



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών»

**Δομοστατικός σχεδιασμός υπεράκτιας
ανεμογεννήτριας εδραζόμενης σε μεταλλικό
δικτυωτό φορέα τύπου jacket**



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Ν. Γεωργάκης

Επιβλέπων: Παύλος Θανόπουλος, Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

ΕΜΚ ΜΕ 2021/13

Γεωργάκης Ν. Ν. (2021).
Δομοστατικός σχεδιασμός υπεράκτια ανεμογεννήτριας εδραζόμενης σε μεταλλικό
δικτυωτό φορέα τύπου jacket
Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2021/13
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Georgakis N. N. (2021).
Structural design of an offshore wind turbine based on jacket foundation
Diploma Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2021/13
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΜΕ 2021/13

**Δομοστατικός σχεδιασμός υπεράκτια ανεμογεννήτριας εδραζόμενης
σε μεταλλικό δικτυωτό φορέα τύπου jacket**

Γεωργιάκης Ν. Ν.

Επιβλέπων: Θανόπουλος Π., Λέκτορας ΕΜΠ

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τον δομοστατικό σχεδιασμό της εγκατάστασης μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας η οποία εδράζεται σε μεταλλικό δικτυωτό φορέα τύπου jacket με δεδομένα που αφορούν περιοχή της Ελλάδας.

Στο πρώτο κεφάλαιο καταγράφεται η σημασία της αιολικής ενέργειας και ειδικότερα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας μέσα από ιστορικά και κοινωνικοοικονομικά στοιχεία αναλύοντας τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα καθώς και χαρακτηριστικά λειτουργίας αυτών των ιδιαίτερων κατασκευών όπως είναι οι ανεμογεννήτριες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής παρουσίαση της γεωμετρίας, των υλικών και των διατομών της κατασκευής που μελετάται. Ακόμα γίνεται αναλυτική αναφορά στον τρόπο προσομοίωσης της κατασκευής μας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων SAP2000 με το οποίο εκτελείται η μελέτη.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία υπολογισμού των δράσεων σχεδιασμού οι οποίες επιδρούν στην ανεμογεννήτρια καθώς παρουσιάζεται και ο συνδυασμός αυτών των δράσεων μεταξύ τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης των μελών της κατασκευής και τα αποτελέσματα των αναλύσεων (ιδιομορφική ανάλυση, φαινόμενα 2^{ης} τάξης, έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας, έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας, έλεγχος οριζόντιων μετατοπίσεων και έλεγχος διάβρωσης).

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται χαρακτηριστικές συνδέσεις μεταξύ των μελών της κατασκευής οι οποίες ελέγχονται κατά τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 με την βοήθεια του προγράμματος IDEA StatiCa.

Στο έκτο κεφάλαιο υπολογίζονται ο οριζόντιος δείκτης εδάφους και η δυσκαμψία των ελατηρίων. Επίσης, πραγματοποιείται ο έλεγχος της φέρουσας ικανότητας των πασσάλων έναντι κατακόρυφων και οριζόντιων φορτίων κατά τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 7 και ελέγχονται οι μεταλλικοί πάσσαλοι σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3.

Στο έβδομο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES
POSTGRADUATE COURSE OF STUDIES
«Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures»

POSTGRADUATE THESIS
EMK ME 2021/13

Structural design of an offshore wind turbine based on jacket foundation

Georgakis N. N.

supervised by Thanopoulos P., Lecturer N.T.U.A.

Abstract

The objective of this master diploma thesis refers to structural design of an offshore wind turbine based on jacket foundation for Greek sea conditions.

In the first chapter the importance of wind energy and specifically the offshore wind energy with historical, social and financial data are reported and the disadvantages and advantages as well as the operating characteristics of these particular structures such as wind turbines are analyzed.

In the second chapter there is an extensive presentation of the geometry, materials and sections. There is also a detailed report on how to model in the finite element program SAP 2000 with which the study is analyzed.

In the third chapter the process of calculating the design loads that affect the wind turbine is presented. Also the combinations of these loads are presented.

In the fourth chapter the results of the modeling of the members and the results of the analyzes (modal analysis, p - δ effect, Ultimate Limit State check, Service Limit State check, horizontal displacements check and corrosion check) are described.

In the fifth chapter typical connections of the jacket structure are presented. Connections are checked by the provisions of Eurocode 3 with the program IDEA StatiCa.

In the sixth chapter the horizontal soil index and the stiffness of the springs are calculated. Also, the check of the piles' load bearing capacity against vertical and horizontal loads is carried out in accordance with the provisions of Eurocode 7 and the steel piles are checked in accordance with Eurocode 3.

In the seventh chapter the conclusions of this thesis are briefly outlined.

Πίνακας περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	1
1.2	ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	2
1.3	Τύποι Ανεμογεννητριών	6
1.3.1	Ανεμογεννήτριες Οριζοντίου Άξονα.....	6
1.3.2	Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα	7
1.3.3	Πύργοι ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα.....	8
1.3.4	Σωληνοειδείς πύργοι από χάλυβα	9
1.3.5	Υβριδικός πύργος από σκυρόδεμα και χάλυβα.....	12
1.3.6	Δικτυωτός πυλώνας από χάλυβα	13
1.4	Ανάγκη μετάβασης στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.....	14
1.5	Πλεονεκτήματα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας	15
1.6	Βασικά μειονεκτήματα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας	16
1.7	Γενικά χαρακτηριστικά θαλάσσιων ανεμογεννητριών – Αρχή λειτουργίας	17
1.8	Είδη φορέων στήριξης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας	20
1.8.1	Φορέας στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου.....	22
1.8.2	Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου	24
1.8.3	Φορέας στήριξης μορφής μεταλλικού δικτυώματος (jacket)	25
1.8.4	Θεμελίωση της κατασκευής μέσω θεμελίου βαρύτητας	27
1.8.5	Πλωτές Ανεμογεννήτριες	28
1.9	Χωροθέτηση υπεράκτιου αιολικού πάρκου	32
1.9.1	Κριτήρια	32
1.9.2	Θ.Α.Π. στην Ελλάδα	34
1.9.3	Χωροθέτηση της υπό μελέτη ανεμογεννήτριας	36
1.9.4	Κυματικά Δεδομένα	37
2	Μόρφωση φορέα	39
2.1	Περιγραφή φορέα	39
2.2	Προσομοίωση φορέα	43
2.2.1	Προσομοίωση κατασκευής.....	43
2.2.2	Προσομοίωση θεμελίωσης	44
2.3	Υλικά κατασκευής.....	47
3	Δράσεις σχεδιασμού	47
3.1	Γενικά	47
3.2	Μόνιμες δράσεις.....	47
3.3	Μεταβλητές δράσεις	48
3.3.1	Κινητές δράσεις καταστρώματος.....	48
3.3.2	Δράσεις ανέμου.....	48

3.3.3 Κυματικές δράσεις	61
3.3.4 Σεισμικές δράσεις	63
3.4 Χαρακτηριστικά και φορτία τουρμπίνας NREL 5MW	66
3.4.1 Χαρακτηριστικά τουρμπίνας NREL5MW	66
3.4.2 Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων (Pitch Control)	66
3.4.3 Δύναμη Ώσης.....	67
3.4.4 Ροπή κάμψης και στρέψης στην κορυφή του πύργου	67
3.5 Συνδυασμοί δράσεων	68
4 Διαστασιολόγηση φορέα	69
4.1 Εισαγωγή.....	69
4.2 Ιδιομορφική ανάλυση	69
4.3 Φαινόμενα 2 ^{ης} τάξης	73
4.4 Έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας.....	79
4.4.1 Κατάταξη των διατομών.....	79
4.4.2 Έλεγχος διατομών πύργου υπεράκτιας ανεμογεννήτριας	99
4.5 Έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας	111
4.6 Μετακίνηση κορυφής πύργου ανεμογεννήτριας	115
4.6.1 Μετακίνηση κορυφής του πύργου λόγω φορτίων ανέμου και συνδυασμού τους με άλλες φορτίσεις	115
4.6.2 Μετακίνηση κορυφής του πύργου λόγω φορτίων σεισμού	120
4.7 Έλεγχος διάβρωσης στοιχείων σε επαφή με τη θάλασσα	125
5 Συνδέσεις	126
6 Γεωτεχνικός και δομοστατικός έλεγχος των πασσάλων.....	130
6.1 Δεδομένα του εδάφους θεμελιώσεως της κατασκευής και των πασσάλων	130
6.2 Φέρουσα ικανότητα πασσάλου έναντι κατακόρυφων φορτίων.....	131
6.3 Φέρουσα ικανότητα πασσάλου έναντι οριζόντιων φορτίων	135
6.4 Δομοστατικός σχεδιασμός των πασσάλων.....	138
7 Συμπεράσματα	140
8 Βιβλιογραφία	142

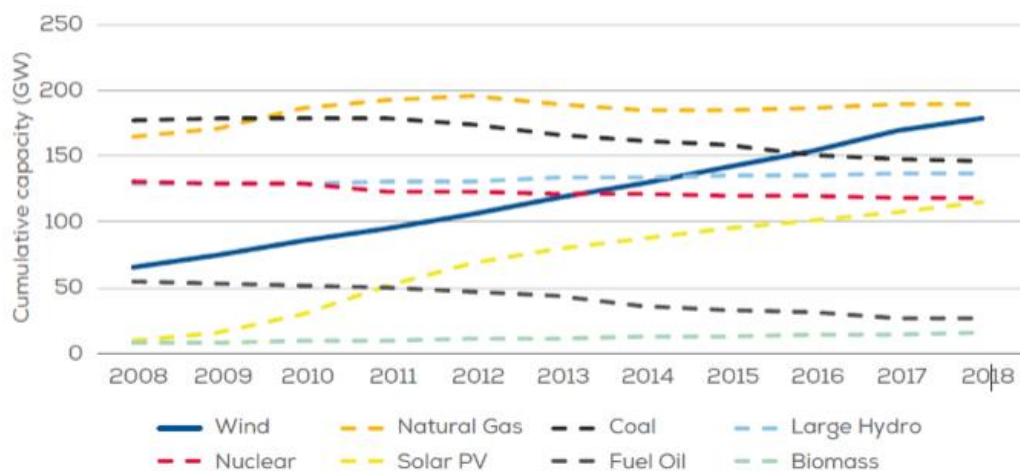
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η αιολική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί από τους ανθρώπους ήδη από το 2000 π.Χ. χρησιμοποιώντας ανεμόμυλους για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Ανεμοκίνητα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται για την άλεση σιτηρών και άντλησης νερού, του ανεμόμυλου και της αντλίας αέρα, αναπτύχθηκαν μέχρι τον 9ο αιώνα στις περιοχές που βρίσκονται τώρα το Ιράν, το Αφγανιστάν και το Πακιστάν. Ο πρώτος ανεμόμυλος που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατασκευάστηκε στη Σκωτία το 1887. Η ύψους 10 μέτρων ανεμογεννήτρια χρησιμοποιήθηκε για τη φόρτιση των συσσωρευτών για την τροφοδοσία του φωτισμού ενός σπιτιού.

Όμως η αιολική τεχνολογία αναπτύσσεται αργά στην ιστορία. Ένα από τα σημαντικότερα σημεία αναφοράς αποτέλεσε η έρευνα και ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973, που ανάγκασε τις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες όπως η Αμερική να αναθεωρήσουν την απόλυτη εξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα. Έτσι παρατηρείται έξαρση στην εγκατάσταση των πρώτων αιολικών πάρκων μεγάλης κλίμακας στην πολιτεία της Καλιφόρνιας. Από την άλλη πλευρά του Ατλαντικού, οι εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων στην βόρεια Ευρώπη αυξάνονταν σταθερά κατά τις δεκαετίες του 80' και του 90', δημιουργώντας μία μικρή αλλά σταθερή αγορά αιολικής ενέργειας, λόγω του υψηλού κόστους ηλεκτρικής ενέργειας και των εξαιρετικών συνθηκών ανέμου. [1]

Σήμερα η αιολική ενέργεια κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος τόσο σε Ευρωπαϊκή όσο και σε παγκόσμια κλίμακα. Η αιολική ενέργεια, όπως λέγεται, αποτελεί ανανεώσιμη μορφή ενέργειας δηλαδή η παραγωγή της δεν έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση στο περιβάλλον επιβλαβών ουσιών όπως διοξείδιο του άνθρακα, τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, υδρογονάνθρακες κ.ά. όπως συμβαίνει με άλλες πηγές ενέργειας (πετρέλαιο, λιγνίτης, πυρηνική ενέργεια κλπ.). Στο Σχήμα παρουσιάζεται η συνολική παραγόμενη ισχύς, για διαφορετικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας, στην Ευρώπη από το 2008 έως το 2018. Στο οποίο παρατηρούμε την μεγάλη άνοδο της αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας καθιστώντας την πλέον σε μια από τις σημαντικότερες πηγές ενέργειας.



Source: WindEurope

Σχήμα 1-1: Συνολική παραγόμενη ισχύς, για διαφορετικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας, στην Ευρώπη από το 2008 έως το 2018 [2]

Ανάμεσα στις ΑΠΕ (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας), κυρίαρχο ρόλο φαίνεται να παίζει σήμερα, η αιολική ενέργεια, με ολοένα και περισσότερες σχετικές εφαρμογές παραγωγής ενέργειας να σημειώνονται ανά τον κόσμο και κυριότερα στην Ευρώπη. Η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού γίνεται με τη βοήθεια ανεμογεννητριών, οι οποίες

έχουν εξελιχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια, δίνοντας τη δυνατότητα αποδοτικότερων και μεγαλύτερης ισχύος ανεμογεννητριών.

1.2 ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια, δηλαδή η ενέργεια που παράγεται από αιολικά πάρκα τοποθετημένα στη θάλασσα μετρά σχεδόν 25 χρόνια. Η Ευρώπη αποτελεί πρωτοπόρο στο συγκεκριμένο τομέα και πιο συγκεκριμένα το 1991 στην Δανία κατασκευάστηκε το πρώτο παρακτικό αιολικό πάρκο το Vindeby Offshore Wind Farm.

Τα τελευταία χρόνια η παγκόσμια αγορά έχει στρέψει την προσοχή της στην υπεράκτια αιολική ενέργεια. Η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας βασίζεται στην εκμετάλλευση των ατέρμονων θαλάσσιων περιοχών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για το έργο αυτό. Σε αντίθεση με τα χερσαία αιολικά πάρκα, τα οποία αντιμετωπίζουν σημαντικά προβλήματα λόγω των περιορισμένων επιφανειών με κατάλληλο ανάγλυφο, αλλά και λόγω των αντιδράσεων σε πολλές περιπτώσεις των τοπικών κοινωνιών, η αναζήτηση και η εύρεση κατάλληλης θαλάσσιας περιοχής όχι μόνο είναι ευκολότερη αλλά είναι και ενεργειακά αποδοτικότερη. Αφού έχει βρεθεί ότι η ταχύτητα του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας είναι συνήθως μεγαλύτερη από αυτήν της ξηράς. Τέλος, εξαλείφει τα αισθητικά προβλήματα της θέας και του θορύβου των χερσαίων ανεμογεννητριών, αφού μπορούν να θεμελιωθούν σε μεγάλες αποστάσεις από την ακτή. [3]

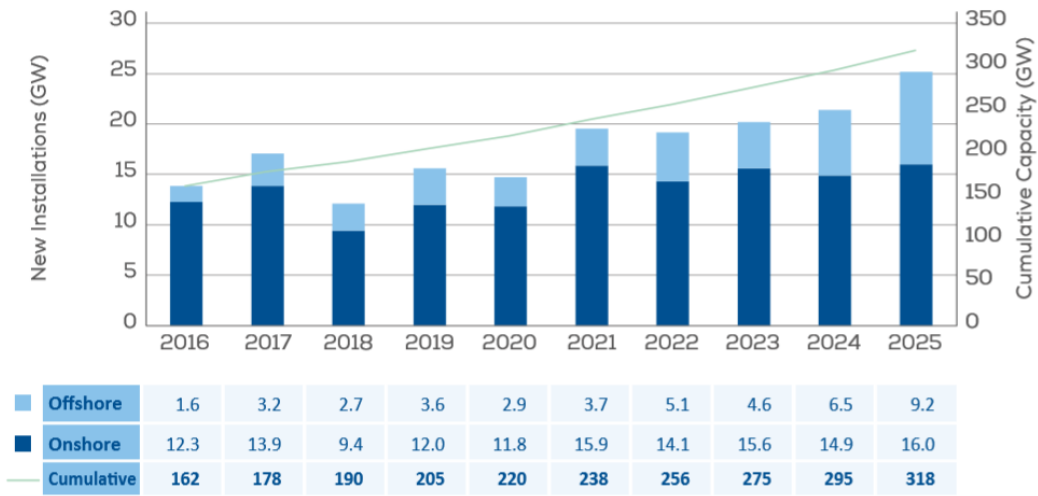
Η υπεράκτια αιολική ενέργεια έκανε τα πρώτα της βήματα στη δεκαετία του 1990 και έκτοτε αυξάνεται σε κλίμακα. Τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, η ανάπτυξη έχει επιταχυνθεί. Από το 1% των παγκόσμιων αιολικών εγκαταστάσεων κατά χωρητικότητα το 2009, η υπεράκτια αιολική ενέργεια αυξήθηκε σε πάνω από 10% το 2019. Μετρούμενο από επενδυτικούς όρους, ο αριθμός αυτός είναι πολύ μεγαλύτερος.

Η υπεράκτια αιολική βιομηχανία είναι πλέον μια σημαντική βιομηχανία, αλλά σιγά σιγά αρχίζει να επεκτείνεται σε όλο τον κόσμο. Δεδομένου ότι πάνω από το 70% του πλανήτη καλύπτεται από τη θάλασσα, και οι ταχύτητες του ανέμου είναι σημαντικά ισχυρότερες από την ξηρά, τα θαλάσσια αιολικά πάρκα είναι αρκετά υποσχόμενα. [4]

Παρόλο που οι νέες εγκαταστάσεις προβλέπεται να αυξάνονται χρόνο με το χρόνο (εκτός από το προβλεπόμενο 19.2 [GW] το 2022), το ποσοστό των χερσαίων εγκαταστάσεων θα αρχίσει να σταματά. Οι χερσαίες εγκαταστάσεις αντιπροσωπεύουν το 72% των νέων εγκαταστάσεων κατά την επόμενη πενταετία. Το 2021 θα δει την κορυφή για εγκαταστάσεις στην ξηρά, ακριβώς κάτω από το σήμα 16 [GW]. Και παρόλο που χώρες όπως η Ισπανία και το Ηνωμένο Βασίλειο θα σημειώσουν αύξηση στις χερσαίες εγκαταστάσεις, η ταυτόχρονη μείωση στις σουηδικές και νορβηγικές εγκαταστάσεις θα ισοπεδώσει την καμπύλη ανάπτυξης στην ξηρά. Οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις θα καταγράφουν επίσης νέα ρεκόρ κάθε χρόνο (εκτός από τα αναμενόμενα 4.6 [GW] το 2023) λόγω του αριθμού των έργων που έφτασαν στο κλείσιμο. Οι μισές από τις εγκαταστάσεις θα πραγματοποιηθούν στο Ηνωμένο Βασίλειο χάρη σε μεγάλο βαθμό στο εξαιρετικό πρόγραμμα υποστήριξης συμβολαίων για διαφορές (CfD). Σύμφωνα με το Σενάριο Ρεαλιστικών Προσδοκιών της WindEurope, μεταξύ 2021 και 2025, η Ευρώπη θα εγκαταστήσει 29 [GW] υπεράκτιου ανέμου. Με μέσο όρο 6 [GW/έτος], η υπεράκτια αιολική ενέργεια θα αντιπροσωπεύει περίπου το 28% της συνολικής αγοράς κατά την πενταετία (σε σύγκριση με μερίδιο 20% στην περίοδο 2019-2023).

FIGURE 13

New and total (cumulative) installations in Europe - WindEurope's Realistic Expectations Scenario

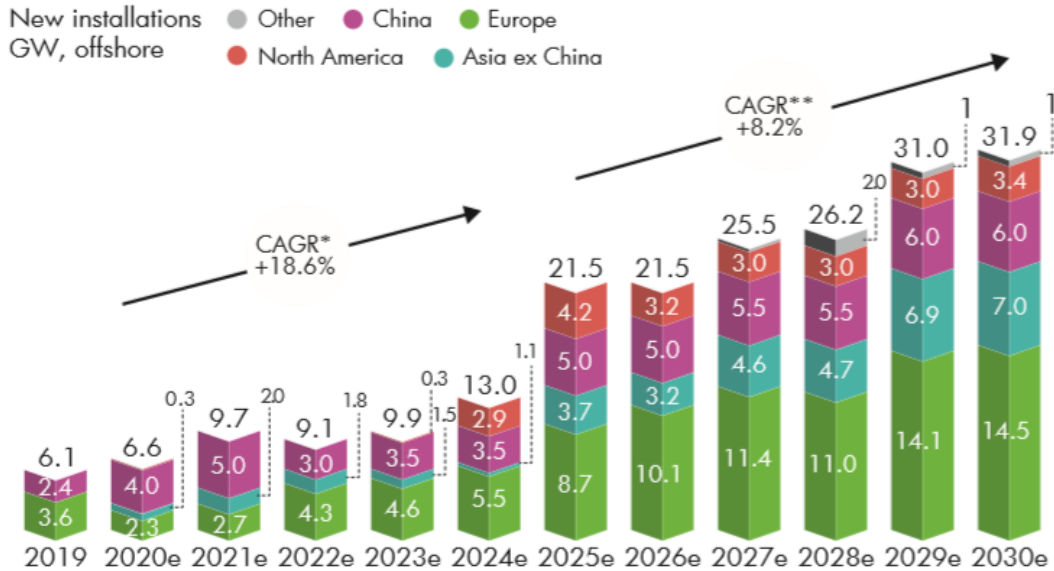


Source: WindEurope

Σχήμα 1-2: Νέες και συνολικές (αθροιστικά) εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών στην Ευρώπη - Σενάριο ρεαλιστικών προσδοκιών της WindEurope [4]

Οι προοπτικές για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι πολύ θετικές μακροπρόθεσμα. Η πρόσφατα δημοσιευμένη υπεράκτια στρατηγική για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προτείνει νομοθετικές και μη νομοθετικές συστάσεις για την ανάπτυξη 300 [GW] υπεράκτιου ανέμου στην ΕΕ-27 έως το 2050. Μαζί με τους στόχους του Ηνωμένου Βασιλείου και της Νορβηγίας, η Ευρώπη θα έχει πάνω από 400 [GW] έως το 2050.

Global offshore wind growth to 2030



* CAGR = Compound Annual Growth Rate
Source: GWEC Market Intelligence, June 2020

Σχήμα 1-3: Πρόβλεψη εγκατάστασης ανεμογεννητριών παγκοσμίως έως το 2030 της GWEC [3]

Οι προοπτικές της παγκόσμιας υπεράκτιας αιολικής αγοράς έως το 2030 έχουν αυξηθεί πολύ τον περασμένο χρόνο καθώς οι κυβερνήσεις αυξάνουν τα επίπεδα φιλοδοξίας

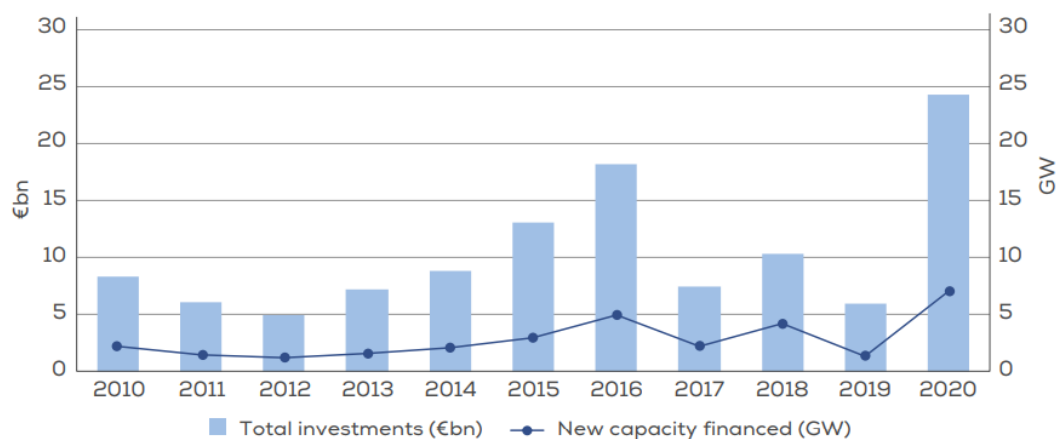
τους και νέες χώρες εντάσσονται στην αγορά. Με μέσο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 18.6% έως το 2024 και 8.2% έως το τέλος της δεκαετίας, οι νέες ετήσιες εγκαταστάσεις αναμένεται να περάσουν τα όρια των 20 [GW] το 2025 και των 30 [GW] το 2030. Η GWEC Market Intelligence αναμένει ότι θα προστεθούν πάνω από 205 [GW] νέας υπεράκτιας αιολικής χωρητικότητας την επόμενη δεκαετία. Τα τρία τέταρτα αυτής της χωρητικότητας θα εγκατασταθούν στο δεύτερο μισό (2025-2030), καθώς τα έργα που βρίσκονται στο στάδιο του σχεδιασμού συνδέονται στο δίκτυο.

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια αντιπροσώπευε ήδη το 10% των παγκόσμιων νέων εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας το 2019. Ενισχυμένη από την επέκταση σε νέες αγορές και την επιτάχυνση της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης, η GWEC Market Intelligence προβλέπει ότι η υπεράκτια αιολική ενέργεια παίζει ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στη συνολική ανάπτυξη της παγκόσμιας αιολικής αγοράς και αναμένει ότι η υπεράκτια αιολική ενέργεια θα συνεισφέρει περισσότερο από το 20% των συνολικών αιολικών εγκαταστάσεων έως το 2025.

Ως η μεγαλύτερη περιφερειακή αγορά αιολικής ενέργειας στον κόσμο, η Ευρώπη αναμένεται να διατηρήσει σταθερή ανάπτυξη, αλλά νέες εγκαταστάσεις εκτός Ευρώπης, κυρίως από την Ασία και τη Βόρεια Αμερική, είναι πιθανό να ξεπεράσουν την Ευρώπη το 2020 για πρώτη φορά και να συνεχίσουν να υπερβαίνουν τον όγκο στην Ευρώπη έως το 2030. Βραχυπρόθεσμα (2020-2024), η πλειοψηφία της ανάπτυξης εκτός Ευρώπης θα προέρχεται κυρίως από την Κίνα και την Ταϊβάν, με τη συμβολή των ΗΠΑ να είναι σημαντική από το 2024 όταν το πρώτο υπεράκτιο έργο κλίμακας χρησιμότητας θα συνδεθεί στο δίκτυο.

Παρά τον COVID-19, το 2020 ήταν έτος ρεκόρ για υπεράκτιες χρηματοδοτήσεις αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη με 26.3 δισ. Ευρώ για τη χρηματοδότηση νέων υπεράκτιων αιολικών πάρκων, συμπεριλαμβανομένων 2.1 δισ. Ευρώ σε υπεράκτιες υποδομές μεταφοράς. Ήταν επίσης ρεκόρ για νέα χωρητικότητα που χρηματοδοτήθηκε με 7.1 [GW], υποδεικνύοντας μια σημαντική μετατόπιση ταχύτητας και όγκου στον ευρωπαϊκό υπεράκτιο αιολικό τομέα.[3]

FIGURE 18
New offshore wind investments and capacity financed: 2010 – 2020 (€bn)



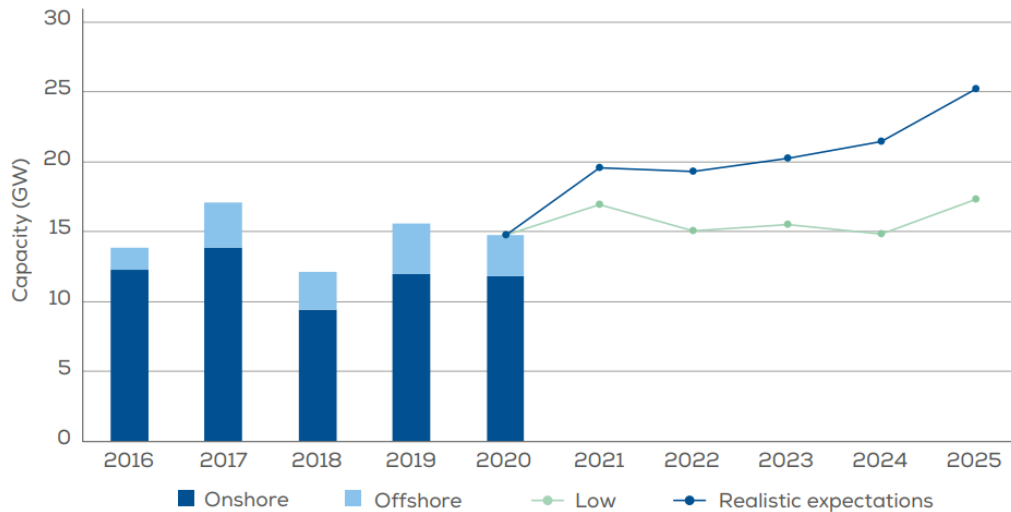
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Total investments (€bn)	8.4	6.1	5	7.2	8.8	13.1	18.2	7.5	10.3	6	24.2
New capacity financed (GW)	2.2	1.5	1.3	1.6	2.1	3	5	2.3	4.2	1.4	7.1

Source: WindEurope

Σχήμα 1-4: Νέες υπεράκτιες αιολικές επενδύσεις και χρηματοδοτούμενη παραγωγική ικανότητα: 2010 - 2020 (δισ. Ευρώ) [4]

Στην Ευρώπη, περίπου 20% των ετήσιων νέων αιολικών εγκαταστάσεων είναι υπεράκτιες. Ήδη μέχρι το 2020 έχει εγκατασταθεί δυναμικό ισχύος 220 [GW] εκ των οποίων τα 195 [GW] είναι χερσαίες και τα 25 [GW] είναι υπεράκτιες. Μέχρι το 2025 εκτιμάται ότι θα εγκατασταθούν άλλα 105 [GW].

FIGURE B
2021-2025 new onshore and offshore wind installations in Europe – WindEurope’s scenarios

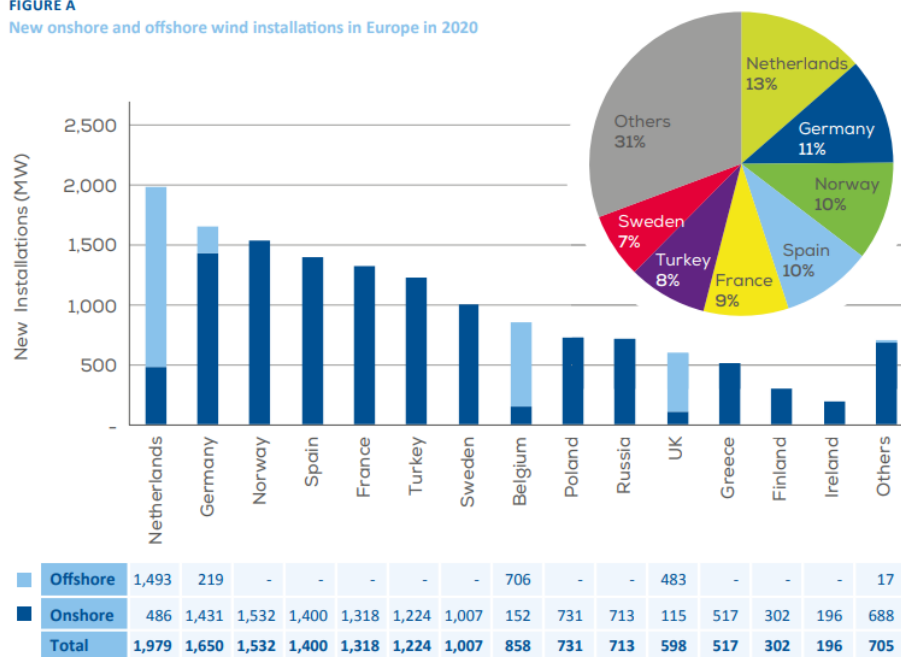


Source: WindEurope

Σχήμα 1-5: Νέες εγκαταστάσεις χερσαίων και υπεράκτιων ανεμογεννητριών στην Ευρώπη – Πρόβλεψη για 2021-2025 [4]

Σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία της WindEurope για το έτος 2020, η Ολλανδία έρχεται πρώτη στην συνολική εγκατεστημένη ισχύ από αιολική ενέργεια με ποσοστό 13%. Ακολουθεί η Γερμανία με ποσοστό 11%, η Δανία και η Ισπανία με 10%, η Γαλλία με 9%, η Τουρκία με 8% και η Σουηδία με 7%.

FIGURE A
New onshore and offshore wind installations in Europe in 2020



Source: WindEurope

Σχήμα 1-6: Νέες εγκαταστάσεις χερσαίων και υπεράκτιων ανεμογεννητριών στην Ευρώπη το 2020 [4]

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, ο Ευρωπαϊκός Νότος απουσιάζει από την λίστα των χωρών παραγωγής ενέργειας μέσω θαλάσσιων ανεμογεννητριών. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του μεγάλου βάθους που παρουσιάζει ο θαλάσσιος χώρος της Μεσογείου, που δυσχεραίνει την εγκατάσταση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Τα υπεράκτια πάρκα στην Ευρώπη αποτελούνται κυρίως από ανεμογεννήτριες που εδράζονται στον πυθμένα, και εγκαθίστανται σε βάθη έως 40 – 50 [m]. Ωστόσο, η έρευνα και η τάση της νέας τεχνολογίας έχει σαν βασικό στόχο την εξέλιξη των πλωτών ανεμογεννητριών. Ήδη έχουν κατασκευαστεί και βρίσκονται σε λειτουργία οι πρώτες πλωτές ανεμογεννήτριες. Η τεχνολογική αυτή εξέλιξη, αναμένεται να δώσει νέα ώθηση στον τομέα των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, εφόσον καθιστά δυνατή την εγκατάσταση αυτών σε ακόμα μεγαλύτερα βάθη.

1.3 Τύποι Ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε 3 είδη ανάλογα με την διεύθυνση των αξόνων τους σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου όπως αναφέρονται παρακάτω:

- Οριζοντίου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος στην κατεύθυνση του ανέμου (Σχήμα 1-7).
- Οριζοντίου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου αλλά παράλληλος στην επιφάνεια της γης (Σχήμα 1-7).
- Κατακόρυφου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι κατακόρυφος και κάθετος στην κατεύθυνση του ανέμου (Σχήμα 1-7).

Στα υπεράκτια αιολικά πάρκα μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται μόνο οι πρώτες ανεμογεννήτριες, ωστόσο γίνονται και μελέτες για την ανάπτυξη υπεράκτιων πάρκων με ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, καθώς παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα έναντι των πρώτων, όπως μικρότερα κόστη συντήρησης και θεμελίωσης. [3]



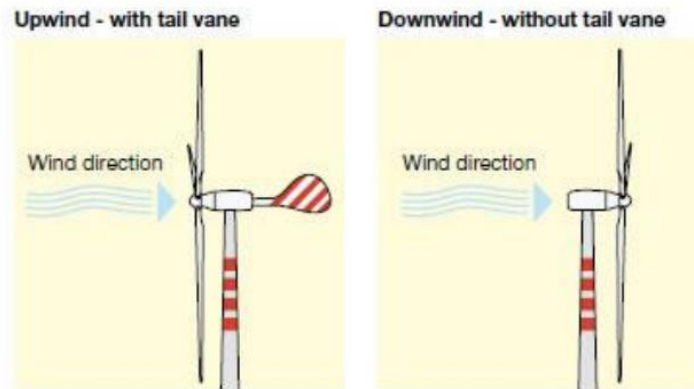
Σχήμα 1-7: Τύποι ανεμογεννητριών α)οριζόντιου άξονα με περιστροφή παράλληλη στον άνεμο, β)οριζόντιου άξονα με περιστροφή κάθετη στον άνεμο, γ)κατακόρυφου άξονα [3]

1.3.1 Ανεμογεννήτριες Οριζοντίου Άξονα

Οι παρακάτω παράγραφοι που αφορούν την επεξήγηση των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα έχουν ληφθεί από τη διπλωματική εργασία του Χρήστου Αντωνόπουλου με θέμα: "Μελέτη δομικού συστήματος ανεμογεννήτριας πολύ μεγάλου ύψους" [5]

Η συνηθέστερη μορφή ανεμογεννητριών σήμερα είναι αυτή του οριζόντιου άξονα. Αυτή η κατηγορία ανεμογεννητριών χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες σε σχέση με τη θέση του ρότορα ως προς τον πυλώνα και τη διεύθυνση του ανέμου:

- Ο ρότορας να βρίσκεται μπροστά από τον πύργο (up wind)
- Ο ρότορας να βρίσκεται πίσω από τον πύργο (down wind)



Σχήμα 1-8: Θέση του ρότορα στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα [5]

Για να επιτευχθεί η μέγιστη δέσμευση κινητικής ενέργειας του ανέμου, το επίπεδο του ρότορα απαιτείται να είναι κάθετο με την κατεύθυνση του ανέμου. Για το λόγο αυτό, στις μικρής ισχύος ανεμοκινητήρες τύπου up wind, τοποθετείται ένα πτερύγιο το οποίο αποσκοπεί στην ευθυγράμμιση του ρότορα. Βασικό μειονέκτημα είναι ότι ο ρότορας θα πρέπει να σχεδιάζεται με μεγάλη δυσκαμψία, το οποίο έχει δυσμενή επιρροή στη δυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας. Οι μικρής ισχύος ανεμοκινητήρες τύπου down wind έχουν το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται σύστημα ευθυγράμμισης του ρότορα, με την προϋπόθεση ότι το κουβούκλιο έχει συγκεκριμένο σχήμα, το οποίο αντικαθιστά την ύπαρξη του πτερυγίου. Μεγάλο μειονέκτημα των ανεμοκινητήρων down wind είναι ότι δημιουργούν αναταραχή στο πεδίο του ανέμου, με αποτέλεσμα τη μείωση της παραγωγικής ικανότητας της ανεμογεννήτριας και τη δημιουργία αυξημένων φορτίων κοπώσεως. Στους ανεμοκινητήρες μεγάλης ισχύος μέσω σερβομηχανισμού επιτυγχάνεται αυτόματη ρύθμιση της ευθυγράμμισης του ρότορα.

Στην αγορά οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι μονόπτερες, δίπτερες ή τρίπτερες, των οποίων η τεχνολογία βασίζεται σε αυτή των αεροπορικών ελίκων. Αυτές που έχουν επικρατήσει είναι οι τρίπτερες γιατί παρά το μεγάλο κόστος των πτερυγίων, αυτού του είδους οι ανεμογεννήτριες δεν απαιτούν μεγάλες ταχύτητες ανέμου για να παράξουν ποσοτικά την ίδια ενέργεια με τις άλλες δύο. Οι πρώτες ανεμογεννήτριες που κατασκευάστηκαν είχαν ισχύ μερικών Watt και με τη βοήθεια των σύγχρονων τεχνολογιών, έχουν εξελιχθεί σε ισχύ πολλών MW.

1.3.2 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα

Οι παρακάτω παράγραφοι που αφορούν την επεξήγηση των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα έχουν ληφθεί από τη διδακτορική διατριβή του Χριστόφορου Δημόπουλου με θέμα: "Ενίσχυση οπών ανθρωποθυρίδων σε χαλύβδινα κελύφη πυλώνων ανεμογεννητριών - Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση" [6]

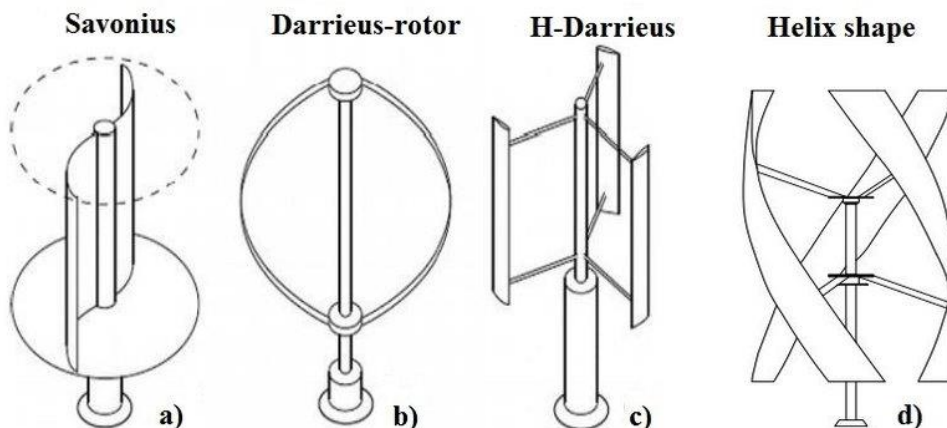
Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα υπερτερούν με αυτές του οριζόντιου άξονα αφενός λόγω του αυτόματου προσανατολισμού του ρότορα στη διεύθυνση του ανέμου και αφετέρου επειδή ο κινητήρας και το κουτί πέδησης βρίσκονται στη βάση, συνεπώς τα καθιστά ευκόλως προσβάσιμα και επισκευάσιμα. Βασικό μειονέκτημα είναι ότι ο ρότορας τοποθετείται κοντά στο έδαφος, όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη, με αποτέλεσμα το σύστημα να είναι λιγότερο αποτελεσματικό. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα περιλαμβάνουν αρκετούς τύπους, εκ των οποίων οι πιο γνωστοί είναι ο τύπος Savonius και ο τύπος Darrieus.



Σχήμα 1-9: α) Savonius, β) Darrieus, γ) Συνδυασμός Savonius και Darrieus [6]

Οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius αποτελούν μηχανές χαμηλού κόστους και περιορισμένης απόδοσης. Χαρακτηριστικά τους αποτελούν ο χαμηλός συντελεστής ισχύος, η μικρή ακραία περιφερειακή ταχύτητα, η απλότητα της κατασκευής, το περιορισμένο μέγεθος και το μικρό κόστος.

Οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus χαρακτηρίζονται από τα καμπυλωτά περύγια. Λόγω της σχετικά μικρής αρχικής ροπής εκκίνησης, έχουν το μειονέκτημα να μην αρχίζει η περιστροφή τους μόνη της όταν φυσάει ο άνεμος. Βέβαια το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τη μικτή τύπου ανεμογεννήτρια Savonius-Darrieus. Συνήθως ο άξονας περιστροφής του ρότορα είναι ο πύργος της ανεμογεννήτριας, ο οποίος είτε είναι αυτό-στηριζόμενος είτε προσδένεται με καλώδια. Η ηλεκτρική γεννήτρια, το κιβώτιο μετάδοσης όπως και οι υπόλοιποι μηχανισμοί τοποθετούνται κοντά στο έδαφος.



Σχήμα 1-10: Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα [7]

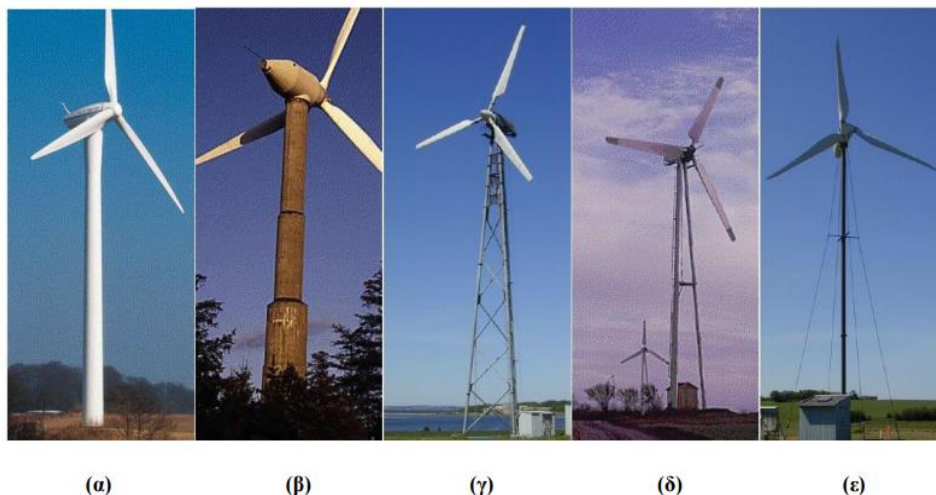
1.3.3 Πύργοι ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα

Οι παρακάτω παράγραφοι που αφορούν την επεξήγηση των πύργων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα έχουν ληφθεί από τη διπλωματική εργασία του Χρήστου Αντωνόπουλου με θέμα: " Μελέτη δομικού συστήματος ανεμογεννήτριας πολύ μεγάλου ύψους " [5]

Ο πυλώνας αποτελεί κρίσιμο μέρος για τον σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα καθώς σε αυτόν στηρίζεται ο ρότορας, η μετάδοση ισχύος και τα λοιπά συστήματα ελέγχου. Το ύψος του είναι άμεσα συνδεδεμένο με το μέγεθος των περυγίων, άρα και με τη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί. Ο βέλτιστος σχεδιασμός του πύργου είναι συνάρτηση της ασφάλειας και του κόστους κατασκευής. Πολύ σημαντικό είναι η εύκολη πρόσβαση στον ρότορα και στα λοιπά στοιχεία του για συνεχή επίβλεψη και τυχόν επισκευές. Τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα ή σε συνδυασμό για την κατασκευή ενός πύργου είναι συνήθως χάλυβας και σκυρόδεμα (τις

περισσότερες φορές προεντεταμένο), ενώ τα τελευταία χρόνια ερευνώνται και τα ανοηλισμένα πολυμερή υλικά. Οι πύργοι ανεμογεννητριών ανάλογα με τον τρόπο σχεδιασμού κατηγοριοποιούνται στις εξής κατηγορίες:

- Σωληνοειδείς πύργοι (tubular tower)
- Δικτυωτοί πυλώνες (lattice tower)
- Σωλήνες σε τριποδική διάταξη (three-legend tower)
- Μονοπολική διάταξη σωλήνα με αντιστήριξη καλωδίων (guy-wired pole tower)



Σχήμα 1-11: α) Σωληνοειδής πύργος από χάλυβα, β) Σωληνοειδής πύργος από σκυρόδεμα, γ) Δικτυωτός πυλώνας, δ) Σωλήνες σε τρίποδη διάταξη, ε) Μεμονωμένος σωλήνας με αντιστήριξη καλωδίων [5]

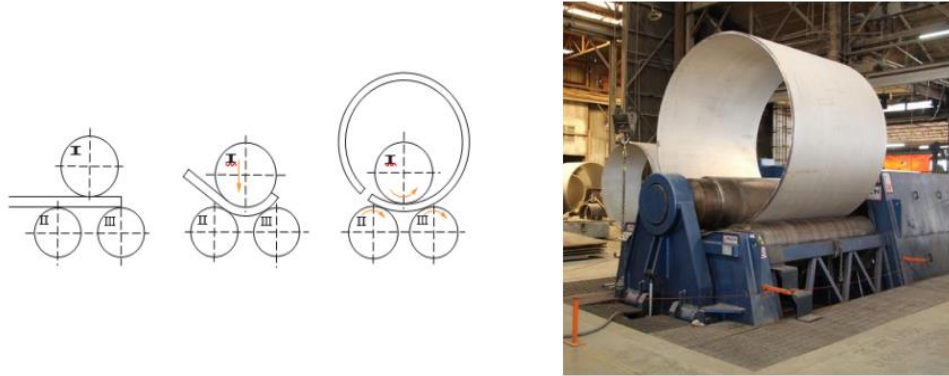
Λόγω της αύξησης της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος, επιδιώκεται η κατασκευή όλο και υψηλότερων πυλώνων με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού. Ιδιαίτερος όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες ξηράς, λόγω της τραχύτητας του εδάφους, ο ρυθμός αύξησης της ταχύτητας του ανέμου καθ' ύψος μειώνεται. Αυτό σημαίνει ότι οι ανεμογεννήτριες ξηράς θα είναι αποδοτικότερες σε μεγάλο ύψος. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των σύγχρονων ανεμογεννητριών πολλών [MW], είναι η μεταφορά και η ανέγερση τους. Στους πύργους με ύψος μεγαλύτερο των εκατό μέτρων η διάμετρος στη βάση τους απαιτείται να είναι περίπου πέντε μέτρα [Hau, 2006], πράγμα που κάνει δύσκολη έως αδύνατη τη μεταφορά των προκατασκευασμένων τμημάτων μέσω του οδικού δικτύου. Κάποιοι τύποι πύργων, όπως για παράδειγμα δικτυωτοί πυλώνες από χάλυβα ή πύργοι από σκυρόδεμα, υπερτερούν. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια το πρόβλημα αυτό άρχισε να αντιμετωπίζεται με την κατασκευή υβριδικών πύργων, οι οποίοι αποτελούνται από σκυρόδεμα στη βάση και χάλυβα στην κορυφή. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πλέον διαδεδομένοι τύποι πύργων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα.

1.3.4 Σωληνοειδείς πύργοι από χάλυβα

Οι παρακάτω παράγραφοι που αφορούν την επεξήγηση των σωληνοειδών πύργων από χάλυβα έχουν ληφθεί από τη διπλωματική εργασία του Χρήστου Αντωνόπουλου με θέμα: "Μελέτη δομικού συστήματος ανεμογεννήτριας πολύ μεγάλου ύψους" [5]

Σήμερα οι σωληνοειδείς πύργοι από χάλυβα αποτελούν τους πιο διαδεδομένους και χρησιμοποιούμενους εξαιτίας του μικρού χρόνου ανέγερσης τους. Το σχήμα τους είναι συνήθως κωνικό και αποτελούνται τις περισσότερες φορές από τρία ή τέσσερα επιμέρους προκατασκευασμένα τμήματα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους στην περιοχή ανέγερσης. Η σύνδεση αυτή γίνεται με τη χρήση προεντεταμένων κοχλιών υψηλής αντοχής μέσω κυκλικών δακτυλίων, γνωστών και ως φλάντζες. Κάθε προκατασκευασμένο τμήμα μπορεί να έχει μήκος έως και 30 [m], και αποτελείται από επιμέρους αριθμό ελασμάτων συγκολλημένα μεταξύ τους, τα οποία καμπυλώνονται με ειδικά μηχανήματα για την επίτευξη του κωνικού σχήματος. Το πάχος των ελασμάτων κυμαίνεται στα 12-75 [mm], ανάλογα με τις ανάγκες

σχεδιασμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του πύργου, τόσο μικρότερο χρειάζεται να είναι το πάχος των ελασμάτων. Αναλυτικότερα κάθε έλασμα φύλλου χάλυβα αφού κουρμπαραιστεί, καμπυλώνεται στην ειδική μηχανή και ύστερα οι δύο άκρες του συγκολλούνται με μία διαμήκη ραφή. Στη συνέχεια πραγματοποιείται συγκόλληση μεταξύ των καμπυλωμένων ελασμάτων με περιφερειακές ραφές. Σε κάθε άκρο του προκατασκευασμένου τμήματος γίνεται συγκόλληση εσωτερικού δακτυλίου. Τελικό στάδιο είναι η επιφανειακή προστασία κάθε προκατασκευασμένου τμήματος έναντι διάβρωσης, το οποίο επιτυγχάνεται με αμμοβολή, γαλβανισμό και επίστρωση δύο ή τριών στρώσεων βαφής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση των προεντεταμένων κοχλιών στις φλάντζες είναι αναγκαία καθώς εξυπηρετεί στην αύξηση της αντοχής του πύργου έναντι κόπωσης που οφείλεται στη δυναμική φύση των ανεμοπιέσεων και στη συνεπαγόμενη κυκλική φόρτιση που υφίστανται οι κοχλίες.



Σχήμα 1-12: Καμπύλωση χαλύβδινων ελασμάτων με τη χρήση ειδικής μηχανής [5]



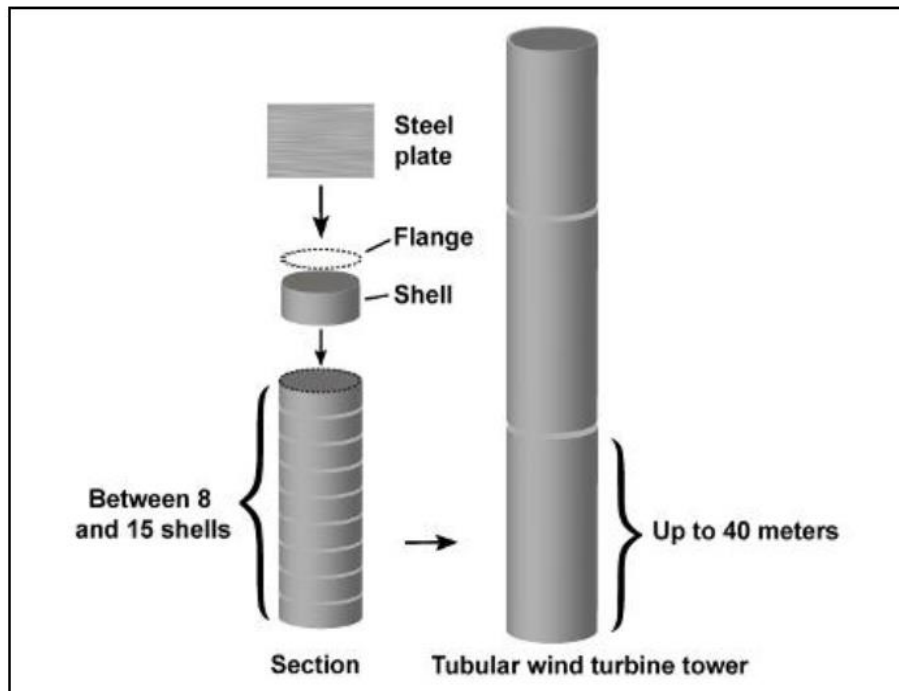
Σχήμα 1-13: Μεταφορά προκατασκευασμένων τμημάτων μέσω οδικού δικτύου [5]



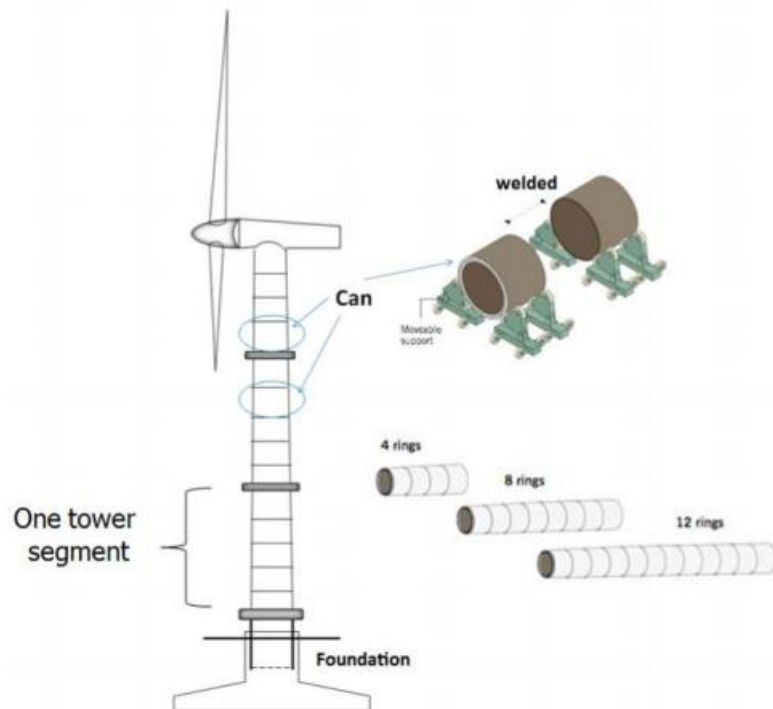
Σχήμα 1-14: Τοποθέτηση προκατασκευασμένων τμημάτων με γερανό [5]



Σχήμα 1-15: Φλάντζα ένωσης μεταξύ δύο προκατασκευασμένων τμημάτων [5]



Σχήμα 1-16: Διακριτοποίηση του πλώρα μιας ανεμογεννήτριας [3]



Σχήμα 1-17: Βασικά τμήματα του πύργου μιας τυπικής ανεμογεννήτριας [5]

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στους υψηλούς πύργους ανεμογεννητριών, όπου η διάμετρος βάσης ξεπερνάει τα πέντε μέτρα, δημιουργείται σημαντικό πρόβλημα μεταφοράς των προκατασκευασμένων τμημάτων μέσω του οδικού δικτύου, καθώς επίσης απαιτούνται πολύ μεγάλες μηχανές για τη συναρμολόγηση τους κατά το στάδιο της ανέγερσης. Ένα άλλο μειονέκτημα των σωληνοειδών πύργων από χάλυβα αποτελεί η ύπαρξη ανθρωποθυρίδας στη βάση τους, η οποία αποσκοπεί στην εύκολη πρόσβαση για τη συντήρηση του ηλεκτρικού και μηχανολογικού εξοπλισμού. Οι διαστάσεις του ανοίγματος είναι σημαντικές και θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό καθώς δημιουργούνται προβλήματα τοπικού λυγισμού και συγκέντρωσης τάσεων. Μία συνηθισμένη μέθοδος αντιμετώπισης είναι η συγκόλληση ενός περιμετρικού πλαισίου στην παρειά της ανθρωποθυρίδας. Σημαντικό πλεονέκτημα των σωληνοειδών πύργων, εκτός της πολύ απλής προσομοίωσης τους με ένα στατικό σύστημα προβόλου, είναι η ευκολία υπολογισμού των διατομών και των αντίστοιχων ιδιοτήτων.

1.3.5 Υβριδικός πύργος από σκυρόδεμα και χάλυβα

Ο υβριδικός πύργος αποτελείται από δύο τμήματα, το κάτω μέρος που αποτελείται από σκυρόδεμα και κατασκευάζεται επί τόπου στο εργοτάξιο και το άνω μέρος που αποτελείται από έναν σωληνοειδή πύργο από χάλυβα. Λόγω της ύπαρξης σκυροδέματος στη βάση επέρχεται μείωση του ύψους του σωληνοειδή πύργου και επομένως μείωση της απαιτούμενης διαμέτρου του. Αυτό σημαίνει ότι τα προκατασκευασμένα τμήματα από χάλυβα έχουν μικρότερο μέγεθος και επομένως η μεταφορά τους μέσω οδικού δικτύου είναι εφικτή, αποφεύγοντας τον κίνδυνο σύγκρουσης. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι ο εύκολος σχεδιασμός του μέρους του σκυροδέματος έτσι ώστε να ληφθούν από τον μελετητή οι ιδιοσυγκρότητες που θέλει. Μειονέκτημα του προαναφερόμενου πύργου είναι το αυξημένο βάρος. [5]



Σχήμα 1-18: Υβριδικός πύργος από σκυρόδεμα και χάλυβα [5]

1.3.6 Δικτυωτός πυλώνας από χάλυβα

Οι δικτυωτοί πυλώνες από χάλυβα ήταν ιδιαίτερος διαδεδομένοι τα προηγούμενα χρόνια για ανεμογεννήτριες μικρού ύψους, αλλά η χρήση τους περιορίστηκε κατά την περίοδο τεχνολογικής εξέλιξης των σωληνοειδών πύργων. Ωστόσο, η χρήση τους πολλές φορές προτείνεται για πυλώνες με ύψος μεγαλύτερο των εκατό μέτρων. Βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα οδικής μεταφοράς συγκριτικά με τους σωληνοειδής πύργους, όπως επίσης χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος λόγω της λιγότερης ποσότητας χάλυβα που χρησιμοποιείται. Μειονέκτημα των δικτυωτών πυλώνων από χάλυβα αποτελεί η αρκετά σύνθετη μορφή τους, με αποτέλεσμα ο χρόνος ανέγερσης να είναι μεγαλύτερος. Υστερεί αισθητικά σε σύγκριση με τον σωληνοειδή πύργο, ενώ τα έξοδα συντήρησης είναι μεγαλύτερα. [5]



Σχήμα 1-19: Δικτυωτός πυλώνας από χάλυβα [5]

1.4 Ανάγκη μετάβασης στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

Η παγκόσμια απαίτηση για αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς για να εξυπηρετήσει το τεράστιο επενδυτικό ενδιαφέρον που υπάρχει από κολοσσιαίες εταιρείες στον κλάδο της ενέργειας και λόγω της αύξησης των τιμών του πετρελαίου αλλά και της σταδιακής εξάντλησης των πετρελαϊκών πόρων. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και πιο συγκεκριμένα η αιολική ενέργεια εμφανίζονται σαν μια καθαρή και φθηνή λύση σε αντίθεση με τις συμβατικές μορφές ενέργειας. Στην πραγματικότητα όμως και η αιολική ενέργεια αντιμετωπίζει μια σειρά από μειονεκτήματα.

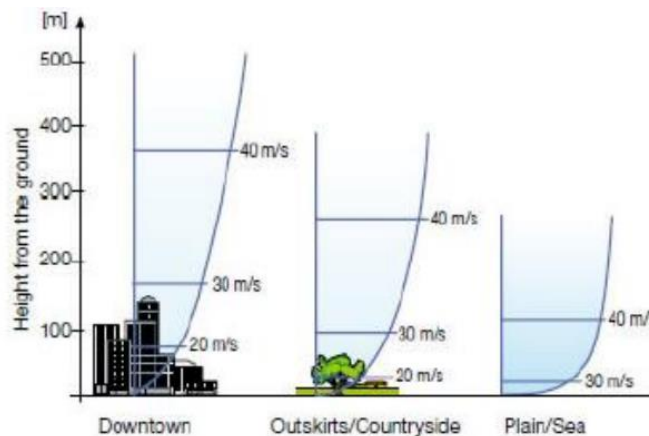
- Η ταχύτητα του ανέμου δεν είναι σταθερή παρουσιάζοντας μεγάλη διακύμανση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία των ανεμογεννητριών να παράγουν τα ίδια ποσοστά ηλεκτρικής ενέργειας όλη την ώρα. Επίσης υπάρχουν περιοχές με χαμηλή ένταση ανέμου, στις οποίες δεν ενδείκνυται η κατασκευή ανεμογεννητριών ή αιολικών πάρκων.
- Ένας σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ο οποίος χρησιμοποιεί ορυκτά καύσιμα, παράγει μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας συγκριτικά με μία ανεμογεννήτρια. Για το λόγο αυτό απαιτείται η κατασκευή πολλών ανεμογεννητριών ώστε να υπάρχει το ίδιο αντίκτυπο.
- Καθώς πολλές φορές οι ανεμογεννήτριες απέχουν από τις αστικές περιοχές, η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας εξ' αποστάσεως αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα για τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας.
- Συνήθως η κατασκευή αιολικών πάρκων έρχεται αντιμέτωπη με διαμαρτυρίες ότι η φύση θα πρέπει να παραμείνει ανέπαφη και να διατηρηθεί η ομορφιά της.
- Η περισσευούμενη ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες αποθηκεύεται σε μπαταρίες υδρογόνου ή άλλων μορφών, οι οποίες χρήζουν περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη για την εμπορική βιωσιμότητα τους.
- Χαρακτηριστικό των ανεμογεννητριών είναι ο έντονος θόρυβος τους, ο οποίος προκαλεί προβλήματα ηχορύπανσης ακόμη και σε κατοίκους που βρίσκονται εκατοντάδες μέτρα μακριά. Ωστόσο, οι σύγχρονες τεχνολογίες έχουν καταφέρει να μειώσουν αισθητά τα επίπεδα θορύβου.
- Οι ψηλές ανεμογεννήτριες μπορούν να γίνουν επικίνδυνες όταν αυτές τοποθετούνται επάνω στις μεταναστευτικές διαδρομές πουλιών.
- Μετά τη διάρκεια ζωής μιας ανεμογεννήτριας υπάρχει αδυναμία ανακύκλωσης των γιγαντιαίων πτερυγίων των ανεμογεννητριών με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο. Μέχρι τώρα δεν έχουν ευδοκιμήσει προσπάθειες σύνθλιψης ή αποσύνθεσης τους λόγω της ανθεκτικότητας των υλικών κατασκευής και του τεραστίου μεγέθους τους. Ενώ θα μπορούσαν να υποστούν θερμόλυση στους 450-700 βαθμούς Κελσίου, η διαδικασία αυτή μόνο "πράσινη" δεν είναι καταναλώνοντας πολύ ενέργεια και απελευθερώνοντας θερμότητα, αλλά και ρύπους. [8]

Καθώς η έλλειψη χώρου γίνεται όλο και πιο φανερό για την εγκατάσταση χερσαίων ανεμογεννητριών, η εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων φαίνεται να αποτελεί μια καλή εναλλακτική λύση λόγω του τεραστίου δυναμικού που συνδέεται με τις παραθαλάσσιες περιοχές. Οι βέλτιστες λύσεις για την αξιοποίηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας διαφέρουν από τις αντίστοιχες χερσαίες επιλογές. Κύρια προϋπόθεση αποτελεί η υιοθέτηση επιτυχημένων λύσεων επιλογών σχεδίασης, οι οποίες θα οδηγήσουν σε μια σημαντική μείωση του κόστους, καθιστώντας έτσι αυτή τη μορφή ενέργειας πιο ανταγωνιστική και την ανάπτυξή της πιο σημαντική στα επόμενα χρόνια. Ως εκ τούτου, αναμένεται να είναι το επόμενο μεγάλο βήμα στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας.

1.5 Πλεονεκτήματα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες κερδίζουν διαρκώς έδαφος έναντι των ανεμογεννητριών ξηράς εξαιτίας των σημαντικών πλεονεκτημάτων τους.

- Το αιολικό δυναμικό στον θαλάσσιο χώρο είναι πολύ μεγάλο σε αντίθεση με τις ηπειρωτικές περιοχές όπου το πεδίο ροής του ανέμου επηρεάζεται σημαντικά από το ανάγλυφο της περιοχής. Οι άνεμοι που αναπτύσσονται πάνω από τη θάλασσα αυξάνονται με την απόσταση από την ακτή και φθάνουν σε πολύ μεγάλη ένταση στα βαθιά νερά. Επομένως, η ενεργειακή απόδοση μίας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι πολύ μεγάλη. Συγκεκριμένα, περίπου το 80% των αιολικών αποθεμάτων εντοπίζεται στα βαθιά νερά (βάθος νερού άνω των 60 [m]). Αυτό γίνεται ακόμα περισσότερο αντιληπτό στο Σχήμα 1-20.
- Η απουσία στη θάλασσα δομημένου περιβάλλοντος και φυσικού ανάγλυφου λόγω εμποδίων, όπως είναι για παράδειγμα οι οροσειρές, επιτρέπουν την ανάπτυξη ανέμων χωρίς τη δημιουργία στροβιλισμών ή στη χειρότερη περίπτωση με στροβιλισμούς περιορισμένης έκτασης. Ως εκ τούτου, η περισυλλογή της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας γίνεται άμεσα και πιο αποτελεσματικά. [9]
- Οι ισχυρότεροι άνεμοι που πνέουν στις υπεράκτιες περιοχές συμβάλλουν στην παραγωγή περισσότερης ενέργειας από λιγότερες ανεμογεννήτριες.
- Στην θαλάσσια επικράτεια υπάρχουν απεριόριστες ελεύθερες εκτάσεις για εκμετάλλευση ενώ στην στεριά είναι αισθητά περιορισμένες ειδικότερα κοντά στα μεγάλα αστικά κέντρα όπου η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυξημένη.
- Η εγκατάσταση ανεμογεννητριών μακριά από την ακτή μπορεί σχεδόν να εξαλείψει ζητήματα οπτικής, αισθητικής, και υψηλού θορύβου αστικών περιοχών γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη ανεμογεννητριών αυξημένης αποδοτικότητας και μειωμένου κόστους.
- Εφόσον η εγκατάσταση και η μεταφορά γίνονται στη θάλασσα δεν τίθενται περιορισμοί μεγέθους των ανεμογεννητριών για την διέλευση από δρόμους όπως συμβαίνει με τις χερσαίες.



Σχήμα 1-20: Προφίλ ανέμου υπό διάφορες περιβαλλοντικές συνθήκες [9]

Παρά την αδιαμφισβήτητη μεγάλη ανάπτυξη των αιολικών πάρκων και της τεχνολογίας στην οποία στηρίζονται, η υπεράκτια αιολική ενέργεια συνεχίζει να αναλαμβάνει μόνο το 2% της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος. Η μεγάλη πρόκληση για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας σήμερα είναι η μείωση του κόστους. Η ανάγκη τοποθέτησης των ανεμογεννητριών σε βαθύτερα νερά, μακριά από την ακτή, με δυσκολότερες συνθήκες πυθμένα και υψηλότερα κύματα, συνέβαλαν στην αύξηση του κόστους σε βαθμό που η τεχνολογική ανάπτυξη δεν ήταν σε θέση να μειώσει. [9]

1.6 Βασικά μειονεκτήματα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας

Εκτός από σημαντικά πλεονεκτήματα, η υπεράκτια αιολική ενέργεια παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα.

- Η ενεργειακή απόδοση εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα του ανέμου. Επομένως, σε περιόδους άπνοιας ή πολύ έντονων ανέμων, οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες δεν μπορούν να παράγουν ενέργεια.
- Ο χρόνος και το κόστος κατασκευής των υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι αυξημένα. Μάλιστα το κόστος των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι 2 με 3 φορές μεγαλύτερο σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες στη στεριά.
- Το πολύ μεγάλο κόστος της εγκατάστασης και συντήρησης των θαλασσιών ανεμογεννητριών ακόμα και των ανεμογεννητριών της ξηράς οδηγούν σε ένα πολύ ακριβό ηλεκτρικό ρεύμα για το λαϊκό νοικοκυριό.
- Η απόσταση από την ξηρά στην οποία αυτά τοποθετούνται, καθώς και το βάθος του νερού, καθιστούν την εγκατάσταση και τη συντήρησή τους ιδιαίτερες απαιτητικές διαδικασίες καθώς γίνονται με πλωτά μέσα τα οποία αυξάνουν σημαντικά το κόστος.
- Η σύνδεσή τους με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει πολύ μεγάλη δυσκολία.
- Το έντονα μάλιστα διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον δεν αφήνει περιθώρια αμφιβολίας ότι πιθανές αστοχίες που θα χρειάζονται άμεση επισκευή και συντήρηση από εξειδικευμένο συνεργείο θα παρατηρούνται συχνά. [10]

Παράλληλα υπάρχουν **πιθανές επιπτώσεις στο θαλάσσιο οικοσύστημα** από τη κατασκευή και λειτουργία ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου:

- **Θαλάσσιοι οργανισμοί:** Τα θεμέλια των ανεμογεννητριών μπορεί να λειτουργήσουν, μετά από χρόνια ως τεχνητοί ύφαλοι με αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των ψαριών από την αναμενόμενη αύξηση της τροφής. Αυτή η αύξηση των πληθυσμών των ψαριών μπορεί να επιφέρει με την σειρά της αύξηση και στον αριθμό των πουλιών στη περιοχή με αποτέλεσμα τις πιθανές συγκρούσεις αυτών με τους πύργους και τα πτερύγια των ανεμογεννητριών.
- **Μεταναστευτικά πουλιά:** Εκτός από τις πιθανές συγκρούσεις με τα διάφορα μέρη των ανεμογεννητριών, τα πουλιά ίσως να χρειάζονται περισσότερη ενέργεια να καταναλώσουν για να αποφύγουν τις ανεμογεννήτριες και να διατηρήσουν τον προσανατολισμό τους. Επίσης, ο υποχρεωτικός φωτισμός των ανεμογεννητριών κατά την διάρκεια της νύχτας είναι πιθανό να επιφέρει αποπροσανατολισμό των πουλιών.
- **Πιθανή αλλαγή του φυσικού περιβάλλοντος και μείωση των ενδιατημάτων:** Η υποθαλάσσια θεμελίωση, τα διάφορα συστήματα αγκίστρωσης, τα υλικά προστασίας των μερών της ανεμογεννήτριας από τη διάβρωση, τα διάφορα υλικά καθαρισμού και συντήρησής της και το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείτε από τη λειτουργία της, είναι πιθανό να προκαλέσουν μείωση του βένθους του θαλάσσιου οικοσυστήματος με αντίκτυπο βέβαια σε όλη τη τροφική αλυσίδα του οικοσυστήματος. Άρα λοιπόν ενδεχομένως, αυτή η παρέμβαση να προκαλέσει αλλαγή στο φυσικό περιβάλλον και υποβάθμιση των ενδιατημάτων των θαλάσσιων οργανισμών.
- **Θαλάσσιες μεταφορές:** Η δημιουργία μεγάλων υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι πιθανό να έχει επιπτώσεις στις θαλάσσιες μεταφορές γιατί όπως είναι λογικό τα πλοία θα πρέπει να χαράξουν νέες πορείες για να αποφύγουν τις ανεμογεννήτριες και ενδεχομένως αυτό να επιφέρει επιπρόσθετο κόστος. Επίσης το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας πιθανότατα να επηρεάζει τα ραντάρ των πλοίων άλλα και τον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας.
- **Θόρυβος:** Η περιστροφή της έλικας της ανεμογεννήτριας παράγει θόρυβο που ίσως να επηρεάσει τους θαλάσσιους οργανισμούς. [11]

1.7 Γενικά χαρακτηριστικά θαλάσσιων ανεμογεννητριών – Αρχή λειτουργίας

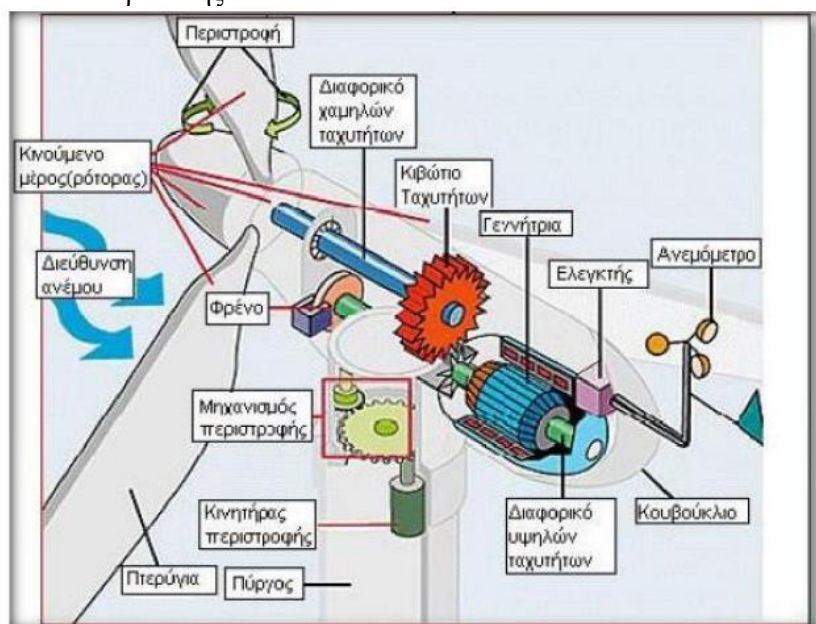
Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες αποτελούν μια εξέλιξη των ανεμογεννητριών της στεριάς, των οποίων η κατασκευή είναι αρκετά διαδεδομένη, με αποτέλεσμα να αποτελούν μια από τις κύριες μορφές παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Τα κύρια μηχανολογικά μέρη μιας τυπικής θαλάσσιας ανεμογεννήτριας καθώς και η αρχή λειτουργίας της παρουσιάζονται παρακάτω.

Ο βασικός τρόπος λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την εκμετάλλευση του ανέμου. Τα πτερύγια (blades) της ανεμογεννήτριας περιστρέφονται γύρω από έναν οριζόντιο άξονα στο ύψος του δρομέα. Η περιστροφική κίνηση των πτερυγίων θέτει σε λειτουργία ένα στέλεχος που καταλήγει στο κιβώτιο ταχυτήτων μέσα στην άτρακτο. Το κιβώτιο των ταχυτήτων αυξάνει την περιστροφική ταχύτητα της ηλεκτρικής γεννήτριας που μετατρέπει την κινητική (στροφοκίνητη) ενέργεια σε ηλεκτρική με τη βοήθεια ενός μαγνητικού πεδίου. Πιο συγκεκριμένα, η ισχύς του ρέοντος ανέμου που μπορεί να δεσμευτεί από την κίνηση του δρομέα της ανεμογεννήτριας εξαρτάται ως επί το πλείστον από την ταχύτητα του ανέμου (είναι ανάλογη με την ταχύτητα του ανέμου εις τον κύβο). [10]

Η ανεμογεννήτρια αποτελείται από τρία βασικά μέρη, κάθε ένα από τα οποία αποτελούνται από άλλα επιμέρους δομικά στοιχεία. Τα τρία βασικά δομικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας είναι τα εξής:

- Νασέλλα – Κουβούκλιο
- Πύργος
- Βάση

Στο ακόλουθο Σχήμα 1-21 απεικονίζεται πιο αναλυτικά η δομή μιας τρίπτερης ανεμογεννήτριας στο εσωτερικό της.



Σχήμα 1-21: Κύρια μηχανολογικά μέρη ανεμογεννήτριας [12]

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά τα βασικά μηχανολογικά και ηλεκτρικά εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας. Είναι εύκολο να διακρίνει κάποιος τον άξονα χαμηλών στροφών που συνδέεται με το κιβώτιο ταχυτήτων και αυτό με το ρότορα της γεννήτριας. Η πλήμνη είναι βάση στήριξης των πτερυγίων και η ένωση τους με τον δρομέα. Η γεννήτρια συνδέεται με ένα μετασχηματιστή και έκτοτε στο δίκτυο. Υπάρχουν και άλλα στοιχεία που μπορεί να προσέξει κανείς, όπως τον ανεμοδείκτη και το ανεμόμετρο που βοηθάνε στον έλεγχο και την προσαρμογή της ανεμογεννήτριας ανάλογα με το περιβάλλον που επικρατεί.

- 1. Νασέλλα:** Η νασέλλα αποτελεί το ογκώδες οριζόντιο τμήμα που είναι τοποθετημένο στην κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας και στο οποίο εφάπτεται ο στροφέας. Η νασέλλα περιλαμβάνει το σύστημα μετάδοσης (κιβώτιο ταχυτήτων), τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, τη γεννήτρια, τον ελεγκτή και την πέδη.
- 2. Κινούμενο μέρος (ρότορας):** Αποτελεί ίσως το σημαντικότερο μέρος για τη σχεδίαση του όλου συστήματος. Ο ρότορας αποτελεί το στρεφόμενο μέρος της μηχανής, το άκρο του οποίου είναι τύπου έλικας. Η περιστροφή των πτερυγίων ενός δρομέα οριζοντίου άξονα οφείλεται στη συνδυασμένη δύναμη της άνωσης και της πίεσης που ασκείται, όταν οι μάζες του αέρα προσπίπτουν στα πτερύγια. Για τη μέγιστη αξιοποίηση αυτής της δύναμης απαιτείται κατάλληλος σχεδιασμός, στη μορφή των πτερυγίων, στη στρέψη τους ως προς τον άξονα στήριξης τους (κλίση) και στην ελικοειδή διάταξη τους (βήμα). Τα πτερύγια συνήθως κατασκευάζονται από ενισχυμένο πολυεστέρα. Στόχος είναι να βρεθεί ένας βέλτιστος συνδυασμός των διάφορων παραμέτρων που συνθέτουν το δρομέα: ταχύτητα περιστροφής, διάμετρος δρομέα, αριθμός πτερυγίων, κατανομή πλάτους πτερυγίου, κατάλληλη αεροτομή ή αεροτομές. Το κριτήριο επιλογής για το συνδυασμό αυτό, είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Τέλος η πλήμνη του δρομέα αποτελεί το σημείο στο οποίο στερεώνονται τα πτερύγια και κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο.
- 3. Πτερύγια:** Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες αποτελούνται από δύο ή τρία πτερύγια. Η κίνηση του ανέμου πάνω από τα πτερύγια προκαλεί την περιστροφή τους και μέσω ενός κεντρικού άξονα μετατρέπει την κίνηση του ανέμου σε κυκλική κίνηση στην ανεμογεννήτρια. Το βασικό χαρακτηριστικό των πτερυγίων είναι το αεροδυναμικό τους σχήμα, που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοσή τους. Τα σύγχρονα πτερύγια κατασκευάζονται από ελαφρύ πλαστικό ενισχυμένο με γυαλί, ενώ μικρότερου μεγέθους πτερύγια κατασκευάζονται από αλουμίνιο ή λεπτά στρώματα ξύλου.
- 4. Διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων:** Το διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων συνδέει την κεφαλή του ρότορα με το κιβώτιο ταχυτήτων. Το διαφορικό περιέχει σωλήνες για το υδραυλικό σύστημα ώστε να μπορεί να λειτουργήσει το αεροδυναμικό φρένο.
- 5. Σύστημα μετάδοσης κίνησης:** Το σύστημα μετάδοσης δίνει τη κίνηση από το δρομέα (χαμηλές στροφές), στην ηλεκτρογεννήτρια (υψηλές στροφές). Συνδέει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής από 30-60 περιστροφές το λεπτό [rpm] σε 1200- 1500 [rpm], δηλαδή την ταχύτητα περιστροφής που απαιτείται από τις περισσότερες γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Οι μηχανικοί ερευνούν προς την κατεύθυνση ανεμογεννητριών «άμεσης ώθησης» (“direct-drive”) οι οποίες λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και δεν χρειάζονται κιβώτιο ταχυτήτων.
- 6. Διαφορικό υψηλών ταχυτήτων:** Ο άξονας υψηλής ταχύτητας συνδέεται μεταξύ του συστήματος μετάδοσης και της γεννήτριας. Το σύστημα μετάδοσης κινεί τον άξονα και αυτός με τη σειρά του κινεί τη γεννήτρια παρέχοντάς της υψηλή ταχύτητα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το διαφορικό είναι εξοπλισμένο με ένα δισκόφρενο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Το μηχανικό φρένο χρησιμοποιείται σε περίπτωση που το αεροδυναμικό φρένο υποστεί βλάβη ή η ανεμογεννήτρια επισκευάζεται.
- 7. Ηλεκτρική γεννήτρια:** Ο μηχανισμός αυτός παράγει την ηλεκτρική ενέργεια όταν υπάρχει ικανοποιητικός αέρας για να περιστρέψει τα πτερύγια. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται στο επόμενο στάδιο (είτε για αποθήκευση, είτε στο σύστημα διανομής, είτε για άμεση χρήση) χρησιμοποιώντας καλωδίωση.
- 8. Σύστημα πέδησης:** Αποτελεί ένα δισκόφρενο, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί μηχανικά, ηλεκτρικά ή υδραυλικά με σκοπό να σταματήσει το στροφέα σε καταστάσεις που ενέχουν κίνδυνο έκτακτης ανάγκης. Σε περιπτώσεις εργασιών συντήρησης, ο στροφέας σταματά να περιστρέφεται με τη βοήθεια ενός μηχανικού δισκοφρένου. Τα δισκόφρενα εφαρμόζονται αφού έχει μειωθεί ήδη η ταχύτητα του στροφέα με ηλεκτρομαγνητική πέδηση, καθώς τα μηχανικά φρένα θα φθαρθούν εύκολα εάν εφαρμοστούν για να σταματήσουν τον στροφέα από τη πλήρη ταχύτητα.

9. **Ελεγκτής:** Η βασική λειτουργία του ελεγκτή είναι να δίνει εντολές στον κινητήρα παρεκτροπής σχετικά με το πόσο και προς τα που να στρέψει τη νασέλλα, έτσι ώστε ο στροφέας να βρίσκεται πάντα κόντρα στη ροή του ανέμου. Ανάλογα με τα δεδομένα που λαμβάνει από το ανεμόπτερο, ενεργοποιεί τη λειτουργία του στροφέα για ταχύτητες ανέμου 8-16 μιλίων την ώρα, ενώ για ταχύτητες μεγαλύτερες από 65 μίλια ανά ώρα σταματά τη λειτουργία του στροφέα, λόγω κινδύνου υπερθέρμανσης της γεννήτριας. Επιπλέον ο ελεγκτής καταγράφει διάφορες παραμέτρους της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας όπως είναι η τάση, το ρεύμα, η συχνότητα, η θερμοκρασία της νασέλλας και της γεννήτριας, το επίπεδο υδραυλικής πίεσης και το επίπεδο δόνησης. Σε κάθε περίπτωση επιλοκής, π.χ. υπερθέρμανση του κιβωτίου ταχυτήτων ή της γεννήτριας, σταματά αυτόματα την ανεμογεννήτρια και καλεί τον υπολογιστή του ελεγκτή της ανεμογεννήτριας μέσω μιας τηλεφωνικής σύνδεσης.
10. **Μηχανισμός και κινητήρας περιστροφής:** Ο μηχανισμός περιστροφής της ανεμογεννήτριας ή αλλιώς yaw drive είναι η αιτία που στρέφεται ο δρομέας της ανεμογεννήτριας απέναντι στον αέρα. Η ανεμογεννήτρια θεωρείται ότι έχει σφάλμα περιστροφής, αν ο δρομέας δεν είναι κάθετος στη διεύθυνση του ανέμου. Ο μηχανισμός περιστροφής ελέγχεται από ηλεκτρονικό ελεγκτή ο οποίος αντιλαμβάνεται τη διεύθυνση του ανέμου χρησιμοποιώντας τον ανεμοδείκτη.
11. **Ανεμόμετρο και ανεμοδείκτης:** Το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης χρησιμοποιούνται για να μετρούν την ένταση και τη διεύθυνση του ανέμου. Τα ηλεκτρικά σήματα του ανεμόμετρου χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να αρχίσει την λειτουργία της όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια ελάχιστη τιμή.
12. **Πύργος:** Ο πύργος είναι το τμήμα της ανεμογεννήτριας πάνω στον οποίο στηρίζεται η νασέλλα και ο στροφέας. Το ύψος της ανεμογεννήτριας αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα κατά το σχεδιασμό των ανεμογεννητριών του τύπου του οριζόντιου άξονα. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει με το ύψος, οι πιο υψηλοί πύργοι επιτρέπουν την παραγωγή περισσότερου ηλεκτρικού ρεύματος. Η μεταβολή της ταχύτητας με το ύψος, που ονομάζεται διάτμηση του ανέμου είναι εντονότερη κοντά στην επιφάνεια της γης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο διπλασιασμός του ύψους του πύργου αυξάνει τις αναμενόμενες ταχύτητες του ανέμου κατά 10% και την αντίστοιχη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κατά 34%. Ο διπλασιασμός του ύψους του πύργου απαιτεί βέβαια και αντίστοιχο διπλασιασμό της διαμέτρου και επομένως και των κατασκευαστικών υλικών που απαιτούνται, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο και το κόστος κατασκευής. Πάνω στον πύργο στερεώνεται η ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Ο πύργος είναι συνήθως μεταλλικός, σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα (μπετόν), ενώ το ύψος του είναι τέτοιο, ώστε ο αέρας που προσπίπτει στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας να έχει ομαλή ροή και όχι τυρβώδη. Έτσι, μειώνεται ο θόρυβος στο ελάχιστο. Δύο είναι οι κύριοι τύποι πύργων που έχουν επικρατήσει, ο σωληνωτός κι ο τύπου δικτύωματος.
13. **Πίνακας ελέγχου:** Βρίσκεται συνήθως τοποθετημένος στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει κι ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία της.
14. **Μονάδα ψύξης:** Η μονάδα ψύξης περιέχει ένα ηλεκτρικό ανεμιστήρα που χρησιμοποιείται για να ψύχει την ηλεκτρική γεννήτρια. Επιπλέον περιέχει μια μονάδα ψύξης με λάδι η οποία χρησιμοποιείται για να ψύχει το λάδι στο κιβώτιο ταχυτήτων. Μερικές ανεμογεννήτριες έχουν υδρόψυκτες γεννήτριες.
15. **Υδραυλικό σύστημα:** Το υδραυλικό σύστημα χρησιμοποιείται για να επαναφέρει τα αεροδυναμικά φρένα της ανεμογεννήτριας. [12]

Τα κύρια λειτουργικά χαρακτηριστικά της είναι:

- Ταχύτητα εκκίνησης (cut-in wind speed): Η ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια ξεκινά να παράγει ισχύ. Αυτή η ταχύτητα είναι διαφορετική και προφανώς μεγαλύτερη από την ταχύτητα που απαιτείται για την περιστροφή των πτερυγίων.

- Ταχύτητα αποκοπής (cut-out wind speed): Η ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια παύει την λειτουργία της για να αποφύγει τον κίνδυνο υπερφόρτωσης.
- Ονομαστική ισχύς (Nominal Power): Είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παραχθεί από την ανεμογεννήτρια.
- Ονομαστική ταχύτητα (Nominal Speed): Είναι η ταχύτητα κατά την οποία η ανεμογεννήτρια παράγει την ονομαστική ισχύ.

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες αρχίζουν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια για μέση ταχύτητα ανέμου 3-4 [m/s], μεγιστοποιούν την απόδοσή τους για ταχύτητα ανέμου 15 [m/s], ενώ σταματούν τη λειτουργία τους για ταχύτητες 25 [m/s] και άνω. Επομένως, καθοριστικής σημασίας είναι η επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης. Η ταχύτητα του εδάφους παρόλα αυτά μεταβάλλεται συνεχώς εξαιτίας των χαρακτηριστικών του εδάφους, της θερμοκρασίας και των καιρικών συνθηκών, με αποτέλεσμα τα φορτία που ασκούνται στα πτερύγια όταν περιστρέφονται να μεταβάλλονται διαρκώς καθιστώντας δύσκολη το βέλτιστο σχεδιασμό τους.

Ωστόσο, δεν πρόκειται για μια συνηθισμένη κατασκευή πολιτικού μηχανικού. Συμπεριφέρεται διαφορετικά, ανάλογα με τις διάφορες καταστάσεις λειτουργίας της (αδρανής, σε κατάσταση παραγωγής ενέργειας κ.τ.λ.), και υποβάλλεται σε μεταβλητά φορτία (φορτία ανέμου, κυμάτων, θαλάσσιων ρευμάτων). Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού έχουν υιοθετηθεί διάφορα είδη διαμόρφωσης του φορέα στήριξης και της θεμελίωσης μιας ανεμογεννήτριας, κυρίως ανάλογα με το βάθος της κατασκευής το οποίο καθορίζει το μέγεθος των ασκούμενων υδροδυναμικών φορτίων. Επιπλέον, δεδομένου ότι η δομική συμπεριφορά μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι μη-γραμμική και επηρεάζεται από αβεβαιότητες και αλληλεπιδράσεις, οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες μπορούν να χαρακτηριστούν ως σύνθετα δομικά συστήματα. [10]

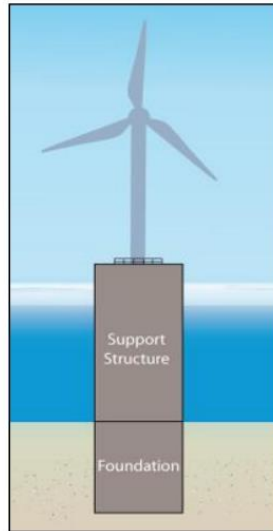
1.8 Είδη φορέων στήριξης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας

Οι παρακάτω παράγραφοι που αφορούν την επεξήγηση των ειδών φορέων στήριξης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας έχουν ληφθεί από τη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Ανδρέα Μπέντα με θέμα: "Φορτία, ανάλυση, συμπεριφορά και δομοστατικός σχεδιασμός θαλάσσιων ανεμογεννητριών". [13]

Ένα σημαντικό θέμα όσον αφορά τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι η κατάλληλη επιλογή του φορέα στήριξης και του είδους της θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας που σχετίζονται κυρίως με το βάθος της θάλασσας, τα χαρακτηριστικά του εδάφους αλλά και με οικονομικά θέματα. Η συνολική κατασκευή στήριξης του δρομέα της ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει:

- Τον πύργο της ανεμογεννήτριας (tower)
- Τον φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας (support structure)
- Τη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας (foundation)

Η θεμελίωση είναι το τμήμα της κατασκευής που βρίσκεται μέσα στο έδαφος ή το μέρος της κατασκευής που διατηρεί το φορέα στήριξης σταθερό στη θέση του στο πυθμένα της θάλασσας (Σχήμα 1-22). Η κατασκευή πάνω από τον πυθμένα ονομάζεται φορέας στήριξης και περιλαμβάνει και το κομμάτι μετάβασης (transition piece).



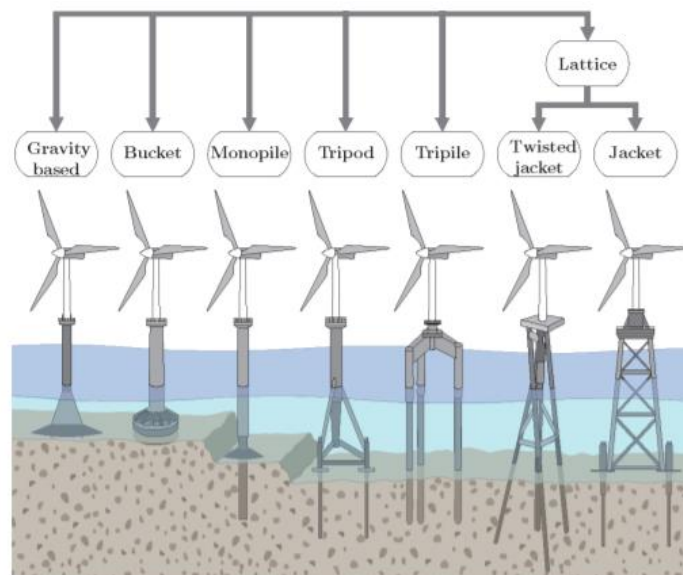
Σχήμα 1-22: Θεμελίωση και δομή στήριξης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας [13]

Τα κυριότερα είδη των φορέων στήριξης που θεμελιώνονται στο έδαφος είναι τα εξής:

- Φορέας στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου
- Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου
- Φορέας στήριξης μορφής δικτυώματος

Τα κυριότερα είδη θεμελιώσεων είναι τα εξής:

- Θεμελίωση μέσω εμπηγνύομενων πασσάλων
- Θεμελίωση μέσω θεμελίων βαρύτητας
- Θεμελίωση μέσω φρεατίων αναρρόφησης

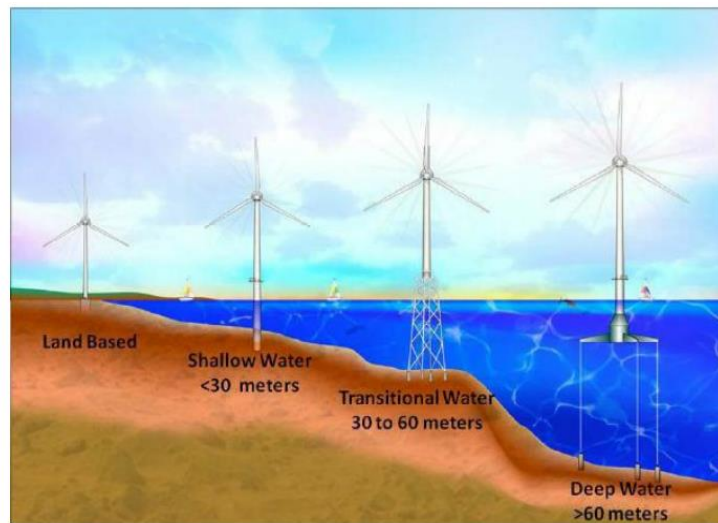


Σχήμα 1-23: Διάφορα είδη φορέων στήριξης και θεμελιώσεων στον πυθμένα θαλάσσιας ανεμογεννήτριας [14]

Αν το βάθος της θάλασσας θεωρείται η βασική παράμετρος επιλογής της δομής υποστήριξης (η οποία περιλαμβάνει τη θεμελίωση και το φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας) της ανεμογεννήτριας μια γενική κατά προσέγγιση κατάταξη μπορεί να είναι η εξής:

- **Φορέας στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου** (monopile) που θεμελιώνεται στο πυθμένα της θάλασσας μέσω εμπηγνύομενου πασσάλου, θεμελίων βαρύτητας και φρεατίων αναρρόφησης για βάθη έως 30 [m].
- **Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου** (tripod) που θεμελιώνεται στο πυθμένα της θάλασσας μέσω εμπηγνύομενων πασσάλων για βάθη από 20 έως 50 [m].

- **Φορέας στήριξης μορφής δικτυώματος (jacket)** που θεμελιώνεται στο πυθμένα της θάλασσας μέσω εμπηγνυόμενων πασσάλων για βάθη από 30 έως 60 [m].
- **Πλωτήρες** και πλατφόρμες που συνδέονται με το πυθμένα της θάλασσας μέσω καλωδίων για βάθη μεγαλύτερα από 60 [m].

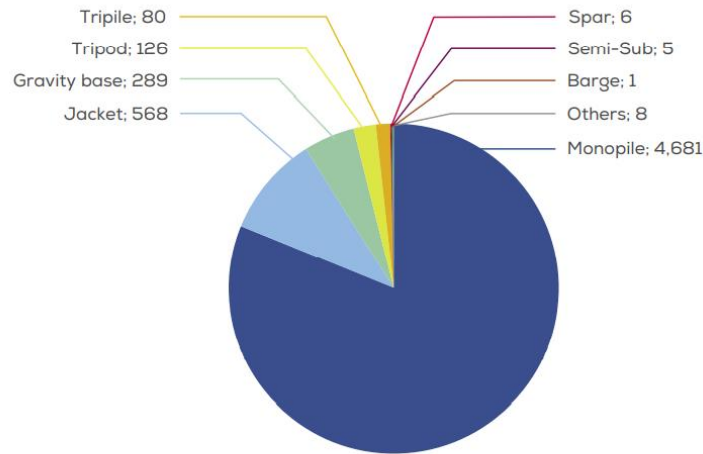


Σχήμα 1-24: Διατάξεις έδρασης υπεράκτιων ανεμογεννητριών ανάλογα με το βάθος πυθμένα [9]

1.8.1 Φορέας στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου

Ένα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι το μονοπάσσαλο σύστημα το οποίο αποτελείται από έναν μεταλλικό πάσσαλο κοίλης κυκλικής διατομής ο οποίος εμπηγνύεται με δόνηση ή υδραυλικό σφυρί μέσα στο έδαφος. Η διάμετρος, το πάχος και το μήκος έμπηξης του πασσάλου καθορίζονται από το βάθος της θάλασσας, τα όρια αντοχής και λειτουργικότητας της ανεμογεννήτριας. Η συχνή χρήση του εν λόγω συστήματος οφείλεται κυρίως στην απλότητα του σχεδιασμού και της κατασκευής ενός τέτοιου συστήματος καθώς και στην σημαντική τεχνογνωσία και εμπειρία που υπάρχει παγκοσμίως πάνω σε τέτοιου είδους συστήματα. Σύμφωνα με στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Αιολικής Ενέργειας (E.W.E.A), το 80% του συνόλου των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών μέχρι το 2020 θεμελιώθηκαν με μονοπάσσαλο (Σχήμα 1-25). Αποτελεί ιδανικό τρόπο θεμελίωσης υπεράκτιων ανεμογεννητριών για βάθη έως 30 [m]. Αντίθετα σε μεγαλύτερα βάθη η κατασκευή γίνεται πιο ασταθής εξαιτίας των σημαντικών υδροδυναμικών φορτίων που της ασκούνται και επομένως προτιμάται κάποιο άλλο σύστημα θεμελίωσης. [15]

Cumulative number of foundations installed by substructure type⁷

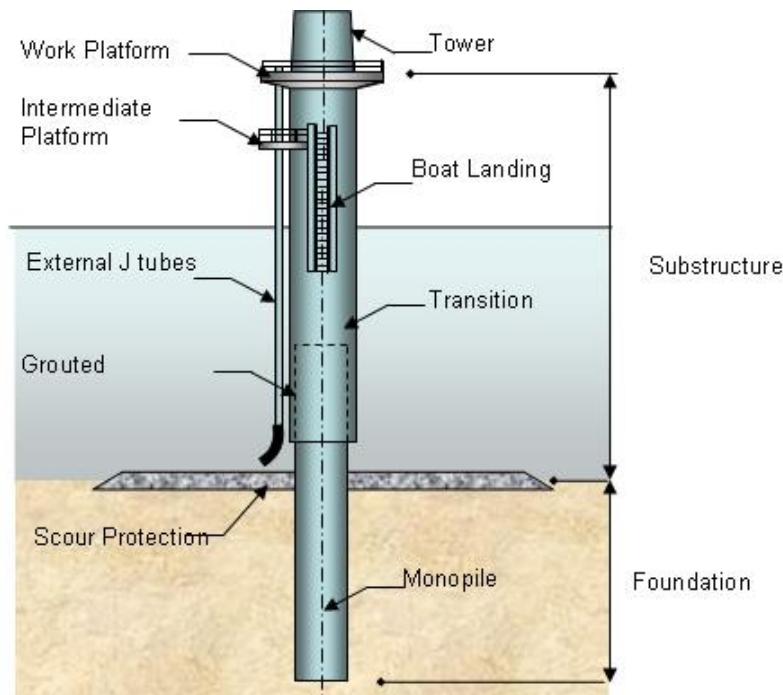


Source: WindEurope

6. Shares are calculated according to the actual number of individual foundations installed in 2020. Where the project developers contracted more than one company to manufacture, and where the respective shares (in case of consortia/joint venture) were not specified, foundations installed were split in equal part between the partners.
7. This includes all foundations installed with and without grid connection by the end of 2020.

Σχήμα 1-25: Αθροιστικός αριθμός ανεμογεννητριών που έχουν εγκατασταθεί ανά τύπο δομής υποστήριξης [15]

Το μονοπάσσαλο σύστημα (Σχήμα 1-26) είναι το μοναδικό στο οποίο ο πάσσαλος αποτελεί ταυτόχρονα την θεμελίωση και τον φορέα στήριξης της ανεμογεννήτριας. Όπως προαναφέρθηκε ο πάσσαλος εμπεγνύεται στο έδαφος με την χρήση υδραυλικής σφύρας (driven piles – Σχήμα 1-27) η οποία ασκεί σημαντικό θλιπτικό φορτίο στην κεφαλή του πασσάλου, τέτοιο ώστε να υπερνικήσει την τριβή που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην ανάγκη ύπαρξης ενός τμήματος μετάβασης (transition piece) το οποίο τοποθετείται στην κορυφή του πασσάλου και εξασφαλίζει τη σύνδεση μεταξύ του φορέα στήριξης και του πύργου της ανεμογεννήτριας χωρίς απόκλιση από την κατακόρυφο. Η σύνδεση αυτή επιτυγχάνεται με την ύπαρξη φλάντζας στην κορυφή του κομματιού μετάβασης και την χρήση κοχλιών.



Σχήμα 1-26: Φορέας στήριξης μορφής monopile [16]

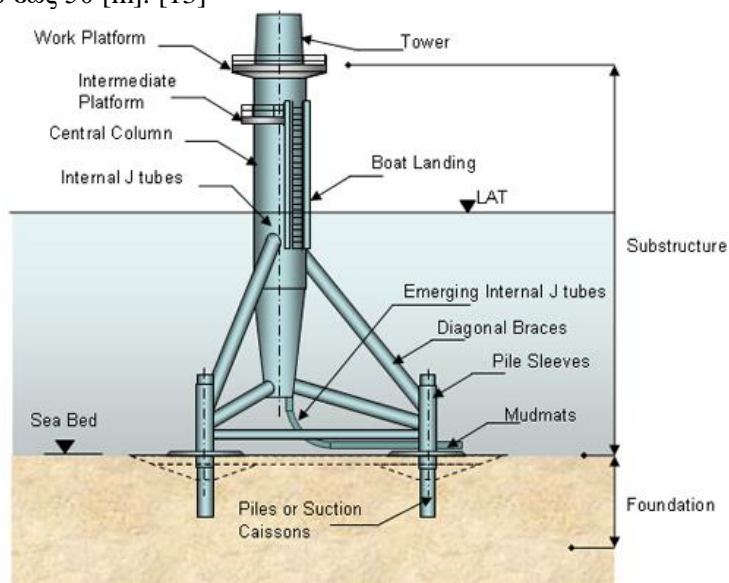
Από την άλλη μεριά το κομμάτι μετάβασης αποτελεί το πιο αδύναμο τμήμα της κατασκευής αφού συνδέεται με τον πάσσαλο με τσιμέντο ή ειδικά ενέματα. Τα παραπάνω υλικά πλήρωσης πρέπει να εξασφαλίζουν πολύ ισχυρή σύνδεση μεταξύ των μελών ώστε τα φορτία να μεταφέρονται από τον πύργο στο κομμάτι μετάβασης και από εκεί στον πάσσαλο και στη συνέχεια στο έδαφος. Εξαιτίας της δυναμικής και ανακυκλιζόμενης φύσης των φορτίων στα οποία υπόκειται η κατασκευή τα εν λόγω ενέματα ενδέχεται να χάσουν μέρος της αντοχής τους. Επομένως απαιτείται συστηματικός έλεγχος και αντικατάσταση τους όταν χρειασθεί. [13]



Σχήμα 1-27: Υδραυλικό σφουρί πασσάλων [17]

1.8.2 Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου

Ο φορέας στήριξης μορφής τριπόδου (Σχήμα 1-28) και (Σχήμα 1-29) χρησιμοποιείται σπάνια στη περίπτωση των θαλάσσιων ανεμογεννητριών. Η κατασκευή αποτελείται από μια κεντρική κολώνα πάνω στη οποία στηρίζεται ο πύργος της ανεμογεννήτριας, διαγώνιους βραχίονες και τρία υποστηρικτικά στοιχεία (pile sleeves) τα οποία συνδέονται με τρεις εμπηγνυόμενους πασσάλους μέσω ειδικών ενεμάτων. Ο φορέας στήριξης μορφής τριπόδου παρέχει μεγάλη ακαμψία και σταθερότητα της κατασκευής έναντι ανατροπής. Αυτό τη καθιστά κατάλληλη επιλογή για μεγαλύτερα βάθη πυθμένα από την περίπτωση του φορέα στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου. Η επιλογή της συγκεκριμένης δομής προτείνεται για βάθη από 20 έως 50 [m]. [13]



Σχήμα 1-28: Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου [16]

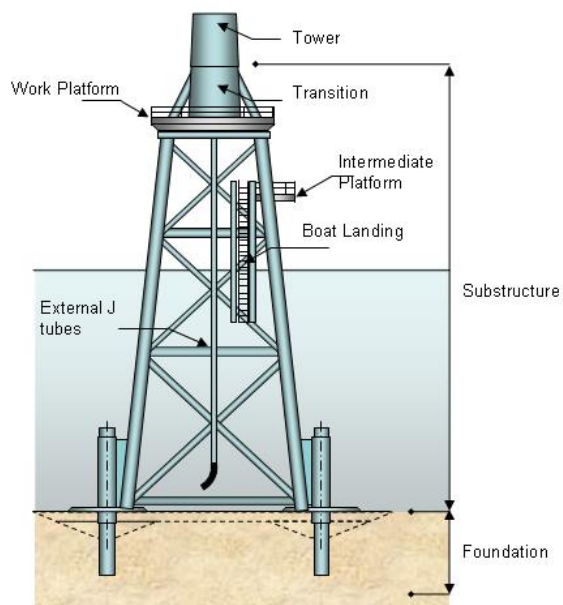
Η πίεση που ασκεί το νερό στη κατασκευή είναι μικρότερη από τη περίπτωση του μεμονωμένου πασσάλου λόγω των μικρότερων διαμέτρων των μελών του τριπόδου, ωστόσο λόγω των περισσότερων μελών τις κατασκευής αυξάνεται και η επιφάνεια προσβολής της από τα κύματα. Σε σύγκριση όμως με το φορέα στήριξης μορφής δικτυώματος το τρίποδο είναι πιο ευάλωτο στα φορτία των κυμάτων λόγω των μεγαλύτερων διαμέτρων των χαλύβδινων σωλήνων. Επίσης η κύρια σύνδεση μεταξύ του τριπόδου και της κεντρικής κολώνας αποτελεί μια πρόκληση για τους μηχανικούς μιας και η συγκεκριμένη σύνδεση είναι επιρρεπής σε κόπωση και περίπλοκη στο σχεδιασμό. Η διάμετρος και το μήκος των εμπηγνυόμενων πασσάλων του τριπόδου είναι αρκετά μικρότερες από τα αντίστοιχα μεγέθη του φορέα στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου. [13]



Σχήμα 1-29: Φορέας στήριξης μορφής τριπόδου [18]

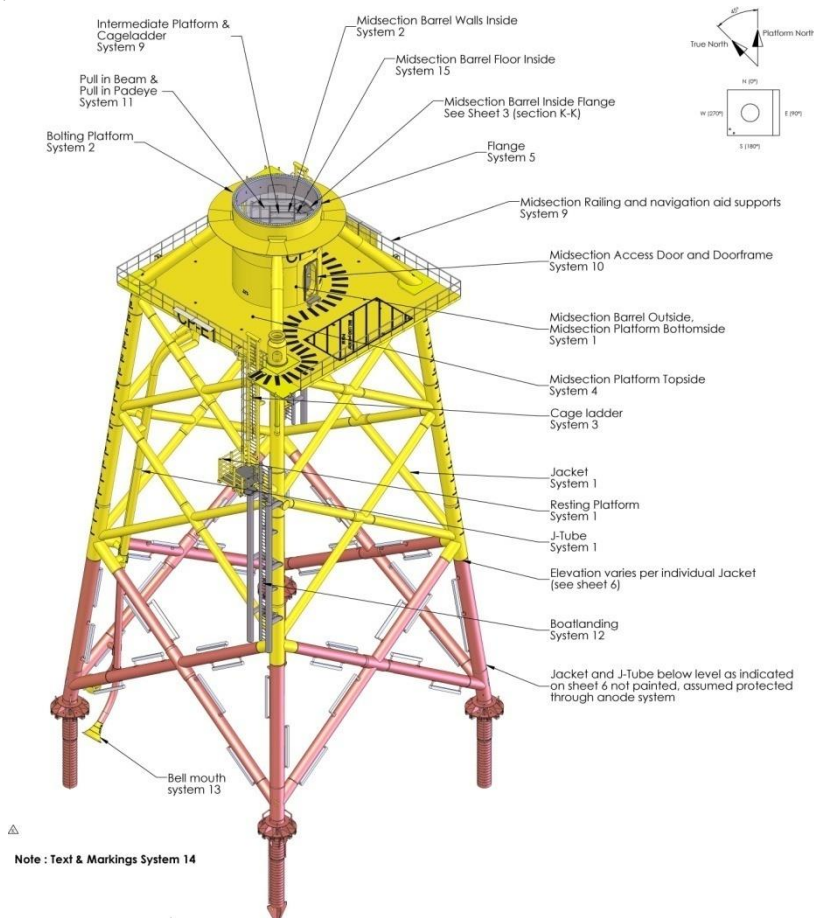
1.8.3 Φορέας στήριξης μορφής μεταλλικού δικτυώματος (jacket)

Για να καταστεί εφικτή η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε μεγαλύτερα βάθη, άρχισαν να ερευνώνται νέες μορφές φορέων στήριξης. Έτσι ο φορέας στήριξης μορφής δικτυώματος (Σχήμα 1-30) εισήλθε στο τομέα των θαλάσσιων ανεμογεννητριών αυξάνοντας τα όρια εγκατάστασης τους. Μέχρι το 2007 οι φορείς στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου και θεμελίωσης μέσω επιφανειακών θεμελίων εφαρμόζονταν για βάθη έως 30 [m]. Με την είσοδο των δικτυωμάτων τα όρια εγκατάστασης αυξήθηκαν από τα 30 στα 60 [m]. Ο φορέας στήριξης προσκολλάται στο πυθμένα της θάλασσας μέσω εμπηγνυόμενων πασσάλων οι οποίοι συνδέονται με το δικτύωμα με τη βοήθεια ειδικών στοιχείων σύνδεσης (pile sleeves). Η σύνδεση μεταξύ των εμπηγνυόμενων πασσάλων και των στοιχείων σύνδεσης γίνεται μέσω ειδικών ενεμάτων.



Σχήμα 1-30: Φορέας στήριξης μορφής δικτύωματος - jacket [16]

Το δικτύωμα αποτελείται από τρία ή τέσσερα βασικά μέλη τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω διαγώνιων συνδέσμων (Σχήμα 1-30). Οι διατομές όλων των στοιχείων είναι κοίλες κυκλικές. Τα βασικά μέλη συνδέονται με τους διαγώνιους συνδέσμους μέσω συγκολλήσεων οι οποίες αποτελούν ένα κρίσιμο στοιχείο της κατασκευής μιας και είναι ευάλωτες σε καταπονήσεις λόγω κόπωσης. Η διάμετρος των κύριων μελών της κατασκευής μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 1.4 [m] ενώ η διάμετρος των διαγώνιων μελών είναι μικρότερη από 1.0 [m].

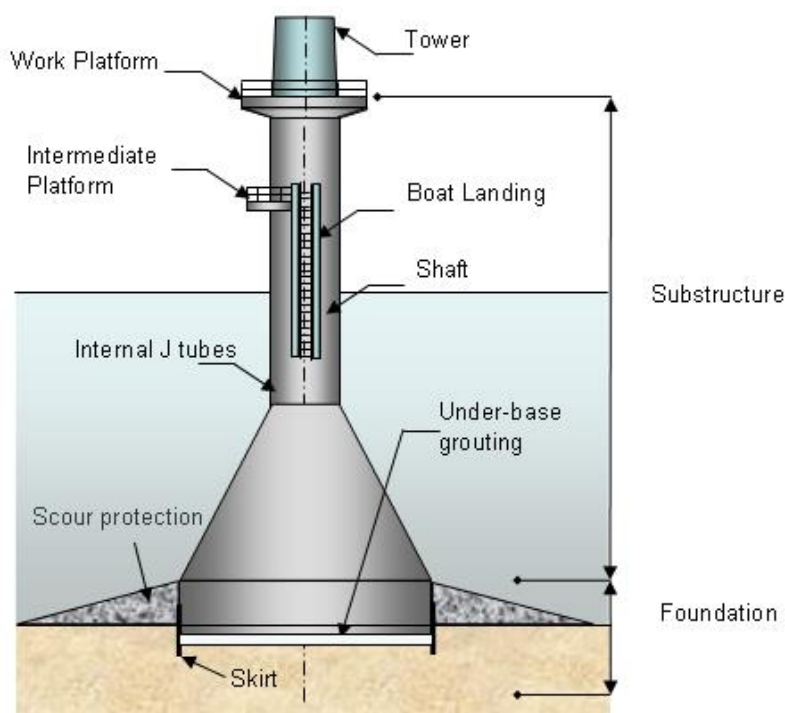


Σχήμα 1-31: Λεπτομέρεια του φορέα στήριξης μορφής δικτύωματος και του μεταβατικού κομματιού [19]

Όπως και στο φορέα στήριξης μορφής μεμονωμένου πασσάλου έτσι και στη περίπτωση του δικτυώματος απαιτείται ένα κομμάτι μετάβασης πάνω στο οποίο θα στηριχτεί ο πύργος της ανεμογεννήτριας (Σχήμα 1-31). Το κομμάτι μετάβασης αποτελείται από μια φαρδιά κορυφή με ύψος μέχρι 9 [m] ενώ περιλαμβάνει και μια πλατφόρμα εργασίας ακριβώς κάτω από τον πύργο. [13]

1.8.4 Θεμελίωση της κατασκευής μέσω θεμελίου βαρύτητας

Η αρχή της επιφανειακής θεμελίωσης (Σχήμα 1-32) και (Σχήμα 1-33) είναι ότι το βάρος του θεμελίου συγκρατεί σταθερή τη κατασκευή απέναντι στα φορτία του ανέμου και των κυμάτων. Επειδή τα φορτία των κυμάτων αυξάνονται και με το βάθος του πυθμένα, το βάρος της θεμελίωσης αυξάνει σημαντικά με την αύξηση του βάθους της θάλασσας. Για την εγκατάσταση της επιφανειακής θεμελίωσης απαιτείται προετοιμασία του πυθμένα με χαλίκι και τσιμέντο το κόστος της οποίας αυξάνει και αυτό σημαντικά ανάλογο με το βάθος του πυθμένα. Το θεμέλιο κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η επιλογή του συγκεκριμένου τρόπου θεμελίωσης είναι πολύ οικονομική για βάθη έως 10 [m] σε σύγκριση με άλλους τύπους θεμελίωσης. Το κόστος της επιφανειακής θεμελίωσης είναι ανάλογο του τετραγώνου του βάθους πράγμα που κάνει απαγορευτική τη συγκεκριμένη επιλογή για μεγάλα βάθη πυθμένα. [13]



Σχήμα 1-32: Θεμελίωση της ανεμογεννήτριας μέσω θεμελίου βαρύτητας [15]



Σχήμα 1-33: Θεμέλιο βαρύτητας [20]

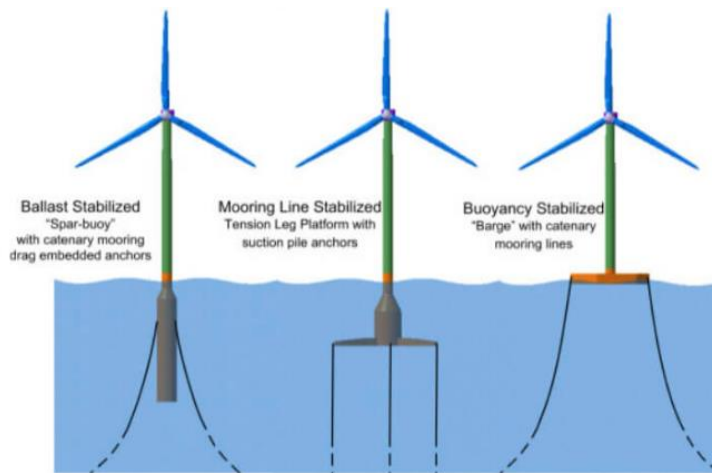
1.8.5 Πλωτές Ανεμογεννήτριες

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η χρήση ανεμογεννητριών με θεμελίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένες περιοχές με ρηχά νερά (βάθη μικρότερα των 60 [m]) τα οποία όμως θα έχουν και το κατάλληλο αιολικό δυναμικό. Έτσι, ενώ ορισμένες χώρες της Ευρώπης αρχίζουν να αξιοποιούν τις δυνατότητες που παρέχει η ανοιχτή θάλασσα (Ηνωμένο Βασίλειο, Γερμανία κ.α.), οι περισσότερες (κυρίως οι Μεσογειακές) αδυνατούν να βρουν τοποθεσίες κατάλληλες για θαλάσσια αιολικά πάρκα, είτε λόγω βαθυμετρίας είτε λόγω μη κατάλληλων συνθηκών σε θέσεις με ρηχά νερά.

Σύμφωνα με έρευνες της Ε.Ε., τα αιολικά αποθέματα σε βάθη μεγαλύτερα των 60 [m] αντιστοιχούν στο 80% των συνολικών, δηλαδή σε περίπου 4000 [GW] [WindEurope, 2017]. Κρίνεται επιτακτική λοιπόν η ανάγκη εύρεσης λύσης, προκειμένου οι ανεμογεννήτριες να μπορούν να εγκατασταθούν όσο το δυνατόν σε μεγαλύτερα βάθη. [20]

Οι πλωτές ανεμογεννήτριες έχουν κοινή αρχή λειτουργίας, διάταξη και κύρια μέρη με τις θεμελιωμένες με τη διαφορά ότι, ο πυλώνας τους τοποθετείται σε μία πλωτή πλατφόρμα στήριξης. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες πλατφόρμας στήριξης :

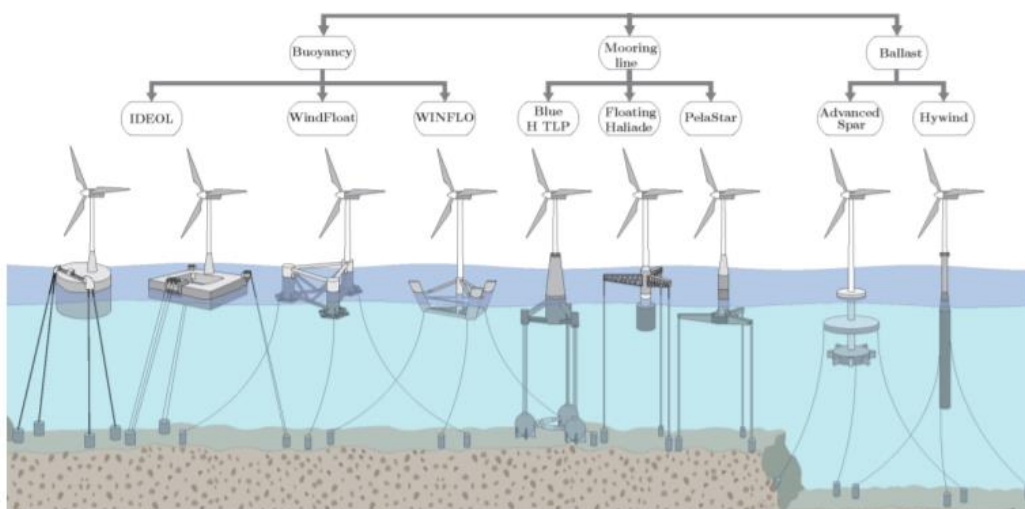
1. **Σημαντήρας τύπου ιστού (Spar-Buoy):** Αποτελείται από ένα κυλινδρικό στέλεχος και προσδένεται μέσω κατάλληλου συστήματος καλωδίων (ή αλυσίδων) αγκύρωσης (catenary mooring system). Το σύστημα αγκύρωσης κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της θέσης της πλατφόρμας και όχι τόσο για την ευστάθεια της.
2. **Ημιβυθισμένη Πλατφόρμα (Semi-Submersible platform):** Αποτελείται από κατακόρυφα υποστυλώματα (columns) τα οποία συνδέονται με οριζόντιους πλωτήρες (pontoon) και προσδένεται μέσω συστήματος αγκύρωσης. Και εδώ το εν λόγω σύστημα κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της θέσης της πλατφόρμας και όχι τόσο για την ευστάθεια της.
3. **Πλατφόρμες με τεταμένους τένοντες (Tension-leg platform, TLP):** Αποτελείται από κατακόρυφα υποστυλώματα (columns) τα οποία συνδέονται με οριζόντιους πλωτήρες (pontoon) και προσδένεται με τεταμένα καλώδια τα οποία αγκυρώνονται στο πυθμένα.



Σχήμα 1-34: Είδη πλωτών ανεμογεννητριών [21]

Η ευστάθεια των πλωτών αυτών κατασκευών έναντι των δυναμικών φορτίσεων που δέχονται, δύναται να επιτευχθεί με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

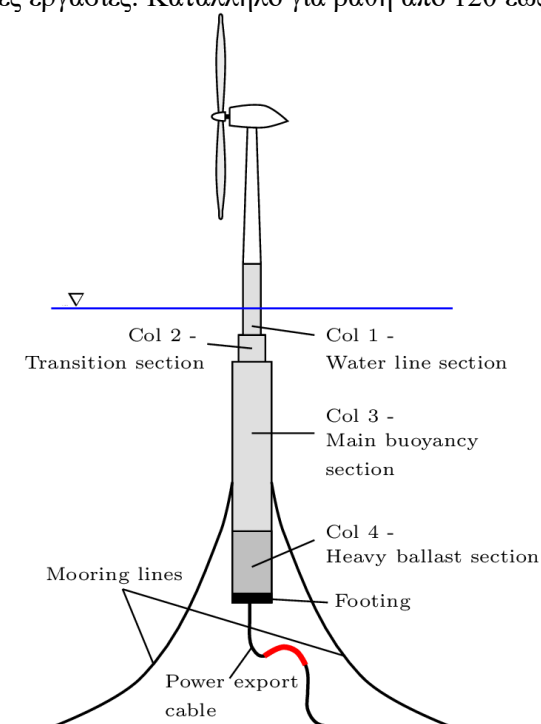
- **Με χρήση έρματος (Ballast Stabilized):** Τοποθετώντας έρμα (σκυρόδεμα, χαλίκι κ.α.) στον πυθμένα της πλατφόρμας επιτυγχάνεται η μετακίνηση του κέντρου βάρους προς τα κάτω. Με τον τρόπο αυτό, όταν η ανεμογεννήτρια κινηθεί από τη θέση ισορροπίας της, η δύναμη άνωσης, που έχει φορά προς τα πάνω, με τη δύναμη του βάρους, που έχει φορά προς τα κάτω, δημιουργούν μία ροπή επαναφοράς. Η ευστάθεια των σημαντήρων τύπου ιστού (Spar-Buoy) εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη συγκεκριμένη μέθοδο ευστάθειας.
- **Με χρήση καλωδιώσεων αγκύρωσης (mooring line stabilized):** Οι πλατφόρμες TLP είναι εκ φύσεως ασταθείς καθώς το κέντρο βάρους τους βρίσκεται υψηλότερα από το κέντρο άνωσης. Μέσω της χρήση τεταμένων παρέχεται η απαιτούμενη ροπή επαναφοράς και μεταφέρονται τα φορτία της ανεμογεννήτριας απευθείας στις αγκυρώσεις του πυθμένα, που βρίσκονται εκτός του κεντρικού άξονα του πυλώνα.
- **Μέσω της άνωσης (Buoyancy Stabilized):** Γίνεται αξιοποίηση της υδροστατικής ακαμψίας του όγκου του νερού που έχει εκτοπισθεί από τους βυθισμένους πλωτήρες. Αυτό παρέχει την απαιτούμενη ακαμψία επαναφοράς που απαιτείται για τη συνολική ευστάθεια της κατασκευής. Οι ημιβυθισμένες πλατφόρμες λειτουργούν με αυτόν τον τρόπο. [10]



Σχήμα 1-35: Διάφορα είδη πλωτών ανεμογεννητριών [14]

1.8.5.1 Σημαντήρας τύπου ιστού (Spar Buoy)

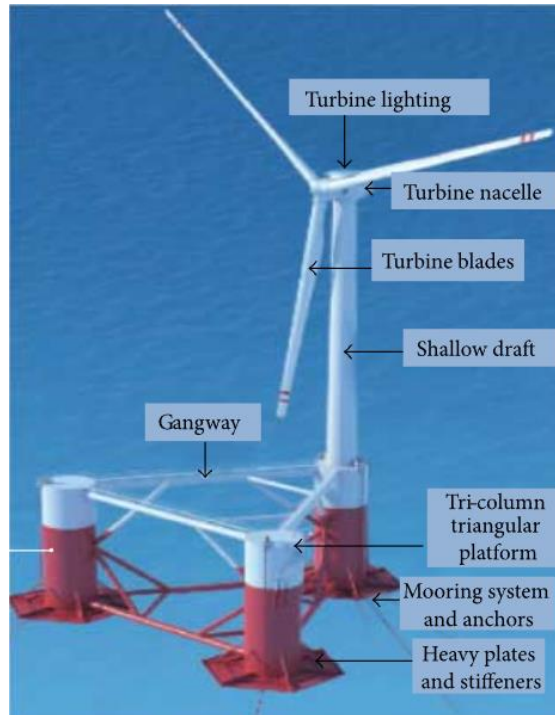
Η συγκεκριμένη πλατφόρμα είναι η πιο διαδεδομένη εκ των πλωτών καθώς συνδυάζει τον σχετικά απλό σχεδιασμό με εκ την φύσεως ευστάθειάς της, η οποία επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της προσθήκης έρματος. Λόγω του μικρού εμβαδού της ίσαλου επιφάνειάς της, η δυναμική της ευστάθεια επηρεάζεται λιγότερο από τους κυματισμούς. Το σύστημα αγκύρωσης τοποθετείται σχετικά εύκολα ενώ το χαρακτηριστικό του είναι ότι δεν είναι τεντωμένο, αλλά δημιουργεί μια καμπύλη, καθώς κύριο ρόλο έχει να διατηρεί την ανεμογεννήτρια εντός ορισμένου χώρου. Το μεγάλο μειονέκτημα της είναι η ρυμούλκηση, λόγω του μεγάλου της βυθίσματος. Πιο συγκεκριμένα, όταν δεν έχει τοποθετηθεί το έρμα στο ναυπηγείο, υπάρχει δυσκολία στην ταυτόχρονη πλήρωση της με έρμα και τοποθέτησης της σε κατακόρυφη θέση, ενώ εάν το έρμα τοποθετηθεί στο ναυπηγείο δυσκολεύει τη μεταφορά της. Επίσης, η τοποθέτηση της πτερωτής στην άτρακτο πρέπει να γίνει στην τελική τοποθεσία εγκατάστασης, γεγονός που αυξάνει το συνολικό κόστος της κατασκευής μιας και απαιτεί εξειδικευμένες θαλάσσιες εργασίες. Κατάλληλο για βάθη από 120 έως 700 [m].



Σχήμα 1-36: Πλωτή ανεμογεννήτρια με πλατφόρμα στήριξης σημαντήρας τύπου ιστού (Spar Buoy) [22]

1.8.5.2 Ημιβυθισμένη Πλατφόρμα (Semi-Submersible platform)

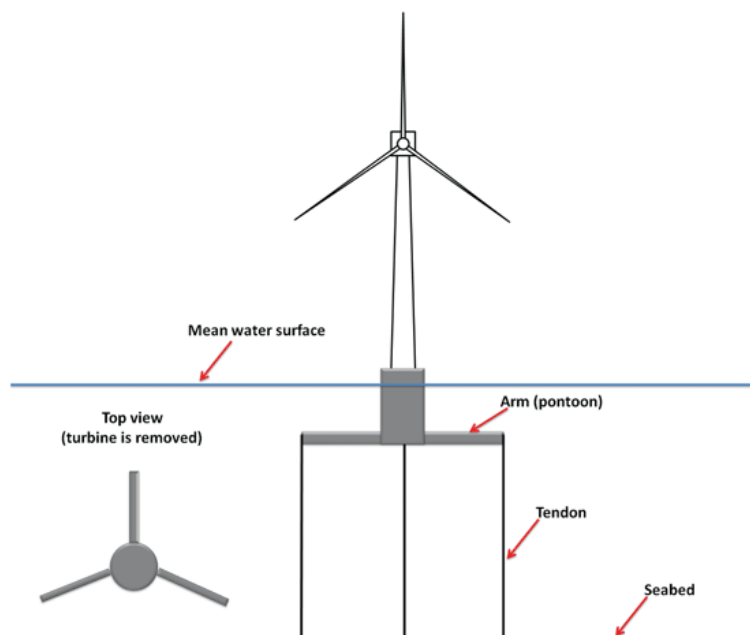
Η ημιβυθισμένη πλατφόρμα είναι ίσως η πιο συμφέρουσα επιλογή όσον αφορά τις κεφαλαιουχικές δαπάνες και αυτό γιατί οι περισσότερες εργασίες (συμπεριλαμβανομένης της τοποθέτησης της πτερωτής στην άτρακτο) μπορούν να γίνουν στο λιμάνι-ναυπηγείο. Έτσι, μειώνονται δραστικά τα μεγάλα κόστη των θαλάσσιων εργασιών. Ακόμα, λόγω του μικρού βυθίσματος, είναι πολύ εύκολη η ρυμούλκησης της μέχρι το σημείο εγκατάστασής της. Ωστόσο, ο περίπλοκος σχεδιασμός σε συνδυασμό με την εκ φύσεως μεγάλη μάζα της δυσχεραίνει σε μεγάλο βαθμό την κατασκευή της στο λιμάνι-ναυπηγείο και προφανώς αυξάνει το αρχικό κόστος της. Το σύστημα αγκύρωσης είναι το ίδιο με τη Spar-Buoy. Κατάλληλο για βάθη από 100 [m] και πάνω. [10]



Σχήμα 1-37: Πλωτή ανεμογεννήτρια με ημιβυθισμένη πλατφόρμα (Semi-Submersible platform) [23]

1.8.5.3 Πλατφόρμες με τεταμένους τένοντες (Tension-leg platform, TLP)

Η πλατφόρμα της μορφής TLP αποτελείται από μία μικρή και σχεδόν πλήρως βυθισμένη πλατφόρμα και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η ευστάθειά της επιτυγχάνεται από τους τεταμένους τένοντες, την καθιστούν πολύ ελαφρύτερη σε σχέση με τις δύο που προαναφέραμε. Αυτό σημαίνει ότι το αρχικό κόστος σχεδιασμού είναι σημαντικά μικρότερο από τις άλλες δύο. Ωστόσο, η εξάρτηση ολόκληρου του συστήματος από τους τένοντες είναι και η achίλλειος πτέρνα του. Αφενός επειδή απαιτείται μία περίπλοκη, και κατά συνέπεια πιο δαπανηρή, σύνδεση στο πυθμένα προκειμένου να μπορεί το σύστημα αγκύρωσης να παραλάβει όλα τα φορτία της ανεμογεννήτριας και αφετέρου επειδή πιθανή αστοχία κάποιου θα μπορούσε να οδηγήσει σε ολική κατάρρευση της ανεμογεννήτριας. [10]



Σχήμα 1-38: Πλωτή ανεμογεννήτρια σε πλατφόρμα με τένοντες (Tension-leg platform, TLP) [24]

1.9 Χωροθέτηση υπεράκτιου αιολικού πάρκου

Η χωροθέτηση θαλάσσιων αιολικών πάρκων, είτε αυτά είναι πλωτά είτε είναι σταθερού θεμελίου, δεν είναι μία εύκολη υπόθεση, αν λάβει κανείς υπόψη την πολυπλοκότητα, τις πολυάριθμες και διαφορετικές παραμέτρους, αλλά και τους περιοριστικούς παράγοντες που σχετίζονται με την επιλογή της καταλληλότερης θέσης για την εγκατάσταση θαλάσσιων ανεμογεννητριών.

Η συνύπαρξη ποικίλων και μερικές φορές αντικρουόμενων δραστηριοτήτων στη θάλασσα, σε συνδυασμό με την ανάγκη για προστασία του οικολογικά ευάλωτου θαλάσσιου περιβάλλοντος, καθιστούν εξαιρετικά σημαντική την δημιουργία και την εφαρμογή του Θαλάσσιου Χωροταξικού Σχεδιασμού. Η ναυτιλία, η αλιεία, η εκμετάλλευση κοιτασμάτων του θαλάσσιου βυθού, ο παράκτιος τουρισμός, οι υποθαλάσσιες διασυνδέσεις, η θαλάσσια έρευνα και βιοτεχνολογία, η γαλάζια ενέργεια - που αφορά και στην συγκεκριμένη εργασία - είναι μερικοί μόνο από τους τομείς δραστηριότητας που λαμβάνουν χώρα στη θάλασσα και αποτελούν βασικούς πυλώνες της γαλάζιας ανάπτυξης.

1.9.1 Κριτήρια

Η χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών πάρκων βασίζεται στα εξής 5 κριτήρια: **ταχύτητα ανέμου, βάθος, γεωλογία βυθού, απόσταση από λιμάνια και απόσταση από υποσταθμούς του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.**

- Η **ταχύτητα του ανέμου** είναι ένας από τους πιο καθοριστικούς παράγοντες της στην λειτουργία των ανεμογεννητριών. Όπως προκύπτει από τον μαθηματικό τύπο που ακολουθεί, η ισχύς μιας αέριας δέσμης P_{air} είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου.

$$P_{air} = 0.5 * \text{airdensity} * A * V^3 \quad (1-1)$$

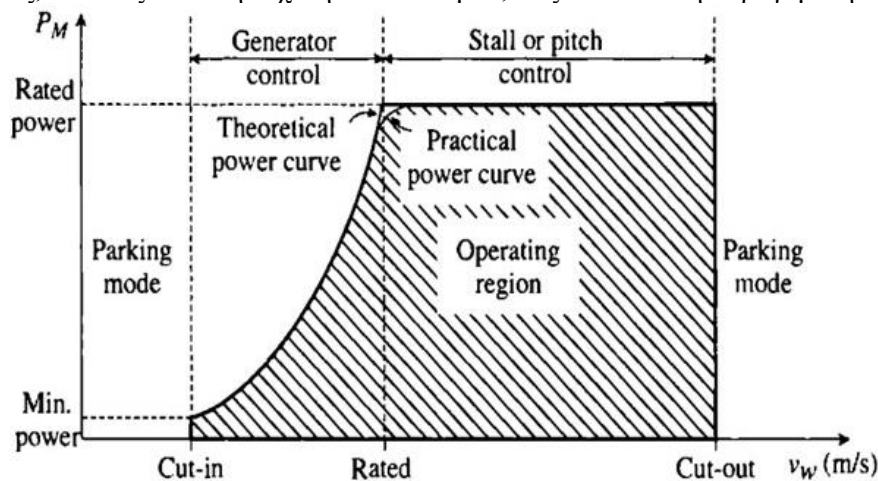
Όπου,

airdensity: η πυκνότητα του αέρα

A: η επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας και

V: η ταχύτητα του ανέμου.

Συνεπώς, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, αυξάνεται και η παραγόμενη ισχύς.



Σχήμα 1-39: Διάγραμμα καμπύλης ισχύος μιας ανεμογεννήτριας

Το παραπάνω διάγραμμα (Σχήμα 1-39) απεικονίζει την καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας. Όπως φαίνεται κι από το διαγραμματισμένο τμήμα, υπάρχει μία συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, που βρίσκεται μεταξύ δύο τιμών ταχυτήτων του ανέμου. Στις πολύ χαμηλές ταχύτητες, η μηχανή δεν λειτουργεί, αλλά και στις εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες, η μηχανή βγαίνει εκτός λειτουργίας. Επίσης, από μία συγκεκριμένη ταχύτητα και πάνω, η ισχύς της μηχανής παραμένει

σταθερή. Ενδεικτικά, μία καλή ταχύτητα ανέμου για παραγωγή ενέργειας από αιολικά πάρκα ξεκινάει από τα 8 [m/sec].

- Το επόμενο κριτήριο που συμμετέχει στην ανάλυση είναι το **βάθος πυθμένα** της περιοχής εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Το κριτήριο αυτό είναι καθοριστικό στην διαδικασία επιλογής θέσης και τύπου ανεμογεννήτριας ανάλογα με τον τρόπο θεμελίωσης, άρα και το κόστος κατασκευής. Άλλωστε, η επιδίωξη του να γίνει εφικτή η εγκατάσταση Θ.Α.Π. σε όλο και μεγαλύτερα βάθη, είναι η βασική κινητήρια δύναμη της έρευνας και της εξέλιξης στον τομέα των υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Ήδη, ένα πρόσφατο επίτευγμα της τεχνολογίας των πλωτών ανεμογεννητριών για μεγάλα βάθη, αποτέλεσε ένα κομβικό σημείο στην εξέλιξη των Θ.Α.Π. Ο λόγος για το πρώτο πλωτό Θ.Α.Π. κοντά στο Πίτερχεντ της Σκωτίας που κατασκεύασε η εταιρία Statoil τον Ιούλιο του 2017. Οι συγκεκριμένες πλωτές ανεμογεννήτριες που βασίζονται στην τεχνολογία των πλωτών πλατφορμών εξόρυξης ορυκτών καυσίμων, ουσιαστικά επέκτειναν το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο βάθους των πλωτών ανεμογεννητριών στα 700 [m]. Αυτό σημαίνει ότι αυξάνονται κατά πολύ οι υποψήφιες περιοχές χωροθέτησης Θ.Α.Π..
- Το τρίτο κριτήριο που είναι η **απόσταση από λιμάνια**, είναι ένα από τα δύο κριτήρια εγγύτητας. Η εγγύτητα σε μεσαία και μεγάλα λιμάνια σημαίνει την ευκολία μεταφοράς των απαιτούμενων υλικών στον χώρο εγκατάστασης, αλλά και την ευκολία όσον αφορά στην προσβασιμότητα του Θ.Α.Π. για επίβλεψη και επιδιόρθωση τυχών βλαβών. Συνήθως, η συναρμολόγηση των τμημάτων της ανεμογεννήτριας πραγματοποιείται στην περιοχή του λιμανιού κι έπειτα μεταφέρονται στον χώρο εγκατάστασης. Ειδικότερα, στην περίπτωση των πλωτών κατασκευών, οι ανεμογεννήτριες συναρμολογούνται εξ' ολοκλήρου στην ξηρά και μεταφέρονται έτοιμες στον χώρο εγκατάστασης, με τη βοήθεια ειδικών ρυμουλκών πλοίων.
- Το τέταρτο κριτήριο, είναι το δεύτερο κριτήριο εγγύτητας, και αφορά στην **απόσταση από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας**. Η σύνδεση του αιολικού πάρκου με το δίκτυο, αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα στην χωροθέτηση ενός αιολικού πάρκου, τόσο στην ξηρά όσο και στη θάλασσα. Με την σύνδεση του αιολικού πάρκου στο δίκτυο, κατοχυρώνεται η δυνατότητα απορρόφησης της παραγόμενης ενέργειας. Ειδικότερα, η σύνδεση των αιολικών πάρκων με το υφιστάμενο δίκτυο περιλαμβάνει τη μετατροπή του δικτύου χαμηλής τάσης που συνδέει τις ανεμογεννήτριες μεταξύ τους, σε δίκτυο μέσης τάσης, το οποίο συνδέει το αιολικό πάρκο με έναν νέο υποσταθμό που δημιουργείται για τις ανάγκες του πάρκου. Από τον νέο υποσταθμό έως τον υφιστάμενο υποσταθμό του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μεσολαβεί το δίκτυο υψηλής τάσης, το οποίο ενώνεται με το δίκτυο υψηλής τάσης της ηπειρωτικής χώρας. Όσο μικρότερα είναι τα μήκη των καλωδίων μεταξύ των διαφόρων συνδέσεων, τόσο μικρότερο είναι και το κόστος κατασκευής. Συνεπώς, η απόσταση από τους υφιστάμενους υποσταθμούς του ηπειρωτικού συστήματος είναι καθοριστικής σημασίας για την δυνατότητα σύνδεσης και για το κόστος της κατασκευής του ενδιάμεσου δικτύου που θα ενώνει το προτεινόμενο αιολικό πάρκο με υφιστάμενο υποσταθμό. Η σύνδεση του αιολικού πάρκου με το δίκτυο είναι αναγκαία, καθότι οι τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε., δεν έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας. Συνεπώς, η ενέργεια αυτή πρέπει να διοχετεύεται κατευθείαν στο σύστημα, ειδάλλως χάνεται.
- Το πέμπτο κριτήριο αφορά στον **γεωλογικό τύπο του βυθού**. Τα ιζήματα του βυθού, ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων που τα αποτελούν κατατάσσονται σε επιμέρους κατηγορίες. Τα ιζήματα του βυθού διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα αμμώδη και τα αργιλώδη. Πέρα των ιζημάτων, υπάρχουν και τα βραχώδη εδάφη, που συναντώνται κυρίως πλησίον της ακτογραμμής. Για τα Θ.Α.Π πρώτα σε προτίμηση έρχονται τα αμμώδη εδάφη. Ακολουθούν τα αργιλώδη και τέλος τα βραχώδη. Η

συγκεκριμένη σειρά προτίμησης αφορά στην ευκολία θεμελίωσης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών στον πυθμένα. [21]

Η χωροθέτηση Θ.Α.Π. αποτελεί ένα πρόβλημα λήψης χωρικών αποφάσεων που σχετίζεται με ένα πλήθος μεταβλητών ή αλλιώς κριτηρίων πέρα από τα βασικά κριτήρια του αιολικού δυναμικού, του βάθους, της απόστασης από την ακτογραμμή, από λιμάνια και από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η αναζήτηση των βέλτιστων περιοχών για την χωροθέτηση Θ.Α.Π. απαιτεί την αξιολόγηση και τον συνδυασμό όλων των σχετικών κριτηρίων. Επιπλέον κριτήρια τα οποία χρειάζεται να λάβουμε υπόψη μας κατά την χωροθέτηση αποτελούν:

- **Περιοχές NATURA 2000**
Το Δίκτυο Natura 2000 αποτελεί ένα Ευρωπαϊκό Οικολογικό Δίκτυο περιοχών, οι οποίες φιλοξενούν φυσικούς τύπους οικοτόπων και οικοτόπους ειδών που είναι σημαντικοί σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Ειδικά στην χώρα μας που διαθέτει πλούσιο φυσικό πλούτο και παρουσιάζει μοναδική και έντονη βιοποικιλότητα πολλές είναι αυτές οι περιοχές που ανήκουν σε αυτό το δίκτυο. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι απαγορευτική η κάθε πρωτοβουλία ανάπτυξης στις περιοχές NATURA, αρκεί αυτή να μην επιβαρύνει το φυσικό περιβάλλον.
- **Γραμμές ναυσιπλοΐας**
Σημαντικό για το οικονομικό αλλά και λειτουργικό κομμάτι ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι η ύπαρξη κοντινού λιμένα. Έτσι, όχι μόνο περιορίζονται σημαντικά τα κόστη ανέγερσης και ο χρόνος κατασκευής του έργου αλλά είναι πιο εύκολη και πιο άμεση η συντήρηση ή η επισκευή κατά τη διάρκεια λειτουργίας του πάρκου. Ωστόσο ένας κοντινός λιμένας ισοδυναμεί με αυξημένη κυκλοφορία πλοίων στη γύρω περιοχή, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει ανασταλτικό παράγοντα στην επιλογή θέσης όταν η θαλάσσια περιοχή αυτή εξυπηρετεί πολλά δρομολόγια πλοίων.
- **Περιοχές ασκήσεων πολεμικού ναυτικού**
Περιοχές που έχουν επιλεγεί από το πολεμικό ναυτικό ως κατάλληλες για να διεξάγουν τις διάφορες πολεμικές ασκήσεις κρίνονται απαγορευτικές.
- **Οπτική όχληση**
Οι ανεμογεννήτριες είναι υψηλές κατασκευές και όταν η τοποθέτησή τους γίνεται κοντά στην στεριά δημιουργούν οπτική όχληση.
- **Απόσταση μεταξύ ανεμογεννητριών**
Βασικό κριτήριο χωροθέτησης των ανεμογεννητριών για σύσταση υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι η μεταξύ τους απόσταση που πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 5 διαμέτρους ρότορα, λαμβάνοντας υπόψη βεβαίως και τα στοιχεία για τις επικρατούσες διευθύνσεις του ανέμου, ώστε να μειώνονται οι απώλειες όμορου μεταξύ των ανεμογεννητριών. Σε περίπτωση που οι ανεμογεννήτριες τοποθετηθούν σε σειρά μεταξύ τους, και ο ρότορας είναι κάθετος στην κυρίαρχη διεύθυνση του ανέμου, τότε η απόσταση μεταξύ τους πρέπει να είναι τουλάχιστον 4 φορές η διάμετρος του ρότορα. [3]

1.9.2 Θ.Α.Π. στην Ελλάδα

Όσον αφορά την Ελλάδα, ο Θαλάσσιος Χωροταξικός Σχεδιασμός είναι ακόμα σε εμβρυικό στάδιο, δεδομένης της έλλειψης νομοθεσίας και σαφούς οριοθέτησης των χωρικών υδάτων και της ελληνικής Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης (Α.Ο.Ζ.). Στην Ελλάδα δεν υπάρχουν εγκατεστημένα θαλάσσια αιολικά πάρκα, όμως το ενδιαφέρον για τις ελληνικές θάλασσες είναι μεγάλο. Έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια σημαντικές ενέργειες ώστε να οριστικοποιηθεί το νομοθετικό πλαίσιο της χώρας μας για τα θαλάσσια αιολικά πάρκα βασισμένο στα πλαίσια της ευρωπαϊκής νομοθεσίας.

Μία πολύ σημαντική ενέργεια για την χωροθέτηση Θ.Α.Π. στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο υπήρξε η πρόταση του Υ.Π.ΕΝ για προκαταρκτική χωροθέτηση Θ.Α.Π. σε

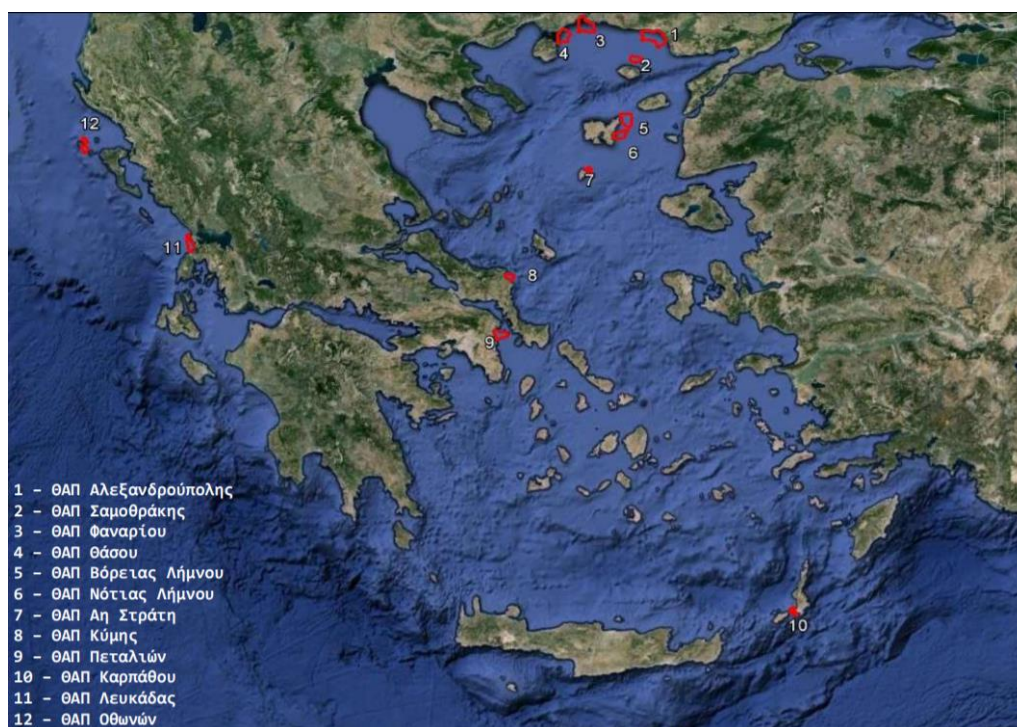
προεπιλεγμένες θέσεις για την 1^η φάση χωροθέτησης Θ.Α.Π. με χρονικό ορίζοντα 2012-2017. Οι προτεινόμενες θέσεις αφορούσαν μόνο στις εδρασμένες στον πυθμένα ανεμογεννήτριες και επιλέχθηκαν βάσει κριτηρίων που απέβλεπαν:

- στον αποκλεισμό περιοχών, όπου η ανάπτυξη θαλάσσιων πάρκων είναι ασύμβατη με άλλες χρήσεις και παραμένοντας εντός των έξι ναυτικών μιλίων.
- στον αποκλεισμό περιοχών με βάθη μεγαλύτερα από 50 [m].
- στην αποφυγή θέσεων με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.
- στην ελαχιστοποίηση της οπτικής όχλησης από τις εγκαταστάσεις.

Βάσει των παραπάνω κριτηρίων επιλέχθηκαν οι παρακάτω περιοχές:

- Άη Στράτης
- Αλεξανδρούπολης
- Θάσος
- Κάρπαθος
- Κέρκυρα
- Κρουονέρι
- Κύμη
- Λευκάδα
- Λήμνος
- Πεταλιόι
- Σαμοθράκη
- Φανάρι

Για τις συγκεκριμένες θέσεις ακολούθησε η «Εκπόνηση Μελετών για τη Στρατηγική Περιβαλλοντική Εκτίμηση του Εθνικού Προγράμματος Ανάπτυξης Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων - MIS 375406». Οι εργασίες εκπονήθηκαν από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.), από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.ΘΕ) και από την εταιρεία ENVECO. Στις εργασίες αυτές διερευνήθηκε η περαιτέρω χωρική εξειδίκευση των περιοχών εγκατάστασης ανεμογεννητριών, με βάση τα κριτήρια θέασης και επιρροής στο τοπίο, την πυκνότητα των ανεμογεννητριών και την παραγόμενη ισχύ, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τη σχέση των προτεινόμενων έργων με άλλες γειτνιάζουσες χρήσεις. [21]



Σχήμα 1-40: Προτεινόμενες θέσεις για εγκατάσταση Θ.Α.Π. στην Ελλάδα [26]

1.9.3 Χωροθέτηση της υπό μελέτη ανεμογεννήτριας

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας δεν πραγματοποιείται μελέτη χωροθέτησης αλλά σύμφωνα με μελέτη του Γεώργιου Παπαβασιλείου επιλέγουμε ως θέση εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας μας το Ακρωτήριο Καφηρέας, Νότια Εύβοια. Οι παρακάτω παράγραφοι που αφορούν την επεξήγηση της χωροθέτησης της υπό μελέτη ανεμογεννήτριας έχουν ληφθεί από τη διπλωματική εργασία του Γεώργιου Παπαβασιλείου με θέμα: "Διερεύνηση κριτηρίων επιλογής θέσεως υπεράκτιου αιολικού πάρκου". [22]

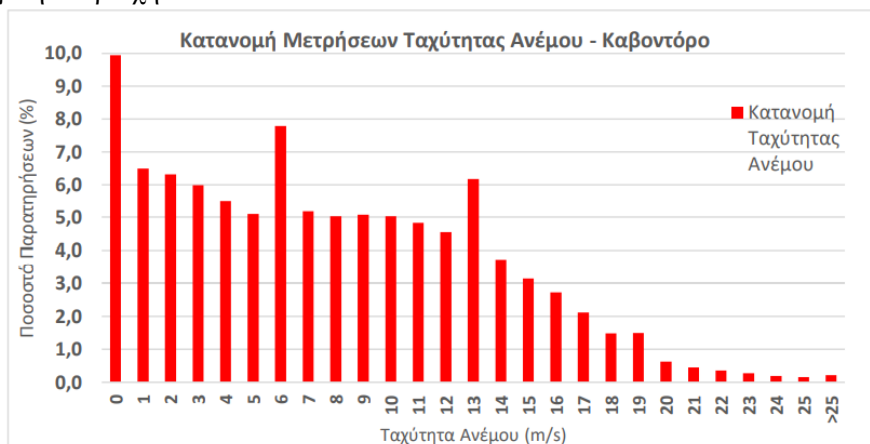
Η περιοχή που επιλέγεται για την εγκατάσταση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου βρίσκεται στην παράκτια περιοχή του Ακρωτηρίου Καφηρέα, στη Νότια Εύβοια. Το ανάγλυφο του βυθού χαρακτηρίζεται από τις έντονες κλίσεις, καθώς το ελάχιστο βάθος θεμελίωσης βρίσκεται στα 30 [m] και το μέγιστο βάθος βρίσκεται στα 60 [m]. Λόγω του βάθους του έργου, το είδος θεμελίωσης προορίζεται να είναι μορφής jacket, ενώ από γεωτεχνικής άποψης, το έδαφος είναι αμμώδες. Η απόσταση του έργου από την Ηπειρωτική Ελλάδα μετρήθηκε σε 2 [km], ενώ η έκταση της περιοχής ισούται με 40 [km²], η οποία εκτείνεται παράπλευρα της ακτογραμμής. Η περιοχή σέβεται την απόσταση μεγαλύτερη των 2000 [m] από τον λιμένα της πόλης, καθώς και 500 [m] από τον βιότοπο της Νοτίου Εύβοιας. Τέλος, απέχει τουλάχιστον 10 [km] από απαγορευμένες περιοχές των Ενόπλων Δυνάμεων και της παράπλευρης εγκατάστασης ιχθυοκαλλιέργειας, σεβόμενοι τις οικονομικές δραστηριότητες της ευρύτερης θέσης. Στο Σχήμα 1-41 παρουσιάζεται ο χάρτης βυθομετρίας στον οποίο εμφανίζονται οι ισοβαθείς καμπύλες του βυθού και με κόκκινη γραμμή ορίζεται η θέση προς κατοχύρωση.



Σχήμα 1-41: Θέση εγκατάστασης θαλάσσιας ανεμογεννήτριας - Ακρωτήριο Καφηρέας, Νότια Εύβοια [22]

Η περιοχή επιλέχθηκε για υπεράκτιο αιολικό πάρκο λόγω των ευνοϊκών ανεμολογικών στοιχείων, σύμφωνα με τα στοιχεία που λαμβάνονται από τον χάρτη αιολικού δυναμικού στον Ελλαδικό χώρο. Αυτό οδηγεί σε μικρότερες κατασκευαστικές δαπάνες και στον οικονομικότερο σχεδιασμό του έργου. Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της θεμελίωσης, θα μπορούσε να θεωρηθεί ως καλή περιοχή, καθώς το πάρκο εκτείνεται κατά μήκος της ακτογραμμής, αποφεύγοντας τα βαθιά νερά. Ύστερα από την επεξεργασία των δεδομένων (Σχήμα 1-42) που πάρθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό του Κάβο Ντόρο, ο οποίος απέχει από την περιοχή έρευνας περίπου 25 [km], παρατηρείται ότι το πλήθος των μηδενικών μετρήσεων ταχυτήτων ισούται με 9.9% του συνόλου των μετρήσεων, ποσοστό αρκετά

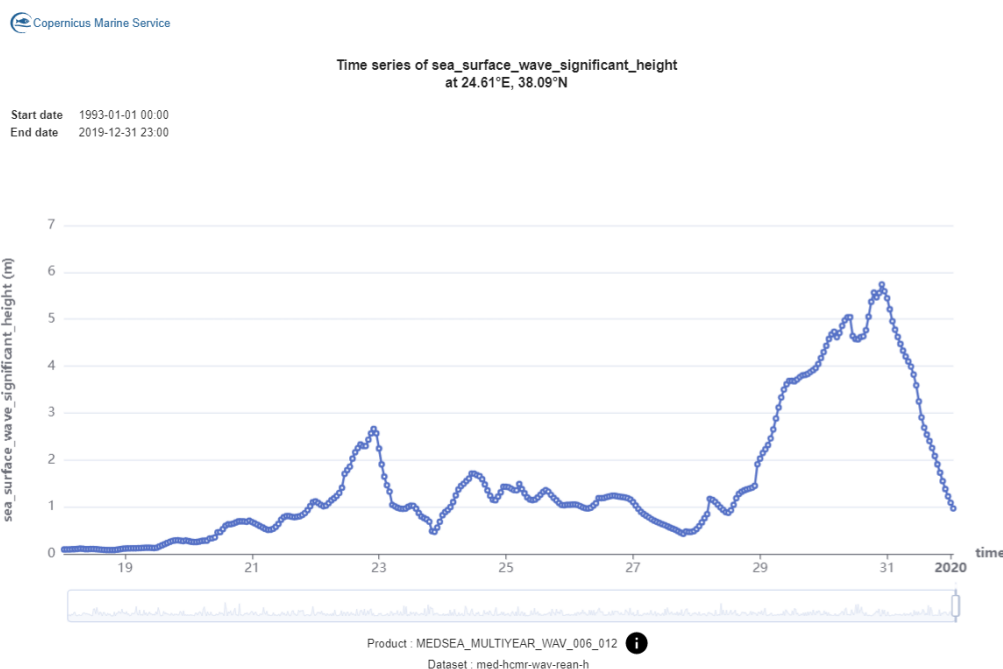
μικρότερου του 33%, που θα σήμαινε ότι είναι περιοχή με μεγάλες περιόδους άπνοιας. Εν συνεχεία, η μέση ταχύτητα ανέμου κυμαίνεται στα 8.3 [m/s], ενώ η μέγιστη ταχύτητα στο διάστημα της πενταετίας που προβλέπεται στην περιοχή του έργου φτάνει τα 38.4 [m/s]. Από τα πρώτα στοιχεία λοιπόν, γίνεται αντιληπτό πως πρόκειται για μία ενεργειακά «παραγωγική» περιοχή.



Σχήμα 1-42: Διάγραμμα κατανομής Μετρήσεων Ταχύτητας Ανέμου, περιοχή Κάβο Ντόρο [22]

1.9.4 Κυματικά Δεδομένα

Τα χαρακτηριστικά του κυματικού καθεστώτος στην εν λόγω περιοχή υπολογίστηκαν με την αξιοποίηση δεδομένων που παρέχονται από την ιστοσελίδα copernicus [23], με την μορφή χρονοσειρών και επιλέχθηκε χρονική διάρκεια 27 ετών (1993 – 2020). Συνεπώς, στην εξεταζόμενη περιοχή το μέσο μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος είναι $H_{max}=6.676$ [m] και το μέσο ελάχιστο σημαντικό ύψος κύματος είναι $H_{min}=0.021$ [m]. Αντίστοιχα για τη μέση περίοδο κυματισμού λάβαμε ως $T_{max}=9.85$ [sec] και $T_{min}=1.244$ [sec].



Σχήμα 1-43: Διάγραμμα μετρήσεων ύψους κύματος [23]

Το ζητούμενο της μη παρεμπόδισης της ναυσιπλοΐας στην περιοχή επίσης ελέγχεται με την βοήθεια του marine traffic. Παρατηρούμε στο Σχήμα 1-44 ότι στην περιοχή δεν

υπάρχει καθόλου δραστηριότητα επιβατικών ή εμπορικών πλοίων, κάτι κρίσιμο τόσο σε φάση κατασκευής όσο και σε φάση λειτουργίας του πάρκου.

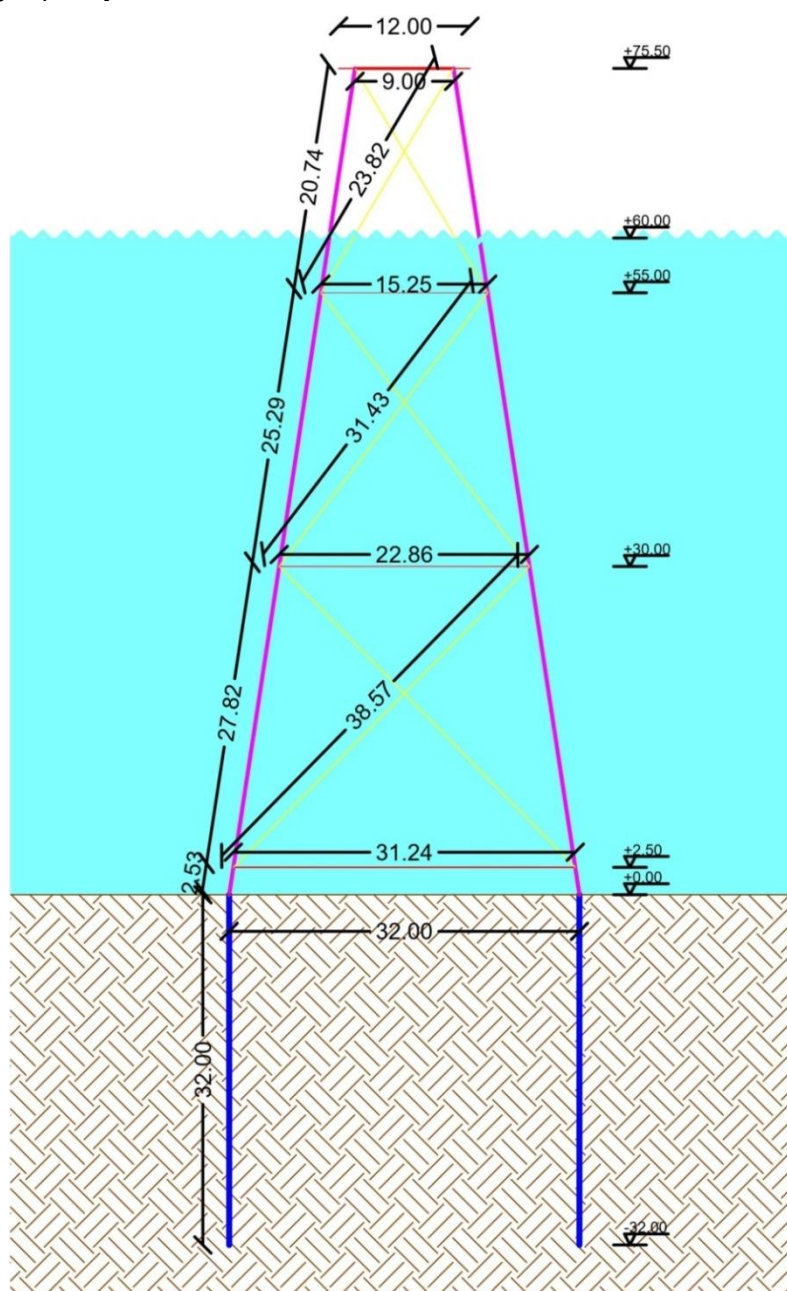


Σχήμα 1-44: Γραμμές νασιπλοΐας στην περιοχή ενδιαφέροντος [24]

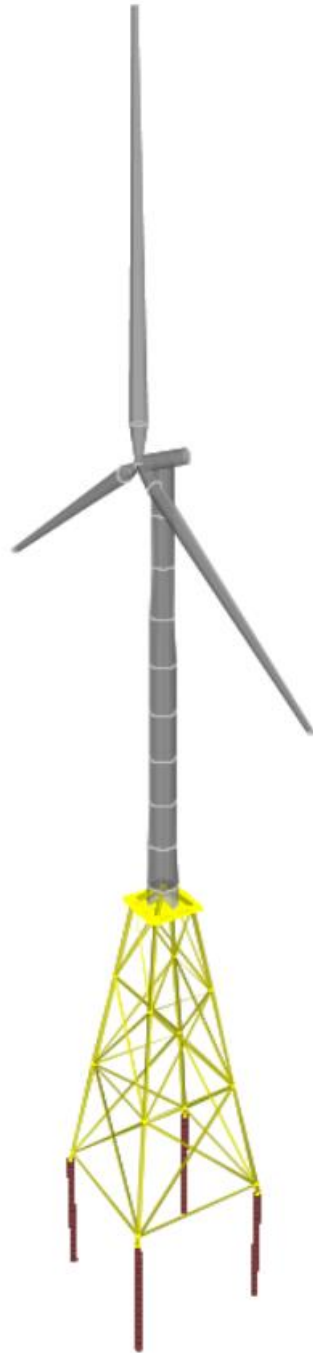
2 Μόρφωση φορέα

2.1 Περιγραφή φορέα

Η τοποθεσία εγκατάστασης του φορέα βρίσκεται στο Ακρωτήριο Καφηρέας στην περιοχή της Νότιας Εύβοιας. Η γεωμετρία της μεταλλικής κατασκευής φαίνεται σε 2D στο Σχήμα 2-1 και σε 3D στο Σχήμα 2-2. Ο φορέας διαστασιολογείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζει ασφαλή μεταφορά των φορτίων που καταπονούν την κατασκευή στην θεμελίωση. Στο πάνω μέρος του φορέα του jacket θα τοποθετηθεί πλατφόρμα η οποία επιλέχθηκε να έχει τετραγωνική κάτοψη επομένως για την ομαλότερη και καλύτερη μεταφορά των φορτίων από την ανωδομή στην θεμελίωση επιλέγεται jacket τετραγωνικής κάτοψης επίσης. Το κατώτερο επίπεδο του jacket στον πυθμένα της θάλασσας έχει διαστάσεις κατόψεως 32x32 [m²] και το ανώτερο επίπεδο έχει διαστάσεις κατόψεως 9x9 [m²]. Το συνολικό ύψος του φορέα ανέρχεται στα 75.50 [m] με βάθος πυθμένα 60 [m] και μέγιστο ύψος κύματος 6.70 [m]. [30]



Σχήμα 2-1: Η γεωμετρία της μεταλλικής κατασκευής σε 2D



Σχήμα 2-2: Η γεωμετρία της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας η οποία εδράζεται σε μεταλλική κατασκευή τύπου jacket σε 3D

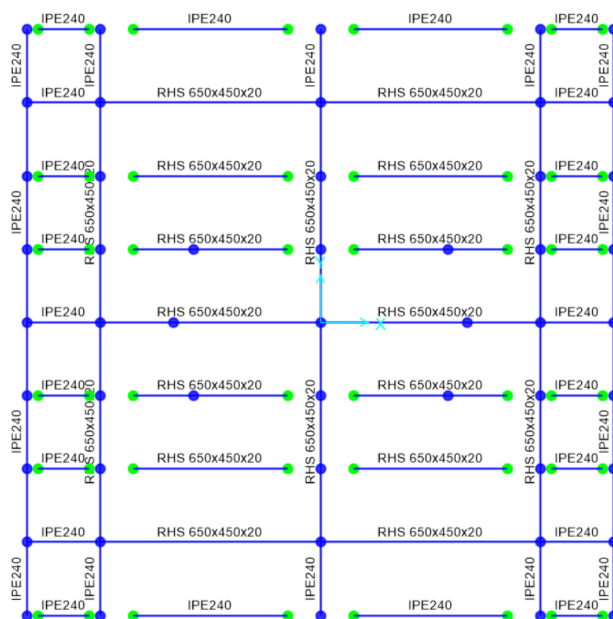
Για το jacket επιλέχθηκαν κοίλες κυκλικές διατομές για την αυξημένη αντοχή που έχουν σε διάβρωση αλλά και το υδροδυναμικό τους σχήμα. Επειδή η διάβρωση αποτελεί δυσμενή συνθήκη για μια τέτοια κατασκευή τόσο για τα μέλη του jacket που είναι εξ' ολοκλήρου στη θάλασσα, όσο και για αυτά στη μεταβατική ζώνη (splash zone), προτιμήθηκε λόγω του μικρού μέσου κύκλου ζωής των υπεράκτιων ανεμογεννητριών (25 έως 30 έτη) η χρήση αντιδιαβρωτικής βαφής των μεταλλικών στοιχείων. Η ανάπτυξη έντονης θαλάσσιας ζωής πρόκειται να συμβάλει -κατά τη διάρκεια ζωής του έργου- στη σταδιακή μεταβολή του πάχους των διατομών και κατ' επέκταση στη μεταβολή των μηχανικών τους χαρακτηριστικών. Ο φορέας μας αποτελείται από τέσσερα υποστυλώματα -"πόδια"- κοίλης κυκλικής διατομής διαμέτρου $D=813$ [mm] και πάχους τοιχώματος $t=25$ [mm] (πρότυπη διατομή). Οι χιαστοί κατακόρυφοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας διαθέτουν πρότυπη κοίλη κυκλική

διατομή, η οποία για την καλύτερη αξιοποίηση της μειώνεται πλησιάζοντας στην επιφάνεια της θάλασσας. Η διατομή των οριζόντιων δοκών είναι επίσης πρότυπη κοίλη κυκλική διατομή Πίνακας 2-1.

Πίνακας 2-1: Τελικές διατομές μελών του jacket

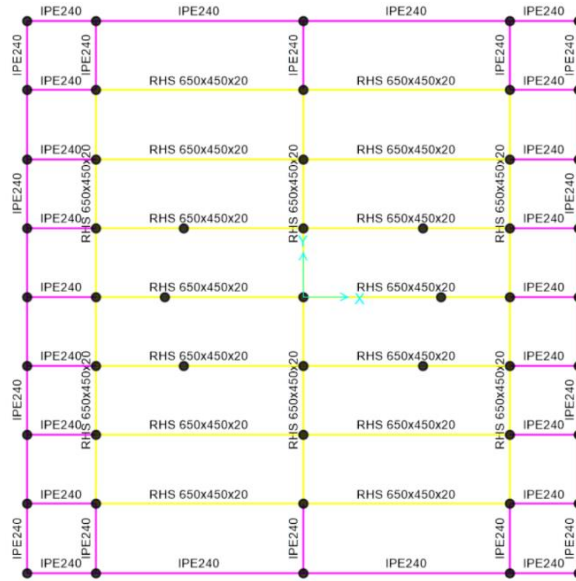
Jacket	
Υποστυλώματα - πόδια	CHS 813 x 25
Κεντρικοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας	CHS 406.4 x 16
	CHS 355.6 x 16
	CHS 323.9 x 16
Οριζόντιες δοκοί	CHS 406.4 x 16
	CHS 168.3 x 16
	CHS 139.7 x 16

Η πλατφόρμα στο πάνω μέρος του jacket έχει διαστάσεις κατόψεως 12x12 [m²] και στηρίζεται στους πυλώνες σε κάτοψη 9x9 [m²] και στη συνέχεια υπάρχει πρόβολος 1.50 [m] περιμετρικά. Η σύνδεση της ανωδομής με τον φορέα του jacket εξασφαλίζεται με την χρήση δύο κοίλων ορθογωνικών διατομών διαστάσεων 650x450x20 ανά διεύθυνση στις θέσεις όπου καταλήγουν και οι πυλώνες του jacket και μία πρόσθετη στο κέντρο της κάτοψης παράλληλα στις διευθύνσεις X και Y διαστάσεων 650x450x20 (Σχήμα 2-3). Επίσης τοποθετήθηκαν δευτερεύουσα δοκάρια με διαστάσεις 650x450x20 σε μεταξύ τους απόσταση 1.50 [m] παράλληλα με την διεύθυνση X. Η σύνδεση των δευτερευουσών δοκαριών με τις κύριες δοκούς έχει οριστεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-3 με εσωτερικές ελευθερώσεις.



Σχήμα 2-3: Κάτοψη πλατφόρμας

Το δάπεδο της πλατφόρμας αποτελείται από «κριθαρωτή» λαμαρίνα και όχι από πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος. Για την μείωση των φορτίων στην κατασκευή, επομένως δεν υπάρχει σύμμικτη λειτουργία. Για την διαστασιολόγηση του προβόλου επιλέχθηκε διατομή IPE 240.



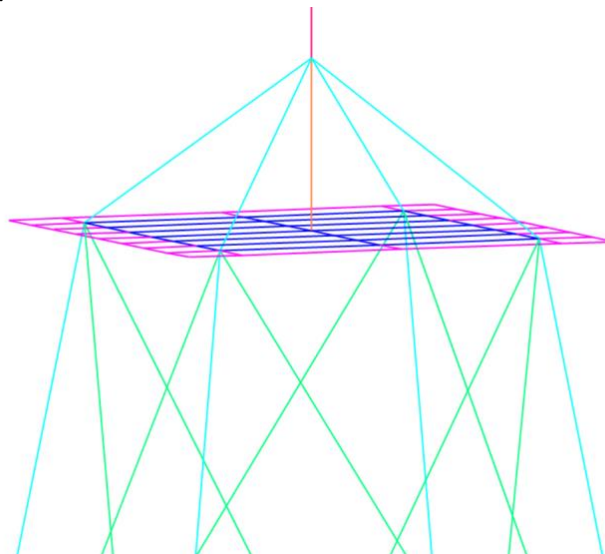
Σχήμα 2-4: Διάταξη δοκών πλατφόρμας

Πάνω στην πλατφόρμα τοποθετείται το μεταβατικό κομμάτι (transition piece) σύνδεσης του πυλώνα της ανεμογεννήτριας με τον μεταλλικό φορέα έδρασης. Ο σχεδιασμός του μεταβατικού κομματιού σύμφωνα και με Sandal Kasper [31] προσομοιώνεται με μια δομή πλαισίου τύπου πυραμίδας με διαγώνιους ενισχυτές στη βάση. Αυτή η πυραμίδα αποτελείται από ένα κεντρικό υποστύλωμα διατομής 6 [m] και μήκους 4.50 [m] και από τέσσερα διαγώνια στοιχεία διατομής 813 [mm] (Πίνακας 2-2).

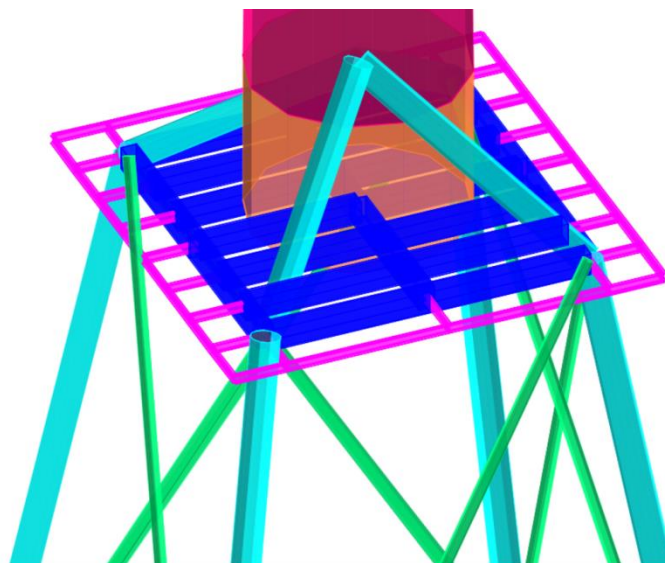
Πίνακας 2-2: Διατομές μελών στο μεταβατικό κομμάτι (transition piece)

ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΟ ΚΟΜΜΑΤΙ (transition piece)	
Κεντρικό υποστύλωμα	CHS 6000 x 27
Διαγώνιοι δοκοί	CHS 813 x 25

Το υποστύλωμα τοποθετήθηκε έτσι ώστε η μια άκρη του να συνδέεται στο κέντρο της πλατφόρμας και στην άλλη άκρη του εδράζεται ο πύργος της ανεμογεννήτριας, ενώ τα διαγώνια στοιχεία τοποθετήθηκαν έτσι ώστε να συνδέουν το πάνω μέρος του κατακόρυφου υποστυλώματος με την κορυφή των τεσσάρων ποδαριών του jacket (Σχήμα 2-5, Σχήμα 2-6). Το ύψος του μεταβατικού κομματιού είναι στα 4.50 [m] και η γωνία των διαγώνιων στοιχείων είναι 35[°].



Σχήμα 2-5: Transition piece



Σχήμα 2-6: Διάταξη δοκών μεταβατικού κομματιού και πλατφόρμας σε 3D

Αναφορικά με τον πύργο, προσομοιώνεται με κοίλες κυκλικές διατομές κωνικού σχήματος, σταθερές ανά 10 [m] ύψους και μειούμενου πάχους ανά στοιχείο. Τα χαρακτηριστικά της εξωτερικής διαμέτρου D και του πάχους της διατομής παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 2-3.

Πίνακας 2-3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πύργου ανεμογεννήτριας

ΚΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΚΩΝΙΚΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ		ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ D [m]		Πάχος t [m]
	ΑΡΧΗ	ΤΕΛΟΣ	ΑΡΧΗ	ΤΕΛΟΣ	
1	0	10	6	5.763	0.027
2	10	20	5.763	5.526	0.026
3	20	30	5.526	5.289	0.025
4	30	40	5.289	5.052	0.024
5	40	50	5.052	4.815	0.023
6	50	60	4.815	4.578	0.022
7	60	70	4.578	4.341	0.021
8	70	80	4.341	4.104	0.02
9	80	90	4.104	3.87	0.019

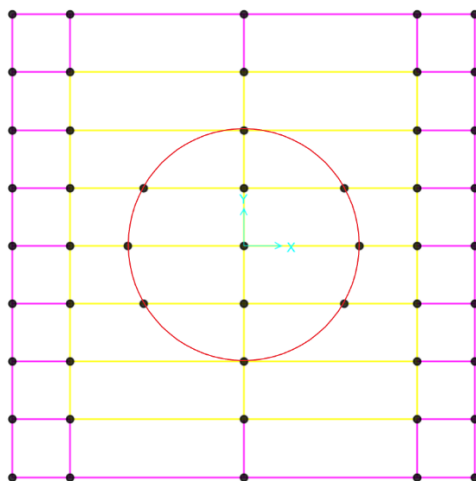
2.2 Προσομοίωση φορέα

2.2.1 Προσομοίωση κατασκευής

Για την προσομοίωση, ανάλυση και διαστασιολόγηση του φορέα έγινε χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων SAP2000. Οι δοκοί και τα υποστυλώματα όλης της κατασκευής προσομοιώθηκαν ως beam στοιχεία. Τα μέλη του jacket θεωρούνται μεταξύ τους συγκολλητά γι' αυτό και η προσομοίωσή τους γίνεται με frame elements χωρίς να ληφθούν ελευθερίες στα άκρα τους. Για την κατανομή των κατακόρυφων φορτίων στην πλατφόρμα χρησιμοποιήθηκαν γραμμικά επιφανειακά φορτία στα δοκάρια που είναι παράλληλα στην διεύθυνση X χρησιμοποιώντας την μέθοδο του εμβαδού επιρροής. Οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας συνδέονται στο μέσο τους, δεσμεύοντας δηλαδή τη μετακίνηση σε αυτό το σημείο, επομένως το μήκος λυγισμού του συνδέσμου λαμβάνεται ίσο με το μισό του πραγματικού για εντός και εκτός επιπέδου λυγισμό. Αναφορικά με τον πύργο, προσομοιώνεται με κοίλες κυκλικές διατομές κωνικού σχήματος, σταθερές ανά 10 [m] ύψους. Συνολικά λοιπόν

χρησιμοποιήθηκαν 9 διατομές, με σταδιακά μειούμενη διατομή προς τα πάνω για λόγους οικονομίας.

Στο μεταβατικό κομμάτι επειδή το κεντρικό υποστύλωμα έχει πολύ μεγάλη διάμετρο για την προσομοίωση της σύνδεσης του με την πλατφόρμα έγινε η παραδοχή ότι στα σημεία τομής της διαμέτρου του υποστυλώματος με τα δοκάρια της πλατφόρμας έχουμε επιβάλλει άκαμπτο στοιχείο (rigid constrain) ώστε να συμπεριφέρεται σαν στερεό σώμα (Σχήμα 2-7). Για την πιο ρεαλιστική προσομοίωση για το πως μεταδίδονται τα φορτία από την ανεμογεννήτρια στο jacket χρειάζεται να γίνει μια πιο ακριβής ανάλυση (π.χ. με πεπερασμένα στοιχεία), η οποία στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν πραγματοποιείται.

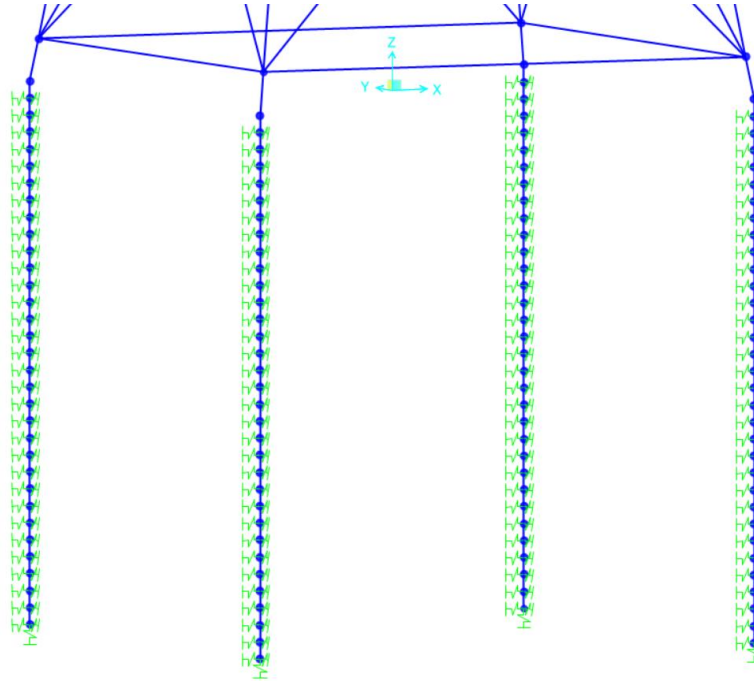


Σχήμα 2-7: Προσομοίωση κατακόρυφου δοκού στο transition piece

Στην περιοχή του κόμβου στο πάνω μέρος του μεταβατικού κομματιού, όπου συνδέονται η κατακόρυφη δοκός με τους διαγώνιους δοκούς υπάρχει ένα τμήμα σε κάθε στοιχείο το οποίο υπερκαλύπτεται από τη διατομή του άλλου. Αυτή η υπερκάλυψη συνεπάγεται τη μείωση του ελαστικού μήκους των στοιχείων, βάσει του οποίου υπολογίζεται η δυσκαμψία τους. Έτσι για κάθε διαγώνια δοκό η οποία θεωρείται ότι αναπτύσσεται ροπή στα άκρα της ορίσαμε το μήκος λυγισμού της ίσο με το 60%. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν γίνεται προσομοίωση των μηχανολογικών μερών της ανεμογεννήτριας (ρότορας, νασέλλα, πτερύγια) καθώς για την προσομοίωση και τον υπολογισμό των φορτίων ανέμου και σεισμού σε αυτά απαιτείται ειδική μελέτη η οποία δεν πραγματοποιείται στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

2.2.2 Προσομοίωση θεμελίωσης

Στην θεμελίωση τοποθετήθηκαν πάσσαλοι μήκους $L=32$ [m] και διαμέτρου $D=1.219$ [m]. Οι ιδιότητες του εδάφους, σύμφωνα με τα εδαφικά, γεωλογικά χαρακτηριστικά του ακρωτηρίου Καφηρέα, θεωρήθηκαν σταθερές σε όλο το βάθος. Η επιρροή του εδάφους στην εκάστοτε κατασκευή προσομοιώθηκε με γραμμικά ελατήρια κατά μήκος του πασσάλου και προς τις δύο εγκάρσιες διευθύνσεις του ανά υψομετρικό βήμα ίσο με $z=1$ [m], η δυσκαμψία των οποίων αντιστοιχούν στο δείκτη εδάφους της εδαφικής στρώσης σε οριζόντια διεύθυνση (k_h). Στο πλαίσιο της εργασίας δεν τοποθετήθηκαν γραμμικά ελατήρια κατά τη διεύθυνση του άξονα του πασσάλου, καθώς η πλευρική τριβή που αναπτύσσεται κατά μήκος του πασσάλου είναι αρκετά μεγάλη και οι αναπτυσσόμενες καθιζήσεις της κατασκευής είναι συγκριτικά ελάχιστες. Παρόλα αυτά, στη βάση των πασσάλων, δηλαδή κατά τη διεύθυνση z , τοποθετήθηκε ένα αξονικό ελατήριο με αρκετά μεγάλη δυσκαμψία, όπως $K=100000$ [kN/m], προκειμένου η έδραση των πασσάλων να προσομοιωθεί σε ισχυρό εδαφικό στρώμα. Για τις σεισμικές φορτίσεις οι τιμές των ελατηρίων διπλασιάστηκαν. Στο Σχήμα 2-8 παρουσιάζεται η διάταξη των ελατηρίων στους πασσάλους στο πρόγραμμα προσομοίωσης.



Σχήμα 2-8: Ελατήρια πασσάλων θεμελίωσης

Δείκτης εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση

Ο δείκτης εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση (k_h) αποτελεί ένα τρόπο έκφρασης της αντίδρασης του εδάφους στην παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου λόγω των οριζόντιων φορτίων που ασκούνται στη κατασκευή. Στα συνεκτικά εδάφη, για την περίπτωση των οριζόντιων φορτίσεων μικρής διάρκειας, ο δείκτης εδάφους κατά την οριζόντια διεύθυνση (k_h), αυξάνει με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και κατά συνέπεια με την αύξηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (c_u) του εδαφικού υλικού [Broms, 1964]. Έτσι για την περίπτωση των κανονικά φορτισμένων (NC) αργίλων όπου η αστράγγιστη διατμητική τους αντοχή αυξάνεται με το βάθος, αναμένεται και ο δείκτης εδάφους (k_h) να αυξάνεται αναλογικά με το βάθος. Για την περίπτωση όμως των προφορτισμένων (O.C) αργίλων όπου η αστράγγιστη διατμητική τους αντοχή είναι πρακτικά σταθερή για ορισμένο βάθος, αναμένεται και ο δείκτης εδάφους (k_h) να είναι αντίστοιχα σταθερός για το βάθος αυτό. Στα μη συνεκτικά εδάφη, ο δείκτης εδάφους κατά την οριζόντια διεύθυνση (k_h) είναι ανάλογος προς το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους [Broms, 1964]. Επειδή όμως στα εδάφη αυτά το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται από τη σχετική πυκνότητα του εδάφους (D_r) καθώς και από την ενεργό πίεση των υπερκευμένων γαιών (σ'_v), ο δείκτης εδάφους (k_h) θα αυξάνεται γραμμικά με το βάθος. Η σύνδεση του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση (k_h) με τη σταθερά των ελατηρίων (K), πραγματοποιείται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση 2-1:

$$K = k_h * D * A \quad (2-1)$$

Όπου,

- K η σταθερά ελατηρίου,
- k_h ο δείκτης εδάφους,
- D η διάμετρος του πασσάλου, και
- A η επιφάνεια επιρροής του ελατηρίου.

Το έδαφος στο οποίο εδράζεται η κατασκευή ανήκει στα μη συνεκτικά εδάφη (άμμος), επομένως ο δείκτης εδάφους κατά την οριζόντια διεύθυνση αυξάνεται γραμμικά με το βάθος και μπορεί να εκτιμηθεί από ένα σταθερό δείκτη (n_h) κατά την παρακάτω εξίσωση 2-2. Θεωρείται γωνία εσωτερικής τριβής της άμμου $\phi=35^\circ$, μέτρο ελαστικότητας $E=30$ [MPa], μέση σχετική πυκνότητας $D_r=60\%$ και ειδικό βάρος κορεσμένου εδάφους $\gamma_{κορ}=20$ [kN/m³]. Για την περίπτωση των μη συνεκτικών εδαφών και σύμφωνα με τον Terzaghi, η

τιμή του δείκτη (n_h) είναι περίπου 5 [MN/m³]. Οι περαιτέρω υπολογισμοί έγιναν με τη βοήθεια του λογισμικού Microsoft Excel.

$$k_h = n_h * \frac{z}{B} \quad (2-2)$$

Όπου,

B η διάμετρος του πασσάλου,

z το βάθος και

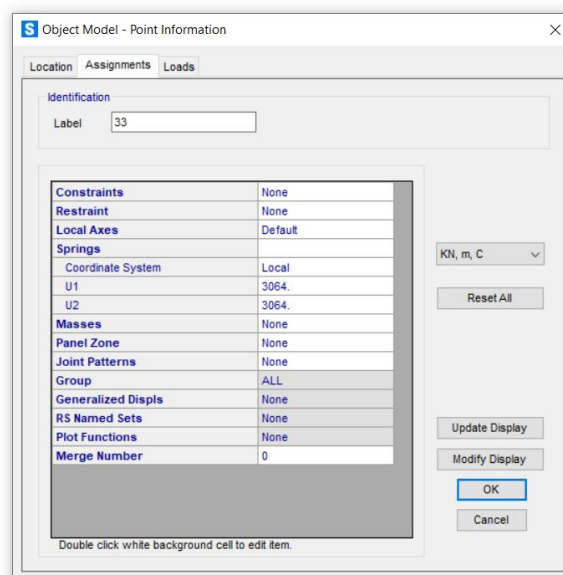
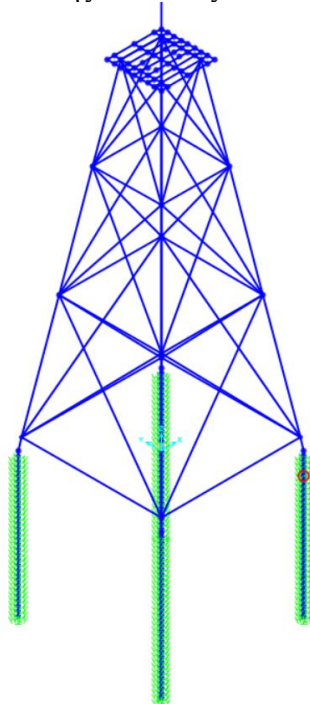
n_h σταθερά του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση (constant of horizontal subgrade reaction), η οποία εκφράζει την ταχύτητα αύξησης του (k_h) με το βάθος σε μονάδες [kN/m³].

Στο Σχήμα 2-9 παρουσιάζεται η διαγραμματική απεικόνιση των ελατηριακών σταθερών συναρτήσει του βάθους έμπτυξης των πασσάλων. [25]



Σχήμα 2-9: Διάγραμμα δυσκαμψίας οριζόντιων ελατηρίων των πασσάλων

Στο Σχήμα 2-10 φαίνεται ο τρόπος προσομοίωσης του ελατηρίου σε βάθος 5 [m] από τον πυθμένα της θάλασσας.



Σχήμα 2-10: Τιμή δυσκαμψίας ελατηρίου σε βάθος z=5 [m] κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας

2.3 Υλικά κατασκευής

Για την κατασκευή του Jacket τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο δομικός χάλυβας, κατηγορίας S355, με μέτρο ελαστικότητας $E=210$ [GPa], ειδικό βάρος χάλυβα $\gamma=78.5$ [kN/m³], λόγο Poisson στην ελαστική περιοχή $\nu=0.3$, ενώ για τον πύργο τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι ο δομικός χάλυβας, κατηγορίας S450, με μέτρο ελαστικότητας $E=210$ [GPa], ειδικό βάρος χάλυβα $\gamma=78.5$ [kN/m³], λόγο Poisson στην ελαστική περιοχή $\nu=0.3$.

Πίνακας 2-4: Ονομαστικές τιμές της αντοχής διαρροής f_y και της οριακής εφελκυστικής αντοχής f_u για εν θερμό ελατούς χάλυβες

Πρότυπο και ποιότητα χάλυβα	Ονομαστικό πάχος του στοιχείου t [mm]			
	$t \leq 40$ mm		$40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

3 Δράσεις σχεδιασμού

3.1 Γενικά

Ο υπολογισμός των δράσεων βάσει των οποίων πραγματοποιείται η ανάλυση και η διαστασιολόγηση του φορέα γίνεται σύμφωνα με τις διατάξεις του EN1991-1-1. Οι δράσεις, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, που επιβλήθηκαν στον φορέα είναι οι μόνιμες δράσεις, οι κινητές, οι δράσεις ανέμου και οι σεισμικές δράσεις. Σημειώνεται ότι τα φορτία χιονιού δεν συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση διότι είναι αμελητέα.

3.2 Μόνιμες δράσεις

Ως μόνιμες δράσεις ορίζονται οι δράσεις των οποίων η μεταβολή στον χρόνο είναι αμελητέα. Τα μόνιμα φορτία περιλαμβάνουν τα ίδια βάρη των φερόντων στοιχείων και τα πρόσθετα μόνιμα φορτία. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ως μόνιμες δράσεις λήφθηκαν υπόψιν τα ίδια βάρη των μελών του jacket, του transition piece και του πύργου της ανεμογεννήτριας τα οποία υπολογίζονται αυτόματα από το στατικό πρόγραμμα SAP 2000.

Στα πρόσθετα μόνιμα φορτία συμπεριλαμβάνονται το βάρος της επικάλυψης του καταστρώματος καθώς και οι μάζες των μηχανολογικών μερών της ανεμογεννήτριας οι οποίες εισήχθησαν ως συγκεντρωμένες μάζες και κατακόρυφα φορτία στην κορυφή του πύργου. Στην πλατφόρμα επιβλήθηκε πρόσθετο μόνιμο επιφανειακό φορτίο ίσο με 2 [kN/m²].

Το φορτίο τοποθετήθηκε σαν γραμμικώς κατανεμημένο στα δοκάρια που είναι παράλληλα στην διεύθυνση X χρησιμοποιώντας την μέθοδο του εμβαδού επιρροής. Στα δύο ακριανά δοκάρια τοποθετήθηκε γραμμικώς κατανεμημένο φορτίο ίσο με $1.5 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ ενώ στα υπόλοιπα δοκάρια τοποθετήθηκε γραμμικό φορτίο ίσο με $3 \text{ [kN/m}^2\text{]}$.

3.3 Μεταβλητές δράσεις

Ως μεταβλητές δράσεις ορίζονται οι δράσεις των οποίων η θέση και το μέγεθος δεν είναι σταθερά και δεν μπορούν να οριστούν με ακρίβεια. Στην παρούσα μελέτη ως μεταβλητές δράσεις λαμβάνονται τα κινητά φορτία της πλατφόρμας και των μηχανολογικών μερών της ανεμογεννήτριας, το φορτίο του ανέμου και τα σεισμικά φορτία.

3.3.1 Κινητές δράσεις καταστρώματος

Τα κινητά φορτία περιλαμβάνουν βάρη λόγω της παρουσίας προσωπικού, της πραγματοποίησης εργασιών συντήρησης και αναβάθμισης καθώς και της χρήσης και μεταφοράς του απαιτούμενου εξοπλισμού για τις εργασίες αυτές.

Στην πλατφόρμα επιβλήθηκε κινητό επιφανειακό φορτίο ίσο με $5 \text{ [kN/m}^2\text{]}$. Το φορτίο τοποθετήθηκε σαν γραμμικό στα δοκάρια που είναι παράλληλα στην διεύθυνση X χρησιμοποιώντας την μέθοδο του εμβαδού επιρροής. Στα δύο ακριανά δοκάρια τοποθετήθηκε γραμμικώς κατανεμημένο φορτίο ίσο με $3.75 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ ενώ στα υπόλοιπα δοκάρια τοποθετήθηκε γραμμικώς κατανεμημένο φορτίο ίσο με $7.5 \text{ [kN/m}^2\text{]}$.

3.3.2 Δράσεις ανέμου

Ο υπολογισμός των δράσεων του ανέμου γίνεται σύμφωνα με τις διατάξεις του EN1991-1-4. Στον φορέα της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας τα φορτία του ανέμου κυριαρχούν στην καταπόνηση της κατασκευής και η επίδραση τους είναι κρίσιμη για το σχεδιασμό του έργου. Παρακάτω παρουσιάζεται ο υπολογισμός των φορτίων του ανέμου στον πύργο της ανεμογεννήτριας και σε τμήμα του jacket το οποίο βρίσκεται εκτός της θάλασσας.

Τα φορτία ανέμου έχουν σημαντική επίδραση στις μεταλλικές κατασκευές, ενώ σε πολλές περιπτώσεις αποτελούν βασικό φορτίο του φορέα, ιδιαίτερα σε κατασκευές μικρού βάρους ή μεγάλης επιφάνειας. Επιπλέον, το μέγεθος και η διεύθυνσή τους μεταβάλλονται διαρκώς με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλη δυσκολία και αβεβαιότητα στον προσδιορισμό τους ενώ ενδέχεται να προκαλέσουν ταλαντώσεις, ιδιαίτερα σε εύκαμπτες κατασκευές. Στην πλειονότητα των κατασκευών το δυναμικό μέρος της φόρτισης ανέμου είναι αμελητέο σε μέγεθος και μπορεί να αγνοηθεί υπό προϋποθέσεις. Αποτέλεσμα της δράσης του ανέμου είναι η άσκηση πιέσεων κάθετα σε επιφάνειες της κατασκευής τόσο στο σύνολό της όσο και σε μεμονωμένα, φέροντα και μη, στοιχεία. Επιπροσθέτως, σε κατασκευές με επιμήκη ή με μεγάλη επιφάνεια στοιχεία αναπτύσσονται εφαιπτόμενες δυνάμεις τριβής που ενδέχεται να αποτελούν σημαντικό ποσοστό της συνολικής φόρτισης ανέμου. Γενικώς η φόρτιση της κατασκευής λόγω ανέμου εξαρτάται από μεγάλο πλήθος παραγόντων στους οποίους περιλαμβάνονται [26]:

- **Η γεωγραφική θέση:** Ορισμένες περιοχές έχουν στατιστικά μεγαλύτερες τιμές ταχυτήτων ανέμου.
- **Η φυσική θέση:** Σε εκτεθειμένες περιοχές εμφανίζονται γενικά μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου σε σχέση με προστατευμένες περιοχές. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην τραχύτητα των επιφανειών.
- **Η τοπογραφία:** Οι τοπικές συνθήκες επηρεάζονται από τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής.
- **Οι διαστάσεις και το σχήμα της κατασκευής:** Οι ταχύτητες ανέμου αυξάνονται γενικώς με αύξηση του ύψους από την στάθμη του εδάφους, ενώ το σχήμα της κατασκευής επηρεάζει την κατανομή πιέσεων.

Η πιο σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό των δράσεων ανέμου είναι η ταχύτητα του ανέμου, η οποία επηρεάζεται από ένα πλήθος παραγόντων όπως η γεωγραφική θέση, η φυσική θέση, η τοπογραφία, οι διαστάσεις του κτιρίου (κυρίως το ύψος), η μέση ταχύτητα του ανέμου, το σχήμα της κατασκευής, η κλίση της στέγης και η διεύθυνση του ανέμου.

Σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα δίνεται ότι ένας τυπικός άνεμος στην Ελλάδα έχει ταχύτητες:

- 33 [m/s] για τα νησιά και παράλια σε απόσταση έως και 10 [km] από την ακτή
- 27 [m/s] στην υπόλοιπη χώρα

Στην επίλυση έχει ληφθεί υπόψη θεμελιώδης ταχύτητα ανέμου $v_{b,0}=33$ [m/s], επειδή η κατασκευή βρίσκεται στην θάλασσα.

Η κατηγορία εδάφους είναι 0, Θαλάσσια ή Παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα. Από τον πίνακα του EN 1991-1-4 (Πίνακας 3-1: Κατηγορίες και παράμετροι εδάφους) για την συγκεκριμένη κατηγορία εδάφους προκύπτει $z_0=0.003$ [m] και $z_{min}=1$ [m], όπου z_0 είναι το μήκος τραχύτητας σε [m] και z_{min} είναι το ελάχιστο ύψος, όπως αυτά ορίζονται ανάλογα με την κατηγορία εδάφους.

Πίνακας 3-1: Κατηγορίες εδάφους και παράμετροι εδάφους

Κατηγορία εδάφους	z_0 m	z_{min} m
0 Θάλασσα ή παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα	0,003	1
I Λίμνες ή επίπεδες και οριζόντιες περιοχές με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια	0,01	1
II Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων	0,05	2
III Περιοχή με κανονική κάλυψη βλάστησης ή με κτίρια ή με μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση)	0,3	5
IV Περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15m.	1,0	10
Οι κατηγορίες εδάφους εικονογραφούνται στο Παράρτημα Α.1.		

Η βασική ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$v_b = c_{dir} * c_{season} * v_{b,0} = 33 \text{ [m/s]} \quad (3-1)$$

Όπου:

c_{dir} και c_{season} οι συντελεστές διεύθυνσης και εποχής αντίστοιχα, ίσοι με 1 και $v_{b,0}$ η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου. Ισούται με την χαρακτηριστική μέση ταχύτητα ανέμου για διάρκεια 10 λεπτών, για έδαφος κατηγορίας 0 λαμβάνεται ίση με 33 [m/s].

Με εφαρμογή των παραπάνω λαμβάνεται $v_b = 33$ [m/s].

3.3.2.1 Δράσεις ανέμου για τις κοίλες διατομές

Ο άνεμος εκτός από την κατασκευή της ανωδομής θεωρήθηκε ότι ασκείται και στα μέλη του jacket τα οποία βρίσκονται εκτός της θάλασσας, δηλαδή στο μήκος των 15.8555 [m] για τους πυλώνες και των 18.1614 [m] για τους διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας. Επίσης θεωρήθηκε ότι ο άνεμος ασκείται και στις διαγώνιους δοκούς του μεταβατικού κομματιού, δηλαδή στο μήκος των 7.7942 [m]. Ο άνεμος προσομοιώθηκε σαν γραμμικώς κατανεμημένο φορτίο πάνω σε αυτά τα μέλη.

Αρχικά, υπολογίστηκε η πίεση ταχύτητας αιχμής του ανέμου $q_p(z)$ σύμφωνα με τον EN1991-1-4-§4.5.

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m(z) = c_e(z) * q_b \quad (3-2)$$

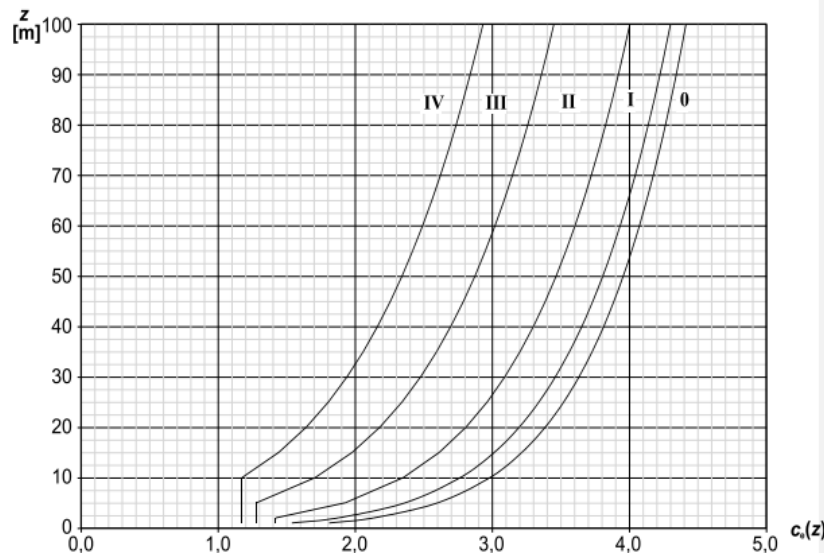
Όπου:

$$I_v(z) = \frac{k_I}{(c_0(z) * \ln(\frac{z}{z_0}))}, \text{ για } z_{min} \leq z \leq z_{max}, \text{ η ένταση στροβιλισμού} \quad (3-3)$$

$\rho = 1.25 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ η πυκνότητα του αέρα
 $c_e(z)$ ο συντελεστής έκθεσης και

$$q_b = \frac{1}{2} * \rho * v_b^2 = 0.681 \text{ [kPa]} \text{ η πίεση της βασικής ταχύτητας του ανέμου} \quad (3-4)$$

Για κάθε στοιχείο ως ύψος αναφοράς για την εκτίμηση του συντελεστή έκθεσης λαμβάνεται η μέση απόστασή του στοιχείου από την θάλασσα. Για επίπεδο έδαφος ο συντελεστής έκθεσης υπολογίζεται με βάση το διάγραμμα του Σχήματος 3-1 σαν συνάρτηση του ύψους z και της κατηγορίας εδάφους. Σαν ύψος z για το κάθε μέλος λήφθηκε η μέση απόσταση του από την μέση στάθμη της θάλασσας. Έτσι υπολογίστηκε απλοποιητικά η πίεση της ταχύτητας αιχμής του ανέμου $q_p(z)$.



Σχήμα 3-1: Διάγραμμα συντελεστή έκθεσης $c_e(z)$ για $c_0=1.0$, $k_I=1.0$

Η επιφάνεια αναφοράς A_{ref} , η οποία λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό του φορτίου ανέμου στις δοκούς των καταστρωμάτων και κατ' επέκταση στα διαφράγματα προσδιορίζεται από την εξίσωση:

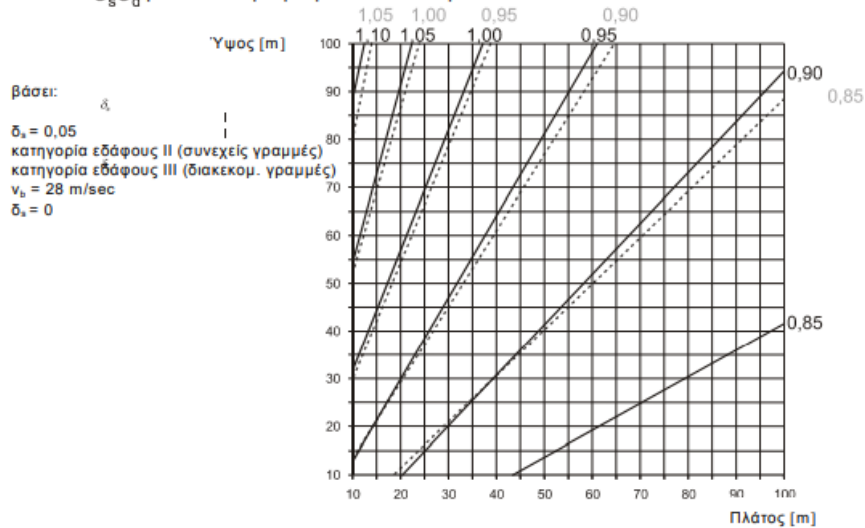
$$A_{ref} = b * l \quad (3-5)$$

Όπου:

- l το μήκος του εξεταζόμενου δομικού στοιχείου
- b το ύψος του εξεταζόμενου δομικού στοιχείου

Τα φορτία ανέμου πολλαπλασιάζονται με $c_s * c_d$, όπου c_s συντελεστής που συνεκτιμά την επίδραση της μη ταυτόχρονης εμφάνισης των μέγιστων πιέσεων ανέμου σε όλη την επιφάνεια και c_d δυναμικός συντελεστής ταλάντωσης του κτηρίου λόγω αναταράξεων. Λόγω της υψηλής δυσκαμψίας της κατασκευής δεν απαιτείται αναλυτικός υπολογισμός τους και λαμβάνονται προσεγγιστικά ίσοι με 1 από το διάγραμμα του Σχήματος 3-2.

C_sC_d για πολυώροφα μεταλλικά κτήρια



Σχήμα 3-2: Τιμές συντελεστών c_s*c_d για πολυώροφα μεταλλικά κτήρια

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν συγκεκριμένοι συντελεστές εξωτερικής πίεσης για κυκλικές διατομές διαμέτρου b όπως η ταχύτητα του ανέμου v(z_e), ο αριθμός Reynolds R_e για το κινηματικό ιξώδες του αέρα ν=15*10⁻⁶ [m²/sec], ο συντελεστής δύναμης για απουσία ροής στο ελεύθερο άκρο c_{f0}, και ο συντελεστής δύναμης c_f. Αναφέρεται ότι για τον υπολογισμό του συντελεστή c_{f0} έγινε χρήση του Σχήματος 3-3 σύμφωνα με τον EN1991- 1-4-§7.9.2 και ορίστηκε σαν τραχύτητα των μελών η τιμή k=0.2 [mm] που αντιστοιχεί σε γαλβανιζέ μέταλλα.

$$v(z_e) = \sqrt{\frac{2 * q_p}{\rho}} \tag{3-6}$$

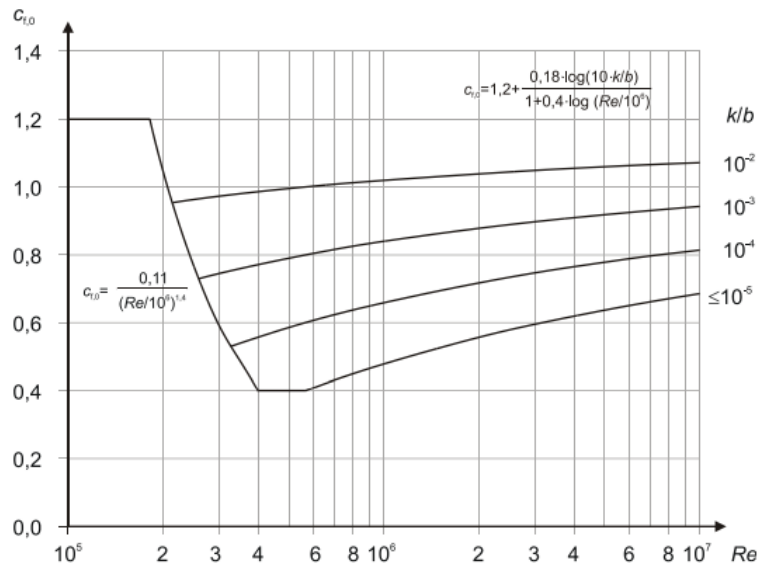
$$R_e = \frac{b * v(z_e)}{\nu} \tag{3-7}$$

$$c_f = c_{f0} * \psi_l \tag{3-8}$$

Όπου: ψ_l συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την μειωμένη αντοχή του μέλους λόγω της ροής του αέρα στα άκρα του (end-effect factor).

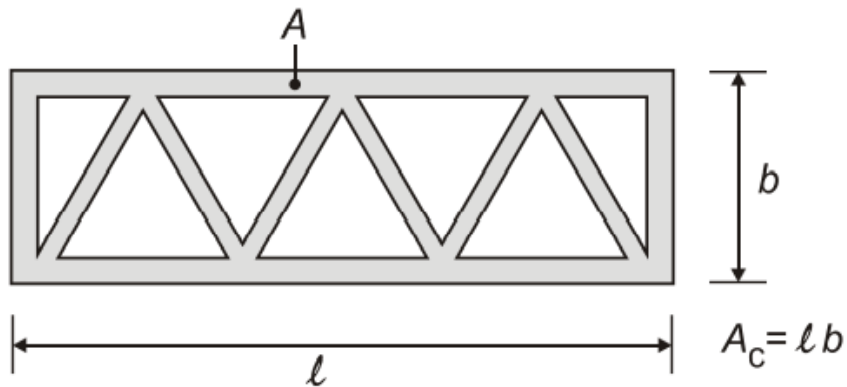
Πίνακας 3-2 : Υπολογισμοί για φόρτιση ανέμου

z _e [m]	l [m]	b [m]	c _e [z]	q _p [kPa]	v _{ze} [m/s]	R _e	k/b	c _{f0}
7.75	15.8555	0.813	2.842	1.934	55.63	3.0153*10 ⁶	0.000246	0.806
7.75	18.1614	0.3239	2.842	1.934	55.63	1.2013*10 ⁶	0.000617	0.815
17.75	7.7942	0.813	3.317	2.258	60.1	3.2575*10 ⁶	0.000246	0.81

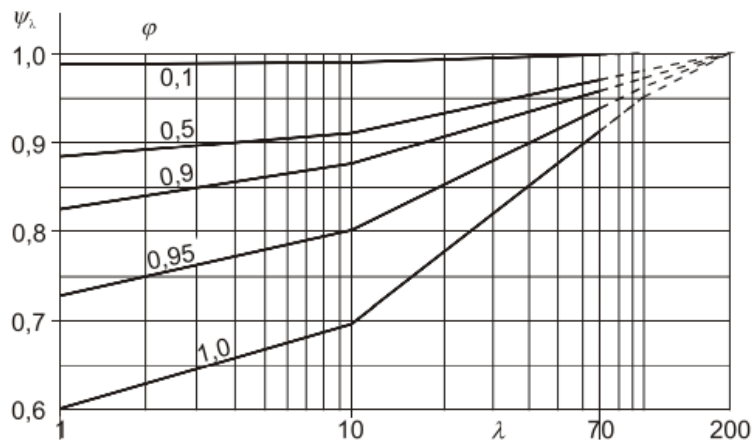


Σχήμα 3-3: Συντελεστής δύναμης $c_{f,0}$ για κυκλικούς κολώνες χωρίς ροή ελευθέρων άκρων και για διάφορες ισοδύναμες τραχύτητες k/b

Ο συντελεστής ψ_λ υπολογίζεται σύμφωνα με τον EN1991-1-4-§7.13 σαν συνάρτηση της λυγηρότητας λ του μέλους και του συντελεστή $\varphi = A/A_c$ (solidity factor) όπου A είναι το άθροισμα των προβολών των επιφανειών των μελών, όπου ασκείται ο άνεμος και A_c είναι η συνολική περιβάλλουσα επιφάνεια όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-4. Εφόσον, ο λόγος A/A_c προκύπτει αρκετά μικρός για την υπό εξέταση κατασκευή (<0.1) ο συντελεστής ψ_λ λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-5, κάτι που είναι και υπέρ της ασφαλείας.



Σχήμα 3-4: Ορισμός του συντελεστή πληρότητας φ



Σχήμα 3-5: Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή επίδρασης άκρων ψ_λ ως συνάρτηση του συντελεστή πληρότητας φ και της λυγηρότητας λ

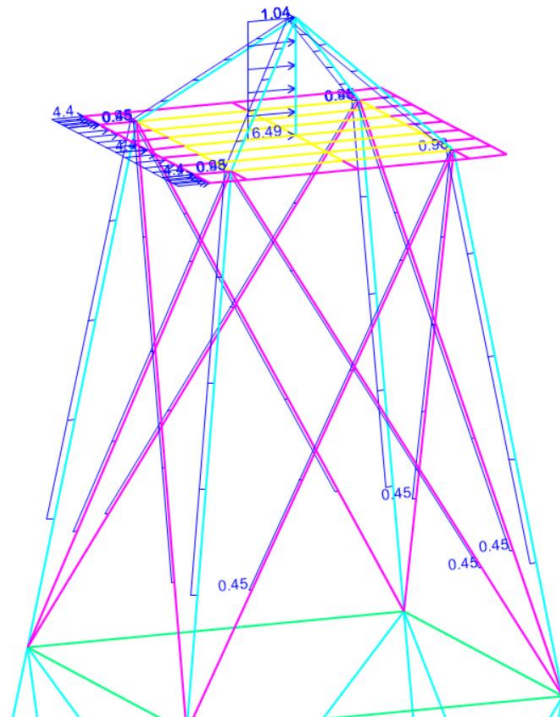
Η τελική ασκούμενη δύναμη q_w από τον άνεμο στα μέλη του jacket δίνεται από την εξίσωση 3-9 και τα τελικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-3. Στο Σχήμα 3-6 φαίνεται ενδεικτικά η φόρτιση του ανέμου στο jacket για διεύθυνση ανέμου +X.

$$q_w = c_f * b * q_p(z_e) \quad (3-9)$$

Πίνακας 3-3: Φόρτιση ανέμου q_w [kN/m] για κοίλες κυκλικές διατομές jacket

Μέλος	b [m]	c_{f0}	λ	ψ_λ	c_f	q_w [kN/m]
Υποστυλώματα jacket	0.813	0.806	19.359	0.771	0.622	0.977
Σύνδεσμοι δυσκαμψίας jacket	0.3239	0.815	54.552	0.883	0.719	0.451
Διαγώνιοι δοκοί transition piece	0.813	0.81	9.587	0.698	0.566	1.038

Δυσμενώς θεωρήθηκε ότι τα μέλη του jacket που βρίσκονται πίσω από άλλα, κοντινά μέλη, δεν προστατεύονται από την ανεμοπίεση με αποτέλεσμα ο άνεμος να επιδρά πάνω τους με την ίδια τιμή. Τέλος θεωρήθηκε δυσμενώς ότι ο άνεμος ασκείται και στα εξωτερικά δοκάρια της πλατφόρμας σε μήκος 12 [m] και πλάτους επιρροής 1 [m] συνυπολογίζοντας την επικάλυψη και τα κάγκελα της πλατφόρμας. Υπολογίστηκε η πίεση αιχμής ίση με $q_p=2.203$ [kN/m²] και απλοποιητικά θεωρήθηκε συντελεστής εξωτερικής πίεσης ίσος με $c_{pe}=2$. Επομένως, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-6, ασκήθηκε περιμετρικά της πλατφόρμας γραμμικώς κατανεμημένο φορτίο ανέμου ίσο με $w_e=q_p*b*c_{pe}=2.203*1*2=4.4$ [kN/m].



Σχήμα 3-6: Φορτία ανέμου στο jacket +X

3.3.2.2 Δράσεις ανέμου στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας

Για την εκτίμηση του φορτίου του ανέμου στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας έγινε προσομοίωση του με 9 κωνικά τμήματα μήκους 10 [m] και μεταβλητής διαμέτρου. Στη συνέχεια, το φορτίο του ανέμου υπολογίστηκε με βάση τις διατάξεις του EN1991-1-4 κάνοντας χρήση των συντελεστών δύναμης. Συγκεκριμένα, ο άνεμος προσομοιώθηκε σαν γραμμικώς κατανεμημένο φορτίο πάνω στον πυλώνα το οποίο δίνεται από την εξίσωση:

$$q_w = c_s * c_d * c_f * q_p * b \quad (3-10)$$

Όπου:

- $c_s \cdot c_d$ ο συνδυασμένος δυναμικός συντελεστής
- c_f ο συντελεστής δύναμης
- q_b η πίεση της ταχύτητας αιχμής του ανέμου
- b η διάμετρος του μέλους, λαμβάνεται ως ο μέσος όρος των διαμέτρων της κορυφής και της βάσης του εξεταζόμενου κωνικού τμήματος

Προκειμένου να προσδιοριστεί η πίεση ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$ και ο συντελεστής δύναμης απουσίας ροής c_{f0} στο εκάστοτε κωνικό τμήμα του πυλώνα, ακολουθείται η ίδια διαδικασία που περιεγράφηκε αναλυτικά παραπάνω για τα μέλη του jacket. Συγκεκριμένα προσδιορίζεται ο αριθμός R_e του κάθε τμήματος λαμβάνοντας υπόψη την μέση διάμετρο του τμήματος. Η τιμή της ισοδύναμης τραχύτητας επιφάνειας k λαμβάνεται και σε αυτή την περίπτωση ίση με $k=0.2$ [mm] (γαλβανισμένος χάλυβας). Παρακάτω παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-4 και Πίνακα 3-5 τα αποτελέσματα των υπολογισμών.

Πίνακας 3-4: Πίεση ταχύτητας αιχμής $q_p(z)$ στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας

Τμήμα	z [m]	b [m]	$c_r(z)$	$v_m(z)$ [m/s]	$I_v(z)$	$q_p(z)$ [kPa]
0-10	25	5.8815	1.4087	46.49	0.1108	2.398
10-20	35	5.6445	1.4612	48.22	0.1068	2.539
20-30	45	5.4075	1.5004	49.51	0.104	2.648
30-40	55	5.1705	1.5317	50.55	0.1019	2.736
40-50	65	4.9335	1.5578	51.41	0.1002	2.81
50-60	75	4.6965	1.5801	52.14	0.0987	2.874
60-70	85	4.4595	1.5996	52.79	0.0975	2.931
70-80	95	4.2225	1.617	53.36	0.0965	2.982
80-90	105	3.987	1.6326	53.88	0.0956	3.028

Πίνακας 3-5: Συντελεστές c_{f0} , λ , ψ_λ στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας

Τμήμα	z [m]	b [m]	v_{ze} [m/s]	R_e	k/b	c_{f0}	λ	ψ_λ
0-10	25	5.8815	61.94	$24.2868 \cdot 10^6$	0.000034	0.798	1.7	0.623
10-20	35	5.6445	63.74	$23.9864 \cdot 10^6$	0.000035	0.800	1.772	0.625
20-30	45	5.4075	65.09	$23.4637 \cdot 10^6$	0.000037	0.801	1.849	0.627
30-40	55	5.1705	66.16	$22.8047 \cdot 10^6$	0.000039	0.802	1.934	0.629
40-50	65	4.9335	67.05	$22.0525 \cdot 10^6$	0.000041	0.803	2.027	0.631
50-60	75	4.6965	67.81	$21.2319 \cdot 10^6$	0.000043	0.804	2.129	0.633
60-70	85	4.4595	68.48	$20.3587 \cdot 10^6$	0.000045	0.804	2.242	0.635
70-80	95	4.2225	69.07	$19.4434 \cdot 10^6$	0.000047	0.805	2.368	0.637
80-90	105	3.987	69.6	$18.5005 \cdot 10^6$	0.00005	0.806	2.508	0.64

Συνδυασμένος δυναμικός συντελεστής $c_s c_d$

Ο συνδυασμένος δυναμικός συντελεστής $c_s c_d$ λαμβάνει υπόψη την επίδραση στη δράση του ανέμου της μη ταυτόχρονης ύπαρξης αιχμών πίεσης στην επιφάνεια και των ταλαντώσεων της κατασκευής εξ' αιτίας του στροβιλισμού. Το $c_s c_d$ για κτίρια με ύψος μικρότερο από 15 [m] και για καμινάδες με κυκλικές διατομές των οποίων το ύψος είναι μικρότερο των 60 [m] η τιμή του $c_s c_d$ λαμβάνεται ίση με 1. Η περίπτωση του εξεταζόμενου πυλώνα της ανεμογεννήτριας δεν ανήκει σε αυτές τις περιπτώσεις και επομένως απαιτείται ο υπολογισμός του δυναμικού συντελεστή $c_s c_d$ μέσω τύπων του EN 1991-1-4, ο οποίος ισούται με το γινόμενο του παράγοντα μεγέθους c_s και του δυναμικού παράγοντα c_d . Ο παράγοντας μεγέθους c_s λαμβάνει υπόψη του τη μειωτική επίδραση στη δράση του ανέμου της μη

ταυτόχρονης ύπαρξης πιέσεων αιχμής από άνεμο στην επιφάνεια και υπολογίζεται από την εξίσωση:

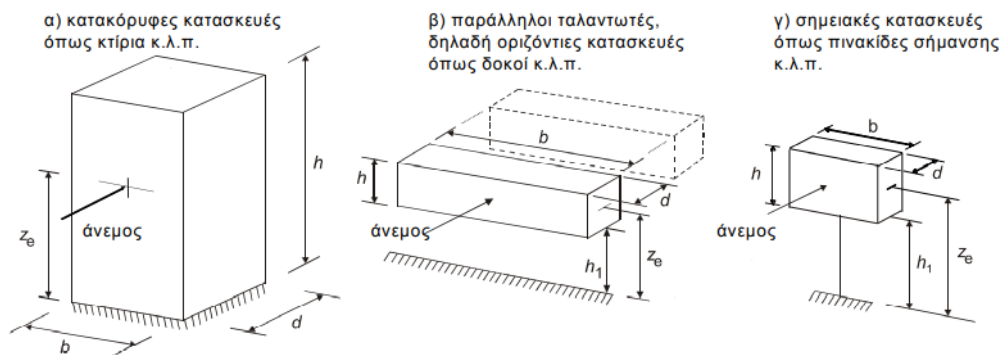
$$c_s = \frac{1 + 7 * I_v(z_e) * \sqrt{B^2}}{1 + 7 * I_v(z_e)} \quad (3-11)$$

Ο δυναμικός παράγοντας c_d λαμβάνει υπόψη την αυξημένη επίδραση από ταλαντώσεις λόγω του στροβιλισμού σε συντονισμό με την κατασκευή και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$c_d = \frac{1 + 2 * k_p * I_v(z_e) * \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 * I_v(z_e) * \sqrt{B^2}} \quad (3-12)$$

Όπου:

- z_e είναι το ύψος αναφοράς. Για κατασκευές όπου το Σχήμα 3-7 δεν έχει εφαρμογή, το z_e μπορεί να λαμβάνεται ίσο με h , το ύψος της κατασκευής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση λαμβάνεται ίσο με $z_e = h = 110$ [m], όπου h είναι η μέγιστη απόσταση του πυλώνα από την μέση στάθμη της θάλασσας.
- k_p είναι ο συντελεστής αιχμής οριζόμενος ως ο λόγος της μέγιστης τιμής του κυμαινόμενου μέρους της απόκρισης προς τη τυπική του απόκλιση
- $I_v(z_e)$ είναι η ένταση του στροβιλισμού στο ύψος αναφοράς
- B^2 είναι ο συντελεστής βασικής απόκρισης, που λαμβάνει υπόψη την έλλειψη πλήρους συσχέτισης των πιέσεων στην επιφάνεια της κατασκευής
- R^2 είναι ο συντελεστής απόκρισης συντονισμού, που λαμβάνει υπόψη στροβιλισμό σε συντονισμό με την ιδιομορφή ταλάντωσης



ΣΗΜΕΙΩΣΗ : Περιορισμοί δίνονται επίσης στο 1.1 (2)

$$z_s = 0,6 \cdot h \geq z_{\min} \quad z_s = h_1 + \frac{h}{2} \geq z_{\min} \quad z_s = h_1 + \frac{h}{2} \geq z_{\min}$$

Σχήμα 3-7: Γενικές μορφές κατασκευών που καλύπτονται από τη διαδικασία σχεδιασμού. Διαστάσεις της κατασκευής και ύψος αναφοράς.

Υπολογισμός του συντελεστή βασικής απόκρισης B^2 και του παράγοντα μεγέθους c_s

Ο συντελεστής βασικής απόκρισης B^2 λαμβάνει υπόψη την έλλειψη πλήρους συσχέτισης των πιέσεων επί των επιφανειών της κατασκευής, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 * \left(\frac{b+h}{L(z_e)}\right)^{0,63}} \quad (3-13)$$

Όπου:

- B το πλάτος της κατασκευής. Λαμβάνεται ίσο με την μέση διάμετρο του πυλώνα δηλαδή $b = 4.934$ [m]
h το ύψος της κατασκευής, $h = 90$ [m]
 $L(z_e)$ το μήκος στροβιλισμού σε ύψος αναφοράς $z = z_e$.

Για ύψη z κάτω των 200 [m] μπορεί να υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$L(z) = L_t * \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha, \text{ για } z \geq z_{min} \quad (3-14)$$

$$L(z) = L(z_{min}), \text{ για } z < z_{min} \quad (3-15)$$

Όπου:

$$L_t = 300\text{m}, z_t = 200\text{m} \text{ και } \alpha = 0,67 + 0,05 * \ln(z_0) = 0.3795 \quad (3-16)$$

Άρα

$$L(z_e) = L_t * \left(\frac{z_e}{z_t}\right)^{0.3795} = 239.10 \text{ [m]} \quad (3-17)$$

Επομένως

$$B^2 = 0.665 \text{ και } I_v(z_e) = \frac{k_I}{(c_0(z_e) * \ln\left(\frac{z_e}{z_0}\right))} = 0.09515 \quad (3-18)$$

Έτσι υπολογίζεται η τιμή του παράγοντα μεγέθους c_s όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-6:

Πίνακας 3-6: Υπολογισμός τιμής του παράγοντα μεγέθους c_s

b [m]	h [m]	B²	I_v(z_e)	c_s
4.934	90	0.665	0.09515	0.926

Υπολογισμός του συντελεστή απόκρισης συντονισμού R^2

Ο συντελεστής της απόκρισης συντονισμού R^2 , ο οποίος λαμβάνει υπόψη το στροβιλισμό σε συντονισμό με τη θεωρούμενη μορφή ταλάντωσης της κατασκευής, υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 * \delta} * S_L(z_e, \eta_{1,x}) * R_h(\eta_h) * R_b(\eta_b) \quad (3-19)$$

Όπου:

- δ η ολική λογαριθμική μείωση της απόσβεσης
 $S_L(z_e, \eta_{1,x})$ η αδιάστατη συνάρτηση φασματικής πυκνότητας
 $R_h(\eta_h), R_b(\eta_b)$ οι αεροδυναμικές συναρτήσεις επαγωγής

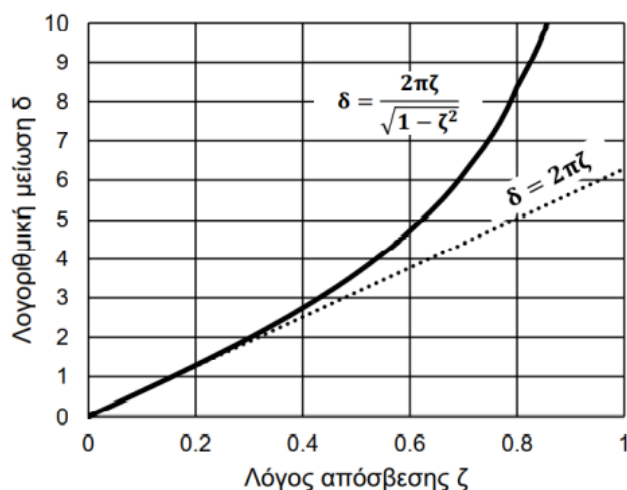
Ολική λογαριθμική μείωση της απόσβεσης (δ)

Σύμφωνα με το «Δυναμική των κατασκευών» του Anil K. Chopra [27], η ολική λογαριθμική μείωση της απόσβεσης μπορεί να ληφθεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$\delta = \frac{2 * \pi * \zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (3-20)$$

Εάν ο λόγος απόσβεσης ζ είναι μικρός, τότε $\sqrt{1 - \zeta^2} \cong 1$ και προκύπτει:

$$\delta = 2 * \pi * \zeta \quad (3-21)$$



Σχήμα 3-8: Λογαριθμική μείωση της απόσβεσης

Πίνακας 3-7: Συνιστώμενες τιμές απόσβεσης

Επίπεδο τάσεων	Μορφή και κατάσταση της κατασκευής	Λόγος απόσβεσης (%)
Τάσεις λειτουργίας, όχι παραπάνω από 1/2 του ορίου διαρροής	Χάλυβας με συγκολλητές συνδέσεις, προεντεταμένο σκυρόδεμα, οπλισμένο σκυρόδεμα καλής κατάστασης (μόνο ελαφρά ρηγμάτωση)	2-3
	Οπλισμένο σκυρόδεμα με σημαντική ρηγμάτωση	3-5
	Χάλυβας με κοχλιωτές συνδέσεις και/ή με ηλώσεις, ξύλινες κατασκευές με καρφωτές ή κοχλιωτές συνδέσεις	5-7
Στο όριο διαρροής ή ακριβώς κάτω από αυτό	Χάλυβας με συγκολλητές συνδέσεις, προεντεταμένο σκυρόδεμα (χωρίς πλήρη απώλεια προέντασης)	5-7
	Προεντεταμένο σκυρόδεμα χωρίς απομένουσα προένταση	7-10
	Οπλισμένο σκυρόδεμα	7-10
	Χάλυβας με κοχλιωτές συνδέσεις και/ή με ηλώσεις, ξύλινες κατασκευές με καρφωτές συνδέσεις	10-15
	Ξύλινες κατασκευές με συνδέσεις με ήλους	15-20

Σύμφωνα με τον Πίνακα 11 όπου φαίνονται οι συνιστώμενες τιμές απόσβεσης όπως προτείνονται στην «Δυναμική των κατασκευών» του Anil K. Chopra [27], λαμβάνεται λόγος απόσβεσης ζ ίσος με ζ = 2%. Άρα η ολική λογαριθμική απόσβεση ισούται με:

$$\delta = 2 * \pi * \zeta = 2 * \pi * 0.02 = 0.1257 \quad (3-22)$$

Αδιάστατη συνάρτηση φασματικής πυκνότητας (S_L)

Η κατανομή του ανέμου συναρτήσει των συχνοτήτων εκφράζεται από την αδιάστατη συνάρτηση φασματικής πυκνότητας $S_L(z,n)$, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$S_L(z, n) = \frac{n * S_v(z, n)}{\sigma_v^2} = \frac{6.8 * f_L(z, n)}{(1 + 10.2 * f_L(z, n))^{5/3}} \quad (3-23)$$

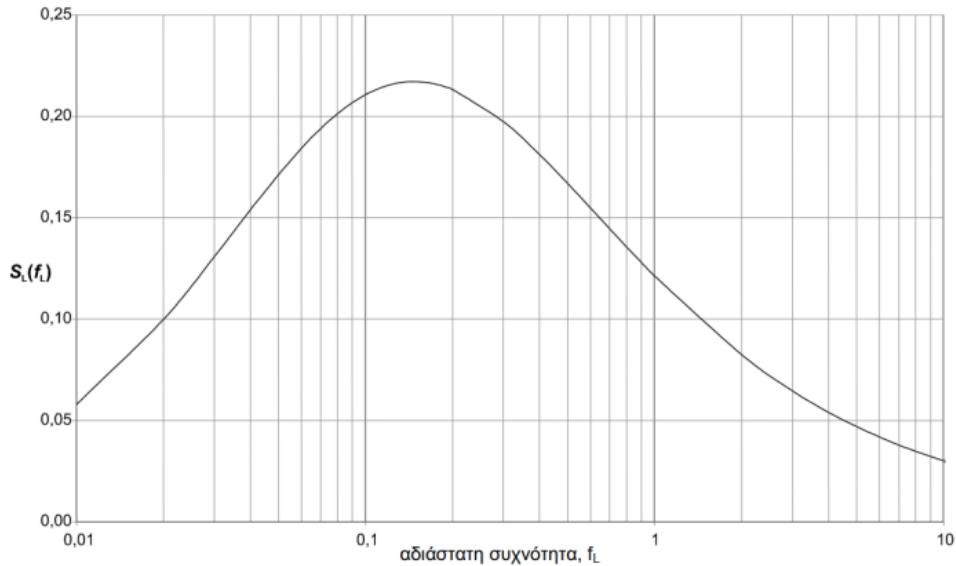
Όπου:

$$Sv(z,n)$$

$$f_L(z,n) = \frac{\eta * L(z)}{v_m(z)}$$

είναι το μονόπλευρο φάσμα διασποράς, και είναι η αδιάστατη συχνότητα υπολογιζόμενη από την θεμελιώδη καμπτική ιδιοσυχνότητα της κατασκευής σε [Hz], από τη μέση ταχύτητα $v_m(z)$ και από το μήκος στροβιλισμού $L(z)$.

Η συνάρτηση της φασματικής πυκνότητας απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 3-9: Αδιάστατη συνάρτηση φασματικής πυκνότητας $S_L(f_L)$

Η θεμελιώδης καμπτική ιδιοσυχνότητα n υπολογίστηκε πραγματοποιώντας ιδιομορφική ανάλυση με τη βοήθεια του προγράμματος SAP 2000 για πυλώνα πλήρως πακτωμένο στο έδαφος και βρέθηκε ίση με $n = 0.89$ [Hz]. Στον Πίνακα 3-8 παρουσιάζεται ο υπολογισμός της αδιάστατης συχνότητας $f_L(z_e, n)$ και της αδιάστατης συνάρτησης φασματικής πυκνότητας $S_L(z_e, n)$.

Πίνακας 3-8: Υπολογισμός της αδιάστατης συχνότητας $f_L(z_e, n)$ και της αδιάστατης συνάρτησης φασματικής πυκνότητας $S_L(z_e, n)$

L_{ze} [m]	$V_{m,ze}$ [m/s]	n [Hz]	$f_L(z_e, n)$	$S_L(z_e, n)$
239.1	54.12	0.89	3.932	0.0546

Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 1.12422; f = 0.8895



Σχήμα 3-10: Θεμελιώδης καμπτική ιδιοσυχνότητα πυλώνα

Αεροδυναμικές συναρτήσεις επαγωγής $R_h(\eta_h)$, $R_b(\eta_b)$

Οι αεροδυναμικές συναρτήσεις επαγωγής R_h και R_b , για μια ιδιομορφή, μπορούν να υπολογίζονται προσεγγιστικά από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2*\eta_h} * (1 - e^{-2*\eta_h}), \quad R_h = 1 \text{ για } \eta_h = 0 \quad (3-24)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2*\eta_b} * (1 - e^{-2*\eta_b}), \quad R_b = 1 \text{ για } \eta_b = 0 \quad (3-25)$$

Όπου:

$$\eta_h = \frac{4.6 * h}{L(z_e)} * f_L(z_e, n_{1,x}) \quad (3-26)$$

$$\eta_b = \frac{4.6 * h}{L(z_e)} * f_L(z_e, n_{1,x}) \quad (3-27)$$

Επομένως προκύπτουν οι τιμές των συναρτήσεων επαγωγής R_h και R_b ο υπολογισμός των οποίων φαίνεται στον Πίνακα 3-9.

Πίνακας 3-9: Συναρτήσεις επαγωγής R_h και R_b για τον πολώνα της ανεμογεννήτριας

η_h	η_b	R_h	R_b
6.808	0.373	0.073	1.975

Τελικώς ο συντελεστής απόκρισης συντονισμού R^2 προκύπτει ίσος με: $R^2 = 0.311$

Υπολογισμός του συντελεστή αιχμής k_p

Ο συντελεστής αιχμής k_p , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης τιμής του κυμαινόμενου μέρους της απόκρισης προς την τυπική απόκλιση, υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

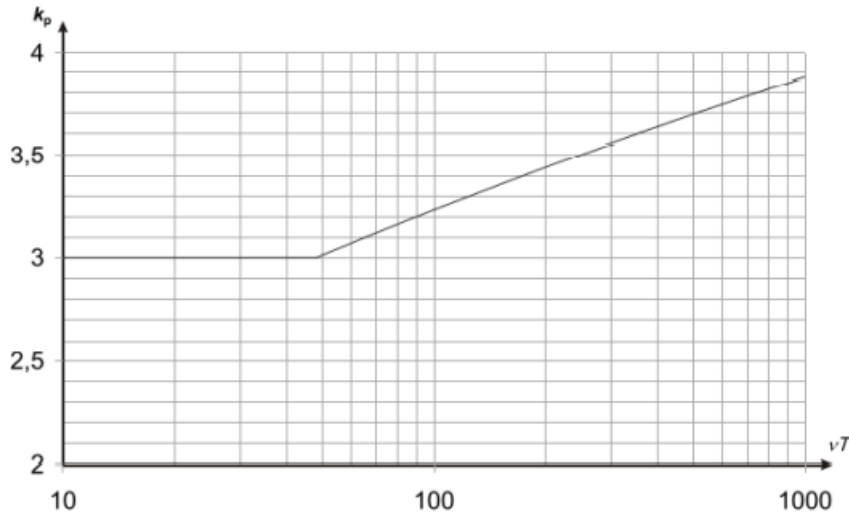
$$k_p = \max \left\{ \sqrt{2 * \ln(v * T)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 * \ln(v * T)}}, \frac{0.6}{3} \right\} \quad (3-28)$$

Όπου:

T το χρονικό διάστημα στο οποίο υπολογίζεται η μέση ταχύτητα ανέμου. Ισχύει ότι $T = 10 \text{ [min]} = 600 \text{ [sec]}$.

n η συχνότητα η οποία υπολογίζεται συναρτήσει της θεμελιώδους καμπτικής ιδιοσυχνότητας $n_{1,x}$, τον συντελεστή βασικής απόκρισης B^2 και το συντελεστή της απόκρισης συντονισμού R^2 από την εξίσωση:

$$v = n_{1,x} * \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \quad v \geq 0.08 \text{ Hz} \quad (3-29)$$



Σχήμα 3-11: Συντελεστής αιχμής

Επομένως ισχύει ότι $B^2 = 0.665$, $R^2 = 0.311$ και $n_{1,x} = 0.89$ [Hz]. Με βάση τα παραπάνω προκύπτει η συχνότητα ν και ο συντελεστής αιχμής k_p όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-10:

Πίνακας 3-10: Συντελεστής αιχμής k_p για τον πύλονα της ανεμογεννήτριας

ν [Hz]	T [s]	K_p
0.502	600.000	3.556

Υπολογισμός του δυναμικού παράγοντα c_d

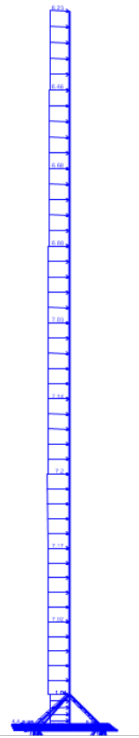
Ο δυναμικός παράγοντας c_d μπορεί να υπολογιστεί από την Εξίσωση 3-7 και είναι ίσος με:

$$c_d = \frac{1 + 2 * k_p * I_v(z_e) * \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 * I_v(z_e) * \sqrt{B^2}} = 1.08 \quad (3-30)$$

Στον παρακάτω συγκεντρωτικό Πίνακα 3-11 παρουσιάζεται το τελικό γραμμικό φορτίο που ασκείται σε κάθε τμήμα του πύλονα της ανεμογεννήτριας, λόγω της φόρτισης του ανέμου. Ενδεικτικά στο Σχήμα 3-12 παρουσιάζεται η ασκούμενη φόρτιση στον πύργο όπως αυτή εφαρμόστηκε στο πρόγραμμα SAP 2000. Το Σχήμα 3-12 αναφέρεται στην φόρτιση του ανέμου στην διεύθυνση X.

Πίνακας 3-11: Υπολογισμός δύναμης ανέμου q_w (kN/m) στον πύλονα της ανεμογεννήτριας

Τμήμα	z_e [m]	b [m]	ψ_λ	$c_{f,0}$	q_p [kN/m]	$c_r(z_e)$	$c_s * c_d$	q_w [kN/m]
0-10	25	5.8815	0.623	0.798	2.398	1.4087	1.001	7.019
10.-20	35	5.6445	0.625	0.8	2.539	1.4612	1.001	7.173
20-30	45	5.4075	0.627	0.801	2.648	1.5004	1.001	7.199
30-40	55	5.1705	0.629	0.802	2.736	1.5317	1.001	7.143
40-50	65	4.9335	0.631	0.803	2.81	1.5578	1.001	7.031
50-60	75	4.6965	0.633	0.804	2.874	1.5801	1.001	6.876
60-70	85	4.4595	0.635	0.804	2.931	1.5996	1.001	6.680
70-80	95	4.2225	0.637	0.805	2.982	1.617	1.001	6.463
80-90	105	3.987	0.64	0.806	3.028	1.6326	1.001	6.234



Σχήμα 3-12: Φορτίο ανέμου στον πύλωνα της ανεμογεννήτριας +X

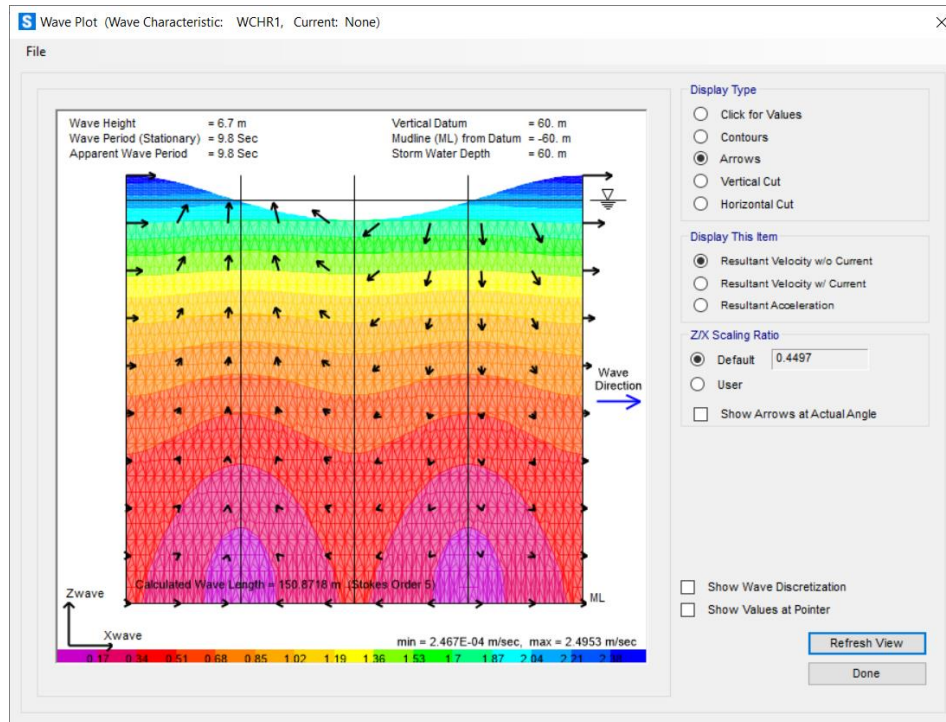
3.3.3 Κυματικές δράσεις

Η επιφάνεια της θάλασσας συντίθεται από μια τεράστια ποικιλία κυματισμών που επελαύνουν σε διαφορετικές κατευθύνσεις και με διαφορετικά πλάτη, συχνότητες και φάσεις. Όπως είναι γνωστό, η κύρια γενεσιουργός αιτία των θαλάσσιων κυματισμών είναι οι σχεδόν πάντα τυχαίες, διατμητικές και εγκάρσιες τάσεις που επιβάλλει ο άνεμος στην επιφάνεια του νερού. Για να απλοποιήσουμε κάπως αυτή την χαοτική εικόνα, είναι απαραίτητο να εξεταστεί το κυματικό πεδίο ως προς τα φασματικά και στατιστικά χαρακτηριστικά του. Η ευκολότερη προσέγγιση που μπορούμε να κάνουμε είναι να προσδιορίσουμε τη μέση τιμή του κυματικού ύψους, περιόδου και μήκους κύματος, και να θεωρήσουμε ότι το κυματικό πεδίο χαρακτηρίζεται μόνο από ένα μονοχρωματικό κυματισμό (κύμα μιας συχνότητας). Έτσι, η συχνότητα αυτής της αρμονικής αντιστοιχεί συνήθως σε κάποια χαρακτηριστική συχνότητα (για παράδειγμα, στην κύρια συχνότητα - συχνότητα κορυφής κάποιου κυματικού φασματικού μοντέλου).

Το λογισμικό SAP 2000 έχει την δυνατότητα προσομοίωσης των δυνάμεων που οφείλονται στον κυματισμό μέσω της επίλυσης της εξίσωσης του Morisson. Από τον χρήστη απαιτείται η εισαγωγή των χαρακτηριστικών του κύματος (H , T_p , d) και της κατάλληλης θεωρίας κυματισμού για την μαθηματική περιγραφή του φαινομένου. Τονίζεται πως το λογισμικό δίνει την δυνατότητα συνυπολογισμού στο φορτίο κυματισμού, φορτίου λόγω ανάπτυξης θαλάσσιας ζωής (marine growth). Η θαλάσσια ζωή αναπτύσσεται σε βάθη έως και 45 [m] με αποτέλεσμα να αυξάνει τις διατομές των κατασκευών και κατ' επέκταση τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτές. Η ανάπτυξη θαλάσσιας ζωής κυμαίνεται μεταξύ πάχους 10-20 [cm].

Στην συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης, με βάση τη στατιστική καταγραφή που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή τοποθέτησης της θαλάσσιας ανεμογεννήτριας η μέγιστη τιμή του σημαντικού ύψους κύματος (ακραία περίπτωση) που παρατηρήθηκε στην περιοχή είναι $H_s=6.7$ [m], με περίοδο κυματισμού $T=9.8$ [sec], σε βάθος οριζόντιου αδιατάρακτου πυθμένα $d=60$ [m]. Η κυματική θεωρία που επιλέχθηκε για την μελέτη είναι η Stokes 5th τάξης. Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ελήφθη υπόψιν σταθερό φορτίο λόγω ανάπτυξης θαλάσσιας ζωής ίσο με 0.15 [m] σε όλα τα βυθισμένα μέλη του jacket. Το κύμα ορίστηκε σε τέσσερις διευθύνσεις (X, Y, 45° και 135°).

Τέλος απεικονίζεται η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, τα πεδία των ταχυτήτων και το δυναμικό της ροής με βάση τη θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης για τιμές των παραμέτρων που επιλέξαμε και όπως υπολογίστηκαν από το λογισμικό SAP 2000 (Σχήμα 3-13).



Σχήμα 3-13: Προσομοίωση κυματικής δράσης στο πρόγραμμα SAP 2000

Υδροδυναμικά λεπτές κατασκευές

Η παρουσία ενός στερεού σώματος στο πεδίο ροής των κυματισμών επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του. Σαν λεπτές υδροδυναμικά χαρακτηρίζονται εκείνες οι διατάξεις των οποίων η επίδραση στα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής του κυματισμού είναι αμελητέα, μπορεί να αγνοηθεί. Στις κατασκευές αυτές οι δράσεις από το κύμα σχεδιασμού υπολογίζονται με τον τύπο του Morison. Τα χαρακτηριστικά του πεδίου ροής που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό τους, ταχύτητες και επιταχύνσεις, είναι αυτά του "αδιατάρακτου" πεδίου ροής, του πεδίου ροής του κυματισμού χωρίς την παρουσία της κατασκευής. Η παραδοχή για "υδροδυναμικά λεπτή κατασκευή" μπορεί να γίνει όταν ισχύει η εξίσωση:

$$D/\lambda < 1/5 \quad (3-31)$$

Όπου:

- D η χαρακτηριστική διάσταση, διάμετρος της διατομής π.χ., των στοιχείων, της κατασκευής και
- λ το μήκος κύματος στην θέση του έργου.

Στη συγκεκριμένη μελέτη, ο λόγος $D/\lambda = 0.813/150.8718 < 1/5$

Επομένως έχουμε υδροδυναμικά λεπτό σώμα και ισχύει ο Morison.

Τύπος Morison

Όπως είναι ευρέως γνωστό, ο υπολογισμός των κυματικών φορτίων στα βυθισμένα μέλη της κατασκευής όταν ισχύει η παραδοχή υδροδυναμικά λεπτού σώματος γίνεται με την εφαρμογή του τύπου του Morison:

$$F_x(t) = F_{drag} + F_{inertia} = C_D * \frac{1}{2} * \rho * D_i * \int u|u|dz + C_M * \frac{\rho * \pi * D_i^2}{4} * \int \frac{\partial u}{\partial t} dz \quad (3-32)$$

Όπου:

ρ η πυκνότητα του ρευστού, στη συγκεκριμένη περίπτωση του νερού,
 D_i η διάμετρος του στοιχείου όταν πρόκειται για κυλινδρική διατομή ή αλλιώς υπολογίζεται η ισοδύναμη διάμετρος μέσω του κατάλληλου τύπου,
CD, CM είναι τα drag and inertia coefficients αντίστοιχα.

Οι τιμές των τελευταίων που προβλέπονται με βάση τον κανονισμό API 1993 για λείους κυλίνδρους με μικρές διαμέτρους είναι $CD = 0.65$ και $CM = 1.60$ αντίστοιχα.

3.3.4 Σεισμικές δράσεις

Σεισμικές δράσεις σχεδιασμού θεωρούνται οι ταλαντώσεις της κατασκευής που προκαλούνται λόγω του σεισμού, οι οποίες ονομάζονται και σεισμικές δονήσεις ή σεισμικές διεγέρσεις. Οι σεισμικές διεγέρσεις κατατάσσονται επίσης στις τυχηματικές δράσεις και δεν συνδυάζονται με άλλες τυχηματικές δράσεις, όπως επίσης δεν συνδυάζονται με τις δράσεις λόγω ανέμου. Είναι λοιπόν αδρανειακές δυνάμεις που προέρχονται από την αντίσταση της μάζας της κατασκευής στη μεταδιδόμενη σε αυτήν κίνηση από το έδαφος. Κατά συνέπεια οι σεισμικές δράσεις εξαρτώνται από την φύση της σεισμικής κίνησης του εδάφους (καθοριζόμενη από την επιτάχυνση, την ταχύτητα, τη χρονική διάρκεια και τη διεύθυνση) και την συμπεριφορά της κατασκευής (καθοριζόμενη από την ακαμψία, την κατανομή μάζας, την απόσβεση, τις ιδιότητες του υλικού κ.τ.λ.).

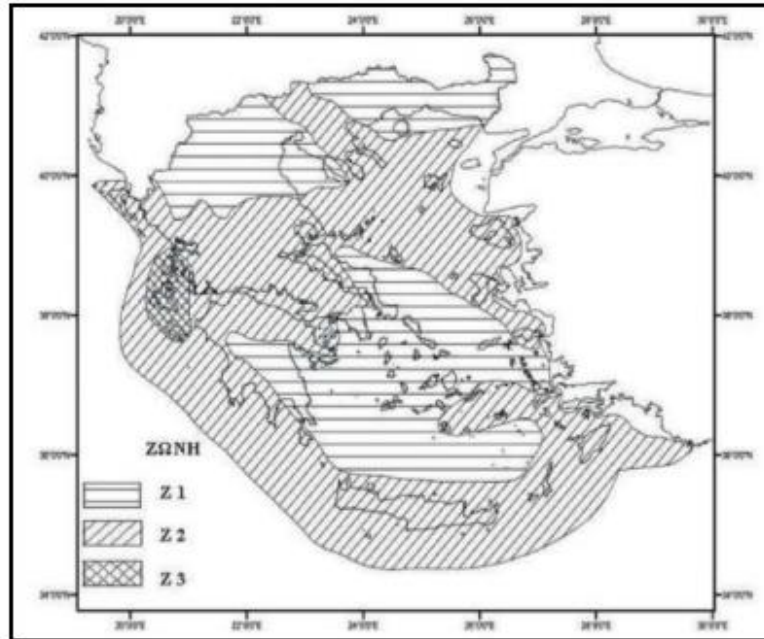
Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, τα σεισμικά αποτελέσματα και τα αποτελέσματα των μη σεισμικών δράσεων που περιλαμβάνονται στους σεισμικούς συνδυασμούς, μπορούν να υπολογιστούν με βάσει γραμμική – ελαστική συμπεριφορά του φορέα. Μπορεί λοιπόν να χρησιμοποιηθεί ένας από τους ακόλουθους δύο τύπους γραμμικής – ελαστικής ανάλυσης:

- Μέθοδος ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης
- Ιδιομορφική ανάλυση φάσματος απόκρισης

Η μελέτη της κατασκευής έναντι σεισμού έγινε μέσω της Ιδιομορφικής Ανάλυσης Φάσματος Απόκρισης, η οποία περιλαμβάνει πλήρη ιδιομορφική ανάλυση του συστήματος και υπολογισμό της μέγιστης σεισμικής απόκρισης για κάθε ιδιομορφή ταλάντωσης.

Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας

Η Ελλάδα χωρίζεται σε τρεις Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας (I, II, III) τα όρια των οποίων καθορίζονται στον χάρτη (Σχήμα 3-14) σεισμικής επικινδυνότητας. Σε κάθε ζώνη αντιστοιχεί μια τιμή σεισμικής επιτάχυνσης a_{gR} , που λαμβάνεται από το χάρτη ζωνών στο Εθνικό Προσάρτημα. Η κατασκευή μας βρίσκεται στη Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας II.



Σχήμα 3-14: Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας

Σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού a_{gR} :

Για κάθε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας προβλέπεται μια τιμή σεισμικής επιτάχυνσης a_{gR} . Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν επίσης σε περίοδο επαναφοράς $T_R=475$ χρόνια, δηλαδή κατά μέσο όρο συμβαίνουν μία φορά κάθε 475 χρόνια. που έχει ληφθεί από το χάρτη ζωνών στο Εθνικό Προσάρτημα, με βάση την σχέση $a_{gR} = a * g$. Για ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II (Πίνακας 3-12), η τιμή εδαφικής επιτάχυνσης αναφοράς είναι: $a_{gR} = 0.16 * g$.

Πίνακας 3-12: Τιμές ενεργούς επιτάχυνσης σεισμικών ζωνών Ελλάδας

Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας	I	II	III
a_{gR}	0.16*g	0.24*g	0.36*g

Για κατασκευές μεγάλης αξίας ή σπουδαιότητας, οι τιμές του Πίνακας 3-13 πολλαπλασιάζονται με το συντελεστή σπουδαιότητας γ_1 . Τα κτίρια κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες σπουδαιότητας ανάλογα με τις κοινωνικοοικονομικές συνέπειες που μπορεί να έχει μία ενδεχόμενη καταστροφή ή διακοπή της λειτουργίας τους.

Πίνακας 3-13: Τιμές συντελεστή σπουδαιότητας γ_1 κατά EC8

Κατηγορία σπουδαιότητας		Συντελεστής σπουδαιότητας
I	Μικρή σπουδαιότητα	0.8
II	Συνήθης σπουδαιότητα	1.0
III	Μεγάλη σπουδαιότητα	1.2
IV	Πολύ μεγάλη σπουδαιότητα	1.4

Σύμφωνα με τον υπ' αριθμό πρωτοκόλλου 489/6-10-2005 έγγραφο του ΟΑΣΠ οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται στην κατηγορία σπουδαιότητας Σ2, που θα πρέπει να θεωρείται η ελάχιστη απαίτηση. Σε αυτή τη μελέτη θεωρήθηκε υπέρ της ασφαλείας ότι έχουμε κατηγορία σπουδαιότητας Σ3 και άρα ο συντελεστής σπουδαιότητας είναι $\gamma_1 = 1.20$.

Έτσι, η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8, η οποία συμβολίζεται με a_g ισούται με $a_g = \gamma_I * a_{gR} = 1.20 * 0.16g = 0.192g$.

Προσδιορισμός της κατηγορίας εδάφους

Η ποιότητα του εδάφους πάνω στο οποίο θα θεμελιωθεί η κατασκευή αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τη μορφή του φάσματος σχεδιασμού. Από άποψη σεισμικής επικινδυνότητας, τα εδάφη κατατάσσονται σε 5 κατηγορίες A, B, C, D και E (Πίνακας 3-14). Το κτίριο μας εδράζεται σε έδαφος κατηγορίας C.

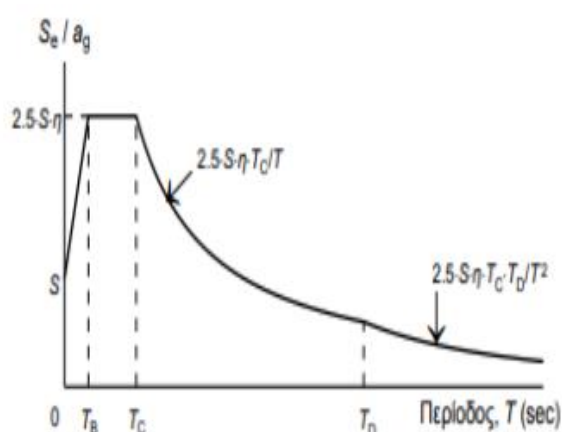
Η τιμή a_g αντιστοιχεί σε βραχώδες ή πολύ σκληρό έδαφος, έτσι ο Ευρωκώδικας 8 αναφέρει ότι σε μαλακά εδάφη η τιμή αυτή πρέπει να επαυξάνεται με το συντελεστή εδάφους S, ο οποίος κυμαίνεται από 1.00 έως 1.40, ανάλογα με την κατηγορία εδάφους.

Πίνακας 3-14: Συντελεστής εδάφους και χαρακτηριστικές περιόδοι φάσματος σχεδιασμού σύμφωνα με τον EC8

Κατηγορία εδάφους	S	T_B (sec)	T_C (sec)	T_D (sec)
A	1.00	0.15	0.40	2.50
B	1.20	0.15	0.50	2.50
C	1.15	0.20	0.60	2.50
D	1.35	0.20	0.80	2.50
E	1.40	0.15	0.50	2.50

Συντελεστής Συμπεριφοράς q

Ο συντελεστής συμπεριφοράς q πραγματοποιεί τη μείωση των σεισμικών επιταχύνσεων της πραγματικής κατασκευής λόγω μετελαστικής συμπεριφοράς, σε σχέση με τις επιταχύνσεις που προκύπτουν υπολογιστικά σε καθαρά ελαστικό σύστημα. Για την σεισμική απόκριση της κατασκευής θεωρήθηκε $q=1.5$, δηλαδή καθαρά ελαστική απόκριση της κατασκευής. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η κατασκευή μιας θαλάσσιας ανεμογεννήτριας λόγω της σημασίας της κατασκευής και του υψηλού κόστους κατασκευής και συντήρησης της δεν επιτρέπεται η ύπαρξη βλαβών μέσω μιας πλάστιμης συμπεριφοράς. Επιλέγεται χαμηλό επίπεδο πλαστιμότητας (DCL = Ductility Class Low). Το ελαστικό φάσμα του σεισμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-15.



Σχήμα 3-15: Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού

$$S_d(T) = a_g * S * \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} * \left(\frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_B \quad (3-33)$$

$$S_d(T) = a_g * S * \frac{2.5}{q} \quad \text{για } T_B \leq T \leq T_C \quad (3-34)$$

$$S_d(T) = a_g * S * \frac{2.5}{q} * \frac{T_c}{T} \quad \text{για } T_c \leq T \leq T_D \quad (3-35)$$

$$S_d(T) = a_g * S * \frac{2.5}{q} * \frac{T_c * T_D}{T^2} \quad \text{για } T_D \leq T \leq 4 \text{ sec} \quad (3-36)$$

Όπου:

- $S_d(T)$ είναι η φασματική επιτάχυνση του σχεδιασμού
 T είναι η περίοδος ταλάντωσης ενός γραμμικού συστήματος μιας ελεύθερης κίνησης
 a_g είναι η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού σε έδαφος κατηγορίας A
 T_B είναι η περίοδος κάτω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης
 T_C είναι η περίοδος άνω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης
 T_D είναι η τιμή της περιόδου που ορίζει την αρχή της περιοχής σταθερής μετακίνησης του φάσματος
 S είναι ο συντελεστής εδάφους
 q είναι ο συντελεστής συμπεριφοράς
 β είναι συντελεστής κατώτατου ορίου για το οριζόντιο φάσμα σχεδιασμού, όπου σύμφωνα με το εθνικό προσάρτημα η τιμή ορίζεται ως $\beta=0.2$

3.4 Χαρακτηριστικά και φορτία τουρμπίνας NREL 5MW

3.4.1 Χαρακτηριστικά τουρμπίνας NREL5MW

Στην κορυφή του πυλώνα της ανεμογεννήτριας εδράζεται μία πρότυπη τουρμπίνα. Επιλέχθηκε πρότυπη τουρμπίνα του Εθνικού Εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Υπουργείου Ενέργειας των ΗΠΑ (NREL) ονομαστικής ισχύος 5 [MW]. Τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας προσδιορίστηκαν μέσω βιβλιογραφικής διερεύνησης και παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω Πίνακα 3-15. [28]

Πίνακας 3-15: Χαρακτηριστικά και φορτία τουρμπίνας NREL 5MW

Χαρακτηριστικά NREL 5MW	
Μάζα ρότορα [tn]	110
Διάμετρος ρότορα [m]	126
Μάζα νασέλλας [tn]	240
Αριθμός πτερυγίων	3
Συνολική μάζα πτερυγίων [tn]	54
Ελάχιστη ταχύτητα ανέμου [m/s]	3
Ταχύτητα ονομαστικής ισχύος [m/s]	11.72
Ταχύτητα αποκοπής [m/s]	25
Ταχύτητα περιστροφής ρότορα [RPM]	6.9-12.1

Η ανεμογεννήτρια εδράζεται σε σωληνοειδή χαλύβδινο πύργο (tubular steel tower) κατασκευασμένο από χάλυβα ποιότητας S450. Η διατομή του πυλώνα είναι κοίλη κυλινδρική με διάμετρο 6 [m] και πάχος 0.027 [m] στη βάση του πύργου και διάμετρο 3.87 [m] και πάχος 0.019 [m] στη κορυφή. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής του πυλώνα μεταβάλλονται γραμμικά στο συνολικό ύψος των 90 [m].

3.4.2 Έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων (Pitch Control)

Όλες οι ανεμογεννήτριες, ακόμα και οι σταθερής ταχύτητας, σχεδιάζονται να έχουν κάποιου είδους έλεγχο ισχύος. Ο πιο πρώιμος έλεγχος ισχύος είναι ο μηχανικός έλεγχος που εφαρμόζεται στα πτερύγια του κινητήρα. Διάφοροι μηχανικοί τρόποι έχουν εφαρμοστεί που περιορίζουν τις αεροδυναμικές δυνάμεις στο δρομέα στις υψηλές τιμές ταχύτητας έτσι ώστε να μην υπάρξουν ζημιές στον κινητήρα. Ο έλεγχος γωνίας βήματος πτερυγίων αποτελεί έναν δημοφιλή τρόπο ελέγχου στον οποίο τα πτερύγια μπορούν να στραφούν είτε ενάντια είτε

προς τη διεύθυνση του ανέμου, ανάλογα με το αν η παραγόμενη ενέργεια είναι πολύ μεγάλη ή πολύ μικρή, αντίστοιχα. [29]

3.4.3 Δύναμη Ώσης

Η ώση είναι μια δύναμη από το δρομέα στο ρευστό, η οποία προκύπτει λόγω της εξαγωγής ισχύος από τη ροή. Η δύναμη αυτή ενεργεί στη διεύθυνση της ταχύτητας του αδιατάραχτου ρεύματος. Απλοποιητικά η στατική τιμή της δύναμης ώσης μπορεί να ληφθεί ίση με:

$$F_{\text{thrust}} = 0.5 * \rho * A * C_T * U^2 \quad (3-37)$$

Όπου:

- ρ η πυκνότητα του αέρα ίση με 1.25 [kg/m³]
- A η επιφάνεια σάρωσης του ρότορα
- U η ταχύτητα του ανέμου
- C_T συντελεστής ώσης

Η στατική δύναμη ώσης υπολογίζεται για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου μεταξύ της τιμής της ελάχιστης ταχύτητας και της ταχύτητας αποκοπής. Με βάση τους [Arany et al. (2017)] [30] ο συντελεστής ώσης μπορεί να ληφθεί ίσος με:

- $C_T = \frac{7m/s}{U_{Rated}}$, για ταχύτητες μεταξύ της ταχύτητας έναρξης και της ταχύτητας ονομαστικής ισχύος
- $C_T = \frac{7m/s * U_{Rated}^2}{U}$, για ταχύτητες μεταξύ της ταχύτητας ονομαστικής ισχύος και της ταχύτητας αποκοπής

Η μέγιστη τιμή του συντελεστή ώσης είναι ίση με 1. Η πτώση της τιμής του συντελεστή ώσης μετά την ταχύτητα ονομαστικής ισχύος οφείλεται στην ενεργοποίηση του ελέγχου βήματος (pitch control). Η μέγιστη δύναμη ώσης προκύπτει για τιμές της ταχύτητας κοντά στην ταχύτητα ονομαστικής ισχύος. Εκτός από την στατική συνιστώσα, για τον ψευδοστατικό υπολογισμό της μέγιστης ώσης πρέπει να ληφθεί υπόψιν η επίδραση της τύρβης μέσω μια δυναμικής συνιστώσας της ταχύτητας u (turbulent thrust force). Ως αποτέλεσμα, η δυναμική μέγιστη δύναμη ώσης προκύπτει προσαυξημένη. Σύμφωνα με [37] τυπικές τιμές της μέγιστης δύναμης ώσης, λαμβάνοντας υπόψιν δυναμικά φαινόμενα και για ανεμογεννήτριες ισχύος 5 [MW] κυμαίνεται στα 1200 [kN].

Για την NREL 5MW υπολογίζεται η στατική μέγιστη δύναμη ώσης, εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση για την ονομαστική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας, ίση με 11.72 [m/s]. Προκύπτει η τιμή της στατικής F_{thrust} ίση με 640 [kN]. Η δυναμική F_{thrust} η οποία χρησιμοποιείται για τον έλεγχο σε κατάσταση αστοχίας λαμβάνεται ίση με 1200 [kN]. [29]

3.4.4 Ροπή κάμψης και στρέψης στην κορυφή του πύργου

Επιπλέον της δύναμης ώσης, στην κορυφή του πύργου επιδρά μια συγκεντρωμένη ροπή κάμψης και μια συγκεντρωμένη ροπή στρέψης που υπολογίζονται για διάφορες ακραία τυχαίες περιπτώσεις. Η τιμή τους εξαρτάται από την μέση ταχύτητα του ανέμου και τις αναταράξεις στην επιφάνεια του ρότορα, την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων, την πυκνότητα του αέρα, το αεροδυναμικό σχήμα των εξαρτημάτων που αποτελούν την ανεμογεννήτρια και τις διαδραστικές επιπτώσεις τους, συμπεριλαμβανομένου αερολαστικών επιπτώσεων.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η τιμή της ροπής κάμψης λήφθηκε ίση με $M_x=13200$ [kNm] με βάση τους [Dhamsaniya et al. 2018][38], οι οποίοι διερεύνησαν την επίδραση της θεμελίωσης με διαφορετικά είδη jacket της πρότυπης ανεμογεννήτριας NREL 5MW με τα ίδια χαρακτηριστικά τουρμπίνας, ύψους πύργου και βάθους θάλασσας με αυτά που εξετάζονται και στην παρούσα εργασία. Με βάση το ίδιο άρθρο η στρεπτική ροπή στην κορυφή του πύργου λήφθηκε ίση με $M_z=9952$ [kNm]. Τέλος στην κορυφή του πύργου

εφαρμόζονται και τα βάρη του ρότορα, της νασέλλας και των τριών πτερυγίων. Η συνολική δύναμη βάρους των μηχανολογικών τμημάτων της ανεμογεννήτριας είναι $F_z = 3962$ [kN].

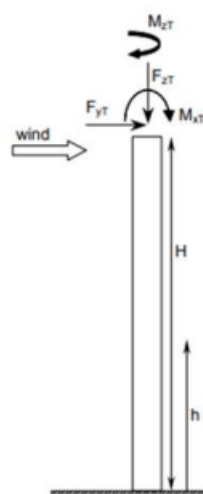


Figure 7-4. Cantilever beam model of a tubular tower subject to loading at the level of the hub.

F_y	thrust from wind load
M_x	bending moment from wind load
F_z	gravity force
M_z	torsional moment

Σχήμα 3-16: Φορτία που ασκούνται στην κορυφή του πύλωνα της ανεμογεννήτριας από τον ρότορα

3.5 Συνδυασμοί δράσεων

Για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας, το σεισμό σχεδιασμού αλλά και την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας δημιουργήθηκαν οι κατάλληλοι συνδυασμοί.

- Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ)
 - $1.35G + 1.5Q$
 - $1.35G + 1.5Q + 0.9Wind + 0.9Wave$
 - $1.35G + 1.05Q + 1.5Wind + 0.9Wave$
 - $1.35G + 1.05Q + 0.9Wind + 1.5Wave$
- Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ)
 - $G + Q$
 - $G + Q + 0.6Wind + 0.6Wave$
 - $G + 0.7Q + Wind + 0.6Wave$
- Σεισμικοί συνδυασμοί
 - $G + 0.3Q + E_x + 0.3E_y$
 - $G + 0.3Q + E_x - 0.3E_y$
 - $G + 0.3Q + E_y + 0.3E_x$
 - $G + 0.3Q + E_y - 0.3E_x$

Όπου: G : τα μόνιμα φορτία στον υπό κατασκευή φορέα

Q : τα κινητά φορτία στον υπό κατασκευή φορέα

$Wind$: οι δράσεις ανέμου (σημειώνεται ότι λήφθηκαν υπόψη και οι δύο διευθύνσεις δράσεις του ανέμου)

Wave: οι κυματικές δράσεις (σημειώνεται ότι λήφθηκαν υπόψη τόσο οι δύο διευθύνσεις X, Y αλλά και διεύθυνση κυματισμού 45° και 135°)

Ex: σεισμική δράση κατά την διεύθυνση X

Ey: σεισμική δράση κατά την διεύθυνση Y

4 Διαστασιολόγηση φορέα

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται όλοι οι έλεγχοι που πραγματοποιήθηκαν για την διαστασιολόγηση των διατομών (δοκών, υποστυλωμάτων κλπ.), σύμφωνα με τους κανονισμούς του Ευρωκώδικα 3. Οι τελικές διατομές όλων των μελών (κύριες δοκοί, υποστυλώματα, χιαστί σύνδεσμοι) επιλέχθηκαν από επαναληπτική διαδικασία, με την ικανοποίηση των απαιτήσεων για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης.

4.2 Ιδιομορφική ανάλυση

Ως μέθοδος «ισοδύναμης» γραμμικής ανάλυσης επιλέγεται η Δυναμική Φασματική Ανάλυση. Η δυναμική φασματική μέθοδος περιλαμβάνει πλήρη ιδιομορφική ανάλυση του συστήματος και υπολογισμό της μέγιστης σεισμικής απόκρισης για κάθε ιδιομορφή ταλάντωσης. Με τη μέθοδο αυτή υπολογίζονται οι πιθανές ακραίες τιμές τυχόντος μεγέθους απόκρισης με τετραγωνική επαλληλία των ιδιομορφικών τιμών του υπόψη μεγέθους. Επειδή η χρήση των φασμάτων δίνει μέγιστες τιμές, οι οποίες προφανώς δεν συμβαίνουν ταυτόχρονα και αφετέρου δεν έχουν κατ' ανάγκη το ίδιο πρόσημο, οι συμμετοχές των ιδιομορφών σε κάποιο μέγεθος X συνδυάζονται με έναν εκ των παρακάτω τρόπων:

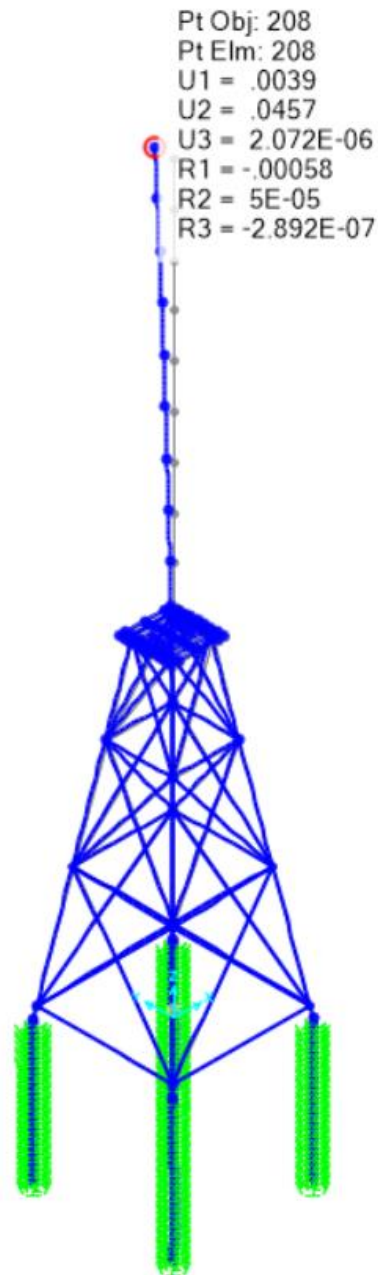
- SRSS: Square Root of the Sum of Squares
- CQC: Complete Quadratic Combination

Κατά την επίλυση και διαστασιολόγηση του φορέα απαιτήθηκε να ορισθούν τουλάχιστον 5 ιδιομορφές έτσι ώστε το άθροισμα των δρώσεων ιδιομορφικών μαζών να φτάσει στο 90% της συνολικής ταλαντούμενης μάζας του συστήματος. Συνολική ταλαντούμενη μάζα είναι η μάζα άνωθεν της διεπιφάνειας κατασκευής- εδάφους, η οποία υφίσταται ελεύθερη μετατόπιση κατά την θεωρούμενη διεύθυνση υπολογισμού. Δρώσα ιδιομορφική μάζα είναι το μέρος της συνολικής ταλαντούμενης μάζας που ενεργοποιείται για κάθε ιδιομορφή ταλάντωσης. Στον Πίνακα 4-1 παρουσιάζεται τα αποτελέσματα των πρώτων 12 ιδιομορφών του φορέα. Η πρώτη και η δεύτερη ιδιομορφή είναι μεταφορικές, ενώ η τρίτη περιστροφική και για τις δύο διευθύνσεις. [31]

Πίνακας 4-1: Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης

TABLE: Modal Participating Mass Ratios													
Step	Period	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ	RX	RY	RZ	SumRX	SumRY	SumRZ
Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
1	6.055271	0.00397	0.54465	1.931E-09	0.00397	0.54465	1.931E-09	0.39108	0.00285	3.468E-12	0.39108	0.00285	3.468E-12
2	6.010071	0.54557	0.00398	1.558E-08	0.54954	0.54863	1.751E-08	0.00285	0.39056	9.423E-12	0.39393	0.39341	1.289E-11
3	1.197231	0.00118	0.30757	1.281E-08	0.55072	0.8562	3.032E-08	0.14036	0.00054	1.694E-09	0.5343	0.39395	1.707E-09
4	1.196354	0.30658	0.00117	4.806E-08	0.85729	0.85737	7.838E-08	0.00054	0.14078	4.821E-11	0.53483	0.53473	1.756E-09
5	0.515822	3.006E-10	6.079E-10	1.502E-09	0.85729	0.85737	7.988E-08	4.901E-09	7.359E-10	0.62792	0.53483	0.53473	0.62792
6	0.48046	0.00275	0.04345	5.447E-07	0.86004	0.90081	6.245E-07	0.13056	0.00827	1.913E-07	0.66539	0.54299	0.62792
7	0.48014	0.04374	0.00275	0.00003604	0.90378	0.90356	0.00003667	0.00827	0.13184	1.009E-12	0.67366	0.67484	0.62792
8	0.443496	0.000002341	4.107E-07	0.96097	0.90378	0.90356	0.961	0.000001451	0.000008374	1.132E-09	0.67366	0.67484	0.62792
9	0.412077	8.517E-07	7.599E-07	0.00001164	0.90378	0.90356	0.96101	0.000003037	0.000003378	2.038E-07	0.67367	0.67485	0.62793
10	0.324779	0.0002	0.01382	7.748E-07	0.90399	0.91739	0.96102	0.06724	0.00099	3.202E-07	0.74091	0.67584	0.62793
11	0.323939	0.01358	0.0002	0.000005441	0.91757	0.91759	0.96102	0.00098	0.06592	9.769E-11	0.74189	0.74176	0.62793
12	0.206401	8.938E-09	5.138E-07	1.411E-08	0.91757	0.91759	0.96102	0.00000483	8.136E-08	0.00086	0.74189	0.74176	0.62878

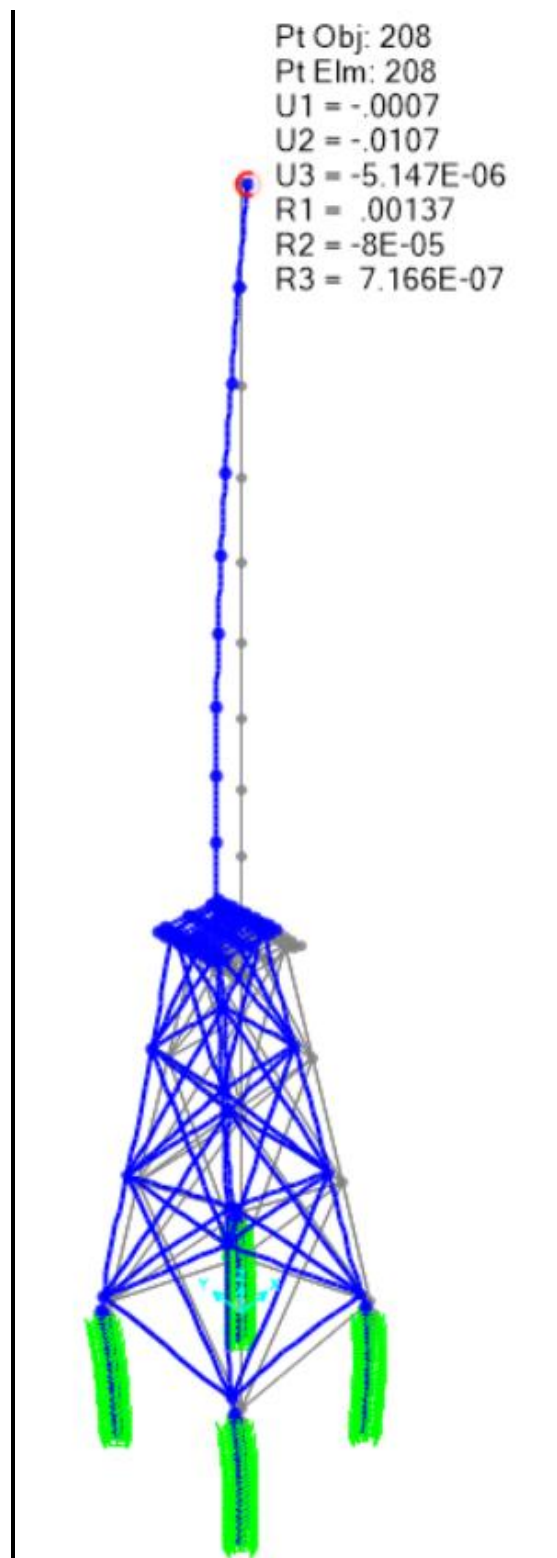
Με βάση τον Πίνακα 4-1 προκύπτει ότι στην διεύθυνση X του φορέα το 90% της μάζας συγκεντρώνεται στην 7^η ιδιομορφή, ενώ στην διεύθυνση Y στην 6^η ιδιομορφή. Επιπλέον, προκύπτουν και οι ιδιοπερίοδοι για τις δύο κύριες διευθύνσεις του φορέα όπου $T_x=1.133$ [sec] και $T_y=1.129$ [sec]. Παρακάτω στα Σχήματα 4-1, 4-2, 4-3 παρουσιάζεται ο παραμορφωμένος φορέας για τις τρεις κύριες ιδιομορφές.



Σχήμα 4-1: 1^η Ιδιομορφή στη διεύθυνση Y ($T_y=6.05527$ sec)



Σχήμα 4-2: 2^η Ιδιομορφή στη διεύθυνση X ($T_x=6.01007\text{sec}$)



Σχήμα 4-3: 3^η Ιδιομορφή περιστροφική ($T=1.19723\text{sec}$)

4.3 Φαινόμενα 2^{ης} τάξης

Ελέγχεται η επιρροή φαινομένων 2^{ης} τάξης, προκειμένου να διαπιστωθεί αν χρειάζεται να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση, προσαιξάνοντας κατάλληλα τις σεισμικές δυνάμεις. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν 5 ιδιομορφικές αναλύσεις λυγισμού της κατασκευής υπό τη δράση των δυσμενέστερων συνδυασμών:

- 1.35G+1.5Q+0.9W_{-Y}+0.9WAV_{-Y}
- 1.35G+1.5Q+0.9W_{-X}+0.9WAV_{-X}
- 1.35G+1.05Q+1.5W_{-Y}+0.9WAV_{-Y}
- 1.35G+1.05Q+1.5W_{-X}+0.9WAV_{-X}
- 1.35G+1.05Q+0.9W_{-X}+0.9WAV_{-Y}+1.5WAV₋₁₃₅

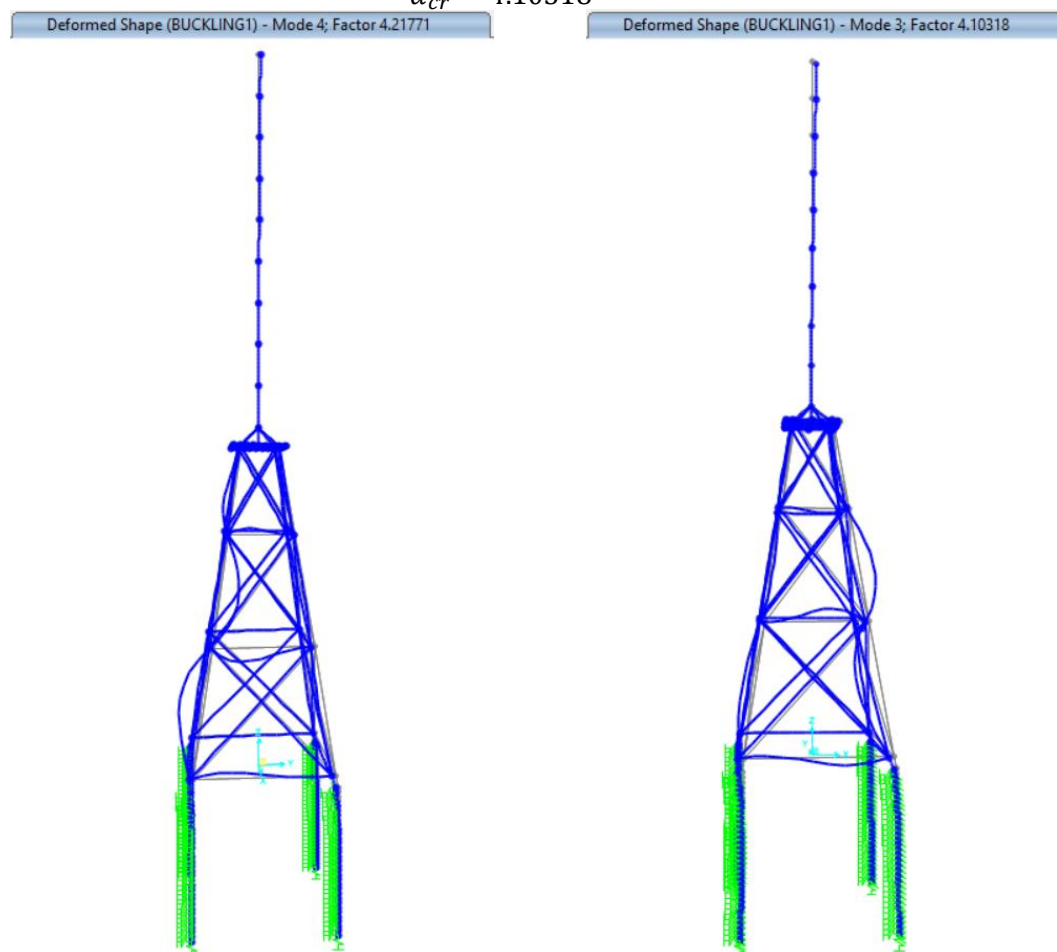
Από την κρίσιμη ιδιομορφή λυγισμού κατά X και κατά Y υπολογίζεται ο συντελεστής α_{cr} με τον οποίο θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί η φόρτιση σχεδιασμού, για να προκληθεί καθολική ελαστική αστάθεια.

- **1.35G+1.5Q+0.9W_{-Y}+0.9WAV_{-Y}**

Για την πρώτη περίπτωση η κυρίαρχη ιδιομορφή λυγισμού για την κατεύθυνση X είναι η ιδιομορφή λυγισμού No.4 (Σχήμα 4-4) με συντελεστή $\alpha_{cr}=4.21771$, καθώς και για την κατεύθυνση Y η κυρίαρχη ιδιομορφή είναι η ιδιομορφή λυγισμού No.3 (Σχήμα 4-4) με συντελεστή $\alpha_{cr}=4.10318$. Άρα, με συντελεστή συμπεριφοράς $q=1.5$ υπολογίζεται:

$$\theta_x = \frac{q}{\alpha_{cr}} = \frac{1.5}{4.21771} = 0.356 > 0.1 \quad (4-1)$$

$$\theta_y = \frac{q}{\alpha_{cr}} = \frac{1.5}{4.10318} = 0.365 > 0.1 \quad (4-2)$$



Σχήμα 4-4: 4^η Ιδιομορφή λυγισμού - X, $\alpha_{cr}=4.21771$ και 3^η Ιδιομορφή λυγισμού - Y, $\alpha_{cr}=4.10318$

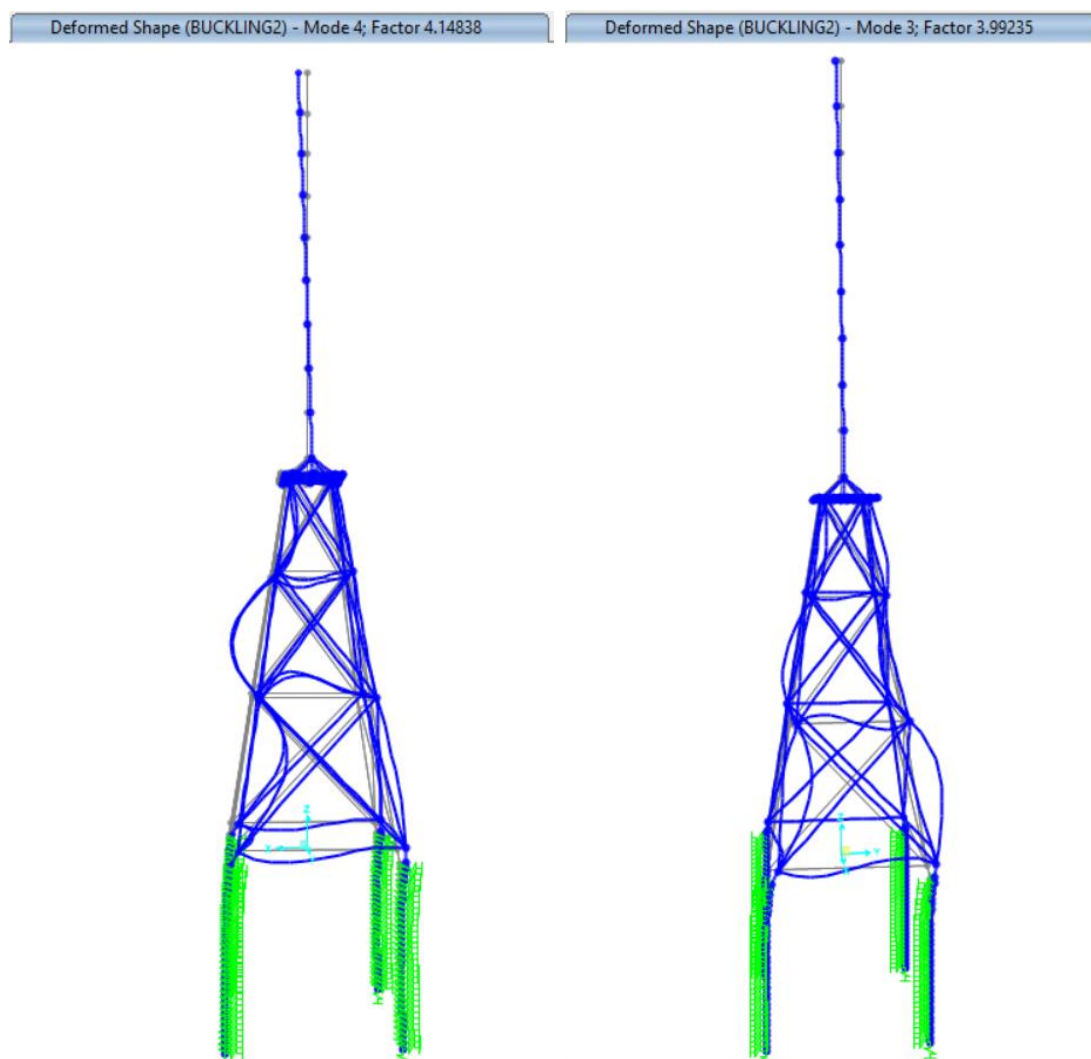
Οι διατάξεις του EN1998-1 δηλώνουν ότι αν $\theta > 0.1$, τα φαινόμενα δευτέρας τάξης δεν μπορούν να αγνοηθούν.

- **1.35G+1.5Q+0.9W_X+0.9WAV_X**

Για την δεύτερη περίπτωση η κυρίαρχη ιδιομορφή λυγισμού για την κατεύθυνση X είναι η ιδιομορφή λυγισμού No.4 (Σχήμα 4-5) με συντελεστή $\alpha_{cr}=4.14838$, καθώς και για την κατεύθυνση Y η κυρίαρχη ιδιομορφή είναι η ιδιομορφή λυγισμού No.3 (Σχήμα 4-5) με συντελεστή $\alpha_{cr}=3.99235$. Άρα, με συντελεστή συμπεριφοράς $q=1.5$ υπολογίζεται:

$$\theta_x = \frac{q}{\alpha_{cr}} = \frac{1.5}{4.14838} = 0.362 > 0.1 \quad (4-3)$$

$$\theta_y = \frac{q}{\alpha_{cr}} = \frac{1.5}{3.99235} = 0.376 > 0.1 \quad (4-4)$$



Σχήμα 4-5: 4^η Ιδιομορφή λυγισμού - X, $\alpha_{cr}=4.21771$ και 3^η Ιδιομορφή λυγισμού - Y, $\alpha_{cr}=3.99235$

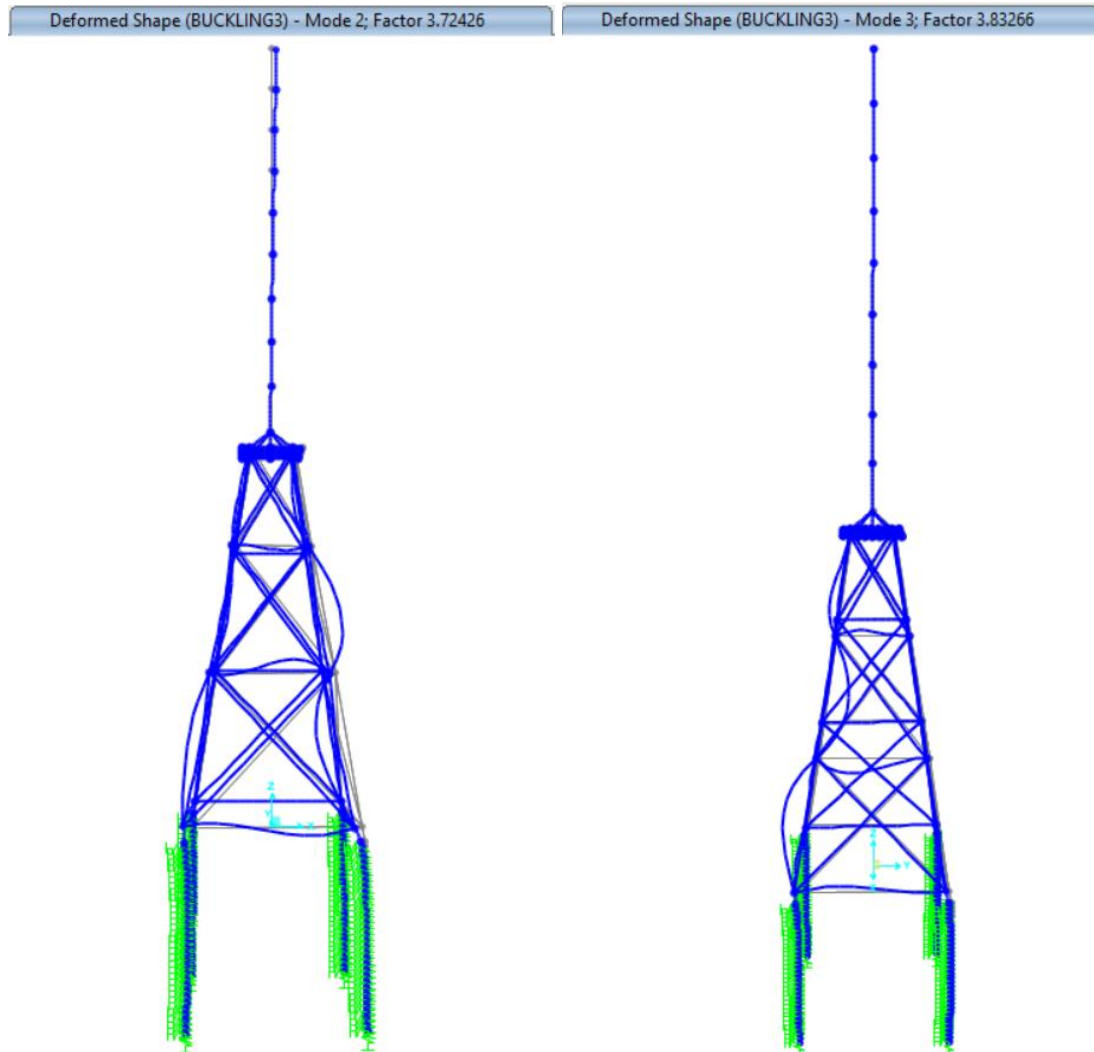
Οι διατάξεις του EN1998-1 δηλώνουν ότι αν $\theta > 0.1$, τα φαινόμενα δευτέρας τάξης δεν μπορούν να αγνοηθούν.

- **1.35G+1.05Q+1.5W₋Y+0.9WAV₋Y**

Για την τρίτη περίπτωση η κυρίαρχη ιδιομορφή λυγισμού για την κατεύθυνση X είναι η ιδιομορφή λυγισμού Νο.2 (Σχήμα 4-6) με συντελεστή $\alpha_{cr}=3.72426$, καθώς και για την κατεύθυνση Y η κυρίαρχη ιδιομορφή είναι η ιδιομορφή λυγισμού Νο.3 (Σχήμα 4-6) με συντελεστή $\alpha_{cr}=3.83266$. Άρα, με συντελεστή συμπεριφοράς $q=1.5$ υπολογίζεται:

$$\theta_x = \frac{q}{\alpha_{cr}} = \frac{1.5}{3.72426} = 0.403 > 0.1 \quad (4-5)$$

$$\theta_y = \frac{q}{\alpha_{cr}} = \frac{1.5}{3.83266} = 0.391 > 0.1 \quad (4-6)$$



Σχήμα 4-6: 2^η Ιδιομορφή λυγισμού - X, $\alpha_{cr}=3.72426$ και 3^η Ιδιομορφή λυγισμού - Y, $\alpha_{cr}=3.83266$

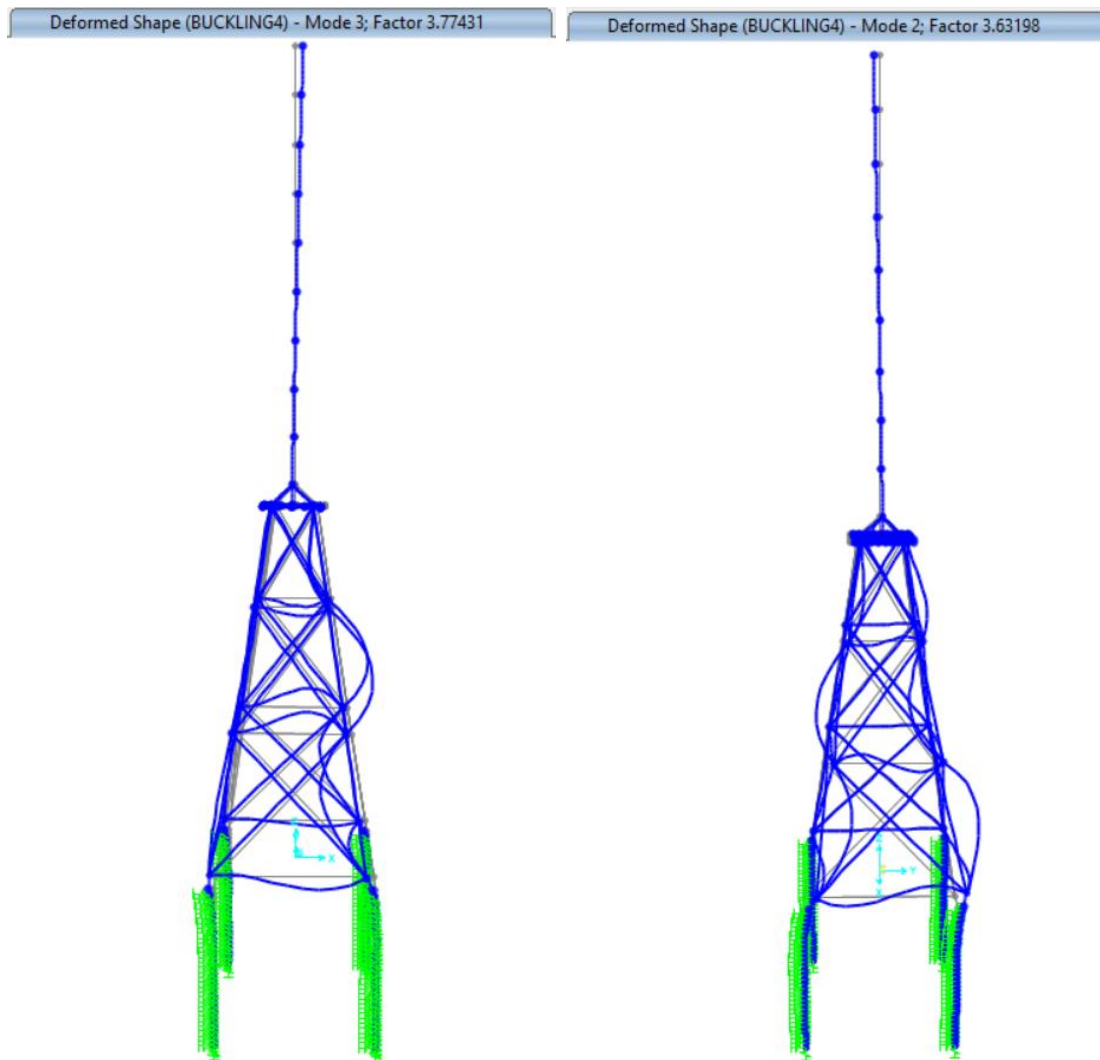
Οι διατάξεις του EN1998-1 δηλώνουν ότι αν $\theta > 0.1$, τα φαινόμενα δευτέρας τάξης δεν μπορούν να αγνοηθούν.

- **1.35G+1.05Q+1.5W_X+0.9WAV_X**

Για την τέταρτη περίπτωση η κυρίαρχη ιδιομορφή λυγισμού για την κατεύθυνση X είναι η ιδιομορφή λυγισμού Νο.3 (Σχήμα 4-7) με συντελεστή $\alpha_{cr}=3.77431$, καθώς και για την κατεύθυνση Y η κυρίαρχη ιδιομορφή είναι η ιδιομορφή λυγισμού Νο.2 (Σχήμα 4-7) με συντελεστή $\alpha_{cr}=3.63198$. Άρα, με συντελεστή συμπεριφοράς $q=1.5$ υπολογίζεται:

$$\theta_x = \frac{q}{\alpha_{cr}} = \frac{1.5}{3.77431} = 0.397 > 0.1 \quad (4-7)$$

$$\theta_y = \frac{q}{\alpha_{cr}} = \frac{1.5}{3.63198} = 0.413 > 0.1 \quad (4-8)$$



Σχήμα 4-7: 3^η Ιδιομορφή λυγισμού - X, $\alpha_{cr}=3.77431$ και 2^η Ιδιομορφή λυγισμού -Y, $\alpha_{cr}=3.63198$

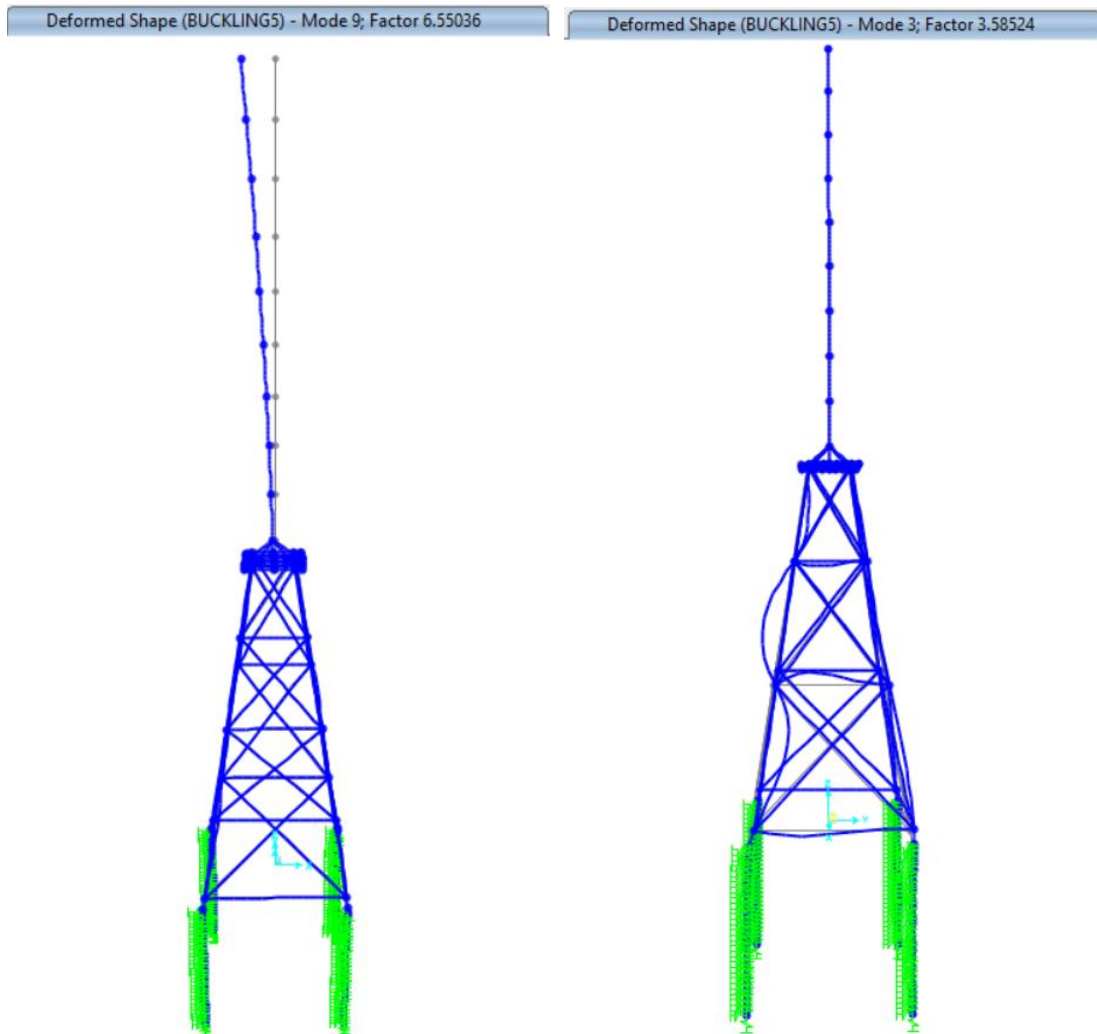
Οι διατάξεις του EN1998-1 δηλώνουν ότι αν $\theta > 0.1$, τα φαινόμενα δευτέρας τάξης δεν μπορούν να αγνοηθούν.

- **1.35G+1.05Q+0.9W_X+0.9WAV_-Y+1.5WAV_-135**

Για την πέμπτη περίπτωση η κυρίαρχη ιδιομορφή λυγισμού για την κατεύθυνση X είναι η ιδιομορφή λυγισμού Νο.9 (Σχήμα 4-8) με συντελεστή $\alpha_{cr}=6.55036$, καθώς και για την κατεύθυνση Y η κυρίαρχη ιδιομορφή είναι η ιδιομορφή λυγισμού Νο.3 (Σχήμα 4-8) με συντελεστή $\alpha_{cr}=3.58524$. Άρα, με συντελεστή συμπεριφοράς $q=1.5$ υπολογίζεται:

$$\theta_x = \frac{q}{\alpha_{cr}} = \frac{1.5}{6.55036} = 0.229 > 0.1 \quad (4-9)$$

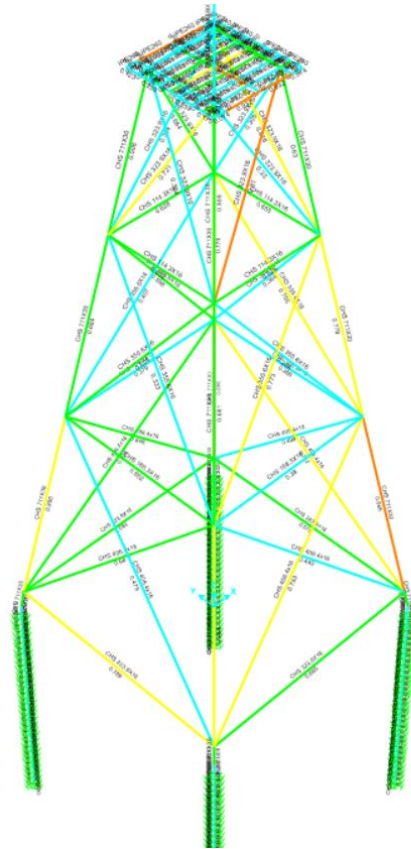
$$\theta_y = \frac{q}{\alpha_{cr}} = \frac{1.5}{3.58524} = 0.418 > 0.1 \quad (4-10)$$



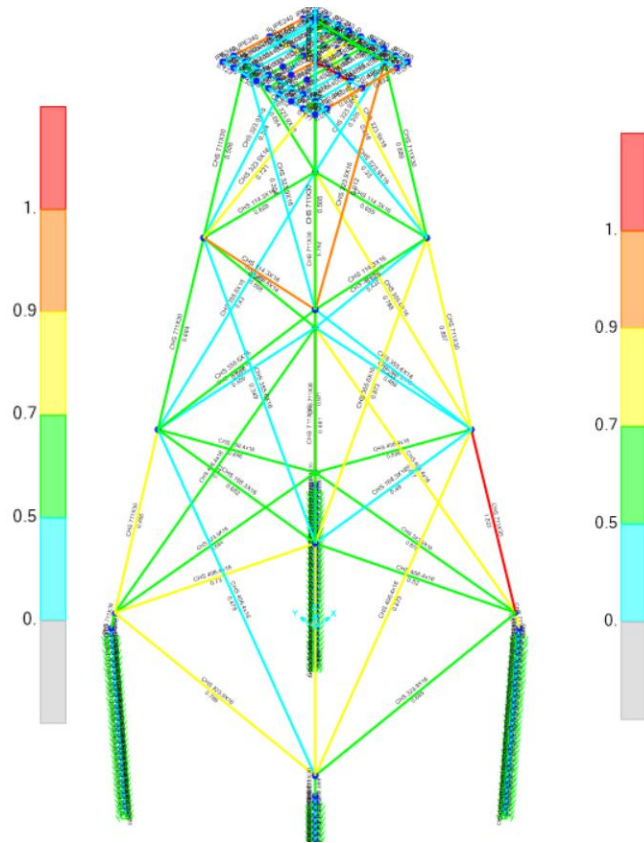
Σχήμα 4-8: 9^η Ιδιομορφή λυγισμού - X, $\alpha_{cr}=6.55036$ και 3^η Ιδιομορφή λυγισμού - Y, $\alpha_{cr}=3.58524$

Οι διατάξεις του EN1998-1 δηλώνουν ότι αν $\theta > 0.1$, τα φαινόμενα δευτέρας τάξης δεν μπορούν να αγνοηθούν.

Επομένως θα ληφθούν υπ' όψη τα φαινόμενα P-Δ στην καθολική ανάλυση του προσομοιώματος και μέσω της σχετικής επιλογής του SAP 2000 θα εκτελέσουμε μη γραμμική ανάλυση P-δ για τους 5 παραπάνω συνδυασμούς.

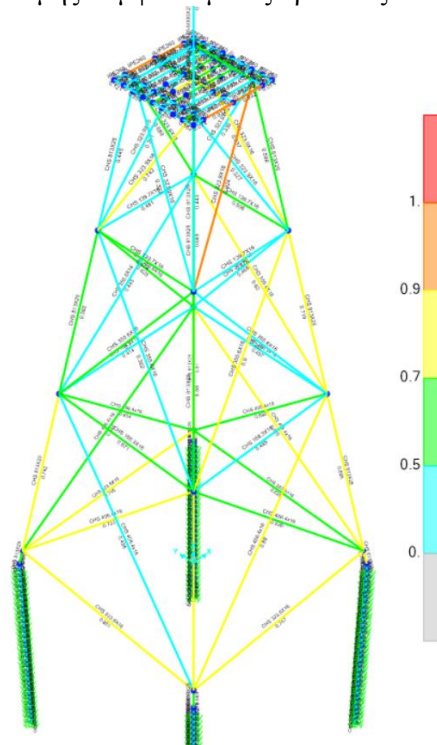


Σχήμα 4-9: Λόγοι αξιοπ. μελών, γραμ. ανάλυση



Σχήμα 4-10: Λόγοι αξιοπ. μελών, buckling analysis

Παρατηρήθηκε, έπειτα από την ανωτέρω ανάλυση η αύξηση των λόγων χρησιμοποίησης για ορισμένα στοιχεία, πιο συγκεκριμένα για τους πυλώνες του jacket ο μέγιστος λόγος χρησιμοποίησης προκύπτει 1.032, για τα πάνω δοκάρια του jacket 0.982 και για τα δοκάρια του καταστρώματος 1.165. Για αυτά τα δομικά στοιχεία προέκυψε απαίτηση αύξηση μίας διαμέτρου της διατομής σύμφωνα με τις πρότυπες κοίλες κυκλικές διατομές.



Σχήμα 4-11: Λόγοι αξιοποίησης μελών jacket μετά την αλλαγή διατομών, buckling analysis

4.4 Έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και οι αντίστοιχοι έλεγχοι για κάθε μέλος του φορέα, για τον δυσμενέστερο συνδυασμό για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας.

4.4.1 Κατάταξη των διατομών

Η κατάταξη των διατομών σε κατηγορίες αποσκοπεί στην επιλογή της κατάλληλης μεθόδου υπολογισμού της αντοχής των διατομών της κατασκευής, ώστε να αναγνωριστεί η έκταση στην οποία η αντοχή και η στρωφική ικανότητα των διατομών περιορίζεται από την ανάπτυξη φαινομένων τοπικού λυγισμού.

Οι διατομές κατατάσσονται στις ακόλουθες 4 κατηγορίες:

- 1^η κατηγορία: έχουν την απαιτούμενη στρωφική ικανότητα για το σχηματισμό πλαστικής άρθρωσης, χωρίς μείωση της αντοχής τους
- 2^η κατηγορία: μπορούν να αναπτύξουν πλαστική ροπή αντοχής, αλλά έχουν περιορισμένη στρωφική ικανότητα
- 3^η κατηγορία: η ακραία θλιβόμενη ίνα φτάνει το όριο διαρροής, αλλά ο τοπικός λυγισμός εμποδίζει την ανάπτυξη πλαστικής ροπής αντοχής
- 4^η κατηγορία: ο τοπικός λυγισμός προηγείται της ανάπτυξης τάσης διαρροής σε οποιοδήποτε σημείο τους

Η κατάταξη γίνεται με βάση τον λόγο πλάτους προς πάχος d/t καθενός από τα θλιβόμενα στοιχεία της διατομής λόγω θλίψης ή/και κάμψης.

Η διατομή του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι κοίλη κυκλική μεταβαλλόμενη ανά 10 [m] ύψους και υπόκειται σε σύγχρονη θλίψη και κάμψη. Η κατάταξη αυτής γίνεται με βάση τον παρακάτω Πίνακα 4-2:

Πίνακας 4-2: Κατάταξη διατομής αναλόγως την ποιότητα χάλυβα και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών

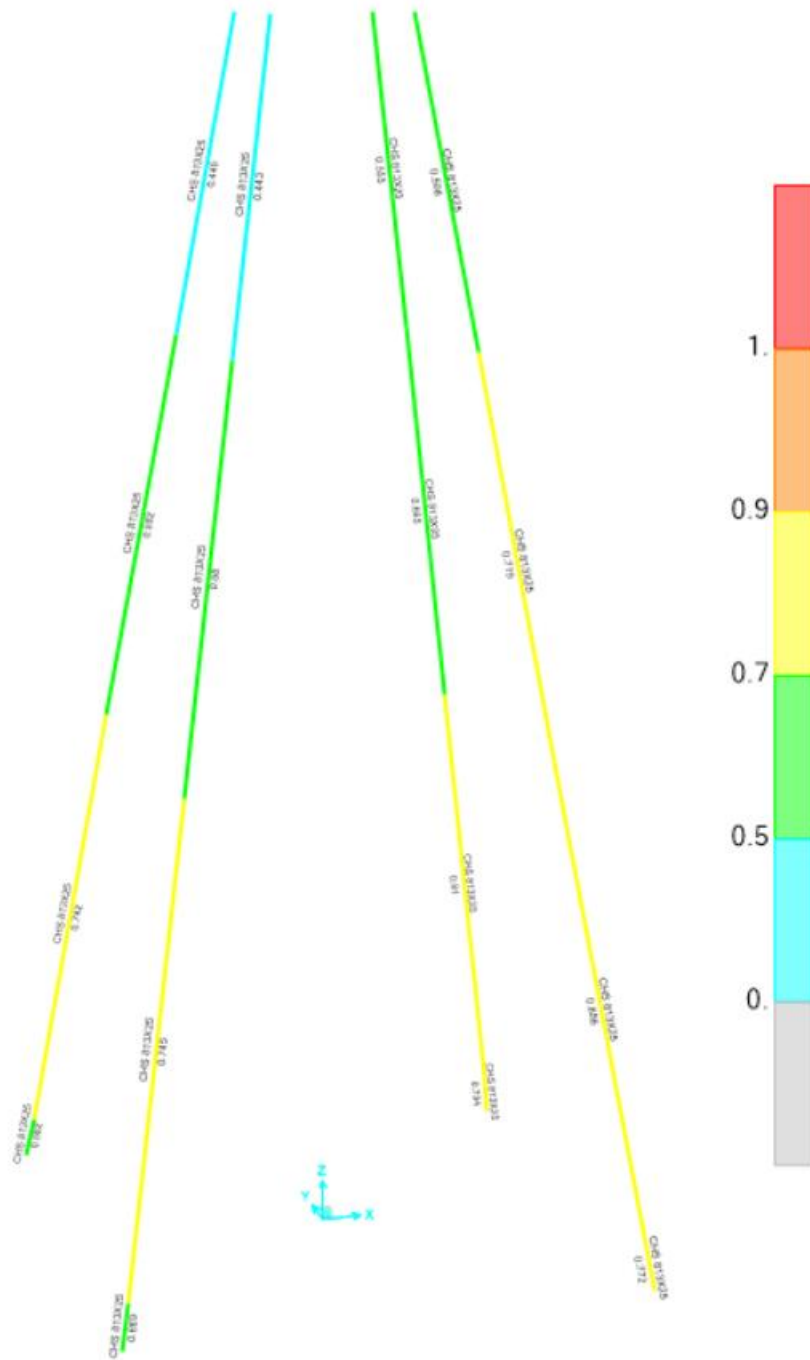
Κατηγορία		Διατομή σε κάμψη και/ή θλίψη				
1		$d/t \leq 50 \varepsilon^2$				
2		$d/t \leq 70 \varepsilon^2$				
3		$d/t \leq 90 \varepsilon^2$				
ΣΗΜΕΙΩΣΗ Για $d/t > 90 \varepsilon^2$ βλέπε EN 1993-1-6.						
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

4.4.1.1 Υποστυλώματα Jacket

Για τα υποστυλώματα του jacket επιλέχθηκε ενιαία διατομή και για τα 75.5 [m], κοίλη κυκλική CHS 813x25. Η διατομή είναι κατηγορίας 2 αφού ικανοποιεί τον έλεγχο για σωληνωτές διατομές σε κάμψη και θλίψη:

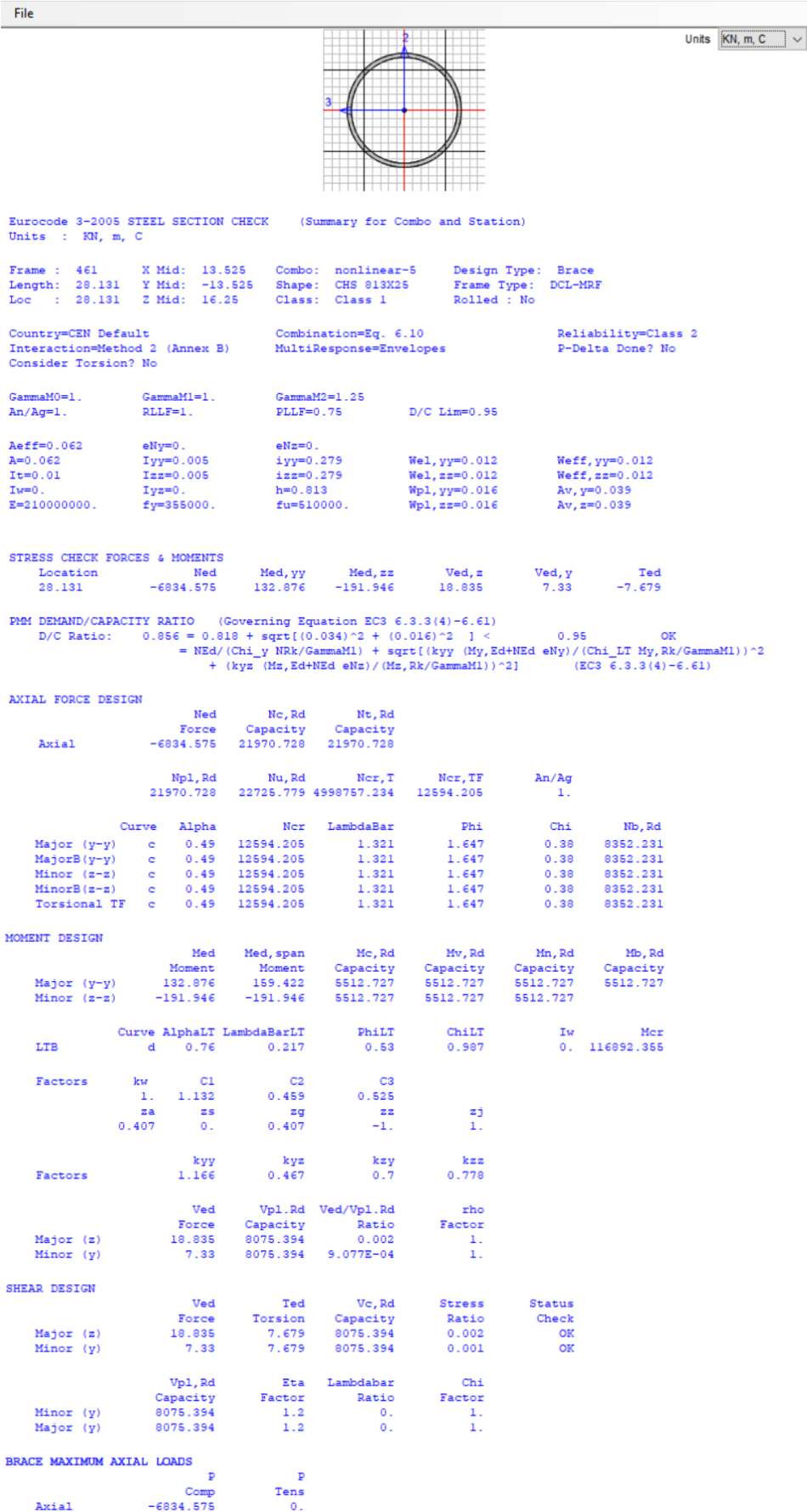
$$d/t = 813/25 = 32.52 \leq 70 \varepsilon^2 = 46.2 \rightarrow \text{Κατηγορία 2}$$

Η δυσμενέστερη φόρτιση για τα υποστυλώματα είναι οι μη γραμμικοί συνδυασμοί, και συγκεκριμένα ο 1.35G+1.05Q+0.9W_X+0.9W_-Y+1.5WAV_-135:



Σχήμα 4-12: Συντελεστές αξιοποίησης υποστρωμάτων CHS 813x25

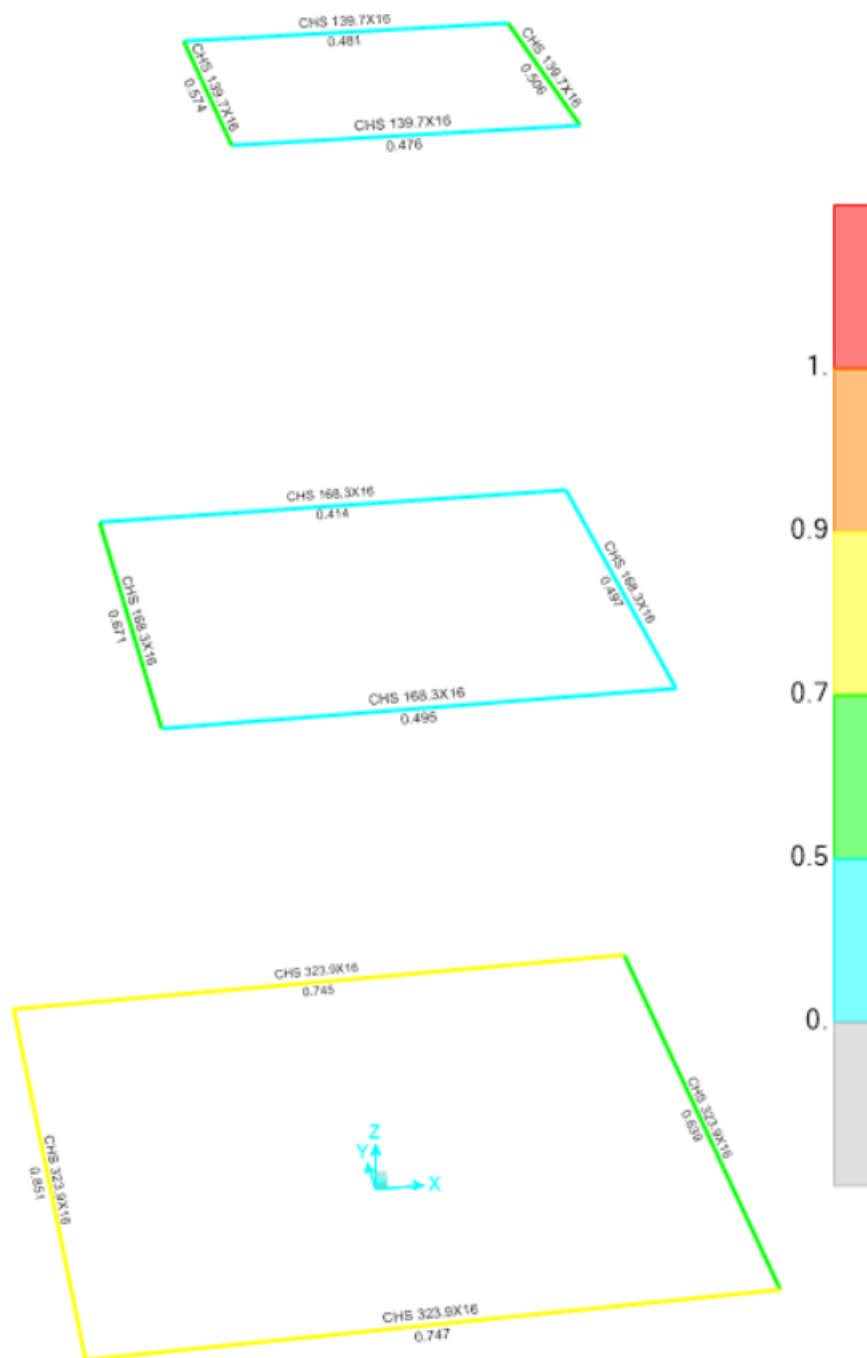
Ο μεγαλύτερος συντελεστής αξιοποίησης της διατομής για έλεγχο μέλους σε διαξονική κάμψη και θλίψη προκύπτει ίσος με $0.856 < 1.0$, επομένως η διατομή επαρκεί. (Σχήμα 4-12)



Σχήμα 4-13: Έλεγχος μέλους οπιστολόματος CHS 813x25

4.4.1.2 Δοκοί jacket

Για τις δοκούς του jacket επιλέχθηκαν κοίλες κυκλικές διατομές CHS 406.4x16, CHS 168.3x16 και CHS 139.7x16.



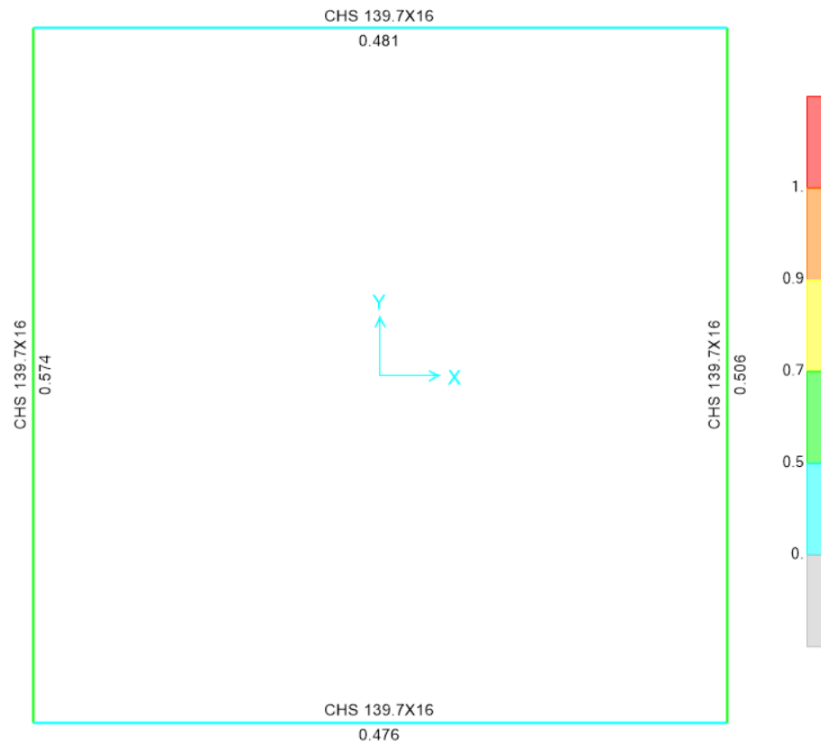
Σχήμα 4-14: Συντελεστές αξιοποίησης δοκών jacket

- **CHS 406.4x16:**

Η διατομή είναι κατηγορίας 1 αφού ικανοποιεί τον έλεγχο για σωληνωτές διατομές σε κάμψη και θλίψη:

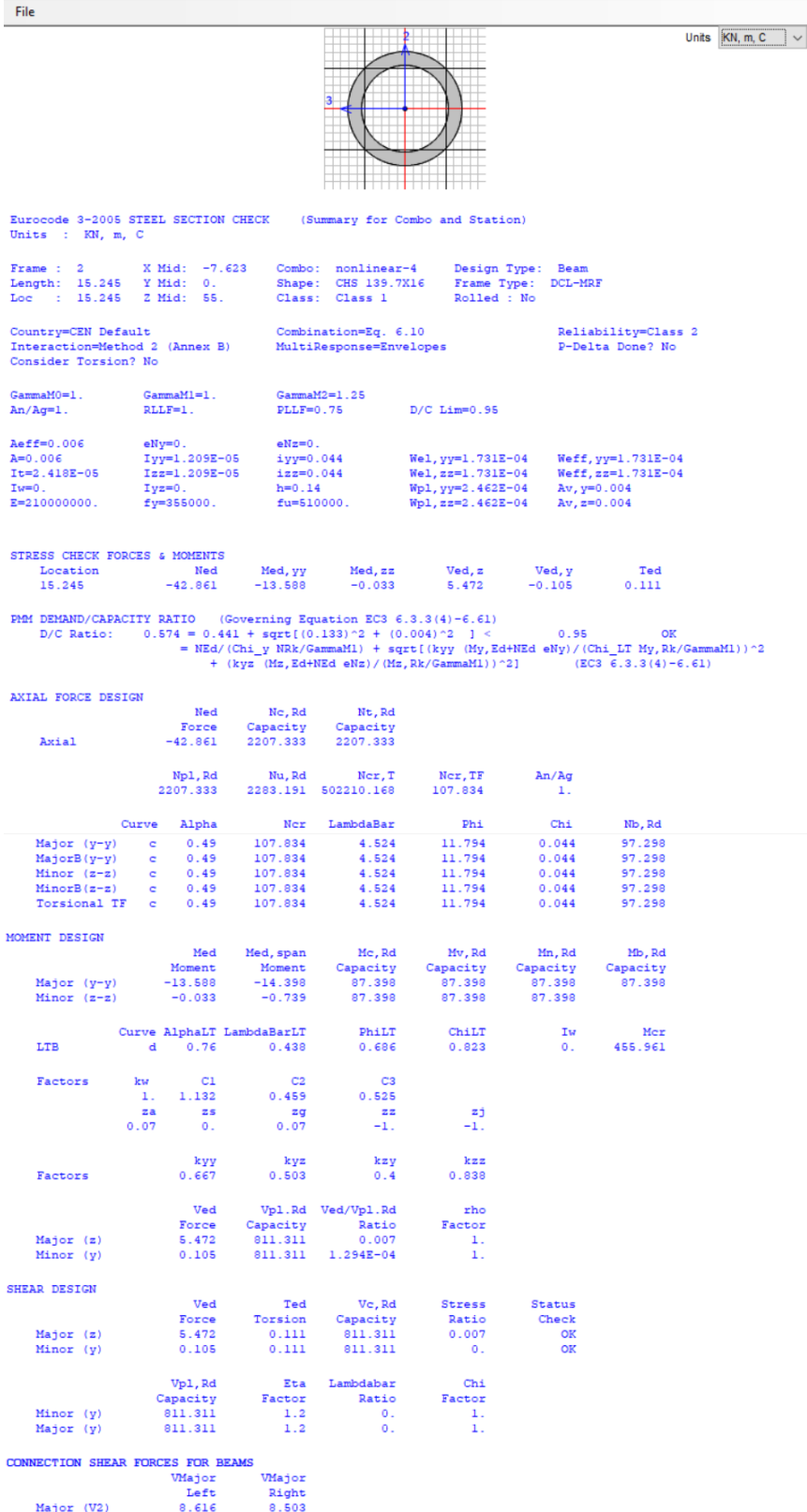
$$d/t = 406.4/16 = 25.4 \leq 50 \varepsilon^2 = 33 \rightarrow \text{Κατηγορία 1}$$

Η δυσμενέστερη φόρτιση για τις δοκούς είναι οι μη γραμμική συνδυασμοί, και συγκεκριμένα ο $1.35G+1.05Q+1.5W_X+0.9WAV_X$ - nonlinear:



Σχήμα 4-15: Συντελεστές αξιοποίησης δοκών jacket CHS 139.7x16

Ο μεγαλύτερος συντελεστής αξιοποίησης της διατομής για έλεγχο μέλους σε διαξονική κάμψη και θλίψη προκύπτει ίσος με $0.574 < 1.0$, επομένως η διατομή επαρκεί. (Σχήμα 4-15)



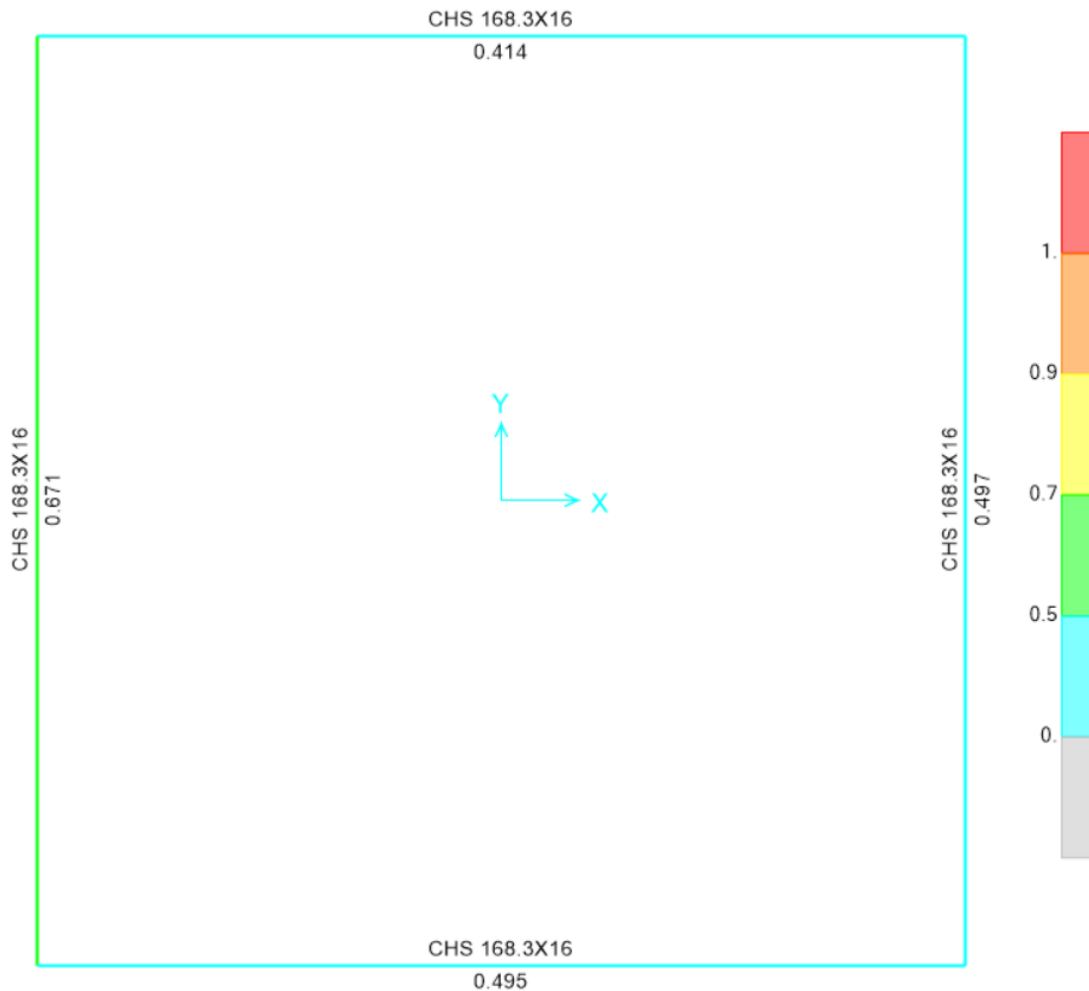
Σχήμα 4-16: Έλεγχος μέλους δοκών jacket CHS 139.7x16

- **CHS 168.3x16:**

Η διατομή είναι κατηγορίας 1 αφού ικανοποιεί τον έλεγχο για σωληνωτές διατομές σε κάμψη και θλίψη:

$$d/t = 168.3/16 = 10.5 \leq 50 \varepsilon^2 = 33 \rightarrow \text{Κατηγορία 1}$$

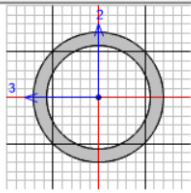
Η δυσμενέστερη φόρτιση για τις δοκούς είναι ο συνδυασμός $1.35G+1.05Q+1.5W_X+0.9WAV_X$:



Σχήμα 4-17: Συντελεστές αξιοποίησης δοκών jacket CHS 168.3x16

Ο μεγαλύτερος συντελεστής αξιοποίησης της διατομής για έλεγχο μέλους σε διαξονική κάμψη και θλίψη προκύπτει ίσος με $0.671 < 1.0$, επομένως η διατομή επαρκεί. (Σχήμα 4-17)

File



Units: KN, m, C

Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
 Units : KN, m, C

Frame : 478 X Mid: -11.43 Combo: 1.35G+1.05Q+1.5W Design Type: Beam
 Length: 22.861 Y Mid: 0. Shape: CHS 168.3X16 Frame Type: DCL-MRF
 Loc : 22.861 Z Mid: 30. Class: Class 1 Rolled : No

Country=CEN Default Combination=Eq. 6.10 Reliability=Class 2
 Interaction=Method 2 (Annex B) MultiResponse=Envelopes P-Delta Done? No
 Consider Torsion? No

GammaM0=1. GammaM1=1. GammaM2=1.25
 An/Ag=1. RLLF=1. PLLF=0.75 D/C Lim=0.95

Aeff=0.008 eNy=0. eNz=0.
 A=0.008 Iyy=2.244E-05 iyy=0.054 Wel,yy=2.667E-04 Weff,yy=2.667E-04
 It=4.488E-05 Iz=2.244E-05 iz=0.054 Wel,zz=2.667E-04 Weff,zz=2.667E-04
 Iw=0. Iyz=0. h=0.168 Wpl,yy=3.725E-04 Av,y=0.005
 E=210000000. fy=355000. fu=510000. Wpl,zz=3.725E-04 Av,z=0.005

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS

Location	Med	Med,yy	Med,zz	Ved,z	Ved,y	Ted
22.861	-36.786	-34.603	-1.566	9.04	0.506	-0.052

DM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.61)
 D/C Ratio: $0.671 = 0.45 + \sqrt{(0.222)^2 + (0.007)^2} < 1 < 0.95$ OK
 $= NEd / (\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}) + \sqrt{(k_{yy} (M_y, Ed + NEd) e_{Ny}) / (\chi_{LT} M_{y, Rk} / \gamma_{M1})^2 + (k_{yz} (M_z, Ed + NEd) e_{Nz}) / (M_{z, Rk} / \gamma_{M1})^2}$ (EC3 6.3.3(4)-6.61)

AXIAL FORCE DESIGN

	Med	Nc, Rd	Nt, Rd
Axial	Force	Capacity	Capacity
	-36.786	2717.679	2717.679

	Npl, Rd	Nu, Rd	Ncr, T	Ncr, TF	An/Ag
	2717.679	2811.075	618323.433	88.998	1.

	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb, Rd
Major (y-y)	c	0.49	88.998	5.526	17.073	0.03	81.791
MajorB (y-y)	c	0.49	88.998	5.526	17.073	0.03	81.791
Minor (z-z)	c	0.49	88.998	5.526	17.073	0.03	81.791
MinorB (z-z)	c	0.49	88.998	5.526	17.073	0.03	81.791
Torsional TF	c	0.49	88.998	5.526	17.073	0.03	81.791

MOMENT DESIGN

	Med	Med, span	Mc, Rd	Mv, Rd	Mn, Rd	Mb, Rd
	Moment	Moment	Capacity	Capacity	Capacity	Capacity
Major (y-y)	-34.603	-34.603	132.234	132.234	132.234	132.234
Minor (z-z)	-1.566	-2.492	132.234	132.234	132.234	132.234

	Curve	AlphaLT	LambdaBarLT	PhiLT	ChiLT	Iw	Mcr
LTB	d	0.76	0.474	0.716	0.798	0.	588.699

	kw	C1	C2	C3
Factors	1.	1.132	0.459	0.525

	za	zs	zg	zj
Factors	0.084	0.	0.084	-1.

	kyy	kyz	kzy	kzz
Factors	0.676	0.369	0.405	0.615

	Ved	Vpl, Rd	Ved/Vpl, Rd	rho
	Force	Capacity	Ratio	Factor
Major (z)	9.04	998.889	0.009	1.
Minor (y)	0.506	998.889	5.070E-04	1.

SHEAR DESIGN

	Ved	Ted	Vc, Rd	Stress	Status
	Force	Torsion	Capacity	Ratio	Check
Major (z)	9.04	0.052	998.889	0.009	OK
Minor (y)	0.506	0.052	998.889	0.001	OK

	Vpl, Rd	Eta	LambdaBar	Chi
	Capacity	Factor	Ratio	Factor
Minor (y)	998.889	1.2	0.	1.
Major (y)	998.889	1.2	0.	1.

CONNECTION SHEAR FORCES FOR BEAMS

	VMajor	VMajor
	Left	Right
Major (V2)	9.004	9.047

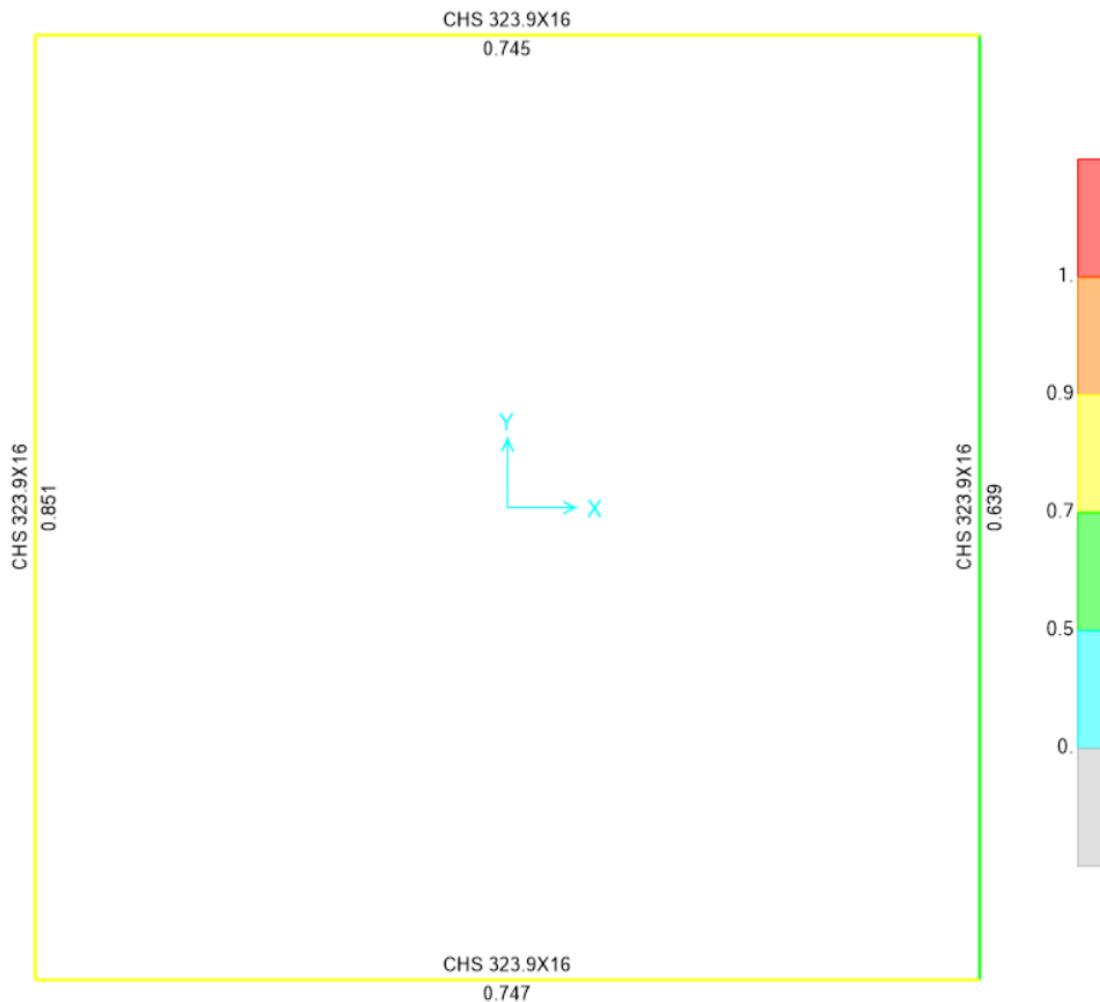
Σχήμα 4-18: Έλεγχος μέλους δοκών jacket CHS 168.3x16

- **CHS 139.7x16:**

Η διατομή είναι κατηγορίας 1 αφού ικανοποιεί τον έλεγχο για σωληνωτές διατομές σε κάμψη και θλίψη:

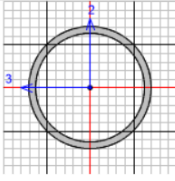
$$d/t = 139.7/16 = 8.73 \leq 50 \varepsilon^2 = 33 \rightarrow \text{Κατηγορία 1}$$

Η δυσμενέστερη φόρτιση για τις δοκούς είναι ο συνδυασμός $1.35G+1.05Q+0.9W_X+1.5WAV_X$:



Σχήμα 4-19: Συντελεστές αξιοποίησης δοκών jacket CHS 323.9x16

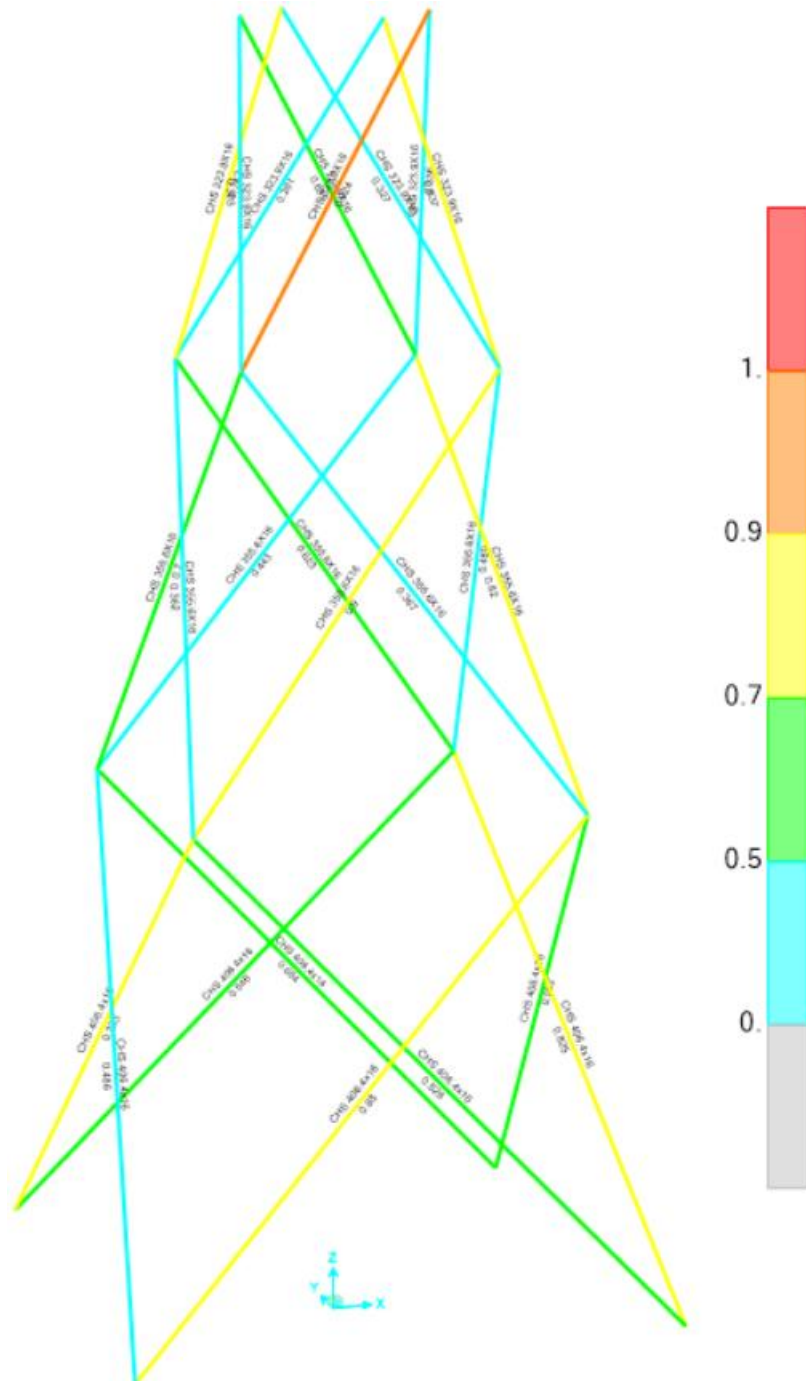
Ο μεγαλύτερος συντελεστής αξιοποίησης της διατομής για έλεγχο μέλους σε διαξονική κάμψη και θλίψη προκύπτει ίσος με $0.851 < 1.0$, επομένως η διατομή επαρκεί. (Σχήμα 4-19)

File		Units KN, m, C					
							
Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)							
Units : KN, m, C							
Frame : 456	X Mid: -15.619	Combo: 1.35G+1.05Q+0.9W	Design Type: Beam				
Length: 31.238	Y Mid: 0.	Shape: CHS 323.9x16	Frame Type: DCL-MRF				
Loc : 31.238	Z Mid: 2.5	Class: Class 1	Rolled : No				
Country=CEN Default	Interaction=Method 2 (Annex B)	Combination=Eq. 6.10	Reliability=Class 2				
Consider Torsion? No	MultiResponse=Envelopes		P-Delta Done? No				
GammaM0=1.	GammaM1=1.	GammaM2=1.25					
An/Ag=1.	RLLF=1.	PLLF=0.75	D/C Lim=0.95				
Aeff=0.015	eNy=0.	eNz=0.					
A=0.015	Iyy=1.839E-04	iyy=0.109	Wel,yy=0.001				
It=3.678E-04	Izz=1.839E-04	izz=0.109	Wel,zz=0.001				
Iw=0.	Iyz=0.	hw=0.324	Wpl,yy=0.002				
E=2100000000.	fy=355000.	fu=510000.	Wpl,zz=0.002				
			Av,y=0.01				
			Av,z=0.01				
STRESS CHECK FORCES & MOMENTS							
Location	Ned	Med,yy	Med,zz	Ved,z	Ved,y	Ted	
31.238	-263.414	-36.912	3.858	8.438	-0.385	2.177	
PRM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.61)							
D/C Ratio:	0.851 = 0.763 + sqrt[(0.088)^2 + (0.007)^2]		<	0.95	OK		
	= NEd / (Chi_y NRk / GammaM1) + sqrt[(kyy (My,Ed+NEd eNy) / (Chi_LT My,Rk / GammaM1))^2 + (kyz (Ms,Ed+NEd eNz) / (Ms,Rk / GammaM1))^2] (EC3 6.3.3(4)-6.61)						
AXIAL FORCE DESIGN							
	Ned	Nc,Rd	Nt,Rd				
Axial	Force	Capacity	Capacity				
	-263.414	5494.243	5494.243				
	Npl,Rd	Nu,Rd	Ncr,T	Ncr,TF	An/Ag		
	5494.243	5683.06	1250044.55	390.59	1.		
	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	c	0.49	390.59	3.751	8.403	0.063	345.054
MajorB (y-y)	c	0.49	390.59	3.751	8.403	0.063	345.054
Minor (z-z)	c	0.49	390.59	3.751	8.403	0.063	345.054
MinorB (z-z)	c	0.49	390.59	3.751	8.403	0.063	345.054
Torsional TF	c	0.49	390.59	3.751	8.403	0.063	345.054
MOMENT DESIGN							
	Med	Med,span	Mc,Rd	Mv,Rd	Mn,Rd	Mb,Rd	
	Moment	Moment	Capacity	Capacity	Capacity	Capacity	
Major (y-y)	-36.912	-53.751	538.962	538.962	538.962	538.962	
Minor (z-z)	3.858	10.183	538.962	538.962	538.962	538.962	
	Curve	AlphaLT	LambdaBarLT	PhiLT	ChiLT	Iw	Mcr
LTB	d	0.76	0.387	0.646	0.86	0.	3600.083
	Factors	kw	C1	C2	C3		
		1.	1.132	0.459	0.525		
		za	zs	zg	zj		
		0.162	0.	0.162	-1.		
	Factors	kyy	kyz	kzy	kzz		
		0.755	0.387	0.453	0.644		
	Ved	Vpl,Rd	Ved/Vpl,Rd	rho			
	Force	Capacity	Ratio	Factor			
Major (z)	8.438	2019.422	0.004	1.			
Minor (y)	0.385	2019.422	1.907E-04	1.			
SHEAR DESIGN							
	Ved	Ted	Vc,Rd	Stress	Status		
	Force	Torsion	Capacity	Ratio	Check		
Major (z)	8.438	2.177	2019.422	0.004	OK		
Minor (y)	0.385	2.177	2019.422	0.	OK		
	Vpl,Rd	Eta	Lambdabar	Chi			
	Capacity	Factor	Ratio	Factor			
Minor (y)	2019.422	1.2	0.	1.			
Major (y)	2019.422	1.2	0.	1.			
CONNECTION SHEAR FORCES FOR BEAMS							
	VMajor	VMajor					
	Left	Right					
Major (V2)	17.428	16.117					

Σχῆμα 4-20: Έλεγχος μέλους δοκών jacket CHS 323.9x16

4.4.1.3 Έλεγχος κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας jacket

Για τους κατακόρυφους συνδέσμους δυσκαμψίας του jacket επιλέχθηκαν κοίλες κυκλικές διατομές CHS 406.4x16, CHS 355.6x16 και CHS 323.9x16.



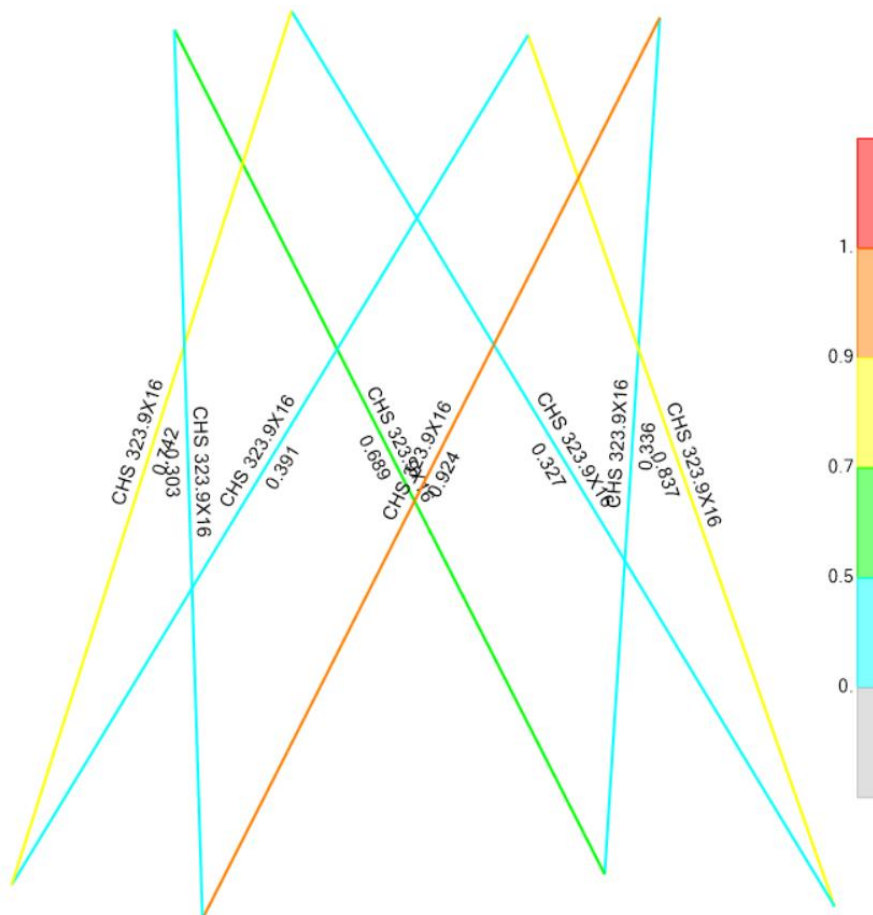
Σχήμα 4-21: Συντελεστές αξιοποίησης για τις διαγώνιους του jacket

- **CHS 323.9x16:**

Η διατομή είναι κατηγορίας 1 αφού ικανοποιεί τον έλεγχο για σωληνωτές διατομές σε κάμψη και θλίψη:

$$d/t = 323.9/16 = 20.24 \leq 50 \varepsilon^2 = 33 \rightarrow \text{Κατηγορία 1}$$

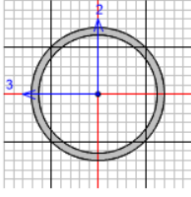
Η δυσμενέστερη φόρτιση για τους κατακόρυφους συνδέσμους δυσκαμψίας είναι ο συνδυασμός $1.35G+1.5Q+0.9W_X +0.9WAV_X$:



Σχήμα 4-22: Συντελεστές αξιοποίησης για τις διαγώνιους του jacket CHS 323.9x16

Ο μεγαλύτερος συντελεστής αξιοποίησης της διατομής για έλεγχο μέλους σε διαξονική κάμψη και θλίψη προκύπτει ίσως με $0.924 < 1.0$, επομένως η διατομή επαρκεί. (Σχήμα 4-22)

File Units: KN, m, C



Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
 Units : KN, m, C

Frame : 162 X Mid: -1.561 Combo: 1.35G+1.5Q+0.5W Design Type: Brace
 Length: 24.02 Y Mid: -6.061 Shape: CHS 323.9X16 Frame Type: DCL-MRF
 Loc : 0. Z Mid: 65.25 Class: Class 1 Rolled : Yes

Country=CEN Default Combination=Eq. 6.10 Reliability=Class 2
 Interaction=Method 2 (Annex B) MultiResponse=Envelopes P-Delta Done? No
 Consider Torsion? No

GammaM0=1. GammaM1=1. GammaM2=1.25 D/C Lim=0.95
 An/Ag=1. RLLF=1. PLLF=0.75

Aeff=0.015 eNy=0. eNz=0.
 A=0.015 Iyy=1.839E-04 iyy=0.109 Wel,yy=0.001 Weff,yy=0.001
 It=3.678E-04 Izz=1.839E-04 izz=0.109 Wel,zz=0.001 Weff,zz=0.001
 Iw=0. Iyz=0. h=0.324 Wpl,yy=0.002 Av,y=0.01
 E=210000000. fy=355000. fu=510000. Wpl,zz=0.002 Av,z=0.01

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS

Location	Ned	Med,yy	Med,zz	Ved,z	Ved,y	Ted
0.	-1329.27	0.	0.	-20.635	2.408	0.

PMI DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.61)
 D/C Ratio: 0.924 = 0.608 + sqrt((0.315)^2 + (0.02)^2) < 0.95 OK
 = Ned/(Chi_y NRk/GammaM1) + sqrt[(kyy (My,Ed+NEd eNy)/(Chi_LT My,Rk/GammaM1))^2 + (kyz (Mz,Ed+NEd eNz)/(Mz,Rk/GammaM1))^2] (EC3 6.3.3(4)-6.61)

AXIAL FORCE DESIGN

	Ned Force	Nc,Rd Capacity	Nt,Rd Capacity
Axial	-1329.27	5494.243	5494.243

	Npl,Rd	Nu,Rd	Ncr,T	Ncr,TF	An/Ag
	5494.243	5683.06	1250044.55	2642.511	1.

	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	a	0.21	2642.511	1.442	1.67	0.398	2186.83
MajorB(y-y)	a	0.21	2642.511	1.442	1.67	0.398	2186.83
Minor (z-z)	a	0.21	2642.511	1.442	1.67	0.398	2186.83
MinorB(z-z)	a	0.21	2642.511	1.442	1.67	0.398	2186.83
Torsional TF	a	0.21	2642.511	1.442	1.67	0.398	2186.83

MOMENT DESIGN

	Med Moment	Med,span Moment	Mc,Rd Capacity	Mv,Rd Capacity	Mn,Rd Capacity	Mb,Rd Capacity
Major (y-y)	0.	112.057	538.962	538.962	538.962	538.962
Minor (z-z)	0.	-11.865	538.962	538.962	538.962	538.962

	Curve	AlphaLT	LambdaBarLT	PhiLT	ChiLT	Iw	Mcr
LTB	d	0.76	0.226	0.535	0.98	0.	10573.537

	kw	C1	C2	C3
Factors	1.	1.	0.	0.596
	za	zs	zg	zj
	0.162	0.	0.162	-1.

	kyy	kyz	kzy	kzz
Factors	1.486	0.892	0.892	1.486

	Ved Force	Vpl,Rd Capacity	Ved/Vpl,Rd Ratio	rho Factor
Major (z)	20.635	2019.422	0.01	1.
Minor (y)	2.408	2019.422	0.001	1.

SHEAR DESIGN

	Ved Force	Ted Torsion	Vc,Rd Capacity	Stress Ratio	Status Check
Major (z)	20.635	0.	2019.422	0.01	OK
Minor (y)	2.408	0.	2019.422	0.001	OK

	Vpl,Rd Capacity	Eta Factor	LambdaBar Ratio	Chi Factor
Minor (y)	2019.422	1.2	0.	1.
Major (y)	2019.422	1.2	0.	1.

BRACE MAXIMUM AXIAL LOADS

	P Comp	P Tens
Axial	-1329.27	0.

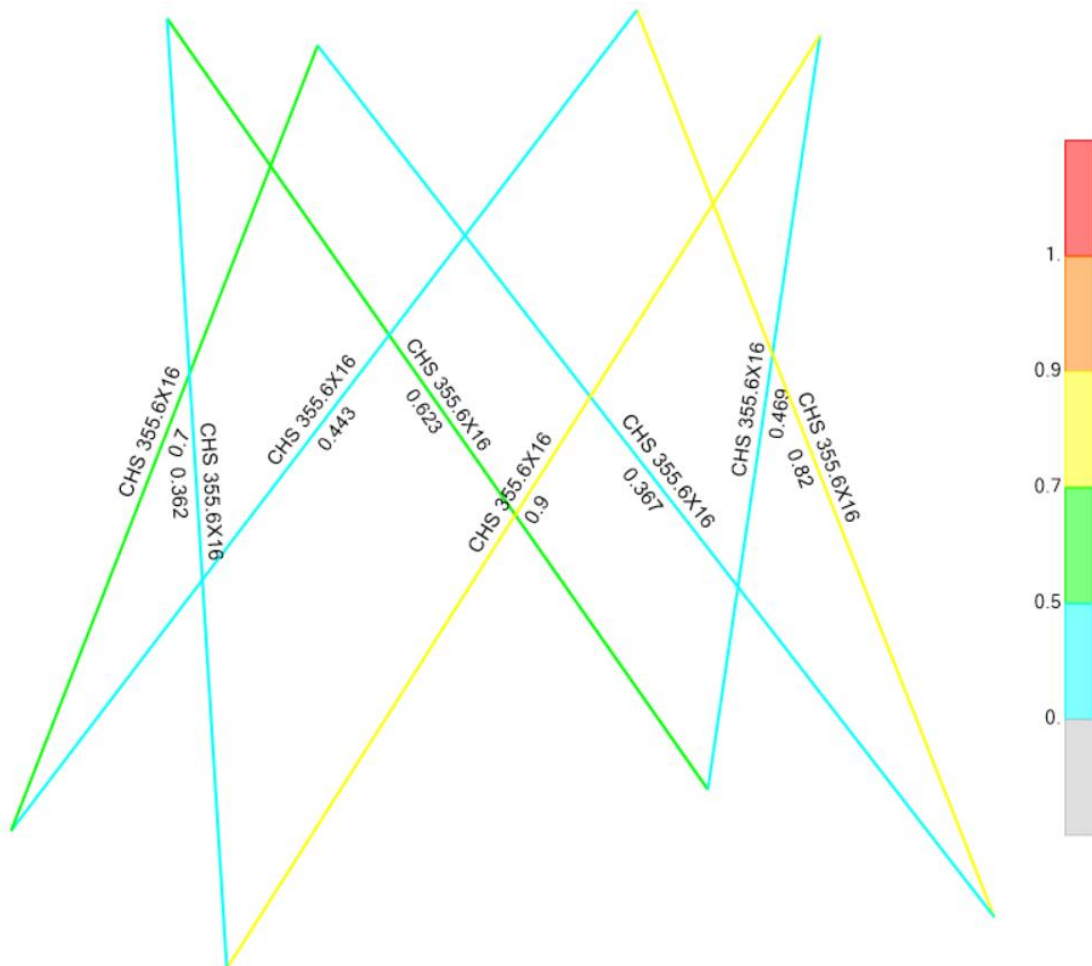
Σχήμα 4-23: Έλεγχος μέλους για τις διαγώνιους του jacket CHS 323.9x16

- **CHS 355.6x16:**

Η διατομή είναι κατηγορίας 1 αφού ικανοποιεί τον έλεγχο για σωληνωτές διατομές σε κάμψη και θλίψη:

$$d/t = 355.6/16 = 22.22 \leq 50 \varepsilon^2 = 33 \rightarrow \text{Κατηγορία 1}$$

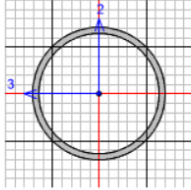
Η δυσμενέστερη φόρτιση για τους κατακόρυφους συνδέσμους δυσκαμψίας είναι οι μη γραμμική συνδυασμοί, και συγκεκριμένα ο $1.35G+1.5Q+0.9W_X+0.9W_{AV}_X$ - nonlinear:



Σχήμα 4-24: Συντελεστές αξιοποίησης για τις διαγώνιους του jacket CHS 355.6x16

Ο μεγαλύτερος συντελεστής αξιοποίησης της διατομής για έλεγχο μέλους σε διαξονική κάμψη και θλίψη προκύπτει ίσος με $0.9 < 1.0$, επομένως η διατομή επαρκεί. (Σχήμα 4-24)

File Units: KN, m, C



Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, m, C

Frame : 459 X Mid: -1.904 Combo: nonlinear-1 Design Type: Brace
Length: 31.663 Y Mid: -9.526 Shape: CHS 355.6x16 Frame Type: DCL-MRF
Loc : 0. Z Mid: 42.5 Class: Class 1 Rolled : Yes

Country=CEN Default Combination=Eq. 6.10 Reliability=Class 2
Interaction=Method 2 (Annex B) MultiResponse=Envelopes P-Delta Done? No
Consider Torsion? No

GammaM0=1. GammaM1=1. GammaM2=1.25
An/Ag=1. RLLF=1. PLLF=0.75 D/C Lim=0.95

Aeff=0.017 eNy=0. eNz=0.
A=0.017 Iyy=2.466E-04 iyy=0.12 Wel,yy=0.001 Weff,yy=0.001
It=4.933E-04 Izz=2.466E-04 izz=0.12 Wel,zz=0.001 Weff,zz=0.001
Iw=0. Iyz=0. h=0.356 Wpl,yy=0.002 Av,y=0.011
E=210000000. fy=355000. fu=510000. Wpl,zz=0.002 Av,z=0.011

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS

Location	Ned	Med,yy	Med,zz	Ved,z	Ved,y	Ted
0.	-972.558	0.	0.	-19.	-2.113	0.

PMI DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.61)
D/C Ratio: $0.9 = 0.549 + \sqrt{(0.35)^2 + (0.)^2} < 0.95$ OK
= $\frac{Ned}{(\chi_y N_{Rk}/\Gamma_{M1})} + \sqrt{(\frac{k_{yy} (My, Ed+NEd eNy)}{(\chi_{LT} My, Rk/\Gamma_{M1})})^2 + (\frac{k_{yz} (Mz, Ed+NEd eNz)}{(Mz, Rk/\Gamma_{M1})})^2}$ (EC3 6.3.3(4)-6.61)

AXIAL FORCE DESIGN

	Ned	Nc,Rd	Nt,Rd
	Force	Capacity	Capacity
Axial	-972.558	6059.906	6059.906

	Npl,Rd	Nu,Rd	Ncr,T	Ncr,TF	An/Ag
	6059.906	6268.162	1378743.518	2039.545	1.

	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	a	0.21	2039.545	1.724	2.146	0.292	1770.229
MajorB(y-y)	a	0.21	2039.545	1.724	2.146	0.292	1770.229
Minor (z-z)	a	0.21	2039.545	1.724	2.146	0.292	1770.229
MinorB(z-z)	a	0.21	2039.545	1.724	2.146	0.292	1770.229
Torsional TF	a	0.21	2039.545	1.724	2.146	0.292	1770.229

MOMENT DESIGN

	Med	Med,span	Mc,Rd	Mv,Rd	Mn,Rd	Mb,Rd
	Moment	Moment	Capacity	Capacity	Capacity	Capacity
Major (y-y)	0.	153.023	655.549	655.549	655.549	655.549
Minor (z-z)	0.	0.	655.549	655.549	655.549	655.549

LTB	Curve	AlphaLT	LambdaBarLT	PhiLT	ChiLT	Iw	Mcr
	d	0.76	0.252	0.552	0.96	0.	10311.112

Factors	kw	C1	C2	C3
	1.	1.	0.	0.596
	za	zs	zg	zz
	0.178	0.	0.178	-1.

Factors	kyy	kyz	kzy	kzz
	1.44	0.864	0.864	1.44

	Ved	Vpl,Rd	Ved/Vpl,Rd	rho
	Force	Capacity	Ratio	Factor
Major (z)	19.	2227.333	0.009	1.
Minor (y)	2.113	2227.333	9.488E-04	1.

SHEAR DESIGN

	Ved	Ted	Vc,Rd	Stress	Status
	Force	Torsion	Capacity	Ratio	Check
Major (z)	19.	0.	2227.333	0.009	OK
Minor (y)	2.113	0.	2227.333	0.001	OK

	Vpl,Rd	Eta	LambdaBar	Chi
	Capacity	Factor	Ratio	Factor
Minor (y)	2227.333	1.2	0.	1.
Major (y)	2227.333	1.2	0.	1.

BRACE MAXIMUM AXIAL LOADS

	P	P
	Comp	Tens
Axial	-972.558	0.

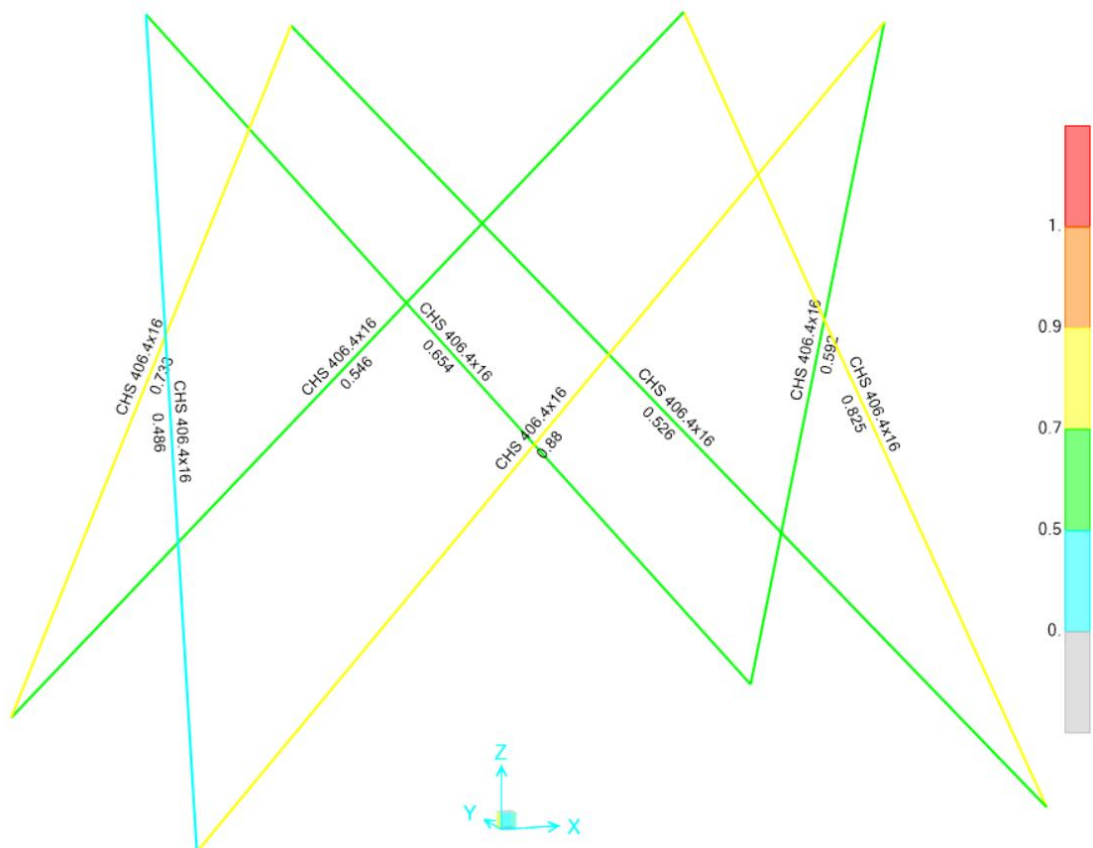
Σχήμα 4-25: Έλεγχος μέλους για τις διαγώνιους του jacket CHS 355.6x16

- **CHS 406.4x16:**

Η διατομή είναι κατηγορίας 1 αφού ικανοποιεί τον έλεγχο για σωληνωτές διατομές σε κάμψη και θλίψη:

$$d/t = 406.4/16 = 25.4 \leq 50 \varepsilon^2 = 33 \rightarrow \text{Κατηγορία 1}$$

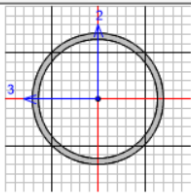
Η δυσμενέστερη φόρτιση για τους κατακόρυφους συνδέσμους δυσκαμψίας είναι οι μη γραμμική συνδυασμοί, και συγκεκριμένα ο $1.35G+1.5Q+0.9W_X+0.9WAV_X$ - nonlinear:



Σχήμα 4-26: Συντελεστές αξιοποίησης για τις διαγώνιους του jacket CHS 406.4x16

Ο μεγαλύτερος συντελεστής αξιοποίησης της διατομής για έλεγχο μέλους σε διαξονική κάμψη και θλίψη προκύπτει ίσως με $0.88 < 1.0$, επομένως η διατομή επαρκεί. (Σχήμα 4-26)

File Units **KN, m, C**



Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
Units : KN, m, C

Frame : 497 X Mid: -2.094 Combo: nonlinear-1 Design Type: Brace
Length: 38.801 Y Mid: -13.525 Shape: CHS 406.4x16 Frame Type: DCL-MRF
Loc : 0. Z Mid: 16.25 Class: Class 1 Rolled : Yes

Country=CEN Default Combination=Eq. 6.10 Reliability=Class 2
Interaction=Method 2 (Annex B) MultiResponse=Envelopes P-Delta Done? No
Consider Torsion? No

GammaM0=1. GammaM1=1. GammaM2=1.25
An/Ag=1. RLLF=1. PLLF=0.75 D/C Lim=0.95

Aeff=0.02 eNy=0. eNz=0.
A=0.02 Iyy=3.745E-04 iyy=0.138 Wel,yy=0.002 Weff,yy=0.002
It=7.490E-04 Izz=3.745E-04 izz=0.138 Wel,zz=0.002 Weff,zz=0.002
Iw=0. Iyz=0. hw=0.406 Wpl,yy=0.002 Av,y=0.012
E=210000000. fy=355000. fu=510000. Wpl,zz=0.002 Av,z=0.012

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS

Location	Ned	Med,yy	Med,zz	Ved,z	Ved,y	Ted
0.	-715.496	0.	0.	-31.008	-1.253	0.

PMI DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.61)
D/C Ratio: 0.88 = 0.395 + sqrt[(0.485)^2 + (0.)^2] < 0.95 OK
= NEd/(Chi_y NRk/GammaM1) + sqrt[(kyy (My,Ed+NEd eNy)/(Chi_LT My,Rk/GammaM1))^2 + (kyz (Mz,Ed+NEd eNz)/(Mz,Rk/GammaM1))^2] (EC3 6.3.3(4)-6.61)

AXIAL FORCE DESIGN

	Ned	Nc,Rd	Nt,Rd	Ncr,T	Ncr,TF	An/Ag
Axial	-715.496	6966.394	6966.394	1584986.659	2062.254	1.

Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	a	2062.254	1.838	2.361	0.26	1812.746
MajorB (y-y)	a	2062.254	1.838	2.361	0.26	1812.746
Minor (z-z)	a	2062.254	1.838	2.361	0.26	1812.746
MinorB (z-z)	a	2062.254	1.838	2.361	0.26	1812.746
Torsional TF	a	2062.254	1.838	2.361	0.26	1812.746

MOMENT DESIGN

	Med	Med, span	Mc,Rd	Mv,Rd	Mn,Rd	Mb,Rd
Major (y-y)	0.	303.69	866.186	866.186	866.186	866.186
Minor (z-z)	0.	0.	866.186	866.186	866.186	866.186

	Curve	AlphaLT	LambdaBarLT	PhiLT	ChiLT	Iw	Mcr
LTB	d	0.76	0.264	0.559	0.951	0.	12465.629

Factors	kw	C1	C2	C3
	1.	1.	0.	0.596
	za	zs	zg	zj
	0.203	0.	0.203	-1.

Factors	kyy	kyz	kzy	kzz
	1.316	0.789	0.789	1.316

	Ved	Vpl,Rd	Ved/Vpl,Rd	rho
Major (z)	31.008	2560.515	0.012	1.
Minor (y)	1.253	2560.515	4.894E-04	1.

SHEAR DESIGN

	Ved	Ted	Vc,Rd	Stress	Status
Major (z)	31.008	0.	2560.515	0.012	OK
Minor (y)	1.253	0.	2560.515	0.	OK

	Vpl,Rd	Eta	LambdaBar	Chi
Minor (y)	2560.515	1.2	0.	1.
Major (y)	2560.515	1.2	0.	1.

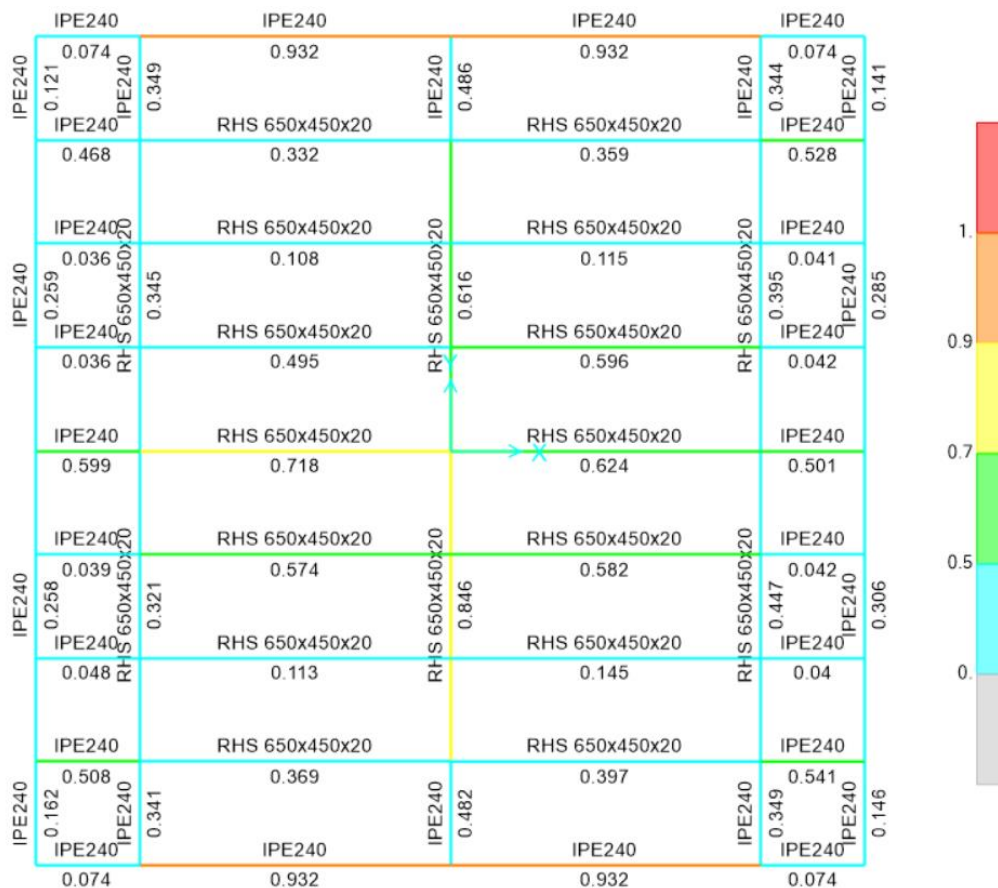
BRACE MAXIMUM AXIAL LOADS

	P	P
Axial	Comp -715.496	Tens 0.

Σχήμα 4-27: Έλεγχος μέλους για τις διαγώνιους του jacket CHS 406.4x16

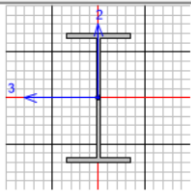
4.4.1.4 Δοκοί

Οι μεσαίες κύριες δοκοί για το κατάστρωμα, κατά την διεύθυνση X και Y, αποτελούνται από ορθογωνικές διατομές τύπου RHS 650x450x20 με μέγιστο λόγο αξιοποίησης 0.846 και οι ακραίες από IPE 240 με μέγιστο λόγο αξιοποίησης 0.932.



Σχήμα 4-28: Συντελεστές αξιοποίησης για τις δοκούς της πλατφόρμας

File Units **KN, m, C**



Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
 Units : KN, m, C

Frame : 269 X Mid: 2.25 Combo: nonlinear-3 Design Type: Beam
 Length: 4.5 Y Mid: 6. Shape: IPE240 Frame Type: DCL-MRF
 Loc : 4.5 Z Mid: 75.5 Class: Class 1 Rolled : Yes

Country=CEN Default Combination=Eq. 6.10 Reliability=Class 2
 Interaction=Method 2 (Annex B) MultiResponse=Envelopes P-Delta Done? No
 Consider Torsion? No

GammaM0=1. GammaM1=1. GammaM2=1.25
 An/Ag=1. RLLF=1. PLLF=0.75 D/C Lim=0.95

Aeff=0.004 eNy=0. eNz=0.
 A=0.004 Iyy=3.892E-05 iyy=0.1 Wel,yy=3.243E-04 Weff,yy=3.243E-04
 It=0. Izz=2.840E-06 izz=0.027 Wel,zz=4.733E-05 Weff,zz=4.733E-05
 Iw=0. Iyz=0. h=0.24 Wpl,yy=3.670E-04 Av,y=0.003
 E=210000000. fy=355000. fu=510000. Wpl,zz=7.390E-05 Av,z=0.002

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS

Location	Med	Med,yy	Med,zz	Ved,z	Ved,y	Ted
4.5	1.121	0.	0.	14.443	14.854	0.

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.3.3(4)-6.62)
 D/C Ratio: $0.932 = 0. + 0.334 + 0.597 < 0.95$ OK
 $= NEd / ((Chi_z NRk / GammaM1) + kz_y (My, Ed + NEd eNy) / ((Chi_LT My, Rk / GammaM1) + kz_z (Mz, Ed + NEd eNz) / (Mz, Rk / GammaM1))$ (EC3 6.3.3(4)-6.62)

AXIAL FORCE DESIGN

	Med Force	Nc,Rd Capacity	Nt,Rd Capacity	Npl,Rd	Nu,Rd	Ncr,T	Ncr,TF	An/Ag
Axial	1.121	1388.05	1388.05	1388.05	1435.752	1343.679	1343.679	1.

	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	a	0.21	3983.519	0.59	0.715	0.894	1240.411
MajorB (y-y)	a	0.21	3983.519	0.59	0.715	0.894	1240.411
Minor (z-z)	b	0.34	290.678	2.185	3.225	0.179	247.998
MinorB (z-z)	b	0.34	290.678	2.185	3.225	0.179	247.998
Torsional TF	b	0.34	1343.679	1.016	1.155	0.587	814.319

MOMENT DESIGN

	Med Moment	Med,span Moment	Mc,Rd Capacity	Mv,Rd Capacity	Mn,Rd Capacity	Mb,Rd Capacity
Major (y-y)	0.	16.046	130.285	130.285	130.285	48.021
Minor (z-z)	0.	16.5	26.235	26.235	26.235	26.235

	Curve	AlphaLT	LambdaBarLT	PhiLT	ChiLT	Iw	Mcr
LTB	a	0.21	1.509	1.776	0.369	0.	57.202

Factors	kw	C1	C2	C3	zj
	1.	1.132	0.459	0.525	0.
	za	zs	zg	zz	zj
	0.12	0.	0.12	0.	0.

Factors	kyy	kyz	kzy	kzz
	0.95	0.57	1.	0.95

	Ved Force	Vpl,Rd Capacity	Ved/Vpl.Rd Ratio	zho Factor
Major (z)	14.443	392.038	0.037	1.
Minor (y)	14.854	521.318	0.028	1.

SHEAR DESIGN

	Ved Force	Ted Torsion	Vc,Rd Capacity	Stress Ratio	Status Check
Major (z)	14.443	0.	392.038	0.037	OK
Minor (y)	14.854	0.	521.318	0.028	OK

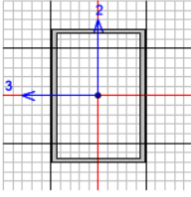
	Vpl,Rd Capacity	Eta Factor	LambdaBar Ratio	Chi Factor
Minor (y)	392.038	1.2	0.506	1.2
Major (y)	521.318	1.2	0.	1.

CONNECTION SHEAR FORCES FOR BEAMS

	VMajor Left	VMajor Right
Major (V2)	18.238	18.238

Σχήμα 4-29: Έλεγχος μέλους για τις δοκοί της πλατφόρμας IPE 240

File Units **KN, m, C**



Eurocode 3-2005 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)
 Units : KN, m, C

Frame : 206 X Mid: 0. Combo: nonlinear-4 Design Type: Beam
 Length: 4.5 Y Mid: -2.25 Shape: RHS 650x450x20 Frame Type: DCL-MRF
 Loc : 3. Z Mid: 75.5 Class: Class 1 Rolled : No

Country=CEN Default Combination=Eq. 6.10 Reliability=Class 2
 Interaction=Method 2 (Annex B) MultiResponse=Envelopes P-Delta Done? No
 Consider Torsion? No

GammaM0=1. GammaM1=1. GammaM2=1.25
 An/Ag=1. RLLF=1. PLLF=0.75 D/C Lim=0.95

Aeff=0.042 eNy=0. eNz=0.
 A=0.042 Iyy=0.003 Iyy=0.245 Wel,yy=0.008 Weff,yy=0.008
 It=0.003 Izz=0.001 Izz=0.184 Wel,zz=0.006 Weff,zz=0.006
 Iw=0. Iyz=0. hw=0.65 Wpl,yy=0.005 Av,y=0.018
 E=210000000. fy=440000. fu=550000. Wpl,zz=0.007 Av,z=0.029

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS

Location	Ned	Med,yy	Med,zz	Ved,z	Ved,y	Ted
3.	122.956	480.18	-2707.698	303.137	-2978.982	463.586

PMI DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.2.9.1(6z))
 D/C Ratio: 0.846 = 0.846 < 0.95 OK
 = (Mz,Ed/Mn,z,Rd) (EC3 6.2.9.1(6z))

AXIAL FORCE DESIGN

	Ned	Nc,Rd	Nt,Rd	Ncr,T	Ncr,TF	An/Ag
	Force	Capacity	Capacity			
Axial	122.956	18656.	16790.4	2385446.086	260305.674	1.

Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	b 0.34	260305.674	0.268	0.547	0.976	18205.359
MajorB (y-y)	b 0.34	260305.674	0.268	0.547	0.976	18205.359
Minor (z-z)	b 0.34	1319523.121	0.119	0.493	1.	18656.
MinorB (z-z)	b 0.34	1319523.121	0.119	0.493	1.	18656.
Torsional TF	b 0.34	260305.674	0.268	0.547	0.976	18205.359

MOMENT DESIGN

	Med	Med,span	Mc,Rd	Mv,Rd	Mn,Rd	Mb,Rd
	Moment	Moment	Capacity	Capacity	Capacity	Capacity
Major (y-y)	480.18	480.18	4132.04	4132.04	4132.04	4132.04
Minor (z-z)	-2707.698	-2707.698	3199.24	3117.456	3199.24	

LTB	Curve	AlphaLT	LambdaBarLT	PhiLT	ChiLT	Iw	Mcr
	d	0.76	0.027	0.435	1.	0.	5681346.862

Factors	kw	C1	C2	C3	zj
	1.	1.365	0.553	1.73	
	za	zs	zg	zz	zj
	0.325	0.	0.325	-1.	1.

Factors	kyy	kyz	kzy	kzz
	0.4	0.24	0.24	0.4

	Ved	Vpl,Rd	Ved/Vpl,Rd	rho
	Force	Capacity	Ratio	Factor
Major (z)	303.137	7438.116	0.041	1.
Minor (y)	2978.982	4572.612	0.651	1.

SHEAR DESIGN

	Ved	Ted	Vc,Rd	Stress	Status
	Force	Torsion	Capacity	Ratio	Check
Major (z)	303.137	463.586	7438.116	0.041	OK
Minor (y)	2978.982	463.586	4572.612	0.651	OK

	Vpl,Rd	Eta	LambdaBar	Chi
	Capacity	Factor	Ratio	Factor
Minor (y)	7438.116	1.2	0.483	1.2
Major (y)	4572.612	1.2	0.	1.

CONNECTION SHEAR FORCES FOR BEAMS

	VMajor	VMajor
	Left	Right
Major (V2)	25.593	1053.518

Σχήμα 4-30: Έλεγχος μέλους για τις δοκούς της πλατφόρμας RHS 650x450x20

4.4.2 Έλεγχος διατομών πύργου υπεράκτιας ανεμογεννήτριας

Οι διατομές του πύργου της ανεμογεννήτριας είναι κοίλες κυκλικές μεταβαλλόμενες ανά 10 [m] ύψους και υπόκεινται σε σύγχρονη θλίψη και κάμψη. Σε όλες τις διατομές του πύργου της ανεμογεννήτριας έχουμε διατομές κατηγορίας 4. Η κατάταξή τους γίνεται με βάση τον Πίνακα 4-3.

Όπου:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

f_y : το όριο διαρροής του χάλυβα.

Στον πύργο έχουμε χρησιμοποιήσει χάλυβα S450, οπότε: $\varepsilon=0.723$

Σε όλες τις διατομές του πύργου της ανεμογεννήτριας ισχύει: $d/t > 90\varepsilon^2 = 47.05$, δηλαδή όλες οι διατομές του πύργου είναι κατηγορίας 4. Κανονικά ο έλεγχος τοπικού λυγισμού θα πρέπει να γίνει καθ' ύψος σε όλες τις διατομές. Η κάθε διατομή έχει τη δική της λυγηρότητα. Ποιοτικά, η λυγηρότητα έχει να κάνει με το λόγο d/t . Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο λόγος, τόσο ευπαθέστερο είναι το κέλυφος σε τοπικό λυγισμό. Ενδεικτικά, ο έλεγχος μπορεί να γίνει μόνο για τη διατομή με το μεγαλύτερο λόγο d/t .

Πίνακας 4-3: Έλεγχος μέλους στον πλόνα της ανεμογεννήτριας

Τμήμα	b [m]	t [m]	b/t	Κατηγορία διατομής
0-10	5.8815	0.027	217.83	4
10.-20	5.6445	0.026	217.10	4
20-30	5.4075	0.025	216.30	4
30-40	5.1705	0.024	215.44	4
40-50	4.9335	0.023	214.50	4
50-60	4.6965	0.022	213.48	4
60-70	4.4595	0.021	212.36	4
70-80	4.2225	0.02	211.12	4
80-90	3.987	0.019	209.84	4

4.4.2.1 Μέθοδος των τάσεων για κελύφη

Αρχικά προσδιορίζονται μέσω γραμμικής ελαστικής ανάλυσης (LA) οι τιμές σχεδιασμού των αξονικών, περιφερειακών ορθών τάσεων καθώς και των διατμητικών στο υπό μελέτη μέλος της κατασκευής. Κατά την γραμμική ελαστική ανάλυση ασκούνται οι χαρακτηριστικές τιμές των φορτίων αυξημένες κατάλληλα με τους επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ . Στην περίπτωση αξονοσυμμετρικών συνθηκών φόρτισης και στήριξης του μέλους, μπορούν να προσδιορισθούν από την μεμβρανική θεωρία. Οι χαρακτηριστικές τιμές των μεμβρανικών τάσεων θα πρέπει να λαμβάνονται ίσες με την μέγιστη τιμή κάθε τάσης, εκτός αν προβλέπεται κάτι διαφορετικό από τις διατάξεις του EN 1993-1-6.

Αντοχή έναντι λυγισμού

Οι τάσεις αντοχής έναντι λυγισμού είναι οι ακόλουθες:

$$\sigma_{x,Rd} = \sigma_{x,Rk} / \gamma_{M1} \quad (4-11)$$

$$\sigma_{\theta,Rd} = \sigma_{\theta,Rk} / \gamma_{M1} \quad (4-12)$$

$$\tau_{x\theta,Rd} = \tau_{x\theta,Rk} / \gamma_{M1} \quad (4-13)$$

όπου $\sigma_{x,Rd}$, $\sigma_{\theta,Rd}$, $\tau_{x\theta,Rd}$ οι αντοχές σχεδιασμού έναντι λυγισμού για αξονική, περιφερειακή θλίψη και διάτμηση αντίστοιχα, ενώ όπου $\sigma_{x,Rk}$, $\sigma_{\theta,Rk}$, $\tau_{x\theta,Rk}$ οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχής έναντι λυγισμού για αξονική, περιφερειακή θλίψη και διάτμηση. Ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας γ_{M1} υποδεικνύεται να λαμβάνεται από τα εθνικά παραρτήματα. Αν δεν υπάρχει σχετική υπόδειξη συνιστάται ως ελάχιστη τιμή του $\gamma_{M1}=1.1$. Οι χαρακτηριστικές τάσεις λυγισμού υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας την χαρακτηριστική τιμή του ορίου διαρροής f_{yk} με τον κατάλληλο μειωτικό συντελεστή για λυγισμό χ_i :

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x * f_{yk} \quad (4-14)$$

$$\sigma_{\theta,Rk} = \chi_{\theta} * f_{yk} \quad (4-15)$$

$$\tau_{x\theta,Rk} = \chi_{\tau} * f_{yk}/\sqrt{3} \quad (4-16)$$

όπου χ_x , χ_{θ} , χ_{τ} οι μειωτικοί συντελεστές λυγισμού για αξονική, περιφερειακή θλίψη και διάτμηση αντίστοιχα, οι οποίοι υπολογίζονται ως συνάρτηση της ανοιγμένης λυγηρότητας λ του κελύφους από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$x = 1, \lambda \leq \lambda_0 \quad (4-17)$$

$$x = 1 - \beta * \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_p - \lambda_0} \right)^n, \lambda_0 < \lambda < \lambda_p \quad (4-18)$$

$$x = \frac{\alpha}{\lambda^2}, \lambda_p \leq \lambda \quad (4-19)$$

Όπου:

α : είναι ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών

β : είναι συντελεστής εύρους πλαστικής περιοχής

n : είναι ο εκθέτης αλληλεπίδρασης

λ_0 : είναι η ανώτατη ανοιγμένη λυγηρότητα της πλαστικής ζώνης

Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων πρέπει να λαμβάνονται από το παράρτημα D του EC3.

Η τιμή της ανοιγμένης πλαστικής λυγηρότητας πρέπει να λαμβάνεται ως:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad (4-20)$$

Η ανοιγμένη λυγηρότητα λ δίνεται από τις εξισώσεις:

$$\lambda_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}} \quad (4-21)$$

$$\lambda_{\theta} = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\theta,Rcr}}} \quad (4-22)$$

όπου λ_x , λ_{θ} , λ_{τ} η ανοιγμένη λυγηρότητα λ για αξονική, περιφερειακή θλίψη και διάτμηση αντίστοιχα.

4.4.2.2 Κυλινδρικά μέλη σταθερού πάχους

Ο προσδιορισμός της ελαστικής κρίσιμης τάσης λυγισμού περιγράφεται παρακάτω: Αρχικά απαιτείται ο προσδιορισμός της αδιάστατης παραμέτρου μήκους ω , του υπό εξέταση κελυφωτού τμήματος από την εξίσωση:

$$\omega = \frac{l}{\sqrt{r * t}} \quad (4-23)$$

όπου l , r , t το μήκος, η ακτίνα και το πάχος του τμήματος αντίστοιχα.

Ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού

Η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma_{x,Rcr} = 0.605 * E * C_x * \frac{t}{r} \quad (4-24)$$

Όπου

$$C_x = \begin{cases} 1.36 - \frac{1.83}{\omega} + \frac{2.07}{\omega^2} & , \omega \leq 1.7 \\ 1, 7 \leq \omega \leq 0.5 * \frac{r}{t} \\ \max\left(0.6, 1 + \frac{0.2}{C_{xb}} \left[1 - 2 * \omega * \frac{t}{r}\right]\right) & , \omega > 0.5 * \frac{r}{t} \end{cases} \quad (4-25)$$

όπου C_{xb} παράμετρος που εξαρτάται από τις συνοριακές συνθήκες .

Για την περίπτωση μακρών κελυφών τα οποία ικανοποιούν τις εξής προϋποθέσεις:

$$\frac{r}{t} \leq 150, \omega \leq 6 * \left(\frac{r}{t}\right) \text{ και } 500 \leq \frac{E}{f_{yk}} \leq 1000 \quad (4-26)$$

ο παράγοντας C_x υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_x = C_{x,N} * \left(\frac{\sigma_{xE,N}}{\sigma_{xE}}\right) + \left(\frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}}\right) \quad (4-27)$$

Όπου:

σ_{xE}	είναι η τιμή σχεδιασμού της αξονικής τάσης
$\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{xE,N}$	η συνιστώσα της αξονικής τάσης που οφείλεται στην αξονική θλίψη, ενώ
$\sigma_{xE,M}$	η συνιστώσα της αξονικής τάσης που προέρχεται από καθολική κάμψη.

Όταν ικανοποιούνται οι συνθήκες (4-26), η ανώτατη ανοιγμένη λυγηρότητα της πλαστικής περιοχής λ_0 λαμβάνεται από την εξίσωση:

$$\lambda_{x0} = 0.20 + 0.10 * \left(\frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}}\right) \quad (4-28)$$

Ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών στην περίπτωση της θλιπτικής αξονικής τάσης ορίζεται ως:

$$\alpha_x = \frac{0.62}{1 + 1.91 * (\Delta w_k / t)^{1.44}} \quad (4-29)$$

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} * \sqrt{\frac{r}{t}} * t \quad (4-30)$$

όπου το Δw_k είναι το χαρακτηριστικό εύρος ατελειών το οποίο εξαρτάται από την παράμετρο Q η οποία καθορίζεται από την ποιότητα κατασκευής και λαμβάνει τιμές 40, 25, 16 για τις κατασκευαστικές κατηγορίες A, B, C αντίστοιχα. Οι υπόλοιποι συντελεστές για αξονικά ή καμπτικά φορτιζόμενα κελύφη λαμβάνονται $\lambda_{x0} = 0.2$, $\beta = 0.6$ και $n = 1.0$. Μέλη τα οποία ικανοποιούν την παρακάτω συνθήκη δεν είναι απαραίτητο να ελέγχονται έναντι αξονικού λυγισμού:

$$\frac{r}{t} \leq 0.03 * \frac{E}{f_{yk}} \quad (4-31)$$

Ελαστική περιφερειακή κρίσιμη τάση λυγισμού

Η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού για περιφερειακή θλίψη δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma_{\theta,Rk} = \begin{cases} 0.92 * E * \left(\frac{C_{\theta s}}{\omega}\right) * \frac{t}{r} & , \frac{\omega}{C_{\theta}} < 20 \\ 0.92 * E * \left(\frac{C_{\theta}}{\omega}\right) * \frac{t}{r} & , 20 \leq \frac{\omega}{C_{\theta}} \leq 1.63 * \frac{r}{t} \\ E * \left(\frac{t}{r}\right)^2 \left[0.275 + 2.03 * \left(\frac{\omega}{C_{\theta}} * \frac{r}{t}\right)^4\right] & , \frac{\omega}{C_{\theta}} > 1.63 * \frac{r}{t} \end{cases} \quad (4-32)$$

Οι παράμετροι C_{θ} , $C_{\theta s}$ εξαρτώνται από τις συννοριακές συνθήκες του κελύφους. Ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών a_{θ} στην περίπτωση της θλιπτικής περιφερειακής τάσης ορίζεται ως συνάρτηση της ποιότητας κατασκευής σύμφωνα με τον Πίνακα 4-4:

Πίνακας 4-4: Συντελεστής a_{θ} συναρτήσει της ποιότητας κατασκευής

Ποιότητα κατασκευής	Περιγραφή	a_{θ}
Κλάση A	Εξαιρετική	0.75
Κλάση B	Υψηλή	0.65
Κλάση C	Κανονική	0.50

Οι υπόλοιπες παράμετροι λυγισμού λαμβάνονται $\lambda_{\theta 0} = 0.4$, $\beta = 0.6$, $n = 1.0$. Δεν απαιτείται έλεγχος έναντι περιφερειακού λυγισμού για μέλη που ικανοποιούν την παρακάτω συνθήκη:

$$\frac{r}{t} \leq 0.21 * \sqrt{\frac{E}{f_{yk}}} \quad (4-33)$$

Ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού

Η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού για διάτμηση δίνεται από την εξίσωση:

$$\tau_{x\theta,Rcr} = 0.75 * E * C_{\tau} * \sqrt{\frac{1}{\omega} * \left(\frac{t}{r}\right)} \quad (4-34)$$

Όπου:

$$C_{\tau} = \begin{cases} \sqrt{1 + \frac{43}{\omega^3}} & , \omega \leq 10 \\ 1 & , 10 \leq \omega \leq 8.7 * \frac{r}{t} \\ \frac{1}{3} * \sqrt{\omega * \frac{r}{t}} & , \omega > 0.5 * \frac{r}{t} \end{cases} \quad (4-35)$$

Ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών a_{τ} στην περίπτωση της διατμητικής τάσης ορίζεται ως συνάρτηση της ποιότητας κατασκευής σύμφωνα με τον

Πίνακα 4-4. Οι υπόλοιπες παράμετροι λυγισμού λαμβάνονται $\lambda_{r0} = 0.4$, $\beta = 0.6$, $n = 1.0$. Δεν απαιτείται έλεγχος έναντι διατμητικού λυγισμού για μέλη που ικανοποιούν την παρακάτω συνθήκη:

$$\frac{r}{t} \leq 0.16 * \left[\frac{E}{f_{yk}} \right]^{0.67} \quad (4-36)$$

4.4.2.3 Κυλινδρικά μέλη μεταβλητού πάχους

Ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού

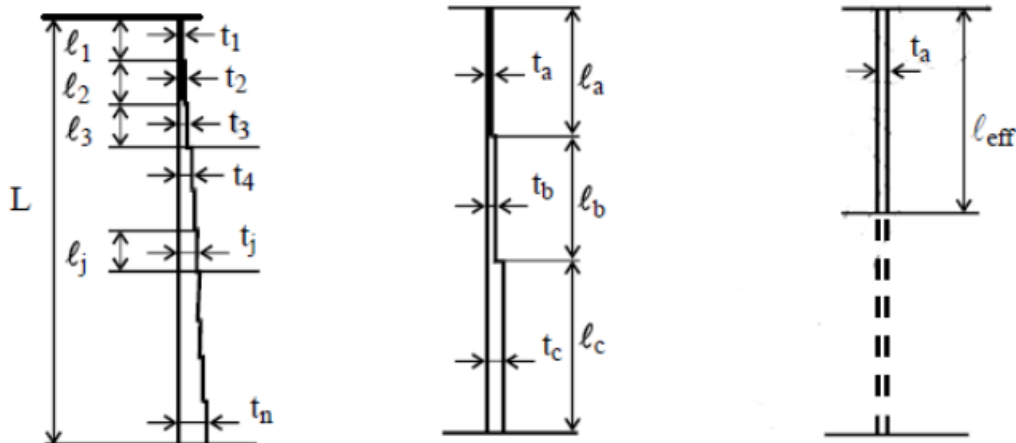
Για κυλινδρικά μέλη μεταβλητού πάχους η ελαστική αξονική κρίσιμη τάση κάθε τμήματος j υπολογίζεται εφαρμόζοντας την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για μέλη ενιαίου πάχους, θεωρώντας ισοδύναμο κύλινδρο μήκους $l = L$ και ενιαίου πάχους $t = t_j$. Όταν ο ισοδύναμος κύλινδρος ικανοποιεί τις συνθήκες μακρών κυλίνδρων, ο συντελεστής C_{xb} πρέπει συντηρητικά να λαμβάνεται ίσος με 1.

Ελαστική περιφερειακή κρίσιμη τάση λυγισμού

Στην περίπτωση που το εξεταζόμενο μέλος είναι κύλινδρος ο οποίος αποτελείται από τμήματα διαφορετικού πάχους ελασμάτων t_j , θα πρέπει να αντικαθίσταται με έναν ισοδύναμο κύλινδρο (equivalent cylinder) τριών τμημάτων a , b και c . Το μήκος l_a του πάνω τμήματος a πρέπει να φθάνει έως το τμήμα του αρχικού κυλίνδρου το οποίο έχει πάχος 1.5 φορές μεγαλύτερο του ελάχιστου πάχους του αρχικού κυλίνδρου αλλά να μην ξεπερνά το μισό αρχικό μήκος. Τα μήκη των τμημάτων b , c ορίζονται ως εξής:

$$l_b = l_a \text{ και } l_c = L - 2 * l_a, l_a \leq \frac{L}{3} \quad (4-37)$$

$$l_b = l_c = 0.5 * (L - l_a), \frac{L}{3} < l_a \leq \frac{L}{2} \quad (4-38)$$



Σχήμα 4-31: Μετατροπή κυλίνδρου μεταβλητού πάχους σε ισοδύναμο κύλινδρο ενιαίου πάχους

Τα πάχη των τριών τμημάτων t_a , t_b , t_c υπολογίζονται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος του πάχους των τμημάτων j του αρχικού κυλίνδρου που βρίσκονται στα αντίστοιχα μήκη l_a , l_b , l_c :

$$t_a = \frac{1}{l_a} * \sum_a l_j * t_j \quad (4-39)$$

$$t_b = \frac{1}{l_b} * \sum_b l_j * t_j \quad (4-40)$$

$$t_c = \frac{1}{l_c} * \sum_c l_j * t_j \quad (4-41)$$

Ο κύλινδρος των τριών τμημάτων a, b και c αντικαθίσταται με έναν ισοδύναμο κύλινδρο μήκους $l_{eff} = l_a/k$ και ενιαίου πάχους $t = t_a$, όπου k αδιάστατος παράγοντας που προσδιορίζεται από το Σχήμα 4-31. Για κάθε τμήμα j υπολογίζεται η αδιάστατη παράμετρος μήκους ω_j , σύμφωνα με την οποία χαρακτηρίζεται το μήκος του τμήματος:

$$\omega_j = \frac{l_j}{\sqrt{r * t_j}} \quad (4-42)$$

Για μικρού ή μεσαίου μήκους τμήματα j του αρχικού κυλίνδρου, η ελαστική περιφερειακή κρίσιμη τάση λυγισμού προσδιορίζεται από την εξίσωση:

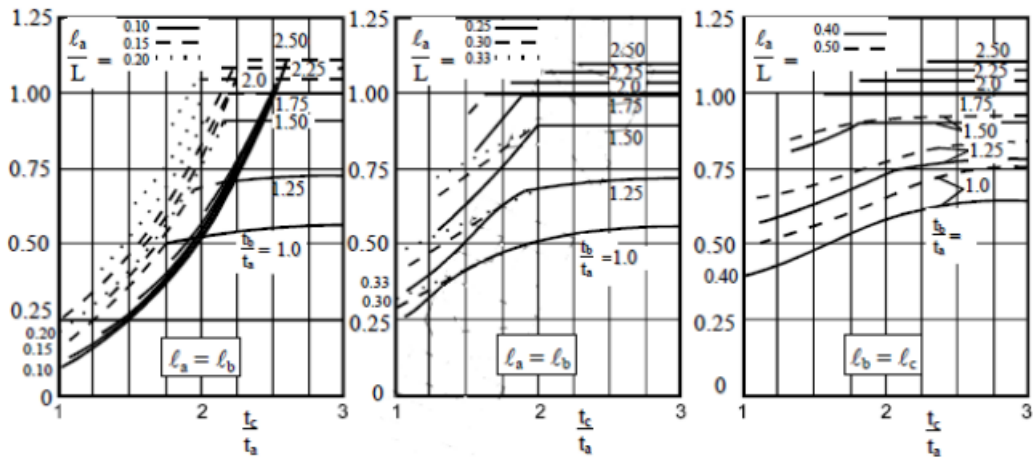
$$\sigma_{\theta,Rcr,j} = \left(\frac{t_a}{t_j}\right) * \sigma_{\theta,Rcr,eff} \quad (4-43)$$

όπου $\sigma_{\theta,Rcr,eff}$ είναι ελαστική περιφερειακή κρίσιμη τάση λυγισμού του ισοδύναμου κυλίνδρου μήκους l_{eff} . Για μακριά τμήματα που ικανοποιούν την παρακάτω συνθήκη:

$$\omega_j > 1.63 * \frac{r}{t_j} \quad (4-44)$$

η ελαστική περιφερειακή κρίσιμη τάση λυγισμού του τμήματος j πρέπει να λαμβάνεται από την:

$$\sigma_{\theta,Rcr,j} = E * \left(\frac{t_j}{r}\right)^2 \left[0.275 + 2.03 * \left(\frac{1}{\omega_j} * \frac{r}{t_j}\right)^4 \right] \quad (4-45)$$



Σχήμα 4-32: Αδιάστατος παράγοντας k για τον προσδιορισμό του l_{eff}

Ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού

Η ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού κυλίνδρου μεταβλητού πάχους υπολογίζεται σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο για τον υπολογισμό της ελαστικής περιφερειακής κρίσιμης τάσης λυγισμού, αντικαθιστώντας τις εκφράσεις της περιφερειακής θλίψης με τις αντίστοιχες της διάτμησης.

Έλεγχος σε λυγισμό

Ανάλογα με την φόρτιση και το καθεστώς των τάσεων, θα πρέπει να πραγματοποιούνται ένας ή περισσότεροι έλεγχοι των κρίσιμων τιμών των μεμονωμένων μεμβρανικών τάσεων:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad (4-46)$$

$$\sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd} \quad (4-47)$$

$$\tau_{x\theta,Ed} \leq \tau_{x\theta,Rd} \quad (4-48)$$

Αν συνυπάρχουν παραπάνω από μια από τις μεμβρανικές τάσεις στην υπό μελέτη φόρτιση, θα πρέπει να γίνεται έλεγχος αλληλεπίδρασης τους με την ακόλουθη εξίσωση:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^{k_x} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}}\right)^{k_\tau} \leq 1 \quad (4-49)$$

όπου $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$, $\tau_{x\theta,Ed}$ είναι το σύνολο των τάσεων που αλληλοεπιδρούν. Οι τάσεις σχεδιασμού $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$, $\tau_{x\theta,Ed}$ υπολογίζονται με δύο τρόπους. Σύμφωνα με τον πρώτο, στη σχέση αλληλεπίδρασης χρησιμοποιούνται το σύνολο των τάσεων που αναπτύσσονται στο υπό εξέταση σημείο του κελύφους. Σύμφωνα με τον δεύτερο τρόπο, η σχέση αλληλεπίδρασης εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας τις μέγιστες τιμές των μεμβρανικών τάσεων ανεξάρτητα από το που αυτές εμφανίζονται, παραδοχή σαφώς συντηρητική. Όταν η $\sigma_{x,Ed}$ ή $\sigma_{\theta,Ed}$ είναι εφελκυστικές, οι τιμές τους πρέπει να λαμβάνονται ίσες με μηδέν στη σχέση αλληλεπίδρασης. Οι εκθέτες αλληλεπίδρασης λυγισμού k_x , k_θ , k_τ που υπεισέρχονται στη εξίσωση (4-38) πρέπει να λαμβάνονται από το Παράρτημα D ως εξής:

$$k_x = 1.25 + 0.75 * x_x \quad (4-50)$$

$$k_\theta = 1.25 + 0.75 * x_\theta \quad (4-51)$$

$$k_\tau = 1.75 + 0.25 * x_\tau \quad (4-52)$$

4.4.2.4 Έλεγχος πυλώνα

Μετά τη στατική ανάλυση που έγινε στο λογισμικό SAP 2000, για κάποιους από τους συνδυασμούς που εισήχθησαν σημειώθηκαν τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη του πυλώνα και υπολογίστηκαν οι τάσεις, οι οποίες προέκυψαν από αυτά. Τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη εντοπίστηκαν στο σημείο της βάσεως του πυλώνα, το οποίο έχει ακτίνα $r_e = 3$ [m] και πάχος $t = 0.027$ [m] και ποιότητα χάλυβα S450.

Πίνακας 4-5: Μέγιστα εντατικά μεγέθη για τους δυσμενέστερους συνδυασμούς φορτίσεων

Μέγιστα εντατικά μεγέθη							
Συνδυασμός		Mx[KNm]	My[KNm]	Mz[KNm]	Fx[KN]	Fy[KN]	Fz[KN]
maxMx	combo1	41921.3925	13860	-10449.6	-6.139E-11	-954.134	-10383.224
maxMy	combo2	-9.663E-12	55780.5375	-10449.6	-954.125	1.607E-13	-10383.224
maxMz	combo3	-25152.282	19800	-14928	-8.822E-11	572.474	-10923.224
maxFx	combo4	-9.663E-12	55780.5375	-10449.6	-954.125	1.607E-13	-10383.224
maxFy	combo5	41921.3925	13860	-10449.6	-6.139E-11	-954.134	-10383.224
maxFz	combo6	44952.3225	-1.498E-12	-14928	5.704E-14	-572.475	-10923.224

Πίνακας 4-6: Συνδυασμοί φορτίσεων στη βάση του πυλώνα

Συνδυασμοί φόρτισης	
combo1	1.35G+1.05Q+1.5W _{-Y} +0.9WAV _{-Y}
combo2	1.35G+1.05Q+1.5W _{-X} +0.9WAV _{-X}
combo3	1.35G+1.5Q+0.9W _{-Y} +0.9WAV _{-Y}

combo4	1.35G+1.05Q+1.5W _X +0.9WAV _X
combo5	1.35G+1.05Q+1.5W _{-Y} +0.9WAV _{-Y}
combo6	1.35G+1.5Q+0.9W _X +0.9WAV _X

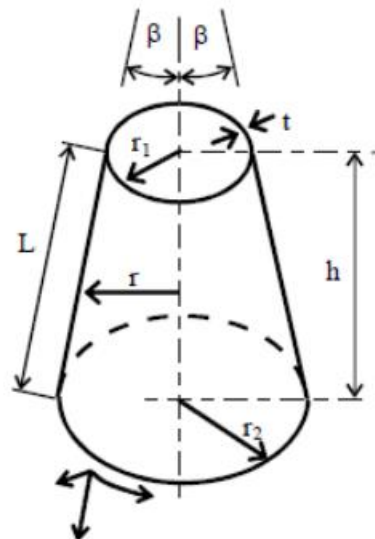
Όπου F_Z η δύναμη κατά τη διεύθυνση του άξονα του πύργου και F_X, F_Y οι εγκάρσιες στον άξονα του πύργου δυνάμεις. Αντίστοιχα οι ροπές M_X, M_Y προκαλούν καμπτική ένταση στον πύργο, ενώ η M_Z στρεπτική. Ο πύργος τους ανεμογεννήτριας αποτελείται από τμήματα κωνικής μορφής ύψους τριών μέτρων, μειούμενης διαμέτρου καθ' ύψος και σταθερού πάχους. Για κωνικά κελυφωτά στοιχεία, στο Παράρτημα Δ του EN 1993-1-6 προτείνεται η αντιμετώπιση τους ως έναν ισοδύναμο κύλινδρο με γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$l_e = L \quad (4-53)$$

$$r_e = \frac{r_1 + r_2}{2 * \cos\beta} \quad (4-54)$$

Όπου:

- l_e μήκος ισοδύναμου κυλίνδρου
- r_e ακτίνα μέσης επιφάνειας ισοδύναμου κυλίνδρου
- β γωνία του κωνικού στοιχείου που φαίνεται στο Σχήμα 4-33
- L μήκος του κωνικού στοιχείου που φαίνεται στο Σχήμα 4-33



Σχήμα 4-33: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κωνικού στοιχείου

Το υπό εξέταση τμήμα του πύργου έχει ύψος $h= 10$ [m], αρχική διάμετρο $D_{αρχ}= 6$ [m], σταθερό πάχος $t= 0.027$ [m] και διάμετρο τέλους $D_{τελ}= 5.763$ [m]. Επομένως υπολογίζονται:

$$r_1 = \frac{D_{αρχ}}{2} - \frac{t_{αρχ}}{2} \quad (4-55)$$

$$r_2 = \frac{D_{τελ}}{2} - \frac{t_{τελ}}{2} \quad (4-56)$$

$$\cos\beta = 0.99317$$

τελικά προκύπτει ισοδύναμος κύλινδρος μήκους $l_e = 10$ [m] και ακτίνας $r_e = 2.947$ [m]. Για τα εντατικά μεγέθη του Πίνακα 4-5, υπολογίζονται οι αντίστοιχες τάσεις σχεδιασμού σύμφωνα με το Παράρτημα Α του EN 1993-1-6:

Ορθές τάσεις λόγω της αξονικής δύναμης F_z

$$\sigma_{x,E,N} = -\frac{F_z}{2 * \pi * r_e * t} \quad (4-57)$$

Ορθές τάσεις λόγω διαξονικής κάμψης περί τους άξονες x και y

$$\sigma_{x,E,M} = \pm \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\pi * r_e^2 * t} \quad (4-58)$$

Διατμητικές τάσεις λόγω στρεπτικής ροπής M_z

$$\tau_{x\theta,ED} = \frac{M_z}{2 * \pi * r_e^2 * t} \quad (4-59)$$

Διατμητικές τάσεις λόγω τεμνουσών δυνάμεων F_x και F_y

$$\tau_{x\theta,ED} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{\pi * r_e * t} \quad (4-60)$$

Συγκεντρωτικά, οι τάσεις που υπολογίστηκαν φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4-7.

Πίνακας 4-7: Υπολογισμός τάσεων σχεδιασμού για τους έξι συνδυασμούς φορτίσεων

Υπολογισμός τάσεων						
	$\sigma_{x,E,N}[\text{kPa}]$	$\sigma_{x,E,M}[\text{kPa}]$	$\sigma_{x,E}[\text{kPa}]$	$\tau_{x\theta,ED}[\text{kPa}]$	$\tau_{x\theta,E}[\text{kPa}]$	$\tau_{x\theta,E.total}[\text{kPa}]$
combo1	20768.66	59936.04	80704.70	-7092.44	3816.94	10909.38
combo2	20768.66	75719.68	96488.34	-7092.44	3816.91	10909.35
combo3	21848.77	43452.99	65301.76	-10132.06	2290.14	12422.20
combo4	20768.66	75719.68	96488.34	-7092.44	3816.91	10909.35
combo5	20768.66	59936.04	80704.70	-7092.44	3816.94	10909.38
combo6	21848.77	61020.85	82869.62	-10132.06	2290.14	12422.20

Από τον Πίνακα 4-7 φαίνεται ότι ο δυσμενέστερος συνδυασμός αναπτυσσόμενων τάσεων $\sigma_{x,ED}$ και $\tau_{x\theta,ED}$ προκύπτει για τον 6^ο συνδυασμό, δηλαδή κατά τη χρονική στιγμή που η αξονική F_z παρουσιάζει μέγιστο. Επομένως οι έλεγχοι πραγματοποιούνται για τη συγκεκριμένη εντατική κατάσταση. Με την θεώρηση των κωνικών τμημάτων του πύργου ως ισοδύναμα κυλινδρικά, ο πύργος τελικά αποτελείται από κυλινδρικά στοιχεία των οποίων τα πάχη μειώνονται καθ' ύψος.

Ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού

Η ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού υπολογίζεται θεωρώντας ένα νέο ισοδύναμο κύλινδρο μήκους $l = L$ και ενιαίου πάχους $t = t_j$, όπου:

L το συνολικό μήκος του πύργου

t_j το πάχος του υπό εξέταση στοιχείου

Η αδιάστατη παράμετρος μήκους του κελύφους ω είναι ίση με:

$$\omega = \frac{l}{\sqrt{r * t}} = \frac{90}{\sqrt{2.947 * 0.027}} = 319.06 \quad (4-61)$$

Εφόσον ικανοποιούνται οι συνθήκες μακρών κελυφών:

$$\frac{r}{t} \leq 150, \omega \leq 6 * \left(\frac{r}{t}\right) \text{ και } 500 \leq \frac{E}{f_{yk}} \leq 1000 \quad (4-62)$$

ο συντελεστές C_x και η ανώτατη ανοιγμένη λυγηρότητα της πλαστικής περιοχής λουπολογίζονται ως εξής:

$$C_x = C_{x,N} * \left(\frac{\sigma_{xE,N}}{\sigma_{xE}}\right) + \left(\frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}}\right) = 0.677 * \left(\frac{21848.77}{82869.62}\right) + \left(\frac{61020.85}{82869.62}\right) = 0.915 \quad (4-63)$$

$$\lambda_{x0} = 0.20 + 0.10 * \left(\frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}}\right) = 0.20 + 0.10 * \left(\frac{61020.85}{82869.62}\right) = 0.274 \quad (4-64)$$

Όπου:

$$C_{x,N} = \max\left(0.6, 1 + \frac{0.2}{C_{xb}} \left[1 - 2 * \omega * \frac{t}{r}\right]\right) = 0.677 \quad (4-65)$$

Επομένως η ελαστική αξονική κρίσιμη τάση λυγισμού υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\sigma_{x,Rcr} = 0.605 * E * C_x * \frac{t}{r} = 0.605 * 210000000 * 0.915 * \frac{0.027}{2.947} = 1065073.04 \text{ [kPa]} \quad (4-66)$$

Θεωρώντας ποιότητα κατασκευής B (high), η παράμετρος Q λαμβάνει τιμή 25. Άρα ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών που υπολογίζεται από λαμβάνει τιμή ίση με:

$$\alpha_x = \frac{0.62}{1 + 1.91 * (\Delta w_k / t)^{1.44}} = \frac{0.62}{1 + 1.91 * (0.011283 / 0.027)^{1.44}} = 0.402 \quad (4-67)$$

Όπου:

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} * \sqrt{\bar{r}} * t = \frac{1}{25} * \sqrt{\frac{2.947}{0.027}} * 0.027 = 0.011283 \quad (4-68)$$

Οι υπόλοιπες παράμετροι λυγισμού είναι:

$$\beta = 0.6$$

$$n = 1.0$$

Η τιμή της ανοιγμένης πλαστικής λυγηρότητας λαμβάνεται ως:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} = \sqrt{\frac{0.402}{1 - 0.6}} = 1 \quad (4-69)$$

Η ανοιγμένη λυγηρότητα λ_x για αξονική θλίψη δίνεται από την εξίσωση:

$$\lambda_x = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{x,Rcr}}} = \sqrt{\frac{450000}{1065073.04}} = 0.65 \quad (4-70)$$

Ο χ_x μειωτικός συντελεστής λυγισμού για αξονική θλίψη υπολογίζεται από την εξίσωση (4-18): $\chi_x = 0.686$

Η χαρακτηριστική τάση λυγισμού υπολογίζεται από την εξίσωση (4-14) και είναι ίση με:

$$\sigma_{x,Rk} = \chi_x * f_{yk} = 0.686 * 450000 = 308700 \text{ [kPa]}$$

Η αντοχή σχεδιασμού έναντι λυγισμού για αξονική θλίψη υπολογίζεται από την εξίσωση (4-11) και είναι ίση με:

$$\sigma_{x,Rk} = \frac{\sigma_{x,Rk}}{\gamma_{M1}} = 280636.364 \text{ [kPa]}$$

Ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού

Σύμφωνα με τα όσα διατυπώθηκαν, η ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού κυλινδρικού μέλους το οποίο αποτελείται από τμήματα διαφορετικού πάχους υπολογίζεται με την με την μετατροπή του αρχικού κυλίνδρου σε έναν ισοδύναμο κύλινδρο τριών τμημάτων (a, b, c), που στην προκειμένη περίπτωση έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

$$l_a = \frac{L}{2} = 45 \text{ [m]}$$

$$l_b = l_c = 0.5 * (L - l_a) = \frac{L}{4} = 22.5 \text{ [m]}$$

$$t_a = \frac{1}{l_a} * \sum_a l_j * t_j = 0.0208 \text{ [m]}$$

$$t_b = \frac{1}{l_b} * \sum_b l_j * t_j = 0.0241 \text{ [m]}$$

$$t_c = \frac{1}{l_c} * \sum_c l_j * t_j = 0.0263 \text{ [m]}$$

όπου:

- l_a μήκος πάνω τμήματος ισοδύναμου κυλίνδρου (Σχήμα 4-31)
- l_b μήκος μεσαίου τμήματος ισοδύναμου κυλίνδρου (Σχήμα 4-31)
- l_c μήκος κάτω τμήματος ισοδύναμου κυλίνδρου (Σχήμα 4-31)
- t_a πάχος του τμήματος a (Σχήμα 4-31)
- t_b πάχος του τμήματος b (Σχήμα 4-31)
- t_c πάχος του τμήματος c (Σχήμα 4-31)

Ο κύλινδρος των τριών τμημάτων a, b και c αντικαθίσταται με έναν ισοδύναμο κύλινδρο μήκους $l_{eff} = l_a / \kappa = 75 \text{ [m]}$ και ενιαίου πάχους $t = t_a = 0.0208 \text{ [m]}$, όπου $\kappa = 0.6$ αδιάστατος συντελεστής που προκύπτει από το Σχήμα 4-32. Υπολογίζεται η αδιάστατη παράμετρος μήκους ω_j του κυλινδρικού τμήματος j του αρχικού κυλίνδρου, η οποία είναι ίση με:

$$\omega_j = \frac{l}{\sqrt{r * t}} = \frac{10}{\sqrt{2.947 * 0.027}} = 35.45$$

Εφόσον ικανοποιείται η συνθήκη $10 \leq \omega_i \leq 8.7 * \frac{r}{t}$ το τμήμα j χαρακτηρίζεται ως μεσαίου μήκους και η ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού του υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\tau_{x\theta,Rcr,j} = \left(\frac{t_a}{t_j} \right) * \tau_{x\theta,Rcr,eff} \quad (4-71)$$

όπου $\tau_{x\theta,Rcr,eff}$ η ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού του ισοδύναμου κυλίνδρου. Η αδιάστατη παράμετρος μήκους του ισοδύναμου κελύφους ω_{eff} είναι ίση με:

$$\omega_{eff} = \frac{l_{eff}}{\sqrt{r * t}} = \frac{75}{\sqrt{2.947 * 0.0208}} = 302.93$$

Ο ισοδύναμος κύλινδρος χαρακτηρίζεται μεσαίου μήκους αφού ικανοποιείται η συνθήκη $10 \leq \omega_{eff} \leq 8.7 * \frac{r}{t}$, επομένως ο συντελεστής C_τ λαμβάνεται ίσος με 1. Από τον Πίνακα 4-4 για υψηλή ποιότητα κατασκευής ο ελαστικός μειωτικός συντελεστής λόγω ατελειών α_τ λαμβάνεται ίσος με 0.65. Οι υπόλοιποι παράμετροι λυγισμού είναι οι εξής:

$$\begin{aligned}\lambda_{\tau 0} &= 0.4 \\ \beta &= 0.6 \\ n &= 1.0\end{aligned}$$

Η ελαστική κρίσιμη τάση λυγισμού για διάτμηση λαμβάνει την τιμή:

$$\tau_{x\theta, Rcr, eff} = 0.75 * E * C_\tau * \sqrt{\frac{1}{\omega_{eff}}} * \left(\frac{t}{r}\right) = 63869.57 [kPa]$$

Επομένως η ελαστική διατμητική κρίσιμη τάση λυγισμού του τμήματος j ισούται με:

$$\tau_{x\theta, Rcr, j} = \left(\frac{t_a}{t_j}\right) * \tau_{x\theta, Rcr, eff} = \left(\frac{0.0208}{0.027}\right) * 63869.57 = 49203.07 [kPa]$$

Οι παράμετροι α_τ , β , n του κυλινδρικού τμήματος j παίρνουν τις ίδιες τιμές με παραπάνω. Η τιμή της ανοιγμένης πλαστικής λυγηρότητας του τμήματος j λαμβάνεται ως:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} = 1.275$$

Η ανοιγμένη λυγηρότητα λ_τ για διάτμηση του τμήματος j δίνεται από την εξίσωση:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} = 2.298$$

Ο χ_τ μειωτικός συντελεστής λυγισμού για διάτμηση δίνεται από την εξίσωση:

$$\chi_\tau = 0.123$$

Η χαρακτηριστική τάση λυγισμού υπολογίζεται από την εξίσωση και είναι ίση με:

$$\tau_{x\theta, Rk} = \chi_\tau * \frac{f_{yk}}{\sqrt{3}} = 31956.34 [kPa]$$

Η αντοχή σχεδιασμού έναντι λυγισμού για διάτμηση είναι ίση με:

$$\tau_{x\theta, Rd} = \frac{\tau_{x\theta, Rk}}{\gamma_{M1}} = 29051.22 [kPa]$$

Έλεγχος αντοχής έναντι λυγισμού

Απαιτούνται μεμονωμένοι έλεγχοι των τιμών των μεμβρανικών τάσεων, καθώς και έλεγχος αλληλεπίδρασης τους. Επομένως, η διατομή του πύργου θεωρείται επαρκής αν ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι παρακάτω συνθήκες:

$$\sigma_{x, Ed} \leq \sigma_{x, Rd} \quad (4-72)$$

$$\tau_{x\theta, Ed} \leq \tau_{x\theta, Rd} \quad (4-73)$$

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^{k_x} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}}\right)^{k_\tau} \leq 1 \quad (4-74)$$

Οι εκθέτες αλληλεπίδρασης υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις και είναι ίσοι με:

$$k_x = 1.25 + 0.75 * x_x = 1.25 + 0.75 * 0.686 = 1.7645$$

$$k_\tau = 1.75 + 0.25 * x_\tau = 1.75 + 0.25 * 0.123 = 1.78075$$

Από τις εξισώσεις (4-72), (4-73) και (4-74) προκύπτει:

$$\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} = 0.295$$

$$\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}} = 0.428$$

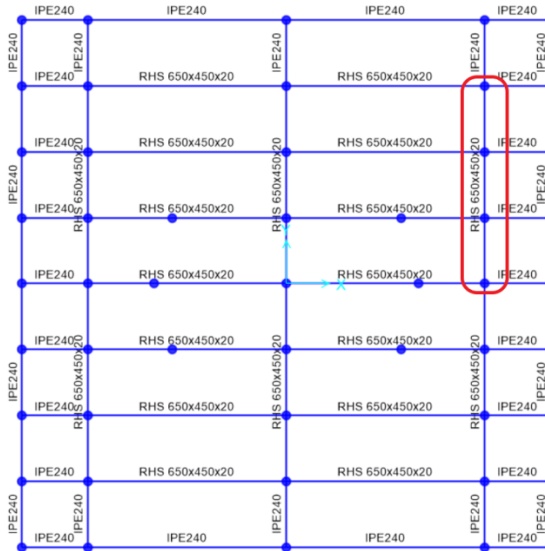
$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}}\right)^{k_x} + \left(\frac{\tau_{x\theta,Ed}}{\tau_{x\theta,Rd}}\right)^{k_\tau} = 0.3366 < 1$$

Άρα φαίνεται ότι η γεωμετρία του πύργου ικανοποιεί τους ελέγχους αντοχής.

4.5 Έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας

Για τον έλεγχο σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας πραγματοποιήθηκε έλεγχος βελών για τις δοκούς του καταστρώματος. Για τον έλεγχο θεωρήθηκαν δυσμενείς συνθήκες, κάνοντας έλεγχο για L/400, με μήκος βέλους για τα δοκάρια ίσο με το μήκος προβόλου. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικοί από τους ελέγχους βελών που πραγματοποιήθηκαν.

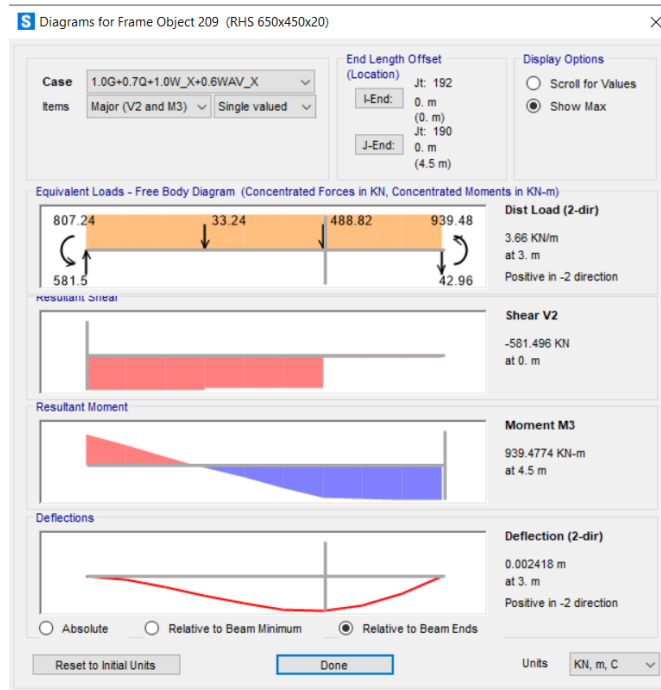
- Δοκός RHS 650x450x20 κατά την διεύθυνση Y:



Σχήμα 4-34: Απεικόνιση του δυσμενέστερου μέλους κατά Y από τις δοκούς RHS 650x450x20 έπειτα από έλεγχο σε Ο.Κ.Λ.

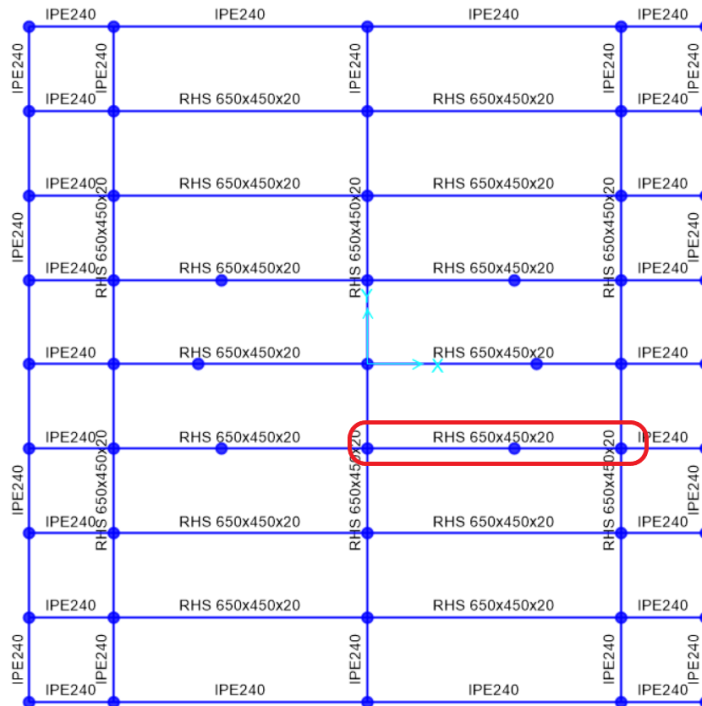
Για φόρτιση G+0.7Q+W_X+0.6WAV_X προκύπτει το μεγαλύτερο βέλος το οποίο είναι ίσο με 0.2418 [cm]. Η δοκός έχει μήκος 4.5 [m] οπότε έχουμε $L_{\text{προβ}}=2*4.5=9$ [m].

Πρέπει $0.2418 \text{ [cm]} < \frac{L}{400} = \frac{900}{400} = 2.25 \text{ [cm]}$, επομένως επαρκεί.



Σχήμα 4-35: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ελέγχου βελών σε φόρτιση $G+0.7Q+W_X+0.6WAV_X$ για την πλατφόρμα

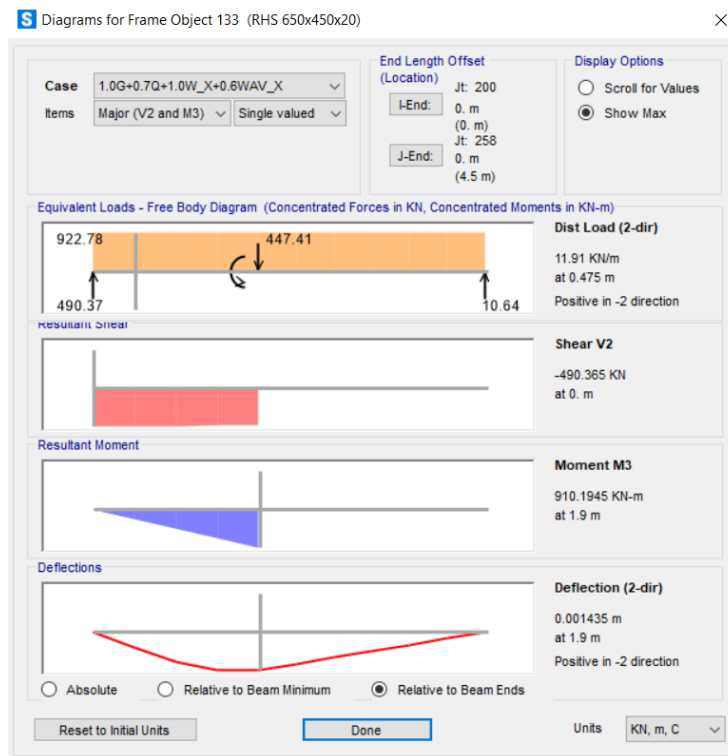
- Δοκός RHS 650x450x20 κατά την διεύθυνση X:



Σχήμα 4-36: Απεικόνιση του δυσμενέστερου μέλους κατά X από τις δοκούς RHS 650x450x20 έπειτα από έλεγχο σε Ο.Κ.Α.

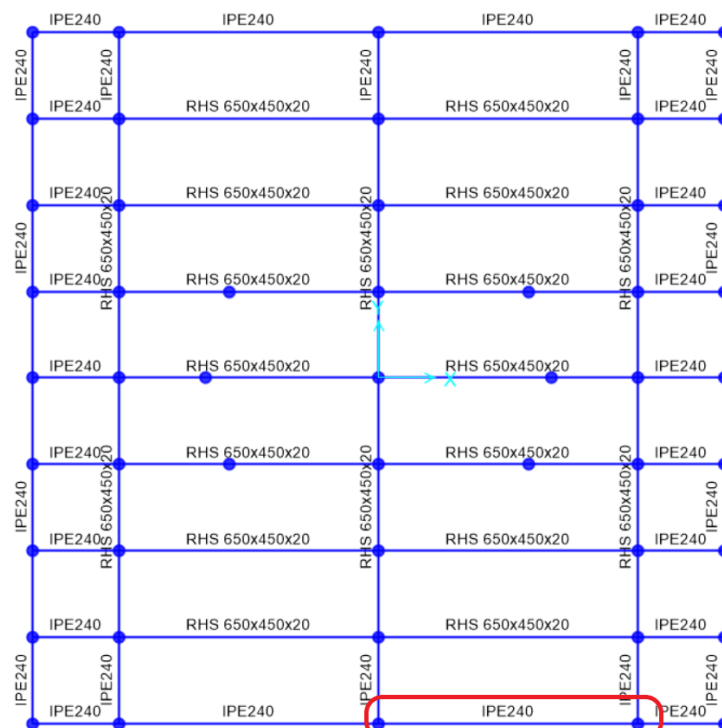
Για φόρτιση $G+0.7Q+W_X+0.6WAV_X$ προκύπτει το μεγαλύτερο βέλος το οποίο είναι ίσο με 0.1435 [cm]. Η δοκός έχει μήκος 4.5 [m] οπότε έχουμε $L_{\text{προβ}}=2*4.5=9$ [m].

Πρέπει $0.1435 \text{ [cm]} < \frac{L}{400} = \frac{900}{400} = 2.25 \text{ [cm]}$, επομένως επαρκεί.



Σχήμα 4-37: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ελέγχου βελών σε φόρτιση $G+0.7Q+W_X+0.6WAV_X$ για την πλατφόρμα

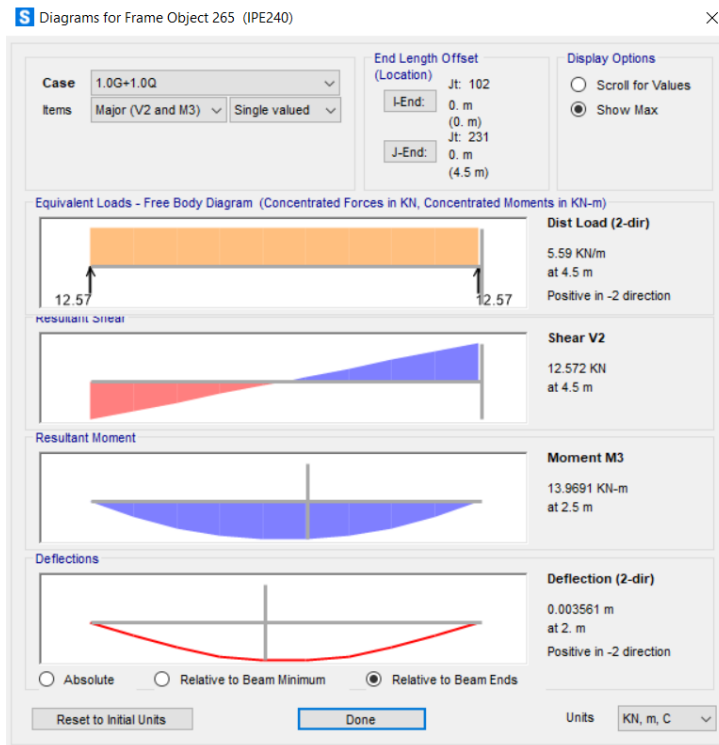
- Δοκός IPE 240 κατά την διεύθυνση X:



Σχήμα 4-38: Απεικόνιση του δυσμενέστερου μέλους κατά X από τις δοκούς IPE 240 έπειτα από έλεγχο σε Ο.Κ.Α.

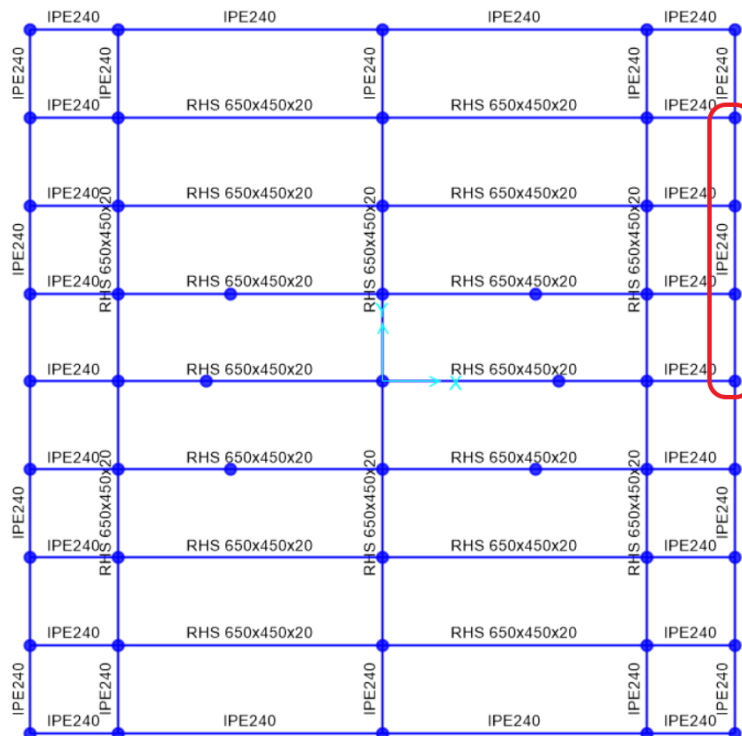
Για φόρτιση G+Q προκύπτει το μεγαλύτερο βέλος το οποίο είναι ίσο με $0.3561[cm]$. Η δοκός έχει μήκος $4.5 [m]$ οπότε έχουμε $L_{\text{προβ}}=2*4.5=9 [m]$.

Πρέπει $0.3561 [cm] < \frac{L}{400} = \frac{900}{400} = 2.25[cm]$, επομένως επαρκεί.



Σχήμα 4-39: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ελέγχου βελών σε φόρτιση G+Q για την πλατφόρμα

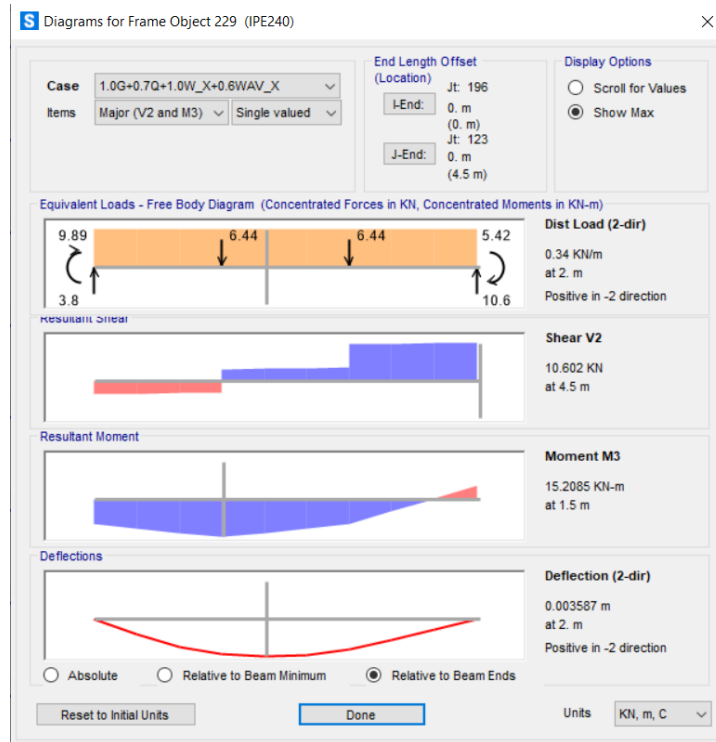
- Δοκός IPE 240 κατά την διεύθυνση Y:



Σχήμα 4-40: Απεικόνιση του δυσμενέστερου μέλους κατά Y από τις δοκούς IPE 240 έπειτα από έλεγχο σε Ο.Κ.Α.

Για φόρτιση $G+0.7Q+W_X+0.6W_{AV}_X$ προκύπτει το μεγαλύτερο βέλος το οποίο είναι ίσο με 0.3587 [cm]. Η δοκός έχει μήκος 4.5 [m] οπότε έχουμε $L_{\text{προβ}}=2*4.5=9$ [m].

Πρέπει $0.3587 [cm] < \frac{L}{400} = \frac{900}{400} = 2.25 [cm]$, επομένως επαρκεί.



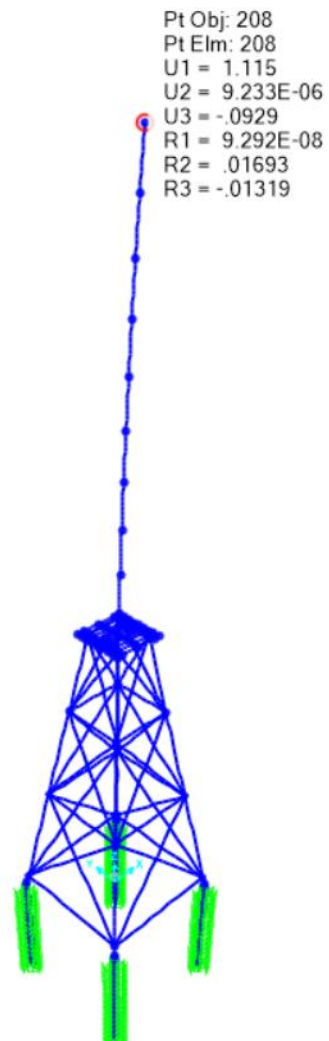
Σχήμα 4-41: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ελέγχου βελών σε φόρτιση G+Q για την πλατφόρμα

4.6 Μετακίνηση κορυφής πύργου ανεμογεννήτριας

4.6.1 Μετακίνηση κορυφής του πύργου λόγω φορτίων ανέμου και συνδυασμού τους με άλλες φορτίσεις

Ως μέγιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση της κορυφής του πύργου λόγω των φορτίων ανέμου τίθεται το 2% του ύψους του πύργου 1.8 [m], με σκοπό την αποφυγή της μεγάλης μετακίνησης που θα παρεμπόδιζε την ομαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας σύμφωνα με τον EN1993-3-2 §7.2(2) ορίζεται ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη μετακίνηση ενός πύργου είναι ίση με $\delta_{max} = h/50 = 1.8$ [m]. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος της μετακίνησης της κορυφής του πύργου για τους δυσμενέστερους συνδυασμούς φορτίσεων.

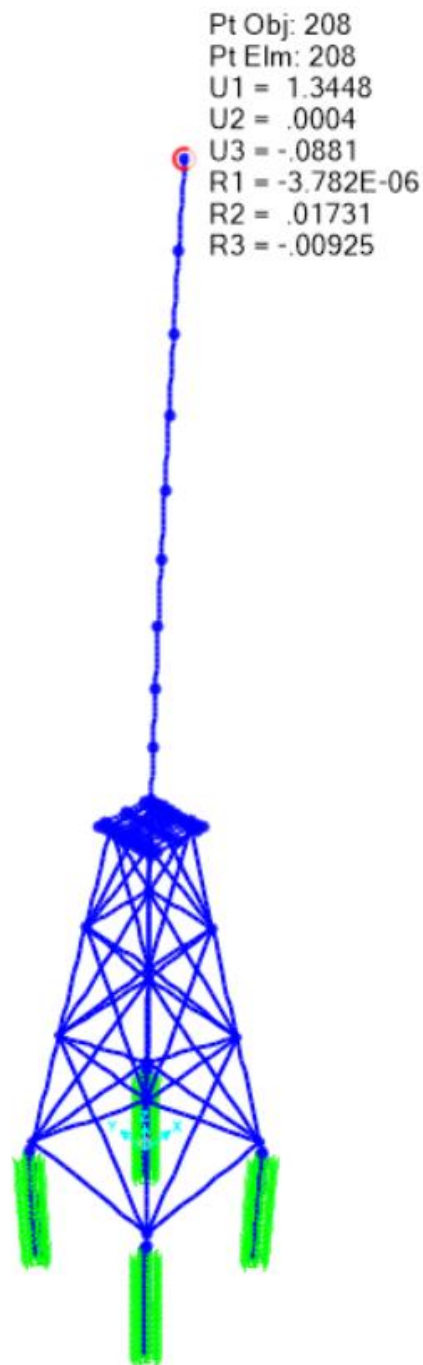
- **1.35G+1.5Q+0.9W_X+0.9WAV_X**



Σχήμα 4-42: Μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου από 1.35G+1.5Q+0.9W_X+0.9WAV_X

Παρατηρείται ότι η μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου για τον συνδυασμό 1.35G+1.5Q+0.9W_X+0.9WAV_X είναι κάτω του επιτρεπόμενου ορίου που τέθηκε, δηλαδή $U_1=1.115 \text{ [m]} < 1.8 \text{ [m]}$.

- 1.35G+1.05Q+1.5W_X+0.9WAV_X



Σχήμα 4-43: Μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου από 1.35G+1.05Q+1.5W_X+0.9WAV_X

Παρατηρείται ότι η μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου για τον συνδυασμό 1.35G+1.05Q+1.5W_X+0.9WAV_X είναι κάτω του επιτρεπόμενου ορίου που τέθηκε, δηλαδή $U_1=1.3448$ [m] < 1.8 [m].

- **1.35G+1.5Q+0.9W_X+0.9WAV_X – nonlinear**



Σχήμα 4-44: Μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου από 1.35G+1.5Q+0.9W_X+0.9WAV_X-nonlinear

Παρατηρείται ότι η μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου για τον συνδυασμό 1.35G+1.5Q+0.9W_X+0.9WAV_X-nonlinear είναι κάτω του επιτρεπόμενου ορίου που τέθηκε, δηλαδή $U_1=1.2594 \text{ [m]} < 1.8 \text{ [m]}$.

- **1.35G+1.05Q+1.5W_X+0.9WAV_X – nonlinear**



Σχήμα 4-45: Μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου από 1.35G+1.05Q+1.5W_X+0.9WAV_X – nonlinear

Παρατηρείται ότι η μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου για τον συνδυασμό 1.35G+1.05Q+1.5W_X+0.9WAV_X – nonlinear είναι κάτω του επιτρεπόμενου ορίου που τέθηκε, δηλαδή $U_1=1.5039$ [m] < 1.8 [m].

4.6.2 Μετακίνηση κορυφής του πύργου λόγω φορτίων σεισμού

Σύμφωνα με τον EN1998-6 §5.5.2 η απαίτηση για περιορισμό βλαβών θεωρείται ότι ικανοποιείται εάν η πλευρική μετακίνηση του άνω μέρους του φορέα δεν υπερβαίνει το 0.5% του ύψους του φορέα.

Σύμφωνα με τον EN1998-6 §4.9(3) οι μετακινήσεις για την απαίτηση περιορισμού βλαβών μπορούν να υπολογίζονται από τις μετακινήσεις για τη σεισμική δράση η οποία αντιστοιχεί στην «απαίτηση οριακής κατάστασης αστοχίας» πολλαπλασιασμένες με ένα συντελεστή μείωσης ν , ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη χαμηλή περίοδο επαναφοράς της σεισμικής δράσης η οποία σχετίζεται με την απαίτηση περιορισμού βλάβης. Σύμφωνα με τον EN1998-1 §4.4.3.2(2) ο συντελεστής μείωσης ν είναι ίσος με $\nu=0.4$ για τις κατηγορίες σπουδαιότητας III και IV. Εφόσον γίνεται γραμμική ανάλυση, οι μετακινήσεις που προκαλούνται από τη σεισμική δράση σχεδιασμού υπολογίζονται βάσει των ελαστικών παραμορφώσεων του στατικού συστήματος με τη βοήθεια της ακόλουθης απλουστευμένης εξίσωσης:

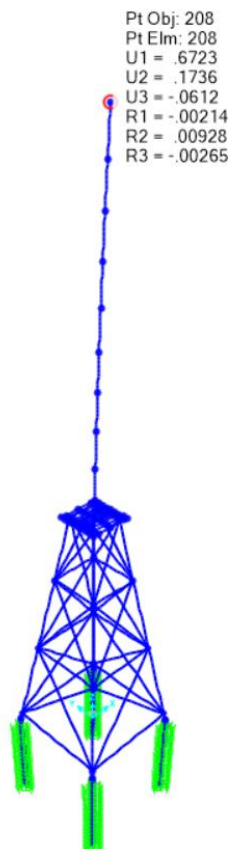
$$d_s = q_d * d_e \quad (4-75)$$

όπου:

- d_s είναι η μετακίνηση σημείου του στατικού συστήματος που προκαλείται από τη σεισμική δράση σχεδιασμού
- q_d είναι ο συντελεστής συμπεριφοράς μετακίνησης, που λαμβάνεται ίσος με τον $q=1.5$
- d_e είναι η μετακίνηση του ίδιου σημείου του στατικού συστήματος, όπως προσδιορίζεται από την γραμμική ανάλυση βασισμένη στο φάσμα απόκρισης σχεδιασμού.

Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος της μετακίνησης της κορυφής του πύργου για τους σεισμικούς συνδυασμούς φορτίσεων.

- **1.0G+0.3Q+1.0EX+0.3EY**



Σχήμα 4-46: Μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου από 1.0G+0.3Q+1.0EX+0.3EY

Η μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου που προέκυψε από τις αναλύσεις $1.0G+0.3Q+1.0EX+0.3EY$ παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-8. Παρατηρείται ότι η μετακίνηση δ που προέκυψε από τις αναλύσεις πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή συμπεριφορά μετακίνησης q και με τον μειωτικό συντελεστή v ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη χαμηλή περίοδο επαναφοράς της σεισμικής δράσης, είναι κάτω της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής σύμφωνα με τον EN1998-6.

Πίνακας 4-8: Μέγιστη μετακίνηση κορυφής πύργου για $1.0G+0.3Q+1.0EX+0.3EY$ πολλαπλασιασμένη με τον μειωτικό συντελεστή v

δ [m]	q	Μειωτικός συντελεστής v	$v * \delta * q$ [m]	$\delta_{\max}=0.5\%h$ [m]
0.6723	1.5	0.4	0.4034	0.45

- $1.0G+0.3Q+1.0EX-0.3EY$



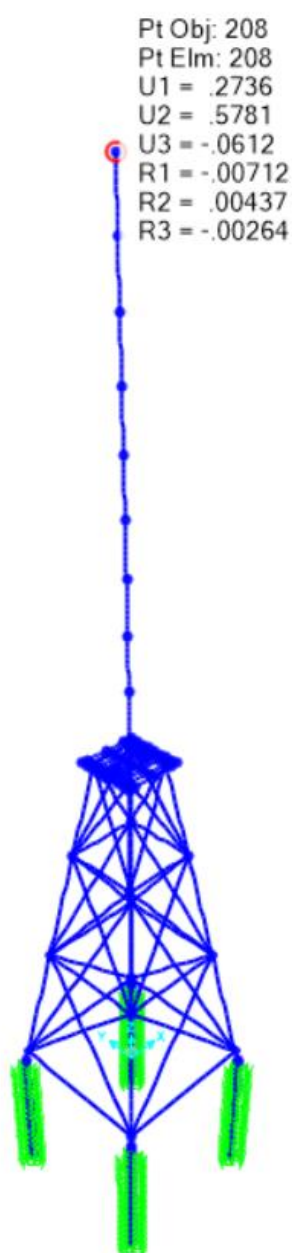
Σχήμα 4-47: Μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου από $1.0G+0.3Q+1.0EX-0.3EY$

Η μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου που προέκυψε από τις αναλύσεις 1.0G+0.3Q+1.0EX-0.3EY παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-9. Παρατηρείται ότι η μετακίνηση δ που προέκυψε από τις αναλύσεις πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή συμπεριφορά μετακίνησης q και με τον μειωτικό συντελεστή ν ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη χαμηλή περίοδο επαναφοράς της σεισμικής δράσης, είναι κάτω της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής σύμφωνα με τον EN1998-6.

Πίνακας 4-9: Μέγιστη μετακίνηση κορυφής πύργου για 1.0G+0.3Q+1.0EX-0.3EY πολλαπλασιασμένη με τον μειωτικό συντελεστή ν

δ [m]	q	Μειωτικός συντελεστής ν	$\nu * \delta * q$ [m]	$\delta_{\max}=0.5\%h$ [m]
0.6719	1.5	0.4	0.4031	0.45

- 1.0G+0.3Q+0.3EX+1.0EY



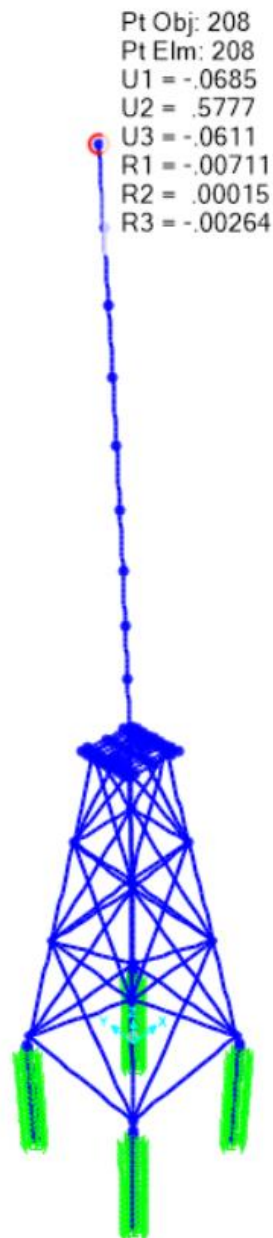
Σχήμα 4-48: Μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου από 1.0G+0.3Q+0.3EX+1.0EY

Η μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου που προέκυψε από τις αναλύσεις $1.0G+0.3Q+0.3EX+1.0EY$ παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-10. Παρατηρείται ότι η μετακίνηση δ που προέκυψε από τις αναλύσεις πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή συμπεριφορά μετακίνησης q και με τον μειωτικό συντελεστή ν ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη χαμηλή περίοδο επαναφοράς της σεισμικής δράσης, είναι κάτω της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής σύμφωνα με τον EN1998-6.

Πίνακας 4-10: Μέγιστη μετακίνηση κορυφής πύργου για $1.0G+0.3Q+0.3EX+1.0EY$ πολλαπλασιασμένη με τον μειωτικό συντελεστή ν

δ [m]	q	Μειωτικός συντελεστής ν	$\nu * \delta * q$ [m]	$\delta_{\max}=0.5\%h$ [m]
0.5781	1.5	0.4	0.3469	0.45

- $1.0G+0.3Q-0.3EX+1.0EY$



Σχήμα 4-49: Μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου από $1.0G+0.3Q-0.3EX+1.0EY$

Η μέγιστη μετακίνηση στην κορυφή του πύργου που προέκυψε από τις αναλύσεις 1.0G+0.3Q-0.3EX+1.0EY παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-11. Παρατηρείται ότι η μετακίνηση δ που προέκυψε από τις αναλύσεις πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή συμπεριφορά μετακίνησης q και με τον μειωτικό συντελεστή ν ο οποίος λαμβάνει υπόψη τη χαμηλή περίοδο επαναφοράς της σεισμικής δράσης, είναι κάτω της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής σύμφωνα με τον EN1998-6.

Πίνακας 4-11: Μέγιστη μετακίνηση κορυφής πύργου για 1.0G+0.3Q-0.3EX+1.0EY πολλαπλασιασμένη με τον μειωτικό συντελεστή ν

δ [m]	q	Μειωτικός συντελεστής ν	$\nu * \delta * q$ [m]	$\delta_{\max}=0.5\%h$ [m]
0.5777	1.5	0.4	0.3466	0.45

4.7 Έλεγχος διάβρωσης στοιχείων σε επαφή με τη θάλασσα

Στις θαλάσσιες μεταλλικές κατασκευές υπάρχει μια ζώνη λεγόμενη ως splash zone, η οποία εμφανίζεται ανάμεσα στη χαμηλότερη και υψηλότερη στάθμη της θάλασσας. Σε αυτή τη περιοχή, λόγω ταυτόχρονης ύπαρξης οξυγόνου και θαλασσινού νερού, προκαλείται σημαντική διάβρωση των μεταλλικών διατομών της κατασκευής.

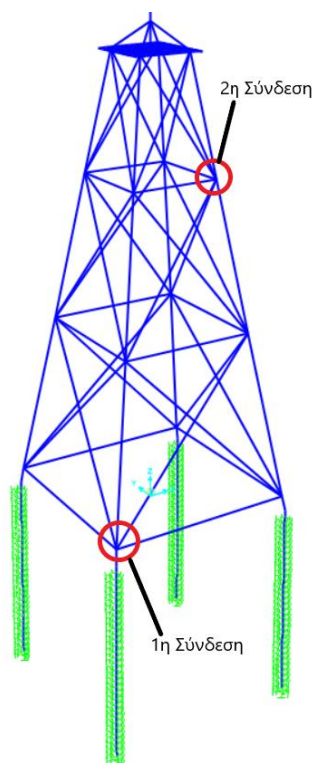
Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της διάβρωσης, στη παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η μέθοδος του θυσιαζόμενου πάχους των μεταλλικών διατομών. Συνεπώς, όλες οι διατομές των μελών του jacket αυξήθηκαν, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4-12.

Πίνακας 4-12: Τελική διαστασιολόγηση μελών jacket

Jacket	
Υποστυλώματα - πόδια	CHS 813 x 30
Κεντρικοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας	CHS 406.4 x 20
	CHS 355.6 x 20
	CHS 323.9 x 20
Οριζόντιες δοκοί	CHS 406.4 x 20
	CHS 168.3 x 20
	CHS 139.7 x 20

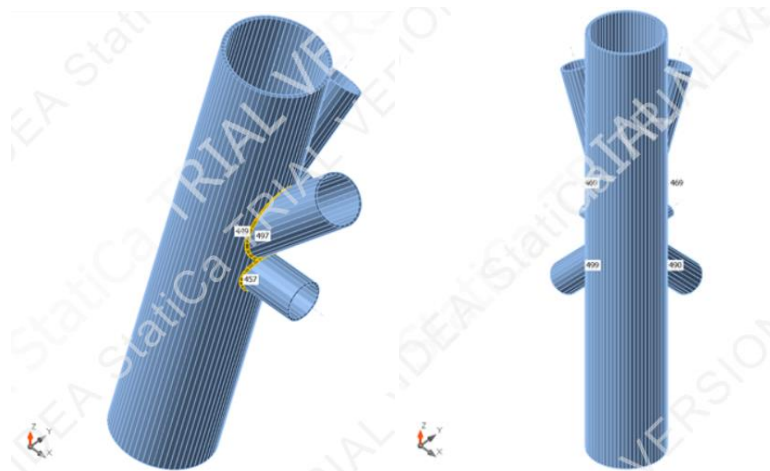
5 Συνδέσεις

Οι έλεγχοι των συνδέσεων περιορίστηκαν στους κόμβους των συνδεόμενων μελών του jacket, οι οποίες επιλέχθηκε να γίνουν όλες συγκολλητές. Οι συγκολλήσεις θεωρείται ότι πραγματοποιούνται σε κοντινή απόσταση από το λιμάνι, ώστε να εξασφαλιστεί ευκολότερη μεταφορά του jacket στο σημείο τοποθέτησης. Ένας επιπλέον λόγος που επιλέχθηκε συγκόλληση όλων των κόμβων του δικτυώματος στην ακτή, είναι η δυσκολία των επιτόπου συγκολλήσεων, αλλά και των κοχλιώσεων, σε συνθήκες τοποθέτησης εντός του νερού.



Σχήμα 5-1: Υπό μελέτη συνδέσεις

Στο Σχήμα 5-1 σημειώνονται οι συνδέσεις που προσομοιώθηκαν και ελέγχθηκαν στο πρόγραμμα IDEA StatiCa (Σχήμα 5-2). Η μοντελοποίηση των μελών, για τον έλεγχο της σύνδεσής τους στον κόμβο έγινε με τις διαστάσεις των τελικά τοποθετούμενων στοιχείων με και τον έλεγχο διάβρωσης. Στο πρόγραμμα πραγματοποιήθηκε έλεγχος συγκολλήσεων των κόμβων. Επιλέχθηκε οι συγκολλήσεις να γίνουν με εξωραφές με χάλυβα ποιότητας S355 και να έχουν πάχος 11 [mm]. Το πάχος που επιλέχθηκε πληρεί τα κριτήρια που ορίζει ο EC3 ($a = 11 \text{ [mm]} \geq 3 \text{ [mm]}$ και $a = 11 \text{ [mm]} \leq 0.7t = 14 \text{ [mm]}$).



Σχήμα 5-2: Τρισδιάστατη άποψη 1^{ης} και 2^{ης} υπό μελέτη σύνδεσης

Στον Πίνακα 5-1 και στον Πίνακα 5-2 παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη των μελών, για τους δυσμενέστερους συνδυασμούς που προέκυψαν κατά την ανάλυση, στις θέσεις των κόμβων και οι αντίστοιχες διατομές αυτών για κάθε υπό μελέτη σύνδεση.

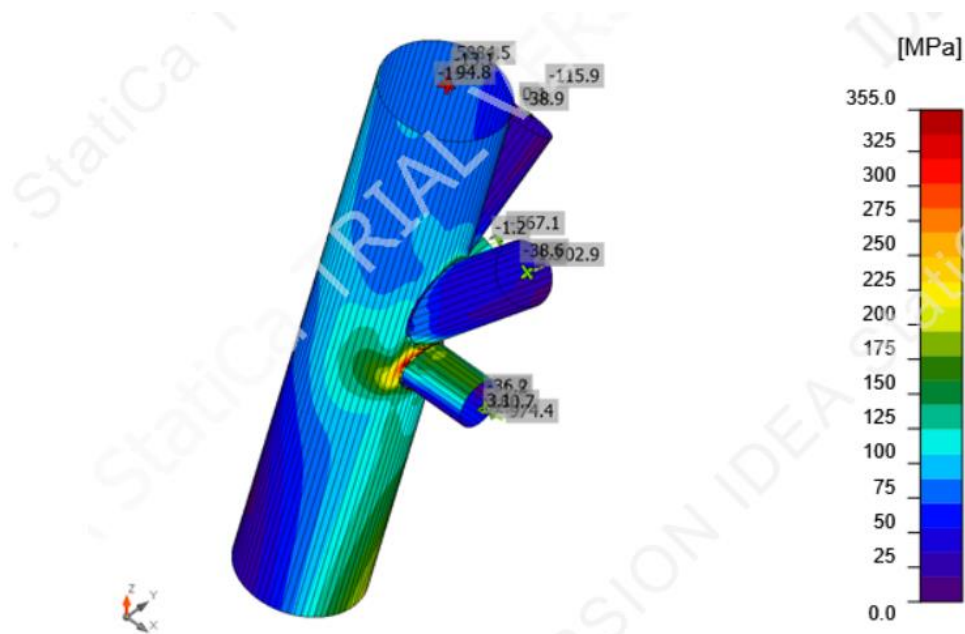
Πίνακας 5-1: Εντατικά μεγέθη στα μέλη των κόμβων για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φορτίσεων στον κόμβο της 1^{ης} υπό μελέτη σύνδεσης

Name	Member	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
1.35G+1.05Q+0.9W _{-X} +0.9W _{-Y} +1.5WAV ₋₄₅ (1)	449	6112.1	10.4	-20.2	13.4	-183.7	-232.8
	449	-6574.9	121.4	547.3	-12.7	318.6	251.8
	456	-278.0	-1.7	-16.0	-2.1	-84.8	10.9
	457	313.4	-2.0	-17.4	2.7	106.5	-14.2
	487	-517.8	1.9	-18.8	0.0	0.0	0.0
1.35G+1.05Q+0.9W _X +1.5WAV ₄₅ +0.9W _Y (2)	449	69.6	10.5	4.1	5.5	353.7	-239.1
	449	-57.7	121.2	155.2	-10.9	-256.9	259.1
	456	217.4	0.6	-14.1	-3.9	-56.2	-11.5
	457	-181.8	0.0	-15.5	0.8	77.6	1.9
	487	-136.6	0.4	-20.7	0.0	0.0	0.0
1.35G+1.05Q+0.9W _X +0.9W _{-Y} +1.5WAV ₋₁₃₅ (5)	449	3221.8	-12.8	-8.0	-25.6	166.2	276.5
	449	-3371.0	-194.4	402.3	45.2	-58.7	-287.6
	456	217.4	-0.7	-15.8	-1.1	-82.7	16.3
	457	313.4	-0.5	-15.1	1.9	70.1	5.1
	487	-275.2	-0.5	-20.9	0.0	0.0	0.0
1.35G+1.05Q+0.9W _{-X} +1.5WAV ₁₃₅ +0.9W _Y (6)	449	3214.1	33.7	-8.2	44.0	162.0	-748.6
	449	-3368.8	437.0	400.1	-68.7	-54.1	798.8
	456	-278.0	0.1	-13.8	-2.9	-48.9	-13.4
	457	-181.9	-1.0	-17.2	3.7	104.4	-21.3
	487	-310.1	1.9	-21.8	0.0	0.0	0.0
1.35G+1.05Q+1.5W _X +0.9WAV _X -1(3)	449	1229.9	-2.6	-4.6	-22.5	274.7	-4.8
	449	-1683.6	-43.4	401.2	27.1	-35.5	9.2
	456	-199.6	0.4	-34.1	-2.7	-166.2	0.2
	457	609.5	-0.5	-35.9	0.9	170.1	3.3
	487	7.9	-0.1	-38.8	0.0	0.0	0.0
1.35G+1.05Q+1.5W _{-Y} +0.9WAV _{-Y} -1(4)	449	5884.5	-9.3	-19.7	-13.1	94.8	-6.8
	449	-6433.3	-34.0	821.1	25.7	155.4	11.7
	456	-567.1	0.0	-34.0	-1.2	-174.4	8.1
	457	974.4	-1.5	-36.2	2.6	180.7	3.1
	487	-115.9	0.1	-38.9	0.0	0.0	0.0
497	-702.9	1.3	-38.6	0.0	0.0	0.0	

Πίνακας 5-2: Εντατικά μεγέθη στα μέλη των κόμβων για τον δυσμενέστερο συνδυασμό φορτίσεων στον κόμβο της 2^{ης} υπό μελέτη σύνδεσης

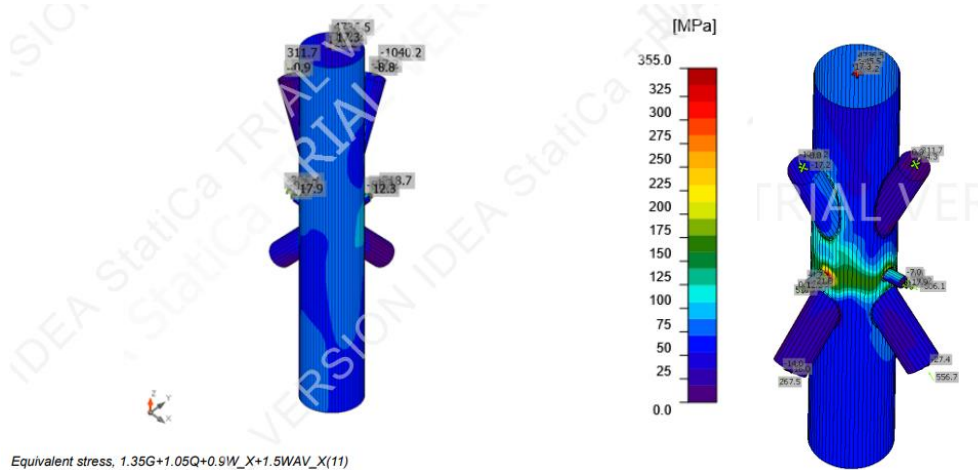
Name	Member	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
	469	-3426.2	13.0	-16.0	33.4	5.7	-31.1
	490	332.3	8.0	-8.8	0.0	0.0	0.0
	499	480.7	6.4	-28.4	0.0	0.0	0.0
	136	-137.1	4.0	-8.0	-0.2	-20.7	-10.2
	137	519.5	-4.3	-6.5	0.1	16.1	-11.3
	154	-1122.0	-15.1	-22.1	0.0	0.0	0.0
	164	455.7	-14.4	-7.8	0.0	0.0	0.0
1.35G+1.05Q+0.9W_X+1.5WAV_135+0.9W_Y(3)	469	746.4	-8.0	-31.6	11.8	-75.9	21.0
	469	-521.0	1.4	-26.6	-11.2	107.2	-20.3
	490	89.9	-7.0	-18.1	0.0	0.0	0.0
	499	623.3	7.0	-18.1	0.0	0.0	0.0
	136	-137.0	3.6	-9.0	-0.1	-21.7	-9.4
	137	192.9	3.7	-9.1	0.2	22.6	9.9
	154	-728.5	7.3	-27.5	0.0	0.0	0.0
	164	423.5	-7.3	-27.5	0.0	0.0	0.0
1.35G+1.05Q+0.9W_X+0.9W_Y+1.5WAV_-135(4)	469	6023.7	-14.3	43.7	1.2	157.4	46.2
	469	-5992.8	0.3	11.1	-2.0	-136.9	-45.2
	490	191.7	11.3	-23.1	0.0	0.0	0.0
	499	726.9	-11.3	-23.1	0.0	0.0	0.0
	136	-462.3	-4.5	-5.2	-0.2	-14.0	10.6
	137	519.5	-4.6	-5.4	0.1	14.9	-11.7
	154	-957.1	-9.7	1.9	0.0	0.0	0.0
	164	174.1	9.7	1.9	0.0	0.0	0.0
1.35G+1.05Q+0.9W_X+1.5WAV_X(11)	469	4736.5	1.2	26.2	-45.5	102.2	-17.3
	469	-4744.1	13.7	2.4	23.1	-80.8	-16.3
	490	267.5	16.0	-14.0	0.0	0.0	0.0
	499	556.7	-2.1	-27.4	0.0	0.0	0.0
	136	-306.1	0.0	-7.0	-0.2	-17.9	-0.4
	137	518.7	-8.6	-4.7	0.1	12.3	-21.8
	154	-1040.2	-17.2	-8.8	0.0	0.0	0.0
	164	311.7	-4.3	0.9	0.0	0.0	0.0

Στο Σχήμα 5-3 παρουσιάζεται η κατανομή των αναπτυσσόμενων τάσεων στον κόμβο της 1^{ης} υπό μελέτη σύνδεσης, λόγω του δυσμενέστερου συνδυασμού για τον συγκεκριμένο κόμβο (1.35G+1.05Q+1.5W_Y+0.9WAV_Y). Στο Σχήμα 5-4 παρουσιάζεται η αντίστοιχη εικόνα για τον κόμβο της 2^{ης} υπό μελέτη σύνδεσης, για τον αντίστοιχο δυσμενέστερο συνδυασμό του κόμβου (1.35G+1.05Q+0.9W_X+0.9W_Y+1.5WAV_45).



Equivalent stress, 1.35G+1.05Q+1.5W_Y+0.9WAV_Y - 1(4)

Σχήμα 5-3: Αναπτυσσόμενες τάσεις για την 1^η υπό μελέτη σύνδεση



Equivalent stress, 1.35G+1.05Q+0.9W_X+1.5WAV_X(11)

Σχήμα 5-4: Αναπτυσσόμενες τάσεις για την 2^η υπό μελέτη σύνδεση

Οι έλεγχοι συγκολλήσεως, που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα IDEA StatiCa για τις δύο υπό μελέτη συνδέσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-3 και στον Πίνακα 5-4 που ακολουθούν.

Πίνακας 5-3: Έλεγχος συγκολλήσεων για την 1^η υπό μελέτη σύνδεση

Item	Edge	Throat th. [mm]	Length [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	ϵ_{PI} [%]	σ_{\perp} [MPa]	τ_{\parallel} [MPa]	τ_{\perp} [MPa]	Ut [%]	Ut _c [%]	Status
449-arc 38	487	▲11.0	1664	1.35G+1.05Q+1.5W_-Y+0.9WAV_-Y - 1(4)	223.3	0.0	-157.8	-73.6	53.8	49.3	20.6	OK
449-arc 57	497	▲11.0	1664	1.35G+1.05Q+1.5W_-Y+0.9WAV_-Y - 1(4)	286.9	0.0	-246.9	15.9	82.8	67.3	23.7	OK
449-arc 40	456	▲11.0	902	1.35G+1.05Q+1.5W_-Y+0.9WAV_-Y - 1(4)	335.8	0.0	207.3	-37.9	-147.7	74.1	41.5	OK
449-arc 56	457	▲11.0	902	1.35G+1.5Q+0.9W_-Y+0.9WAV_-Y - 1(16)	423.8	0.0	249.7	8.4	-197.5	93.5	45.4	OK

Πίνακας 5-4: Έλεγχος συγκολλήσεων για την 2^η υπό μελέτη σύνδεση

Item	Edge	Throat th. [mm]	Length [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	ϵ_{PI} [%]	σ_{\perp} [MPa]	τ_{\parallel} [MPa]	τ_{\perp} [MPa]	Ut [%]	Ut _c [%]	Status
469-arc 55	154	▲11.0	1691	1.35G+1.05Q+0.9W_X+1.5WAV_45+0.9W_Y(10)	274.1	0.0	-77.2	-131.0	76.7	60.5	18.5	OK
469-arc 39	164	▲11.0	1691	1.35G+1.5Q+0.9W_X+0.9WAV_X - 1(18)	152.2	0.0	9.1	86.1	-16.5	33.6	12.1	OK
469-arc 55	137	▲11.0	354	1.35G+1.05Q+0.9W_X+1.5WAV_X(11)	444.4	0.1	293.8	137.1	-135.1	98.0	48.2	OK
469-arc 42	136	▲11.0	354	1.35G+1.05Q+0.9W_-Y+1.5WAV_-Y(12)	444.3	0.0	332.4	-136.1	-102.2	98.0	43.0	OK
469-arc 57	490	▲11.0	1266	1.35G+1.05Q+1.5W_X+0.9WAV_X - 1(7)	154.1	0.0	-128.1	-7.4	48.9	34.9	10.3	OK
469-arc 43	499	▲11.0	1266	1.35G+1.5Q+0.9W_-Y+0.9WAV_-Y - 1(14)	192.1	0.0	-123.4	-84.9	3.4	42.4	23.5	OK

6 Γεωτεχνικός και δομοστατικός έλεγχος των πασσάλων

6.1 Δεδομένα του εδάφους θεμελίωσης της κατασκευής και των πασσάλων

Κατά την πραγματοποίηση της γεωτεχνικής μελέτης θεωρήθηκε ως έδαφος θεμελίωσης άμμος (μη συνεκτικό έδαφος) μέσης σχετικής πυκνότητας $D_r=60\%$, κάνοντας την παραδοχή ότι το εδαφικό προφίλ για όλο το βάθος έμπηξης του πασσάλου είναι ενιαίο, προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή μόνο της μεταβολής της σταθεράς των ελατηρίων στην απόκριση της κατασκευής. Θεωρείται γωνία εσωτερικής τριβής της άμμου $\phi=35^\circ$ και μέτρο ελαστικότητας $E=30$ [MPa] με $\gamma_{κορ}= 20$ [kN/m³] . Οι εδαφικοί συντελεστές λαμβάνονται ως $\gamma_\gamma=1.00$ και $\gamma_\phi=1.00$ κατά τον Ευρωκώδικα 7. Σημειώνεται ότι όλες οι παραπάνω τιμές αποτελούν γενικευμένες τιμές σε κορεσμένα αμμώδη εδάφη. Για ακριβέστερο υπολογισμό θα έπρεπε να πραγματοποιηθούν γεωτρήσεις στην περιοχή θεμελίωσης της κατασκευής, να ληφθούν εδαφικά δείγματα από μεγάλα βάθη, ώστε να προκύψει η στρωματογραφία του εδάφους. Ωστόσο, στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αυτό δεν είναι εφικτό, συνεπώς το έδαφος θεωρείται ως ενιαίο στρώμα αμμώδους υλικού με μήκος έμπηξης του πασσάλου στην άμμο ίσο με $L=32$ [m]. Ακολουθεί ο Πίνακας 6-1 με τα δεδομένα του εδάφους αλλά και τα χαρακτηριστικά των πασσάλων:

Πίνακας 6-1: Δεδομένα του εδάφους θεμελίωσης

Άμμος μέσης σχετικής πυκνότητας		
E	30	[Mpa]
c	0	[Mpa]
ϕ	35	[°]
γ_ϕ	1	
K_p	3.6902	
$\gamma_{κορ}$	20	[kN/m ³]
γ'	10	[kN/m ³]
γ_γ	1	
D_r	60	[%]
δ	18	
n_h	5000	[kN/m ³]
$A_{ελατηρίου}$	1	[m]

όπου:

$K_p=\tan^2(45+\phi/2)$:

δ :

n_h :

συντελεστής παθητικών ωθήσεων

γωνία τριβής μεταξύ των κόκκων της άμμου και του μεταλλικού πασσάλου

σταθερά του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση, η οποία εκφράζει την ταχύτητα αύξησης του k_h με το βάθος σε μονάδες [kN/m³] .

Πίνακας 6-2: Γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά μεταλλικών πασσάλων

Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μεταλλικών πασσάλων		
D=B	1.219	[m]
t	0.03	[m]
D/t	40.63	
f _y	355	[Mpa]
Υπασσάλου	78.5	[kN/m ³]
E _p	210000	[Mpa]
I _p	0.0198	[m ⁴]
E _p I _p	4158	[MN*m ²]
L _{έμπηξης}	32	[m]
L _c =10D	12.19	[m]
A _p	0.11206	[m ²]

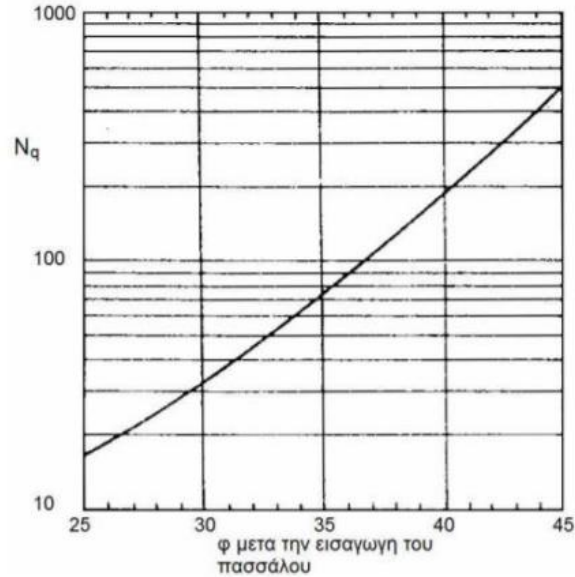
6.2 Φέρουσα ικανότητα πασσάλου έναντι κατακόρυφων φορτίων

Για πασσάλους έμπηξης στην άμμο οι εξισώσεις για την αντοχή αιχμής και την πλευρική τριβή είναι οι ακόλουθες:

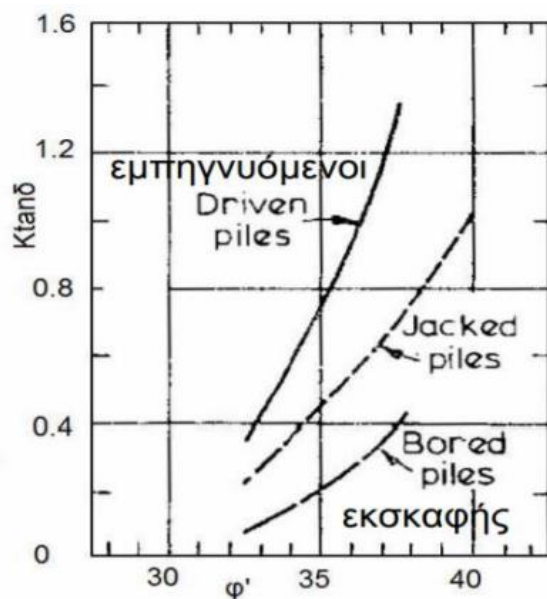
$$Q_{ru} = A_p * q_{ru} = A_p * N_q * \sigma_v \quad (6-1)$$

$$Q_{su} = \pi * D * L * q_s = \pi * D * L * K * \sigma_v * \tan\delta \quad (6-2)$$

Για τον υπολογισμό του N_q και του K*tanδ χρησιμοποιούνται τα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 6-1: N_q για διάφορες γωνίες φ [Γεωργιάννου, 2015]



Σχήμα 6-2: Υπολογισμός $K_{tan\delta}$ για διάφορες γωνίες ϕ

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις υπολογισμού των αντοχών σε κατακόρυφη φόρτιση με επιμέρους συντελεστές ασφαλείας $\gamma_b=1.30$ και $\gamma_s=1.30$ κατά τον Ευρωκώδικα 7 [EN 1997-1, 2004] προκύπτουν οι ακόλουθοι πίνακες:

Πίνακας 6-3: Υπολογισμός αντίστασης αχμής Q_{bu}

Βάθος έμπτυξης z [m]	$\sigma'_{v,o}$ [kPa]	N_q	q_b [kPa]	A_p [m ²]	$Q_{bu,k}$ [kN]	γ_b	$Q_{bu,d}$ [kN]	W
0	0	80	0	0.11	0.00	1.3	0.00	0
1	10	80	800	0.11	89.65	1.3	68.96	9.68
2	20	80	1600	0.11	179.30	1.3	137.92	19.36
3	30	80	2400	0.11	268.95	1.3	206.88	29.04
4	40	80	3200	0.11	358.59	1.3	275.84	38.72
5	50	80	4000	0.11	448.24	1.3	344.80	48.4
6	60	80	4800	0.11	537.89	1.3	413.76	58.08
7	70	80	5600	0.11	627.54	1.3	482.72	67.76
8	80	80	6400	0.11	717.19	1.3	551.68	77.44
9	90	80	7200	0.11	806.84	1.3	620.64	87.12
10	100	80	8000	0.11	896.48	1.3	689.60	96.8
11	110	80	8800	0.11	986.13	1.3	758.56	106.48
12	120	80	9600	0.11	1075.78	1.3	827.52	116.16
13	130	80	10400	0.11	1165.43	1.3	896.48	125.84
14	140	80	11200	0.11	1255.08	1.3	965.45	135.52
15	150	80	12000	0.11	1344.73	1.3	1034.41	145.2
16	160	80	12800	0.11	1434.38	1.3	1103.37	154.88
17	170	80	13600	0.11	1524.02	1.3	1172.33	164.56
18	180	80	14400	0.11	1613.67	1.3	1241.29	174.24

19	190	80	15200	0.11	1703.32	1.3	1310.25	183.92
20	200	80	16000	0.11	1792.97	1.3	1379.21	193.6
21	210	80	16800	0.11	1882.62	1.3	1448.17	203.28
22	220	80	17600	0.11	1972.27	1.3	1517.13	212.96
23	230	80	18400	0.11	2061.92	1.3	1586.09	222.64
24	240	80	19200	0.11	2151.56	1.3	1655.05	232.32
25	250	80	20000	0.11	2241.21	1.3	1724.01	242
26	260	80	20800	0.11	2330.86	1.3	1792.97	251.68
27	270	80	21600	0.11	2420.51	1.3	1861.93	261.36
28	280	80	22400	0.11	2510.16	1.3	1930.89	271.04
29	290	80	23200	0.11	2599.81	1.3	1999.85	280.72
30	300	80	24000	0.11	2689.45	1.3	2068.81	290.4
31	310	80	24800	0.11	2779.10	1.3	2137.77	300.08
32	320	80	25600	0.11	2868.75	1.3	2206.73	309.76

Πίνακας 6-4: Υπολογισμός πλευρικής τριβής Q_{su} και ιδίου βάρους πασσάλου

Βάθος έμπτυξης z [m]	$\sigma'_{v,o}$ [kPa]	q_s [kPa]	$Q_{su,k}$ [kN]	γ_s	$Q_{su,d}$ [kN]
0	0	0.00	0.00	1.3	0.00
1	10	3.25	12.44	1.3	9.57
2	20	6.50	49.77	1.3	38.29
3	30	9.75	111.99	1.3	86.14
4	40	13.00	199.09	1.3	153.15
5	50	16.25	311.08	1.3	239.29
6	60	19.50	447.95	1.3	344.58
7	70	22.74	609.71	1.3	469.01
8	80	25.99	796.36	1.3	612.58
9	90	29.24	1007.89	1.3	775.30
10	100	32.49	1244.31	1.3	957.16
11	110	35.74	1505.62	1.3	1158.17
12	120	38.99	1791.81	1.3	1378.31
13	130	42.24	2102.89	1.3	1617.61
14	140	45.49	2438.85	1.3	1876.04
15	150	48.74	2799.70	1.3	2153.62
16	160	51.99	3185.44	1.3	2450.34
17	170	55.24	3596.06	1.3	2766.20
18	180	58.49	4031.57	1.3	3101.21
19	190	61.73	4491.97	1.3	3455.36
20	200	64.98	4977.25	1.3	3828.65
21	210	68.23	5487.42	1.3	4221.09
22	220	71.48	6022.47	1.3	4632.67
23	230	74.73	6582.41	1.3	5063.39
24	240	77.98	7167.24	1.3	5513.26

25	250	81.23	7776.95	1.3	5982.27
26	260	84.48	8411.55	1.3	6470.42
27	270	87.73	9071.03	1.3	6977.72
28	280	90.98	9755.40	1.3	7504.16
29	290	94.23	10464.66	1.3	8049.74
30	300	97.48	11198.81	1.3	8614.47
31	310	100.73	11957.84	1.3	9198.34
32	320	103.97	12741.75	1.3	9801.35

Πίνακας 6-5: Φέρουσα ικανότητα μεμονωμένου πασσάλου κατά EC7

Αντίσταση πασσάλου(σε θλίψη) $Q_u=Q_{bu}+Q_{su}-W_p$		
Βάθος έμπηξης z [m]	Q_{ult}[KN]	$N_{Ed,max}$[KN]
0	0.00	
1	68.85	
2	156.85	
3	263.99	
4	390.27	
5	535.69	
6	700.26	
7	883.97	
8	1086.83	
9	1308.83	
10	1549.97	
11	1810.25	
12	2089.68	
13	2388.25	
14	2705.96	
15	3042.82	
16	3398.82	
17	3773.97	
18	4168.25	
19	4581.69	
20	5014.26	
21	5465.98	
22	5936.84	
23	6426.84	
24	6935.99	
25	7464.28	
26	8011.71	
27	8578.29	
28	9164.01	
29	9768.87	
30	10392.88	
31	11036.03	
32	11698.32	8229.448

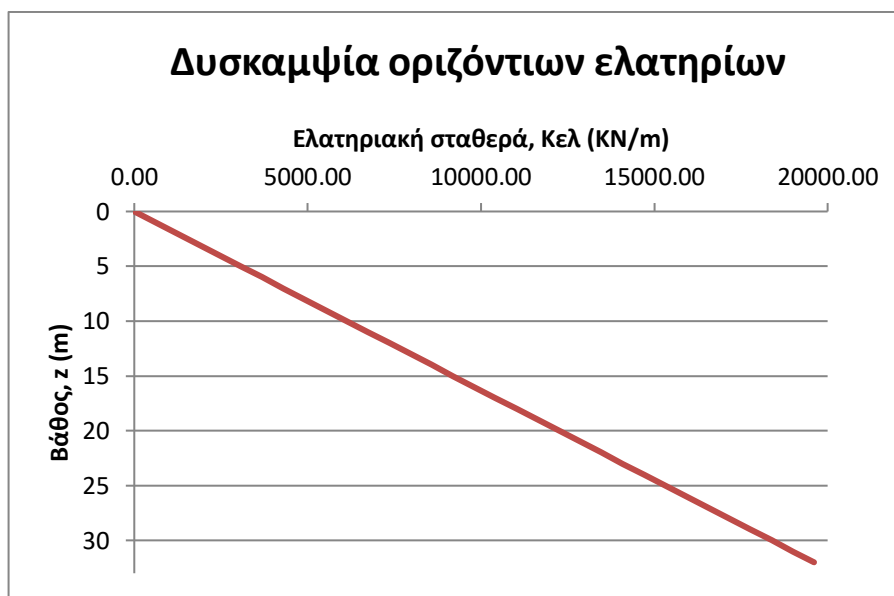
Το μέγιστο θλιπτικό φορτίο από τους συνδυασμούς των κατακόρυφων φορτίσεων προκύπτει ίσο με $N_{Ed,max} = -8229.448$ [kN]. Επομένως, η φέρουσα ικανότητα του κατακόρυφου πασσάλου, που υποβάλλεται σε κατακόρυφη αξονική φόρτιση είναι επαρκής αφού:

$$Q_{du} = 11698.32 \text{ [kN]} > N_{Ed,max} = 8229.448 \text{ [kN]}$$

6.3 Φέρουσα ικανότητα πασσάλου έναντι οριζόντιων φορτίων

Η δυσκαμψία των οριζόντιων ελατηρίων όπως έχει αναφερθεί και στο 2.1 προκύπτει από την από την παρακάτω εξίσωση και ισχύει για διάφορα βάθη κάτω από την επιφάνεια του πυθμένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-3 παρακάτω:

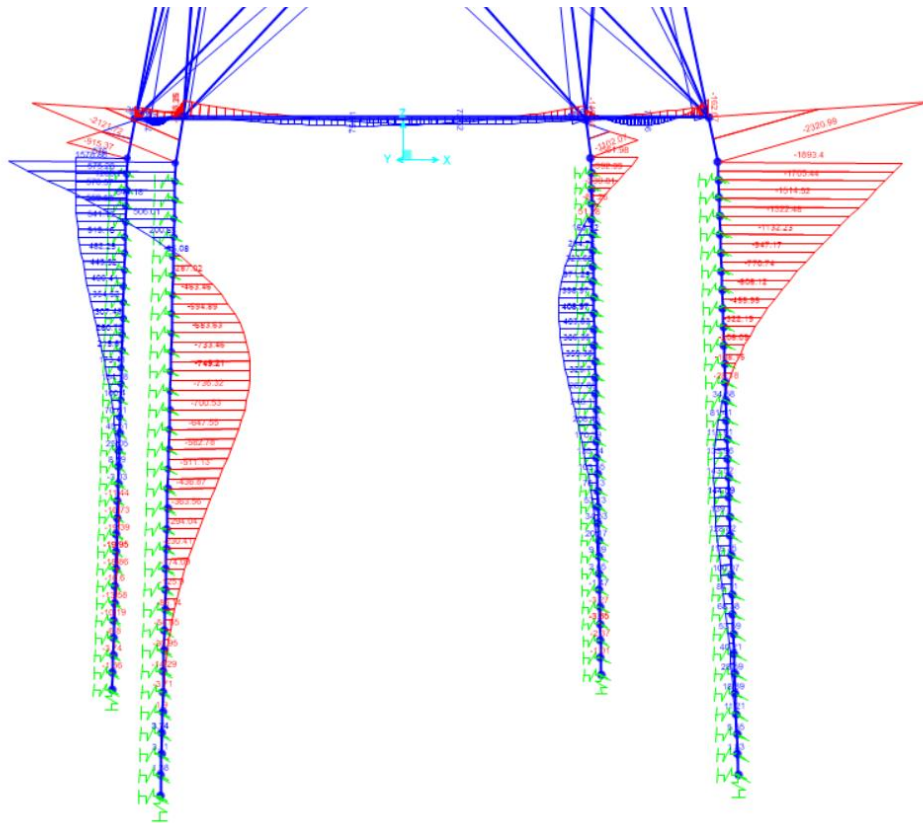
$$K_{ελ} = k_h * D_{\text{πασσάλου}} * A_{\text{επιρροής,ελ.}} \quad (6-3)$$



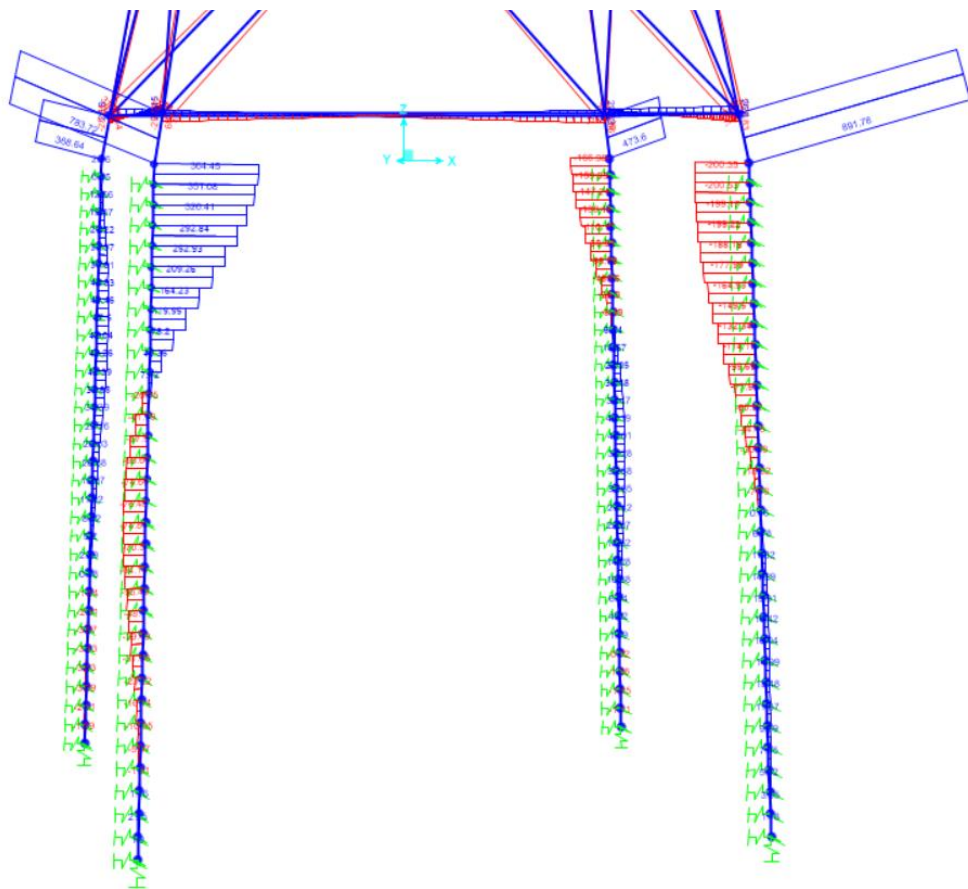
Σχήμα 6-3: Διάγραμμα δυσκαμψίας οριζόντιων ελατηρίων πασσάλων

Παρατηρείται δηλαδή το φαινόμενο που αναφέρθηκε παραπάνω για τα μη συνεκτικά αμμώδη εδάφη, ότι ο δείκτης εδάφους k_h , οπότε και η σταθερά ελατηρίων $K_{ελ}$ είναι ανάλογα προς το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους (E), τη σχετική πυκνότητα του εδάφους (D_r), καθώς και προς την ενεργό πίεση των υπερκειμένων γαιών (σ'_v), συνεπώς αυξάνονται γραμμικά με την αύξηση του βάθους.

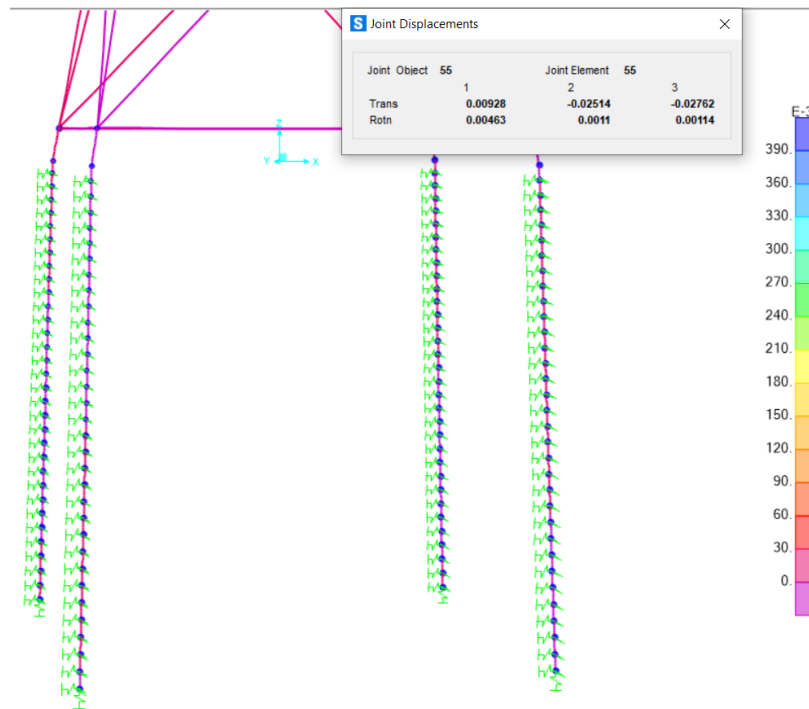
Κατά τις αναλύσεις της κατασκευής προκύπτουν τα μέγιστα εντατικά μεγέθη (ροπή κάμψης M33 και τέμνουσα δύναμη V22) και οι παραμορφώσεις των πασσάλων καθ' ύψος για το συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.05Q+1.5W_{-Y}+0.9WAV_{-Y} - nonlinear και παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήμα 6-4), (Σχήμα 6-5) και (Σχήμα 6-6):



Σχήμα 6-4: Ροπή κάμψης M_{33} στους πασσάλους με $M_{max} = -1893.4$ [kNm]

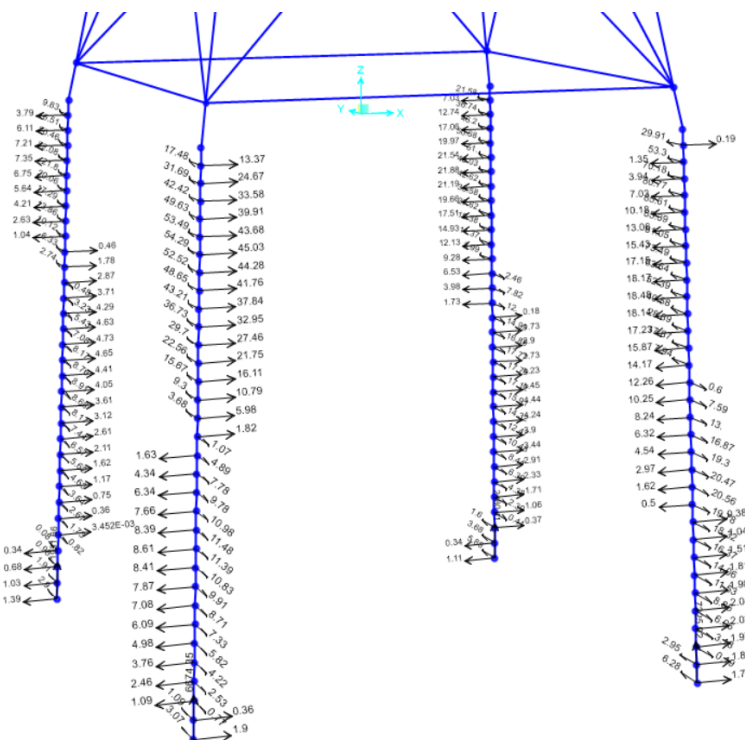


Σχήμα 6-5: Τέμνουσα δύναμη V_{22} στους πασσάλους με $V_{Ed,max} = 305.4$ [kN]



Σχήμα 6-6: Παραμορφώσεις πασσάλων κατά X για συνδυασμό 1.35G+1.05Q+1.5W₋Y+0.9WAV₋Y - nonlinear

Οι αντιδράσεις των ελατηρίων για το συνδυασμό φόρτισης 1.35G+1.05Q+1.5W₋Y+0.9WAV₋Y - nonlinear φαίνονται στο Σχήμα 6-7.



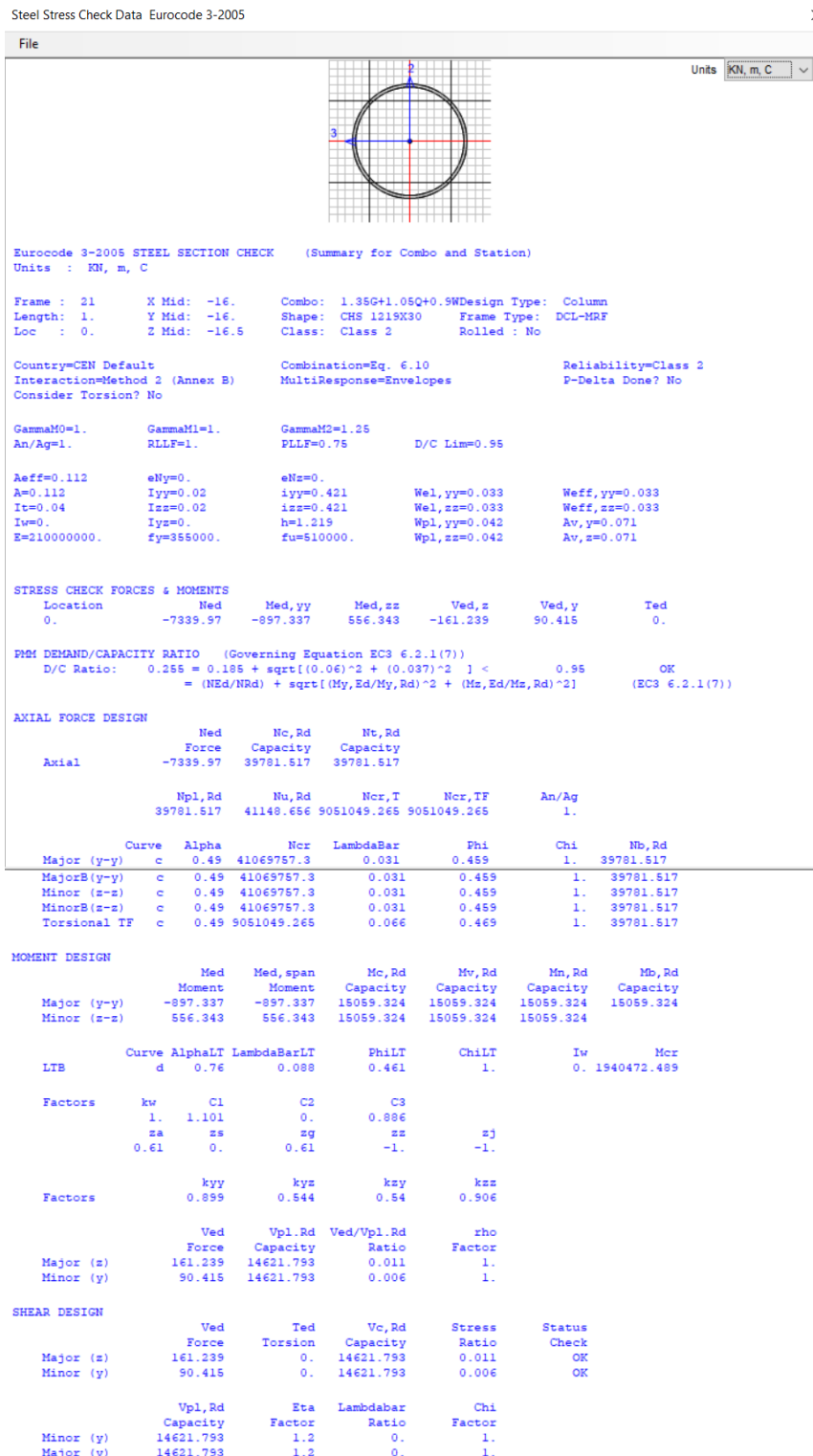
Σχήμα 6-7: Αντιδράσεις ελατηρίων κατά X, Y

Συγκρίνοντας τα μέγιστα εντατικά μεγέθη που ασκούνται στην κατασκευή με τη μέγιστη πλευρική φέρουσα ικανότητα του εδάφους (p_u) προκύπτει ότι η φέρουσα ικανότητα του εδάφους έναντι των πλευρικών φορτίων είναι επαρκής. Τέλος γίνεται αντιληπτό πως στο μέγιστο βάθος θεμελιώσεως του πασσάλου οι αντιδράσεις των ελατηρίων είναι περίπου μηδενικές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να “σβήνει” η τέμνουσα δύναμη του πασσάλου στο

μέγιστο βάθος έμπηξης, πράγμα που σημαίνει ότι τα 32 [m] μήκος θεμελίωσης επαρκούν ως βάθος έμπηξης.

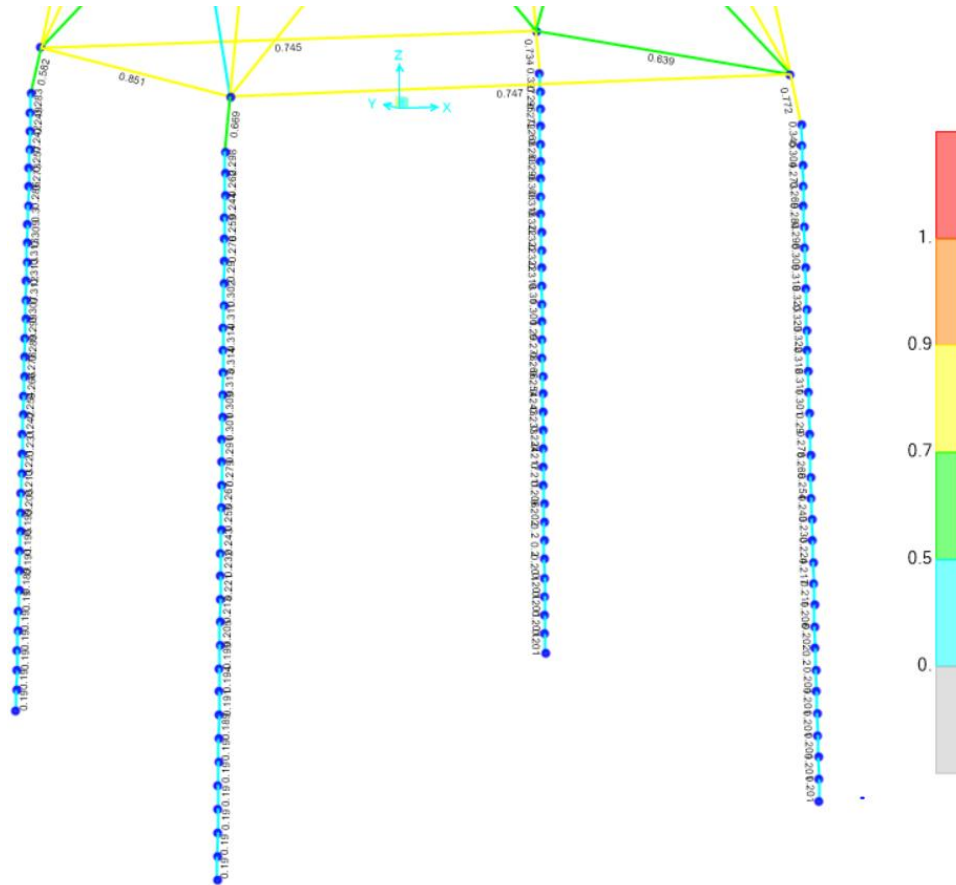
6.4 Δομοστατικός σχεδιασμός των πασσάλων

Οι πάσσαλοι αποτελούνται από σωληνωτές διατομές διαμέτρου $d=1.219$ [m] και πάχους τοιχώματος $t=0.03$ [m]. Τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά της διατομής δίνονται από το λογισμικό με το Σχήμα 6-8 της διατομής που ακολουθεί:



Σχήμα 6-8: Έλεγχος μέλους για τους πασσάλους διατομής CHS 1219x30

Είναι $d/t = 40.63 \leq 70 \cdot \varepsilon^2 = 70 \cdot ((235/355)1/2)^2 = 46.34$, επομένως η διατομή ανήκει στην κατηγορία 2. Στο παρακάτω Σχήμα 6-9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τους συνδυασμούς φόρτισης που εξετάστηκαν. Όπως είναι εμφανές το ποσοστό αξιοποίησης των διατομών των πασσάλων είναι μικρότερο του $0.34 < 1.00$. Συνεπώς οι έλεγχοι διατομής και μέλους ικανοποιούνται και ο πάσσαλος επαρκεί.



Σχήμα 6-9: Αποτελέσματα ελέγχων διατομής και μέλους πασσάλων θεμελίωσης

Σύμφωνα με τους παραπάνω ελέγχους οι πάσσαλοι είναι επαρκείς τόσο σε δομοστατικό όσο και σε γεωτεχνικό σχεδιασμό.

7 Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διπλωματική εργασία επισημαίνονται στη συνέχεια.

Όσον αφορά τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες:

- Η αιολική ενέργεια και ειδικότερα η υπεράκτια αποτελούν αιχμή στην παγκόσμια προσπάθεια επένδυσης σε εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας.
- Η αποδοτικότητα αλλά και οι δυνατότητες των υπεράκτιων ανεμογεννητριών βελτιώνονται ραγδαία. Από τη μία η παραγωγικότητα αυξάνεται με κινητήρες μεγαλύτερης ισχύος και από την άλλη η απόσταση από την ακτή και το βάθος εγκατάστασης διαρκώς μεγαλώνουν. Σε αυτό έχει συμβάλει σημαντικά η ανάπτυξη της τεχνολογίας εγκατάστασης των πλωτών ανεμογεννητριών.
- Υπάρχουν διάφορα είδη φορέων στήριξης θαλάσσιων ανεμογεννητριών, η επιλογή των οποίων εξαρτάται κυρίως από το βάθος της θάλασσας στην περιοχή εγκατάστασης. Οι θαλάσσιες ανεμογεννήτριες μεταλλικού δικτυώματος τύπου jacket και οι πλωτές είναι πιο σημαντικές για θάλασσες με μεσαία και μεγάλα βάθη, όπως είναι οι θάλασσες στην Ελλάδα.
- Υπερτερούν έναντι των ενδοχώριων καθώς οι θαλάσσιες περιοχές προσφέρουν κατά κανόνα υψηλότερο αιολικό δυναμικό. Επίσης εξαλείφονται θέματα οπτικής, αισθητικής και ακουστικής όχλησης.
- Υστερούν έναντι των χερσαίων ανεμογεννητριών καθώς έχουν υψηλότερο βαθμό δυσκολίας και κόστος κατασκευής και συντήρησης, καθώς και μεταφοράς του παραγόμενου ρεύματος στην περιοχή κατανάλωσης του.

Επομένως η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας με χερσαία και με θαλάσσια αιολικά πάρκα είναι μια μορφή αρκετά σημαντική αλλά εμπεριέχει και αυτή αρκετές αρνητικές επιπτώσεις. Άλλωστε, παρά τον τρόπο με τον οποίο παρουσιάζονται πολλές φορές τα πράγματα, στην πραγματικότητα δεν υπάρχει τρόπος παραγωγής ενέργειας με μηδενική επίπτωση στο περιβάλλον. Για να μπορέσουμε να παράγουμε την ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που απαιτείται ώστε να καλύπτονται όλες οι ανάγκες του λαού σε χαμηλή τιμή, έχοντας και τις λιγότερες δυνατές επιπτώσεις στο περιβάλλον απαιτείται ένα επιστημονικός κεντρικός σχεδιασμός της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που θα μπορεί να αξιοποιεί όλα τα επιστημονικά μέσα με μοναδικό κριτήριο τη διασφάλιση των διευρυνόμενων κοινωνικών αναγκών.

Για τους ελέγχους επάρκειας της κατασκευής στην Ο.Κ.Α. έγιναν με βάση τις διατάξεις του EN 1993-1-6 ο οποίος αναφέρεται σε κελύφη, θεωρώντας χάλυβα με χαρακτηριστική τάση διαρροής (f_{yk}) που κυμαίνεται μεταξύ 355 [MPa] και 450 [MPa]. Απαιτούνται ξεχωριστοί έλεγχοι για τον πύργο και τους πασσάλους της ανεμογεννήτριας.

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας εδραζόμενης σε μεταλλικό δικτυωτό φορέα τύπου jacket, διαπιστώσαμε ότι κρίσιμη φόρτιση της κατασκευής μας ήταν ο άνεμος. Επίσης σημαντικό ρόλο έπαιξε και η επίδραση των φαινομένων 2^{ης} τάξης τα οποία μας οδήγησαν και στην τελική επιλογή των διατομών. Όλες οι διατομές της κατασκευής είναι κατηγορίας I και II, κοίλης κυκλικής διατομής για το jacket, διπλού ταν και ορθογωνικές κοίλες διατομές για την πλατφόρμα και κωνική κυλινδρική διατομή μειούμενου πάχους ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας κατηγορίας IV.

Η διάβρωση είναι ένας παράγοντας που έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη διαστασιολόγηση του jacket της κατασκευής. Για προστασία έναντι διάβρωσης αυξήσαμε το πάχος των διατομών καθ' όλο το ύψος του jacket, αν και κρίσιμη ήταν η περιοχή που βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας – η λεγόμενη “splash zone”. Ενώ επιλέξαμε κοίλες κυκλικές διατομές, οι οποίες έχουν καλύτερη συμπεριφορά έναντι διατομών ανοιχτού τύπου.

Επιπλέον, δεν πρέπει να παραληφθεί η επιρροή του στρώματος θαλάσσιας χλωρίδας που αναπτύσσεται στα μέλη του υποθαλάσσιου τμήματος της κατασκευής, εφόσον έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία επιπρόσθετου φορτίου. Το φορτίο αυτό λήφθηκε υπόψιν κατά τον υπολογισμό του φορτίου κύματος.

Ένα ζήτημα που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής σε τέτοιες κατασκευές είναι το μεταβατικό κομμάτι (transition piece) με το οποίο επιτυγχάνεται η σύνδεση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας με το jacket, καθώς η μεταφορά των φορτίων από τον πρώτο στο δεύτερο πρέπει να γίνει με όσο το δυνατόν καλύτερο και ασφαλέστερο τρόπο. Επομένως για το μεταβατικό κομμάτι απαιτείται ιδιαίτερη μελέτη.

Η μετακίνηση κορυφής του πυλώνα της ανεμογεννήτριας βρίσκεται εντός των ορίων που προβλέπονται από τον EN1998-6 και οι αναπτυσσόμενες τάσεις βρίσκονται κάτω του ορίου διαρροής.

8 Βιβλιογραφία

- [1] «Βικιπαίδεια,» 13 10 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: https://el.wikipedia.org/wiki/Αιολική_ενέργεια. [Πρόσβαση 2021].
- [2] Α. Πετρίδης και Μ. Μιχαηλίδης, «Σχεδιασμός Υπεράκτιας Ανεμογεννήτριας στο Βόρειο Αιγαίο,» Θεσσαλονίκη, 2019.
- [3] Κ. Τσιβόλας, «Προκαταρκτικός Σχεδιασμός Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου Νότια από το Δέλτα του Νέστου,» Αθήνα, 2018.
- [4] G. E. C. Wind, "Global Offshore Wind Report 2020," Brussels, 2020.
- [5] Χ. Αντωνόπουλος, «Μελέτη Δομικού Συστήματος Ανεμογεννήτριας Πολύ Μεγάλου Ύψους,» Θεσσαλονίκη, 2018.
- [6] Χ. Δημόπουλος, «Ενίσχυση Οπών Ανθρωποθυρίδων σε Χαλύβδινα Κελύφη Πυλώνων Ανεμογεννητριών,» Αθήνα, 2012.
- [7] F. Castellani, D. Astolfi, M. Peppoloni, F. Natili, D. Butta and A. Hirschl, "Experimental Vibration Analysis of a Small Scale Vertical Wind Energy System for Residential Use," *machines*, vol. 7, no. 35, 2019.
- [8] «www.ot.gr,» 9 Οκτώβριος 2021. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ot.gr/2021/10/09/green/thavoun-tis-anemogennitries-otan-gerasoun/>.
- [9] Ν. Μανταδάκης, «Υδροελαστική Ανάλυση Πλωτής Υπεράκτιας Ανεμογεννήτριας,» Θεσσαλονίκη, 2018.
- [10] Α. Βαβουράκη, «Σχεδιασμός και Πειραματική Διερεύνηση Υδροδυναμικής Συμπεριφοράς Πλωτής Ανεμογεννήτριας για Ελληνικές Θάλασσες,» Πάτρα, 2020.
- [11] Ε. Ε. Π. Θ. Π. HELMEPA, «Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα,» 2011.
- [12] Ι. Σιάχος και Ν. Μπίστας, «Παράκτια Αιολικά Πάρκα,» Πάτρα, 2019.
- [13] Α. Μπέντας, «Φορτία, Ανάλυση, Συμπεριφορά και Δομοστατικός Σχεδιασμός Θαλάσσιων Ανεμογεννητριών,» Αθήνα, 2014.
- [14] Α. Τσιρόπουλος, «Χωροθέτηση Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου στις Κυκλάδες με τη Χρήση της Μεθόδου VIKOR,» Θεσσαλονίκη, 2018.
- [15] WindEurope, "Offshore Wind in Europe, Key trends and statistics 2020," Rory O'Sullivan, WindEurope, 2021.
- [16] «<https://www.wind-energy-the-facts.org/offshore-support-structures.html>,» [Ηλεκτρονικό].
- [17] «www.owp-butendiek.de,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.owp-butendiek.de/environment/noise-mitigation/>.
- [18] «www.smulders.com,» 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.smulders.com/en/offshore-wind/global-tech/161#>.
- [19] "http://www.c-power.be/index.php/technology/jackets," [Online].
- [20] «<https://www.baminfra.nl/projecten/gravity-base-foundation-for-blyth>,» [Ηλεκτρονικό].
- [21] Χ. Κατσέλη, «Χωροθέτηση Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων στο Αιγαίο, το Ιόνιο και το Λιβυκό Πέλαγος με την Χρήση Εργαλείων Γεωπληροφορικής,» Αθήνα, 2017.
- [22] Γ. Παπαβασιλείου, «Διερεύνηση Κριτηρίων Επιλογής Θέσεως Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου,» Αθήνα, 2017.
- [23] «www.copernicus.eu,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/MEDSEA_ANALYSISFORECAST_WAV_006_017/INFORMATION.

- [24] "www.marinetraffic.com".
- [25] Ν. Γεωργιάκης, Ε. Καραφέρη, Ι. Μακρή, Ε. - Α. Μάτα, Ο. Παπαϊώνου και Χ. Τσιούρη, «Σχεδιασμός Πλατφόρμας Άντλησης Πετρελαίου,» Αθήνα, 2020.
- [26] Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος και Γ. Ιωαννίδης, Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα, τόμ. ΙΙ, Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδαρίθμος, 1999.
- [27] Α. Κ. Chopra, Δυναμική των κατασκευών.
- [28] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development," National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [29] Δ. Βαλλιανάτου, Μ. Δημούλα, Μ. Καρδάτου και Ν. Παύλου, «Μόρφωση και Προκαταρκτική Διαστασιολόγηση Υπεράκτιας Ανεμογεννήτριας με Έδραση Τύπου Jacket,» Αθήνα, 2021.
- [30] S. Bhattacharya, L. Arany, G. Nikitas and N. Nikitas, "Soil - Structures Interactions (SSI) for Offshore Wind Turbines," 2017.
- [31] Π. Αθανασίου, Ε. Γεραμάνη, Ό. Γιαννοπούλου, Ε. Καπετανάκη και Π. Μπαλιόζογλου, «Σχεδιασμός Πλατφόρμας Άντλησης Πετρελαίου (Jacket),» 2019.
- [32] Δ. Μπάρμπα, «Προκατασκευτικός Σχεδιασμός Τρίποδης Θαλάσσιας Ανεμογεννήτριας,» Αθήνα, 2015.
- [33] Ν. Κουκουλάς, «Προκατασκευτικός Σχεδιασμός Μονοπάσσαλης Θαλάσσιας Ανεμογεννήτριας,» Αθήνα, 2014.
- [34] WindEurope, "Wind energy in Europe, 2020 Statistics and the outlook for 2021-2025," Rory O'Sullivan, 2021.
- [35] Ν. Χνάρης, «Σχεδιασμός Θαλάσσιας Μεταλλικής,» Αθήνα, 2019.
- [36] K. Sandal, "Design optimization of jacket structures for mass production," Roskilde, 2017.
- [37] I.-W. Chen, B.-L. Wong, Y.-H. Lin, S.-W. Chau και Η.-H. Huang, «Design and Analysis of Jacket Substructures for Offshore Wind Turbines,» *energies*, τόμ. 9, αρ. 264, 2016.
- [38] Μηχανικοί Μελετών και Εφαρμογών Α.Ε., ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή Α.Ε., Ε. Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών και Εργαστήριο Υδραυλικής Μηχανικής, Ε.Μ.Π., «SeaWind-Σχεδιασμός Θαλάσσιων Ανεμογεννητριών με Βάση την Επιτελεστικότητα,» 2013.
- [39] M. Froese, «www.windpowerengineering.com,» 10 October 2018. [Ηλεκτρονικό].
- [40] I. Fylling και P. A. Berthelsen, «Windpot-An Optimization Tool For Floating Support Structures For Deep Water Wind Turbines,» Trondheim, 2011.
- [41] R. K. L. Su, "Modeling and Simulation of Offshore Wind Power Platform for 5 MW Baseline NREL Turbine," Hindawi, Jakarta, 2015.
- [42] M. Karimirad, Offshore Energy Structures, For Wind Power, Wave Energy and Hybrid Marine Platforms, Springer, 2014.
- [43] Α. ENVECO, «Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Εθνικού Προγράμματος Ανάπτυξης Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων,» 2015.
- [44] P. R. Dhamsaniya, D. K. Jivani και R. Dhamsaniya, «A comparative analysis of offshore windmill supporting structure,» *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 2018.
- [45] Ε. 1. EN1991-1, *Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις στις κατασκευές*'.
- [46] Ε. 3. EN1993-1, *Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα*.
- [47] Ε. 0. EN1990, *Βασικές αρχές σχεδιασμού*.
- [48] Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος και Γ. Ιωαννίδης, Σχεδιασμός δομικών έργων από

χάλυβα, 2η έκδοση, Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005.

- [49] Ι. Ερμόπουλος, Ευρωκώδικας 1-Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις επί των κατασκευών & Ερμηνευτικά σχόλια και παραδείγματα εφαρμογής, Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005.
- [50] C. a. S. I. CSI, «SAP2000».