

Τ.Ε.Ι ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΣΤΕΦ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ  
ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΚΟΝΤΑΞΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ  
ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : ΤΖΑΝΕΤΑΚΗΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2013

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εισηγητή καθηγητή Κονταξάκη Κωνσταντίνο για την καθοδήγηση του στην εργασία και την οικογένεια μου για την στήριξή τους στην προσπάθεια μου.

## **ΣΚΟΠΟΣ**

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η διερεύνηση της τεχνολογίας των θεμελιώσεων για ανεμογεννήτριες που θεμελιώνονται στην θάλασσα κοντά στις ακτές, σε παράκτια αιολικά πάρκα, και για ανεμογεννήτριες που θεμελιώνονται στην ανοικτή θάλασσα, σε υπεράκτια αιολικά πάρκα.

Επίσης σχεδιάζεται ένα θεμέλιο παράκτιας ανεμογεννήτριας, σε πραγματικές διαστάσεις, και υλοποιείται η προσομοίωση της λειτουργίας με τις συνθήκες που επικρατούν σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

Στην εισαγωγή γίνεται μια γενική αναφορά για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στη θάλασσα.

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται οι τρόποι θεμελιώσεων παρακτίων και υπεράκτιων ανεμογεννητριών, γίνεται αναφορά στις διαστάσεις, και τα υλικά με τα οποία είναι κατασκευασμένα τα θεμέλια αυτά.

Στο κεφάλαιο 2 αναφέρεται ο τρόπος υπολογισμού των δυνάμεων για τα θεμέλια των παρακτίων και υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το σχέδιο του θεμελίου μιας ανεμογεννήτριας 5MW.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται προσομοίωση του μοντέλου του θεμελίου που σχεδιάστηκε και γίνεται έλεγχος αντοχής στο πρόγραμμα solidworks στις ακραίες καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή θεμελίωσης του.

Στο κεφάλαιο 5 αναφέρονται οι τα συμπεράσματα από τις αναλύσεις της προσομοίωσης που έγιναν με το πρόγραμμα solidworks.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται αναφορά για την νομοθεσία που ισχύει στην Ελλάδα για τα χερσαία, παράκτια και υπεράκτια αιολικά πάρκα.

## **PURPOSE**

The purpose of this study is to investigate the technology foundations for wind turbines are based on the sea near the coast, coastal wind farms and wind turbines based on the open sea, offshore wind farms . Also designed a coastal wind turbine foundation , life size , and implemented the simulation of operating conditions prevailing in a particular area.

The introduction is a general reference for the exploitation of wind energy at sea .

In Chapter 1 the ways foundations coastal and offshore wind turbines , refer to the dimensions and the materials they are made these foundations .

Chapter 2 deals with the calculation of forces on the foundations of coastal and offshore wind turbines .

Chapter 3 presents the design of a wind turbine foundation 5MW.

In Chapter 4, the model simulated the foundation designed and made control program solidworks resistance to extreme weather conditions in the area of the foundation .

In Chapter 5 reports the findings from the analyzes of the simulation performed with the program solidworks.

In Chapter 6 refers to the legislation in force in Greece for land , coastal and offshore wind farms .

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Θεμέλια παράκτιων και υπεράκτιων ανεμογεννητριών	8
1. Monopile	8
2. Gravitation	9
3. Suction bucket	11
4. Tripod	13
5. Jacket structure	14
6. Sparc floating	15
7. Tension leg platform	17
8. Spar buoy floater	18
9. TLP-SPAR floater	19
10. Tri-floater	20
11. Windwave float	21
12. Poseidon	22
13. Windsea	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Υπολογισμός των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα θεμέλια παράκτιων και υπεράκτιων ανεμογεννητριών.	24
Φορτία σε σταθερές θαλάσσιες θεμελιώσεις	26
Φορτία σε πλωτές θαλάσσιες θεμελιώσεις	28
Περιγραφή θεμελίου, τοποθεσίας και ανεμογεννητριας	28
Παράμετροι που λήφθηκαν υπόψιν κατά τον σχεδιασμό	31
Τοποθεσία και Περιβαλλοντικές Συνθήκες	31
Φορτίσεις που εξασκούνται στον Πυλώνα	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Σχεδιασμός θεμελίωσης τύπου TLP πλωτής ανεμογεννητριας (TLP: TENSION LEG PLATFORM)	38
Διαδικασία σχεδιασμού	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Υπολογισμοί (προσομοίωση μοντέλου) ελέγχου αντοχής θεμελίου	45
Στήριξη θεμελίου ανεμογεννητριας και δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό	46
Περιπτώσεις φόρτισης (Load cases), σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-3 για υπεράκτιες ανεμογεννητρίες.	48
Υπολογισμός φορτίσεων από το πρόγραμμα solidworks	49
Περίπτωση φόρτισης 1.1 : Η ανεμογεννητρια σε κανονική λειτουργία	49
Περίπτωση φόρτισης 1.5 : Η ανεμογεννητρια σε κανονική λειτουργία	52
Περίπτωση φόρτισης: 1.6 : Η ανεμογεννητρια σε κανονική λειτουργία	55
Περίπτωση φόρτισης: 2.1 : Η ανεμογεννητρια σε παραγωγή και εμφανίζει βλάβη.	58
Περίπτωση φόρτισης: 6.1 : Ανεμογεννητρια εκτός λειτουργίας	61
Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στατικών αναλύσεων	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: συμπεράσματα-επίλογος	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Θεσμικό περιβάλλον για υπεράκτια και παράκτια αιολικά πάρκα στην Ελλάδα	66
1. Νομοθεσία	66
2. Κριτήρια Αδειοδότησης	66
3. Η κατάσταση στην Ελλάδα	67
Πίνακας αιτήσεων για αιολικά πάρκα στη θάλασσα	69
4. Υπεράκτια αιολικά πάρκα στην Ευρώπη	70
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1. Τιμές των υδροδυναμικών φορτίων	72

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2. Διαγράμματα υδροδυναμικών φορτίων	76
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

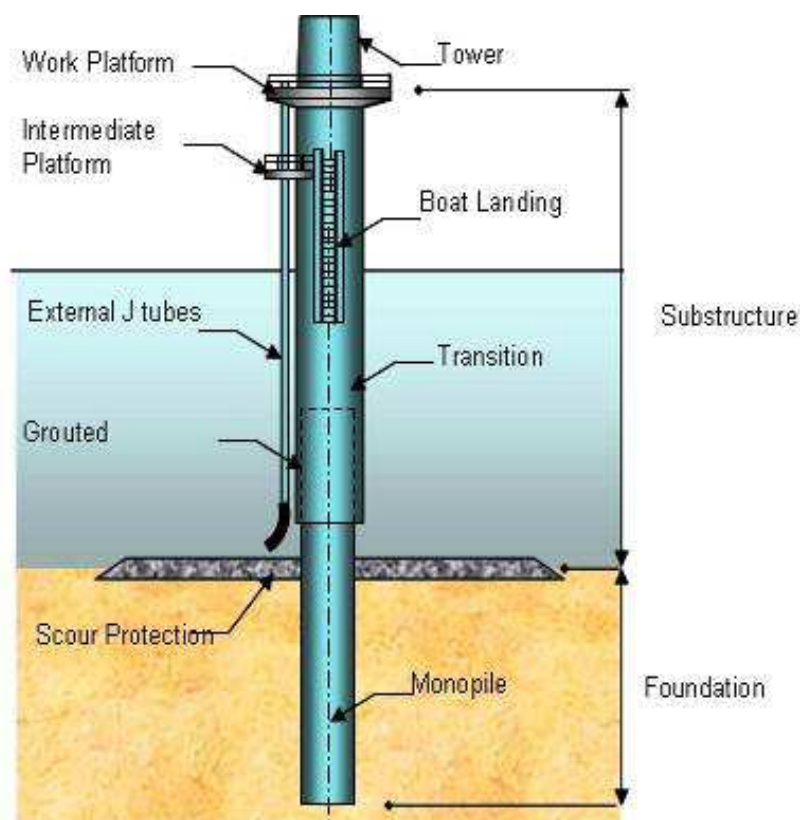
Τα αιολικά πάρκα σε θαλάσσιες περιοχές είναι μια γρήγορα αναπτυσσόμενη βιομηχανία. Προς το παρόν οι εγκαταστάσεις των παράκτιων αιολικών πάρκων αντιμετωπίζουν ακόμα κάποιες προκλήσεις. Το σημαντικότερο θέμα που απασχολεί του μηχανικούς που εμπλέκονται σε τέτοιες εγκαταστάσεις και ειδικά στις εγκαταστάσεις σε περιοχές όπως η Μεσόγειος θάλασσα, είναι το θεμέλιο των ανεμογεννητιών. Η διερεύνηση αυτού του πεδίου αποτελεί το αντικείμενο αυτής της εργασίας, πιστεύοντας ότι τα παράκτια αιολικά πάρκα είναι το μέλλον στις εγκαταστάσεις της αιολικής ενέργειας.

Όπως αναφέρει σε διαδικτυακή του συνέντευξη ο καθηγητής του ΕΜΠ κ. Γιώργος Μπεργελές, την 31 Ιαν 2011: «Η απάντηση στην αιολική ενέργεια είναι οι πλωτές ανεμογεννήτριες. Η πολιτεία να ορίσει έγκαιρα θαλάσσιες περιοχές, μικρές, και να δημιουργήσει αιολικά πάρκα. Το δεύτερο σημαντικό βήμα βέβαια είναι η διασύνδεση των νησιών με την ενδοχώρα. Το έργο αυτό θα πρέπει να αποκτήσει το χαρακτήρα προτεραιότητας. Συνοψίζοντας λοιπόν η λύση είναι: διασύνδεση των νησιών, πλωτά αιολικά πάρκα με μεταφορά της ενέργειας στην ενδοχώρα και ενίσχυση του δικτύου της ενδοχώρας.»

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΜΕΛΙΑ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΚΑΙ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι πυλώνων για ανεμογεννήτριες στη θάλασσα. Δεν επιχειρήθηκε η μετάφραση του ονόματος κάθε τύπου θεμελίωσης μιας και εκτιμήθηκε ότι δεν υπάρχουν ακόμα στην ελληνικοί αντίστοιχοι όροι.

### 1. Monopile



Εικόνα 1. Θεμέλιο τύπου monopile

Η θεμελίωση τύπου monopile αποτελείται από ένα χαλύβδινο σωλήνα που έχουν εφαρμοστεί πάνω του κάποια επιπλέον στοιχεία για την εύκολη συναρμολόγηση και συντήρηση της γεννήτριας και εξασφαλίζουν την σταθερότητα των θεμελίων. Αυτά είναι :

- Σύστημα προστασίας βυθού ώστε να μην γίνεται μεταφορά της άμμου στο βυθό της θάλασσας από τα θαλάσσια ρεύματα και να μην δημιουργείται βουρκόδες έδαφος γύρο από το θεμέλιο καθώς με τα χρόνια ο πυλώνας έχει πρόβλημα σταθερότητας (Scour protection) .
- Ο πυλώνας ο οποίος βυθίζεται στον βυθό της θάλασσας και σταθεροποιεί την ανεμογεννήτρια . Έχει μικρότερη διάμετρο από τον πυλώνα που βρίσκεται πάνω από το έδαφος έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμόσει εσωτερικά του πυλώνα της γεννήτριας (grouted).
- Τις εξωτερικές σωλήνες (external J tubes) για την προστασία των



καλωδίων του ρεύματος από το θαλάσσιο περιβάλλον και να εξασφαλίζουν την ασφαλή σύνδεση με το δίκιο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

- Την ενδιάμεση πλατφόρμα (intermediate platform) για να συνδέει την σκάλα αποβίβασης (boat landing) με την πλατφόρμα εργασίας (work platform) όπου εκεί γίνονται όλες οι εργασίες σύνδεσης και συντήρησης των καλωδίων του ρεύματος.
- Ο πύργος (tower) που στηρίζει την γεννήτρια. Η διάμετρος και το πάχος του πύργου υπολογίζεται από το βάθος που τοποθετείται, τη μάζα της γεννήτριας, το ύψος του πύργου, τα φορτία που ασκούνται πάνω του από τα ρεύματα που υπάρχουν κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και τα κύματα που επικρατούν στην περιοχή τοποθέτησης του. Τοποθετείται στο βυθό με δονήσεις ή σε διάτρητους βράχους.

Είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη θεμελίωση για τις παράκτιες ανεμογεννήτριες σε μικρά βάθη νερού. Τα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου θεμελίωσης είναι ότι είναι απλός στην κατασκευή και δεν χρειάζεται καμιά προεργασία ο βυθός πριν την τοποθέτηση του. Τα μειονεκτήματα του είναι ότι χρειάζεται μεγάλους και βαρείς πασσάλους, και δεν μπορεί να τοποθετηθεί σε μεγάλο βάθος και σε βυθό με μεγάλους ογκολίθους. Ο πυλώνας υπόκειται σε αντιδιαβρωτική βαφή ώστε να προστατεύεται από το διαβρωτικό περιβάλλον που τοποθετείται.

Η monopile είναι από τις πιο γνωστές τεχνικές θεμελίωσης στην παράκτια βιομηχανία καθώς με αυτή θεμελιώνονται γέφυρες, λιμάνια και πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου. Οι διαστάσεις του θεμελίου είναι ανάλογες με την γεννήτρια που τοποθετείται και το βάθος που θεμελιώνεται. Παράδειγμα για μια γεννήτρια 3MW (Vestas V90 στην Αγγλία) το πάχος των τοιχωμάτων είναι 50mm, η διάμετρος από 4,1 έως 4,9 μέτρα, εισχωρούν στο βυθό από 25 έως 30 μέτρα. Το συνολικό ύψος του θεμελίου είναι από 50 έως 60 μέτρα, ζυγίζουν από 350 έως 485 τόνους και το βάθος του νερού είναι 20 έως 30 μέτρα .

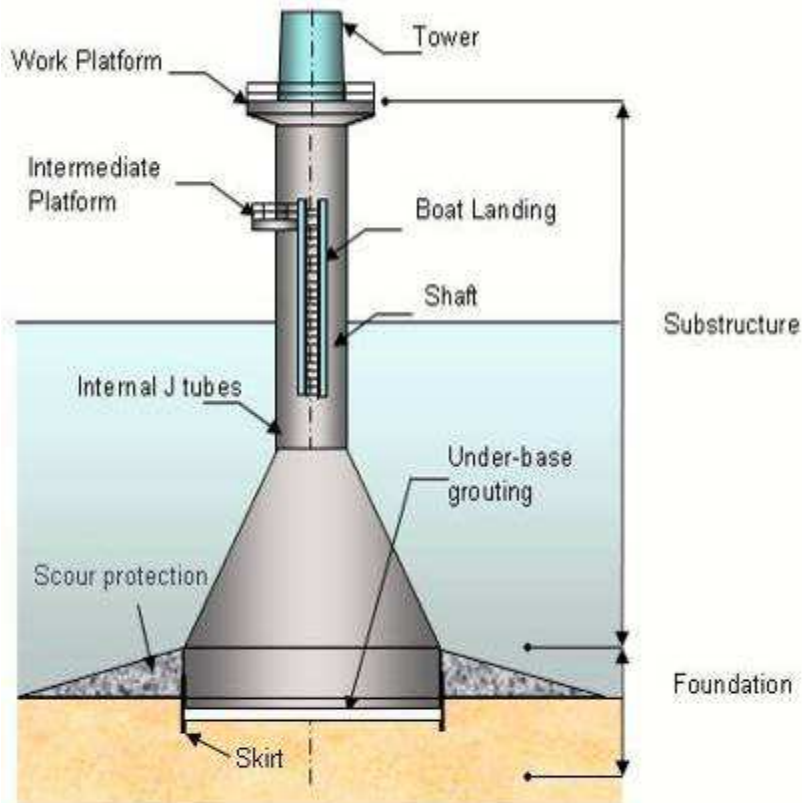
## **2. Gravitation**

Ο τύπος αυτός θεμελίωσης αποτελείται από:

- Σύστημα προστασίας βυθού ώστε να μην γίνεται μεταφορά της άμμου στο βυθό της θάλασσας από τα θαλάσσια ρεύματα και να μην δημιουργείται βουρκώδες έδαφος γύρω από το θεμέλιο καθώς με τα χρόνια ο πυλώνας θα είχε πρόβλημα σταθερότητας (Scour protection)
- Τις εσωτερικές σωλήνες (internal J tubes) για την προστασία των καλωδίων του ρεύματος από το θαλάσσιο περιβάλλον και για να εξασφαλίζουν την ασφαλή σύνδεση με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Την ενδιάμεση πλατφόρμα (intermediate platform) για να συνδέει την σκάλα αποβίβασης (boat landing) με την πλατφόρμα εργασίας (work

platform) όπου εκεί γίνονται όλες οι εργασίες σύνδεσης και συντήρησης των καλωδίων του ρεύματος.

- Τον πύργο (tower) που στηρίζει την γεννήτρια.
- Την βάση που θεμελιώνεται στο βυθό (under-base grouting) και τον πυλώνα που συνδέει το θεμέλιο με τον πύργο (shaft).



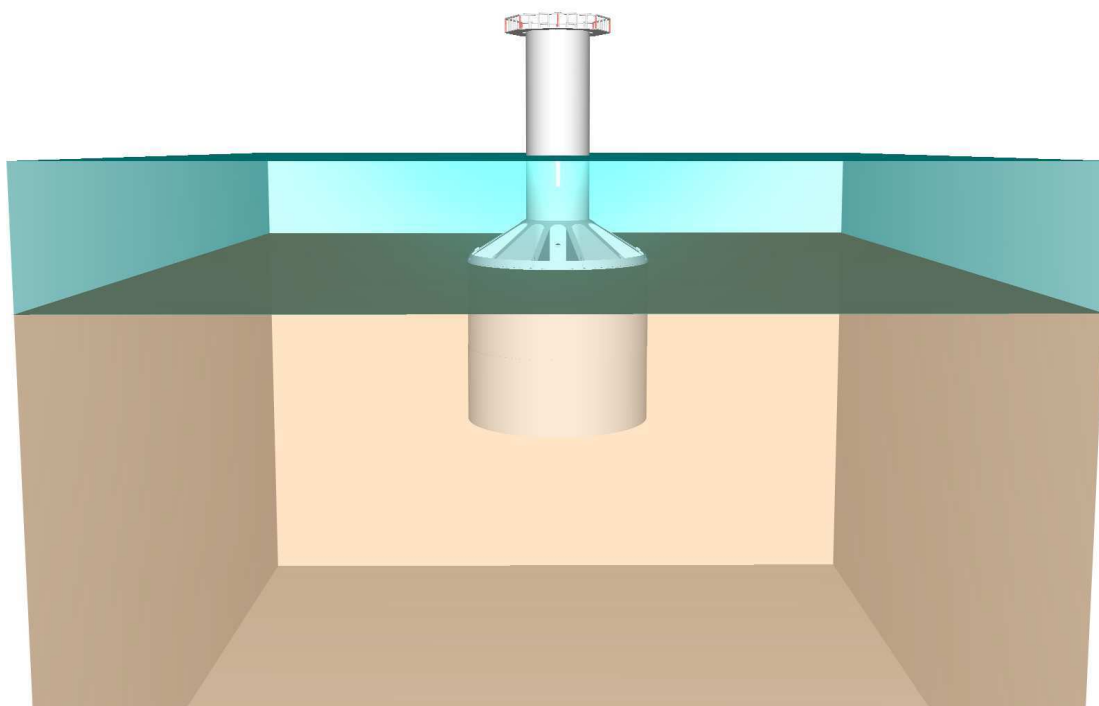
Εικόνα 2.Θεμέλιο τύπου Gravitation

Χρήση θεμελίων τύπου Gravitation: Πρόκειται για μια νέα τεχνολογία, παρόμοια με εκείνη των θεμελίων για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες .

Το θεμέλιο είναι χαλύβδινο, κωνικό και τοποθετείται στον βυθό της θάλασσας όπου γεμίζεται με σκυρόδεμα, το οποίο προσθέτει στο θεμέλιο επιπλέον βάρος για να αντέξει την δύναμη από τα κύματα και την πίεση. Το πλεονέκτημα της λύσης του χάλυβα είναι ότι μπορεί συναρμολογηθεί στην ξηρά, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα είδη του βυθού αν και ο βυθός χρειάζεται κάποια προεργασία για να αφαιρεθούν από εκεί ο βούρκος αν υπάρχει και οι πέτρες. Έχει αντιδιαβρωτική προστασία με την μέθοδο της βαφής. Χρησιμοποιεί τη μάζα του για να αντέξει στα φορτία που τον καταπονούν για να παραμείνει σε όρθια θέση. Όπως και στη monopile θεμελίωση έτσι και σε αυτήν συναρμολογούνται πάνω στον πυλώνα βάσεις, σωλήνες για την σταθερότητα του θεμελίου και την ασφαλή λειτουργία της γεννήτριας με πρόσθετα εδώ ότι ο σωλήνας που μεταφέρει τα ρευματοφόρα καλώδια είναι εσωτερικά του θεμελίου, και ότι κάτω από την βάση έχει γίνει επίστρωση με σκυρόδεμα.

Για να θεμελιωθεί μια γεννήτρια 2,3MW σε βάθος νερού από 6 έως 9,5 μέτρα, το θεμέλιο έχει μέσα του 6 θαλάμους που γεμίζονται με σκυρόδεμα για να αποκτήσει το απαραίτητο βάρος και να σταθεροποιηθεί στον πυθμένα. Στον πυθμένα η διάμετρος ενός τέτοιου θεμελίου είναι 16 μέτρα και με το Σύστημα προστασίας του βυθού (ώστε να μην δημιουργείται βουρκώδες έδαφος στο βυθό της θάλασσας) φτάνει τα 25 μέτρα σε διάμετρο. Στο πάνω μέρος το θεμέλιο είναι 8 μέτρα .Ο κεντρικός πυλώνας έχει διάμετρο 4,2 μέτρα και ύψους 3 μέτρα. (Τέτοιες ανεμογεννήτριες είναι τοποθετημένες 10 χλμ νότια της πόλης του Nysted και 13 χλμ. δυτικά της πόλης της Gedser).

### 3. Suction bucket



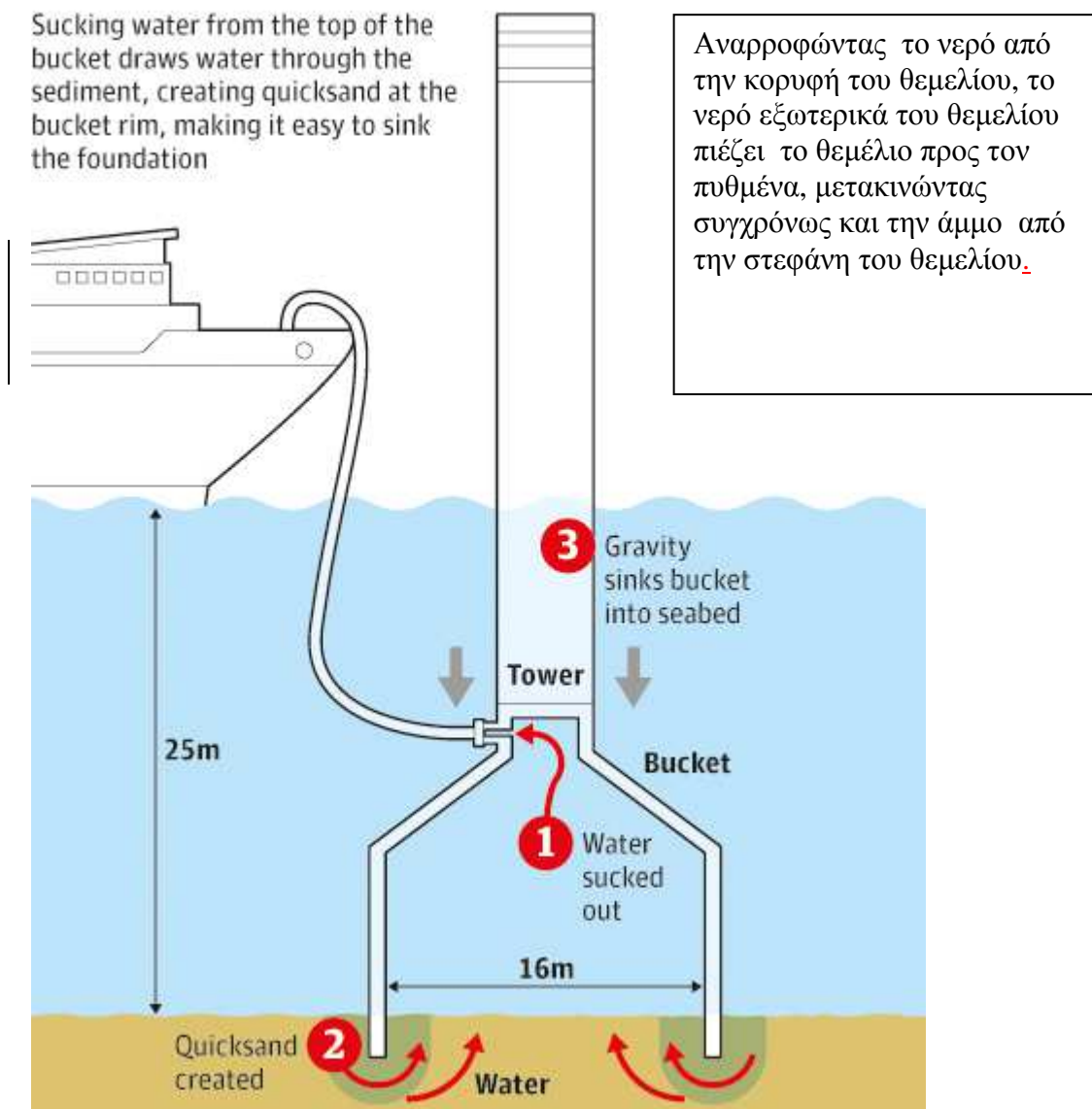
Εικόνα 3 .Θεμέλιο τύπου Suction bucket

Η τύπου Suction bucket ή suction caissons θεμελίωση είναι μια διάταξη κατασκευασμένη από χάλυβα. Είναι μια τεχνολογία θεμελίωσης παρακτίων ανεμογεννητριών η οποία είχε ως σκοπό να μειώσει το κόστος των ανεμογεννητριών στην ανοικτή θάλασσα καθώς είναι απλή στην κατασκευή της και στην τοποθέτηση της στο βυθό. Πλεονεκτεί έναντι των άλλων θεμελιώσεων καθώς δεν απαιτεί εξοπλισμό για την τοποθέτηση των πασσάλων στο βυθό αλλά μια αντλία για την αφαίρεση του νερού. Έτσι η εγκατάσταση της συγκεκριμένης θεμελίωσης απαιτεί λιγότερο χρόνο από τις υπόλοιπες μεθόδους με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος εγκατάστασης. Αποτελείται από ένα πυλώνα ο οποίος στηρίζεται σε μια εσωτερικά κενή βάση με μεγάλη διάμετρο, ανοικτή στο κάτω μέρος και κλειστή στην κορυφή. Εγκαθίσταται αρχικά στο βυθό με το ίδιο το βάρος του. Μοιάζει με αναποδογυρισμένο δοχείο. Είναι κενό από μέσα έτσι ώστε μετά την

τοποθέτηση του να αντλείται το νερό που βρίσκεται ενδιάμεσα στο βυθό και την βάση. Αναπτύσσεται έτσι διαφορετική πίεση εσωτερικά και εξωτερικά του θεμελίου, με αποτέλεσμα να ασκούνται στο θεμέλιο οι δυνάμεις που είναι απαραίτητες για να σταθεροποιηθεί στο βυθό.

### How the suction bucket works

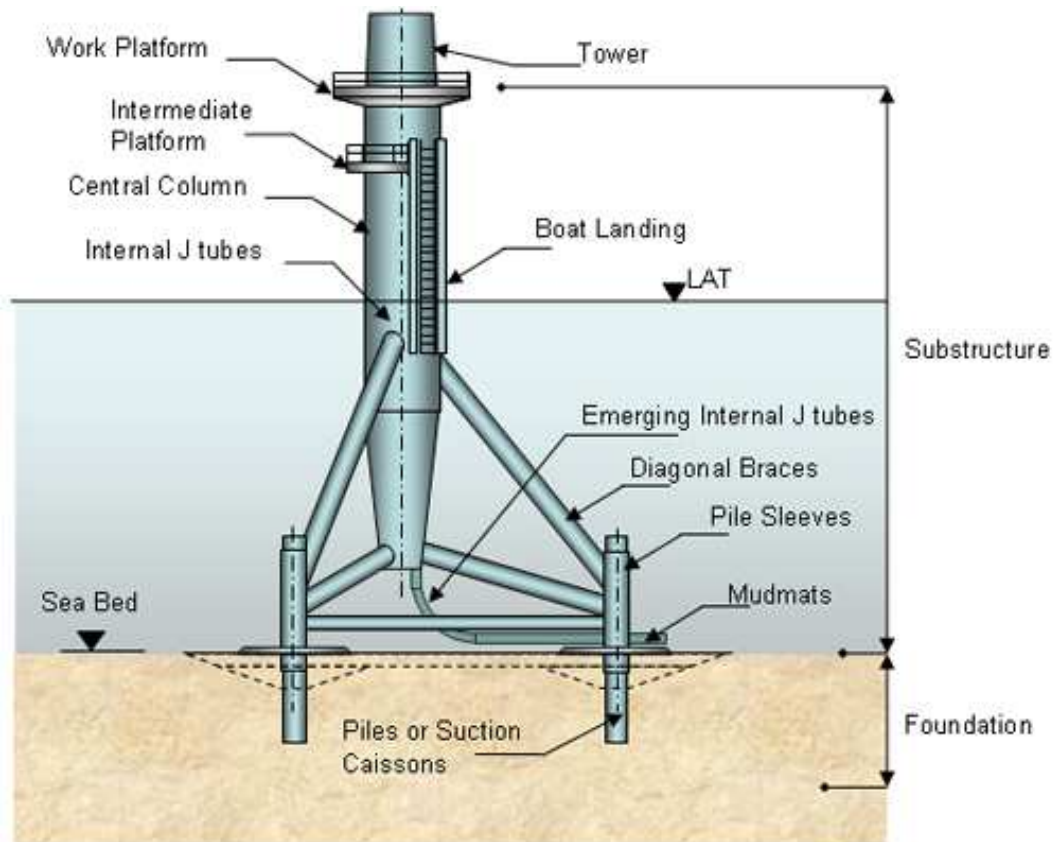
Sucking water from the top of the bucket draws water through the sediment, creating quicksand at the bucket rim, making it easy to sink the foundation



Εικόνα 4 .Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η τοποθέτηση της θεμελίωσης Suction bucket

Ο συγκεκριμένος τύπος θεμελίωσης δεν είναι συχνά χρησιμοποιούμενος. Ένα πρότυπο για ερευνητικούς σκοπούς που έχει χρησιμοποιηθεί έξω από το λιμάνι της πόλης Frederikshavn της Δανίας έχει τοποθετηθεί σε βάθος νερού 10 έως 20 μέτρα . Έχει διάμετρο θεμελίου 12 μέτρα και έχει βυθιστεί κάτω από τον βυθό 6 μέτρα . Το συνολικό ύψους του θεμελίου είναι 12,7 μέτρα ο πυλώνας που συνδέεται με τον πύργο έχει διάμετρο 4,190 μέτρα . Το βάρος του θεμελίου είναι 135 τόνους δηλαδή 100 τόνους ελαφρύτερο από την θεμελίωση τύπου monopile για την ίδια περιοχή. Στο θεμέλιο έχει τοποθετηθεί μια γεννήτρια ισχύς 3MW (Vestas V90).

## 4. Tripod



Εικόνα 5. Θεμέλιο τύπου Tripod

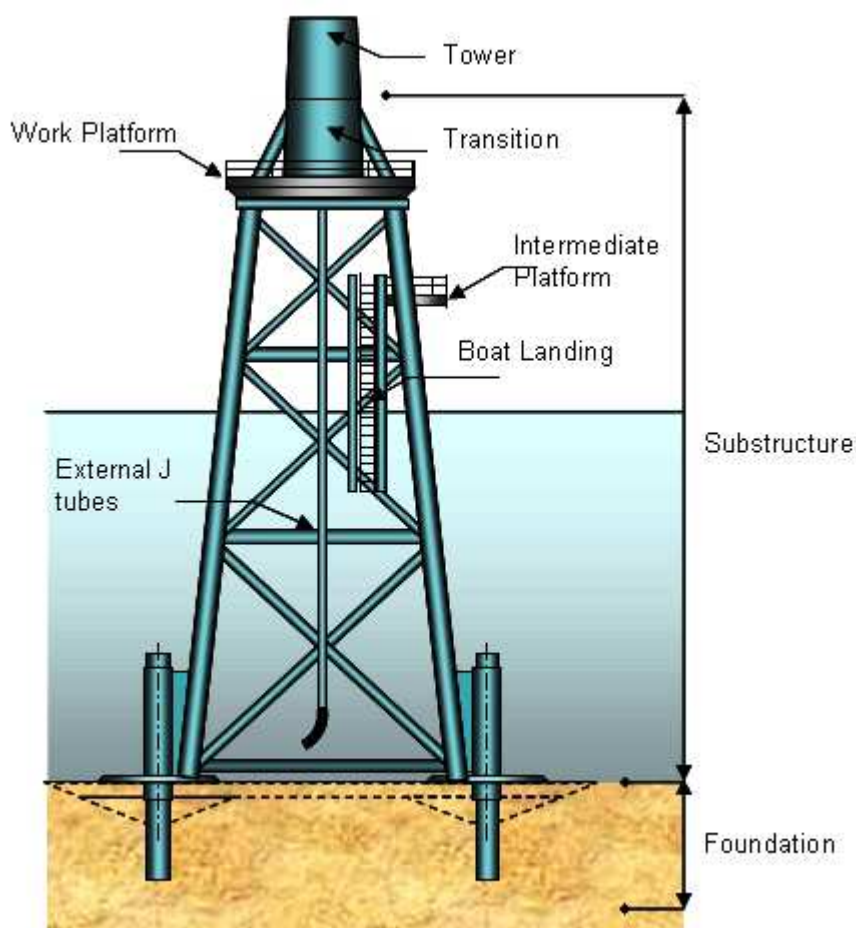
Η θεμελίωση τύπου tripod αποτελείται από:

- Πλατφόρμα εργασίας (work platform),
- Ενδιάμεση πλατφόρμα (intermediate platform),
- Κεντρικό πυλώνα (central column) για να στηριχθούν σε αυτόν τα πόδια
- Εσωτερικές σωλήνες (internal j tubes) από τις οποίους περνάνε τα ρευματοφόρα καλώδια,
- Πύργο (tower),
- Σκάλα αποβίβασης (boat landing),
- Αναδύομενες εσωτερικές σωλήνες (emerging internal j tubes) οι οποίες περικλείουν τα ρευματοφόρα καλώδια για αποφυγή βραχυκυκλώματος, διαγώνια στηρίγματα (diagonal braces) έτσι ώστε να παρέχουν μεγαλύτερη σταθερότητα και αντοχή στην βάση της ανεμογεννήτριας,
- Σωλήνες για τους πασσάλους (pile sleeves), από όπου περνάνε οι πάσσαλοι για να τοποθετηθούν στο βυθό και να σταθεροποιήσουν την βάση μαζί με την γεννήτρια,
- Κάλυμμα (mudmats) για την αποφυγή της μετακίνησης του βυθού,
- Πάσσαλοι (piles or suction caisson) για την σταθεροποίηση του θεμελίου στο βυθό.

Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου θεμελίωσης είναι ότι χρησιμοποιείται για μεγαλύτερα βάθη (25 έως 40 μέτρα νερού) και ότι οι δυνάμεις στην βάση μοιράζονται και στα τρία πόδια. Τα μειονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου θεμελίου είναι ότι είναι ακριβότερο στην κατασκευή και εγκατάσταση του. Μπορεί να σταθεροποιηθεί στον βυθό και με την μέθοδο Suction bucket. Αυτός ο συνδυασμός έχει πλεονέκτημα ότι μπορεί να αφαιρεθεί πιο εύκολα όταν χρειαστεί, και έχει φθηνότερη εγκατάσταση όμως μεγαλώνει το κόστος κατασκευής του.

Οι διαστάσεις της βάσης για γεννήτρια 5 MW και βάθος νερού 30 μέτρα είναι: Διάμετρος κεντρικού κυλινδρικού πυλώνα 7 μέτρα, διάμετρος διαγώνιων στηριγμάτων 3 μέτρα, διάμετρος οριζοντίων πυλώνων στήριξης 3 μέτρα, και συνολική διάμετρος θεμελίου είναι 12 μέτρα.

## 5.Jacket structure



Εικόνα 6. Θεμέλιο τύπου jacket structure

Η θεμελίωση τύπου jacket structure αποτελείται από:

- Πλατφόρμα εργασίας (work platform),
- εξωτερικές σωλήνες (external J tubes)

- σκάλα αποβίβασης (boat landing),
- ενδιάμεση πλατφόρμα (intermediate platform) και τον μεταβατικό πύργο (transition) όπου συνδέει τον πύργο συγκράτησης της γεννήτριας με την βάση,
- διαγώνια στηρίγματα (diagonal braces),
- κάλυμμα (mudmats) για την αποφυγή της μετακίνησης του βυθού,
- πάσσαλοι (piles of suction caisson).

Είναι όμοια με την tripod θεμελίωση όμως η jacket structure έχει τέσσερα πόδια, μπορεί να τοποθετηθεί σε μεγαλύτερο βάθος νερού (15 έως 80 μέτρα νερού) και είναι κατάλληλη για την θεμελίωση γεννητριών που παράγουν ισχύ μεγαλύτερη των 5MW. Οι διαστάσεις της θεμελίωσης τύπου jacket είναι: Διάμετρος των κύριων πυλώνων 1,2 μέτρα, διάμετρος των δοκών που τους στηρίζουν είναι 0,8 μέτρα και συνολική διάμετρος θεμελίου είναι 25 μέτρα.

### **Επιπλέουσες ή Πλωτές θεμελιώσεις**

Στην ανοικτή θάλασσα οι ανεμογεννήτριες παράγουν μεγαλύτερη ισχύ καθώς τα ρεύματα του αέρα είναι πιο δυνατά. Όμως το βάθος της θάλασσας, που ξεπερνάει τα 80 μέτρα, αποτρέπει την θεμελίωση για τους παραπάνω τύπους θεμελιώσεων. Γι' αυτό δημιουργήθηκαν τα πλωτά θεμέλια (Floating).

## **6. Sparc floating**

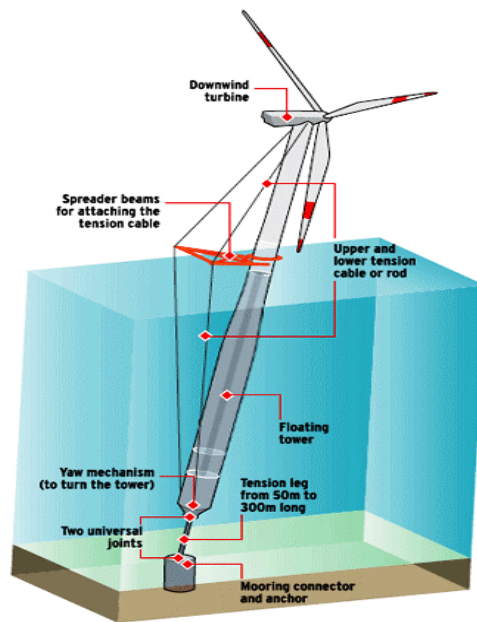
Η θεμελίωση τύπου sparc floating. Αποτελείται από:

- Διάταξη στήριξης των συρματόσκοινων που στηρίζουν τον πύργο σε αρθρωμένη βάση.
- Μηχανισμό προσανεμισμού του πύργου (yaw mechanism), για να μπορεί να περιστρέφει τον πύργο ανάλογα με την φορά του ανέμου.
- Δυο σφαιρικές αρθρώσεις συνδεδεμένες μεταξύ τους με μία δοκό προκειμένου να στηριχθεί ο πύργος στην άγκυρα.
- Συρματόσχοινα στήριξης του πύργου (πάνω και κάτω συρματόσχοινα από τη διάταξη στήριξης)
- Πλωτός πύργος.
- Αμφιαρθρωμένος δοκός έντασης (tension leg from 50 to 300m long). Το μήκος του εξαρτάται από το βάθος της θάλασσας δηλαδή το βάθος που έχει τοποθετηθεί η άγκυρα του πύργου. Ο αμφιαρθρωμένος δοκός έχει μήκος από 50 μέτρα έως 300 μέτρα
- Σύστημα έρματος και αγκύρωσης πυλώνα με το βυθό (mooring connector and anchor). Είναι για να σταθεροποιεί τον πυλώνα με την ανεμογεννήτρια στο σημείο που έγινε η θεμελίωση.



## FLOATING ASSETS

Sway's floating foundation that can tilt to reduce stress



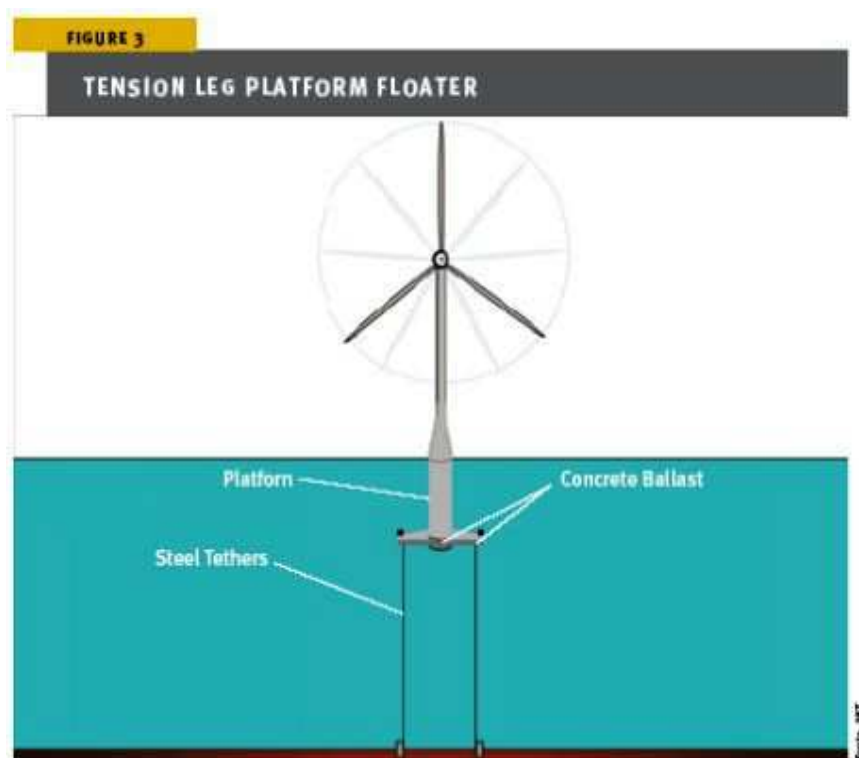
Εικόνα 7. Θεμέλιο τύπου sparac floating

Το σύστημα αυτό θεμελίωσης μπορεί να μετατοπίζεται ελαφρά ώστε να μειώνει την καταπόνηση του πυλώνα.

Ο συγκεκριμένος τύπος μπορεί να θεμελιωθεί σε μεγάλα βάθη που είναι και το ζητούμενο έτσι ώστε να έχουμε μεγαλύτερη ταχύτητα αέρα. Έχουν μελετηθεί θεμελιώσεις τέτοιου τύπου για γεννήτρια ισχύος έως 10MW. Οι διαστάσεις του συγκεκριμένου τύπου θεμελίου, για γεννήτρια ισχύος 5 MW είναι: μήκος κυλινδρικού τμήματος(πλωτός πύργος) που επιπλέει 120 μέτρα και έχει διάμετρο από 6,5 έως 9,4 μέτρα γιατί είναι κωνικό. Η διάμετρος του θεμελίου που βρίσκεται στο βυθό είναι 5,2 μέτρα και τα συρματόσχοινα που προσδένουν τον κυλινδρικό πλωτό πύργο με το θεμέλιο έχουν διάμετρο 0,09 μέτρα. Η συνολική μάζα του θεμελίου είναι 7.466 τόνους.



## 7. Tension leg platform



Εικόνα 8. Θεμελίωση τύπου tension leg platform

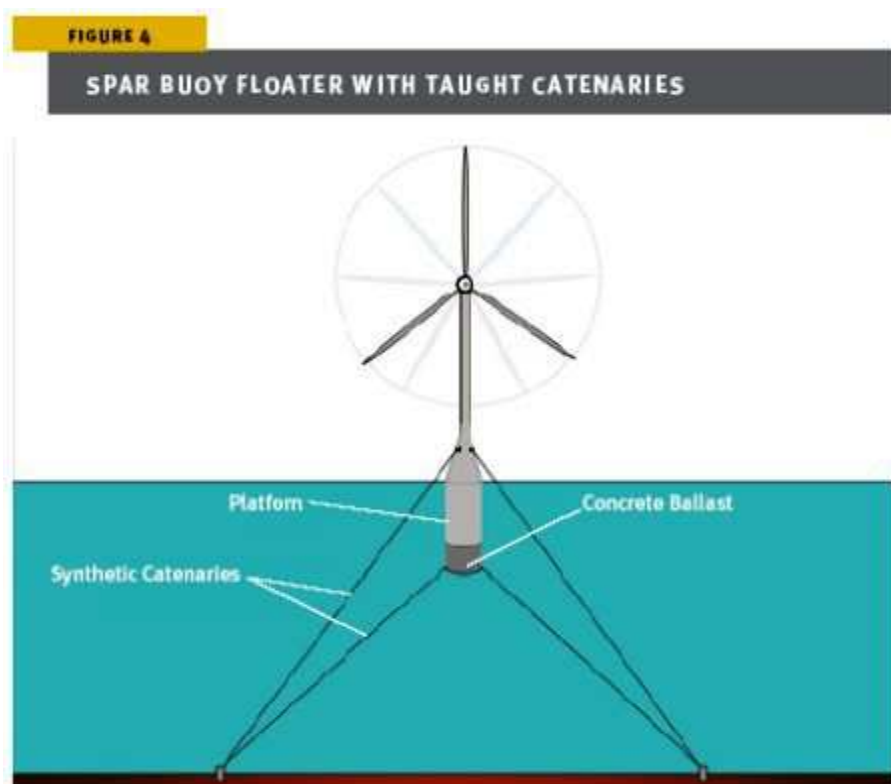
Η θεμελίωση τύπου tension leg platform είναι μια πλωτή κοίλη βάση όπου πάνω της τοποθετείται ο πυλώνας με τη γεννήτρια. Για να παραμείνει σταθερή στο σημείο τοποθέτησης της η πλατφόρμα, προενταμένα συρματόσχοινα συνδέουν την βάση της με άγκυρες στον πυθμένα της θάλασσας. Στον πυθμένα τα συρματόσχοινα σταθεροποιούνται με άγκυρες βαρύτητας από μπετόν ή μεταλλικά στοιχεία, έτσι ώστε να έχουν αρκετή μάζα και να μην μπορούν οι δυνάμεις από τα κύματα ή τον αέρα να παρασύρουν το θεμέλιο. Τα συρματόσχοινα φορτίζονται με προένταση ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος να ανατραπεί η ανεμογεννήτρια.

Τα πλεονεκτήματα της σε σχέση με τις θεμελιώσεις που δεν είναι πλωτές εκτός από το ότι μπορεί να θεμελιωθεί σε μεγαλύτερο βάθος της θάλασσας είναι ότι έχει και μικρότερο κόστος κατασκευής, θεμελίωσης και μεταφοράς στο σημείο θεμελίωσης, με αποτέλεσμα να μειώνεται το συνολικό κόστος της ανεμογεννήτριας.

Οι διαστάσεις του συγκεκριμένου τύπου θεμελίωσης για να στηρίξει μια γεννήτρια ισχύς 5 MW είναι: μήκος του κάθε έρματος από σκυρόδεμα (concrete ballast) 32,5 μέτρα, διάμετρος κάθε έρματος από σκυρόδεμα 4,5 μέτρα, και το πάχος του είναι 50 εκατοστά. Το ύψος του έρματος από σκυρόδεμα που ενώνεται με τον πύργο 20 μέτρα και η διάμετρος του είναι 4,5 μέτρα. Η συνολική μάζα του θεμελίου είναι 1338 τόνους, η μάζα του

θεμελίου που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια τις θάλασσας είναι 700 τόνους. Τα συρματοσχοίνα που συνδέουν τις άγκυρες με το θεμέλιο για να εμποδίζουν την μετακίνηση τις ανεμογεννήτρια σε μεγάλες αποστάσεις έχουν μάζα 21 τόνους και η διάμετρος τους είναι 0,167 μέτρα.

## 8. Spar buoy floater

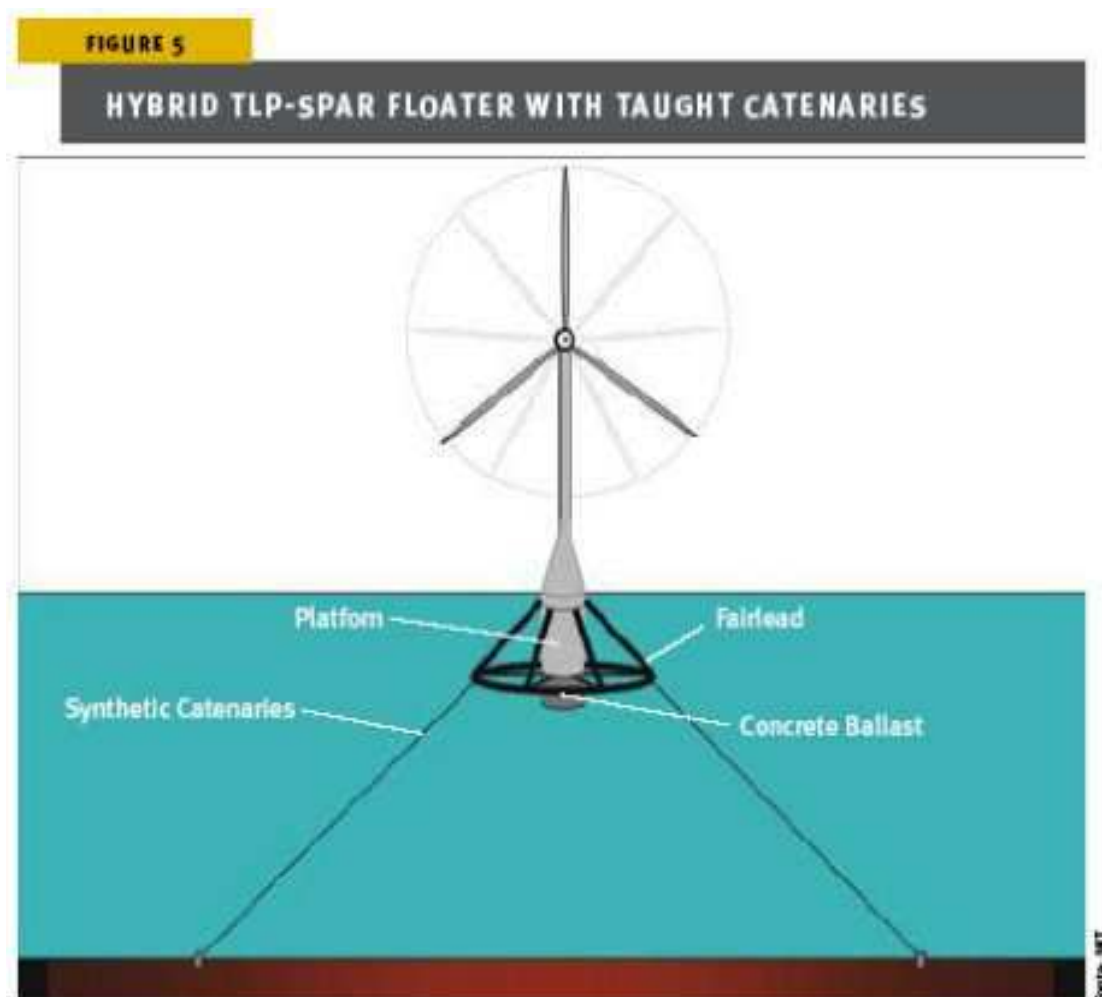


Εικόνα 9. Θεμελίωση τύπου spar buoy floater

Η θεμελίωση τύπου spar buoy floater αποτελείται από ένα κυλινδρικό κοίλο πυλώνα σημαντικά μεγαλύτερο σε διάμετρο από τον πυλώνα που στηρίζει την γεννήτρια, έτσι ώστε να δημιουργούνται οι κατάλληλες δυνάμεις της άνωσης και να παραμένει στη επιφάνεια η γεννήτρια. Βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού. Θεμελιώνεται στον πυθμένα με συρματοσχοίνα τα οποία είναι από χάλυβα ή άλλο συνθετικό υλικό και τα οποία σταθεροποιούνται στον βυθό της θάλασσας με άγκυρες. Αυτός ο τύπος θεμελίωσης μπορεί να υποστεί κλίση μερικών μοιρών από τις δυνάμεις που ασκούνται από τα κύματα και την δύναμη του αέρα, η οποία κλίση μπορεί να περιοριστεί με την διαμόρφωση των συρματοσχοίων. Είναι πιο οικονομική μέθοδος θεμελίωσης σε σχέση με την μέθοδο tension leg platform. Το πρώτο αιολικό πάρκο στην θάλασσα με πλωτές ανεμογεννήτριες θα κατασκευαστεί στην ανοικτή θάλασσα έξω από την Νορβηγία σε βάθος νερού περίπου 200 μέτρων και το ύψους του πύργου είναι 80 μέτρα. Οι διαστάσεις του συγκεκριμένου τύπου θεμελίου για γεννήτρια ισχύς 2,3 MW που θα προσδεθεί από τον βυθό με 3 συρματοσχοίνα, είναι: Μήκος κυλινδρικού θεμελίου που επιπλέει 100 μέτρα, διάμετρος κυλίνδρου που βρίσκεται πάνω

από την επιφάνεια του νερού 6 μέτρα, διάμετρος κυλίνδρου κάτω από την επιφάνεια του νερού 8,3 μέτρα, όγκος του θεμελίου είναι 5300 κυβικά μέτρα.

## 9. TLP-SPAR floater

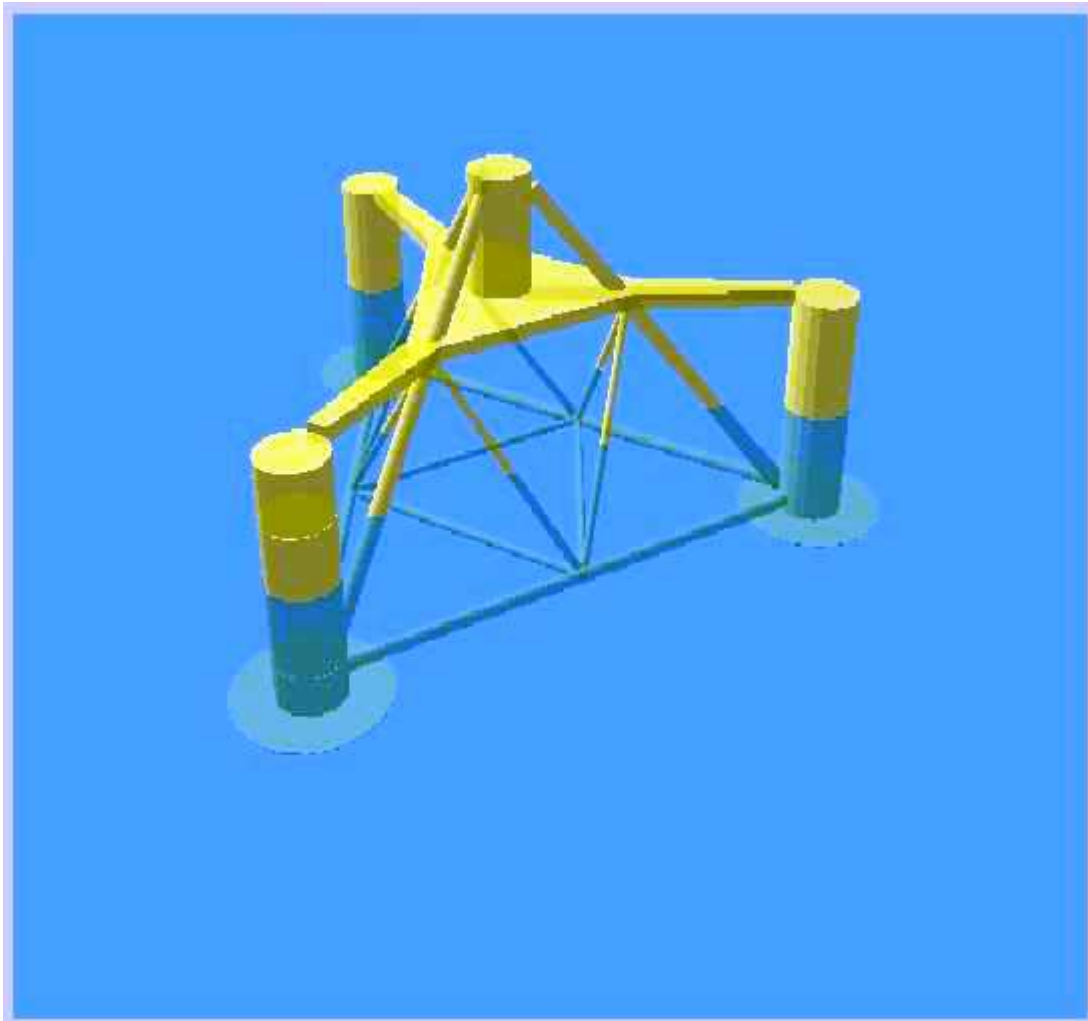


Εικόνα 10. Θεμελίωση τύπου hybrid TLP-SPAR floater

Η θεμελίωση τύπου hybrid TLP-SPAR floater είναι ένας συνδυασμός των πλεονεκτημάτων από τους τύπους θεμελίωσης tension leg platform και spar buoy floater. Αποτελείται από έναν κύλινδρο ο οποίος επιπλέει και σε αυτόν έχουν προσδεθεί πάνω του πλωτοί κύλινδροι (βαρελάκια) για να εμποδίζουν την γεννήτρια να υφίσταται μεγάλες κλίσεις από τα κύματα με αποτέλεσμα να μειώνουν τον κίνδυνο να βυθιστεί.

Οι διαστάσεις του συγκεκριμένου τύπου θεμελίου είναι: Διάμετρος κεντρικού κυλίνδρου 7,62 μέτρα, διάμετρος βοηθητικών κυλίνδρων 5,33 μέτρα και διάμετρος συρμάτων πρόσδεσης με το βυθό 1,67 μέτρα. Η συνολική μάζα του θεμελίου είναι 21.500 τόνοι.

## 10. Tri-floater

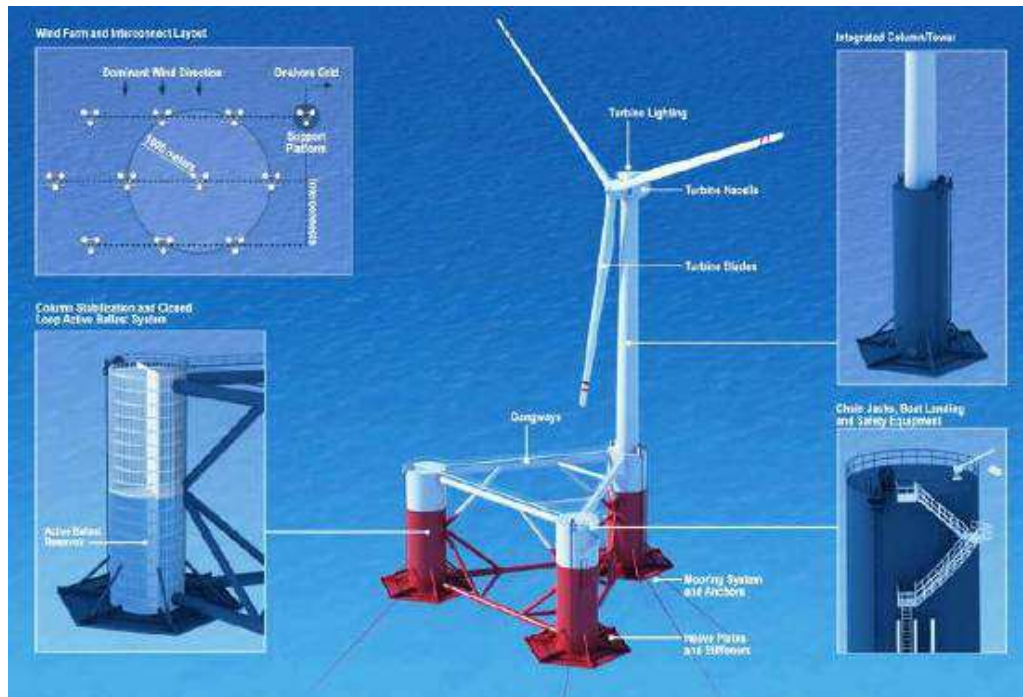


Εικόνα 11. Θεμελίωση τύπου tri-floater

Η θεμελίωση τύπου tri-floater αποτελείται από τρεις κοίλους κυλίνδρους που δημιουργούν συνθήκες άνωσης για να παραμένει η διάταξη στην επιφάνεια της θάλασσας. Οι κύλινδροι συνδέονται μεταξύ τους με χαλύβδινους δοκούς. Για να παραμείνει στο σημείο στο οποίο έχει τοποθετηθεί και να αποφεύγονται οι μεγάλες μετακινήσεις έχει στερεοποιηθεί στο βυθό με συρματόσχοινα που είναι δεμένα (στο βυθό).

Οι διαστάσεις του συγκεκριμένου τύπου θεμελίωσης για να τοποθετηθεί πάνω του μια γεννήτρια ισχύς 5 MW σε βάθος νερού 182,4 μέτρα, είναι : διάμετρος κάθε κυλίνδρου 8 μέτρα, ύψος κάθε κυλίνδρου 24 μέτρα και βυθίζεται στην θάλασσα 12 μέτρα. Οι κύλινδροι σχηματίζουν ένα ισόπλευρο τρίγωνο και απέχουν μεταξύ τους 68 μέτρα και παραμένουν ενωμένοι με δοκούς. Το βάρος του θεμελίου είναι 1300 τόνους. Στο βυθό σταθεροποιείται με 6 άγκυρες που συνδέονται με το θεμέλιο με 6 συρματόσχοινα που το κάθε ένα έχει διάμετρο 0,91 μέτρα.

## 11. Windwave float



Εικόνα 12. Θεμελίωση τύπου windwave float

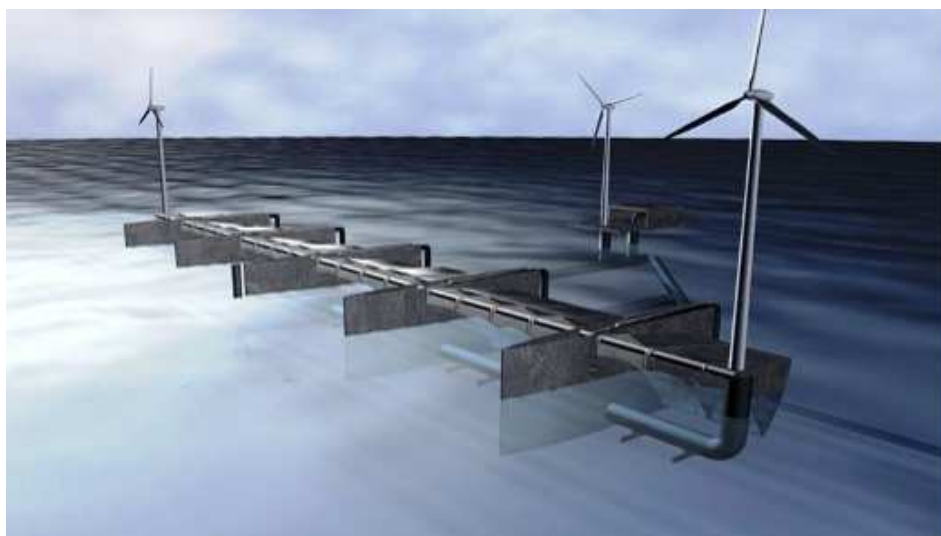
Η θεμελίωση τύπου windwave float είναι μια πλωτή εξέδρα με τρεις κυλίνδρους που συνδέονται μεταξύ τους με σιδερένιους σωλήνες (gangways) οι οποίοι επιτρέπουν στο νερό της θάλασσα να περνάει από τον ένα κύλινδρο στον άλλο. Είναι βυθισμένο μέχρι την μέση στην θάλασσα. Με αυτόν τον τρόπο το θεμέλιο είναι πάντα σε όρθια θέση καθώς γίνεται αντιστάθμιση στα έρμα. Η γεννήτρια είναι τοποθετημένη πάνω στον ένα κύλινδρο. Ο συγκεκριμένος τύπος θεμελίου έχει και μια άλλη ιδιαιτερότητα που είναι ότι η γεννήτρια μπορεί να γυρίσει και να είναι πάντα κάθετη στην διεύθυνση του ανέμου. Από τον βυθό δένεται με 6 αλυσοειδή σύρματα από τα οποία τα τέσσερα είναι για τον κύλινδρο που έχει τοποθετηθεί η γεννήτρια.

Μια άλλη καινοτομία που προσφέρει ο συγκεκριμένος τύπος θεμελίωσης είναι ότι κατά την αντιστάθμιση που γίνεται για να παραμένει σε ορθή θέση η γεννήτρια χρησιμοποιεί και την ενεργεία των κυμάτων και την μετατρέπει σε ηλεκτρική. Με αυτόν τον τρόπο ο συγκεκριμένος τύπος θεμελίωσης δεν είναι μόνο για την στήριξη της γεννήτριας αλλά μπορεί να παράγει και ισχύ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η θεμελίωση τύπου windwaves float είναι όμοιας λειτουργίας με την θεμελίωση τύπου windfloat με την διαφορά όμως πως η windwave float έχει ενεργό ρολό στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το 2009 η εταιρία «PRINCIPLE POWER» εξέλιξε το σχέδιο του θεμελίου έτσι ώστε να αξιοποιεί τα κύμματα σαν επιπλέον πηγή ενέργειας στην θάλασσα και να την μετατρέπει σε ηλεκτρική για να μειώσει το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Η windfloat είχε μικρότερο κόστος παραγωγής, ήταν απλούστερη στην σχεδίαση και ελαφρότερη από τις θεμελιώσεις που δεν είναι πλωτές και ήταν για βάθος νερού μεγαλύτερο των 50 μέτρων.

Οι διαστάσεις του συγκεκριμένου τύπου θεμελίωσης είναι : Διάμετρος κάθε κυλίνδρου 10 μέτρα και το ύψος του κάθε κυλίνδρου είναι 18 μέτρα. Το κέντρο του κάθε κυλίνδρου απέχει από το κέντρο του αλλού 46 μέτρα. Οι διαστάσεις έχουν σχεδιαστεί για να τοποθετηθεί γεννήτρια ισχύς 5 MW.

Ο συγκεκριμένος τρόπος θεμελίωσης είναι υπό διερεύνηση για το αν είναι οικονομικά αποδεκτός. Για το λόγο αυτό σε συνεργασία με τη SIEMENS (γεννήτριες 2,3 MW (V 80) με την εταιρία PRINCIPLE POWER η οποία ειδικεύεται στην παραγωγή ενέργειας από τα κύματα θα υλοποιήσει ένα αιολικό πάρκο κοντά στις ακτές της Πορτογαλίας. Το πάρκο με το συγκεκριμένο τύπο θεμελίωσης θα είναι για 12 μήνες υπό παρακολούθηση για το αν συμφέρει για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

## 12. Poseidon



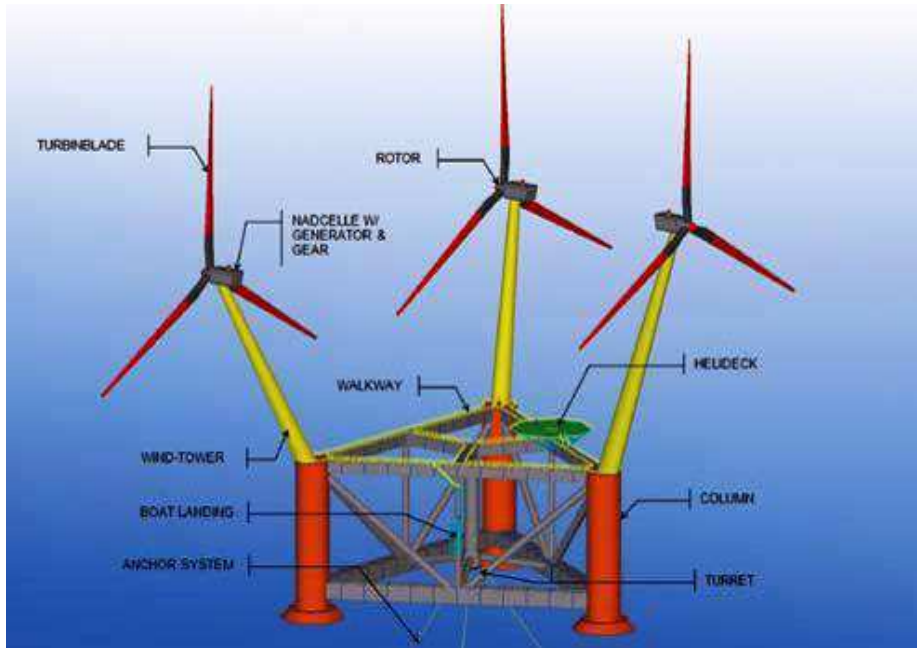
Εικόνα 13. Θεμελίωση τύπου Poseidon

Η θεμελίωση τύπου Poseidon έχει και αυτή ενεργό ρολό στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και αυτή εκμεταλλεύεται την ενέργεια των κυμάτων και την μετατρέπει σε ηλεκτρική. Ένα άλλο πλεονέκτημα του συγκεκριμένου θεμελίου είναι ότι μπορούν πάνω του να τοποθετηθούν μέχρι και τρεις γεννήτριες. Μπορεί να θεμελιωθεί σε βάθος νερού μεγαλύτερο από τα 30 μέτρα. Για να παραμείνει στο σημείο τοποθέτησης τις δένεται από τον βυθό με συρματόσκοινα.

Ένα παράδειγμα διαστάσεων τέτοιου θεμελίου είναι : πλάτος 37 μέτρα, μήκος 25 μέτρα, ύψους 6 μέτρα και το βάρος του είναι 350 τόνους. Οι διαστάσεις αυτές είναι για να τοποθετηθούν πάνω στο θεμέλιο τρεις γεννήτριες ισχύς 1,5 MW ή δυο γεννήτριες ισχύς 2 MW ή μια γεννήτρια ισχύς 5 MW. Ο συγκεκριμένος τύπος θεμελίωσης χρησιμοποιήθηκε στο Nakskon της Δανία, έξω από το λιμάνι το Σεπτέμβριο του 2008 για να δοκιμαστεί η αξιοπιστία του και αν συμφέρει οικονομικά η χρήση του συγκεκριμένου τρόπου θεμελίωσης.



### 13. Windsea



Εικόνα 14. Θεμελίωση τύπου windsea

Η θεμελίωση τύπου windsea αποτελείται από τρία κυλινδρικά τμήματα τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με χαλύβδινους σωλήνες έτσι ώστε να αντέχουν τις τάσεις που αναπτύσσονται από τις γεννήτριες και το θαλάσσιο περιβάλλον. Είναι και αυτός ο τύπος θεμελίωσης πλωτός. Έχει σχεδιαστεί για βάθος νερού από 40 μέτρα και άνω, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους τύπους πλωτών ανεμογεννητριών που απαιτείται συνήθως βάθος νερού τουλάχιστον 110 μέτρα.

Από τον βυθό συγκρατείται με 6 συρματόσκοινα. Έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να περιστρέφεται και οι γεννήτριες να έρχονται πάντα σε κάθετη θέση στην ροή του ανέμου. Αυτό που διαφοροποιεί τον συγκεκριμένο τύπο θεμελίωσης από τους υπολοίπους τρόπους θεμελίωσης είναι ότι μπορούν πάνω του να τοποθετηθούν τρεις γεννήτριες. Έχει σχήμα τριγώνου και η γεννήτριες απέχουν μεταξύ τους 103 μέτρα και οι κύλινδροι απέχουν μεταξύ τους 75 μέτρα. Το ύψος του κάθε κυλινδρικού τμήματος είναι 50 μέτρα και είναι βυθισμένο κατά 23 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας καθώς είναι ημι-υποβρύχια πλατφόρμα. Η διάμετρος του κάθε κυλίνδρου είναι 9 μέτρα και το βάρος του είναι 9200 τόνους. Οι διαστάσεις είναι για γεννήτριες ισχύς 3,6 MW η κάθε μια αν και μπορούν να τοποθετηθούν πάνω στο θεμέλιο και γεννήτριες ισχύος έως και 10 MW όταν αυτές θα είναι διαθέσιμες στην αγορά. Ο συγκεκριμένος τύπος θεμελίωσης δεν έχει χρησιμοποιηθεί στην ανοικτή θάλασσα.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΝΤΑΙ ΣΤΑ ΘΕΜΕΛΙΑ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΚΑΙ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.**

Ο υπολογισμός των φορτιών που δέχονται οι εγκαταστάσεις των ανεμογεννητριών στη θάλασσα είναι ένα από τα βασικά προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Οι φορτίσεις αυτές είναι :

- Κατακόρυφες φορτίσεις οι οποίες έχουν μικρή επίδραση στα θεμέλια και
- Οριζόντιες οι οποίες καταπονούν περισσότερο τα θεμέλια.

Οι Φορτίσεις που εφαρμόζονται στις ανεμογεννήτριες που εγκαθίστανται στη θάλασσα επίσης μπορούν να χωριστούν σε:

- Μόνιμες φορτίσεις
- Μεταβλητές φορτίσεις
- Φορτίσεις που προέρχονται από το περιβάλλον που έχουν θεμελιωθεί οι ανεμογεννήτριες.

Οι μόνιμες φορτίσεις οφείλονται στην μάζα της ανεμογεννήτριας, του πύργου και του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την λειτουργία ,συντήρηση και την επίβλεψη της γεννήτριας. Οι μόνιμες φορτίσεις προκαλούν την μικρότερη καταπόνηση του θεμελίου καθώς είναι εύκολα υπολογίσιμες και συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς αντοχής του. Οι φορτίσεις αυτές είναι άμεσα συνδεδεμένες με την ισχύ της ανεμογεννήτριας καθώς από αυτήν εξαρτάται και το μέγεθος και η μάζα της. Για παράδειγμα τα μεγέθη για μια γεννήτρια ονομαστικής ισχύος 5 MW είναι: Μάζα πύργου 347 τόνοι , μάζα νασέλλας 240 τόνοι και μάζα στροφείου 110 τόνοι.

Οι μεταβλητές φορτίσεις διαφέρουν σε μέγεθος, φορά καθώς και στο σημείο εφαρμογής κατά την διάρκεια της φόρτισης. Οι μεταβλητές φορτίσεις αναπτύσσονται κυρίως κατά την μεταφορά, την εγκατάσταση, την συντήρηση και την λειτουργία της ανεμογεννήτριας αφού τα θεμέλια καταπονούνται κατά την περιστροφική κίνηση της φτερωτής σε κανονική λειτουργία αλλά και από το σύστημα πέδησης που υπάρχει στην άτρακτο της γεννήτριας. Μεταβλητές φορτίσεις επίσης αναπτύσσονται κατά την ανέλκυση των επιμέρους εξαρτημάτων, την συναρμολόγηση τους και την προσέγγιση των πλοίων. Αυτές οι φορτίσεις είναι πιο δύσκολα υπολογίσιμες από τις σταθερές φορτίσεις.

Οι φορτίσεις που προέρχονται από το περιβάλλον είναι φορτίσεις που προκαλούνται στο θεμέλιο από τα κύματα, τον πάγο, τον άνεμο, τα θαλάσσια ρεύματα, τους σεισμούς και είναι ανάλογα με το κλίμα που επικρατεί στην περιοχή που έχει επιλεγεί να γίνει το αιολικό πάρκο. Τα φορτία αυτά διαφέρουν ανάλογα με την χρονική περίοδο που επικρατεί στην περιοχή. Τα φορτία που προέρχονται από το περιβάλλον είναι αυτά τα οποία επηρεάζουν το θεμέλιο και διαφέρουν σε φορά και κατεύθυνση κάθε χρονική στιγμή. Είναι από τα φορτία που είναι πιο δύσκολα να υπολογιστούν και να προβλεφθούν κατά το σχεδιασμό παρόλο που για να εκπονηθεί μια τέτοια μελέτη πρέπει να υπάρχουν μετρήσεις των καιρικών συνθηκών που



επικρατούν στην περιοχή για τουλάχιστον ένα χρόνο. Για τη μελέτη που παρουσιάζουμε παρακάτω αναζητήθηκαν στη βιβλιογραφία στοιχεία από μετρήσεις περιβαλλοντικών συνθηκών και παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 1.

Συχνότητα: 1φορά στα 50 χρόνια	Βόρεια Θάλασσα	Βαλτική Θάλασσα	Ακτογραμμή Ηνωμένο Βασίλειο	ΗΠΑ Ανατολική Ακτή	Κόλπος του Μεξικό	ΗΠΑ Δυτική Ακτή
Μέση ακραία ταχύτητα ανέμου (10 λεπτά) m/s	50	54,5	38~46	46	45	33
Ριπή ανέμου (5 δευτερόλεπτα) m/s	60	65	46~55	55	54	40
Μέγιστο ύψους κύματος (m)	22,3	5	8~12	24,2	19,9	17
Περίοδος κύματος (sec)	14,5	13	14	13,7~14,5	13	15~17
Ταχύτητα ρευμάτων Παλίρροιας στην επιφάνεια του θεμελίου (m/s)	1,71	1,7	3	2,06	1,03	1
Ταχύτητα κυμάτων από ανεμοθύελλα (m/s)	0,43	0,3	0,7	0,5	0,25	0,25

Πίνακας 1. Φορτίσεις που προέρχονται από τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα σε περιοχές όπου έχουν εγκατασταθεί αιολικά πάρκα.

Πριν την εγκατάσταση δημιουργείται ένα μοντέλο υπό κλίμακα και προσομοιώνονται οι συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή εγκατάστασης του αιολικού πάρκου ώστε να ελέγξουν τις αντοχές του θεμελίου και αν έχουν τις σωστές αντοχές τα υλικά τα οποία έχουν επιλεγεί για τις δυνάμεις που ασκούνται πάνω τους.

Τα φορτία προκαλούν διαφορετικές καταπονήσεις σε σταθερές θεμελιώσεις και σε πλωτές και γ'αυτό υπολογίζονται και με διαφορετικούς μεθόδους.

## Φορτία σε σταθερές θαλάσσιες θεμελιώσεις

Για τις σταθερές θαλάσσιες θεμελιώσεις οι τύποι υπολογισμού των φορτίσεων είναι:

### Δύναμη που ασκείται στον ρότορα από τον άνεμο

$$F_w = (\gamma/2g) C_T A V^2$$

Όπου:  $F_w$ = φορτίο ανέμου σε Newton (N)

$\gamma$  = ειδικό βάρος αέρα σε (N/m<sup>3</sup>)

$g$ = επιτάχυνση της βαρύτητας σε (m/s<sup>2</sup>)

$C_T$ = συντελεστής ώσης

$A$ = εμβαδόν ρότορα σε (m<sup>2</sup>)

$V$ = ταχύτητα ανέμου σε (m/s)

Ο συντελεστής ώσης  $C_T$  μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο

$$C_T = 7 / V_{hub}$$

Όπου  $V_{hub}$  είναι η ταχύτητα του ανέμου στο κέντρο του ρότορα

Στην μελέτη που παρουσιάζεται παρακάτω ο συντελεστής ώσης λήφθηκε από μετρήσεις για την ανεμογεννήτρια που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

### Δυνάμεις που ασκούνται από τα κύματα

Οι δυνάμεις από τα κύματα που ασκούνται στο θεμέλιο μπορούν να υπολογιστούν από τον τύπο:

$$F = F_D + F_I \quad (\text{σε N/m})$$

$F$ = Υδροδυναμική δύναμη ανά μονάδα μήκους του πυλώνα που δέχεται κάθετα την δύναμη του κύματος σε (N/m).

$F_D$ = Δύναμη που εξασκείται από τα κύματα ανά μονάδα μήκους σε (N/m).

$F_I$ = Δύναμη αδράνειας ανά μονάδα μήκους σε (N/m).

$F_D$ = Η δύναμη που ασκείται από τα κύματα δίνεται από τον τύπο:

$$F_D = (\gamma/2g) D C_D u_n |u_n|$$

Όπου

$\gamma$  = ειδικό βάρος νερού σε (N/m<sup>3</sup>)

$g$ = επιτάχυνση της βαρύτητας σε (m/s<sup>2</sup>)

$D$ = Πλάτος τμήματος που είναι κάθετο στην ροή του κύματος. Στα κυλινδρικά τμήματα θεωρείται η διάμετρος του, σε ( m)

$C_D$ = συντελεστής οπισθέλκουσας.

$u_n$ = Ταχύτητα του ρευστού σε (m/s).

$|u_n|$ = Απόλυτη τιμή της ταχύτητας του ρευστού σε (m/s).

Η δύναμη αδράνειας  $F_I$  δίνεται από τον τύπο

$$F_I = (\gamma/g) (\pi D^2/4) C_M a_n$$

$C_M$ = Συντελεστής αδρανείας της εκτοπιζόμενης μάζας του υγρού ανά μονάδα μήκους.

$a_n$ = Επιτάχυνση του υγρού που προσκρούει κάθετα στον πυλώνα σε (m/s<sup>2</sup>)

$C_m$  = Συντελεστής προστιθέμενης μάζας.  
 Ο όρος  $\pi D^2/4$  συμβολίζει την κυλινδρική διατομή του πυλώνα και μπορεί να διαφοροποιηθεί όταν πρόκειται για θεμελίωση με διαφορετική διατομή.

Για τα τμήματα του θεμελίου που δεν είναι κάθετα στην διεύθυνση του κύματος η εξίσωση γίνεται:

$$F_D = (\gamma / 2g) D C_D (u_n - \bar{u}_n) |u_n - \bar{u}_n|$$

$$F_I = (\gamma / g) (\pi D^2 / 4) a_n + (\rho / g) (\pi D^2 / 4) C_m (a_n - \bar{a}_n)$$

$\bar{u}_n$  είναι η η συνισταμένη τιμή της ταχύτητας του κύματος σε (m/s)

$\bar{a}_n$  είναι η συνισταμένη τιμή της επιτάχυνσης του κύματος σε (m/s<sup>2</sup>)

### Φορτία από τα υποθαλάσσια ρεύματα.

Τα φορτία από τα υποθαλάσσια ρεύματα τα οποία ασκούνται στον θεμέλιο από την περιοχή τοποθέτησης της ανεμογεννήτριας πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά κατά την προσομοίωση του μοντέλου. Για τον υπολογισμό της άνωσης που προκαλείται από το θαλασσινό νερό και τον υπολογισμό της οπισθέλκουσας φόρτισης χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τύποι

$$F_L = (\gamma / 2g) A C_L U^2$$

$$F_D = (\gamma / 2g) A C_D U^2$$

Όπου :

$F_L$  = Συνολική δύναμη που ασκείται στο θεμέλιο από την άνωση ανά μονάδα μήκους σε (N/m)

$F_D$  = Συνολική δύναμη οπισθέλκουσας ανά μονάδα μήκους σε (N/m)

$\gamma$  = ειδικό βάρος νερού σε (N/m<sup>3</sup>)

$g$  = Επιτάχυνση της βαρύτητας, σε (m/s<sup>2</sup>)

$A$  = Επιφάνεια που είναι κάθετη στην διεύθυνση της φόρτισης σε (m<sup>2</sup>/m)

$C_L$  = συντελεστής άνωσης

$C_D$  = συντελεστής αντίστασης

$U$  = ταχύτητα ρευμάτων στην περιοχή σε (m/s<sup>2</sup>)

Σε τοποθεσίες όπου υπάρχει συσσώρευση πάγου και χιονιού δημιουργείται μια φαινομενική αύξηση βάρους, διαφοροποιείται η γεωμετρία των μερών της ανεμογεννήτριας, περιστρεφόμενων και μη, προκαλείται αλλαγή της τραχύτητας με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η αεροδυναμική φόρτιση, καθώς και η υδροδυναμική φόρτιση με αποτέλεσμα να διαφοροποιούνται τα φορτία που ασκούνται στην ανεμογεννήτρια.

Όταν τα αιολικά πάρκα θεμελιώνονται σε θαλάσσιες διόδους πρέπει να ληφθούν κατά το σχεδιασμό οι φορτίσεις από την διέλευση πλοίων καθώς προκαλούνται μεταβολές στην μάζα πρόσκρουσης του νερού, μεταβολή της πίεσης του νερού, της ταχύτητας καθώς και της συχνότητας των κυμάτων που προσκρούουν στο θεμέλιο.

Κατά την θεμελίωση εξετάζονται τα σεισμικά δεδομένα της περιοχής καθώς από ένα σεισμό προκαλούνται εδαφικές κινήσεις και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να προκαλούνται επιπλέον φορτίσεις.

## **Φορτία σε πλωτές θαλάσσιες θεμελιώσεις**

Στις **πλωτού τύπου θεμελιώσεις** κατά τον σχεδιασμό είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψιν, εκτός όλων των παραπάνω και η εξίσωση κίνησης του θεμελίου . Είναι μια μη γραμμική εξίσωση και δίνεται από τον τύπο:

$$M_{ij}(q,u,t)\ddot{q}_j = f_i(q,\dot{q},u,t)$$

Όπου:

$M_{ij}$  είναι η μάζα αδράνειας η οποία εξαρτάται γραμμικά από τους βαθμούς ελευθερίας του θεμελίου  $q$ , την ταχύτητα του ρότορα  $u$ , και τον χρόνο  $t$ .

$\ddot{q}_j$  είναι η δεύτερη παράγωγος του βαθμού ελευθερίας.

$f_i$  είναι η συνισταμένη της εξαναγκασμένης κίνησης που εξαρτάται από τον βαθμό ελευθερίας  $q$ , την πρώτη παράγωγο του βαθμού ελευθερίας  $\dot{q}$ , την ταχύτητα του ρότορα  $u$ , και τον χρόνο  $t$ .

## **Περιγραφή θεμελίου, τοποθεσίας και ανεμογεννήτριας**

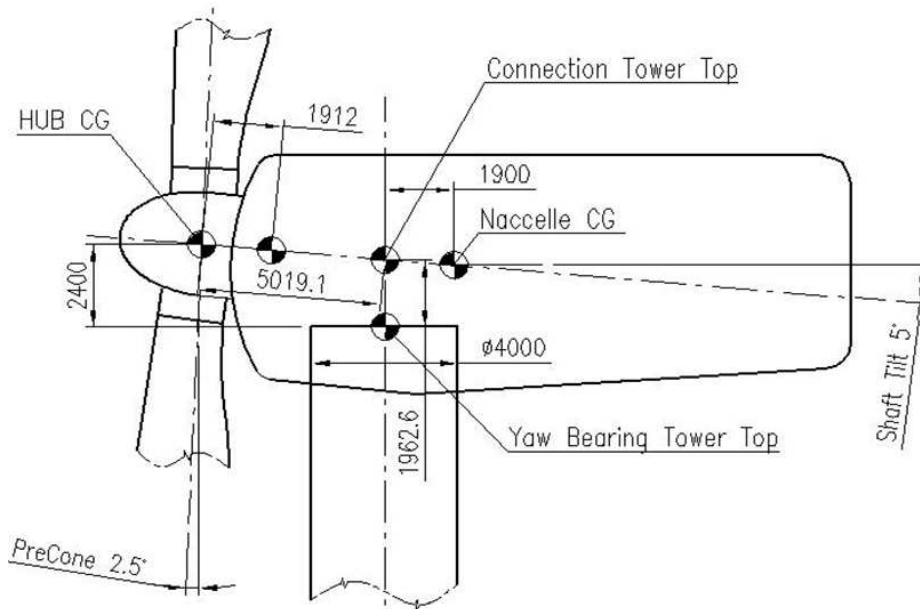
Στα πλαίσια αυτής εργασίας, όπως φαίνεται παρακάτω έγινε ο υπολογισμός ενός θεμελίου πλωτής ανεμογεννήτριας. Ο τύπος αυτός της θεμελίωσης επιλέχτηκε γιατί στο περιβάλλον της χώρας μας αλλά και γενικότερα στη Μεσόγειο θάλασσα, τα βάθη είναι σημαντικά και ο τύπος αυτός της θεμελίωσης ταιριάζει καλύτερα.

Για τον υπολογισμό των φορτίων στη θεμελίωση αυτή έγινε ανάλυση του θεμελίου με πεπερασμένα στοιχεία στο πρόγραμμα Solidworks.

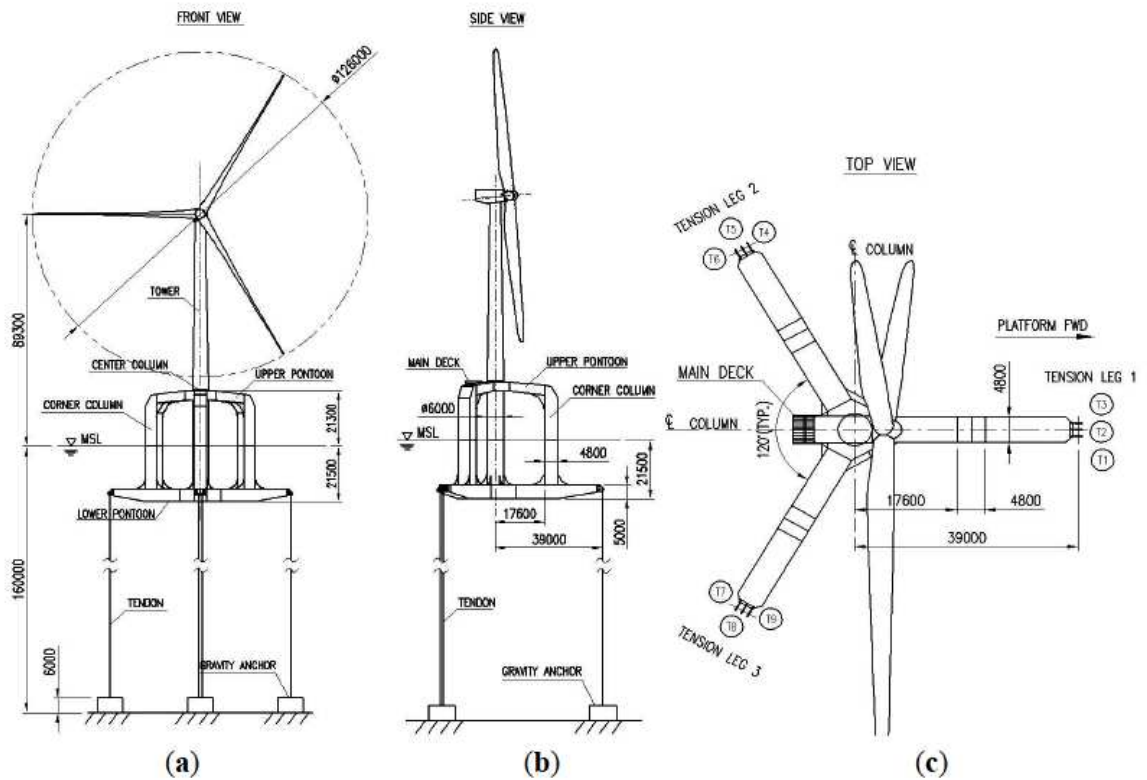
Η επιλογή του τύπου του θεμελίου καθώς και η περιοχή για την εγκατάσταση του θεμελίου επιλέχτηκαν με επιπρόσθετα κριτήρια όπως πχ ότι στην περιοχή αυτή πρόκειται να εγκατασταθεί αιολικό πάρκο και υπήρχαν στοιχεία για τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν. Η ανεμογεννήτρια που πρόκειται να εγκατασταθεί και επιλέχθηκε για να μελετηθεί είναι η Repower 5M.



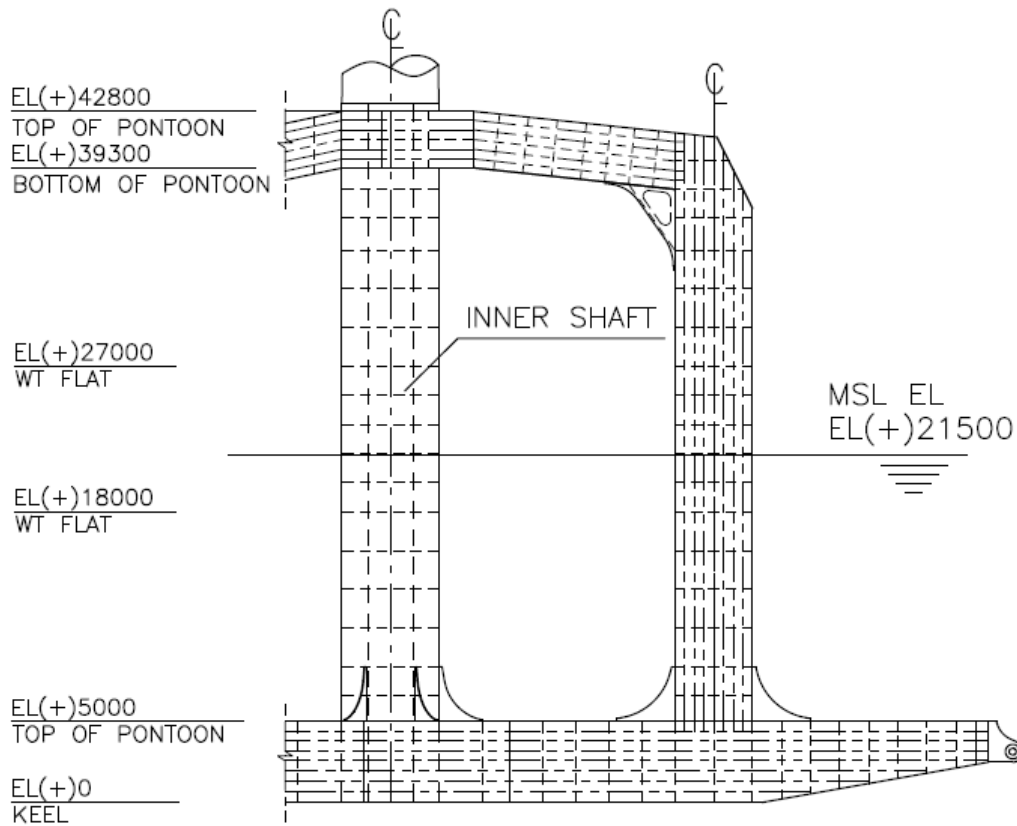
Εικόνα 15. Ανεμογεννήτρια Repower 5M.



Εικόνα 16. Διαστάσεις νασέλας και ρότορα ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 17. Διαστάσεις πύλωνα και θεμελίωσης τύπου TPL της εταιρίας WindStar.



Εικόνα 18. Βάση θεμελίου τύπου TPL της εταιρίας WindStar.

## Παράμετροι που λήφθηκαν υπόψιν κατά τον σχεδιασμό

Για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια της πλωτής ανεμογεννήτριας (tension leg platform: TLP) έχουν ληφθεί οι ακόλουθες παράμετροι:

α) Θα πρέπει να αντέχει τις δυνάμεις και το βάρος μια ανεμογεννήτριας ισχύος 5-MW

β) Θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι η συχνότητα περιστροφής δεν συμπίπτει με την ιδιοσυχνότητα του συστήματος.

γ) Θα πρέπει να προσφέρει επαρκή ακαμψία στην ανεμογεννήτρια για να αντέχει σε δυναμικές καταπονήσεις κατά τη λειτουργία.

δ) Θα πρέπει κατά τον σχεδιασμό να ληφθεί υπόψη ότι θα λειτουργεί για 20 χρόνια τουλάχιστον και να αντέχει τις ριπές ανέμου και τις καταπονήσεις από τα κύματα.

ε) Η γωνία κλίσης του δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 5 ° είτε κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας είτε στις ακραίες συνθήκες.

στ) Οι δυνάμεις από την έκταση των συρματόσκοινων πρέπει να έχουν πάντα θετική φορά, με επαρκή περιθώρια ασφαλείας. Ο συντελεστής ασφαλείας δεν θα πρέπει να έχει τιμή μικρότερη του 3.

ζ) Θα πρέπει να επιτρέπεται η επαρκής πρόσβαση για συντήρηση.

## Τοποθεσία και Περιβαλλοντικές Συνθήκες

Για τον κατάλληλο σχεδιασμό ενός θεμελίου ανεμογεννήτριας είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την ακριβή θέση θεμελίωσης.

Για το συγκεκριμένο θεμέλιο η θέση όπου έχει γίνει μελέτη είναι 61°20' N γεωγραφικό πλάτος και 0°0' E γεωγραφικό μήκος. Είναι κοντά στα νησιά Σέτλαντ στα βορειοανατολικά της Σκωτίας.

### Βάθος νερού.

Το βάθος του νερού στο χώρο εγκατάστασης θεωρείται ότι είναι 160 m από τη στάθμη της θάλασσας.

### Συνθήκες που επικρατούν στην θάλασσα.

Τα δεδομένα για την στάθμη του νερού στην συγκεκριμένη θέση έχουν ληφθεί από την ιστοσελίδα IJmuiden και περιλαμβάνουν μετρήσεις 22 ετών για ακραίες καιρικές συνθήκες.

Υψηλότερη στάθμη του νερού: +2.4 m

Η μέση στάθμη της θάλασσας: 0 m

Χαμηλότερη στάθμη του νερού: -2.1 m

### Ρεύματα

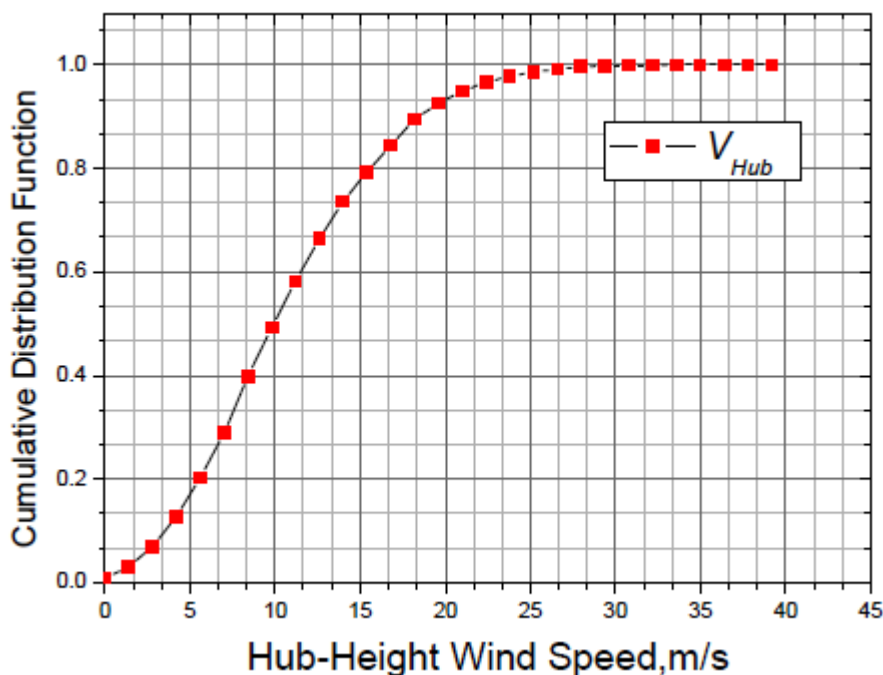
Οι τιμές των ρευμάτων λαμβάνονται από την μελέτη NoordzeeWind OWEZ βρίσκεται κοντά στην επιλεγμένη τοποθεσία. Για μέση τιμή της ταχύτητας των ρευμάτων έχει εκτιμηθεί ότι είναι 0,6 m / s και ακραία τιμή έχει θεωρηθεί 1.2 m/s

### Παράμετροι από τον άνεμο και τα κύματα.

Τα δεδομένα για την μέση ταχύτητα του ανέμου  $V$ , το ύψους του κύματος  $H_s$ , και τη συχνότητα πρόσκρουσης του κύματος  $T_p$ , προέρχονται από 37992 δείγματα μετρήσεων σε 13 χρόνων δεδομένων για τις καιρικές συνθήκες της περιοχής.

Για περίοδο 1 έτους μετρήθηκε πως το μέσο ύψος του κύματος που επηρεάζει το θεμέλιο είναι  $H_{s1}=10,8$  m και περίοδο  $(15.5 \text{ s} < TP < 19.7 \text{ s})$  και η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου στην πλήμνη  $V_1=40$  m/s

Για περίοδο 50 ετών μετρήθηκε ότι  $H_{s50}=13.8$  m και περίοδο  $(18.5 \text{ s} < TP < 19.9 \text{ s})$ , η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου στην πλήμνη  $V_{50}=50$  m/s, και η μέση ταχύτητα ανέμου είναι  $V=11.4$  m/s.



Εικόνα 19. Αθροιστική κατανομή πιθανότητας πνοής του ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης.

## ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΔΕΣΗΣ

Το σύστημα πρόσδεσης αποτελείται από τρία συρματόσκοινα από πολυεστέρα που το κάθε ένα έχει βάρος 650 τόνους. Η διάμετρος του κάθε συρματόσκοινου είναι 239mm και μπορούν να αντέξουν φορτίο 1967 τόνους.

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΥΣΙΚΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η φυσική συχνότητα του συστήματος έχει πολύ μεγάλη σημασία για την απόδοση της ανεμογεννήτριας και ειδικότερα του τύπου θεμελίωσης TLP: tension leg platform. Πρέπει να αποφευχθεί ο συντονισμός της φυσικής συχνότητας του συστήματος με την συχνότητα που δημιουργείται κατά την περιστροφή του ρότορα. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής δεν έγινε ιδιομορφική ανάλυση. Στο εργαστήριο NREL στην Αμερική μετρήσε τις συχνότητες του συστήματος αυτού και τα αποτελέσματα είναι. Η ταχύτητα



περιστροφής έναρξης λειτουργίας και ονομαστική είναι 6,9 και 12,1 rpm, αντίστοιχα και άρα η κύριες ιδιοσυχνότητες του ρότορα κυμαίνονται από 0,115 μέχρι 0,202 Hz. Οι ιδιοσυχνότητες του θεμελίου και του πυλώνα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, όπου φαίνεται ότι βρίσκονται αρκετά μακριά από τις ιδιοσυχνότητες του ρότορα.

<b>Mode</b>	<b>Natural Frequency (Hz)</b>
Platform Surge/Sway	0.024
Platform Yaw	0.049
Platform Heave	0.303
Platform Pitch	0.248
Platform Roll	0.247
1st Tower Side-Side	0.664
1st Tower Fore-Aft	0.673
2nd Tower Side-Side	1.886
2nd Tower Fore-Aft	2.079

## Φορτίσεις που εξασκούνται στον Πυλώνα

### 1. Μάζα του ρότορα

Η μάζα του ρότορα αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον σχεδιασμό του θεμελίου καθώς με την αύξηση της ισχύος της ανεμογεννήτριας αυξάνεται και τη μάζα της.

Εξάρτημα	επιμέρους εξαρτήματα	Μάζα (kg)
Ρότορας	φτερό πλήμνη	17740 56780
Νασέλλα		240000
Συνολικό		350000

Πίνακας 2. Μάζα μιας ανεμογεννήτριας 5 MW

### 2. Ώση στον ρότορα

Η ώση είναι η αξονική δύναμη που εφαρμόζεται από τον άνεμο στον ρότορα της ανεμογεννήτριας. Ο υπολογισμός της βασίζεται στην θεωρία Blade Momentum Theory, που λέει ότι αν η ανεμογεννήτρια προσομοιωθεί σαν να βρίσκεται μέσα σ'ένα σωλήνα ροής και λαμβάνοντας ότι η απόσταση πριν και μετά από την επιφάνεια κατά την περιστροφή του ρότορα είναι πολύ μεγάλη, η δύναμη ώσης στον ρότορα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$T = (1/2) \rho_{\text{air}} A_r (U_{\infty}^2 - U_w^2)$$

Όπου:

$\rho_{\text{air}}$  είναι πυκνότητα του αέρα

$A_r$  είναι η περιοχή που διαγράφει ο ρότορας κατά την περιστροφή του

$U_{\infty}$  είναι η ταχύτητα του ανέμου πριν τον ρότορα

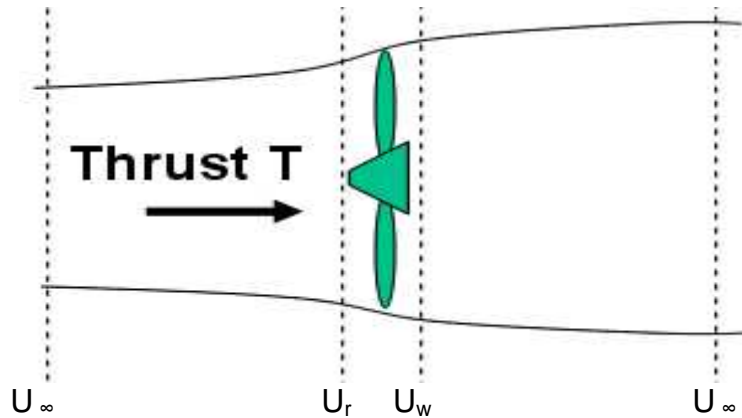
$U_w$  είναι η ταχύτητα του ανέμου μετά τον ρότορα

Ο συντελεστής επαγωγής υπολογίζεται:

$$a = (U_{\infty} - U_r) / U_{\infty}$$

όπου  $U_r$  είναι η ταχύτητα του ανέμου στον ρότορα και υπολογίζεται από τον τύπο :

$$U_r = (U_{\infty} + U_w) / 2$$



Εικόνα 20. Σωλήνας ροής (Θεωρία δίσκου ενέργειας).

Η εικόνα παραπάνω παρουσιάζει τον σωλήνα ροής του ρότορα στην Θεωρία του δίσκου ορμής.

Λόγω της στιγμιαίας μεταβολής της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου η δύναμη της ώσης μεταβάλλεται και έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή της ροπής κάμψης που ασκείται στην βάση στήριξης της νασέλλας από τον ρότορα.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις ο τύπος της δύναμης ώσης στον ρότορα γίνεται :

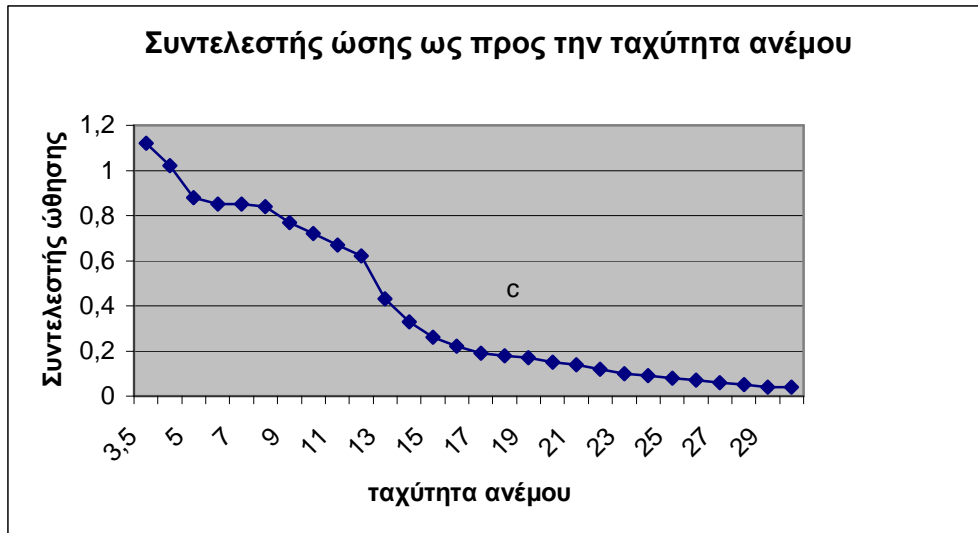
$$T=2 \rho_{\text{air}} A_r U_{\infty}^2 a(1- a)$$

Γνωρίζοντας ότι:

$$T=(1/2)C_T \rho_{\text{air}} A_r U_{\infty}^2$$

Όπου  $C_T$  είναι ο συντελεστής ώσης και ισούται με  $4a(1- a)$ .

Ο συντελεστής ώσης για την Repower 5M δίνεται από το παρακάτω γράφημα.



Γράφημα 1 Συντελεστής  $C_T$  για την ανεμογεννήτρια Repower 5M

### 3. Υδροδυναμικά φορτία

Λόγω της πρόσκρουσης των κυμάτων στο θεμέλιο η βάση στήριξης της Νασέλλας ταλαντώνεται με το μέγεθος και την κατεύθυνση των κυμάτων. Το μοντέλο του Μόρισον (Morison) είναι από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους τρόπους για τον υπολογισμό της δύναμης του κύματος.

### 4. Ταλαντώσεις

Η ταλάντωση του συστήματος κίνησης πρέπει να εξεταστεί για τον σχεδιασμό της βάσης στήριξης της νασέλλας. Τα εξαρτήματα που είναι συνδεδεμένα με το σύστημα μετάδοσης της κίνησης όπως η πλήμνη του ρότορα, το κιβώτιο ταχυτήτων, τα φρένα, ο συμπλέκτης, προκαλούν δονήσεις στη βάση στήριξης της νασέλλας οι οποίοι επηρεάζουν και το θεμέλιο.

### 5. Ροπή του ρότορα

Εκτός από τους κραδασμούς στην βάση στήριξης της νασέλλας, ενεργεί και η ροπή του ρότορα. Η ροπή του ρότορα μεταδίδεται μέσω του άξονα χαμηλής ταχύτητας, του κιβωτίου ταχυτήτων και του άξονα υψηλής ταχύτητας. Στην γεννήτρια ενεργεί η ροπή μέσω της βάσης στήριξης της νασέλλας. Η ανατροπή της ανεμογεννήτριας αποτρέπεται καθώς η ροπή του ρότορα αντισταθμίζεται με την ροπή που παράγεται από την περιστροφή των φτερών.

Οι εξισώσεις που δίνουν την άνωση και την οπισθέλκουσα είναι:

$$\Delta F_L = (1/2) \rho_{\text{air}} c_{rb} u^2 C_L \Delta r_b$$

$$\Delta F_D = (1/2) \rho_{\text{air}} c_{rb} u^2 C_D \Delta r_b$$

Οπού

$\rho_{\text{air}}$  είναι πυκνότητα του αέρα

$c_{rb}$  είναι μήκος χορδής φτερού

$u$  είναι η ταχύτητα του ανέμου που προσπίπτει στο φτερό

$C_L$  είναι συντελεστής δύναμης ανύψωσης

$C_D$  είναι συντελεστής οπισθέλκουσα

$\Delta r_b$  είναι μήκος φτερού

Η ταχύτητα του ανέμου  $u$  είναι το διανυσματικό άθροισμα της ταχύτητας του ανέμου που προσπίπτει κάθετα στο φτερό και της περιφερειακής ταχύτητας του ρότορα. Η γωνία  $\varphi$  είναι η γωνία μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου που προσπίπτει κάθετα στο φτερό  $u$  και της περιφερειακής ταχύτητας του ρότορα που είναι εφαπτόμενη στο φτερό  $u_t$ .

Η εφαπτόμενη δύναμη δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta F_t = N_b (\Delta F_L \sin\varphi - \Delta F_D \cos\varphi) = (1/2) N_b \rho a r_b c_{rb} u^2 (C_L \sin\varphi - C_D \cos\varphi) \Delta r_b$$

Όπου  $N_b$  είναι ο αριθμός των φτερών.

Η ροπή συνεπώς υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\Delta Q = \Delta (F_t r_b) = \Delta P_{\text{mech}} / \omega$$

Όπου  $r_b$  είναι η ακτίνα του φτερού.

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΤΥΠΟΥ TLP ΠΛΩΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ (TLP: TENSION LEG PLATFORM)**

- Ανεμογεννήτρια

Το είδος της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς είναι μια γεννήτρια 5 MW της Repower.

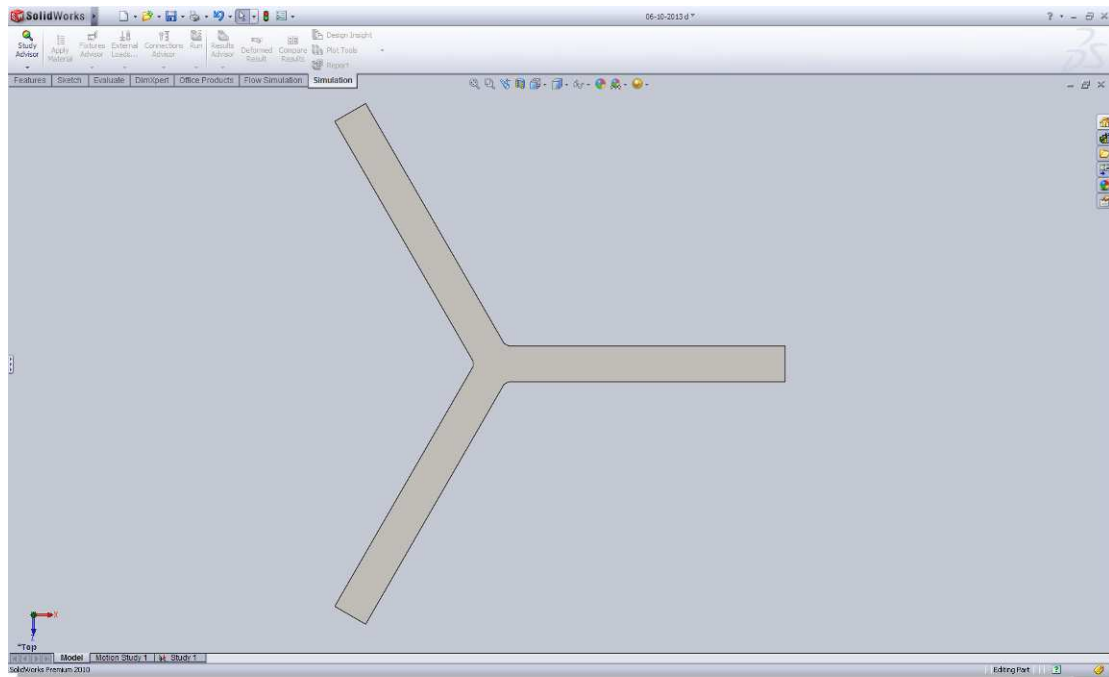
Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας είναι:

- Αριθμός φτερών: 3,
  - διάμετρος πλήμνης: 126, 3 m,
  - ταχύτητα ανέμου που ξεκινάει την λειτουργία της: 3 m/s,
  - ταχύτητα ανέμου μέγιστης ισχύος : 11.4 m/s,
  - ταχύτητα ανέμου που σταματάει την λειτουργία της: 25 m/s,
  - στροφές που ξεκινάει να παράγει: 6.9 rpm,
  - ονομαστική ταχύτητα του δρομέα: 12.1 rpm,
  - μάζα ρότορα: 110.000 kg,
  - μάζα νασέλλας : 240.000 kg,
  - μήκος νασέλλας : 19 m,
  - πλάτος νασέλλας: 6 m,
  - ύψος νασέλλας: 7 m.
- Διαστάσεις θεμελίου
    - Διάμετρος κεντρικής κολώνας 6 μέτρα.
    - Ύψος κεντρικής κολώνας 37,8 μέτρα
    - Μήκος κάθε ποδιού 39 μέτρα
    - Πλάτος κάθε ποδιού 4,8 μέτρα
    - Ύψος κάθε ποδιού 5 μέτρα
    - Μήκος πλάγιας κολώνας 4,8 μέτρα
    - Πλάτος πλάγιας κολώνας 4,8 μέτρα
    - Ύψος πλάγιας κολώνας 37,8 μέτρα.
    - Ύψος πύργου 28,5 μέτρα
    - Είναι βυθισμένη κατά 21,5 μέτρα
    - Υλικό κατασκευής: Χάλυβας κατασκευών st37

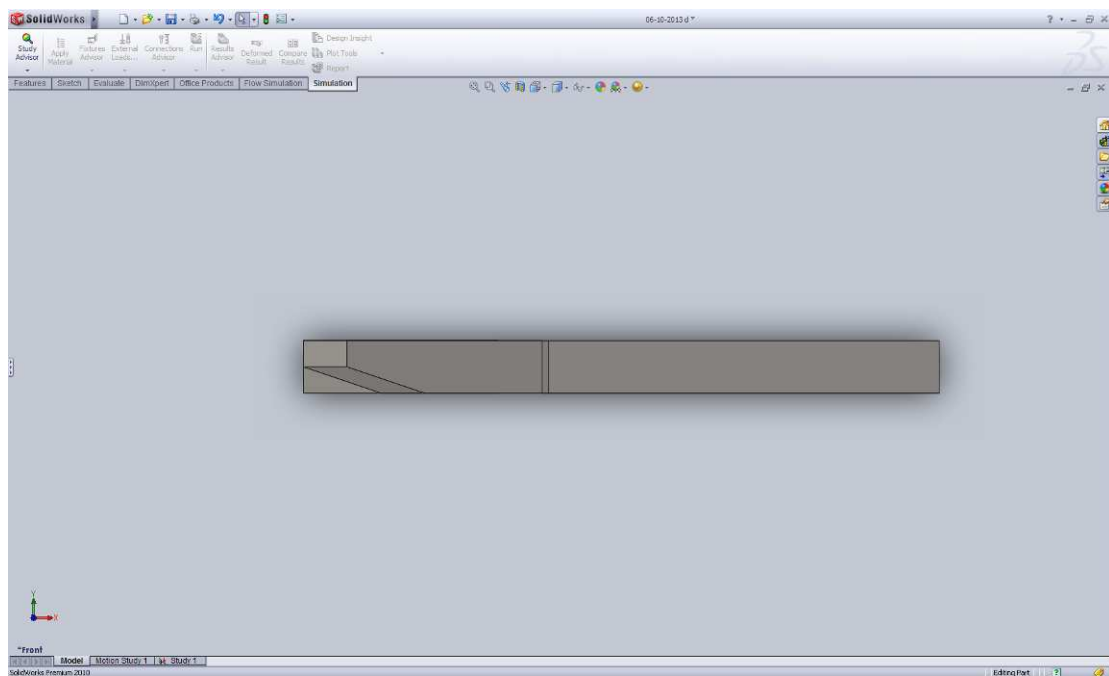
Προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός ελέγχου της θεμελίωσης σχεδιάστηκε το θεμέλιο στο πρόγραμμα Solidworks, σύμφωνα με τις διαστάσεις της κατασκευάστριας εταιρίας.

## ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

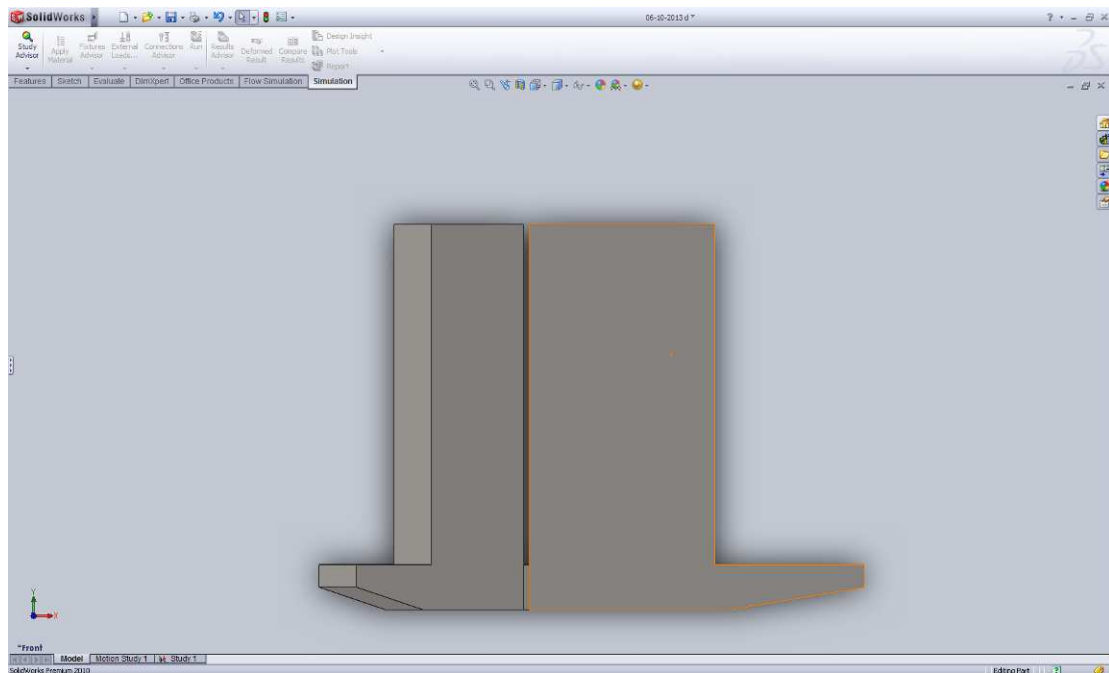
Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η διαδικασία κατά τον σχεδιασμό του θεμελίου.



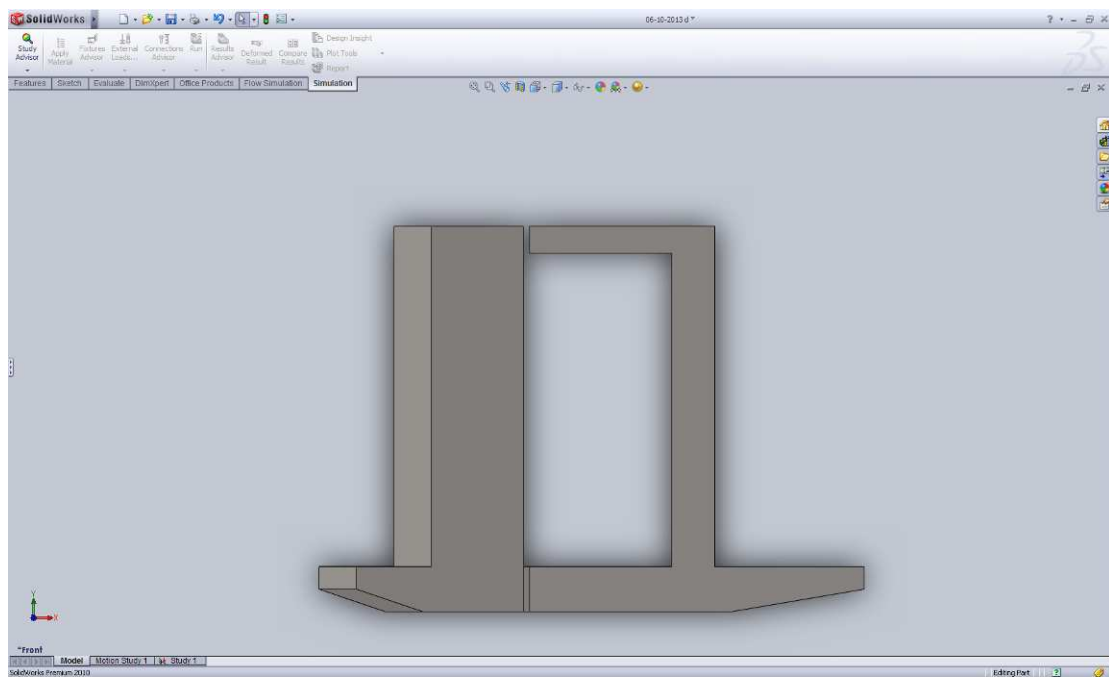
Εικόνα 21. Σχεδιασμός βάσης



Εικόνα 22. Αφαίρεση υλικού στην άκρη της βάσης

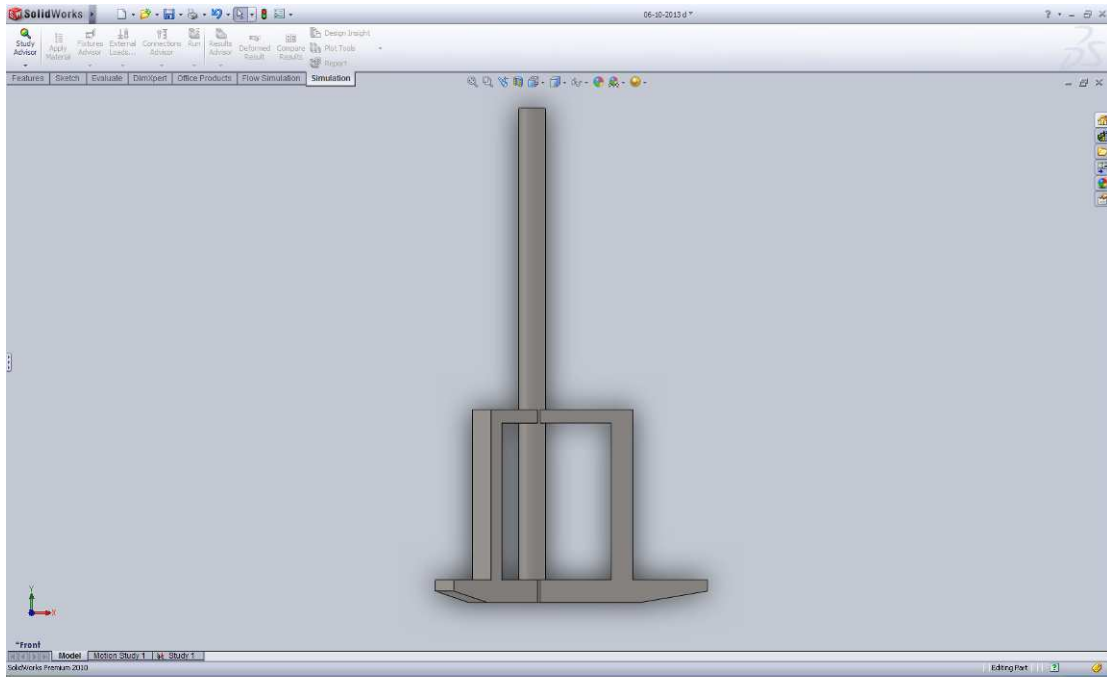


**Εικόνα 23. Σχεδιασμός κολόννας για την στήριξη του πύργου**

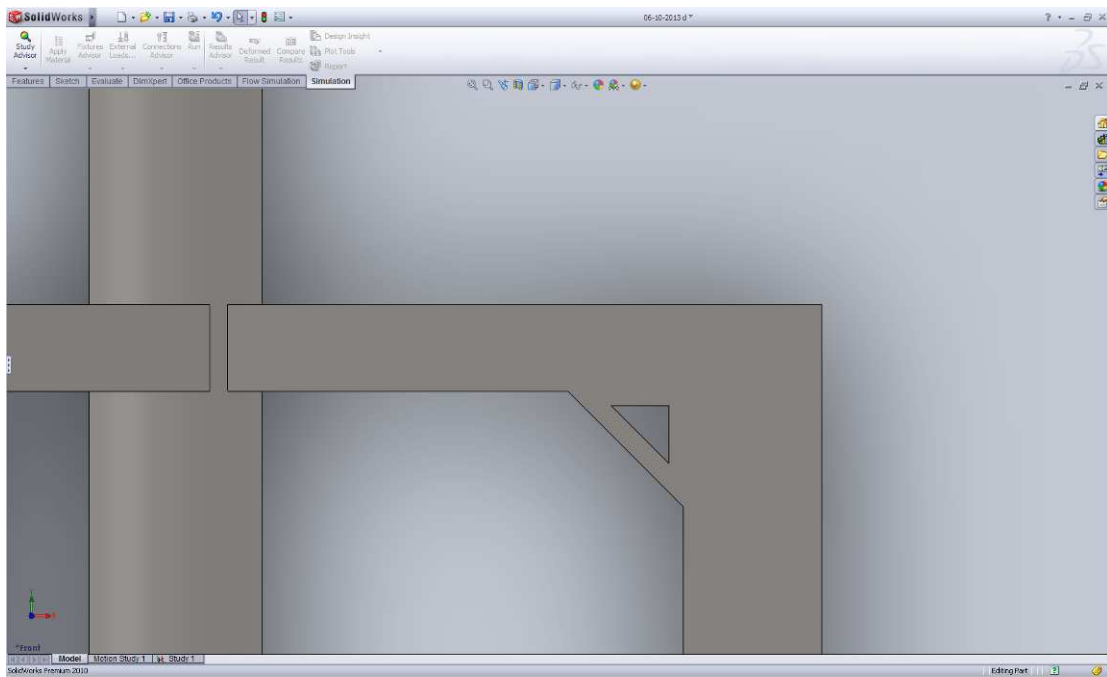


**Εικόνα 24. Αφαίρεση υλικού από τις κολόννες που στηρίζουν τον πύργο**

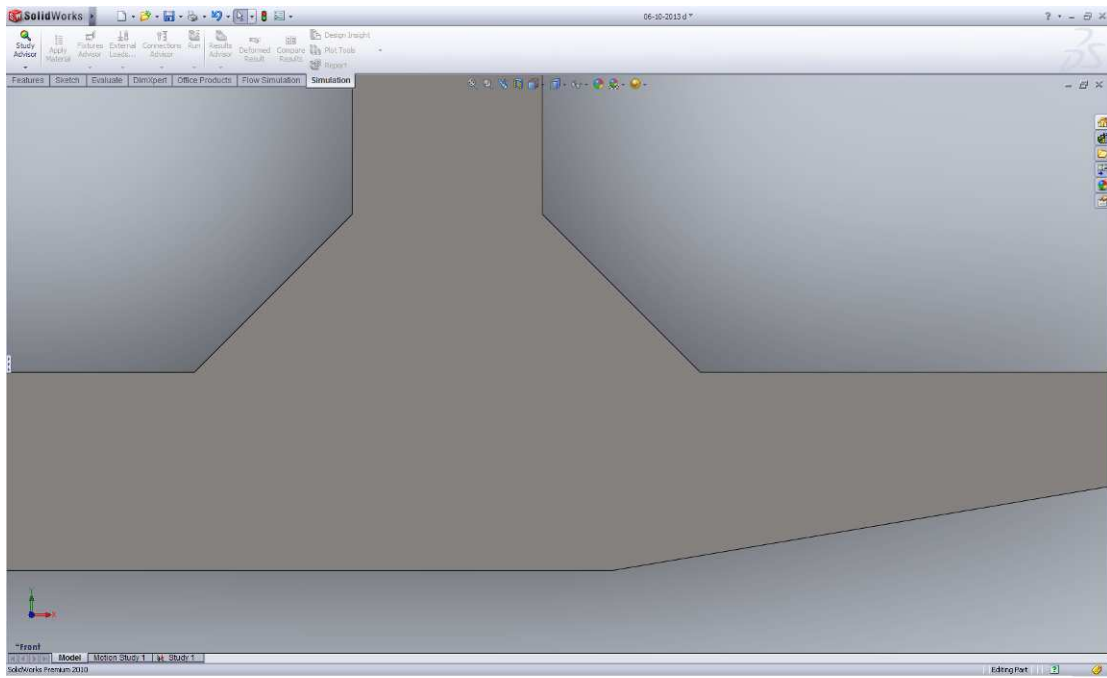




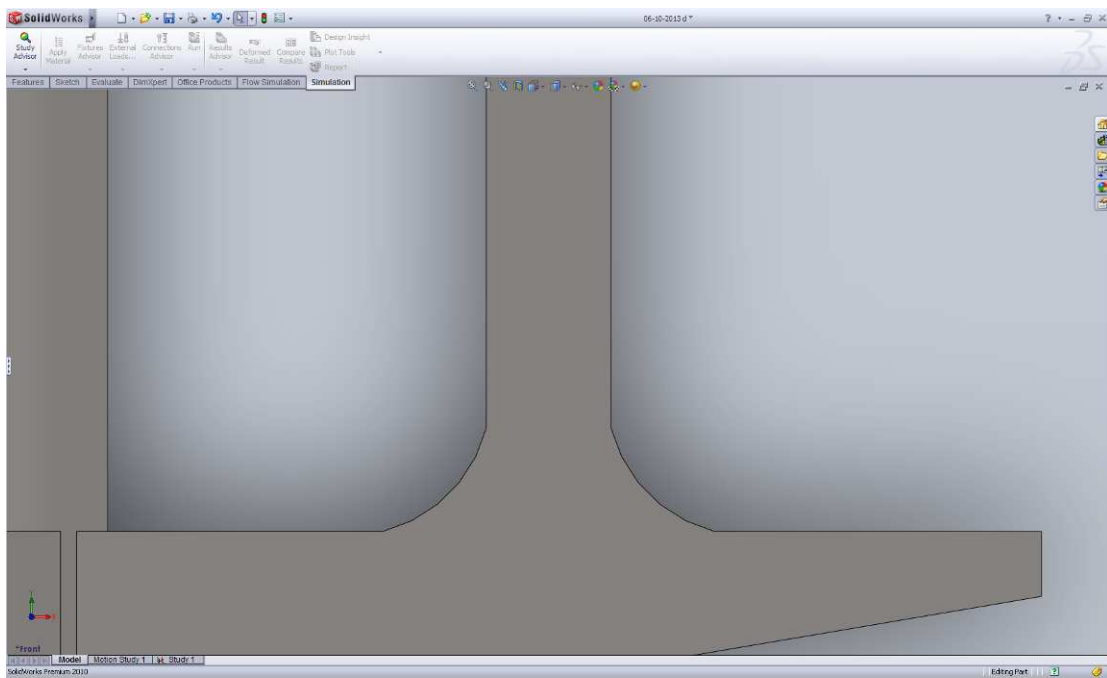
**Εικόνα 25. Σχεδιασμός του πύργου της ανεμογεννήτριας**



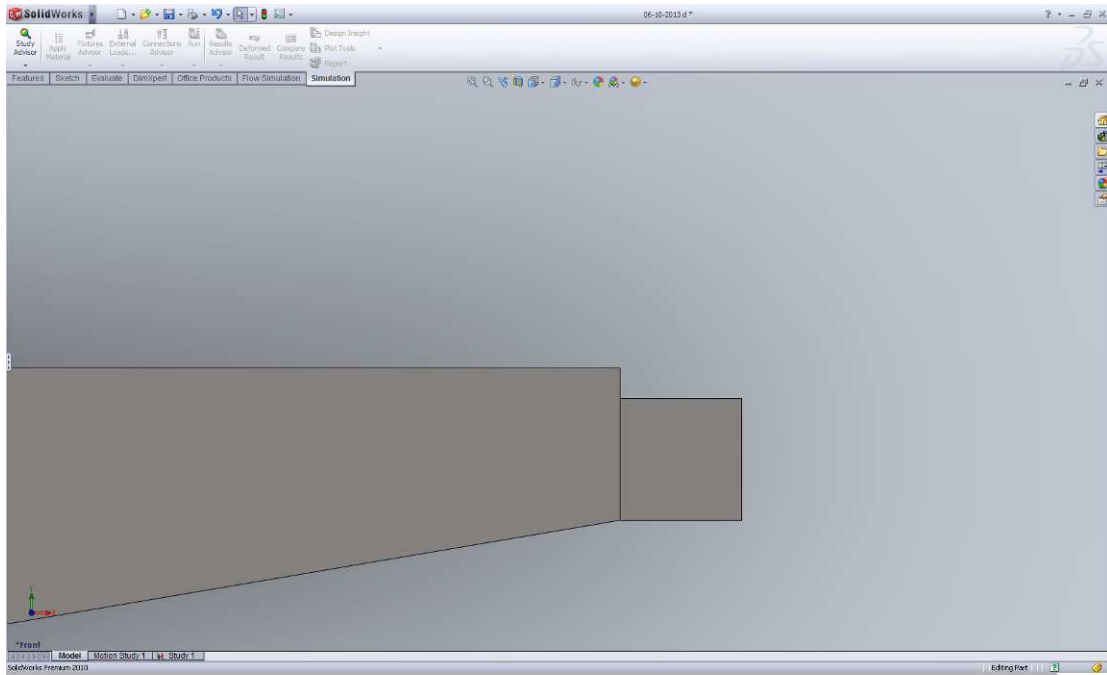
**Εικόνα 26. Σχεδιασμός στηριγμάτων στις κολόνες του πύργου**



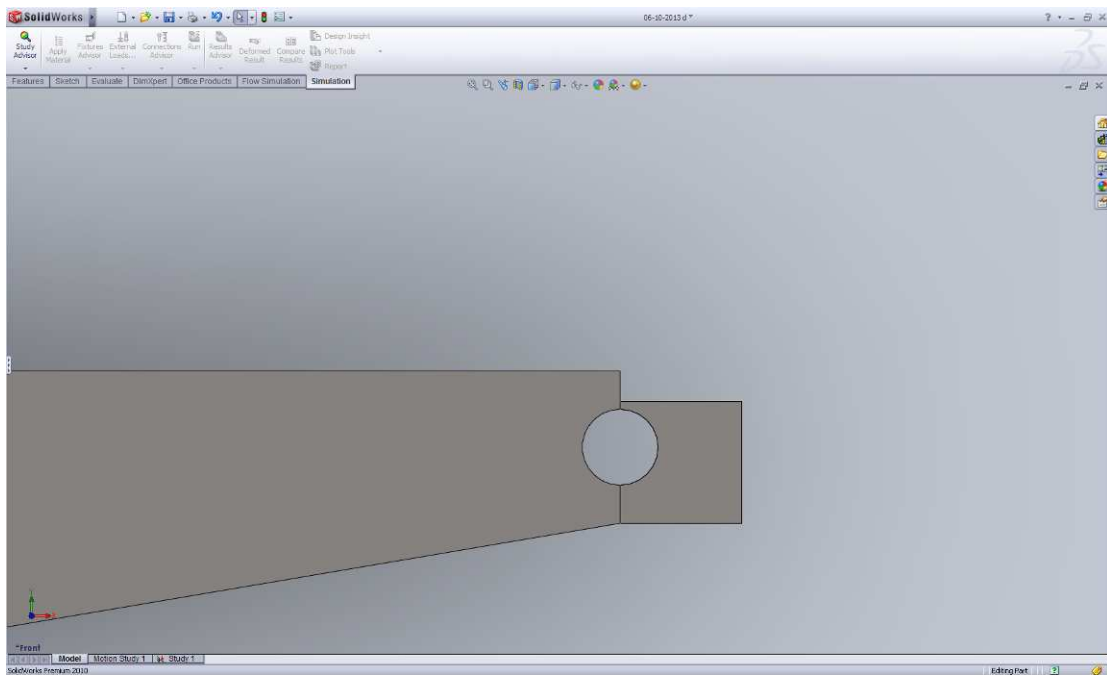
**Εικόνα 27. Σχεδιασμός στηριγμάτων στις κολόνες του πύργου**



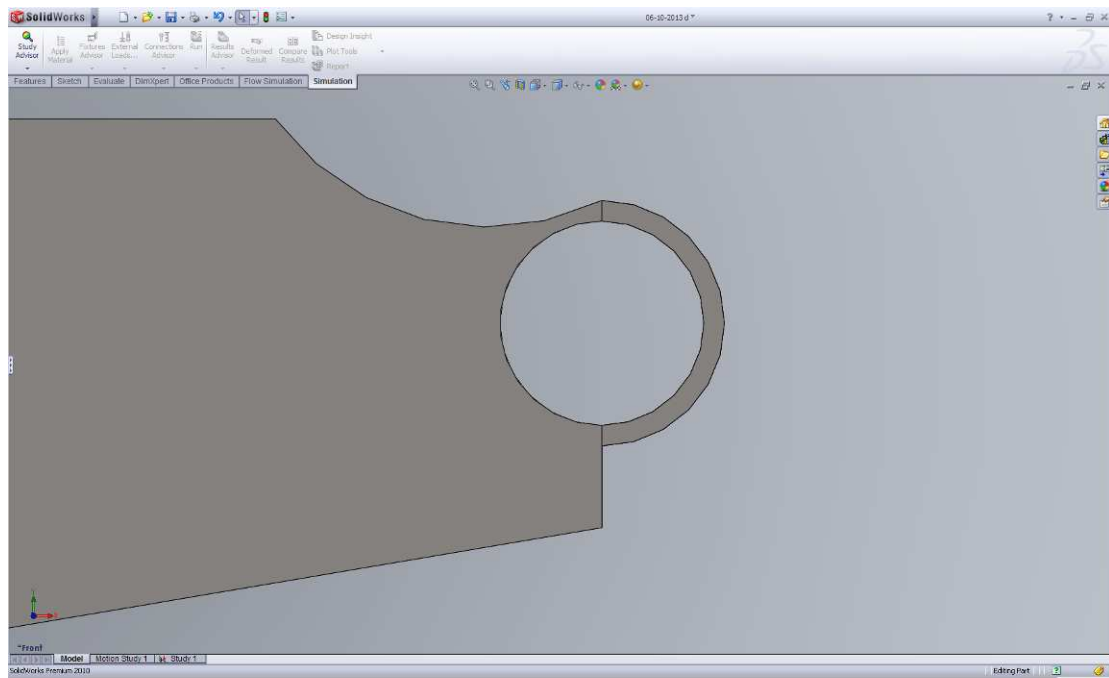
**Εικόνα 28. Μορφοποίηση των στηριγμάτων στις κολόνες του πύργου**



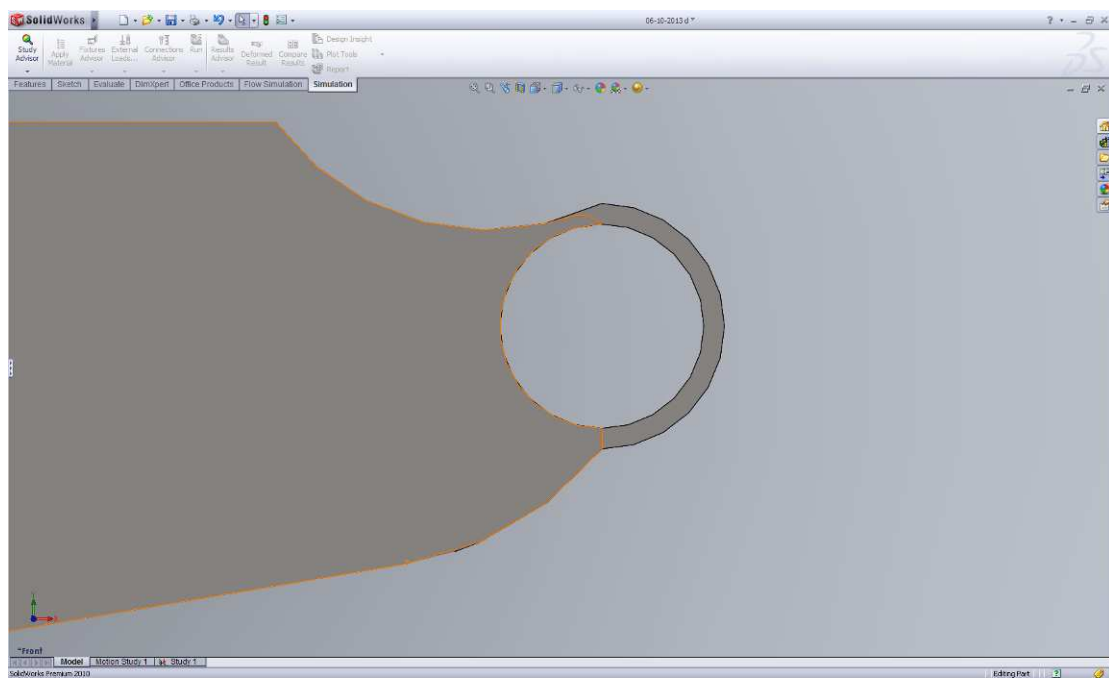
**Εικόνα 29. Σχεδιασμός της ένωσης τις βάσης με τα συρματόσκοινα**



**Εικόνα 30. Μορφοποίηση των στηριγμάτων για να ενωθούν με τα συρματόσκοινα**



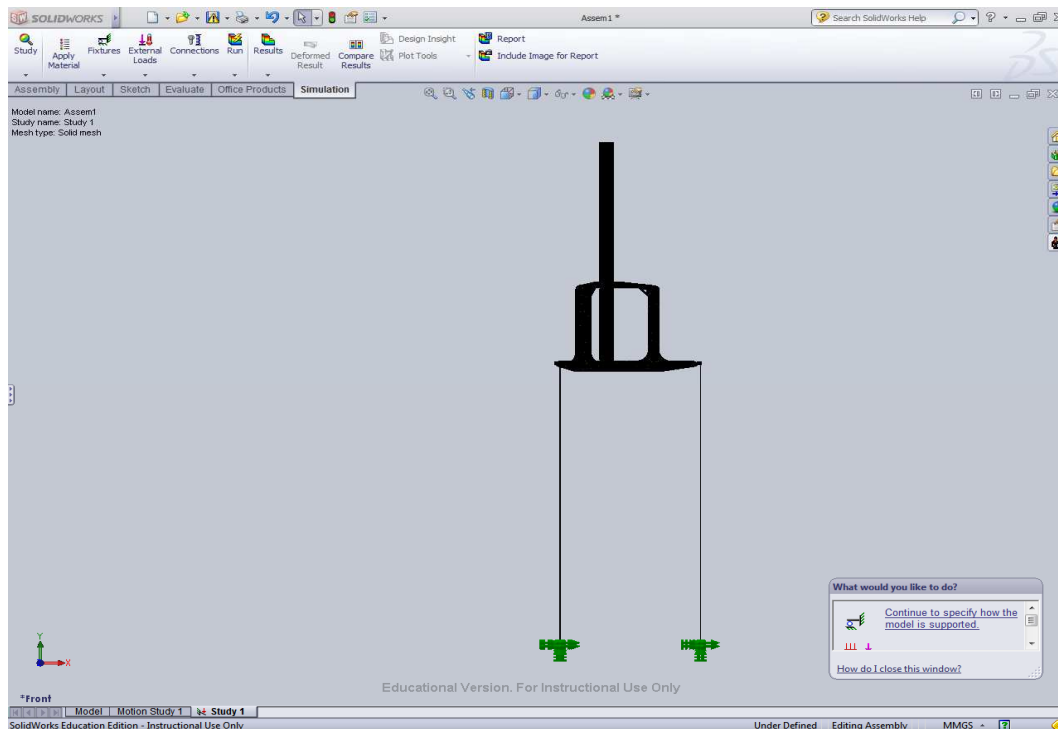
**Εικόνα 31. Αφαίρεση υλικού από τα στηρίγματα που ενώνονται τα συρματόσκινα**



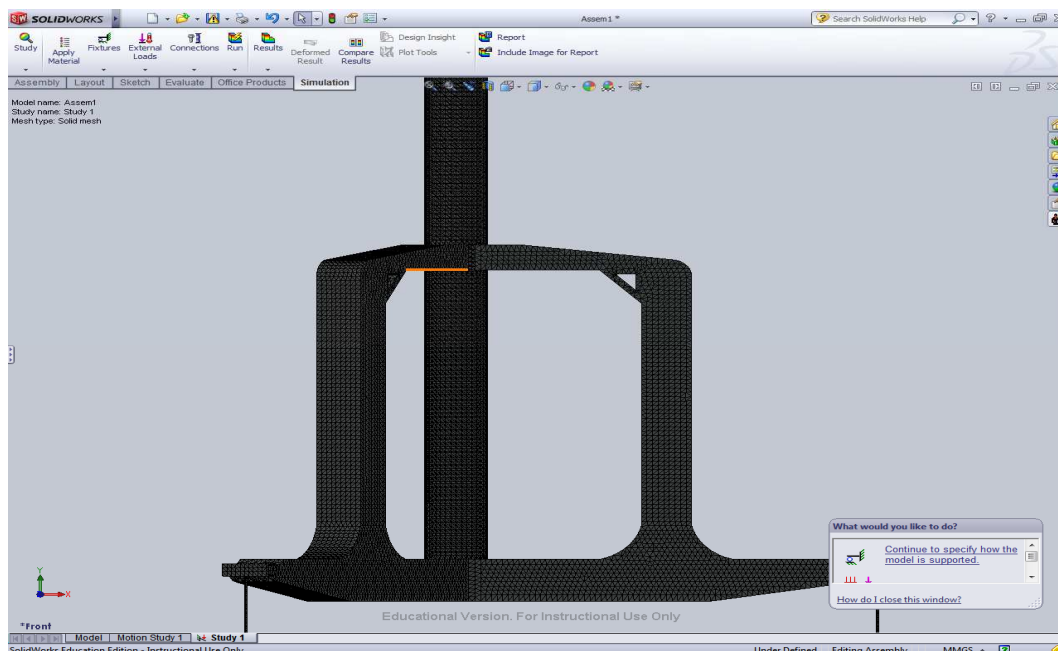
**Εικόνα 32. Τελική μορφή της ένωσης της βάσης με τα συρματόσκινα**

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται η διαδικασία του σχεδιασμού που πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα solidworks.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ (ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ) ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΤΟΧΗΣ ΘΕΜΕΛΙΟΥ



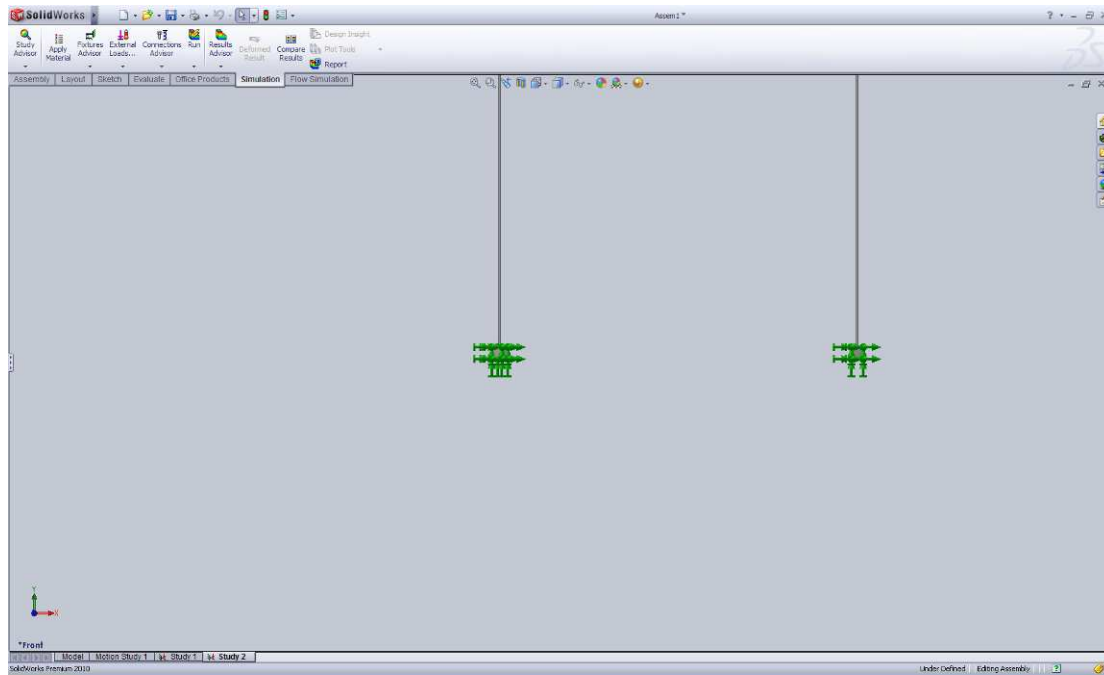
Εικόνα 33. Γενική άποψη του μοντέλου θεμελίωσης τύπου TLP.



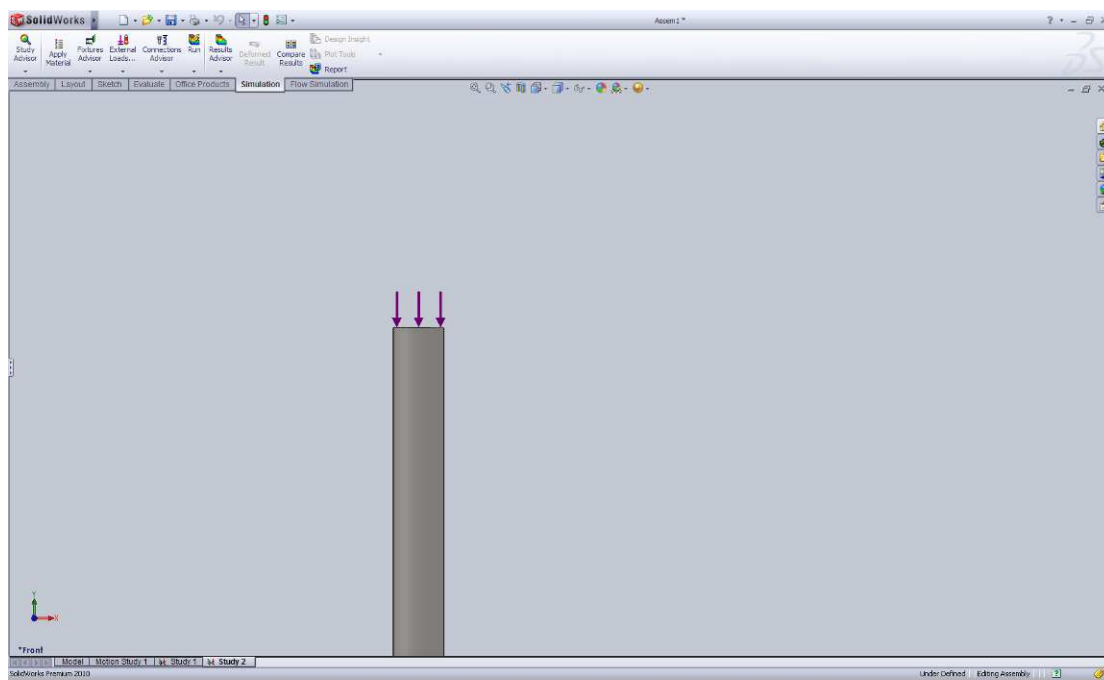
Εικόνα 34. Διακριτοποίηση βάσης

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται το θεμέλιο με την διακριτοποίηση που έγινε από το πρόγραμμα solidworks.

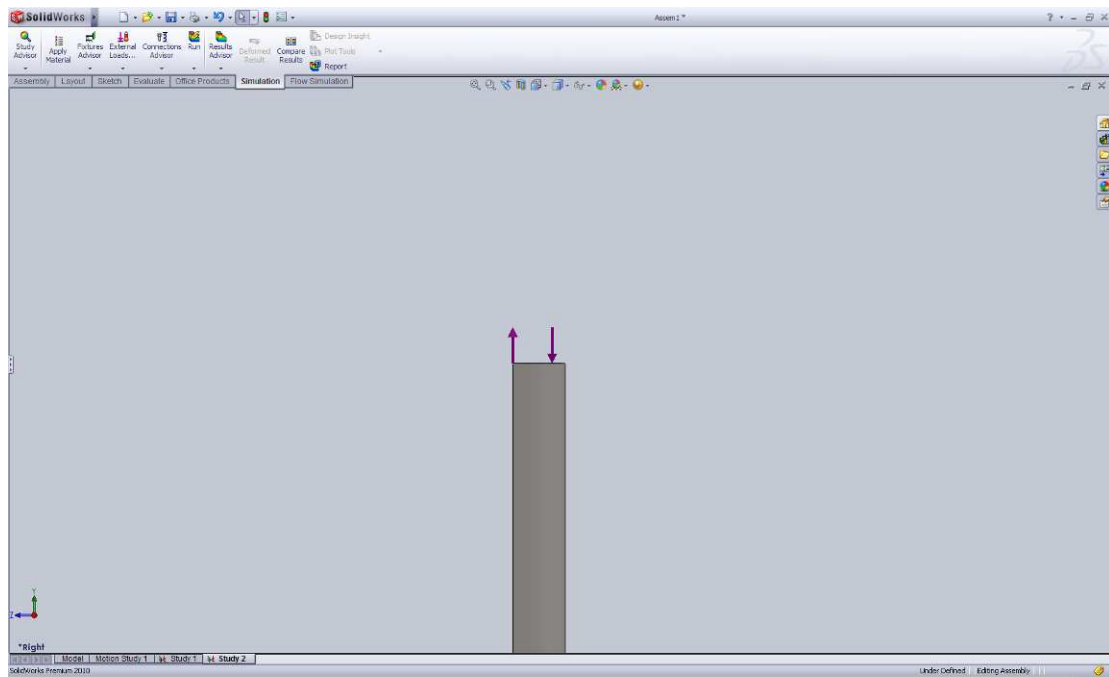
## Στήριξη θεμελίου ανεμογεννήτριας και δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό



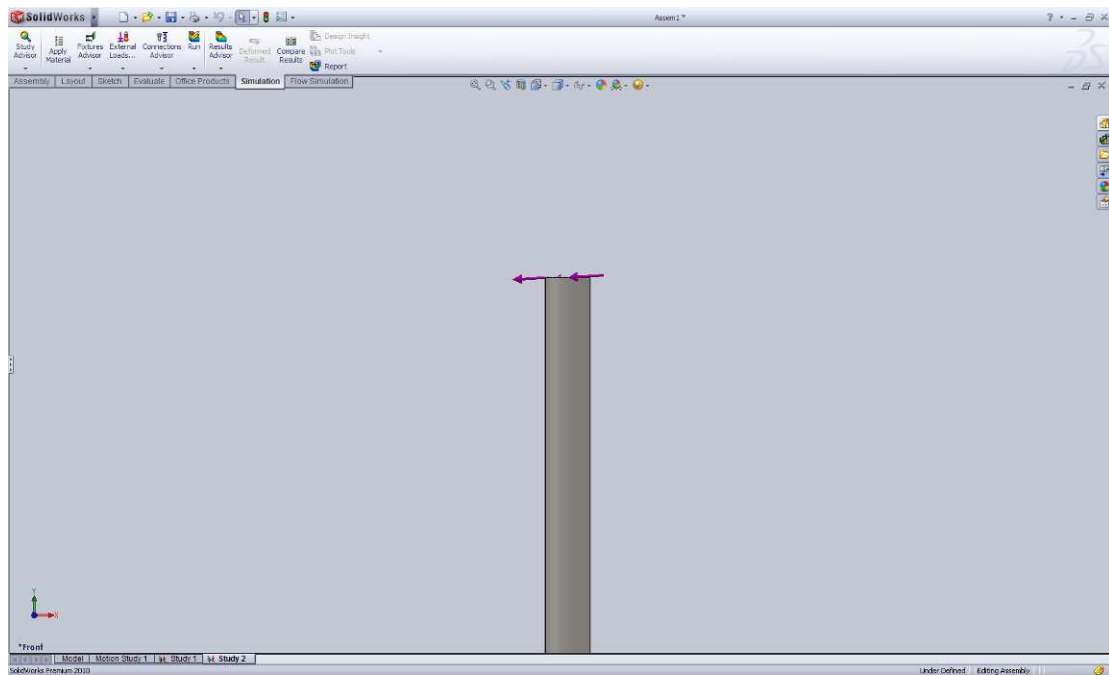
Εικόνα 35. Στήριξη του θεμελίου από τον βυθό (πακτωμένες άγκυρες στο βυθό).



Εικόνα 36. Φορτίο Μάζας νασέλλας και ρότορα



**Εικόνα 37. Ροπή που δημιουργείται στον πύργο κατά την περιστροφή της φτερωτής**



**Εικόνα 38. Δύναμη που δημιουργείται στον πύργο από την οπισθέλκουσα που εξασκείται στον άξονα του ρότορα.**

Για τους υπολογισμούς των φορτίων χρησιμοποιήθηκαν οι παρά μετροι που αναφέρονται στις περιπτώσεις φόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-3 για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.

**Περιπτώσεις φόρτισης (Load cases), σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-3 για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.**

Περίπτωση φόρτισης	Ταχύτητα ανέμου $U_{\infty}$ (m/s)	Χαρακτηριστικά ανέμου	ύψος κύματος $H_s$ (m)	Κατάσταση της θάλασσας	Κατάσταση ανεμογεννήτριας	Συντελεστής φορτίου
<b>Η ανεμογεννήτρια σε κανονική λειτουργία</b>						
1.1	11,4	φυσιολογική τύρβη	5.9	φυσιολογική κατάσταση	κανονική λειτουργία	1,5
1.3	11,4	ακραία τύρβη	5.9	φυσιολογική κατάσταση	κανονική λειτουργία	1,35
1.4	25	ακραία ριπή ανέμου και μεταβολή διεύθυνσης	5,9	φυσιολογική κατάσταση	σε λειτουργία και περιστρέφεται η νασέλλα	1,35
1.5	11,4	ακραία διάτμηση ανέμου	1.6	φυσιολογική κατάσταση	σε λειτουργία, περιστρέφεται η νασέλλα και μεταβάλλονται και οι στρόφες του ρότορα	1,35
1.6	25	φυσιολογική τύρβη-ακραία ταχύτητα ανέμου	15.04	ακραίες συνθήκες θαλάσσης	κανονική λειτουργία	1,35
<b>Η ανεμογεννήτρια σε λειτουργία + βλάβη.</b>						
2.1	20	φυσιολογική τύρβη	5,9	φυσιολογική κατάσταση	βλάβη στο σύστημα ελέγχου ή χάσιμομ του δικτύου	1,35
2.3	25	ακραία ριπή ανέμου	5,9	φυσιολογική κατάσταση	βλάβη στο ηλεκτρικό σύστημα ή χάσιμομ του δικτύου	1,1
<b>Η ανεμογεννήτρια εκτός λειτουργίας</b>						
6.1	47,5	ακραία ταχύτητα ανέμου	15.04	ακραίες συνθήκες θαλάσσης	νασέλλα βρίσκεται υπό κλίση $0^{\circ}$ έως $8^{\circ}$	1,35
6.2	47,5	ακραία ταχύτητα ανέμου	15.04	ακραίες συνθήκες θαλάσσης	απώλεια του δικτύου και περιστροφή νασέλλας από $-180^{\circ}$ έως $180^{\circ}$	1,1
6.3	38	ακραία ταχύτητα ανέμου	11.77	ακραίες συνθήκες θαλάσσης	νασέλλα βρίσκεται υπό κλίση $0^{\circ}$ έως $20^{\circ}$	1,35
<b>Η ανεμογεννήτρια εκτός λειτουργίας + βλάβη.</b>						
7.1	38	ακραία ταχύτητα ανέμου	15.04	ακραίες συνθήκες θαλάσσης	δεν περιστρέφεται καθώς έχουν ενεργοποιηθεί τα φρένα βρίσκεται και υπό κλίση $0^{\circ}$ έως $8^{\circ}$	1,1

**Πίνακας 3. Περιπτώσεις φορτίσεων (IEC 61400-3).**



## Υπολογισμός φορτίσεων από το πρόγραμμα *solidworks*

Από τον παραπάνω πίνακα επιλέχτηκαν να παρουσιαστούν οι πέντε πιο αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις φόρτισης που αναλύθηκαν με το πρόγραμμα *solidworks*. Αυτές είναι: 1.1, 1.5, 1.6, 2.1, 6.1,

### Περίπτωση φόρτισης 1.1 : Η ανεμογεννήτρια σε κανονική λειτουργία

Οι καιρικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον υπολογισμό είναι:

- Ταχύτητα ανέμου  $U_{\infty}=11,4$  m/s με φυσιολογική τυρβώδη ροή ανέμου,
- ύψος κύματος  $H_s=5.9$ m, φυσιολογική κατάσταση της θάλασσας,
- πυκνότητα αέρα  $\rho_{air}=1.225$ kg/m<sup>3</sup>
- συντελεστής ώσης  $C_T=0,7$
- επιφάνεια σάρωσης  $A_r=12469$ m<sup>2</sup>
- η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε λειτουργία
- ο συντελεστής φορτίου είναι  $1,25*1,2=1,5$

Μάζα:  $m=350000$ kg

Μέγιστη Οπισθέλκουσα στον άξονα της Α/Γ:  $T=(1/2)C_T \rho_{air} A_r U_{\infty}^2$   
 $=0.5*0.7*1.225$ kg/m<sup>3</sup>\* $12469$ m<sup>2</sup> (11.4 m/s)<sup>2</sup>= $694777.04$ N

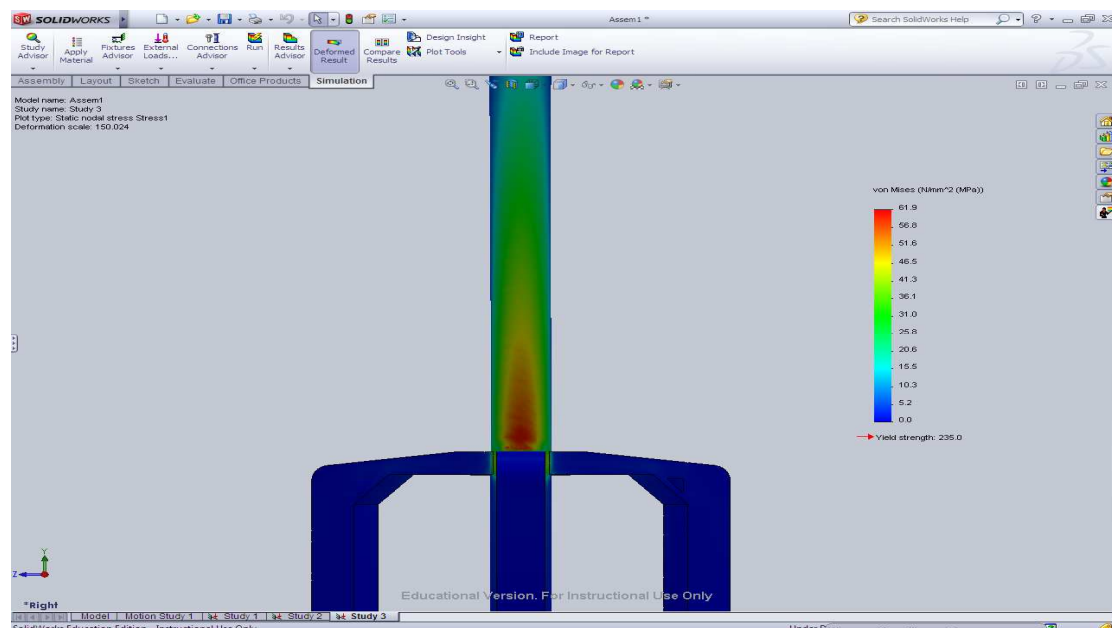
Μέγιστη Μηχανική ισχύς:  $P=T U_{\infty}= 7.92$  MW

$\omega=1.35$  rad/se  $2*\pi$ N/60

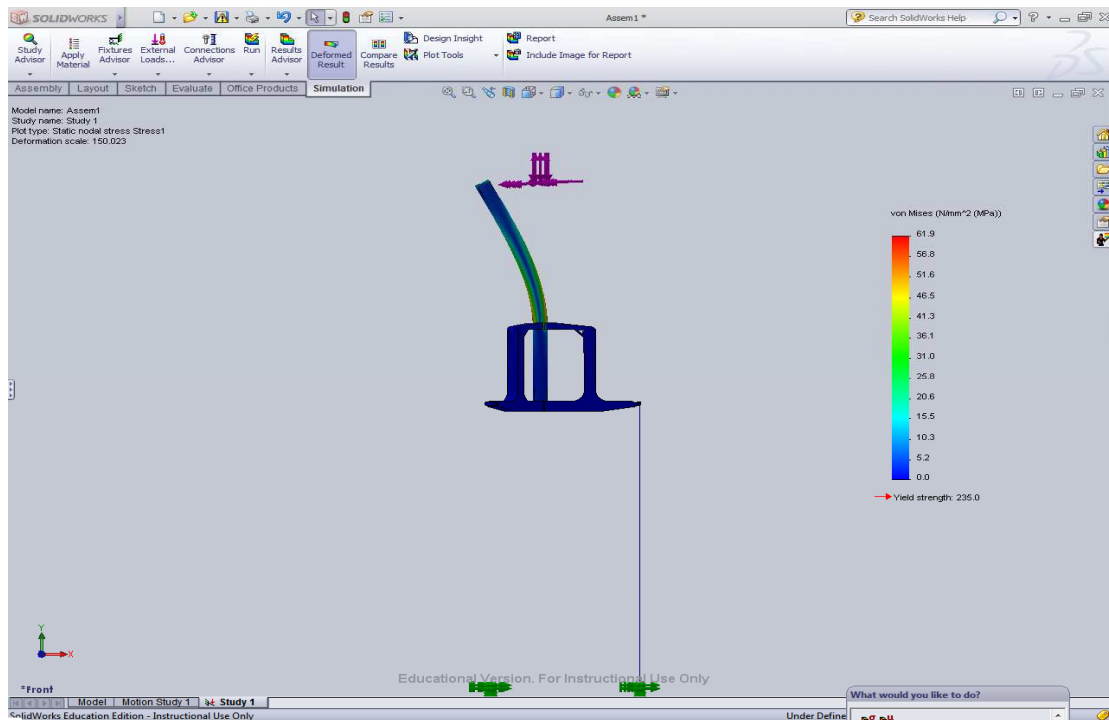
Μέγιστη Ροπή στον άξονα της Α/Γ, λόγω περιστροφής της:  $Q=5.87$ MNm

Τα υδροδυναμικά φορτία υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα *solidworks* και λήφθησαν υπόψιν απευθείας στον υπολογισμό.

### Αποτελέσματα ανάλυσης:

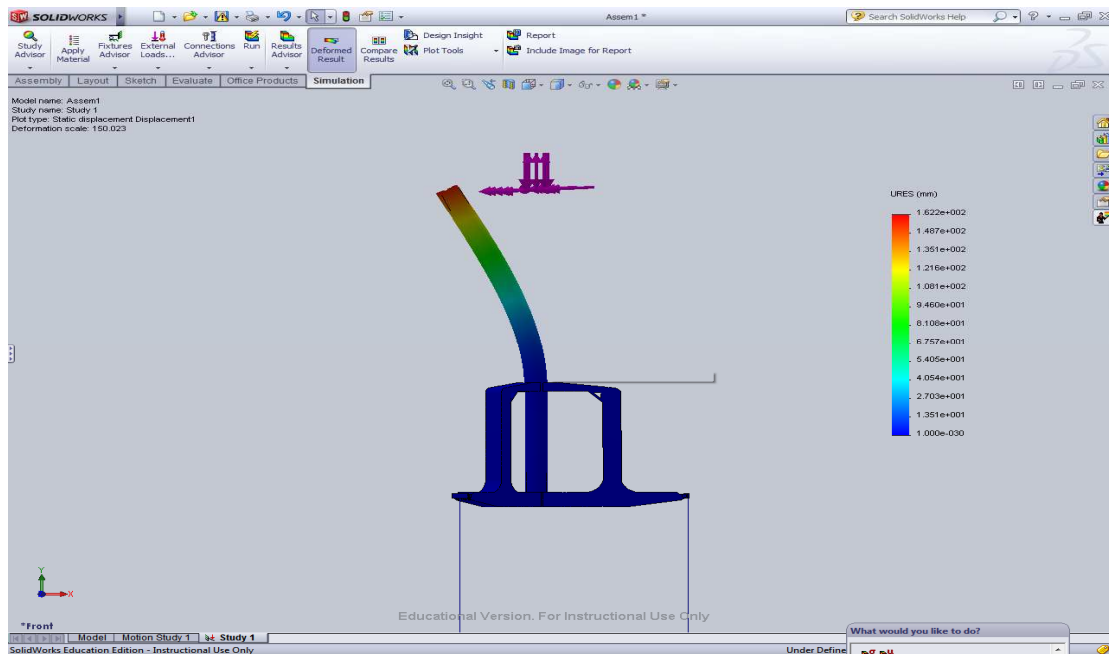


Εικόνα 39. Μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises

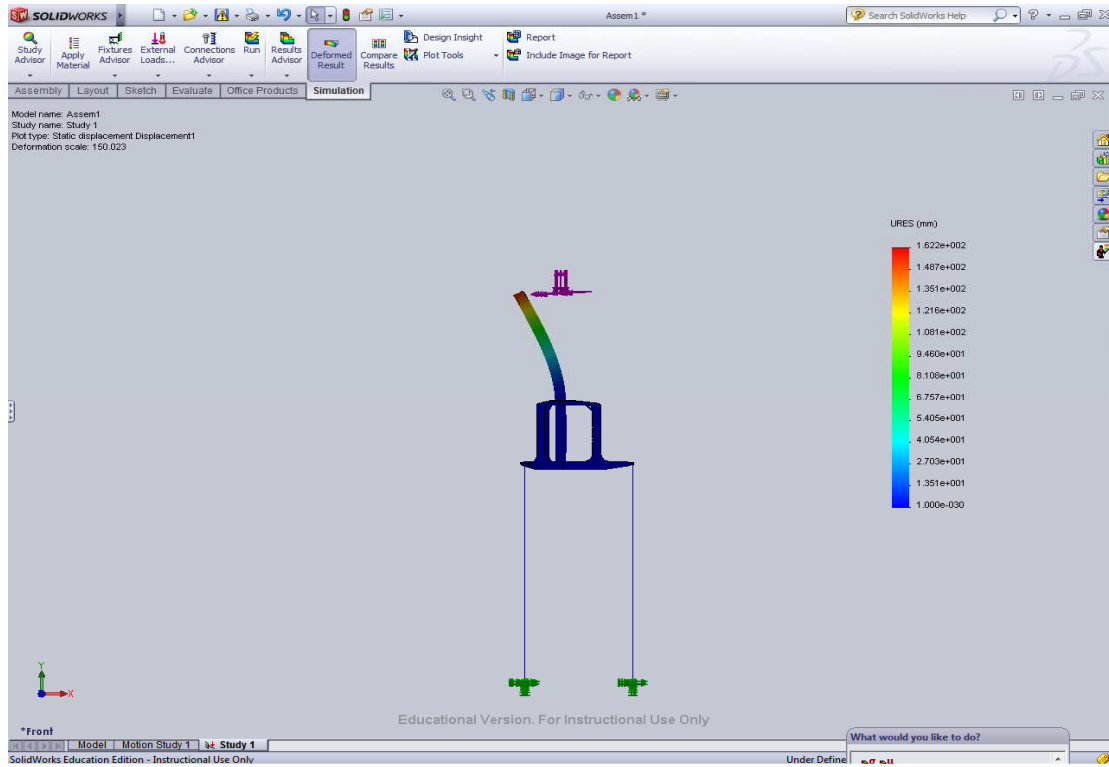


**Εικόνα 40. Μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises**

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται η μέγιστη ισοδύναμη τάση που δέχεται το θεμέλιο ίση με 61,9 MPa(N/mm<sup>2</sup>).



**Εικόνα 41. Μέγιστη μετατόπιση ίση με 162 mm**



Εικόνα 42. Μέγιστη μετατόπιση ίση με 162 mm.

A/A	Ελάχιστη	Μέγιστη
Τάση Von Misses N/mm <sup>2</sup> (MPa)	1.063*10 <sup>-10</sup>	61,9
Μετατόπιση mm	0	162.164

Πίνακας 4. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση φόρτισης 1.1

## Περίπτωση φόρτισης 1.5 : Η ανεμογεννήτρια σε κανονική λειτουργία

Οι καιρικές συνθήκες που λυθήκαν κατά τον υπολογισμό είναι

- Ταχύτητα ανέμου  $U_{\infty}=11.4$  m/s με ακραίο διατμητικός άνεμο, (παρουσιάζεις μεγάλες αλλαγές σε ταχύτητα και κατεύθυνση σε σύντομο χρονικό διάστημα)
- ύψος κύματος  $H_s=1.6$ m φυσιολογική κατάσταση της θάλασσας,
- πυκνότητα αέρα  $\rho_{\text{air}}=1.225$ kg/m<sup>3</sup>
- συντελεστής ώσης  $C_T=0.7$
- επιφάνεια που διαγράφουν τα φτερά  $A_r=12469$ m<sup>2</sup>
- Η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε λειτουργία και περιστρέφεται η νασέλλα λόγω της μεταβολής τις κατεύθυνσης του ανέμου και μεταβάλλονται και οι στροφές του ρότορα λόγω της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου .
- Ο συντελεστής φορτίου είναι 1,35

Μάζα:  $m=350000$ kg

Μέγιστη Οπισθέλκουσα στον άξονα της Α/Γ:  $T=(1/2)C_T \rho_{\text{air}} A_r U_{\infty}^2$   
 $=0.5*0.7*1.225$ kg/m<sup>3</sup>\* $12469$ m<sup>2</sup>  $(11.4$  m/s)<sup>2</sup> $=694777.04$ N

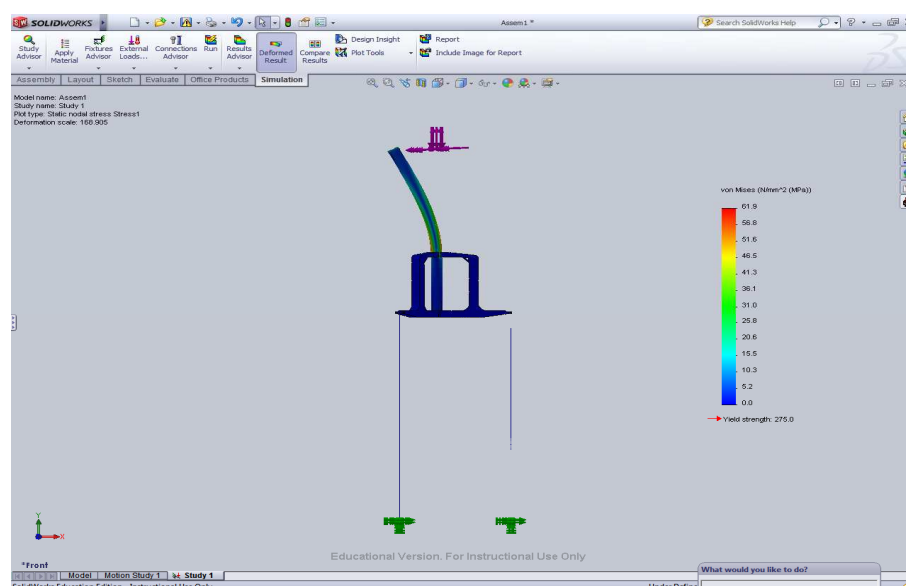
Μέγιστη Μηχανική ισχύς:  $P=T U_{\infty}= 7.92$  MW

$\omega=1.35$  rad/se  $2*\pi$ N/60

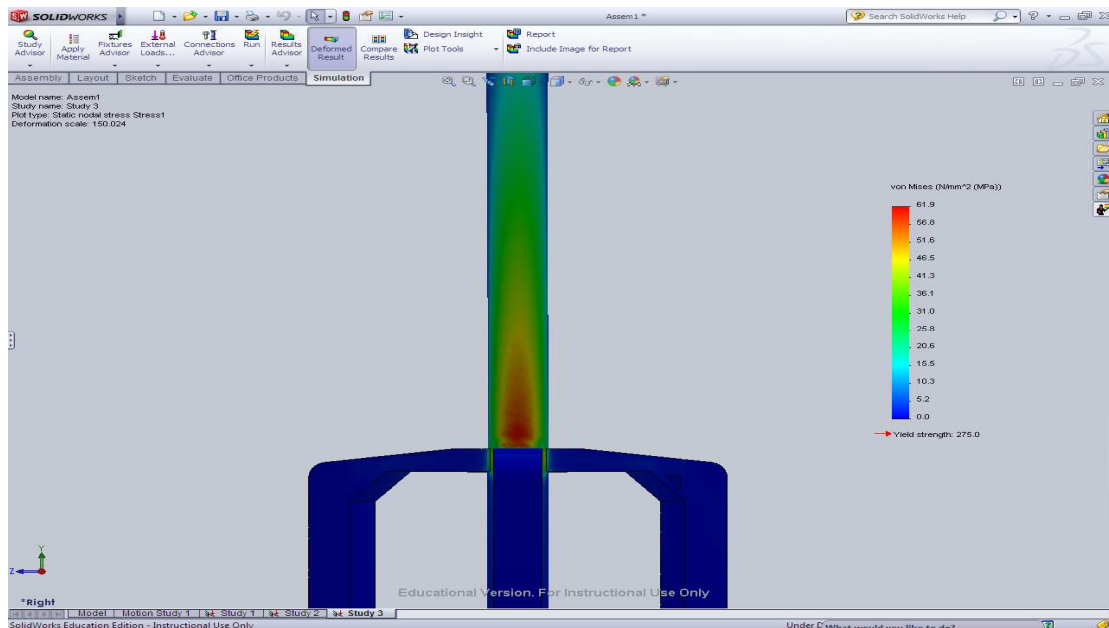
Μέγιστη Ροπή στον άξονα της Α/Γ , λόγω περιστροφής της:  $Q=5.87$ MNm

Τα υδροδυναμικά φορτία υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα solidworks και λήγθησαν υπόψιν απευθείας στον υπολογισμό.

Αποτελέσματα ανάλυσης:

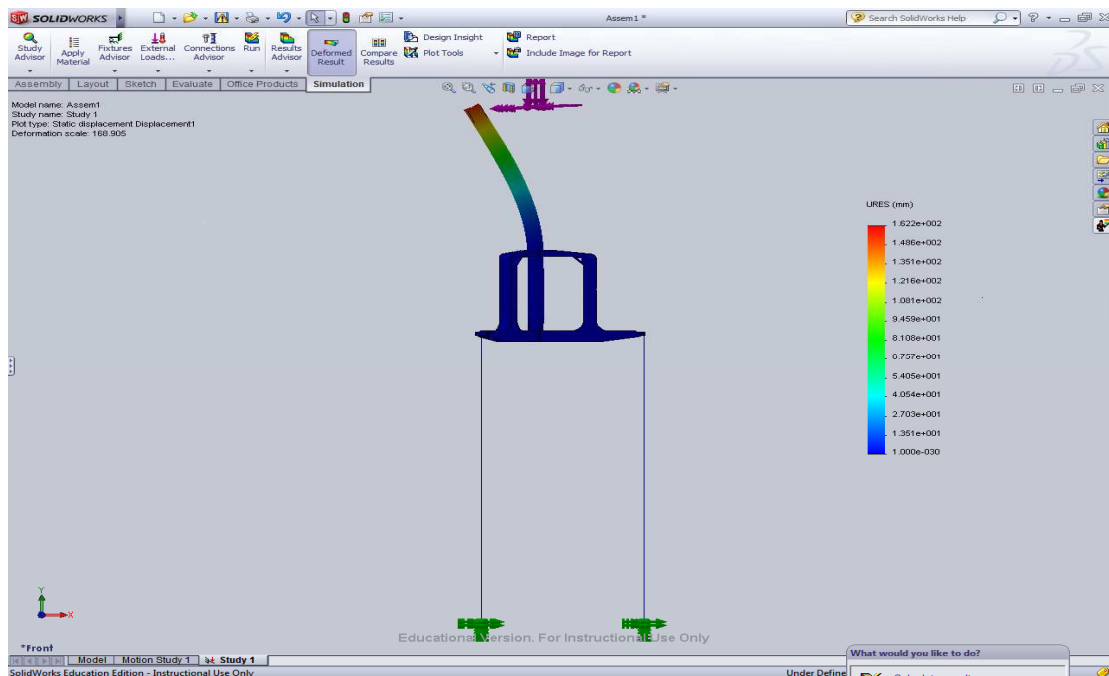


Εικόνα 43. Μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Misses

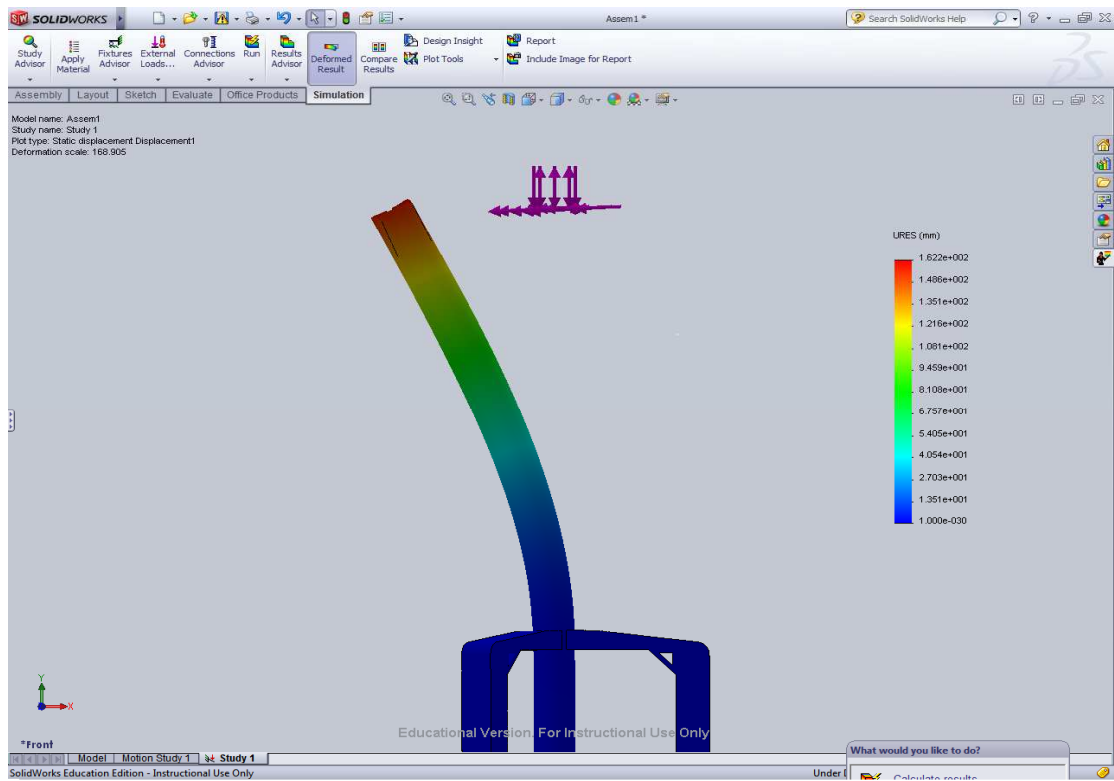


Εικόνα 44. Μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Misses

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται η μέγιστη τάση που δέχεται το θεμέλιο με μέγιστη τάση  $64.941 \text{ (N/mm}^2\text{)}$



Εικόνα 45. Μέγιστη μετατόπιση ίση με 162 mm



Εικόνα 46. Μέγιστη μετατόπιση ίση με 162mm

A/A	Ελάχιστη	Μέγιστη
Τάση Von Mises N/mm <sup>2</sup> (MPa)	$1.064 \cdot 10^{-10}$	64.941
Μετατόπιση mm	0	162.164

Πίνακας 5. Συγκενρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση φόρτισης 1.5

## Περίπτωση φόρτισης: 1.6 : Η ανεμογεννήτρια σε κανονική λειτουργία

Οι καιρικές συνθήκες που λυθήκαν κατά τον υπολογισμό είναι

- Ταχύτητα ανέμου  $U_{\infty}=25$  m/s με φυσιολογική τυρβώδης ροή ανέμου
- ύψος κύματος  $H_s=15.04$ m φυσιολογική κατάσταση της θάλασσας
- πυκνότητα αέρα  $\rho_{air}=1.225$ kg/m<sup>3</sup>
- συντελεστής ώσης  $C_T=0.15$
- επιφάνια που διαγράφουν τα φτερά  $A_r=12469$ m<sup>2</sup>
- Η ανεμογεννήτρια βρίσκεται σε λειτουργία.
- Ο συντελεστής φορτίου είναι 1,35

Μάζα:  $m=350000$ kg

Μέγιστη Οπισθέλκουσα στον άξονα της Α/Γ:  $T=(1/2)C_T \rho_{air} A_r U_{\infty}^2$   
 $=0.5*0.15*1.225$ kg/m<sup>3</sup>\* $12469$ m<sup>2</sup>( $25$  m/s)<sup>2</sup>= $715993.35$ N

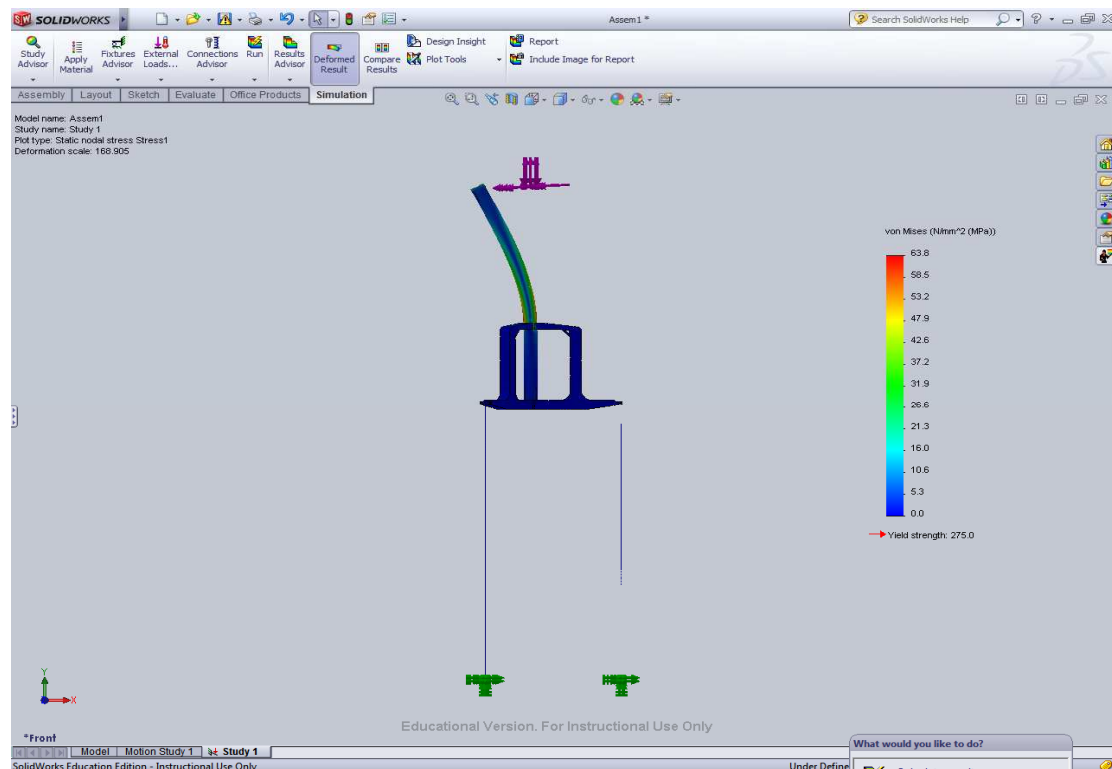
Μέγιστη Μηχανική ισχύς:  $P=T U_{\infty}= 17.9$  MW

$\omega=1.35$  rad/se  $2*\pi$ N/60

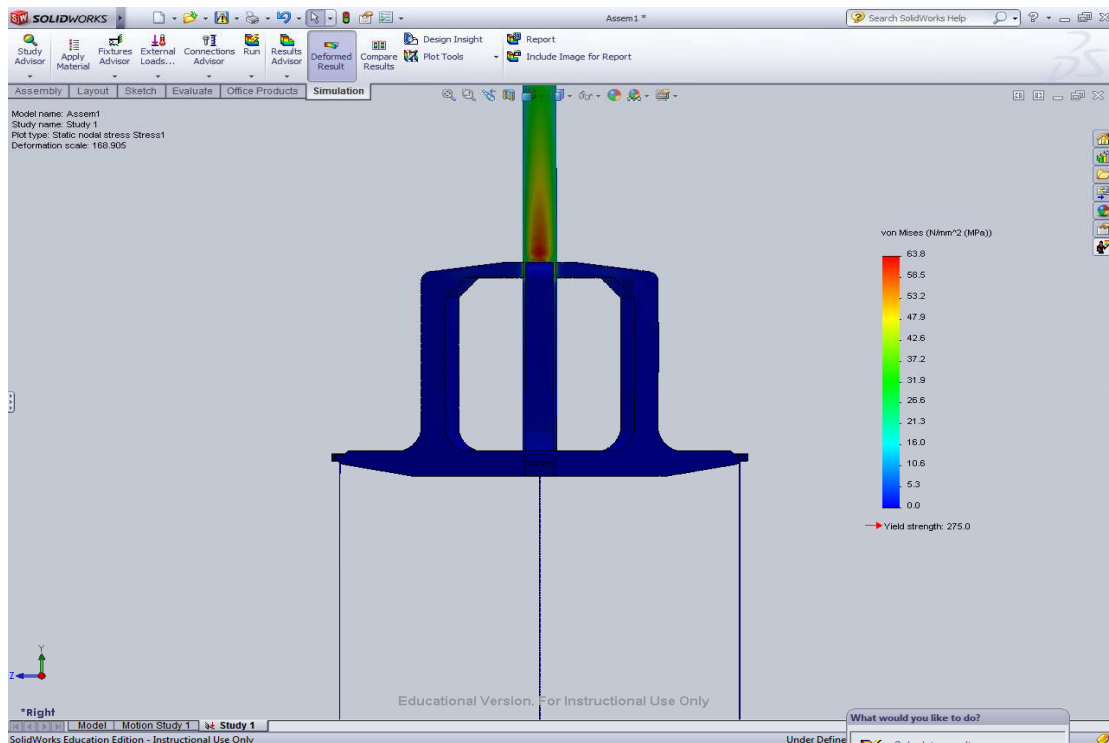
Μέγιστη Ροπή στον άξονα της Α/Γ, λόγω περιστροφής της:  $Q=13.26$  MNm

Τα υδροδυναμικά φορτία υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα solidworks και λήγθησαν υπόψιν απευθείας στον υπολογισμό.

### Αποτελέσματα ανάλυσης:

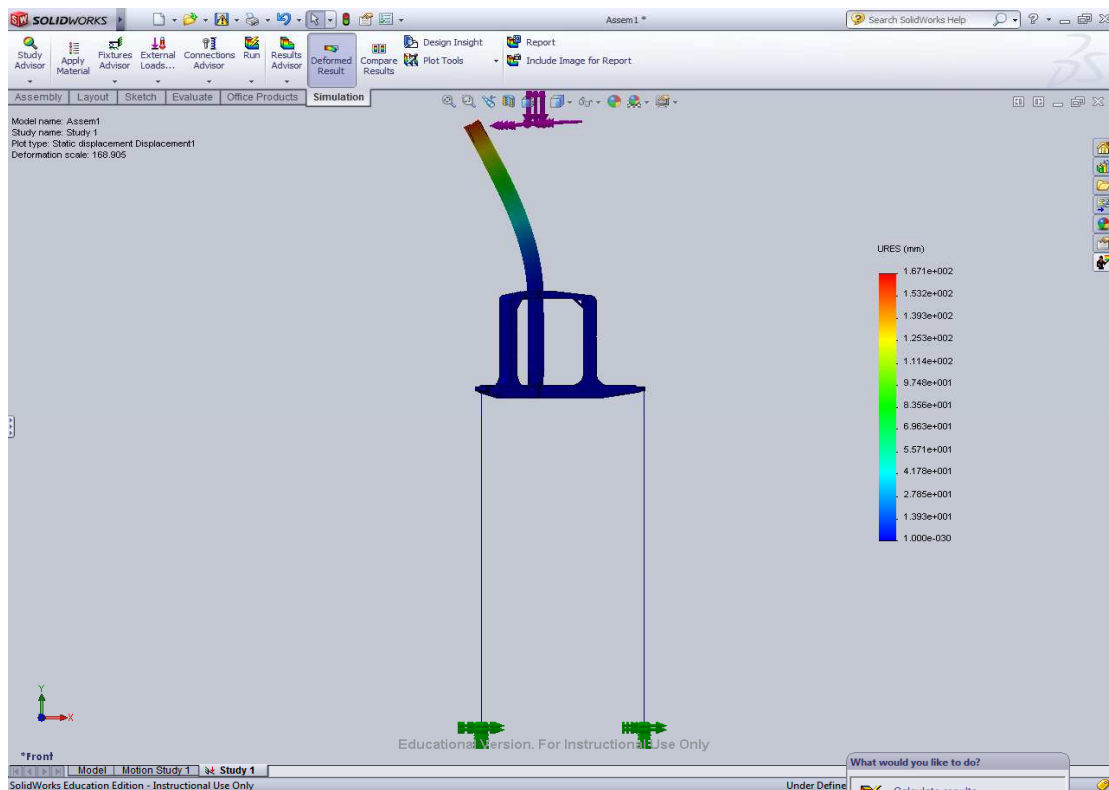


Εικόνα 47. Μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Misses



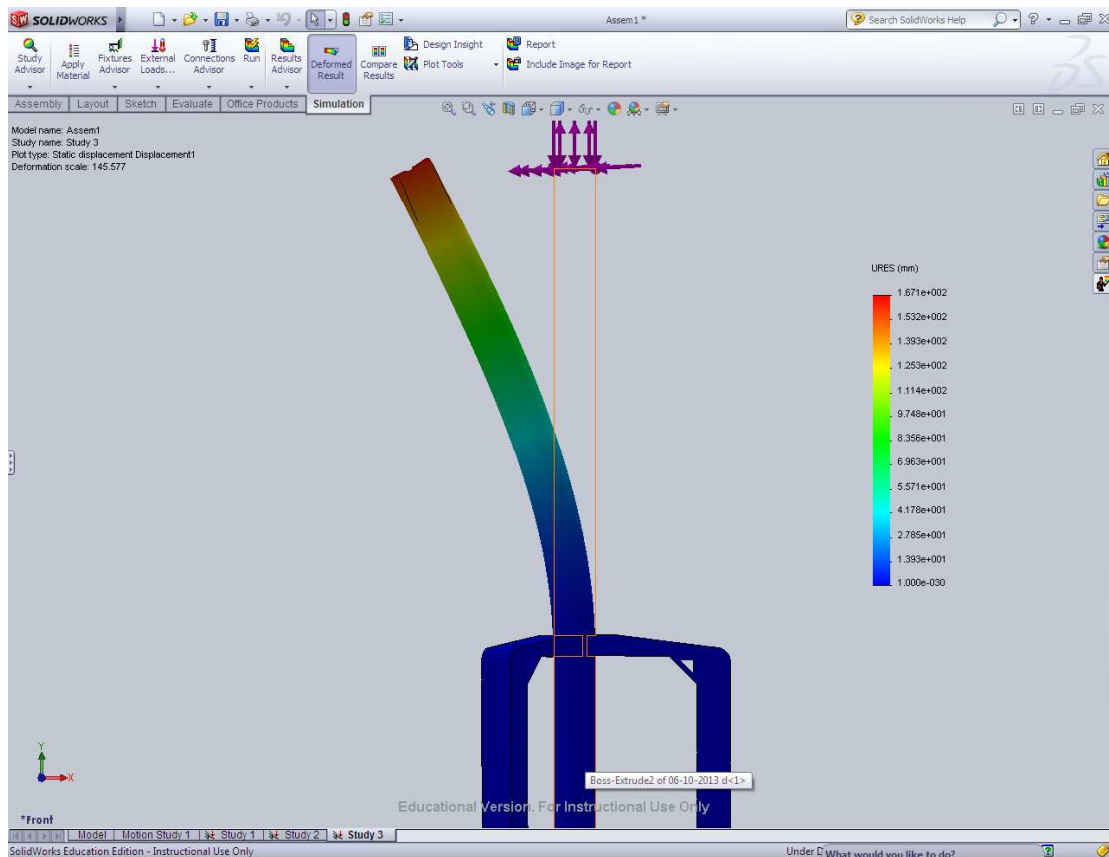
Εικόνα 48. Μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται η μέγιστη ισοδύναμη τάση που δέχεται το θεμέλιο ίση με  $63.833 \text{ (N/mm}^2\text{)}$



Εικόνα 49. Μέγιστη μετατόπιση ίση με 167 mm





Εικόνα 50. Μέγιστη μετατόπιση ίση με 167 mm

A/A	Ελάχιστη	Μέγιστη
Τάση Von Mises N/mm <sup>2</sup> (MPa)	1.095*10 <sup>-10</sup>	63.833
Μετατόπιση mm	0	167.116

Πίνακας 6. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση φόρτισης 1.6

## Περίπτωση φόρτισης: 2.1 : Η ανεμογεννήτρια σε παραγωγή και εμφανίζει βλάβη.

Οι καιρικές συνθήκες που λυθήκαν κατά τον υπολογισμό είναι

- Ταχύτητα ανέμου  $U_{\infty}=20$  m/s με φυσιολογική τυρβώδης ροή ανέμου
- ύψος κύματος  $H_s=5.9$ m με φυσιολογική κατάσταση της θάλασσας
- πυκνότητα αέρα  $\rho_{\text{air}}=1.225$ kg/m<sup>3</sup>
- συντελεστής ώσης  $C_T=0.19$
- επιφάνεια που διαγράφουν τα φτερά  $A_r=12469$ m<sup>2</sup>
- Η ανεμογεννήτρια λειτουργεί ανεξέλεγκτα μέχρι να σταματήσει.
- Ο συντελεστής φορτίου είναι 1,35

Μάζα:  $m=350000$ kg

Μέγιστη Οπισθέλκουσα στον άξονα της Α/Γ:  $T=(1/2)C_T \rho_{\text{air}} A_r U_{\infty}^2$   
 $=0.5*0.19*1.225\text{kg/m}^3*12469\text{m}^2(20\text{ m/s})^2=580431.95$  N

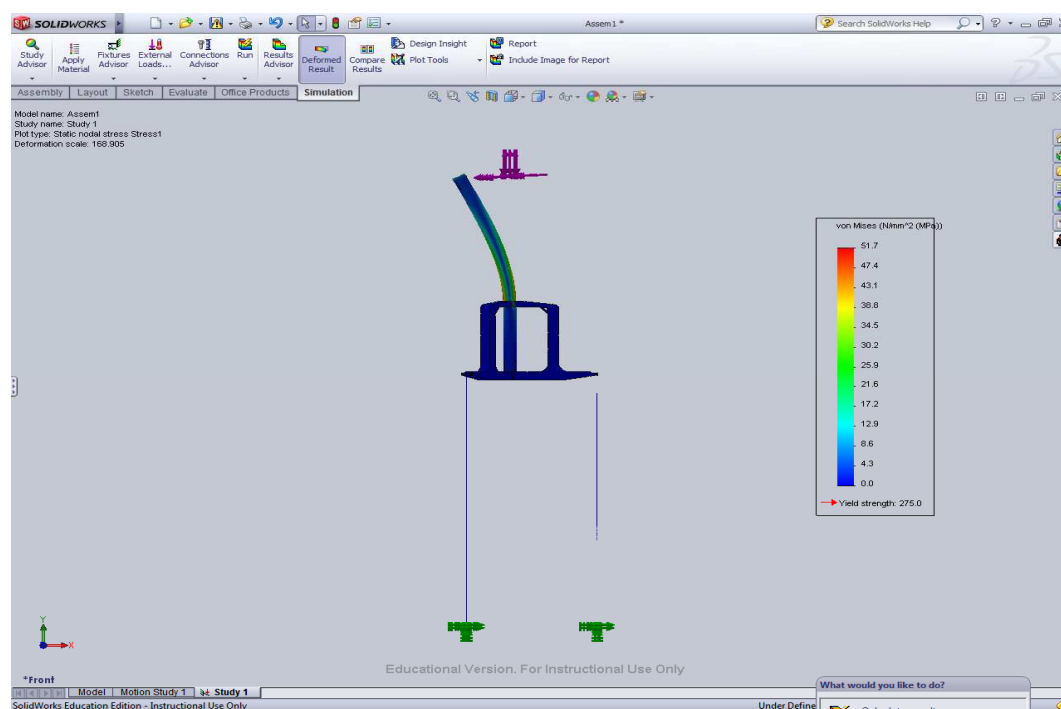
Μέγιστη Μηχανική ισχύς:  $P=T U_{\infty}= 11.6$  MW

$\omega=1.35$  rad/sec  $2*\pi$ N/60

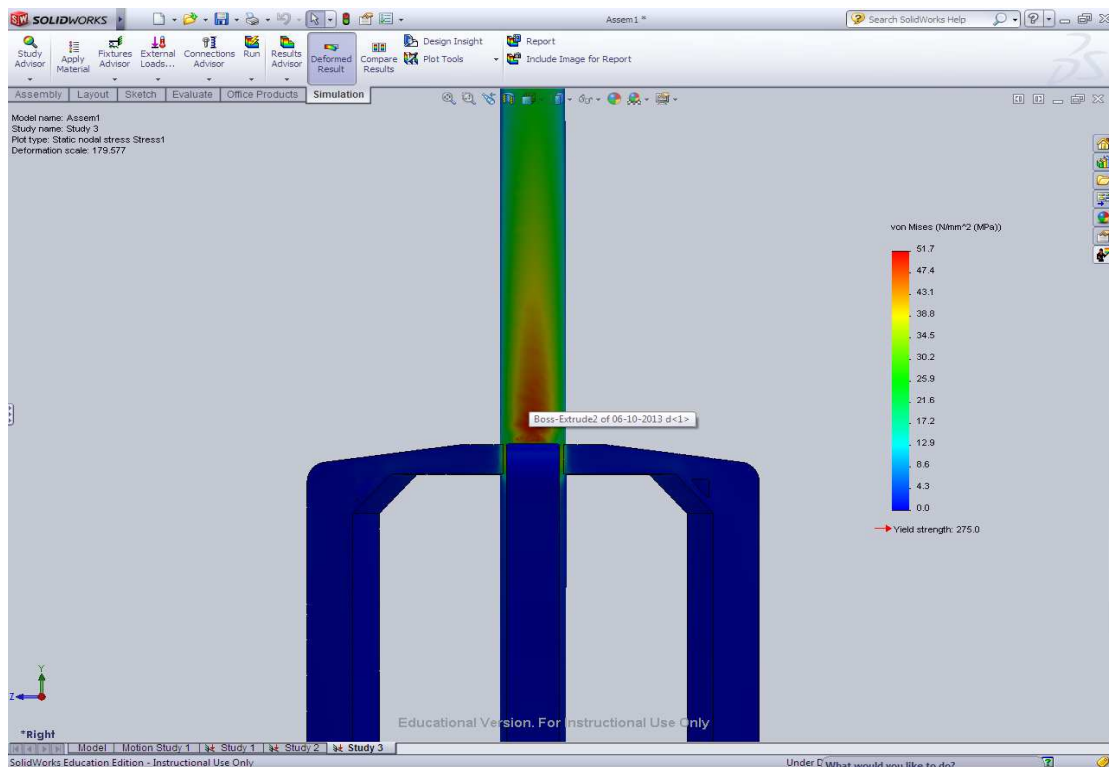
Μέγιστη Ροπή στον άξονα της Α/Γ, λόγω περιστροφής της:  $Q=8.6$  MNm

Τα υδροδυναμικά φορτία υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα solidworks και λήγθησαν υπόψιν απευθείας στον υπολογισμό.

### Αποτελέσματα ανάλυσης:

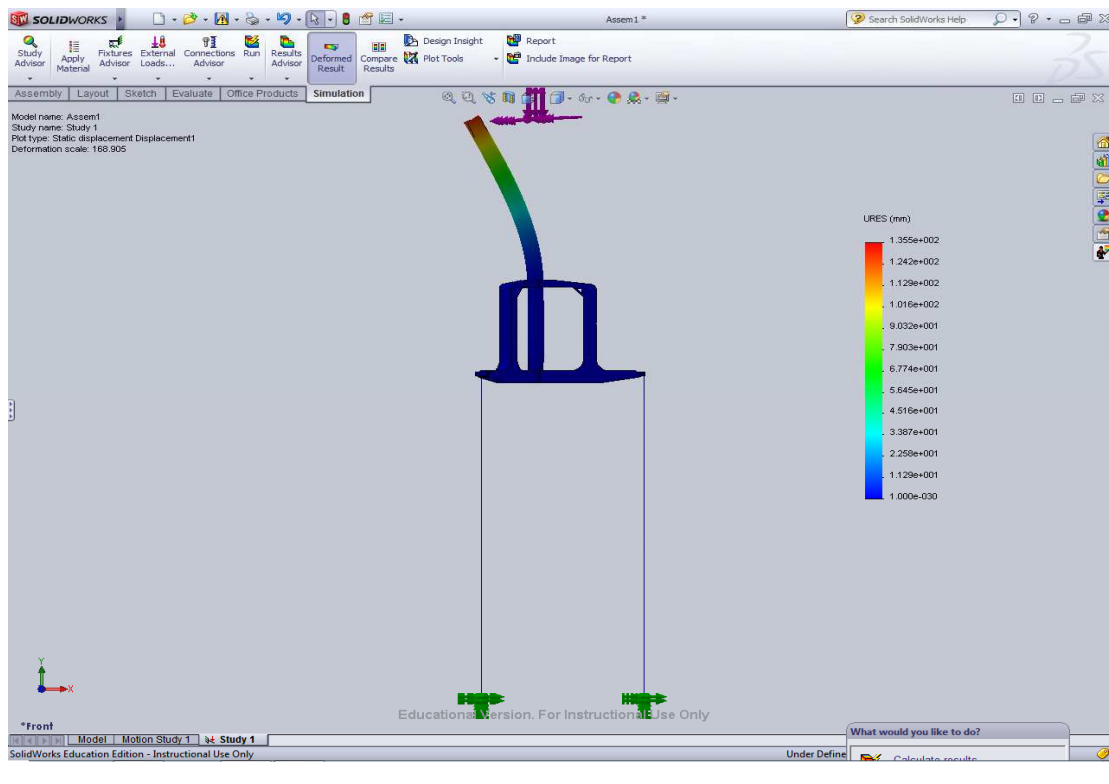


Εικόνα 51. Μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Misses

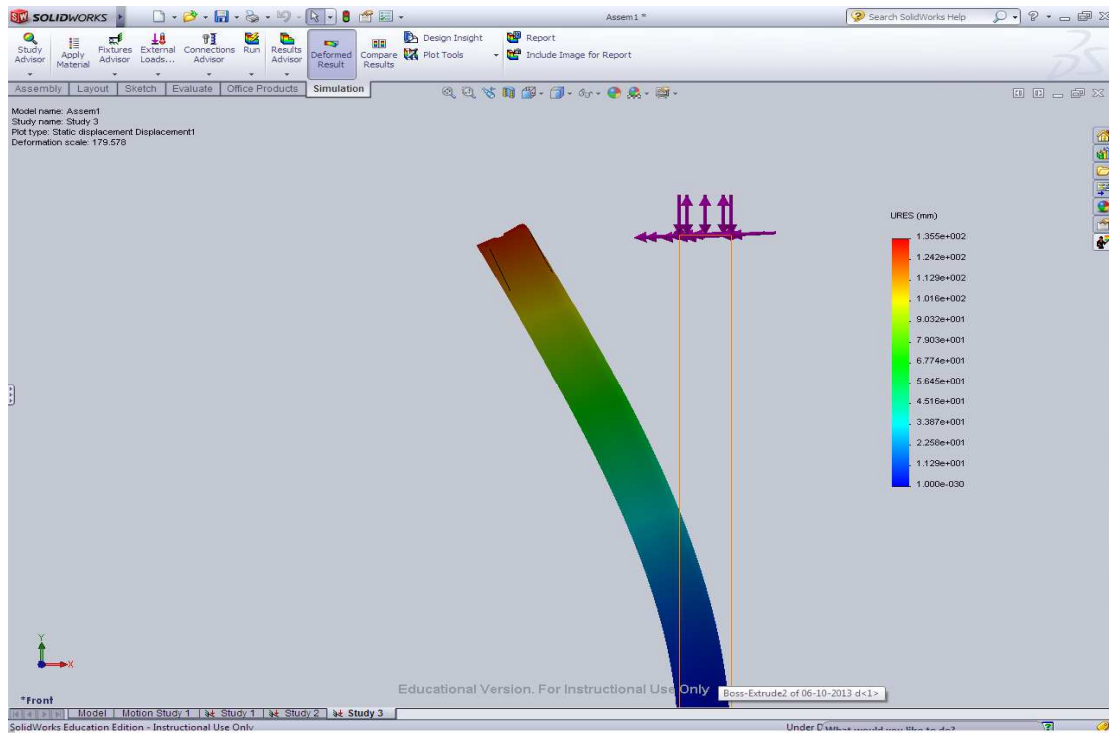


Εικόνα 52. Μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Mises

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται η μέγιστη τάση που δέχεται το θεμέλιο με μέγιστη τάση 51.75 (N/mm<sup>2</sup>)



Εικόνα 53. Μέγιστη μετατόπιση ίση με 135 mm



**Εικόνα 54. Μέγιστη μετατόπιση ίση με 135 mm**

A/A	Ελάχιστη	Μέγιστη
Τάση Von Mises N/mm <sup>2</sup> (MPa)	8.923*10 <sup>-11</sup>	51.75
Μετατόπιση mm	0	135.475

**Πίνακας 7. Συγκριτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση φόρτισης 2.1**

## Περίπτωση φόρτισης: 6.1 : Ανεμογεννήτρια εκτός λειτουργίας

Οι καιρικές συνθήκες που λυθήκαν κατά τον υπολογισμό είναι

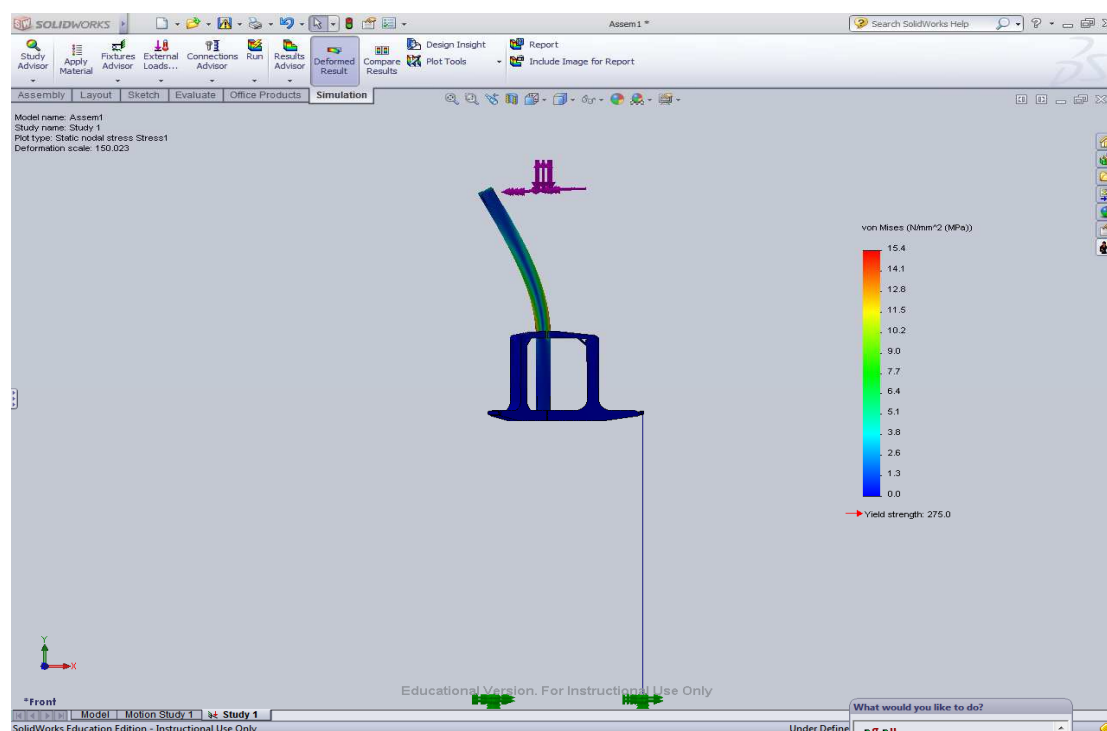
- Ταχύτητα ανέμου  $U_{\infty}=47.5\text{m/s}$  Με τυρβώδη ακραία ταχύτητα ανέμου
- ύψος κύματος  $H_s=15.04\text{m}$  με ακραίες συνθήκες θαλάσσης
- πυκνότητα αέρα  $\rho_{\text{air}}=1.225\text{kg/m}^3$
- συντελεστής ώσης  $C_T=0.01$
- επιφάνεια που διαγράφουν τα φτερά  $A_r=12469\text{m}^2$
- Η νασέλλα βρίσκεται υπό κλίση  $0^\circ$  έως  $8^\circ$  λόγω των ακραίων καιρικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή.
- Ο συντελεστής ισχύς είναι 1,35

ΜΜάζα:  $m=350000\text{kg}$

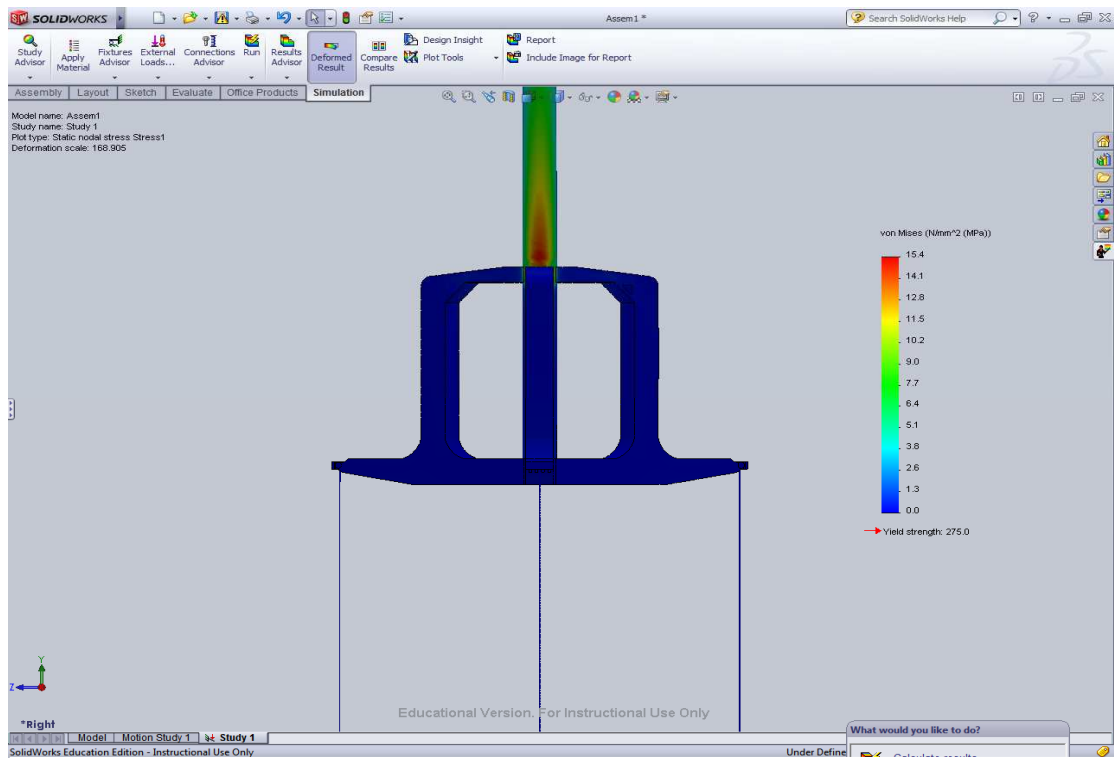
Μέγιστη Οπισθέλκουσα στον άξονα της Α/Γ:  $T=(1/2)C_T \rho_{\text{air}} A_r U_{\infty}^2$   
 $=0.5*0.01*1.225\text{kg/m}^3*12469\text{m}^2(47.5)^2=172315.73\text{ N}$

Τα υδροδυναμικά φορτία υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα solidworks και λήγθησαν υπόψιν απευθείας στον υπολογισμό.

### Αποτελέσματα ανάλυσης:

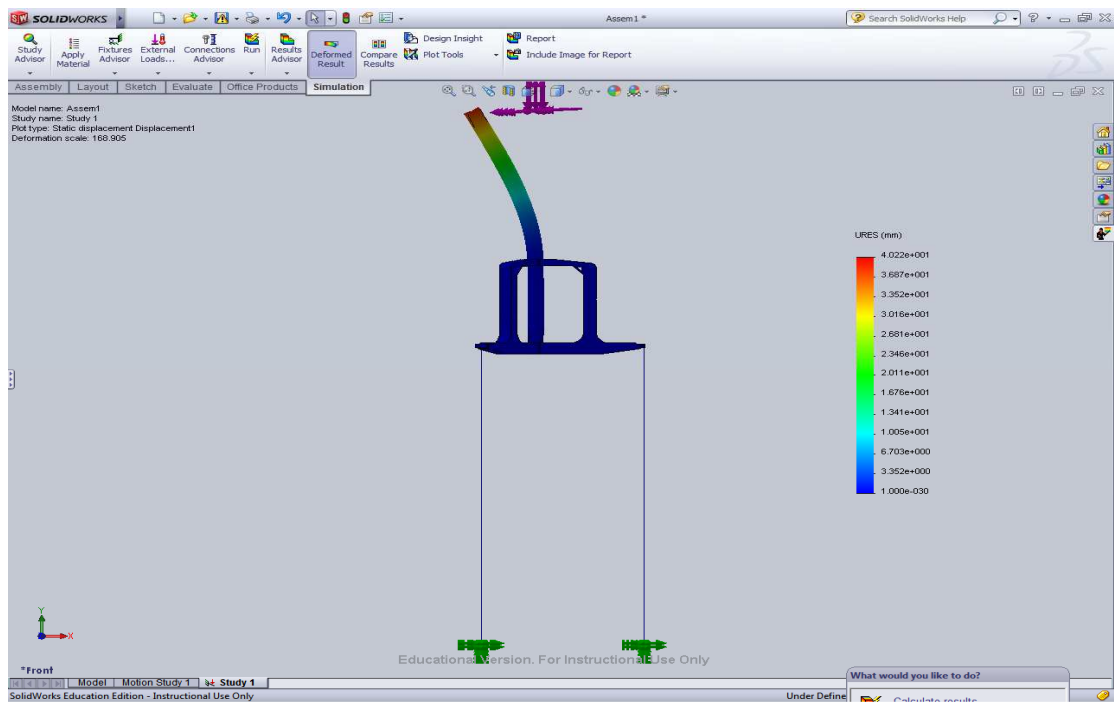


Εικόνα 55. Μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Misses

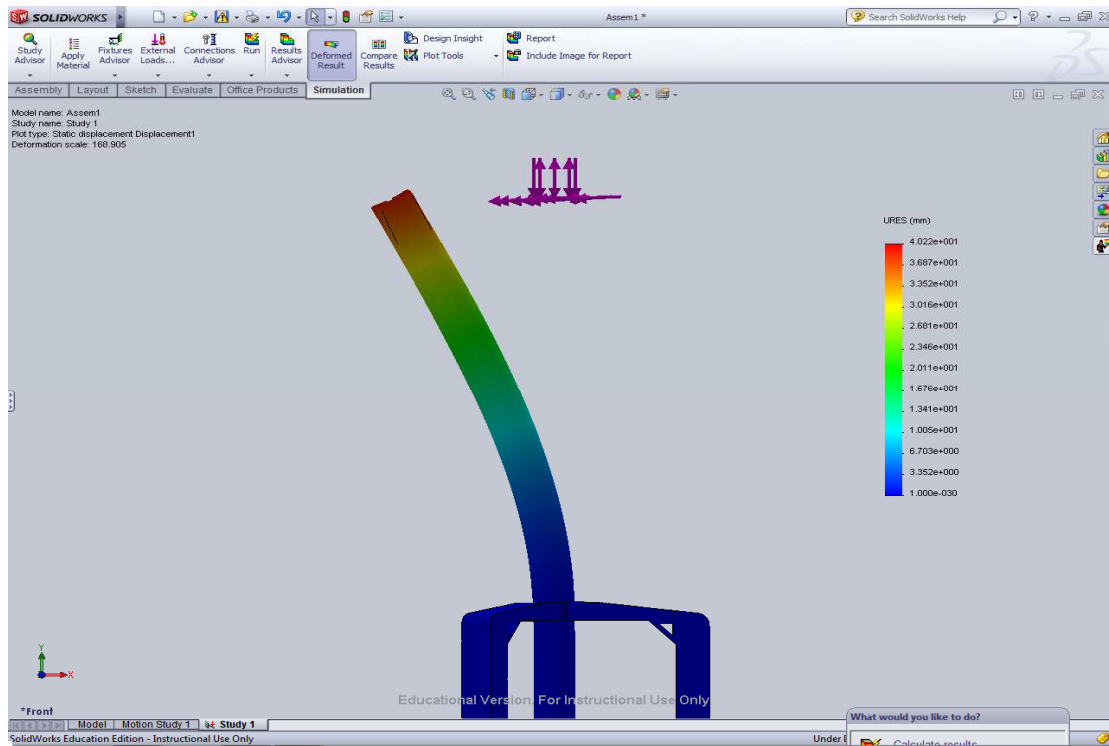


Εικόνα 56. Μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Misses

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται η μέγιστη τάση που δέχεται το θεμέλιο με μέγιστη τάση 15.363 (N/mm<sup>2</sup>)



Εικόνα 57. Μέγιστη μετατόπιση ίση με 40.22 mm



**Εικόνα 58. Μέγιστη μετατόπιση ίση με 40.22 mm**

A/A	Ελάχιστη	Μέγιστη
Τάση Von Mises N/mm <sup>2</sup> (MPa)	2.646*10 <sup>-11</sup>	15.363
Μετατόπιση mm	0	40.219

**Πίνακας 8. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για περίπτωση φόρτισης 6.1**

### Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στατικών αναλύσεων

Περίπτωση φόρτισης	Περιγραφή περίπτωσης	Τάση κατά Von Misses N/mm <sup>2</sup> (MPa) (Μέγιστη)	Μετατόπιση mm (Μέγιστη)
1.1		61.9	162.164
1.5		<b>64.941</b>	162.200
1.6		63.833	167.116
2.1		51.75	135.475
6.1		15.363	40.219

Πίνακας 9. Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τις περιπτώσεις φόρτισης.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Κατασκευάστηκε το μοντέλο πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας tension leg platform σε πραγματικές διαστάσεις για την εγκατάσταση του στη θάλασσα κοντά στα νησιά Σέτλαντ στα βορειοανατολικά της Σκωτίας. Είναι κενή από μέσα ώστε να μπορεί να επιπλέει στην θάλασσα και συγκρατείται με καλώδια από πολυεστέρα τα οποία συνδέονται με άγκυρες οι οποίες είναι πακτωμένες στον βυθό της θάλασσας για να εμποδίζουν την μετακίνηση της ανεμογεννήτριας.

Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Solidworks για τη διακριτοποίηση του μοντέλου καθώς και για την εφαρμογή των φορτίων οι οποίες ασκούνται στο θεμέλιο ώστε να διαπιστωθεί αν το μοντέλο θα αντέξει τις καταπονήσεις που θα υποστεί από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Οι τιμές των υδροδυναμικών φορτίων έχουν υπολογιστεί από το πρόγραμμα solidworks και φαίνονται στον πίνακα στο παράρτημα 1.

Στα διαγράμματα στο παράρτημα 2 φαίνεται τι υδροδυναμικά φορτία δέχεται το θεμέλιο σε κάθε πρόσκρουση του κύματος..

Η ανάλυση που έγινε στο μοντέλο που αναπτύχθηκε ήταν μόνο στατική.

Επιλέχτηκαν από το πρότυπο IEC 61400-3 ορισμένες περιπτώσεις φόρτισης, οι οποίες καταπονούν το θεμέλιο περισσότερο, και είναι πιο επίφοβες για να δημιουργήσουν κόπωση στα υλικά κατασκευής του θεμελίου με αποτέλεσμα να υπάρχει πρόβλημα αντοχής του σε μακροχρόνια περίοδο λειτουργίας

Από τις αναλύσεις που έγινε φαίνεται ότι η χειρότερη περίπτωση φόρτισης είναι η 1.5 μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Misses 64.941 MPa και μέγιστη μετατόπιση 162.2 mm

Σε κάθε περίπτωση η μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Von Misses είναι πολύ μικρότερη από την επιτρεπόμενη δυναμική αντοχή του υλικού που είναι 135 MPa για το st37 που και χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του μοντέλου.

Επιβεβαιώνεται λοιπόν η ορθότητα της διασυσσιολόγησης της θεμελίωσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΓΙΑ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

### 1. Νομοθεσία

Ο νόμος 3851/2010 που αφορά τη χορήγηση αδειών για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα καθορίζει κυρίως το αν η σχετική θαλάσσια περιοχή βρίσκεται εντός της περιοχής των χωρικών υδάτων, δηλαδή εντός της ζώνης των 12 μιλίων, ή πέρα από αυτό το όριο. Φυσικά οι νομοθετικές ρυθμίσεις διαφέρουν από χώρα σε χώρα.

Συγκεκριμένα κάθε εγκατάσταση πρέπει να ακολουθεί τους εκάστοτε εθνικούς κανονισμούς. Σε ορισμένες χώρες, όπως στη Γερμανία, προαπαιτούνται τα ίδια κριτήρια αδειοδότησης και νομικών αρχών όπως στη στεριά. Την ίδια στιγμή πρέπει να υπάρχει και η σύμφωνη γνώμη και άδεια από τους αντίστοιχους οργανισμούς που αφορούν τη χλωρίδα και την πανίδα καθώς και την προστασία περιοχών με υπό εξαφάνιση πουλιά. Οι περιφερειακές αρχές είναι τυπικά υπεύθυνες για την έκδοση οικοδομικών αδειών όπως και στην ξηρά. Για τις κατασκευαστικές επιχειρήσεις στον πυθμένα της θάλασσας (θεμελίωση, θαλάσσια καλώδια), υπάρχουν επίσης κανονισμοί που πρέπει να τηρούνται. Η νομική κατάσταση στην περιοχή της αποκλειστικής οικονομικής ζώνης είναι πολύ λιγότερο σαφής και οδηγεί σε μια συζήτηση για τις αρχές του διεθνούς δικαίου, ανεξάρτητα από τη χωροθέτηση των ανεμογεννητριών. Όλοι οι εθνικοί και ευρωπαϊκοί νόμοι έχουν ισχύ αυστηρά μέχρι το όριο των χωρικών υδάτων. Σε ορισμένες χώρες υπάρχει η τάση να καταστεί δυνατή η απλοποίηση της μεθόδου χορήγησης αδειών στην αποκλειστική οικονομική ζώνη.

### 2. Κριτήρια Αδειοδότησης

Τα κριτήρια βάσει των οποίων εξετάζεται η αίτηση άδειας για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών στην Ελλάδα είναι τα εξής:

- Η ασφάλεια στην κυκλοφορία για τις πλωτές και εναέριες μεταφορές
- Οικολογικές επιπτώσεις
- Παράβαση των οικονομικών συμφερόντων των τρίτων
  - **Ασφάλεια κυκλοφορίας για πλωτές και εναέριες μεταφορές**

Τις περισσότερες φορές οι περιοχές κοντά στις ακτές αποτελούν διαδρομές διέλευσης πλοίων.

Προσοχή πρέπει να δοθεί όχι μόνο στις πολιτικές μεταφορές αλλά και στη χρήση των περιοχών από το στρατό για τις ασκήσεις ή τις εγκαταστάσεις. Η πολιτική αεροπορία είναι μικρότερο πρόβλημα, αλλά πιθανά απαιτούνται περιορισμοί ύψους των ανεμογεννητριών καθώς και οπτικά - ηλεκτρονικά προειδοποιητικά σήματα.

- **Οικολογικές επιπτώσεις**

Οι λέξεις κλειδιά σύμφωνα με τις οποίες εξετάζονται οι οικολογικές επιπτώσεις είναι:

- Πτηνά : μετανάστευση των πουλιών, συγκρούσεις με πουλιά, περιοχές αναπαραγωγής, πηγές τροφής για τα πουλιά, κ.λπ.
- Θαλάσσια θηλαστικά (μικρές φάλαινες, φώκιες) : διαταραχές των ζώων από τον υποβρύχιο ήχο και ενδεχομένως από ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που προέρχονται από τις ανεμογεννήτριες.
- Ψάρια : επίδραση των τόπων αναπαραγωγής και διατροφής τους, αλλαγές στα ωκεάνια ρεύματα και στη φύση του βυθού λόγω των θεμελίων και πιθανή επιρροή στη συμπεριφορά των ψαριών.
- Μικρές μορφές ζωής στον βυθό της θάλασσας: αρνητικές επιπτώσεις στον εκάστοτε βιότοπο ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των εργασιών του κτιρίου.
- Διατήρηση του τοπίου: η προβολή των ανεμογεννητριών από τη γη (οπτική όχληση).

Η ορατότητα από τη στεριά, φαίνεται πως έχει απασχολήσει τους οικολογικούς οργανισμούς και την τουριστική βιομηχανία σε μεγάλο βαθμό.

Στη Δανία, για παράδειγμα, λόγω της απόστασης από την ακτή η ορατότητα είναι ελάχιστη και μάλιστα όταν η ατμόσφαιρα είναι αρκετά καθαρή. Η κατάσταση είναι παρόμοια και στη Γερμανία. Θα πρέπει να τονισθεί ότι, λόγω της καμπυλότητας της γης, οι ανεμογεννήτριες θα εξαφανίζονται από τον ορίζοντα σε απόσταση 20 με 30 χιλιόμετρα, σε κάθε περίπτωση.

- **Οικονομικό ενδιαφέρον:** Όταν ένα νέο πεδίο εμφανίζεται, πρέπει να οριοθετηθεί με τα υφιστάμενα οικονομικά συμφέροντα. Ειδικότερες περιπτώσεις είναι οι εξής:
- Παρεμπόδιση της αλιείας
- Παρεμπόδιση κάθε πιθανής εκμετάλλευσης του ορυκτού πλούτου
- Παρατήρηση των ήδη υφιστάμενων εγκαταστάσεων υποδομής(αγωγοί πετρελαίου και φυσικού αερίου, θαλάσσια ηλεκτρικά καλώδια κ.λπ.)

### 3. Η κατάσταση στην Ελλάδα

Πρόσφατα το υπουργείο Περιβάλλοντος (ΥΠΕΚΑ) παρουσίασε σε ενεργειακούς φορείς, εταιρείες, εκπροσώπους υπουργείων και μη κυβερνητικών οργανώσεων σχέδια για την εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων την περίοδο 2012-2017. Στόχος είναι να εγκατασταθούν πάρκα συνολικής ισχύος περίπου 1.200 MW. Η εγκατάσταση των αιολικών πάρκων θα πρέπει να τηρεί τα ακόλουθα κριτήρια που όρισε το ΥΠΕΚΑ. Έτσι το βάθος της θάλασσας θα πρέπει να είναι μικρότερο από 50 μέτρα, η απόσταση από την ακτή μέχρι 6 μίλια (10 χιλιόμετρα), να χαρακτηρίζονται από μικρή περιβαλλοντική και οπτική όχληση από τις ακτές (μηχανές ισχύος 5 MW, με διάμετρο πτερυγίων 125 μέτρα και απόσταση της μιας από την άλλη 1.000 μέτρα), ικανοποιητική ταχύτητα ανέμου και να βρίσκονται εκτός στρατιωτικών περιοχών. Προκειμένου να προχωρήσει η διαδικασία αδειοδότησης για τα θαλάσσια αιολικά πάρκα απαιτείται η προκαταρκτική αδειοδότηση των περιοχών ενδιαφέροντος επί των οποίων θα γίνουν στη συνέχεια οι αναλυτικές μελέτες και η διαδικασία εκπόνησης Στρατηγικών

Μελετών Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΣΜΠΕ). Μέσα από τη διαδικασία αυτή θα καθοριστεί η ακριβής θέση των θαλάσσιων αιολικών πάρκων.

Στη συνέχεια θα γίνει η προκήρυξη των θέσεων, με αντικείμενο την προσφερόμενη τιμή πώλησης μεγαβατώρας στο σύστημα ή το ετήσιο μίσθωμα που θα καταβάλλει στο Δημόσιο ο παραχωρησιούχος. Για να εξασφαλιστεί η ταχύτητα της ανάπτυξης, η αξιοπιστία και η οικονομικότητα των εγκαταστάσεων, επιλέγεται για την πρώτη φάση η τεχνολογία της θεμελίωσης των ανεμογεννητριών στον θαλάσσιο πυθμένα, αποκλείοντας τις πλωτές ανεμογεννήτριες και το μεγάλο θαλάσσιο βάθος.

Η αξιοποίηση της θαλάσσιας αιολικής ενέργειας μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην αποκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι σημαντικής σημασίας δεδομένων των γεωγραφικών ιδιοτεροτήτων της Ελλάδας (ορεινή, νησιώτικη χώρα). Η αποκέντρωση αυτή θα οδηγήσει με τη σειρά της σε σημαντικά οφέλη για τις τοπικές κοινωνίες και οικονομίες όσο και κατ'επέκταση για το σύνολο της χώρας, μέσω της μείωσης αναγκών και κόστους μεταφοράς της ενέργειας

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΙΤΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΑ

ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ	ΝΟΜΟΣ	ΔΗΜΟΣ	ΘΕΣΗ	ΠΛΗΘΟΣ Α/Γ	ΤΥΠΟΣ	ΙΣΧΥΣ (MW)
VENERGIA ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΕ	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ	Κ.ΟΘΩΝΩΝ ΚΑΙ ΕΡΕΙΚΟΥΣΗΣ	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΠΟΝΤΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	32	VESTAS V90	3.0
ΤΖΑΣΠΕΡ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΛΛΑΔΟΣ ΑΕ & ΣΙΑ ΚΕΡΚΥΡΑ 1 ΕΕ	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ	ΟΘΩΝΩΝ	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡ. ΒΑ ΝΗΣΟΥ ΟΘΩΝΟΙ	44	REPOWER 5M	5.0
ΤΖΑΣΠΕΡ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΛΛΑΔΟΣ ΑΕ & ΣΙΑ ΚΕΡΚΥΡΑ 2 ΕΕ	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ	ΜΑΘΡΑΚΙΟΥ	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡ. ΒΟΡΕΙΑ Ν. ΜΑΘΡΑΚΙΟΥ	55	REPOWER 5M	5.0
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΔΟΜΙΚΗ ΑΝΕΜΟΣ Α.Ε.	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ	ΜΑΘΡΑΚΙΟΥ	Β.ΙΟΝΙΟ-ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΑ Ν. ΚΕΡΚΥΡΑΣ	45	SIEMENS SWT107	3.6
ΑΙΟΛΙΚΗ ΠΛΑΤΕΙΑ-ΕΝ.ΤΕ.ΚΑ - ΕΝΟΡΑ - ΦΙΛΙΠΠΙΔΗΣ	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ	Κ. ΜΑΘΡΑΚΙΟΥ	ΠΛΑΤΕΙΑ	11	NM92	2.75
ΒΟΥΛΓΑΡΑΚΗΣ Ε. ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΕΠΕ	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΑΝΑΤ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ Σ & ΘΡΑΚΗΣ	ΕΒΡΟΥ	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟ ΥΠΟΛΗΣ	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡ. ΔΙΚΕΛΑ ΑΛΕΞ/ΠΟΛΗ	10	AREVA MULTIBRID M5000	5.0
ΘΡΑΚΙΚΗ ΑΙΟΛΙΚΗ 1 Α.Ε.	ΑΔΕΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ Σ & ΘΡΑΚΗΣ	ΕΒΡΟΥ	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟ ΥΠΟΛΗΣ	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ	60	SIEMENS SWT/3.6	3.6
ΑΙΟΛΙΚΗ ΠΡΟΒΑΤΑ ΤΡΑΪΑΝΟΥΠΟΛΕΩΣ Ο.Ε.	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ Σ & ΘΡΑΚΗΣ	ΕΒΡΟΥ	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟ ΥΠΟΛΗΣ	ΘΡΑΚΙΚΟ ΠΕΛΑΓΟΣ	95	REPOWER 6M	6.15
CITY ELECTRIC Α.Ε	ΑΔΕΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΒΟΡΕΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ	ΛΕΣΒΟΥ	ΜΟΥΔΡΟΥ	ΠΛΑΚΑ	81	REpower 6M	6.15
ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΒΟΡΕΙΟΣ ΕΛΛΑΣ ΑΒΕΕ	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΒΟΡΕΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ	ΛΕΣΒΟΥ	ΜΟΥΔΡΟΥ	ΠΛΑΚΑ-ΚΕΡΟΣ-ΑΓ.ΕΙΡΗΝΗ	135	SIEMENS-SWT-3.6-107	3.6

ΤΖΑΣΠΕΡ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΛΛΑΣ ΑΕ & ΣΙΑ ΑΓ. ΕΥΣΤΡΑΤΙΟ Σ ΕΕ	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΒΟΡΕΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ	ΛΕΣΒΟΥ	ΑΓΙΟΥ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΥ	ΒΒΑ Ν. ΑΓ.ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΥ	89	REPOWER 5M	5.0
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚ Η Α.Β.Ε.Τ.Ε.	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΒΟΡΕΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ	ΛΕΣΒΟΥ	ΑΓΙΟΥ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΥ	ΑΗ-ΣΤΡΑΤΗΣ	7	REPOWER 5M	5.0
ΤΖΑΣΠΕΡ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΛΛΑΣ Α.Ε. & ΑΝΔΡΟΣ Ε.Ε.	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΝΟΤΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ	ΚΥΚΛΑΔΩΝ	ΥΔΡΟΥΣΑΣ	ΘΑΛΑΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ Ν.ΑΝΔΡΟΥ ΒΒΑ	85	SIEMENS-SWT-3.6-107	3.6
ΚΥΩΝ ΕΠΕ	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ	ΕΥΒΟΙΑΣ	ΚΥΜΗΣ	ΘΑΛΑΣΣΙΟΣ ΧΩΡΟΣ	60	NORDEX	5.0
ΠΛΕΙΑΔΕΣ ΑΙΟΛΙΚΗ Α.Ε.	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΑΤΤΙΚΗΣ	ΑΤΤΙΚΗΣ	ΡΑΦΗΝΑΣ	ΚΟΛΠΟΣ ΠΕΤΑΛΙΩΝ	45	REPOWER 6M	6.15
ARGOS ΑΙΟΛΟΣ Α.Ε	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ	ΕΥΒΟΙΑΣ	ΚΑΡΥΣΤΟΥ	ΘΑΛΑΣΣΙΟΣ ΧΩΡΟΣ ΣΤΕΝΟΥ ΚΑΦΗΡΕΑ	50	VESTAS V90	3.0
ΜΙΝΩΙΚΑ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ Α.Ε	ΑΙΤΗΣΗ ΣΕ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	ΝΟΤΙΟΥ ΑΙΓΑΙΟΥ	ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΟΥ	ΚΑΣΟΥ	ΘΑΛ. ΠΕΡ. ΔΥΤ ΚΑΡΠΑΘΟΥ ΒΟΡ ΚΑΣΟΥ	56	REPOWER 6M	6.15

**Πίνακας 10.** Αιτήσεις που έχουν γίνει στην Ελλάδα για την εκμετάλλευση του θαλάσσιου αιολικού δυναμικού και από ποιες εταιρίες.

#### 4. Υπεράκτια αιολικά πάρκα στην Ευρώπη

Συνολικά 277 νέες υπερράκτιες ανεμογεννήτριες, συνολικής ισχύος 1.045 (MW), συνδέθηκαν στην Ευρώπη κατά τους πρώτους έξι μήνες του 2013. Η ισχύς αυτή είναι διπλάσια σε σύγκριση με την ίδια περίοδο το 2012, όταν είχαν εγκατασταθεί μόλις 523,2 MW. Επιπλέον, εγκαταστάθηκαν 268 θεμελιώσεις και ανεγέρθηκαν χωρίς να συνδεθούν ακόμη, 254 ανεμογεννήτριες, κατά τη διάρκεια των πρώτων 181 ημερών του έτους. Το σύνολο των υπερράκτιων εγκαταστάσεων στην Ευρώπη είναι σήμερα 6.040 MW, σε 58 αιολικά πάρκα σε δέκα χώρες – αυξημένο από 4.336 MW, τον Ιούνιο του 2012. Είκοσι ένα Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα είναι υπό κατασκευή ή υπό προετοιμασία κατασκευής, συνολικής ισχύος 5.694 MW. Οι 277 ανεμογεννήτριες που συνδέθηκαν πλήρως κατά το πρώτο εξάμηνο του 2013 βρίσκονται σε επτά αιολικά πάρκα: Thornton Bank (BE), Gunfleet Sands 3 (UK), Lincs (UK), London Array (UK), Teesside (UK), Anholt (DK), BARD offshore 1 (DE).

Συγκεντρωτικός πίνακας 1<sup>ου</sup> εξαμήνου 2013

<b>Χώρα</b>	<b>Αριθμός ΑΓ</b>	<b>Ισχύς σε MW</b>
Βέλγιο	12	73,8
Δανία	98	352,8
Γερμανία	21	105
Ην. Βασίλειο	146	513,5
Σύνολο	277	1045,1

**Πίνακας 11.**

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1. Τιμές των υδροδυναμικών φορτίων

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Delta	Criteria
GG Normal Force 1	[N]	134662,9055	134531,3537	134169,1435	134820,1817	132,434568	2111,625866
GG X - Component of Normal Force 1	[N]	133410,1297	133305,616	132961,0866	133536,5801	108,6373244	1976,589736
GG Y - Component of Normal Force 1	[N]	17548,36333	17522,30854	16793,99138	17977,32363	348,5807986	1305,893993
GG Z - Component of Normal Force 1	[N]	-	-	-	-	-	-
GG Force 1	[N]	5281,131777	4587,566884	5281,131777	4206,305416	262,1527527	165,9817692
GG X - Component of Force 1	[N]	136887,327	136759,4959	136386,2571	137052,0549	133,1322766	2117,600357
GG Y - Component of Force 1	[N]	135663,3461	135562,9311	135207,624	135796,9896	109,6686614	1983,811973
GG Z - Component of Force 1	[N]	17482,91432	17453,06869	16729,55786	17908,84206	347,9473709	1307,582204
GG Shear Force 1	[N]	-	-	-	-	-	-
GG X - Component of Shear Force 1	[N]	5286,255824	4584,819287	5286,255824	4204,832531	262,2167221	165,9819797
GG Y - Component of Shear Force 1	[N]	2254,172614	2258,385216	2247,57349	2271,352897	2,960305211	7,787795583
GG X - Component of Shear Force 1	[N]	2253,216444	2257,315148	2246,491176	2270,237892	3,035506049	7,812338722
GG Y - Component of Shear Force 1	[N]	-	-	-	-	-	-
GG Z - Component of Shear Force 1	[N]	65,44900587	-69,2398561	76,90721173	64,15032635	2,880900845	2,179520897

**Πίνακας 12 Υδροδυναμικά φορτία για την φόρτιση 1.1**

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Delta	Criteria
GG Normal Force 1	[N]	113915,0613	113928,8588	113652,4398	114184,6538	502,8799391	1723,072267
GG X - Component of Normal Force 1	[N]	106556,1504	106685,1126	106536,5525	106913,3841	308,8757748	1530,596845
GG Y - Component of Normal Force 1	[N]	-40279,12643	-39974,462	-40477,8294	-39516,1977	677,7991602	817,3149512
GG Z - Component of Normal Force 1	[N]	-	-	-	-	-	-
GG X - Component of Normal Force 1	[N]	-141,3613322	126,8076166	511,1579046	124,5779814	380,6990263	110,3864437



GG Force 1	[N]	115722,4874	115726,0492	115462,9732	115970,0343	502,0447465	1726,634869
GG X - Component of Force 1	[N]	108494,6285	108613,161	108472,8904	108849,4436	311,2388511	1536,92548
GG Y - Component of Force 1	[N]	-40256,57389	39944,82224	-40440,4071	39497,79306	676,807523	817,7494572
GG Z - Component of Force 1	[N]	-133,9008462	119,9722048	504,3720733	130,4927741	380,3966935	110,3246276
GG Shear Force 1	[N]	1938,623633	1928,330939	1915,516024	1938,623633	2,866958022	14,47755213
GG X - Component of Shear Force 1	[N]	1938,478092	1928,048393	1915,47387	1938,478092	2,865916504	14,4764122
GG Y - Component of Shear Force 1	[N]	22,55253463	29,63976756	12,68704018	48,62048028	2,24420766	1,272940414

Πίνακας 13 Υδροδυναμικά φορτία για την φόρτιση 1.5

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Delta	Criteria
GG Normal Force 1	[N]	166475,6633	165790,3349	165320,7281	166475,6633	984,210526	2569,449757
GG X - Component of Normal Force 1	[N]	161855,9097	161250,5075	160947,7855	161855,9097	630,8376762	2429,932778
GG Y - Component of Normal Force 1	[N]	-38902,61497	38357,18073	39651,96453	36980,53296	1493,168674	902,1787056
GG Z - Component of Normal Force 1	[N]	-1843,239464	3447,828179	-4861,01736	1843,239464	2263,30995	195,5412231
GG Force 1	[N]	168337,705	167650,2019	167180,8009	168337,705	988,1687159	2576,066853
GG X - Component of Force 1	[N]	163772,5517	163165,5355	162882,2428	163772,5517	639,6084024	2436,459337
GG Y - Component of Force 1	[N]	-38894,24879	38343,15016	39621,33023	36982,47026	1490,837626	903,541388
GG Z - Component of Force 1	[N]	-1836,209414	3442,931535	4864,110032	1836,209414	2270,088856	195,3393886
GG Shear Force 1	[N]	1916,673159	1915,135907	1863,191682	1950,442571	13,35484524	18,69193712
GG X - Component of Shear Force 1	[N]	1916,642007	1915,02799	1863,074504	1950,441451	13,36596256	18,68937714
GG Y - Component of Shear Force 1	[N]	8,366178415	14,03057573	-4,73859335	33,27216057	3,776770903	3,112618691

Πίνακας 14 Υδροδυναμικά φορτία για την φόρτιση 1.6

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Delta	Criteria
GG Normal Force 1	[N]	134662,9055	134531,3537	134169,1435	134820,1817	132,434568	2111,625866
GG X - Component of Normal Force 1	[N]	133410,1297	133305,616	132961,0866	133536,5801	108,6373244	1976,589736
GG Y - Component of Normal Force 1	[N]	17548,36333	17522,30854	16793,99138	17977,32363	348,5807986	1305,893993
GG Z - Component of Normal Force 1	[N]	-5281,131777	-4587,566884	-5281,131777	-4206,305416	262,1527527	165,9817692
GG Force 1	[N]	136887,327	136759,4959	136386,2571	137052,0549	133,1322766	2117,600357
GG X - Component of Force 1	[N]	135663,3461	135562,9311	135207,624	135796,9896	109,6686614	1983,811973
GG Y - Component of Force 1	[N]	17482,91432	17453,06869	16729,55786	17908,84206	347,9473709	1307,582204
GG Z - Component of Force 1	[N]	-5286,255824	-4584,819287	-5286,255824	-4204,832531	262,2167221	165,9819797
GG Shear Force 1	[N]	2254,172614	2258,385216	2247,57349	2271,352897	2,960305211	7,787795583
GG X - Component of Shear Force 1	[N]	2253,216444	2257,315148	2246,491176	2270,237892	3,035506049	7,812338722
GG Y - Component of Shear Force 1	[N]	-65,44900587	-69,2398561	-76,90721173	-64,15032635	2,880900845	2,179520897

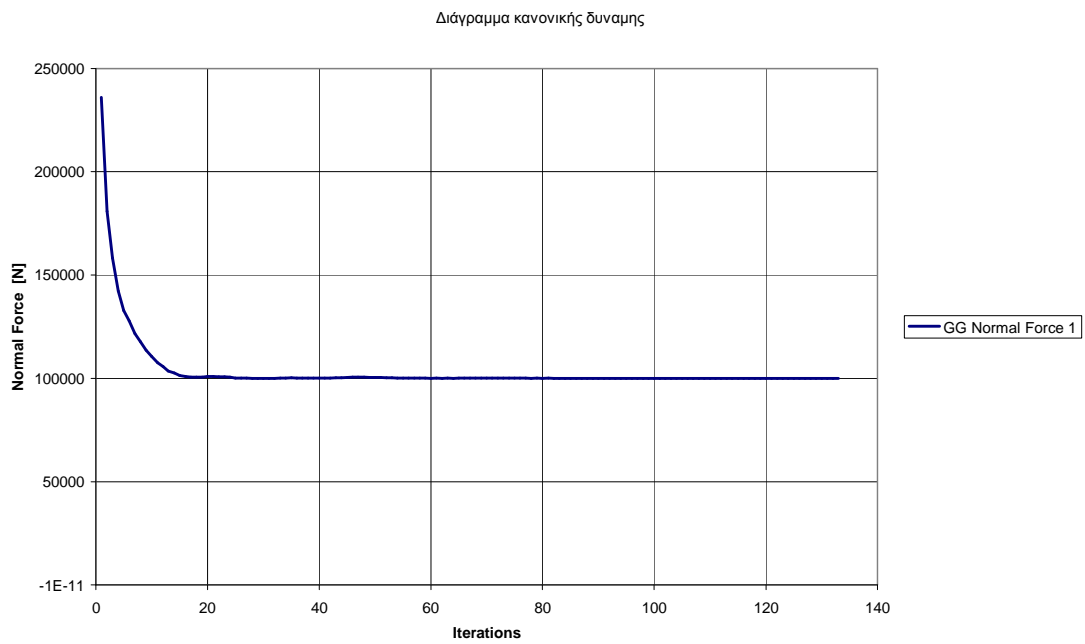
Πίνακας 15 Υδροδυναμικά φορτία για την φόρτιση 2.1

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Delta	Criteria
GG Normal Force 1	[N]	166475,6633	165790,3349	165320,7281	166475,6633	984,210526	2569,449757
GG X - Component of Normal Force 1	[N]	161855,9097	161250,5075	160947,7855	161855,9097	630,8376762	2429,932778
GG Y - Component of Normal Force 1	[N]	-38902,61497	-38357,18073	-39651,96453	-36980,53296	1493,168674	902,1787056
GG Z - Component of Normal Force 1	[N]	-1843,239464	-3447,828179	-4861,01736	-1843,239464	2263,30995	195,5412231
GG Force 1	[N]	168337,705	167650,2019	167180,8009	168337,705	988,1687159	2576,066853
GG X - Component of Force 1	[N]	163772,5517	163165,5355	162882,2428	163772,5517	639,6084024	2436,459337
GG Y -	[N]	-38894,24879	-38894,24879	-38894,24879	-38894,24879	1490,837626	903,541388

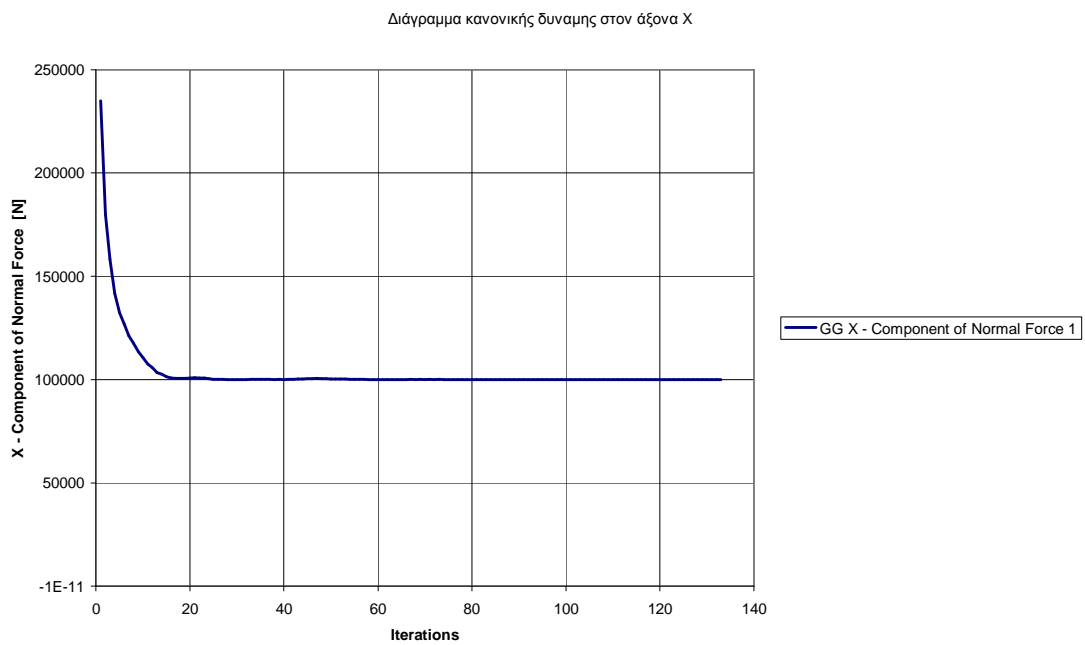
Component of Force 1			38343,15016	39621,33023	36982,47026		
GG Z - Component of Force 1	[N]	-1836,209414	3442,931535	4864,110032	1836,209414	2270,088856	195,3393886
GG Shear Force 1	[N]	1916,673159	1915,135907	1863,191682	1950,442571	13,35484524	18,69193712
GG X - Component of Shear Force 1	[N]	1916,642007	1915,02799	1863,074504	1950,441451	13,36596256	18,68937714
GG Y - Component of Shear Force 1	[N]	8,366178415	14,03057573	-4,73859335	33,27216057	3,776770903	3,112618691

**Πίνακας 16 Υδροδυναμικά φορτία για την φόρτιση 6.1**

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2. Διαγράμματα υδροδυναμικών φορτίων

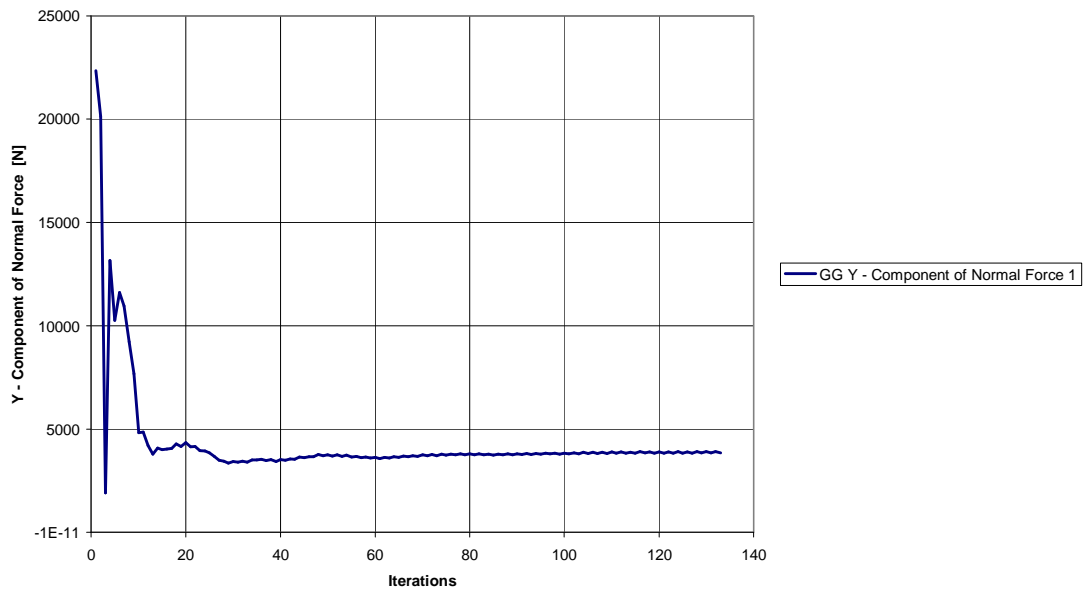


Γράφημα 2.



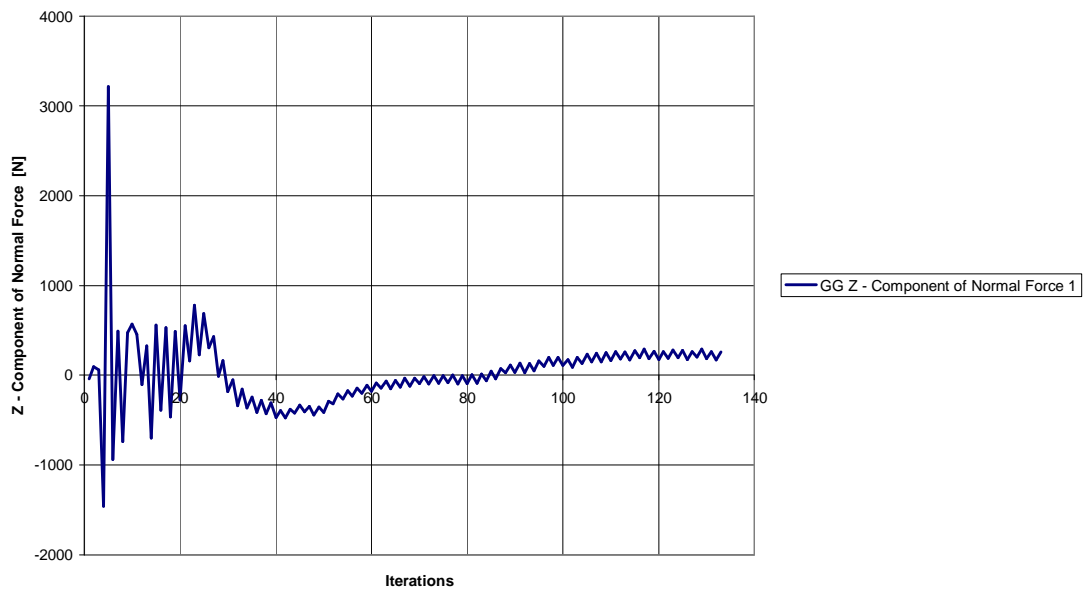
Γράφημα 3.

Διάγραμμα κανονικής δύναμης στον άξονα Y

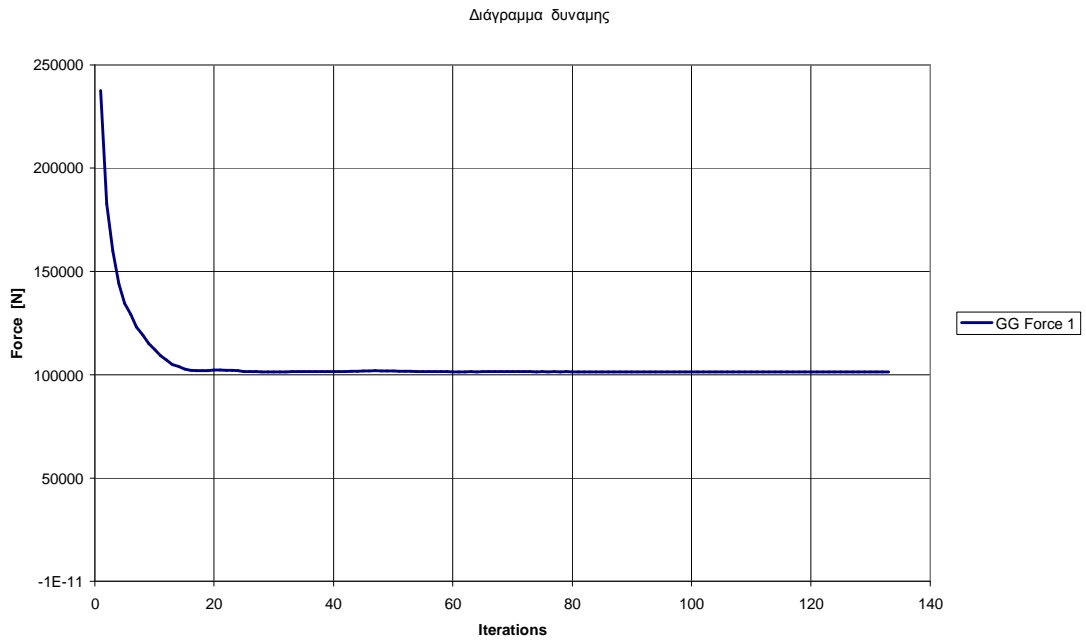


**Γράφημα 4.**

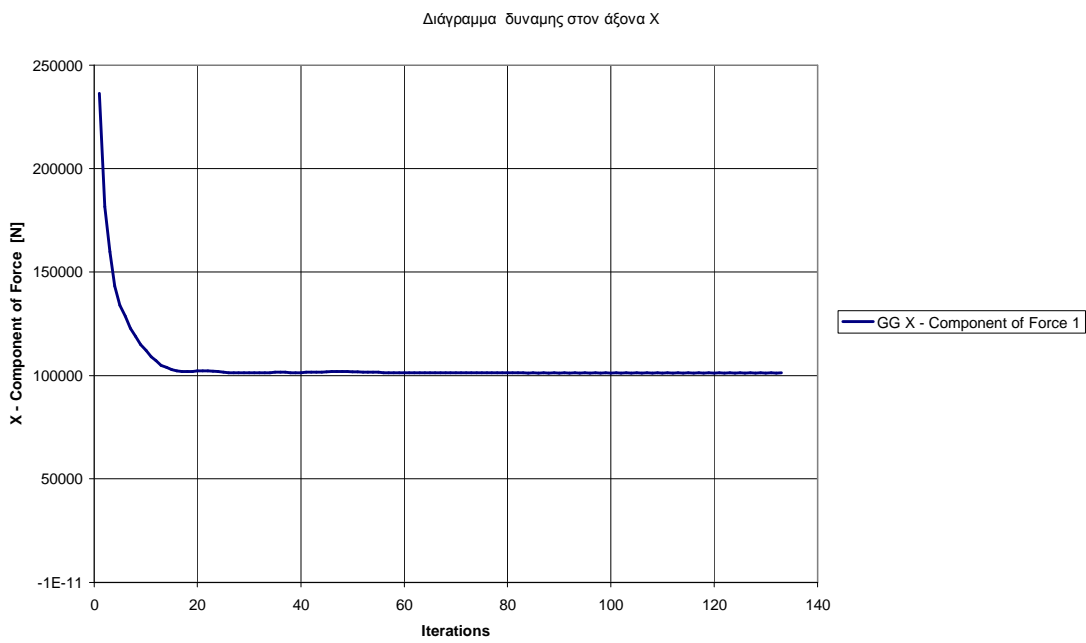
Διάγραμμα κανονικής δύναμης στον άξονα Z



**Γράφημα 5.**

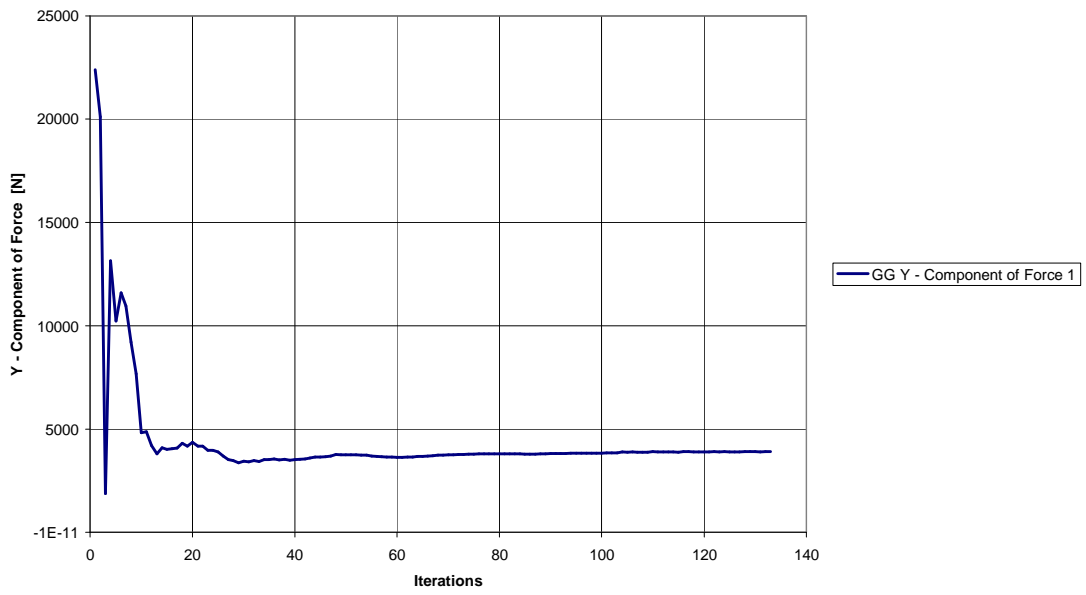


**Γράφημα 6.**



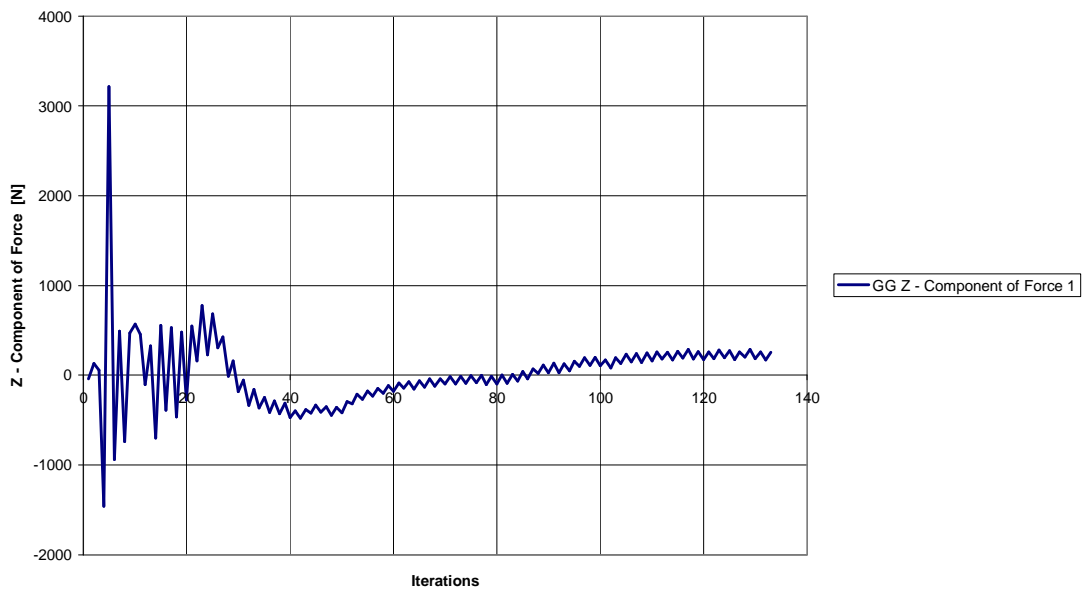
**Γράφημα 7.**

Διάγραμμα δύναμης στον άξονα Y

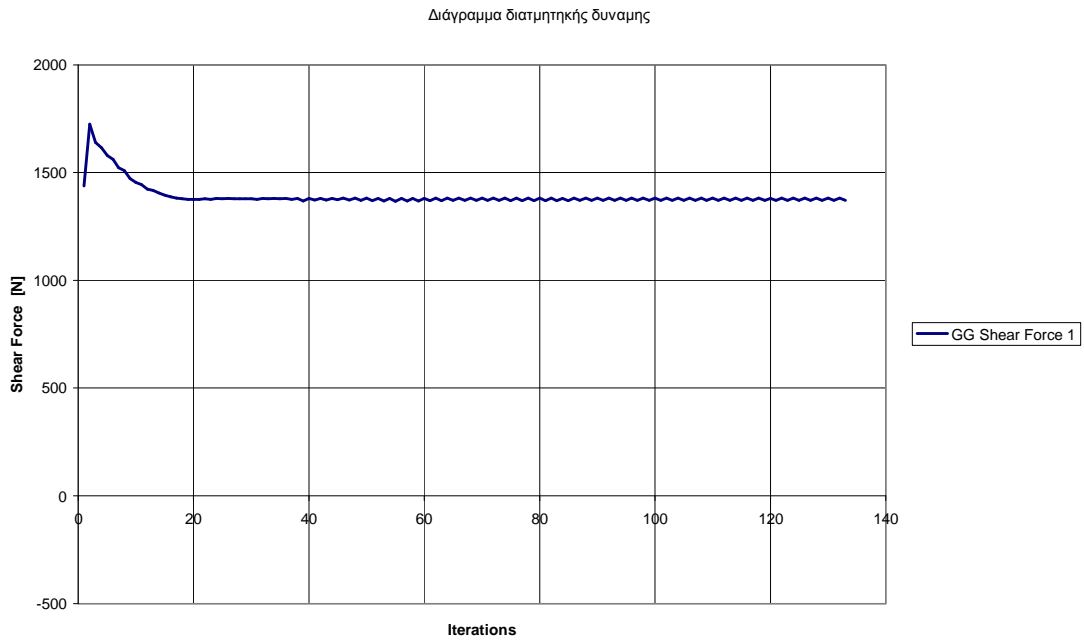


Γράφημα 8.

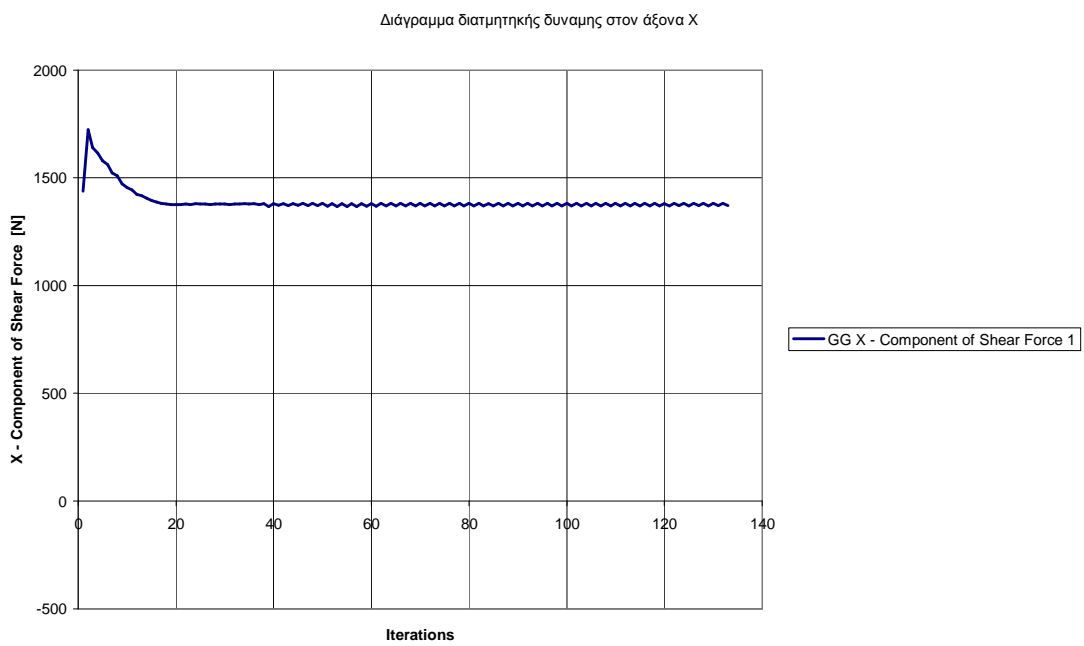
Διάγραμμα δύναμης στον άξονα Z



Γράφημα 9.

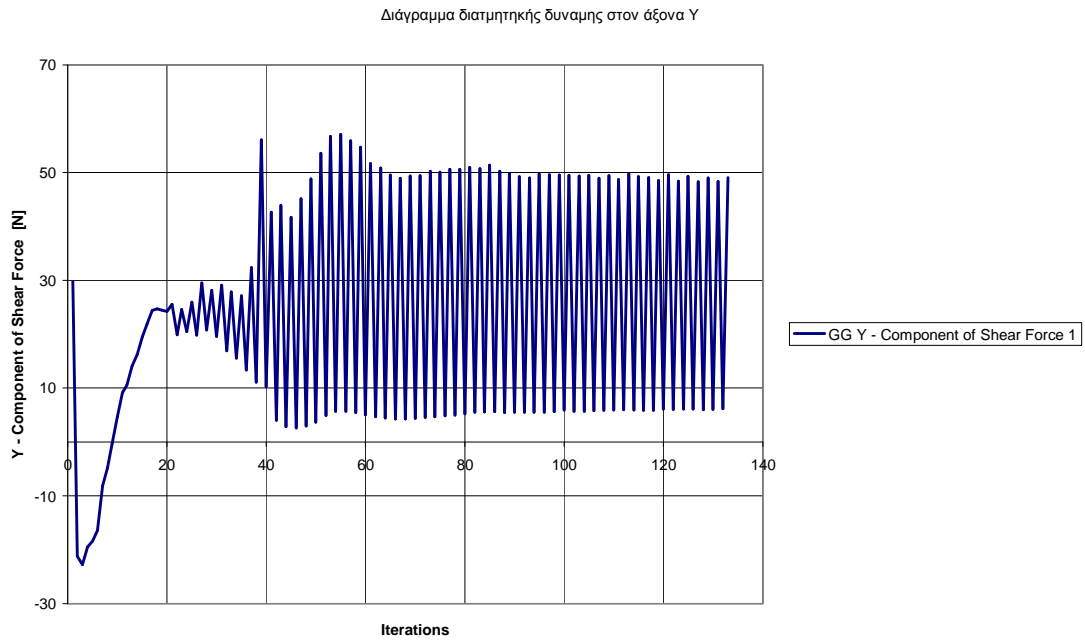


**Γράφημα 10.**



**Γράφημα 11.**





**Γράφημα 12.**

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. [http://vivliothmmy.ee.auth.gr/562/1/Karipidis\\_Mastrogiannopoulos.pdf](http://vivliothmmy.ee.auth.gr/562/1/Karipidis_Mastrogiannopoulos.pdf)
2. <http://www.byggmek.lth.se/fileadmin/byggnadsmekanik/publications/tvsm5000/web5173.pdf>
3. <http://www.connect2compete.eu/media/documents/vattenfallpresentation240310.pdf>
4. [http://www.intechopen.com/source/pdfs/14804/InTech-Selection\\_design\\_and\\_construction\\_of\\_offshore\\_wind\\_turbine\\_foundations.pdf](http://www.intechopen.com/source/pdfs/14804/InTech-Selection_design_and_construction_of_offshore_wind_turbine_foundations.pdf)
5. [http://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/Rules&Guides/Current/176\\_WindTurbine/OWTI\\_Guide](http://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/Rules&Guides/Current/176_WindTurbine/OWTI_Guide)
6. <http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/41958.pdf>
7. [http://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=tension%20leg%20platform%20\(tlp\)%20structure%20for%20an%20offshore%20wind%20turbine&source=web&cd=22&ved=0CCYQFjABOBQ&url=http%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F1996-1073%2F5%2F10%2F3874%2Fpdf&ei=sS-EUP7gC-334QT0joGQAw&usg=AFQjCNE4TQFZHeGO5rkYVZqYeaoBAC6Eg&cad=rja](http://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=tension%20leg%20platform%20(tlp)%20structure%20for%20an%20offshore%20wind%20turbine&source=web&cd=22&ved=0CCYQFjABOBQ&url=http%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F1996-1073%2F5%2F10%2F3874%2Fpdf&ei=sS-EUP7gC-334QT0joGQAw&usg=AFQjCNE4TQFZHeGO5rkYVZqYeaoBAC6Eg&cad=rja)
8. [http://www.piraeusbank.gr/Documents/internet/Economic\\_Research/Kladikes\\_Meletes/2010/Eolika\\_Parka.pdf](http://www.piraeusbank.gr/Documents/internet/Economic_Research/Kladikes_Meletes/2010/Eolika_Parka.pdf)
9. <http://vivliothmmy.ee.auth.gr/813/1/diploma.pdf>
10. <http://patentscope.wipo.int/search/en/WO2009026933>
11. <http://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/978-91-620-6367-2.pdf>
12. [http://projekter.aau.dk/projekter/files/17644488/Analysis\\_of\\_Grouted\\_Connections\\_in\\_Monopile\\_Wind\\_Turbine\\_Foundations\\_Subjected\\_to\\_Horizontal\\_Load\\_Transfer.pdf](http://projekter.aau.dk/projekter/files/17644488/Analysis_of_Grouted_Connections_in_Monopile_Wind_Turbine_Foundations_Subjected_to_Horizontal_Load_Transfer.pdf)
13. <http://www.wind-energy-the-facts.org/en/part-i-technology/chapter-5-offshore/wind-farm-design-offshore/offshore-support-structures.html>
14. [http://offshorewind.net/Other\\_Pages/Turbine-Foundations.html](http://offshorewind.net/Other_Pages/Turbine-Foundations.html)
15. [http://www.cowi.com/SiteCollectionDocuments/cowi/en/menu/02.%20Services/03.%20Transport/7.%20Ports%20and%20marine%20structures/Other%20file%20types/021-1700-033e-08a-Offshore%20wind\\_low.pdf](http://www.cowi.com/SiteCollectionDocuments/cowi/en/menu/02.%20Services/03.%20Transport/7.%20Ports%20and%20marine%20structures/Other%20file%20types/021-1700-033e-08a-Offshore%20wind_low.pdf)
16. [http://www.google.gr/url?sa=t&source=web&cd=44&ved=0CDwQFjADOCg&url=http%3A%2F%2Fexchange.dnv.com%2Fpublishing%2FCodes%2Fdownload.asp%3Furl%3D2010-10%2Fos-j101.pdf&rct=j&q=forces%20on%20tension%20leg%20platform%20offshore%20wind%20turbines%20foundation&ei=CMnvTbaaJouAhQed6J3ICQ&usg=AFQjCNHoSHRI-bngSP9jqK531nSId\\_o9w&cad=rja](http://www.google.gr/url?sa=t&source=web&cd=44&ved=0CDwQFjADOCg&url=http%3A%2F%2Fexchange.dnv.com%2Fpublishing%2FCodes%2Fdownload.asp%3Furl%3D2010-10%2Fos-j101.pdf&rct=j&q=forces%20on%20tension%20leg%20platform%20offshore%20wind%20turbines%20foundation&ei=CMnvTbaaJouAhQed6J3ICQ&usg=AFQjCNHoSHRI-bngSP9jqK531nSId_o9w&cad=rja)
17. [http://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=forces%20on%20tension%20leg%20platform%20offshore%20wind%20turbines%20foundation&ei=CMnvTbaaJouAhQed6J3ICQ&usg=AFQjCNHoSHRI-bngSP9jqK531nSId\\_o9w&cad=rja](http://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=forces%20on%20tension%20leg%20platform%20offshore%20wind%20turbines%20foundation&ei=CMnvTbaaJouAhQed6J3ICQ&usg=AFQjCNHoSHRI-bngSP9jqK531nSId_o9w&cad=rja)
18. <http://bib.tiera.ru/dvd60/Koller%20J.%20-%20Offshore%20Wind%20Energy.%20Research%20on%20Environmental%20Impacts%282006%29%28317%29.pdf>
19. [http://wind.nrel.gov/public/jjonkman/FloatingWindPapers/Jonkman\\_DynamicsOfOffshoreFloatingWindTurbines-ModelDevelopmentAndVerification\\_WindEnergy\\_2009.pdf](http://wind.nrel.gov/public/jjonkman/FloatingWindPapers/Jonkman_DynamicsOfOffshoreFloatingWindTurbines-ModelDevelopmentAndVerification_WindEnergy_2009.pdf)

20. <http://www.google.gr/url?sa=t&source=web&cd=25&ved=0CDYQFjAE OBQ&url=http%3A%2F%2Fntnu.diva-portal.org%2Fsmash%2Fget%2Fdiva2%3A375379%2FFULLTEXT01&rct=j&q=forces%20on%20JACKET%20STRUCTURE%20offshore%20wind%20turbines%20foundation&ei=XE3vTfbPONGAhQfjsdWpCQ&usg=AFQjCNFRDPrtDj0G0CZbG3tR9BRYuWBYEQ&cad=rja>
21. [http://iopscience.iop.org/1742-6596/75/1/012073/pdf/1742-6596\\_75\\_1\\_012073.pdf](http://iopscience.iop.org/1742-6596/75/1/012073/pdf/1742-6596_75_1_012073.pdf)
22. <http://etd.ohiolink.edu/send-pdf.cgi/Andersen%20Brett.pdf?toledo1271883552>
23. <http://energinet.dk/SiteCollectionDocuments/Danske%20dokumenter/Forskning%20-%20PSO-projekter/10092%20Aero-Hydro-Elastic%20Simulation%20Platform%20for%20Wave%20Energy%20Systems%20and%20floating%20Wind%20Turbines.pdf>
24. [http://www.google.gr/url?sa=t&source=web&cd=208&ved=0CFoQFjAH OMgB&url=http%3A%2F%2Fciteseerx.ist.psu.edu%2Fviewdoc%2Fdownload%3Fdoi%3D10.1.1.157.7636%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf&rct=j&q=Numerical%20analysis%20of%20floating%20offshore%20wind%20turbine&ei=pS7tTf\\_nDlur8APvt\\_ybAQ&usg=AFQjCNHnkrVe69Pws1FyzMIE9f0IPI-sSQ&cad=rja](http://www.google.gr/url?sa=t&source=web&cd=208&ved=0CFoQFjAH OMgB&url=http%3A%2F%2Fciteseerx.ist.psu.edu%2Fviewdoc%2Fdownload%3Fdoi%3D10.1.1.157.7636%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf&rct=j&q=Numerical%20analysis%20of%20floating%20offshore%20wind%20turbine&ei=pS7tTf_nDlur8APvt_ybAQ&usg=AFQjCNHnkrVe69Pws1FyzMIE9f0IPI-sSQ&cad=rja)
25. [http://www-civil.eng.ox.ac.uk/people/bwb/papers/isfog\\_1.pdf](http://www-civil.eng.ox.ac.uk/people/bwb/papers/isfog_1.pdf)
26. [http://wind.nrel.gov/public/SeaCon/Proceedings/Copenhagen.Offshore.Wind.2005/documents/papers/Future\\_innovative\\_solutions/L.B.Ibsen\\_Bucket\\_Foundation\\_a\\_status.pdf](http://wind.nrel.gov/public/SeaCon/Proceedings/Copenhagen.Offshore.Wind.2005/documents/papers/Future_innovative_solutions/L.B.Ibsen_Bucket_Foundation_a_status.pdf)
27. [https://ceprofs.civil.tamu.edu/jzhang/ocen407/HywindForOC3\\_Rev3.pdf](https://ceprofs.civil.tamu.edu/jzhang/ocen407/HywindForOC3_Rev3.pdf)
28. <http://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/ishihara/paper/2011-3.pdf>
29. <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/40369/190862366.pdf?sequence=1>
30. [http://www.google.gr/url?sa=t&source=web&cd=75&ved=0CDoQFjAE OEY&url=http%3A%2F%2Fexchange.dnv.com%2Fpublishing%2FCodes%2Fdownload.asp%3Furl%3D2009-04%2Frfp-f205.pdf&rct=j&q=forces%20on%20hybrid%20TLP-SPAR%20floater%20offshore%20wind%20turbines%20foundation&ei=SNDvTdfhJYqwhQfo69SRCQ&usg=AFQjCNEiKakeXYaYTkDtb6feRyX4FhU\\_Gw&cad=rja](http://www.google.gr/url?sa=t&source=web&cd=75&ved=0CDoQFjAE OEY&url=http%3A%2F%2Fexchange.dnv.com%2Fpublishing%2FCodes%2Fdownload.asp%3Furl%3D2009-04%2Frfp-f205.pdf&rct=j&q=forces%20on%20hybrid%20TLP-SPAR%20floater%20offshore%20wind%20turbines%20foundation&ei=SNDvTdfhJYqwhQfo69SRCQ&usg=AFQjCNEiKakeXYaYTkDtb6feRyX4FhU_Gw&cad=rja)
31. [http://www.iwwwfb.org/Abstracts/iwwwfb26/iwwwfb26\\_37.pdf](http://www.iwwwfb.org/Abstracts/iwwwfb26/iwwwfb26_37.pdf)
32. <http://www.google.gr/url?sa=t&source=web&cd=189&ved=0CGIQFjAIO LQB&url=http%3A%2F%2Fgrahamwatsonmep.org%2Fen%2Fdocument%2Fgraham-s-publications%2Fmaking-the-green-energy-switch-at-a-time-of-crisis.pdf&rct=j&q=forces%20on%20TRI-FLOATER%20floater%20offshore%20wind%20turbines%20foundation&ei=DtXvTc3gl8GKhQersa2UCQ&usg=AFQjCNEUnhynM9si2pOjLq0G Ga1rdxY0sg&cad=rja>
33. [http://www.fzk-nth.de/fileadmin/institut/Veranstaltungen/FZK-Kolloquium/Vortraege\\_2011/\\_1\\_08\\_-\\_Mai\\_-\\_In-line\\_force\\_on\\_a\\_tripod\\_presentation.pdf](http://www.fzk-nth.de/fileadmin/institut/Veranstaltungen/FZK-Kolloquium/Vortraege_2011/_1_08_-_Mai_-_In-line_force_on_a_tripod_presentation.pdf)
34. [http://www.iwes.fraunhofer.de/Images/2009-TPC-616\\_Vorpahl\\_tcm402-50038.pdf](http://www.iwes.fraunhofer.de/Images/2009-TPC-616_Vorpahl_tcm402-50038.pdf)

35. <http://www.risoe.dk/vea/kombilaster/Intern/Notater/M%C3%B8de12/Design%20procedures%201.draft.pdf>
36. [http://lr.typo3.3xo.eu/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen\\_en\\_Leerstoelen/Afdeling\\_AEWE/Wind\\_Energy/Education/Masters\\_Projects/Finished\\_Master\\_projects/doc/Lindert\\_Blonk\\_r.pdf](http://lr.typo3.3xo.eu/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen_en_Leerstoelen/Afdeling_AEWE/Wind_Energy/Education/Masters_Projects/Finished_Master_projects/doc/Lindert_Blonk_r.pdf)
37. [http://www.lr.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen\\_en\\_Leerstoelen/Afdeling\\_AEWE/Wind\\_Energy/Education/Masters\\_Projects/Finished\\_Master\\_projects/doc/Jan\\_Beerens\\_r.pdf](http://www.lr.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/LR/Organisatie/Afdelingen_en_Leerstoelen/Afdeling_AEWE/Wind_Energy/Education/Masters_Projects/Finished_Master_projects/doc/Jan_Beerens_r.pdf)
38. [http://vbn.aau.dk/files/41634991/Reliability\\_Assessment\\_and\\_Reliability\\_Based\\_Inspection\\_and\\_Maintenance\\_of\\_Offshore\\_Wind\\_Turbines.pdf](http://vbn.aau.dk/files/41634991/Reliability_Assessment_and_Reliability_Based_Inspection_and_Maintenance_of_Offshore_Wind_Turbines.pdf)
39. <http://www.dhigroup.com/~media/Publications/News/2011/29-03-2011CFD%20modelling%20by%20DHI%20SoQ.ashx>
40. <http://seagrant.gso.uri.edu/oceansamp/pdf/appendix/18-BaxterHuStructures.pdf>
41. <http://www.ewec2010proceedings.info/ewea2011/papers/157.pdf>
42. <http://www.michanikos-online.gr/news.php?aID=8665>
43. [https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=11&cad=rja&ved=0CCsQFjAAOAO&url=http%3A%2F%2Frepository.tudelft.nl%2Fassets%2Fuuid%3A60cbccec-d00f-4814-933f-d20c3bb3c4fc%2FWei\\_Gong\\_Lattice\\_Tower\\_Design\\_of\\_Offshore\\_Wind\\_Turbine\\_Support\\_Structures\\_v0.pdf&ei=jNHauZmpLITFPP2hgbAM&usq=AFQjCNFMULR73XTVC8Yf4w5Nqsktal\\_3KQ&sig2=ajy5OrM1ShR9KFjo85XAJA&bvm=bv.48705608,d.Yms](https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=11&cad=rja&ved=0CCsQFjAAOAO&url=http%3A%2F%2Frepository.tudelft.nl%2Fassets%2Fuuid%3A60cbccec-d00f-4814-933f-d20c3bb3c4fc%2FWei_Gong_Lattice_Tower_Design_of_Offshore_Wind_Turbine_Support_Structures_v0.pdf&ei=jNHauZmpLITFPP2hgbAM&usq=AFQjCNFMULR73XTVC8Yf4w5Nqsktal_3KQ&sig2=ajy5OrM1ShR9KFjo85XAJA&bvm=bv.48705608,d.Yms)
44. <http://www.rae.gr/geo/>