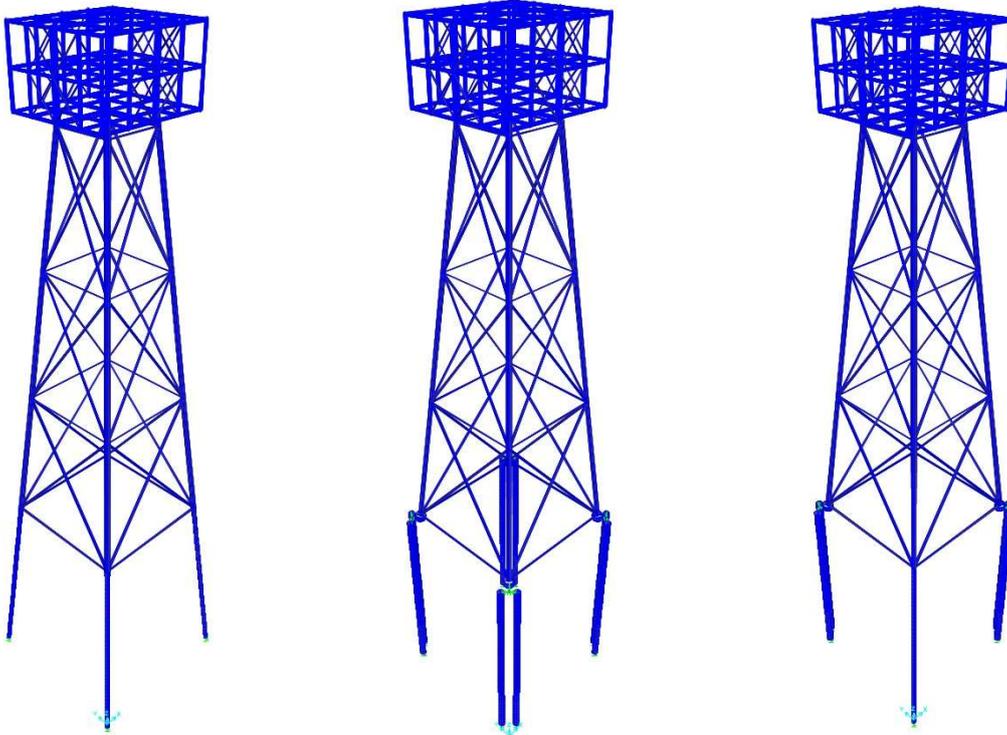




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



## ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΞΕΔΡΩΝ



Διπλωματική Εργασία  
**Ανδρέας Γιαννούτσος**

EMK ΔΕ 2024 6

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2024

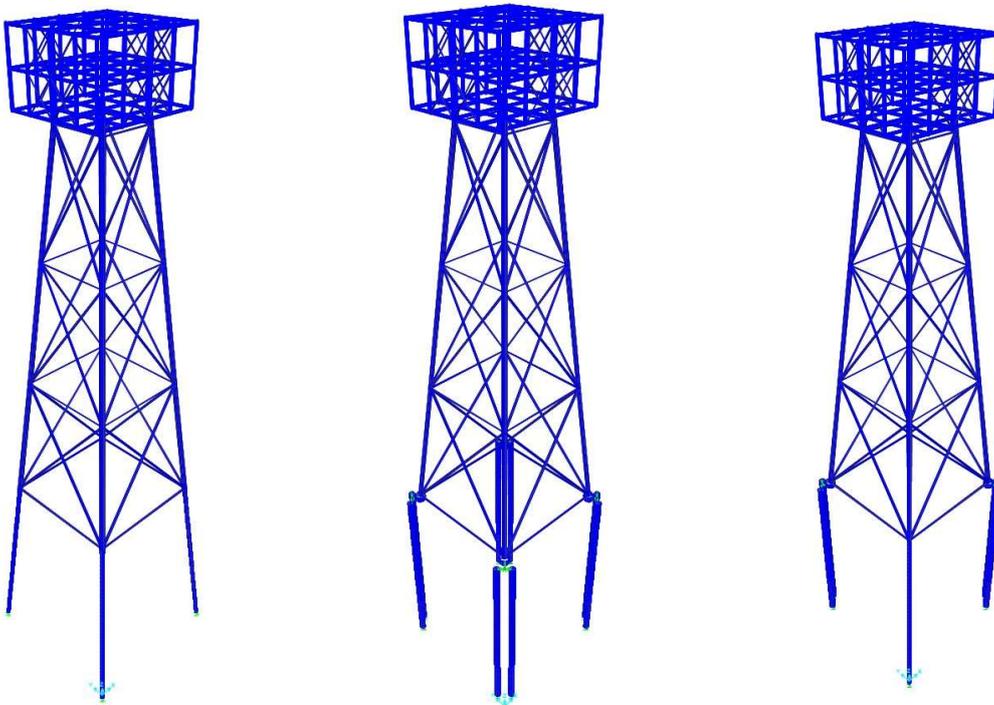




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



## ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΞΕΔΡΩΝ



Διπλωματική Εργασία  
**Ανδρέας Γιαννούτσος**

EMK 2024 6

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2024



Copyright © Ανδρέας Γιαννούτσος, 2024  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Andreas Giannoutsos, 2024  
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Ανδρέας Γιαννούτσος (2024)  
Εναλλακτικοί Τρόποι Θεμελίωσης Θαλάσσιων Εξεδρών  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ 2024 6  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Andreas Giannoutsos (2024)  
Diploma Thesis EMK 2024 6  
Alternative Foundation Solutions for Offshore Jackets  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτέρως τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ τον κ. Χάρη Γαντέ για την επιστημονική καθοδήγησή και στήριξη που παρείχε, αλλά και την πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε σε κάθε στάδιο εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Ψαρά, Πολιτικό Μηχανικό και τον κ. Παύλο Θανόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσαν αλλά και τη σημαντική βοήθεια που προσέφεραν, η οποία είχε καθοριστικό ρόλο σε ζητήματα που αφορούσαν το στατικό πρόγραμμα SAP2000 και συνάμα στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αχιλλέα Παπαδημητρίου, Αναπληρωτή Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε αλλά και τη σημαντική βοήθεια που προσέφερε, η οποία είχε καθοριστικό ρόλο σε ζητήματα γεωτεχνικής φύσεως.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συνεχή ηθική, πνευματική και υλική υποστήριξη και συμπαράσταση που παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς και την κατανόηση και την υπομονή της, συμβάλλοντας σε μία ολοκληρωμένη εκπαιδευτική πορεία στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.





*Στην οικογένειά μου*





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2024 6

## Εναλλακτικοί Τρόποι Θεμελίωσης Θαλάσσιων Εξεδρών

Ανδρέας Γιαννούτσος

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές Καθηγητής

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας προπτυχιακής διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση της επιρροής εναλλακτικών τρόπων θεμελίωσης στην συμπεριφορά θαλάσσιων εξεδρών. Σε μία υπερράκτια μεταλλική πλατφόρμα *jacket* διερευνώνται τρεις τρόποι θεμελίωσης, με χρήση:

- pin piles*: μεμονωμένων πασσάλων εμπηγνυόμενων εντός των ποδιών του *jacket*,
- skirt piles*: ζεύγος πασσάλων εμπηγνυόμενων εντός ειδικών περιβλημάτων (*sleeves*) εξωτερικά των ποδιών του *jacket*,
- mixed piles*: μεικτή χρήση των πασσάλων τύπου *pin* και *skirt* με αντιδιαμετρική τοποθέτηση των όμοιων πασσάλων.

Αρχικά, γίνεται μία γενικότερη αναφορά στις υπερράκτιες κατασκευές και εν συνεχεία εξειδίκευση στο δικτύωμα *jacket*, το οποίο πρόκειται να προσομοιωθεί με το πρόγραμμα SAP2000.

Επιλέγεται, η εξεταζόμενη υπερράκτια πλατφόρμα να έχει λειτουργία υποσταθμού αιολικού πάρκου, καθώς επίσης να χωροθετηθεί σε ελληνικά ύδατα και συγκεκριμένα στο Θρακικό Πέλαγος.

Σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα, υπολογίζονται τα φορτία που ασκούνται στην κατασκευή. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα μόνιμα, τα κινητά, οι περιβαλλοντικές δράσεις, δηλαδή το χιόνι, ο άνεμος, η ανάπτυξη θαλάσσιας ζωής, το κύμα και οι σεισμικές δράσεις. Έτσι, προκύπτουν οι συνδυασμοί δράσεων.

Η αλληλεπίδραση εδάφους-κατασκευής κατά την οριζόντια διεύθυνση προσομοιώνεται μέσω μη γραμμικών μεταβαλλόμενων ελατηρίων. Σε κάθε ελατήριο, αντιστοιχεί μια καμπύλη πίεσης-υποχώρησης ( $p-y$ ), η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες του εδάφους και από το βάθος του ελατηρίου. Η κατακόρυφη μετακίνηση των πασσάλων περιορίζεται στην βάση τους με ελατήρια αντίστασης ίσης με τη φέρουσα ικανότητα αυτών.

Κατά τη στατική ανάλυση, τα προσομοιώματα διαστασιολογούνται βάσει των συνδυασμών Οριακής Κατάστασης Αστοχίας (ΟΚΑ) και ελέγχονται σε επιτρεπόμενες μετατοπίσεις βάσει των συνδυασμών Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας (ΟΚΛ). Στην συνέχεια γίνεται ιδιομορφική ανάλυση και σύγκριση των μετατοπίσεων των προσομοιωμάτων κατά το δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης. Το προσομοίωμα με τη μεγαλύτερη μετατόπιση είναι εκείνο των *pin piles*, ενώ ακολουθούν με φθίνουσα σειρά τα προσομοιώματα με *mixed piles* και *skirt piles*.

Τέλος, γίνεται παραμετρική ανάλυση ως προς το μήκος των πασσάλων, την πυκνότητα του εδάφους και το πρότυπο διαστασιολόγησης. Μειώνοντας το μήκος των πασσάλων ή την πυκνότητα του εδάφους, με καθοριστική την πυκνότητα, αυξάνεται η μετατόπιση της κατασκευής. Υιοθετώντας ένα διαφορετικό πρότυπο διαστασιολόγησης όπως το API και συγκρίνοντάς το με τον Ευρωκώδικα προκύπτουν μικροδιαφορές ως προς τις μετατοπίσεις της υπό εξέταση κατασκευής.





NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES



DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2024 6

## **Alternative Foundation Solutions for Offshore Jackets**

**Andreas Giannoutsos**

Supervisor: Charis J. Gantes Professor

### **ABSTRACT**

The purpose of this undergraduate diploma thesis is to investigate the effect of alternative foundation methods on the behavior of offshore platforms. On an offshore steel jacket platform, three types of foundation are investigated, using:

- a) *pin piles*: single piles driven into the jacket legs,
- b) *skirt piles*: a pair of piles driven into special sleeves on the outside of the jacket legs,
- c) *mixed piles*: a mixed use of pin and skirt piles with counter-diametric placement of similar piles.

Initially, a general reference to offshore structures is made, with a specialization on jacket structure, which is simulated with SAP2000.

It is decided that the offshore platform will operate as a wind farm substation and will be located in Greek territory, specifically in the Thracian Sea.

According to the Eurocode provisions, the loads applied to the structure are calculated, which include permanent, mobile, environmental actions, i.e. snow, wind, marine growth, wave and seismic actions. This is how the combinations of actions are formed.

The soil-structure interaction in the horizontal direction is simulated by using non-linear adjustable springs. For each spring, there is a pressure - yield curve ( $p$ - $y$ ), which depends on the soil conditions and the depth of the spring. The vertical movement of the piles is limited at their base using resistance springs with a resistance equal to their load-bearing capacity.

During the static analysis, the simulations are designed according to the Ultimate Limit State (ULS) combinations and checked for allowable displacements according to the Serviceability Limit State (SLS) combinations. An eigenmodal analysis is then performed and the displacements of the simulations are compared under the most unfavorable loading combination. The simulation with the highest displacement is that of pin piles, followed in descending order by the simulations with mixed piles and skirt piles.

Finally, a parametric analysis is performed in terms of pile length, soil density and design standard. Decreasing the length of the piles or the soil density, with density being the crucial factor, the displacement of the structure increases. By adopting a different design standard such as the API and comparing it with the Eurocode results in minor differences in the displacements of the structure.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ.....</b>	<b>1</b>
1.1	Εισαγωγή.....	1
1.2	Ερμηνεία της Υπεράκτιας Κατασκευής.....	1
1.3	Ιστορία Υπεράκτιων Κατασκευών .....	2
1.4	Καταστροφές σε Υπεράκτιες Κατασκευές .....	5
1.5	Κατηγορίες Υπεράκτιων Πλατφορμών .....	6
1.5.1	Κατασκευές εδραζόμενες στον πυθμένα .....	7
1.5.2	Πλωτές Υπεράκτιες Κατασκευές .....	7
<b>2</b>	<b>ΤΟ ΔΙΚΤΥΩΜΑ ΩΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ .....</b>	<b>9</b>
2.1	Υπεράκτια Κατασκευή με Δικτύωμα ( <i>Jacket</i> ) .....	9
2.2	Δικτύωμα ( <i>Jacket</i> ) και Πάσσαλοι .....	11
2.3	Διαστασιολόγηση ενός Υπεράκτιου Δικτυώματος .....	13
2.4	Κατασκευή, Μεταφορά και Εγκατάσταση .....	22
2.4.1	Κατασκευή .....	22
2.4.2	Μεταφορά .....	25
2.4.3	Εγκατάσταση.....	27
<b>3</b>	<b>ΜΟΡΦΩΣΗ ΦΟΡΕΑ.....</b>	<b>37</b>
3.1	Εισαγωγή.....	37
3.2	Εξυπηρετούσα Λειτουργία .....	37
3.3	Χωροθέτηση .....	38
3.4	Γεωμετρία Φορέα .....	38
3.4.1	Γεωμετρία Φορέα Θεμελιωμένου με Pin Piles .....	41
3.4.2	Γεωμετρία Φορέα Θεμελιωμένου με Skirt Piles .....	41
3.4.3	Γεωμετρία Φορέα Θεμελιωμένου με Mixed Piles .....	41
<b>4</b>	<b>ΔΡΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ .....</b>	<b>43</b>
4.1	Εισαγωγή.....	43
4.2	Μόνιμα Φορτία .....	43
4.3	Κινητά Φορτία.....	44
4.4	Περιβαλλοντικές Δράσεις: .....	44
4.4.1	Φορτίο Ανέμου .....	44
4.4.2	Φορτίο Χιονιού .....	55
4.4.3	Φορτίο Κύματος.....	56
4.5	Σεισμικές Δράσεις.....	61

4.6	Συνδυασμοί Δράσεων: .....	64
<b>5</b>	<b>ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ &amp; ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ .....</b>	<b>67</b>
5.1	Εισαγωγή.....	67
5.2	Προσομοίωση Ανωδομής .....	67
5.3	Προσομοίωση του <i>Jacket</i> .....	69
5.4	Προσομοίωση Πασσάλων Θεμελίωσης .....	71
5.4.1	Προσομοίωση Εδάφους – Δημιουργία Καμπυλών P - Y .....	73
5.4.2	Υπολογισμός Φέρουσας Ικανότητας Πασσάλου .....	76
5.4.3	Προσομοίωση Μη-Γραμμικών Ελατηρίων .....	77
5.5	Στατική Ανάλυση.....	79
5.5.1	Ιδιομορφική Ανάλυση.....	79
5.5.2	Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ).....	85
5.5.3	Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ) .....	87
5.5.4	Ροπές και Μετατοπίσεις Φορέα.....	88
<b>6</b>	<b>ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ .....</b>	<b>95</b>
6.1	Εισαγωγή.....	95
6.2	Μήκος Πασσάλων.....	95
6.3	Πυκνότητα του Εδάφους .....	99
6.4	Συνδυασμός Μήκους Πασσάλων και Πυκνότητας Εδάφους.....	102
6.5	Πρότυπο Διαστασιολόγησης.....	104
6.5.1	Προσομοίωση και Υπολογισμός Φορτίων κατά API .....	105
<b>7</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ &amp; ΙΔΕΕΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ .....</b>	<b>111</b>
7.1	Εισαγωγή.....	111
7.2	Συμπεράσματα .....	111
7.3	Ιδέες Μελλοντικής Έρευνας.....	112
<b>8</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>115</b>



## ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 4.1: Κατηγορία εδάφους και συντελεστές $z_0$ ( $m$ ) και $z_{min}$ ( $m$ ). (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.).....	46
Πίνακας 4.2: Συντελεστές $c_{pe}$ ζωνών σε κατακόρυφες επιφάνειες. (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.) .....	48
Πίνακας 4.3: Συντελεστές $c_{pe}$ ζωνών σε κατακόρυφες επιφάνειες. (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.) .....	49
Πίνακας 4.4: Υπολογισμένοι συντελεστές $c_{pe}$ για κατακόρυφες επιφάνειες. ....	50
Πίνακας 4.5: Υπολογισμένοι συντελεστές $c_{pe}$ για οριζόντιες επιφάνειες. ....	50
Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα - υπολογισμοί. ....	50
Πίνακας 4.7: Τελική υπολογισμένη ανεμοπίεση στις ζώνες που υπάρχουν στην κατασκευή. ....	50
Πίνακας 4.8: Επιφάνεια των μελών και συντελεστής $k$ . (Πηγή: Γαντές Χ., Θανόπουλος Π., Γκατζογιάννης Σ. (2022). Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος «Θαλάσσιες Μεταλλικές Κατασκευές» με τίτλο: «Actions on marine structures», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.) .....	54
Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα φορτίων ανέμου στα μέλη του <i>jacket</i> . ....	54
Πίνακας 4.10: Τιμή χαρακτηριστικού φορτίου χιονιού για τον χάρτη της εικόνας 4.12. (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)..	56
Πίνακας 4.11: Τιμές του συντελεστή $\mu$ ανάλογα με τη γωνία $\sigma$ του επιπέδου υπό μελέτη. (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)..	56
Πίνακας 4.12: Υπολογισμός του ενεργού αναπύγματος πελάγους $F_{eff}$ [ $km$ ]. ....	59
Πίνακας 4.13: Υπολογισμοί του αναπύγματος $F_{eff}$ με τη χρήση της μεθόδου <i>SMB</i> . ....	60
Πίνακας 4.14: Συντελεστές συνδυασμών δράσεων σύμφωνα με το πρότυπο EN 1990-2002. ....	64
Πίνακας 4.15: Συνδυασμοί Φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Αστοχίας (ΟΚΑ) (1). ....	65
Πίνακας 4.16: Συνδυασμοί Φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Αστοχίας (ΟΚΑ) (1). ....	65
Πίνακας 4.17: Συνδυασμοί Σεισμικών Φορτίσεων (1). ....	65
Πίνακας 4.18: Συνδυασμοί Σεισμικών Φορτίσεων (2). ....	66
Πίνακας 4.19: Συνδυασμοί Φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας (ΟΚΛ) (1).....	66
Πίνακας 4.20: Συνδυασμοί Φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας (ΟΚΛ) (2).....	66
Πίνακας 5.1: Τυπική διστασιολόγηση ανωδομής.....	67

Πίνακας 5.2: Διαστασιολόγηση <i>Jacket</i> με χρήση <i>pin piles</i> .	71
Πίνακας 5.3: Διαστασιολόγηση <i>Jacket</i> με χρήση <i>skirt piles</i> .	71
Πίνακας 5.4: Διαστασιολόγηση <i>Jacket</i> με χρήση <i>mixed piles</i> .	71
Πίνακας 5.5: Διαστασιολόγηση πασσάλων προσομοιώματος με <i>pin piles</i> .	72
Πίνακας 5.6: Διαστασιολόγηση πασσάλων προσομοιώματος με <i>skirt piles</i> .	72
Πίνακας 5.7: Διαστασιολόγηση πασσάλων προσομοιώματος με <i>mixed piles</i> .	72
Πίνακας 5.8: Τιμές της σταθεράς $n_h$ (σε MN/m <sup>3</sup> ) άμμων. (Πηγή: Μ. Καββαδάς (2020 - 2021). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Θεμελιώσεις» με τίτλο: «Διάλεξη 13, Θεμελιώσεις με πασσάλους: Εγκάρσια Φόρτιση Πασσάλων», Εργαστήριο Θεμελιώσεων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)	74
Πίνακας 5.9: Δεδομένα για υποθαλάσσια μη συνεκτικά εδάφη.	75
Πίνακας 5.10: Ενδεικτικός υπολογισμός καμπύλης $p$ - $\gamma$ σε βάθος 10 m.	75
Πίνακας 5.11: Ενδεικτικά δεδομένα για πασσάλους τύπου <i>skirt</i> (μέση διάμετρος 1,4 m) σε πυκνό έδαφος ( $\varphi = 35^\circ$ ).	77
Πίνακας 5.12: Ενδεικτικός υπολογισμός φέρουσας ικανότητας πασσάλων.	77
Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης – <i>pin piles</i> .	80
Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης – <i>skirt piles</i> (1).	80
Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης – <i>skirt piles</i> (2).	81
Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης – <i>mixed piles</i> (1).	81
Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης – <i>mixed piles</i> (2).	81
Πίνακας 6.1: Με την αύξηση του μήκους των πασσάλων τύπου <i>pin</i> αυξάνεται το οριακό αξονικό φορτίο $Q_u$ , με το οποίο ορίζεται η αντίσταση των κατακόρυφων ελατηρίων.	96
Πίνακας 6.2: Με την αύξηση του μήκους των πασσάλων τύπου <i>skirt</i> αυξάνεται το οριακό αξονικό φορτίο $Q_u$ , με το οποίο ορίζεται η αντίσταση των κατακόρυφων ελατηρίων.	97
Πίνακας 6.3: Με την αύξηση του μήκους των πασσάλων τύπου <i>mixed</i> αυξάνεται το οριακό αξονικό φορτίο $Q_u$ , με το οποίο ορίζεται η αντίσταση των κατακόρυφων ελατηρίων.	98
Πίνακας 6.4: Ποσοστά επιρροής της μετατόπισης κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού OKA7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής λόγω της μεταβολής του μήκους των πασσάλων στο εκάστοτε προσομοίωμα.	99
Πίνακας 6.5: Ποσοστά επιρροής της μετατόπισης κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού OKA7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής λόγω της μεταβολής της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους $\varphi^\circ$ στο εκάστοτε προσομοίωμα.	101
Πίνακας 6.6: Ποσοστά επιρροής της μετατόπισης κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού OKA7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής λόγω του συνδυασμού της μεταβολής του μήκους των πασσάλων και της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους $\varphi^\circ$ στο εκάστοτε προσομοίωμα.	103
Πίνακας 6.7: Συνδυασμοί σεισμικών φορτίσεων σύμφωνα με το πρότυπο του API.	109
Πίνακας 6.8: Συνδυασμοί φορτίσεων σε συνθήκες καταίγιδας 100 χρόνων σύμφωνα με το πρότυπο του API (1).	109

Πίνακας 6.9: Συνδυασμοί φορτίσεων σε συνθήκες καταιγίδας 100 χρόνων σύμφωνα με το πρότυπο του API (2). .....	109
--	-----

## ΕΙΚΟΝΕΣ

- Εικόνα 1.1: Υπεράκτια Κατασκευή. (Πηγή: <https://www.offshorewind.biz/2018/08/06/hornsea-one-offshore-substations-in-place/>)..... 2
- Εικόνα 1.2: Εξέλιξη των σταθερών υπεράκτιων πλατφορμών. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.) ..... 4
- Εικόνα 1.3: Διάγραμμα αριθμού γεωτρήσεων συναρτήσει του χρόνου. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)..... 4
- Εικόνα 1.4: Πλατφόρμα *Troll A* (Η υψηλότερη κατασκευή του κόσμου από σκυρόδεμα που μετακινήθηκε στην επιφάνεια της γης). (Πηγή: <https://www.zmescience.com/other/offbeat-other/tallest-structure/>) 5
- Εικόνα 1.5: Τραγωδία με το *P-36* της *Petrobras* να βυθίζεται στη λεκάνη *Campos*. (Πηγή: <https://www.bluestarline.org/farstad/p36.html>) ..... 6
- Εικόνα 1.6: Είδη υπεράκτιων κατασκευών. (Πηγή: Χατζηγεωργίου Ιωάννης Κ., Κονισπολιάτης Δ (2022). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Έργα Ανοικτής Θαλάσσης» με τίτλο: «Offshore Platform Design», Εργαστήριο Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)..... 6
- Εικόνα 2.1: Δικτύωμα *Jacket*. (Πηγή: [https://www.researchgate.net/figure/Steel-jacket-structure\\_fig1\\_226471868](https://www.researchgate.net/figure/Steel-jacket-structure_fig1_226471868)).....10
- Εικόνα 2.2: Διαφορετικές περιπτώσεις θεμελίωσης με πασσάλους. (Πηγή: Chatzigiannelis I., Elsayed K., Loukakis K., M. ASCE, P.E. (March 2009). "Foundation Engineering of Offshore "Jacket" Structures." Conference Paper, International Foundation Congress and Equipment Expo 2009.).....11
- Εικόνα 2.3: Περιγραφή διαδικασίας έμπηξης και σκυροδέτησης πασσάλου. (Πηγή: Chatzigiannelis I., Elsayed K., Loukakis K., M. ASCE, P.E. (March 2009). "Foundation Engineering of Offshore "Jacket" Structures." Conference Paper, International Foundation Congress and Equipment Expo 2009.).....12
- Εικόνα 2.4: Περιβλήματα *skirt* σε συνδυασμό με *mudmat*. (Πηγή: Chatzigiannelis I., Elsayed K., Loukakis K., M. ASCE, P.E. (March 2009). "Foundation Engineering of Offshore "Jacket" Structures." Conference Paper, International Foundation Congress and Equipment Expo 2009.).....13
- Εικόνα 2.5: Προσομοίωση της θεμελίωσης: α) Ο πάσσαλος δεν είναι σκυροδετημένος εντός του ποδιού του jacket. β) Ο πάσσαλος είναι σκυροδετημένος εντός του ποδιού του jacket. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.) .....15
- Εικόνα 2.6: Ανοχές μετατόπισης πασσάλων. (Πηγή: El-Reedy Mohamed A., Ph.D. (2012). «Offshore Structures, Design, Construction and Maintenance». Elsevier, USA.).....15
- Εικόνα 2.7: Ειδικό στοιχείο σύνδεσης μεταξύ υποστυλώματος και δοκού καταστρώματος. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.).....18
- Εικόνα 2.8: Συστήματα κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.) .....19
- Εικόνα 2.9: Απόσταση των μελών στους κόμβους. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)19

Εικόνα 2.10: α) Επικάλυψη εντός κόμβου, β) Επικάλυψη εκτός κόμβου. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.).....	20
Εικόνα 2.11: Βασικά στοιχεία ενός <i>jacket</i> . (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.) .....	20
Εικόνα 2.12: Ιδιοπερίοδος και ύψη σταθερών υπεράκτιων κατασκευών. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.).....	21
Εικόνα 2.13: Σταδιακή κατανομή της αξονικής δύναμης μέσω των προεκταμένων πασσάλων τύπου <i>skirt</i> , που κατανέμουν με τη σειρά τους το φορτίο στους υπόλοιπους πασσάλους τύπου <i>skirt</i> . (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.).....	21
Εικόνα 2.14: Τρόποι κατασκευής των <i>jackets</i> . (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)	24
Εικόνα 2.15: α) Σύνδεση συγκολλημένης πλάκας, β) Σύνδεση με πλάκα στέψης. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.) .....	24
Εικόνα 2.16: α) Λεπτομέρεια σύνδεσης, β) Λεπτομέρειες διατμητικών κλειδιών. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.) .....	25
Εικόνα 2.17: Διαδικασία φόρτωσης του <i>jacket</i> σε φορηγίδα. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.).....	27
Εικόνα 2.18: Διαδικασία ανύψωσης με λειτουργία δύο γερανών. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume II», Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.).....	31
Εικόνα 2.19: Διαδικασία ανύψωσης με λειτουργία ενός γερανού. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume II», Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.).....	32
Εικόνα 2.20: Τυπική ακολουθία καθέλκυσης ενός αυτοαναδιδόμενου <i>jacket</i> . (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume II», Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.).....	32
Εικόνα 2.21: Φορτίσεις που αναπτύσσονται κατά την καθέλκυση της πλατφόρμας (α). (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.).....	33
Εικόνα 2.22: Φορτίσεις που αναπτύσσονται κατά την καθέλκυση της πλατφόρμας (β). (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.).....	33
Εικόνα 2.23: Εγκατάσταση καταστρώματος. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)	33
Εικόνα 2.24: Τρόποι ανέγερσης καταστρώματος (μονό σημείο, διπλό σημείο, ράβδος διανομής). (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume II», Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.).....	34

Εικόνα 2.25: Εγκατάσταση και χειρισμός εμπηγνυόμενων πασσάλων. (Πηγή: El-Reedy Mohamed A., Ph.D. (2012). «Offshore Structures, Design, Construction and Maintenance». Elsevier, USA.) .....	34
Εικόνα 2.26: Σύγκριση βάρους σφυριών έμπηξης πασσάλων σε χερσαίες και υπεράκτιες κατασκευές. (Πηγή: El-Reedy Mohamed A., Ph.D. (2012). «Offshore Structures, Design, Construction and Maintenance». Elsevier, USA.).....	35
Εικόνα 3.1: Υπεράκτια πλατφόρμα <i>jacket</i> με λειτουργία υποσταθμού. (Πηγή: <a href="https://www.offshorewind.biz/2021/09/29/keppel-completes-greater-changhua-1-2a-offshore-substations/">https://www.offshorewind.biz/2021/09/29/keppel-completes-greater-changhua-1-2a-offshore-substations/</a> ).....	38
Εικόνα 3.2: Βάθος σημείου (70 m) χωροθέτησης του υπό μελέτη υποσταθμού. (Πηγή: <a href="https://webapp.navionics.com/#boating">https://webapp.navionics.com/#boating</a> ).....	39
Εικόνα 3.3: Απόσταση σημείου χωροθέτησης από τα χερσαία τμήματα. ....	39
Εικόνα 3.4: Μέση ταχύτητα ανέμου σε υψόμετρο 100 m. (Πηγή: <a href="https://globalwindatlas.info/en/area/Greece/Notio%20Aigaio">https://globalwindatlas.info/en/area/Greece/Notio%20Aigaio</a> ) .....	40
Εικόνα 3.5: Γεωμετρία φορέα.....	40
Εικόνα 3.6: Κατόψεις Ανωδομής. ....	40
Εικόνα 3.7: Γεωμετρία φορέα θεμελιωμένου με <i>pin piles</i> .....	41
Εικόνα 3.8: Γεωμετρία φορέα θεμελιωμένου με <i>skirt piles</i> . ....	42
Εικόνα 3.9: Γεωμετρία φορέα θεμελιωμένου με <i>mixed piles</i> .....	42
Εικόνα 4.1: Ελικόπτερο τύπου <i>Sikorsky S-76</i> . (Πηγή: <a href="https://winair.ca/blog/preeminent-guide-sikorsky-s-76-helicopter/">https://winair.ca/blog/preeminent-guide-sikorsky-s-76-helicopter/</a> ) .....	44
Εικόνα 4.2: Χάρτης ζωνών σε κλίμακα 1:500000 για τον καθορισμό της θεμελιώδους τιμής της βασικής ταχύτητας του ανέμου, $v_{b,0}$ . (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.) .....	45
Εικόνα 4.3: Πίεση αιχμής $q_p$ για ύψος αναφοράς $z_e$ βάσει του λόγου διαστάσεων της κατασκευής. (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.).....	48
Εικόνα 4.4: Ορισμός ζωνών για κατακόρυφες και οριζόντιες επιφάνειες. (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.).....	49
Εικόνα 4.5: Τελική ανεμοπίεση. ....	50
Εικόνα 4.6: Εισαγωγή της ανεμοπίεσης στο λογισμικό <i>SAP2000</i> (οι κατακόρυφοι χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας της ανωδομής δεν εμφανίζονται στο ως άνω για να είναι πιο ευδιάκριτη η ανεμοπίεση). ..	51
Εικόνα 4.7: Σχήμα αναλογίας $\psi_1$ και $\lambda$ . (Πηγή: Γαντές Χ., Θανόπουλος Π., Γκατζογιάννης Σ. (2022). Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος «Θαλάσσιες Μεταλλικές Κατασκευές» με τίτλο: «Actions on marine structures», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.).....	51
Εικόνα 4.8: Επεξηγηματικό σχήμα σε σχέση με τις παραμέτρους $A$ και $A_c$ . (Πηγή: Γαντές Χ., Θανόπουλος Π., Γκατζογιάννης Σ. (2022). Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος «Θαλάσσιες Μεταλλικές	

Κατασκευές» με τίτλο: «Actions on marine structures», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.) .....	53
Εικόνα 4.9: Συσχέτιση των παραμέτρων $C_{f,0}$ και αριθμού $Re$ . (Πηγή: Γαντές Χ., Θανόπουλος Π., Γκατζογιάννης Σ. (2022). Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος «Θαλάσσιες Μεταλλικές Κατασκευές» με τίτλο: «Actions on marine structures», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.).....	53
Εικόνα 4.10: Ενδεικτικό σχήμα τμήματος του φορέα προς εξέταση. ....	53
Εικόνα 4.11: Εισαγωγή της ανεμοπίεσης στα μέλη του <i>jacket</i> στο λογισμικό <i>SAP2000</i> . ....	54
Εικόνα 4.12: Ζώνες χαρακτηριστικής τιμής φορτίου χιονιού με τις τιμές στον πίνακα 4.10. (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.).....	55
Εικόνα 4.13: Ετήσιες συχνότητες ανέμου από την ΕΜΥ στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης. (Πηγή: <a href="http://www.emy.gr/emv/el/climatology/climatology_city?perifereia=East%20Macedonia%20and%20Thrace&amp;poli=Alexandroupolis">http://www.emy.gr/emv/el/climatology/climatology_city?perifereia=East%20Macedonia%20and%20Thrace&amp;poli=Alexandroupolis</a> ).....	58
Εικόνα 4.14: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους <i>Fetch</i> . ....	59
Εικόνα 4.15: Εισαγωγή του κυματικού φορτίου μέσω του λογισμικού <i>SAP2000</i> . ....	60
Εικόνα 4.16: Προσομοίωση του κυματικού φορτίου μέσω του λογισμικού <i>SAP2000</i> κατά <i>API WSD2000</i> . ....	61
Εικόνα 4.17: Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας σύμφωνα με Εθνικό Προσάρτημα ΕΚ8. (Πηγή: Φραγκιαδάκης Μ. (2022). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Αντισεισμική Τεχνολογία Ι» με τίτλο «Μέρος Α΄», Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.).....	62
Εικόνα 4.18: Το ελαστικό φάσμα του ΕΚ8. (Πηγή: Φραγκιαδάκης Μ. (2022). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Αντισεισμική Τεχνολογία Ι» με τίτλο «Μέρος Α΄», Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.) .....	63
Εικόνα 4.19: Προσομοίωση της σεισμικής δράσης μέσω του λογισμικού <i>SAP2000</i> κατά <i>Ευρωκώδικα 8</i> . ....	63
Εικόνα 5.1: Τρισδιάστατη όψη ανωδομής.....	68
Εικόνα 5.2: Κάτοψη τυπικού ορόφου και διατομές. ....	68
Εικόνα 5.3: Τυπική όψη και διατομές. ....	69
Εικόνα 5.4: Τρισδιάσταση όψη <i>Jacket</i> . ....	70
Εικόνα 5.5: Λεπτομέρεια προσομοίωσης του ειδικού περιβλήματος <i>sleeve</i> . ....	72
Εικόνα 5.6: Διαστάσεις του ειδικού περιβλήματος <i>sleeve</i> . ....	72
Εικόνα 5.7: Λεπτομέρεια προσομοίωσης του <i>mudmat</i> . ....	72
Εικόνα 5.8: Συντελεστές $C_1, C_2, C_3$ συναρτήσει της εσωτερικής γωνίας τριβής $\varphi^\circ$ . (Πηγή: Μηχανικοί Μελετών & Εφαρμογών Α.Ε., ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή Α.Ε., Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών – ΕΜΠ (2015). Ερευνητικό Πρόγραμμα SeaWind – Σχεδιασμός θαλάσσιων ανεμογεννητριών με βλαση την επιτελεσματικότητα με τίτλο: «Π8.2 Πιλοτικός Προκαταρκτικός Σχεδιασμός & Διαστασιολόγηση Σταθερής Υπεράκτιας Ανεμογεννήτριας».).....	74
Εικόνα 5.9: Διάγραμμα καμπυλών $p-y$ . ....	76

Εικόνα 5.10: Προσομοίωση των μη-γραμμικών ελατηρίων στο πρόγραμμα <i>SAP2000</i> .	78
Εικόνα 5.11: Ανάθεση μη-γραμμικών ελατηρίων στα ευθύγραμμα τμήματα (μήκους 1 m) των πασσάλων.	78
Εικόνα 5.12: Ανάθεση ελατηρίων στις αιχμές των πασσάλων κατά τη διεύθυνση αυτών.	79
Εικόνα 5.13: 1 <sup>η</sup> Ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση του άξονα Y – <i>pin piles</i> .	82
Εικόνα 5.14: 2 <sup>η</sup> Ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση του άξονα X – <i>pin piles</i> .	82
Εικόνα 5.15: 3 <sup>η</sup> Ιδιομορφή περιστροφική ως προς τον άξονα Z – <i>pin piles</i> .	82
Εικόνα 5.16: 1 <sup>η</sup> Ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση του άξονα Y – <i>skirt piles</i> .	83
Εικόνα 5.17: 2 <sup>η</sup> Ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση του άξονα X – <i>skirt piles</i> .	83
Εικόνα 5.18: 3 <sup>η</sup> Ιδιομορφή περιστροφική ως προς τον άξονα Z – <i>skirt piles</i> .	83
Εικόνα 5.19: 1 <sup>η</sup> Ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση του άξονα Y – <i>mixed piles</i> .	84
Εικόνα 5.20: 2 <sup>η</sup> Ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση του άξονα X – <i>mixed piles</i> .	84
Εικόνα 5.21: 3 <sup>η</sup> Ιδιομορφή περιστροφική ως προς τον άξονα Z – <i>mixed piles</i> .	84
Εικόνα 5.22: Στατικός έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) με το πρόγραμμα <i>SAP2000</i> , όπου (Α) προσομοίωμα με <i>pin piles</i> , (Β) προσομοίωμα με <i>skirt piles</i> , (Γ) προσομοίωμα με <i>mixed piles</i> .	85
Εικόνα 5.23: Στατικός έλεγχος των πασσάλων σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) με το πρόγραμμα <i>SAP2000</i> , όπου (Α) προσομοίωμα με <i>pin piles</i> , (Β) προσομοίωμα με <i>skirt piles</i> , (Γ) προσομοίωμα με <i>mixed piles</i> .	86
Εικόνα 5.24: Δυσμενέστερη μέλος ανωδομής με αξιοποίηση 82%, στην οποία γίνεται ο έλεγχος οριακής κατάστασης λειτουργικότητας (ΟΚΛ).	87
Εικόνα 5.25: Α) Μετατόπιση ακραίου κόμβου της δοκού, Β) Μετατόπιση κόμβου στήριξης της δοκού στο υποστύλωμα/πόδι του <i>jacket</i> .	88
Εικόνα 5.26: Σκαριφήματα ροπών προσομοιωμάτων κατά τη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7: Α) <i>pin piles</i> , Β) <i>skirt piles</i> , Γ) <i>mixed piles</i> .	89
Εικόνα 5.27: Έλεγχος του δυσμενέστερου τμήματος των πασσάλων για το προσομοίωμα με χρήση <i>pin piles</i> κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού φόρτισης ΟΚΑ7.	90
Εικόνα 5.28: Έλεγχος του δυσμενέστερου τμήματος των πασσάλων για το προσομοίωμα με χρήση <i>skirt piles</i> κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού φόρτισης ΟΚΑ7.	91
Εικόνα 5.29: Έλεγχος του δυσμενέστερου τμήματος των πασσάλων για το προσομοίωμα με χρήση <i>mixed piles</i> κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού φόρτισης ΟΚΑ7.	92
Εικόνα 5.30: Μέγιστη μετατόπιση του φορέα κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής. Α) <i>pin piles</i> , Β) <i>skirt piles</i> , Γ) <i>mixed piles</i> .	93
Εικόνα 5.31: Σύγκριση μετατοπίσεων του φορέα κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής.	93
Εικόνα 6.1: Μέγιστη μετατόπιση του προσομοιώματος με <i>pin piles</i> κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής. Α) πάσσαλοι μήκους 40 m, Β) πάσσαλοι μήκους 35 m, Γ) πάσσαλοι μήκους 30 m.	96
Εικόνα 6.2: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με <i>pin piles</i> κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής.	96



Εικόνα 6.3: Μέγιστη μετατόπιση του προσομοιώματος με <i>skirt piles</i> κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής. Α) πάσσαλοι μήκους 40 m, Β) πάσσαλοι μήκους 35 m, Γ) πάσσαλοι μήκους 30 m. ....	97
Εικόνα 6.4: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με <i>skirt piles</i> κατά τη διεύθυνση Υ στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση του μήκους των πασσάλων. ....	97
Εικόνα 6.5: Μέγιστη μετατόπιση του προσομοιώματος με <i>mixed piles</i> κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής. Α) πάσσαλοι μήκους 40 m, Β) πάσσαλοι μήκους 35 m, Γ) πάσσαλοι μήκους 30 m. ....	98
Εικόνα 6.6: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με <i>mixed piles</i> κατά τη διεύθυνση Υ στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση του μήκους των πασσάλων. ....	98
Εικόνα 6.7: Συγκέντρωση δεδομένων μετατόπισης των τριών προσομοιωμάτων <i>pin</i> , <i>skirt</i> και <i>mixed</i> κατά τη διεύθυνση Υ στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση του μήκους των πασσάλων. ....	99
Εικόνα 6.8: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με <i>pin piles</i> κατά τη διεύθυνση Υ στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους $\varphi^\circ$ . ....	100
Εικόνα 6.9: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με <i>skirt piles</i> κατά τη διεύθυνση Υ στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους $\varphi^\circ$ . ....	100
Εικόνα 6.10: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με <i>mixed piles</i> κατά τη διεύθυνση Υ στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους $\varphi^\circ$ . ....	101
Εικόνα 6.11: Συγκέντρωση δεδομένων μετατόπισης των τριών προσομοιωμάτων <i>pin</i> , <i>skirt</i> και <i>mixed</i> κατά τη διεύθυνση Υ στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους $\varphi^\circ$ . ....	101
Εικόνα 6.12: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με <i>pin piles</i> κατά τη διεύθυνση Υ στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση του μήκους των πασσάλων για διαφορετικές γωνίες εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους $\varphi^\circ$ . ....	102
Εικόνα 6.13: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με <i>skirt piles</i> κατά τη διεύθυνση Υ στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση του μήκους των πασσάλων για διαφορετικές γωνίες εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους $\varphi^\circ$ . ....	102
Εικόνα 6.14: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με <i>mixed piles</i> κατά τη διεύθυνση Υ στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση του μήκους των πασσάλων για διαφορετικές γωνίες εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους $\varphi^\circ$ . ...	103
Εικόνα 6.15: Προτιμήσεις διαστασιολόγησης σύμφωνα με το πρότυπο του API RP2A-WSD2014 στο λογισμικό SAP2000. ....	105
Εικόνα 6.16: Εισαγωγή του φορτίου του ανέμου στο πρόγραμμα προσομοίωσης SAP2000 σύμφωνα με το πρότυπο API 4F 2013. ....	106
Εικόνα 6.17: Σύγκριση του συντελεστή σεισμικής ζώνης με την εδαφική επιτάχυνση για τα πρότυπα API και UBC. (Πηγή: El-Reedy Mohamed A., Ph.D. (2012). «Offshore Structures, Design, Construction and Maintenance». Elsevier, USA.).....	107

Εικόνα 6.18: Εισαγωγή της σεισμικής δράσης κατά τη διεύθυνση X στο πρόγραμμα προσομοίωσης SAP2000 σύμφωνα με το πρότυπο UBC 1997.....	108
Εικόνα 6.19: Σύγκριση των μετατοπίσεων των τριών προσομοιωμάτων κατά τη διεύθυνση Y στην άκρη του 3 <sup>ου</sup> καταστρώματος της ανώδομης κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού OKA7 (σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα) και του δυσμενέστερου συνδυασμού Storm 90° (σύμφωνα με το πρότυπο του API).....	109

# 1 ΥΠΕΡΑΚΤΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

## 1.1 Εισαγωγή

Υπεράκτιες κατασκευές, σταθερές ή πλωτές, είναι οι κατασκευές, οι οποίες βρίσκονται στην θάλασσα, δεν έχουν σταθερή πρόσβαση σε χερσαίο έδαφος και έχουν ως κύριο υλικό κατασκευής το χάλυβα.

Τεχνικά, ο σχεδιασμός και η κατασκευή υπεράκτιας πλατφόρμας είναι μια υβριδική κατασκευή που συνδυάζει τους κλάδους των μεταλλικών κατασκευών και των λιμενικών έργων.

Μόνο ένας περιορισμένος αριθμός σχολών μηχανικών επικεντρώνεται στην υπεράκτια κατασκευαστική μηχανική, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού σταθερών υπεράκτιων πλατφορμών, πλωτών ή άλλων τύπων, και, ίσως λόγω του περιορισμένου αριθμού των υπεράκτιων δομικών έργων σε σύγκριση με τον αριθμό των κανονικών μεταλλικών έργων, όπως οι κτιριακές εγκαταστάσεις και τα εργοστάσια. Επιπλέον, η κατασκευή υπεράκτιων χαλύβδινων κατασκευών εξαρτάται από τη συνεχή έρευνα και μελέτη που αντλείται σε παγκόσμια κλίμακα.

Όλες οι μεγάλες πολυεθνικές εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον τομέα του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και των ανεμογεννητριών ενδιαφέρονται για τις υπεράκτιες κατασκευές. Οι εταιρείες αυτές παρέχουν συνεχή υποστήριξη για την έρευνα και την ανάπτυξη, που θα ενισχύσει την ικανότητα των εταιρειών, των μηχανικών και των εργολάβων κατασκευών τους, να υποστηρίξουν τις επιχειρηματικές τους ανάγκες.

## 1.2 Ερμηνεία της Υπεράκτιας Κατασκευής

Μια υπεράκτια κατασκευή δεν έχει σταθερή πρόσβαση σε ξηρά και μπορεί να απαιτείται να παραμείνει στη θέση της, υπό οποιεσδήποτε καιρικές συνθήκες. Οι υπεράκτιες κατασκευές μπορεί να είναι στερεωμένες στον πυθμένα της θάλασσας ή να είναι πλωτές. Οι πλωτές κατασκευές μπορεί να είναι αγκυροβολημένες στο βυθό, να τοποθετούνται δυναμικά με προωθητήρες ή να αφήνονται να παρασύρονται ελεύθερα. Η μηχανική των κατασκευών που χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μεταφορά αγαθών και ανθρώπων ή για κατασκευές, όπως τα θαλάσσια και εμπορικά πλοία, τα πλοία πολλαπλών υπηρεσιών (*MSV*) και τα γερανοφόρα πλοία βαρέως τύπου (*HLCV*) που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη εργασιών ανάπτυξης πεδίου, καθώς και οι φορτηγίδες και τα ρυμουλκά, δεν εξετάζονται λεπτομερώς στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Ενώ η πλειονότητα των υπεράκτιων κατασκευών υποστηρίζει την εξερεύνηση και την παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, άλλες σημαντικές κατασκευές εμφανίζονται επίσης όπως π.χ. για την

αξιοποίηση της ενέργειας από τη θάλασσα, υπεράκτιες βάσεις, υπεράκτια αεροδρόμια. Ο σχεδιασμός αυτών των κατασκευών χρησιμοποιεί τις ίδιες αρχές μελέτης και δόμησης των υπεράκτιων έργων.



Εικόνα 1.1: Υπεράκτια Κατασκευή. (Πηγή: <https://www.offshorewind.biz/2018/08/06/hornsea-one-offshore-substations-in-place/>)

### 1.3 Ιστορία Υπεράκτιων Κατασκευών

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του *Chakrabarti*, η υπεράκτια εξερεύνηση πετρελαίου και φυσικού αερίου χρονολογείται από τον δέκατο ένατο αιώνα. Οι πρώτες υπεράκτιες πετρελαιοπηγές διανοίχθηκαν από εκτεταμένες προβλήτες στα νερά του Ειρηνικού Ωκεανού, στα ανοικτά των Σάμερλαντς της Καλιφόρνιας τη δεκαετία του 1890 (και στα ανοικτά του Μπακού του Αζερμπαϊτζάν στην Κασπία Θάλασσα). Ωστόσο, η γέννηση της υπεράκτιας βιομηχανίας θεωρείται από πολλούς το 1947, όταν η *Kerr-McGee* ολοκλήρωσε την πρώτη επιτυχημένη υπεράκτια γεώτρηση στον Κόλπο του Μεξικού στα 4,6 m βάθος νερού στα ανοικτά της Λουϊζιάνα [*Burleson, 1999*]. Η γεώτρηση και τα έργα άντλησης υποστηρίχθηκαν σε μια ξύλινη πλατφόρμα με ξύλινο κατάστρωμα 11,6 m επί 21,6 m, χτισμένη πάνω σε 16 πασσάλους 61 cm

που τοποθετήθηκαν σε βάθος 31,7 m. Από την εγκατάσταση αυτής της πρώτης πλατφόρμας στον Κόλπο του Μεξικού πριν από 50 χρόνια, η υπεράκτια βιομηχανία έχει δει πολλές καινοτόμες κατασκευές, σταθερές και πλωτές, να τοποθετούνται σε όλο και πιο βαθιά νερά και σε πιο δύσκολα και εχθρικά περιβάλλοντα. Μέχρι το 1975, το βάθος κατασκευής επεκτάθηκε στα 144 m. Μέσα στα επόμενα τρία χρόνια το βάθος κατασκευής έκανε δραματικό άλμα στο διπλάσιο με την εγκατάσταση της πλατφόρμας *COGNAC*, η οποία αποτελούνταν από τρεις ξεχωριστές κατασκευές, η μία πάνω στην άλλη, στα 312 m. Η *COGNAC* κατείχε το παγκόσμιο ρεκόρ βάθους νερού για μια σταθερή υπεράκτια κατασκευή από το 1978 έως το 1991. Πέντε σταθερές κατασκευές εγκαταστάθηκαν σε βάθη νερού μεγαλύτερα από 328 m τη δεκαετία του 1990. Η βαθύτερη από αυτές είναι η πλατφόρμα *Shell Bullwinkle* στα 412 m που εγκαταστάθηκε το 1991. Η εξέλιξη των σταθερών υπεράκτιων κατασκευών σε βαθύτερα ύδατα μέχρι το 1988 παροσιάζεται στην εικόνα 1.2.

Από το 1947 έχουν κατασκευαστεί και εγκατασταθεί παγκοσμίως περισσότερες από 10.000 υπεράκτιες πλατφόρμες διαφόρων τύπων και μεγεθών. Το 1995, το 30% της παγκόσμιας παραγωγής αργού πετρελαίου προερχόταν από υπεράκτιες πλατφόρμες. Πρόσφατα, έγιναν νέες ανακαλύψεις σε όλο και πιο βαθιά νερά. Το 2003, το 3% του παγκόσμιου εφοδιασμού σε πετρέλαιο και φυσικό αέριο προήλθε από υπεράκτια παραγωγή σε βαθιά νερά (>305 m) [*Westwood, 2003*]. Το ποσοστό αυτό προβλέπεται να αυξηθεί στο 10% τα επόμενα δεκαπέντε χρόνια. Το μεγαλύτερο μέρος του νέου πετρελαίου θα προέρχεται από την παραγωγή σε βαθιά και πολύ βαθιά ύδατα από τρεις υπεράκτιες περιοχές, γνωστές ως "Χρυσό Τρίγωνο": Κόλπος του Μεξικού, Δυτική Αφρική και Βραζιλία.

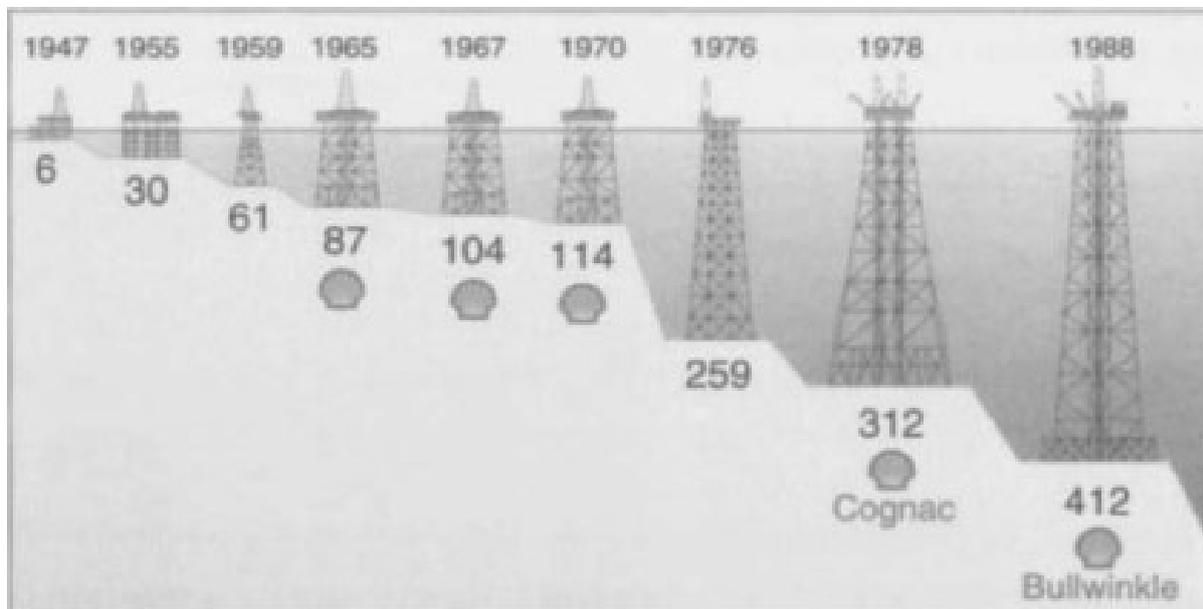
Η εικόνα 1.3 απεικονίζει την πρόσφατη αύξηση των γεωτρήσεων σε πολύ βαθιά νερά στον Κόλπο του Μεξικού. Η δραστηριότητα των γεωτρήσεων είναι ενδεικτική της μελλοντικής παραγωγής.

Οι σταθερές κατασκευές γίνονταν όλο και πιο ακριβές και πιο δύσκολο να εγκατασταθούν καθώς τα βάθη των υδάτων αυξάνονταν. Μια καινοτόμος και φθηνότερη εναλλακτική λύση στη σταθερή δομή, δηλαδή η πλατφόρμα *Lena* (πλατφόρμα άντλησης πετρελαίου που κατασκευάστηκε στον Κόλπο του Μεξικού) παρουσιάστηκε το 1983. Η πλατφόρμα κατασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε η ανωδομή του φορέα μπορούσε να παραμορφωθεί με τις δυνάμεις των κυμάτων και του ανέμου. Οι πάσσαλοι που εκτείνονται πάνω από τη θάλασσα θα μπορούσαν να λυγίσουν και οι οριζόντιες αλυσίδες πρόσδεσης που συνδέονται στη μέση της πλατφόρμας θα μπορούσαν να αντιστέκονται στα μεγαλύτερα φορτία τυφώνων. Η πλατφόρμα *Lena* εγκαταστάθηκε σε 305 m βάθος νερού. Δύο ακόμη "συμβατοί" πύργοι εγκαταστάθηκαν στον Κόλπο του Μεξικού το 1998: *Amerada Hess Baldpate* στα 502 m και *Chevron Texaco Petronius* στα 502 m. Ο πύργος *Petronius* ήταν η ψηλότερη αυτόνομη κατασκευή στον κόσμο, μέχρι που ξεπεράστηκε από το *Burj Khalifa* το 2010.

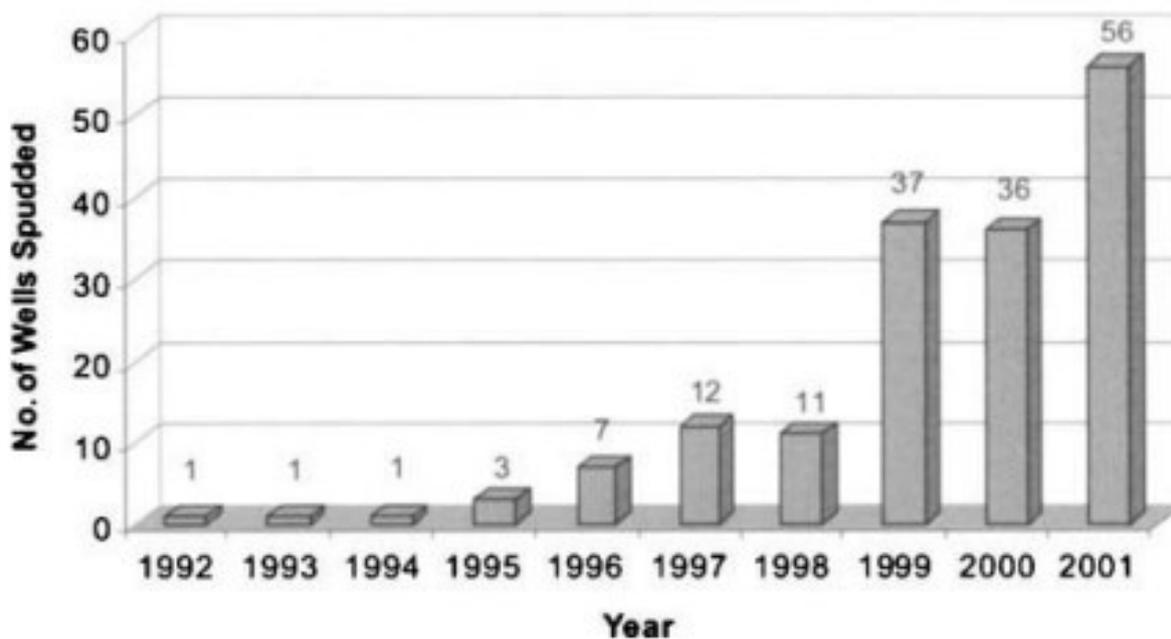
Παρόλο που σχεδόν όλες αυτές οι πλατφόρμες είναι χαλύβδινες, περίπου είκοσι τέσσερις μεγάλες κατασκευές από σκυρόδεμα εγκαταστάθηκαν στα πολύ αφιλόξενα νερά της Βόρειας Θάλασσας τη δεκαετία του 1980 και στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και αρκετές άλλες στα ανοικτά της Βραζιλίας, του Καναδά και των Φιλιππίνων. Μεταξύ αυτών, η πλατφόρμα φυσικού αερίου *Troll A* (εικόνα 1.4) είναι η ψηλότερη κατασκευή από σκυρόδεμα που μετακινήθηκε στην επιφάνεια της γης, η οποία εγκαταστάθηκε το 1996 στη θαλάσσια περιοχή της Νορβηγίας. Το συνολικό της ύψος είναι 369 m και περιέχει 245.000 m<sup>3</sup> σκυροδέματος, που ισοδυναμεί με 215.000 θεμέλια σπιτιών.

Οι κατασκευές βαρύτητας διαφέρουν από άλλες σταθερές κατασκευές έχουσες την ιδιομορφία να συγκρατούνται στη θέση τους αυστηρά από το βάρος των κατασκευών βάσης τους. Η πλατφόρμα *Troll A*, για παράδειγμα, διεισδύει 36 m στον πυθμένα της θάλασσας υπό το ίδιο της το βάρος. Το πρώτο πλωτό σύστημα παραγωγής, μια τροποποιημένη ημιβυθιζόμενη κατασκευή, εγκαταστάθηκε στο κοιτάσμα *Argyle* από τη *Hamilton* στη Βόρεια Θάλασσα του Ηνωμένου Βασιλείου το 1975. Το πρώτο πλωτό σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης σε σχήμα πλοίου εγκαταστάθηκε το 1977 από τη *Shell International* για το κοιτάσμα *Castellon*, στα ανοικτά της Ισπανίας. Το 2002 υπήρχαν 40 ημιβυθιζόμενα πλωτά συστήματα παραγωγής (FPS) και 91 πλωτά συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης σε σχήμα

πλοίου (*FPSO*) σε λειτουργία ή υπό κατασκευή για βαθιά ύδατα [*Offshore, 2002*]. Η *Petrobras* υπήρξε πρωτοπόρος στην προώθηση της πλωτής παραγωγής σε όλο και βαθύτερα ύδατα στα κοιτάσματα της λεκάνης *Campos*, στα ανοικτά της Βραζιλίας.



Εικόνα 1.2: Εξέλιξη των σταθερών υπεράκτιων πλατφορμών. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



Εικόνα 1.3: Διάγραμμα αριθμού γεωτρήσεων συναρτήσει του χρόνου. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



Εικόνα 1.4: Πλατφόρμα *Troll A* (Η υψηλότερη κατασκευή του κόσμου από σκυρόδεμα που μετακινήθηκε στην επιφάνεια της γης). (Πηγή: <https://www.zmescience.com/other/offbeat-other/tallest-structure/>)

#### 1.4 Καταστροφές σε Υπεράκτιες Κατασκευές

Αν και οι περισσότερες από τις υπεράκτιες κατασκευές που έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα έχουν αντέξει στη δοκιμασία του χρόνου, έχουν σημειωθεί και αρκετές καταστροφικές αστοχίες υπεράκτιων κατασκευών. Οι καιρικές συνθήκες, οι εκρήξεις, οι ανατροπές και τα ανθρώπινα λάθη είχαν ως αποτέλεσμα την απώλεια σημαντικού αριθμού σταθερών και πλωτών κατασκευών. Μεταξύ 1955 και 1968, σχεδόν είκοσι τέσσερις κινητές μονάδες γεώτρησης καταστράφηκαν. Μόνο κατά τη διετή περίοδο μεταξύ 1957 και 1959, οι τυφώνες *Hilda* και *Betsy* προκάλεσαν απώλειες εκατοντάδων εκατομμυρίων δολαρίων σε εγκαταστάσεις γεώτρησης, παραγωγής και αγωγών. Δύο ημιβυθιζόμενες πλατφόρμες ανατράπηκαν και βυθίστηκαν τη δεκαετία του 1980: *Alexander Keilland*, ένα σκάφος μεταφοράς προσωπικού στη νορβηγική βόρεια θάλασσα (1980), και το *Ocean Ranger* στα ανοικτά της *Hibernia* του Καναδά (1982), είχαν ως αποτέλεσμα την απώλεια εκατοντάδων ανθρώπινων ζώων.

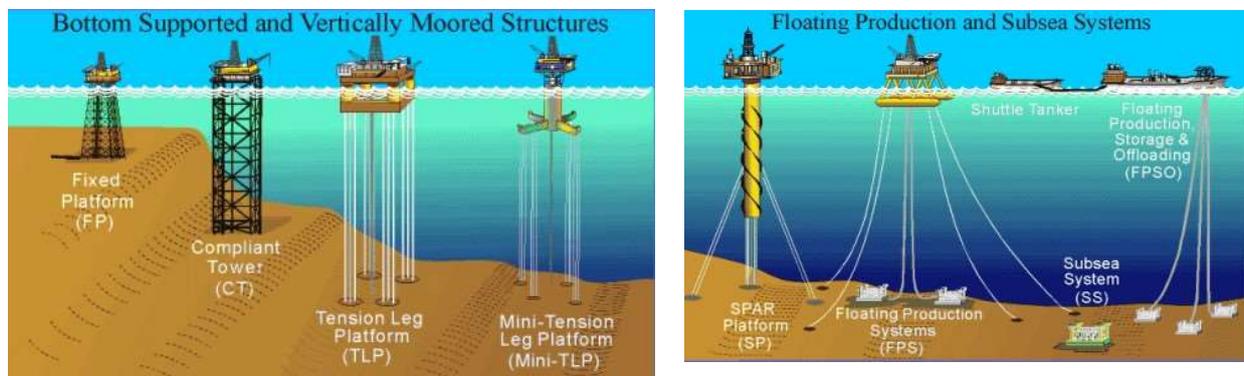
Η χειρότερη υπεράκτια καταστροφή συνέβη όταν η πλατφόρμα πετρελαίου και φυσικού αερίου *Piper Alpha* έπιασε φωτιά το 1988. Εκατόν εξήντα επτά άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους. Τον Μάρτιο του 2001, το μεγαλύτερο πλωτό σύστημα παραγωγής στον κόσμο, το *P-36* της *Petrobras*, βυθίστηκε στη λεκάνη *Campos* (εικόνα 1.5) και κόστισε 10 ζωές [Barusco, 2002].



Εικόνα 1.5: Τραγωδία με το P-36 της Petrobras να βυθίζεται στη λεκάνη Campos. (Πηγή: <https://www.bluestarline.org/farstad/p36.html>)

## 1.5 Κατηγορίες Υπεράκτιων Πλατφορμών

Οι υπεράκτιες κατασκευές μπορούν να οριστούν είτε ως εδραζόμενες στον πυθμένα είτε ως πλωτές. Οι κατασκευές που εδράζονται στον πυθμένα είναι είτε "σταθερές", όπως τα *jackets* και οι κατασκευές βαρύτητας, είτε "εύκαμπτες", όπως ο καλωδιωτός πύργος (*guyed tower*) και ο πύργος πρόβολος (*compliant tower*). Οι πλωτές κατασκευές είναι από τη φύση τους ευλύγιστες. Μπορούν να θεωρηθούν είτε ως "ουδέτερης άνωσης", όπως οι ημιβυθιζόμενες *FPSs*, οι *FPSOs* σε σχήμα πλοίου και οι μονοκόλונες *Spars*, είτε ως "θετικής άνωσης", όπως οι πλατφόρμες ποδιών έντασης (*Tension Leg Platforms – TLP*).



Εικόνα 1.6: Είδη υπεράκτιων κατασκευών. (Πηγή: Χατζηγεωργίου Ιωάννης Κ., Κονισπολιάτης Δ (2022). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Έργα Ανοικτής Θαλάσσης» με τίτλο: «Offshore Platform Design», Εργαστήριο Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)



### 1.5.1 Κατασκευές εδραζόμενες στον πυθμένα

Οι κατασκευές που εδράζονται στον πυθμένα, με εξαίρεση τις κατασκευές βαρύτητας, κατασκευάζονται συνήθως από συγκολλημένα χαλύβδινα σωληνωτά μέλη. Τα μέλη αυτά λειτουργούν ως δικτυώματα που υποστηρίζουν το βάρος του εξοπλισμού επεξεργασίας και τις περιβαλλοντικές δυνάμεις από τα κύματα, τον άνεμο και τα ρεύματα.

Οι κατασκευές που εδράζονται στον πυθμένα ονομάζονται "σταθερές" όταν η χαμηλότερη ιδιοσυχνότητα της ελαστικής τους κίνησης είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια των κυμάτων. Συμπεριφέρονται ως δύσκαμπτες κατασκευές και πρέπει να αντιστέκονται στις μέγιστες δυναμικές φορτίσεις του περιβάλλοντος.

Οι "εύκαμπτες" κατασκευές με βάση τον πυθμένα σχεδιάζονται συνήθως έτσι ώστε η χαμηλότερη ιδιοσυχνότητά τους να είναι μικρότερη από την ενέργεια των κυμάτων. Τα κύματα, ο άνεμος και τα ρεύματα προκαλούν παραμόρφωση αυτών των κατασκευών, αλλά το μέγεθος των δυναμικών φορτίων μειώνεται σημαντικά. Αυτό επιτρέπει σε οικονομικές κατασκευές εδραζόμενες στον πυθμένα να σχεδιάζονται για βάθη νερού, τα οποία δεν θα ήταν πρακτικά εφικτά για σταθερές κατασκευές.

Ο τύπος κατασκευής που εδράζεται στον πυθμένα συμπεριφέρεται όπως μια σταθερή κατασκευή σε ένα ήπιο περιβάλλον. Μια τέτοια κατασκευή σχεδιάζεται με τα αντίστοιχα μέσα ώστε να συμπεριφέρεται τόσο ως σταθερή όσο και ως εύκαμπτη κατασκευή. Η ευκαμψία επιτυγχάνεται με επιλογές όπως τα τεταμένα συρματοσχοίνα που συνδέονται με βαριές αλυσίδες στον πυθμένα ή αποσπώμενες συνδέσεις με πασσάλους. Έτσι, όταν οι εφαρμοζόμενες πλευρικές δυνάμεις ανέμου, κύματος και ρεύματος υπερβούν το όριο σχεδιασμού, οι αλυσίδες ανασηκώνονται από τον πυθμένα ή οι συνδέσεις πασσάλων αποδεσμεύονται, ώστε η σταθερή δομή να μετατραπεί σε περιστροφικά εύκαμπτη δομή (από μηδενικούς βαθμούς ελευθερίας σε δύο βαθμούς ελευθερίας γύρω από τον πυθμένα).

### 1.5.2. Πλωτές Υπεράκτιες Κατασκευές

Οι πλωτές κατασκευές έχουν διάφορους βαθμούς ευκαμψίας.

Οι "ουδέτερης άνωσης πλωτές κατασκευές", όπως τα ημιβυθισμένα σκάφη, τα *Spars* και τα γεωτρύπανα, είναι δυναμικά ανεμπόδιστες και επιτρέπεται να έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας (ανύψωση, κύμα, ταλάντωση, κλίση, κύλιση και περιστροφή). Ένα σώμα (π.χ. μία πλωτή υπεράκτια κατασκευή) θεωρείται ότι επιπλέει με ουδέτερη άνωση όταν η μέση πυκνότητά του είναι ίση με την πυκνότητα του υγρού στο οποίο είναι βυθισμένο (σε αυτή την περίπτωση του νερού), με αποτέλεσμα η δύναμη της άνωσης να εξισορροπεί τη δύναμη της βαρύτητας που διαφορετικά θα ανάγκαζε το σώμα να βυθιστεί (αν η πυκνότητα του σώματος είναι μεγαλύτερη από την πυκνότητα του υγρού στο οποίο είναι βυθισμένο) ή να αναδυθεί (αν είναι μικρότερη). Ένα σώμα που έχει ουδέτερη άνωση δεν θα βυθιστεί ούτε θα αναδυθεί.

Οι "θετικής άνωσης πλωτές κατασκευές" εξαρτώνται από ένα συνδυασμό της επιφάνειας του πλωτήρα και της δυσκαμψίας που παρέχουν οι προσδέσεις για να επιτύχουν σταθερότητα, όπως οι *Tension Leg Platforms (TLPs)* και οι *Tethered Buoyant Towers (TBTs)* ή οι *Buoyant Leg Structures (BLS)*, είναι προσδεμένες στον πυθμένα και περιορίζονται από το κύμα. Αντίστοιχα με τον ορισμό της ουδέτερης άνωσης, ένα σώμα θεωρείται ότι επιπλέει με θετική άνωση όταν η μέση πυκνότητά του είναι μικρότερη από την πυκνότητα του υγρού στο οποίο είναι βυθισμένο, με αποτέλεσμα η δύναμη της άνωσης να υπερτερεί της δύναμης της βαρύτητας του σώματος και να ωθεί το ίδιο να αναδυθεί.

Όλες αυτές οι κατασκευές είναι δομικά δύσκαμπτες. Η ευκαμψία επιτυγχάνεται με το σύστημα πρόσδεσης. Η διαστασιολόγηση των πλωτών κατασκευών βασίζεται στις εκτιμήσεις της άνωσης και της ευστάθειας. Το βάρος της ανωδομής για αυτές τις κατασκευές είναι πιο κρίσιμο από ό,τι για μια δομή εδραζόμενη στον πυθμένα. Τα ημιβυθιζόμενα σκάφη και τα κύπη σε σχήμα πλοίου βασίζονται στην ικανότητα ευστάθειας της επιφάνειας του πλωτήρα. Το κέντρο βάρους βρίσκεται συνήθως πάνω από το κέντρο άνωσης. Η πλατφόρμα *Spar* έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε το κέντρο βάρους της να βρίσκεται χαμηλότερα από το κέντρο άνωσης, επομένως είναι εγγενώς σταθερή.



## 2 Το ΔΙΚΤΥΩΜΑ ΩΣ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

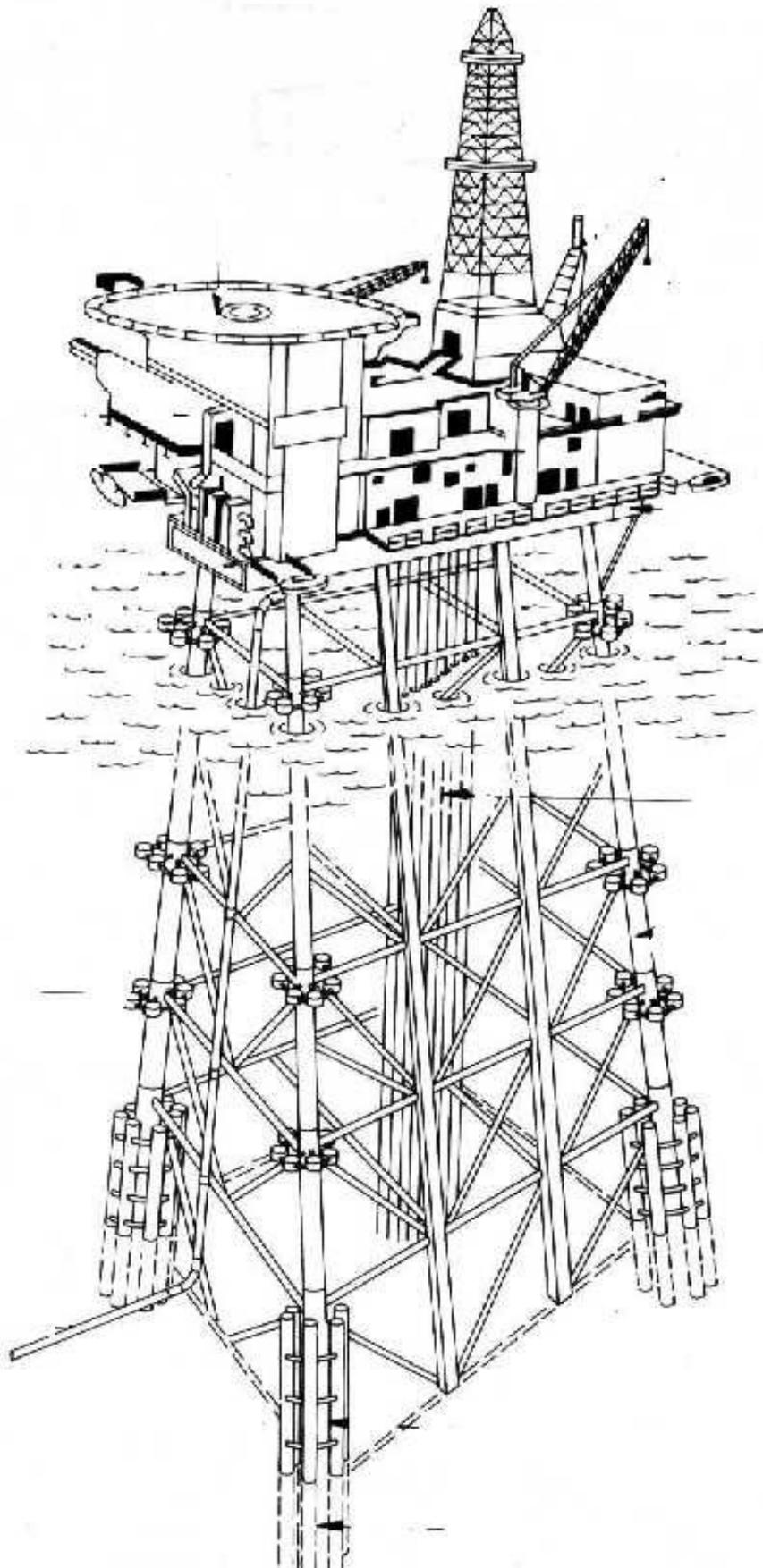
Στην παρούσα διπλωματική εργασία πρόκειται να γίνει εμβάθυνση στις εδραζόμενες στον βυθό υπεράκτιες κατασκευές και συγκεκριμένα στο δικτύωμα τύπου *Jacket*.

### 2.1 Υπεράκτια Κατασκευή με Δικτύωμα (*Jacket*)

Οι κατασκευές *jacket* ή δικτύωματος εξακολουθούν να είναι οι πιο κοινές υπεράκτιες κατασκευές που χρησιμοποιούνται για γεώτρηση και παραγωγή ενέργειας. Ορισμένα *jacket* περιέχουν διευρυμένα πόδια, τα οποία είναι κατάλληλα για αυτοανάδυση κατά την εγκατάστασή τους στο χώρο. Οι σταθερές δομές *jacket* αποτελούνται από σωληνοειδή μέλη που συνδέονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν ένα τρισδιάστατο πλαίσιο (εικόνα 2.1). Οι κατασκευές αυτές έχουν συνήθως τέσσερα έως οκτώ πόδια μπηγμένα ώστε να επιτυγχάνεται σταθερότητα έναντι ανατροπής σε κυματισμούς. Οι κύριοι πάσσαλοι, οι οποίοι είναι σωληνοειδείς μεταφέρονται συνήθως μαζί με το *jacket* και εμπεγνύονται μέσω των ποδιών του *jacket* στον πυθμένα της θάλασσας. Ο όρος δομή *jacket* έχει εξελιχθεί από την έννοια της παροχής ενός περιβλήματος ("*jacket*") για τους αγωγούς του κοιτάσματος.

Αυτές οι πλατφόρμες υποστηρίζουν γενικά μια υπερκατασκευή, η οποία έχει δύο ή τρία καταστρώματα με εξοπλισμό γεώτρησης, παραγωγής και εξέδρες επισκευής. Η χρήση αυτών των πλατφορμών, σύμφωνα με το εγχειρίδιο του *Chakrabarti*, έχει γενικά περιοριστεί σε βάθος νερού περίπου 150-180 m στο αντίξοο περιβάλλον της Βόρειας Θάλασσας (τυπικό κύμα σχεδιασμού 30 m), ενώ στο πιο ενδιάμεσο περιβάλλον του Κόλπου του Μεξικού (τυπικό κύμα σχεδιασμού 23 m) έξι *jacket* έχουν εγκατασταθεί σε βαθύτερα νερά.

Ένα μεγάλο *jacket* βάρους 34.300 τόνων εγκαταστάθηκε το 1979 στο κοιτάσμα *Cognac* στον Κόλπο του Μεξικού στα ανοικτά των ακτών της Λουιζιάνα σε βάθος νερού 300 m. Αυτή η κατασκευή που έσπασε το ρεκόρ ακολουθήθηκε από άλλες πλατφόρμες, συμπεριλαμβανομένων των *Cerveza* και *Cerveza Liguera* (285 m), *Pompano* (393 m) και την πλατφόρμα *Bullwinkle* που κατέχει σήμερα το ρεκόρ. Το μονοκόμματο *jacket Bullwinkle* ζυγίζει 49.375 τόνους και εγκαταστάθηκε σε μια τοποθεσία με βάθος νερού 412 m το 1988. Το αρχικό βάρος του καταστρώματος του *Bullwinkle* ήταν 2033 τόνοι. Τέσσερις χιλιάδες τόνοι προστέθηκαν το 1996 για να φιλοξενήσουν μεγαλύτερη παραγωγή. Μια πλωτή πλατφόρμα που θα μπορούσε να φιλοξενήσει αυτό το ωφέλιμο φορτίο θα ζύγιζε περίπου 6000-10.000 τόνους.



Εικόνα 2.1: Δικτύωμα *Jacket*. (Πηγή: [https://www.researchgate.net/figure/Steel-jacket-structure\\_fig1\\_226471868](https://www.researchgate.net/figure/Steel-jacket-structure_fig1_226471868))

## 2.2 Δικτύωμα (*Jacket*) και Πάσσαλοι

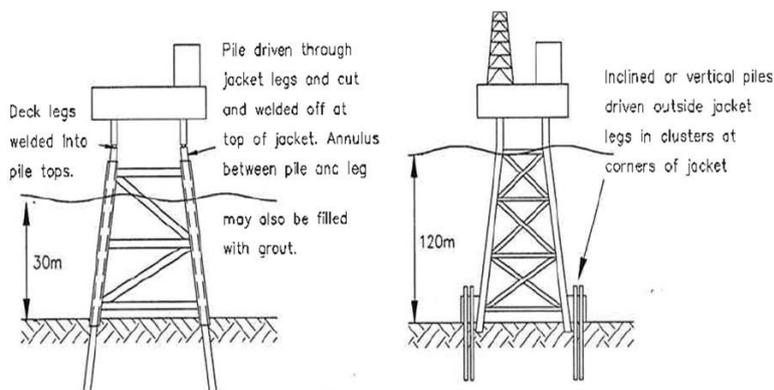
Η θεμελίωση ενός υπεράκτιου δικτύωματος (*jacket*) γίνεται με τη χρήση πασσάλων. Υπάρχουν δύο διαφορετικές περιπτώσεις θεμελίωσης με πασσάλους (εικόνα 2.2):

1. Στην πρώτη περίπτωση, οι πάσσαλοι είναι μικρότερης διαμέτρου από τα κάθετα φέροντα στοιχεία του jacket (πόδια) και είναι εφικτό να μπηχθούν μέσα από αυτά, υιοθετώντας την κλίση τους, και να καταλήξουν σε επαρκές βάθος θεμελίωσης στον βυθό. Το κενό μεταξύ της εξωτερικής διαμέτρου των πασσάλων και της εσωτερικής διαμέτρου των ποδιών είναι δυνατό να πληρωθεί με ένεμα για μεγαλύτερη δυσκαμψία, χωρίς να είναι υποχρεωτικό. Τα υποστυλώματα του καταστώματος εδράζονται πάνω στις κορυφές των πασσάλων, όπου και συγκολλούνται. Οι πάσσαλοι αυτού του τύπου λέγονται *pin piles*.
2. Στην δεύτερη περίπτωση, οι πάσσαλοι εμπεγνύονται μέσω ειδικών διαμορφωμένων περιβλημάτων (εικόνα 2.2), τα οποία συγκολλούνται παρά τον πόδα, στον βυθό και ονομάζονται *sleeves*. Σε αυτή την περίπτωση, δεν είναι αναγκαία η επιλογή μικρότερης διαμέτρου των πασσάλων σε σχέση με διάμετρο των ποδιών, αλλά και είναι εφικτή η τοποθέτηση παραπάνω από ένα πάσσαλο σε κάθε πόδι. Οι πάσσαλοι αυτού του τύπου λέγονται *skirt piles*.

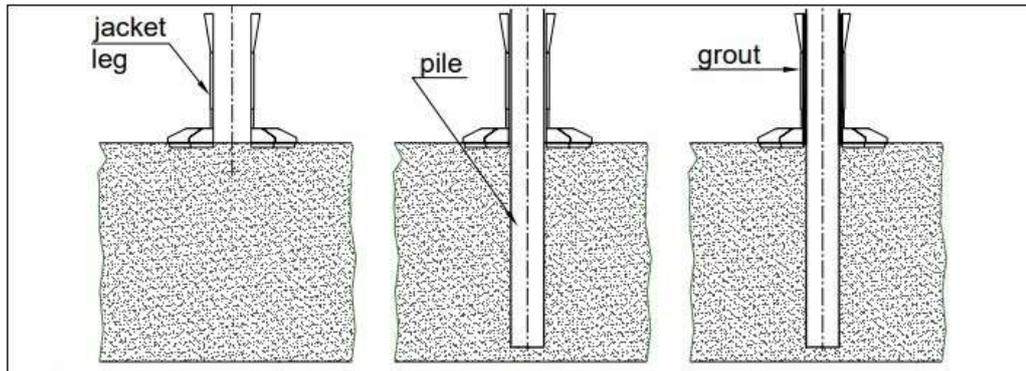
Στην παρούσα διπλωματική θα αναλυθεί εκτενώς η επιρροή του τρόπου θεμελίωσης με πασσάλους.

Η μεταφορά φορτίου μέσω του ενέματος ενισχύεται από κρίκους ή σπειροειδείς ράβδους που συγκολλούνται στην περιμετρο του ποδιού *skirt* για να λειτουργήσουν ως διατμητικά κλειδιά (εικόνα 2.3)

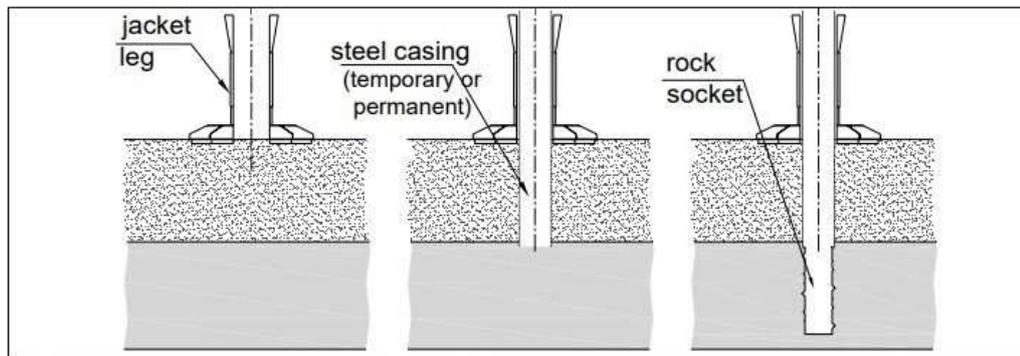
Για την υποστήριξη των jackets στην φάση τοποθέτησής τους στον πυθμένα χρησιμοποιούνται τα *mudmats*. Πρόκειται για ειδικά διαμορφωμένα πέδιλα, τα οποία εφαρμόζουν στον πάτο των ποδιών για να παρέχουν την απαιτούμενη επιφάνεια έδρασης για τη στήριξη του βάρους του jacket και την αντίσταση στην περιβαλλοντική φόρτιση κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης και μέχρι να αναπτυχθεί επαρκώς η αντοχή των πασσάλων. Η φάση αυτή είναι γνωστή ως φάση "μη πακτωμένης σταθερότητας". Τα πέδιλα αποτελούν επίπεδες πλάκες που κατασκευάζονται από χαλυβδοέλασμα ή, για τη μείωση του βάρους, από υαλοενισχυμένα πλαστικά. Τα *mudmats* διαστασιολογούνται έτσι ώστε να υποστηρίζουν τα συνδυασμένα φορτία του βάρους και της άνωσης του *jacket*, το βάρος των πασσάλων που πρέπει να στηριχθούν στο *jacket* και τα περιβαλλοντικά φορτία που σχετίζονται με το χρονικό περιθώριο εγκατάστασης. Σε περίπτωση που χρησιμοποιούνται πάσσαλοι τύπου *skirt*, τα ειδικά περιβλήματα αυτών (τα λεγόμενα *sleeves*) ενσωματώνονται στα *mudmats* (εικόνα 2.4). Αν δεν είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθούν τα *mudmats*, ίσως χρειαστεί ενίσχυση του εδάφους για την ασφαλή παραλαβή του φορτίου από το *jacket*. Τέτοιες μέθοδοι πιθανών περιλαμβάνουν βυθοκόρηση, αντικατάσταση των ακατάλληλων υλικών με χαλίκι και προφόρτιση της θεμελίωσης, δονητική συμπύκνωση, ή δονητική αντικατάσταση και κατασκευή πέτρινων υποστυλωμάτων.



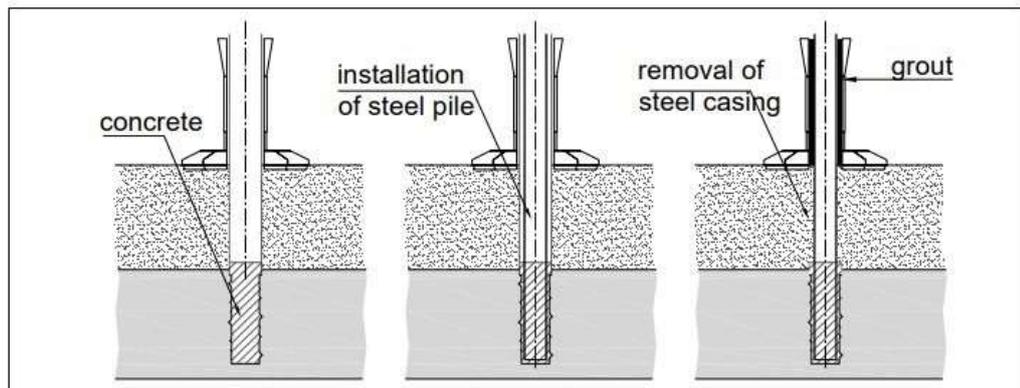
Εικόνα 2.2: Διαφορετικές περιπτώσεις θεμελίωσης με πασσάλους. (Πηγή: Chatzigiannelis I., Elsayed K., Loukakis K., M. ASCE, P.E. (March 2009). "Foundation Engineering of Offshore "Jacket" Structures." Conference Paper, International Foundation Congress and Equipment Expo 2009.)



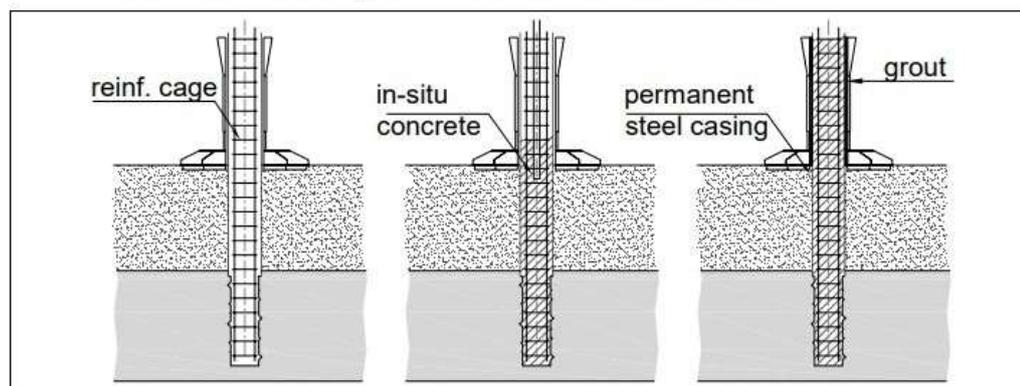
**Driven steel pile through Jacket leg into soil deposits**



**Construction of rock socket; drilling through Jacket leg and steel casing**



**Installation of steel pile in concrete-filled rock socket.**



**Construction of R.C. pile connected to permanent steel casing**

Εικόνα 2.3: Περιγραφή διαδικασίας έμψηξης και σκυροδέτησης πασσάλου. (Πηγή: Chatzigiannelis I., Elsayed K., Loukakis K., M. ASCE, P.E. (March 2009). "Foundation Engineering of Offshore "Jacket" Structures." Conference Paper, International Foundation Congress and Equipment Expo 2009.)



Εικόνα 2.4: Περιβλήματα *skirt* σε συνδυασμό με *mudmat*. (Πηγή: Chatzigiannelis I., Elsayed K., Loukakis K., M. ASCE, P.E. (March 2009). "Foundation Engineering of Offshore "Jacket" Structures." Conference Paper, International Foundation Congress and Equipment Expo 2009.)

### 2.3 Διαστασιολόγηση ενός Υπεράκτιου Δικτυώματος

Οι τρεις βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού μιας σταθερής υπεράκτιας πλατφόρμας είναι:

- i. Ικανότητα αντοχής σε όλα τα φορτία, που αναμένονται κατά την κατασκευή, τη μεταφορά και την εγκατάσταση.
- ii. Η ικανότητα αντοχής σε φορτία, που προκύπτουν από ισχυρές καταιγίδες και σεισμούς.
- iii. Η ικανότητα ασφαλούς λειτουργίας ως μικτή εγκατάσταση, παραγωγής και στέγασης.

Η σημασία της δεύτερης απαίτησης και η ανάγκη επανεκτίμησης των κριτηρίων σχεδιασμού των πλατφορμών αναδείχθηκαν τη δεκαετία του 1960, όπως αναφέρεται από τον *Mohamed A. El-Reedy*, όταν οι τυφώνες προκάλεσαν σοβαρές ζημιές στις πλατφόρμες στον Κόλπο του Μεξικού. Το 1964, ο τυφώνας *Hilda*, με ύψος κύματος 13 m και ριπές ανέμου έως 89 m/s, κατέστρεψε δεκατρείς πλατφόρμες. Το επόμενο έτος, ο τυφώνας *Betsy* κατέστρεψε τρεις πλατφόρμες και προκάλεσε ζημιές σε πολλές άλλες.

Επειδή οι τυφώνες (καταιγίδες) *Hilda* και *Betsy* ήταν "τυφώνες 100 ετών", οι μηχανικοί εγκατέλειψαν τη χρήση των "τυφώνων 25 και 50 ετών" και άρχισαν να σχεδιάζουν για τους πιο καταστροφικούς τυφώνες 100 ετών.

Στην συνέχεια, αναφέρονται εμπειρικές αρχές, οι οποίες αναφέρονται από τους *Mohamed A. El-Reedy* και *Chakrabarti* και τηρούνται κατά τη διαστασιολόγηση μια υπεράκτιας κατασκευής *jacket*:

#### Σχεδίαση του Jacket:

- Όλες οι σχεδιαστικές αποφάσεις βασίζονται *στο πόδι του jacket*. Η κατάσταση του εδάφους και οι απαιτήσεις θεμελίωσης συχνά καθορίζουν το μέγεθος του ποδιού.
- Το πάχος του τοιχώματος του ποδιού του *jacket* έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να αντιστέκεται στην αξονική δύναμη και τις τάσεις κάμψης και τις παραμορφώσεις που ασκούνται από τους οριζόντιους συνδέσμους και τους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας. Συνήθως λαμβάνεται ένα πάχος της τάξης των 12 cm έως 63 cm (πάχος ποδιού). Αν το πάχος του τοιχώματος είναι μικρότερο από 10 cm μπορεί να προκαλέσει προβλήματα διάβρωσης. Μια σωληνωτή διατομή 63 cm ή μεγαλύτερου πάχους είναι δύσκολο να κατασκευαστεί και μπορεί να υποστεί σημαντικές ρωγμές στα σημεία συγκόλλησης με τα υπόλοιπα μέλη (π.χ. οριζόντιο σύνδεσμοι), εκτός εάν χρησιμοποιηθεί ειδικός χάλυβας. Η αύξηση του πάχους του ποδιού και των συνδέσμων δυσκαμψίας στη ζώνη θραύσης του κύματος κατά περίπου 3,00 έως 2,90 m (όταν υπάρχει καθοδική αντιδιαβρωτική προστασία) χρησιμοποιείται συνήθως ως πρόσθετη αντοχή σε διάβρωση. Οι υψηλές καταπονήσεις και οι απαιτήσεις συγκόλλησης μπορεί να υπαγορεύουν τη χρήση ειδικά κατασκευασμένου (πλάστιμου, υψηλού πάχους αντοχής, χωρίς ελάσματα) χάλυβα σε σύνθετους κόμβους των ποδιών. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το παχύ πόδι και τα άκρα των οριζόντιων συνδέσμων μπορούν να ενταχθούν στους κόμβους. Χαρακτηριστικό στοιχείο που επηρεάζει το πάχος του τοιχώματος του ποδιού είναι η σκυροδέτηση ή μη εντός του ποδιού του πασσάλου.
- Ο χρυσός κανόνας σχεδίασης του *jacket* είναι η ελαχιστοποίηση της προβαλλόμενης επιφάνειας των μελών κοντά στην επιφάνεια του νερού (*high wave zone*), έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το φορτίο στην κατασκευή και να μειωθούν οι απαιτήσεις θεμελίωσης.
- Η στατική ανάλυση της υπεράκτιας κατασκευής είναι ίδια όπως στις χερσαίες κατασκευές, επειδή το λογισμικό χρησιμοποιεί το μητρώο δυσκαμψίας για να υπολογίσει την παραμόρφωση και στη συνέχεια τις εσωτερικές δυνάμεις και τάσεις σε κάθε μέλος. Ωστόσο, για τις υπεράκτιες κατασκευές, το πρόβλημα είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ της κατασκευής και των πασσάλων, καθώς η κατασκευή θα είναι ελαστική και οι πάσσαλοι θα είναι ανελαστικοί.

#### Διαστάσεις:

- Σε πλατφόρμα με 8 πόδια, η μεταξύ τους απόσταση είναι περίπου 12-18 m.
- Τα πόδια του *jacket* εμπηγνύονται για να παρέχουν ένα μεγαλύτερο πλάτος βάσης για το *jacket* και έτσι βοηθούν στην αντίσταση στις ροπές ανατροπής που προκαλούνται από το περιβάλλον. Η έμπηξη των πασσάλων γίνεται με κλίση 1:8 ή 1:7.

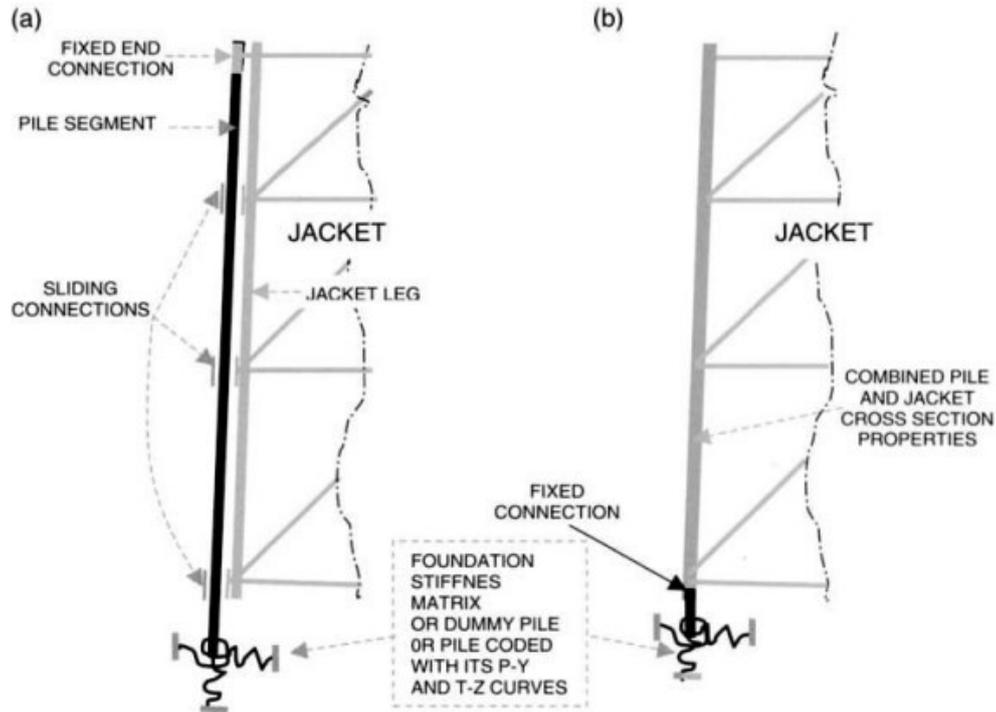
#### Σύστημα δυσκαμψίας:

- Συνίσταται συντελεστής λυγηρότητας μεταξύ 70 και 90 για τα μέλη δυσκαμψίας. Σε χαμηλότερο συντελεστή λυγηρότητας συνίσταται υψηλότερη αναλογία  $D/t$  για σωληνωτά μέλη που πιθανόν να εμφανίσουν τοπικό λυγισμό (όπου  $D$  η διάμετρος του μέλους και  $t$  το πάχος του τοιχώματος).
- Προτείνεται αναλογία  $D/t$  μεταξύ 19 και 60. Για  $D/t < 19$ , ο πάσσαλος είναι ακριβός ή δύσκολος στην παραγωγή του. Για  $D/t > 60$ , ο πάσσαλος μπορεί να εμφανίσει φαινόμενα τοπικού λυγισμού. Πρακτικά, για βάθη  $h$  (ft), ελέγχεται το πρόβλημα υδροστατικής πίεσης όταν  $D/t > 250/(h)^{0,3333}$ .

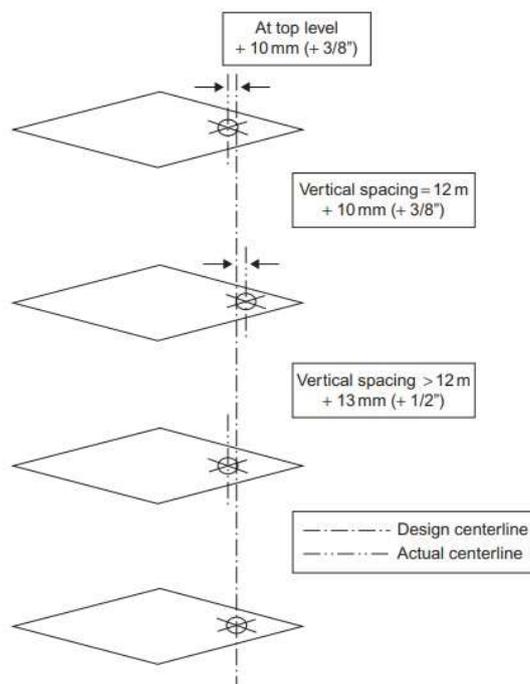
#### Πάσσαλοι:

- Οι πάσσαλοι πρέπει να σχεδιάζονται να αντέχουν κατακόρυφες και οριζόντιες φορτίσεις από την ανωδομή. Το μήκος των πασσάλων καθορίζεται από την αξονική φόρτιση.
- Ανοχές μετατόπισης πασσάλων:
  - Σε μήκος 3 m, οι πάσσαλοι πρέπει να είναι ευθύγραμμοι με απόκλιση έως 3 mm.
  - Σε μήκος 12 m, οι πάσσαλοι πρέπει να είναι ευθύγραμμοι με απόκλιση έως 10 mm.
  - Σε μήκος μεγαλύτερο από 12 m, οι πάσσαλοι πρέπει να είναι ευθύγραμμοι με απόκλιση έως 0,1% του επιθυμητού μήκους.





Εικόνα 2.5: Προσομοίωση της θεμελίωσης: α) Ο πάσσαλος δεν είναι σκυροδετημένος εντός του ποδιού του jacket. β) Ο πάσσαλος είναι σκυροδετημένος εντός του ποδιού του jacket. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



Εικόνα 2.6: Ανοχές μετατόπισης πασσάλων. (Πηγή: El-Reedy Mohamed A., Ph.D. (2012). «Offshore Structures, Design, Construction and Maintenance». Elsevier, USA.)

### Ακολουθία επιλογής των μελών και των συνδέσμων δυσκαμψίας της πλατφόρμας:

Η προκαταρκτική επιλογή μεγέθους μέλους ξεκινά με την επιλογή των κύριων πασσάλων. Στα περισσότερα *jacket* που βρίσκονται σε ρηχά νερά, οι κύριοι πάσσαλοι τοποθετούνται μέσα στα πόδια του *jacket* και τα πόδια του καταστρώματος εδράζονται πάνω από στις κορυφές των πασσάλων. Δεδομένης της διαμέτρου των κύριων πασσάλων, η εσωτερική διάμετρος του ποδιού του *jacket* επιλέγεται έτσι ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση και έμπηξη των πασσάλων. Η διάμετρος του ποδιού του καταστρώματος είναι συνήθως ίση με τη διάμετρο του κύριου πασσάλου. Αφού γίνουν γνωστά τα μεγέθη του κύριου πασσάλου, του *jacket* και των ποδιών του καταστρώματος, μπορούν να επιλεγούν τα μεγέθη των βασικών στηριγμάτων του *jacket*, των δοκών και των συνδέσμων δυσκαμψίας. Ακολουθεί λεπτομερής στατική ανάλυση και διαστασιολόγηση.

- a) Επιλογή εξωτερικής διαμέτρου πασσάλου: Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση του επιλεγμένου μεγέθους πασσάλου σε άλλα δομικά στοιχεία όπως το κατάστρωμα και τα πόδια του *jacket*. Για μια δομή όπου οι πάσσαλοι εμπερνούν εντός των ποδιών του *jacket*, όταν γίνει γνωστή η διάμετρος του πασσάλου, τα πόδια του *jacket* θα είναι μεγαλύτερης διαμέτρου από τη διάμετρο του πασσάλου. Οι διάμετροι πασσάλων θα πρέπει να διατηρούνται στις ελάχιστες τιμές που υπαγορεύονται από την αντοχή του εδάφους, την ικανότητα του εξοπλισμού πασσαλόεμπηξης και τα φορτία που επιβάλλονται στον πάσσαλο.
- b) Προσδιορισμός της διείσδυσης πασσάλων: Το βάθος διείσδυσης πασσάλων υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις κατά προσέγγιση ακραίες αξονικές φορτίσεις των πασσάλων πολλαπλασιασμένες με έναν παράγοντα ασφαλείας.
- c) Επιλογή πάχους τοιχώματος για τον πάσσαλο: Το αρχικό πάχος τοιχώματος πασσάλου επιλέγεται για να αντέχει τη μέγιστη ροπή κάμψης και το αξονικό φορτίο που ασκείται στον πάσσαλο. Εάν ο πάσσαλος είναι πακτωμένος στο πόδι του *jacket* (σκυροδέτηση μεταξύ πασσάλου και εσωτερικού τοιχώματος του ποδιού του *jacket*), η πιο πιθανή θέση της μέγιστης ροπής κάμψης του πασσάλου θα είναι στο σημείο όπου ο πάσσαλος εισέρχεται στο πόδι του *jacket*. Εάν αυτή η σύνδεση δεν είναι άκαμπτη (μη σκυροδέτηση στο διάκενο), η θέση της μέγιστης ροπής κάμψης θα είναι κάτω από αυτό το σημείο, σε απόσταση που καθορίζεται από την ευελιξία της σύνδεσης πασσάλου-*jacket* και των συγκεκριμένων σημείων στο εσωτερικό του ποδιού του *jacket*.

### Δάπεδο καταστρώματος:

Τα δάπεδα των καταστρώματων μιας χαλύβδινης υπεράκτιας πλατφόρμας μπορεί να είναι ξύλινα ή από μεταλλική πλάκα. Στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται δάπεδο μεταλλικής πλάκας, εάν αυτή συγκολληθεί σωστά στις δοκούς του καταστρώματος, λειτουργεί επίσης ως μεμβράνη που κατανέμει τα οριζόντια φορτία ανέμου και κυμάτων στην κύρια δομή του καταστρώματος, ενισχύοντας τη διαφραγματική λειτουργία. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για διαγώνιες φορτίσεις, οι οποίες θα αναγκάσουν το κατάστρωμα να συμπεριφέρεται ως οριζόντιος πλαισιωτός φορέας, προκαλώντας ανεπιθύμητες παραμορφώσεις. Εάν δεν υπάρχει πλάκα καταστρώματος, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η χρήση οριζόντιων διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας που συνδέουν τις κορυφές των στηλών σε κάθε επίπεδο καταστρώματος.

Επιπλέον, η δύναμη εφελκυσμού μεταξύ υποστυλώματος και δοκού καταστρώματος απαιτεί τη χρήση ειδικών συγκολλημένων στοιχείων σύνδεσης και στα δύο άκρα, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ικανοποιητική μεταφορά φορτίου (εικόνα 2.7).

### Κατακόρυφοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας:

Η χρήση χιαστί συνδέσμων δυσκαμψίας παρέχει υψηλή οριζόντια δυσκαμψία, πλαστιμότητα και μεγαλύτερη ασφάλεια λόγω της περίσσειας αντοχής. Οι κόμβοι είναι πολλοί με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλος όγκος συγκόλλησης. Αυτό το μοτίβο δυσκαμψίας είναι δημοφιλές σε *jacket* σε βαθιά νερά, όπου απαιτείται μεγάλη δυσκαμψία για τη μείωση των περιόδων ταλάντωσης και σε σεισμικά ενεργές περιοχές όπου η πλάστιμη συμπεριφορά είναι σημαντική. (Εικόνα 2.8)

Διαστασιολόγηση με κατακόρυφους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας:

Για μικρό βάθος νερού, εάν το  $D/t$  δεν είναι εξαιρετικά χαμηλό, η αστοχία λόγω υδροστατικής πίεσης δεν αποτελεί πραγματικό πρόβλημα.

Αν ισχύει ο τύπος:

$$D/t < 250/(h)^{0,3333}$$

Τότε δεν υπάρχει πιθανότητα αστοχίας λόγω υδροστατικής πίεσης.

Διαστασιολόγηση έναντι κόπωσης:

Η συμπεριφορά κόπωσης των πλατφορμών βαθέων υδάτων μπορεί να βελτιωθεί με:

- Την προσοχή στην ποιότητα της συγκόλλησης των σωληνωτών συνδέσεων.
- Με την χρήση κατάλληλων τεχνικών βελτίωσης της διάρκειας ζωής λόγω κόπωσης, συμπεριλαμβανομένων της διαμόρφωσης του προφίλ της συγκόλλησης, της κοπής, της λείανσης και της σκλήρυνσης που δικαιολογούν τη χρήση υψηλότερων καμπυλών  $\sigma-N$  (Τάσης – Κύκλων Φόρτισης) λόγω κόπωσης.

Απόσταση των μελών στους κόμβους:

Η απόκλιση του κόμβου (εκκεντρότητα =  $e$ ) μπορεί να είναι το ένα τέταρτο της διαμέτρου του συνδέσμου δυσκαμψίας ( $D/4$ ). Οι ροπές που προκαλούνται από τις αποκλίσεις των αρθρώσεων που υπερβαίνουν το όριο  $D/4$  θα πρέπει να εκτιμώνται μέσω της στατικής ανάλυσης, κωδικοποιώντας τα σημεία τομής δοκού-συνδέσμου δυσκαμψίας ως αρθρώσεις στο προσομοίωμα της πλατφόρμας. Αυτή η απόκλιση μπορεί να είναι σημαντική παράμετρος σχεδιασμού για τις αρθρώσεις  $K$  και  $X$  όπου όλα τα μέλη έχουν παρόμοια εξωτερική διάμετρο και θα πρέπει να αξιολογείται ακόμη και αν ικανοποιείται η απαίτηση  $D/4$ . (Εικόνα 2.9)

Στατική αντοχή των σωληνοειδών αρθρώσεων αλληλοεπικάλυψης:

Η συνηθέστερη αιτία για την αλληλοεπικάλυψη των κόμβων είναι η υπερβολική εκκεντρότητα των στηρίξεων η οποία προκαλείται από τις μεγάλες αναλογίες  $\rho$  των αρθρώσεων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η πρόβλεψη ελάχιστου διακένου 5 cm μεταξύ των μελών μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη εκκεντρότητα αυτών η οποία δύναται να παραβιάζει τις γεωμετρικές απαιτήσεις για τη μόρφωση μιας απλής σύνδεσης.

Σε τέτοιες περιπτώσεις τα μέλη μπορούν να επικαλύπτονται με σκοπό την αποτελεσματική μεταφορά φορτίου μεταξύ των επικαλυπτόμενων μελών. Το μέλος με τη μεγαλύτερη διάμετρο θα πρέπει να είναι το διαμπερές μέλος. Εάν οι διάμετροι είναι ίδιες, το μέλος με το μεγαλύτερο πάχος τοιχώματος θα πρέπει να είναι το διαμπερές μέλος. Τα επικαλυπτόμενα στηρίγματα είναι αποτελεσματικά για τη μεταφορά στατικών φορτίων, λόγω των υψηλής συγκέντρωσης τάσεων και της ανάγκης επανασυγκόλλησης πάνω από μια ήδη συγκολλημένη σύνδεση, μπορεί να οδηγήσουν σε προβλήματα κόπωσης. (Εικόνα 2.10).

Υπεράκτια *jacket* σε βαθιά νερά:

Στην εγκατεστημένη διαμόρφωσή της, μια πλατφόρμα *jacket* μπορεί να απεικονιστεί ως μια δοκός πρόβολος που πακτώνεται στον πυθμένα με τη χρήση πολλών πασσάλων μεγάλης διαμέτρου (εικόνα 2.11).

Το *jacket* ανταποκρίνεται στο δυναμικό θαλάσσιο περιβάλλον ως συνάρτηση της γεωμετρίας και της μάζας του, η οποία κατανέμεται κατά μήκος του με το ωφέλιμο φορτίο του καταστρώματος να βρίσκεται στην κορυφή του.

Στο σύστημα ασκούνται δυνάμεις που εξαρτώνται από το χρόνο από τις κινήσεις των σωματιδίων του νερού λόγω των κυμάτων και των ρευμάτων. Οι δυνάμεις αυτές είναι ανάλογες με τη διάσταση των μελών της πλατφόρμας που βρίσκονται στη "ζώνη κυματισμών", η οποία γενικά αντιπροσωπεύει ένα βάθος περίπου 60 m κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Καθώς αυξάνεται το μέγεθος και ο αριθμός

των μελών που δέχονται το κυματικό φορτίο, όπως τα πόδια του *jacket*, οι αποβάθρες σκαφών, οι προσκρουστήρες των φορηγίδων, τα περιβλήματα *sleeves* των πασσάλων τύπου *skirt*, η ανωδομή κ.λπ., αυξάνεται και η αντίσταση και οι αδρανειακές δυνάμεις που δημιουργούνται από τα κύματα και τα ρεύματα.

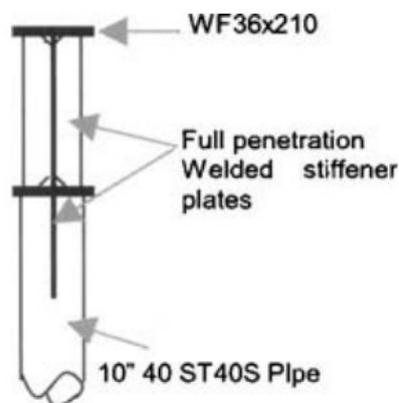
Σε μικρά βάθη νερού, η δομή του *jacket*, παρουσιάζει χαμηλή πρώτη ιδιοπερίοδο (συνήθως λιγότερο από 4 s σε βάθη νερού μικρότερα από 240 m). Αυτή η μικρή ιδιοπερίοδος απέχει πολύ από τη μέση ιδιοπερίοδο ενός φάσματος κυματικής ενέργειας ακραίου σχεδιασμού. Η μέση περίοδος των κυμάτων βρίσκεται γενικά στο εύρος 12-14 s, οπότε δεν θα συνέβαινε αξιόλογη δυναμική ενίσχυση των κυματικών φορτίων (εικόνα 2.12).

Τα μεγαλύτερα βάθη νερού και η μεγαλύτερη μάζα της πλατφόρμας έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της ιδιοπεριόδου της πλατφόρμας, η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε αυξημένα δυναμικά φορτία κύματος. Ο σχεδιασμός των *jacket* για περιβάλλον βαθιών υδάτων απαιτεί γενικά να ελαχιστοποιούνται τα κυματικά φορτία που ασκούνται στο *jacket*, να διατηρούνται κάτω από λογικά επίπεδα και να υπάρχει τεχνολογική δυνατότητα για την κατασκευή και την εγκατάστασή του στην προβλεπόμενη υπεράκτια τοποθεσία.

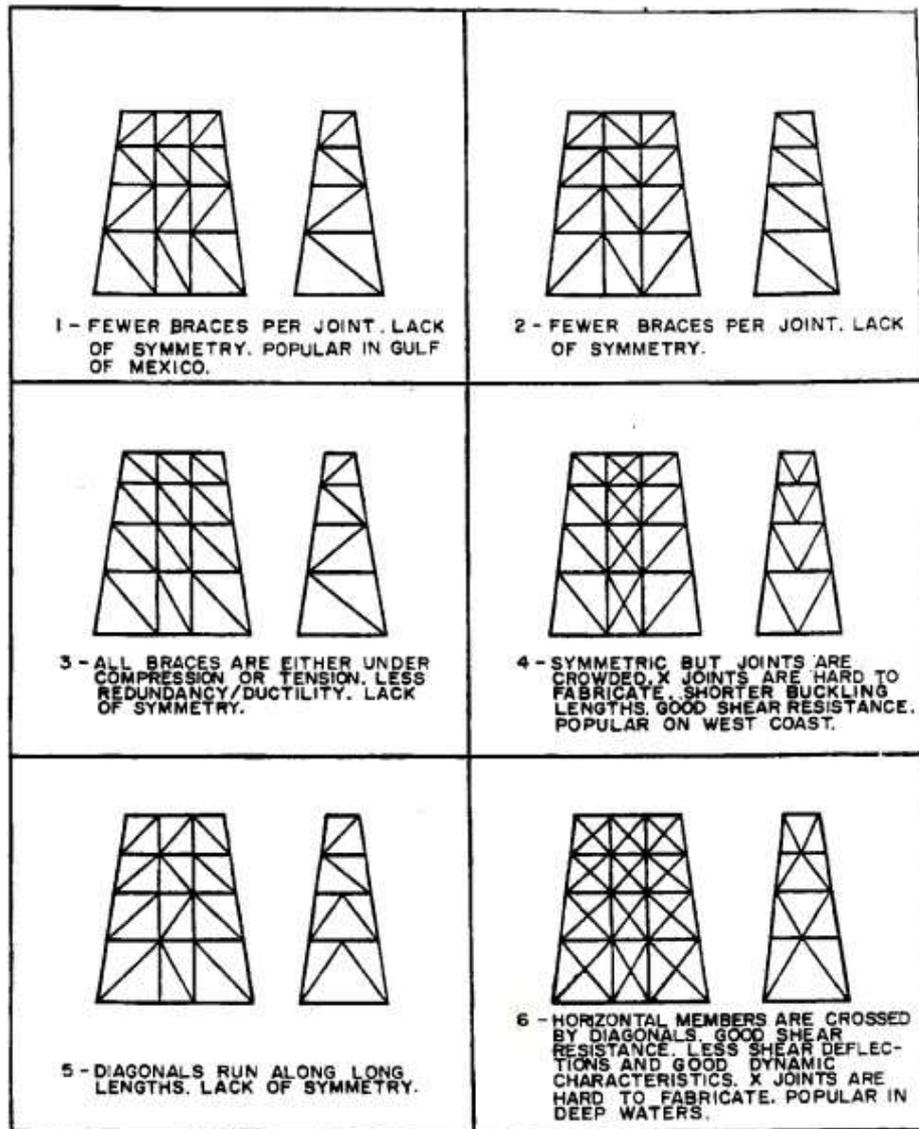
Καθώς αυξάνεται το βάθος του νερού, η αυξημένη ροπή ανατροπής θα απαιτούσε τη χρήση μεγάλου αριθμού πασσάλων τύπου *skirt*. Έτσι θα πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο να επεκταθούν ορισμένοι από αυτούς τους πασσάλους πιο ψηλά από τη βάση της πλατφόρμας. Η προσέγγιση αυτή θα επέτρεπε την ομαλή μεταφορά αξονικού φορτίου από τα πόδια του *jacket* στους πασσάλους τύπου *skirt*, ενώ παράλληλα θα αύξανε την καμπτική δυσκαμψία των κατώτερων τμημάτων της κατασκευής του *jacket* (εικόνα 2.13).

Η τέμνουσα της βάσης παραμένει σχεδόν σταθερή, όσο αυξάνεται το βάθος του νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μειωμένη τέμνουσα ανά πάσσαλο, γεγονός που μειώνει την ανάγκη για κλίση των πασσάλων. Αυξανόμενου του βάθους του νερού θα πρέπει να εξεταστούν:

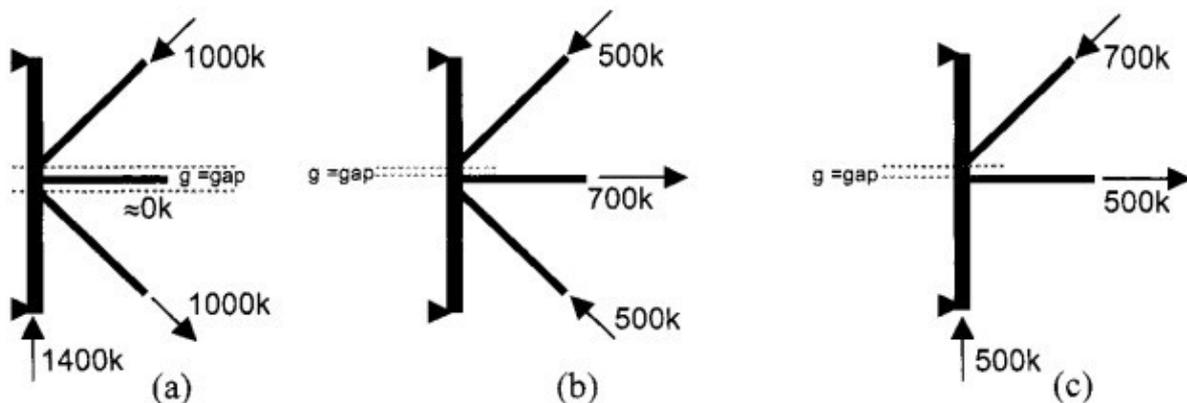
- Η μείωση της κλίσης των ποδιών του *jacket*.
- Η μείωση των διαμέτρων των μελών της ανωδομής του *jacket* και των υποστυλωμάτων του καταστρώματος στις ελάχιστες συμβατές με το φορτίο του καταστρώματος και τη ροπή ανατροπής που προκύπτει από τα κύματα και τον άνεμο.
- Το ενδεχόμενο μείωσης του αριθμού των ποδιών του *jacket*.
- Η χρησιμοποίηση πλωτών δοκών αντιστήριξης και, εάν είναι δυνατόν, πλωτών ποδιών *jacket*, με έμφαση στις θέσεις κοντά στην κορυφή (μειώνοντας έτσι την προστιθέμενη υδάτινη μάζα).



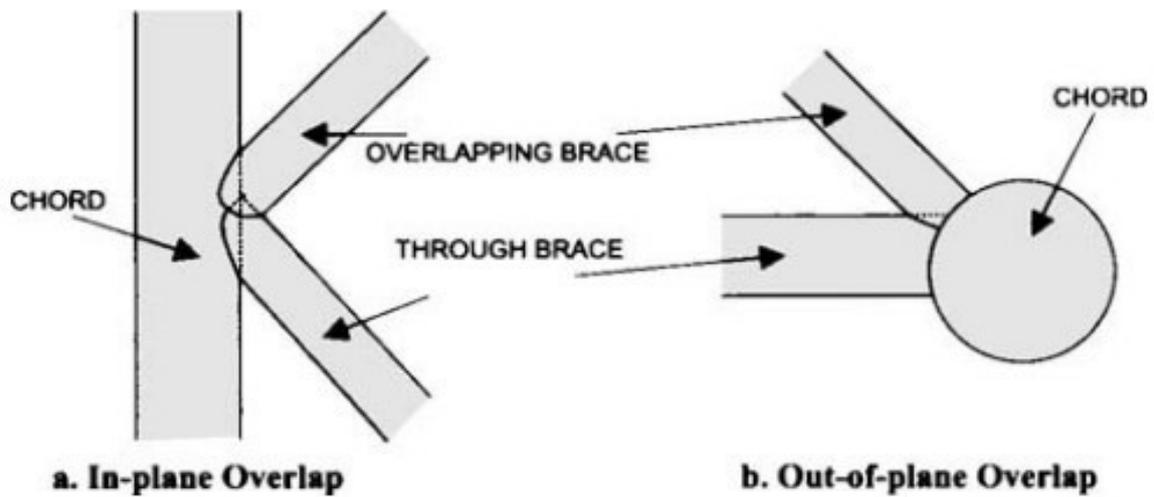
Εικόνα 2.7: Ειδικό στοιχείο σύνδεσης μεταξύ υποστυλώματος και δοκού καταστρώματος. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



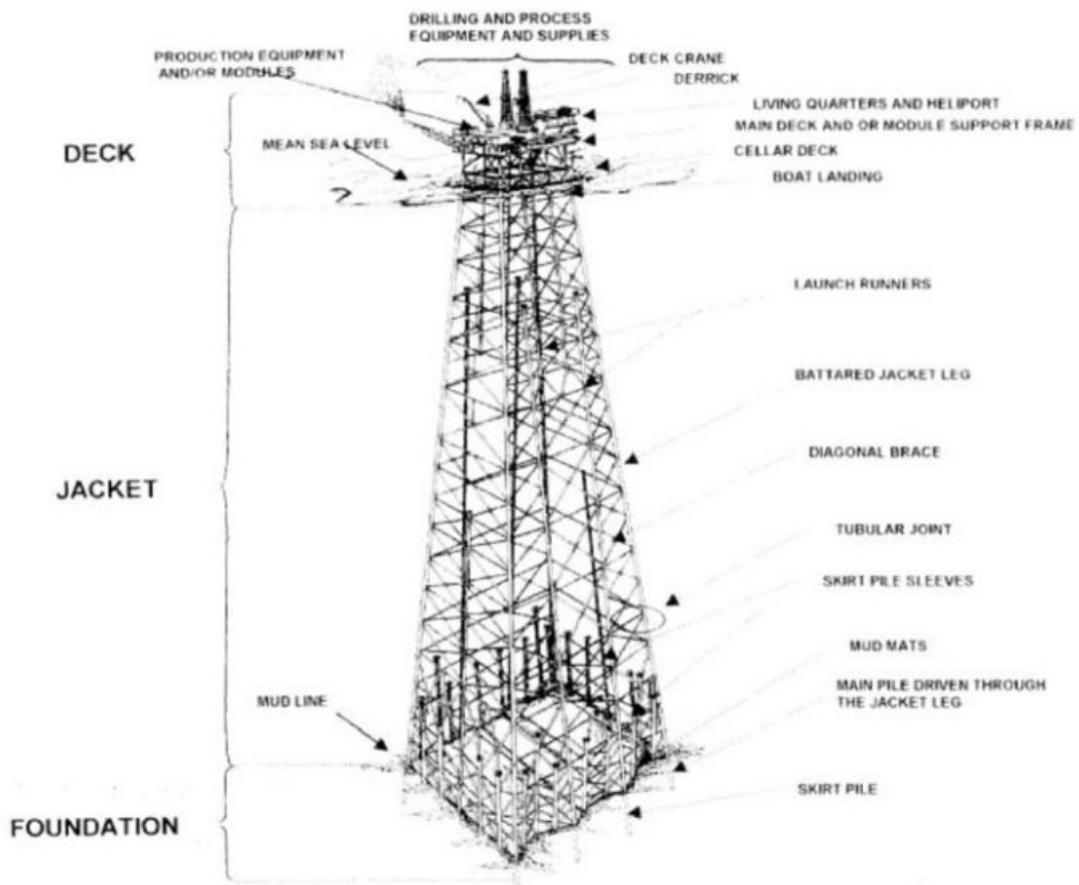
Εικόνα 2.8: Συστήματα κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



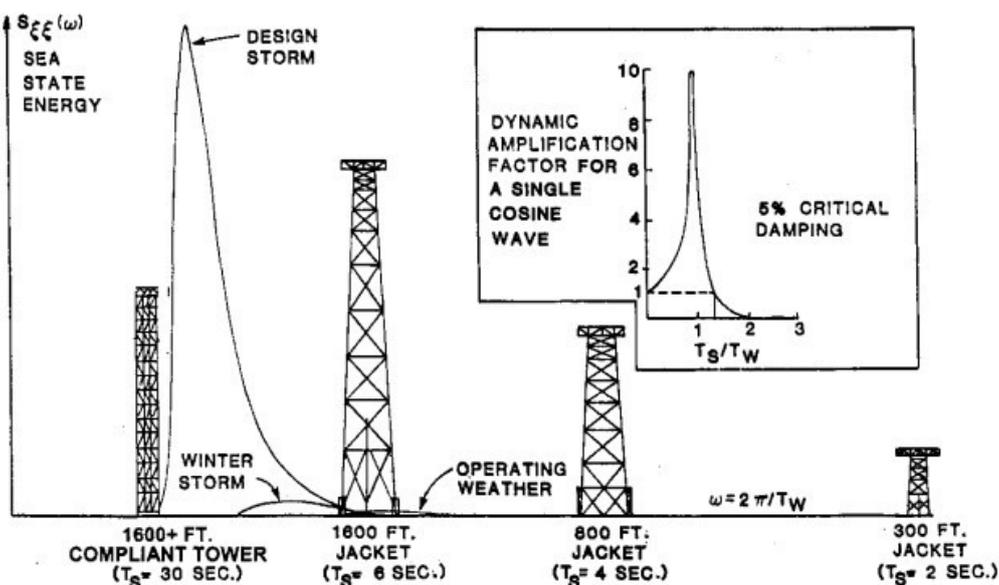
Εικόνα 2.9: Απόσταση των μελών στους κόμβους. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



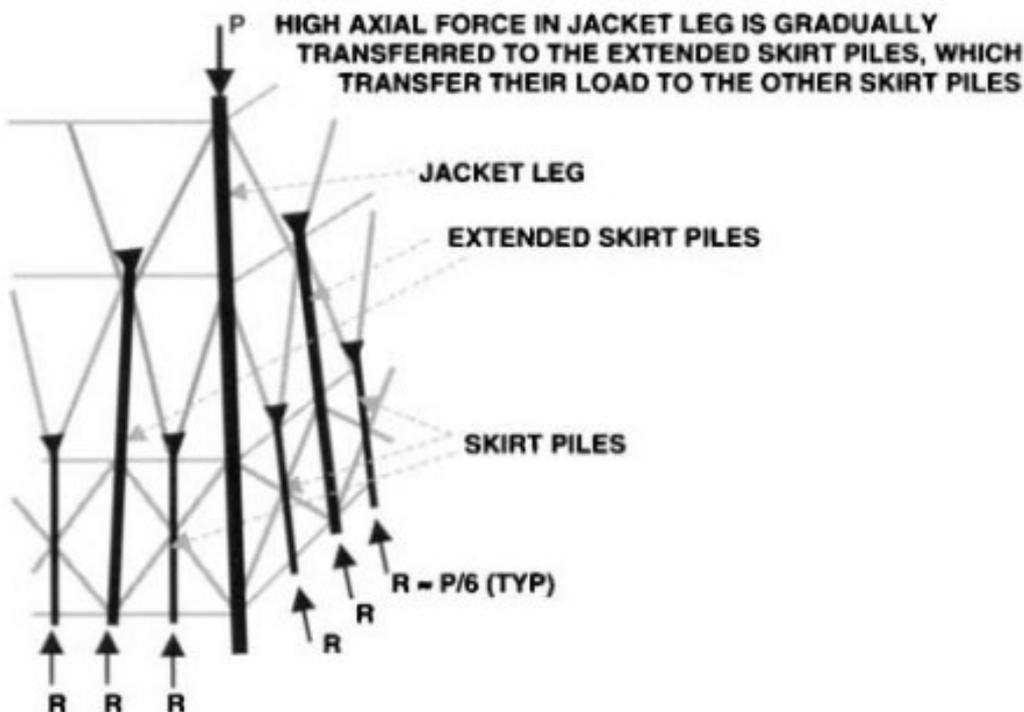
Εικόνα 2.10: α) Επικάλυψη εντός κόμβου, β) Επικάλυψη εκτός κόμβου. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



Εικόνα 2.11: Βασικά στοιχεία ενός *jacket*. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



Εικόνα 2.12: Ιδιοπερίοδος και ύψη σταθερών υπεράκτιων κατασκευών. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



Εικόνα 2.13: Σταδιακή κατανομή της αξονικής δύναμης μέσω των προεκταμένων πασσάλων τύπου *skirt*, που κατανέμουν με τη σειρά τους το φορτίο στους υπόλοιπους πασσάλους τύπου *skirt*. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)

## 2.4 Κατασκευή, Μεταφορά και Εγκατάσταση

Ενώ οι κατασκευές πολιτικού μηχανικού συνήθως κατασκευάζονται στον χώρο εγκατάστασής τους, οι υπεράκτιες κατασκευές κατασκευάζονται στην ξηρά και μεταφέρονται στον υπεράκτιο χώρο εγκατάστασης. Η διαδικασία μετακίνησης μιας κατασκευής στον χώρο εγκατάστασης περιλαμβάνει *τρεις διακριτές εργασίες* που αναφέρονται ως *εργασίες φόρτωσης, μεταφοράς και εγκατάστασης*.

Κατά τη διάρκεια των προσωρινών φάσεων, η κατασκευή υποβάλλεται σε φορτία, τα οποία είναι διαφορετικά σε μέγεθος και κατεύθυνση από τα φορτία στη θέση εγκατάστασης. Συνεπώς, το σχήμα, το βάρος και το κόστος των υπεράκτιων κατασκευών επηρεάζονται άμεσα από αυτές τις προσωρινές φάσεις. Οι προσωρινές φάσεις επίσης επηρεάζουν την επιλογή του ναυπηγείου κατασκευής και το κόστος και το χρονοδιάγραμμα του συνολικού έργου.

### 2.4.1 Κατασκευή

Λόγω του γεγονότος ότι τα *jacket* βαθέων υδάτων πιθανότατα α)θα κατασκευάζονται, β)θα μεταφέρονται στον τόπο του έργου γ)θα κατελκύνονται και δ)θα εγκαθίστανται ως ενιαία μονάδα, οι εργασίες κατασκευής, θα έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη σκοπιμότητα του σχεδιασμού τους.

Παραδοσιακά, τα *jacket* του Κόλπου του Μεξικού κατασκευάζονται με τη γνωστή μέθοδο "*bent-roll-up*" (εικόνα 2.14 (1)). Σε αυτή τη μέθοδο, κάθε δοκός από ένα κατακόρυφο πλαίσιο του *jacket* που περιέχει δύο ή περισσότερα πόδια και συνδέσμους δυσκαμψίας κατασκευάζεται ξαπλωμένο στην επιφάνεια της μονάδας κατασκευής. Τα καμπύλα ελάσματα αυτά στη συνέχεια περιστρέφονται γύρω από ένα πόδι του *jacket* και τυλίγονται σε κατακόρυφη διαμόρφωση με τη χρήση πολυάριθμων ερπυστριοφόρων γερανών μεγάλου ύψους και ανυψωτικής ικανότητας. Σε σύγκριση με τη μέθοδο κατασκευής κόμβων στον αέρα, που είναι δημοφιλής στα ναυπηγεία της Βόρειας Θάλασσας, η μέθοδος με την τύλιξη (*roll-up*) εξαλείφει την ανάγκη ανύψωσης και συγκόλλησης προκατασκευασμένων κόμβων σύνδεσης ψηλά στον αέρα και έχει ως αποτέλεσμα μειωμένο κόστος εργατοωρών συγκόλλησης και τοποθέτησης.

Στην προκειμένη περίπτωση τα μεγάλα πλάτη βάσης και τα βάρη των καμπυλωτών ελασμάτων για *jackets* βαθέων υδάτων θα δημιουργούσαν σοβαρά προβλήματα χειρισμού των βραχιόνων στις εργασίες τυλίγματος. Οι τάσεις που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της κάμψης και της συναρμολότητας και της φόρτωσης σε φορτηγίδα καθέλκυσης θα μπορούσαν να αλλάξουν ορισμένα από τα μεγέθη των κύριων μελών και ενδέχεται να απαιτήσουν την εισαγωγή πρόσθετων αντιστηρίξεων. Θα μπορούσε βέβαια σε αυτές τις περιπτώσεις, να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος προσωρινών ανυψωτικών δικτυωμάτων "ισχυρής υποστήριξης" ή τεχνικών "*box roll-up*" (εικόνα 2.14 (2)).

Στην εν λόγω μέθοδο, τα δύο πρώτα γειτονικά ελάσματα κατασκευάζονται σε ένα "κουτί" μέσω της αναδίπλωσης των μικρότερων και ελαφρύτερων ελασμάτων του. Μετά την τοποθέτηση της αντιστήριξης του, ολόκληρο το περίβλημα τυλίγεται σε κυλινδρικό σχήμα με τη χρήση γερανών ερπυστριοφόρου τύπου, με τη βοήθεια γραμμικών γρύλων ή βαρέων βαρών συρματοσχοινών. (Τμήματα της κατασκευής, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως σημεία στήριξης για την κύρτωση με κάμψη, δύνανται να επηρεάσουν τους συνδέσμους δυσκαμψίας).

#### Συνδέσεις των πασσάλων με το *jacket*.

- Συγκολλημένες συνδέσεις πασσάλου με το πόδι του *jacket*:  
Η ασφαλής μεταφορά των φορτίων του *jacket* στους πασσάλους θεμελίωσης αποτελεί σημαντικό παράγοντα σχεδιασμού. Η μεταφορά των αξονικών φορτίων θα μπορούσε να επιτευχθεί με τη χρήση συγκολλητής σύνδεσης μεταξύ της κορυφής του ποδιού του *jacket* και του πασσάλου εάν οι πάσσαλοι πρέπει να διαπερνούν τα πόδια του *jacket*.  
Η λεπτομέρεια της σύνδεσης με συγκολλημένη πλάκα [εικόνα 2.15 (α)] είναι ευκολότερη στην κατασκευή, αλλά οδηγεί σε μεγαλύτερη συγκέντρωση τάσεων και μπορεί να μην είναι επιθυμητή



για δυναμικές συνθήκες φόρτισης, όπου η κόπωση δύναται να αποτελέσει πρόβλημα. Η λεπτομέρεια σύνδεσης με πλάκα στέψης, η οποία παρουσιάζεται στην [εικόνα 2.15 (β)] είναι δύσκολο να κατασκευαστεί λόγω της ανάγκης για μεγαλύτερου πάχους χαλύβδινης πλάκας και των απαιτήσεων τοποθέτησης και συγκόλλησης ακριβείας, *αλλά οδηγεί σε ομαλότερη μεταφορά φορτίου και καλύτερη συμπεριφορά σε κόπωση.*

Το πάχος της πλάκας της στέψης θα πρέπει να επιλέγεται ώστε να καλύπτει το κενό, τόσο μεταξύ της εξωτερικής διαμέτρου του πασσάλου όσο και της εσωτερικής διαμέτρου του ποδιού του *jacket* και επιπλέον να παρέχει επαρκή επιφάνεια ανάληψης φορτίου στην κορυφή του ποδιού. Αυτό τυπικά οδηγεί σε 5 cm συν το πάχος της πλάκας στέψης. Και στις δύο λεπτομέρειες, η συμβατότητα κάμψης και αξονικού φορτίου μεταξύ του *jacket* και των πασσάλων θα μπορούσε να δημιουργηθεί με την σκυροδέτηση του πασσάλου στο εσωτερικό του ποδιού του *jacket*. Η επιθυμητή αντοχή στον πόδα επιτυγχάνεται με την σκυροδέτηση του πασσάλου και τότε δύνανται να κατασκευαστούν λεπτότερα πόδια.

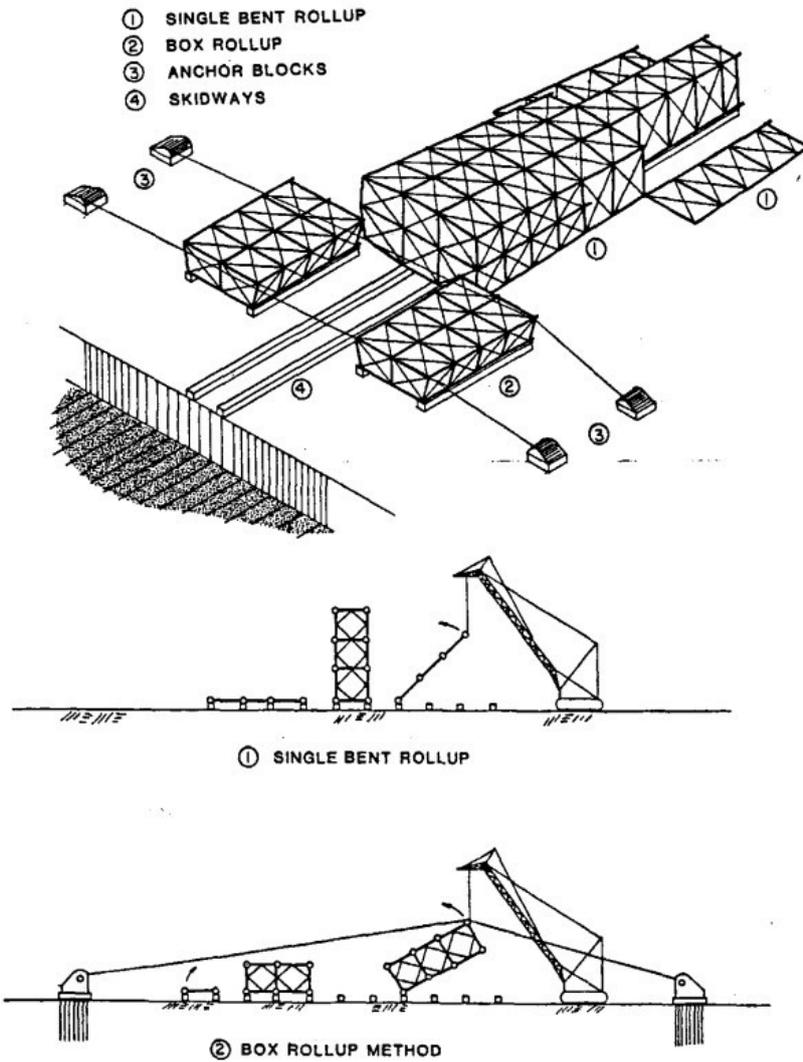
- Συνδέσεις σκυροδετημένου πασσάλου με *sleeves*.

Εάν οι πασσαλοι μπηχθούν μέσα από τις ειδικά διαμορφωμένες βάσεις (*sleeves*) των πασσάλων, η σύνδεση του πασσάλου με το *jacket* θα δύναται να επιτευχθεί με σκυροδέτηση των πασσάλων μέσα στα περιβλήματα τους. Σε τέτοιες συνδέσεις, το φορτίο του *jacket* μεταφέρεται στον πάσσαλο μέσω του περιβλήματος (*sleeve*) διαμέσου της σκυροδέτησης. Οι δοκιμές για την αντοχή των συνδέσεων απλού πασσάλου με σκυροδετούμενο περίβλημα χωρίς διατμητικά κλειδιά παρουσιάζουν μεγάλη αβεβαιότητα λόγω του ανεπαρκούς περιορισμού, της ελαστικότητας των μεγάλων διαμέτρων του πασσάλου και του περιβλήματος και της δυσκολίας πλήρους εκτόπισης του νερού στο διάκενο με σκυρόδεμα που αντλείται επιφανειακά. Οι απαιτήσεις υψηλής αντοχής και υψηλότερου συντελεστή ασφαλείας για τις συνδέσεις με σκυροδέτηση οδηγούν γενικά σε μεγαλύτερα περιβλήματα πασσάλων. Η δυσκολία αυτή δύναται να αποφευχθεί με την τοποθέτηση διατμητικών κλειδιών συγκολλημένων στο εσωτερικό τοίχωμα του περιβλήματος και στην εξωτερική επιφάνεια του πασσάλου (εικόνα 2.16).

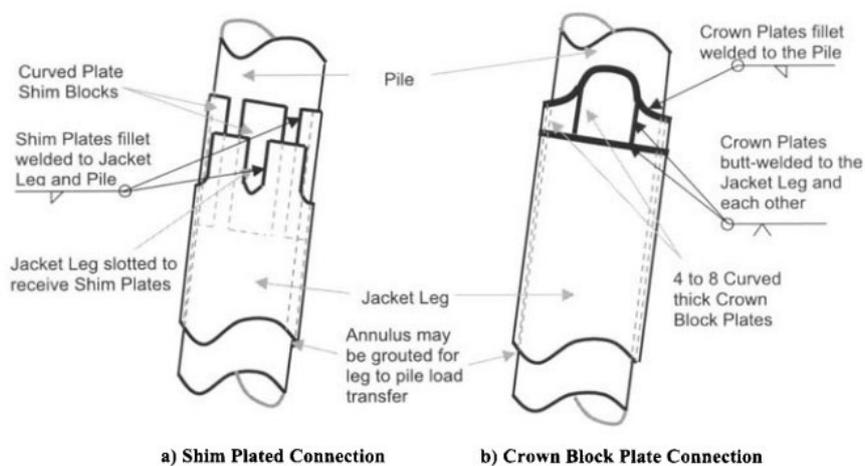
Δοκιμές σε συνδέσεις με διατμητικό κλειδί δείχνουν ότι οι δύο ξεχωριστοί μηχανισμοί εμφανίζονται κατά την αστοχία μιας σκυροδετημένης σωληνοειδούς σύνδεσης:

- ο Πρώτον, μια ολίσθηση μεταξύ του χάλυβα και του ενέματος και,
- ο δεύτερον, μια σύνθλιψη του ενέματος πάνω στα διατμητικά κλειδιά [Karsan et al, 1984]. Μια τέτοια σύνδεση αστοχεί συνήθως με πλαστικό τρόπο, έτσι ώστε η οριακή αντοχή να λαμβάνεται ως το άθροισμα των δύο διαφορετικών πηγών αντοχής.

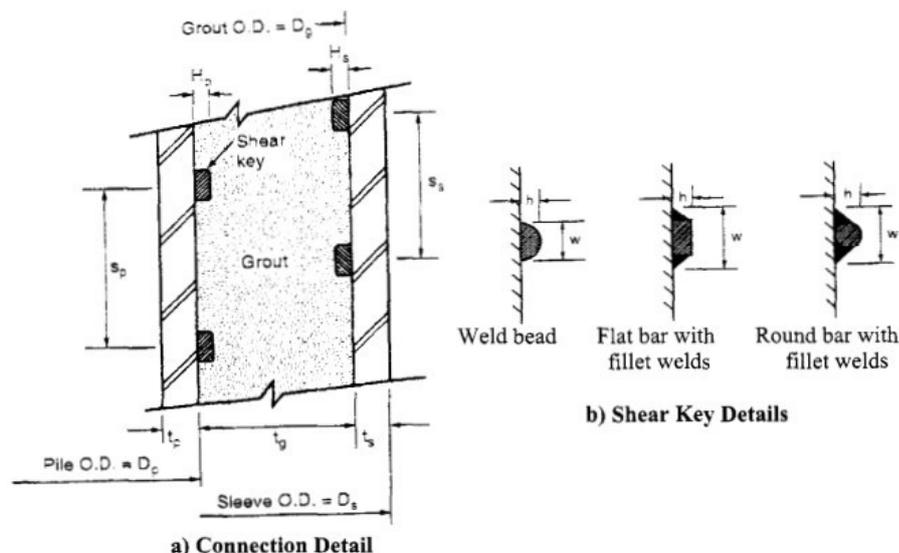
Τέλος, οι διαφορές μεταξύ των θερμοκρασιών ημέρας και νύχτας, οι εποχιακές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, οι θερμικές επιδράσεις της συγκόλλησης, η σειρά κατασκευής και οι παραμορφώσεις κατά την ανέλκυση απαιτούν συστηματικό έλεγχο των διαστάσεων, ανάλυση και προσαρμογές, ώστε η πλατφόρμα να συναρμολογηθεί με επιτυχία εντός των απαιτήσεων ανοχής των διαστάσεων.



Εικόνα 2.14: Τρόποι κατασκευής των *jackets*. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



Εικόνα 2.15: α) Σύνδεση συγκολλημένης πλάκας, β) Σύνδεση με πλάκα στέψης. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



Εικόνα 2.16: α) Λεπτομέρεια σύνδεσης, β) Λεπτομέρειες διαμηθικών κλειδιών. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)

#### 2.4.2 Μεταφορά

Μόλις ολοκληρωθεί η κατασκευή του *jacket*, φορτώνεται και δένεται σε ένα σκάφος έτοιμο για μεταφορά στον υπεράκτιο χώρο εγκατάστασής του. Τα ελαφρύτερα, με τρία έως έξι πόδια, *jacket* μπορούν να συναρμολογηθούν σε οριζόντια ή κάθετη διαμόρφωση με όλα τα πόδια όρθια και τους οριζόντιους και διαγώνιους συνδέσμους να συγκολλούνται σε αυτά. Στη συνέχεια, η κατασκευή ανυψώνεται και φορτώνεται στο σκάφος μεταφοράς (γενικά φορτηγίδα) χρησιμοποιώντας πολλαπλούς γεραμούς ή έναν μεγάλο μονό γερανό, ο οποίος μπορεί να τοποθετηθεί σε φορτηγίδα. Τα βαρύτερα ή/και τα *jacket* με οκτώ πόδια συναρμολογούνται γενικά χρησιμοποιώντας τη διαδικασία της ελικοειδούς συγκόλλησης των μελών (*bent roll-up process*). Μετά τη συγκόλληση κάθε ποδιού, αυτά τοποθετούνται σε βάσεις στήριξης ή δοκούς ολίσθησης και συγκολλούνται στους υπόλοιπους συνδέσμους (οριζόντιους και διαγώνιους). Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει χαμηλού κόστους και γρήγορη συγκόλληση των συνδέσμων ενώ η κατασκευή κείται στο έδαφος.

Στη συνέχεια, τα ελικοειδώς συγκολλημένα μέλη του *jacket* συναρμολογούνται, ολοκληρώνοντας τη διάταξη της υπεράκτιας κατασκευής. Εάν υπάρχει δυνατότητα ικανού προς ανύψωση γερανού, τα *jacket* που κατασκευάζονται με τη μέθοδο της ελικοειδούς συγκόλλησης μπορούν να ανυψωθούν, να φορτωθούν και να δεθούν στη φορτηγίδα μεταφοράς. Όμως εάν δεν είναι δυνατή η ανύψωση, το *jacket* θα ωθηθεί κατά μήκος των δοκών ολίσθησης και θα φορτωθεί στη φορτηγίδα μεταφοράς. Η φόρτωση με ολίσθηση μπορεί να γίνει σε σταθερή ή πλωτή φορτηγίδα. Ενδεχόμενα και για τη σταθερότητα της φορτηγίδας, γίνεται βυθοκόρηση του πυθμένα και γεμίζεται με ψιλή άμμο για να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχουν σκληρά σημεία. Η φορτηγίδα τοποθετείται πάνω από τον πυθμένα με άμμο και στη συνέχεια ερματίζεται πλήρως (βάρος έρματος ίσο ή μεγαλύτερο από το βάρος μεταφοράς του *jacket*) κάνοντας προφόρτιση στον πυθμένα της θάλασσας.

Γενικά, η ολίσθηση σε μια σταθερή φορτηγίδα είναι απλή και δεν δημιουργεί ασυνήθιστες συνθήκες πίεσης στη δομή του *jacket*, υπό την προϋπόθεση ότι η επιφάνεια του βυθού είναι κατάλληλα προετοιμασμένη και προφορτισμένη. Κατά τη διαδικασία φόρτωσης του *jacket*, είναι σημαντικό να υπάρχει μία αλληπάλληλη έλξη και ώθηση της κατασκευής πάνω στη φορτηγίδα, καθώς πιέζεται η φορτηγίδα στο τοιχίο της προκυμαίας, εξαλείφοντας πιθανή ζημιά της φορτηγίδας.

Στην εικόνα 2.17 φαίνονται βαρούλκα εγκατεστημένα στην ακτή που τραβούν το *jacket* πάνω στη φορτηγίδα χρησιμοποιώντας συρματοσχοίνα που περνούν σε πολλά τμήματα τροχαλιών, ένα αγκυρωμένο στην πρύμνη της φορτηγίδας και το άλλο στα ακραία σημεία που ξεπροβάλλουν στο άκρο της κατασκευής. Χρησιμοποιούνται επίσης υδραυλικοί γρύλοι μακράς διαδρομής τοποθετημένοι στη φορτηγίδα που σπρώχνουν το *jacket* πάνω στη φορτηγίδα.

Η περιστροφή της κατασκευής από την πραγματική θέση του μοντέλου στατικής ανάλυσης σε μια οριζόντια κατάσταση επιβάλλει διαφορετικές φορτίσεις στο προσομοίωμα. Για τη διαδικασία μεταφοράς του *jacket* από τον χώρο της κατασκευής, που ολισθαίνει στις δοκούς ολίσθησης που τοποθετούνται στη φορτηγίδα η προσομοίωση επιτυγχάνεται από ένα σύνολο κατακόρυφων ελατηρίων και οριζόντιων δυνάμεων που αντιπροσωπεύουν τις διάφορες συνθήκες στήριξης και τις δυνάμεις τριβής που δημιουργούνται κατά την ολίσθηση στη φορτηγίδα. Οι δυνάμεις στατικής τριβής μεταξύ της φορτηγίδας και των ολισθηρών ελασμάτων που εφάπτονται της κατασκευής θα μπορούσαν να είναι σημαντικές, ειδικά εάν συσσωρεύονται σκουριά και μπάζα στο ενδιάμεσο κατά τη διάρκεια της περιόδου κατασκευής ή/και αποθήκευσης.

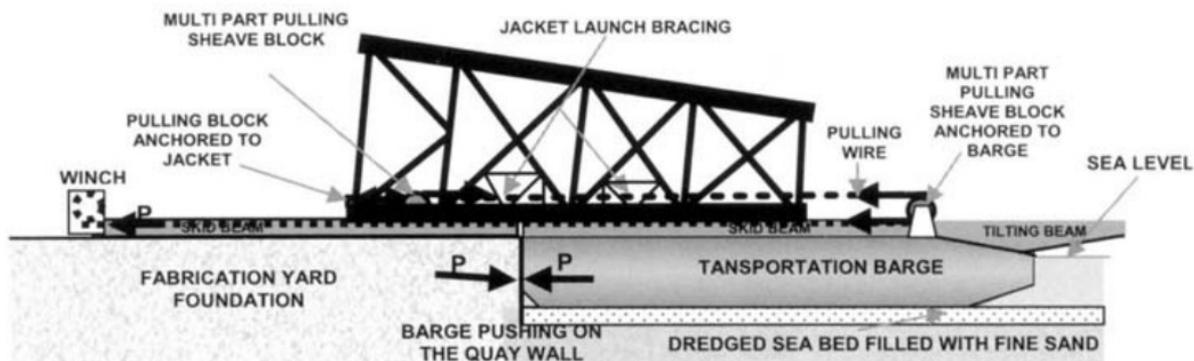
Η μέθοδος φόρτωσης *σε πλωτή φορτηγίδα* δύναται να χρησιμοποιηθεί εάν το έδαφος στον βυθό δεν είναι αρκετά ισχυρό για να υποστηρίξει το βάρος του *jacket* ή εάν απαιτείται υπερβολική προετοιμασία για το έδαφος αυτό. Αυτή η προσέγγιση γίνεται χρησιμοποιώντας μικρή ολίσθηση (όπως 3 m ανά ολίσθηση) και φορτώνοντας έρμα την φορτηγίδα με τέτοιο τρόπο, ώστε να παρέχει επαρκή υποστήριξη στο *jacket* σε κάθε τέτοια ολίσθηση.

Κάθε τέτοια ολίσθησης και φόρτωση του κατάλληλου έρματος μπορεί να διαρκέσει από 30 έως 60 λεπτά, ενώ η εκφόρτωση μιας μεγάλης πλατφόρμας βαθών υδάτων από μια πλωτή φορτηγίδα μπορεί να διαρκέσει αρκετές ημέρες. Η κοντινή θαλάσσια κυκλοφορία, η οποία μπορεί να δημιουργήσει κύματα και παφλασμούς και συνάμα να προκαλέσει κινήσεις της φορτηγίδας, πρέπει να περιοριστεί ή να σταματήσει κατά τη διάρκεια της περιόδου φόρτωσης.

Θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη οι παλιρροιακές διακυμάνσεις και οι ανεμολογικές και κυματικές συνθήκες της περιοχής. Σε αυτή τη μέθοδο, είναι σύνηθες να ελέγχεται ένας αριθμός τυχηματικών συνθηκών φόρτωσης, όπου το *jacket* μπορεί να μην στηρίζεται πλήρως από το σύστημα ολίσθησης της φορτηγίδας (με αποτέλεσμα να λειτουργεί τμηματικά σαν πρόβολος), λόγω μη προγραμματισμένων κινήσεων αυτής.

Κατά τη μεταφορά του στο πεδίο με μια φορτηγίδα μεταφοράς, το *jacket* και οι βραχίονες πρόσδεσης μεταφοράς, οι συνδέσεις τους και η φορτηγίδα υπόκεινται σε σημαντικές δυναμικές επιταχύνσεις και κεκλιμένα φορτία ιδίου βάρους. Οι κινήσεις αυτές και τα προκύπτοντα δυναμικά φορτία πρέπει να προσομοιωθούν σε σταδιακές ακολουθίες φόρτισης για τον προσδιορισμό και τη διαστασιολόγηση των στοιχείων με την υψηλότερη καταπόνηση. Η οριζόντια δυσκαμψία του *jacket*, η οποία είναι δευτερεύουσας σημασίας για την αντοχή του *jacket* στη θέση του, παίζει σημαντικό ρόλο κατά το στάδιο της μεταφοράς. Όμως ο ορθός σχεδιασμός αυτής της οριζόντιας δυσκαμψίας θα μπορούσε να σώσει το *jacket* από ζημιές ή αποσύνθεση κατά τη ρυμούλκηση προς την περιοχή τοποθέτησης.

Επίσης θα πρέπει να επαληθευτεί η πιθανή δυναμική διέγερση ορισμένων υποστηριγμάτων της κατασκευής από τις δυνάμεις αντίστασης που προκαλούνται από τις υψηλές ταχύτητες του ανέμου, οι οποίες μπορεί να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια μακρών υπερωκεάνιων ρυμούλκησης. Ορισμένα στηρίγματα μπορεί να είναι απαραίτητα μόνο για τη φάση μεταφοράς του *jacket*, ενώ ορισμένα από αυτά τα στηρίγματα μπορεί να απαιτείται να αφαιρεθούν, πριν από την εγκατάσταση της κατασκευής στο σημείο τοποθέτησης, για να μειωθούν τα φορτία κύματος στη θέση τους.



Εικόνα 2.17: Διαδικασία φόρτωσης του *jacket* σε φορτηγίδα. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)

### 2.4.3 Εγκατάσταση

Αρχικά, γίνεται η προετοιμασία του πυθμένα. Δεδομένου ότι η επιφάνεια του βυθού σπάνια είναι οριζόντια ή ομοιόμορφη και η οριζοντιότητα του εδάφους είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία των εργασιών γεώτρησης, οι πάσσαλοι εγκαθίστανται πριν από την εγκατάσταση των οποιονδήποτε υποθαλάσσιων κατασκευών ή εμπηγνύονται ή γίνεται αρχικά διάτρηση του εδάφους και ενεματοποιούνται.

Οι χαλύβδινοι πάσσαλοι τοποθετούνται μέσω των ποδιών του *jacket* ή μέσω των περιβλημάτων τύπου *sleeves*, που συνδέονται με τα πόδια του *jacket* στη βάση του. Οι πάσσαλοι που εγκαθίστανται μέσα στα πόδια του *jacket* εκτείνονται συνήθως μέχρι την κορυφή των ποδιών. Οι διαμπερείς πάσσαλοι συνδέονται με τα πόδια του *jacket* στην κορυφή με τη χρήση ελασμάτων, γνωστών ως "*crown shims*", τα οποία εγκαθίστανται στον διάκενο μεταξύ του ποδιού και του πασσάλου και συγκολλούνται και στα δύο (εικόνα 2.15). Σε ορισμένες κατασκευές, το διάκενο μεταξύ του ποδιού του *jacket* και του πασσάλου σκυροδετείται, αν και αυτό δεν αποτελεί πλέον συνήθη πρακτική. Οι πάσσαλοι που εγκαθίστανται μέσω περιβλήματος στο εξωτερικό της κατασκευής του ποδιού, συνδέονται με το περίβλημα με τσιμεντενέσεις στο διάκενο πασσάλου-περιβλήματος.

Ανεξάρτητα από το μέγεθος ή τον τύπο της εγκατάστασης του *jacket*, μόλις βρεθεί στον πυθμένα, το βάρος του υποστηρίζεται προσωρινά από τα *mudmats* (εικόνα 2.4).

Οι ακόλουθες μέθοδοι είναι οι πιο συνηθισμένες για την εγκατάσταση ενός *Jacket*:

#### Ανύψωση και καθέλκυση στο νερό:

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για μικρά *jackets*, σε πολύ ρηχά νερά, τα οποία μεταφέρονται σε φορτηγίδες σε όρθια θέση, ήδη προετοιμασμένα για υπεράκτια ανύψωση και εγκατάσταση από γερανοφόρο σκάφος. Όταν η κατασκευή φτάσει στην τοποθεσία εγκατάστασης, ανυψώνεται από το κατάστρωμα της φορτηγίδας και καθελκύεται στον βυθό. Τα *jacket* που εγκαθίστανται με αυτή τη διαδικασία έχουν συνήθως ύψος μικρότερο από 50 m. Οι πάσσαλοι θεμελίωσης για αυτό το μέγεθος δομής *jacket* μεταφέρονται συνήθως μαζί με το *jacket* στην ίδια φορτηγίδα. Μόλις η κατασκευή τοποθετηθεί στον πυθμένα, οι πάσσαλοι εγκαθίστανται με το ίδιο γερανοφόρο σκάφος και ένα σφυρι έμπηξης κατάλληλου μεγέθους.

#### Ανύψωση και ανατροπή:

Καθώς αυξάνεται το μέγεθος μιας δομής *jacket*, κατασκευάζεται και μεταφέρεται σε φορτηγίδα σε οριζόντια θέση. Η κατασκευή ανυψώνεται από τη φορτηγίδα χρησιμοποιώντας έναν ή δύο γεραμούς. Μετά την ανύψωση, η φορτηγίδα απομακρύνεται και το *jacket* αναποδογυρίζεται. Για την ανύψωση μικρότερων *jacket* μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμονωμένοι γερανοί με δύο βραχίονες, με το μήκος του *jacket* να ευθυγραμμίζεται με το επίπεδο του βραχίονα του γερανού.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ανύψωσης των *jackets*:

- Ανύψωση με δύο βραχίονες (εικόνα 2.18):  
Ανύψωση στον αέρα ή εν μέρει στο νερό με τη χρήση δύο γερανών. Σε αυτή τη μέθοδο, το *jacket* δεν έχει επαρκή άνωση για να επιπλεύσει χωρίς τη βοήθεια του γερανού. Αντ' αυτού, η ανύψωση επιτυγχάνεται με την καθήλωση του βραχίονα του ενός από τους δύο γερανούς ενώ ο άλλος ανυψώνεται προς τα πάνω. Το μέγεθος των *jackets* που μπορούν να ανασηκωθούν με έναν μόνο γερανό είναι περιορισμένο.
- Ανύψωση με μονό βραχίονα (εικόνα 2.19):  
Ένα *jacket*, το οποίο εγκαθίσταται με αυτή τη μέθοδο πρέπει να έχει επαρκή άνωση για να επιπλέει μόνο του σε οριζόντια θέση. Σε αυτή τη μέθοδο, η κατασκευή προ-εξοπλίζεται με δύο σετ τεσσάρων ιμάντων.  
Το πρώτο σετ ιμάντων (οι ιμάντες ανύψωσης) προσαρτάται κάπου κατά μήκος του άνω πλαισίου του *jacket*, ενώ βρίσκεται σε οριζόντια θέση.  
Το δεύτερο σετ ιμάντων (οι ιμάντες ανόρθωσης) προσαρτώνται στην κορυφή των ποδιών όταν το *jacket* βρίσκεται σε όρθια θέση.  
Το *jacket* ανυψώνεται από τη φορηγίδα με τους ιμάντες ανύψωσης και κατεβαίνει στο νερό μέχρι η άνωση να εξισορροπήσει το βάρος του. Στη συνέχεια, οι ιμάντες ανύψωσης αποσυνδέονται από τον γάντζο του γερανού και οι ιμάντες ανόρθωσης συνδέονται με τον γάντζο και η κατασκευή φορτώνεται με ελεγχόμενο τρόπο έως ότου απέχει λίγα μέτρα από τον πυθμένα της θάλασσας. Στη συνέχεια, ενεματώνεται περαιτέρω μέχρι να ακουμπήσει στον πυθμένα.  
Η μέθοδος αυτή απαιτεί μόνο έναν γερανό, αν και πρέπει να είναι ικανός να ανυψώσει το πλήρες βάρος της κατασκευής χωρίς βοήθεια. Τα πόδια του *jacket* πρέπει να γίνουν πλωτά με την τοποθέτηση ελαστικών διαφραγμάτων στο κάτω μέρος των ποδιών και χαλύβδινων καπακιών στις κορυφές. Προς τούτο απαιτείται επίσης πρόσθετος εξοπλισμός όπως βαλβίδες κατάκλισης, σωλήνες και αντλίες. Η πλευστότητα του *jacket* πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να επιτρέπει την εύκολη τοποθέτηση των ιμάντων ανύψωσης, ενώ το *jacket* επιπλέει οριζόντια. Για να εξασφαλιστεί ότι η πλήρωση ενός διαμερίσματος με νερό δεν θα οδηγήσει σε βύθιση του *jacket* ή σε αδυναμία ολοκλήρωσης της εγκατάστασης, απαιτείται επαρκής πλευστότητα και υποδιαίρεση των τμημάτων πλήρωσης. Επίσης θα πρέπει να εξεταστεί το ενδεχόμενο παροχής βαλβίδων με τηλεχειρισμό και χειροκίνητη υποστήριξη.

#### Καθέλκυση:

Οι κατασκευές *jacket* οι οποίες έχουν μεγάλο βάρος για να ανυψωθούν δύνανται να καθελκυστούν στη θάλασσα από μια φορηγίδα καθέλκυσης (εικόνα 2.20). Η φορηγίδα καθέλκυσης είναι μια φορηγίδα φορτίου με επίπεδη επιφάνεια, εξοπλισμένη με ολισθαίνουσες ράβδους, βραχίονα, βίντσια καθέλκυσης και κατάλληλο σύστημα εμφόρτωσης. Τα *jackets* είναι σχεδιασμένα ώστε να ανασηκώνονται μόνα τους ή να ανασηκώνονται με τη βοήθεια γερανοφόρου σκάφους.

Τα *jackets* που καθελκύονται πρέπει να έχουν επαρκές απόθεμα πλευστότητας, ώστε να εξασφαλίζεται ότι επιπλέουν στο τέλος της διαδικασίας καθέλκυσης. Τα πόδια του *jacket* γίνονται πλωτά με τη χρήση ελαστικών διαφραγμάτων στα κάτω άκρα τους και χαλύβδινων καπακιών στην κορυφή.

Μερικές φορές απαιτείται πρόσθετη άνωση προσαρμοσμένη κατάλληλα για να επιτευχθεί το απαιτούμενο επίπεδο αποθεμάτων άνωσης ή για να εξασφαλιστεί ότι το *jacket* θα ευθυγραμμιστεί μόνο του στο τέλος της διαδικασίας καθέλκυσης.

Οι εργασίες καθέλκυσης απαιτούν την τοποθέτηση του *jacket* με μια βάση καθέλκυσης. Η δοκός καθέλκυσης αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της δομής του *jacket* και χρησιμεύει για τη μεταφορά του βάρους του *jacket* στις δοκούς ολίσθησης και στους βραχίονες περιστροφής κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καθέλκυσης. Σημαντικό μέρος του βάρους του *jacket*, συνήθως αποτελεί το βάρος της δοκού καθέλκυσης.

Οι προαναφερόμενοι βραχίονες είναι δύο δοκοί που εγκαθίστανται στην πρύμνη της φορτηγίδας σε ευθυγράμμιση με τις δοκούς ολίσθησης και συνδέονται με την πρύμνη μέσω αρθρώσεων. Οι βραχίονες περιστροφής χρησιμεύουν για τη στήριξη του βάρους του *jacket*, καθώς αυτό περιστρέφεται πάνω από την πρύμνη της φορτηγίδας και βυθίζεται στο νερό (εικόνα 2.21).

Ως εκ τούτου, οι βραχίονες και οι αρθρώσεις στήριξης είναι ουσιώδεις κατασκευές.

Το *jacket* κατά την καθέλκυση του στη θάλασσα, θα υποβληθεί σε σημαντικές αδρανειακές και οπισθέλκουσες φορτίσεις. Γενικά, η πιο κρίσιμη φόρτιση θα εμφανιστεί όταν το *jacket* αρχίσει να γέρνει γύρω από την δοκό ανατροπής και αρχίσει να κατεβαίνει απότομα στη θάλασσα. Σε αυτή τη θέση οι κεκλειμένοι δοκοί θα ασκούν μεγάλα συγκεντρωμένα φορτία στους συνδέσμους δυσκαμψίας. Αυτοί απαιτούν ένα σύστημα υποστήριξης κατά την καθέλκυση ειδικά σχεδιασμένο για να κατανέμει και να μειώνει τις δυνάμεις καθέλκυσης.

Καθώς το *jacket* προσκρούει στο επίπεδο του νερού και κατεβαίνει με αυξανόμενη ταχύτητα στη θάλασσα, τα προπορευόμενα μέλη του *jacket* δύνανται να υποστούν υψηλές δυνάμεις κρούσης, αντίστασης και αδρανείας (εικόνα 2.22).

#### Ανύψωση και εγκατάσταση καταστρώματος:

Η ανύψωση καταστρώματος ή *jacket* με γερανό από φορτηγίδα μεταφοράς είναι μια άλλη κρίσιμη κατάσταση φόρτισης που απαιτεί προσομοίωση, ανάλυση και μελέτη (εικόνα 2.23). Σε τέτοιες εργασίες ανύψωσης, τα μέλη και οι συνδέσεις του καταστρώματος και του *jacket* φορτίζονται προς διαφορετικές διευθύνσεις από τις διευθύνσεις φόρτισης στη χωροθέτησή τους.

Επιπλέον, πλεονάζοντα ή μικρότερα μήκη ιμάντων ανύψωσης, από τα προβλεπόμενα, μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικά διαφορετικά φορτία από εκείνα που υπολογίζονται για εξιδανικευμένες συνθήκες π.χ. για την περίπτωση ανύψωσης με τέσσερις ιμάντες, εάν ένας ιμάντας είναι μικρότερος από τον προβλεπόμενο, τρεις αντί για τέσσερις ιμάντες μπορεί να μεταφέρουν ολόκληρο το φορτίο του καταστρώματος. Μια τέτοια μη προγραμματισμένη κατανομή φορτίου μπορεί επίσης να προκληθεί αν ένα κέντρο βάρους βρίσκεται σε διαφορετική θέση από την υπολογισμένη. Τα πτερύγια ανύψωσης και οι κρίκοι ανύψωσης είναι εξαρτήματα με μεγάλες συνέπειες αστοχίας. Η αστοχία και ενός μόνο πτερυγίου ανύψωσης είναι ικανό να οδηγήσει σε καταστροφή ολόκληρου του καταστρώματος, του *jacket* και του γερανού. Τέτοια κρίσιμα εξαρτήματα και οι συνδέσεις τους με τις ανυψούμενες κατασκευές πρέπει να σχεδιάζονται για υψηλότερους συντελεστές ασφαλείας. Συντελεστές ασφαλείας της τάξης του 4 ή και μεγαλύτερης αναλογίας έναντι της μέγιστης ικανότητας χρησιμοποιούνται συνήθως για τα πτερύγια ανύψωσης, τις συνδέσεις τους με την κατασκευή και τον σχετικό ανυψωτικό εξοπλισμό.

#### Συστήματα εγκατάστασης καταστρώματος:

Υπάρχουν διάφοροι τύποι καταστρωμάτων που μπορούν να εγκατασταθούν σε μια κατασκευή με βάση την κατασκευή και τη μέθοδο μεταφοράς τους. Ένα ολοκληρωμένο κατάστρωμα είναι ένα κατάστρωμα στο οποίο ο εξοπλισμός είναι προεγκατεστημένος στο κατάστρωμα σε ένα χερσαίο ναυπηγείο. Σε αυτή την περίπτωση, η ανωδομή του καταστρώματος στηρίζεται απευθείας στα ολισθηρά ελάσματα, καθώς και παρέχει κάθε απαιτούμενη πλευρική στήριξη. Ένα ολοκληρωμένο κατάστρωμα πολλαπλών τεμαχίων χρησιμοποιείται όταν το συνολικό κατάστρωμα είναι πολύ δαπανηρό για να ανυψωθεί σε ένα τεμάχιο και η πλατφόρμα έχει οκτώ ή περισσότερα πόδια. Τα προκατασκευασμένα καταστρώματα επιτρέπουν την κατανομή του φόρτου εργασίας κατασκευής σε διάφορα ναυπηγεία, έτσι ώστε διαφορετικά ναυπηγεία να εργάζονται παράλληλα σε διαφορετικές μονάδες, μειώνοντας έτσι δυννητικά το χρόνο κατασκευής.

Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξοπλισμός με ρόδες που περιέχει κάποιες σωληνώσεις, βαλβίδες και χειριστήρια, αλλά είναι γενικά μικρότερος από τις μεμονωμένες μονάδες, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η προσπάθεια κατασκευής στο ναυπηγείο για τη συναρμολόγηση ενός ολοκληρωμένου καταστρώματος ή μιας μεγάλης μονάδας. Οι ολισθαίνοντες εξοπλισμοί είναι γενικά μεταφερόμενοι με φορτηγό και συνεπώς

μπορούν να υποβληθούν σε προσφορά σε έναν αριθμό μικρότερων κατασκευαστών για αυξημένο ανταγωνισμό, χαμηλότερο κόστος έργου και συντομότερο χρόνο κατασκευής. Τα ράουλα δύνανται να εγκατασταθούν στο εσωτερικό μιας μονάδας ή ενός ολοκληρωμένου καταστρώματος. Ωστόσο, όμως τείνουν να αυξάνουν το δομικό βάρος. (εικόνα 2.24)

#### Θεμελιώσεις:

Υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι θεμελίωσης:

- 1) Εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι
- 2) Σκυροδετούμενοι πάσσαλοι μετά από διάτρηση
- 3) Άγκυρες με ενσωματωμένο μηχανισμό αναρρόφησης
- 4) Άγκυρες συρόμενες

*Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται εκτενέστερα οι πρώτες δύο τύποι θεμελίωσης με πασσάλους.*

#### Εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι (εικόνα 2.25):

Οι εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι είναι χαλύβδινα σωληνοειδή μέλη που αποτελούνται: α) από μια κεφαλή έμπηξης, β) το κύριο σώμα του πασσάλου και γ) ένα πάτο έμπηξης.

Το μήκος του πασσάλου, η διάμετρος και το πάχος του τοιχώματος εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους και το μέγεθος των φορτίων σχεδιασμού. Έχουν εγκατασταθεί πάσσαλοι μήκους άνω των 150 μέτρων και διαμέτρου μεγαλύτερης των 2,4 μέτρων.

#### Σκυροδετούμενοι πάσσαλοι μετά από διάτρηση:

Η έννοια του σκυροδετούμενου χαλύβδινου πασσάλου μετά από διάτρηση, *έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία* σε υπεράκτιες εφαρμογές.

Κατ' αυτήν συνήθως, διανοίγεται μία οπή σε συγκεκριμένο βάθος στο θαλάσσιο πυθμένα, μέσω του ποδιού μιας κατασκευής *jacket*.

Στη συνέχεια, ένας πάσσαλος εισέρχεται μέσω του ποδιού του *jacket* και κατεβαίνει στη διατρημένη οπή.

Ακολουθως, διοχετεύεται τσιμέντο από την κορυφή μέσω και γύρω από τον πάσσαλο ώστε να γεμίσει το κενό μεταξύ του πασσάλου και των τοιχωμάτων της οπής στον πυθμένα. Η διοχέτευση συνεχίζεται έως ότου το διάκενο μεταξύ του ποδιού του *jacket* και του πασσάλου γεμίσει με σκυρόδεμα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η δομική συνέχεια και η μεταφορά φορτίου από το *jacket* στον πάσσαλο, μέσω του διάκενου του ενέματος και μεταξύ του πασσάλου και του εσωτερικού τοιχώματος του σκέλους του *jacket* (εικόνα 2.3).

Οι εργασίες διάτρησης πρέπει να γίνονται προσεκτικά για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα κατάρρευσης της οπής. Τα χαλύβδινα σωληνωτά περιβλήματα χρησιμοποιούνται όταν αναμένεται αστάθεια της οπής.

*Αξίζει να σημειωθεί ότι τα τρυπητά θεμέλια έχουν ένα σαφές πλεονέκτημα* σε σχέση με τους άλλους τύπους, όπου οι οπές δύνανται να διανοιχθούν μέσα στο βράχο, ενώ η έμπηξη πασσάλων δεν είναι εφικτή και δεν μπορεί να θεωρηθεί ως επιλογή.

#### Τύποι και μεγέθη σφυριών έμπηξης πασσάλων (εικόνα 2.26):

Ωστόσο, με τις υπεράκτιες κατασκευές που προχωρούν σε βαθύτερα νερά, τα υδραυλικά σφυριά έχουν χρησιμοποιηθεί για την προώθηση πασσάλων τόσο κάτω όσο και πάνω από το νερό. Τα σφυριά ποικίλλουν σε μέγεθος, βάρος και ικανότητα ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του πασσάλου που πρόκειται να μπηχθεί και τις ιδιότητες του εδάφους στο οποίο πρόκειται να μπηχθεί. Αυτά ταξινομούνται με βάση τη μέγιστη ενέργεια που μπορούν να αποδώσουν. Τα υπάρχοντα σφυριά μπορούν να καρφώσουν πασσάλους διαμέτρου έως 3 m. Το σφυρί πρέπει να είναι επαρκώς μεγάλο για να ωθήσει τον πάσσαλο



στη διείσδυση σχεδιασμού στις δεδομένες εδαφικές συνθήκες. Συνήθως οι εξεταζόμενες εδαφικές συνθήκες αντιστοιχούν τόσο στα κατώτερα όσο και στα ανώτερα όρια. Επίσης, ο πάσσαλος θεωρείται ότι είναι είτε "κλειστού τύπου» ή "ανοικτού τύπου" (δηλαδή με κλειστό ή ανοικτό το άκρο).

Η περίπτωση "κλειστού" αναφέρεται στην περίπτωση όπου το εδαφικό πώμα στο εσωτερικό του πασσάλου θεωρείται ότι έχει γίνει αναπόσπαστο τμήμα του πασσάλου και κινείται μαζί του καθώς ο πάσσαλος φράζει στον πυθμένα. Η περίπτωση "ανοικτού" αναφέρεται στην περίπτωση όπου το εδαφικό πώμα θεωρείται ότι παραμένει στο ίδιο επίπεδο με το έδαφος εκτός του πασσάλου και ότι η αντίσταση από την τριβή του εδάφους συνεχίζει να αναπτύσσεται τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό του πασσάλου.

Ελλείψει της διεξαγωγής ειδικών αναλύσεων για την ικανότητα έμπηξης, υπάρχουν οδηγίες στη βιομηχανία σχετικά με τον απαιτούμενο συνδυασμό πάχους τοιχώματος και διαμέτρου πασσάλου για δεδομένο μέγεθος σφυριού [*API RP2A*]. Ωστόσο, σχεδόν όλα τα υπεράκτια έργα εγκατάστασης πασσάλων βασίζονται πλέον στις αναλύσεις ικανότητας έμπηξης των πασσάλων.

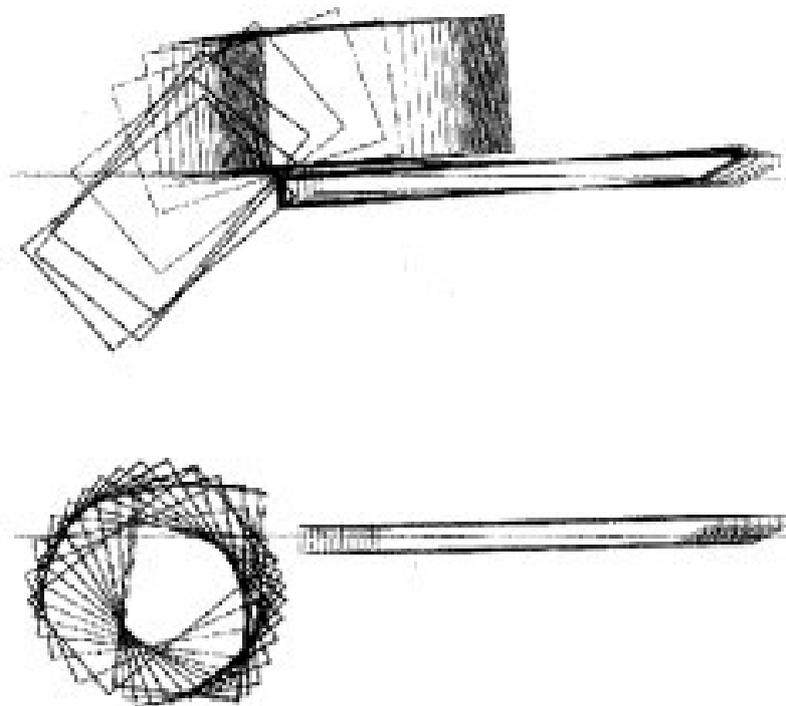
Για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική λειτουργία υπεράκτιας έμπηξης πασσάλων, συνιστάται να αποφεύγονται οι καθυστερήσεις κατά την διαδικασία έμπηξης, εάν είναι δυνατόν. Ένας κοινώς αποδεκτός ρυθμός σφυροκόπησης είναι 980 χτυπήματα/m.



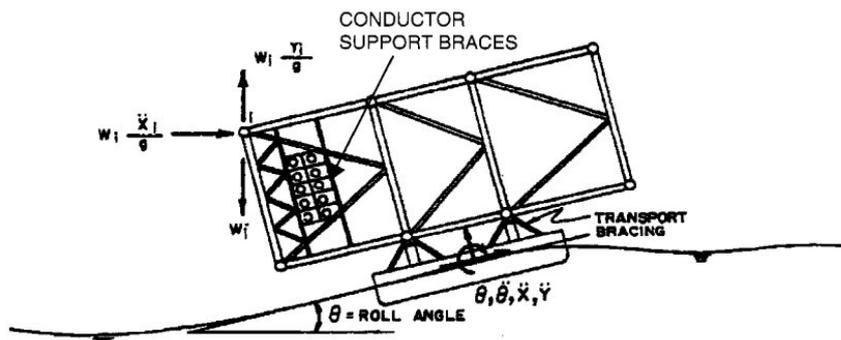
Εικόνα 2.18: Διαδικασία ανύψωσης με λειτουργία δύο γερανών. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume II», Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



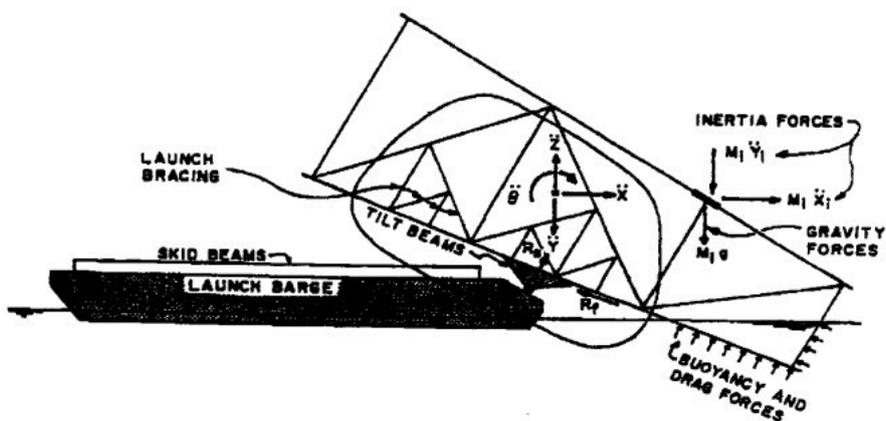
Εικόνα 2.19: Διαδικασία ανύψωσης με λειτουργία ενός γερανού. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume II», Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



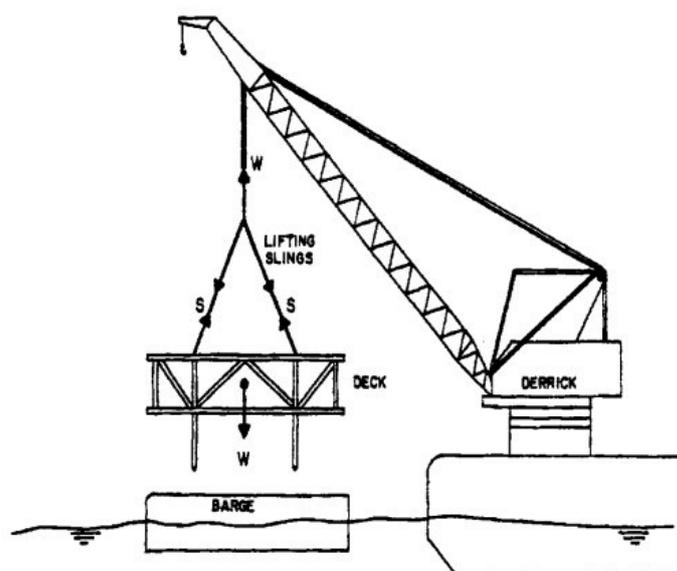
Εικόνα 2.20: Τυπική ακολουθία καθέλκυσης ενός αυτοαναδυόμενου *jacket*. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume II», Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



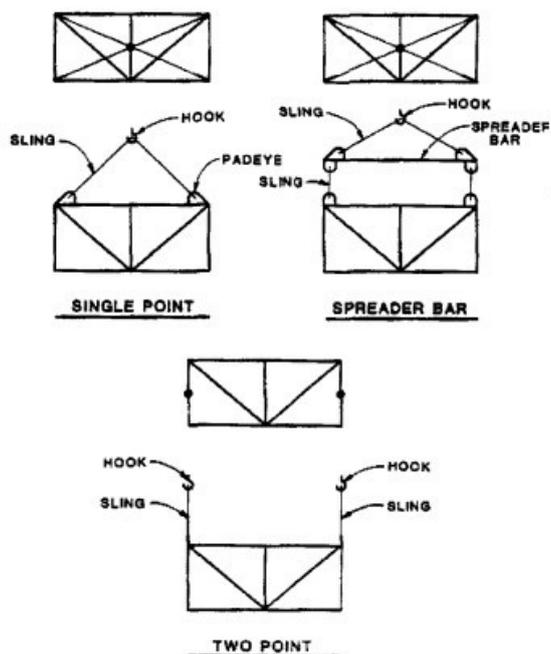
Εικόνα 2.21: Φορτίσεις που αναπτύσσονται κατά την καθέλκυση της πλατφόρμας (α). (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



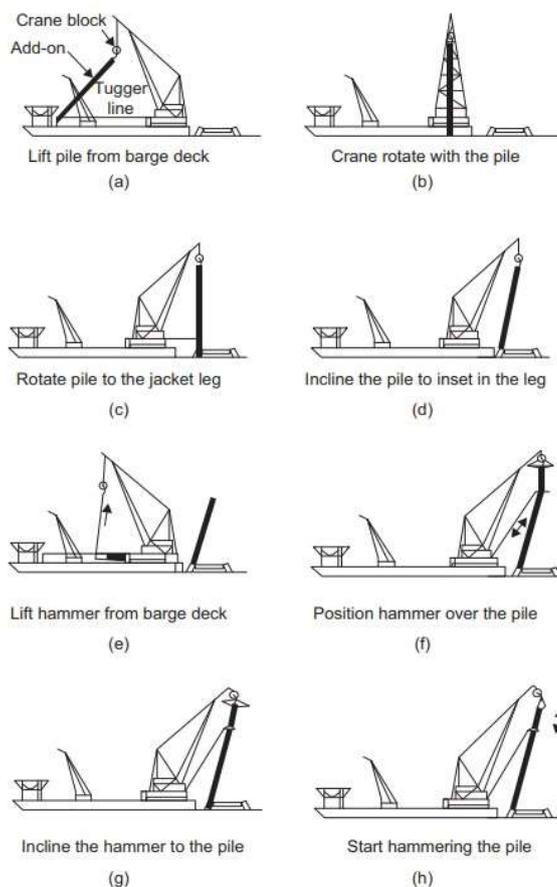
Εικόνα 2.22: Φορτίσεις που αναπτύσσονται κατά την καθέλκυση της πλατφόρμας (β). (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



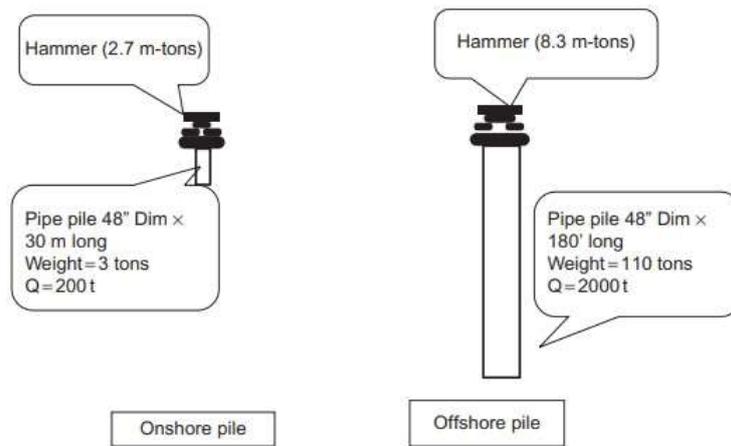
Εικόνα 2.23: Εγκατάσταση καταστρώματος. (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



Εικόνα 2.24: Τρόποι ανέγερσης καταστρώματος (μονό σημείο, διπλό σημείο, ράβδος διανομής). (Πηγή: Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume II», Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.)



Εικόνα 2.25: Εγκατάσταση και χειρισμός εμπηγνυόμενων πασσάλων. (Πηγή: El-Reedy Mohamed A., Ph.D. (2012). «Offshore Structures, Design, Construction and Maintenance». Elsevier, USA.)



Εικόνα 2.26: Σύγκριση βάρους σφυριών έμμηξης πασσάλων σε χερσαίες και υπεράκτιες κατασκευές. (Πηγή: El-Reedy Mohamed A., Ph.D. (2012). «Offshore Structures, Design, Construction and Maintenance». Elsevier, USA.)



## 3 ΜΟΡΦΩΣΗ ΦΟΡΕΑ

### 3.1 Εισαγωγή

*Στην παρούσα διπλωματική εργασία πρόκειται να αναλυθεί εκτενώς η επιρροή της επιλογής του τρόπου θεμελίωσης με πασσάλους.*

Πιο συγκεκριμένα, μορφώνοντας την ίδια υπεράκτια κατασκευή με 3 διαφορετικούς τρόπους θεμελίωσης θα προκύψουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα.

Οι εν λόγω 3 τρόποι θεμελίωσης είναι οι ακόλουθοι:

- 1) Θεμελίωση με *pin piles* (πασσάλους, οι οποίοι διέρχονται εντός του πόδα του *jacket*).
- 2) Θεμελίωση με *skirt piles*, πασσάλους που διέρχονται από τα sleeves, (ειδικά περιβλήματα παρά τον πόδα του *jacket*).
- 3) Θεμελίωση με *mixed piles*, δηλαδή συνδυασμό των *pin* και *skirt piles*.

### 3.2 Εξυηηρετούσα Λειτουργία

Προκειμένου να είναι όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερη η προσομοίωση και να αντικατοπτρίζει τα ελληνικά δεδομένα, *η χωροθέτηση γίνεται σε ελληνικά ύδατα.*

Μία από τις πιο συνήθεις χρήσεις των υπεράκτιων κατασκευών είναι τα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Θα πρέπει να αναφερθεί και είναι γνωστό ότι η κατασκευή ενός θαλάσσιου αιολικού πάρκου είναι ακριβότερη από την χερσαία εκδοχή αυτού, ωστόσο η δαπάνη αυτή αντισταθμίζεται από την αποδοτικότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μεγαλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται χάρη στους ανέμους μεγάλης ταχύτητας και σταθερής πνοής, αφού δεν επηρεάζεται από τυχόν εμπόδια όπως στα χερσαία αιολικά πάρκα. Παρόλο που στην Ελλάδα και ιδιαίτερα στο Αιγαίο πέλαγος επικρατούν ιδανικές ανεμολογικές συνθήκες, ένα θαλάσσιο αιολικό πάρκο δεν έχει γίνει ακόμη πραγματικότητα.

Επιλέχθηκε, η εξεταζόμενη υπεράκτια πλατφόρμα της εν λόγω διπλωματικής εργασίας να έχει λειτουργία υποσταθμού αιολικού πάρκου. Πρόκειται για μία απαραίτητη δομή σε κάθε αιολικό πάρκο, όπου συγκεντρώνεται η ηλεκτρική ενέργεια, η οποία παράγεται από τις ανεμογεννήτριες μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων. Ακολούθως, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε ρεύμα υψηλής τάσης και εν συνεχεία μεταφέρεται στην ακτή μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων.



Εικόνα 3.1: Υπεράκτια πλατφόρμα *jacket* με λειτουργία υποσταθμού. (Πηγή:

<https://www.offshorewind.biz/2021/09/29/keppel-completes-greater-changhua-1-2a-offshore-substations/>)

### 3.3 Χωροθέτηση

Η χωροθέτηση της πλατφόρμας υποσταθμού έγινε στην περιοχή του Βόρειου Αιγαίου και συγκεκριμένα στο Θρακικό Πέλαγος με συντεταγμένες στο Παγκόσμιο Εγκάρσιο Μερκτωρικό Σύστημα (*UTM*): Τετμημένη  $X = 347418,11 \mu A$ , Τεταγμένη  $Y = 4508050,03 \lambda B$ .

Η τοποθεσία επιλέχθηκε έτσι ώστε να πληροί τις εξής προϋποθέσεις:

- ✓ Το μικρότερο δυνατό βάθος, έτσι ώστε να μην είναι απαγορευτικό το κόστος μιας σταθερής πλατφόρμας *jacket*:  
Βάθος σημείου χωροθέτησης: 70 m (ως εμφανίζεται στην εικόνα 3.2)
- ✓ Επαρκή απόσταση από τις γύρω ακτές, ώστε να αποφευχθεί η οπτική όχληση:  
Απόσταση σημείου χωροθέτησης: τουλάχιστον 24 km από την ακτή (εικόνα 3.3)
- ✓ Μεγάλο αιολικό δυναμικό:  
Μέση ταχύτητα ανέμου στα 100 m υψόμετρο: 7 m/s (ως εμφανίζεται εικόνα 3.4)

### 3.4 Γεωμετρία Φορέα

Η δομή του *jacket* του υποσταθμού ανέρχεται σε ύψος 78 m και αποτελείται από τα 3 φατώματα με παρόμοιο λόγο ύψους προς πλάτους.

Το βάθος της θάλασσας στο σημείο χωροθέτησης της κατασκευής είναι 70 m, οπότε λαμβάνονται 8 m ύψους μεταξύ της Μέσης Στάθμης της Θάλασσας (ΜΣΘ) και του κατώτερου επιπέδου της ανωδομής.

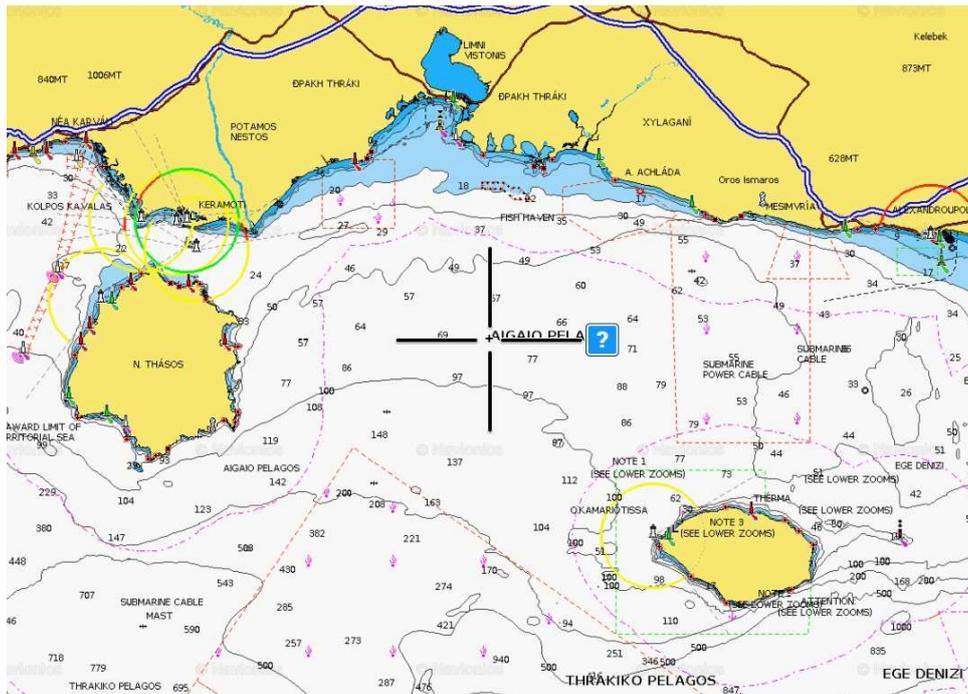


Το κύμα σχεδιασμού έχει ύψος 3,60 m, ενώ λαμβάνονται άλλα 4,40 m στα πλαίσια ασφαλείας. Η κλίση των ποδιών της δομής του *jacket* είναι 1:10 με πλάτος βάσης ίσο με 24,86 m και πλάτος κορυφής ίσο με 10,00 m.

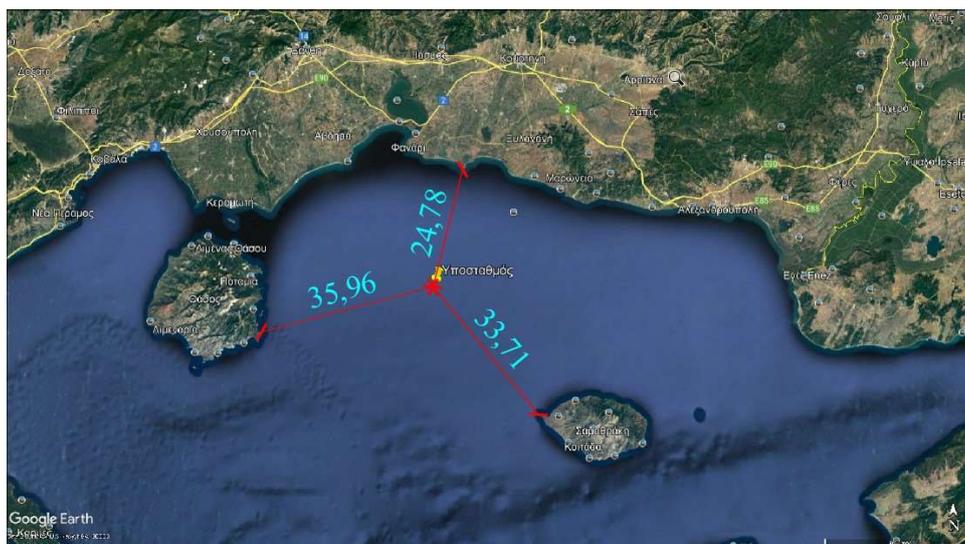
Η ανωδομή αποτελείται από τριώροφη κατασκευή ορθογωνικής κάτοψης, πλευράς 20,00 m κατά τη διεύθυνση του άξονα Χ και 18,00 m κατά τη διεύθυνση του άξονα Υ.

Το ύψος μεταξύ των ορόφων είναι 6,00 m, έτσι ώστε να είναι εφικτή η εγκατάσταση του εξοπλισμού.

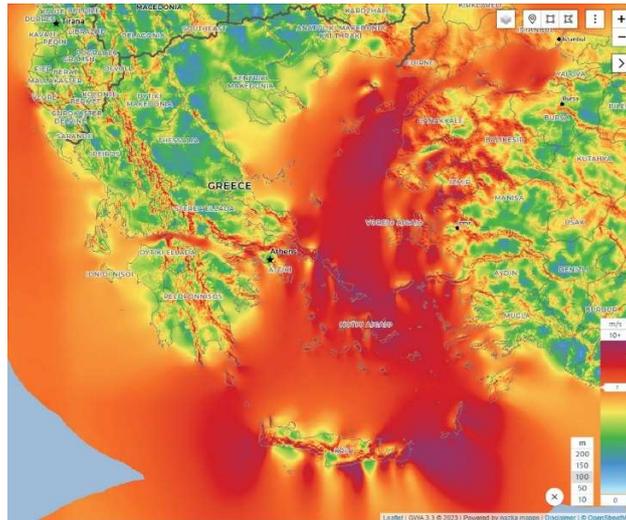
Ο τελευταίος όροφος θα έχει χρήση ελικοδρομίου διαμέτρου 16,00 m.



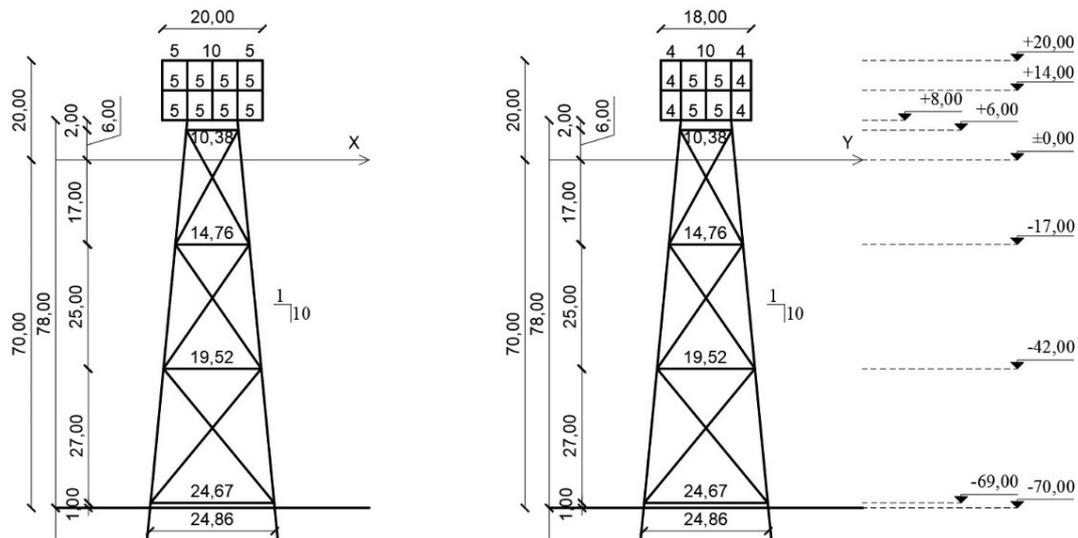
Εικόνα 3.2: Βάθος σημείου (70 m) χωροθέτησης του υπό μελέτη υποσταθμού. (Πηγή: <https://webapp.navionics.com/#boating>)



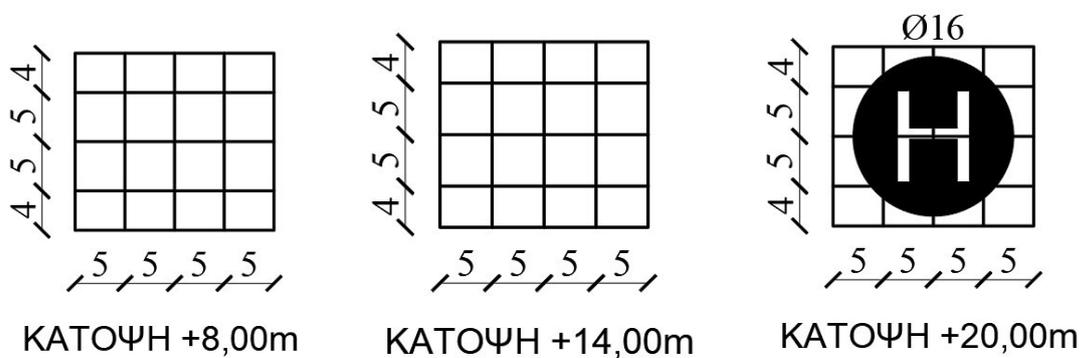
Εικόνα 3.3: Απόσταση σημείου χωροθέτησης από τα χερσαία τμήματα.



Εικόνα 3.4: Μέση ταχύτητα ανέμου σε υψόμετρο 100 m. (Πηγή: <https://globalwindatlas.info/en/area/Greece/Notio%20Aigaio>)



Εικόνα 3.5: Γεωμετρία φορέα.



Εικόνα 3.6: Κατόψεις Ανωδομής.

### 3.4.1 Γεωμετρία Φορέα Θεμελιωμένου με Pin Piles

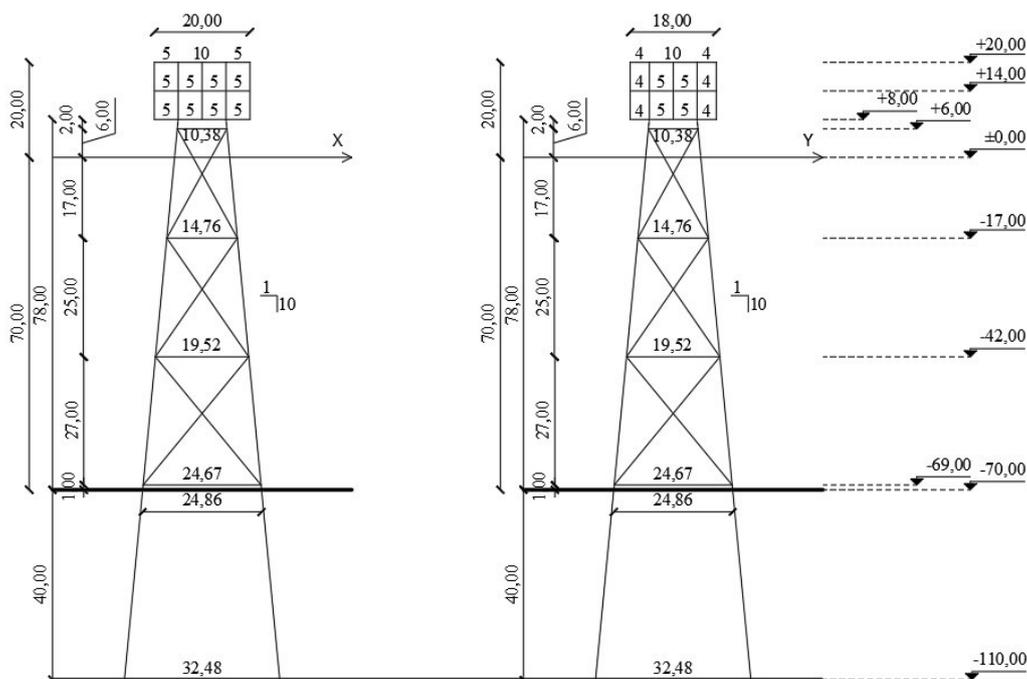
Η θεμελίωση του *jacket* γίνεται με *pin piles* (εικόνα 3.7), δηλαδή με τη χρήση πασσάλων μικρότερης διαμέτρου από τα πόδια του *jacket*, ώστε οι πάσσαλοι να μπηχθούν εσωτερικά των ποδιών, υιοθετώντας την κλίση αυτών, και να καταλήξουν σε επαρκές βάθος θεμελίωσης στον βυθό. Στο κενό μεταξύ της εξωτερικής διαμέτρου των πασσάλων και της εσωτερικής διαμέτρου των ποδιών δεν γίνεται πλήρωση με ένεμα για απλούστευση της διαστασιολόγησης. Τα πόδια του καταστρώματος εδράζονται πάνω στις κορυφές των πασσάλων, όπου και συγκολλούνται. Το αρχικό βάθος έμπηξης των πασσάλων θεωρείται 40 m.

### 3.4.2 Γεωμετρία Φορέα Θεμελιωμένου με Skirt Piles

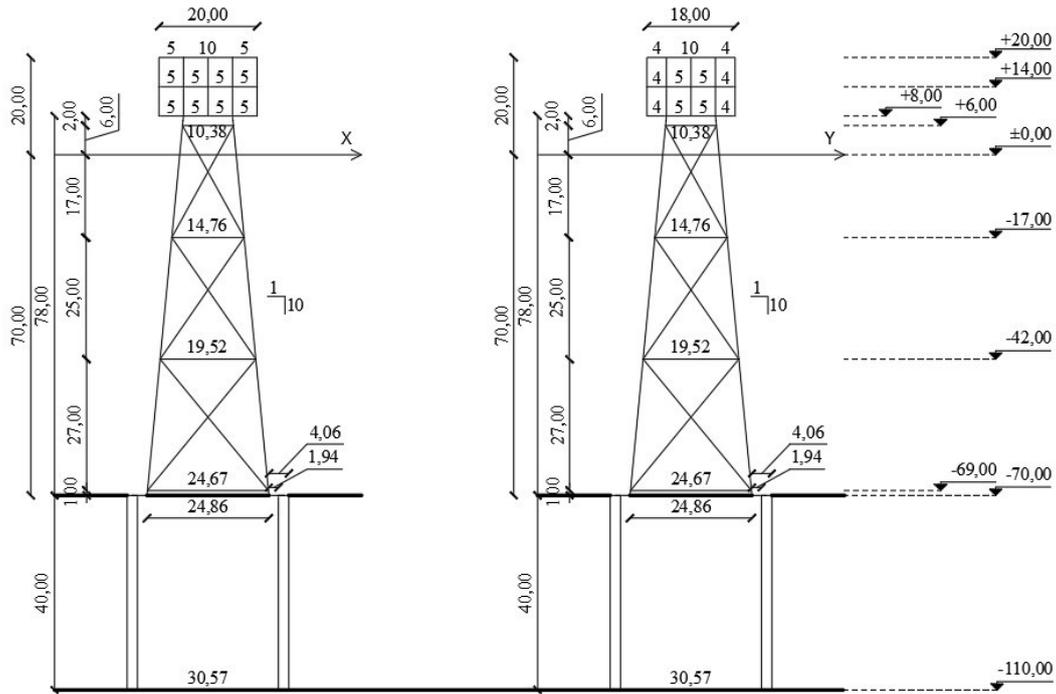
Η θεμελίωση του *jacket* γίνεται με *skirt piles* (εικόνα 3.8), δηλαδή οι πάσσαλοι εμπερνούνονται μέσω ειδικών διαμορφωμένων περιβλημάτων (*sleeves*), τα οποία συγκολλούνται παρά τους πόδες του *jacket*, στον βυθό. Σε αυτή την περίπτωση, δεν είναι αναγκαία η μικρότερη διάμετρος των πασσάλων σε σχέση με αυτή των ποδιών, αλλά είναι εφικτή η τοποθέτηση παραπάνω από ένα πάσσαλο σε κάθε πόδι. Στην παρούσα εξετάζεται με την τοποθέτηση δύο πασσάλων ανά πόδα. Το αρχικό βάθος έμπηξης των πασσάλων θεωρείται 40 m.

### 3.4.3 Γεωμετρία Φορέα Θεμελιωμένου με Mixed Piles

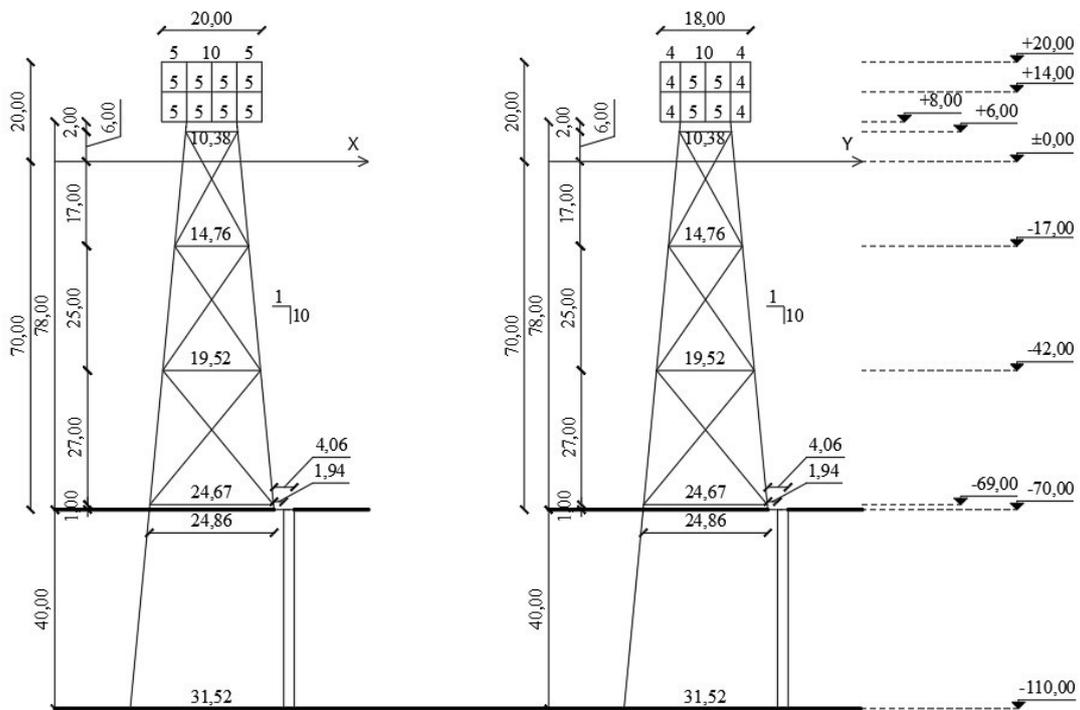
Η θεμελίωση του *jacket* γίνεται με *mixed piles* (εικόνα 3.9), δηλαδή συνδυάζονται πάσσαλοι τύπου *pin* και *skirt* σε ένα μεικτό τρόπο θεμελίωσης. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, οι όμοιοι τύποι πασσάλων τοποθετούνται αντιδιαμετρικά της υπεράκτιας κατασκευής. Το αρχικό βάθος έμπηξης των πασσάλων θεωρείται 40 m.



Εικόνα 3.7: Γεωμετρία φορέα θεμελιωμένου με *pin piles*.



Εικόνα 3.8: Γεωμετρία φορέα θεμελιωμένου με *skirt piles*.



Εικόνα 3.9: Γεωμετρία φορέα θεμελιωμένου με *mixed piles*

## 4 ΔΡΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

### 4.1 Εισαγωγή

Μία υπεράκτια πλατφόρμα έρχεται αντιμέτωπη με αρκετά φορτία κατά τη διάρκεια ζωής αυτής, τα οποία πρέπει να υπολογιστούν και να εφαρμοστούν σωστά κατά την ανάλυση της. Όσο καλύτερη είναι η προσέγγιση των φορτίων, τόσο ακριβέστερη θα είναι και η μετέπειτα διαστασιολόγηση και στατική ανάλυση της κατασκευής.

Τα φορτία που πρόκειται να αναλυθούν, ασκούνται ταυτοχρόνως, οπότε πρόκειται να μελετηθούν υπό συνδυασμούς δράσεων.

### 4.2 Μόνιμα Φορτία

Στα μόνιμα φορτία περιλαμβάνεται το ίδιο βάρος του φορέα (υποστυλώματα, δοκοί, σύνδεσμοι δυσκαμψίας, πάσσαλοι) και κάποια μόνιμα πρόσθετα φορτία όπως οι επικαλύψεις, τα επιχρίσματα, ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός, διάφορες υδραυλικές σωληνώσεις και το βάρος σύνδεσης των υποθαλάσσιων καλωδίων. Τα πρόσθετα μόνιμα φορτία λαμβάνονται ως:

- Πρώτο κατάστρωμα (+8,00 m): Κύριο κατάστρωμα με το πρόσθετο μόνιμο φορτίο να ορίζεται σε 5,0 kN/m<sup>2</sup>.
- Δεύτερο κατάστρωμα (+14,00 m): Δευτερεύων κατάστρωμα με το πρόσθετο μόνιμο φορτίο να ορίζεται σε 3,0 kN/m<sup>2</sup>.

Για την προσομοίωση του φορέα τα μόνιμα φορτία αυτού υπολογίζονται από το λογισμικό *SAP2000*.

Σε αυτά προστίθεται το φορτίο του ελικοδρομίου του τρίτου καταστρώματος, το οποίο σύμφωνα με την εταιρεία "*Aluminium Offshore*" έχει διάμετρο 16 m και ζυγίζει 13 τόνους, ενώ είναι σχεδιασμένο για ελικόπτερα γενικής χρήσης τύπου *Sikorsky S-76*.



Εικόνα 4.1: Ελικόπτερο τύπου *Sikorsky S-76*. (Πηγή: <https://winair.ca/blog/preeminent-guide-sikorsky-s-76-helicopter/>)

### 4.3 Κινητά Φορτία

Τα κινητά φορτία είναι αυτά που πρόκειται να δεχτεί ο φορέας κατά τη λειτουργία του από το ανθρώπινο εργατικό δυναμικό, τα γραφεία ή τους χώρους διαμονής και τα διάφορα αποθηκευμένα είδη, όπως καύσιμα, εργαλεία, προσωπικά είδη και αντικείμενα των χρηστών.

Βάσει της λειτουργίας κάθε καταστρώματος και του Ευρωκώδικα, τα φορτία ορίζονται ως εξής:

- Πρώτο κατάστρωμα (+8,00 m): Κατάστρωμα συντήρησης και βιομηχανικών εργασιών, συλλογής και μετασχηματισμού ηλεκτρικής ενέργειας. Το κινητό φορτίο ορίζεται σε 5,0 kN/m<sup>2</sup>.
- Δεύτερο κατάστρωμα (+14,00 m): Κατάστρωμα χώρων γραφείου και διαμονής. Το κινητό φορτίο ορίζεται σε 3,0 kN/m<sup>2</sup>.
- Τρίτο κατάστρωμα (+20,00 m): Κατάστρωμα ελικοδρόμιου. Το κινητό φορτίο ορίζεται σε 1,5 kN/m<sup>2</sup>.

### 4.4 Περιβαλλοντικές Δράσεις:

#### 4.4.1 Φορτίο Ανέμου

Σε μία υπεράκτια μεταλλική πλατφόρμα το φορτίο του ανέμου είναι από τις σημαντικότερες δράσεις που εξετάζονται, καθώς άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι η τοποθεσία χωροθέτησης του υποσταθμού επιλέχθηκε με βάση την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας.

Ως φορτίο ανέμου επί των κατασκευών θεωρείται η πίεση που αναπτύσσεται από την ανάσχεση της ροής του ανέμου. Από τις αναπτυσσόμενες πιέσεις προκύπτουν δυνάμεις κάθετες προς την προσβαλλόμενη επιφάνεια. Το φορτίο του ανέμου εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Γεωγραφική θέση της κατασκευής
- Τοπογραφία της περιοχής (θαλάσσιο περιβάλλον, άρα ανεμπόδιστη ροή ανέμου)
- Διαστάσεις και σχήμα της κατασκευής
- Μέση ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου στην εξεταζόμενη περιοχή

Ως θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου  $v_{b,0}$  ορίζεται η χαρακτηριστική μέση τιμή δεκάλεπτου ανέμου σε μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε ύψος 10 m από το έδαφος και σε επίπεδη περιοχή στην οποία δεν υπάρχουν εμπόδια, δηλαδή σε περιοχή με *κατηγορία εδάφους II*.

Η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου λαμβάνεται ίση με  $v_{b,0} = 33 \text{ m/s}$  σύμφωνα με το Εθνικό προσάρτημα, εφόσον πρόκειται για υπεράκτια πλατφόρμα.



Στην συνέχεια, υπολογίζεται η μέση ταχύτητα του ανέμου  $v_m(z)$  σε ύψος  $z$ :

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_a(z) \cdot v_b \quad (4-2)$$

Όπου:

- $c_a(z)$  είναι ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης, με τον οποίο εκτιμάται η αύξηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου πάνω από μεμονωμένους λόφους και εξάρσεις ή γκρεμούς ανάλογα με την προσήνεμη κλίση. Στην περίπτωση του υποσταθμού, ο οποίος βρίσκεται σε θαλάσσια περιοχή,  $c_a(z) = 1,0$
- $c_r(z)$  είναι ο συντελεστής τραχύτητας, ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln \frac{z}{z_0}, \text{ για } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (4-3)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}), \text{ για } z \leq z_{min} \quad (4-4)$$

Όπου:

- $k_r$  είναι ο συντελεστής εδάφους, ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$k_r = 0,19 \cdot \ln \left( \frac{z}{z_{0,11}} \right)^{0,07} \quad (4-5)$$

Οι τιμές των  $z_0$  (m) και  $z_{min}$  (m) λαμβάνονται από το Εθνικό Προσάρτημα 0,003 και 1 αντίστοιχα ως Κατηγορία Εδάφους 0, ενώ το  $z_{max}$  (m) λαμβάνεται ίσο με 200.

Πίνακας 4.1: Κατηγορία εδάφους και συντελεστές  $z_0$  (m) και  $z_{min}$  (m). (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)

Κατηγορία εδάφους		$Z_0$ (m)	$Z_{min}$ (m)
0	Θάλασσα ή παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα	0.003	1
I	Λίμνες ή επίπεδες και οριζόντιες περιοχές με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια	0.01	1
II	Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) σε απόσταση 20 φορές το ύψος των εμποδίων	0.05	2
III	Περιοχή με κανονική κάλυψη βλάστησης ή με κτίρια ή με μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωρία, προάστια, μόνιμα δάση)	0.3	5
IV	Περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια των οποίων το μέσα ύψος ξεπερνά τα 15 m	1	10



Ακολουθως, υπολογίζεται η πίεση αιχμής σε ύψος  $z$ , η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)]^{1/2} * \rho * v_m^2(z) = c_e(z) * q_b \quad (4-6)$$

Όπου:

- $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα, που εξαρτάται από το υψόμετρο, τη θερμοκρασία και τη βαρομετρική πίεση του ανέμου που αναμένονται σε μία περιοχή κατά τη διάρκεια ανεμοθύελλας και λαμβάνεται ίση με  $1,25 \text{ kg/m}^3$
- $I_v(z)$  είναι η ένταση του στροβιλισμού σε ύψος  $z$

$$I_v(z) = \frac{k_1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) * c_0(z)} \quad (4-7)$$

- $v_m$  είναι η μέση ταχύτητα ανέμου σε ύψος  $z$  πάνω από το έδαφος

#### Ανεμοπίεση στις κατακόρυφες επιφάνειες

Η πίεση του ανέμου σε κατακόρυφες επιφάνειες διαχωρίζεται σε εξωτερική και εσωτερική ανεμοπίεση.

- *Εξωτερική Ανεμοπίεση:*  
Δίνεται από τη σχέση:

$$W_e = q_p(z_e) * c_{pe} \quad (4-8)$$

Όπου:

- $c_{pe}$  είναι ο συντελεστής εξωτερικής πίεσης
- $q_p(z_e)$  είναι η πίεση αιχμής για το ύψος αναφοράς  $z_e$ , το οποίο υπολογίζεται βάσει του λόγου των διαστάσεων στις πλατφόρμας (ύψος  $h$  προς πλάτος  $b$ ) σύμφωνα με την εικόνα 4.3.

Θεωρήθηκε ως πλάτος της κατασκευής το *δυσμενέστερο των δύο διευθύνσεων*, δηλαδή  $b = \max(18,20) = 20,0 \text{ m}$ , ενώ ισχύει πως  $h = 20,0 \text{ m}$ .

Συνεπώς, η περίπτωση της υπό μελέτης κατασκευής βρίσκεται στην πρώτη κατηγορία της εικόνας 3.3, όπου  $h \leq b$ .

Ο υπολογισμός του συντελεστή εξωτερικής πίεσης  $c_{pe}$  για κατακόρυφες επιφάνειες, αλλά και οριζόντιες με κλίση μικρότερη από 5% γίνεται με τη χρήση των πινάκων 4.2 και 4.3.

Για των υπολογισμό των συντελεστών  $c_{pe}$  υπολογίστηκε ο λόγος  $\frac{h}{d} = 1,11$  και με γραμμική παρεμβολή προέκυψαν οι τιμές στον πίνακα 4.4.

- *Εσωτερική ανεμοπίεση:*  
Δίνεται από τη σχέση:

$$W_i = q_p(z_i) * c_{pi} \quad (4-9)$$

Όπου,  $c_{pi}$  ο συντελεστής εσωτερικής ανεμοπίεσης.

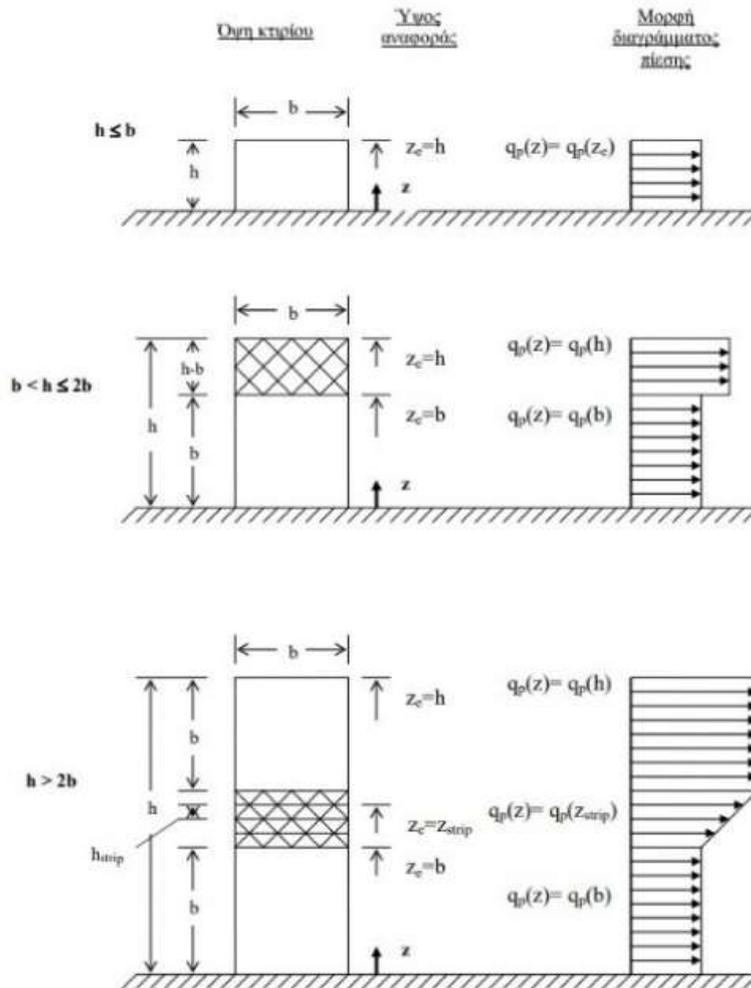
Για την εσωτερική ανεμοπίεση, καθώς οι τιμές  $c_{pi}$  εξαρτώνται από το μέγεθος και τη θέση των ανοιγμάτων για τα οποία υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα λαμβάνονται οι ακραίες τιμές του συντελεστή  $c_{pi}$ , δηλαδή  $c_{pi,1} = 0,2$  και  $c_{pi,2} = -0,3$ .

Για  $z_e$  ίσο με  $h$  αρχικά γίνονται οι υπολογισμοί και προκύπτουν τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στον πίνακα 4.6, με τη χρήση του οποίου υπολογίζεται η τελική ανεμοπίεση (πίνακας 4.7), η οποία προκύπτει ως το άθροισμα εσωτερικής και εξωτερικής ανεμοπίεσης.

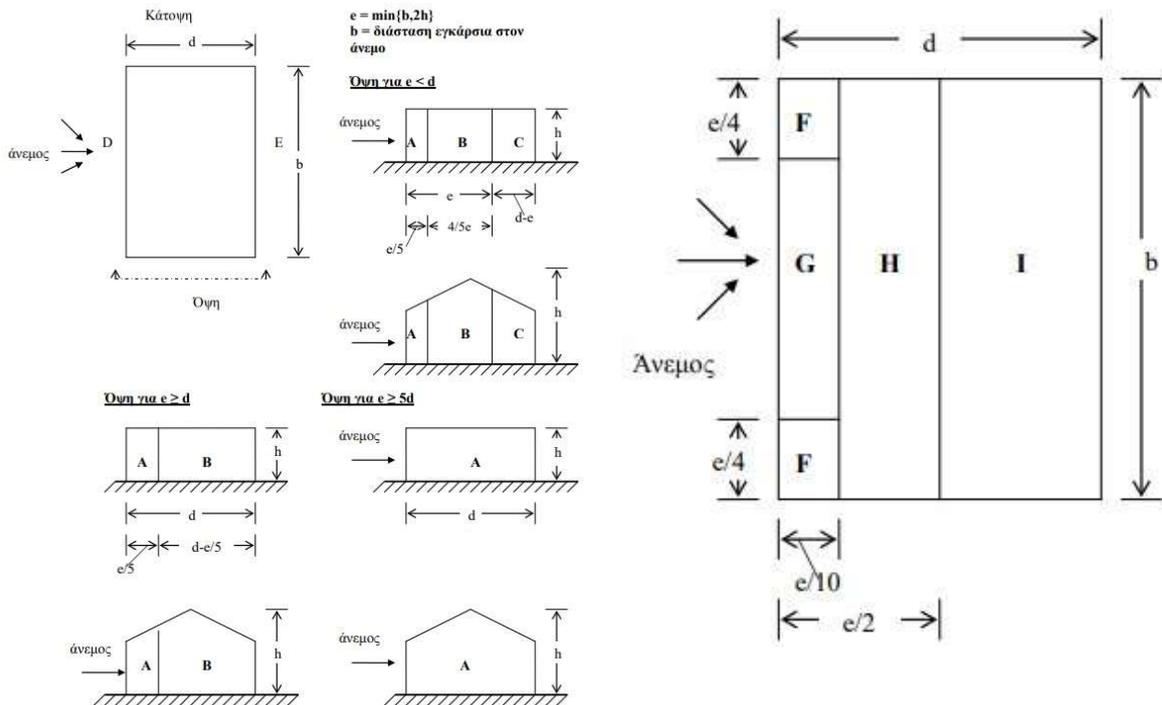
Πίνακας 4.2: Συντελεστές  $c_{pe}$  ζωνών σε κατακόρυφες επιφάνειες. (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)

Ζώνη	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Για ενδιάμεσες τιμές του λόγου h/d χρειάζεται γραμμική παρεμβολή.



Εικόνα 4.3: Πίεση αιχμής  $q_p$  για ύψος αναφοράς  $z_e$  βάσει του λόγου διαστάσεων της κατασκευής. (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)

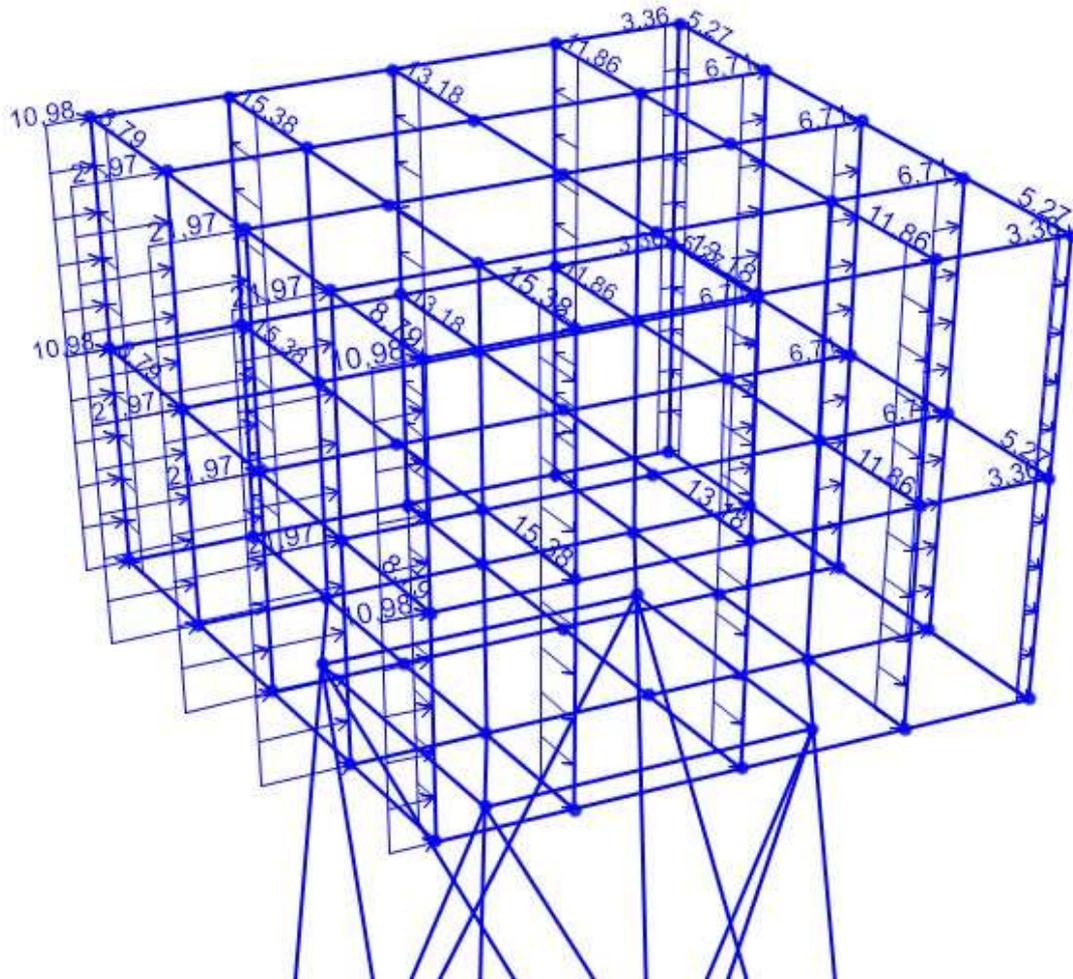


Εικόνα 4.4: Ορισμός ζωνών για κατακόρυφες και οριζόντιες επιφάνειες. (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)

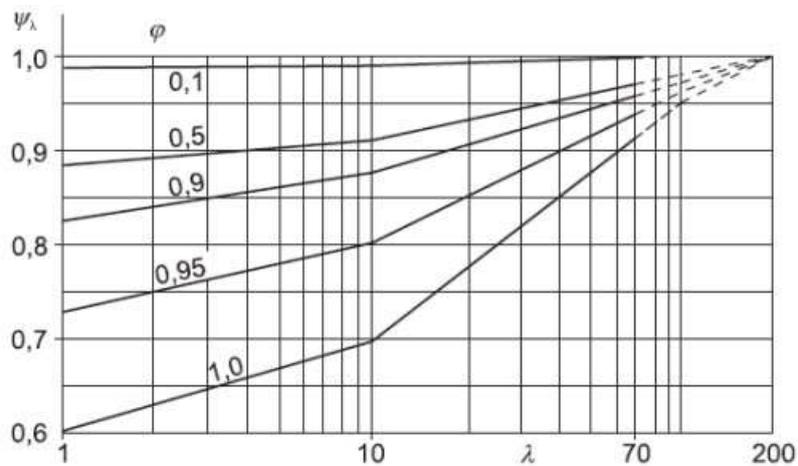
Πίνακας 4.3: Συντελεστές  $c_{pe}$  ζωνών σε κατακόρυφες επιφάνειες. (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)

Τύπος στέγης		Ζώνη							
		F		G		H		I	
		$c_{pe.10}$	$c_{pe.1}$	$c_{pe.10}$	$c_{pe.1}$	$c_{pe.10}$	$c_{pe.1}$	$c_{pe.10}$	$c_{pe.1}$
Αιχμηρά άκρα		-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	±0,2	
Με στηθαία	$h_p/h=0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	±0,2	
	$h_p/h=0,05$	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	±0,2	
	$h_p/h=0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	±0,2	
Καμπύλα Άκρα	$r/h=0,05$	-1,0	-1,5	-1,2	-1,8	-0,4		±0,2	
	$r/h=0,10$	-0,7	-1,2	-0,8	-1,4	-0,3		±0,2	
	$r/h=0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3		±0,2	
Κεκλιμένα άκρα	$\alpha=30^\circ$	-1,0	-1,5	-1,0	-1,5	-0,3		±0,2	
	$\alpha=45^\circ$	-1,2	-1,8	-1,3	-1,9	-0,4		±0,2	
	$\alpha=60^\circ$	-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5		±0,2	





Εικόνα 4.6: Εισαγωγή της ανεμοποίησης στο λογισμικό *SAP2000* (οι κατακόρυφοι χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας της ανωδομής δεν εμφανίζονται στο ως άνω για να είναι πιο ευδιάκριτη η ανεμοποίηση).



Εικόνα 4.7: Σχήμα αναλογίας  $\psi_\lambda$  και  $\lambda$ . (Πηγή: Γαντές Χ., Θανόπουλος Π., Γκατζογιάννης Σ. (2022). Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος «Θαλάσσιες Μεταλλικές Κατασκευές» με τίτλο: «Actions on marine structures», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)

Φορτίο που ασκεί ο άνεμος σε μέλη του jacket που ξεπροβάλουν από τη μέση στάθμη της θάλασσας:

Το φορτίο το οποίο ασκεί ο άνεμος στα μέλη του jacket που ξεπροβάλουν από τη μέση στάθμη της θάλασσας, δηλαδή 8 m ύψους, δύνανται από τη σχέση:

$$q_w = c_f * b * q_p(z_e) \quad (4-10)$$

Όπου:

- $q_p(z_e)$  είναι η πίεση αιχμής στο ύψος αναφοράς  $z_e$
- $b$  είναι η διάμετρος του στοιχείου
- $c_f$  είναι ο συντελεστής δυνάμεως που δίνεται από τη σχέση:

$$c_f = c_{f,0} * \psi_{\lambda} \quad (4-11)$$

Όπου:

- $\psi_{\lambda}$  είναι ο συντελεστής μειωμένης αντοχής του μέλους, λόγω ροής ανέμου στα άκρα. Ο συντελεστής  $\psi_{\lambda}$  είναι ανάλογος της λυγηρότητας  $\lambda$  του μέλους και επιλέγεται σύμφωνα με την εικόνα 4.7.
- Όπου, το  $\varphi$  ισούται με το εμβαδόν του φατνώματος  $A$  προς το εμβαδόν της προβολής του μέλους  $A_c$ , δηλαδή δίνεται από τον τύπο  $\varphi = \frac{A}{A_c}$ , όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.8.
- $c_{f,0}$  είναι ο συντελεστής δυνάμεως για κυκλικές διατομές με απουσία ροής ανέμου στο ελεύθερο άκρο, ο οποίος δίνεται συναρτήσει του αριθμού *Reynolds*  $Re$  και τον λόγο  $\frac{k}{b}$  (που πρέπει  $\frac{k}{b} < 5 * 10^{-4}$ ) από τους τύπους:

$$c_{f,0} = 1,20 + \frac{0,18 * \log(10 * \frac{k}{b})}{1 + 0,40 * \log(\frac{Re}{10^6})} \quad (4-12)$$

$$c_{f,0} = \frac{0,11}{(\frac{Re}{10^6})^{1,4}} \quad (4-13)$$

Ο αριθμός *Reynolds* δίνεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{b * v(z_e)}{\nu} \quad (4-14)$$

Όπου:

- $v(z_e)$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος αναφοράς  $z_e$
- $\nu$  είναι το κινηματικό ιξώδες του αέρα με τιμή  $15 * 10^{-6}$  m/s, το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$\nu = \sqrt{\frac{2 * q_p}{\rho}} \quad (4-15)$$

- Ο συντελεστής  $k$  επιλέγεται ως 0,02 mm θεωρώντας την επιφάνεια των μελών βαμμένη με ψεκασμό.

Ενδεικτικά, το τμήμα του φορέα προς εξέταση απεικονίζεται στην εικόνα 4.10.

Εν συνεχεία, υπολογίζονται τα εμβαδά των μελών, τα οποία δύνανται να αλλάξουν ανάλογα με τον τρόπο θεμελίωσης (*pin piles*, *skirt piles* ή συνδυασμός των δύο).

Ενδεικτικά, γίνεται ο υπολογισμός για πόδι διατομής 1168 mm, δοκό διατομής 508 mm και χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας διατομής 324 mm.

Επομένως:

$$A_{legs} = 18,86 \text{ m}^2$$

$$A_{horizontal} = 5,27 \text{ m}^2$$

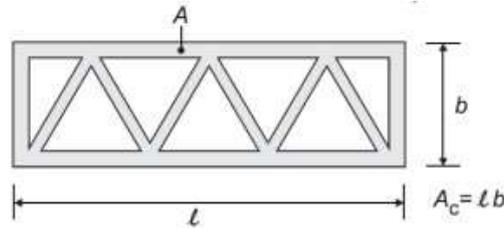
$$A_{x-braces} = 4,44 \text{ m}^2$$

Ενώ, το  $A_c$  υπολογίζεται ως  $A_c = \frac{11,52 + 10}{2} * 8 = 86,08 \text{ m}^2$ .

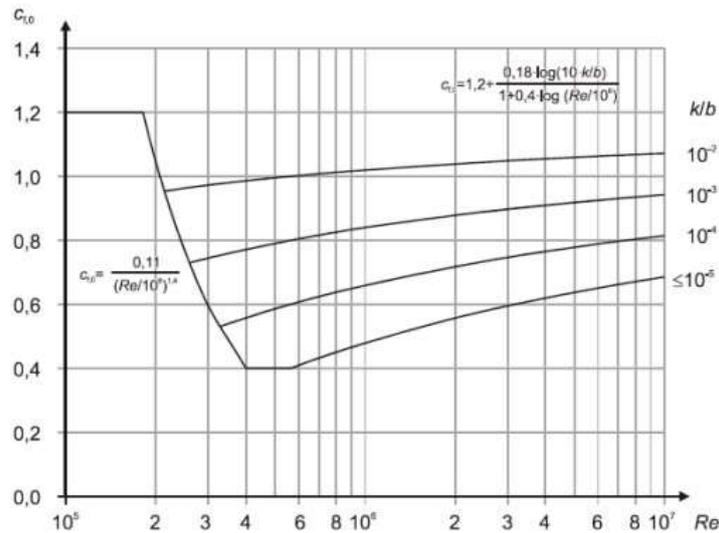
Άρα, το  $\varphi$  προκύπτει ως:

$$\varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{18,86+5,27+4,44}{86,08} \Rightarrow \varphi = 0,33.$$

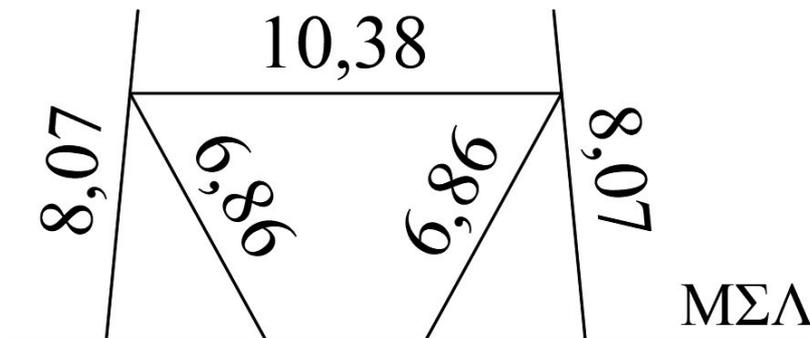
Κάνοντας τους υπολογισμούς για κάθε μέλος προκύπτουν τα αναγραφόμενα αποτελέσματα στον πίνακα 4.9, τα οποία προσομοιώνονται στο πρόγραμμα SAP2000 ως εμφανίζονται στην εικόνα 4.11.



Εικόνα 4.8: Επεξηγηματικό σχήμα σε σχέση με τις παραμέτρους  $A$  και  $A_c$ . (Πηγή: Γαντές Χ., Θανόπουλος Π., Γκατζογιάννης Σ. (2022). Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος «Θαλάσσιες Μεταλλικές Κατασκευές» με τίτλο: «Actions on marine structures», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)



Εικόνα 4.9: Συσχέτιση των παραμέτρων  $c_{f0}$  και αριθμού  $Re$ . (Πηγή: Γαντές Χ., Θανόπουλος Π., Γκατζογιάννης Σ. (2022). Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος «Θαλάσσιες Μεταλλικές Κατασκευές» με τίτλο: «Actions on marine structures», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)



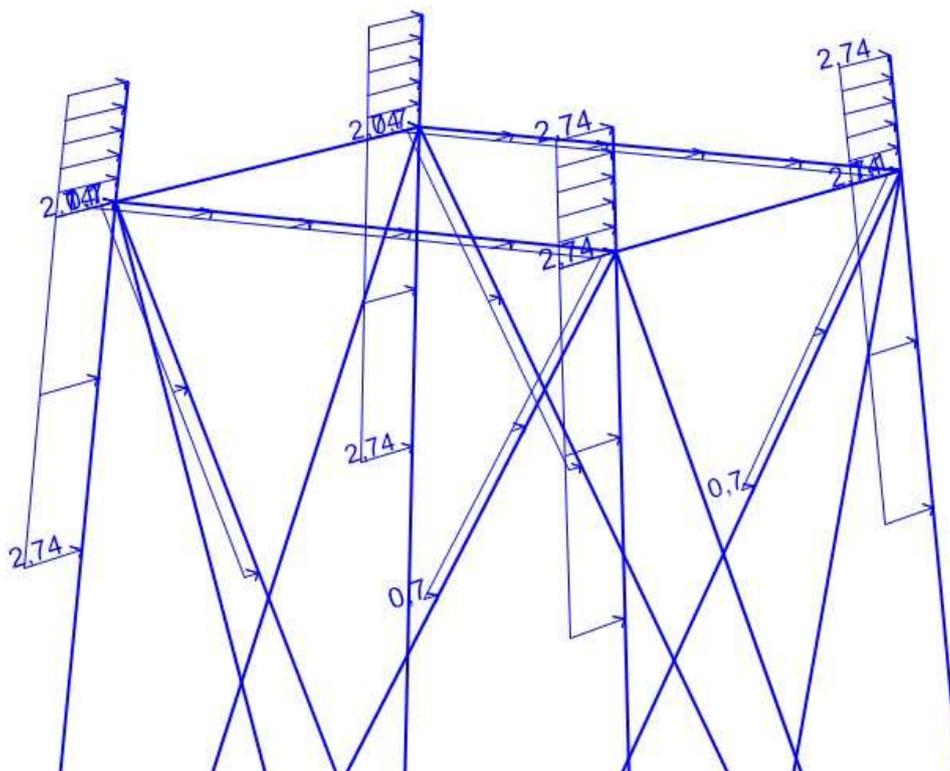
Εικόνα 4.10: Ενδεικτικό σχήμα τμήματος του φορέα προς εξέταση.

Πίνακας 4.8: Επιφάνεια των μελών και συντελεστής  $k$ . (Πηγή: Γαντές Χ., Θανόπουλος Π., Γκατζογιάννης Σ. (2022). Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος «Θαλάσσιες Μεταλλικές Κατασκευές» με τίτλο: «Actions on marine structures», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)

Type of surface	Equivalent roughness $k$ mm	Type of surface	Equivalent roughness $k$ mm
glass	0,0015	smooth concrete	0,2
polished metal	0,002	planed wood	0,5
fine paint	0,006	rough concrete	1,0
spray paint	0,02	rough sawn wood	2,0
bright steel	0,05	rust	2,0
cast iron	0,2	brickwork	3,0
galvanised steel	0,2		

Πίνακας 4.9: Αποτελέσματα φορτίων ανέμου στα μέλη του *jacket*.

Μέλος	$b$ (m)	$z_e$ (m)	$v(z_e)$ (m/s)	$q_p$ (kPa)	$q_w$ (kN/m)
<b>Πόδια</b>	1,168	8,00	76,13	3,62	<b>2,74</b>
<b>Δοκοί</b>	0,508	6,00	73,71	3,40	<b>1,10</b>
<b>Χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας</b>	0,324	6,00	73,71	3,40	<b>0,70</b>



Εικόνα 4.11: Εισαγωγή της ανεμοπίεσης στα μέλη του *jacket* στο λογισμικό *SAP2000*.



#### 4.4.2 Φορτίο Χιονιού

Το φορτίο χιονιού σε μια υπεράκτια πλατφόρμα είναι μικρό σχετικά με τα υπόλοιπα φορτία υπό μελέτη. Εν τούτοις υπολογίζεται και κατανέμεται στο τρίτο κατάστρωμα με το ελικοδρόμιο.

Το φορτίο χιονιού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S = \mu_i * C_e * C_t * S_k \quad (4-16)$$

Όπου:

- $S_k$  είναι η χαρακτηριστική τιμή φορτίου χιονιού που δίνεται από τη σχέση:

$$S_k = S_{k,0} * (1 + (\frac{A}{917})^2) \quad (4-17)$$

- Όπου:

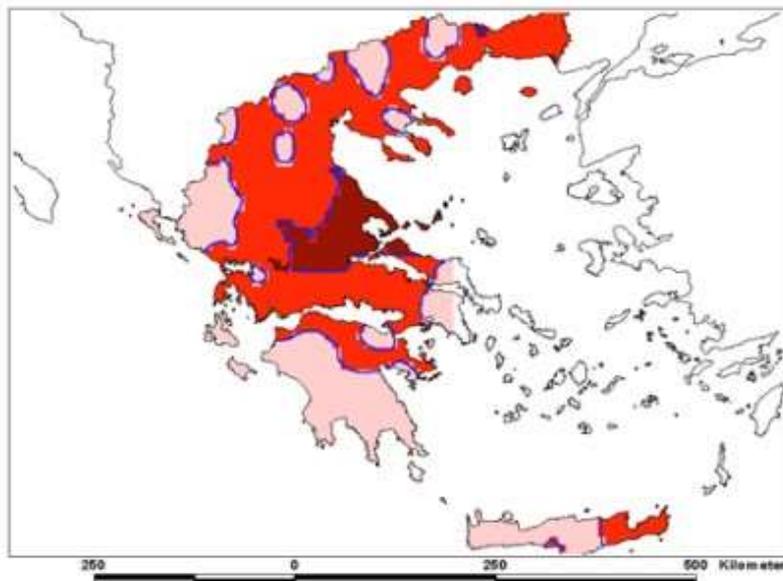
- $S_{k,0}$  είναι το χαρακτηριστικό φορτίο χιονιού στο έδαφος σε ύψος της στάθμης της θάλασσας. Η τιμή του λαμβάνεται ανάλογα με τη ζώνη στην οποία ανήκει η περιοχή χωροθέτησης του έργου, δηλαδή ίσο με 0,8 για τη Ζώνη 2 (εικόνα 4.12 & πίνακας 4.10).
- $A$  είναι που είναι το υψόμετρο της περιοχής πάνω από το επίπεδο της θάλασσας και λαμβάνεται ίσο με 20,0 m, δηλαδή ίσο με το ψηλότερο επίπεδο του υποσταθμού.

Επομένως,  $S_k = 0,80$  kN.

- $\mu_i$  είναι ο συντελεστής σχήματος, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 0,80, καθώς το κατάστρωμα του υποσταθμού είναι οριζόντιο επίπεδο (πίνακας 4.11).
- $C_e$  είναι ο συντελεστής έκθεσης που λαμβάνεται ίσος με 1,00 για κανονικές συνθήκες, ίσος με 0,80 όταν υπάρχει έκθεση σε ισχυρούς ανέμους και ίσος με 1,20 για προστατευμένες κατασκευές. Προφανώς, λόγω της χρήσης της κατασκευής σε υπεράκτιο αιολικό πάρκο ο συντελεστής  $C_e = 0,80$ .
- $C_t$  είναι ο θερμικός συντελεστής που λαμβάνεται ίσος με 1,00

Υπολογισθέν φορτίο χιονιού:

$$S = 0,80 * 0,80 * 1,00 * 0,80 \Rightarrow S = 0,51 \text{ kN/m}^2.$$



Εικόνα 4.12: Ζώνες χαρακτηριστικής τιμής φορτίου χιονιού με τις τιμές στον πίνακα 4.10. (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)

Πίνακας 4.10: Τιμή χαρακτηριστικού φορτίου χιονιού για τον χάρτη της εικόνας 4.12. (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)

Ζώνη	$S_{k,o}$ (kN/m <sup>2</sup> )
1	0,4
2	0,8
3	1,7

Πίνακας 4.11: Τιμές του συντελεστή  $\mu$  ανάλογα με τη γωνία  $\alpha$  του επιπέδου υπό μελέτη. (Πηγή: Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)

	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
$\mu_1$	0,8	$0,8(60-\alpha)/30$	0,0
$\mu_2$	$0,8+0,8 \alpha/30$	1,6	0,0

#### 4.4.3 Φορτίο Κύματος

Το κυματικό φορτίο σε μια υπεράκτια κατασκευή είναι μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που θα πρέπει να αντιμετωπίσει ένας μηχανικός.

##### Ανεμολογικά Δεδομένα:

Συγκεντρώθηκαν οι ετήσιες συχνότητες ανέμου από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (ΕΜΥ) για την πόλη της Αλεξανδρούπολης, η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στο σημείο χωροθέτησης της υπό μελέτης πλατφόρμας (εικόνα 4.13).

##### Ενεργό Ανάπτυγμα Πελάγους (*Fetch effective*)

Η Βορειοανατολική διεύθυνση, αποτελεί την κύρια διεύθυνση του ανέμου, οπότε με βάση αυτή σχεδιάστηκε και υπολογίστηκε το Ενεργό Ανάπτυγμα Πελάγους (*Fetch effective*).

Για να αναπτυχθεί ένας κυματισμός στην ανοιχτή θάλασσα χρειάζεται ένα εύλογο περιθώριο θαλάσσιας έκτασης, εκτός από την ταχύτητα και τη διάρκεια του ανέμου.

Για τον υπολογισμό του αναπτύγματος πελάγους *Fetch effective*, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος *SMB*, όπου κατά την κύρια διεύθυνση του ανέμου (Βορειοανατολική) και κατά  $\pm 45^\circ$ , εκατέρωθεν αυτής, χαράσσονται ευθείες γραμμές ανά  $5^\circ$  έως ότου συναντήσουν κάποιο φυσικό εμπόδιο (ακτή).

Στην συνέχεια, ακολουθεί η μέτρηση του μήκους των γραμμών αυτών και συμβολίζεται με  $F_i$  [km]. Το ενεργό ανάπτυγμα πελάγους σύμφωνα με τη μέθοδο *SMB* υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{eff} = \frac{\sum f_i \cdot \cos^2 \theta_i}{\sum \cos \theta_i} \quad (4-18)$$

Σύμφωνα με τις μετρήσεις από την Εικόνα 4.14 και τους υπολογισμούς του Πίνακα 4.12 υπολογίζεται η τιμή του  $F_{eff} = 33,50$  km.

Ακολουθως, χρησιμοποιώντας την ταχύτητα σε m/s για κάθε beaufort και λαμβάνοντας την επιτάχυνση της βαρύτητας  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ , υπολογίζεται η περίοδος  $T_p$  [s] και το ύψος  $H_s$  [m] του κύματος στον πίνακα 4.13 μέσω των ακόλουθων τύπων:

$$\Phi = \frac{g * F_{eff}}{U^2} \quad (4-19)$$

$$H_s = 0,283 * \tanh(0,0125 * \Phi^{0,42}) * \frac{U^2}{g} \quad (4-20)$$

$$T_p = 7,54 * \tanh(0,077 * \Phi^{0,25}) * \frac{U}{g} \quad (4-21)$$

Επιλέγεται ως κύμα σχεδιασμού το κύμα που προκύπτει με 10 Beauforts, δηλαδή με ταχύτητες ανέμου  $U = 28,4 \text{ m/s}$ , το οποίο κύμα έχει ύψος  $H_s = 3,60 \text{ m}$  και περίοδο  $T_p = 7,26 \text{ s}$ .

Υπολογίζεται το μήκος κύματος από τον τύπο:

$$L = \frac{g * T_p^2}{2 * \pi} \quad (4-22)$$

Το μήκος κύματος προκύπτει να είναι  $L = 82,29 \text{ m}$ .

Ελέγχεται ο λόγος  $\frac{d}{L}$ , όπου d το βάθος στο σημείο χωροθέτησης του υποσταθμού ( $d = 70 \text{ m}$ ):

$$\frac{d}{L} = 0,85 > 0,50 \quad (4-23)$$

Ο υποσταθμός βρίσκεται σε βαθιά νερά, οπότε δεν τίθεται θέμα θραύσης του κύματος.

#### Εφαρμογή της εξίσωσης του Morison:

Ο J.E. Morison, μεταπτυχιακός φοιτητής στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια, θέλησε να προβλέψει τις κυματικές δυνάμεις σε έναν εκτεθειμένο κατακόρυφο πάσσαλο [Morison et al, 1950]. Επικάλυψε τη γραμμική δύναμη αδράνειας και την προσαρμοσμένη τετραγωνική δύναμη αντίστασης για να λάβει την ακόλουθη προκύπτουσα δύναμη (ανά μονάδα μήκους):

$$\frac{dF_x(t)}{dz} = C_m * \rho * \pi * \frac{D^2}{4} * \frac{du}{dt} + \frac{1}{2} * C_D * \rho * D * |u| * u \quad (4-24)$$

Όπου:

- $F$  είναι η συνολική δύναμη που ασκείται στην κατασκευή
- $z$  είναι η κατά μήκος του κυλινδρικού στοιχείου απόσταση
- $\rho$  είναι η πυκνότητα του νερού
- $D$  είναι η διάμετρος του κυλινδρικού στοιχείου
- $u$  είναι η οριζόντια ταχύτητα του ρευστού (νερού στην προκειμένη περίπτωση)
- $C_m$  είναι ο αδρανειακός συντελεστής (υπολογίζεται μέσω του λογισμικού SAP2000 σύμφωνα με το πρότυπο API WSD2000)
- $C_d$  είναι ο συντελεστής αντίστασης (υπολογίζεται μέσω του λογισμικού SAP2000 σύμφωνα με το πρότυπο API WSD2000)

Με την παραδοχή ότι η περίθλαση των κυμάτων αγνοείται, η εξίσωση του Morison ισχύει μόνο για υδροδυναμικά λεπτές κατασκευές, δηλαδή αν η έκταση κατά τη διεύθυνση του κύματος (στην περίπτωση ενός κατακόρυφου κυλίνδρου: η διάμετρος  $D$ ) είναι σημαντικά μικρότερη από το μήκος κύματος  $\lambda$ .

Ήτοι θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$\frac{D}{\lambda} < \frac{1}{5} \quad (4-25)$$

Στον υπό μελέτη υποσταθμό, θεωρώντας (υπέρ της ασφαλείας) τη μεγαλύτερη διάμετρο D ίση με 2,5 m, η ανίσωση που προκύπτει είναι:

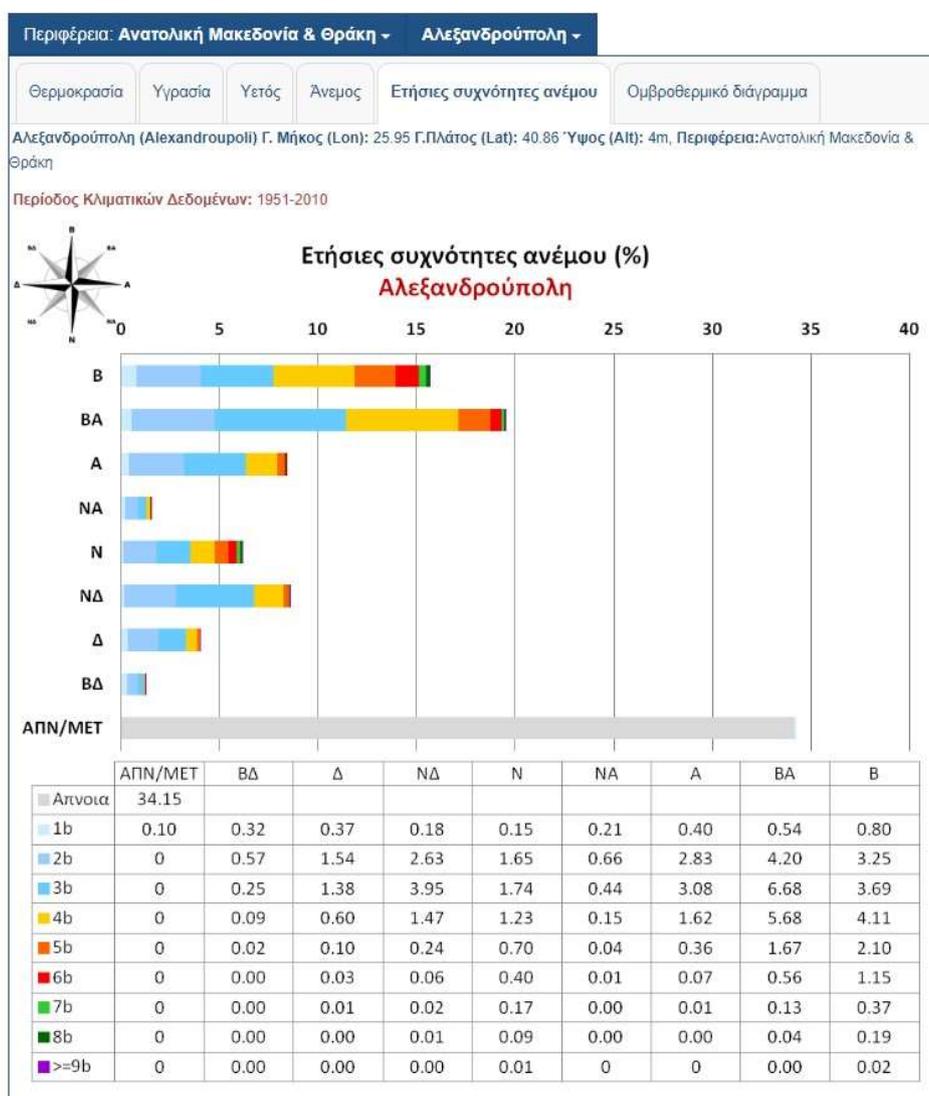
$$\frac{2,5}{82,29} = 0,03 < \frac{1}{5} = 0,20$$

Επομένως, η ανίσωση επαληθεύεται και ο τύπος έχει εφαρμογή.

Η εισαγωγή του κυματικού φορτίου στο λογισμικό SAP2000 υποδεικνύεται στην εικόνα 4.15.

#### Θαλάσσια Ζωή:

Η θαλάσσια ζωή αναπτύσσεται σε βάθη έως και 45 m με συνέπεια την αύξηση του πάχους των μελών του *jacket* (με την προσκόλληση θαλάσσιων οργανισμών) και κατ' επέκταση τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά. Αυτό συμβαίνει λόγω της αύξησης του εμβαδού των διατομών με αποτέλεσμα μεγαλύτερα κυματικά φορτία. Η συνήθης ανάπτυξη θαλάσσιας ζωής έχει πάχος 10 με 20 cm. Στην υπό μελέτη κατασκευή λήφθηκε υπόψιν η δυσμενέστερη κατάσταση, δηλαδή 20 cm θαλάσσιας ζωής για βάθος ίσο με 45 m.



Εικόνα 4.13: Ετήσιες συχνότητες ανέμου από την ΕΜΥ στην περιοχή της Αλεξανδρούπολης. (Πηγή:

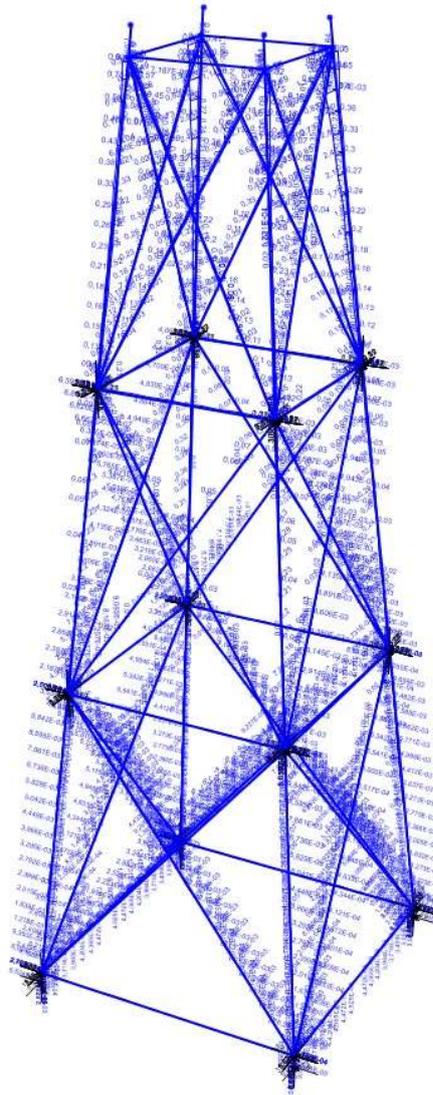
[http://www.emy.gr/emv/el/climatology/climatology\\_city?perifereia=East%20Macedonia%20and%20Thrace&poli=Alexandroupolis](http://www.emy.gr/emv/el/climatology/climatology_city?perifereia=East%20Macedonia%20and%20Thrace&poli=Alexandroupolis))

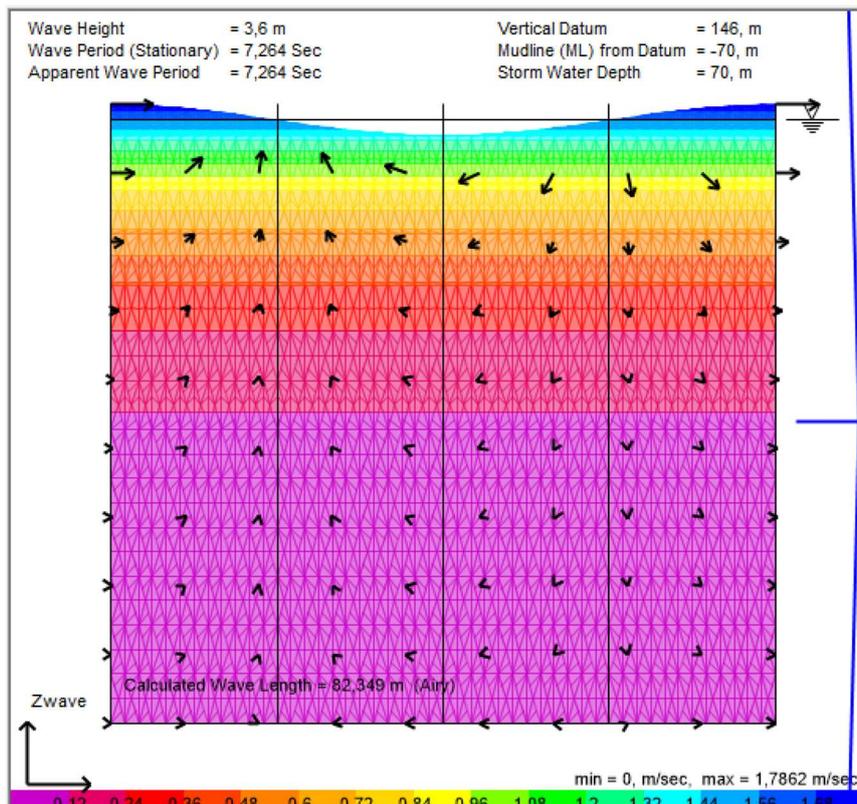
Εικόνα 4.14: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους *Fetch*.Πίνακας 4.12: Υπολογισμός του ενεργού αναπτύγματος πελάγους  $F_{eff}$  [km].

<b>Κύρια διεύθυνση ανέμου: Βορειοανατολικός</b>				
<b><math>\alpha</math> [°]</b>	<b>cosa</b>	<b><math>F_i</math> [km]</b>	<b><math>F_i * cosa</math></b>	<b><math>F_{eff}</math> [km]</b>
-45	0,707	26,14	13,069	<b>33,500</b>
-40	0,766	26,11	15,322	
-35	0,819	25,97	17,428	
-30	0,866	26,17	19,626	
-25	0,906	28,27	23,220	
-20	0,939	28,94	25,556	
-15	0,965	28,82	26,893	
-10	0,984	27,67	26,837	
-5	0,996	28,89	28,674	
0	1,000	30,48	30,47	
5	0,996	31,54	31,301	
10	0,984	32,51	31,530	
15	0,965	34,58	32,261	
20	0,939	41,32	36,486	
25	0,906	46,45	38,156	
30	0,866	59,48	44,608	
35	0,819	69,09	46,361	
40	0,766	71,40	41,898	
45	0,707	73,05	36,524	
<b>ΑΘΡΟΙΣΜΑ</b>	16,90		566,23	

Πίνακας 4.13: Υπολογισμοί του αναπτύγματος  $F_{eff}$  με τη χρήση της μεθόδου *SMB*.

Κύρια διεύθυνση ανέμου: Βορειοανατολικός				
Beaufort	U [m/s]	$\Phi$	$H_s$ [m]	$T_p$ [sec]
1	1,5	146060,48	0,06	1,04
2	3,3	30177,79	0,23	1,95
3	5,5	10864,00	0,48	2,77
4	8	5134,94	0,78	3,52
5	10,8	2817,52	1,14	4,22
6	13,9	1700,93	1,54	4,89
7	17,2	1110,86	1,99	5,52
8	20,7	766,96	2,48	6,12
9	24,5	547,50	3,03	6,71
10	<b>28,4</b>	407,45	<b>3,60</b>	<b>7,26</b>
11	32,6	309,23	4,23	7,82

Εικόνα 4.15: Εισαγωγή του κυματικού φορτίου μέσω του λογισμικού *SAP2000*.



Εικόνα 4.16: Προσομοίωση του κυματικού φορτίου μέσω του λογισμικού *SAP2000* κατά *API WSD2000*.

## 4.5 Σεισμικές Δράσεις

Σύμφωνα με τον *Mohamed A. El-Reedy* περίπου 100 συμβατικές πλατφόρμες με πασσάλους έχουν εγκατασταθεί σε περιοχές με υψηλή σεισμική δραστηριότητα, όπως η Καλιφόρνια, η Αλάσκα, η Νέα Ζηλανδία, η Ιαπωνία, η Κίνα και η Ινδονησία. Υπεράκτιες κατασκευές έχουν επίσης εγκατασταθεί σε νέες περιοχές υψηλής σεισμικής δραστηριότητας, όπως η Βενεζουέλα, το Τρινιντάντ και η Κασπία Θάλασσα.

Οι απαιτήσεις για το επίπεδο πλαστιμότητας έχουν ως στόχο να διασφαλίσουν ότι η πλατφόρμα διαθέτει επαρκή αποθεματική ικανότητα για να αποτρέψει την κατάρρευσή της κατά τη διάρκεια σπάνιας έντονης σεισμικής κίνησης, αν και ενδέχεται να προκληθούν δομικές βλάβες. Σε περιοχές με χαμηλή σεισμική δραστηριότητα, μικρότερη από 0,05  $g$  (όπου  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας), ο σχεδιασμός για περιβαλλοντική φόρτιση από οτιδήποτε άλλο εκτός από σεισμούς θα παρέχει επαρκή αντίσταση έναντι σεισμών.

Στον Ελλαδικό χώρο και συγκεκριμένα στο Θρακικό Πέλαγος, (εξεταζόμενη περιοχή) σύμφωνα με το Εθνικό Προσάρτημα εντάσσεται στην ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II, η εδαφική επιτάχυνση είναι  $a_{gR} = 0,24 g$  (εικόνα 4.17).

Θεωρείται ότι το έδαφος στην περιοχή είναι κατηγορίας C, οπότε προκύπτουν από τον Ευρωκώδικα οι χαρακτηριστικές περίοδοι σχεδιασμού του φάσματος:

- $T_B = 0,20 s$
- $T_C = 0,60 s$
- $T_D = 2,00 s$

Ο συντελεστής σπουδαιότητας  $\gamma$  του υπεράκτιου υποσταθμού λαμβάνεται ίσος με 1,40 , καθώς η κατασκευή του υποσταθμού θεωρείται πολύς μεγάλης σπουδαιότητας και ζωτικής σημασίας.

Επομένως, η εδαφική επιτάχυνση προκύπτει:

$$a_g = 1,40 * 0,24 g \Rightarrow a_g = 0,336 g$$

Ο συντελεστής  $q$  αφορά την ικανότητα μιας κατασκευής να παραμορφώνεται ανελαστικά χωρίς σοβαρό ποσοστό μείωσης της αντοχής της. Επιλέγεται  $q = 1,50$  θεωρώντας ελαστική συμπεριφορά του φορέα.

Στις φορτίσεις της κατασκευής λαμβάνονται υπόψιν μόνο οι οριζόντιες σεισμικές δυνάμεις, καθώς θεωρούνται δυσμενέστερες. Στην εικόνα 4.18, αναλύεται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού με *τύπο 1*, ο οποίος και επιλέχθηκε.

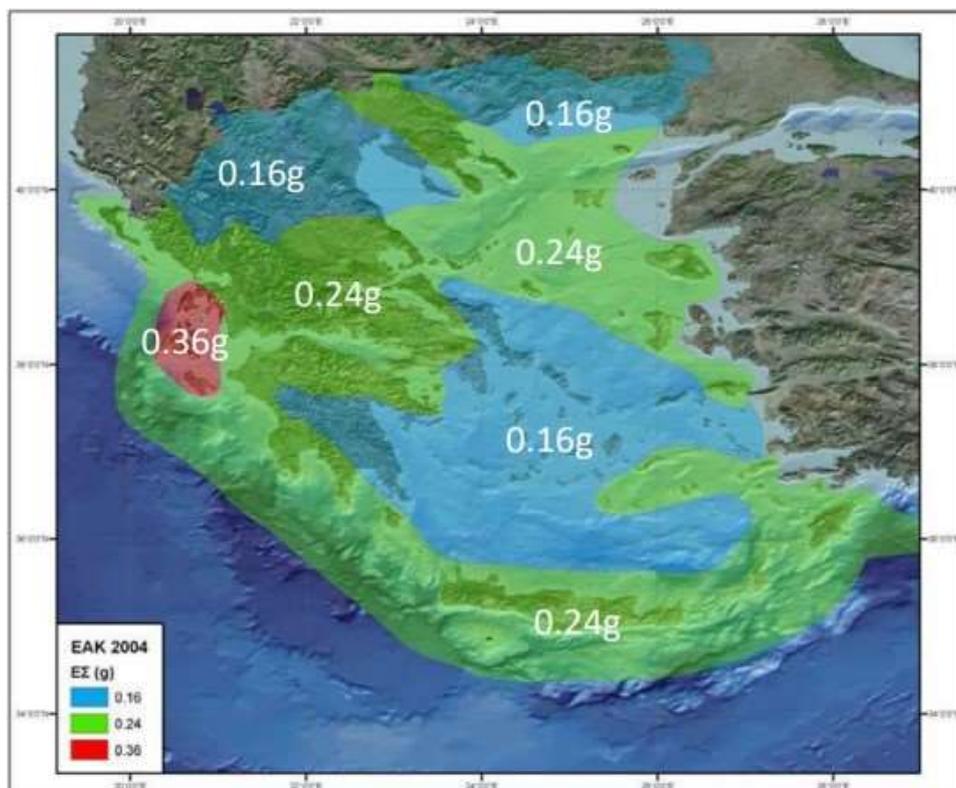
Όπου σε κάθε περιοχή του φάσματος η φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού  $S_d$  είναι:

$$S_d(T) = a_g * S * \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} * \left( \frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right], \text{ για } 0 \leq T \leq T_B \quad (4-26)$$

$$S_d(T) = a_g * S * \frac{2,5}{q}, \text{ για } T_B \leq T \leq T_C \quad (4-27)$$

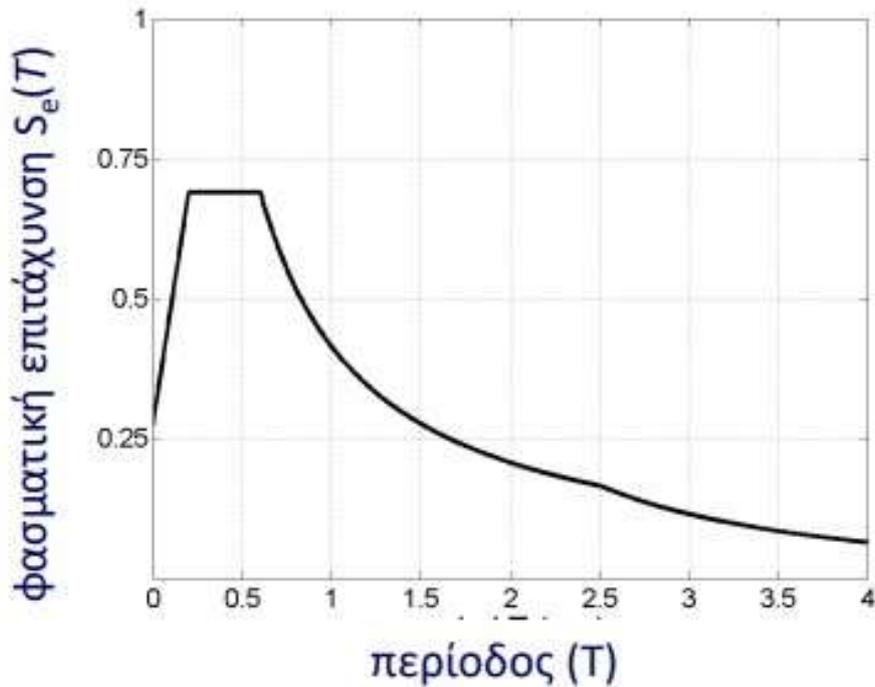
$$S_d(T) = a_g * S * \frac{2,5}{q} * \frac{T_C}{T} \geq \beta * a_g, \text{ για } T_C \leq T \leq T_D \quad (4-28)$$

$$S_d(T) = a_g * S * \frac{2,5}{q} * \frac{T_C * T_D}{T^2} \geq \beta * a_g, \text{ για } T_D \leq T \leq 4 \text{ s} \quad (4-29)$$



Εικόνα 4.17: Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας σύμφωνα με Εθνικό Προσάρτημα ΕΚ8. (Πηγή: Φραγκιαδάκης Μ. (2022). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Αντισεισμική Τεχνολογία Ι» με τίτλο «Μέρος Α'», Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)





Εικόνα 4.18: Το ελαστικό φάσμα του ΕΚ8. (Πηγή: Φραγκιαδάκης Μ. (2022). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Αντισεισμική Τεχνολογία Ι» με τίτλο «Μέρος Α'», Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)

Response Spectrum EuroCode 8 - 2004 Function Definition

Function Name: Response\_Spectrum      Function Damping Ratio: 0,05

Parameters

- Country: CEN Default
- Direction: Horizontal
- Horizontal Ground Accel., ag/g: 0,336
- Spectrum Type: 1
- Ground Type: C
- Soil Factor, S: 1,15
- Acceleration Ratio, Avg/Ag:
- Spectrum Period, Tb: 0,2
- Spectrum Period, Tc: 0,6
- Spectrum Period, Td: 2,
- Lower Bound Factor, Beta: 0,2
- Behavior Factor, q: 1,5

Define Function

Period	Acceleration
0,	0,2576
0,0667	0,3864
0,1333	0,5152
0,2	0,644
0,6	0,644
0,8333	0,4637
1,0667	0,3623
1,3	0,2972

Function Graph

Convert to User Defined      Display Graph

OK      Cancel

Εικόνα 4.19: Προσομοίωση της σεισμικής δράσης μέσω του λογισμικού *SAP2000* κατά *Ευρωκώδικα 8*.

## 4.6 Συνδυασμοί Δράσεων:

Σε πραγματικές συνθήκες όλες οι δράσεις που αναλύθηκαν μέχρι τούδε δεν δρουν μεμονωμένα, αλλά συνδυαστικά.

Οι συνδυασμοί των δράσεων προκύπτουν χρησιμοποιώντας τους εκάστοτε συντελεστές ασφαλείας κάθε κατάστασης.

Ο φορέας εξετάζεται βάσει της Οριακής Κατάστασης Αστοχίας (ΟΚΑ), έτσι ώστε να προληφθεί η κατάρρευση αυτού ή κάποιου τμήματός του, να διασφαλιστεί κατά κύριο λόγο η ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής και ιδανικά και του φορέα.

Ο φορέας όμως εξετάζεται και ως προς την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ), έτσι ώστε η κατασκευή να συμπεριφέρεται με τέτοιο τρόπο, κατά τον οποίο να μην επηρεάζεται η λειτουργία του υποσταθμού, είτε αυτό αναφέρεται σε κάποιο μηχάνημα είτε μεταφράζεται σε ανασφάλεια του χρήστη.

Έχουν προκύψει δεκαέξι (16) συνδυασμοί φορτίσεων για ΟΚΑ, από τους οποίους οι οκτώ (8) είναι σεισμικοί και οκτώ (8) αντίστοιχα για ΟΚΛ, έτσι ώστε να ελέγχεται η περίπτωση κρισιμότητας κάθε φορτίου.

Για την οριακή κατάσταση αστοχίας λαμβάνονται υπόψιν οι συνδυασμοί:

*Βασικός συνδυασμός για καταστάσεις διάρκειας:*

$$S_d = \Sigma(\gamma_G * G_k) + \gamma_Q * Q_k + \Sigma(\gamma_Q * \psi_0 * Q_k) \quad (4-30)$$

*Σεισμικός συνδυασμός:*

$$S_d = \Sigma G_k + E + \Sigma(\psi_2 * Q_k) \quad (4-31)$$

Για την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας λαμβάνεται υπόψιν ο *συχνός συνδυασμός*:

$$S_d = \Sigma G_k + \psi_1 * Q_k + \Sigma(\psi_2 * Q_k) \quad (4-32)$$

Οι συνδυασμοί φόρτισης αναφέρονται στους Πίνακες 4.15 - 4.20.

Πίνακας 4.14: Συντελεστές συνδυασμών δράσεων σύμφωνα με το πρότυπο EN 1990-2002.

	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$	$\gamma_a$	$\gamma_a * \psi_0$
κύμα	0,60	0,20	0,00	1,50	0,90
χιόνι	0,80	0,00	0,00	1,50	1,20
άνεμος (W1)	0,50	0,20	0,00	1,50	0,75
άνεμος (W2)	0,50	0,20	0,00	1,50	0,75
κινητό q	0,75	0,75	0,00	1,35	1,01

Πίνακας 4.15: Συνδυασμοί Φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Αστοχίας (ΟΚΑ) (1).

Συνδυασμοί Φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Αστοχίας (1)							
1 (ΟΚΑ)		2 (ΟΚΑ)		3 (ΟΚΑ)		4 (ΟΚΑ)	
ίδιο βάρος	1,35	ίδιο βάρος	1,35	ίδιο βάρος	1,35	ίδιο βάρος	1,35
εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,35	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,35	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,35	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,35
	$\gamma_a \cdot \psi_0$		$\gamma_a \cdot \psi_0$		$\gamma_a \cdot \psi_0$		$\gamma_a \cdot \psi_0$
κύμα	1,50	κύμα	0,90	κύμα	0,90	κύμα	0,90
χιόνι	1,20	χιόνι	1,50	χιόνι	1,20	χιόνι	1,20
άνεμος (W)	0,75	άνεμος (W)	0,75	άνεμος (W)	1,50	άνεμος (W)	0,75
άνεμος (W1)	<b>0,75</b>	άνεμος (W1)	<b>0,75</b>	άνεμος (W1)	<b>1,50</b>	άνεμος (W1)	<b>0,75</b>
άνεμος (W2)	0,00	άνεμος (W2)	0,00	άνεμος (W2)	0,00	άνεμος (W2)	0,00
κινητό q	1,01	κινητό q	1,01	κινητό q	1,01	κινητό q	1,50

Πίνακας 4.16: Συνδυασμοί Φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Αστοχίας (ΟΚΑ) (1).

Συνδυασμοί Φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Αστοχίας (2)							
5 (ΟΚΑ)		6 (ΟΚΑ)		7 (ΟΚΑ)		8 (ΟΚΑ)	
ίδιο βάρος	1,35	ίδιο βάρος	1,35	ίδιο βάρος	1,35	ίδιο βάρος	1,35
εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,35	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,35	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,35	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,35
	$\gamma_a \cdot \psi_0$		$\gamma_a \cdot \psi_0$		$\gamma_a \cdot \psi_0$		$\gamma_a \cdot \psi_0$
κύμα	1,50	κύμα	0,90	κύμα	0,90	κύμα	0,90
χιόνι	1,20	χιόνι	1,50	χιόνι	1,20	χιόνι	1,20
άνεμος (W)	0,75	άνεμος (W)	0,75	άνεμος (W)	1,50	άνεμος (W)	0,75
άνεμος (W1)	0,00	άνεμος (W1)	0,00	άνεμος (W1)	0,00	άνεμος (W1)	0,00
άνεμος (W2)	<b>0,75</b>	άνεμος (W2)	<b>0,75</b>	άνεμος (W2)	<b>1,50</b>	άνεμος (W2)	<b>0,75</b>
κινητό q	1,01	κινητό q	1,01	κινητό q	1,01	κινητό q	1,50

Πίνακας 4.17: Συνδυασμοί Σεισμικών Φορτίσεων (1).

Συνδυασμοί Σεισμικών Φορτίσεων (1)							
1 (ΣΕΙΣΜ)		2 (ΣΕΙΣΜ)		3 (ΣΕΙΣΜ)		4 (ΣΕΙΣΜ)	
ίδιο βάρος	1,00	ίδιο βάρος	1,00	ίδιο βάρος	1,00	ίδιο βάρος	1,00
εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00
	$\psi_2$		$\psi_2$		$\psi_2$		$\psi_2$
κινητό q	0,30	κινητό q	0,30	κινητό q	0,30	κινητό q	0,30
	$\pm \psi \cdot E$		$\pm \psi \cdot E$		$\pm \psi \cdot E$		$\pm \psi \cdot E$
Ex	<b>1,00</b>	Ex	<b>1,00</b>	Ex	<b>1,00</b>	Ex	<b>1,00</b>
Ey	<b>0,30</b>	Ey	<b>0,30</b>	Ey	<b>0,30</b>	Ey	<b>0,30</b>

Πίνακας 4.18: Συνδυασμοί Σεισμικών Φορτίσεων (2).

Συνδυασμοί Σεισμικών Φορτίσεων (2)							
5 (ΣΕΙΣΜ)		6 (ΣΕΙΣΜ)		7 (ΣΕΙΣΜ)		8 (ΣΕΙΣΜ)	
ίδιο βάρος	1,00	ίδιο βάρος	1,00	ίδιο βάρος	1,00	ίδιο βάρος	1,00
εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00
	$\psi_2$	-	$\psi_2$	-	$\psi_2$	-	$\psi_2$
κινητό q	0,30	κινητό q	0,30	κινητό q	0,30	κινητό q	0,30
	$\pm\psi * E$		$\pm\psi * E$		$\pm\psi * E$		$\pm\psi * E$
Ex	<b>0,30</b>	Ex	<b>- 0,30</b>	Ex	<b>0,30</b>	Ex	<b>- 0,30</b>
Ey	<b>1,00</b>	Ey	<b>1,00</b>	Ey	<b>- 1,00</b>	Ey	<b>- 1,00</b>

Πίνακας 4.19: Συνδυασμοί Φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας (ΟΚΛ) (1).

Συνδυασμοί Φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας (1)							
1 (ΟΚΛ)		2 (ΟΚΛ)		3 (ΟΚΛ)		4 (ΟΚΛ)	
ίδιο βάρος	1,00	ίδιο βάρος	1,00	ίδιο βάρος	1,00	ίδιο βάρος	1,00
εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00
	$\psi_1$	-	$\psi_1$	-	$\psi_1$	-	$\psi_1$
κύμα	1,00	κύμα	0,20	κύμα	0,20	κύμα	0,20
χιόνι	0,00	χιόνι	1,00	χιόνι	0,00	χιόνι	0,00
άνεμος (W)	0,20	άνεμος (W)	0,20	άνεμος (W)	1,00	άνεμος (W)	0,20
άνεμος (W1)	<b>0,20</b>	άνεμος (W1)	<b>0,20</b>	άνεμος (W1)	<b>1,00</b>	άνεμος (W1)	<b>0,20</b>
άνεμος (W2)	0,00	άνεμος (W2)	0,00	άνεμος (W2)	0,00	άνεμος (W2)	0,00
κινητό q	0,75	κινητό q	0,75	κινητό q	0,75	κινητό q	1,00

Πίνακας 4.20: Συνδυασμοί Φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας (ΟΚΛ) (2).

Συνδυασμοί Φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας (2)							
5 (ΟΚΛ)		6 (ΟΚΛ)		7 (ΟΚΛ)		8 (ΟΚΛ)	
ίδιο βάρος	1,00	ίδιο βάρος	1,00	ίδιο βάρος	1,00	ίδιο βάρος	1,00
εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,00
	$\psi_1$	-	$\psi_1$	-	$\psi_1$	-	$\psi_1$
κύμα	1,00	κύμα	0,20	κύμα	0,20	κύμα	0,20
χιόνι	0,00	χιόνι	1,00	χιόνι	0,00	χιόνι	0,00
άνεμος (W)	0,20	άνεμος (W)	0,20	άνεμος (W)	1,00	άνεμος (W)	0,20
άνεμος (W1)	0,00	άνεμος (W1)	0,00	άνεμος (W1)	0,00	άνεμος (W1)	0,00
άνεμος (W2)	<b>0,20</b>	άνεμος (W2)	<b>0,20</b>	άνεμος (W2)	<b>1,00</b>	άνεμος (W2)	<b>0,20</b>
κινητό q	0,75	κινητό q	0,75	κινητό q	0,75	κινητό q	1,00

## 5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ & ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

### 5.1 Εισαγωγή

Η προσομοίωση του φορέα έγινε στο λογισμικό SAP2000 και πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις για την καλύτερη μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής. Η ποιότητα του χάλυβα που επιλέχθηκε για όλες τις διατομές είναι της κατηγορίας S355.

### 5.2 Προσομοίωση Ανωδομής

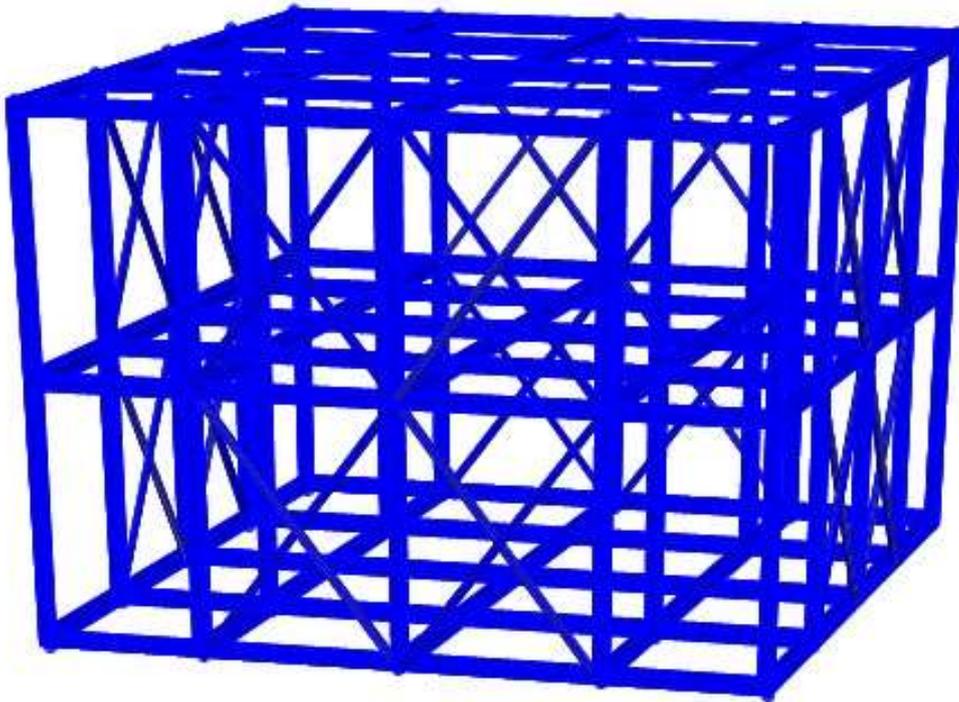
Κατά την προσομοίωση της ανωδομής θεωρήθηκαν κατάλληλες συνδέσεις μεταξύ δοκών και υποστυλωμάτων, χωρίς εσωτερικές ελευθερώσεις, ώστε να εξασφαλίζεται πλαισιακή λειτουργία κατά τις δύο διευθύνσεις X και Y του φορέα. Οι δοκοί λειτουργούν σαν μια ενιαία εσχάρα δοκών δημιουργώντας διαφραγματική λειτουργία της κατασκευής. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιήθηκαν κατακόρυφοι χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας κατά τις δύο διευθύνσεις X και Y, ώστε να αυξηθεί η δυσκαμψία της ανωδομής και να μειωθούν πιθανές μετακινήσεις αυτής. Οι χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας συνδέονται με τον υπόλοιπο φορέα αμφιαρθρωτά, χωρίς να μεταφέρουν ροπές.

Για τα μέλη των δοκών και των υποστυλωμάτων χρησιμοποιήθηκαν ανοικτές διατομές σειράς *HEM*, ενώ για τους κατακόρυφους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας χρησιμοποιήθηκαν κοίλες κυκλικές διατομές, τύπου *CHS*.

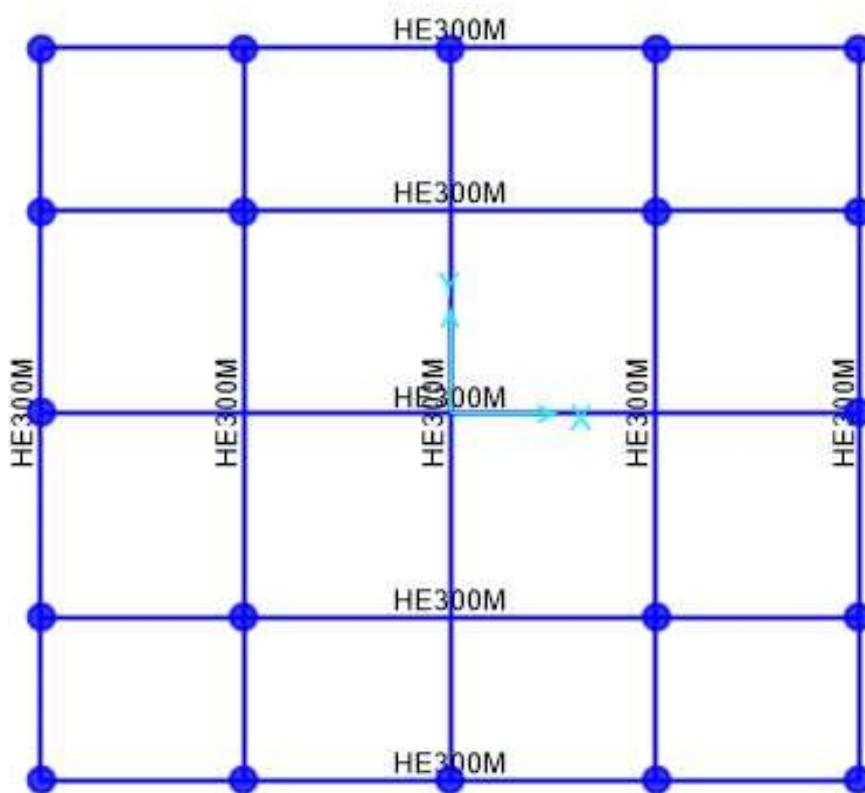
Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι διατομές που χρησιμοποιήθηκαν για τα μέλη της ανωδομής, ενώ η τρισδιάστατη όψη της ανωδομής, οι διατομές σε τυπικό όροφο και η τυπική όψη της ανωδομής παρουσιάζονται ενδεικτικά στις εικόνες 5.1, 5.2 και 5.3.

Πίνακας 5.1: Τυπική διαστασιολόγηση ανωδομής.

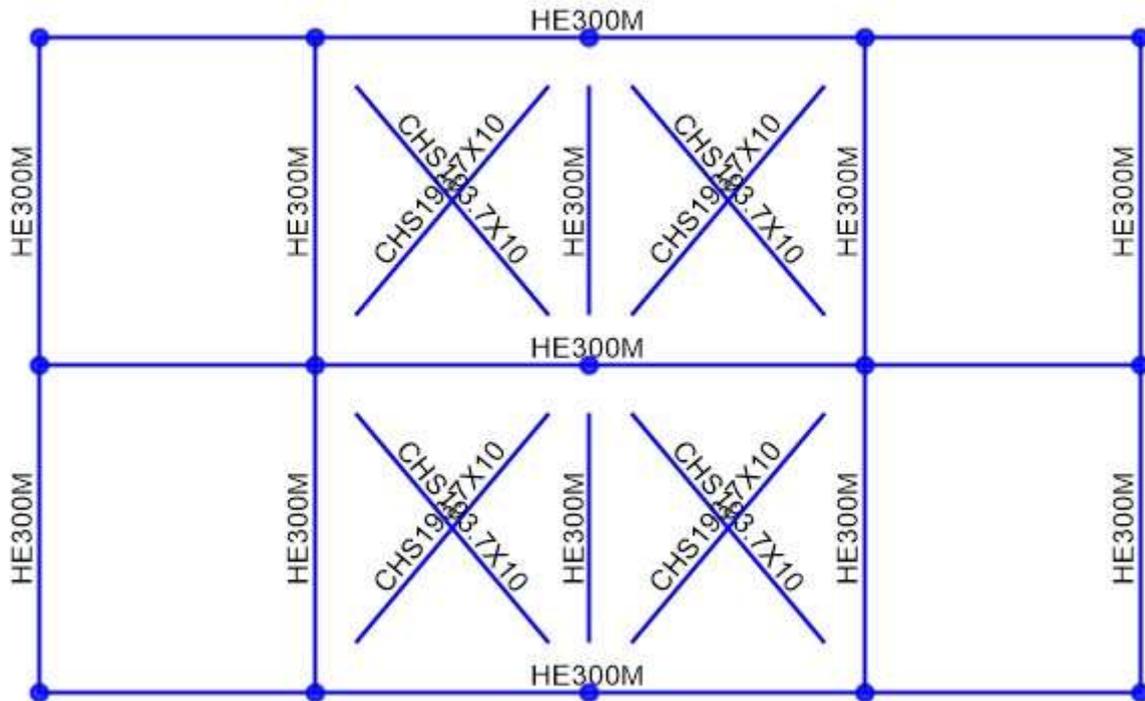
<b>Τυπική διαστασιολόγηση ανωδομής</b>	
<b>Υποστυλώματα</b>	HEM300
<b>Δοκοί</b>	HEM300
<b>Κατακόρυφοι Χιαστί Σύνδεσμοι Δυσκαμψίας</b>	CHS193,7X10



Εικόνα 5.1: Τρισδιάστατη όψη ανωδομής



Εικόνα 5.2: Κάτοψη τυπικού ορόφου και διατομές.



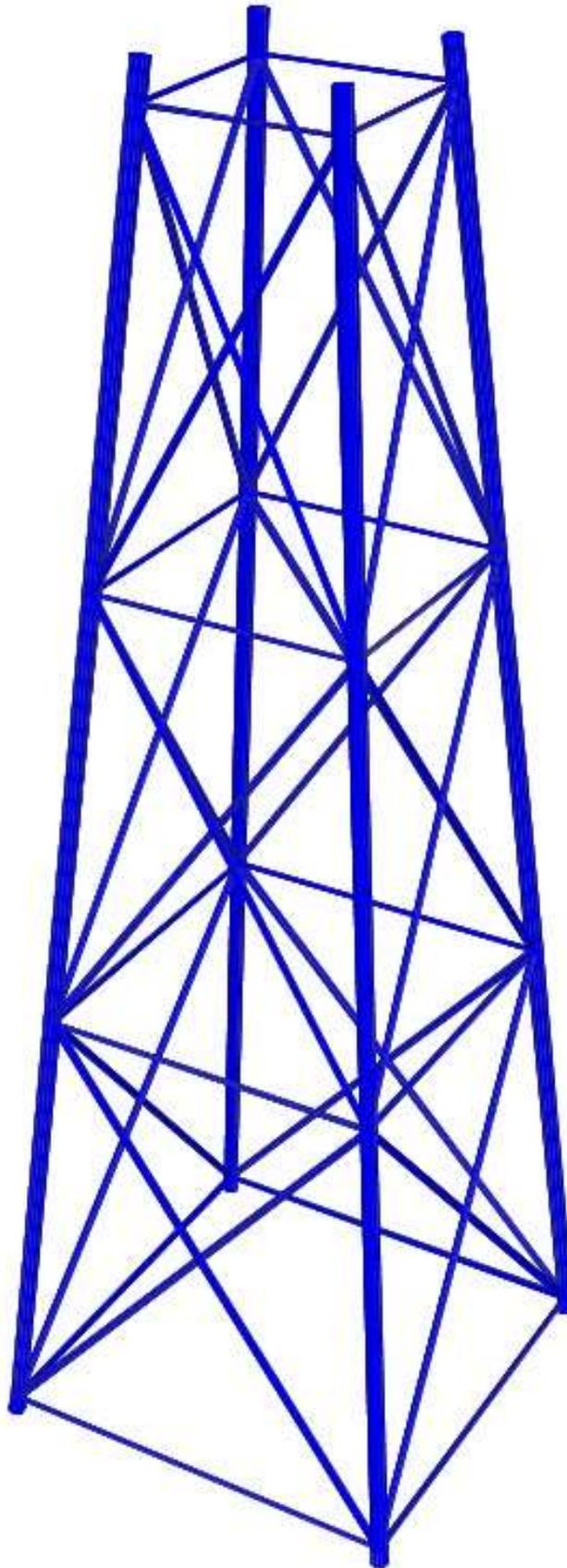
Εικόνα 5.3: Τυπική όψη και διατομές.

### 5.3 Προσομοίωση του *Jacket*

Για την προσομοίωση του *jacket* χρησιμοποιήθηκαν κοίλες κυκλικές διατομές, τύπου *CHS*. Ειδικότερα, οι κοίλες διατομές είναι ανθεκτικότερες σε διάβρωση από αντίστοιχες ανοιχτές διατομές τύπου *I* ή *H*, λειτουργούν καλύτερα υδροδυναμικά λόγω του σχήματός τους και παρουσιάζουν ικανοποιητική αντοχή έναντι κάμψης και στις δύο διευθύνσεις. Οι διατομές συνδέονται μεταξύ τους συγκολλητά, όπως συνηθίζεται σε φορείς τύπου *jacket*, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν εσωτερικές ελευθερώσεις κατά την προσομοίωση του φορέα. Οι κατακόρυφοι χιαστί σύνδεσμοι δυσκαμψίας συνδέονται κατάλληλα με τον υπόλοιπο φορέα, ώστε να προκύπτουν συνδέσεις ροής.

Η διαστασιολόγηση του *jacket* δεν προκύπτει να είναι ίδια για κάθε προσομοίωμα, καθώς η επιλογή διαφορετικών τύπων πασσάλων έχει διαφορετικές απαιτήσεις στα πόδια του φορέα. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.2, κατά τη χρήση πασσάλων τύπου *pin piles* οι πάσσαλοι εμπεγνύονται εντός των ποδιών του *jacket*, άρα τα πόδια θα πρέπει να είναι μεγαλύτερης διαμέτρου από τους πασσάλους. Αυτή η απαίτηση δεν υπάρχει κατά την χρήση πασσάλων τύπου *skirt*. Ως αποτέλεσμα της διαφορετικής επιλογής διατομής των ποδιών, αλλά και της προκύπτουσας δυσκαμψίας από την επιλογή των πασσάλων, επηρεάζονται και τα υπόλοιπα μέλη του *jacket*.

Στους πίνακες 5.2, 5.3 και 5.4 παρουσιάζονται αναλυτικά οι διατομές που χρησιμοποιήθηκαν για τα μέλη του *jacket*.



Εικόνα 5.4: Τρισδιάσταση όψη *Jacket*.



Πίνακας 5.2: Διαστασιολόγηση *Jacket* με χρήση *pin piles*.

<b>Διαστασιολόγηση <i>Jacket</i> με χρήση <i>pin piles</i></b>	
<b>Υποστυλώματα (πόδια)</b>	CFCHS965X17,5
<b>Δοκοί</b>	1ο Επίπεδο: CHS193,7X10
	2ο Επίπεδο: CHS219,1X12
	3ο Επίπεδο: CHS273,0X20
	4ο Επίπεδο: CHS323,9X20
<b>Κατακόρυφοι Χιαστί Σύνδεσμοι Δυσκαμψίας</b>	1ο - 2ο Επίπεδο: CHS355,6X16
	3ο Επίπεδο: CHS406,4X16

Πίνακας 5.3: Διαστασιολόγηση *Jacket* με χρήση *skirt piles*.

<b>Διαστασιολόγηση <i>Jacket</i> με χρήση <i>skirt piles</i></b>	
<b>Υποστυλώματα (πόδια)</b>	CFCHS864X22,2
<b>Δοκοί</b>	1ο - 2ο Επίπεδο: CHS193,7X12
	3ο Επίπεδο: CHS273,0X20
	4ο Επίπεδο: CHS406,4X20
<b>Κατακόρυφοι Χιαστί Σύνδεσμοι Δυσκαμψίας</b>	1ο - 2ο Επίπεδο: CHS355,6X16
	3ο Επίπεδο: CHS406,4X16

Πίνακας 5.4: Διαστασιολόγηση *Jacket* με χρήση *mixed piles*.

<b>Διαστασιολόγηση <i>Jacket</i> με χρήση <i>mixed piles</i></b>	
<b>Υποστυλώματα (πόδια)</b>	CFCHS914X22,2
<b>Δοκοί</b>	1ο Επίπεδο: CHS193,7X12,5
	2ο Επίπεδο: CHS244,5X12,5
	3ο Επίπεδο: CHS273,0X12,5
	4ο Επίπεδο: CHS355,6X25
<b>Κατακόρυφοι Χιαστί Σύνδεσμοι Δυσκαμψίας</b>	1ο - 2ο Επίπεδο: CHS355,6X16
	3ο Επίπεδο: CHS406,4X16

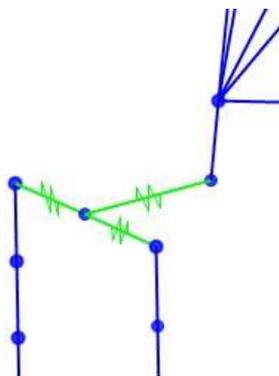
## 5.4 Προσομοίωση Πασσάλων Θεμελίωσης

Για την προσομοίωση των πασσάλων θεμελίωσης χρησιμοποιήθηκαν κοίλες κυκλικές διατομές, τύπου *CHS*. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5.3, οι κοίλες διατομές είναι ανθεκτικότερες σε διάβρωση από αντίστοιχες ανοιχτές διατομές τύπου *I* ή *H*, λειτουργούν καλύτερα υδροδυναμικά λόγω του σχήματός τους και παρουσιάζουν ικανοποιητική αντοχή έναντι κάμψης και στις δύο διευθύνσεις.

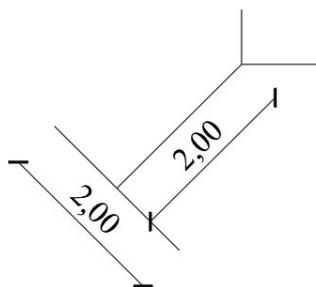
Στην περίπτωση των πασσάλων τύπου *pin*, η προσομοίωση σύνδεσης μεταξύ του πασσάλου και του ποδιού του *jacket* γίνεται με σύνδεση ροπής.

Στην περίπτωση των πασσάλων τύπου *skirt*, η σύνδεση μεταξύ του πασσάλου και του ποδιού του *jacket* γίνεται με χρήση ειδικών περιβλημάτων, των λεγόμενων *sleeves* (κεφάλαιο 2.2). Τα *sleeves* προσομοιώνονται στο λογισμικό του *SAP2000* με ένα σταυροειδές στοιχείο με πρακτικά άπειρο μέτρο ελαστικότητας. Η λεπτομέρεια προσομοίωσης του *sleeve*, καθώς και οι διαστάσεις του απεικονίζονται στις εικόνες 5.5 και 5.6.

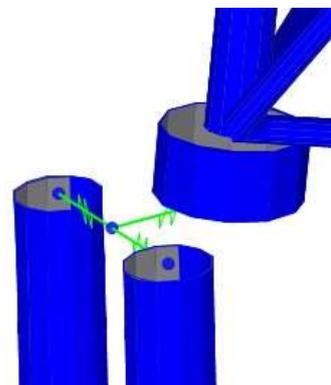
Άξιο αναφοράς είναι το στοιχείο μεταξύ του κόμβου του *jacket* και του σταυροειδούς δύσκαμπτου στοιχείου, το λεγόμενο *mudmat*. Το στοιχείο αυτό για να έχει όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερες ιδιότητες διαστασιολογείται με τη μεγαλύτερη CFCHS διατομή στο στατικό πρόγραμμα, την CFCHS2134X22,2. Η λεπτομέρεια προσομοίωσης του *mudmat* απεικονίζεται στις εικόνες 5.5, 5.6 και 5.7, ενώ στους πίνακες 5.5, 5.6 και 5.7 παρουσιάζονται αναλυτικά οι διατομές που χρησιμοποιήθηκαν για τους πασσάλους κάθε προσομοιώματος.



Εικόνα 5.5: Λεπτομέρεια προσομοίωσης του ειδικού περιβλήματος *sleeve*.



Εικόνα 5.6: Διαστάσεις του ειδικού περιβλήματος *sleeve*.



Εικόνα 5.7: Λεπτομέρεια προσομοίωσης του *mudmat*.

Πίνακας 5.5: Διαστασιολόγηση πασσάλων προσομοιώματος με *pin piles*.

<b>Διαστασιολόγηση πασσάλων προσομοιώματος με <i>pin piles</i></b>	
<b>Pin Piles</b>	CFCHS864X17,5
<b>Skirt Piles</b>	-

Πίνακας 5.6: Διαστασιολόγηση πασσάλων προσομοιώματος με *skirt piles*.

<b>Διαστασιολόγηση πασσάλων προσομοιώματος με <i>skirt piles</i></b>	
<b>Pin Piles</b>	-
<b>Skirt Piles</b>	CFCHS1270X22,2

Πίνακας 5.7: Διαστασιολόγηση πασσάλων προσομοιώματος με *mixed piles*.

<b>Διαστασιολόγηση πασσάλων προσομοιώματος με <i>mixed piles</i></b>	
<b>Pin Piles</b>	CFCHS762X15,9
<b>Skirt Piles</b>	CFCHS1422X22,2

### 5.4.1 Προσομοίωση Εδάφους – Δημιουργία Καμπυλών P - Y

Η αλληλεπίδραση του πασσάλου θεμελίωσης του *jacket* με το έδαφος, προσομοιώνεται στην ανάλυση μέσω πλευρικών, μη γραμμικώς μεταβαλλόμενων ελατηρίων ανά 1,0 m.

Στην εξεταζόμενη θέση του έργου δεν υπάρχει διαθέσιμη γεωτεχνική έρευνα – αξιολόγηση, επομένως το έδαφος προσομοιώνεται με την απλουστευτική παραδοχή ότι πρόκειται για μη συνεκτικό έδαφος με γωνία εσωτερικής τριβής  $\varphi = 35^\circ$  (αμμώδες έδαφος) και ειδικό βάρος υπό άνωση  $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ .

Σε κάθε ελατήριο, αντιστοιχεί μια καμπύλη πίεσης – υποχώρησης ( $p$ - $y$ ), η οποία εξαρτάται από το βάθος του ελατηρίου, μετρούμενο από την επιφάνεια του πυθμένα. Οι καμπύλες  $p$ - $y$  υπολογίζονται βάσει του προτύπου *ISO 19902*, για μη συνεκτικό έδαφος, όπου ισχύει η εξίσωση (5-1).

$$p = A * p_u * \tanh\left(\frac{k_h * X}{A * p_u} * y\right) \quad (5-1)$$

Όπου:

- $p$ : πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους που ασκείται στον πάσσαλο
- $y$ : πλευρική μετατόπιση του πασσάλου
- $k_h$ : δείκτης εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση  
Κατά τη μέθοδο Broms για μη συνεκτικά, αμμώδη εδάφη ο δείκτης εδάφους  $k_h$  είναι ανάλογος του συντελεστή  $n_h$  και αυξάνεται γραμμικά με το βάθος, καθώς η διάμετρος του πασσάλου παραμένει σταθερή, βάσει της εξίσωσης:

$$k_h = n_h * \frac{z}{D} \quad (5-2)$$

Όπου,

- $n_h$ : σταθερά του δείκτη εδάφους σε οριζόντια διεύθυνση με την οποία αποτυπώνεται η ταχύτητα αύξησης του συντελεστή  $k_h$  συναρτήσει του βάθους.  
Στον πίνακα 5.8 φαίνονται οι τιμές της σταθεράς  $n_h$  συναρτήσει της πυκνότητας της άμμου. Σημειώνεται ότι για τους υπολογισμούς της σταθεράς  $n_h$  σε κάθε πυκνότητα λήφθηκε η μέση τιμή των δύο ακραίων τιμών.
- $z$ : το βάθος
- $D$ : η διάμετρος του πασσάλου
- $p_u$ : μέγιστο πλευρικό φορτίο ανά μέτρο μήκους πασσάλου
- $X$ : βάθος κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας
- $A$ : αδιάστατος συντελεστής που εξαρτάται από τις συνθήκες φόρτισης και δίνεται από τη σχέση:

$$A = \begin{cases} 0,9 & , \text{για ανακυκλιζόμενη φόρτιση} \\ (3 - 0,8 * \frac{X}{D}) & , \text{για στατική φόρτιση} \end{cases} \quad (5-3)$$

Η μέγιστη πλευρική φέρουσα ικανότητα της άμμου (μη συνεκτικό έδαφος)  $p_u$  ανά μέτρο μήκους του πασσάλου εξαρτάται από το βάθος κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Για συγκεκριμένο βάθος η μέγιστη πλευρική αντοχή ορίζεται από την εξίσωση:

$$A = \begin{cases} (C_1 * X + C_2 * D) * \gamma * X & , 0 < X < X_R \\ C_3 * D * \gamma * X & , X > X_R \end{cases} \quad (5-4)$$

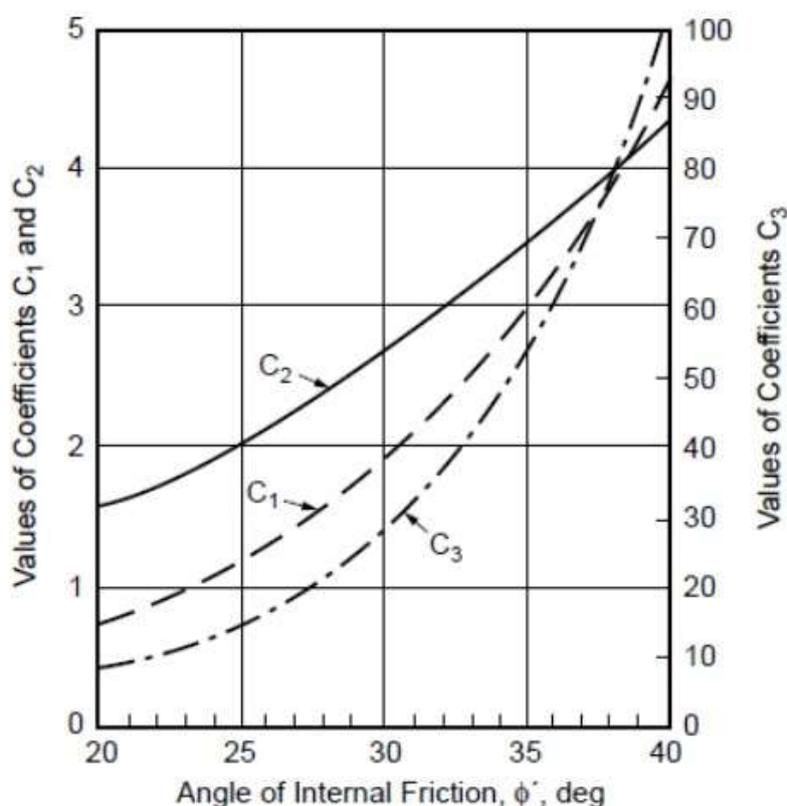
Όπου,

- $D$ : διάμετρος του πασσάλου
- $X_R$ : βάθος κάτω από το οποίο η τιμή της παράστασης  $(C_1 * X + C_2 * D) * \gamma * X$  υπερβαίνει την τιμή  $C_3 * D * \gamma * X$
- $C_1, C_2, C_3$ : συντελεστές οι οποίοι εξαρτώνται από την γωνία της εσωτερικής τριβής του εδάφους (εικόνα 5.8)

Στον πίνακα 5.10, παρουσιάζεται ενδεικτικός υπολογισμός της καμπύλης  $p$ - $\gamma$  σε βάθος 10 m για πασσάλους τύπου skirt (μέση διάμετρος 1,4 m) με δεδομένα που συγκεντρώνονται στον πίνακα 5.9, ενώ στην εικόνα 5.9 παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες από τις καμπύλες  $p$ - $\gamma$  μεταξύ βάθους 1 m και 40 m.

Πίνακας 5.8: Τιμές της σταθεράς  $n_h$  (σε  $\text{MN/m}^3$ ) άμμων. (Πηγή: Μ. Καββαδάς (2020 - 2021). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Θεμελιώσεις» με τίτλο: «Διάλεξη 13, Θεμελιώσεις με πασσάλους: Εγκάρσια Φόρτιση Πασσάλων», Εργαστήριο Θεμελιώσεων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.)

Σχετική πυκνότητα άμμου:	Χαλαρή	Μέσης πυκνότητας	Πυκνή
Εύρος τιμών $n_h$ ( $\text{MN/m}^3$ ) κορεσμένης άμμου	1,4 – 5,3	5 – 16,3	12 - 34



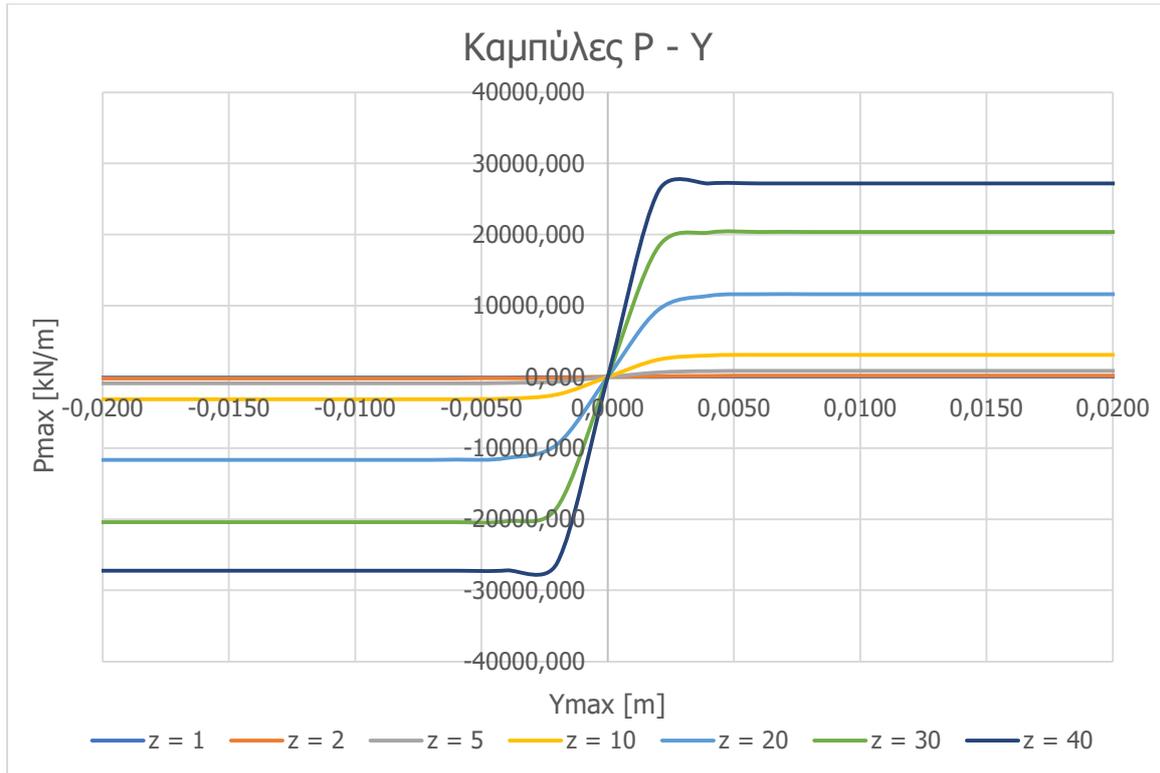
Εικόνα 5.8: Συντελεστές  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  συναρτήσει της εσωτερικής γωνίας τριβής  $\phi^\circ$ . (Πηγή: Μηχανικοί Μελετών & Εφαρμογών Α.Ε., ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή Α.Ε., Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών – ΕΜΠ (2015). Ερευνητικό Πρόγραμμα SeaWind – Σχεδιασμός θαλάσσιων ανεμογεννητριών με βλαση την επιτελεσματικότητα με τίτλο: «Π8.2 Πιλοτικός Προκαταρκτικός Σχεδιασμός & Διαστασιολόγηση Σταθερής Υπεράκτιας Ανεμογεννήτριας».)

Πίνακας 5.9: Δεδομένα για υποθαλάσσια μη συνεκτικά εδάφη.

Μη συνεκτικά εδάφη κάτω από το νερό		
Περιγραφή εδάφους	Άμμος	
Μέτρο ελαστικότητας E	60	Mpa
Λόγος Poisson ν=	0,3	-
Βάθος H=	40	m
Διάμετρος D=	1,4	m
Γωνία τριβής φ=	35	°
n <sub>h</sub> =	23000	kN/m <sup>3</sup>
Για ανακυκλιζόμενη φόρτιση A=	0,9	
γ=	10	kN/m <sup>3</sup>
C <sub>1</sub> =	3	
C <sub>2</sub> =	3,4	
C <sub>3</sub> =	54	

Πίνακας 5.10: Ενδεικτικός υπολογισμός καμπύλης p-γ σε βάθος 10 m.

z [m]	ρ <sub>us</sub> [kN/m]	ρ <sub>ud</sub> [kN/m]	ρ <sub>u</sub> [kN/m]	A*ρ <sub>u</sub> [kN/m]	Μέθοδος Broms k <sub>h</sub> = n <sub>h</sub> *(z/D)	(k <sub>h</sub> *z)/(A*ρ <sub>u</sub> ) [1/m]	γ <sub>max</sub> [m]	P <sub>max</sub> [kN/m]
<b>10,0</b>	3476,00	7560	3476,00	3128,40	164285,71	525,1429	-0,1520	-3128,400
							-0,0140	-3128,397
							-0,0120	-3128,379
							-0,0100	-3128,228
							-0,0080	-3126,997
							-0,0060	-3116,951
							-0,0040	-3036,066
							-0,0020	-2446,151
							0,0000	0,000
							0,0020	2446,151
							0,0040	3036,066
							0,0060	3116,951
							0,0080	3126,997
							0,0100	3128,228
							0,0120	3128,379
							0,0140	3128,397
							0,1520	3128,400



Εικόνα 5.9: Διάγραμμα καμπυλών  $p$ - $y$ .

#### 5.4.2 Υπολογισμός Φέρουσας Ικανότητας Πασσάλου

Σύμφωνα με τους Κ. Γεωργιάδη και Μ. Γεωργιάδη στο βιβλίο τους «Στοιχεία Εδαφομηχανικής», *φέρουσα ικανότητα του πασσάλου* ονομάζεται το οριακό αξονικό φορτίο  $Q_u$  στο οποίο ο πάσσαλος αστοχεί και είναι ίση προς:

$$Q_u = Q_b + Q_s \quad (5-5)$$

Όπου,

- $Q_b$ : η οριακή αντίσταση του εδάφους στην αιχμή του πασσάλου
- $Q_s$ : η συνολική οριακή πλευρική τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του πασσάλου και των « $n$ » εδαφικών στρώσεων

Η οριακή αντίσταση αιχμής  $Q_b$  για πάσσαλο κυκλικής διατομής  $D$ , δίνεται από τη σχέση:

$$Q_b = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot q_b \quad (5-6)$$

Όπου,

- $q_b$ : η οριακή αντίσταση αιχμής ανά μονάδα επιφάνειας της αιχμής του πασσάλου.

Η οριακή πλευρική τριβή  $Q_s$  του πασσάλου δίνεται από τη σχέση:

$$Q_s = \sum_{i=1}^n Q_{si} = \pi \cdot D \cdot \sum_{i=1}^n (L_i \cdot f_{si}) \quad (5-7)$$

Όπου,

- $Q_{si}$ : η οριακή πλευρική τριβή στη διεπιφάνεια πασσάλου – εδάφους στη στρώση  $i$ ,
- $L_i$ : το πάχος της στρώσης  $i$ ,
- $f_{si}$ : η οριακή πλευρική τριβή ανά μονάδα παράπλευρης επιφάνειας του πασσάλου στην εδαφική στρώση  $i$ .

Για το αμμώδες έδαφος του έργου οι υπολογισμοί γίνονται ως εξής:

$$q_b = \sigma'_{vb} \cdot N_q \quad (5-8)$$

Όπου,

- $\sigma'_{vb}$ : η επιφόρτιση, η κατακόρυφη τάση στη στάθμη της αιχμής του πασσάλου
- $N_q$ : συντελεστής φέρουσας ικανότητας για το έδαφος που βρίσκεται κάτω από την αιχμή του πασσάλου

$$N_q = a_t * N'_q \quad (5-9)$$

Όπου,

- $a_t$ : ένας διορθωτικός συντελεστής βάθους, λαμβάνεται ως 0,65 από το σχήμα 6.4 στο βιβλίο «Στοιχεία Εδαφομηχανικής»,
- $N'_q$ : ο συντελεστής αναφοράς που προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$N'_q = 0,21 * e^{0,17 * \varphi'} \quad (5-10)$$

Όπου,

$\varphi'$ : η γωνία που χρησιμοποιείται στους εμπηγνυόμενους πασσάλους, στην περίπτωση που το έδαφος είναι πολύ πυκνό, οπότε μπορεί να προκληθεί χαλάρωση από τις κρούσεις.

$$\varphi' = \frac{\varphi' b + 40}{2} \quad (5-11)$$

Η οριακή πλευρική τριβή  $f_s$  δίνεται από τη σχέση:

$$f_s = K * \tan \delta * \sigma'_v \quad (5-12)$$

Όπου,

- $\sigma'_v$ : η κατακόρυφη τάση του εδάφους σε βάθος  $z$
- $K$ : ένας συντελεστής πλευρικής ώθησης, κυμαίνεται από  $K = 1$  στα χαλαρά εδάφη ( $\varphi = 25^\circ$ ) έως  $K = 2$  στα πυκνά ( $\varphi = 35^\circ$ ). Άρα, στα εδάφη μέσης πυκνότητας ( $\varphi = 30^\circ$ )  $K = 1,5$ .
- $\tan \delta$ : κυμαίνεται από  $0,75 * \tan \varphi'$  έως  $\tan \varphi'$

Στον πίνακα 5.12, παρουσιάζεται ενδεικτικός υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας πασσάλων τύπου skirt (μέση διάμετρος 1,4 m) σε πυκνό έδαφος ( $\varphi = 35^\circ$ ), σύμφωνα με τα δεδομένα των πινάκων 5.9 και 5.11.

Πίνακας 5.11: Ενδεικτικά δεδομένα για πασσάλους τύπου skirt (μέση διάμετρος 1,4 m) σε πυκνό έδαφος ( $\varphi = 35^\circ$ ).

Δεδομένα	
L/D=	28,57
$a_t$ =	0,65
$N'_q$ '=	123,27
$\varphi'$ =	37,5
$N_q$ =	80,12
K=	2
$\tan \delta$ =	0,767
$0,75 * \tan \varphi$ =	0,575

Πίνακας 5.12: Ενδεικτικός υπολογισμός φέρουσας ικανότητας πασσάλων.

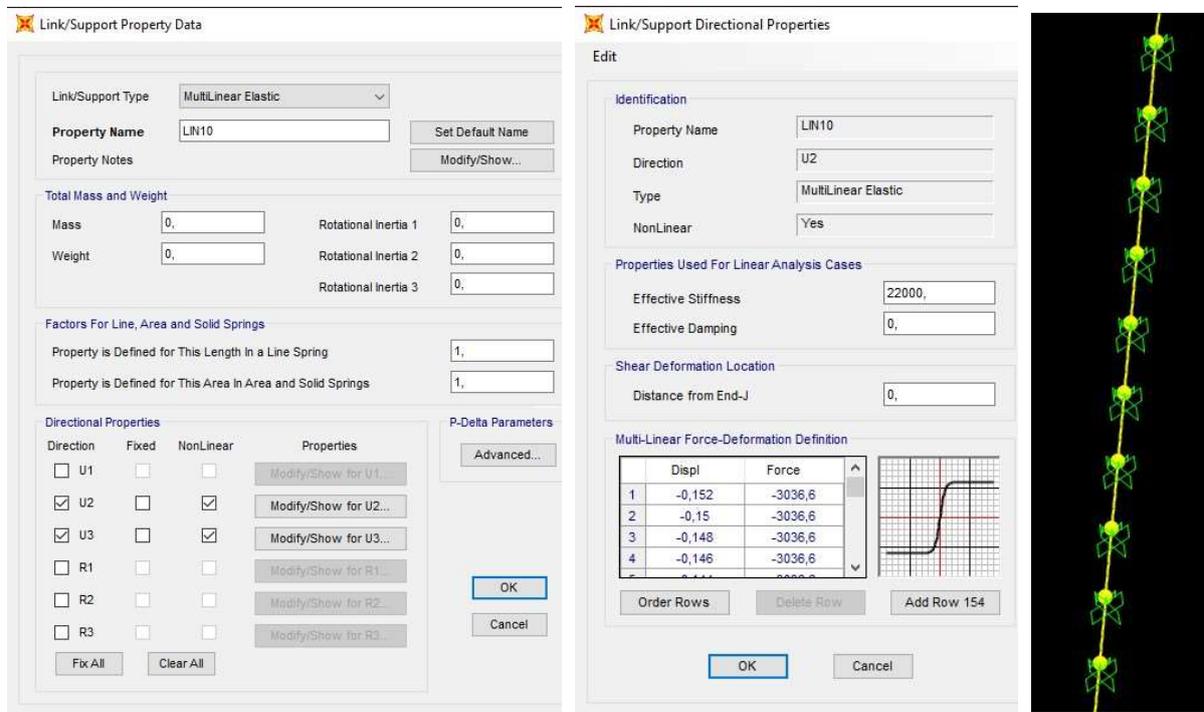
z [m]	$\sigma_{vb}'$ [kN/m]	$q_b$ [kN]	$Q_b$ [kN]	$f_s$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_s$ [kN]	$Q_u$ [kN]
30,0	300,00	24037,05	37002,17	345,30	45560,88	<b>82563,05</b>
35,0	350,00	28043,23	43169,20	402,85	62013,43	<b>105182,62</b>
40,0	400,00	32049,4	49336,23	460,40	80997,13	<b>130333,35</b>

### 5.4.3 Προσομοίωση Μη-Γραμμικών Ελατηρίων

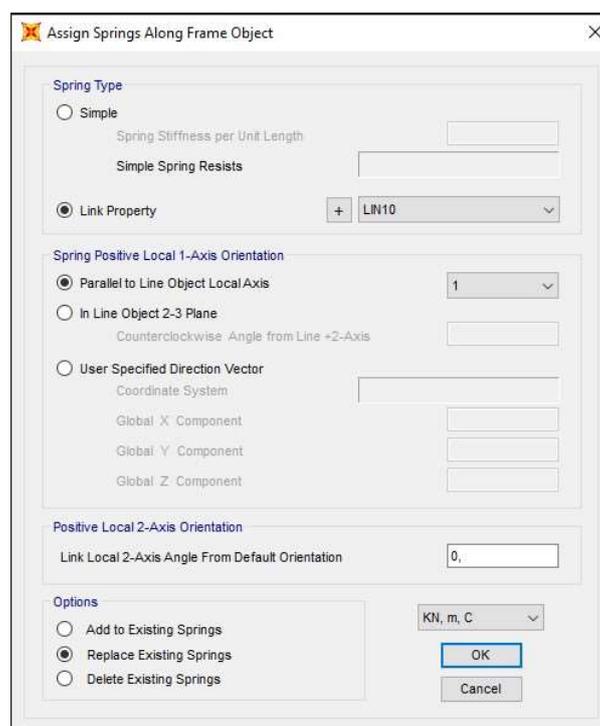
Η προσομοίωση των μη-γραμμικών ελατηρίων στο πρόγραμμα SAP2000, έγινε με στοιχεία τύπου *multi-linear elastic spring*, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.10. Τα στοιχεία αυτά δέχονται μόνον εφελκυσμό και τοποθετούνται ανά 1 m σε κάθε διατομή πασσάλου με διεύθυνση  $U_2$  και  $U_3$ , δηλαδή περιορίζουν τις πλευρικές μετακινήσεις του πασσάλου.

Τα μη-γραμμικά ελατήρια αναθέτονται στα ευθύγραμμα τμήματα μήκους 1 m των πασσάλων προσανατολισμένα κατά τον τοπικό άξονα 1 των πασσάλων (εικόνα 5.11).

Η κατακόρυφη μετακίνηση των πασσάλων περιορίζεται στην βάση τους με ελατήρια αντίστασης ίσης με τη φέρουσα ικανότητα αυτών, τα οποία προσανατολίζονται ως προς την διεύθυνση των πασσάλων, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.12.

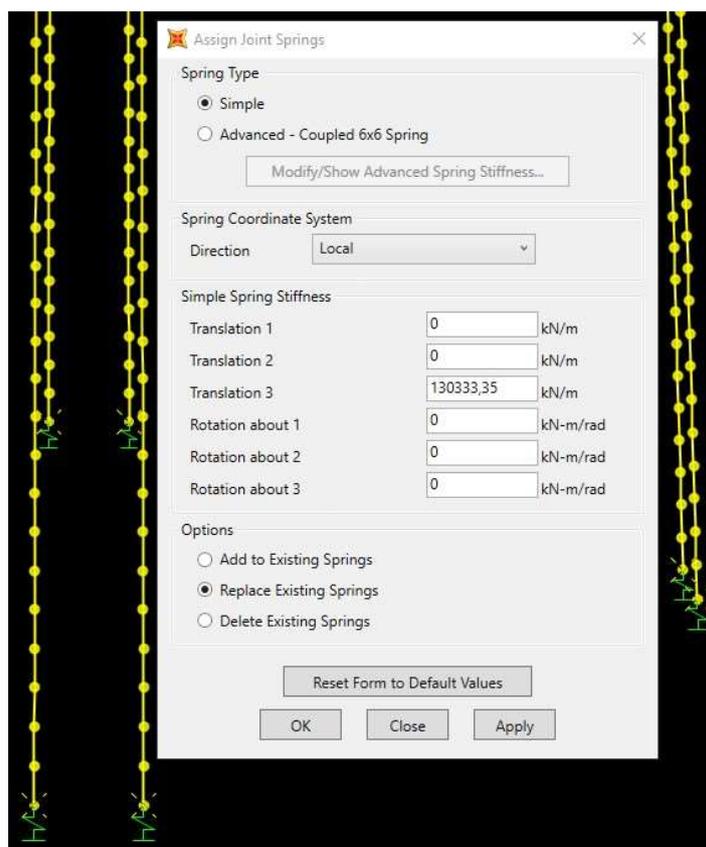


Εικόνα 5.10: Προσομοίωση των μη-γραμμικών ελατηρίων στο πρόγραμμα SAP2000.



Εικόνα 5.11: Ανάθεση μη-γραμμικών ελατηρίων στα ευθύγραμμα τμήματα (μήκους 1 m) των πασσάλων.





Εικόνα 5.12: Ανάθεση ελατηρίων στις αιχμές των πασσάλων κατά τη διεύθυνση αυτών.

## 5.5 Στατική Ανάλυση

### 5.5.1 Ιδιομορφική Ανάλυση

Η ιδιομορφική ανάλυση χρησιμοποιείται για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών μιας κατασκευής. Η ανάλυση αυτή είναι κρίσιμη για την κατανόηση της δυναμικής απόκρισης μιας κατασκευής κατά τη φόρτισή της. Οι ιδιοσυχνότητες είναι οι συχνότητες στις οποίες μια κατασκευή τείνει να ταλαντώνεται όταν διεγείρεται χωρίς να υπάρχει εξωτερική δύναμη. Κάθε ιδιοσυχνότητα αντιστοιχεί σε μία ιδιομορφή. Οι ιδιομορφές είναι τα χαρακτηριστικά σχήματα ταλάντωσης που παίρνει η κατασκευή στις αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες. Κάθε ιδιομορφή αντιπροσωπεύει ένα συγκεκριμένο πρότυπο μετατόπισης των σημείων της κατασκευής. Στους πίνακες 5.13 έως και 5.17 αναγράφονται τα ποσοστά της μάζας συμμετοχής καθώς και οι ιδιοπερίοδοι του προσομοιώματος με τη χρήση πασσάλων τύπου *pin*, *skirt* και *mixed*.

Στο προσομοίωμα με πασσάλους τύπου *pin* το 90% της μάζας συμπληρώνεται στην 9<sup>η</sup> ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση X και στην 10<sup>η</sup> ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση Y.

Στο προσομοίωμα με πασσάλους τύπου *skirt* παρατηρείται ότι δεν συγκεντρώνεται το 90% της μάζας εντός των πρώτων ιδιομορφών, αλλά αυτό συμβαίνει στην 92<sup>η</sup> κατά τη διεύθυνση X και στην 93<sup>η</sup> ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση Y (Πίνακας 5.15).

Στο προσομοίωμα με πασσάλους τύπου *mixed* παρατηρείται επίσης ότι δεν συγκεντρώνεται το 90% της μάζας εντός των πρώτων ιδιομορφών, αλλά αυτό συμβαίνει στην 75<sup>η</sup> κατά τη διεύθυνση X και κατά τη διεύθυνση Y (Πίνακας 5.17).

Στις εικόνες 5.8 – 5.16 παρουσιάζονται σχηματικά οι τρεις πρώτες βασικές ιδιομορφές για τα τρία προσομοιώματα *pin piles*, *skirt piles* και *mixed piles*.

Κατά τη στροφική ιδιομορφή, τα τρία προσομοιώματα έχουν παρόμοια συμπεριφορά. Άξιο αναφοράς για τα προσομοιώματα με *pin piles* και *skirt piles* είναι ότι στην πρώτη ιδιομορφή υπάρχει μετατόπιση κυρίως κατά τη διεύθυνση του άξονα Y (εικόνες 5.13 και 5.16), ενώ στην δεύτερη ιδιομορφή υπάρχει μετατόπιση κυρίως κατά τη διεύθυνση του άξονα X (εικόνες 5.14 και 5.17). Δεν συμβαίνει το ίδιο στις πρώτες δύο ιδιομορφές του προσομοιώματος με *mixed piles*, όπου υπάρχει εξίσου μετατόπιση τόσο κατά τη διεύθυνση του άξονα Y όσο κατά τη διεύθυνση του άξονα X (εικόνες 5.19 και 5.20). Αυτό πιθανόν προκύπτει από την τοποθέτηση των ίδιων τύπων πασσάλων αντιδιαμετρικά, προκαλώντας, έτσι στην κατασκευή, μια διαγώνια μετατόπιση.

Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης – *pin piles*.

OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless	SumUZ Unitless
MODAL	Mode	1	2,563171	0,01902	0,7678	6,23E-10	0,01902	0,7678	6,23E-10
MODAL	Mode	2	2,561257	0,76702	0,01906	5,648E-10	0,78604	0,78686	1,188E-09
MODAL	Mode	3	0,745528	1,914E-07	3,721E-07	1,271E-07	0,78604	0,78686	1,283E-07
MODAL	Mode	4	0,482282	0,03519	0,00014	0,00013	0,82123	0,787	0,00013
MODAL	Mode	5	0,476231	7,184E-06	6,575E-05	0,94825	0,82124	0,78707	0,94838
MODAL	Mode	6	0,470411	0,00014	0,03527	0,0019	0,82138	0,82234	0,95028
MODAL	Mode	7	0,284575	2,353E-09	1,446E-08	8,831E-10	0,82138	0,82234	0,95028
MODAL	Mode	8	0,263102	2,005E-06	3,669E-06	0,00813	0,82138	0,82234	0,95841
MODAL	Mode	9	0,245235	0,08374	0,00024	7,654E-08	0,90512	0,82258	0,95841
MODAL	Mode	10	0,242893	0,00027	0,08647	1,993E-07	0,90539	0,90905	0,95841
MODAL	Mode	11	0,238618	4,524E-05	0,00016	4,764E-07	0,90543	0,90922	0,95841
MODAL	Mode	12	0,23077	1,454E-06	1,264E-06	0,00013	0,90544	0,90922	0,95854
MODAL	Mode	13	0,202627	0,0044	2,731E-06	0,00014	0,90983	0,90922	0,95867
MODAL	Mode	14	0,193018	0,00028	9,772E-05	0,00028	0,91011	0,90932	0,95895
MODAL	Mode	15	0,187454	3,613E-05	2,443E-05	0,00608	0,91015	0,90934	0,96503

Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης – *skirt piles* (1).

OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless	SumUZ Unitless
MODAL	Mode	1	1,784507	0	0,62759	0	0	0,62759	0
MODAL	Mode	2	1,780345	0,62905	0	4,283E-17	0,62905	0,62759	4,283E-17
MODAL	Mode	3	0,721655	1,028E-16	6,044E-11	3,309E-17	0,62905	0,62759	7,592E-17
MODAL	Mode	4	0,454875	0,0341	2,226E-18	2,22E-12	0,66315	0,62759	2,22E-12
MODAL	Mode	5	0,445229	5,373E-17	0,03397	2,385E-17	0,66315	0,66156	2,22E-12
MODAL	Mode	6	0,362527	3,725E-12	7,337E-15	0,80417	0,66315	0,66156	0,80417
MODAL	Mode	7	0,242595	6,118E-12	4,564E-14	0,01237	0,66315	0,66156	0,81654
MODAL	Mode	8	0,240926	1,808E-16	1,839E-08	6,978E-16	0,66315	0,66156	0,81654
MODAL	Mode	9	0,226897	3,396E-12	2,796E-18	0,00139	0,66315	0,66156	0,81793
MODAL	Mode	10	0,213825	0,06928	9,051E-15	2,03E-10	0,73243	0,66156	0,81793
MODAL	Mode	11	0,213796	9,11E-15	9,042E-05	6,835E-15	0,73243	0,66165	0,81793
MODAL	Mode	12	0,21082	1,106E-15	0,07896	1,127E-14	0,73243	0,74062	0,81793
MODAL	Mode	13	0,191927	0,01198	3,164E-16	3,725E-11	0,74441	0,74062	0,81793
MODAL	Mode	14	0,184801	4,06E-15	0,0002	3,625E-14	0,74441	0,74082	0,81793
MODAL	Mode	15	0,181332	6,526E-12	6,444E-15	0,01453	0,74441	0,74082	0,83246

Πίνακας 5.15: Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης – *skirt piles* (2).

OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless	SumUZ Unitless
MODAL	Mode	85	0,038332	4,121E-15	2,734E-14	1,494E-15	0,84878	0,84496	0,99943
MODAL	Mode	86	0,038332	1,774E-15	8,142E-16	2,243E-15	0,84878	0,84496	0,99943
MODAL	Mode	87	0,038332	7,866E-14	6,048E-14	3,929E-14	0,84878	0,84496	0,99943
MODAL	Mode	88	0,038332	7,911E-14	0,00045	2,549E-14	0,84878	0,84541	0,99943
MODAL	Mode	89	0,038332	0,00047	3,159E-14	2,271E-11	0,84925	0,84541	0,99943
MODAL	Mode	90	0,038331	0,02752	2,808E-14	1,385E-09	0,87677	0,84541	0,99943
MODAL	Mode	91	0,03833	1,043E-14	0,02841	6,402E-15	0,87677	0,87382	0,99943
MODAL	Mode	92	0,03833	0,02788	1,522E-13	1,498E-10	0,90465	0,87382	0,99943
MODAL	Mode	93	0,03833	3,628E-14	0,03195	1,04E-14	0,90465	0,90576	0,99943
MODAL	Mode	94	0,038329	5,585E-05	5,11E-14	1,294E-06	0,90471	0,90576	0,99943
MODAL	Mode	95	0,038324	0,0596	8,205E-14	4,05E-14	0,96431	0,90576	0,99943
MODAL	Mode	96	0,038324	7,597E-14	0,05596	4,913E-15	0,96431	0,96172	0,99943
MODAL	Mode	97	0,038221	1,713E-13	0,00021	1,228E-13	0,96431	0,96193	0,99943
MODAL	Mode	98	0,038108	0,00886	2,526E-16	5,512E-09	0,97317	0,96193	0,99943
MODAL	Mode	99	0,038067	2,057E-14	0,0106	5,508E-16	0,97317	0,97253	0,99943

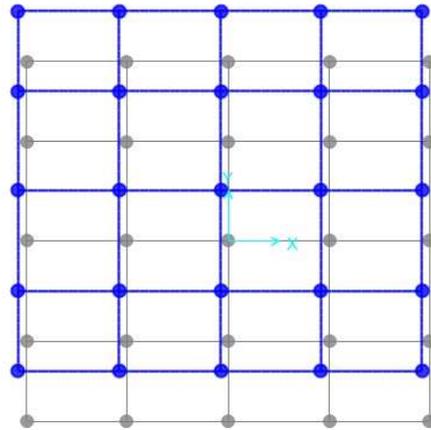
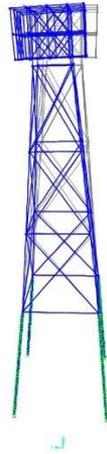
Πίνακας 5.16: Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης – *mixed piles* (1).

OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless	SumUZ Unitless
MODAL	Mode	1	2,435837	0,34994	0,35329	1,868E-11	0,34994	0,35329	1,868E-11
MODAL	Mode	2	1,815717	0,33965	0,33699	4,763E-09	0,68959	0,69028	4,781E-09
MODAL	Mode	3	0,731248	3,822E-07	6,374E-07	1,628E-07	0,68959	0,69028	1,676E-07
MODAL	Mode	4	0,474504	0,02829	0,00371	4,988E-07	0,71788	0,69399	6,664E-07
MODAL	Mode	5	0,458631	0,00573	0,03046	2,917E-05	0,72361	0,72445	2,984E-05
MODAL	Mode	6	0,409651	3,891E-08	1,575E-06	0,86169	0,72361	0,72445	0,86172
MODAL	Mode	7	0,26308	7,813E-07	1,118E-06	0,00414	0,72361	0,72445	0,86586
MODAL	Mode	8	0,255209	1,875E-07	2,697E-07	0,02997	0,72361	0,72445	0,89583
MODAL	Mode	9	0,234918	0,04674	0,03188	1,979E-06	0,77035	0,75634	0,89584
MODAL	Mode	10	0,230396	2,554E-05	1,762E-05	0,00026	0,77038	0,75635	0,8961
MODAL	Mode	11	0,228944	0,00013	0,00011	3,351E-06	0,77051	0,75646	0,8961
MODAL	Mode	12	0,219095	0,02752	0,05298	1,013E-06	0,79802	0,80944	0,8961
MODAL	Mode	13	0,200727	0,01283	0,00075	0,00033	0,81085	0,81019	0,89642
MODAL	Mode	14	0,192525	0,00082	0,00025	0,00046	0,81167	0,81045	0,89688
MODAL	Mode	15	0,186495	0,0001	8,533E-05	0,01261	0,81178	0,81053	0,90949

Πίνακας 5.17: Αποτελέσματα ιδιομορφικής ανάλυσης – *mixed piles* (2).

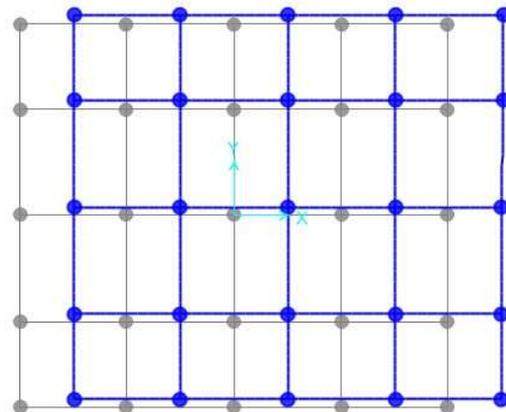
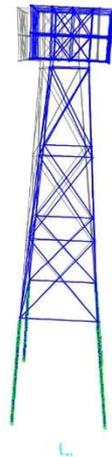
OutputCase	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless	SumUZ Unitless
MODAL	Mode	69	0,048517	0,0003	0,0003	8,139E-08	0,85686	0,85686	0,99829
MODAL	Mode	70	0,047771	2,828E-08	1,305E-08	1,689E-06	0,85686	0,85686	0,99829
MODAL	Mode	71	0,041638	0,00105	0,00105	1,261E-12	0,85791	0,85791	0,99829
MODAL	Mode	72	0,041581	0,00083	0,00083	2,484E-05	0,85875	0,85875	0,99831
MODAL	Mode	73	0,041121	0,00257	0,00262	1,977E-07	0,86132	0,86136	0,99831
MODAL	Mode	74	0,041092	4,749E-05	4,654E-05	3,902E-13	0,86136	0,86141	0,99831
MODAL	Mode	75	0,040734	0,04801	0,04789	2,07E-13	0,90937	0,9093	0,99831
MODAL	Mode	76	0,040661	0,00015	0,00015	2,706E-05	0,90952	0,90945	0,99834
MODAL	Mode	77	0,040594	0,0043	0,0043	6,405E-11	0,91382	0,91375	0,99834
MODAL	Mode	78	0,040594	0,00026	0,00026	5,708E-14	0,91408	0,91401	0,99834
MODAL	Mode	79	0,040593	7,662E-14	5,67E-14	1,286E-13	0,91408	0,91401	0,99834
MODAL	Mode	80	0,040593	7,798E-16	1,012E-15	2,005E-17	0,91408	0,91401	0,99834
MODAL	Mode	81	0,04059	0,03568	0,03564	1,618E-10	0,94975	0,94966	0,99834
MODAL	Mode	82	0,04059	0,0001	0,00017	2,625E-14	0,94986	0,94982	0,99834
MODAL	Mode	83	0,040526	0,00738	0,00739	1,004E-13	0,95723	0,95721	0,99834

Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 2,56317; f = 0,39014



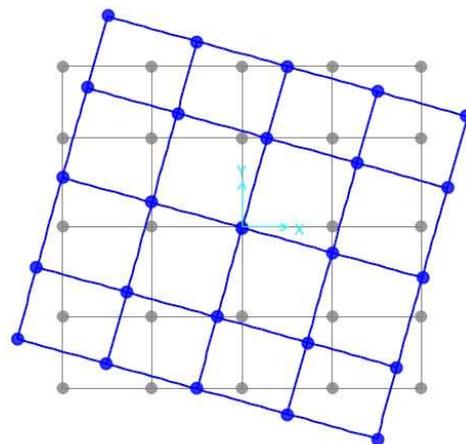
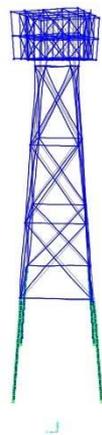
Εικόνα 5.13: 1<sup>η</sup> Ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση του άξονα Y – *pin piles*.

Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; T = 2,56126; f = 0,39043



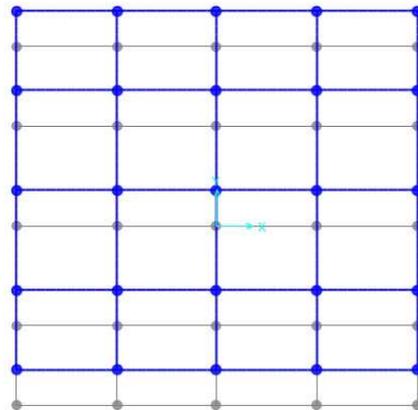
Εικόνα 5.14: 2<sup>η</sup> Ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση του άξονα X – *pin piles*.

Deformed Shape (MODAL) - Mode 3; T = 0,74553; f = 1,34133



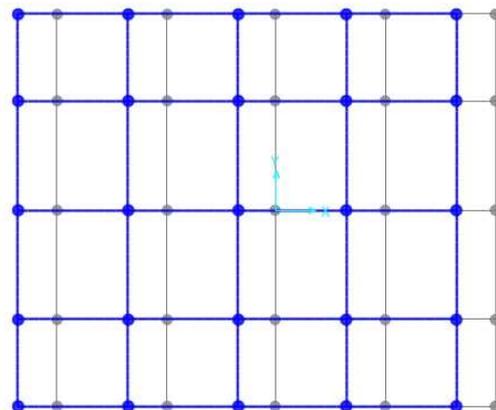
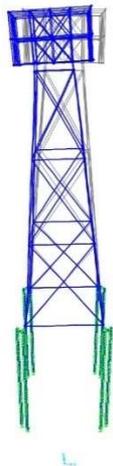
Εικόνα 5.15: 3<sup>η</sup> Ιδιομορφή περιστροφική ως προς τον άξονα Z – *pin piles*.

Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 1,78451; f = 0,56038



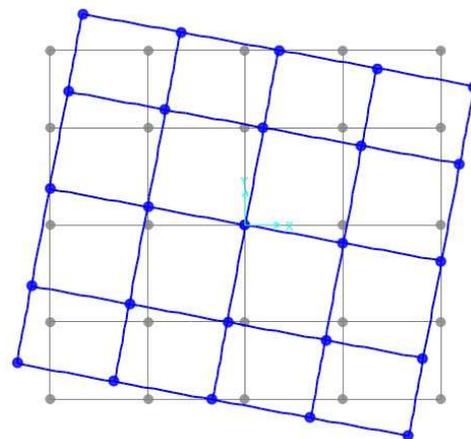
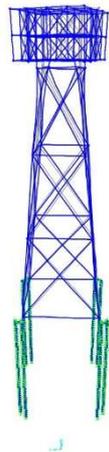
Εικόνα 5.16: 1<sup>η</sup> Ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση του άξονα Y – skirt piles.

Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; T = 1,78034; f = 0,56169



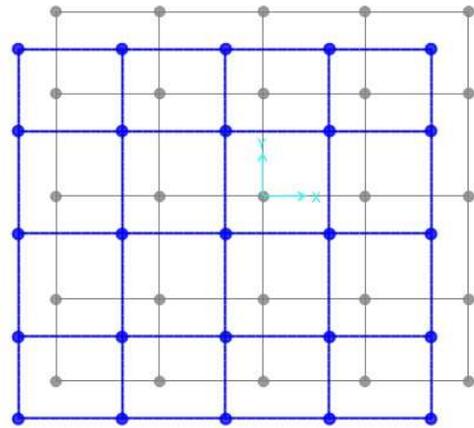
Εικόνα 5.17: 2<sup>η</sup> Ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση του άξονα X – skirt piles.

Deformed Shape (MODAL) - Mode 3; T = 0,72166; f = 1,3857



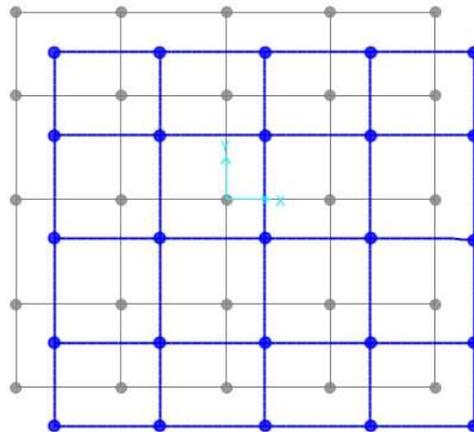
Εικόνα 5.18: 3<sup>η</sup> Ιδιομορφή περιστροφική ως προς τον άξονα Z – skirt piles.

Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 2,43584; f = 0,41054



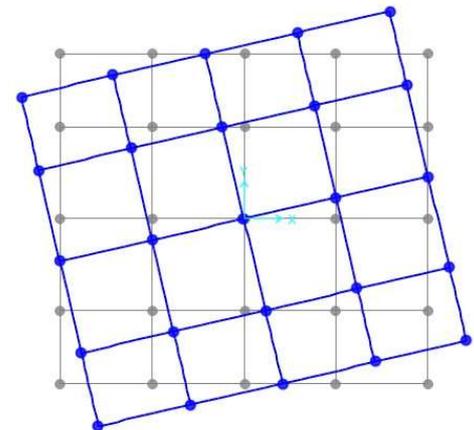
Εικόνα 5.19: 1<sup>η</sup> Ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση του άξονα Y – *mixed piles*.

Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; T = 1,81572; f = 0,55075



Εικόνα 5.20: 2<sup>η</sup> Ιδιομορφή κατά τη διεύθυνση του άξονα X – *mixed piles*.

Deformed Shape (MODAL) - Mode 3; T = 0,73125; f = 1,36753

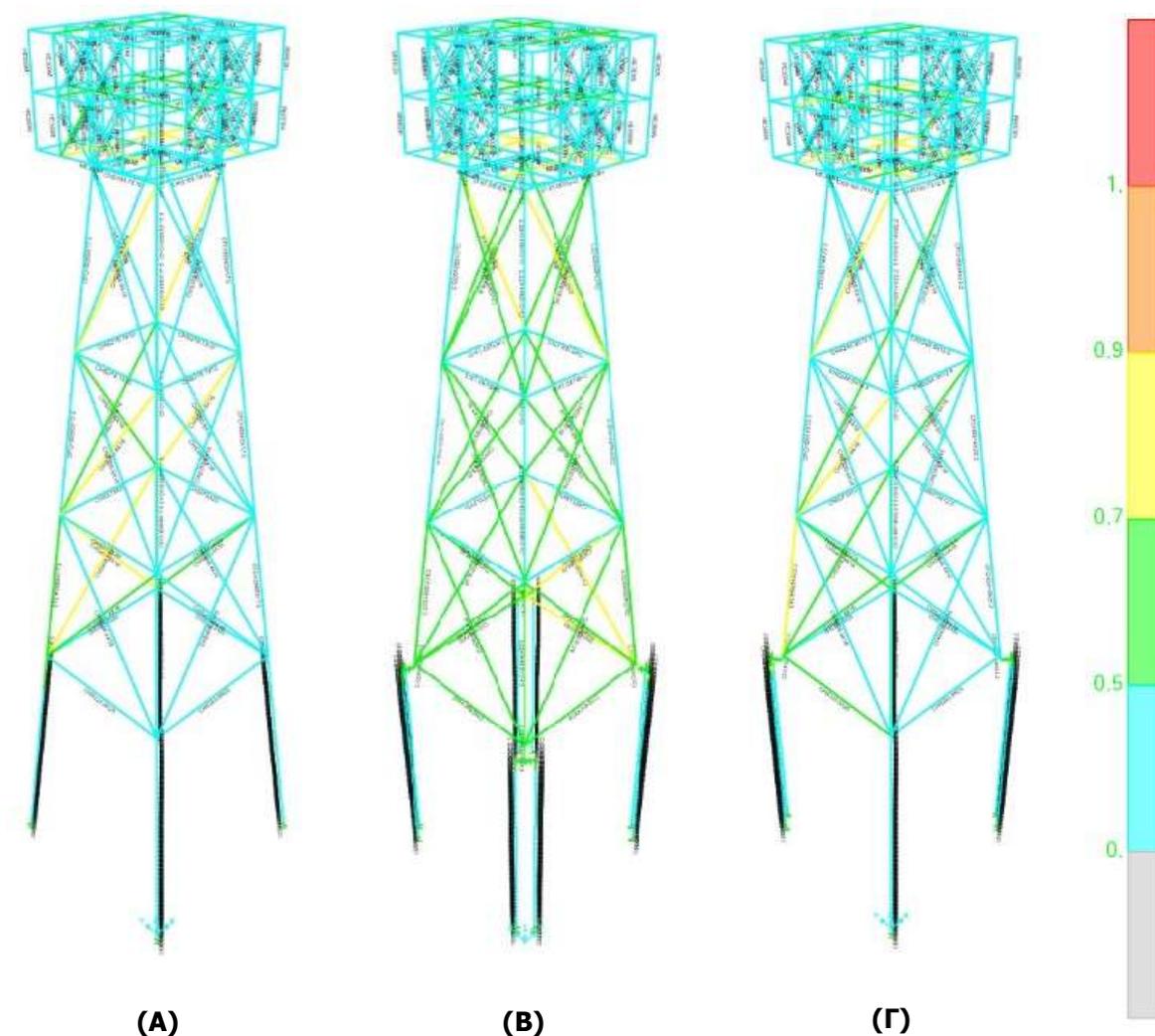


Εικόνα 5.21: 3<sup>η</sup> Ιδιομορφή περιστροφική ως προς τον άξονα Z – *mixed piles*.

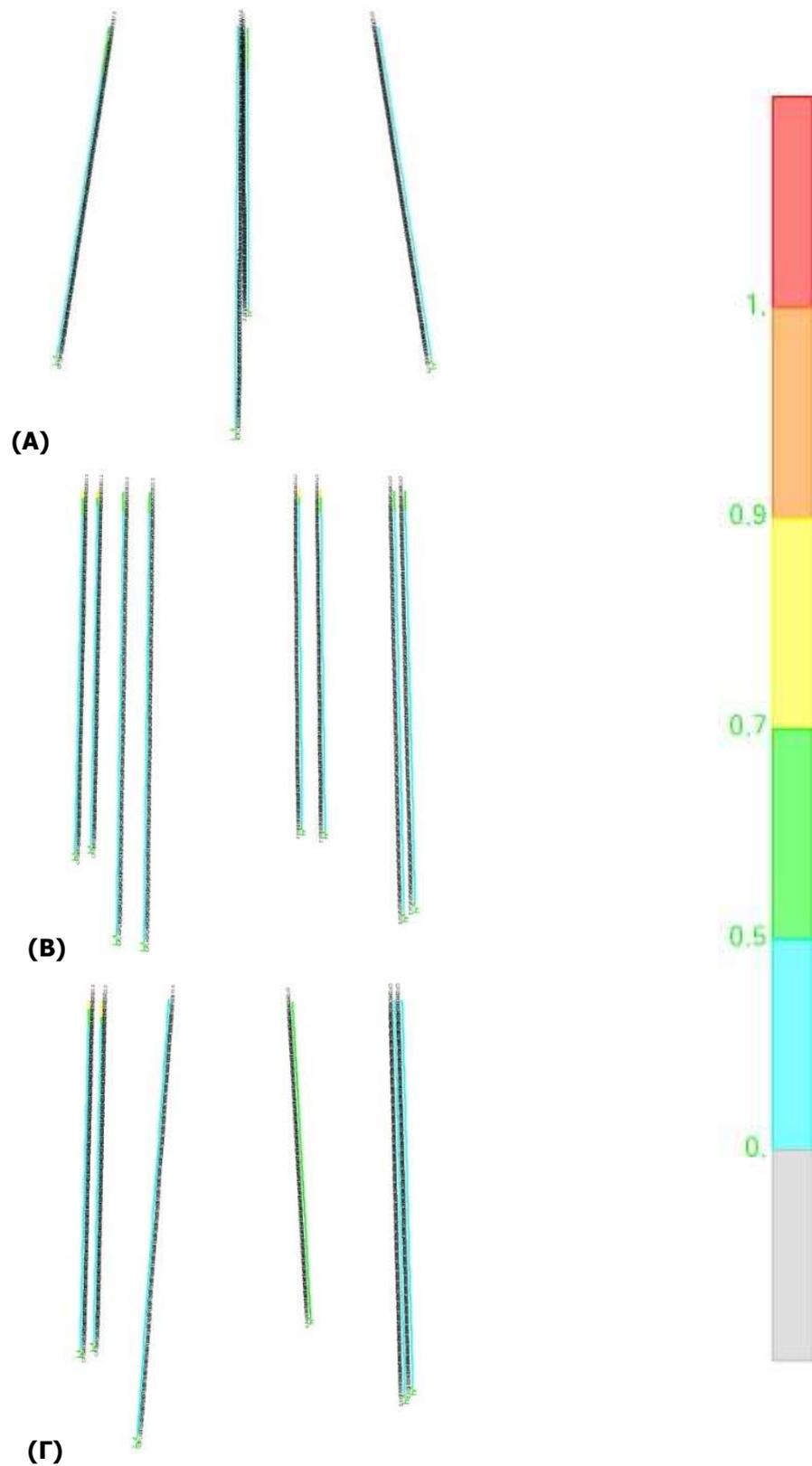
### 5.5.2 Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ)

Ο φορέας εξετάζεται σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ), έτσι ώστε να προληφθεί η κατάρρευση του φορέα ή κάποιου τμήματος αυτού, να διασφαλιστεί κατά κύριο λόγο η ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής και ιδανικά και του φορέα. Οι διατομές των μελών ελέγχονται βάσει του Ευρωκώδικα 3 (2005) από το στατικό πρόγραμμα *SAP2000* και προκύπτει ο συντελεστής αξιοποίησης καθεμίας εξ αυτών. Ο συντελεστής αξιοποίησης είναι επιθυμητό να είναι μικρότερος από 0,9 (ή 90%), ενώ παράλληλα να παραμένει κοντά στο εύρος 0,7 – 0,9. Όσο καλύτερη είναι η αξιοποίηση των διατομών τόσο λιγότερο αντιοικονομική προκύπτει η μελέτη. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο δυσμενέστερος συνδυασμός φόρτισης είναι ο *OKA7*, όπου κρίσιμο φορτίο είναι ο άνεμος *W2*:

$$1,35*G + 1,01*Q + 0,90*Wave + 1,20*Snow + 1,50*Wind (2)$$



Εικόνα 5.22: Στατικός έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) με το πρόγραμμα *SAP2000*, όπου (Α) προσομοίωμα με *pin piles*, (Β) προσομοίωμα με *skirt piles*, (Γ) προσομοίωμα με *mixed piles*.



Εικόνα 5.23: Στατικός έλεγχος των πασσάλων σε Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) με το πρόγραμμα *SAP2000*, όπου (Α) προσομοίωμα με *pin piles*, (Β) προσομοίωμα με *skirt piles*, (Γ) προσομοίωμα με *mixed piles*.



### 5.5.3 Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ)

Ο φορέας εξετάζεται ως προς την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ), έτσι ώστε η κατασκευή να έχει τέτοια συμπεριφορά, κατά την οποία να μην επηρεάζεται η λειτουργία του υποσταθμού, είτε αυτό αναφέρεται σε κάποιο μηχάνημα είτε μεταφράζεται σε ανασφάλεια του χρήστη.

Ο έλεγχος πραγματοποιείται με έλεγχο του βέλους κάμψης του δυσμενέστερου μέλους της ανωδομής για τους 8 συνδυασμούς οριακής κατάστασης λειτουργικότητας. Το μέλος αυτό είναι η εμφανιζόμενη δοκός στην εικόνα 5.24, το βέλος της οποίας δεν πρέπει να ξεπερνάει το μέγιστο, το οποίο προκύπτει από τη σχέση 5.13.

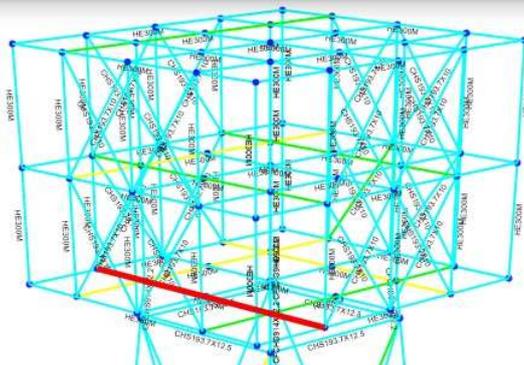
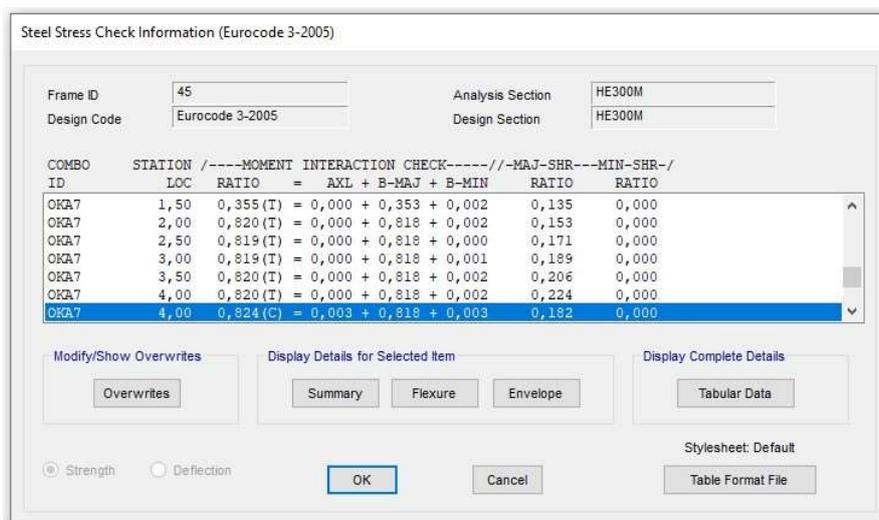
$$\delta_{max} = \frac{L}{250} \quad (5-13)$$

Η δοκός αποτελεί μία ΗΕΜ300 στο 1<sup>ο</sup> κατάστρωμα με μήκος 18 m. Το μέγιστο επιτρεπόμενο βέλος της δοκού, που προκύπτει από την εξίσωση 5-13, είναι  $\frac{L}{250} = \frac{18}{250} = 0,072 \text{ m} = 7,2 \text{ cm}$ .

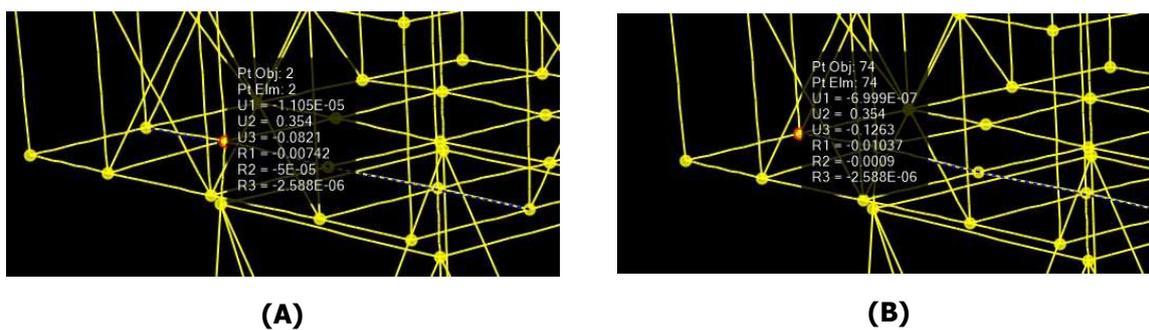
Υπολογίζεται η μέγιστη σχετική μετατόπιση μεταξύ του ακραίου κόμβου της δοκού και του κόμβου εκείνου που στηρίζεται στο υποσύλωμα/πόδι του *jacket*. Αυτή προκύπτει κατά τον συνδυασμό **ΟΚΛ7**, όπου κρίσιμο φορτίο είναι ο άνεμος *W2*:

$$1,00*G + 0,75*Q + 0,20*Wave + 0,00*Snow + 1,00*Wind (2)$$

Η σχετική μετατόπιση υπολογίζεται ως η μέγιστη απόλυτη διαφορά μεταξύ των μετατοπίσεων (U3) και προκύπτει 0,0442 m, δηλαδή  $4,4 \text{ cm} < 7,2 \text{ cm}$ .



Εικόνα 5.24: Δυσμενέστερο μέλος ανωδομής με αξιοποίηση 82%, στην οποία γίνεται ο έλεγχος οριακής κατάστασης λειτουργικότητας (ΟΚΛ).



Εικόνα 5.25: Α) Μετατόπιση ακραίου κόμβου της δοκού, Β) Μετατόπιση κόμβου στήριξης της δοκού στο υποστυλώμα/πόδι του *jacket*.

### 5.5.4 Ροπές και Μετατοπίσεις Φορέα

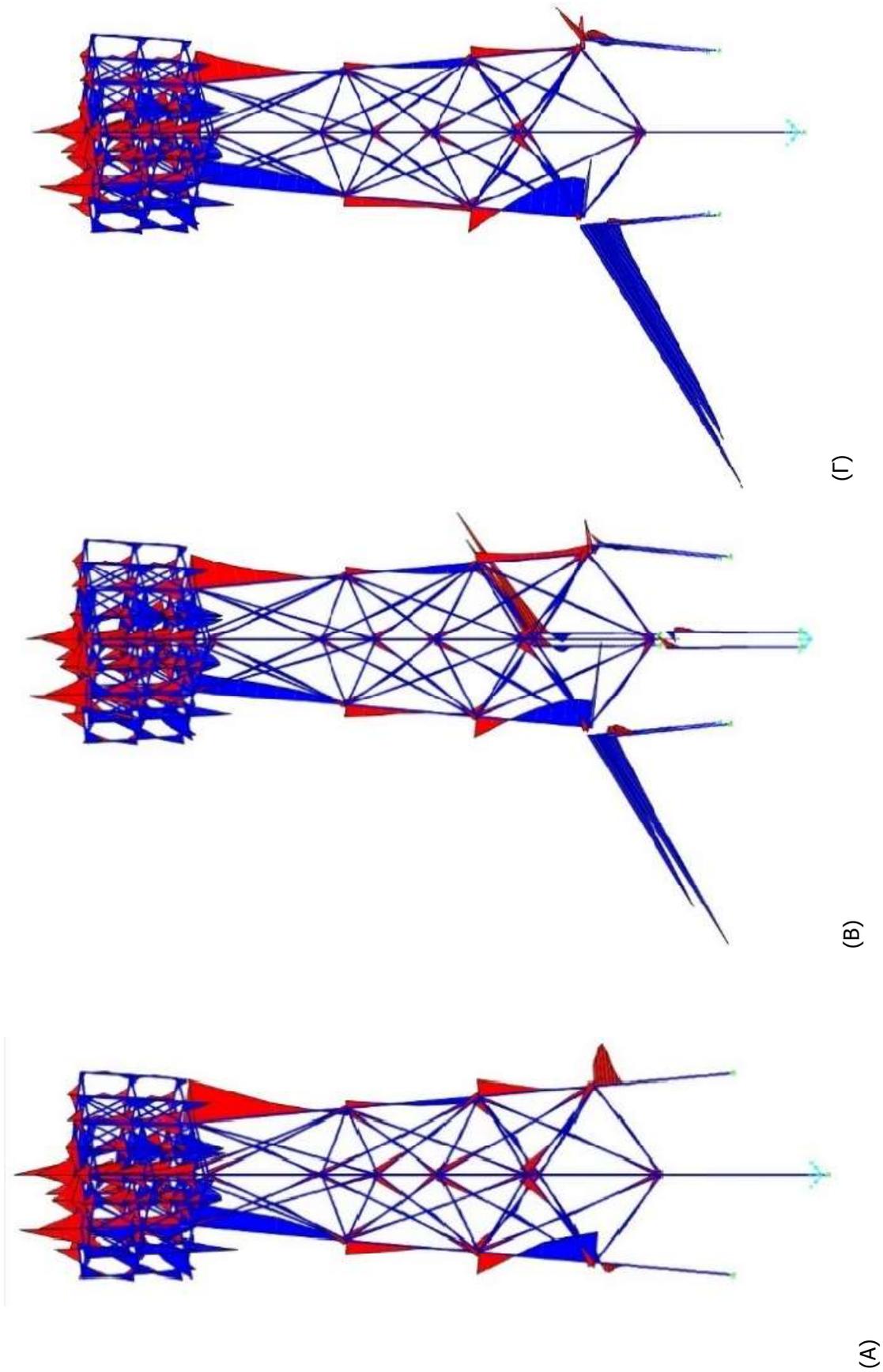
Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5.5.2, ο δυσμενέστερος συνδυασμός φόρτισης είναι ο *OKA7*, οπότε θα παρουσιαστούν οι ροπές και οι μετατοπίσεις που προκύπτουν στον φορέα κατά το συνδυασμό φόρτισης *OKA7*.

Τα διαγράμματα ροπών στους πασσάλους μηδενίζονται ομαλά περί τα 10 m στο προσομοίωμα με τα *pin piles*, περί τα 12 m στο προσομοίωμα με τα *skirt piles* και περί τα 15 m στο προσομοίωμα με τα *mixed piles* (εικόνα 5.26). Παρόλο που στα διαγράμματα ροπών φαίνεται να αξιοποιείται μικρό ποσοστό των πασσάλων, το μήκος τους προσδίδει μεγαλύτερη αντίσταση τριβής, άρα και καλύτερη σταθερότητα της κατασκευής. Η επιρροή του μήκους των πασσάλων στην συμπεριφορά της κατασκευής μελετάται σε επόμενο κεφάλαιο (6.2).

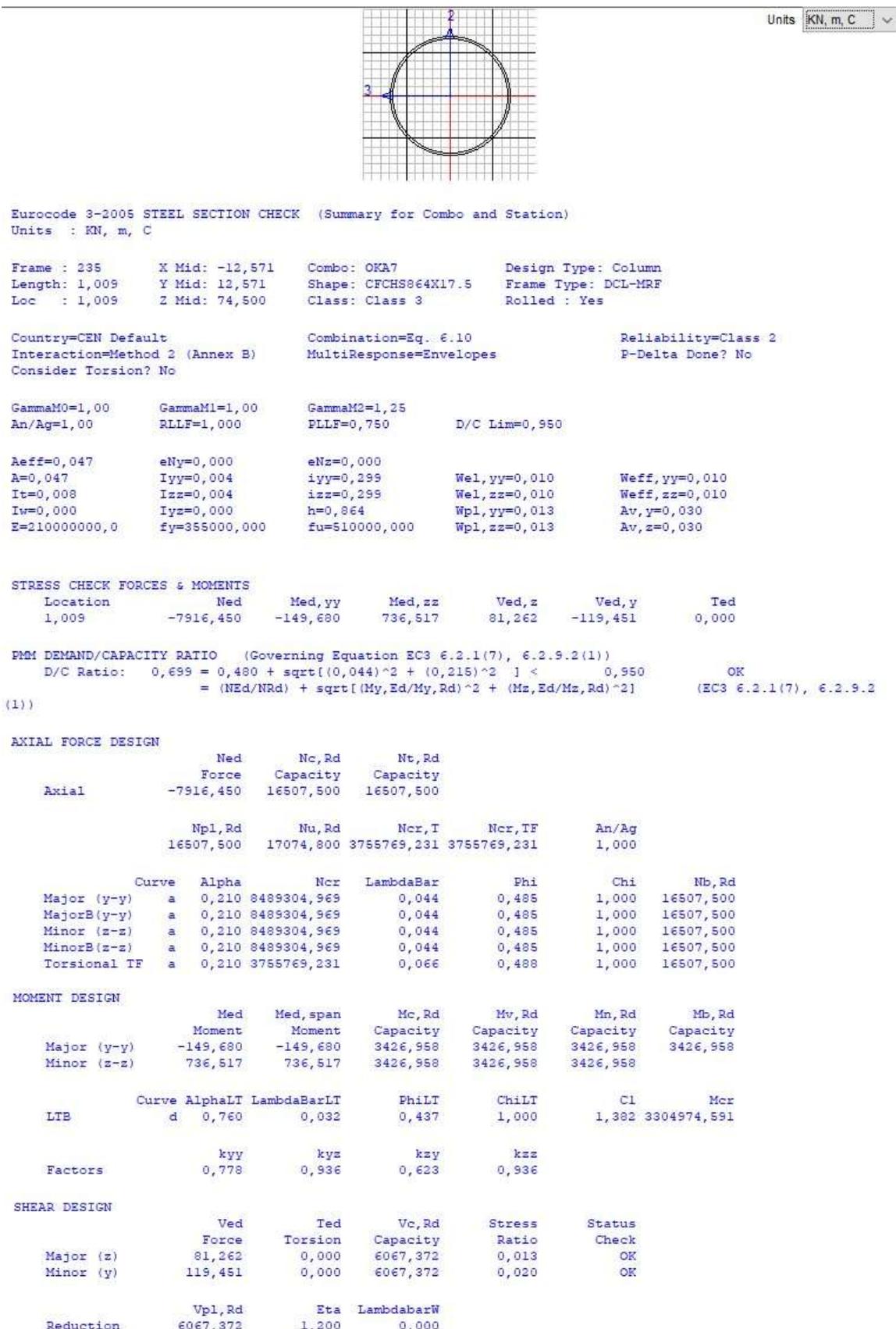
Οι πάσσαλοι τύπου *skirt* παραλαμβάνουν μεγαλύτερη ροπή σε σύγκριση με τους πασσάλους τύπου *pin* λόγω της εκκεντρότητάς τους από τα υποστυλώματα/πόδια του *jacket*.

Στις εικόνες 5.27, 5.28 και 5.29 παρουσιάζονται αναλυτικά οι έλεγχοι του δυσμενέστερου τμήματος των πασσάλων για κάθε προσομοίωμα κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού φόρτισης *OKA7*, ενώ στις εικόνες 5.30 και 5.31 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις κατά το δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης *OKA7*.

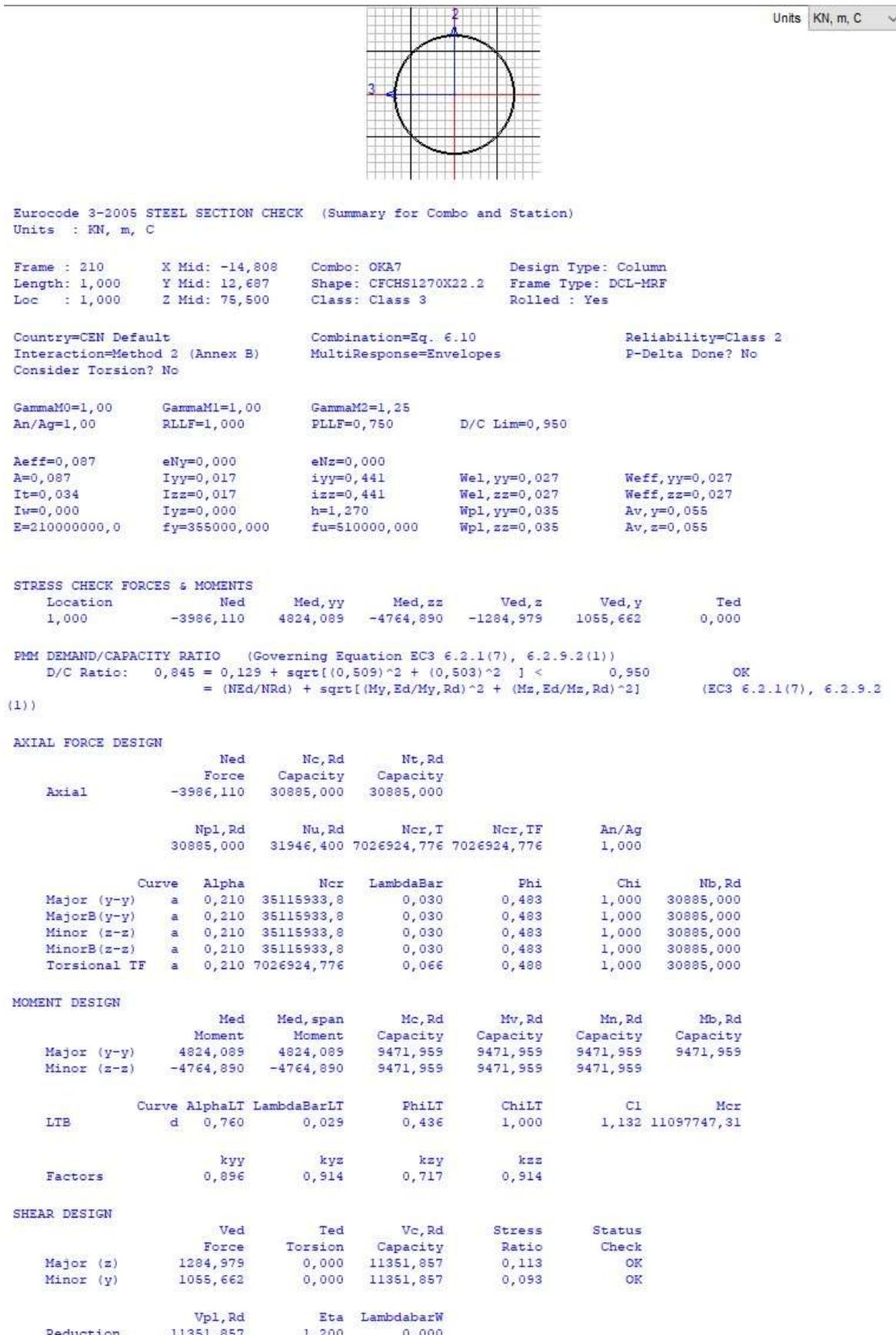
Παρατηρείται ότι με τη χρήση πασσάλων τύπου *skirt* επιτυγχάνεται η μικρότερη δυνατή μετατόπιση της κατασκευής, ενώ με τη χρήση πασσάλων τύπου *pin* προκύπτει η μεγαλύτερη δυνατή μετατόπιση της κατασκευής.



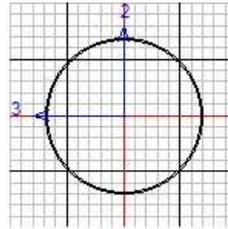
Εικόνα 5.26: Σκαριφήματα ροπών προσομοιωμάτων κατά τη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7: Α) *pin piles*, Β) *skirt piles*, Γ) *mixed piles*



Εικόνα 5.27: Έλεγχος του δυσμενέστερου τμήματος των πασσάλων για το προσομοίωμα με χρήση *pin piles* κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού φόρτισης OKA7.



Εικόνα 5.28: Έλεγχος του δυσμενέστερου τμήματος των πασσάλων για το προσομοίωμα με χρήση *skirt piles* κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού φόρτισης OKA7.



Units KN, m, C

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

Frame : 363 X Mid: -12,687 Combo: OKA7 Design Type: Column  
Length: 1,000 Y Mid: 14,808 Shape: CFCHS1422X22.2 Frame Type: DCL-MRF  
Loc : 1,000 Z Mid: 75,500 Class: Class 4 Rolled : Yes

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

GammaM0=1,00 GammaM1=1,00 GammaM2=1,25  
An/Ag=1,00 RLLF=1,000 PLLF=0,750 D/C Lim=0,950

Aeff=0,098 eNy=0,000 eNz=0,000  
A=0,098 Iyy=0,024 iyy=0,495 Wel,yy=0,034 Weff,yy=0,034  
It=0,048 Iss=0,024 iss=0,495 Wel,zz=0,034 Weff,zz=0,034  
Iw=0,000 Iyz=0,000 h=1,422 Wpl,yy=0,044 Av,y=0,062  
E=210000000,0 fy=355000,000 fu=510000,000 Wpl,zz=0,044 Av,z=0,062

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS

Location	Ned	Med,yy	Med,zz	Ved,z	Ved,y	Ted
1,000	-4581,209	6137,280	-5796,769	-792,509	1146,961	0,000

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (Governing Equation EC3 6.2.9.3(2))

D/C Ratio: 0,839 = 0,132 + sqrt[(0,514)^2 + (0,485)^2] < 0,950 OK  
= (Ned/Aeff fy/GammaM0) + sqrt[((My,Ed+Ned eNy)/(Weff,y,min fy/GammaM0))^2 + ((Mz,Ed+Ned eNz)/(Weff,z,min fy/GammaM0))^2] (EC3 6.2.9.3(2))

AXIAL FORCE DESIGN

	Ned	Nc,Rd	Nt,Rd				
	Force	Capacity	Capacity				
Axial	-4581,209	34648,000	34648,000				
	Np1,Rd	Nu,Rd	Ncr,T	Ncr,TF	An/Ag		
	34648,000	35838,720	7883078,273	7883078,273	1,000		
	Curve	Alpha	Ncr	LambdaBar	Phi	Chi	Nb,Rd
Major (y-y)	a	0,210	49572291,6	0,026	0,482	1,000	34648,000
MajorB(y-y)	a	0,210	49572291,6	0,026	0,482	1,000	34648,000
Minor (z-z)	a	0,210	49572291,6	0,026	0,482	1,000	34648,000
MinorB(z-z)	a	0,210	49572291,6	0,026	0,482	1,000	34648,000
Torsional TF	a	0,210	7883078,273	0,066	0,488	1,000	34648,000

MOMENT DESIGN

	Med	Med,span	Mc,Rd	Mv,Rd	Mn,Rd	Mb,Rd
	Moment	Moment	Capacity	Capacity	Capacity	Capacity
Major (y-y)	6137,280	6137,280	11942,045	11942,045	11942,045	11942,045
Minor (z-z)	-5796,769	-5796,769	11942,045	11942,045	11942,045	11942,045

	Curve	AlphaLT	LambdaBarLT	PhiLT	ChiLT	C1	Mcr
LTB	d	0,760	0,029	0,435	1,000	1,054	14585935,68

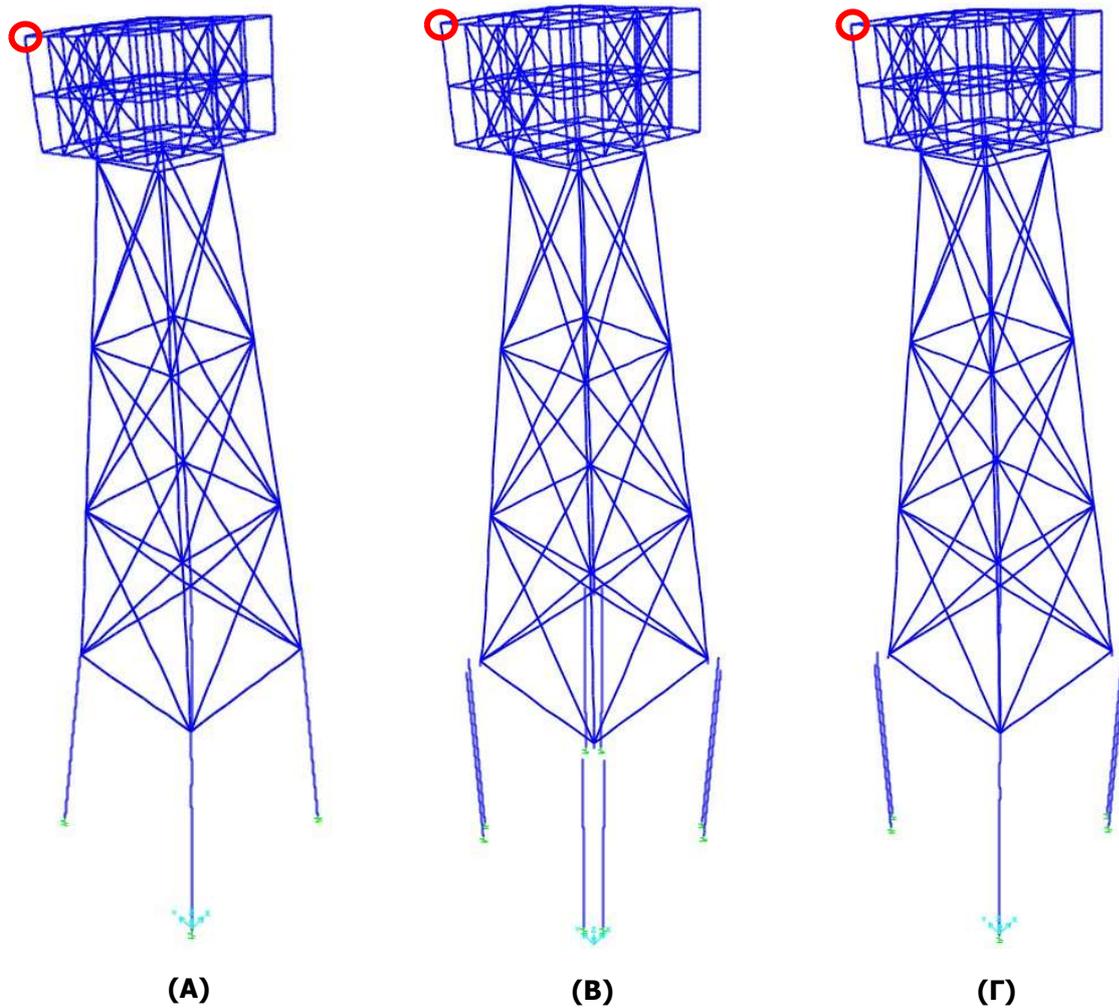
	kyy	kyz	kzy	kzz
Factors	0,951	0,923	0,761	0,923

SHEAR DESIGN

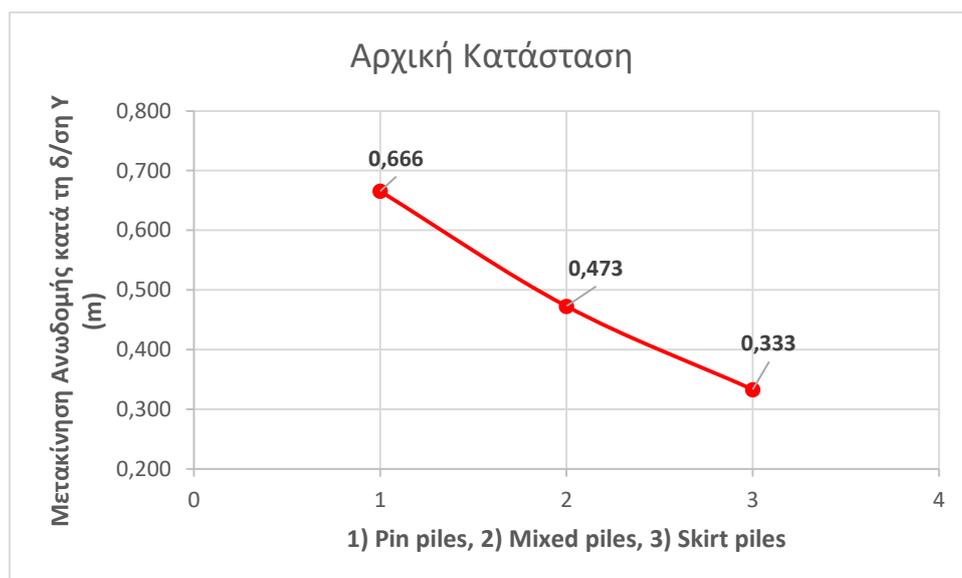
	Ved	Ted	Vc,Rd	Stress	Status
	Force	Torsion	Capacity	Ratio	Check
Major (z)	792,509	0,000	12734,956	0,062	OK
Minor (y)	1146,961	0,000	12734,956	0,090	OK

	Vp1,Rd	Eta	LambdaBarW
Reduction	12734,956	1,200	0,000

Εικόνα 5.29: Έλεγχος του δυσμενέστερου τμήματος των πασσάλων για το προσομοίωμα με χρήση *mixed piles* κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού φόρτισης OKA7.



Εικόνα 5.30: Μέγιστη μετατόπιση του φορέα κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής. Α) *pin piles*, Β) *skirt piles*, Γ) *mixed piles*.



Εικόνα 5.31: Σύγκριση μετατοπίσεων του φορέα κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής.





## 6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

### 6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο πρόκειται να συγκριθεί η επιρροή της διαφοροποίησης ορισμένων παραμέτρων στην συμπεριφορά της υπό εξέταση υπεράκτιας κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για τις εξής παραμέτρους:

- Μήκος πασσάλων
- Πυκνότητα εδάφους
- Πρότυπο διαστασιολόγησης

Σε κάθε προσομοίωμα γίνεται εκ νέου διαστασιολόγηση, ώστε να τηρούνται οι έλεγχοι στατικής ανάλυσης όπως συντελέστηκαν στο κεφάλαιο 5.5. Σε κάθε παραμετρική διαφοροποίηση γίνεται σύγκριση των μετακινήσεων της άκρης του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη διεύθυνση του άξονα Y, η οποία είναι και η μέγιστη μετακίνηση που πραγματοποιείται.

### 6.2 Μήκος Πασσάλων

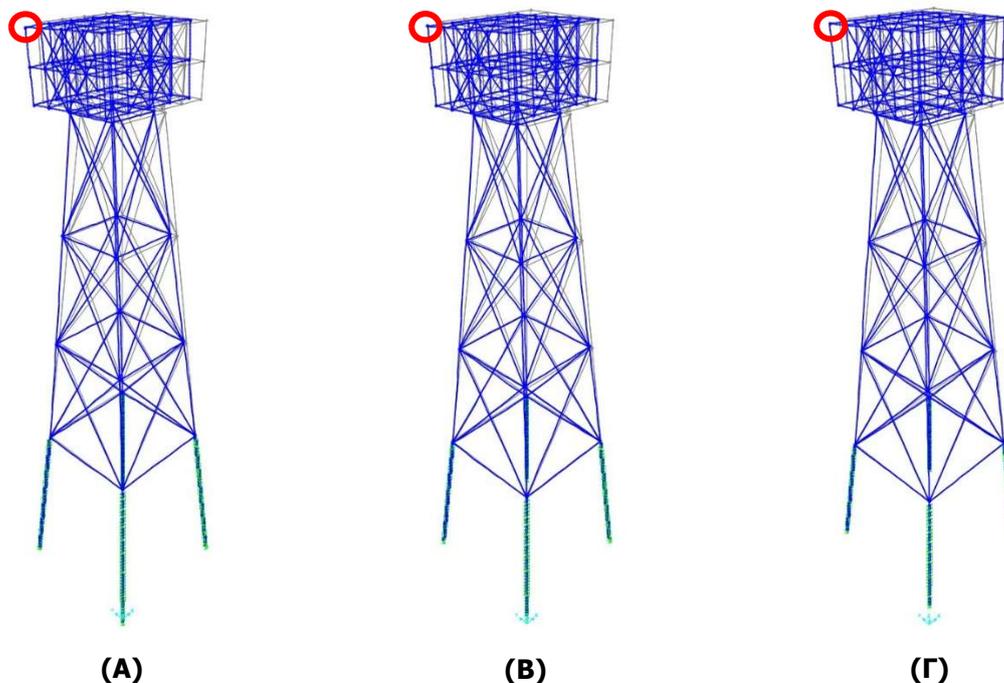
Το μήκος των πασσάλων είναι καθοριστικός παράγοντας στην συμπεριφορά της υπεράκτιας κατασκευής. Επηρεάζει την οριακή πλευρική τριβή  $Q_s$  σύμφωνα με τη σχέση 5-7 (βλ. κεφάλαιο 5), αλλά και την οριακή αντίσταση αιχμής  $Q_b$ , αφού αυξάνεται η επιφόρτιση του εδάφους με την αύξηση του βάθους θεμελίωσης σύμφωνα με τις σχέσεις 5-6 και 5-8. Τελικώς, επηρεάζεται το οριακό αξονικό φορτίο  $Q_u$  σύμφωνα με τη σχέση 5-5. Έτσι, η αντίσταση των ελατηρίων στην βάση των πασσάλων αλλάζει με επιρροή στην κατακόρυφη μετατόπιση των πασσάλων, συνεπώς και σε ολόκληρη την κατασκευή.

Στον πίνακα 6.1 και στις εικόνες 6.1 και 6.2 φαίνεται η επιρροή της μείωσης του μήκους των πασσάλων τύπου *pin* από τα 40 m αρχικού μήκους στα 35 m και 30 m, αντίστοιχα στον πίνακα 6.2 και στις εικόνες 6.3, 6.4 φαίνεται η επιρροή της μείωσης του μήκους των πασσάλων τύπου *skirt* και στον πίνακα 6.3 και στις εικόνες 6.5 και 6.6 φαίνεται η επιρροή της μείωσης του μήκους των πασσάλων τύπου *mixed*.

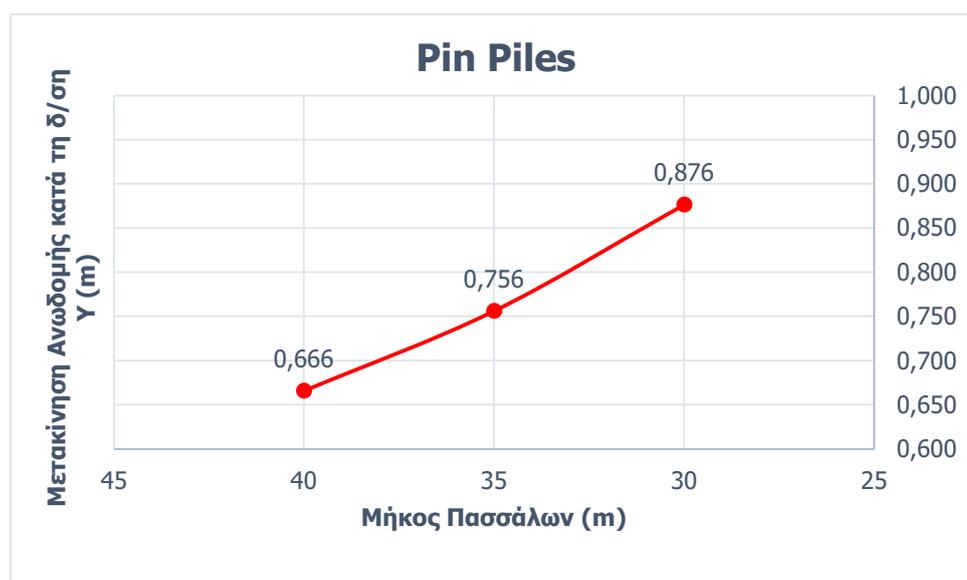
Στην εικόνα 6.7 συγκεντρώνονται τα δεδομένα της επιρροής της μείωσης του μήκους των πασσάλων από τα 40 m αρχικού μήκους στα 35 m και 30 m για τους τρεις τύπους προσομοιωμάτων *pin*, *skirt* και *mixed*, βάσει της οποίας προκύπτει ότι με μείωση του μήκους των πασσάλων κατά 25% είναι δυνατή η *αύξηση της μετατόπισης της υπεράκτιας υπό μελέτη κατασκευής έως και 32%*. Αναλυτικά όλα τα ποσοστά επιρροής της μετατόπισης της κατασκευής λόγω της μεταβολής του μήκους των πασσάλων στο εκάστοτε προσομοίωμα καταγράφονται στον πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.1: Με την αύξηση του μήκους των πασσάλων τύπου *pin* αυξάνεται το οριακό αξονικό φορτίο  $Q_u$ , με το οποίο ορίζεται η αντίσταση των κατακόρυφων ελατηρίων.

z [m]	$\sigma_{vb}'$ [kN/m]	qb [kN]	$Q_b$ [kN]	$f_s$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_s$ [kN]	$Q_u$ [kN]
30,0	300,00	24037,05	15291,71	345,30	29289,14	<b>44580,85</b>
35,0	350,00	28043,23	17840,33	402,85	39865,77	<b>57706,11</b>
40,0	400,00	32049,4	20388,95	460,40	52069,58	<b>72458,53</b>



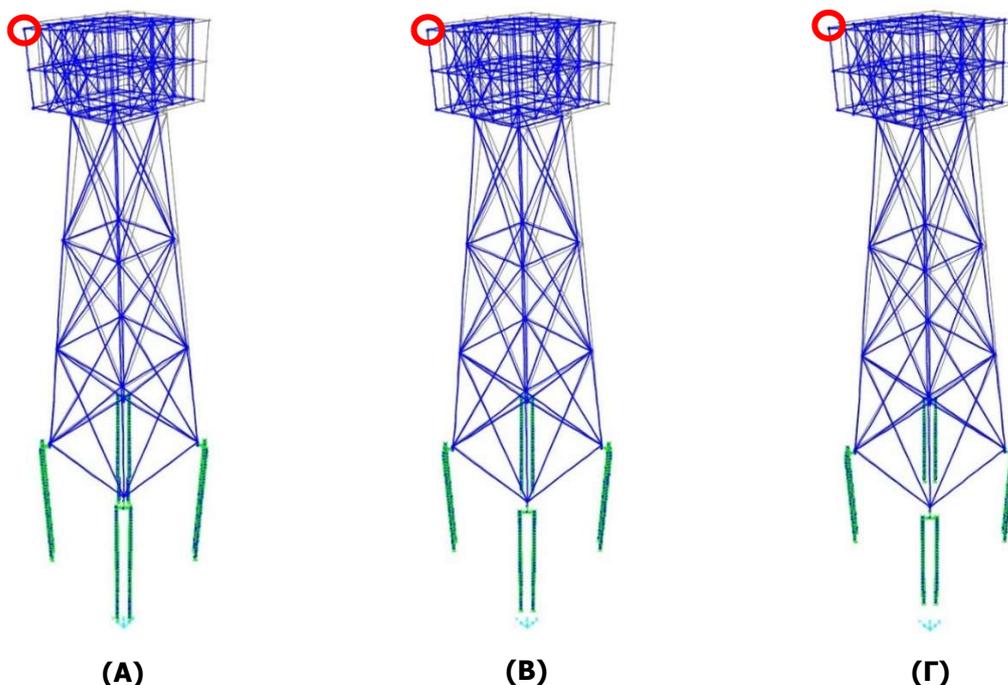
Εικόνα 6.1: Μέγιστη μετατόπιση του προσομοιώματος με *pin piles* κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού OKA7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής. Α) πάσσαλοι μήκους 40 m, Β) πάσσαλοι μήκους 35 m, Γ) πάσσαλοι μήκους 30 m.



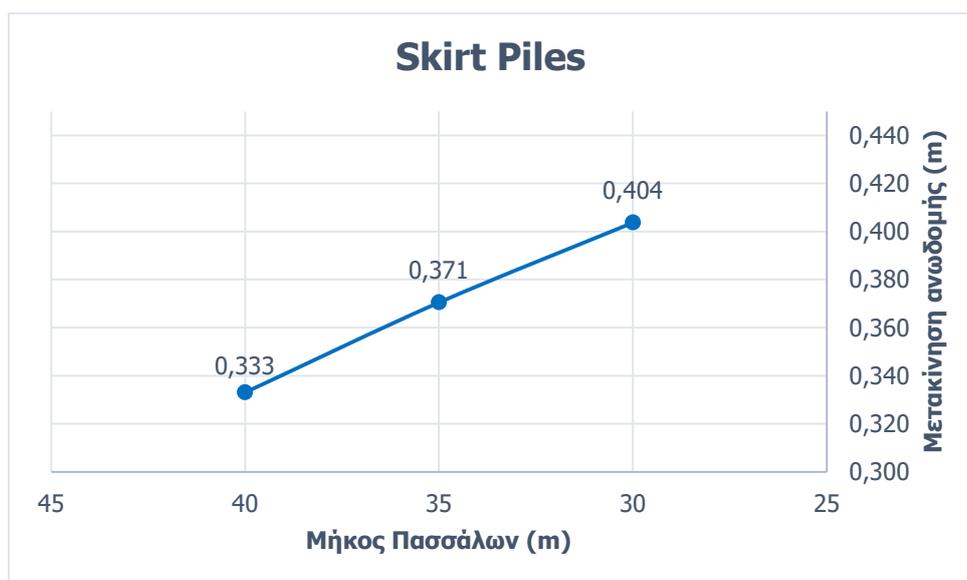
Εικόνα 6.2: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με *pin piles* κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού OKA7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής.

Πίνακας 6.2: Με την αύξηση του μήκους των πασσάλων τύπου *skirt* αυξάνεται το οριακό αξονικό φορτίο  $Q_u$ , με το οποίο ορίζεται η αντίσταση των κατακόρυφων ελατηρίων.

z [m]	$\sigma_{vb}'$ [kN/m]	qb [kN]	Qb [kN]	fs [kN/m <sup>2</sup> ]	Qs [kN]	Qu [kN]
30,0	300,00	24037,05	37002,17	345,30	45560,88	<b>82563,05</b>
35,0	350,00	28043,23	43169,20	402,85	62013,43	<b>105182,62</b>
40,0	400,00	32049,4	49336,23	460,40	80997,13	<b>130333,35</b>



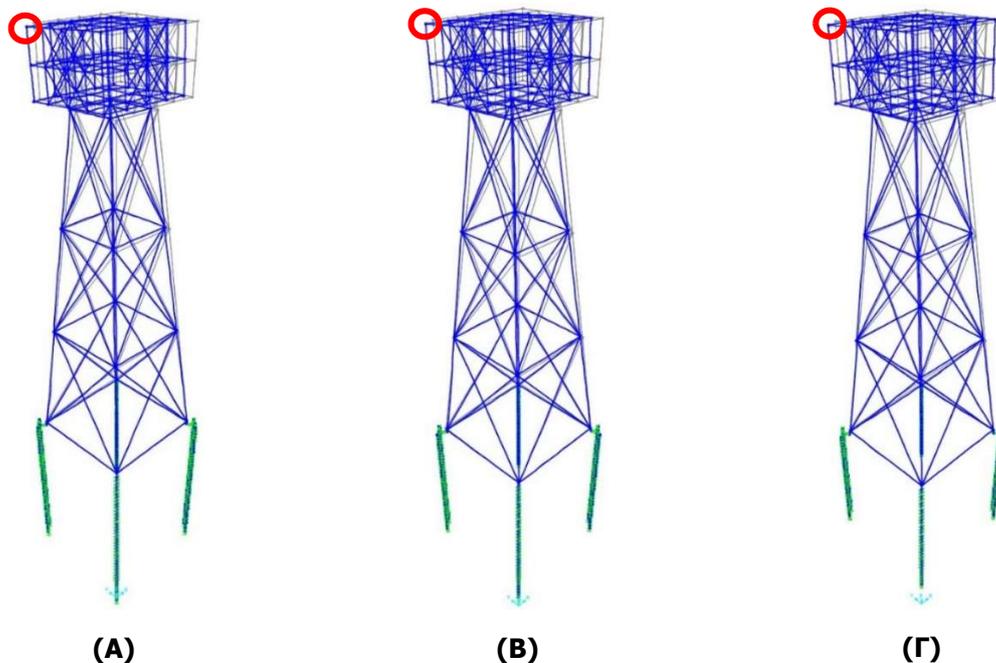
Εικόνα 6.3: Μέγιστη μετατόπιση του προσομοιώματος με *skirt piles* κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής. Α) πάσσαλοι μήκους 40 m, Β) πάσσαλοι μήκους 35 m, Γ) πάσσαλοι μήκους 30 m.



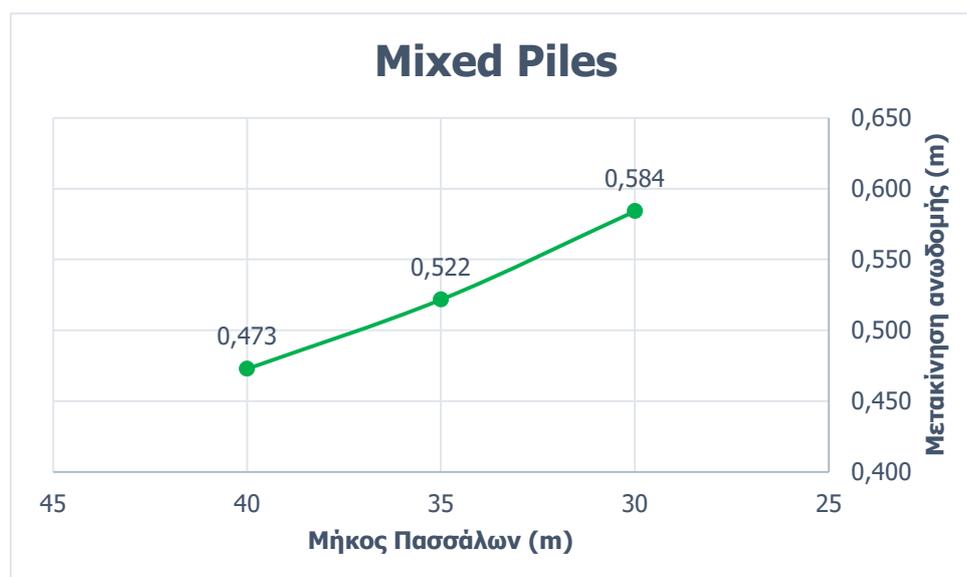
Εικόνα 6.4: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με *skirt piles* κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση του μήκους των πασσάλων.

Πίνακας 6.3: Με την αύξηση του μήκους των πασσάλων τύπου *mixed* αυξάνεται το οριακό αξονικό φορτίο  $Q_u$ , με το οποίο ορίζεται η αντίσταση των κατακόρυφων ελατηρίων.

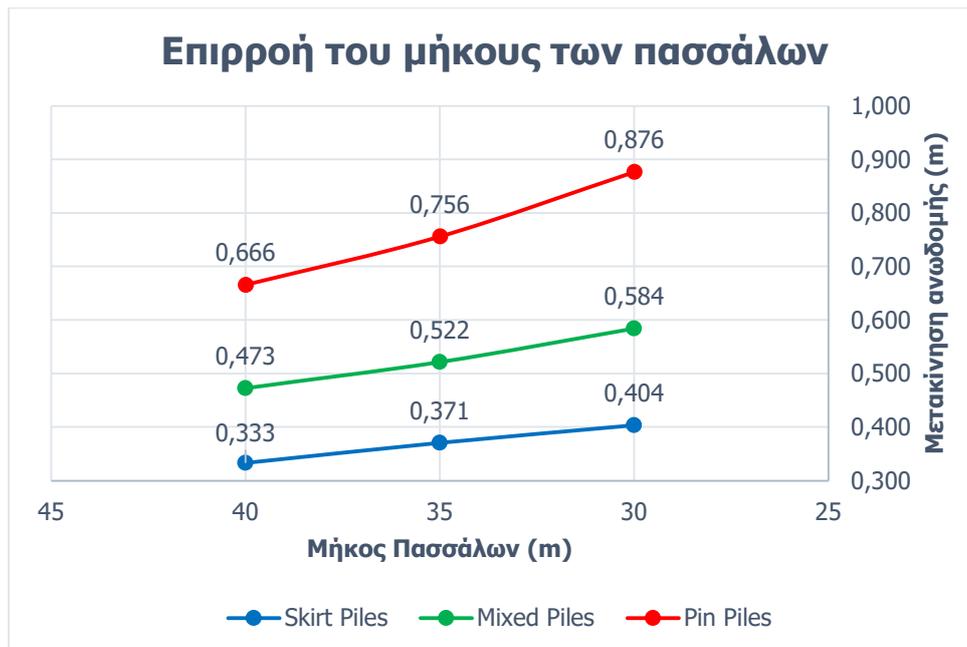
z [m]	$\sigma_{vb}'$ [kN/m]	qb [kN]	Qb [kN]	fs [kN/m <sup>2</sup> ]	Qs [kN]	Qu [kN]
30,0	300,00	24037,05	27185,27	345,30	39052,19	<b>66237,45</b>
35,0	350,00	28043,23	31716,14	402,85	53154,37	<b>84870,51</b>
40,0	400,00	32049,4	36247,02	460,40	69426,11	<b>105673,13</b>



Εικόνα 6.5: Μέγιστη μετατόπιση του προσομοιώματος με *mixed piles* κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής. Α) πάσσαλοι μήκους 40 m, Β) πάσσαλοι μήκους 35 m, Γ) πάσσαλοι μήκους 30 m.



Εικόνα 6.6: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με *mixed piles* κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση του μήκους των πασσάλων.



Εικόνα 6.7: Συγκέντρωση δεδομένων μετατόπισης των τριών προσομοιωμάτων *pin*, *skirt* και *mixed* κατά τη διεύθυνση Υ στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση του μήκους των πασσάλων.

Πίνακας 6.4: Ποσοστά επιρροής της μετατόπισης κατά τη διεύθυνση Υ στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής λόγω της μεταβολής του μήκους των πασσάλων στο εκάστοτε προσομοίωμα.

Μήκος πασσάλων	pin piles	skirt piles	mixed piles
40m -> 35m	14%	11%	10%
35m -> 30m	16%	9%	12%
<b>Σύνολο</b>	<b>32%</b>	<b>21%</b>	<b>24%</b>

### 6.3 Πυκνότητα του Εδάφους

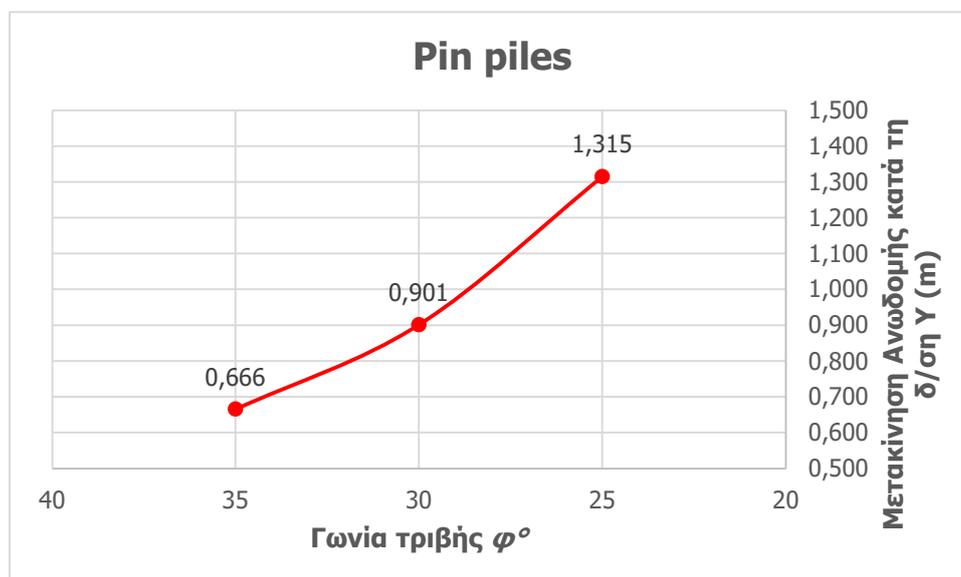
Η πυκνότητα του εδάφους και συνεπώς η ποιότητα αυτού είναι μείζονος σημασίας στην συμπεριφορά κάθε υπέργειας, αλλά και υπόγειας κατασκευής. Όταν το έδαφος είναι πυκνότερο ασκεί μεγαλύτερη αντίσταση στις θεμελιώσεις της κατασκευής κατά πιθανές μετατοπίσεις εκείνης. Ως εκ τούτου αναμένονται μικρότερες μετακινήσεις και καλύτερη συμπεριφορά της κατασκευής.

Κατά την παραμετρική διερεύνηση της πυκνότητας του εδάφους μειώνεται η γωνία εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$  από 35° (πυκνό έδαφος), στις αρχικές συνθήκες, σε 30° (έδαφος μέσης πυκνότητας) και 25° (χαλαρό έδαφος).

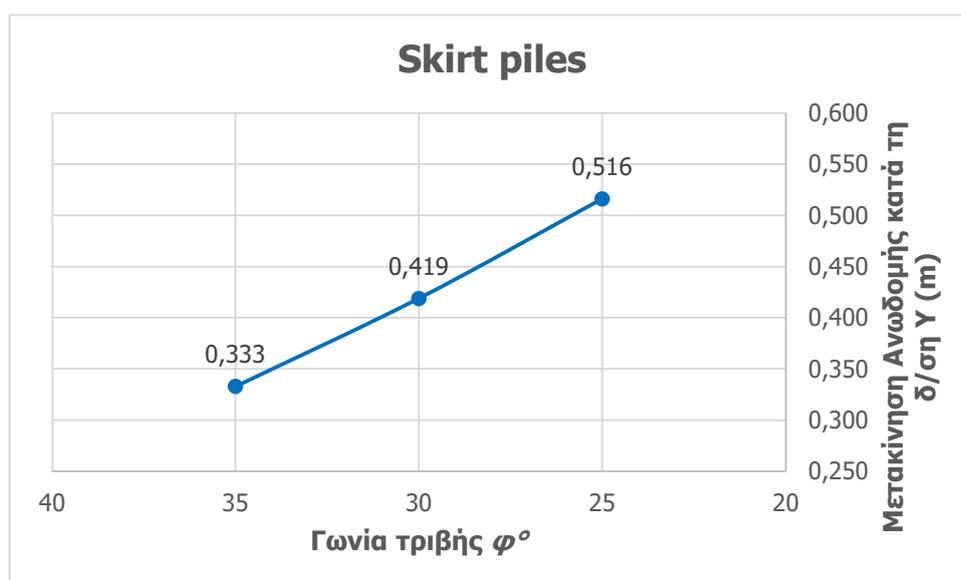
Παράλληλα, αλλάζουν και συντελεστές όπως οι συντελεστές  $C_1$ ,  $C_2$  και  $C_3$ , οι οποίοι επιλέγονται από την εικόνα 5.2 συναρτήσει της εσωτερικής γωνίας τριβής  $\varphi^\circ$ , η σταθερά του δείκτη εδάφους  $n_h$  (πίνακας 5.5) και ο συντελεστής πλευρικής ώθησης  $K$  (σχέση 5-12). Σύμφωνα με τις σχέσεις του κεφαλαίου 5.4.1 προκύπτουν νέες καμπύλες  $p$ - $\gamma$  επηρεάζοντας την αντίσταση των πλευρικών μη-γραμμικών ελατηρίων και σύμφωνα με τις σχέσεις του κεφαλαίου 5.4.2 επηρεάζεται η αντίσταση των κατακόρυφων ελατηρίων στην βάση των πασσάλων.

Στις εικόνες 6.8, 6.9, 6.10 και συνολικά στην εικόνα 6.11 απεικονίζεται η επιρροή της μείωσης της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$ .

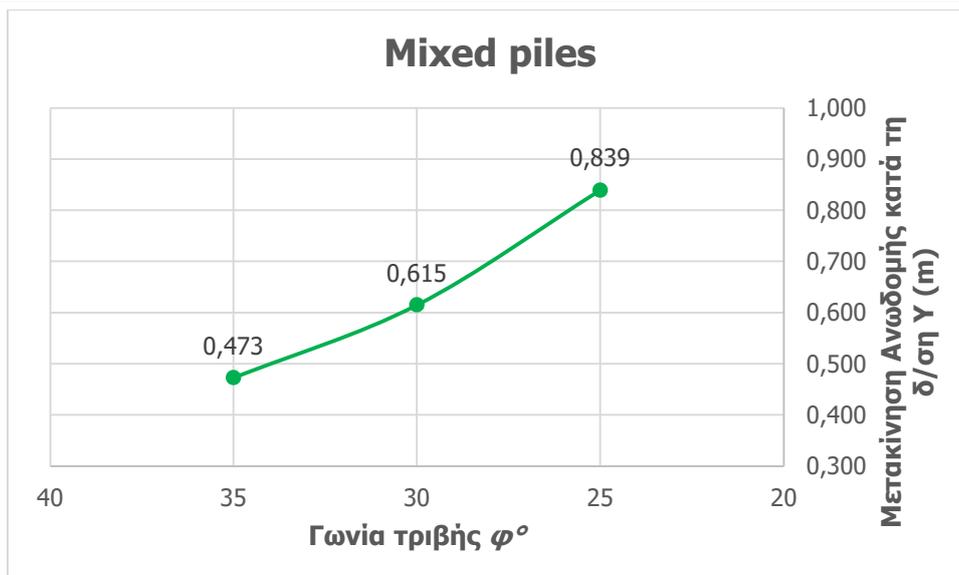
Βάσει της εικόνας 6.11 προκύπτει ότι με μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$  είναι δυνατή η *αύξηση της μετατόπισης της υπεράκτιας υπό μελέτη κατασκευής έως και 97%*. Αναλυτικά όλα τα ποσοστά επιρροής της μετατόπισης της κατασκευής λόγω της μεταβολής του μήκους των πασσάλων στο εκάστοτε προσομοίωμα καταγράφονται στον πίνακα 6.5.



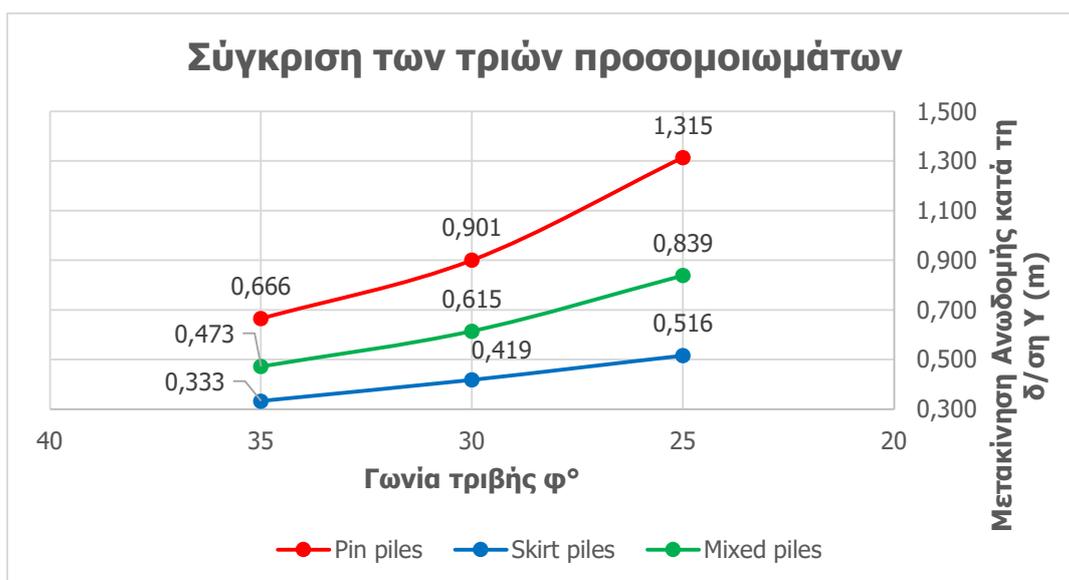
Εικόνα 6.8: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με *pin piles* κατά τη διεύθυνση Υ στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$ .



Εικόνα 6.9: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με *skirt piles* κατά τη διεύθυνση Υ στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$ .



Εικόνα 6.10: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με *mixed piles* κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού OKA7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$ .



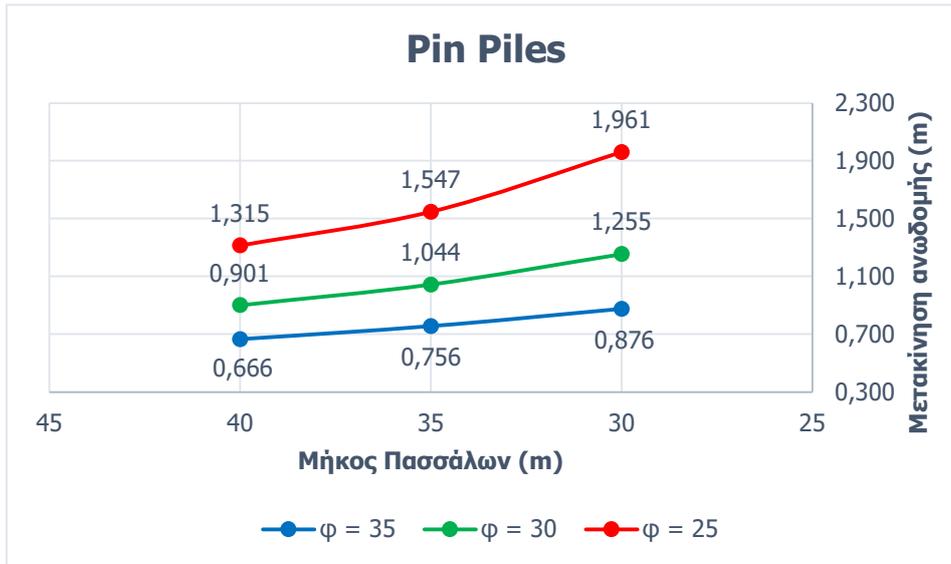
Εικόνα 6.11: Συγκέντρωση δεδομένων μετατόπισης των τριών προσομοιωμάτων *pin*, *skirt* και *mixed* κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού OKA7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$ .

Πίνακας 6.5: Ποσοστά επιρροής της μετατόπισης κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού OKA7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής λόγω της μεταβολής της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$  στο εκάστοτε προσομοίωμα.

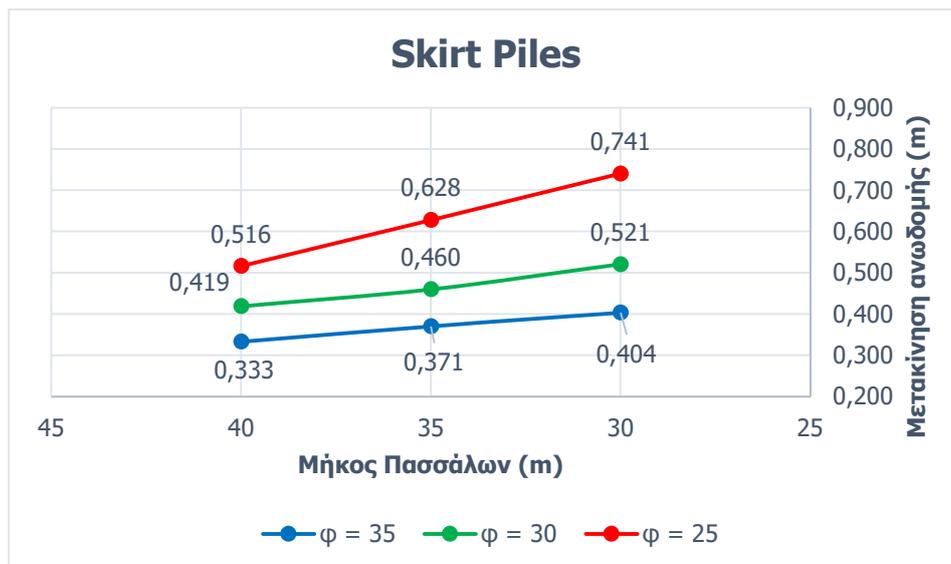
Πυκνότητα εδάφους	pin piles	skirt piles	mixed piles
35° -> 30°	35%	26%	30%
30° -> 25°	46%	23%	36%
<b>Σύνολο</b>	<b>97%</b>	<b>55%</b>	<b>77%</b>

## 6.4 Συνδυασμός Μήκους Πασσάλων και Πυκνότητας Εδάφους

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει ο συνδυασμός παραμετρικής διερεύνησης με ταυτόχρονη μείωση του μήκους των πασσάλων και της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$ . Η ταυτόχρονη αυτή μείωση των δύο παραμέτρων μπορεί να προκαλέσει *αύξηση στην μετατόπιση κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής έως και 194%*. Η επιρροή του συνδυασμού των δύο παραμέτρων αποτυπώνεται στα διαγράμματα των εικόνων 6.12 (προσομοίωμα με *pin piles*), 6.13 (προσομοίωμα με *skirt piles*) και 6.14 (προσομοίωμα με *mixed piles*), ενώ τα αναλυτικά ποσοστά κάθε μεταβολής φαίνονται στον πίνακα 6.6.

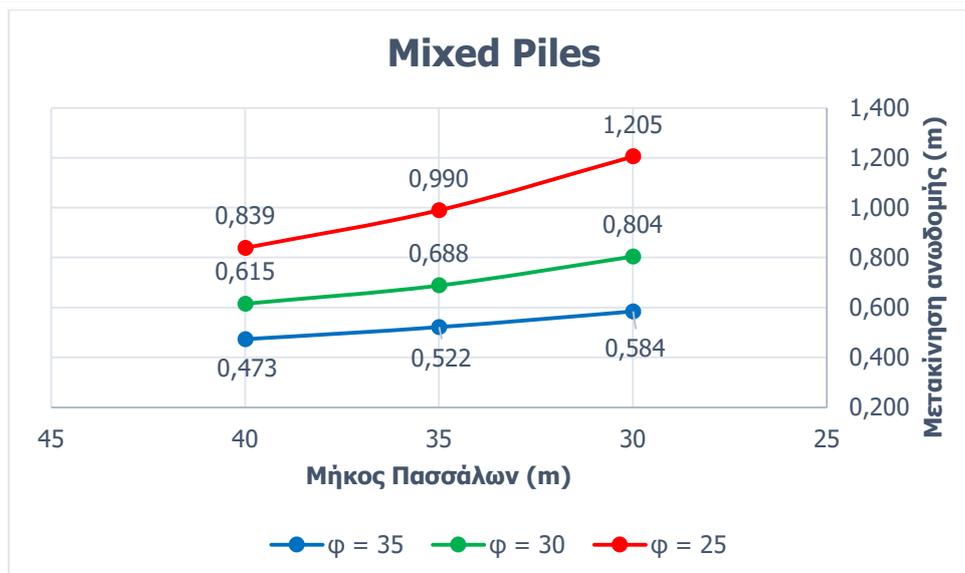


Εικόνα 6.12: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με *pin piles* κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση του μήκους των πασσάλων για διαφορετικές γωνίες εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$ .



Εικόνα 6.13: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με *skirt piles* κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση του μήκους των πασσάλων για διαφορετικές γωνίες εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$ .





Εικόνα 6.14: Σύγκριση μετατοπίσεων του προσομοιώματος με *mixed piles* κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη μείωση του μήκους των πασσάλων για διαφορετικές γωνίες εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$ .

Πίνακας 6.6: Ποσοστά επιρροής της μετατόπισης κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του συνδυασμού ΟΚΑ7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής λόγω του συνδυασμού της μεταβολής του μήκους των πασσάλων και της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$  στο εκάστοτε προσομοίωμα.

Πυκνότητα εδάφους	Μήκος πασσάλων	pin piles	skirt piles	mixed piles
$\varphi = 35^\circ$	40m -> 35m	14%	11%	10%
	35m -> 30m	16%	9%	12%
	<b>Σύνολο</b>	<b>32%</b>	21%	24%
$\varphi = 30^\circ$	40m -> 35m	16%	10%	12%
	35m -> 30m	20%	13%	17%
	<b>Σύνολο</b>	<b>39%</b>	24%	31%
$\varphi = 25^\circ$	40m -> 35m	18%	22%	18%
	35m -> 30m	27%	18%	22%
	<b>Σύνολο</b>	<b>49%</b>	43%	44%
35° -> 30°	Πασσάλοι 40m	35%	26%	30%
30° -> 25°		46%	23%	36%
<b>Σύνολο</b>		<b>97%</b>	55%	77%
35° -> 30°	Πασσάλοι 35m	38%	24%	32%
30° -> 25°		48%	37%	44%
<b>Σύνολο</b>		<b>105%</b>	70%	90%
35° -> 30°	Πασσάλοι 30m	43%	29%	38%
30° -> 25°		56%	42%	50%
<b>Σύνολο</b>		<b>124%</b>	83%	106%
<b>35° -&gt; 25°</b>	<b>40m -&gt; 30m</b>	<b>194%</b>	122%	155%

## 6.5 Πρότυπο Διαστασιολόγησης

Δύο ευρέως χρησιμοποιούμενα σύνολα προτύπων σχεδιασμού για υπεράκτιες κατασκευές είναι οι συνιστώμενες πρακτικές του Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίου (API) και οι Ευρωκώδικες. Παρόλο που τα δύο σύνολα προτύπων παρέχουν ολοκληρωμένη καθοδήγηση σχετικά με τον σχεδιασμό, την ανάλυση και την κατασκευή υπεράκτιων κατασκευών, υπάρχουν ορισμένες βασικές διαφορές μεταξύ των δύο προσεγγίσεων.

### Συνιστώμενες πρακτικές του Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίου (API):

Οι Συνιστώμενες Πρακτικές του API είναι μια σειρά εγγράφων που αναπτύχθηκαν από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου (API) για την παροχή καθοδήγησης σχετικά με τον σχεδιασμό, την ανάλυση, την κατασκευή και την επιθεώρηση των υπεράκτιων κατασκευών. Τα έγγραφα αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου και θεωρούνται το καθορισμένο πρότυπο για το σχεδιασμό υπεράκτιων κατασκευών στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Τα έγγραφα API RP βασίζονται συνήθως στην συμπεριφορά και στις επιδόσεις της κατασκευής, πράγμα που σημαίνει ότι επικεντρώνονται στη συνολική απόδοση της κατασκευής και όχι σε κανονιστικές διατάξεις σχεδιασμού. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στη διαδικασία σχεδιασμού, αλλά απαιτεί επίσης λεπτομερέστερη κατανόηση των φορτίων στα οποία θα υποβληθεί η κατασκευή.

### Ευρωκώδικες:

Οι Ευρωκώδικες είναι ένα σύνολο εναρμονισμένων τεχνικών προδιαγραφών για τον σχεδιασμό κατασκευών στην Ευρώπη. Αναπτύσσονται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN) και προορίζονται να αντικαταστήσουν τα εθνικά πρότυπα των κρατών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Οι Ευρωκώδικες είναι συνήθως κανονιστικοί, δηλαδή παρέχουν λεπτομερείς κανόνες σχεδιασμού που πρέπει να ακολουθούνται. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να καταστήσει τη διαδικασία σχεδιασμού πιο απλή, αλλά μπορεί επίσης να είναι λιγότερο ευέλικτη από την προσέγγιση των εγγράφων API RP που βασίζεται στην συνολική απόδοση της κατασκευής.

### Βασικές διαφορές μεταξύ API και Ευρωκώδικα:

- Συντελεστές φορτίων: Στις συνιστώμενες πρακτικές του API χρησιμοποιούν συνήθως μια προσέγγιση σχεδιασμού με *συντελεστή φορτίου και αντίστασης (LRFD)*, ενώ οι Ευρωκώδικες χρησιμοποιούν συνήθως μια προσέγγιση με *μερικό συντελεστή ασφαλείας (PSF)*. Η μέθοδος LRFD είναι μια πιθανολογική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα των φορτίων και της αντίστασης της κατασκευής. Η μέθοδος PSF είναι μια ντετερμινιστική προσέγγιση που χρησιμοποιεί σταθερούς πολλαπλασιαστές για να λάβει υπόψη την αβεβαιότητα.
- Συντελεστές ασφαλείας: Οι συνιστώμενες πρακτικές του API και οι Ευρωκώδικες χρησιμοποιούν διαφορετικούς συντελεστές ασφαλείας για να διασφαλίσουν ότι οι υπεράκτιες κατασκευές είναι ασφαλείς. Κατά το πρότυπο API RP χρησιμοποιείται συνήθως ένα επίπεδο αξιοπιστίας της τάξης του  $10^{-4}$ , ενώ οι Ευρωκώδικες χρησιμοποιούν συνήθως ένα επίπεδο αξιοπιστίας τάξεως  $10^{-6}$ .
- Έλεγχοι σχεδιασμού: Τα έγγραφα API RP και οι Ευρωκώδικες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις για τους ελέγχους σχεδιασμού. Για παράδειγμα, τα έγγραφα API RP έχουν πιο λεπτομερείς απαιτήσεις για την ανάλυση κόπωσης, ενώ οι Ευρωκώδικες έχουν πιο λεπτομερείς απαιτήσεις για την πυροπροστασία.

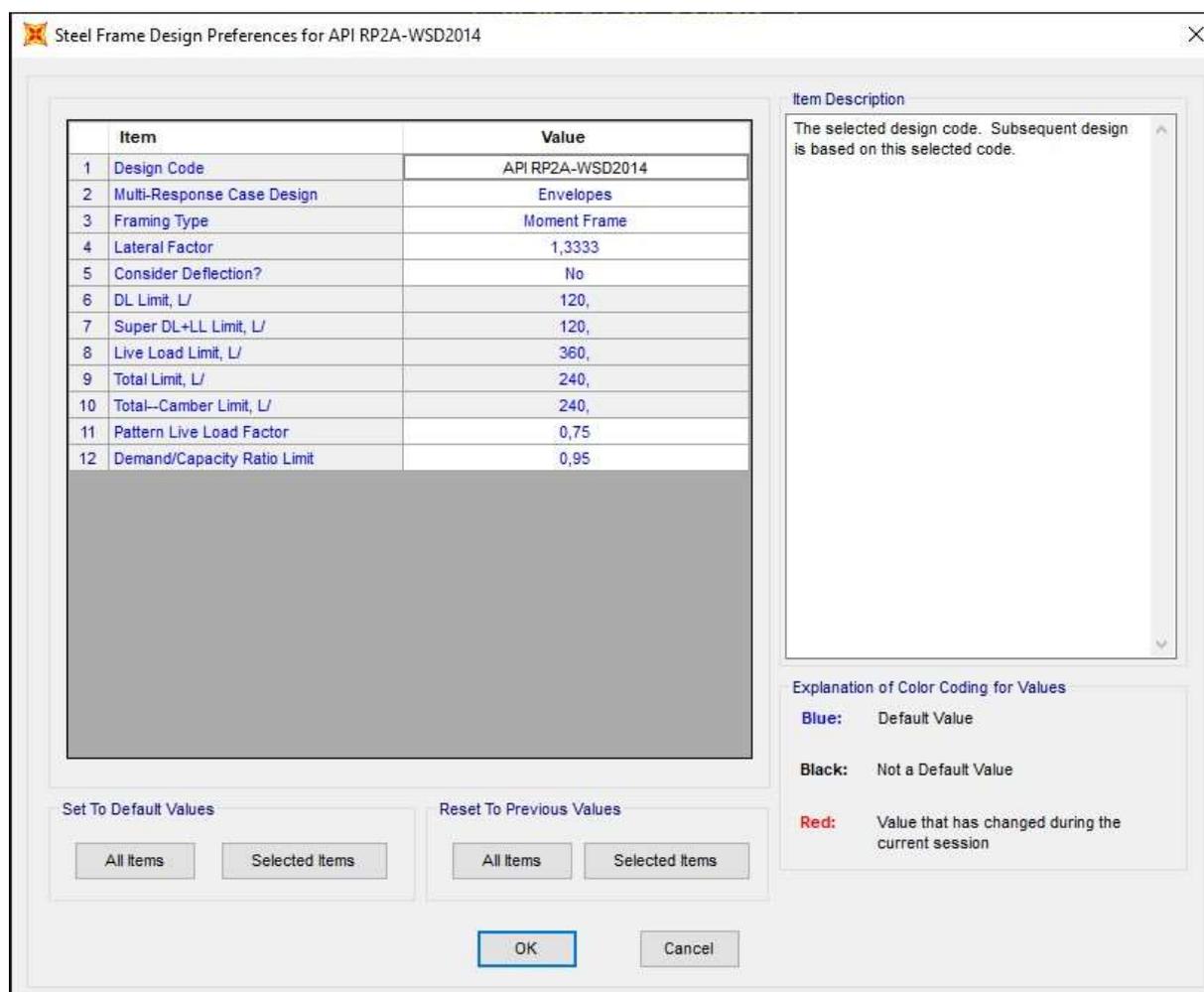
Τα έγγραφα API RP και οι Ευρωκώδικες είναι και τα δύο ολοκληρωμένα και αξιосέβαστα σύνολα προτύπων σχεδιασμού για υπεράκτιες κατασκευές. Η επιλογή του προτύπου που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του έργου, όπως τι επιβάλει η χωροθέτηση αυτού και τις προτιμήσεις των συντελεστών του έργου.

Η προσομοίωση και ο υπολογισμός των φορτίων κατά τα έγγραφα API RP έγινε από το πρόγραμμα SAP2000.

### 6.5.1 Προσομοίωση και Υπολογισμός Φορτίων κατά API

Ο υπολογισμός των *μόνιμων* και των *κινητών* φορτίων από τα κεφάλαια 4.2 και 4.3 παραμένει ίδιος. Το *κυματικό φορτίο*, το οποίο ασκείται στα προσομοιώματα ανά γωνία 45°, παραμένει επίσης ίδιο, καθώς προσομοιώνεται σύμφωνα με το πρότυπο του API WSD2000 στο πρόγραμμα SAP2000. (εικόνα 6.15)

Η προσομοίωση στο πρόγραμμα του SAP2000 γίνεται σύμφωνα με τις αρχικές συνθήκες, δηλαδή χωρίς κάποια επιρροή στο μήκος των πασσάλων (40 m) ή την πυκνότητα του εδάφους ( $\varphi = 35^\circ$ ).



Εικόνα 6.15: Προτιμήσεις διαστασιολόγησης σύμφωνα με το πρότυπο του API RP2A-WSD2014 στο λογισμικό SAP2000.

#### 6.5.1.1 Φορτίο Ανέμου

Η εισαγωγή του φορτίου του ανέμου στο πρόγραμμα προσομοίωσης SAP2000 γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο API 4F 2013, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.16.

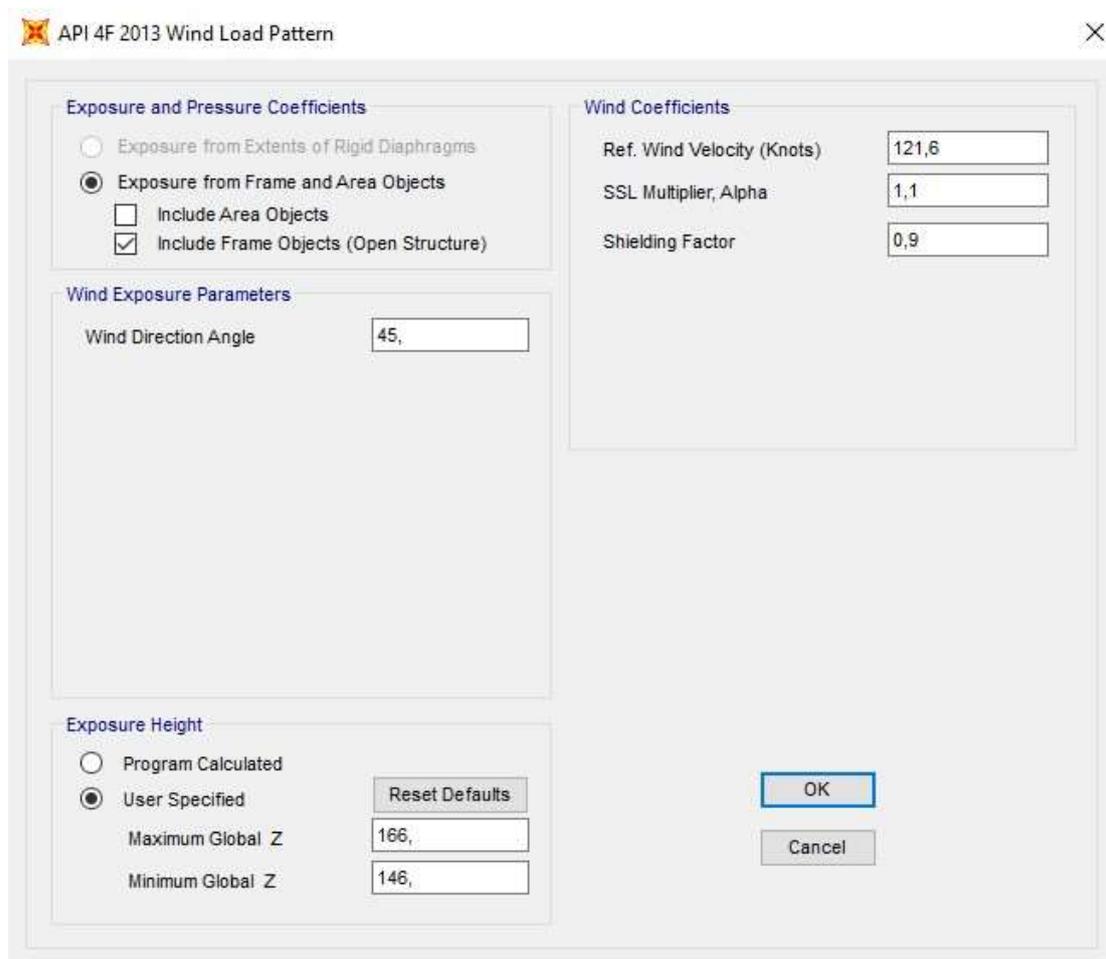
Η δύναμη-φορτίο του ανέμου ασκείται στα προσομοιώματα ανά γωνία 45°, ενώ η ταχύτητα ανέμου αναφοράς λαμβάνεται ίση με τη μέση ταχύτητα του ανέμου  $v_m(z)$  σε ύψος  $z$  σύμφωνα με τη σχέση 4-2 και μετατρέπεται σε μονάδες μέτρησης Knots (κόμβους).

Επιλέγονται οι μέσες τιμές για δύο συντελεστές του πρότυπου API 4F 2013:

- Πολλαπλασιαστής SSL:
 

Ο πολλαπλασιαστής SSL προσαρμόζει τη βασική ταχύτητα του ανέμου ώστε να ληφθούν υπόψη οι ειδικές συνθήκες της περιοχής. Σύμφωνα με το API 4F, ο πολλαπλασιαστής αυτός μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με παράγοντες όπως η γεωγραφική θέση, το έδαφος και τα τοπικά μετεωρολογικά δεδομένα. Συνήθως κυμαίνεται από 1,0 έως 1,2. Λαμβάνεται τιμή ίση με 1,1.
- Συντελεστής θωράκισης (Shielding Factor):
 

Ο συντελεστής θωράκισης υπολογίζει τη μείωση του φορτίου ανέμου στα υπήνεμα μέλη, λόγω της επίδρασης θωράκισης των υπήνεμων μελών. Το API 4F προτείνει συντελεστές με βάση την απόσταση και τη διάταξη των δομικών στοιχείων. Γενικά, ο συντελεστής θωράκισης κυμαίνεται από 0,8 έως 1,0. Λαμβάνεται τιμή ίση με 0,9.



Εικόνα 6.16: Εισαγωγή του φορτίου του ανέμου στο πρόγραμμα προσομοίωσης SAP2000 σύμφωνα με το πρότυπο API 4F 2013.

### 6.5.1.2 Σεισμικές Δράσεις

Σύμφωνα με το βιβλίο «Offshore Structures, Design, Construction and Maintenance» του El-Reedy Mohamed A. η σεισμική φόρτιση θα πρέπει να προσδιορίζεται με ανάλυση φάσματος απόκρισης σύμφωνα με το API RP2A ή το UBC 1997 και ο τρόπος υπολογισμού του σεισμικού φορτίου θα πρέπει να αναφέρεται στο έγγραφο βάσης σχεδιασμού. Καθώς το πρότυπο API RP2A δεν υπάρχει στο λογισμικό του SAP2000 χρησιμοποιείται το πρότυπο UBC 1997 για την εισαγωγή της σεισμικής δράσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.17

Επιλέγεται *τύπος εδάφους C*, κατά τον οποίο συναντώνται βαθιές, ισχυρές άμμοι, ιλύες και άκαμπτες άργιλοι με πάχος μεγαλύτερο από περίπου 61 m και υπερκείμενα βραχοειδή υλικά με διατμητική αντοχή με αστράγγιστες συνθήκες από 50 έως 100 kPa με τυποποιημένη δοκιμή διείδυσης από 15 έως 50 χτύπους.

Επιλέγεται εδαφική επιτάχυνση 0,30 g, ενώ στην εικόνα 6.17 φαίνεται η σύγκριση του συντελεστή σεισμικής ζώνης με την εδαφική επιτάχυνση για τα πρότυπα API και UBC.

Στην εικόνα 6.18 εμφανίζονται δύο ακόμη παράμετροι του πρότυπου UBC 1997:

- Συντελεστής σπουδαιότητας  $I$ :

Χρησιμοποιείται για την προσαρμογή των δυνάμεων σεισμικών δράσεων με βάση τη σημασία και την κατηγορία χρήσης της κατασκευής. Αντανακλά την ανάγκη για υψηλότερη αξιοπιστία και απόδοση για κατασκευές που είναι κρίσιμες για την ανθρώπινη ασφάλεια, απαραίτητες για την αντιμετώπιση καταστροφών ή περιέχουν επικίνδυνα υλικά.

- i. Για κτίρια μικρής σπουδαιότητας ως προς την ασφάλεια του κοινού, όπως αγροτικά οικήματα, λαμβάνεται η τιμή  $I = 1,0$ .
- ii. Για συνήθη ή εμπορικά κτίρια και κατοικίες λαμβάνεται η τιμή  $I = 1,0$ .
- iii. Για κτίρια των οποίων η αντισεισμική αντοχή είναι σημαντική ως προς τις συνέπειες μίας πιθανής αστοχίας, όπως σχολεία, χώροι συνάθροισης κοινού λαμβάνεται η τιμή  $I = 1,25$ .
- iv. Για κτίρια των οποίων η λειτουργία κατά τη διάρκεια του σεισμού είναι ζωτικής σημασίας για την πολιτική προστασία ή αποτελούν απαραίτητες δομές, όπως νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, σταθμοί παραγωγής ενέργειας λαμβάνεται η τιμή  $I = 1,5$ .

Λαμβάνεται η τιμή  $I = 1,5$ .

- Συντελεστής της υπεραντοχής  $R$ :

Για μεταλλικές κατασκευές, όπως η υπό μελέτη κατασκευή, λαμβάνεται η τιμή  $R = 8,5$ .

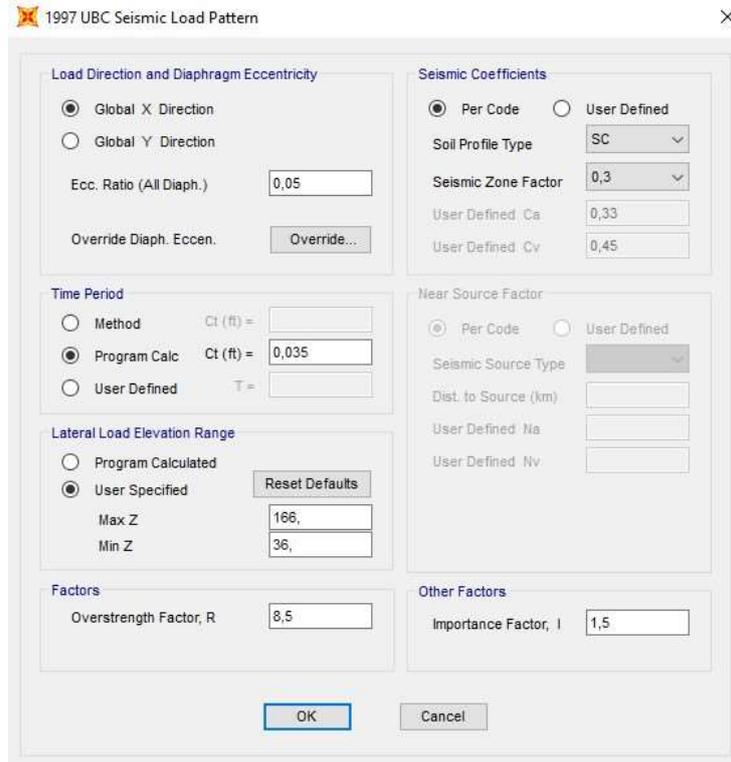
Οι σεισμικές δράσεις λαμβάνονται ως προς τις δύο διευθύνσεις X και Y.

Seismic zone (relative seismicity) factor, $Z^*$	1	2	3	4	5
Horizontal ground acceleration to gravitational acceleration, g in API	0.05	0.10	0.20	0.25	0.40
Horizontal ground acceleration to gravitational acceleration, g in UBC	0.075	0.15	0.20	0.30	0.40

\*The zones in UBC are 1, 2A, 2B, 3, and 4, which corresponds to 1, 2, 3, 4, and 5 in API, respectively.

Εικόνα 6.17: Σύγκριση του συντελεστή σεισμικής ζώνης με την εδαφική επιτάχυνση για τα πρότυπα API και UBC.

(Πηγή: El-Reedy Mohamed A., Ph.D. (2012). «Offshore Structures, Design, Construction and Maintenance». Elsevier, USA.)



Εικόνα 6.18: Εισαγωγή της σεισμικής δράσης κατά τη διεύθυνση X στο πρόγραμμα προσομοίωσης SAP2000 σύμφωνα με το πρότυπο UBC 1997.

### 6.5.1.3 Συνδυασμοί Δράσεων

Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 4.6, σε πραγματικές συνθήκες όλες οι δράσεις που αναλύθηκαν μέχρι τούδε δεν δρουν μεμονωμένα, αλλά συνδυαστικά.

Σύμφωνα με τον El-Reedy Mohamed A. ο συνδυασμός σεισμικής δράσης για το πρότυπο του API είναι:

$$Q = 1,1*G_1 + 1,1*G_2 + 1,1*Q_1 + 0,9*E \quad (6-1)$$

Όπου:

- $E$  είναι η σεισμική δράση
- $G_1$ ,  $G_2$  και  $Q_1$  πρέπει να περιλαμβάνουν φορτία που είναι πιθανόν να ασκούνται στην κατασκευή κατά τη διάρκεια ενός σεισμού.

Ο συνδυασμός δράσης για συνθήκες καταιγίδας 100 χρόνων για το πρότυπο του API είναι:

$$Q = 1,1*G_1 + 1,1*G_2 + 1,0*Q_1 + 1,0*Storm\ Wind + 1,0*Wave \quad (6-2)$$

Όπου *Storm Wind* και *Wave* είναι οι δράσεις του ανέμου και του κύματος αντίστοιχα, οι οποίες ασκούνται ανά γωνία 45°.

Στους πίνακες 6.7, 6.8 και 6.9 εμπεριέχονται οι συνδυασμοί φόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο του API. Από τη σύγκριση των δύο προτύπων (εικόνα 6.19) προκύπτουν μικροδιαφορές στις μετατοπίσεις της κατασκευής.

Ενδιαφέρουσα παρατήρηση αποτελεί ότι κατά τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης του Ευρωκώδικα OKA7, κρίσιμο φορτίο είναι ο άνεμος με συντελεστή 1,5, ενώ κατά το πρότυπο του API το φορτίο του ανέμου έχει συντελεστή ίσο με 1,0. Παρόλα αυτά προκύπτουν παρόμοια αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει, καθώς όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου το πρότυπο του API χρησιμοποιεί μια πιθανολογική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα των φορτίων και της αντίστασης της κατασκευής, ενώ κατά τον Ευρωκώδικα γίνεται μια ντετερμινιστική προσέγγιση που χρησιμοποιεί σταθερούς πολλαπλασιαστές για να λάβει υπόψη την αβεβαιότητα.

Πίνακας 6.7: Συνδυασμοί σεισμικών φορτίσεων σύμφωνα με το πρότυπο του API.

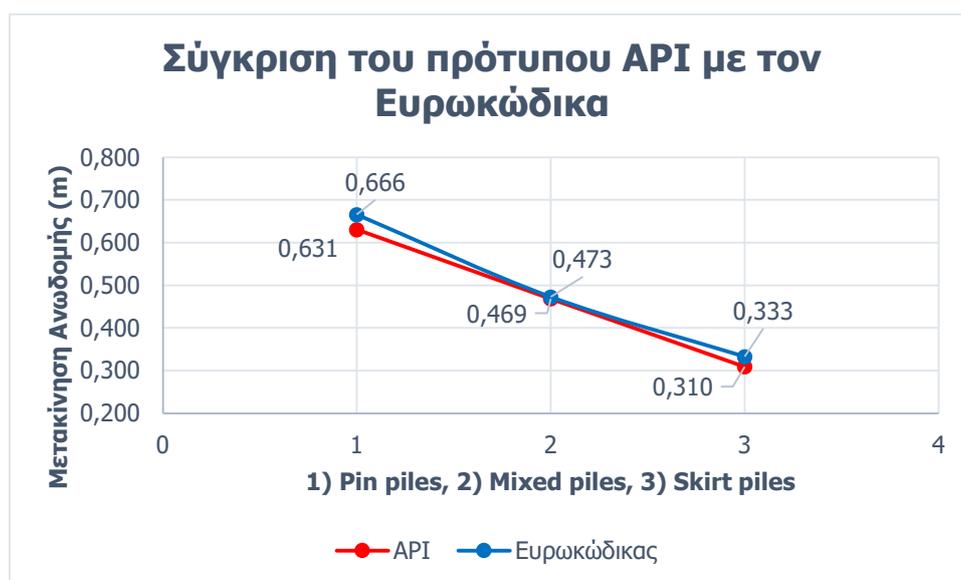
Συνδυασμοί Σεισμικών Φορτίσεων - API			
1 (ΣΕΙΣΜ - API)		2 (ΣΕΙΣΜ - API)	
ίδιο βάρος	1,10	ίδιο βάρος	1,00
εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,10	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,10
κινητό q	1,10	κινητό q	1,10
Ex	<b>0,90</b>	Ey	<b>0,90</b>

Πίνακας 6.8: Συνδυασμοί φορτίσεων σε συνθήκες καταιγίδας 100 χρόνων σύμφωνα με το πρότυπο του API (1).

Συνδυασμοί Φορτίσεων - Συνθήκες Καταιγίδας 100 Χρόνων - API (1)							
STORM 0°		STORM 45°		STORM 90°		STORM 135°	
ίδιο βάρος	1,1	ίδιο βάρος	1,1	ίδιο βάρος	1,1	ίδιο βάρος	1,1
εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,1	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,1	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,1	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,1
κινητό q	1,00	κινητό q	1,00	κινητό q	1,00	κινητό q	1,00
άνεμος 0°	1,00	άνεμος 45°	1,00	άνεμος 90°	1,00	άνεμος 135°	1,00
κύμα 0°	0,75	κύμα 45°	0,75	κύμα 90°	0,75	κύμα 135°	0,75

Πίνακας 6.9: Συνδυασμοί φορτίσεων σε συνθήκες καταιγίδας 100 χρόνων σύμφωνα με το πρότυπο του API (2).

Συνδυασμοί Φορτίσεων - Συνθήκες Καταιγίδας 100 Χρόνων - API (2)							
STORM 180°		STORM 225°		STORM 270°		STORM 315°	
ίδιο βάρος	1,1	ίδιο βάρος	1,1	ίδιο βάρος	1,1	ίδιο βάρος	1,1
εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,1	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,1	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,1	εξοπλισμός - ελικοδρόμιο	1,1
κινητό q	1,00	κινητό q	1,00	κινητό q	1,00	κινητό q	1,00
άνεμος 180°	1,00	άνεμος 225°	1,00	άνεμος 270°	1,00	άνεμος 315°	1,00
κύμα 180°	0,75	κύμα 225°	0,75	κύμα 270°	0,75	κύμα 315°	0,75



Εικόνα 6.19: Σύγκριση των μετατοπίσεων των τριών προσομοιωμάτων κατά τη διεύθυνση Y στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής κατά τη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού ΟΚΑ7 (σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα) και του δυσμενέστερου συνδυασμού Storm 90° (σύμφωνα με το πρότυπο του API).





# 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ & ΙΔΕΕΣ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

## 7.1 Εισαγωγή

Με το παρών κεφάλαιο και την ακόλουθη «Βιβλιογραφία» ολοκληρώνεται η διπλωματική εργασία. Σύμφωνα με τις αναλύσεις που έγιναν στην υπό μελέτη υπεράκτια κατασκευή προέκυψαν ενδιαφέροντα συμπεράσματα, κάποια από τα οποία έχουν ήδη αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια (φυσικά συμπεριλαμβάνονται στο κεφάλαιο 7).

## 7.2 Συμπεράσματα

- 1) Σύμφωνα με τις ιδιομορφές των προσομοιωμάτων που προκύπτουν από τη στατική ανάλυση στο κεφάλαιο 5.5.1 γίνεται μία ενδιαφέρουσα παρατήρηση:  
Κατά τη στροφική ιδιομορφή, τα τρία προσομοιώματα έχουν παρόμοια συμπεριφορά. Ωστόσο, τα προσομοιώματα με *pin piles* και *skirt piles* στην πρώτη ιδιομορφή τους μετατοπίζονται κυρίως κατά τη διεύθυνση του άξονα Y (εικόνες 5.13 και 5.16), ενώ στην δεύτερη ιδιομορφή τους μετατοπίζονται κυρίως κατά τη διεύθυνση του άξονα X (εικόνες 5.14 και 5.17).  
Δεν συμβαίνει το ίδιο στις πρώτες δύο ιδιομορφές του προσομοιώματος με *mixed piles*, όπου υπάρχει εξίσου μετατόπιση τόσο κατά τη διεύθυνση του άξονα Y όσο κατά τη διεύθυνση του άξονα X (εικόνες 5.19 και 5.20). Αυτό πιθανόν προκύπτει από την τοποθέτηση των ίδιων τύπων πασσάλων αντιδιαμετρικά, προκαλώντας, έτσι στην κατασκευή, μια διαγώνια μετατόπιση.
- 2) Κατά τις δύο οριακές καταστάσεις ελέγχου, την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) και την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ), κρίσιμος συνδυασμός φόρτισης προκύπτει εκείνος στον οποίο κρίσιμο φορτίο είναι ο άνεμος «Wind 2» (εικόνα 4.5) ΟΚΑ7 και ΟΚΛ7 αντίστοιχα. Λογικό συμπέρασμα, αφού η υπεράκτια κατασκευή έχει χρήση υποσταθμού σε θαλάσσιο αιολικό πάρκο.
- 3) Σύμφωνα με τα διαγράμματα ροπών (εικόνα 5.26) και των μετατοπίσεων (εικόνα 5.31) των τριών προσομοιωμάτων παρατηρούνται τα εξής:
  - Οι πάσσαλοι τύπου *skirt* παραλαμβάνουν μεγαλύτερη ροπή σε σύγκριση με τους πασσάλους τύπου *pin* λόγω της εκκεντρότητάς τους από τα υποστυλώματα/πόδια του *jacket*
  - Οι πάσσαλοι τύπου *skirt*, λόγω της μεγαλύτερης ροπής που παραλαμβάνουν διαστασιολογούνται με μεγαλύτερες διατομές (CFCHS1270X22,2) (πίνακας 5.6) έναντι των πασσάλων τύπου *pin* (CFCHS864X17,5) (πίνακας 5.5).

Η διαφορά των διατομών μεγαλώνει κατά την προσομοίωση με χρήση *mixed piles*, όπου οι πάσσαλοι τύπου *skirt* είναι διατομής CFCHS1422X22,2 και οι πάσσαλοι τύπου *pin* είναι διατομής CFCHS762X15,9 (πίνακας 5.7).

Αυτό δείχνει πως στο προσομοίωμα με τα *mixed piles*, μεγαλύτερο ρόλο επωμίζονται οι πάσσαλοι τύπου *skirt*.

- Το προσομοίωμα των πασσάλων τύπου *skirt*, λόγω της υπεροχής αυτών σε αριθμό και σε διάμετρο έχει τη μικρότερη μετατόπιση κατά τη σύγκριση των τριών προσομοιωμάτων.

Αντιθέτως, το προσομοίωμα των πασσάλων τύπου *pin* έχει τη μεγαλύτερη μετατόπιση.

- 4) Παρόλο που στα διαγράμματα ροπών (εικόνα 5.26) φαίνεται να αξιοποιείται μικρό ποσοστό των πασσάλων, το μήκος τους προσδίδει μεγαλύτερη αντίσταση τριβής, άρα και καλύτερη σταθερότητα της κατασκευής.

Η σημαντικότητα και η επιρροή, του μήκους των πασσάλων στη συμπεριφορά αυτών είναι μεγάλη, όπως και αναλύεται στο κεφάλαιο 6.2. Προκύπτει ότι με μείωση του μήκους των πασσάλων κατά 25%, δηλαδή από το αρχικό τους μήκος 40 m σε τελικό μήκος 30 m, είναι δυνατή η *αύξηση της μετατόπισης της υπεράκτιας υπό μελέτη κατασκευής έως και 32%* (εικόνα 6.7).

- 5) Όσον αφορά την πυκνότητα του εδάφους που πιθανόν υπάρχει στο πεδίο χωροθέτησης της κατασκευής, προκύπτει ότι με μείωση της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$ , είναι δυνατή η *αύξηση της μετατόπισης της υπεράκτιας υπό μελέτη κατασκευής έως και 97%* (εικόνα 6.11).

Βέβαια, κατά τον δονητικό τρόπο εγκατάστασης των όποιων πασσάλων αναμένεται συμπύκνωση του εδάφους με πιθανή αύξηση της γωνίας  $\varphi^\circ$ , άρα συνεπάγεται καλύτερη συμπεριφορά της κατασκευής.

- 6) Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει ο συνδυασμός παραμετρικής διερεύνησης με ταυτόχρονη μείωση του μήκους των πασσάλων και της γωνίας εσωτερικής τριβής των κόκκων του εδάφους  $\varphi^\circ$ .

Η ταυτόχρονη αυτή μείωση των δύο παραμέτρων μπορεί να προκαλέσει *αύξηση στην μετατόπιση κατά τη διεύθυνση Y στη δράση του δυσμενέστερου συνδυασμού OKA7 στην άκρη του 3<sup>ου</sup> καταστρώματος της ανωδομής έως και 194%*.

- 7) Κατά την προσομοίωση των διαφορετικών μοντέλων με δύο διαφορετικά πρότυπα, το API και τον Ευρωκώδικα (εικόνα 6.19), προκύπτουν μικροδιαφορές στις μετατοπίσεις της κατασκευής. Παρατηρείται ότι κατά τον δυσμενέστερο συνδυασμό φόρτισης του Ευρωκώδικα OKA7, κρίσιμο φορτίο είναι ο άνεμος με συντελεστή 1,5, ενώ κατά το πρότυπο του API το φορτίο του ανέμου έχει συντελεστή ίσο με 1,0.

Παρόλα αυτά προκύπτουν παρόμοια αποτελέσματα. Αυτό συμβαίνει, καθώς το πρότυπο του API χρησιμοποιεί μια πιθανολογική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα των φορτίων και της αντίστασης της κατασκευής, ενώ κατά τον Ευρωκώδικα γίνεται μια ντετερμινιστική προσέγγιση που χρησιμοποιεί σταθερούς πολλαπλασιαστές για να λάβει υπόψη την αβεβαιότητα.

### 7.3 Ιδέες Μελλοντικής Έρευνας

Η επιρροή εναλλακτικών τρόπων θεμελίωσης μίας υπεράκτιας κατασκευής στην συμπεριφορά της είναι ένας μεγάλος κλάδος με επιστημονικό ενδιαφέρον τόσο στατικό όσο και γεωτεχνικό. Μία διπλωματική εργασία μπορεί να καλύψει κάποια ενδιαφέροντα τμήματα αυτού του κλάδου, αλλά σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να καλύψει την ολότητα αυτού. Αυτό που μπορεί να κάνει, όμως, μία διπλωματική εργασία είναι να δώσει το έναυσμα για περαιτέρω μελλοντική έρευνα στον επιστημονικό κλάδο.

Μέχρι στιγμής στα χωρικά ύδατα της Ελλάδας, στα οποία και μελετάται η υποθετική κατασκευή της παρούσας διπλωματικής, δεν έχει υπάρξει ακόμη κάποια σταθερή υπεράκτια κατασκευή τύπου *jacket*.

Ενδιαφέρουσες ιδέες μελλοντικής έρευνας:

- 1) Μη συμμετρική ανωδομή:  
Η προσομοίωση μίας μη συμμετρικής ανωδομής στην υπεράκτια κατασκευή *jacket* θα ασκούσε μη συμμετρικά φορτία στο δικτύωμα *jacket* και εν συνεχεία και στους πασσάλους. Έτσι, η επιλογή των τύπων των πασσάλων πιθανόν να είναι πιο κρίσιμη, ειδικά στο προσομοίωμα με *mixed piles*.
- 2) Διαφορετική χωροθέτηση των πασσάλων του προσομοιώματος με τα *mixed piles*:  
Η προσομοίωση των πασσάλων στο προσομοίωμα με τα *mixed piles* θα μπορούσε να γίνει με τοποθέτηση ίδιων τύπων πασσάλων ανά πλευρά σε αντίθεση με την αντιδιαμετρική διάταξη που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Μία τέτοια επιλογή πιθανόν να επηρέαζε περισσότερο τη στροφή του προσομοιώματος.
- 3) Επιλογή διαφορετικής ποιότητας χάλυβα:  
Μία τέτοια αλλαγή θα μπορούσε να οδηγήσει σε διαστασιολόγηση διαφορετικών διατομών, άρα και σε διαφορετική υδροδυναμική και αεροδυναμική συμπεριφορά.
- 4) Επιλογή διαφορετικού είδους εδάφους:  
Με την επιλογή διαφορετικού είδους εδάφους, όπως συνεκτικά εδάφη έναντι των μη συνεκτικών που επιλέχθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής, είναι πιθανόν οι πάσσαλοι και συνεπώς η κατασκευή να έχουν διαφορετική συμπεριφορά. Τέτοια συμπεριφορά αναμένεται να υπάρξει ως προς τις ιδιομορφές και τις προκύπτουσες μετατοπίσεις στους εκάστοτε συνδυασμούς φόρτισης.
- 5) Προσομοίωση και ανάλυση σε διαφορετικό πρόγραμμα:  
Το πρόγραμμα SAP2000 που χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής αποτελεί ένα στατικό πρόγραμμα στατικής ανάλυσης.  
Ενδιαφέρον θα έχει να γίνει η προσομοίωση και ανάλυση σε κάποιο πιο εξειδικευμένο πρόγραμμα στον τομέα των υπεράκτιων κατασκευών, όπως είναι το SACS Offshore Structure της Bentley Systems. Ίσως με αυτό τον τρόπο γίνει ρεαλιστικότερη η προσομοίωση της κατασκευής, όπως των ειδικών περιβλημάτων των πασσάλων τύπου skirt (sleeves) ή των mudmats ή των πασσάλων τύπου pin που εμπεγνύονται εντός των ποδιών του jacket με δυνατότητα σκυροδέτησης του κενού μεταξύ των τοιχωμάτων των δύο. Ρεαλιστικότερη θα μπορούσε να είναι και η προσομοίωση του εδάφους, χωρίς τη χρήση καμπυλών p-γ και μη γραμμικών ελατηρίων, αλλά με πραγματικές εδαφικές συνθήκες. Φυσικά, ένα τέτοιο πρόγραμμα χρειάζεται εξειδικευμένες γνώσεις για το χειρισμό του.



## 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Γαντές Χ., Βαμβάτσικος Δ., Θανόπουλος Π. (2019-2020). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Σιδηρές Κατασκευές ΙΙ» με τίτλο: «Φορτία Χιονιού και Ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
2. Γαντές Χ., Θανόπουλος Π., Γκατζογιάννης Σ. (2022). Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος «Θαλάσσιες Μεταλλικές Κατασκευές» με τίτλο: «Actions on marine structures», Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
3. Καββαδάς Μ. (2020 – 2021). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Θεμελιώσεις» με τίτλο: «Διάλεξη 13, Θεμελιώσεις με πασσάλους: Εγκάρσια Φόρτιση Πασσάλων», Εργαστήριο Θεμελιώσεων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
4. Μηχανικοί Μελετών & Εφαρμογών Α.Ε., ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή Α.Ε., Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών – ΕΜΠ (2015). Ερευνητικό Πρόγραμμα SeaWind – Σχεδιασμός θαλάσσιων ανεμογεννητριών με βάση την επιτελεσματικότητα με τίτλο: «Π8.1 Οδηγίες Προκαταρκτικού Σχεδιασμού Σταθερών Υπεράκτιων Ανεμογεννητριών».
5. Μηχανικοί Μελετών & Εφαρμογών Α.Ε., ΤΕΡΝΑ Ενεργειακή Α.Ε., Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών – ΕΜΠ (2015). Ερευνητικό Πρόγραμμα SeaWind – Σχεδιασμός θαλάσσιων ανεμογεννητριών με βάση την επιτελεσματικότητα με τίτλο: «Π8.2 Πιλοτικός Προκαταρκτικός Σχεδιασμός & Διαστασιολόγηση Σταθερής Υπεράκτιας Ανεμογεννήτριας».
6. Τσικουράκης Γ. (2017). «Βελτιωμένα Αριθμητικά Προσομοιώματα για την Αλληλεπίδραση Ανωδομής – Θεμελίωσης σε Πυλώνες Ανεμογεννητριών». Μεταπτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
7. Τσουκαλά Β., Χονδρός Μ. (2022). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Θαλάσσια Υδραυλική και Λιμενικά Έργα» με τίτλο: «Offshore Wave Generation & Prediction», Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
8. Φραγκιαδάκης Μ. (2022). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Αντισεισμική Τεχνολογία Ι» με τίτλο: «Μέρος Α΄», Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
9. Φραγκιαδάκης Μ. (2022). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Αντισεισμική Τεχνολογία Ι» με τίτλο: «Μέρος Β΄», Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

10. Χατζηγεωργίου Ιωάννης Κ., Κονισπολιάτης Δ (2022). Σημειώσεις προπτυχιακού μαθήματος «Έργα Ανοικτής Θαλάσσης» με τίτλο: «Offshore Platform Design», Εργαστήριο Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
11. Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume I». Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.
12. Chakrabarti Subrata K. (2005). «Handbook of Offshore Engineering, Volume II», Elsevier, Offshore Structure Analysis, Inc. Plainfield, Illinois, USA.
13. Chatzigiannelis I., Elsayed K., Loukakis K., M. ASCE, P.E. (March 2009). "Foundation Engineering of Offshore "Jacket" Structures." Conference Paper, International Foundation Congress and Equipment Expo 2009.
14. El-Reedy Mohamed A., Ph.D. (2012). «Offshore Structures, Design, Construction and Maintenance». Elsevier, USA.