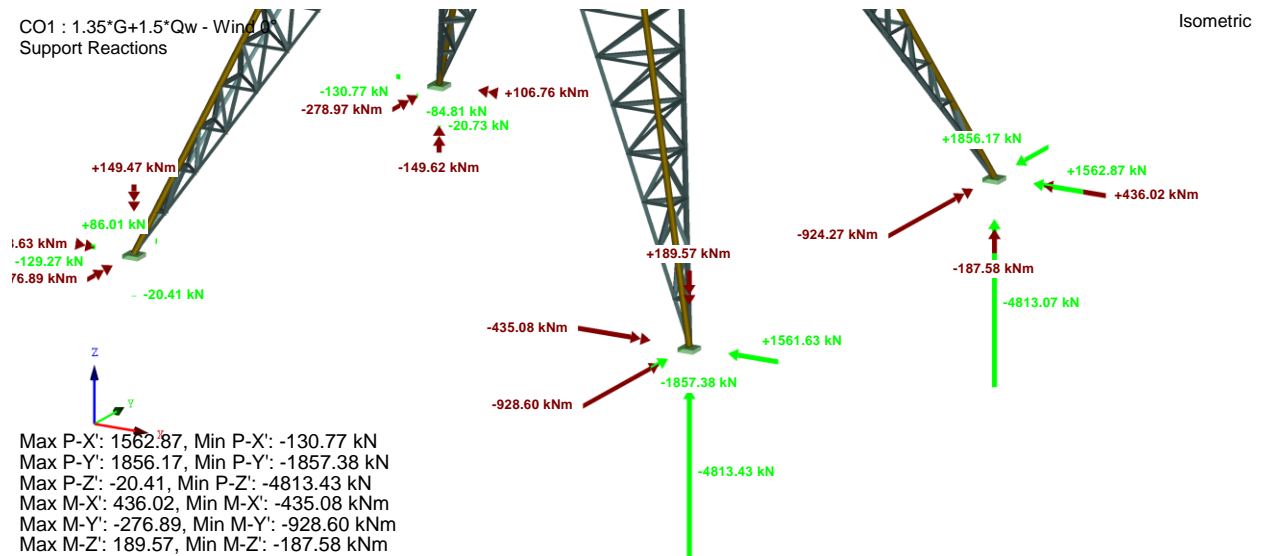
Τα «πόδια» λοιπόν, λειτουργούν ως ο κύριος σκελετός της κατασκευής ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία εξυπηρετούν ως ενίσχυση και καταπονούνται αρκετά λιγότερο. Ειδικά οι πλάγιοι σύνδεσμοι ενίσχυσης αναπτύσσουν αρκετά μικρές αξονικές δυνάμεις. Λίγο μεγαλύτερες δυνάμεις αναπτύσσουν ορισμένοι εξωτερικοί οριζόντιοι σύνδεσμοι.



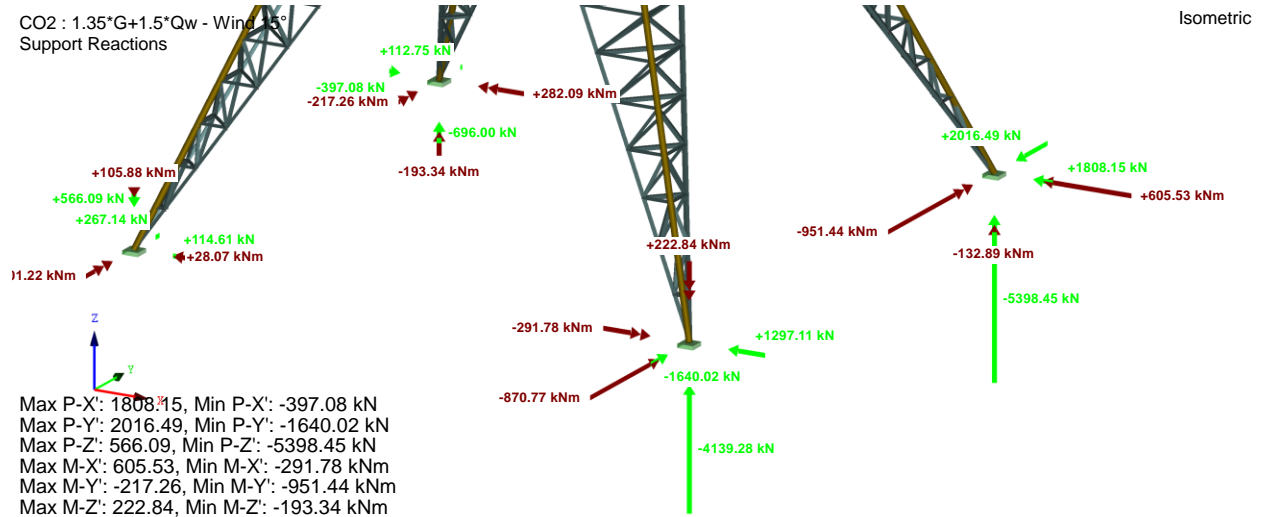
Εικόνα 6.5: Διαγράμματα αξονικών δυνάμεων για τους συνδυασμούς φόρτισης (kN)

### 6.1.3 Αντιδράσεις υποβάθρου

Παρακάτω παρατίθενται με τη σειρά για κάθε σενάριο διεύθυνσης ανέμου, οι αντιδράσεις του υποβάθρου που αναπτύσσονται στην κατασκευή (Εικόνα 6.6 - Εικόνα 6.9). Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό της θεμελίωσης του πύργου.



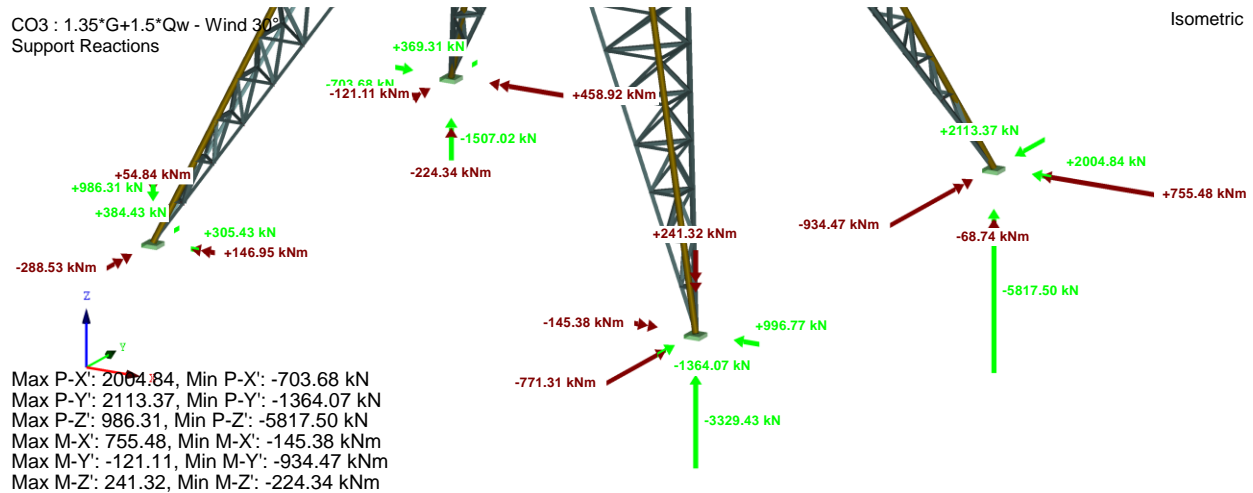
Εικόνα 6.6: Αντιδράσεις υποβάθρου στον πύργο για διεύθυνση ανέμου 0° (kN, kNm).



Εικόνα 6.7: Αντιδράσεις υποβάθρου στον πύργο για διεύθυνση ανέμου 15° (kN, kNm).

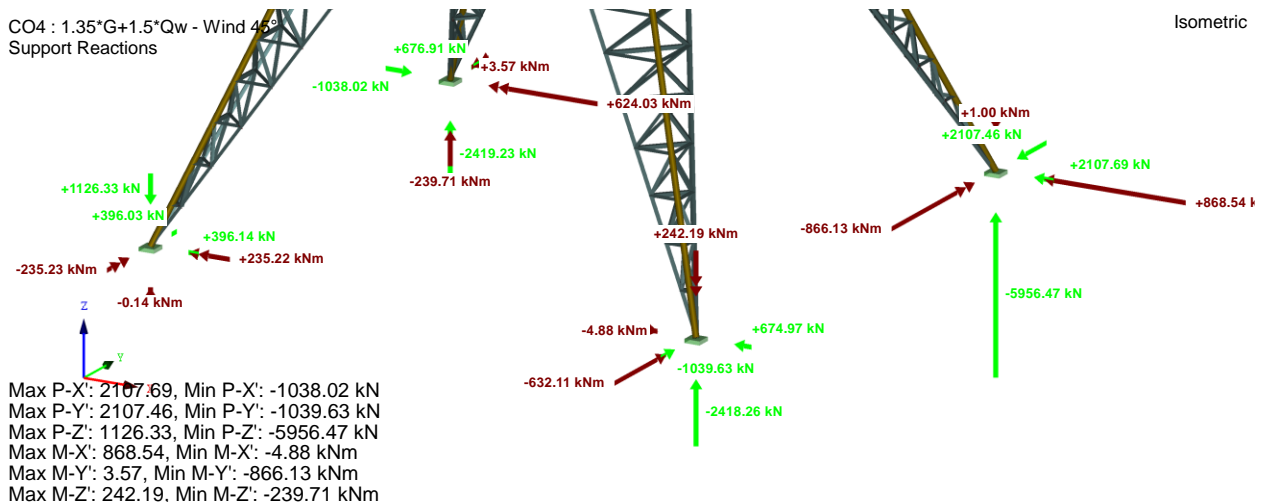
Οι αντιδράσεις που κυριαρχούν είναι οι κατακόρυφες δυνάμεις όπως είναι αναμενόμενο και συγκεκριμένα οι μεγαλύτερες τιμές τους εμφανίζονται στα υπήνεμα «πόδια» του πύργου τα οποία αντιστέκονται στην ανατροπή του από τον άνεμο. Η μέγιστη τιμή που εμφανίζεται είναι  $P_{z,max} = -5956.47 \text{ kN}$  στο πίσω δεξιά «πόδι» όταν ο άνεμος προσπίπτει με γωνία 45° στον πύργο. Οι τιμές των κατακόρυφων αντιδράσεων στις προσήνεμες πλευρές είτε είναι συγκριτικά απειροελάχιστες

είτε έχουν θετικό πρόσημο, πράγμα που προδίδει την τάση ανατροπής του πύργου στην οποία προβάλλει αντίσταση η πάκτωση του στο υπόβαθρο.



Εικόνα 6.8: Αντιδράσεις υποβάθρου στον πύργο για διεύθυνση ανέμου 30° (kN, kNm).

Όσον αφορά τις ροπές, οι τιμές των αντιδράσεων στις πακτώσεις είναι αρκετά μικρότερες από άποψη τιμών και η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή ροπή που εμφανίζεται είναι περί του άξονα Y όταν ο άνεμος έρχεται υπό γωνία 15° με τιμή  $M_{Y,min} = -951.44 \text{ kNm}$ . Ο πύργος γενικά φαίνεται να μην επηρεάζεται από στρέψη αφού και οι ροπές στις πακτώσεις περί τον καθολικό άξονα Z είναι αρκετά μικρές.



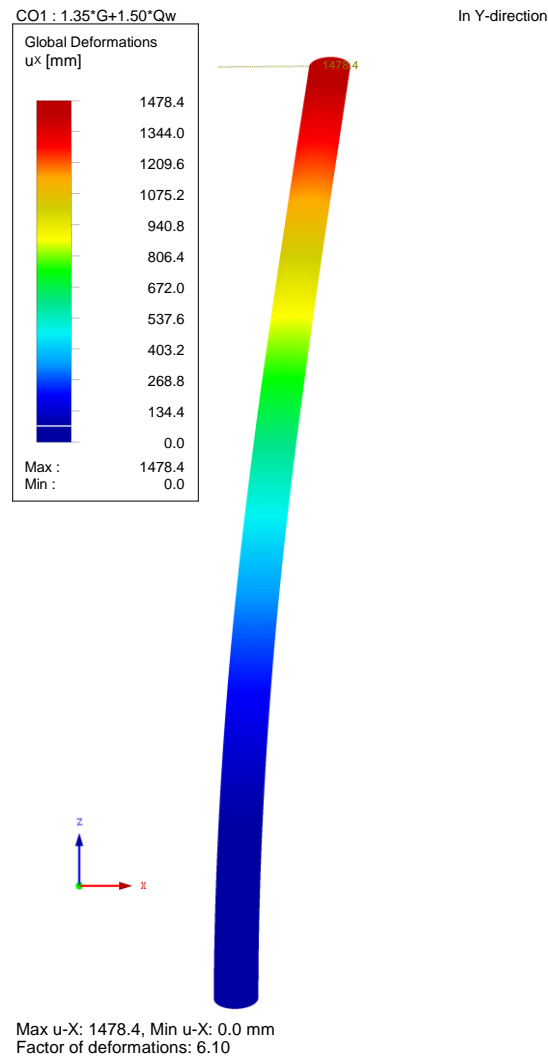
Εικόνα 6.9: Αντιδράσεις υποβάθρου στον πύργο για διεύθυνση ανέμου 45° (kN, kNm).



## 6.2 Σωληνωτός Πύργος

### 6.2.1 Μετακινήσεις

Όπως ήταν αναμενόμενο η μέγιστη μετατόπιση του πύργου προέκυψε στην κορυφή του κατά τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου ανέμου στον πύργο αλλά και της ώθησης του ρότορα δηλαδή κατά τον καθολικό άξονα X και είχε τιμή  $u_x = 1478.40 \text{ mm}$ . Σχετικά με τις υπόλοιπες μετατοπίσεις, κατά τον καθολικό άξονα Y η μετατόπιση ήταν αμελητέα αφού προέκυψε στα 1.20 mm ενώ κατά τον καθολικό άξονα Z η κατακόρυφη βύθιση βρέθηκε επίσης σχετικά αρκετά μικρότερη με τιμή  $u_z = 44.80 \text{ mm}$ . Τέλος, αναφορικά με τις στροφές του πυλώνα, οι τιμές που προέκυψαν είναι μηδαμινές (μεγέθη της τάξεως mrad) με την μέγιστη εξ αυτών να ανέρχεται στα 33.20 mrad περί του καθολικού άξονα Y. Παρακάτω παρουσιάζεται η ελαστική γραμμή του πύργου με τη συνισταμένη μετακίνηση κάθε σημείου.



Εικόνα 6.10: Ελαστική γραμμή πυλώνα (mm).

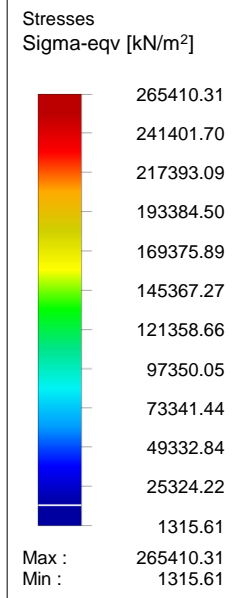


### 6.2.2 Τάσεις

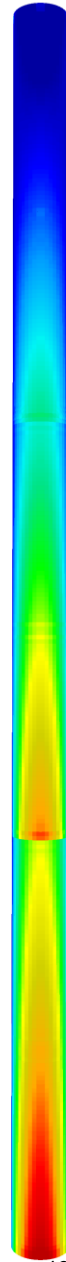
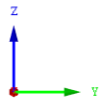
Οι μέγιστες τάσεις von Mises που αναπτύσσονται στον πύργο έχουν τιμή 265.00 MPa και όπως προέκυψε από το λογισμικό RF-STEEL Surfaces, το μοντέλο πληροί τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-6 για τον έλεγχο LS1 (Plastic), αφού το όριο διαρροής του επιλεγμένου χάλυβα δεν υπερβαίνεται σε κανένα σημείο του πύργου.

Πιο συγκεκριμένα, όπως ήταν αναμενόμενο, η μέγιστη τιμή των αναπτυσσόμενων ισοδύναμων τάσεων von Mises 265.00 MPa εμφανίζεται στο τμήμα 0.00 – 30.00 m κοντά στη βάση του πύργου και αντιδιαμετρικά της επιφάνειας επιβολής των φορτίων του ανέμου. Στο μεσαίο τμήμα και κύριο σώμα της κατασκευής, η μέγιστη ισοδύναμη τάση von Mises έχει χαμηλότερη τιμή 221.00 MPa ενώ αξίζει να σημειωθεί πως στο τμήμα των 60.00 – 90.00 m και συγκεκριμένα στην κορυφή στο σημείο επιβολής του φορτίου της ώθησης του ρότορα, εμφανίζεται σχετικά υψηλή τιμή ισοδύναμων τάσεων von Mises ίση με 185.00 MPa. Η τιμή αυτή προκύπτει από την τοποθέτηση των άκαμπτων στοιχείων για την τοποθέτηση της Α/Γ. Η εμφάνιση τόσο υψηλών τάσεων συγκεντρωμένη σημειακά στην κορυφή του πυλώνα δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, αλλά οφείλεται εξ ολοκλήρου στον τρόπο προσομοίωσης που επιλέχθηκε. Τέλος, υπογραμμίζεται πως σχεδόν στα 2/3 του πύργου εμφανίζεται ομοιόμορφη κατανομή των πιέσεων.

RF-STEEL Surfaces CA1  
CO1

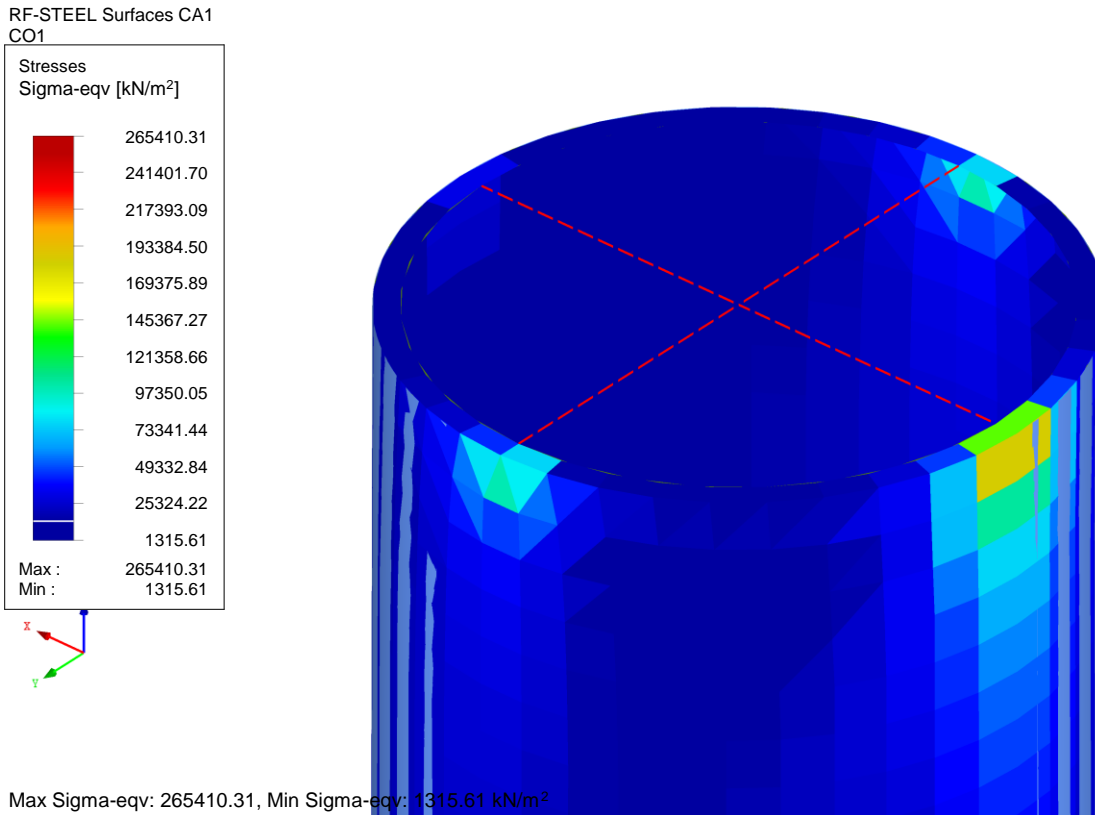


Against X-direction



Max Sigma-eqn: 265410.31, Min Sigma-eqn: 1315.61 kN/m<sup>2</sup>

Εικόνα 6.11: Κατανομή τάσεων στον πύργο (kPa).



Εικόνα 6.12: Εμφάνιση συγκεντρωμένων τάσεων στην κορυφή του πύργου λόγω των άκαμπτων στοιχείων (kPa).

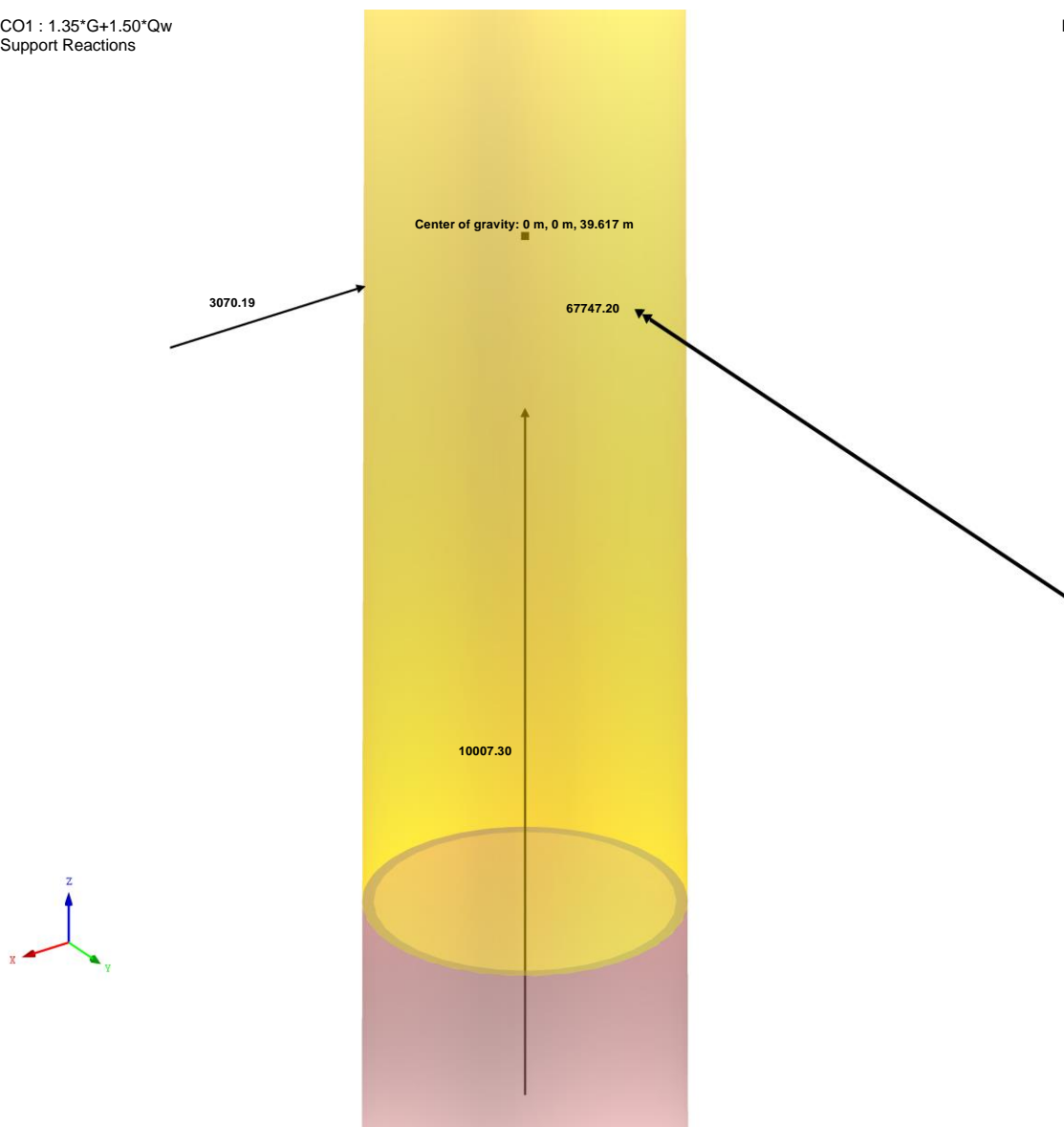
Αναφορικά με τους δακτυλίους ακαμψίας, αυτός που εμφανίζει τις μεγαλύτερες τάσεις είναι εκείνος που έχει τοποθετηθεί πλησιέστερα στη βάση του πύργου, σε ύψος 15.00 μέτρων και εμφανίζει μέγιστες von Mises τάσεις με τιμή 35.00 MPa.

### 6.2.3 Αντιδράσεις υποβάθρου

Λόγω του ότι η στήριξη της κατασκευής στο υπόβαθρο είναι γραμμική πάκτωση (support line), οι αντιδράσεις που αναπτύσσονται αναπαρίστανται με κατανεμημένα φορτία κατά μήκος της πάκτωσης. Για λόγους ευκολίας στην κατανόηση όμως, οι αντιδράσεις προτιμάται να δίνονται σε μορφή διανυσμάτων δυνάμεων και ροπών. Για να παρουσιαστούν υπό την επιθυμητή αυτή μορφή, απλώς μεταφέρθηκαν οι συνιστώσες δυνάμεις και ροπές του κέντρο βάρους της κατασκευής στην βάση της. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές των αντιδράσεων όπως προέκυψαν:

- Κατακόρυφη αξονική δύναμη:  $N = -10007.30 \text{ kN}$
- Τέμνουσα κατά τον άξονα X:  $Q_x = 3070.19 \text{ kN}$
- Ροπή περί τον άξονα Y:  $M_y = 189845.62 \text{ kNm}$

CO1 : 1.35\*G+1.50\*Qw  
Support Reactions



Εικόνα 6.13: Συνιστώσες των αντιδράσεων στο κέντρο βάρους (kN, kNm).

## 7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το τελευταίο κεφάλαιο, αφού έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης του δικτυωτού και του σωληνωτού πύργου, γίνεται η σύγκριση των δύο, εντοπίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε κατασκευής και δίνονται προτάσεις ως προς τις εφαρμογές τους στην αγορά. Όπως και πριν, τονίζεται ότι η σύγκριση των δύο μοντέλων καθώς και τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν κρίνονται έγκυρα για πύργους ύψους 90 μέτρων.

Έχοντας στόχο την αντικειμενικότερη σύγκριση των δύο ειδών πύργων για υποστήριξη Α/Γ, καταβλήθηκε προσπάθεια έτσι ώστε τα μοντέλα που διαμορφώθηκαν να διέθεταν κατά το δυνατό περισσότερα παρόμοια ή κοινά χαρακτηριστικά. Έχοντας αυτό υπόψη, πρώτο και κυριότερο κοινό χαρακτηριστικό που επιλέχθηκε ήταν το μοντέλο της Α/Γ που θα φέρουν και οι δύο πύργοι στην κορυφή τους. Έτσι, και οι δύο καταπονούνται από την ίδια δύναμη βάρους λόγω της Α/Γ στην κορυφή και ίδιων φορτίων λόγω της κίνησης του ρότορα της από τον άνεμο. Άλλα κοινά χαρακτηριστικά είναι το ύψος και των δύο που ορίζεται στα 90.00 m και οι διαστάσεις της κορυφής με τη μικρή διαφορά ότι ο ένας πύργος έχει πλάτος τετραγωνικής κάτοψης 4.00 m ενώ ο δεύτερος διάμετρο κύκλου  $3.97 \text{ m} \approx 4.00 \text{ m}$ .

Πέρα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των πύργων έγινε προσπάθεια ώστε οι αρχές που διέπουν την προσομοίωση και ανάλυση και των δύο να συμπίπτουν κατά το δυνατότερο. Για αμφοτέρους τους πύργους έγιναν ίδιες παραδοχές κατά το σχεδιασμό και τον υπολογισμό των φορτίων, οι βάσεις τους θεωρήθηκαν πακτωμένες στο υπόβαθρο, οι έλεγχοι των στοιχείων τους σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες διενεργήθηκαν για την ίδια οριακή κατάσταση και η ανάλυση τους ήταν γραμμικού τύπου.

Πρέπει να επισημανθεί πως, παρότι πραγματοποιήθηκε διαδικασία βελτιστοποίησης ως προς ορισμένες παραμέτρους, τα μοντέλα απέχουν αρκετά από τις πραγματικές βέλτιστες λύσεις. Επομένως, τα αποτελέσματα της σύγκρισης τους δεν ανταποκρίνονται πλήρως στην πραγματικότητα όμως από αυτά μπορούν να αντληθούν χρήσιμα γενικά συμπεράσματα.

### 7.1 Σύγκριση

Ίσως η πιο σημαντική παράμετρος σύγκρισης είναι το βάρος του πυλώνα καθώς σχετίζεται άμεσα με την ελαχιστοποίηση του κόστους της κατασκευής, αφού όπως αναφέρθηκε η δαπάνη για την κατασκευή του πύργου αποτελεί περίπου το  $\frac{1}{4}$  της συνολικής. Το μοντέλο του δικτυωτού πυλώνα προέκυψε 7% ελαφρύτερο με διαφορά περίπου 26 τόνων. Αν και αυτή η διαφορά δεν είναι εντυπωσιακά μεγάλη, έρχεται να επιβεβαιώσει τα ευρήματα άλλων επιστημονικών ερευνών που καταδεικνύουν την ικανότητα ενός δικτυωτού πύργου με κατάλληλη διάταξη να φέρει το ίδιο φορτίο φτάνοντας σε ίδιο ύψος με έναν σωληνωτό με σημαντική εξοικονόμηση υλικού.

Μεγάλη βαρύτητα πρέπει να δοθεί στη σύγκριση των αντιδράσεων στις βάσεις των δύο μοντέλων. Ο σωληνωτός πύργος εμφάνισε συντριπτικά μεγαλύτερες τιμές ροπών. Η μέγιστη ροπή που

εμφανίζεται σε κάποιο πόδα του δικτυωτού πύργου είναι μόλις 951.44 kNm έναντι 189845.62 kNm που εμφανίζεται στη βάση του σωληνωτού, σχεδόν 200 φορές μεγαλύτερη. Ο λόγος που ο δικτυωτός παρουσίασε τόσο μικρότερες τιμές ροπών στους πόδες του οφείλεται κυρίως στο τεράστιο πλάτος της βάσης του μήκους 37.50 μέτρων κάνοντας έτσι τον πύργο να καλύπτει έκταση 1406.25 m<sup>2</sup>. Από την άλλη ο σωληνωτός πυλώνας στηρίζεται στη βάση του σε κυλινδρική διατομή με διάμετρο 4.30 m το οποίο καλύπτει εμβαδό μόνο 58.10 m<sup>2</sup>.

Έχοντας τα παραπάνω ως δεδομένα, γίνεται σαφές ότι για το σωληνωτό πυλώνα κρίνεται απαραίτητη η κατασκευή πολύ ισχυρής θεμελίωσης που να εδράζεται σε στερεό υπόβαθρο και να είναι ικανή να φέρει τα κατακόρυφα φορτία και παράλληλα να αντιστέκεται στις ακραίες δυνάμεις ανατροπής που αναπτύσσονται. Μια τέτοια θεμελίωση έχει απαιτήσεις όπως μεγάλη έκταση για να κατασκευαστεί και εκτεταμένων χωματουργικών εργασιών που προκαλούν όχληση και ζημιά στο κοντινό περιβάλλον. Αφετέρου, απαιτείται μεγάλος όγκος σκυροδέματος και χάλυβα οπλισμού τα οποία προσθέτουν στο κόστος του έργου.

Από την άλλη πλευρά, η μεγάλη έκταση που χρειάζεται να καταλάβει η βάση του δικτυωτού πύργου και να αφαιρέσει αξιοποιήσιμο χώρο, αντισταθμίζεται από τις μικρές απαιτήσεις που έχει για τη θεμελίωση του η οποία μπορεί να επιτευχθεί και με τέσσερις επιφανειακές θεμελιώσεις στους πόδες του όπως ένα κανονικό πέδιλο. Έτσι, εκτός από εξοικονόμηση υλικού του χάλυβα για τον πύργο γίνεται το ίδιο και όσον αφορά το σκυρόδεμα και τον οπλισμό της θεμελίωσης.

Αναφορικά με τις μετακινήσεις, παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες τιμές στη μετακίνηση της κορυφής του σωληνωτού πυλώνα. Συγκεκριμένα, η μετακίνηση του ξεπερνάει κατά παραπάνω από 1.00 m αυτή του δικτυωτού. Η μικρή μετακίνηση της κορυφής του δικτυωτού είναι σχεδόν απαραίτητη για την εύρυθμη λειτουργία της Α/Γ λόγω ενός σημαντικού μειονεκτήματος του είδους του. Η αύξηση του πλάτους του πύργου σε χαμηλότερα ύψη μειώνει το διάκενο μεταξύ του πύργου και των πτερυγίων της Α/Γ με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο κίνδυνος πρόσκρουσης τους με καταστροφικές συνέπειες για την κατασκευή. Ο κατάλληλος έλεγχος που απαιτείται για την παραπάνω περίπτωση είναι ο έλεγχος Ο.Κ.Λ., του οποίου οι οριακές τιμές όμως ορίζονται από τον κατασκευαστή της Α/Γ και κατά συνέπεια στην προκειμένη περίπτωση δεν δύναται να διερευνηθεί.

	<b>Δικτυωτός Πύργος</b>	<b>Σωληνωτός Πυλώνας</b>	<b>Διαφορά</b>
<b>Μέγιστο ποσοστό εξάντλησης</b>	0.88	0.88	0.0
<b>Βάρος</b>	379.991 tn	405.776 tn	25.785 tn
<b>Μέγιστη μετακίνηση κορυφής</b>	457.60 mm	1478.40 mm	1020.80 mm
<b>Μέγιστη ροπή βάσης</b>	951.44 kNm	189845.62 kNm	188894.18 kNm
<b>Εμβαδό βάσης</b>	58.10 m <sup>2</sup>	1406.25 m <sup>2</sup>	1348.15 m <sup>2</sup>

Πίνακας 7.1: Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων.

Πέρα από τη σύγκριση τεχνικών χαρακτηριστικών, τα δύο μοντέλα μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους και σε άλλους τομείς ασύνδετους με την ανάλυση που διεξήχθη όπως η μεταφορά των υλικών, ο χρόνος κατασκευής ή η συντήρηση τους, με βάση πληροφορίες που αντλήθηκαν από την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Ένας σωληνωτός πυλώνας κατασκευάζεται πρώτα ανά τμήματα σε εξειδικευμένο εργοστάσιο από το οποίο πρέπει να μεταφερθεί στο πεδίο εγκατάστασης του. Τα εργοστάσια που κατασκευάζουν τέτοιους πυλώνες είναι πολύ πιο σπάνια από τα εργοστάσια που

παράγουν τυπικές μεταλλικές διατομές από τις οποίες μπορεί να αποτελείται ένας δικτυωτός πύργος. Αυτό σημαίνει ότι ένας πυλώνας μπορεί να κάνει πολύ μακρύ ταξίδι, περνώντας ακόμα και από σύνορα χωρών ή από υδάτινα σώματα για να φτάσει στον προορισμό του. Η αποστολή του επίσης προϋποθέτει προσεκτικό σχεδιασμό για την κυκλοφορία του ώστε να μην βρεθεί μπροστά του κάποιο απροσπέλαστο εμπόδιο λόγω του μεγέθους του. Για το λόγο αυτό άλλωστε κινητοποιούνται ειδικά φορτηγά οχήματα και πλοία για τη μεταφορά τους.

Σε αντίθεση με το σωληνωτό, οι διατομές από τις οποίες αποτελούνται τα μέλη του δικτυωτού πύργου είναι προϊόν τυποποίησης και η προμήθεια τους είναι σημαντικά ευκολότερη και μπορεί να γίνει από το κοντινότερο εργοστάσιο χάλυβα. Επιπλέον, η μεταφορά τους μπορεί να πραγματοποιηθεί με συμβατικά φορτηγά πράγμα που την καθιστά οικονομικότερη. Όμως, το μειονέκτημα του δικτυωτού μοντέλου εμφανίζεται στο πεδίο εγκατάστασης όπου απαιτείται πολύ περισσότερος χρόνος για τη συναρμολόγηση και ανέγερση του λόγω της πολυπλοκότητας του και του μεγάλου πλήθους συνδέσεων. Απεναντίας, μόλις το κάθε τμήμα του σωληνωτού πύργου βρεθεί στο εργοτάξιο, η ανέγερση του μπορεί να είναι και υπόθεση λίγων ωρών.

Τέλος, για κάθε είδος πύργου, ανάλογη με τους χρόνους της συναρμολόγησης στο εργοτάξιο, είναι και η διαδικασία συντήρησης. Έτσι, το σωληνωτό μοντέλο φέρει τη συνδεσμολογία του συνήθως στο εσωτερικό του, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει τόσο συχνή απαίτηση για συντήρηση αλλά και για να τελούνται οι επιθεωρήσεις με μεγαλύτερη ασφάλεια και ταχύτητα. Στο δικτυωτό μοντέλο δυσχεραίνονται κατά πολύ οι διαδικασίες συντήρησης, αφενός διότι η εκτεθειμένη συνδεσμολογία του είναι ευάλωτη από το περιβάλλον, αφετέρου γιατί λόγω γεωμετρίας η επί τόπου επίσκεψη είναι επικίνδυνη.

## 7.2 Συμπεράσματα

Σε ό,τι αφορά τις εφαρμογές του κάθε μοντέλου, συμπεραίνεται πως η λύση του σωληνωτού πυλώνα ίσως αποδειχτεί αποδοτικότερη για έργα μαζικής εγκατάστασης όπως αιολικά πάρκα. Αυτό διότι σε έργα τέτοιας κλίμακας ο χρόνος και η ευκολία στην ανέγερση, η γρήγορη και ασφαλής συντήρηση καθώς και η έκταση που καταλαμβάνει κάθε πυλώνας αντισταθμίζουν το κόστος του επιπλέον υλικού, της μεταφοράς με εξειδικευμένα οχήματα και των βαρέων μηχανημάτων που απαιτούνται για την ολοκλήρωση του έργου καθώς οι κοινές μεγάλες δαπάνες διαιρούνται δια το πλήθος των μονάδων προς εγκατάσταση.

Αντιθέτως, για μεμονωμένες εγκαταστάσεις Α/Γ όπου η εξοικονόμηση πόρων από κάθε πτυχή του έργου είναι καθοριστική για την απόδοση της επένδυσης τότε μάλλον προκρίνεται το μοντέλο του δικτυωτού πύργου. Πρώτα από όλα δύναται να γίνει μείωση της δαπάνης λόγω του λιγότερου απαιτούμενου υλικού και ως συνέπεια της δαπάνης για τη μεταφορά του και τη μίσθωση μηχανημάτων για την ανέγερση του. Επιπλέον, ο χρόνος κατασκευής και η έκταση που θα καταλάβει το έργο δεν έχουν τόσο μεγάλη αξία όσο θα είχαν σε ένα μεγαλύτερης κλίμακας.

Εν κατακλείδι, δεν μπορεί να εξαχθεί απόλυτο συμπέρασμα για το ποιο είδος πυλώνα υπερέχει του άλλου καθώς αμφότερα παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Η επιλογή

του καταλληλότερου μοντέλου πύργου για Α/Γ οφείλει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραμέτρους και τις ιδιαιτερότητες του έργου και η τελική απόφαση επαφίεται στην κρίση και την εμπειρία των μελετητών μηχανικών.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Agbayani, N., & Vega, R. (2013, Jul). Wind Farm Tower Design. *Structure Magazine*.
- Ancona, D., & McVeigh, J. (2001). *Wind Turbine-Materials and Manufacturing Fact Sheet*. Princeton Energy Resources International.
- ArchiEXPO. (2021, March 10). *Vertical-axis small wind turbine*. Retrieved from ArchiEXPO: <https://www.archiexpo.com/prod/windside/product-88530-959470.html>
- Baniotopoulos, C., Lavassas, I., Nikolaidis, G., & Zervas, P. (2011). Topics on the Design of Tubular Steel Wind Turbine Towers. Στο C. Baniotopoulos, C. Borri, & T. Stathopoulos, *Environmental Wind Engineering and Design of Wind Energy Structures* (σσ. 254-293). Udine: SpringerWienNewYork.
- Blewett, D. (2020, March 24). *Wind Turbine Cost: How Much? Are They Worth It In 2020?* Ανάκτηση από <https://weatherguardwind.com>: <https://weatherguardwind.com/how-much-does-wind-turbine-cost-worth-it/>
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). Component Design. In *Wind Energy Handbook, Second Edition* (pp. 383-437). John Wiley & Sons, Ltd.
- Det Norske Veritas; Risø National Laboratory. (2002). *Guidelines for Design of Wind Turbines 2nd Edition*. Copenhagen: Det Norske Veritas & Risø National Laboratory.
- Dlupal. (2021, July 9). *Snow Load, Wind Speed, and Seismic Load Maps*. Ανάκτηση από Dlupal: <https://www.dlupal.com/en-US/solutions/online-services/snow-load-wind-speed-and-seismic-load-maps>
- E. Efthymiou, D. K. (2009). *On the response of steel lattice telecommunication masts under environmental actions and seismic loading*.
- Engström, S., Lyrner, T., Hassanzadeh, M., Stalin, T., & Johansson, J. (2010). *Tall Towers for Large Wind Turbines*. Elforsk.
- European Commission. (2021, September). Ανάκτηση από [europa.eu](https://ec.europa.eu): [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030\\_en#tab-0-0](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en#tab-0-0)
- Falani, S. C., Gonzalez, M. O., & Torkomian, A. (2020). Trends in the Technological Development of Wind Energy Generation. *International Journal of Technology Management and Sustainable Development*, 43-68.
- General Electric. (χ.χ.). *Haliade-X offshore wind turbine*. Ανάκτηση March 15, 2021, από GE Renewable Energy: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>
- Gipe, P. (χ.χ.). *Éole Darrieus VAWT*. Ανάκτηση March 16, 2021, από Wind-Works: <http://www.wind-works.org/cms/index.php?id=506>

- Hansen, M. O. (1998). *Basic Rotor Aerodynamics applied to Wind Turbines*. Technical University of Denmark.
- Hernandez-Estrada, E., Lastres-Danguillecourt, O., Robles-Ocampo, J. B., Lopez-Lopez, A., Sevilla-Camacho, P. Y., Perez-Sarinana, B. Y., & Dorrego-Portela, J. R. (2020, 10 20). Considerations for the Structural Analysis and Design of Wind Turbine Towers. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* .
- Hu, Y., Baniotopoulos, C., & Yang, J. (2014, October 10). Effect of internal stiffening rings and wall thickness on the structural response of steel wind turbine towers. *Engineering Structures*, σσ. 148-161.
- International Renewable Energy Agency. (2020). Ανάκτηση από Irena.org: <https://www.irena.org/wind>
- Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., & Scott, G. (2009). *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development*. National Renewable Energy Laboratory.
- Junling, C., Jinwei, L., & Xinheng, H. (2020, July). Design optimization of steel–concrete hybrid wind turbine tower based on improved genetic algorithm. *Struct Design Tall and Spec Build*.
- Lavassas, I., Nikolaidis, G., Zervas, P., Efthimiou, E., Doudoumis, I., & Baniotopoulos, C. (2003, February 20). Analysis and Design of the Prototype of a Steel 1-MW Wind Turbine Tower. *Engineering Structures*, σσ. 1097-1106.
- Lee, J., & Zhao, F. (2021). *Global Wind Report 2021*. Brussels: GWEC.
- Lotfy, I. (2012). *Prestressed Concrete Wind Turbine Supporting System*. University of Nebraska - Lincoln.
- Mathern, A., von der Haar, C., & Marx, S. (2021, April 4). Concrete Support Structures for Offshore Wind Turbines: Current Status, Challenges, and Future Trends. *Energies*, σσ. 1-31.
- Mathis, W. (2020, May 6). *Peek Into a Wooden Mast Reveals Wind Power's Towering Future*. Retrieved from Bloomberg: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-05-06/climate-change-could-be-fought-with-wood-wind-turbines>
- Modvion. (2020). Retrieved from Modvion: <https://www.modvion.com>
- Modvion. (2021, February 18). *Modvion Press*. Ανάκτηση από Modvion: <https://www.modvion.com/wp-content/uploads/2021/02/Vestas-Ventures-invests-in-wood-technology-company-Modvion-2021-02-18.pdf>
- National Renewable Energy Laboratory. (2005). *Evaluation of Design and Construction Approaches for Economical Hybrid Steel-Concrete Wind Turbine Towers*. Washington: National Renewable Energy Laboratory.
- Pires, P. M. (2013). *Design of Concrete-Steel Transitions in a Hybrid Wind Turbine Tower*. University of Coimbra.

- Quick, D. (2012, November 14). *New Atlas Environment*. Ανάκτηση από New Atlas : <https://newatlas.com/timbertower-wooden-wind-turbine/25007/>
- Righter, R. W. (1996). *Wind Energy In America*.
- Ritchie, H., & Roser, M. (2020). *Renewable Energy*. Ανάκτηση από Our World In Data: <https://ourworldindata.org/renewable-energy#wind-energy>
- Sahin, S. (2016). *Wind Turbine Tower Structure Analysis According to Wind Load in Terms of Cost*. West Pomeranian University of Technology, Pusan National Univeristy.
- Sathyajith, M. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer.
- SPBer. (2007, April 9). *Windkraftanlage Laasow*. Ανάκτηση March 30, 2021, από Wikimedia Commons: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Windkraftanlage\\_Laasow.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Windkraftanlage_Laasow.jpg)
- Stavridou, N., Koltsakis, E., & Baniotopoulos, C. C. (2020). Lattice and Tubular Steel Wind Turbine Towers. Comparative Structural Investigation. *Energies*.
- Tourisme Gaspésie. (χ.χ.). *Éole Cap-Chat*. Ανάκτηση March 15, 2021, από Tourisme Gaspésie: <https://www.tourisme-gaspesie.com/en/visiter/eole-cap-chat/6818498.html>
- van Bussel, G., & Zaaijer, M. (2001). *Reliability, Availability and Maintenance Aspects of Large-Scale Offshore Wind Farms, A Concept Study*.
- Van Wyngaardt, M. (2014, May 16). *Solid foundations for wind turbines*. Retrieved March 18, 2021, from Creamer Media's Engineering News: [https://www.engineeringnews.co.za/article/solid-foundations-for-wind-turbines-2014-05-16/rep\\_id:4136](https://www.engineeringnews.co.za/article/solid-foundations-for-wind-turbines-2014-05-16/rep_id:4136)
- Veljkovic, M., Heistermann, C., Pavlovic, M., Feldmann, M., Pak, D., Richter, C., . . . Nüsse, G. (2015). *High-Strength Steel Tower for Wind Turbines*. Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel.
- Von Der Haar, C., & Marx, S. (2015). Design Aspects of Concrete Towers for Wind Turbines. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 30-37.
- Way, A., & Van Zul, G. (2015). A study on the design and material costs of tall wind turbine towers in South Africa. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 45-54.
- Wind Europe. (2021). *Wind energy in Europe 2020 Statistics and the outlook for 2021-2025*.
- World Steel Association. (2012). *Steel Solutions in the Green Economy-Wind Turbines*. World Steel Association.
- Yang, L. (2021). *Back to the future for wind turbines?* Retrieved from UPMTIMBER: <https://www.upmtimber.com/whats-new/2020/back-to-the-future-for-wind-turbines>
- Zotomayor, C. (2020, June 19). *Enlil Is A Smart Wind Turbine Design That Converts Energy From Oncoming Traffic*. Ανάκτηση March 16, 2021, από SolidSmack: <https://www.solidsmack.com/design/enlil-smart-wind-turbine-design-converts-energy-oncoming-traffic/>

ΕΛΕΤΑΕΝ. (2020). *ΕΛΕΤΑΕΝ*. Retrieved April 25, 2021, from Η Στατιστική της Αιολικής Ενέργειας το 2020: <https://eletaen.gr/wp-content/uploads/2021/01/2021-01-26-2020-HWEA-Statistics-Greece.pdf>