



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ Ε/Ο ΠΛΟΙΟΥ ΜΕ ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΑΡΙΟΣ ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ

Επιτροπή Διπλωματικής

Επιβλέπων: Σαμουηλίδης Μ.Σ., Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλη Επιτροπής: Ανυφαντής Κ., Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Ζαραφωνίτης Γ., Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2023

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με σκοπό την καταπολέμηση της κλιματικής κρίσης, η κατασκευή υπεράκτιων αιολικών πάρκων εξαπλώνεται με γοργούς ρυθμούς. Έτσι, όλο και περισσότερα αιολικά πάρκα είναι πιθανό να βρίσκονται κοντά σε θαλάσσιες γραμμές εμπορικών και επιβατηγών πλοίων. Ωστόσο, αυτό εγείρει ανησυχίες για πιθανά ζητήματα ασφάλειας, συμπεριλαμβανομένου και της πιθανότητας σύγκρουσης μεταξύ των διερχόμενων πλοίων και των ανεμογεννητριών. Συνεπώς, κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία αριθμητικών μοντέλων που θα προβλέπουν τη δυναμική συμπεριφορά των κατασκευών μετά τη σύγκρουση τους.

Η ακόλουθη διπλωματική εργασία διερευνά τη συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας ύστερα από την πλευρική σύγκρουση ενός Επιβατηγού/Οχηματαγωγού πλοίου με αυτήν. Στοχεύει στην κατασκευή ενός αποτελεσματικού μοντέλου για την όσο το δυνατόν πιο ακριβή πρόβλεψη της απόκρισης της κατασκευής, με βάση και τις παραδοχές που εφαρμόζονται κατά τη μοντελοποίηση. Με σκοπό την εύρεση των παραμέτρων που επηρεάζουν το φαινόμενο και οδηγούν στις δυσμενέστερες συνέπειες, 14 διαφορετικά σενάρια σύγκρουσης προσομοιώνονται, τα αποτελέσματα των οποίων συγκρίνονται και εξετάζονται.

Για την ανάλυση χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και το λογισμικό ABAQUS. Για το μοντέλο της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται η ανεμογεννήτρια αναφοράς των 10 MW του Πολυτεχνείου της Δανίας (DTU), ενώ για το πλοίο χρησιμοποιείται τμήμα του επιβατηγού πλοίου Blue Star ΙΤΗΑΚΙ. Βασικοί άξονες της κατασκευής του μοντέλου αποτελούν: η μέθοδος καθορισμού του μοντέλου υλικού, η επιλογή και ρύθμιση του κριτηρίου αστοχίας, η εφαρμογή των φορτίων που ασκούνται στις κατασκευές, καθώς και ο προσδιορισμός της αλληλεπίδρασης μεταξύ του τμήματος της ανεμογεννήτριας που βρίσκεται εντός του πυθμένα και του υπεδάφους που το περιβάλλει.

Οι διαφορετικές συνθήκες σύγκρουσης διαμορφώνονται με βάση τις τέσσερις βασικές παραμέτρους που θεωρήθηκε ότι καθορίζουν την εξέλιξη του φαινομένου: η ταχύτητα του πλοίου, η ταχύτητα του ανέμου, η κατεύθυνση του πλοίου σε σχέση με αυτή του ανέμου και η οριακή συνθήκη της ανεμογεννήτριας στον πυθμένα. Διασταυρώνοντας διαφορετικά μεγέθη αυτών των παραμέτρων προκύπτουν 14 βασικά σενάρια σύγκρουσης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τίθενται υπό σύγκριση με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της κάθε παραμέτρου στην απόκριση της κατασκευής και στα βασικά δυναμικά μεγέθη που περιγράφουν το φαινόμενο.

Ευχαριστίες

Είμαι βαθύτατα ευγνώμων που έφτασα σε αυτή τη σημαντική στιγμή της ακαδημαϊκής μου πορείας, και θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή εκτίμησή μου σε όλους όσους με υποστήριξαν και συνέβαλαν στην επιτυχημένη ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Καταρχάς, εκφράζω τις ειλικρινέστερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντά μου, Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Μανώλη Σαμουηλίδη, ο οποίος με την ακλόνητη καθοδήγηση, τις ανεκτίμητες γνώσεις και την αδιάκοπη υποστήριξή του, συνέβαλε σημαντικά στον καθορισμό της κατεύθυνσης και του περιεχομένου αυτής της έρευνας. Η υπομονή και η ενθάρρυνσή του με ενέπνευσαν να εμβαθύνω στο θέμα και να προσπαθήσω για την αρτιότητα σε κάθε πτυχή αυτής της εργασίας. Είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων για τον χρόνο του και την προθυμία να μοιραστεί τις απόψεις του μαζί μου.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Σταμάτη Φανουργάκη, για τη βοήθεια και τη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Η συνεχής του παρουσία και η διάθεση του να μοιραστεί μαζί μου τις γνώσεις και την εμπειρία του ήταν καταλυτικοί παράγοντες για την πρόοδο και εν τέλει την ολοκλήρωση της μελέτης. Η μεγάλη του εξοικείωση με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε, συντέλεσε στο να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά οποιοδήποτε πρόβλημα προέκυψε όλο αυτό το διάστημα.

Δεν μπορώ επίσης να παραλείψω να ευχαριστήσω το προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και ιδιαίτερα τον Καθηγητή Νικόλαο Τσούβαλη και τους Υποψήφιους Διδάκτορες Ηλία Μπιλάλη και Νικόλαο Σιλιώνη, για τη δυνατότητα που μου παρείχαν να χρησιμοποιήσω τους υπολογιστές του εργαστηρίου για τους σκοπούς της διπλωματικής μου εργασίας. Οι πράξεις τους και ο χρόνος που διέθεσαν για την διευκόλυνση μου και την αντιμετώπιση των τεχνικών προβλημάτων που παρουσιάζονταν, έπαιξαν κρίσιμο ρόλο στην άμεση και επιτυχή ολοκλήρωση της διατριβής.

Καταληκτικά, θα ήθελα να εκφράζω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου για την αμετανόητη υποστήριξή τους, την ενθάρρυνση και την πίστη στις ικανότητές μου. Η αγάπη και η κατανόησή τους λειτουργούσαν σταθερά σαν κίνητρο καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της ακαδημαϊκής πορείας.

Περιεχόμενα

Περίληψη	ii
Ευχαριστίες	iii
Περιεχόμενα	iv
Πίνακας Σχημάτων	vii
Πίνακας Πινάκων	xiii
Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή	2
1.1 Υπόβαθρο	2
1.2 Αντικείμενο και στόχος διπλωματικής εργασίας	4
1.3 Επισκόπηση διπλωματικής εργασίας	4
Κεφάλαιο 2^ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο & Σχετική Έρευνα	6
2.1 Εισαγωγή	6
2.2 Θεωρία Συγκρούσεων – Σχεδιαστικά Πρότυπα	6
2.2.1 Γενικά	6
2.2.2 Φιλοσοφία Σχεδίασης	7
2.2.3 Εσωτερική και Εξωτερική Μηχανική	8
2.2.4 Χρήση πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση συγκρούσεων	11
2.3 Σχετική Βιβλιογραφία	12
2.3.1 Γενικά	12
2.3.2 Ανάλυση σεναρίων μετωπικής σύγκρουσης πλοίου με ανεμογεννήτρια	12
2.3.3 Χρήση αναλυτικών μεθόδων για την διερεύνηση της σύγκρουσης	15
2.3.4 Ανάλυση ρίσκου αυτού του είδους συγκρούσεων	17
2.3.5 Χρήση νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη της ζημιάς στην ανεμογεννήτρια	18
Κεφάλαιο 3^ο: Μοντέλο Σύγκρουσης Πλοίου και Υπεράκτιας Ανεμογεννήτριας	21
3.1 Εισαγωγή	21
3.2 Γεωμετρικό Μοντέλο	22
3.2.1 Επιλογή ανεμογεννήτριας	22
3.2.2 Αριθμητικό μοντέλο ανεμογεννήτριας	24
3.2.3 Επιλογή πλοίου	25
3.2.4 Αριθμητικό μοντέλο πλοίου	27
3.3 Χωρική Διακριτοποίηση	29
3.3.1 Τύπος Στοιχείων	29
3.3.2 Μέγεθος Στοιχείου	31
3.3.2.1 Μελέτη Σύγκλισης Πλέγματος	31

3.3.2.2	Μελέτη Σύγκλισης Πλέγματος στην παρούσα εργασία.....	33
3.3.2.3	Τροποποίηση του πλέγματος κατά τη διαδικασία επαλήθευσης του μοντέλου	40
3.4	Μοντέλο Υλικού	42
3.4.1	Μηχανική παραμορφώσιμου σώματος	42
3.4.1.1	Τάσεις και παραμορφώσεις	42
3.4.1.2	Δοκιμή Εφελκυσμού – Καμπύλη Τάσης-Παραμόρφωσης	43
3.4.1.3	Πραγματική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης	44
3.4.2	Θραυστομηχανική	48
3.4.2.1	Μηχανισμός όλκιμης θραύσης	48
3.4.2.2	Επίδραση τριαξονικότητας.....	49
3.4.2.3	Κριτήρια Αστοχίας – Κριτήριο RTCL	51
3.4.3	Μοντελοποίηση υλικού στην παρούσα εργασία.....	55
3.4.3.1	Επιλογή υλικού.....	55
3.4.3.2	Πραγματική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης και δοκιμή εφελκυσμού	56
3.4.3.3	Εισαγωγή κριτηρίου RTCL	60
3.5	Μοντελοποίηση Φορτίων	65
3.5.1	Βαρυτικές δυνάμεις	65
3.5.2	Δυνάμεις κυματισμών και θαλάσσιων ρευμάτων	65
3.5.3	Φορτία ανέμου.....	66
3.5.3.1	Βασικές αρχές αεροδυναμικής στις ανεμογεννήτριες.....	66
3.5.3.2	Μοντελοποίηση φορτίων ανέμου στην παρούσα εργασία.....	71
3.5.4	Δυνάμεις κρούσης - Μοντελοποίηση επαφής.....	77
3.6	Μοντελοποίηση Οριακών Συνθηκών	78
3.6.1	Οριακή συνθήκη στο πλοίο	78
3.6.2	Οριακή συνθήκη στη βάση του πυλώνα.....	78
3.6.3	Μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ πυλώνα και υπεδάφους.....	79
3.7	Χρονική Διακριτοποίηση	86
3.7.1	Άμεσος & έμμεσος επιλύτης	86
3.7.2	Επιλογή επιλύτη για το βασικό μοντέλο	87
3.7.3	Μεταβλητές εξόδου	89
3.8	Σενάρια Συγκρούσεων.....	90
Κεφάλαιο 4°: Αποτελέσματα προσομοιώσεων & σύγκριση σεναρίων		93
4.1	Εισαγωγή	93
4.2	Ανάλυση Ιδιομορφών.....	94
4.3	Επίδραση της ταχύτητας του πλοίου	96
4.3.1	Παρουσίαση των αποτελεσμάτων του σεναρίου Str_3_0_0.....	96

4.3.2	Σύγκριση Σεναρίων Str_1_0_0, Str_3_0_0, Str_5_0_0	106
4.4	Επίδραση της ευκαμψίας του πυθμένα.....	113
4.5	Επίδραση του ανέμου και της ταχύτητας του	120
4.5.1	Ταχύτητα πλοίου $V = 1$ m/s.....	120
4.5.2	Ταχύτητα πλοίου $V = 5$ m/s.....	124
4.5.3	Ταχύτητα πλοίου $V = 3$ m/s – Πολλαπλές ταχύτητες ανέμου.....	127
4.6	Επίδραση της κατεύθυνσης του ανέμου σε σχέση με την κατεύθυνση του πλοίου.....	131
4.7	Παρατηρήσεις επί των προσομοιώσεων – Συζήτηση.....	137
Κεφάλαιο 5^ο: Σύνοψη, συμπεράσματα και προτάσεις		148
5.1	Σύνοψη διπλωματικής εργασίας & παραδοχών.....	148
5.2	Συμπεράσματα.....	151
5.3	Προτάσεις για μελλοντική δουλειά	155
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		I

Πίνακας Σχημάτων

- Σχήμα 1.1: Κατανομή της παγκόσμιας υπεράκτιας αιολικής ισχύος
- Σχήμα 1.2: Οι πιο συνηθισμένοι τύποι θεμελίων στα υπεράκτια αιολικά πάρκα
- Σχήμα 2.1: Κατανομή Ενέργειας για τους τρεις διαφορετικούς τύπους σχεδίασης
- Σχήμα 2.2: Αποσυζευγμένο πρόβλημα προσάραξης πλοίου
- Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστικές καμπύλες δύναμης-παραμόρφωσης πλοίου και εγκατάστασης
- Σχήμα 2.4: Καμπύλες δύναμης-παραμόρφωσης του DNV
- Σχήμα 2.5: Παραμορφωμένο σχήμα ανεμογεννήτριας για κάθε ταχύτητα σύγκρουσης
- Σχήμα 2.6: Χρονική ιστορία της μετατόπισης της κορυφής της ανεμογεννήτριας
- Σχήμα 2.7: Μορφή κατάρρευσης της ανεμογεννήτριας για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου
- Σχήμα 2.8: Απλοποιημένη σχηματική αναπαράσταση της ανεμογεννήτριας για τον υπολογισμό της μετατόπισης λόγω του ανέμου
- Σχήμα 2.9: Απλοποιημένη σχηματική αναπαράσταση της ανεμογεννήτριας για τον υπολογισμό της μετατόπισης λόγω της κρούσης
- Σχήμα 2.10: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας για την πρόβλεψη της αστοχίας
- Σχήμα 2.11: Συνολική διαδικασία προσδιορισμού της αστοχίας με τη χρήση νευρωνικών δικτύων
- Σχήμα 3.1: Βασική δομή υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με θεμέλια μονού πυλώνα
- Σχήμα 3.2: Γραφική αναπαράσταση του αριθμητικού μοντέλου της ανεμογεννήτριας
- Σχήμα 3.3: Μοντέλο ανεμογεννήτριας-πλοίου στο ABAQUS
- Σχήμα 3.4: Στοιχεία κελύφους, στοιχεία πλάκας και στοιχεία μεμβράνης
- Σχήμα 3.5: Τετρακομβικό στοιχείο μειωμένης ολοκλήρωσης με πέντε επίπεδα κατά το πάχος
- Σχήμα 3.6: Τέσσερα διαφορετικά μεγέθη πλέγματος για τους σκοπούς της μελέτης σύγκλισης πλέγματος
- Σχήμα 3.7: Καμπύλη σύγκλισης πλέγματος
- Σχήμα 3.8: Πύκνωση πλέγματος στην περιοχή ενδιαφέροντος
- Σχήμα 3.9: Γραφική αναπαράσταση των ζωνών πλέγματος
- Σχήμα 3.10: Διάγραμμα Δύναμης Κρούσης - Οριζόντιας Μετατόπισης Πλοίου για τα 4 πειράματα σύγκλισης

Σχήμα 3.11: Μέγιστη Δύναμη Κρούσης σε κάθε δοκιμή σύγκλισης

Σχήμα 3.12: Απόλυτη οριζόντια μετατόπιση κορυφής σε κάθε δοκιμή σύγκλισης

Σχήμα 3.13: Οριζόντια επιτάχυνση κορυφής σε κάθε δοκιμή σύγκλισης

Σχήμα 3.14: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στην περιοχή σύγκρουσης σε κάθε δοκιμή σύγκλισης

Σχήμα 3.15: Απόλυτη οριζόντια μετατόπιση πυθμένα σε κάθε δοκιμή σύγκλισης

Σχήμα 3.16: Υπολογιστικός χρόνος για κάθε δοκιμή σύγκλισης

Σχήμα 3.17: Tie Constraint σε μη ταυτόσημους κόμβους δύο ακμών

Σχήμα 3.18: Τρισδιάστατη εντατική κατάσταση στερεού σώματος

Σχήμα 3.19: Δοκίμιο εφελκυσμού

Σχήμα 3.20: Μορφή καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης όλκιμου μεταλλικού υλικού

Σχήμα 3.21: Πειραματική (A) και πραγματική (B) καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού

Σχήμα 3.22: Μοντέλο πραγματικής καμπύλης τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης μετά το όριο αντοχής, εφαπτομενικού (tangent, $w=1$) και εκθετικού (power-law, $w=0$) τύπου

Σχήμα 3.23: Μακροσκοπική εξέλιξη της αστοχίας υπό εφελκυστικό φορτίο

Σχήμα 3.24: Σχέση παραμόρφωσης θραύσης και τριαξονικότητας με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των Wierzbicki και Bao

Σχήμα 3.25: Επίδραση Damage Evolution στην καμπύλη υλικού

Σχήμα 3.26: Γραφική αναπαράσταση συναρτήσεων κριτηρίων αστοχίας

Σχήμα 3.27: Καμπύλη τριαξονικότητας συνδυαστικού κριτηρίου RTCL

Σχήμα 3.28: Πειραματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του επιλεχθέντος υλικού

Σχήμα 3.29: Πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης

Σχήμα 3.30: Γεωμετρία δοκιμίου εφελκυσμού

Σχήμα 3.31: Χωρική διακριτοποίηση του δοκιμίου εφελκυσμού

Σχήμα 3.32: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης από την πραγματική δοκιμή και την προσομοίωση της στο Abaqus

Σχήμα 3.33: Εύρεση του ϵ_n μέσω της καμπύλης ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης-πειραματικής παραμόρφωσης

Σχήμα 3.34: Διάγραμμα παραμόρφωσης θραύσης συναρτήσει της τριαξονικότητας για τις δύο ζώνες ενδιαφέροντος

Σχήμα 3.35: Χρονική ιστορία εσωτερικής και κινητικής ενέργειας στην προσομοίωση πειράματος εφελκυσμού

Σχήμα 3.36: Αναπτυσσόμενες δυνάμεις στην αεροτομή

Σχήμα 3.37: Η μεταβολή των χαρακτηριστικών του ανέμου λόγω της διέλευσης του από την ανεμογεννήτρια

Σχήμα 3.38: Καμπύλες συντελεστή ώσης και συντελεστή ισχύος

Σχήμα 3.39: Επαγόμενο τρίγωνο ταχυτήτων στις αεροτομές της ανεμογεννήτριας

Σχήμα 3.40: Τρίγωνο ταχυτήτων και προκύπτουσες δυνάμεις στην αεροτομή

Σχήμα 3.41: Καμπύλες ώσης και ηλεκτρικής ισχύος της ανεμογεννήτριας αναφοράς του Πολυτεχνείου της Δανίας

Σχήμα 3.42: Καμπύλη μηχανικής ισχύος της ανεμογεννήτριας αναφοράς του Πολυτεχνείου της Δανίας

Σχήμα 3.43: Καμπύλες ταχύτητας περιστροφής και γωνίας κλίσης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας αναφοράς του Πολυτεχνείου της Δανίας

Σχήμα 3.44: Μεταβολή του συντελεστή αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Reynolds για λεπτούς και λείους κυλίνδρους

Σχήμα 3.45: Περιστροφή της βάσης του πυλώνα γύρω από τον οριζόντιο άξονα γ

Σχήμα 3.46: Ελατήρια και καμπύλες $P - \gamma$

Σχήμα 3.47: Καμπύλες $P - \gamma$ ζωνών χώματος

Σχήμα 3.48: Διαγράμματα συναρτήσει της γωνίας τριβής ϕ (a) του συντελεστή αντίδρασης υποβάθρου k (b) των συντελεστών C_1, C_2, C_3

Σχήμα 3.49: Καμπύλες $P - \gamma$ ζωνών άμμου

Σχήμα 3.50: Καμπύλες χρονικής ιστορίας οριζόντιας μετατόπισης κορυφής για διαφορετικές τιμές μέγιστου increment

Σχήμα 3.51: Καμπύλες χρονικής ιστορίας οριζόντιας μετατόπισης κορυφής για διαφορετικές τιμές μέγιστου increment με εφαρμογή του Transient Fidelity

Σχήμα 3.52: Σχετικές κατευθύνσεις ανέμου – πλοίου

Σχήμα 4.1: Γραφική αναπαράσταση των δύο πρώτων καμπτικών ιδιομορφών

Σχήμα 4.2: Πρώτη και δεύτερη φάση απόκρισης της ανεμογεννήτριας μετά τη σύγκρουση

Σχήμα 4.3: Αρχικό στάδιο δημιουργίας πλαστικών παραμορφώσεων στην περιοχή ένωσης πυλώνα – πύργου. PEEQ: Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση

Σχήμα 4.4: Τελική μορφή κόμβου στην περιοχή ένωσης πυλώνα – πύργου

Σχήμα 4.5: (α) Θέση μέγιστης εισχώρησης (β) Αρχική, μέγιστη και τελική εισχώρηση

Σχήμα 4.6: Χρονική ιστορία δύναμης κρούσης

Σχήμα 4.7: Καμπύλη δύναμης κρούσης συναρτήσει της μετατόπισης του πλοίου

Σχήμα 4.8: Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας στη νέα θέση ισορροπίας της κορυφής της

Σχήμα 4.9: Οριζόντια ταλάντωση της κορυφής της ανεμογεννήτριας γύρω από τη νέα θέση ισορροπίας

Σχήμα 4.10: Μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις πυθμένα και υπεδάφους

Σχήμα 4.11: Ισοζύγιο Ενέργειας

Σχήμα 4.12: Συνιστώσες εσωτερικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας

Σχήμα 4.14: Παραμορφωμένο σχήμα ανεμογεννήτριας για ταχύτητες πλοίου (α) 1 m/s, (β) 3 m/s, (γ) 5 m/s

Σχήμα 4.15: Χρονική ιστορία οριζόντιας μετατόπισης κορυφής ανεμογεννήτριας για τις τρεις ταχύτητες του πλοίου

Σχήμα 4.16: Χρονική ιστορία της δύναμης κρούσης για τις τρεις ταχύτητες του πλοίου

Σχήμα 4.17: Καμπύλη δύναμης κρούσης συναρτήσει της μετατόπισης του πλοίου για τις τρεις ταχύτητες πλοίου

Σχήμα 4.18: Οριζόντιες κατόψεις του πυλώνα στο σημείο και στη στιγμή της μέγιστης εισχώρησης

Σχήμα 4.19: Χρονική ιστορία εισχώρησης στον πυλώνα για τρεις ταχύτητες του πλοίου

Σχήμα 4.20: Χρονική ιστορία εσωτερικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας για κάθε ταχύτητα πλοίου

Σχήμα 4.21: Χρονική ιστορία κινητικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας για κάθε ταχύτητα πλοίου

Σχήμα 4.22: Κινητική ενέργεια ανεμογεννήτριας για τους δύο τύπους οριακής συνθήκης στον πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.23: Παραμορφωμένο σχήμα ανεμογεννήτριας για (α) ελατήρια, (β) πάκτωση στον πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.24: Οριζόντια μετατόπιση της κορυφής συναρτήσει του χρόνου για τους δύο τύπους οριακής συνθήκης στον πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.25: (α) Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή της σύγκρουσης στο τέλος της προσομοίωσης (β) Μέγιστη σχετική εισχώρηση τοιχωμάτων πυλώνα ($V = 3 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.26: Χρονική ιστορία σχετικής εισχώρησης τοιχωμάτων πυλώνα για τους δύο τύπους οριακής συνθήκης στον πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.27: Χρονική ιστορία της δύναμης κρούσης για τα σενάρια πάκτωσης και ελατηρίων ($V = 3 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.28: Ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης ανεμογεννήτριας για τους δύο τύπους οριακής συνθήκης στον πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.29: Πλαστική ενέργεια παραμόρφωσης ανεμογεννήτριας για τους δύο τύπους οριακής συνθήκης στον πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.30: Εσωτερική ενέργεια ανεμογεννήτριας για τους δύο τύπους οριακής συνθήκης στον πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.31: Χρονική ιστορία σχετικής εισχώρησης τοιχωμάτων πυλώνα με και χωρίς φορτία ανέμου ταχύτητας 11.4 m/s ($V = 1 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.32: Οριζόντια μετατόπιση της κορυφής της ανεμογεννήτριας με και χωρίς άνεμο ταχύτητας 11.4 m/s ($V = 1 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.33: Χρονική ιστορία εσωτερικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας με και χωρίς άνεμο ταχύτητας 11.4 m/s ($V = 1 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.34: Χρονική ιστορία της δύναμης κρούσης με και χωρίς άνεμο ταχύτητας 11.4 m/s ($V = 1 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.35: Στιγμιότυπα της σταδιακής παραμόρφωσης της ανεμογεννήτριας σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές μετρημένες από τη στιγμή της κρούσης ($V = 5 \text{ m/s}$ & $W = 11.4 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.36: Χρονική ιστορία εσωτερικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας με και χωρίς άνεμο ταχύτητας 11.4 m/s ($V = 5 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.37: Χρονική ιστορία της δύναμης κρούσης με και χωρίς άνεμο ταχύτητας 11.4 m/s ($V = 5 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.38: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κορυφής για κάθε ταχύτητα ανέμου ($V = 3 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.39: Χρονική ιστορία οριζόντιας ταλάντωσης κορυφής για κάθε ταχύτητα ανέμου ($V = 3 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.40: Χρονική ιστορία εσωτερικής ενέργειας κατασκευής για κάθε ταχύτητα ανέμου ($V = 3 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.41: Χρονική ιστορία κρουστικής δύναμης για κάθε ταχύτητα ανέμου ($V = 3 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.42: Απόκριση της ανεμογεννήτριας στο επίπεδο z-x (πλάγια όψη) για γωνία ανέμου – πλοίου (α) 0° , (β) 90° , (γ) 180° , ($V = 3 \text{ m/s}$ & $W = 11.4 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.43: Απόκριση της ανεμογεννήτριας στο επίπεδο x-y (κάτοψη) για γωνία ανέμου – πλοίου (α) 0° , (β) 90° , (γ) 180° ($V = 3 \text{ m/s}$ & $W = 11.4 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.44: Χρονική ιστορία οριζόντιας μετατόπισης της κορυφής της ανεμογεννήτριας ως προς τις δύο διευθύνσεις, για εγκάρσια σύγκρουση ($V = 3 \text{ m/s}$ & $W = 11.4 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.45: Χρονική ιστορία εσωτερικής ενέργειας για τους τρεις τύπους συγκρούσης ($V = 3 \text{ m/s}$ & $W = 11.4 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.46: Χρονική ιστορία δύναμης κρούσης για τους τρεις τύπους συγκρούσης ($V = 3 \text{ m/s}$ & $W = 11.4 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.47: Χρονική ιστορία εισχώρησης για τους τρεις τύπους συγκρούσης ($V = 3 \text{ m/s}$ & $W = 11.4 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.48: Χρονική ιστορία εσωτερικής ενέργειας των ελατηρίων του πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$, $W = 0 \text{ m/s}$)

Σχήμα 4.49: Ποσοστό τεχνητής ενέργειας παραμόρφωσης ως προς την εσωτερική ενέργεια για το σενάριο Str_5_0_11

Σχήμα 4.50: Ενέργεια που εκλείεται λόγω θραύσης των στοιχείων για το σενάριο Str_3_0_11

Σχήμα 4.51: Μεταβλητές SDEG για το πρώτο και το πέμπτο σημείο ολοκλήρωσης και STATUS, του στοιχείου No2206 στον πλαστικό κόμβο του σεναρίου Str_3_0_11.4

Σχήμα 4.52: Καμπύλη τάσης παραμόρφωσης για το πρώτο και το πέμπτο σημείο ολοκλήρωσης του στοιχείου No2206 στον πλαστικό κόμβο του σεναρίου Str_3_0_11.4

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά επιλεγμένων ανεμογεννητριών των Siemens Gamesa , MHI Vestas και GE

Πίνακας 3.2: Βασικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας αναφοράς του DTU

Πίνακας 3.3: Διαστάσεις Ε/Ο πλοίου BLUE STAR ΙΤΗΑΚΙ

Πίνακας 3.4: Κατακόρυφες αποστάσεις καταστρωμάτων από το βασικό επίπεδο αναφοράς του πλοίου

Πίνακας 3.5: Βασικά χαρακτηριστικά πλέγματος κατά τη μελέτη σύγκλισης

Πίνακας 3.6: Μέγεθος στοιχείου κάθε ζώνης

Πίνακας 3.7: Τελικά μεγέθη στοιχείων κάθε ζώνης

Πίνακας 3.8: Ιδιότητες υλικού της ανεμογεννήτριας αναφοράς από τη διπλωματική εργασία του A.M. Broersen

Πίνακας 3.9: Ιδιότητες του υλικού S235JR EN10025

Πίνακας 3.10: Παράμετροι ρύθμισης του χρονικού βήματος

Πίνακας 3.11: Τιμές του ε_{cr} για τις ζώνες ενδιαφέροντος

Πίνακας 3.12: Τιμές παραμόρφωσης θραύσης και τριαξονικότητας για τις ζώνες ενδιαφέροντος

Πίνακας 3.13: Οι τιμές της δύναμης ώσης, T για τις ταχύτητες ανέμου ενδιαφέροντος

Πίνακας 3.14: Τιμές ισχύος, στροφών και ροπής για τις ταχύτητες ανέμου ενδιαφέροντος

Πίνακας 3.15: Αποτελέσματα υπολογισμών για την πίεση ανέμου στην επιφάνεια του πυλώνα

Πίνακας 3.16: Αποτελέσματα υπολογισμών για την πίεση ανέμου στην επιφάνεια του πύργου

Πίνακας 3.17: Φυσικές ιδιότητες των ζωνών του υπεδάφους

Πίνακας 3.18: Αποτελέσματα υπολογισμών για τον προσδιορισμό των καμπυλών $P - \gamma$ των ζωνών χώματος

Πίνακας 3.19: Αποτελέσματα υπολογισμών για τον προσδιορισμό των καμπυλών $P - \gamma$ των ζωνών άμμου

Πίνακας 3.20: Πίνακας σεναρίων σύγκρουσης

Πίνακας 4.1: Ιδιοπερίοδοι και ιδιοσυχνότητες των δύο μοντέλων

Πίνακας 4.2: Μέγιστη επιτάχυνση και μετατόπιση κορυφής για τις διαφορετικές ταχύτητες πλοίου

Πίνακας 4.3: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση πυθμένα για τις διαφορετικές ταχύτητες πλοίου

Πίνακας 4.4: Ιδιότητες ταλαντώσεων για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου ($V = 3 \text{ m/s}$)

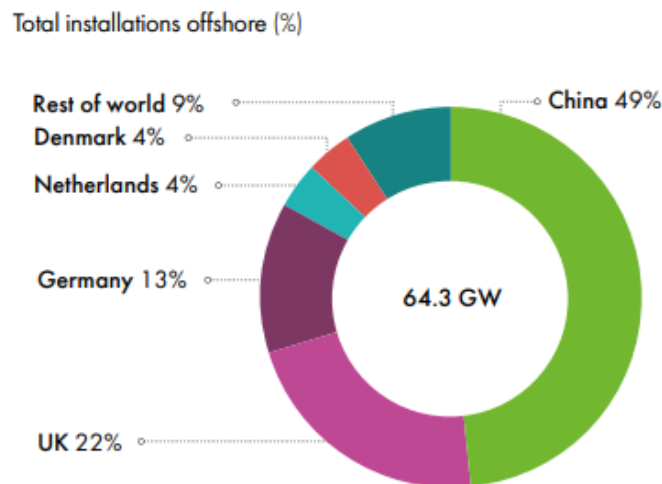
Πίνακας 5.1: Μορφή απόκρισης της ανεμογεννήτριας του εκάστοτε σεναρίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

1.1 Υπόβαθρο

Τα τελευταία χρόνια, ένας μεγάλος αριθμός ανεμογεννητριών εγκαθίσταται υπεράκτια, λόγω της έλλειψης χώρου στην ενδοχώρα και λόγω των ευνοϊκών συνθηκών που επικρατούν στην ανοιχτή θάλασσα. Η ροή του αέρα είναι πιο στρωτή και σταθερή και τα προβλήματα θορύβου και αισθητικής είναι μικρότερα σε σχέση με τις αντίστοιχες εγκαταστάσεις στην στεριά. Σύμφωνα με το Global Wind Energy Council (GWEC) [140], μέχρι και το τέλος του 2022, η ονομαστική ισχύς των υπεράκτιων αιολικών πάρκων έφτανε παγκοσμίως τα 64.3 GW, αποτελώντας το 7.6% της συνολικής αιολικής ενέργειας, αν ληφθούν υπόψιν και τα αιολικά πάρκα της ενδοχώρας. Μάλιστα, τη διετία 2021-2022 παρατηρήθηκε ποσοστιαία αύξηση της τάξεως του 87% στο συγκεκριμένο μέγεθος, ενώ κατασκευάστηκαν 29,877 θαλάσσιες ανεμογεννήτριες με τον συνολικό αριθμό αυτών να φτάνει τις 64,320 στο τέλος του προηγούμενου έτους. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, την πρωτοκαθεδρία στη συγκεκριμένη βιομηχανία την διαθέτει η Κίνα, καθώς της ανήκει το 49% της ισχύος με 31,442 εγκαταστάσεις. Την ακολουθούν το Ηνωμένο Βασίλειο και η Γερμανία με το 22% και 13% της ισχύος αντίστοιχα και με αριθμό εγκαταστάσεων 13,918 και 8,055 αντίστοιχα.

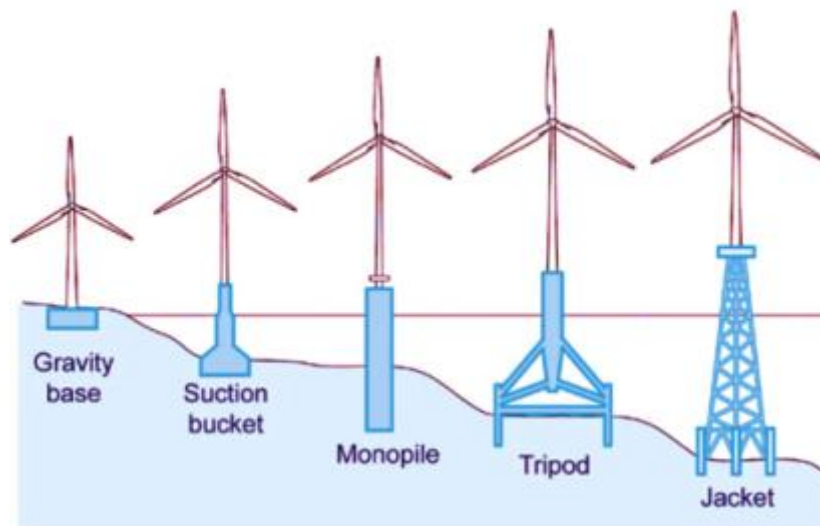


Σχήμα 1.1: Κατάνομη της παγκόσμιας υπεράκτιας αιολικής ισχύος [1]

Στην Ελλάδα, παρά τις μεγάλες δυνατότητες για παραγωγή αιολικής ενέργειας που προσφέρει το Αιγαίο πέλαγος λόγω της ιδανικής ταχύτητας του ανέμου μεταξύ 7 και 12 m/s και της τεράστιας ακτογραμμής με μήκος 13,676 km, καμία θαλάσσια ανεμογεννήτρια δεν έχει εγκατασταθεί στον Ελλαδικό χώρο μέχρι αυτή τη στιγμή [2]. Πλέον με το νομοθετικό πλαίσιο για την κατασκευή αιολικών πάρκων να έχει ολοκληρωθεί τον περασμένο χρόνο, η Ελληνική Κυβέρνηση έχει ως στόχο τα 2.7 GW μέχρι το 2030 [3]. Σύμφωνα με την Ελληνική Διαχειριστική Εταιρία Υδρογονανθράκων και Ενεργειακών Πόρων (ΕΔΕΥΕΠ Α.Ε.) οι πρώτες ανεμογεννήτριες θα εγκατασταθούν σε 5 ζώνες στο Αιγαίο πέλαγος. Τα ανοιχτά της

Αλεξανδρούπολης, η περιοχή μεταξύ της Λήμνου και του Αγίου Ευστρατίου, τα Δωδεκάνησα, οι Κυκλάδες και η Κρήτη θα είναι οι πρώτες περιοχές που θα φιλοξενήσουν ελληνικά θαλάσσια αιολικά πάρκα [4].

Λόγω των μετρίων βαθών, μεταξύ 10 και 40 m, που χαρακτηρίζουν αυτές τις περιοχές ευνοείται η κατασκευή ανεμογεννητριών με θεμέλια έναν μονό πυλώνα (monopile) πακτωμένο στο υπέδαφος του πυθμένα. Ο συγκεκριμένος τύπος θεμελίων είναι ο πιο διαδεδομένος, υποστηρίζοντας το 75% των εγκαταστάσεων, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο εύρος βαθών. Ακολουθούν οι βαρυτικές βάσεις (Gravity Base) και οι κάδοι αναρρόφησης (Suction Bucket) που στηρίζουν το 21% των εγκαταστάσεων και οι τρίποδες και οι Jacket κατασκευές που μοιράζονται το υπόλοιπο 4% [2]. Τα πρώτα δύο είδη είναι ιδανικά για περιοχές με ρηχά νερά, ενώ τα επόμενα δύο για περιοχές με μεγάλα βάθη έως και 50 m. Σε ακόμα μεγαλύτερα βάθη προτιμούνται οι πλωτές ανεμογεννήτριες λόγω της δυσκολίας και του κόστους κατασκευής των θεμελίων. Στο Σχήμα 1.2 φαίνονται τα βασικά είδη θεμελίων που αναφέρθηκαν.



Σχήμα 1.2: Οι πιο συνηθισμένοι τύποι θεμελίων στα υπεράκτια αιολικά πάρκα [5]

Με τον συνεχώς αυξανόμενο αριθμό υπεράκτιων αιολικών πάρκων, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην εξασφάλιση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας των εγκαταστάσεων καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους. Οι ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες και οι μεγάλες πιέσεις που ασκούνται από τον άνεμο, τα κύματα και τα ρεύματα δοκιμάζουν την αντοχή και την στατική τους επάρκεια. Ο μεγαλύτερος όμως κίνδυνος που αντιμετωπίζουν είναι η πιθανή σύγκρουση με διερχόμενα πλοία, είτε εμπορικά όπως τα επιβατηγά και τα ιδιωτικά γιοτ, είτε επιχειρησιακά όπως τα πλοία συντήρησης και υποστήριξης των εγκαταστάσεων. Μια τέτοια σύγκρουση είναι δυνατόν να προκαλέσει ζημιές ή και να καταστρέψει τόσο το πλοίο όσο και την ανεμογεννήτρια, οδηγώντας από μόλυνση του περιβάλλοντος μέχρι και σε θύματα [5]. Όσον αφορά τα ελληνικά χωρικά ύδατα, αυτά φιλοξενούν έναν τεράστιο αριθμό ακτοπλοϊκών γραμμών οι οποίες διασχίζουν τις περιοχές που πρόκειται να εγκατασταθούν οι ανεμογεννήτριες και πάνω στις οποίες δραστηριοποιούνται αναρίθμητα Επιβατηγά Οχηματαγωγά (Ε/Ο) πλοία. Συνεπώς, ο κίνδυνος μιας πιθανής σύγκρουσης είναι κάτι παραπάνω από υπαρκτός. Κρίνεται λοιπόν αναγκαίο να αναλυθεί και να αξιολογηθεί ο

συγκεκριμένος κίνδυνος, αλλά και να αναγνωριστούν οι συνέπειες ενός ενδεχόμενου συμβάντος, ώστε να βρεθούν τα κατάλληλα μέτρα πρόληψης και αντιμετώπισης.

1.2 Αντικείμενο και στόχος διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι η εύρεση μιας αποτελεσματικής διαδικασίας για τη ρεαλιστική μοντελοποίηση της πλευρικής σύγκρουσης ενός Ε/Ο πλοίου με μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια με θεμέλια τύπου μονού πυλώνα. Η εργασία εστιάζει στη δυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας και στη ζημιά που αυτή υφίσταται, αδιαφορώντας για τις συνέπειες της σύγκρουσης στο πλοίο. Για την όσο το δυνατόν βαθύτερη και πιο αξιόπιστη μελέτη του φαινομένου, είναι απαραίτητη η προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων σύγκρουσης, το κάθε ένα από τα οποία καθορίζεται από την ταχύτητα του πλοίου τη στιγμή της σύγκρουσης, την κατεύθυνση του σε σχέση με τον άνεμο, την ταχύτητα του ανέμου και την οριακή συνθήκη του πυλώνα στον πυθμένα. Ωστόσο, για να είναι το μοντέλο αποδοτικό και οικονομικό, πρέπει να γίνουν διαφορές αναγκαίες υποθέσεις και παραδοχές. Αφού τα διάφορα σενάρια προσομοιωθούν, συγκρίνονται μεταξύ τους με τελικό στόχο την εύρεση της επίδρασης κάθε παραμέτρου στην απόκριση της ανεμογεννήτριας. Για να επιτευχθεί αυτό, η σύγκριση θα αφορά όχι μόνο την μορφή απόκρισης της γεννήτριας αλλά και δυναμικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν το φαινόμενο όπως είναι οι επιταχύνσεις, οι μετατοπίσεις, οι ενέργειες κ.α.

1.3 Επισκόπηση διπλωματικής εργασίας

Η συγκεκριμένη μελέτη χωρίζεται σε δύο βασικά μέρη. Στο πρώτο μέρος, όπου αντιστοιχεί στο 3ο Κεφάλαιο της εργασίας, περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή του μοντέλου της σύγκρουσης, αναλύοντας κάθε πτυχή της αριθμητικής ανάλυσης που εφαρμόζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση μοντέλου. Η αρχή γίνεται με την παρουσίαση της γεωμετρίας του μοντέλου και την εύρεση του πλέγματος με το οποίο διακριτοποιείται χωρικά. Έπειτα, ορίζεται το μοντέλο υλικού που εισάγεται στις κατασκευές, και περιγράφονται τα φορτία που ασκούνται σε αυτές, αλλά και οι οριακές συνθήκες που τις περιορίζουν. Στο τέλος, προσδιορίζεται ο επιλύτης που χρησιμοποιείται για τις προσομοιώσεις και δίνονται τα σενάρια σύγκρουσης που αναλύονται. Το δεύτερο μέρος, που αποτελεί το 4^ο Κεφάλαιο της μελέτης, παρουσιάζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των σεναρίων, τα οποία συγκρίνονται μεταξύ τους, με στόχο την αναγνώριση της επίδρασης κάθε διαφορετικής παραμέτρου στην εξέλιξη της σύγκρουσης. Η εργασία περιλαμβάνει, ωστόσο, δύο επιπλέον κεφάλαια. Στο 2^ο Κεφάλαιο δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο των συγκρούσεων των πλοίων με τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες και παρουσιάζονται ορισμένες προϋπάρχουσες έρευνες της βιβλιογραφίας πάνω στο συγκεκριμένο φαινόμενο. Τέλος, στο 5^ο Κεφάλαιο, πραγματοποιείται η επισκόπηση της εργασίας, περιγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα σε αυτό το επιστημονικό πεδίο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ
&
ΣΧΕΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Κεφάλαιο 2^ο: Θεωρητικό Υπόβαθρο & Σχετική Έρευνα

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που ήταν απαραίτητο για τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής, αλλά και για την ομαλή παρακολούθηση της από τον αναγνώστη. Σε πρώτη φάση, παρατίθεται η μηχανική των συγκρούσεων και η φιλοσοφία πίσω από τα σχεδιαστικά πρότυπα, που σχετίζονται με τον σχεδιασμό των ανεμογεννητριών έναντι των συγκρούσεων με πλοία, εστιάζοντας στα πρότυπα των DNV-GL και NORSOK. Έπειτα, γίνεται αναφορά στον ρόλο των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων στην μελέτη και την επίλυση προβλημάτων σύγκρουσης. Τέλος, συνοψίζεται η έρευνα που έχει προηγηθεί σχετικά με την μοντελοποίηση αυτού του τύπου συγκρούσεων, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση του θέματος της συγκεκριμένης μελέτης καθώς και την απόκτηση ιδεών και μεθόδων για το στήσιμο ενός αποτελεσματικού και ρεαλιστικού μοντέλου σύγκρουσης.

2.2 Θεωρία Συγκρούσεων – Σχεδιαστικά Πρότυπα

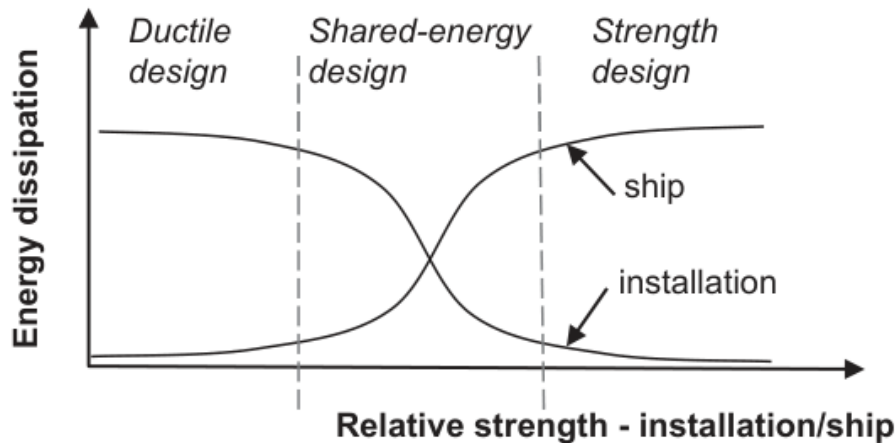
2.2.1 Γενικά

Το φαινόμενο της σύγκρουσης ενός πλοίου με μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια χαρακτηρίζεται από την κινητική ενέργεια. Αυτή καθορίζεται από τη μάζα του πλοίου, την πρόσθετη υδροδυναμική μάζα και την ταχύτητα του πλοίου τη στιγμή της σύγκρουσης. Ανάλογα τις συνθήκες της σύγκρουσης, ένα μέρος της κινητικής ενέργειας ίσως παραμείνει κινητική ενέργεια μετά την σύγκρουση. Το μεγαλύτερο όμως ποσοστό αυτής, μετατρέπεται σε ενέργεια παραμόρφωσης, την οποία απορροφά η κατασκευή και πιθανώς και το ίδιο το πλοίο. Αυτό περιλαμβάνει μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις και σημαντικές κατασκευαστικές ζημιές στην ανεμογεννήτρια, στο πλοίο ή και στα δύο. Ο τρόπος με τον οποίο η ενέργεια παραμόρφωσης διασπείρεται εξαρτάται από την χαρακτηριστική καμπύλη δύναμης-παραμόρφωσης της κάθε κατασκευής. Ωστόσο, σημειώνεται, πως οι παραμορφώσεις στην ανεμογεννήτρια πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις ολκιμότητας και ευστάθειας. Το αντίκτυπο που θα έχει η σύγκρουση στην δομική ακεραιότητα των κατασκευών μπορεί να μελετηθεί είτε μέσω μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων είτε μέσω ενεργειακών μεθόδων σε συνδυασμό με απλές ελαστοπλαστικές μεθόδους.

2.2.2 Φιλοσοφία Σχεδίασης

Σύμφωνα με τα πρότυπα NORSOK (N-004 2013) [6] και τα σχεδιαστικά πρότυπα του DNV [7], ορίζονται τρεις τύποι σχεδίασης όσον αφορά την κατανομή της ενέργειας παραμόρφωσης:

- Σχεδίαση Αντοχής (Strength Design)
- Όλκιμη Σχεδίαση (Ductility Design)
- Σχεδίαση Μοιρασμένης Ενέργειας (Shared-Energy Design)



Σχήμα 2.1: Κατανομή ενέργειας για τους τρεις διαφορετικούς τύπους σχεδίασης [6],[7]

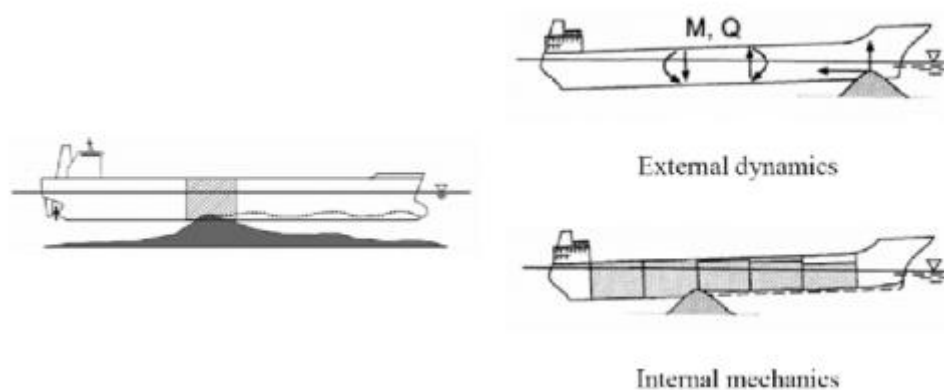
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1, με τη σχεδίαση αντοχής η εγκατάσταση, εν προκειμένω η ανεμογεννήτρια, θεωρείται αρκετά στιβαρή ώστε να αντισταθεί στις δυνάμεις που ασκούνται λόγω της σύγκρουσης με ελάχιστες παραμορφώσεις. Αυτό σημαίνει, πως το πλοίο αναγκάζεται να παραμορφωθεί απορροφώντας το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας σύγκρουσης. Από την άλλη μεριά, με την όλκιμη σχεδίαση η εγκατάσταση είναι η κατασκευή που υφίσταται μεγάλες, πλαστικές παραμορφώσεις και που απορροφά την περισσότερη ενέργεια. Στην τρίτη περίπτωση και οι δύο κατασκευές συμμετέχουν σημαντικά στην διάχυση της ενέργειας. Για την υπολογιστική διαδικασία, η επιλογή ενός από των δύο πρώτων τύπων σχεδίασης αποδεικνύεται ευνοϊκότερη, καθώς σε αυτή την περίπτωση, η απόκριση της κατασκευής που θα παραλάβει τις παραμορφώσεις μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας την έτερη κατασκευή πλήρως άκαμπτη. Εφαρμόζοντας όμως τη σχεδίαση μοιρασμένης ενέργειας συνεπάγεται πως το μέγεθος και η κατανομή της δύναμης κρούσης εξαρτάται από την παραμόρφωση και των δύο κατασκευών, κάτι το οποίο καθιστά την ανάλυση πολύπλοκη.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία κρίνεται χρήσιμη η υιοθέτηση ενός τύπου σχεδίασης από τους παραπάνω. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια της εργασίας, τόσο τα σχεδιαστικά πρότυπα, όσο και οι υπάρχουσες έρευνες αναφέρονται στη σύγκρουση υπηρεσιακών πλοίων με ανεμογεννήτριες. Τα συγκεκριμένα πλοία είναι μικρού μεγέθους, έχουν εκτόπισμα λίγων τόνων και κινούνται σε χαμηλές ταχύτητες. Επομένως, σε αυτές τις περιπτώσεις η ανεμογεννήτρια θα αντέξει κατά πάσα πιθανότητα τη σύγκρουση, γεγονός που ευνοεί την εφαρμογή της σχεδίασης αντοχής. Στην εργασία αυτή όμως, το συγκρουόμενο πλοίο είναι

ένα Ε/Ο που όπως είναι φανερό έχει μεγαλύτερο μέγεθος και εκτόπισμα από ένα υπηρεσιακό πλοίο. Επομένως, η υιοθέτηση της όλκιμης σχεδίασης φαίνεται να είναι η πιο λογική επιλογή.

2.2.3 Εσωτερική και Εξωτερική Μηχανική

Μια βολική μέθοδος για την επίλυση των προβλημάτων σύγκρουσης που περιέχουν και ρευστό είναι ο διαχωρισμός του προβλήματος στην εξωτερική του δυναμική και στον εσωτερικό του μηχανισμό. Το αποσυζευγμένο μοντέλο δίνει μια γρήγορη και σχετικά υψηλής ακρίβειας εκτίμηση της διάχυσης της ενέργειας σύγκρουσης. Παρουσιάζει ωστόσο σημαντικά μειονεκτήματα που σχετίζονται με τις υποθέσεις και παραδοχές που γίνονται κατά την εφαρμογή της (Yu et al 2013) [8]. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται ενδεικτικά η αποσύζευξη ενός προβλήματος προσάραξης πλοίου.



Σχήμα 2.2: Αποσυζευγμένο πρόβλημα προσάραξης πλοίου (Rypestol, 2020) [9]

Το μοντέλο της εξωτερικής δυναμικής απλοποιεί την επίδραση του ρευστού, θεωρώντας σταθερή την πρόσθετη υδροδυναμική μάζα και το σύστημα να μην περιέχει απόσβεση. Έτσι, μπορεί να εφαρμοστεί η αρχή διατήρησης της ορμής και της ενέργειας και να υπολογιστεί εύκολα και με σχετική ακρίβεια η κατανομή της ενέργειας. Θεωρώντας γνωστή την ταχύτητα των δύο κατασκευών πριν και μετά τη σύγκρουση, μπορούν να υπολογιστούν οι απώλειες ενέργειας κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης.

Για τις πλωτές κατασκευές το ποσοστό της κινητικής ενέργειας πριν την κρούση που μετατρέπεται σε ενέργεια παραμόρφωσης ισούται με:

$$E_s = \frac{1}{2} (m_s + a_s) v_s^2 \frac{\left(1 - \frac{v_i}{v_s}\right)^2}{1 + \frac{m_s + a_s}{m_i + a_i}} \quad (2.1)$$

Ενώ για τις πακτωμένες στον πυθμένα εγκαταστάσεις ισούται με:

$$E_s = \frac{1}{2} (m_s + a_s) v_s^2 \quad (2.2)$$

Όπου:

m_s , η μάζα του πλοίου

a_s , η πρόσθετη υδροδυναμική μάζα του πλοίου

v_s , η ταχύτητα σύγκρουσης του πλοίου

m_i , η μάζα της εγκατάστασης

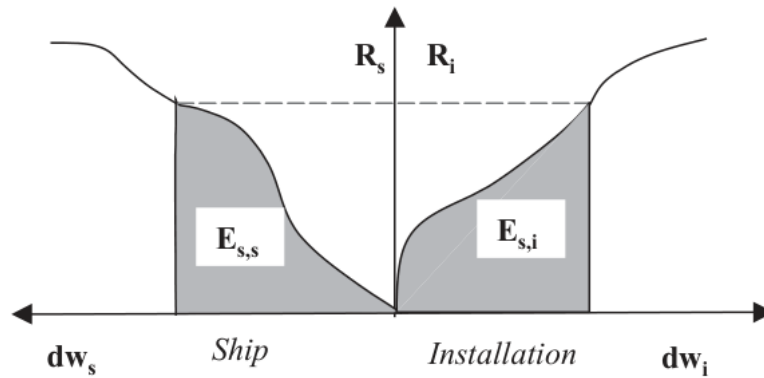
a_i , η πρόσθετη υδροδυναμική μάζα της εγκατάστασης

v_i , η ταχύτητα της εγκατάστασης η οποία σε πολλές περιπτώσεις αμελείται και θεωρείται μηδενική

Το μοντέλο του εσωτερικού μηχανισμού αφορά τις παραμορφώσεις που υφίσταται η κατασκευή μέσω των οποίων εκδηλώνεται η ενέργεια παραμόρφωσης. Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες δύναμης – μετατόπισης για τις δύο συγκρουόμενες κατασκευές. Η συνολική επιφάνεια κάτω από κάθε καμπύλη ισούται με τη συνολική ενέργεια παραμόρφωσης που κάθε κατασκευή απορροφά. Η τελική εγκάρσια παραμόρφωση κάθε κατασκευής αντιστοιχεί σε εκείνη που η συνολική επιφάνεια που σχηματίζεται ισούται με τις απώλειες ενέργειας κατά τη διάρκεια της κρούσης ή αλλιώς την κινητική ενέργεια του πλοίου πριν την σύγκρουση για πακτωμένες κατασκευές (Εξίσωση 2.3).

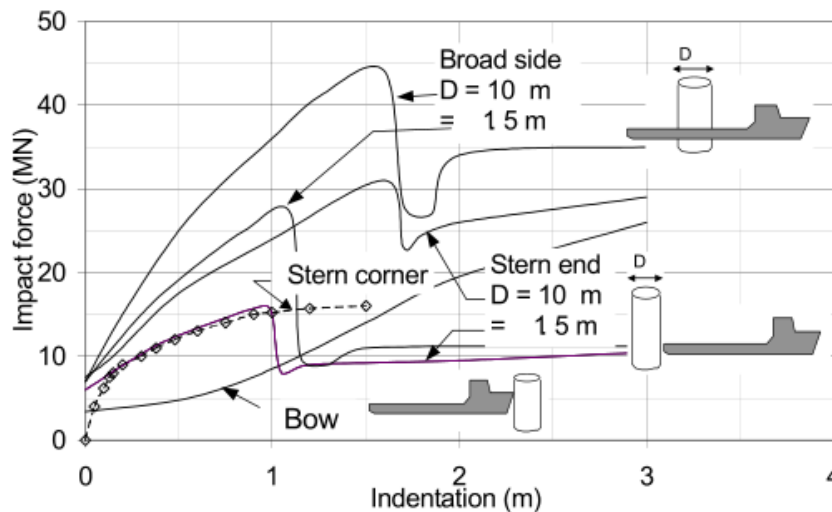
$$E_s = E_{s,s} + E_{s,i} = \int_0^{w_{s,max}} R_s dw_s + \int_0^{w_{i,max}} R_i dw_i \quad (2.3)$$

Οι σχέσεις δύναμης – μετατόπισης για το πλοίο και την εγκατάσταση συνήθως προσδιορίζονται ανεξάρτητα η μία από την άλλη, θεωρώντας το ένα από τα δύο αντικείμενα απόλυτα άκαμπτο. Αυτός ο τρόπος όμως δεν είναι απόλυτα ακριβής αφού και τα δύο αντικείμενα θα απορροφήσουν μέρος της ενέργειας κρούσης υπό μορφή ενέργειας παραμόρφωσης ανεξάρτητα με το πόσο εύκαμπτα είναι (Moan 2003) [10]. Αντίθετα, εφαρμόζοντας αυτή τη μέθοδο, η απόκριση της πιο ανθεκτικής κατασκευής υπερεκτιμάται, αφού παρατηρείται μεγαλύτερη ζημιά από ότι θα υπήρχε στην πραγματικότητα. Στην αντίπερα όχθη, η λιγότερο στιβαρή δομή υπόκειται σε μικρότερες παραμορφώσεις από τις πραγματικές. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν η πιο εύκαμπτη κατασκευή παραμορφώνεται, η επιφάνεια επαφής αυξάνεται και η δύναμη κρούσης κατανέμεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια με αποτέλεσμα η αντίσταση της δυνατότερης κατασκευής να μεγαλώνει (Kullerud 2020) [11].



Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστικές καμπύλες δύναμης-παραμόρφωσης πλοίου και εγκατάστασης [6]

Ο DNV [7] προτείνει ορισμένες καμπύλες δύναμης-παραμόρφωσης (Σχήμα 2.4) για συγκρούσεις επιχειρησιακών πλοίων εκτοπίσματος 5000 τόνων με κατακόρυφο κύλινδρο, ο οποίος θεωρείται απόλυτα άκαμπτος. Δηλαδή υιοθετείται το μοντέλο σχεδιάσης αντοχής, σύμφωνα με το οποίο όλη την ενέργεια σύγκρουσης την παραλαμβάνει το πλοίο. Οι συγκρούσεις που περιγράφονται μπορεί να είναι πλευρικές, αλλά και με την πλώρη ή την πρύμνη του πλοίου. Ενώ ο κυλινδρικός πυλώνας μπορεί να αντιστοιχεί είτε σε λεπτούς πυλώνες θεμελίων τύπου Jacket ($D=1.5\text{ m}$) είτε σε μονούς πυλώνες μεγάλης διαμέτρου ($D=10\text{ m}$).



Σχήμα 2.4: Καμπύλες δύναμης-παραμόρφωσης του DNV [7]

Ωστόσο, ενώ μέχρι τώρα τα πρότυπα του DNV αφορούν επιχειρησιακά πλοία 5000 τόνων, το μέγεθος αυτών των πλοίων συνεχώς αυξάνεται φτάνοντας μέχρι και τους 10,000 τόνους. Επίσης, όπως σχολιάστηκε και νωρίτερα τέτοιες εγκαταστάσεις βρίσκονται κοντά σε ακτοπλοϊκές γραμμές όπου κινούνται πλοία πολύ μεγαλύτερου μεγέθους και με μεγαλύτερες ταχύτητες. Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερες ενέργειες σύγκρουσης και σε καταστροφικότερες συνέπειες. Είναι επομένως εμφανές ότι τα διαθέσιμα ενεργειακά σχεδιαστικά πρότυπα δεν συμβαδίζουν με τις ανάγκες της εποχής. Επιπλέον, σε αυτές τις περιπτώσεις, η εφαρμογή της

σχεδίασης αντοχής δεν ανταποκρίνεται απαραίτητα στην πραγματικότητα, καθώς η εγκατάσταση ενδεχομένως να είναι η κατασκευή που θα εμφανίσει τις μεγαλύτερες παραμορφώσεις και που πιθανόν να οδηγηθεί στην κατάρρευση. Οπότε, είναι αναγκαία η ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων για την μελέτη του φαινομένου.

2.2.4 Χρήση πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση συγκρούσεων

Η χρήση των λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση προβλημάτων σύγκρουσης αποτελεί μεγάλη πρόκληση για τους επιστήμονες εδώ και τέσσερις δεκαετίες (Σαμουηλίδης) [12]. Τα πλεονεκτήματα του έναντι των αναλυτικών μεθόδων ήταν εμφανή από την αρχή. Με τα πεπερασμένα στοιχεία δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να μοντελοποιήσει την επαφή και την αλληλεπίδραση κατασκευών με πολύπλοκες γεωμετρίες, να χρησιμοποιήσει μοντέλα υλικών που περιγράφουν καλύτερα τη συμπεριφορά του υλικού και να λύσει μη γραμμικά προβλήματα με μεγάλες παραμορφώσεις και μετατοπίσεις. Με τη σταδιακή βελτίωση τόσο των λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων, όσο και των δυνατοτήτων των υπολογιστών, τα πεπερασμένα στοιχεία έγιναν ο βασικός τρόπος για την μελέτη και την ανάλυση των συγκρούσεων συμπεριλαμβανομένου και εκείνων των πλοίων. Παρ' όλα αυτά λόγω της ύπαρξης πολλαπλών κατασκευών που αλληλεπιδρούν και της πιθανής θραύσης που θα επέλθει μεταξύ τους, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μπορεί να αποδειχθούν ιδιαίτερα αναληθή αν δεν γίνει η κατάλληλη μοντελοποίηση του προβλήματος. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν έντονα το αποτέλεσμα είναι το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος, το μοντέλο του υλικού και το κριτήριο θραύσης. Επομένως, η χρήση των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση συγκρούσεων εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση για τους μελετητές.

2.3 Σχετική Βιβλιογραφία

2.3.1 Γενικά

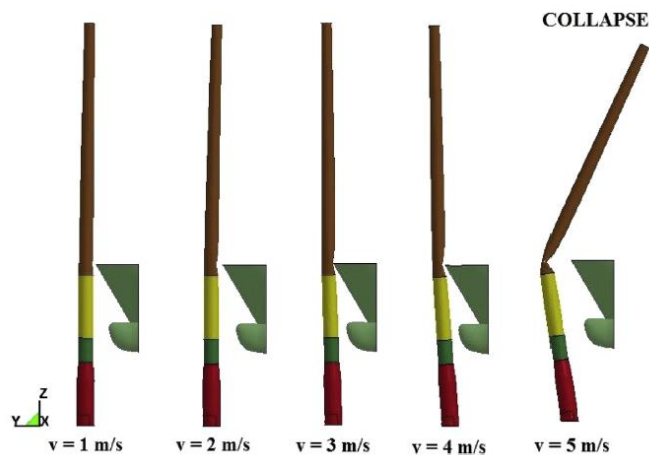
Παρά το γεγονός ότι η κατασκευή ανεμογεννητριών κοντά σε ακτοπλοϊκές γραμμές εμπορικών πλοίων συνεχίζεται με αμείωτο ρυθμό, ελάχιστες μελέτες έχουν δημοσιευτεί σχετικά με την πιθανή σύγκρουση των δύο κατασκευών και των συνεπειών που αυτή μπορεί να επιφέρει. Αυτό οφείλεται στην μέχρι αυτή τη στιγμή πολύ χαμηλή πιθανότητα εμφάνισης τέτοιων ατυχημάτων. Η υπάρχουσα έρευνα έχει εστιάσει στις συγκρούσεις που μπορεί να προκληθούν από τα επιχειρησιακά πλοία που επισκέπτονται τακτικά τις ανεμογεννήτριες. Οι ερευνητές έχουν προσεγγίσει το φαινόμενο από διαφορετικές σκοπιές και με διαφορετικούς τρόπους. Έχουν εξετάσει την απόκριση όλων των τύπων υπεράκτιων ανεμογεννητριών και έχουν λάβει αποτελέσματα τόσο για τις συνέπειες όσο και για την πιθανότητα εμφάνισης τέτοιων συμβάντων, χρησιμοποιώντας τόσο συμβατικές όσο και σύγχρονες μεθόδους. Η βασικότερη τροχοπέδη που τους εμποδίζει στο να καταλήξουν σε απόλυτα συμπεράσματα είναι η απουσία πειραματικών δεδομένων, αλλά και πραγματικών συμβάντων που θα τους επέτρεπε να επαληθεύσουν ή να διαψεύσουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένες επιλεγμένες μελέτες που συλλέχθηκαν από την σχετική υπάρχουσα βιβλιογραφία και που αποδείχτηκαν χρήσιμες για την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης.

2.3.2 Ανάλυση σεναρίων μετωπικής σύγκρουσης πλοίου με ανεμογεννήτρια

Στην έρευνα των Bela, Le Sourne και άλλων [13] μελετήθηκε η μετωπική σύγκρουση δύο επιχειρησιακών πλοίων με μια θαλάσσια ανεμογεννήτρια τύπου μονού πυλώνα. Στόχος των ερευνητών ήταν η κατανόηση της συμπεριφοράς της κατασκευής λόγω της κρούσης και της δυναμικής απόκρισης της κορυφής της, όπου βρίσκεται η ηλεκτρική γεννήτρια και στηρίζονται οι περιστρεφόμενες λεπίδες. Επιπλέον, καλούνταν να διερευνήσουν την επιρροή διαφόρων παραμέτρων στην εξέλιξη του φαινομένου. Αυτές ήταν η ταχύτητα σύγκρουσης του πλοίου, η κατακόρυφη θέση της σύγκρουσης, τα φορτία του ανέμου και η ευκαμψία του πυθμένα. Λόγω του θέματος και της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε στην συγκεκριμένη δημοσίευση, αυτή φάνηκε εν τέλει ιδιαίτερα χρήσιμη για την εκπλήρωση της παρούσας εργασίας.

Η ανεμογεννήτρια που μοντελοποιήθηκε είχε ύψος 115 m και η άτρακτος (nacelle) πάνω στην οποία στηρίζονται οι λεπίδες ζύγιζε 350 t. Για λόγους απλοποίησης του μοντέλου η γεωμετρία του ατρακτίδιου και των λεπίδων δεν μοντελοποιήθηκε. Αντίθετα, αντικαταστήθηκαν από μία σημειακή μάζα στην κορυφή του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Το πρώτο πλοίο που μοντελοποιήθηκε είχε εκτόπισμα 5000 t και θεωρήθηκε απόλυτα άκαμπτο, ώστε να ληφθεί μια συντηρητική εκτίμηση της αντίστασης της ανεμογεννήτριας. Το δεύτερο πλοίο με εκτόπισμα 3000 t μπορούσε να παραλάβει παραμορφώσεις λόγω της σύγκρουσης, αποτυπώνοντας έτσι καλύτερα την διάχυση της ενέργειας μεταξύ των δύο κατασκευών.

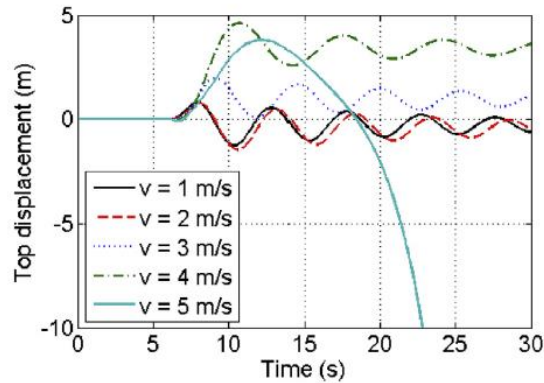
Για την περίπτωση της σύγκρουσης με το άκαμπτο πλοίο θεωρήθηκαν πέντε ταχύτητες σύγκρουσης από 1 m/s έως 5 m/s. Τα φορτία του ανέμου θεωρήθηκαν μηδενικά με σκοπό να φανεί ξεκάθαρα η επίδραση της ταχύτητας του πλοίου στην απόκριση της γεννήτριας. Παρατηρήθηκε πως για μικρές ταχύτητες πλοίου (1-2 m/s), η κορυφή του πυλώνα κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της σύγκρουσης, λόγω των πλαστικών παραμορφώσεων στην περιοχή που γίνεται η επαφή. Για τις ενδιάμεσες ταχύτητες των 3 m/s και 4 m/s, η κορυφή κινείται στην ίδια κατεύθυνση με το συγκρουόμενο πλοίο λόγω των επιπρόσθετων παραμορφώσεων κοντά στον πυθμένα. Ενώ, όταν το πλοίο προσκρούει στον πυλώνα με ταχύτητα 5 m/s, η κατασκευή δέχεται ακόμα μεγαλύτερες πλαστικές παραμορφώσεις στον πυθμένα και η δημιουργία πλαστικού κόμβου στην περιοχή της σύγκρουσης οδηγεί στην κατάρρευση όλης της κατασκευής (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5: Παραμορφωμένο σχήμα ανεμογεννήτριας για κάθε ταχύτητα σύγκρουσης [13]

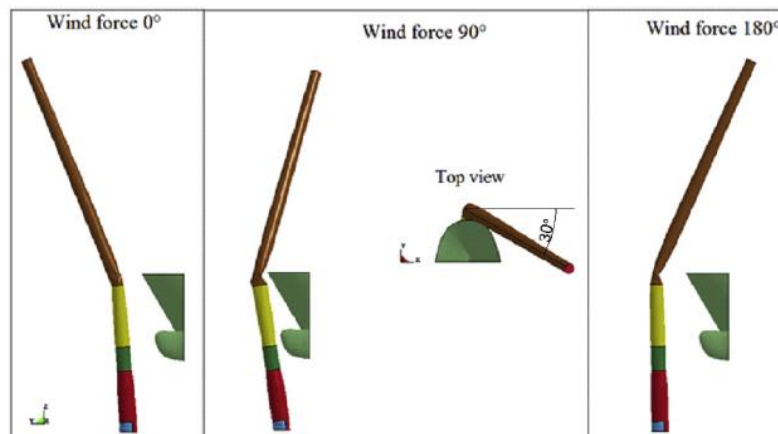
Μετά την σύγκρουση η κορυφή της ανεμογεννήτριας αποκτά μια ταλαντωτική συμπεριφορά για ταχύτητες από 1 m/s έως 4 m/s. Η νέα θέση ισορροπίας, λόγω της ταλάντωσης, απομακρύνεται από την αρχική σταθερή θέση της κορυφής, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του πλοίου (Σχήμα 2.6). Η δύναμη κρούσης κυμαίνεται από 6.17 MN για 1 m/s έως 11.7 MN για 5 m/s, ενώ η εισχώρηση στην περιοχή της κρούσης από 0.54 m για 1 m/s έως 2.39 m για 5 m/s. Μάλιστα τα 2.39 m ισοδυναμούν με μια μείωση της εγκάρσιας τομής της ανεμογεννήτριας της τάξεως του 56%, γεγονός που υποδηλώνει την δημιουργία πλαστικού κόμβου.

Έπειτα, οι μελετητές ερεύνησαν την επίδραση της θέσης πάνω στον πυλώνα όπου συμβαίνει η σύγκρουση. Ανάλογα την παλίρροια και το ύψος του πλοίου η κατακόρυφη θέση του σημείου σύγκρουσης θα ποικίλει. Όταν η σύγκρουση συμβαίνει στην περιοχή του πύργου της ανεμογεννήτριας (της κατασκευής δηλαδή που στηρίζεται από τα θεμέλια τύπου μονού πυλώνα), η τελική εισχώρηση θα είναι μεγαλύτερη από εκείνη που θα προκαλούταν από σύγκρουση στην περιοχή των θεμελίων. Αντίθετα, αποδείχτηκε πως όσο χαμηλότερα βρισκόταν το σημείο σύγκρουσης τόσο χαμηλότερη ήταν η κρίσιμη ταχύτητα σύγκρουσης πέρα από την οποία η κατασκευή κατέρρεε.



Σχήμα 2.6: Χρονική ιστορία της μετατόπισης της κορυφής της ανεμογεννήτριας [13]

Επιπρόσθετα, θεωρώντας ένα σταθερό φορτίο ανέμου μοντελοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές κατευθύνσεις του ανέμου για κάθε ταχύτητα κρούσης. Όπως αναμενόταν, ένας κάθετος άνεμος ως προς την διεύθυνση κίνησης του πλοίου δεν είχε μεγάλη επίδραση στην απόκριση της κατασκευής, αν εξαιρέσουμε ότι η κατασκευή καταρρέει σε γωνία 30 μοιρών ως προς τη διεύθυνση του ανέμου. Αντιθέτως, όταν ο άνεμος και το πλοίο έχουν αντίθετες κατευθύνσεις, η ανεμογεννήτρια καταρρέει ακόμα και στην περίπτωση όπου συγκρούεται με πλοίο ταχύτητας 3 m/s. Στο χειρότερο σενάριο κιάλας μπορεί να οδηγήσει σε πτώση της ανεμογεννήτριας πάνω στο πλοίο (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7: Μορφή κατάρρευσης της ανεμογεννήτριας για διαφορετικές κατευθύνσεις ανέμου [13]

Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση της ευελιξίας του πυθμένα χρησιμοποιώντας ελατήρια για την μοντελοποίηση της ευκαμψίας του σε αντίθεση με την απλή πάκτωση που εφαρμόστηκε στις προηγούμενες περιπτώσεις. Έτσι, φάνηκε ότι χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ευκινησία του εδάφους η πλαστική παραμόρφωση της κατασκευής υπερεκτιμούταν.

Στην δεύτερη περίπτωση, όπου το πλοίο μπορούσε να λάβει παραμορφώσεις, η ανεμογεννήτρια παραμορφώθηκε δύο φορές λιγότερο σε σχέση με την πρώτη περίπτωση του άκαμπτου πλοίου και μπορούσε να αντέξει την σύγκρουση χωρίς να καταρρεύσει έως και για ταχύτητα πλοίου 6 m/s. Επιπλέον, φάνηκε πως για ταχύτητες έως 3 m/s το πλοίο απορροφούσε περισσότερη ενέργεια από την γεννήτρια. Ωστόσο, για μεγαλύτερες ταχύτητες

περισσότερη ενέργεια διαχέεται στην ανεμογεννήτρια λόγω των επιπλέον παραμορφώσεων στην περιοχή του πυθμένα.

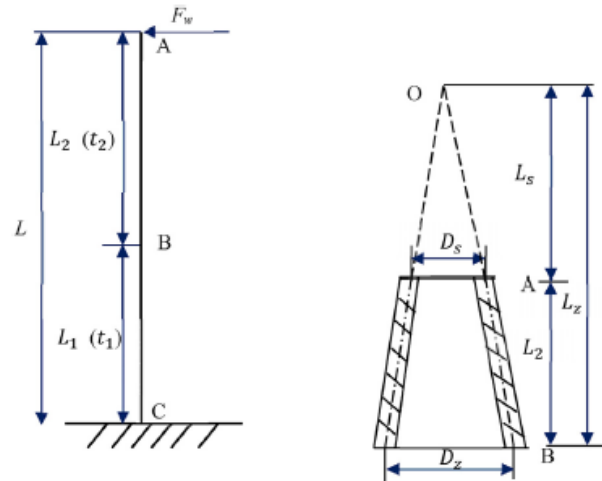
2.3.3 Χρήση αναλυτικών μεθόδων για την διερεύνηση της σύγκρουσης

Μια παρόμοια μελέτη δημοσίευσαν το 2020 οι Song, Jiang και Yuan [14]. Αρχικά κατασκεύασαν ένα αριθμητικό μοντέλο με το οποίο προσομοίωσαν 36 διαφορετικά σενάρια σύγκρουσης με σκοπό τον έλεγχο των διαφορετικών παραμέτρων που επιδρούν στο φαινόμενο. Η διαφορά με την δουλειά των Bela και Le Sourne [13] έγκειται στο ότι παράλληλα συνέθεσαν και ένα αναλυτικό μοντέλο που περιέγραφε τη συμπεριφορά των κατασκευών με μαθηματικές εξισώσεις, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του με εκείνα των προσομοιώσεων.

Το αριθμητικό μοντέλο κατασκευάστηκε ακολουθώντας τις βασικές μεθόδους που χρησιμοποίησαν και οι Bela, Le Sourne [13]. Ωστόσο, μοντελοποιήθηκε και το τμήμα του πυλώνα που βρίσκεται εντός του πυθμένα με σκοπό να αναπαρασταθεί η αλληλεπίδραση του με το υπέδαφος που το περιβάλλει. Για να επιτευχθεί αυτό μη γραμμικά ελατήρια, στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, τοποθετήθηκαν σε διάφορα ύψη του πυλώνα. Το ένα άκρο των ελατηρίων ήταν ενωμένο με τον πυλώνα και το άλλο άκρο ήταν πακτωμένο σε όλες τις διευθύνσεις. Η συγκεκριμένη τεχνική θα εφαρμοστεί και στην παρούσα εργασία όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια.

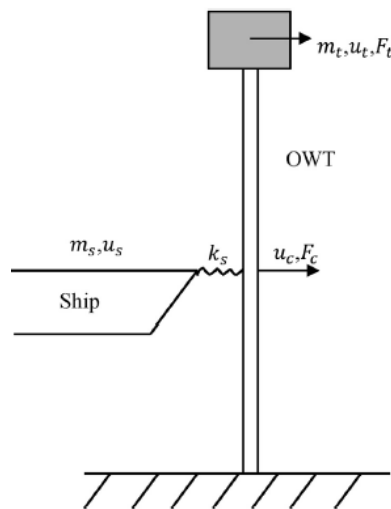
Για την κατασκευή του αναλυτικού μοντέλου, η απόκριση της ανεμογεννήτριας θεωρήθηκε ένα γραμμικό άθροισμα των ξεχωριστών μετατοπίσεων λόγω του φορτίου του ανέμου και της δύναμης κρούσης. Η μετατόπιση λόγω του ανέμου υπολογίστηκε με βάση την ελαστική γραμμή και την καμπτική θεωρία δοκού, με την ανεμογεννήτρια να θεωρείται πρόβολος δοκός μεταβλητής διατομής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Από την άλλη η μετατόπιση λόγω της κρούσης και η διάχυση της ενέργειας λόγω αυτής υπολογίστηκαν εφαρμόζοντας τις αρχές διατήρησης της ορμής και της ενέργειας και τις βασικές εξισώσεις δυναμικής των στερεών σωμάτων. Το απλοποιημένο δισδιάστατο μοντέλο σύγκρουσης φαίνεται στο Σχήμα 2.9.

Ένας από τους παράγοντες που μελετήθηκαν για την εξέλιξη της σύγκρουσης ήταν η αεροδυναμική απόσβεση. Οι συγγραφείς κατέληξαν πως όταν λαμβάνεται υπόψιν το συγκεκριμένο μέγεθος για κατευθύνσεις ανέμου ομόρροπες ή αντιρροπες της κατεύθυνσης του πλοίου, το πλάτος της ταλάντωσης της κορυφής της ανεμογεννήτριας και η απορροφούμενη ελαστική ενέργεια από αυτή είναι πολύ μικρότερα από όταν θεωρείται μηδενικό. Αντίθετα, αποδείχτηκε πως επηρεάζει ελάχιστα για κατεύθυνση ανέμου κάθετη σε εκείνη της σύγκρουσης.



Σχήμα 2.8: Απλοποιημένη σχηματική αναπαράσταση της ανεμογεννήτριας για τον υπολογισμό της μετατόπισης λόγω του ανέμου [14]

Όσον αφορά το αναλυτικό μοντέλο, φάνηκε πως τα αποτελέσματα του για τη μέγιστη μετατόπιση της κορυφής, τη μέγιστη δύναμη και τη διάχυση της ενέργειας συμφωνούν ικανοποιητικά με τα αντίστοιχα από το αριθμητικό μοντέλο για ταχύτητες πλοίου 1 m/s και 3 m/s. Η ακρίβεια είναι χαμηλότερη για ταχύτητα 2 m/s και οι μαθηματικές εξισώσεις εξακολουθούν να μην μπορούν να αξιολογήσουν αποτελεσματικά την κατάρρευση της κατασκευής.



Σχήμα 2.9: Απλοποιημένη σχηματική αναπαράσταση της ανεμογεννήτριας για τον υπολογισμό της μετατόπισης λόγω της κρούσης [14]

2.3.4 Ανάλυση ρίσκου αυτού του είδους συγκρούσεων

Μια διαφορετική προσέγγιση του φαινομένου παρουσίασαν στο άρθρο τους οι Dai, Ehlers και άλλοι το 2012 [15]. Μέσω της δημοσίευσης τους πρότειναν ένα πλαίσιο αξιολόγησης του ρίσκου των συγκρούσεων μεταξύ επιχειρησιακών πλοίων και υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Διερευνήσανε το μέγεθος του ρίσκου σύγκρουσης αναδεικνύοντας τους σημαντικότερους παράγοντες που το επηρεάζουν.

Για τον καθορισμό του πλαισίου ακολουθήθηκε μια τυπική ανάλυση ρίσκου. Πρώτο βήμα ήταν ο προσδιορισμός των κινδύνων που εγκυμονούν με βάση τη συνήθη λειτουργία των επιχειρησιακών πλοίων γύρω από τις ανεμογεννήτριες. Επιπλέον, διαχωρίστηκαν οι τύποι των πιθανών συγκρούσεων σε μετωπικές, πλευρικές και συγκρούσεις λόγω πηδαλιούχησης.

Έπειτα, οι μελετητές καλούνταν να υπολογίσουν την πιθανότητα εκδήλωσης αυτών των σεναρίων σύγκρουσης, αποστολή που ήταν ιδιαίτερα δύσκολη λόγω της έλλειψης ιστορικών δεδομένων από προηγούμενες παρόμοιες συγκρούσεις. Όμως, με τη βοήθεια δέντρων γεγονότων και δέντρων αιτιών, αλλά και χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα από παρόμοιες συγκρούσεις στην υπεράκτια βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου και αερίου κατάφεραν να προσδιορίσουν τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν το ρίσκο (RIFs – Risk Influencing Factors). Έτσι, αφού προσάρμοσαν τους παράγοντες ρίσκου στη βιομηχανία των υπεράκτιων ανεμογεννητριών και τους κατέταξαν με βάση τη σημαντικότητα τους και την επιρροή τους, κατέληξαν σε μια εκτίμηση της πιθανότητας σύγκρουσης ενός επιχειρησιακού πλοίου με ανεμογεννήτρια.

Για την εύρεση των συνεπειών λόγω της σύγκρουσης, κατασκευάστηκε ένα αριθμητικό μοντέλο με τη χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων. Με αυτό τον τρόπο προσομοιώθηκαν 7 διαφορετικά σενάρια ανακαλύπτοντας σε ποιές περιπτώσεις δημιουργούνται περιορισμένες παραμορφώσεις γύρω από την περιοχή της σύγκρουσης και σε ποιές περιπτώσεις η ζημιά επεκτείνεται σε μεγαλύτερο τμήμα της κατασκευής. Συνεπώς, αξιολογήθηκε ποιά σενάρια σύγκρουσης επιφέρουν τις δυσμενέστερες συνέπειες. Μάλιστα, βρέθηκε ότι ακόμα και στα σενάρια όπου το πλοίο κινούταν με χαμηλή ταχύτητα οι συνέπειες δεν μπορούσαν να θεωρηθούν αμελητέες.

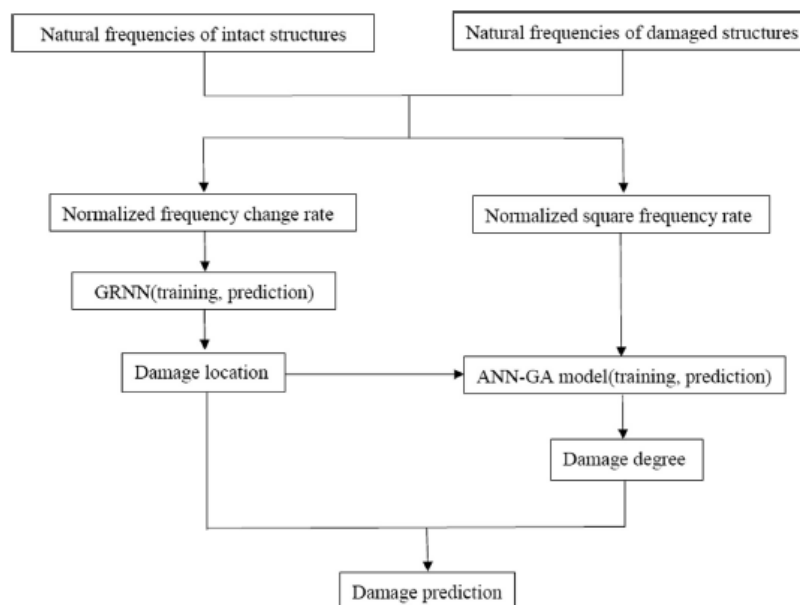
Έχοντας πλέον εκτιμήσει τόσο την πιθανότητα όσο και τις συνέπειες μιας τέτοιας σύγκρουσης οι ερευνητές μπορούσαν να υπολογίσουν το ρίσκο που την χαρακτηρίζει σε κάθε περίπτωση. Αυτό τους προσέφερε την δυνατότητα να προτείνουν κατάλληλα μέτρα για την μείωση του. Αυτά χωρίζονταν σε δύο κατηγορίες: εκείνα που αφορούσαν την μείωση της πιθανότητας σύγκρουσης, όπως την πλήρη εκπαίδευση του πληρώματος των πλοίων και των μηχανικών των ανεμογεννητριών και εκείνα που σχετίζονταν με την μείωση των συνεπειών, όπως την αποτελεσματική συντήρηση της ανεμογεννήτριας.

2.3.5 Χρήση νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη της ζημιάς στην ανεμογεννήτρια

Οι Qiu, Lu, Sun και άλλοι [16] πρότειναν έναν σύγχρονο τρόπο για τον προσδιορισμό της ζημιάς που έχει προκληθεί στην ανεμογεννήτρια. Η μέθοδος τους περιλάμβανε τη χρήση νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη της θέσης και της έκτασης της αστοχίας. Για την εκπαίδευση των δικτύων χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων τα οποία είχαν επαληθευτεί μέσω αντίστοιχων πειραματικών αποτελεσμάτων.

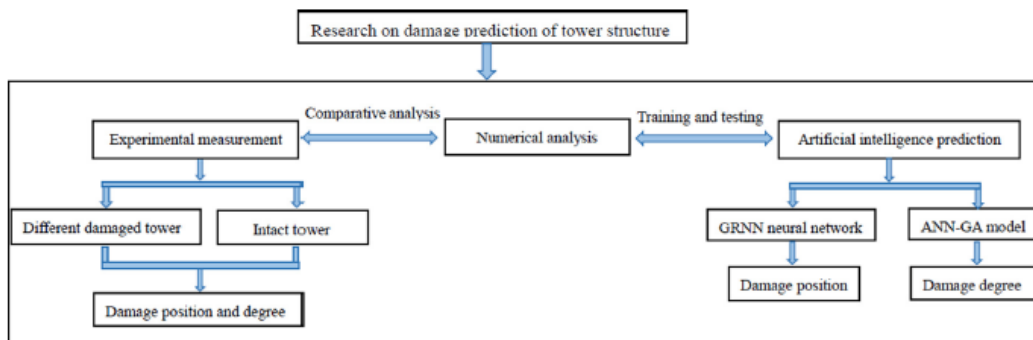
Η βασική αρχή στην οποία βασίζεται η διαδικασία είναι το γεγονός ότι οι ιδιοτιμές και οι ιδιομορφές του συστήματος είναι συναρτήσεις των φυσικών ιδιοτήτων της κατασκευής όπως είναι η μάζα, η απόσβεση και η δυσκαμψία. Επομένως, οποιαδήποτε αλλαγή στις ιδιότητες λόγω κάποιας αστοχίας θα επιφέρει παρατηρήσιμες αλλαγές και στις ιδιοτιμές. Δεδομένου αυτού, παρατηρώντας την διαφορά μεταξύ των ιδιοτιμών στην μετρούμενη και στην άθικτη κατάσταση μπορεί να εκτιμηθεί η έκταση της ζημιάς.

Οι μελετητές έστησαν δύο νευρωνικά δίκτυα. Το πρώτο ήταν ένα Νευρωνικό Δίκτυο Γενικής Παλινδρόμησης (GRNN-Generalised Regression Neural Network) που χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της θέσης της αστοχίας στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Οι εισαγωγικές τιμές αυτού του δικτύου ήταν ο κανονικοποιημένος ρυθμός μεταβολής της ιδιοσυχνότητας (NFCR- Normalized Frequency Change Rate). Το δεύτερο δίκτυο ήταν ένα βελτιστοποιημένο Νευρωνικό Δίκτυο Ανάστροφης Διάδοσης (BPNN- Back Propagation Neural Network) με το οποίο υπολογιζόταν ο βαθμός της αστοχίας. Αυτό ως εισαγωγικές τιμές χρειαζόταν τα αποτελέσματα του πρώτου δικτύου για την θέση της ζημιάς και τον κανονικοποιημένο τετραγωνικό ρυθμό μεταβολής της ιδιοσυχνότητας (NSFR – Normalized Square Frequency Rate). Στο Σχήμα 2.10 φαίνεται το διάγραμμα ροής που περιγράφει την παραπάνω διαδικασία.



Σχήμα 2.10: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας για την πρόβλεψη της αστοχίας [16]

Οι παραπάνω εισαγωγικές τιμές λαμβάνονταν από ένα αριθμητικό μοντέλο που προσομοίωνε διαφορετικές περιπτώσεις θέσης και έκτασης της αστοχίας. Απώτερος σκοπός αυτού του μοντέλου ήταν η περαιτέρω εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων ώστε να δίνουν όσο το δυνατόν πιο ακριβή αποτελέσματα. Για την επαλήθευση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε μια αντίστοιχη πειραματική διάταξη. Ορισμένα αποτελέσματα του μοντέλου και της διάταξης συγκρίθηκαν και με βάση τις διαφορές που εντοπίστηκαν έγιναν οι κατάλληλες τροποποιήσεις στο μοντέλο καθιστώντας το ακόμα πιο ακριβές. Διαθέτοντας πλέον ένα λειτουργικό μοντέλο, οι ερευνητές μπορούσαν να μοντελοποιήσουν μεγαλύτερο αριθμό σεναρίων αστοχίας, ώστε αρχικά να μελετήσουν την αποτελεσματικότητα των νευρωνικών δικτύων και έπειτα να τα εκπαιδεύσουν με σκοπό να τα κάνουν ακόμη πιο αποτελεσματικά. Στο Σχήμα 2.11 αναπαρίσταται γραφικά η συνολική διαδικασία.



Σχήμα 2.11: Συνολική διαδικασία προσδιορισμού της αστοχίας με τη χρήση νευρωνικών δικτύων [16]

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι το βελτιστοποιημένο νευρωνικό δίκτυο όχι μόνο μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια της πρόβλεψης αλλά μπορεί να εξοικονομήσει και σημαντικό υπολογιστικό χρόνο σε σχέση με τις αριθμητικές προσομοιώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο
ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ
ΠΛΟΙΟΥ & ΥΠΕΡΑΚΤΙΑΣ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Κεφάλαιο 3^ο: Μοντέλο Σύγκρουσης Πλοίου και Υπεράκτιας Ανεμογεννήτριας

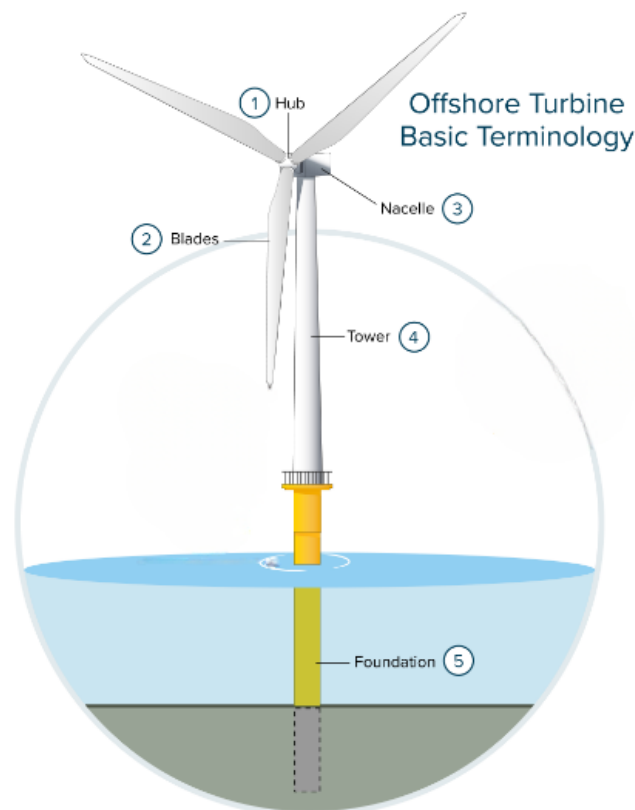
3.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο στοχεύει στην αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής του αριθμητικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της πλευρικής σύγκρουσης ενός Ε/Ο πλοίου με μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια. Για την μοντελοποίηση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS CAE της Dassault Systems. Αρχικά, παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο επιλέχθηκαν το πλοίο και η ανεμογεννήτρια που μοντελοποιήθηκαν, δίνονται τα χαρακτηριστικά τους, η γεωμετρία τους και πως αυτά αναπαραστάθηκαν στο Abaqus. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η μελέτη σύγκλισης πλέγματος, με τη βοήθεια της οποίας ο γράφων καταλήγει στο πλέγμα που χρησιμοποιείται για τη χωρική διακριτοποίηση των μοντέλων. Έπειτα, αφού παρέχεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο της μηχανικής παραμορφώσιμου στερεού και της θραυστομηχανικής, αναλύεται η διαδικασία διαμόρφωσης του μοντέλου υλικού, που εισάγεται με τη σειρά του στις κατασκευές του αριθμητικού μοντέλου. Το κεφάλαιο συνεχίζεται, με την περιγραφή του τρόπου με τον οποίο οι ανεμογεννήτριες παράγουν ηλεκτρική ισχύ μέσω της ενέργειας του ανέμου και με τον υπολογισμό των φορτίων που δέχεται η ανεμογεννήτρια στην παρούσα εργασία. Ακολουθεί, η παρουσίαση των οριακών συνθηκών που εφαρμόζονται στο μοντέλο, δίνοντας έμφαση στην αλληλεπίδραση μεταξύ της ανεμογεννήτριας και του πυθμένα. Επιπλέον, περιγράφονται οι επιλύτες που χρησιμοποιεί το Abaqus και η διαδικασία με την οποία επιλέχθηκε ο επιλύτης στη συγκεκριμένη μελέτη. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται, με την κατασκευή των διαφορετικών σεναρίων σύγκρουσης που προσομοιώνονται στη συνέχεια.

3.2 Γεωμετρικό Μοντέλο

3.2.1 Επιλογή ανεμογεννήτριας

Πρώτο βήμα για την κατάλληλη επιλογή της ανεμογεννήτριας είναι η κατανόηση της βασικής διάταξης της. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες αποτελούνται από δύο βασικά τμήματα, τον πύργο και τα θεμέλια. Τα θεμέλια μπορεί να είναι διαφόρων ειδών όπως αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 1.1. Στην προκειμένη περίπτωση, η παρούσα εργασία ασχολείται με θεμέλια μονού πυλώνα (Monopile), μεγάλο τμήμα του οποίου βρίσκεται εντός του πυθμένα παρέχοντας την απαιτούμενη στήριξη. Ο πύργος (Tower) τοποθετείται πάνω από τον πυλώνα και συνδέεται μαζί του με τη βοήθεια ενός τμήματος μετάβασης που χρησιμοποιείται για την ένωση δύο διαφορετικών τομών μιας κατασκευής. Πλέον, τις περισσότερες φορές αυτό το κομμάτι είναι ενσωματωμένο στον πυλώνα εξοικονομώντας υλικό και μειώνοντας το κόστος κατασκευής. Στην κορυφή του πύργου βρίσκεται το ατρακτίδιο (Nacelle) που περιλαμβάνει τον μηχανισμό της γεννήτριας που μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Στην άκρη αυτού και του άξονα που καταλήγει στην γεννήτρια συναντάται ο κεντρικός κόμβος (Hub) στον οποίο συνδέονται οι λεπίδες (Blades) που περιστρέφονται με τη βοήθεια του ανέμου. Οι λεπίδες μαζί με τον κεντρικό κόμβο αποτελούν την φτερωτή (Rotor) της ανεμογεννήτριας. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η γραφική αναπαράσταση μιας τυπικής υπεράκτιας ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 3.1: Βασική δομή υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με θεμέλια μονού πυλώνα

Με σκοπό τη λήψη αξιόπιστων αποτελεσμάτων και την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων, είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση μιας ανεμογεννήτριας ρεαλιστικών διαστάσεων. Έτσι, πραγματοποιήθηκε έρευνα αγοράς στους μεγαλύτερους κατασκευαστές υπεράκτιων ανεμογεννητριών, εκ των οποίων αυτή τη στιγμή οι 3 μεγαλύτεροι στην Ευρώπη είναι οι εξής: Siemens Gamesa, MHI Vestas Offshore Wind και GE Renewable Energy [17]. Συγκεκριμένα, καλύπτουν περίπου το 95% της ευρωπαϊκής κατασκευής υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψιν το γεγονός ότι οι ιδιοκτήτριες εταιρείες θαλάσσιων αιολικών πάρκων επιδιώκουν την κατασκευή του ελάχιστου απαιτούμενου αριθμού γεννητριών για να καλύψουν τον ενεργειακό στόχο. Αυτό σημαίνει πως χρειάζεται να εγκατασταθούν γεννήτριες μεγάλης ονομαστικής ισχύος. Γι αυτόν τον λόγο η έρευνα αγοράς αφορούσε εγκαταστάσεις με ονομαστική ισχύ μεγαλύτερη από 8 MW. Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των μοντέλων που επιλέχθηκαν.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά επιλεγμένων ανεμογεννητριών των Siemens Gamesa [18], MHI Vestas [19] και GE [20]

Κατασκευαστής Μοντέλο	Siemens Gamesa		GE	MHI Vestas
	SG 8.0 – 167 DD	SG 11.0 – 200 DD	Haliade-X	V236 – 15.0 MW
<i>Ονομαστική Ισχύς</i>	8 MW	11 MW	12 MW	15 MW
<i>Διάμετρος Φτερωτής</i>	167 m	200 m	220 m	236 m
<i>Μήκος Λεπίδων</i>	81.4 m	97 m	107 m	115.5 m
<i>Επιφάνεια Σάρωσης Φτερωτής</i>	21,900 m ²	31,400 m ²	38,000 m ²	43,742 m ²

Ωστόσο, οι μεγάλοι κατασκευαστές δεν δημοσιοποιούν τα σχέδια και τις βασικές διαστάσεις των προϊόντων τους για λόγους εχεμύθειας και εμπιστευτικότητας. Γι αυτόν τον λόγο το Πολυτεχνείο της Δανίας (DTU), όντας ένα από τα κορυφαία στον κλάδο της αιολικής ενέργειας, σχεδίασε μια ανεμογεννήτρια αναφοράς με ονομαστική ισχύ 10 MW [21]. Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να μοντελοποιηθεί, καθώς είναι διαθέσιμες οι περισσότερες από τις απαιτούμενες πληροφορίες. Τα βασικά του χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Βασικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας αναφοράς του DTU

Παράμετρος	Τιμή
<i>Ονομαστική Ισχύς</i>	10 MW
<i>Διάμετρος Φτερωτής</i>	178.3 m
<i>Διάμετρος Κόμβου</i>	5.6 m
<i>Ύψος Κόμβου</i>	119 m
<i>Μάζα Φτερωτής</i>	229 tons
<i>Μάζα Ατρακτίδιου</i>	446 tons
<i>Μάζα Πύργου</i>	605 tons

Συγκρίνοντας τα παραπάνω χαρακτηριστικά με τα αντίστοιχα των ανεμογεννητριών που συναντάμε στην πραγματική αγορά από τον Πίνακα 3.1, συμπεραίνουμε ότι η ανεμογεννήτρια αναφοράς του Πολυτεχνείου της Δανίας αποτελεί ιδανική προσέγγιση μιας κοινής θαλάσσιας ανεμογεννήτριας μεγάλης ονομαστικής ισχύος. Αν επίσης λάβουμε υπ' όψη πως οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες των ανεμογεννητριών της αγοράς δεν είναι δημοσίως διαθέσιμες καταλήγουμε στο ότι μπορούμε την χρησιμοποιήσουμε για τους σκοπούς της παρούσας έρευνας.

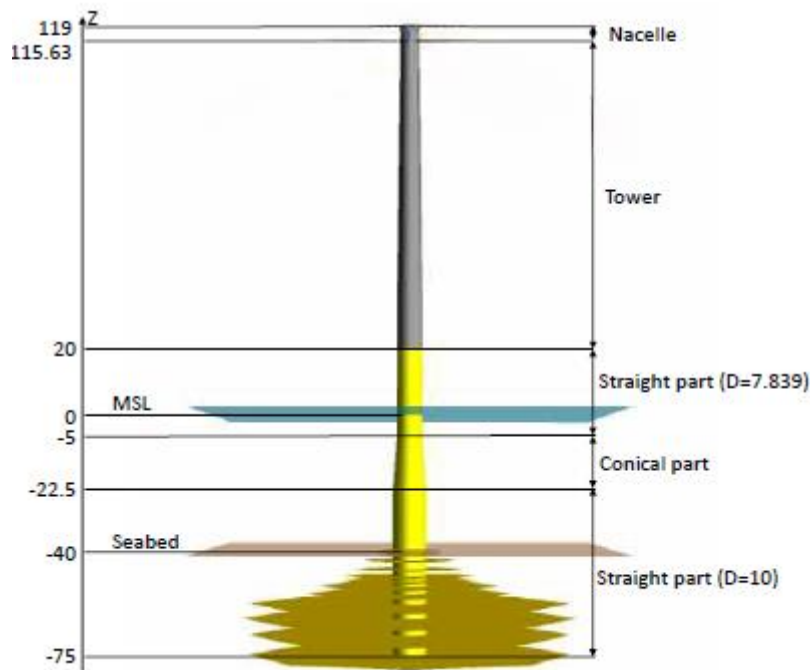
3.2.2 Αριθμητικό μοντέλο ανεμογεννήτριας

Ο πύργος της ανεμογεννήτριας έχει κυλινδρικό σχήμα μεταβλητής διατομής. Έχει δηλαδή κωνικό σχήμα. Η κορυφή του βρίσκεται στα 115.63 m και έχει εξωτερική διάμετρο 5.647 m ενώ, η βάση του είναι στα 20 m με εξωτερική διάμετρο 7.839 m. Το κέντρο του συστήματος αξόνων σύμφωνα με το οποίο μετριοούνται όλες οι γεωμετρικές αποστάσεις βρίσκεται στο κέντρο της κυκλικής τομής που βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας. Το πάχος της διατομής είναι 32.4 mm σε όλο το ύψος του πύργου και ο χάλυβας από τον οποίο είναι κατασκευασμένος έχει πυκνότητα $7,850 \text{ kg/m}^3$, μέτρο ελαστικότητας 210 GPa, και λόγο Poisson 0.3. Το μοντέλο υλικού όλης της ανεμογεννήτριας θα περιγραφεί αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.4.

Όπως περιγράφηκε νωρίτερα, στην κορυφή του πύργου βρίσκεται η άτρακτος και η φτερωτή της ανεμογεννήτριας. Με σκοπό την κατασκευή ενός απλούστερου μοντέλου ώστε να εξοικονομηθεί υπολογιστικός χρόνος και εξασφαλίζοντας πάντα την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκε να μην μοντελοποιηθεί η γεωμετρία των δύο αυτών στοιχείων. Αντίθετα, για να ληφθεί υπόψιν στις προσομοιώσεις η βαρυτική δύναμη που επάγουν αυτές οι κατασκευές λόγω της μάζας τους αντικαταστήθηκαν από μία σημειακή μάζα στην κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας. Ειδικότερα, η σημειακή αυτή μάζα που ζύγιζε το άθροισμα της μάζας της φτερωτής και του ατρακτίδιου (Πίνακας 3.2), δηλαδή 675 tons, δεν τοποθετήθηκε στον κεντρικό κόμβο της υψηλότερης τομής του πύργου στα 115.63 m αλλά σε ένα σημείο αναφοράς, RP1, στο κέντρο μιας εικονικής τομής στα 119 m, όπου σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2 βρίσκεται ο κεντρικός κόμβος που ενώνει τις λεπίδες. Αυτό το σημείο αναφοράς συνδέθηκε με την υψηλότερη τομή του πύργου μέσω ενός Rigid Body Constraint, ώστε η κίνηση της κορυφής να ταυτίζεται με την κίνηση του σημείου αναφοράς, χωρίς παραμορφώσεις. Αυτός ο τρόπος μοντελοποίησης του ατρακτίδιου και της φτερωτής αποτελεί ικανοποιητική προσέγγιση της πραγματικότητας καθώς επαρκεί ώστε να μοντελοποιηθούν οι βαρυτικές δυνάμεις που δημιουργούνται στην κορυφή της ανεμογεννήτριας. Το βασικό μειονέκτημα, που χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη μέθοδο, είναι το γεγονός πως δεν μπορεί να εξεταστεί η συμπεριφορά των λεπίδων μετά την κρούση και η αλληλεπίδραση τους με τον πύργο της ανεμογεννήτριας.

Ο πύργος στηρίζεται πάνω στον μονό πυλώνα ο οποίος φτάνει μέχρι τον πυθμένα και εισέρχεται σε αυτόν. Ο κυλινδρικός πυλώνας μπορεί να χωριστεί σε τρία τμήματα. Το πρώτο είναι ένα τμήμα σταθερής διατομής με διάμετρο 10 m. Έχει μήκος 52.5 m εκ των οποίων τα 35 m είναι εντός του πυθμένα και τα υπόλοιπα 17.5 m πάνω από αυτόν. Θεωρώντας το βάθος της θάλασσας ίσο με 40 m προκύπτει πως η ανώτερη τομή αυτού του τμήματος βρίσκεται

στα 22.5 m βάθος. Πάνω από αυτό βρίσκεται ένα κωνικό κομμάτι μεταβλητής κυκλικής διατομής με διάμετρο από 10 m στα 22.5 m βάθος έως 7.839 m στα 5 m βάθος. Εκεί ενώνεται με το τελευταίο κομμάτι που έχει σταθερή διάμετρό 7.839 m καθ' όλο το ύψος του και φτάνει μέχρι τα 20 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, όπου συνδέεται με τον πύργο. Το πάχος όλου του πυλώνα είναι 100 mm, έχει μέτρο ελαστικότητας 210 GPa, λόγο Poisson ίσο με 0.3 και πυκνότητα 7,850 kg/m³. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται γραφικά η γεωμετρία όλης της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 3.2: Γραφική αναπαράσταση του αριθμητικού μοντέλου της ανεμογεννήτριας [22]

3.2.3 Επιλογή πλοίου

Η σωστή επιλογή και αναπαράσταση της ανεμογεννήτριας πρέπει να συνδυάζεται με την κατάλληλη επιλογή και μοντελοποίηση του πλοίου. Επομένως, πρέπει να επιλεχθεί ένας τύπος πλοίου που είναι πιθανό να βρεθεί κοντά σε θαλάσσια αιολικά πάρκα. Τέτοια πλοία είναι τα επιχειρησιακά που επισκέπτονται τις ανεμογεννήτριες για συντήρηση και τυπικούς ελέγχους. Όμως, όπως συζητήθηκε στο υποκεφάλαιο 2.2.3, τα ισχύοντα σχεδιαστικά πρότυπα αφορούν επιχειρησιακά πλοία με εκτόπισμα έως 5000 tons. Υπολογίζοντας ακόμη ότι πολλές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται κοντά σε θαλάσσιες γραμμές Επιβατηγών Οχηματαγωγών πλοίων και με σκοπό την επέκταση των σχεδιαστικών προτύπων, αναζητήθηκε ένα E/O πλοίο εκτοπίσματος περίπου 7000 tons. Ένα τέτοιο πλοίο, πέρα από μεγαλύτερο εκτόπισμα σε σχέση με ένα τυπικό επιχειρησιακό πλοίο, έχει μεγαλύτερες διαστάσεις και λόγω των πολλών οριζόντιων καταστρωμάτων δημιουργείται μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής με τον πυλώνα της ανεμογεννήτριας σε μια πιθανή σύγκρουση. Επιπλέον, λόγω του σκοπού λειτουργίας του κινείται με μεγαλύτερες ταχύτητες. Αυτά δημιουργούν νέες συνθήκες σύγκρουσης, πολύ διαφορετικές από εκείνες που ισχύουν για ένα επιχειρησιακό πλοίο. Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως ο λόγος που δεν αναζητήθηκε ένα

Ε/Ο μεγαλύτερου εκτοπίσματος είναι το γεγονός πως σε αυτήν την περίπτωση οι συνέπειες της σύγκρουσης θα ήταν ακόμη πιο ραγδαίες σε σημείο που ολόκληρη η μελέτη δεν θα είχε νόημα, αφού η κατασκευή κατά πάσα πιθανότητα θα κατέρρεε και δεν θα μπορούσε να γίνει κάποια ουσιαστική σύγκριση μεταξύ διαφορετικών σεναρίων σύγκρουσης.

Με βάση τα παραπάνω και έπειτα από έρευνα στα Ε/Ο πλοία που πλέουν ως επί το πλείστον στις ελληνικές θάλασσες, το πλοίο που επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί ήταν το BLUE STAR ΙΤΗΑΚΙ του οποίου άλλωστε ήταν διαθέσιμα τα σχέδια Μέσης Τομής και Χωρητικότητας. Οι διαστάσεις και τα βασικά του χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 3.3 ενώ οι κατακόρυφες αποστάσεις των οριζόντιων καταστρωμάτων στον Πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.3: Διαστάσεις Ε/Ο πλοίου BLUE STAR ΙΤΗΑΚΙ

Παράμετρος	Τιμή
Ολικό Μήκος	123.8 m
Πλάτος	18.9 m
Κοίλο (Κατάστρωμα 3)	7.25 m
Βύθισμα Αντοχής	5.1 m
Εκτόπισμα	6,721.3 tons
Συντελεστής Γάστρας	0.56

Πίνακας 3.4: Κατακόρυφες αποστάσεις καταστρωμάτων από το βασικό επίπεδο αναφοράς του πλοίου

Παράμετρος	Τιμή
Κατάστρωμα 1 (Διπύθμενο)	1.2 m
Κατάστρωμα 2	4.4 m
Κατάστρωμα 3 (Κοίλο)	7.25 m
Κατάστρωμα 4	9.75 m
Κατάστρωμα 5	12.25 m
Κατάστρωμα 6	15.35 m
Κατάστρωμα 7	18.11 m
Κατάστρωμα 8	20.91 m
Κατάστρωμα 9	23.46 m

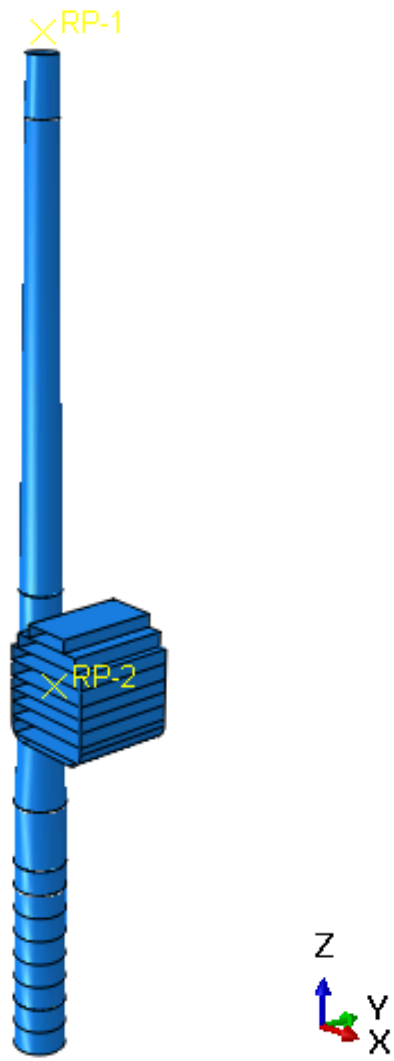
3.2.4 Αριθμητικό μοντέλο πλοίου

Στην παρούσα μελέτη, με σκοπό να αξιολογηθεί η αξιοπιστία σε συγκρούσεις της ανεμογεννήτριας και όχι του πλοίου, το μοντέλο του πλοίου θεωρήθηκε απόλυτα άκαμπτο. Δηλαδή, δεν είχε την δυνατότητα να παραλάβει παραμορφώσεις. Αυτή η θεώρηση είναι αρκετά συντηρητική, καθώς σε αυτήν την περίπτωση όλη η ενέργεια λόγω της κρούσης απορροφάται μόνο από την ανεμογεννήτρια. Ενώ, στην πραγματικότητα, τόσο το πλοίο όσο και η εγκατάσταση απορροφούν μέρος της ενέργειας σύγκρουσης μέσω παραμορφώσεων. Έτσι, κάνοντας αυτή την παραδοχή, η προκειμένη εργασία εστιάζει στην έκταση της ζημιάς αποκλειστικά στην υπεράκτια ανεμογεννήτρια.

Ο τύπος της σύγκρουσης που μελετάται στην εργασία είναι η πλευρική σύγκρουση. Αυτή προκύπτει στην περίπτωση που το πλοίο έχει παρασυρθεί από τον άνεμο και τα κύματα και προσκρούει με την πλευρά του πάνω στον πυλώνα. Είναι ο συνηθέστερος τρόπος σύγκρουσης, σε σχέση με την μετωπική ή την σύγκρουση με την πρύμνη.

Η γεωμετρία του πλοίου μοντελοποιήθηκε με βάση τους Πίνακας 3.3 και Πίνακας 3.4. Ωστόσο, επειδή το πλοίο θεωρήθηκε απόλυτα άκαμπτο, δεν υπήρχε λόγος να μοντελοποιηθεί όλο το μήκος του από την πρύμνη έως την πλώρη. Αντίθετα, επειδή και η σύγκρουση θεωρήθηκε καθαρά πλευρική, μοντελοποιήθηκε ένα τμήμα της μέσης τομής με μήκος 20 m. Το μέγεθος αυτής της διάστασης δεν παίζει πρακτικό ρόλο στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, καθώς πέρα από το γεγονός ότι το πλοίο είναι άκαμπτο, τοποθετήθηκε συμμετρικά απέναντι από την ανεμογεννήτρια, ώστε να μην επάγεται κάποια ροπή. Επιπλέον, περιορίστηκαν οι περιστροφικές του κινήσεις γύρω από κάθε άξονα με αποτέλεσμα να μην μπορεί να περιστραφεί κάτι που θα επηρέαζε την απόκριση της έτερης κατασκευής.

Το εκτόπισμα του πλοίου ήταν 6,721.3 tons αλλά λόγω της κίνησης του μέσα στο ρευστό έπρεπε να ληφθεί υπόψιν και η πρόσθετη υδροδυναμική μάζα. Για πλευρικές συγκρούσεις ο συντελεστής πρόσθετης μάζας θεωρείται συνήθως ίσος με 0.4. Επομένως, η συνολική μάζα που συγκρούεται με τον πυλώνα είναι 9409.8 tons. Η μάζα αυτή ορίστηκε σε ένα σημείο αναφοράς, RP2, στην πλευρά του πλοίου που έρχεται σε επαφή με την κατασκευή. Αυτό το σημείο συνδέθηκε με όλο το μοντέλο του πλοίου μέσω ενός Rigid Body Constraint, ώστε η κίνηση του πλοίου να ταυτίζεται με την κίνηση του σημείου αναφοράς, χωρίς παραμορφώσεις. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται το μοντέλο του πλοίου και της ανεμογεννήτριας όπως αυτά φαίνονται στο λογισμικό του Abaqus, μαζί με το καρτεσιανό σύστημα αξόνων αναφοράς.



Σχήμα 3.3: Μοντέλο ανεμογεννήτριας-πλοίου στο ABAQUS

3.3 Χωρική Διακριτοποίηση

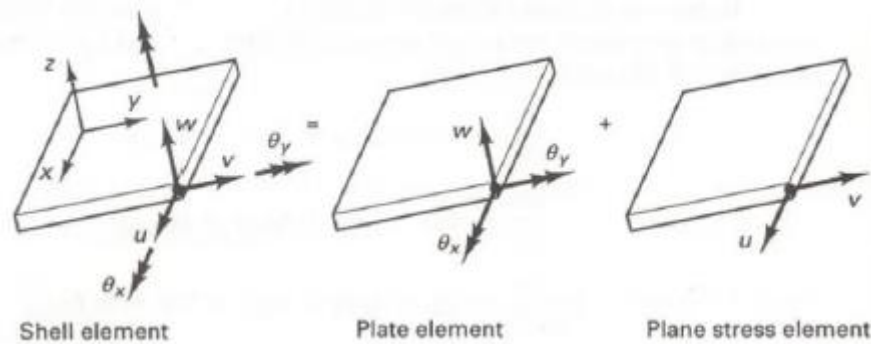
Η χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου είναι μία από τις ακρογωνιαίες πτυχές της ανάλυσης κατασκευών με τη χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων. Μεγάλες και περίπλοκες γεωμετρικές διαμερίζονται σε ένα σύνολο διασυνδεδεμένων στοιχείων. Με άλλα λόγια, περίπλοκα σχήματα χωρίζονται σε μικρότερα και απλούστερα σχήματα με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, δημιουργώντας ένα πλέγμα από στοιχεία. Ο τρόπος με τον οποίο η κάθε κατασκευή θα διακριτοποιηθεί στα επιμέρους στοιχεία παίζει καίριο ρόλο στην ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η τρεις βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την καταλληλότητα του πλέγματος είναι ο τύπος του στοιχείου, το μέγεθος του και η ποιότητα του πλέγματος. Στο παρόν εδάφιο θα αναλυθεί η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την δημιουργία ενός επιτυχημένου πλέγματος για το πλοίο και την ανεμογεννήτρια.

3.3.1 Τύπος Στοιχείων

Αρχικά, πρέπει να προσδιοριστεί ο τύπος του στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί για το πλέγμα της κάθε κατασκευής. Για να γίνει αυτό είναι απαραίτητο ο μελετητής να διαθέτει ικανοποιητική εξοικείωση με την βιβλιοθήκη των στοιχείων του Abaqus αλλά και να μπορεί να αναγνωρίσει τα βασικά δομικά χαρακτηριστικά του κάθε μοντέλου. Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει δύο λεπτότοιχες κατασκευές, με μικρό λόγο πάχους προς τις άλλες δύο διαστάσεις. Η μοντελοποίηση τέτοιων κατασκευών γίνεται συνήθως με στοιχεία κελύφους. Στην περίπτωση όμως του πλοίου, η κατασκευή του μοντελοποιείται σαν πλήρως άκαμπτη. Για τέτοιου τύπου μοντέλα, το Abaqus διαθέτει ειδικά άκαμπτα στοιχεία (Rigid Elements). Έτσι, για το πλέγμα του πλοίου χρησιμοποιούνται τα άκαμπτα στοιχεία R3D4. Το R υποδηλώνει τον τύπο του στοιχείου, δηλαδή Rigid, το 3D σημαίνει ότι αφορά τρισδιάστατη ανάλυση, ενώ το 4 αντιπροσωπεύει τον αριθμό των κόμβων του στοιχείου. Στα άκαμπτα σώματα μόνο ο κόμβος αναφοράς διαθέτει ανεξάρτητους βαθμούς ελευθερίας, τρεις γραμμικούς και τρεις περιστροφικούς, για την περίπτωση τρισδιάστατων σωμάτων όπως εδώ. Οι κόμβοι των άκαμπτων στοιχείων έχουν μόνο δευτερεύοντες βαθμούς ελευθερίας, αφού η κίνηση τους καθορίζεται από την κίνηση όλου του άκαμπτου σώματος που ταυτίζεται με την κίνηση του κόμβου αναφοράς. Μάλιστα, αυτοί οι δευτερεύοντες βαθμοί ελευθερίας είναι μόνο γραμμικοί για τρισδιάστατα άκαμπτα στοιχεία. Επιπλέον, από τη στιγμή που αυτά τα στοιχεία δεν παραμορφώνονται, δεν χρησιμοποιούν σημεία ολοκλήρωσης κατά το πάχος τους, όπως στην περίπτωση των στοιχείων κελύφους που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Τέλος, τα μόνα αποτελέσματα (Outputs) που μπορούμε να εξάγουμε γι' αυτά τα στοιχεία αφορούν την κίνηση των κόμβων τους [23].

Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας από την άλλη, θα διακριτοποιηθεί με τη χρήση στοιχείων κελύφους που μπορούν να παραλάβουν παραμορφώσεις. Τα στοιχεία κελύφους (Shell Elements) αποτελούν υπέρθεση των στοιχείων μεμβράνης (Membrane Elements) και των καμπτόμενων στοιχείων πλάκας (Plate Elements). Αυτό τους δίνει την δυνατότητα να παραλαμβάνουν μεμβρανικές, καμπτικές και εγκάρσιες διατμητικές δυνάμεις. Τα στοιχεία μεμβράνης είναι στοιχεία επίπεδης τάσης τα οποία έχουν δύο βαθμούς ελευθερίας ανά

κόμβο (μετατοπίσεις εντός επιπέδου). Τα στοιχεία πλάκας έχουν τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (μετατοπιση εκτός πεδίου και δύο στροφές εντός πεδίου), όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.4 και βασίζονται στη θεωρία κάμψης πλακών του Kirchhoff. Τα στοιχεία κελύφους μπορεί να έχουν στρεπτική δυσκαμψία εντός επιπέδου ή όχι, ανάλογα με το λογισμικό, οπότε έχουν έξι ή πέντε βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο. Στο Abaqus οι βαθμοί ελευθερίας σε κάθε κόμβο των στοιχείων κελύφους είναι έξι [24].

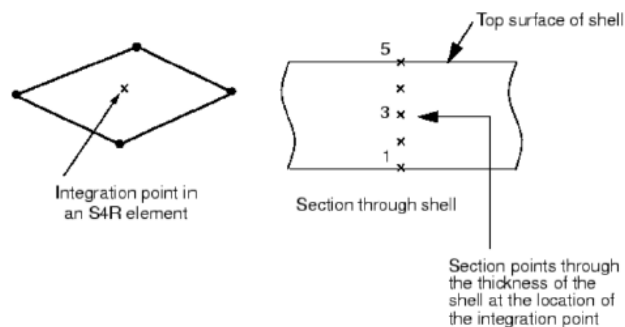


Σχήμα 3.4: Στοιχεία κελύφους, στοιχεία πλάκας και στοιχεία μεμβράνης [24]

Η διακριτοποίηση της γεωμετρίας της ανεμογεννήτριας γίνεται με τετράπλευρα στοιχεία τεσσάρων κόμβων. Η επίλυση των εξισώσεων στατικής ισορροπίας απαιτεί τη γνώση του μητρώου ακαμψίας του πεπερασμένου στοιχείου, το οποίο υπολογίζεται με ολοκλήρωση Gauss. Η συγκεκριμένη μέθοδος παράγει αποτελέσματα χωρίς σφάλμα, για τετράπλευρα τετρακομβικά στοιχεία με τουλάχιστον τέσσερα σημεία ολοκλήρωσης ανά επίπεδο του στοιχείου (full integration). Ωστόσο, με σκοπό τη μείωση του υπολογιστικού κόστους των προσομοιώσεων, συχνά χρησιμοποιούνται στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης (reduced integration), που λαμβάνουν ένα σημείο ολοκλήρωσης, στο κεντροειδές κάθε επιπέδου του στοιχείου (Σχήμα 3.5)[24].

Τα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης είναι ευαίσθητα στο φαινόμενο κλεψύδρας (hourglassing), δηλαδή τη μη ρεαλιστική επίπεδη παραμόρφωση τους. Το στοιχείο δεν φέρει αντίσταση σε αυτήν την παραμόρφωση, καθώς το σημείο ολοκλήρωσης του δεν μετακινείται. Το φαινόμενο μπορεί να αποφευχθεί με την εισαγωγή τεχνητής στρεπτικής δυσκαμψίας από το λογισμικό (hourglass control). Κατά το πάχος, που ανατίθεται στο στοιχείο κελύφους, ορίζονται πέντε επίπεδα ολοκλήρωσης. Σε κάθε επίπεδο κατά το πάχος θεωρούνται συνθήκες επίπεδης τάσης.

Τα πεπερασμένα στοιχεία που έχουν τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν παραπάνω είναι τύπου Belytschko-Lin-Tsay και έχουν κωδική ονομασία S4R (τετρακομβικά στοιχεία κελύφους, μειωμένης ολοκλήρωσης, με πέντε στρώσεις κατά το πάχος). Η ρύθμιση αυτή γίνεται μετά την κατασκευή του πλέγματος μέσω του Mesh Module χρησιμοποιώντας την Element Library: Explicit, Geometric Order: Linear και ενεργοποιώντας την επιλογή Reduced integration.



Σχήμα 3.5: Τετρακομβικό στοιχείο μειωμένης ολοκλήρωσης με πέντε επίπεδα κατά το πάχος [24]

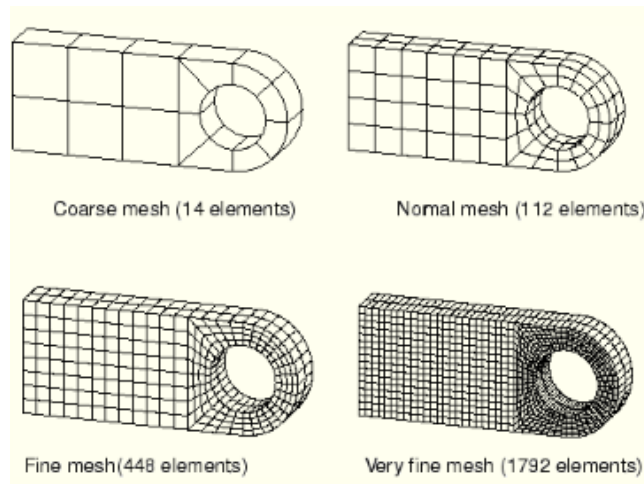
3.3.2 Μέγεθος Στοιχείου

Το δεύτερο χαρακτηριστικό των στοιχείων του μοντέλου που πρέπει να προσδιοριστεί είναι το μέγεθος τους. Για τα άκαμπτα στοιχεία R3D4 του πλοίου, του μέγεθος τους δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης λόγω της άκαμπτης τους φύσης. Γι' αυτόν τον λόγο χρησιμοποιήθηκαν όσο το δυνατόν πιο τετράγωνα στοιχεία με μήκος πλευράς περίπου 1000 mm. Για τον προσδιορισμό όμως του μεγέθους των στοιχείων του μοντέλου της ανεμογεννήτριας έπρεπε να ακολουθηθεί η μελέτη σύγκλισης πλέγματος (Mesh Convergence Study) που περιγράφεται στη συνέχεια.

3.3.2.1 Μελέτη Σύγκλισης Πλέγματος

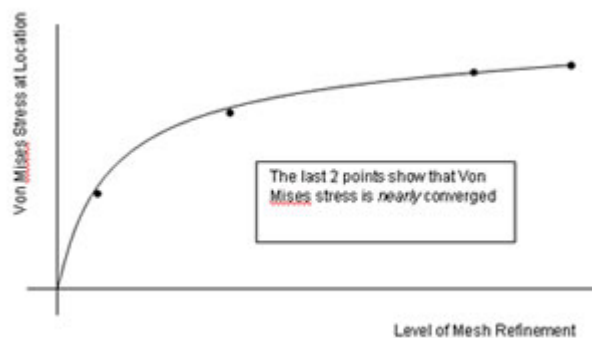
Η μελέτη σύγκλισης πλέγματος στοχεύει στον καθορισμό του μικρότερου δυνατού μεγέθους στοιχείου που απαιτείται για να εξασφαλιστεί ότι η ακρίβεια της ανάλυσης δεν επηρεάζεται από την αλλαγή του μεγέθους του πλέγματος. Σε μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων είναι σημαντικό να χρησιμοποιείται ένα αρκετά εκλεπτυσμένο πλέγμα ώστε τα αποτελέσματα της να είναι επαρκή και ακριβή, αφού τα αραιά πλέγματα συνήθως οδηγούν σε μη ακριβή και αβέβαια αποτελέσματα. Το αντίτιμο της χρήσης πολύ πυκνού πλέγματος είναι η αύξηση του υπολογιστικού χρόνου. Επομένως, ο μελετητής καλείται να αποφασίσει ποιο μέγεθος στοιχείου του εξασφαλίζει την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στον ελάχιστο δυνατό χρόνο.

Αρχικά, είναι απαραίτητη η καλή κατανόηση της φυσικής του προβλήματος και των βασικών παραμέτρων που το χαρακτηρίζουν. Με αυτόν τον τρόπο, καθίσταται εφικτή η επιλογή των μεγεθών που θα μελετηθούν ως προς την σύγκλιση για διαφορετικά μεγέθη πλέγματος. Αυτά τα μεγέθη συνήθως είναι κάποια τάση, μετατόπιση ή δύναμη ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κάθε μοντέλου. Έπειτα, ο μελετητής οφείλει να τρέξει την ίδια προσομοίωση κρατώντας όλες τις παραμέτρους σταθερές εκτός από το μέγεθος του πλέγματος, πυκνώνοντας το κάθε φορά. Συνήθως απαιτούνται τρία ή τέσσερα τρεξίματα με διαφορετικό μέγεθος στοιχείου. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 3.6 φαίνονται τέσσερα διαφορετικά μεγέθη πλέγματος. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, τα μεγέθη που μελετώνται ως προς την σύγκλιση των τιμών τους είναι η μετατόπιση της βάσης της οπής και η μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Mises στη βάση της οπής και στην περιοχή της πάκτωσης με τον τοίχο.



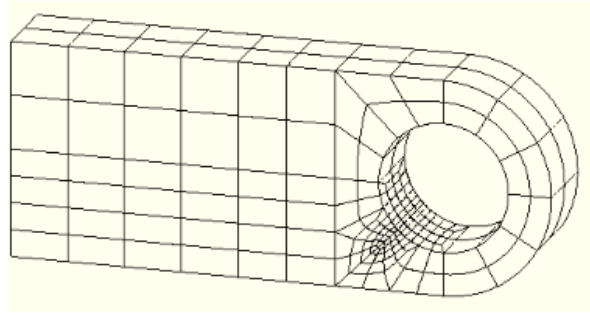
Σχήμα 3.6: Τέσσερα διαφορετικά μεγέθη πλέγματος για τους σκοπούς της μελέτης σύγκλισης πλέγματος [23]

Στόχος είναι η παραγωγή μιας καμπύλης, για κάθε κρίσιμη παράμετρο, η οποία θα συγκλίνει σε μια συγκεκριμένη τιμή με την εκτέλεση του πλέγματος (Σχήμα 3.7). Παράλληλα, είναι αναγκαίο να συγκριθεί και ο υπολογιστικός χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί το εκάστοτε μοντέλο με το διαφορετικό πλέγμα. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω δεδομένα, ο μελετητής θα είναι σε θέση να καταλήξει στο κατάλληλο μέγεθος στοιχείου.



Σχήμα 3.7: Καμπύλη σύγκλισης πλέγματος

Θεωρητικά, για κάθε συνεχόμενη πυκνωση του πλέγματος, όλα τα στοιχεία του μοντέλου πρέπει να μικραίνουν σε μέγεθος. Ωστόσο, αυτό δεν είναι απαραίτητο καθώς σύμφωνα με την αρχή του St Venant οι τοπικές τάσεις σε μια περιοχή της κατασκευής δεν επηρεάζουν τις τάσεις στις άλλες περιοχές. Με βάση αυτό, προτείνεται η εκτέλεση του πλέγματος μόνο στις περιοχές ενδιαφέροντος του εκάστοτε μοντέλου, κρατώντας πιο αραιό πλέγμα στην υπόλοιπη γεωμετρία. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται ζώνες πυκνού και αραιού πλέγματος βελτιώνοντας την αποδοτικότητα της προσομοίωσης και χωρίς να επηρεάζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της. Η μόνη προϋπόθεση για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου είναι η εξασφάλιση πως τα μεγαλύτερα στοιχεία αναπαριστούν επιτυχώς τη γεωμετρία του μοντέλου. Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται η επιλεκτική εκτέλεση του πλέγματος στο παράδειγμα που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως.



Σχήμα 3.8: Πύκνωση πλέγματος στην περιοχή ενδιαφέροντος [23]

3.3.2.2 Μελέτη Σύγκλισης Πλέγματος στην παρούσα εργασία

Την τακτική δημιουργίας ζωνών πλέγματος χρησιμοποίησε και ο γράφων για τον προσδιορισμό του κατάλληλου μεγέθους στοιχείου στο μοντέλο της ανεμογεννήτριας. Η ανεμογεννήτρια χωρίστηκε σε 5 οριζόντιες ζώνες. Η πρώτη ζώνη που ονομάστηκε «Ζώνη Πυθμένα» ξεκινούσε από την χαμηλότερη διατομή του μοντέλου της ΑΓ, που βρισκόταν εντός του πυθμένα στα -75 m (από την επιφάνεια της θάλασσας) και έφτανε έως τη διατομή 5 m πάνω από το επίπεδο του πυθμένα, δηλαδή έως τα -35 m. Η «Ενδιάμεση Ζώνη», που βρισκόταν πάνω από τη «Ζώνη Πυθμένα», ήταν η ζώνη του χαμηλότερου ενδιαφέροντος και είχε ύψος 12.5 m φτάνοντας έως την έναρξη του κωνικού τμήματος του μονού πυλώνα στα -22.5 m. Η τρίτη και σημαντικότερη ζώνη ήταν η «Ζώνη Σύγκρουσης» η οποία περιλάμβανε το κωνικό τμήμα του πυλώνα και έφτανε έως τη σύνδεση του πυλώνα και του πύργου στα 20 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η «Ζώνη Πύργου» αποτελούταν από το μεγαλύτερο τμήμα του πύργου μέχρι και τα 105 m. Τελευταία ήταν η «Ζώνη Κορυφής» που ξεκινούσε από τα 105 m και ολοκληρωνόταν στην υψηλότερη άκρη της ΑΓ στα 115.63 m. Κάθε ζώνη φαίνεται γραφικά στο Σχήμα 3.9.

Οι σημαντικότερες ζώνες είναι η Ζώνη Σύγκρουσης και η Ζώνη Κορυφής. Η πρώτη είναι εκείνη που έρχεται σε επαφή με το συγκρουόμενο πλοίο με αποτέλεσμα να δέχεται τις υψηλότερες τάσεις και δυνάμεις, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ύπαρξη ενός όσο το δυνατόν πιο πυκνού πλέγματος για την σωστή περιγραφή του φαινομένου. Η σημαντικότητα της δεύτερης προκύπτει από την ανάγκη για μελέτη της ταλαντωτικής συμπεριφοράς της κορυφής της ανεμογεννήτριας λόγω της μεγάλης μάζας που φέρει. Επομένως, για αυτές τις δύο περιοχές θα πραγματοποιηθεί η μελέτη σύγκλισης πλέγματος. Θα προσομοιωθεί το ίδιο πείραμα τέσσερις φορές, μεταβάλλοντας κάθε φορά το ονομαστικό μήκος της πλευράς του στοιχείου, a , μέσω του Mesh Module (Seed Edges > Approximate element size = # mm). Τα μήκη που θα χρησιμοποιηθούν είναι τα εξής: $a_1 = 1000 \text{ mm}$, $a_2 = 750 \text{ mm}$, $a_3 = 500 \text{ mm}$, $a_4 = 200 \text{ mm}$. Σημειώνεται πως το ονομαστικό χαρακτηριστικό μήκος του στοιχείου κελύφους, l_e , που αποτελεί στην ουσία το μέγεθος του στοιχείου, ισούται με τη ρίζα του γινομένου του μήκους των πλευρών του. Δηλαδή, $l_e = a \times b$.

Η Ζώνη Πυθμένα περιελάμβανε όλο το τμήμα της ανεμογεννήτριας που βρισκόταν εντός του υπεδάφους μαζί με ένα κομμάτι ύψους 5 m πάνω από αυτό. Εδώ, αξίζει να αναφερθεί ότι για την μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης της ανεμογεννήτριας και των στρωμάτων του υπεδάφους χρησιμοποιήθηκαν μη γραμμικά ελατήρια των οποίων η καμπύλη δύναμη-

παραμόρφωσης λήφθηκε με βάση τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους σε κάθε διαφορετικό στρώμα. Η συγκεκριμένη διαδικασία θα αναλυθεί διεξοδικά στη συνέχεια, στο υποκεφάλαιο 3.6. Είναι όμως ήδη φανερό πως η συγκεκριμένη ζώνη παίζει σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή ρεαλιστικών αποτελεσμάτων. Επομένως, απαιτείται υψηλή ακρίβεια τάσεων και μετατοπίσεων σε αυτή την περιοχή. Γι' αυτόν τον λόγο επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν στοιχεία με ονομαστικό μήκος πλευράς $a = 500 \text{ mm}$, μέγεθος που σε πρώτη φάση φαίνεται ικανοποιητικά μικρό, σε σχέση με τις διαστάσεις του μοντέλου, ώστε να εξασφαλίζει τις απαιτήσεις ακρίβειας και υπολογιστικού χρόνου. Η συγκεκριμένη παραδοχή ωστόσο ελέγχεται εκ νέου με την ολοκλήρωση της μελέτης σύγκλισης. Το μήκος αυτό διατηρείται σταθερό καθ' όλη την μελέτη σύγκλισης, ώστε να μειωθούν οι μη σταθεροί παράγοντες της προσομοίωσης και να ευνοηθεί η σύγκλιση.



Σχήμα 3.9: Γραφική αναπαράσταση των ζωνών πλέγματος

Η Ενδιάμεση Ζώνη και η Ζώνη Πύργου είναι εκείνες με το λιγότερο ενδιαφέρον από μηχανικής απόψεως. Χρειάζονται ωστόσο ένα πλέγμα που θα αναπαριστά επιτυχώς τη γεωμετρία και την καμπυλότητα του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Γι' αυτόν τον σκοπό, αυτές οι περιοχές διακριτοποιούνται με ονομαστικό μέγεθος πλευράς των στοιχείων ίσο με $a = 1000 \text{ mm}$ που μένει σταθερό και στα τέσσερα πειράματα για τον έλεγχο της σύγκλισης.

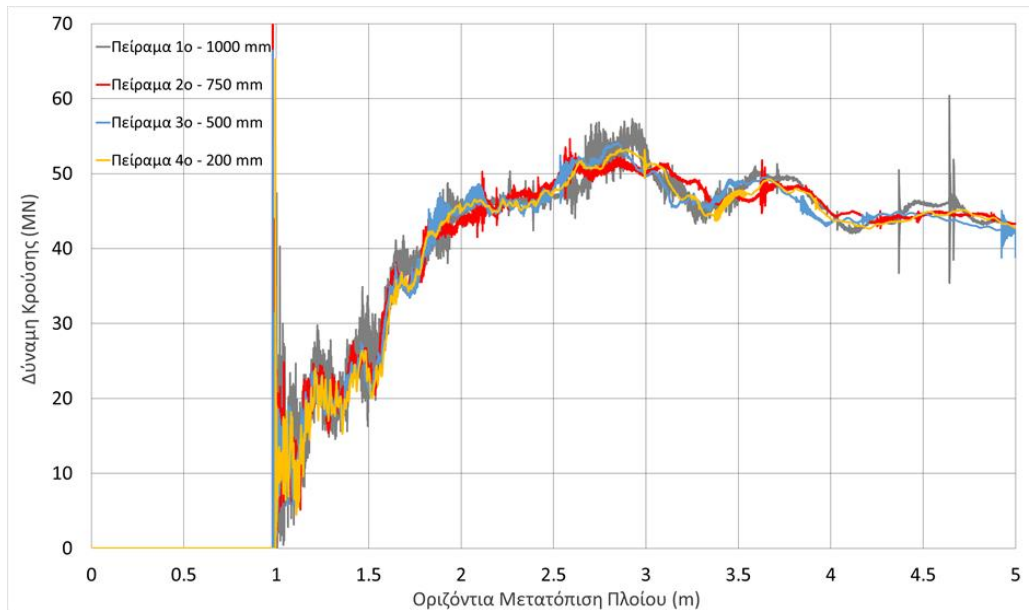
Στον Πίνακα 3.5 φαίνεται το μήκος της πλευράς του στοιχείου που χρησιμοποιείται σε κάθε ζώνη μαζί με το σύνολο των στοιχείων και τον μέσο όρο του λόγου των πλευρών. Σημειώνεται πως το ιδανικό είναι ο λόγος των πλευρών να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στη μονάδα (τετραγωνικά στοιχεία), ώστε να διανέμονται ομοιόμορφα οι τάσεις στους κόμβους. Όπως φαίνεται, σε κάθε περίπτωση η συγκεκριμένη παράμετρος λαμβάνει ικανοποιητική τιμή.

Πίνακας 3.5: Βασικά χαρακτηριστικά πλέγματος κατά τη μελέτη σύγκλισης

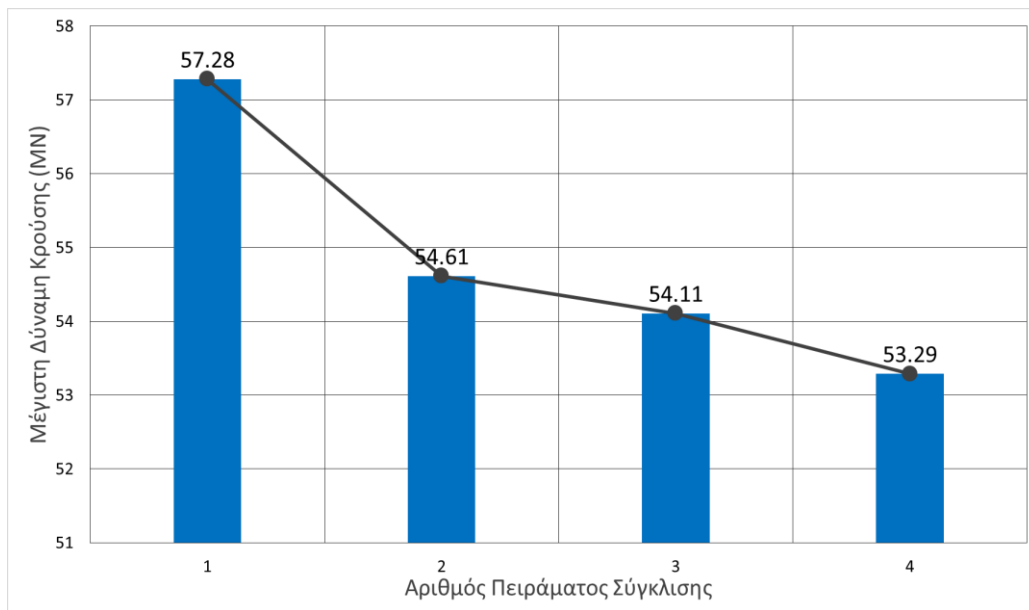
Παράμετροι	Πείραμα 1 ^ο	Πείραμα 2 ^ο	Πείραμα 3 ^ο	Πείραμα 4 ^ο
Προσεγγιστικό Μέγεθος Στοιχείου Ζωνών Σύγκρουσης & Κορυφής	1000 mm	750 mm	500 mm	200 mm
Σύνολο Στοιχείων Μοντέλου	9,310	10,443	13,608	43,763
Μέσος Λόγος Πλευρών	1.0287	1.0302	1.0292	1.0270

Η συγκεκριμένη διαμέριση της ανεμογεννήτριας στοχεύει στην κατάλληλη επιλογή μεγέθους στοιχείου στις Ζώνες Σύγκρουσης και Κορυφής. Το πείραμα που προσομοιώθηκε για αυτόν τον σκοπό έχει την εξής δομή: Το μοντέλο του πλοίου έχοντας βύθισμα 5.1 m, τέθηκε να κινείται με σταθερή ταχύτητα 1.25 m/s προς το μοντέλο της ανεμογεννήτριας για χρονική διάρκεια 4 s. Με βάση αυτά τα δεδομένα το πλοίο θα μετακινηθεί για 5 m συνολικά. Η ταχύτητα παρέμεινε αμετάβλητη παρά τη σύγκρουση του με τον πυλώνα, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα, αλλά για τους σκοπούς του συγκεκριμένου πειράματος θεωρήθηκε αποδεκτό. Τα μεγέθη που ελέγχθηκαν ως προς την σύγκλιση ήταν η δύναμη κρούσης, η μετατόπιση και η επιτάχυνση της κορυφής της ανεμογεννήτριας, η μέγιστη ισοδύναμη τάση στην περιοχή της κρούσης και η οριζόντια μετατόπιση του πυθμένα. Παράλληλα, καίριο ρόλο στην τελική απόφαση έπαιξε ο υπολογιστικός χρόνος που χρειάστηκε για την ολοκλήρωση του κάθε πειράματος.

Στα συγκριτικά διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων σύγκλισης. Στο Σχήμα 3.10 φαίνεται η μεταβολή της δύναμης κρούσης συναρτήσει της οριζόντιας μετατόπισης του πλοίου. Το διάστημα 0 έως 1 m, όπου οι καμπύλες είναι οριζόντιες ευθείες, είναι το διάστημα που χρειάστηκε να καλύψει το πλοίο ώστε να έρθει σε επαφή με την ανεμογεννήτρια. Τη στιγμή που έρχεται σε επαφή, προκύπτουν πολύ ακραίες τιμές δύναμης κρούσης οι οποίες εναλλάσσονται με μικρότερες τιμές ταχύτατα. Το συγκεκριμένο κομμάτι των καμπυλών αποτελεί θόρυβο (noise). Ο θόρυβος είναι ένα υπολογιστικό σφάλμα που συναντάται σε προβλήματα κρούσης και είναι πιο έντονος όταν χρησιμοποιείται Explicit Solver. Προκύπτει καθώς το λογισμικό προσπαθεί να ισορροπήσει τις εξωτερικές δυνάμεις με τις εσωτερικές δυνάμεις στους κόμβους, διατηρώντας ταυτόχρονα το ισοζύγιο ενέργειας. Σε κάθε περίπτωση, δεν λαμβάνεται υπόψιν καθώς δεν είναι ενδεικτικό των μέγιστων δυνάμεων κρούσης που αναπτύσσονται σε κάθε δοκιμή. Οι πραγματικές μέγιστες δυνάμεις βρίσκονται στο διάστημα 2.5 με 3 m και φαίνονται γραφικά στο Σχήμα 3.11. Από τα δύο διαγράμματα φαίνεται πως οι καμπύλες της δύναμης έχουν παρόμοια μορφή και σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους, αλλά και πως οι μέγιστες δυνάμεις παρουσιάζουν τάση σύγκλισης προς τα 53 MN.



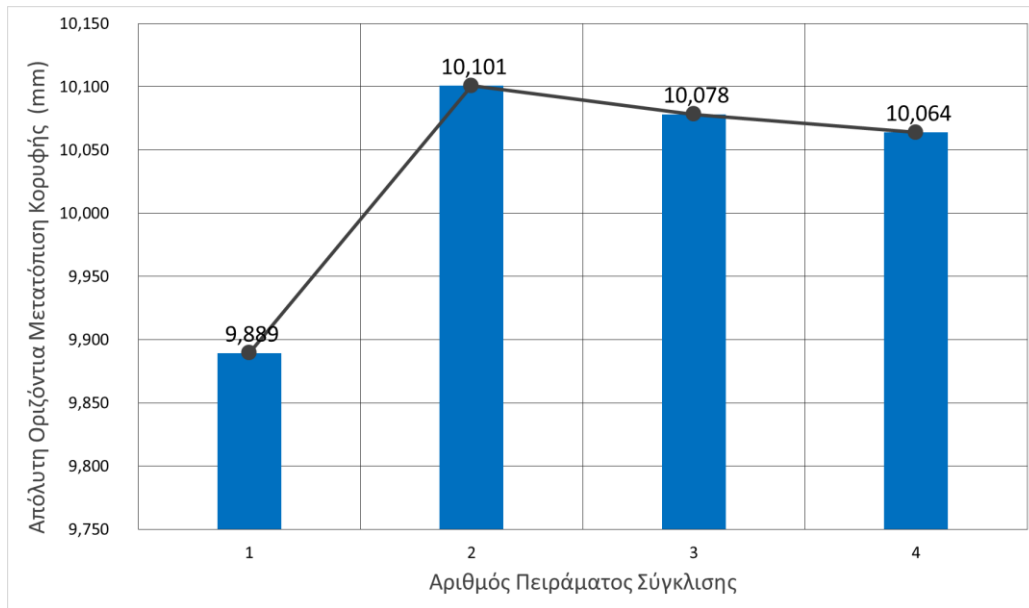
Σχήμα 3.10: Διάγραμμα Δύναμης Κρούσης - Οριζόντιας Μετατόπισης Πλοίου για τα 4 πειράματα σύγκλισης



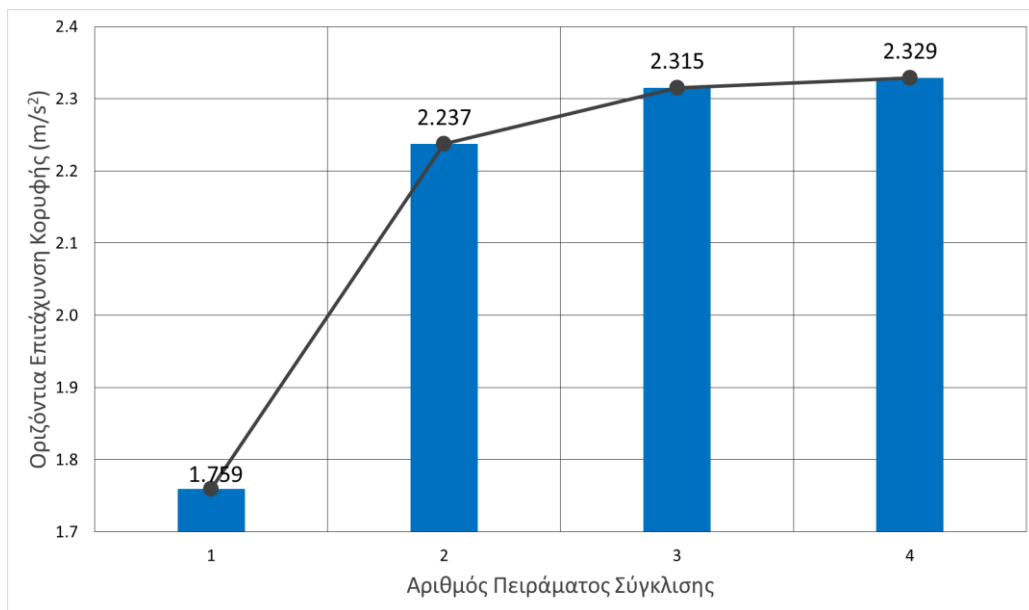
Σχήμα 3.11: Μέγιστη Δύναμη Κρούσης σε κάθε δοκιμή σύγκλισης

Ιδανική σύγκλιση παρουσιάζουν και τα μεγέθη που αφορούν την κίνηση της κορυφής της ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι πολύ σημαντικά για την εξέλιξη όλου του φαινομένου. Τόσο η οριζόντια μετατόπιση όσο και η οριζόντια επιτάχυνση της κορυφής, στο τέλος της κάθε δοκιμής, έχουν ξεκάθαρη συγκλίνουσα συμπεριφορά, όπως φαίνεται στα Σχήμα 3.12 και

Σχήμα 3.13.



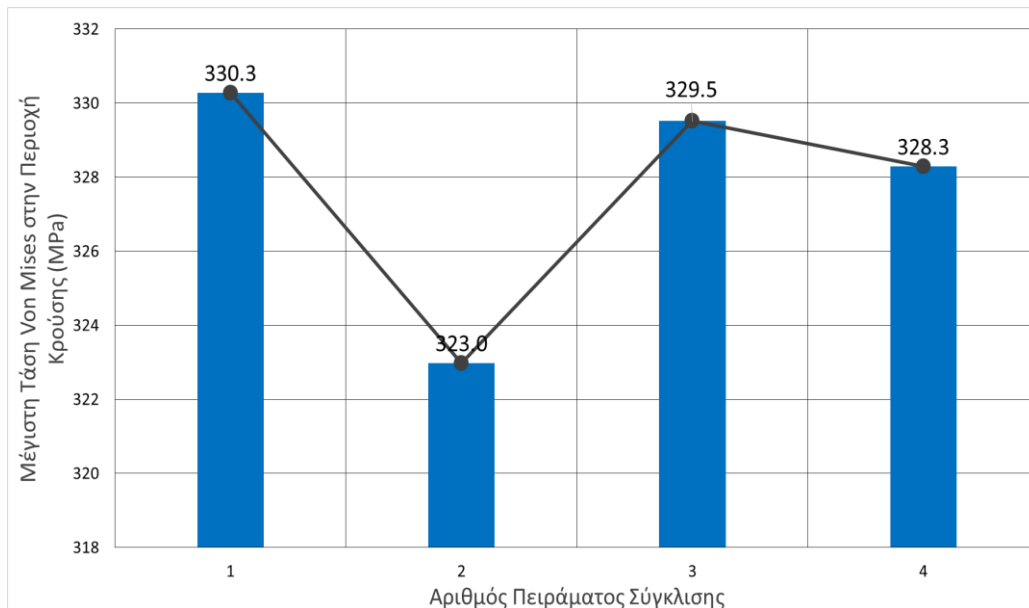
Σχήμα 3.12: Απόλυτη οριζόντια μετατόπιση κορυφής σε κάθε δοκιμή σύγκλισης



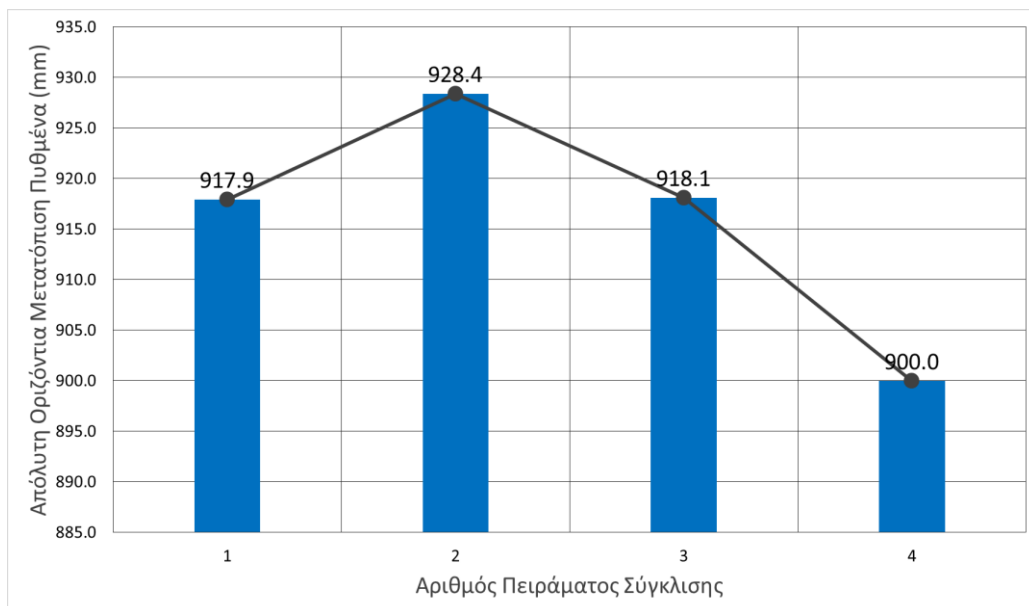
Σχήμα 3.13: Οριζόντια επιτάχυνση κορυφής σε κάθε δοκιμή σύγκλισης

Όσον αφορά τη μέγιστη ισοδύναμη τάση κατά Mises στην περιοχή της σύγκρουσης με το πέρας της προσομοίωσης (Σχήμα 3.14), οι τιμές που λαμβάνει στα τέσσερα πειράματα είναι σχεδόν σταθερές, με μέγιστη απόκλιση 1.5 % της τιμής του δεύτερου πειράματος από τον μέσο όρο των τεσσάρων. Ενώ, οι τιμές της συνολικής οριζόντιας μετατόπισης του πυθμένα είναι παρόμοιες για τα πρώτα τρία πειράματα με την τιμή του τέταρτου να παρουσιάζει την μέγιστη απόκλιση του 1.75 % από τον μέσο όρο των τεσσάρων (Σχήμα 3.15). Ωστόσο, οι συγκεκριμένες αποκλίσεις είναι από μηχανική σκοπιά μικρές και μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Ειδικά, για την περίπτωση της μετατόπισης του πυθμένα, οι αποκλίσεις εξηγούνται από το γεγονός ότι το πλέγμα σε αυτήν την περιοχή παραμένει σταθερό σε κάθε

δοκιμή, ενώ μεταβάλλεται το μέγεθος των στοιχείων σε ανώτερες ζώνες δυσχεραίνοντας την σύγκλιση των τιμών εκεί.



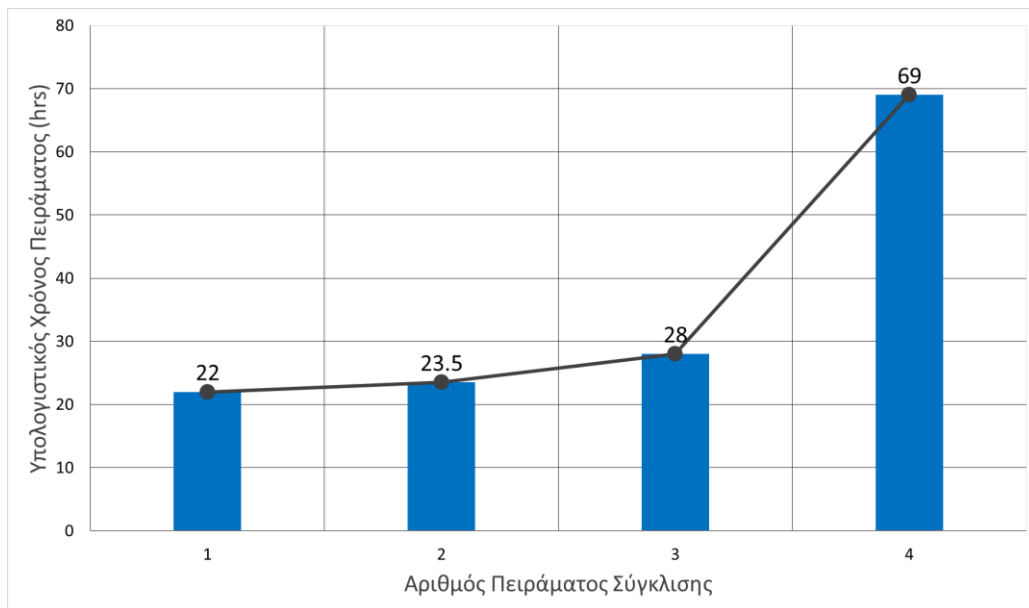
Σχήμα 3.14: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στην περιοχή σύγκρουσης σε κάθε δοκιμή σύγκλισης



Σχήμα 3.15: Απόλυτη οριζόντια μετατόπιση πυθμένα σε κάθε δοκιμή σύγκλισης

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, φαίνεται πως με τη χρήση των $a = 500$ mm (Πείραμα 3) και $a = 200$ mm (Πείραμα 4) ως ονομαστικό μήκος της πλευράς των στοιχείων εξασφαλίζεται η ζητούμενη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Όμως, για την τελική επιλογή του μήκους του στοιχείου, πρέπει να ληφθεί υπόψιν και ο υπολογιστικός χρόνος που χρειάστηκε για την ολοκλήρωση της κάθε δοκιμής. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.16, το Πείραμα 4 με $a = 200$ mm κατανάλωσε υπερδιπλάσιο χρόνο από το Πείραμα 3 με $a = 500$ mm. Επομένως, σαν ονομαστικό μήκος πλευράς των στοιχείων στις Ζώνες Σύγκρουσης και Κορυφής επιλέγεται το

$a = 500 \text{ mm}$. Επομένως, για τετραγωνικά στοιχεία το ονομαστικό χαρακτηριστικό μήκος τους, $I_e = a \times a$, ισούται και αυτό με 500 mm . Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζεται το μήκος στοιχείων σε κάθε επιμέρους Ζώνη.



Σχήμα 3.16: Υπολογιστικός χρόνος για κάθε δοκιμή σύγκλισης

Με την ολοκλήρωση της μελέτης σύγκλισης πρέπει να ελεγχθει η αξιοπιστία της χρήσης του $a = 500 \text{ mm}$ στη Ζώνη Πυθμένα. Δεδομένου ότι αυτό είναι και το τελικό μέγεθος που επιλέχθηκε για της υπόλοιπες ζώνες ενδιαφέροντος, αλλά και των μικρών αποκλίσεων της μετατόπισης του πυθμένα (Σχήμα 3.15) η συγκεκριμένη παραδοχή κρίνεται αποδεκτή.

Πίνακας 3.6: Μέγεθος στοιχείου κάθε ζώνης

Ζώνη	Μέγεθος Στοιχείου
Κορυφής	500 mm
Πύργου	1000 mm
Σύγκρουσης	500 mm
Ενδιάμεση	1000 mm
Πυθμένα	500 mm

3.3.2.3 Τροποποίηση του πλέγματος κατά τη διαδικασία επαλήθευσης του μοντέλου

Μετά την ολοκλήρωση του μοντέλου με την εισαγωγή όλων των καθοριστικών παραμέτρων και μεταβλητών, όπως είναι η καμπύλη υλικού, τα φορτία και οι οριακές συνθήκες, που θα αναλυθούν στη συνέχεια της εργασίας, ήταν απαραίτητη η επαλήθευση της ορθότητας του. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν ορισμένες δοκιμές ενός πραγματικού σεναρίου σύγκρουσης, όπου το πλοίο θα είχε μια αρχική ταχύτητα με την οποία θα προσέκρουε στην ανεμογεννήτρια και η οποία όμως θα επιβραδυνόταν λόγω της κρούσης, χωρίς να παραμένει συνεχώς σταθερή, όπως στα πειράματα για τη σύγκλιση. Στη πρώτη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν τα μεγέθη στοιχείων του Πίνακα 3.6 και τα αποτελέσματα της έδειξαν ότι προκύπτουν μεγάλες συγκεντρωμένες παραμορφώσεις στην περιοχή μετάβασης από τη Ζώνη Πύργου στη Ζώνη Σύγκρουσης. Αυτές οι δύο ζώνες έχουν μήκος στοιχείου 1000 mm και 500 mm αντίστοιχα. Επομένως, έπρεπε να διερευνηθεί αν η μεταβολή του πλέγματος, που συνεπάγεται σε μεταβολή της δυσκαμψίας των στοιχείων, προκαλεί τη συγκέντρωση έντονων παραμορφώσεων σε αυτό το σημείο και όχι η δυναμική του ίδιου του προβλήματος. Για τον σκοπό αυτό, ένα τμήμα ύψους 20 m στη χαμηλότερη περιοχή της Ζώνης Πύργου διακριτοποιήθηκε με $l_e = 500$ mm αντί για $l_e = 1000$ mm. Εκτελώντας την ίδια δοκιμή με πριν, αλλά με το νέο πλέγμα, φάνηκε πως και πάλι έντονες παραμορφώσεις εμφανίζονται στην νέα περιοχή μεταβολής του πλέγματος και συγκεκριμένα στην πλευρά του μικρότερου μεγέθους στοιχείου το οποίο χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη δυσκαμψία σε σχέση με τα μεγαλύτερα στοιχεία. Άρα αποδείχθηκε πως αυτή η μεταβολή επηρεάζει την απόκριση της ανεμογεννήτριας καθιστώντας τα αποτελέσματα ασταθή και αναληθή.

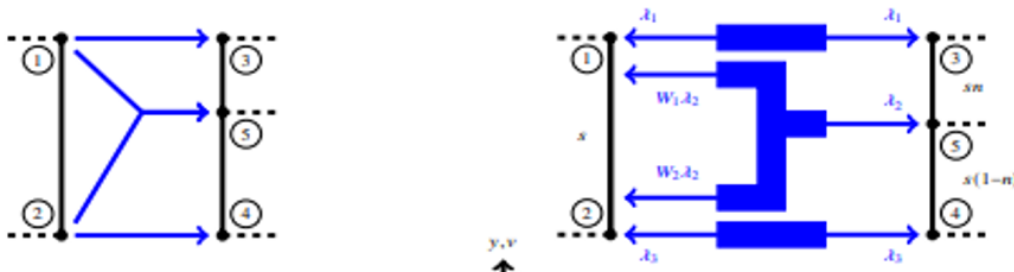
Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, επιλέχθηκε όλη η Ζώνη Πύργου να διακριτοποιηθεί με στοιχεία μήκους 500 mm. Έτσι, η απόκριση της ανεμογεννήτριας θα ήταν ανεξάρτητη του πλέγματος, αφού θα παρέμενε σταθερό σε όλη την καίρια περιοχή. Πράγματι, με το νέο πλέγμα οι έντονες παραμορφώσεις παρουσιάστηκαν και πάλι στο σημείο όπου εναλλάσσεται η Ζώνη Πύργου με τη Ζώνη Σύγκρουσης. Αυτή τη φορά όμως δεν διέθεταν διαφορετικό μήκος στοιχείου αλλά διαφορετικό πάχος στοιχείου, αφού η ίδια τομή είναι αυτή που ενώνει τον πύργο με πάχος τοιχώματος 32.4 mm με τον μονό πυλώνα με πάχος τοιχώματος 100 mm. Αυτό καθιστούσε τη συγκεκριμένη περιοχή ευάλωτη στις μεγάλες ροπές κάμψης λόγω της κίνησης του ατρακτίδιου στην κορυφή της ανεμογεννήτριας. Άρα, οι παραμορφώσεις εκεί θεωρούνται λογικές από φυσική και μηχανική σκοπιά. Στον Πίνακα 3.7 φαίνονται τα τελικά μεγέθη στοιχείων κάθε ζώνης.

Πίνακας 3.7: Τελικά μεγέθη στοιχείων κάθε ζώνης

Ζώνη	Μέγεθος Στοιχείου
<i>Κορυφής</i>	500 mm
<i>Πύργου</i>	500 mm
<i>Σύγκρουσης</i>	500 mm
<i>Ενδιάμεση</i>	1000 mm
<i>Πυθμένα</i>	500 mm

Σχόλιο επί της μοντελοποίησης του πλέγματος

- Σε αυτό το σημείο αξίζει να σχολιαστεί ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται στο μοντέλο ο πύργος και ο μονός πυλώνας. Η ανεμογεννήτρια δεν μοντελοποιήθηκε σαν ενιαίο σώμα. Οι δύο βασικές κατασκευές που την αποτελούν μοντελοποιήθηκαν σαν δύο ξεχωριστά τμήματα (Parts) που έπρεπε να συνδεθούν. Αυτό έγινε εφικτό μέσω του Tie Constraint του Abaqus που εισάγεται από το Interaction Module. Τα Tie Constraints έχουν τη δυνατότητα να συνδέουν δύο ή περισσότερα πλέγματα σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Εφαρμόζονται στις άκρες των ακμών ή στις επιφάνειες των μοντέλων και εξασφαλίζουν την δομική συνέχεια του μοντέλου [23]. Αυτό το πετυχαίνουν μεταφέροντας τις μετατοπίσεις των κόμβων της μιας ακμής στους κόμβους της άλλης. Μάλιστα, στην περίπτωση που οι κόμβοι δεν είναι κοινοί αλλά ένας κόμβος της μιας ακμής βρίσκεται ανάμεσα σε δύο κόμβους της άλλης ακμής, η μετατόπιση αυτού υπολογίζεται μέσω ενός ζυγισμένου αθροίσματος των μετατοπίσεων των δύο άλλων κόμβων (Σχήμα 3.17).



Σχήμα 3.17: Tie Constraint σε μη ταυτόσιμους κόμβους δύο ακμών [23]

3.4 Μοντέλο Υλικού

Η σωστή μοντελοποίηση των ιδιοτήτων του υλικού της κατασκευής αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες για τη λήψη ρεαλιστικών αποτελεσμάτων. Στα προβλήματα κρούσης συγκεκριμένα, ο μελετητής καλείται, πέρα από το να αναπαραστήσει επιτυχώς την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης του υλικού, να εισάγει ένα κατάλληλο κριτήριο θραύσης για την περίπτωση που η έντονη φθορά οδηγήσει στην τελική θραύση του υλικού. Στο παρόν υποκεφάλαιο, αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της μηχανικής παραμορφώσιμου σώματος και της θραυστομηχανικής και έπειτα περιγράφεται η εφαρμογή τους στην παρούσα εργασία. Για την παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου, ο γράφων ανέτρεξε στα βιβλία των Χρυσουλάκη και Παντελή [25], Παπάζογλου και Τσούβαλη [26] και στη διπλωματική εργασία της τέως φοιτήτριας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Μυρσίνη Παπαϊωάννου [24].

3.4.1 Μηχανική παραμορφώσιμου σώματος

3.4.1.1 Τάσεις και παραμορφώσεις

Τα βασικότερα μεγέθη της μηχανικής παραμορφώσιμου σώματος είναι η τάση και η παραμόρφωση. Όταν εξωτερικά φορτία ενεργούν επί ενός στερεού σώματος, τότε εσωτερικές δυνάμεις αναπτύσσονται για να τα αντισταθμίσουν, επιφέροντας μια κατάσταση (στατικής ισορροπίας). Ως «τάση» ορίζεται το πηλίκο των εσωτερικών δυνάμεων F , με την θεωρητική στοιχειώδη επιφάνεια τομής A , πάνω στην οποία αυτές ενεργούν.

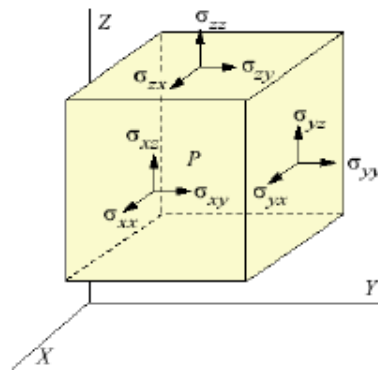
$$\sigma [Pa] = \frac{F[N]}{A[m^2]} \quad (3.1)$$

Με την επιβολή εξωτερικού φορτίου οι εσωτερικές τάσεις προκαλούν τη μεταβολή του μεγέθους ή/και του σχήματος του σώματος, παραμορφώνοντας το. Θεωρώντας ένα μονοδιάστατο στοιχείο εντός του στερεού σώματος υπό φόρτιση, ως «αξονική παραμόρφωση» ε , ορίζεται το ορισμένο ολοκλήρωμα του πηλίκου της στοιχειώδους μεταβολής του μήκους του dl , προς το μήκους του στοιχείου l , με άκρα l_0 και l .

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} \quad (3.2)$$

Σε ένα τρισδιάστατο κυβικό στοιχείο μπορούν να συνυπάρχουν εννέα συνιστώσες τάσεις, μία ορθή (κάθετη στο επίπεδο) και δύο διατμητικές (παράλληλες στο επίπεδο) σε κάθε επίπεδο (Σχήμα 3.18). Αυτού του είδους η εντατική κατάσταση προκαλεί έξι συνιστώσες παραμόρφωσης: τρεις γραμμικές παραμορφώσεις, κάθετες σε κάθε επίπεδο που προκαλούν επιμήκυνση ή συρρίκνωση, ε_x , ε_y , ε_z , και τρεις γωνιακές/διατμητικές παραμορφώσεις

παράλληλες με κάθε επίπεδο που προκαλούν στρέβλωση, γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{xz} . Οι γωνιακές παραμορφώσεις ορίζονται ως η αρνητική μεταβολή μιας γωνίας α , μεταξύ ακμών του στοιχείου.



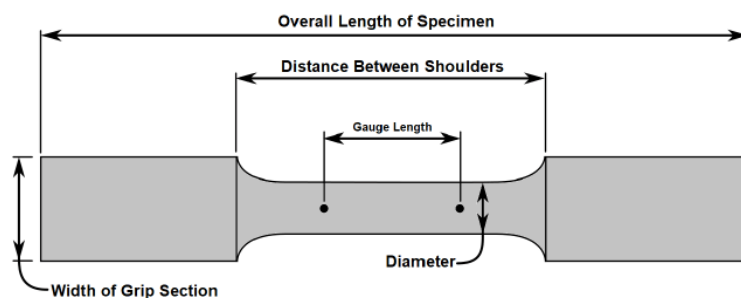
Σχήμα 3.18: Τρισδιάστατη εντατική κατάσταση στερεού σώματος [24]

3.4.1.2 Δοκιμή Εφελκυσμού – Καμπύλη Τάσης-Παραμόρφωσης

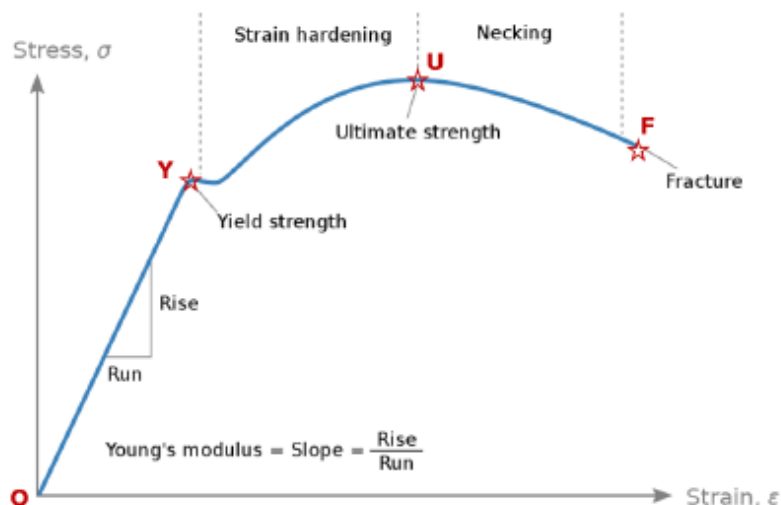
Τα φυσικά αυτά μεγέθη συνδέονται μέσω της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης του υλικού. Η καμπύλη αυτή παράγεται μέσω της δοκιμής εφελκυσμού και εξαρτάται πρωτίστως από το είδος του υλικού, αποτελώντας το βασικότερο χαρακτηριστικό του και έναν τρόπο αναγνώρισης του. Κατά την δοκιμή, τα δύο άκρα ενός κατάλληλα σχεδιασμένου δοκιμίου δεσμεύονται από μια αρπάγη, ενώ στο ένα από τα δύο επιβάλλεται σταθερός ρυθμός δύναμης ή μετατόπισης. Ένα τυπικό δοκίμιο εφελκυσμού φαίνεται στο Σχήμα 3.19. Ένα δυναμόμετρο καταγράφει τη δύναμη που ασκείται στα άκρα του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του τεστ και ένα επιμηκυσιόμετρο (gauge), τοποθετημένο στη μέση του δοκιμίου, μετράει την προοδευτική επιμήκυνση του. Επομένως, το άμεσο αποτέλεσμα του πειράματος είναι η καμπύλη δύναμης-επιμήκυνσης. Όμως, διαιρώντας τη δύναμη με την αρχική επιφάνεια διατομής του δοκιμίου και την μεταβολή του μήκους του επιμηκυσιόμετρου με το αρχικό του μήκος (gauge length, Σχήμα 3.19) υπολογίζονται η «πειραματική τάση» και η «πειραματική παραμόρφωση» αντίστοιχα. Έτσι, προκύπτει η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες για την συμπεριφορά του υλικού.

Τα μεταλλικά και όλκιμα υλικά όπως ο απλός ναυπηγικός χάλυβας, που αφορά τη συγκεκριμένη εργασία, έχουν καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης της μορφής του Σχήμα 3.20. Όπως φαίνεται, η καμπύλη μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές. Στην πρώτη περιοχή (O->Y) το υλικό παρουσιάζει μια γραμμική ελαστική συμπεριφορά η οποία περιγράφεται από τον νόμο του Hooke, $\sigma = E\epsilon$, όπου E το Μέτρο Ελαστικότητας του υλικού. Η ελαστική περιοχή εκτείνεται μέχρι το όριο διαρροής σ_y (Yield Strength, Y), πέρα από το οποίο το υλικό εισέρχεται στην πλαστική περιοχή όπου εμφανίζεται πλαστική παραμόρφωση. Ένα τμήμα αυτής παραμένει ως μόνιμη, μη αντιστρεπτή παραμόρφωση μετά και από την απομάκρυνση του φορτίου. Μετά το σημείο διαρροής το δοκίμιο παραμορφώνεται ισόογκα, αυξάνοντας το μήκος του και μειώνοντας το πλάτος του, με αποτέλεσμα η διατομή του να λεπταίνει καθ' όλο το μήκος του ομοιόμορφα. Παράλληλα, συντελείται το φαινόμενο της ενδοτράχυνσης που έχει σαν αποτέλεσμα την σκληρυνση του υλικού. Η περιοχή αυτή του διαγράμματος (Y-

>U) ονομάζεται περιοχή κράτυνσης και ολοκληρώνεται στο όριο μέγιστης αντοχής σ_{ult} (Ultimate Strength, U), που αποτελεί το σημείο στο οποίο μεγιστοποιείται η τάση. Μετά από αυτό το σημείο, παρατηρείται ότι η δύναμη που καταγράφεται από το δυναμόμετρο και επομένως η τάση που υπολογίζεται από την μηχανή, αρχίζει να μειώνεται συναρτήσει της παραμόρφωσης. Έτσι, στην τρίτη και τελευταία περιοχή (U->F), η παραμόρφωση συγκεντρώνεται σε μια περιορισμένη ζώνη που καλείται λαιμός, καθώς η διατομή λεπταίνει πλέον εντοπισμένα εκεί. Η υπερβολική και ανομοιόμορφη τοπική παραμόρφωση του δοκιμίου στο σημείο του λαιμού προκαλεί τη δημιουργία και τη συγκέντρωση κενών στη δομή του υλικού οδηγώντας τελικά στην θραύση του, η οποία συμβαίνει στο σημείο F, Fracture του Σχήμα 3.20. Εκεί, συναντάμε την παραμόρφωση θραύσης που είναι η τελική συνολική παραμόρφωση μετά τη θραύση του δοκιμίου.



Σχήμα 3.19: Δοκίμιο εφελκυσμού [24]



Σχήμα 3.20: Μορφή καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης όλκιμου μεταλλικού υλικού [24]

3.4.1.3 Πραγματική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης

Η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που παράγεται από το πείραμα εφελκυσμού ονομάζεται «πειραματική καμπύλη». Στην πραγματικότητα, οι εσωτερικές τάσεις συναρτήσει των παραμορφώσεων σε ένα σημείο εντός του δοκιμίου δεν δίνονται από αυτήν την καμπύλη. Αυτή η ανισότητα οφείλεται στον τρόπο παραγωγής της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης από την καμπύλη δύναμης-επιμήκυνσης κατά τη διεξαγωγή του πειράματος εφελκυσμού. Η πραγματική τάση που αναπτύσσεται σε μία διατομή του δοκιμίου, κατά το μονοαξονικό εφελκυσμό, υπολογίζεται ως ο λόγος της τιμής της δύναμης προς το εμβαδόν

διατομής τη στιγμή που καταγράφεται η εν λόγω τιμή της δύναμης. Κατά το πείραμα εφελκυσμού, δεν γίνεται συνεχής καταγραφή του εμβαδού διατομής του δοκιμίου, A , επομένως η τάση υπολογίζεται ως προς το αρχικό εμβαδόν διατομής, A_0 , που προφανώς είναι μεγαλύτερο από το A , αφού η διατομή λεπταίνει λόγω των δευτερευουσών πλευρικών παραμορφώσεων. Γι' αυτόν τον λόγο, η πραγματική τιμή της τάσης που αναπτύσσεται για μία δεδομένη παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη από αυτήν που αντιστοιχεί στην ίδια παραμόρφωση και βρίσκεται από την πειραματική καμπύλη (Εξ. 3.3).

$$A_0(\varepsilon) > A(\varepsilon) \Rightarrow \frac{F}{A_0}(\varepsilon) < \frac{F}{A}(\varepsilon) \Rightarrow \sigma_{eng}(\varepsilon) < \sigma_{true}(\varepsilon) \quad (3.3)$$

Επιπλέον, η πραγματική αξονική παραμόρφωση μιας διατομής του δοκιμίου, δεν ισούται με την τιμή της παραμόρφωσης που υπολογίζεται από το πείραμα εφελκυσμού. Η πειραματική παραμόρφωση υπολογίζεται ως ο λόγος της διαφοράς στο μήκος του επιμηκυσσιόμετρου, Δl , προς το αρχικό του μήκος, ενώ η πραγματική παραμόρφωση είναι το ολοκλήρωμα της στοιχειώδους μεταβολής του μήκους προς το εκάστοτε μήκος τη στιγμή της μέτρησης. Ισχύει, δηλαδή η σχέση Εξ. 3.4.

$$\varepsilon_{true} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln(l) - \ln(l_0) \Rightarrow \varepsilon_{true} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (3.4)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν και τον ορισμό της πειραματικής παραμόρφωσης, η σχέση που συνδέει την πειραματική με την πραγματική παραμόρφωση φαίνεται στην Εξ. 3.5.

$$\varepsilon_{true} = \ln(\varepsilon_{eng} + 1) \quad (3.5)$$

Επιχειρείται επίσης, να συνδεθεί η πραγματική και πειραματική τιμή της τάσης με μια ευθεία σχέση. Εφόσον ισχύει η συνθήκη της ομοιόμορφης παραμόρφωσης, ισχύει η Εξ. (3.6) για το εμβαδόν διατομής του δοκιμίου. Εισάγοντας την στον ορισμό της πραγματικής τάσης, προκύπτει η ζητούμενη Εξ. (3.7).

$$V_0 = V \Rightarrow A_0 * l_0 = A * l \Rightarrow A = A_0 * \frac{l_0}{l} \quad (3.6)$$

$$\sigma_{true} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0 * \frac{l_0}{l}} = \frac{F}{A_0} * \frac{l}{l_0} \Rightarrow \sigma_{true} = \sigma_{eng} * (\varepsilon_{eng} + 1) \quad (3.7)$$

Οι παραπάνω σχέσεις σύνδεσης των πραγματικών και πειραματικών τάσεων και παραμορφώσεων ισχύουν υπό την προϋπόθεση της ομοιόμορφης παραμόρφωσης του στοιχείου, η οποία εφαρμόζεται μόνο στην δεύτερη περιοχή έως το όριο αντοχής του υλικού.

Τα πραγματικά μεγέθη τάσης και παραμόρφωσης, στην περιοχή μετά το όριο αντοχής όπου δημιουργείται ο λαιμός, συνδέονται συνήθως μέσω της εκθετικής σχέσης (Power-law).

$$\sigma_{true} = K * \varepsilon_{true_plastic}^n \quad (3.8)$$

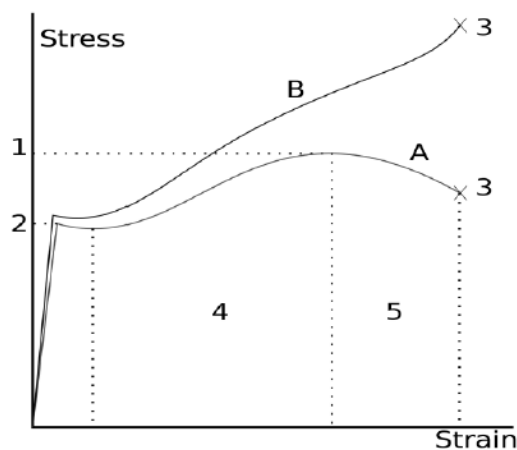
Τα K και n είναι σταθερές που συσχετίζονται με το υλικό και καλούνται σταθερά ενδοτράχυνσης και συντελεστής ενδοτράχυνσης, αντίστοιχα. Μάλιστα, ο συντελεστής ενδοτράχυνσης ισούται με την τιμή της πραγματικής παραμόρφωσης στο όριο αντοχής. Δηλαδή:

$$n = \varepsilon_{ult,true} \quad (3.9)$$

Ενώ για την σταθερά ενδοτράχυνσης ισχύει ότι:

$$K = \frac{\sigma_{ult,true}}{n^n} \quad (3.10)$$

Τελικά, αποδεικνύεται πως η πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του υλικού είναι μια αύξουσα καμπύλη σε όλο το εύρος των παραμορφώσεων ως τη θραύση, ενώ η πειραματική καμπύλη αποκτά αρνητική κλίση μετά το όριο αντοχής (Σχήμα 3.21). Αυτό αποδίδεται στο φαινόμενο της ενδοτράχυνσης, δηλαδή τη δυνατότητα του υλικού να αυξήσει την τάση που μπορεί να παραλάβει με την αύξηση της φόρτισης.



Σχήμα 3.21: Πειραματική (A) και πραγματική (B) καμπύλη μονοαξονικού εφελκυσμού [24]

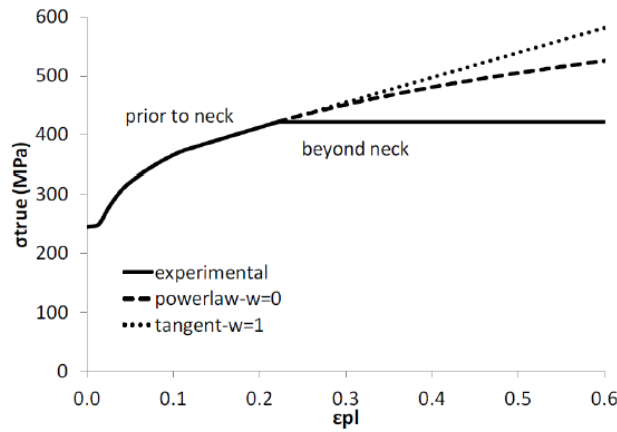
Κάποιες φορές, για την περιγραφή της συμπεριφοράς του υλικού μετά το όριο αντοχής, χρησιμοποιείται αντί της εκθετικής σχέσης μία γραμμική σχέση (tangent) που εφάπτεται στην υπάρχουσα καμπύλη στο σημείο του ορίου αντοχής. Με σκοπό να εξασφαλίζεται η συνέχεια σε αυτό το σημείο η γραμμική σχέση έχει την παρακάτω μορφή.

$$\sigma_{true} = \sigma_{ult,true} * \varepsilon_{true,plastic} + \sigma_{ult,true} * (1 - \varepsilon_{ult,true}) \quad (3.11)$$

Πολλοί ερευνητές όπως ο Μαρινάτος [27] και ο Ling [28], προσεγγίζουν την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης μετά το όριο αντοχής με μια εξίσωση με βαθμό από n έως 1. Για τον σκοπό αυτό εισάγουν τον παράγοντα w ο οποίος οδηγεί σε μια σχέση που παρεμβάλλεται μεταξύ της εκθετικής και της γραμμικής ως εξής.

$$\begin{aligned}
\sigma_{true} &= (1 - w) * f_{powerlaw}(\varepsilon_{true_{plastic}}) + w * f_{tangent}(\varepsilon_{true_{plastic}}) \\
\Rightarrow \sigma_{true} &= (1 - w) * \left[K * \varepsilon_{true_{plastic}}^n \right] + w \\
&\quad * \left[\sigma_{ult,true} * \varepsilon_{true_{plastic}} + \sigma_{ult,true} * (1 - \varepsilon_{ult,true}) \right] \\
\Rightarrow \sigma_{true} &= (1 - w) * \left[\frac{\sigma_{ult,true}}{\varepsilon_{ult,true}} \varepsilon_{ult,true} * \varepsilon_{true_{plastic}} \right] + w \\
&\quad * \left[\sigma_{ult,true} * \varepsilon_{true_{plastic}} + \sigma_{ult,true} * (1 - \varepsilon_{ult,true}) \right] \\
\Rightarrow \sigma_{true} &= \sigma_{ult,true} * \left[(1 - w) * \left(\frac{\varepsilon_{true_{plastic}}}{\varepsilon_{ult,true}} \right)^{\varepsilon_{ult,true}} + w \right. \\
&\quad \left. * \left(\varepsilon_{true_{plastic}} + 1 - \varepsilon_{ult,true} \right) \right]
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Για $w=0$, η εξίσωση μετά το όριο αντοχής ταυτίζεται με την εκθετική, ενώ για $w=1$ ισοδυναμεί με την εφαπτομενική (γραμμική) σχέση (Σχήμα 3.22). Η τιμή του w υπολογίζεται με αντίστροφη μηχανική.



Σχήμα 3.22: Μοντέλο πραγματικής καμπύλη τάσης – πλαστικής παραμόρφωσης μετά το όριο αντοχής, εφαπτομενικού (tangent, $w=1$) και εκθετικού (power-law, $w=0$) τύπου [24]

Σε κάθε περίπτωση, η καμπύλη του μοντέλου υλικού συνεχίζει μέχρι το σημείο της αστοχίας, το οποίο λαμβάνεται ως το όριο θραύσης του υλικού. Η θέση του σημείου αυτού πάνω στην καμπύλη βρίσκεται με βάση το κριτήριο θραύσης που χρησιμοποιείται όπως αναλύεται στο υποκεφάλαιο 3.4.3.

3.4.2 Θραυστομηχανική

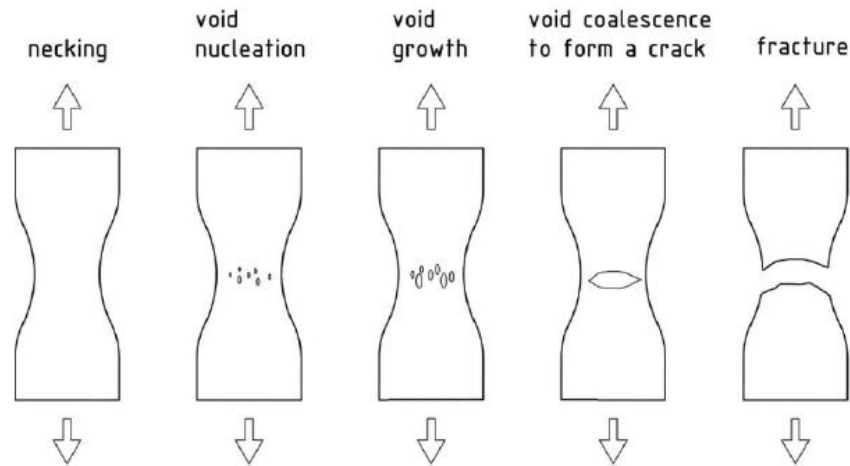
Η θραύση κάποιου υλικού αντιπροσωπεύει την έσχατη αστοχία του υλικού, κατά την οποία προκύπτει ο διαχωρισμός του σώματος σε δύο ή περισσότερα μέρη. Αυτό συμβαίνει μέσω της αποχώρησης των ατομικών δεσμών και επιπέδων με αποτέλεσμα την ρήξη της συνέχειας του. Η ανεπιθύμητη ασυνέχεια στο υλικό, που δεν προϋπήρχε στην αρχική γεωμετρία του στοιχείου και προκλήθηκε από θραύση, ονομάζεται ρωγμή. Ο τρόπος διάδοσης της ρωγμής καθορίζεται από την ικανότητα του υλικού (κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος και φόρτισης) να αναπτύξει πλαστικές παραμορφώσεις μπροστά από το άκρο της ρωγμής και καθορίζει το είδος της θραύσης, εάν δηλαδή αυτή θα είναι όλκιμη (ductile) ή ψαθυρή (brittle). Κατά την όλκιμη θραύση, αναπτύσσονται εκτεταμένες πλαστικές παραμορφώσεις μπροστά από το άκρο της ρωγμής και η ρωγμή χαρακτηρίζεται ως ευσταθής, υπό την έννοια ότι δεν διαδίδεται εάν δεν αυξηθεί το επιβαλλόμενο φορτίο. Αντίθετα, κατά την ψαθυρή θραύση οι πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται μπροστά από το άκρο της ρωγμής είναι πολύ μικρές και η ρωγμή χαρακτηρίζεται ως ασταθής, με την έννοια ότι διαδίδεται απότομα και καταστροφικά χωρίς να αυξηθεί το επιβαλλόμενο φορτίο. Η φύση και η εξέλιξη της θραύσης επηρεάζεται από το είδος του υλικού, το είδος της επιβαλλόμενης τάσης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, τη θερμοκρασία και το ρυθμό μεταβολής της εντατικής κατάστασης.

3.4.2.1 Μηχανισμός όλκιμης θραύσης

Στην παρούσα μελέτη, διερευνάται η συμπεριφορά σε ακραίες φορτίσεις κατασκευών από χάλυβα, ο οποίος σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 0 °C, θερμοκρασίες δηλαδή που επικρατούν στις θάλασσες και τους ωκεανούς, δρα όλκιμα κατά την θραύση του. Συνεπώς, ο μηχανισμός της όλκιμης θραύσης είναι αυτός που ενδιαφέρει τον γράφων. Ο μηχανισμός της όλκιμης θραύσης ξεκινά σε μια αδύναμη περιοχή του κατασκευαστικού στοιχείου στην οποία σταδιακά δημιουργείται ο λαιμός. Όταν η τάση είναι μικρότερη του ορίου αντοχής, ο ρυθμός μείωσης της επιφάνειας διατομής μειώνεται σε εκείνο το σημείο, χάρη στο φαινόμενο της ενδοτράχυνσης, με αποτέλεσμα την ομοιόμορφη παραμόρφωση. Αφού, όμως η γεωμετρία παραλάβει το μέγιστο δυνατό φορτίο, το φαινόμενο της ενδοτράχυνσης δεν μπορεί πλέον να αντισταθμίσει την επιφόρτιση των αδύναμων ζωνών με μεγαλύτερη τάση, με αποτέλεσμα η πιο ευαίσθητη από αυτές να καταρρέει συγκεντρώνοντας την επιπλέον παραμόρφωση. Μετά τη δημιουργία της τοπικής αστάθειας, το υπόλοιπο στοιχείο αποφορτίζεται ελαστικά, διατηρώντας μόνο την μόνιμη πλαστική παραμόρφωση του ορίου αντοχής και η περαιτέρω παραμόρφωση επιβαρύνει μόνο την περιοχή αστάθειας.

Η όλκιμη θραύση εξελίσσεται με την πυρήνωση, ανάπτυξη και συνένωση μικροκενών εντός του υλικού. Τα κενά αυτά οφείλονται στην παρουσία δευτερογενών φάσεων ή εγκλεισμάτων μέσα στο υλικό, διαφορετικής όλκιμότητας από την μήτρα. Κατά την επιβολή μιας εξωτερικής τάσης, η ασυνέχεια της παραμόρφωσης στην διεπιφάνεια εγκλείσματος/μήτρας οδηγεί στη δημιουργία νέων διαταραχών, οι οποίες προκαλούν μια επιπρόσθετη τάση, η οποία τείνει να αποκολλήσει το εγκλείσμα από τη μήτρα ή να το οδηγήσει σε θραύση. Αν η διεπιφάνεια εγκλείσματος/μήτρας δεν είναι αρκετά ισχυρή, τότε δημιουργείται ένα μικροκενό.

Οι σπές εντός του μεταλλικού πλέγματος μεγαλώνουν υπό την επίδραση αυξανόμενης πραγματικής τάσης και συγκεντρωμένης παραμόρφωσης. Τα τοιχώματα που τις διαχωρίζουν κάποια στιγμή καταρρέουν και τα μικροκέντρα που έχουν δημιουργηθεί συνενώνονται μεταξύ τους και οδηγούν στην τελική θραύση του υλικού. Η συνένωση των κενών γίνεται με δύο μηχανισμούς: με τοπική δημιουργία λαιμού μεταξύ των μικροκενών και μέσω δημιουργίας ζώνης διάτμησης λόγω έντονης διατμητικής παραμόρφωσης. Τα στάδια της μακροσκοπικής αστοχίας του υλικού κάτω από την επίδραση εφελκυστικής τάσης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.23.



Σχήμα 3.23: Μακροσκοπική εξέλιξη της αστοχίας υπό εφελκυστικό φορτίο [24]

3.4.2.2 Επίδραση τριαξονικότητας

Η τριαξονικότητα ορίζεται ως ο λόγος της υδροστατικής προς την ισοδύναμη τάση (Εξ. 3.13). Η υδροστατική τάση είναι υπεύθυνη για την μεταβολή του όγκου του στοιχείου και εκφράζεται μέσω της Εξ. 3.14. Η ισοδύναμη τάση, από την άλλη, είναι το πιο χρήσιμο μέγεθος για τη μελέτη προβλημάτων πολυαξονικής εντατικής καταπόνησης, σχετίζεται με την αλλαγή του σχήματος του στοιχείου και κατά von Mises υπολογίζεται από την Εξ. 3.15. Το σχετικό μέγεθος της υδροστατικής τάσης, σε μια δεδομένη εντατική κατάσταση, εκφράζεται μέσω της τριαξονικότητας. Με άλλα λόγια, η τριαξονικότητα εκφράζει το κατά πόσο η εντατική κατάσταση τείνει να μεταβάλλει τον όγκο του στοιχείου και όχι να το στρεβλώσει.

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}} \quad (3.13)$$

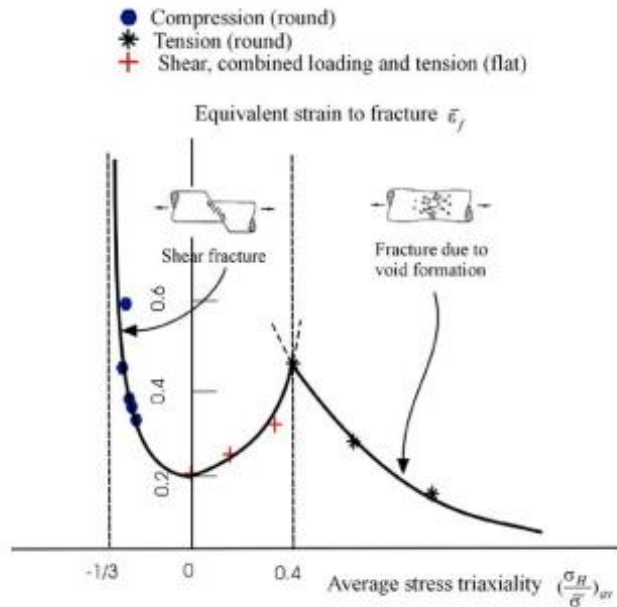
$$\sigma_h = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \quad (3.14)$$

$$\sigma_{eq-Von\ Mises} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \right. \\ \left. * (\tau_{xy} + \tau_{yz} + \tau_{zx})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.15)$$

Η τριαξονικότητα επηρεάζει την παραμόρφωση στην οποία επέρχεται η θραύση του στοιχείου. Αυτό οφείλεται στην επιρροή του μεγέθους της υδροστατικής συνιστώσας των τάσεων στον ρυθμό μεγέθυνσης των μικροκενών, που σχηματίζονται συνήθως μετά την υπέρβαση του ορίου αντοχής του υλικού. Οι Wierzbicki και Bao [33] προσπάθησαν να προσδιορίσουν μια σχέση μεταξύ της τριαξονικότητας και της παραμόρφωσης θραύσης. Στην έρευνα τους εκτέλεσαν δοκιμές σε δοκίμια από υλικό Al 2024-T351, καλύπτοντας όλο το εύρος της τριαξονικότητας από την μονοαξονική θλίψη ($\eta = -1/3$) έως τον διαξονικό εφελκυσμό ($\eta = 1$). Για τις αρνητικές τιμές τριαξονικότητας πραγματοποίησαν πειράματα θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια, ενώ για χαμηλές τιμές θετικής τριαξονικότητας δοκίμασαν ένα τεστ καθαρής διάτμησης, ένα συνδυαστικό τεστ διατμητικού και εφελκυστικού φορτίου και ένα τεστ σε πλάκα με μια κυκλική οπή υπό εφελκυστικό φορτίο. Τέλος, για μεγάλες τιμές τριαξονικότητας εφάρμοσαν τυπικές δοκιμές εφελκυσμού σε δοκίμια με εγκοπή.

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν προέκυψε μια καμπύλη παραμόρφωσης θραύσης-τριαξονικότητας η οποία μπορεί να χωριστεί σε τρεις περιοχές (Σχήμα 3.24):

- Η πρώτη περιοχή ξεκινάει από την τριαξονικότητα που χαρακτηρίζει την μονοαξονική θλίψη ($\eta = -1/3$) και εκτείνεται έως την τριαξονικότητα που αντιστοιχεί στην καθαρή διάτμηση ($\eta = 0$). Εδώ, η παραμόρφωση θραύσης μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της τιμής της τριαξονικότητας και ο μηχανισμός θραύσης που ακολουθείται είναι η δημιουργία ζωνών διάτμησης. Η τιμή $\eta = -1/3$ ονομάζεται τιμή αποκοπής, καθώς εκεί η παραμόρφωση θραύσης απειρίζεται και για τιμές τριαξονικότητας μικρότερης από αυτήν δεν επέρχεται θραύση του δοκιμίου.
- Στην δεύτερη περιοχή, για τριαξονικότητες μεταξύ αυτής της καθαρής διάτμησης ($\eta = 0$) και αυτής του μονοαξονικού εφελκυσμού για κυκλικό δοκίμιο ($\eta = 0.4$), παρατηρείται εκθετική αύξηση της παραμόρφωσης θραύσης με την αύξηση της τριαξονικότητας. Όπως και προηγουμένως, ο μηχανισμός που οδηγεί σε θραύση και εδώ είναι οι διατμητικές ζώνες που δημιουργούνται κατά την συνδυαστική φόρτιση από εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία.
- Η τρίτη και τελευταία περιοχή καλύπτει το φάσμα των εφελκυστικών τριαξονικοτήτων έως και τον διαξονικό εφελκυσμό ($\eta = 1$). Εδώ, παρατηρείται η εκθετική πτώση της παραμόρφωσης θραύσης με την αύξηση της τριαξονικότητας των τάσεων, λόγω της αύξησης του μεγέθους της υδροστατικής τάσης, που οδηγεί στην αλλαγή του μηχανισμού θραύσης από τη δημιουργία ζωνών διάτμησης στην ανάπτυξη μικροκενών.



Σχήμα 3.24: Σχέση παραμόρφωσης θραύσης και τριαξονικότητας με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των Wierzbicki και Bao [33]

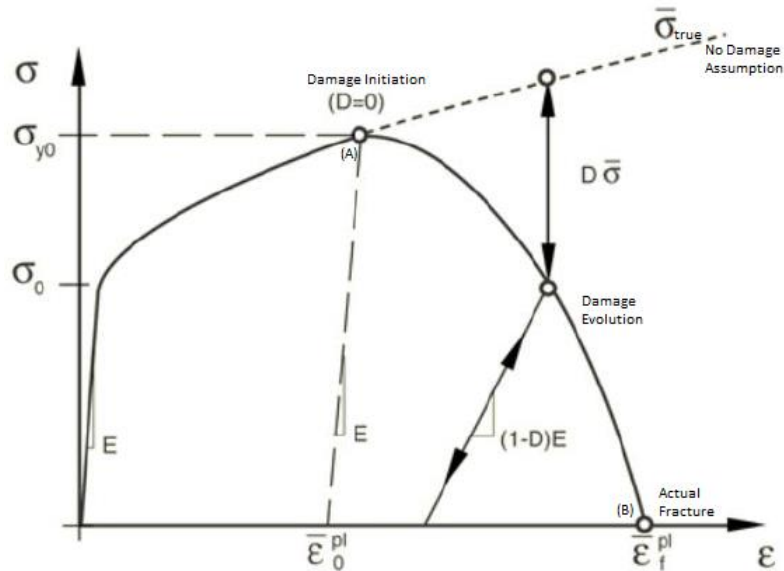
3.4.2.3 Κριτήρια Αστοχίας – Κριτήριο RTCL

Οι μελετητές μετά τον προσδιορισμό της καμπύλης πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης καλούνταν να βρουν το σημείο στο οποίο διακόπτεται αυτή η καμπύλη και επέρχεται η θραύση του δοκιμίου. Σχετικά με αυτό, δύο θεωρήσεις έχουν επικρατήσει. Άλλοι λαμβάνουν το σημείο δημιουργίας τοπικής αστάθειας και άλλοι το σημείο όπου το στοιχείο θραύεται οριστικά. Σε κάθε περίπτωση, οι συντεταγμένες αυτού του σημείου προσδιορίζονται, εκτελώντας πειραματικά και αριθμητικά, κατάλληλη καταστρεπτική δοκιμή και εφαρμόζοντας τη μέθοδο της αντίστροφης μηχανικής. Για κατασκευαστικά στοιχεία όμως, που βρίσκονται σε διαφορετική εντατική κατάσταση από εκείνες των πειραμάτων για τα οποία γνωρίζουμε το όριο θραύσης τους, είναι αναγκαία η εφαρμογή κάποιου κριτηρίου αστοχίας.

Τα κριτήρια αστοχίας ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη στιγμή που θεωρούν πως έχει επέλθει η θραύση του στοιχείου. Εκείνα, που θεωρούν ως σημείο διακοπής της πραγματικής καμπύλης υλικού το σημείο εκκίνησης του μηχανισμού αστάθειας (Damage Initiation, Σημείο A στο Σχήμα 3.25), ονομάζονται κριτήρια αστάθειας. Μεταξύ όμως της έναρξης της θραύσης (Σημείο A) και της πραγματικής θραύσης (Σημείο B), η θραύση εξελίσσεται σταδιακά (Damage Evolution) με υποβάθμιση τόσο των τάσεων όσο και της δυσκαμψίας του υλικού. Η χαλάρωση της στιβαρότητας του στοιχείου εκφράζεται μέσω της μεταβλητής D (Damage Degradation), η οποία παίρνει τιμές από 0 έως 1 και αντιστοιχεί στο ποσοστό μείωσης της πραγματικής τάσης στην περίπτωση που δεν θα είχε προκύψει θραύση (Εξ. 3.16). Αντίστοιχη μείωση δέχεται και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Έπειτα, από τη συνεχή υποβάθμιση της δομής του υλικού, η τάση και η δυσκαμψία του υλικού μηδενίζονται και η θραύση τελικά επέρχεται στο Σημείο B του Σχήμα 3.25. Έτσι, τα κριτήρια αστοχίας τα

οποία λαμβάνουν όλο το εύρος της καμπύλης μέχρι και τον αποχωρισμό του υλικού, ονομάζονται κριτήρια θραύσης.

$$\sigma_{true} \left(\varepsilon_{true_{plastic}} > \varepsilon_{0_{plastic}} \right) = \sigma_{true} \left(\varepsilon_{true_{plastic}} \right) * (1 - D) \quad (3.16)$$

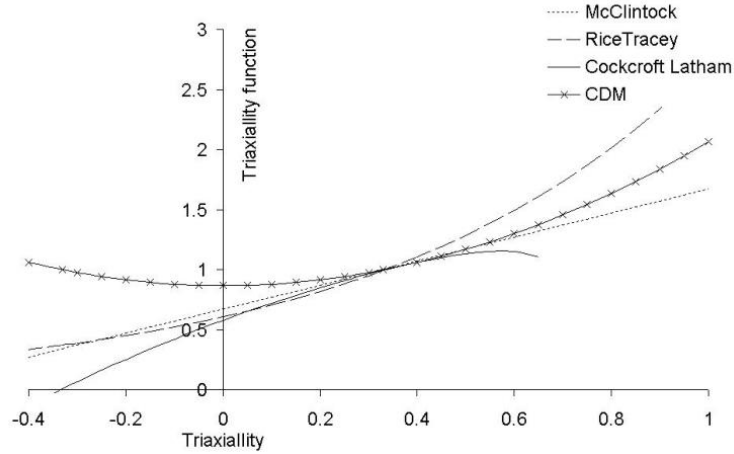


Σχήμα 3.25: Επίδραση Damage Evolution στην καμπύλη υλικού

Ένα από τα δημοφιλέστερα κριτήρια αστοχίας και αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι το κριτήριο Rice-Tracey-Cockcroft-Latham (Κριτήριο RTCL) το οποίο εισαγάγει πρώτη φορά ο Tornqvist [34] στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής. Αποτελεί συνδυασμό δύο διαφορετικών κριτηρίων αστοχίας, το Cockcroft & Latham (CL) και το Rice & Tracey (RT). Το κριτήριο των Cockcroft & Latham μπορεί να γραφεί σύμφωνα με την Εξ. 3.17.

$$f(\eta) = 2 \frac{1 + \eta\sqrt{12 - 27\eta^2}}{3\eta + \sqrt{12 - 27\eta^2}} \quad (3.17)$$

Ο τύπος αυτός ισχύει για συνθήκες επίπεδης εντατικής κατάστασης σε χαμηλές τιμές τριαξονικότητας, καθώς για τιμές μεγαλύτερες του $\eta = 2/3$ ο τύπος καταρρέει. Ωστόσο, η Εξ. 3.16 δηλώνει πως όταν το στοιχείο τίθεται υπό ομογενή θλίψη ($\eta < -1/3$), δεν επέρχεται θραύση (Σχήμα 3.26), κάτι το οποίο επαληθεύεται από πολλούς ερευνητές, όπως οι Wierzbicki και Bao [33] των οποίων η μελέτη σχολιάστηκε νωρίτερα. Μάλιστα, αυτό έρχεται σε αντίθεση με άλλα κριτήρια αστοχίας όπως του McClintock και τα CDM, σύμφωνα με τα οποία για τριαξονικότητες ακόμα μικρότερες του $\eta = -1/3$, θα υπάρξει θραύση (Σχήμα 3.26). Αυτό βέβαια, εξηγείται από το γεγονός πως αυτά τα κριτήρια έχουν κατασκευαστεί για θετικές τριαξονικότητες και αφορούν τον μηχανισμό θραύσης μέσω της δημιουργίας μικροκενών. Γίνεται όμως κατανοητό, πως το κριτήριο των Cockcroft & Latham είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην περιοχή δημιουργίας ζωνών διάτμησης.



Σχήμα 3.26: Γραφική αναπαράσταση συναρτήσεων κριτηρίων αστοχίας

Ένα άλλο κριτήριο που μελετά την ανάπτυξη των μικροκενών είναι αυτό των Rice & Tracey. Γι' αυτόν τον λόγο, περιγράφει ιδανικά τη στιγμή της θραύσης του υλικού για εφελκυστικές τριαξονικότητες ($\eta > 1/3$). Ωστόσο, και αυτό προβλέπει θραύση του στοιχείου για $\eta < -1/3$, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα. Ο μαθηματικός τύπος του κριτηρίου Rice & Tracey φαίνεται στην Εξ. 3.18.

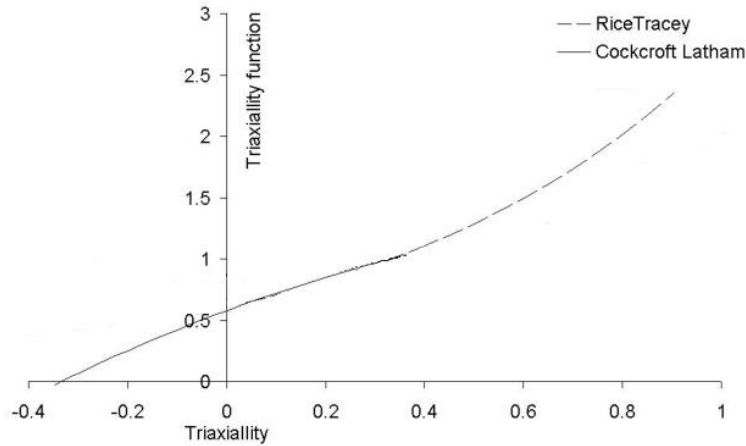
$$f(\eta) = a_{RT} \exp(1.5\eta) \quad (3.18)$$

Ο Tornqvist [34] συνδυάζοντας το Cockcroft & Latham που μπορούσε να προβλέψει ιδανικά την θραύση λόγω διάτμησης και το Rice & Tracey που έδινε σωστά αποτελέσματα για τη θραύση λόγω ανάπτυξης μικροκενών, κατασκεύασε το συνδυαστικό κριτήριο RTCL που περιέγραφε αποτελεσματικά τη θραύση για όλο το φάσμα των τριαξονικοτήτων. Έτσι, το RTCL χρησιμοποιούσε το Cockcroft & Latham για τριαξονικότητες μέχρι $\eta = 1/3$, από όπου και έπειτα εφαρμοζόταν το Rice & Tracey. Η μόνη παράμετρος που πρέπει να προσδιοριστεί είναι η σταθερά a_{RT} (εξαρτάται από το υλικό), η οποία με σκοπό να εξασφαλίζεται η συνέχεια στο σημείο αλλαγής του τύπου ($\eta = 1/3$), τίθεται ίση με $1/1.65$. Έτσι, η καμπύλη του κριτηρίου RTCL φαίνεται στο Σχήμα 3.27 και η τελική μαθηματική μορφή του είναι η εξής:

$$D = \frac{1}{\varepsilon_{cr}} \int f(\eta)_{RTCL} d\varepsilon \geq 1 \quad (3.19)$$

Όπου:

$$f(\eta)_{RTCL} = \begin{cases} 0 & , \text{για } \eta < -\frac{1}{3} \\ 2 \frac{1 + \eta\sqrt{12 - 27\eta^2}}{3\eta + \sqrt{12 - 27\eta^2}} & , \text{για } -\frac{1}{3} < \eta < \frac{1}{3} \\ \frac{1}{1.65} \exp(1.5\eta) & , \text{για } \eta > \frac{1}{3} \end{cases} \quad (3.20)$$



Σχήμα 3.27: Καμπύλη τριαξονικότητας συνδυαστικού κριτηρίου RTCL

Η παράμετρος ϵ_{cr} είναι η παράμετρος ρύθμισης του κριτηρίου RTCL ανάλογα με το χαρακτηριστικό μέγεθος των στοιχείων στο Abaqus. Αντιστοιχεί στην ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση θραύσης υπό συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού ($\eta = 1/3$) και λαμβάνεται μέσω μοντελοποίησης της δοκιμής εφελκυσμού διακριτοποιώντας την περιοχή του λαιμού του δοκιμίου με το χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείου που ενδιαφέρει κάθε φορά. Στην περίπτωση όμως, που το χαρακτηριστικό μέγεθος στοιχείου του βασικού μοντέλου είναι τέτοιου μεγέθους, όπου δεν μπορεί να κατασκευαστεί ένα ρεαλιστικό μοντέλο δοκιμίου εφελκυσμού στο Abaqus, το ϵ_{cr} δίνεται μέσω της Εξ. 3.21 η οποία λαμβάνει υπόψιν το μέγεθος και το πάχος του στοιχείου.

$$\epsilon_{cr} = n + (\epsilon_n - n) \frac{t_e}{l_e} \quad (3.21)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, με ϵ_n ισούται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση θραύσης υπό συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού με $l_e = t_e$. Το n είναι ο συντελεστής ενδοτράχυνσης του υλικού και τα l_e και t_e , το χαρακτηριστικό μήκος των στοιχείων στην περιοχή του λαιμού και το πάχος του δοκιμίου αντίστοιχα.

3.4.3 Μοντελοποίηση υλικού στην παρούσα εργασία

3.4.3.1 Επιλογή υλικού

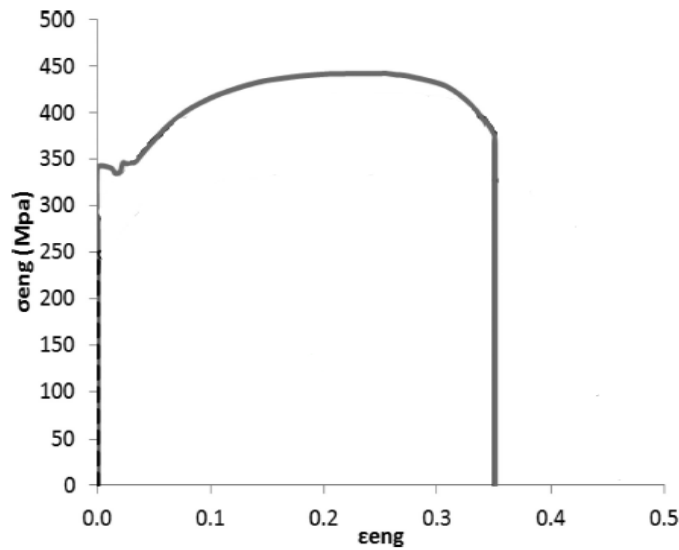
Για την επιτυχή περιγραφή του μοντέλου υλικού της ανεμογεννήτριας (και όχι και του πλοίου καθώς έχει θεωρηθεί απαραμόρφωτο) είναι απαραίτητη η εύρεση μιας καμπύλης υλικού που θα εκφράζει ικανοποιητικά τη μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής. Ωστόσο, η πληροφορία για το υλικό της ανεμογεννήτριας αναφοράς του Πολυτεχνείου της Δανίας, που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη, δεν ήταν διαθέσιμες από τους κατασκευαστές. Επομένως, έπρεπε να συνδυαστούν οι διαθέσιμες πληροφορίες από την υπάρχουσα βιβλιογραφία, για την σωστή επιλογή. Στη διπλωματική εργασία του Α.Μ. Broersen [22], όπου αναζητείται ένα αναλυτικό μοντέλο για την αξιολόγηση των καμπτικών ροπών που αναπτύσσονται στην ανεμογεννήτρια λόγω της σύγκρουσης της με πλοίο, ο γράφων χρησιμοποιεί την ίδια ανεμογεννήτρια αναφοράς και οι ιδιότητες του υλικού της φαίνονται στον Πίνακα 3.8. Όμως, δεν παρέχεται η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης με αποτέλεσμα να μην είναι γνωστή η συμπεριφορά της κατασκευής στην ελαστοπλαστική περιοχή. Γι' αυτόν τον λόγο αναζητήθηκε εκ νέου στη βιβλιογραφία ένα υλικό, με γνωστή χαρακτηριστική καμπύλη, του οποίου οι ιδιότητες θα προσεγγίζουν εκείνες του υλικού του Broersen. Τελικά, το υλικό που χρησιμοποίησαν οι Alsos και Amdahl [29] και οι Σαμουηλίδης και Μαρινάτος [30] είναι αυτό που επιλέγεται. Είναι χάλυβας τύπου S235JR EN10025 και οι ιδιότητές του παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.9 και συγκρίνοντας τις με εκείνες του υλικού του Broersen, φαίνεται πως οι αποκλίσεις μεταξύ τους είναι μικρές. Ακόμη, δεδομένου πως παρέχεται και η πειραματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (Σχήμα 3.28), η επιλογή του κρίνεται αποδεκτή.

Πίνακας 3.8: Ιδιότητες υλικού της ανεμογεννήτριας αναφοράς από τη διπλωματική εργασία του Α.Μ. Broersen [22]

Παράμετρος	Τιμή
Πυκνότητα, ρ	7830 kg/m ³
Όριο Διαροής, σ_y	355 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας, E	210 GPa
Λόγος Poisson, ν	0.3
Σταθερά Ενδοτράχυνσης, K	790 MPa
Συντελεστής Ενδοτράχυνσης, n	0.19

Πίνακας 3.9: Ιδιότητες του υλικού S235JR EN10025 [29],[30]

Παράμετρος	Τιμή
Πυκνότητα, ρ	7850 kg/m ³
Όριο Διαροής, σ_y	340 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας, E	210 GPa
Λόγος Poisson, ν	0.3
Σταθερά Ενδοτράχυνσης, K	760 MPa
Συντελεστής Ενδοτράχυνσης, n	0.225



Σχήμα 3.28: Πειραματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του επιλεχθέντος υλικού [29],[30]

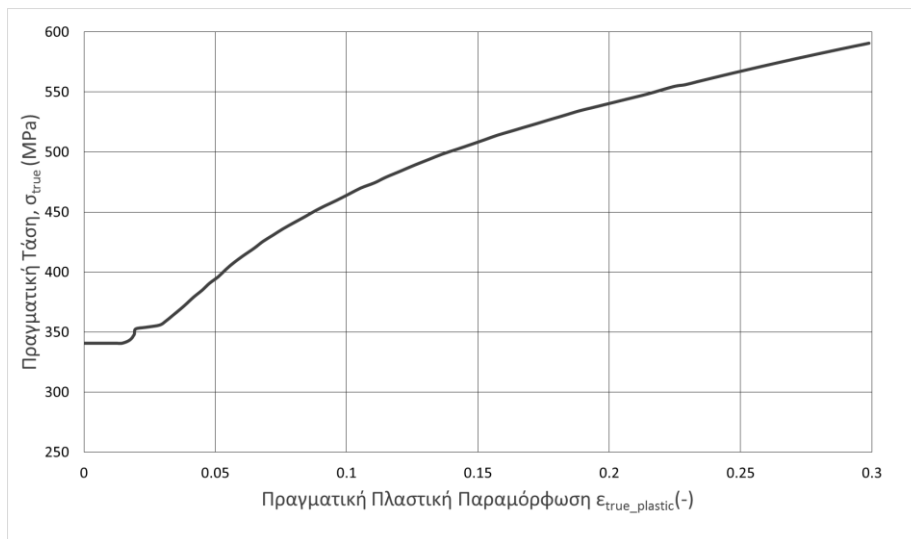
3.4.3.2 Πραγματική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης και δοκιμή εφελκυσμού

Η πειραματική καμπύλη ψηφιοποιείται και μετατρέπεται στην πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης. Για την περιοχή πριν το όριο αντοχής χρησιμοποιούνται οι Εξ. 3.5 και Εξ. 3.7, ενώ για την περιοχή δημιουργίας λαϊμού εφαρμόζεται η εκθετική σχέση (Εξ. 3.8). Προϋπόθεση για την εφαρμογή της, είναι η μετατροπή της συνολικής πραγματικής παραμόρφωσης ϵ_{true} (Εξ. 3.5) στην πλαστική πραγματική παραμόρφωση $\epsilon_{true_plastic}$ ώστε να εισηχθεί στον τύπο. Αυτή υπολογίζεται αφαιρώντας από την συνολική πραγματική παραμόρφωση την πραγματική ελαστική παραμόρφωση $\epsilon_{true_elastic}$, δηλαδή την μη μόνιμη και αντιστρεπτή παραμόρφωση που λαμβάνει το δοκίμιο στην γραμμική ελαστική περιοχή, εκφρασμένη σε όρους πραγματικής παραμόρφωσης (Εξ. 3.22).

$$\begin{aligned} \epsilon_{true_elastic} &= \ln(\epsilon_{eng_elastic} + 1) \\ \epsilon_{eng_elastic} &= \frac{\sigma_y}{E} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Ο συντελεστής και η σταθερά ενδοτράχυνσης της εκθετικής σχέσης υπολογίζονται από τις Εξ. 3.9 και Εξ. 3.10, με σκοπό να εξασφαλιστεί η συνέχεια της καμπύλης στο σημείο του ορίου αντοχής. Αυτές οι εξισώσεις περιέχουν τα μεγέθη ϵ_{ult_true} και σ_{ult_true} , τα οποία προκύπτουν από την ψηφιοποίηση της πειραματικής καμπύλης και την μετατροπή της σε πραγματική. Τελικά, ισχύει ότι $K = 776 \text{ MPa}$ και $n = 0.226$, τιμές που έχουν μια μικρή απόκλιση της τάξεως του 2% και του 0.5% αντίστοιχα, σε σχέση με εκείνες που δίνονται στον Πίνακα 3.9, λόγω της ανακρίβειας που περιέχει η διαδικασία ψηφιοποίησης της πειραματικής καμπύλης. Όμως, αποκλίσεις τέτοιας τάξης κρίνονται μικρές, με αποτέλεσμα οι τιμές που

υπολογίστηκαν να θεωρούνται αποδεκτές. Στο Σχήμα 3.29 φαίνεται γραφικά η πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του υλικού.

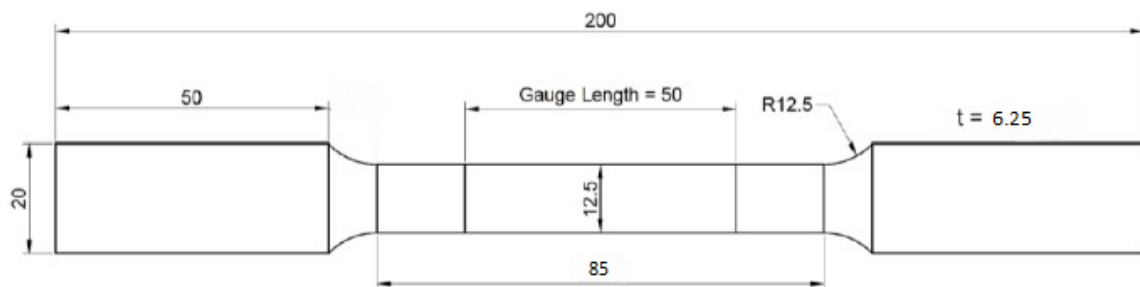


Σχήμα 3.29: Πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης

Με σκοπό την επαλήθευση της πραγματικής καμπύλης, αλλά και την ρύθμιση του κριτηρίου θραύσης όπως θα φανεί στη συνέχεια, προσομοιώνεται στο Abaqus, η δοκιμή του εφελκυσμού. Η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελεί μέρος της διαδικασίας αντίστροφης μηχανικής για την κατάλληλη επιλογή του συντελεστή w , που οδηγεί στο καλιμπράρισμα της πραγματικής καμπύλης. Συγκεκριμένα, στο Property Module εισάγεται η πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης και εκτελώντας το πείραμα εφελκυσμού λαμβάνεται η πειραματική καμπύλη σύμφωνα με το Abaqus. Αυτή συγκρίνεται με την πειραματική καμπύλη από τη ρεαλιστική δοκιμή και ελέγχεται η ταύτιση τους. Ακολουθώντας τη μέθοδο δοκιμής και λάθους (Trial & Error), η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί η τιμή του w για την οποία η πειραματική καμπύλη του Abaqus ταυτίζεται με εκείνη που έχει προκύψει από το πείραμα. Στα πλαίσια όμως της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το w έχει ληφθεί ίσο με 0 (powerlaw) και δεν τίθεται θέμα μεταβολής του. Ο λόγος που δεν αναζητείται ένα διαφορετικό w , για τη βελτίωση της μορφής της καμπύλης μετά το όριο άντοχης, είναι το γεγονός πως στη δοκιμή εφελκυσμού χρησιμοποιούνται στοιχεία με μήκος $l_e = 6.25$ mm, ενώ στο μοντέλο της ανεμογεννήτριας συναντιούνται στοιχεία μήκους $l_e = 500$ mm και $l_e = 1000$ mm. Το πρόβλημα εδώ εντοπίζεται στο ότι δεν γνωρίζουμε τη συμπεριφορά της καμπύλης με w διαφορετικό του 0 για τόσο μεγάλα μήκη στοιχείων. Αντίθετα, η εκθετική σχέση έχει χρησιμοποιηθεί από πλειάδα μελετητών, όπως ο Liu [31] και ο Ehlers [32], σε μοντέλα σύγκρουσης πλοίων και ανεμογεννητριών, δίνοντας ρεαλιστικά αποτελέσματα. Στη συνέχεια ακολουθούν οι λεπτομέρειες της κατασκευής του μοντέλου της δοκιμής εφελκυσμού.

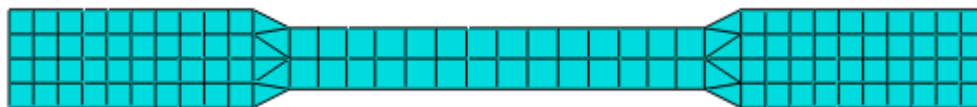
Δοκίμια εφελκυσμού κατασκευάζονται σε πολλά μεγέθη και σχήματα. Στην παρούσα εργασία το δοκίμιο εφελκυσμού της προσομοίωσης οφείλει να έχει ορθογώνια διατομή, καθώς στο μοντέλο της σύγκρουσης προσομοιώνεται η συμπεριφορά μιας λεπτότοιχης κατασκευής όπως η ανεμογεννήτρια. Η γεωμετρία του δοκιμίου εφελκυσμού ταυτίζεται με

αυτή που χρησιμοποίησε ο Μαρινάτος στη διδακτορική του διατριβή [33] και φαίνεται στο Σχήμα 3.30.



Σχήμα 3.30: Γεωμετρία δοκιμίου εφελκυσμού [33]

Για την χωρική διακριτοποίηση του δοκιμίου επιλέγεται ίδιος τύπος στοιχείων με εκείνα της ανεμογεννήτριας, δηλαδή στοιχεία Belytschko-Lin-Tsay (S4R) της βιβλιοθήκης Explicit (τετρακομβικά στοιχεία κελύφους, μειωμένης ολοκλήρωσης, με πέντε στρώσεις κατά το πάχος). Το ονομαστικό χαρακτηριστικό μήκος l_e του στοιχείου στην περιοχή του λαιμού πρέπει να είναι ίσο με το πάχος t του δοκιμίου εκεί, για τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης θραύσης υπο συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού για $t = l_e$, e_n , που χρησιμεύει στη ρύθμιση του κριτηρίου θραύσης. Το ονομαστικό χαρακτηριστικό μήκος του στοιχείου ισούται με τη ρίζα του γινομένου των πλευρών του. Επομένως, με βάση τις διαστάσεις του δοκιμίου, είναι δυνατή η χρήση τετραγωνικών στοιχείων με μήκος πλευράς 6.25 mm για την περιοχή του λαιμού. Έτσι, και το ονομαστικό χαρακτηριστικό μήκος ισούται με 6.25 mm και εξισώνεται με το πάχος του δοκιμίου. Άρα $l_e = t = 6.25$ mm. Στο Σχήμα 3.31 φαίνεται η μορφή του πλέγματος του δοκιμίου εφελκυσμού.



Σχήμα 3.31: Χωρική διακριτοποίηση του δοκιμίου εφελκυσμού

Το δοκίμιο πακτώνεται στο αριστερό του άκρο και στο δεξί άκρο του επιβάλλεται με σταθερό ρυθμό μετατόπιση ίση με 50 mm, που είναι ομοιόμορφη κατά το πάχος. Το φορτίο επιβάλλεται αυξανόμενο με αργό ρυθμό, γεγονός που επιτρέπει στην ανάλυση να μελετηθεί ψευδο-στατικά, αμελώντας τους αδρανειακούς όρους και τις αποσβέσεις. Επομένως, το βήμα που επιλέγεται είναι το Static, General του Implicit Επιλύτη από το Step Module. Σε αυτό εφαρμόζεται αυτόματη σταθεροποίηση (Automatic Stabilization>Specify Damping Factor: 0.0002) με την οποία εισάγεται τεχνητή απόσβεση με συντελεστή απόσβεσης $c = 0.0002$, για την εξάλειψη αριθμητικών ασταθειών. Ακόμη, ενεργοποιείται η ρύθμιση Nlgeom (Nonlinear Geometry>ON), ώστε το λογισμικό να λάβει υπόψη του τη μη γραμμική επίδραση των μεγάλων παραμορφώσεων και μετατοπίσεων και να μην τις θεωρήσει αριθμητικό σφάλμα. Για την επιλογή του μέγεθος του βήματος επιλέγεται ο αυτόματος τρόπος. Ο χρήστης ορίζει ένα αρχικό, ένα ελάχιστο και ένα μέγιστο χρονικό βήμα καθώς και ένα μέγιστο αριθμό βημάτων που θα χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα. Οι τιμές που επιλέχθηκαν φαίνονται στον Πίνακας 3.10. Ο επιλύτης χρησιμοποιεί άμεση μέθοδο Newton. Στο Job Module γίνεται

η ρύθμιση “Precision: Full”, το οποίο έχει να κάνει με τον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων των μεγεθών που αποθηκεύει το πρόγραμμα.

Πίνακας 3.10: Παράμετροι ρύθμισης του χρονικού βήματος

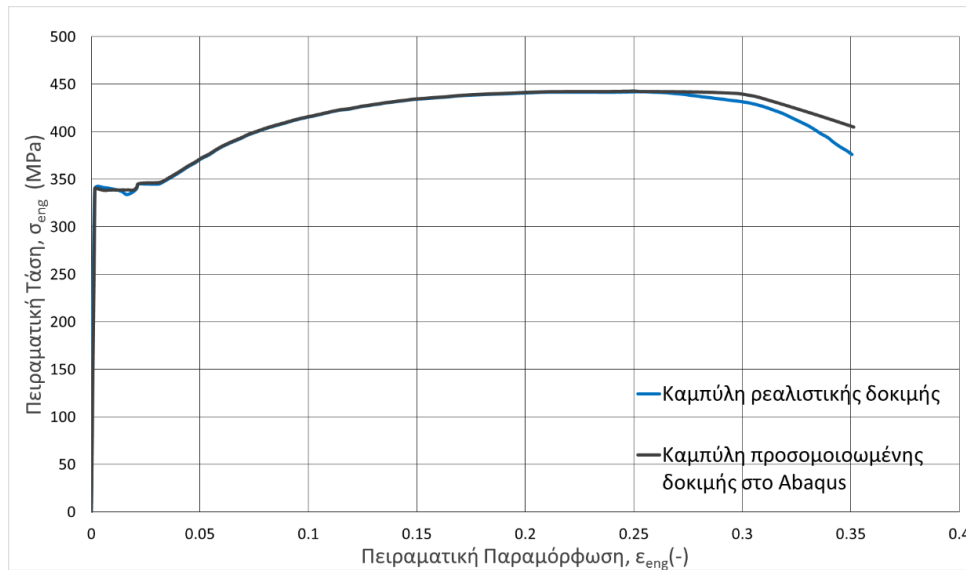
Παράμετρος	Τιμή
<i>Maximum number of increments</i>	10^5
<i>Initial Increment</i>	10^{-3}
<i>Minimum Increment</i>	10^{-20}
<i>Maximum Increment</i>	10^{-3}

Η παραγωγή της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης προϋποθέτει την εύρεση της χρονικής ιστορίας της δύναμης και της μετατόπισης κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Αυτό επιτυγχάνεται ζητώντας τις κατάλληλες εξόδους (Outputs) από το λογισμικό. Field Outputs είναι οι εξοδοί που αφορούν δεδομένα που είναι χωρικά κατανεμημένα σε όλο το μοντέλο ή σε τμήμα αυτού. Η οπτικοποίηση τους γίνεται με χρωματικές αναπαραστάσεις ισούψών περιοχών στο Visualization Module. Τα δεδομένα αυτά καταλαμβάνουν μεγάλη ποσότητα μνήμης και γι’ αυτόν τον λόγο ζητείται από το πρόγραμμα να τα αποθηκεύει σε λίγες χρονικές στιγμές κατά την προσομοίωση. Τα History Outputs συνιστούν την χρονική ιστορία των μεγεθών. Η οπτικοποίηση τους γίνεται μέσω διαγραμμάτων στο Visualization Module. Λόγω του μικρού όγκου που καταλαμβάνουν, τις περισσότερες φορές ζητούνται τα αποτελέσματα τους σε μεγάλο αριθμό χρονικών στιγμών για την ομαλότερη αναπαράσταση των καμπυλών. Στο υπό μελέτη πείραμα εφελκυσμού, ζητείται από το πρόγραμμα να αναπαραστήσει την κατανομή της ισοδύναμης τάσης κατά Mises και της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης (PEEQ) σε όλο το μοντέλο. Επιπλέον, ζητείται η χρονική ιστορία της μετατόπισης των άκρων του επιμηκυσιόμετρου (Gauge Length, Σχήμα 3.25) και η αξονική δύναμη αντίστασης στο δεξιό άκρο. Για τον υπολογισμό του αθροίσματος της δύναμης από όλους τους κόμβους του δεξιού άκρου γίνεται κινηματική σύζευξη τους σε ένα σημείο αναφοράς στο μέσο του πλάτους και η χρονική ιστορία μετράται εκεί (Constraints>Coupling, Coupling Type > Kinematic, Constrained degrees of freedom> όλοι). Τέλος, ζητείται η χρονική ιστορία της εσωτερικής (ALLIE) και της κινητικής ενέργειας (ALLKE) όλου του δοκιμίου, για τον έλεγχο της παραδοχής περί ψευδοστατικότητας του προβλήματος.

Για το σχεδιασμό της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης χρειάζεται να μετατραπούν οι χρονικές ιστορίες της δύναμης επί της διατομής του δοκιμίου στην περιοχή του λαιμού και της μετατόπισης των άκρων του επιμηκυσιόμετρου σε τάση και παραμόρφωση αντίστοιχα. Αυτό επιτυγχάνεται με τις Εξ. 3.23 και 3.24. Στο Σχήμα 3.32 φαίνεται η πειραματική καμπύλη που προέκυψε από το Abaqus, σε σύγκριση με εκείνη από τη ρεαλιστική δοκιμή εφελκυσμού.

$$\sigma_{eng}(t) = \frac{F(t)}{w * t} = \frac{F(t)}{12.5 \text{ mm} * 6.25 \text{ mm}} \quad (3.23)$$

$$\varepsilon_{eng}(t) = \frac{\Delta l(t)}{\text{gauge length}} = \frac{u_{right}(t) - u_{left}(t)}{50 \text{ mm}} \quad (3.24)$$



Σχήμα 3.32: Σύγκριση πειραματικών καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης από την πραγματική δοκιμή και την προσομοίωση της στο Abaqus

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, οι δύο καμπύλες χαρακτηρίζονται από απόλυτη ταύτιση μέχρι το κοινό όριο αντοχής τους. Από εκείνο το σημείο και έπειτα η καμπύλη προερχόμενη από το αριθμητικό μοντέλο αρχίζει να αποκλίνει από εκείνη της πραγματικής δοκιμής. Αυτό εξηγείται από την μη διόρθωση της πραγματικής καμπύλης στην περιοχή δημιουργίας λαιμού με τον συντελεστή w , κάτι το οποίο θα οδηγούσε στην ταύτιση των καμπύλων. Ωστόσο, δεδομένου ότι η μέγιστη απόκλιση είναι της τάξεως του 7%, αλλά και της πλήρους συμφωνίας στο πρώτο τμήμα, συμπεραίνεται πως η πραγματική καμπύλη τάση-παραμόρφωσης έχει εκτιμηθεί σωστά και είναι αποδεκτή προς χρήση στο μοντέλο της σύγκρουσης.

Έτσι, στο Property Module του μοντέλου σύγκρουσης πλοίου-ανεμογεννήτριας εισάγονται οι ιδιότητες του υλικού της ανεμογεννήτριας. Μέσω του Material > General > Density ορίζεται η πυκνότητα του υλικού ίση με $7,850 \text{ kg/m}^3$ και μέσω του Mechanical > Elastic θέτονται το μέτρο ελαστικότητας να ισούται με 210 GPa και ο λόγος Poisson με 0.3. Στο Mechanical > Plastic εισάγεται η πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης όπως υπολογίστηκε στο Σχήμα 3.24 και επαληθεύτηκε με τη μοντελοποίηση της δοκιμής εφελκυσμού.

3.4.3.3 Εισαγωγή κριτηρίου RTCL

Για την ολοκλήρωση του μοντέλου του υλικού χρειάζεται να εισηχθεί και το κριτήριο αστοχίας στο Abaqus. Όπως αναφέρθηκε στο εδάφιο 3.4.2.3 το κριτήριο που θα χρησιμοποιηθεί είναι το RTCL. Προϋπόθεση όμως για την εφαρμογή του είναι η μετατροπή του τύπου της Εξ. 3.17 σε μια κατάλληλη μορφή, ώστε να διευκολύνεται η εισαγωγή στο λογισμικό της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης θραύσης για τις διαφορετικές τριαξονικότητες. Γι' αυτόν τον σκοπό ακολουθείτε η ακόλουθη επαγωγική διαδικασία. Στην Εξ. 3.19 το μέγεθος D καλείται δείκτης ζημιάς (Damage Indicator) και υποδηλώνει πως για να επέλθει θραύση πρέπει να είναι μεγαλύτερο η ίσος της μονάδας. Πρακτικά όμως, η θραύση

επέρχεται όταν η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση ε ξεπεράσει την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση θραύσης ε_f . Δηλαδή όταν:

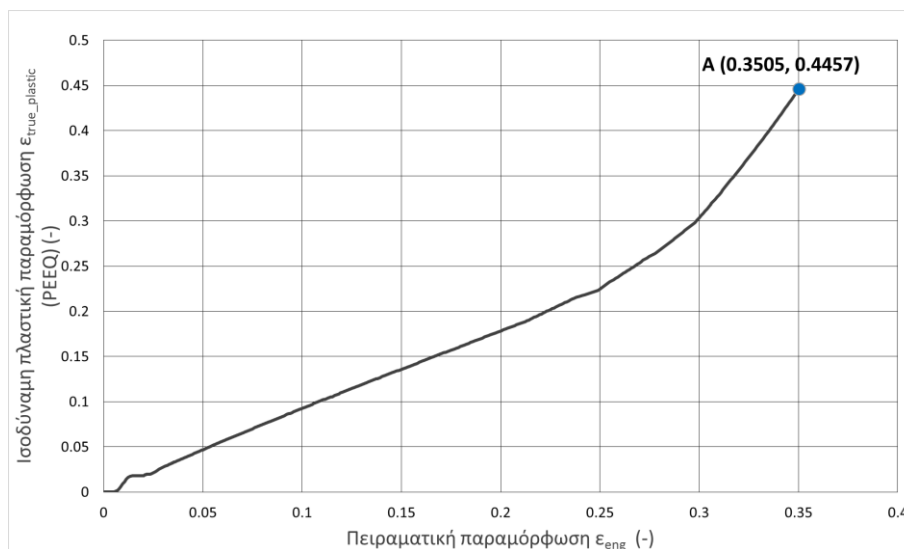
$$\varepsilon \geq \varepsilon_f \Rightarrow \frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} \geq 1 \quad (3.25)$$

Αυτός ο λόγος είναι στην ουσία ο δείκτης ζημιάς D. Επομένως, εξισώνοντας τις Εξ. 3.19 και 3.25 προκύπτει το εξής:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f} = \frac{1}{\varepsilon_{cr}} \int f(\eta)_{RTCL} d\varepsilon \geq 1 \Rightarrow$$

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cr} * \varepsilon}{\int f(\eta)_{RTCL} d\varepsilon} \Rightarrow \varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{cr}}{f(\eta)} \quad (3.26)$$

Έτσι, μέσω της Εξ. 3.22 υπολογίζεται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση θραύσης για όλες τις τριαξονικότητες. Προτού όμως γίνει αυτό, πρέπει να υπολογιστεί η τιμή του ε_{cr} από την Εξ. 3.21, κάτι το οποίο προϋποθέτει τον υπολογισμό του ε_n . Από τα αποτελέσματα της δοκιμής εφελκυσμού στο Abaqus, κατασκευάζεται η καμπύλη ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης (PEEQ) – πειραματικής παραμόρφωσης (Σχήμα 3.33). Το ε_n αντιστοιχεί στην τιμή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης για πειραματική παραμόρφωση ίση με εκείνη όπου επέρχεται θραύση στην πειραματική καμπύλη του Σχήματος 3.27, δηλαδή για $\varepsilon_{eng} = 0.3505$ (Σημείο A, Σχήμα 3.33). Επομένως, $\varepsilon_n = 0.4457$.



Σχήμα 3.33: Εύρεση του ε_n μέσω της καμπύλης ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης-πειραματικής παραμόρφωσης

Διαθέτοντας πλέον το ε_n , με την Εξ. 3.19 υπολογίζεται το ε_{cr} για τις ζώνες τις ανεμογεννήτριας, όπου ενδέχεται να προκύψει θραύση της κατασκευής. Οι ζώνες αυτές είναι η Ζώνη Πύργου και Ζώνη Σύγκρουσης. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των στοιχείων των ζωνών, μαζί με τα ε_{cr} φαίνονται στον

Πίνακας 3.11.

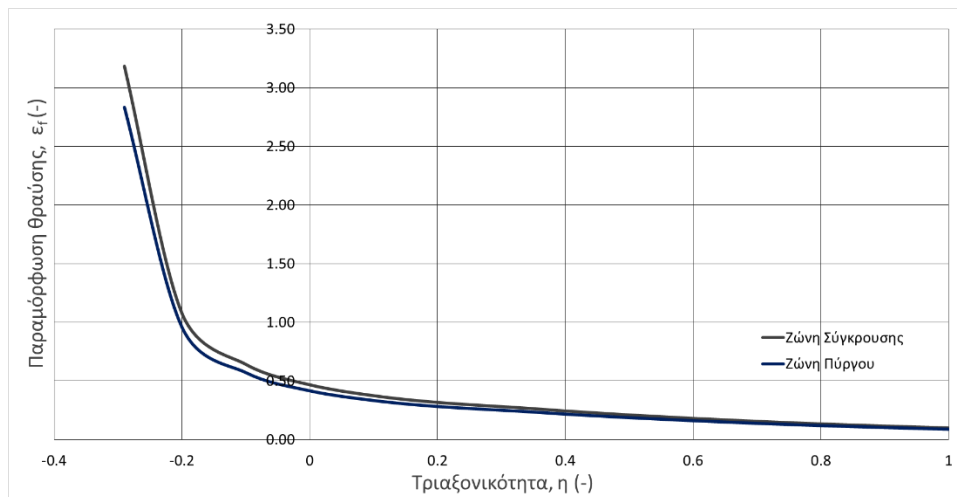
Πίνακας 3.11: Τιμές του ϵ_{cr} για τις ζώνες ενδιαφέροντος

Ζώνη	Πάχος στοιχείων, t_e	Ονομαστικό χαρακτηριστικό μήκος στοιχείων, l_e	Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση θραύσης για $\eta = 1/3$, ϵ_{cr}
<i>Πύργου</i>	32.4 mm	500 mm	0.24045
<i>Σύγκρουσης</i>	100 mm	500 mm	0.27013

Οι τιμές της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης θραύσης σε συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού εισάγονται στην Εξ. 3.21 και υπολογίζοντας παράλληλα τη συνάρτηση της τριαξονικότητας $f(\eta)$ από την Εξ. 3.18 κατασκευάζεται ο Πίνακας 3.12 που περιλαμβάνει τις τιμές της παραμόρφωσης θραύσης για διάφορες τιμές τριαξονικότητας. Στο Σχήμα 3.34 φαίνονται και οι καμπύλες παραμόρφωσης θραύσης – τριαξονικότητας για τις δύο ζώνες.

Πίνακας 3.12: Τιμές παραμόρφωσης θραύσης και τριαξονικότητας για τις ζώνες ενδιαφέροντος

Τριαξονικότητα, η	$f(\eta)$	ϵ_f για Ζώνη Πύργου	ϵ_f για Ζώνη Σύγκρουσης
-0.3	0.0849	2.8334	3.1831
-0.2	0.2508	0.9589	1.0772
-0.1	0.4208	0.5714	0.6419
0	0.5774	0.4165	0.4679
0.1	0.7208	0.3336	0.3748
0.2	0.8508	0.2826	0.3175
0.33	0.9992	0.2406	0.2703
0.4	1.1043	0.2177	0.2446
0.5	1.2830	0.1874	0.2105
0.6	1.4907	0.1613	0.1812
0.7	1.7319	0.1388	0.1560
0.8	2.0122	0.1195	0.1342
0.9	2.3378	0.1029	0.1155
1	2.7162	0.0885	0.0995



Σχήμα 3.34: Διάγραμμα παραμόρφωσης θραύσης συναρτήσει της τριαξονικότητας για τις δύο ζώνες ενδιαφέροντος

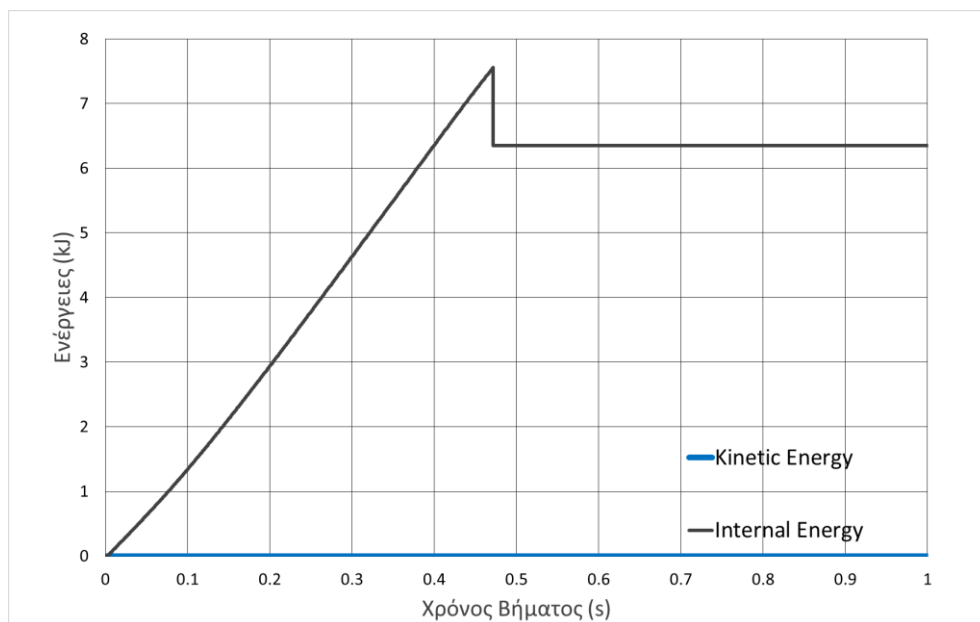
Οι τιμές τριαξονικότητας και παραμόρφωσης θραύσης του Πίνακα 3.12 εισάγονται στο Abaqus μέσω του Property Module του μοντέλου πλοίου-ανεμογεννήτρια, επιλέγοντας Material > Mechanical > Damage for Ductile Metals > Ductile Damage. Ο ρυθμός παραμόρφωσης θραύσης (strain rate) τίθεται ίσος με το 0 σε όλα τα κελιά. Η συγκεκριμένη παραδοχή θα ελεγχθεί στην πορεία της εργασίας.

Όσον αφορά το Damage Evolution το οποίο ενεργοποιείται επιλέγοντας Suboptions στο μενού του Ductile Damage, αποφασίστηκε να μην ληφθεί υπόψιν θεωρώντας πως η αστοχία συμβαίνει στο σημείο έναρξης της αστάθειας (Damage Initiation). Αυτό είναι κάτι που πράττει μεγάλος αριθμός μελετητών, καθώς η συγκεκριμένη παράμετρος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του πλέγματος. Με σκοπό να μειωθεί αυτή η εξάρτηση, στο Abaqus το Damage Evolution ορίζεται μέσω της ισοδύναμης πλαστικής μετατόπισης τη στιγμή της θραύσης (Displacement at Failure) αντί για την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση. Η μετατόπιση αυτή είναι μηδενική στην έναρξη της αστάθειας και φτάνει στην τιμή της τη στιγμή της θραύσης. Γενικότερα, όμως, προτείνεται η αγνόηση της συγκεκριμένης παραμέτρου. Στην παρούσα εργασία, με σκοπό να διευκολυνθεί η ανάλυση των μοντέλων, η τιμή του Displacement at Failure τίθεται ίση με 0.0001 αντί του μηδενός.

Σχόλια επί του μοντέλου εφελκυσμού και της τιμής του ϵ_{cr}

- Μετά τον προσδιορισμό του ϵ_n , δοκιμάστηκε να προσομοιωθεί το πείραμα εφελκυσμού, οπτικοποιώντας την θραύση του δοκιμίου αυτή τη φορά. Η τιμή του $\epsilon_n = 0.4457$ και η τριαξονικότητα 0.33 εισήχθησαν στο μενού του Ductile Damage. Ακόμη, με στόχο να διαγραφούν τα στοιχεία στον λαιμό του δοκιμίου όταν φτάσουν την κρίσιμη παραμόρφωση ενεργοποιήθηκε το Element Deletion στην καρτέλα του τύπου των στοιχείων από το Mesh Module. Επιπλέον, στα Field Outputs επιλέχθηκαν οι μεταβλητές Failure/Fracture>SDEG και State/Field/User/Time>STATUS. Η συγκεκριμένη διαδικασία εφαρμόζεται και στο κύριο μοντέλο πλοίου-ανεμογεννήτριας, ώστε να αφαιρεθούν από το πλέγμα τα στοιχεία που υφίστανται θραύση.

- Η παραδοχή περί ψευδοστατικότητας του μοντέλου εφελκυσμού ελέγχεται και κρίνεται αληθής μέσω του Σχήμα 3.35. Όπως φαίνεται η μέγιστη τιμή της κινητικής ενέργειας είναι μικρότερη του 5% της μέγιστης τιμής της εσωτερικής ενέργειας. Επομένως, τα δυναμικά φαινόμενα θεωρούνται αμελητέα. Το σημείο ασυνέχειας της καμπύλης της εσωτερικής ενέργειας οφείλεται στη θραύση του δοκιμίου που συμβαίνει εκείνη την στιγμή.
- Η Ζώνη Πύργου περιλαμβάνει ένα κωνικό τμήμα της ανεμογεννήτριας με μεταβλητή διάμετρο. Λόγω αυτού, το μέσο χαρακτηριστικό μήκος των στοιχείων της, στην πραγματικότητα δεν είναι ίσο με 500 mm, παρ' όλο που ο γράφων είχε θέσει αυτή την τιμή στο Mesh Module για το ονομαστικό μέγεθος της πλευράς του στοιχείου. Αντίθετα, ισούται με 439.7 mm. Ομοίως, για το κωνικό τμήμα της Ζώνης Σύγκρουσης το μέσο χαρακτηριστικό μήκος των στοιχείων της είναι ίσο με 446.6 mm. Αντίθετα, το ίδιο κυλινδρικό τμήμα της έχει μέσο χαρακτηριστικό μήκος 500 mm. Υπολογίζοντας τις τιμές της παραμόρφωσης θραύσης με τα πραγματικά χαρακτηριστικά μήκη, προκύπτουν τιμές οι οποίες αποκλίνουν από εκείνες του Πίνακας 3.12 κατά 0.8% και 1.9% για την Ζώνη Πύργου και τη Ζώνη Σύγκρουσης αντίστοιχα. Οι συγκεκριμένες αποκλίσεις θεωρούνται μηδαμινές. Οπότε, για να χρησιμοποιηθεί ένα ενιαίο χαρακτηριστικό μήκος και για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου η χρήση του $l_e = 500$ mm και για τις δύο ζώνες είναι αποδεκτή.



Σχήμα 3.35: Χρονική ιστορία εσωτερικής και κινητικής ενέργειας στην προσομοίωση πειράματος εφελκυσμού

3.5 Μοντελοποίηση Φορτίων

Πριν και κατά τη διάρκεια του φαινομένου της σύγκρουσης του πλοίου με την ανεμογεννήτρια, ασκούνται σε αυτήν δυναμικά και στατικά φορτία, τα οποία καθορίζουν την απόκριση της και την εξέλιξη του φαινομένου. Αυτά είναι τα εξής: οι δυνάμεις που επάγονται από τον άνεμο όταν η ανεμογεννήτρια είναι σε λειτουργία, η βαρυτική δύναμη που ασκείται στην κατασκευή λόγω της μάζας της, οι δυνάμεις από τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα και φυσικά η δύναμη κρούσης λόγω της επαφής της με το πλοίο. Στο παρόν υποκεφάλαιο θα αναλυθεί η μοντελοποίηση αυτών των φορτίων στην παρούσα διπλωματική εργασία.

3.5.1 Βαρυτικές δυνάμεις

Στις αριθμητικές προσομοιώσεις, οι βαρυτικές δυνάμεις συνήθως παραλείπονται αφού τα υπόλοιπα φορτία που ασκούνται στα μοντέλα είναι μεγαλύτερης τάξης μεγέθους, καθιστώντας την επίδραση της βαρύτητας αμελητέα. Στη συγκεκριμένη μελέτη όμως, έχουν μοντελοποιηθεί κατασκευές μεγάλου μεγέθους και μάζας, με αποτέλεσμα το βάρος τους να παίζει καθοριστικό ρόλο στον τρόπο συμπεριφοράς τους. Για τη μοντελοποίηση των βαρυτικών δυνάμεων ορίζεται η επιτάχυνση της βαρύτητας $g = 9,810 \text{ mm/s}^2$ στον κατακόρυφο άξονα z , μέσω του Load Module (Create Load > Gravity). Το λογισμικό υπολογίζει το φορτίο χρησιμοποιώντας την επιτάχυνση αυτή και την πυκνότητα του υλικού της κατασκευής, όπως αυτή ορίστηκε στο Property Module. Γενικά, οι βαρυτικές δυνάμεις αφορούν όλο το μοντέλο, αλλά στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται να εφαρμοστούν μόνο στην ανεμογεννήτρια, καθώς το πλοίο θεωρείται εξ ορισμού πως ισορροπεί σε ένα συγκεκριμένο βύθισμα, από την επίδραση του βάρους του και της άνωσης από την θάλασσα, χωρίς να χρειάζεται αυτές οι δυνάμεις να μοντελοποιηθούν.

3.5.2 Δυνάμεις κυματισμών και θαλάσσιων ρευμάτων

Στα τοιχώματα της ανεμογεννήτριας ασκούνται υδροστατικές πιέσεις και δυνάμεις άνωσης από το περιβάλλον ρευστό. Επίσης, οι κυματισμοί και τα θαλάσσια ρεύματα ασκούν τα αντίστοιχα υδροδυναμικά φορτία. Οι δυνάμεις αυτές όμως είναι πολύ μικρότερης τάξης μεγέθους από τις υπόλοιπες που εφαρμόζονται. Γι' αυτόν τον λόγο και με σκοπό την απλοποίηση του μοντέλου σύγκρουσης οι δυνάμεις που προέρχονται από την θάλασσα θεωρούνται αμελητέες και δεν μοντελοποιούνται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

3.5.3 Φορτία ανέμου

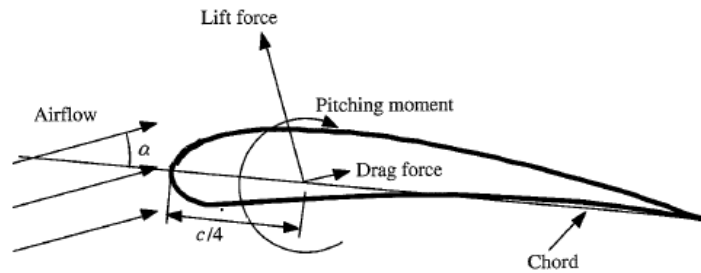
3.5.3.1 Βασικές αρχές αεροδυναμικής στις ανεμογεννήτριες

Η ανεμογεννήτρια, είτε στην στεριά είτε στην θάλασσα, είναι μια κατασκευή που αποσκοπεί στην παραγωγή μαζικής ηλεκτρικής ενέργειας από την κινητική ενέργεια του ανέμου, αφού την μετατρέψει σε μηχανική. Στο παρόν εδάφιο, θα αναλυθούν οι βασικές αρχές της αεροδυναμικής που εφαρμόζονται στις ανεμογεννήτριες και συντελούν στην δημιουργία αυτής της μηχανικής ενέργειας. Ο γράφων άντλησε τις πληροφορίες για τη σύνταξη του συγκεκριμένου εδαφίου από το βιβλίο “Wind Energy Explained: Theory, Design and Application” των J.F. Manwell, J.G. McGowan και A.L. Rogers [35] και το βιβλίο “Aerodynamics of Wind Turbines” του Martin O.L.Hansen [36].

Οι λεπίδες της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούν αεροτομές για την ανάπτυξη μηχανικής ισχύος, αφού η διατομή τους σε κάθε επιμέρους ακτίνα έχει το σχήμα μιας αεροτομής. Το πλάτος και το μήκος της λεπίδας είναι συναρτήσεις της επιθυμητής αεροδυναμικής αποτελεσματικότητας, της μέγιστης ισχύος, των ιδιοτήτων της αεροτομής και των αναγκών αντοχής. Πριν αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο οι ανεμογεννήτριες παράγουν την απαιτούμενη μηχανική ενέργεια, θα περιγραφούν οι βασικές έννοιες της αεροδυναμικής που αφορούν τις αεροτομές.

Η αεροτομή είναι διατομή μακρόστενου και ελλειψοειδούς σχήματος που συναντάται στις τομές πολλών κατασκευών στην καθημερινότητα, όπως στα φτερά των αεροπλάνων, στα υδροπτέρυγα σκάφη, στα πηδάλια, στα μονοθέσια αμαξίδια του μηχανοκίνητου αθλητισμού και φυσικά στις λεπίδες των ανεμογεννητριών. Λόγω του ιδιαίτερου σχήματος της, όταν ροή αέρα την διασχίζει, παράγεται μια συγκεκριμένη κατανομή δυνάμεων που εφαρμόζεται σε αυτήν. Αυτό οφείλεται στην διαφορά πίεσης που σχηματίζεται μεταξύ της πάνω και της κάτω ακμής της. Παράλληλα, λόγω της συνεκτικότητας του αέρα και της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ αυτού και της αεροτομής η ταχύτητα του αέρα παρουσιάζει μια μείωση κοντά στην επιφάνεια της. Οι δυνάμεις που παράγονται είναι η άνωση, η αντίσταση και μια περιστροφική ροπή και φαίνονται στο Σχήμα 3.36. Το μέγεθος τους εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης της ροής στην αεροτομή.

- Η άνωση (Lift Force) είναι η κάθετη στην ροή του αέρα δύναμη. Είναι συνέπεια της διαφοράς πίεσης μεταξύ της πάνω και της κάτω ακμής της αεροτομής.
- Η αντίσταση (Drag Force) ορίζεται ως η παράλληλη στη ροή του αέρα δύναμη. Οφείλεται στις συνεκτικές δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στην επιφάνεια της και στην διαφορά πίεσης μεταξύ της ακμής πρόσπτωσης και ακμής εκφυγής της αεροτομής.
- Η περιστροφική ροπή (Pitching Moment) τείνει να περιστρέψει την αεροτομή γύρω από έναν άξονα κάθετο σε αυτήν.



Σχήμα 3.36: Αναπτυσσόμενες δυνάμεις στην αεροτομή [35]

Για κάθε μία από τις παραπάνω δυνάμεις υπολογίζεται ο αντίστοιχος συντελεστής της δύναμης (Εξ. 3.27, Εξ. 3.28, Εξ. 3.29). Οι συντελεστές αυτοί αφορούν τρισδιάστατα αντικείμενα. Στην περίπτωση που μελετάται μια συγκεκριμένη δισδιάστατη αεροτομή, οι συντελεστές της άνωσης και της αντίστασης θα έπρεπε να διαιρεθούν με το άνοιγμα της αεροτομής l .

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U^2 c} \quad (3.27)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U^2 c} \quad (3.28)$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho U^2 A c} \quad (3.29)$$

Όπου: ρ είναι η πυκνότητα του αέρα, U η ταχύτητα της ροής, A η προβαλλόμενη επιφάνεια της αεροτομής (χορδή \times άνοιγμα) και c το μήκος της χορδής της.

Όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες, ο Betz, το 1926, κατασκεύασε ένα απλό, μονοδιάστατο μοντέλο για να προσδιορίσει την ισχύ που προκύπτει από μια ιδανική φτερωτή, την ώση που ασκείται σε αυτή, καθώς και το πως επηρεάζεται το πεδίο του αέρα. Στο Σχήμα 3.37 φαίνεται η αναπαράσταση της ανεμογεννήτριας και των γραμμών ροής του αέρα που την διαπερνούν. Οι λεπίδες θεωρούνται ιδανικές. Δηλαδή, δεν αναπτύσσουν τριβή με τον αέρα και δεν δημιουργούν περιστροφική συνιστώσα στον αέρα του ομόρου. Η ανεμογεννήτρια είναι μια κατασκευή η οποία παράγει ενέργεια απορροφώντας μέρος της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Επομένως, όταν ο άνεμος την διασχίζει με ταχύτητα V_0 η ταχύτητα της ροής του μειώνεται και γίνεται ίση με u , ώσπου τελικά σταθεροποιείται σε μια νέα τιμή u_1 μακριά από την ανεμογεννήτρια. Παράλληλα, η πίεση του αυξάνεται μέχρι τη στιγμή που συναντά την φτερωτή, όπου παρατηρείται μια απότομη και ασυνεχής πτώση πίεσης Δp . Στη συνέχεια, η πίεση επανέρχεται και ισούται ξανά με την ατμοσφαιρική p_0 . Οι παραπάνω μεταβολές παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 3.37.

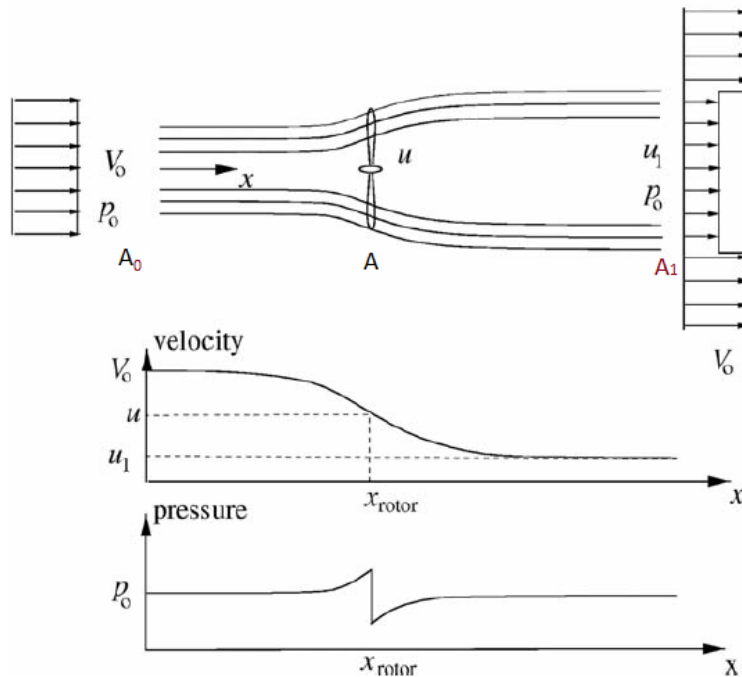
Η ροή θεωρείται σταθερή, ασυμπιεστή, μη συνεκτική και δεν ασκούνται σε αυτήν εξωτερικά φορτία. Επομένως, μπορεί να εφαρμοστεί η εξίσωση του Bernoulli για αυτήν, από την αρχική της κατάσταση μέχρι την είσοδο στη γεννήτρια και από την έξοδο της γεννήτριας

έως την τελική κατάσταση της ροής. Έτσι, ισχύουν οι Εξ. 3.30 και Εξ. 3.31 οι οποίες με τον συνδυασμό τους δίνουν την Εξ. 3.32.

$$p_0 + \frac{1}{2}\rho V_0^2 = p + \frac{1}{2}\rho u^2 \quad (3.30)$$

$$p_0 - \Delta p + \frac{1}{2}\rho u^2 = p_0 + \frac{1}{2}\rho u_1^2 \quad (3.31)$$

$$\Delta p = \frac{1}{2}\rho(V_0^2 - u_1^2) \quad (3.32)$$



Σχήμα 3.37: Η μεταβολή των χαρακτηριστικών του ανέμου λόγω της διέλευσης του από την ανεμογεννήτρια

Οι δύο εξωτερικές γραμμές ροής (πάνω και κάτω) του Σχήμα 3.37 μαζί με την διατομή εισόδου και εξόδου της ροής ορίζουν έναν όγκο ελέγχου, για τον οποίο εφαρμόζεται η αρχή διατήρησης της ορμής και παράλληλα ισχύει η αρχή διατήρησης της μάζας. Σύμφωνα με την πρώτη, εξισώνεται ο ρυθμός μεταβολής της ορμής μεταξύ της αρχικής και της τελικής κατάστασης με τη δύναμη λόγω της πτώσης πίεσης και εισάγοντας την Εξ. 3.32 προκύπτει η Εξ. 3.33. Ενώ, λόγω της δεύτερης ισχύει η Εξ. 3.34.

$$\begin{aligned} \rho A_0 V_0^2 - \rho A_1 u_1^2 &= \Delta p A \\ \Rightarrow \rho A_0 V_0^2 &= \rho A_1 u_1^2 + \frac{1}{2}\rho(V_0^2 - u_1^2) \end{aligned} \quad (3.33)$$

$$\rho A_0 V_0 = \rho A_1 u_1 = \rho A u \quad (3.34)$$

Διαιρώντας την Εξ. 3.33 με την Εξ. 3.34 και λύνοντας ως προς u λαμβάνεται η σχέση για την ταχύτητα στο επίπεδο της φτερωτής (Εξ. 3.35). Αυτή, είναι ο μέσος όρος της αρχικής και της τελικής ταχύτητας.

$$u = \frac{1}{2}(V_0 + u_1) \quad (3.35)$$

Η σταδιακή μείωση της ταχύτητας εκφράζεται μέσω ενός αξονικού επαγωγικού συντελεστή α με βάση τον οποίο δημιουργούνται οι Εξ. 3.36 και Εξ. 3.37.

$$u = (1 - \alpha)V_0 \quad (3.36)$$

$$u_1 = (1 - 2\alpha)V_0 \quad (3.37)$$

Η δύναμη που ασκείται στην φτερωτή της ανεμογεννήτριας λόγω της πτώσης πίεσης ονομάζεται ώση, T και είναι αυτή που προκαλεί την μείωση της ταχύτητας από V_0 σε u_1 (Εξ. 3.38). Το γινόμενο της ώσης, T , με την ταχύτητα στην διατομή της ανεμογεννήτριας, u , δίνει την ισχύ, P του άξονα της (Εξ. 3.39).

$$T = \Delta p A = \frac{1}{2} \rho A (V_0^2 - u_1^2) = \frac{1}{2} \rho A V_0^2 (4\alpha(1 - \alpha)) \quad (3.38)$$

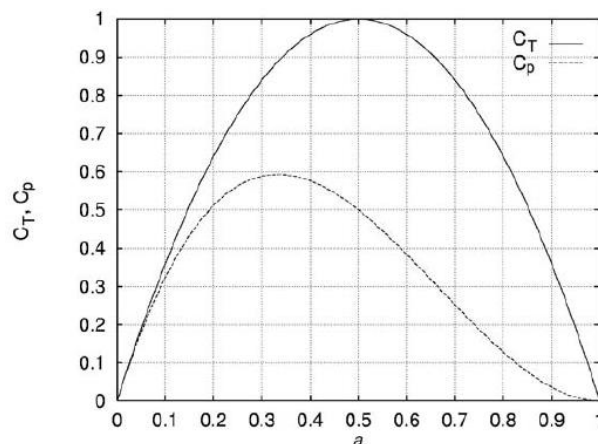
$$P = Tu = \frac{1}{2} \rho A V_0^2 (4\alpha(1 - \alpha))(1 - \alpha)V_0 = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (3.39)$$

Με σκοπό την απλοποίηση και την αδιαστατοποίηση των εξισώσεων ώσης και ισχύς ορίζονται οι συντελεστές ώσης και ισχύος αντίστοιχα (Εξ. 3.40 & Εξ. 3.41), οι καμπύλες των οποίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.38.

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A V_0^2} = 4\alpha(1 - \alpha) \quad (3.40)$$

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_0^3} = 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (3.41)$$

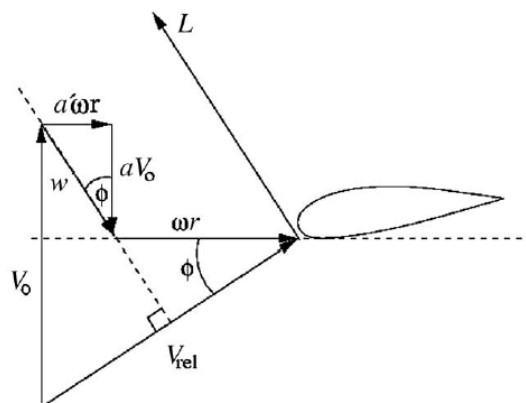
Με διαφοροποίηση του συντελεστή ισχύος αποδεικνύεται πως η βέλτιστη τιμή του, για την οποία η ανεμογεννήτρια παράγει την μέγιστη ισχύ, ισούται με $C_{p,max}=0.59$ για $\alpha=0.33$. Αυτό το θεωρητικό μέγιστο για μια ιδανική ανεμογεννήτρια καλείται το όριο του Betz.



Σχήμα 3.38: Καμπύλες συντελεστή ώσης και συντελεστή ισχύος

Η προηγούμενη ανάλυση έγινε με βάση την παραδοχή πως ο αέρας στον ομόρου της ανεμογεννήτριας δεν περιστρέφεται. Στην πραγματικότητα όμως, ο αέρας που διασχίζει την φτερωτή προκαλεί την περιστροφή της προς μια κατεύθυνση με γωνιακή ταχύτητα ω . Αυτό, όμως, λόγω του τρίτου νόμου του Νεύτωνα, οδηγεί στην εμφάνιση μιας επαγόμενης περιστροφικής ταχύτητας στον άνεμο προς την αντίθετη κατεύθυνση. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή λιγότερης ενέργειας σε σχέση με την ιδανική περίπτωση που περιγράφηκε προηγουμένως.

Η περιστροφή της φτερωτής διαφοροποιεί και το πεδίο των ταχυτήτων στις αεροτομές των λεπίδων, δημιουργώντας ένα τρίγωνο ταχυτήτων (Σχήμα 3.39). Η κάθετη συνιστώσα του τριγώνου είναι η ταχύτητα ροής του ανέμου V_0 , μειωμένη κατά τον αξονικό επαγωγικό συντελεστή α (Εξ. 3.32). Η οριζόντια συνιστώσα του τριγώνου είναι το άθροισμα της γραμμικής ταχύτητας της αεροτομής στην ακτίνα r , λόγω της περιστροφής των λεπίδων με γωνιακή ταχύτητα ω και της γραμμικής ταχύτητας, λόγω της επαγόμενης περιστροφής του αέρα προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η ταχύτητα αυτή εκφράζεται μέσω του περιστροφικού επαγωγικού συντελεστή, α' και ισούται με $(\alpha'+1)\omega r$. Η συνισταμένη ταχύτητα V_{rel} που προκύπτει, είναι η ταχύτητα με την οποία ο αέρας συναντά την ακμή πρόπτωσης της αεροτομής.



Σχήμα 3.39: Επαγόμενο τρίγωνο ταχυτήτων στις αεροτομές της ανεμογεννήτριας.

Σχετικά με την παραγόμενη ισχύ και τον συντελεστή της, αυτοί εκφράζονται μέσω των Εξ. 3.42 και Εξ. 3.43.

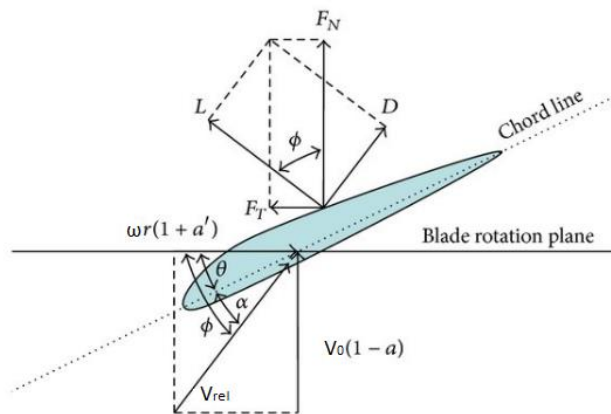
$$P = 4\pi\rho\omega^2V_0 \int_0^R \alpha'(1-\alpha)r^3 dr \quad (3.42)$$

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda \alpha'(1-\alpha)x^3 dx \quad (3.43)$$

Όπου: $\lambda = \omega R/V_0$ και $x = \omega r/V_0$

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του εδαφίου, η διερχόμενη γύρω από την αεροτομή ροή με ταχύτητα V_{rel} , συντελεί στην εμφάνιση των δυνάμεων της άνωσης, L που είναι κάθετη στη διεύθυνση της ροής και της αντίστασης, D που είναι παράλληλη στη διεύθυνση της ροής. Αυτές οι δυνάμεις μπορούν να αναλυθούν σε συνιστώσες στον οριζόντιο άξονα (του Σχήμα

3.40), που είναι παράλληλος του επιπέδου περιστροφής της ανεμογεννήτριας και στον κατακόρυφο άξονα (του Σχήμα 3.40), που είναι παράλληλος στον άξονα της ανεμογεννήτριας. Αθροίζοντας, για όλες τις αεροτομές της ανεμογεννήτριας, τις οριζόντιες συνιστώσες, προκύπτει η δύναμη F_T , που δημιουργεί την ροπή Q που περιστρέφει την φτερωτή. Από την άλλη, το άθροισμα των κατακόρυφων συνιστωσών, για όλες τις αεροτομές, δίνει την δύναμη F_N , που αντιστοιχεί στην ώση T , που ασκείται στην κορυφή της ανεμογεννήτριας. Αυτές οι δύο δυνάμεις, T και Q , είναι οι δύο σημαντικότερες δυνάμεις που επενεργούν στην κορυφή της ανεμογεννήτριας, και μαζί με την πίεση που ασκεί ο άνεμος στον πυλώνα και στον πύργο της ανεμογεννήτριας, είναι τα φορτία που θα μοντελοποιηθούν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.



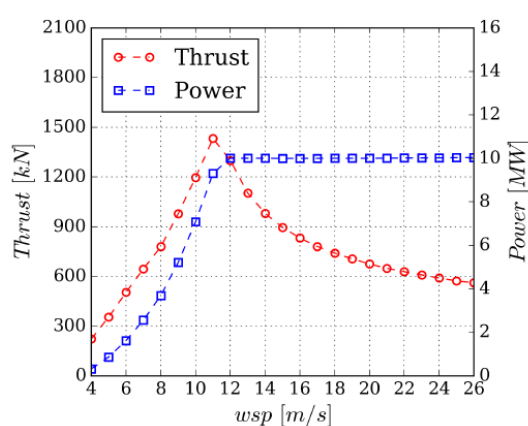
Σχήμα 3.40: Τρίγωνο ταχυτήτων και προκύπτουσες δυνάμεις στην αεροτομή

3.5.3.2 Μοντελοποίηση φορτίων ανέμου στην παρούσα εργασία

Η υπεράκτια ανεμογεννήτρια των 10 MW του Πολυτεχνείου της Δανίας, που μοντελοποιείται στην παρούσα εργασία, λειτουργεί μέσα σε συγκεκριμένα όρια της ταχύτητας του ανέμου. Το χαμηλότερο όριο, που είναι η ελάχιστη απαιτούμενη ταχύτητα του ανέμου ώστε να περιστρέφεται η φτερωτή, είναι τα 4 m/s. Ενώ, το υψηλότερο όριο της ταχύτητας του ανέμου, για το οποίο η ανεμογεννήτρια διακόπτει την λειτουργία της για λόγους ασφαλείας, είναι τα 26 m/s. Εντός αυτών των ορίων, εντοπίζεται και η ονομαστική ταχύτητα του ανέμου, με την οποία παράγεται και η μέγιστη ενέργεια ίση με 10 MW, είναι τα 11.4 m/s [37]. Για τη συγκεκριμένη εργασία, όμως, δεν χρειάζεται ο υπολογισμός των φορτίων του ανέμου για όλο το εύρος των ταχυτήτων του από 4 m/s έως 26 m/s. Αντίθετα, αναζητούνται οι δυνάμεις που ασκεί ο άνεμος στην ανεμογεννήτρια για έξι συγκεκριμένες τιμές της ταχύτητας του, ώστε να μελετηθεί η απόκριση της κατασκευής σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, όσον αφορά τον άνεμο. Οι ταχύτητες αυτές είναι οι εξής: 7 m/s, 8.5 m/s, 10 m/s, 13.5 m/s, 20 m/s και η ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας του ανέμου 11.4 m/s. Σημειώνεται πως η ροή και η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, αμελώντας τα μεταβαλλόμενα και μη γραμμικά φορτία του ανέμου που συναντώνται στην πραγματικότητα. Επομένως, τα φορτία λόγω του ανέμου είναι στατικά, και όχι δυναμικά αφού δεν μεταβάλλονται με τον χρόνο.

- Ώση, T

Ο γράφων διαθέτει την δημοσίευση των Wang και Larsen, του Πολυτεχνείου της Δανίας, με τίτλο “Ultimate load analysis of a 10 MW offshore monopole wind turbine incorporating fully nonlinear irregular wave kinematics” [37]. Όπως και στην παρούσα μελέτη, έτσι και σε αυτή των Wang και Larsen, χρησιμοποιείται η ανεμογεννήτρια αναφοράς του DTU. Μάλιστα, δίνεται το διάγραμμα της ώσης που ασκείται στην φτερωτή και της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει η ανεμογεννήτρια, συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου (Σχήμα 3.41). Από αυτό, αντλούνται οι τιμές της ώσης, T για τις ταχύτητες ανέμου που ενδιαφέρουν και παρατίθενται στον Πίνακα 3.13.



Σχήμα 3.41: Καμπύλες ώσης και ηλεκτρικής ισχύος της ανεμογεννήτριας αναφοράς του Πολυτεχνείου της Δανίας [37]

Πίνακας 3.13: Οι τιμές της δύναμης ώσης, T για τις ταχύτητες ανέμου ενδιαφέροντος

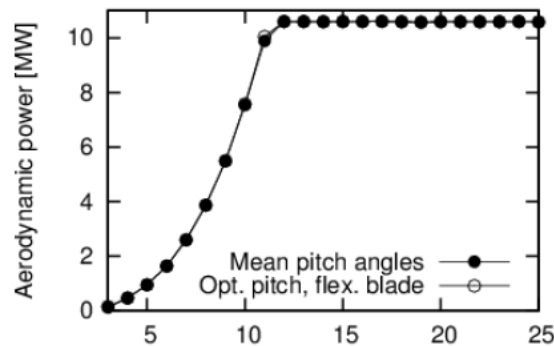
Ταχύτητα ανέμου, V_w (m/s)	Ώση, T (kN)
7	644.46
8.5	884.6
10	1,195.8
11.4	1,379
13.5	1,036.5
20	674.41

Η εισαγωγή της κάθε τιμής της ώσης, στο αριθμητικό μοντέλο, γίνεται μέσω του Load Module (Create Load > Concentrated Force). Το σημείο στο οποίο επιλέγεται να ασκείται η εκάστοτε ώση είναι το σημείο αναφοράς RP1, πάνω από την κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας, το οποίο, όπως συζητήθηκε στο υποκεφάλαιο 3.2.4, αναπαριστά την άτρακτο και την φτερωτή, αφού η μάζα τους έχει προσαρτηθεί εξ ολοκλήρου σε αυτό. Άλλωστε, το σημείο RP1 συνδέεται με την υψηλότερη τομή της ανεμογεννήτριας, μέσω ενός Rigid Body Constraint. Η κατεύθυνση της δύναμης ώσης στο λογισμικό είναι παράλληλη και αντίθετη της κατεύθυνσης του οριζώντιου άξονα x, δηλαδή του άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδο περιστροφής της φτερωτής.

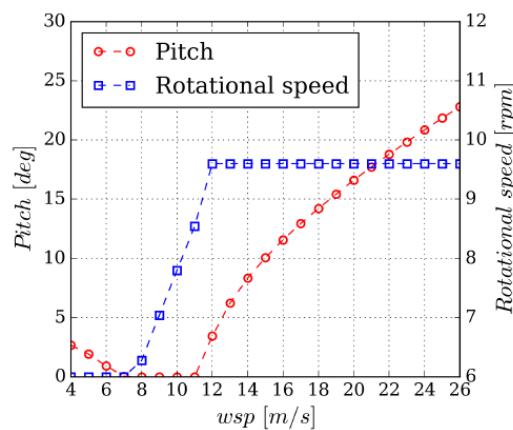
- Ροπή, Q

Ο γράφων διαθέτει επίσης τη δημοσίευση των Back και Bitsche, με τίτλο “Light Rotor: The 10-MW reference wind turbine” [38], η οποία επίσης αναφέρεται στην ανεμογεννήτρια αναφοράς του DTU. Σε αυτήν εντοπίζεται η καμπύλη μηχανικής ισχύος της ανεμογεννήτριας (Σχήμα 3.42). Επιπλέον, από την δημοσίευση των Wang και Larsen [37], λαμβάνεται και το διάγραμμα της γωνίας κλίσης ή προνευτασμού των πτερυγίων (pitch angle) και της ταχύτητας περιστροφής της φτερωτής σε rpm (Σχήμα 3.43). Αυτά χρησιμεύουν στον υπολογισμό της ροπής που ασκείται στην φτερωτή και οδηγεί στην περιστροφή της, αφού ισχύει η Εξ. 3.44. Οι τιμές που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 3.14.

$$Torque, Q \text{ (kNm)} = \frac{\text{Mechanical Power (kW)}}{\text{Rotational Speed (rpm)}} * \frac{30}{\pi} \quad (3.44)$$



Σχήμα 3.42: Καμπύλη μηχανικής ισχύος της ανεμογεννήτριας αναφοράς του Πολυτεχνείου της Δανίας [38]



Σχήμα 3.43: Καμπύλες ταχύτητας περιστροφής και γωνίας κλίσης των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας αναφοράς του Πολυτεχνείου της Δανίας [37]

Πίνακας 3.14: Τιμές ισχύος, στροφών και ροπής για τις ταχύτητες ανέμου ενδιαφέροντος

Ταχύτητα ανέμου, V_w (m/s)	Μηχανική Ισχύς, P (kW)	Στροφές, N (rpm)	Ροπή, Q (kNm)
7	2,585	6	4,113.99
8.5	4,659	6.7	6,670.33
10	7,568	7.8	9,265.76
11.4	10,188	9	10,809.80
13.5	10,586	9.6	10,530.09
20	10,586	9.6	10,530.09

Όπως και για την ώση, έτσι και για την ροπή, οι τιμές της εισάγονται στο βασικό μοντέλο σύγκρουσης μέσω του Load Module (Create Load > Moment) και εφαρμόζεται στο ίδιο σημείο αναφοράς RP1. Το διάνυσμα της έχει κατεύθυνση ομόρροπη με τον οριζόντιο άξονα x, κάτι που σημαίνει πως η ανεμογεννήτρια περιστρέφεται στο επίπεδο yz με αντιωρολογιακή φορά.

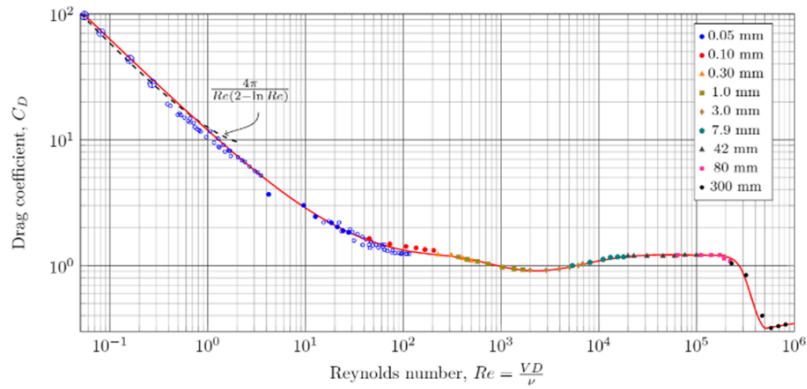
- Πίεση στον πύργο και στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας, P

Ο τελευταίος τύπος φορτίου που ασκεί ο άνεμος στην εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας είναι η πίεση που ασκεί στην κατασκευή που στηρίζει την άτρακτό και την φτερωτή, δηλαδή στον πύργο και δευτερευόντως στο τμήμα του πυλώνα που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ο υπολογισμός αυτής της πίεσης απαιτεί την κάθετη δύναμη που δρα σε αυτές τις επιφάνειες λόγω του ανέμου. Ουσιαστικά, η δύναμη που αναζητείται είναι η δύναμη αντίστασης (Drag Force) που ασκεί ένα ρευστό σε ένα κινούμενο σώμα μέσα σε αυτό, μόνο που σε αυτή την περίπτωση το ρευστό είναι σε κίνηση και το σώμα βρίσκεται ακίνητο μέσα σε αυτό. Για τον υπολογισμό της εφαρμόζεται η Εξ. 3.45.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V_w^2 A C_D \quad (3.45)$$

Όπου: F_D η δύναμη αντίστασης, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ η πυκνότητα του αέρα στους $15 \text{ }^\circ\text{C}$, V_w η ταχύτητα του αέρα, A η επιφάνεια του σώματος κάθετη στην κατεύθυνση της ροής και C_D ο συντελεστής αντίστασης του σώματος.

Ο συντελεστής αντίστασης C_D εκτιμάται μέσω του διαγράμματος του Σχήμα 3.44, όπου παρουσιάζεται η καμπύλη μεταβολής του συντελεστή αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Reynolds για λεπτούς και λείους κυλίνδρους. Η καμπύλη έχει προκύψει από πειραματικά δεδομένα και αντλείται από το βιβλίο του John Anderson “Fundamentals of Aerodynamics” [39]. Ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται από την Εξ. 3.46.



Σχήμα 3.44: Μεταβολή του συντελεστή αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Reynolds για λεπτούς και λείους κυλίνδρους [39]

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (3.46)$$

Όπου: V η ταχύτητα του ρευστού, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση $V = V_w$, D η χαρακτηριστική διάσταση του σώματος, όπου εδώ είναι η διάμετρος του κυλίνδρου και $\nu = 0.000014776 \text{ m}^2/\text{s}$ η κινηματική συχνότητα του αέρα στους $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται για δύο ξεχωριστά τμήματα της κατασκευής. Το πρώτο είναι το τμήμα του πυλώνα που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Έχει διάμετρο $D_1 = 7.839 \text{ m}$ και η μετωπική επιφάνεια που «βλέπει» η ροή του ανέμου ισούται με $A_1 = 156.78 \text{ m}^2$. Το δεύτερο τμήμα είναι ο πύργος της ανεμογεννήτριας. Επειδή έχει κωνικό σχήμα ως χαρακτηριστική διάσταση επιλέγεται η μέση διάμετρος του $D_2 = 6.743 \text{ m}$ και η μετωπική επιφάνεια αναφοράς είναι ίση με $A_2 = 644.83 \text{ m}^2$. Με βάση όλα τα παραπάνω, οι υπολογισμοί καταλήγουν στους

Πίνακας 3.15 και Πίνακας 3.16.

Η εισαγωγή και αυτού του φορτίου στο λογισμικό γίνεται μέσω του Load Module (Create Load > Pressure) και επιλέγεται η ομοιόμορφη κατανομή του (Distribution: Uniform) στην εκάστοτε κατάλληλη επιφάνεια.

Πίνακας 3.15: Αποτελέσματα υπολογισμών για την πίεση ανέμου στην επιφάνεια του πυλώνα

Επιφάνεια Πυλώνα, $A_1 = 156.78 \text{ m}^2$

Ταχύτητα ανέμου, $V_w \text{ (m/s)}$	Αριθμός Reynolds, $Re \text{ (-)}$	Συντελεστής Αντίστασης $C_D \text{ (-)}$	Δύναμη Αντίστασης, $F_D \text{ (N)}$	Ασκούμενη Πίεση, $P = F_D/A \text{ (MPa)}$
7	3,713,657	0.404	1,901	$1.213 \cdot 10^{-5}$
8.5	4,509,440	0.412	2,859	$1.823 \cdot 10^{-5}$
10	5,305,224	0.419	4,024	$2.566 \cdot 10^{-5}$
11.4	6,047,956	0.425	5,304	$3.383 \cdot 10^{-5}$
13.5	7,162,053	0.432	7,560	$4.822 \cdot 10^{-5}$

20	10,610,449	0.449	17,247	0.00011
----	------------	-------	--------	---------

Πίνακας 3.16: Αποτελέσματα υπολογισμών για την πίεση ανέμου στην επιφάνεια του πύργου

Επιφάνεια Πύργου, $A_2 = 644.83 \text{ m}^2$

Ταχύτητα ανέμου, $V_w \text{ (m/s)}$	Αριθμός Reynolds, $Re \text{ (-)}$	Συντελεστής Αντίστασης $C_D \text{ (-)}$	Δύναμη Αντίστασης, $F_D \text{ (N)}$	Ασκούμενη Πίεση, $P = F_D/A \text{ (MPa)}$
7	3,194,436	0.397	7,683	$1.191 \cdot 10^{-5}$
8.5	3,878,959	0.406	11,586	$1.797 \cdot 10^{-5}$
10	4,563,481	0.413	16,312	$2.530 \cdot 10^{-5}$
11.4	5,202,368	0.418	21,455	$3.327 \cdot 10^{-5}$
13.5	6,160,699	0.426	30,664	$4.755 \cdot 10^{-5}$
20	9,126,962	0.443	69,987	0.00011

Σχόλια επί των φορτίων του ανέμου

- Πέρα από τα παραπάνω φορτία που αναλύθηκαν και μοντελοποιήθηκαν οι λεπίδες της ανεμογεννήτριας δέχονται επιπλέον αδρανειακές δυνάμεις, οι οποίες είτε οφείλονται στην επιτάχυνση/επιβράδυνση τους, είτε είναι φυγόκεντρες δυνάμεις λόγω της συνεχόμενης περιστροφής τους. Οι μεν πρώτες δεν χρειάζεται να μοντελοποιηθούν στην παρούσα εργασία, αφού εξαρχής η ταχύτητα του ανέμου έχει θεωρηθεί σταθερή, με αποτέλεσμα να μην προκαλείται κάποια αλλαγή της κινητικής κατάστασης της φτερωτής. Οι δε φυγόκεντρες δυνάμεις, είναι αμελητέου μεγέθους μπροστά στα υπόλοιπα φορτία για μεγάλες ανεμογεννήτριες. Εξάλλου, επιβαρύνουν κυρίως την ρίζα των λεπίδων στον κεντρικό κόμβο όπου ενώνονται παρά όλη την κατασκευή της ανεμογεννήτριας, ώστε να αξίζει να μοντελοποιηθούν.
- Οι λεπίδες της ανεμογεννήτριας διαθέτουν έναν ειδικό μηχανισμό που τους επιτρέπει να αλλάζουν την γωνία κλίσης (pitch angle, Σχήμα 3.43) τους και επομένως τη γωνία πρόσπτωσης της ροής του ανέμου. Με αυτόν τον τρόπο, οι δυνάμεις που ασκούνται στις αεροτομές μεταβάλλονται. Για μεγάλες γωνίες κλίσης η δύναμη ώσης που ασκείται στην φτερωτή μειώνεται (Σχήμα 3.41), καθώς μειώνεται η μετωπική επιφάνεια των λεπίδων ως προς τον άνεμο, προκαλώντας πτώση στην αντίσταση που δημιουργείται στις αεροτομές τους. Ο σκοπός του συγκεκριμένου μηχανισμού είναι επίτευξη κατάλληλης ρύθμισης της παραγόμενης ισχύος για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου.
- Λόγω της συνεκτικότητας της ροής του ανέμου στο πίσω μέρος του εκτεθειμένου τμήματος του πυλώνα και του πύργου η ροή γίνεται τυρβώδης, με αποτέλεσμα να

ασκούνται επιπλέον δυνάμεις στην κατασκευή. Τα φορτία αυτά όμως είναι πολύ μικρότερης τάξης μεγέθους από αυτά που μοντελοποιήθηκαν και γι αυτόν τον λόγο δεν λαμβάνονται υπόψιν.

3.5.4 Δυνάμεις κρούσης - Μοντελοποίηση επαφής

Τα σημαντικότερα φορτία που λαμβάνουν μέρος στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι εκείνα που προέρχονται από τη πλευρική σύγκρουση του μοντέλου του πλοίου με το μοντέλο της ανεμογεννήτριας. Όμως, μια βασική διαφορά με τα αεροδυναμικά φορτία, είναι το γεγονός πως τα κρουστικά δεν εισάγονται μέσω του Load Module καθώς δεν είναι γνωστά εξαρχής. Αντίθετα, λαμβάνονται σαν έξοδοι στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Για να γίνει όμως αυτό, πρέπει στο Interaction Module του Abaqus, να οριστούν οι ιδιότητες της επαφής (Contact) των δύο μοντέλων κάθετα και παράλληλα στη διεύθυνση της σύγκρουσης.

Τα είδη επαφής που διαθέτει το λογισμικό είναι τρία: η γενική επαφή (General Contact), η επαφή μεταξύ συγκεκριμένων επιφανειών (Surface to Surface Contact) και η επαφή μιας επιφάνειας με τον εαυτό της (Self-Contact). Στο βασικό μοντέλο της εργασίας επιλέγεται η γενική επαφή (Create Interaction > General Contact), αναγνωρίζοντας την επαφή μεταξύ όλων των επιφανειών του μοντέλου (Included Surface Pairs: All*with self). Έπειτα, ορίζονται οι ιδιότητες της επαφής (Create Interaction Property > Contact). Κάθετα στη διεύθυνση της σύγκρουσης (Tangential Behavior) ρυθμίζεται η τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των επιφανειών (Friction formulation: Penalty) θέτοντας τον συντελεστή τριβής ίσο με 0.3. Τέλος, στη διεύθυνση παράλληλα της διεύθυνσης της κρούσης (Normal Behavior) επιλέγεται το “Hard Contact”, σύμφωνα με το οποίο οι πιέσεις λόγω της επαφής είναι μηδενικές όταν οι επιφάνειες δεν βρίσκονται σε επαφή. Όταν όμως επέρχεται η σύγκρουση οι πιέσεις καθορίζονται από τον περιορισμό ότι η μία επιφάνεια δεν μπορεί να εισχωρήσει εντός της άλλης. Επίσης, ενεργοποιείται η επιλογή να επιτρέπεται τα σώματα να χωρίζουν μετά την επαφή και να μην δημιουργείται συσσωμάτωμα. Σημειώνεται, πως στο παρόν μοντέλο σύγκρουσης, δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα διείσδυσης των επιφανειών μεταξύ τους, αφού οι επιφάνειες ήταν λείες και χωρίς έντονες γωνίες.

3.6 Μοντελοποίηση Οριακών Συνθηκών

Οι οριακές συνθήκες εκπληρώνουν συνήθως δύο βασικούς σκοπούς στην αριθμητική ανάλυση. Είτε αναπαριστούν την αλληλεπίδραση του μοντέλου με στοιχεία του περιβάλλοντος του που δεν έχουν μοντελοποιηθεί, είτε προκαλούν ένα είδος φόρτισης σε αυτό μέσω μετατοπίσεων ή γωνιών στροφής. Επομένως, η απόκριση των κατασκευών στα φορτία που τους ασκούνται εξαρτάται και από τις οριακές συνθήκες που έχουν τεθεί σε αυτές. Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο θα περιγραφούν οι οριακές συνθήκες που έχουν εφαρμοστεί στο βασικό μοντέλο της εργασίας.

3.6.1 Οριακή συνθήκη στο πλοίο

Όπως σχολιάστηκε και στο εδάφιο 3.2.4, ο γράφων περιόρισε τις περιστροφικές κινήσεις του πλοίου και ως προς τους τρεις άξονες, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο περιορισμός αυτός γίνεται μέσω του Load Module (Create Boundary Condition > Type: Displacement/Rotation), θέτοντας μηδενικές τις περιστροφές UR1, UR2 και UR3. Το σημείο όπου εφαρμόστηκε η συγκεκριμένη οριακή συνθήκη είναι το σημείο αναφοράς RP2, του οποίου η κίνηση, επειδή συνδέεται με το μοντέλο του πλοίου μέσω ενός Rigid Body Constraint, καθορίζει και την κίνηση όλου του πλοίου, χωρίς να δημιουργούνται παραμορφώσεις. Ο περιορισμός της περιστροφής του πλοίου γύρω από κάθε άξονα εφαρμόστηκε, καθώς η μελέτη του τι θα συμβεί έπειτα από μια πιθανή περιστροφή του πλοίου δεν ήταν το ζητούμενο στην παρούσα φάση, ειδικά από τη στιγμή που το πλοίο είχε θεωρηθεί άκαμπτο και είχε μοντελοποιηθεί μόνο ένα περιορισμένο τμήμα του. Άλλωστε, οι ροπές αδράνειας του πλοίου ως προς τους άξονες δεν ήταν γνωστές.

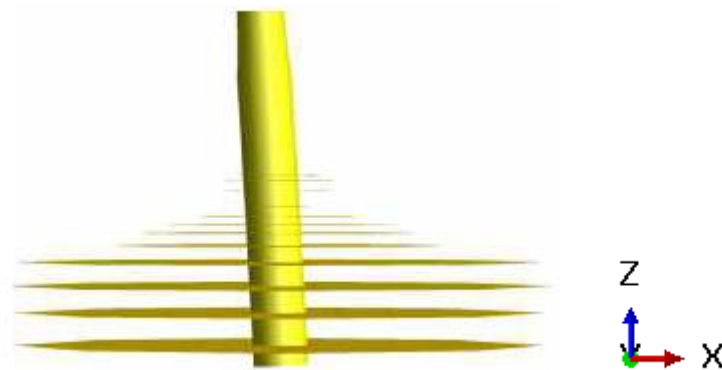
3.6.2 Οριακή συνθήκη στη βάση του πυλώνα

Μεγάλο τμήμα του πυλώνα, που στηρίζει τον πύργο της ανεμογεννήτριας, βρίσκεται εντός του πυθμένα της θάλασσας. Αυτό το κομμάτι εκτείνεται από τα -40 m έως τα -75 m και αποτελεί τα θεμέλια της εγκατάστασης. Περιβάλλεται από τα στρώματα του πυθμένα και η αλληλεπίδραση του με αυτά καθορίζει την στήριξη που παρέχεται από το υπέδαφος, σε συνθήκες μεταβολής της κινητικής του κατάστασης. Λεπτομέρειες, όμως, για την αναπαράσταση αυτής της αλληλεπίδρασης, ακολουθούν στο επόμενο εδάφιο. Στο παρόν εδάφιο, περιγράφεται η οριακή συνθήκη που έχει τεθεί στη χαμηλότερη διατομή του πυλώνα, δηλαδή στην βάση του. Η συνθήκη αυτή είναι διαφορετική από τον τρόπο με τον οποίο έχει μοντελοποιηθεί η σχέση υπεδάφους-πυλώνα και γι' αυτόν τον λόγο μελετάται ξεχωριστά.

Η βασική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι, ενώ η αλληλεπίδραση υπεδάφους-πυλώνα αφορά την κίνηση του δεύτερου στο οριζόντιο επίπεδο xy , η οριακή συνθήκη στη βάση του πυλώνα αφορά την κίνηση του στον κατακόρυφο άξονα z . Συγκεκριμένα, σε πρώτη φάση, περιορίζεται η περιστροφή της βάσης γύρω από τον κατακόρυφο άξονα, θέτοντας ίση με μηδενική την στροφή UR3 (Create Boundary Condition > Type: Displacement/Rotation). Αυτό, ισχύει για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Με αυτόν τον τρόπο, η βάση δεν περιστρέφεται ανεξάρτητα από τα ασκούμενα φορτία, κάτι το οποίο συμβαίνει και στην

πραγματικότητα λόγω των συνεκτικών δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ βάσης και υπεδάφους λόγω του τεράστιου βάρους της κατασκευής.

Έπειτα, τίθεται ίση με μηδέν η κατακόρυφη μετατόπιση της βάσης ($U_3=0$). Όμως, η συγκεκριμένη συνθήκη δεν ισχύει για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, αλλά για το χρονικό διάστημα μέχρι να επέλθει η σύγκρουση του πλοίου με την ανεμογεννήτρια. Άλλωστε, στην πραγματικότητα, οι μεγάλες δυνάμεις που ασκούνται στον πυλώνα λόγω της κρούσης, προκαλούν την μετατόπιση του πυθμένα αλλά και μια μικρή περιστροφή της βάσης του πυλώνα γύρω από τον οριζόντιο άξονα, γ , που είναι κάθετος στη διεύθυνση της σύγκρουσης (Σχήμα 3.45). Η συμπεριφορά αυτή έχει παρατηρηθεί και από άλλους μελετητές [22]. Επομένως, για να επιτρέπεται αυτή η περιστροφή, η οριακή συνθήκη $U_3=0$ απενεργοποιείται από τη στιγμή της κρούσης και έπειτα. Πριν την κρούση, όμως, εφαρμόζεται γιατί πρέπει να αντισταθμιστεί η δύναμη της βαρύτητας που προκαλεί την κατακόρυφη μετατόπιση όλη της κατασκευής προς τα κάτω, μια συμπεριφορά που δεν συναντάται φυσικά στην πραγματικότητα. Έτσι, θέτοντας $U_3=0$ η κατακόρυφη μετατόπιση δεσμεύεται. Ο τρόπος με τον οποίο η βαρύτητα αντισταθμίζεται από τη στιγμή που δεν ισχύει το $U_3=0$ σχολιάζεται στο τέλος του υποκεφαλαίου.



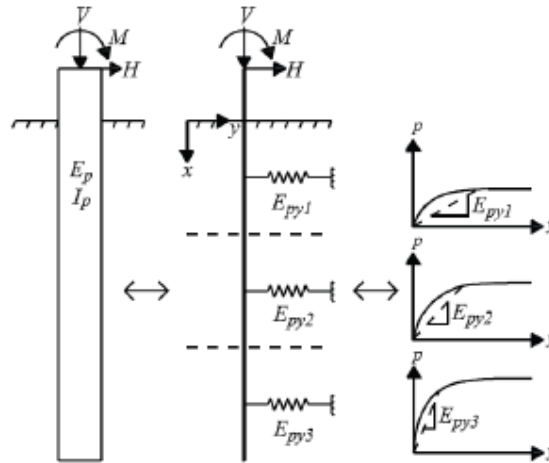
Σχήμα 3.45: Περιστροφή της βάσης του πυλώνα γύρω από τον οριζόντιο άξονα γ [22]

3.6.3 Μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ πυλώνα και υπεδάφους

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, μεγάλο τμήμα ύψους 35 m, του πυλώνα στήριξης βρίσκεται εντός του πυθμένα της θάλασσας. Επομένως, η κατάσταση και οι ιδιότητες του υπεδάφους επηρεάζουν την συμπεριφορά της κατασκευής. Συνήθως, το υπεδάφος είναι χωρισμένο καθ' ύψος σε στρώματα διαφορετικών συστατικών και χαρακτηριστικών που στηρίζουν τον πυλώνα και αντιστέκονται στις μετατοπίσεις του. Οπότε, στην ουσία, αναζητείται το πως αυτά τα στρώματα αντιδρούν στην εγκάρσια φόρτιση που δέχονται από την εγκάρσια μετατόπιση του πυλώνα λόγω της κρούσης του πλοίου.

Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος API (American Petroleum Institute) [40]. Σύμφωνα με αυτήν, τα στρώματα του υπεδάφους υπό εγκάρσια φόρτιση, δρουν ελαστοπλαστικά γεγονός που καθιστά απαραίτητη την συσχέτιση της παραμόρφωσης του εδάφους με την αντίστασή του. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των καμπυλών αντίστασης – μετατόπισης του εδάφους ($P - \gamma$), οι οποίες κατασκευάζονται με βάση τις φυσικές ιδιότητες

του κάθε διαφορετικού τύπου υπεδάφους. Κάθε καμπύλη $P - \gamma$ αποτελεί την χαρακτηριστική καμπύλη φανταστικών μη γραμμικών ελατηρίων στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις, που θεωρείται ότι συνδέουν την κάθε διαφορετική ζώνη του υπεδάφους με το αντίστοιχο τμήμα του πυλώνα (Σχήμα 3.46).



Σχήμα 3.46: Ελατήρια και καμπύλες $P - \gamma$

Στην παρούσα εργασία, το υπεδάφος, που περικλείει τον βυθισμένο σε αυτο πυλώνα ύψους 35 m, χωρίζεται σε 7 ζώνες ύψους 5 m η καθεμία. Ο τύπος του εδάφους στην κάθε ζώνη και οι ιδιότητες του φαίνονται στον Πίνακας 3.17. S_u είναι η μέγιστη τιμή της διατμητικής αντοχής του χώματος, γ είναι το ειδικό βάρος του υπεδάφους και ϵ_{50} η παραμόρφωση που προκύπτει στα μισά της μέγιστης τάσης σε εργαστηριακό τεστ θλίψης δειγμάτων χώματος. Σημειώνεται, πως οι τιμές των ιδιοτήτων ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, εξυπηρετούν τον σκοπό της μελέτης και έχουν ληφθεί από την εργασία του A.M. Broersen [22]. Ωστόσο, δεν είναι βέβαιο ότι η συγκεκριμένη δομή και διάταξη του πυθμένα συναντάται με ακρίβεια, σε κάποια περιοχή του κόσμου όπου εγκαθίστανται υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.

Πίνακας 3.17: Φυσικές ιδιότητες των ζωνών του υπεδάφους

Όρια Ζώνης (m) μετρημένα από το ύψος του πυθμένα	Τύπος Υπεδάφους	S_u [Pa]	γ [N/m ³]	ϵ_{50}
0 – 5	Χώμα	160,200	7,600	0.007
5 – 10	Χώμα	200,400	8,450	0.007
10 – 15	Άμμος	-	9,800	-
15 – 20	Άμμος	-	9,800	-
20 – 25	Άμμος	-	9,800	-
25 – 30	Χώμα	201,204	7,400	0.01
30 - 35	Χώμα	240,528	7,400	0.01

Για τον προσδιορισμό των καμπυλών P – γ των ζωνών χώματος ακολουθείται η διαδικασία που προτείνεται από το API [40] και εφαρμόζεται μέσω των Εξ. 3.47– Εξ. 3.50).

$$p_u = \begin{cases} \left(3 + \frac{\gamma}{S_u} X + J \frac{X}{D}\right) S_u D, & \text{για } X < X_R \\ 9 S_u D, & \text{για } X \geq X_R \end{cases} \quad (3.47)$$

$$P = \begin{cases} 0.5 p_u \left(\frac{y}{y_{50}}\right)^{\frac{1}{3}}, & \text{για } 0 \leq y \leq 8 y_{50} \\ p_u, & \text{για } y > 8 y_{50} \end{cases} \quad (3.48)$$

Όπου:

p_u , η μέγιστη αντοχή της ζώνης σε N/m,

$D = 10$ m η διάμετρος του πυλώνα,

J , αδιάστατη πειραματική σταθερά του χώματος μεταξύ 0.25 και 0.5, εδώ επιλέγεται $J=0.35$

X , το βάθος αναφοράς κάτω από τον πυθμένα, όπου εδώ επιλέγεται να είναι στο μέσο ύψος της κάθε ζώνης

$$X_R = \frac{6D}{\frac{\gamma D}{S_u} + J} \quad (3.49)$$

, το βάθος κάτω από τον πυθμένα της ζώνης μειωμένης αντίσταση.

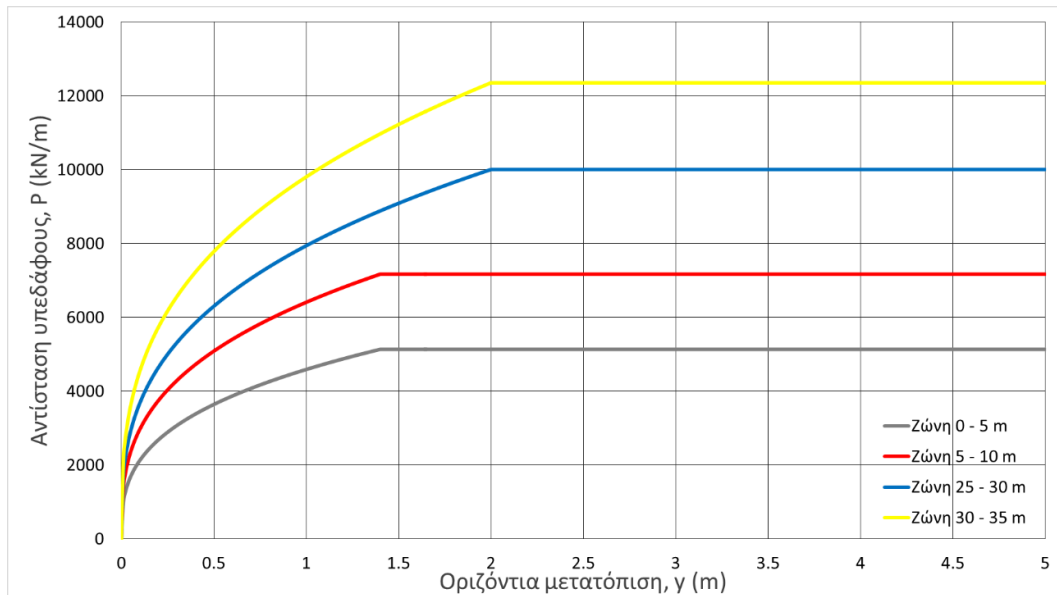
και

$$y_{50} = 2.5 \varepsilon_{50} D \quad (3.50)$$

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει για τις ζώνες χώματος ο Πίνακας 3.18 και το Σχήμα 3.47 που περιλαμβάνει τις αντίστοιχες καμπύλες αντίστασης μετατόπισης.

Πίνακας 3.18: Αποτελέσματα υπολογισμών για τον προσδιορισμό των καμπυλών P – γ των ζωνών χώματος

Όρια Ζώνης (m)	Βάθος αναφοράς, X (m)	X_R (m)	y_{50} [m]	P_u [N/m]
0 – 5	2.50	72.78	0.175	5,136,175
5 – 10	7.50	77.75	0.175	7,171,800
25 – 30	27.50	83.59	0.25	10,007,709
30 - 35	32.50	91.23	0.25	12,356,846



Σχήμα 3.47: Καμπύλες P – γ ζωνών χώματος

Για τον προσδιορισμό των καμπυλών P – γ των ζωνών άμμου ακολουθείται επίσης η διαδικασία που προτείνεται από το API [40] και εφαρμόζεται μέσω των Εξ. 3.51– Εξ. 3.55.

$$p_{us} = (C_1H + C_2D)\gamma H, \quad \text{για χαμηλά βάθη} \quad (3.51)$$

$$p_{ud} = C_3D\gamma H, \quad \text{για μεγάλα βάθη} \quad (3.52)$$

$$p_u = \min(p_{us}, p_{ud}) \quad (3.53)$$

$$P = Ap_u \tanh\left(\frac{kH}{Ap_u} \gamma\right) \quad (3.54)$$

Όπου:

P_u , η μέγιστη αντοχή της ζώνης σε (κΝ/μ)

ϕ , η γωνία εσωτερικής τριβής της άμμου που επιλέγεται ίση με 30° και για τις τρεις ζώνες άμμου

H , το βάθος αναφοράς σε m κάτω από τον πυθμένα, όπου και εδώ επιλέγεται να είναι στο μέσο ύψος της κάθε ζώνης

k , αρχικός συντελεστής της αντίδρασης υποβάθρου. Υπολογίζεται από το Σχήμα 3.48 και είναι ίσος με $9,266.2 \text{ kN/m}^3$

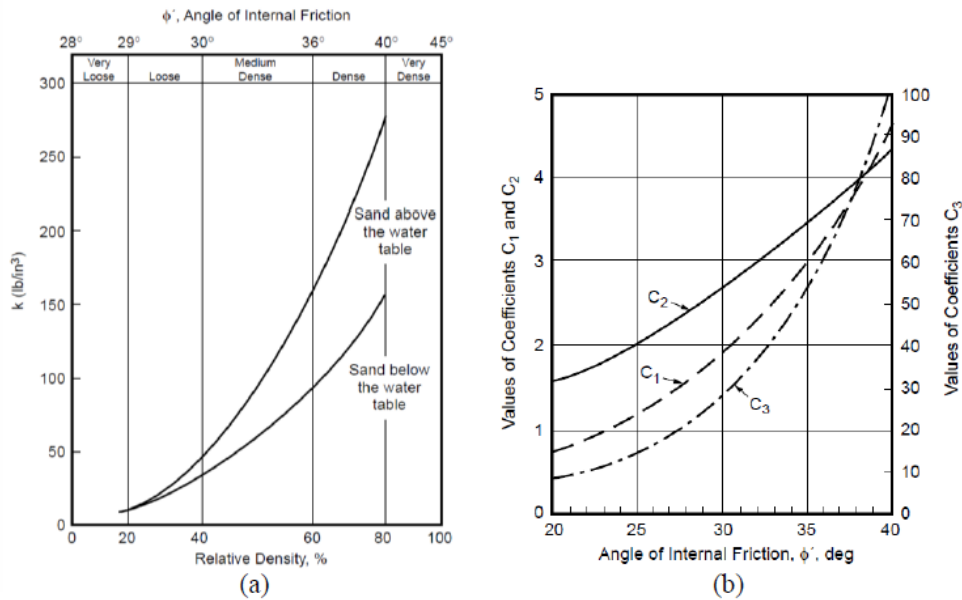
C_1, C_2, C_3 , συντελεστές συναρτήσεων της γωνίας ϕ . Βρίσκονται από το Σχήμα 3.48 και ισούνται με $C_1 = 1.903, C_2 = 2.699, C_3 = 28.132$

και A , παράγοντας που λαμβάνει υπόψιν την κατάσταση κυκλικής ή στατικής φόρτισης και ισούται με:

$$A = 0.9, \text{ για κυκλική φόρτιση}$$

(3.55)

$$A = \left(0.3 - 0.8 \frac{H}{D} \right) \geq 0.9, \text{ για στατική φόρτιση}$$

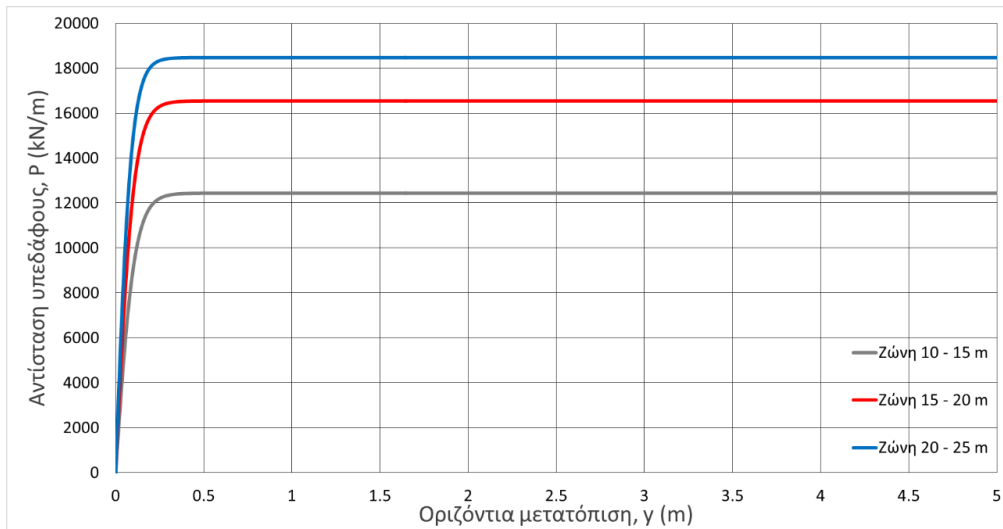


Σχήμα 3.48: Διαγράμματα συναρτήσεως της γωνίας τριβής ϕ (a) του συντελεστή αντίδρασης υποβάθρου k (b) των συντελεστών C_1, C_2, C_3

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει για τις ζώνες άμμου ο Πίνακας 3.19 και το Σχήμα 3.49 που περιλαμβάνει τις αντίστοιχες καμπύλες αντίστασης μετατόπισης.

Πίνακας 3.19: Αποτελέσματα υπολογισμών για τον προσδιορισμό των καμπυλών $P - \gamma$ των ζωνών άμμου

Όρια Ζώνης (m)	Βάθος αναφοράς, H (m)	A	ρ_{us} [kN/m]	ρ_{ud} [kN/m]	P_u [kN/m]
10 - 15	12.50	2	6,220	34,462	6,220
15 - 20	17.50	1.6	10,340	48,246	10,340
20 - 25	22.50	1.2	15,393	62,031	15,393



Σχήμα 3.49: Καμπύλες P – γ ζωνών άμμου

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες P – γ των ελατηρίων από τα Σχήμα 3.47 και Σχήμα 3.49 εισάγονται στο βασικό μοντέλο σύγκρουσης. Το Abaqus όμως προσφέρει τη δυνατότητα μοντελοποίησης μόνο γραμμικών ελατηρίων, ορίζοντας τη σταθερά δυσκαμψίας τους, η οποία δεν είναι σταθερή στην περίπτωση των μη γραμμικών ελατηρίων. Επομένως, για την αναπαράσταση τους εφαρμόζεται μια εναλλακτική διαδικασία. Αρχικά, το τμήμα του μοντέλου της ανεμογεννήτριας, που θεωρείται ότι βρίσκεται εντός του πυθμένα, χωρίζεται (Assembly Module > Create Partition) σε 7 επιμέρους κομμάτια (με ύψος 5 m) που αντιστοιχούν στις 7 ζώνες του υπεδάφους. Επίσης, ορίζονται 7 σημεία αναφοράς (RP5 – RP11) στο κέντρο όγκου της κάθε ζώνης, το βάθος των οποίων αντιστοιχεί στο βάθος αναφοράς που χρησιμοποιείται στους προηγούμενους υπολογισμούς. Σε κάθε σημείο αναφοράς ορίζεται ένα στοιχείο Wire μέσω του Interaction Module, το οποίο από την μία πλευρά θεωρείται πακτωμένο στο έδαφος (Create Wire Feature > Wires to ground). Έπειτα, δημιουργούνται 7 Connectors Sections, επιλέγοντας Connection Category: Basic και Translational Type: Cartesian και στο νεο μενού που εμφανίζεται, ενεργοποιείται η επιλογή Elasticity, το Definition τίθεται Nonlinear και «τσεκάρονται» οι οριζόντιες δυνάμεις F1 και F2. Οι σύλεις που ακολουθούν συμπληρώνονται από τα σημεία των καμπύλων P – γ. Εδώ, σημειώνεται πως το Abaqus ζητάει σαν είσοδο τη δύναμη σε N. Επομένως, οι τιμές της αντίστασης P που δίνονται σε ανά μονάδα ύψους (σε N/m), πρέπει να πολλαπλασιαστούν με το ύψος της κάθε ζώνης, δηλαδή τα 5 m, πριν εισαχθούν στο λογισμικό. Στη συνέχεια, το κάθε Connector Section ανατίθεται στο κατάλληλο στοιχείο Wire (Create Connector Assignment). Τέλος, ο κάθε Connector που αφορά τα στοιχεία Wire στα σημεία αναφοράς συνδέεται με το αντίστοιχο κομμάτι του πυλώνα μέσω Coupling Constraint (Create Constraint > Coupling), ενεργοποιώντας την επιλογή Continuum distributing και «τσεκάροντας» όλους τους περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας. Με όλη αυτή τη διαδικασία, αυτό που επιτυγχάνεται είναι το εξής: οποιαδήποτε μετακίνηση του πυλώνα γίνεται αντιληπτή από το εκάστοτε σημείο αναφοράς και λόγω του μη γραμμικού ελατηρίου που περιέχει, εφαρμόζεται η κατάλληλη οριζόντια δύναμη αντίστασης στην μετακίνηση.

Επιπλέον σχόλιο

Από τη στιγμή που συμβαίνει η κρούση και η οριακή συνθήκη για περιορισμό της κατακόρυφης μετατόπισης της βάσης του πυλώνα ($U_3 = 0$) απενεργοποιείται, η δύναμη της βαρύτητας αντισταθμίζεται μέσω ενός επιπλέον μη γραμμικού ελατηρίου που επενεργεί στην κατακόρυφη διεύθυνση. Το ελατήριο αυτό έχει χαρακτηριστική καμπύλη ίδια με εκείνη του ελατηρίου της ζώνης 30 – 35 m και ορίζεται μέσω της ίδιας διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τα οριζόντια ελατήρια του πυλώνα. Το ζήτημα που προκύπτει εδώ, είναι η ύπαρξη μιας αφύσικης, κατακόρυφης ταλάντωσης μικρού πλάτους του πυλώνα λόγω της συνεχόμενης επίδρασης της βαρύτητας και της επαναφοράς του ελατηρίου. Στο Κεφάλαιο 4, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων θα ελεγχθεί το πόσο σημαντική είναι αυτή η ταλάντωση.

3.7 Χρονική Διακριτοποίηση

Το τελευταίο βήμα για την ολοκλήρωση του βασικού μοντέλου σύγκρουσης είναι η διακριτοποίηση του χρόνου για τον οποίο θα μελετηθεί το φαινόμενο της σύγκρουσης του πλοίου με την ανεμογεννήτρια. Η χρονική διακριτοποίηση, δηλαδή η διαμέριση του συνολικού χρόνου σε πολύ μικρά χρονικά βήματα, αποτελεί μια από τις βασικότερες αρχές της αριθμητικής ανάλυσης, μαζί με τη χωρική διακριτοποίηση. Έτσι, έντονα μη γραμμικά προβλήματα μεγάλης χρονικής διάρκειας χωρίζονται σε μικρότερα γραμμικά προβλήματα, τα οποία επιλύονται ξεχωριστά, δίνοντας εν τέλει το αποτέλεσμα για το αρχικό μη γραμμικό πρόβλημα. Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο επιλύεται χρονικά το μοντέλο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

3.7.1 Άμεσος & έμμεσος επιλύτης

Τα λογισμικά αριθμητικής ανάλυσης, και εν προκειμένω το Abaqus, χρησιμοποιούν δύο τρόπους για τη διακριτοποίηση του χρόνου, οι οποίοι εκφράζονται μέσα από δύο επιλύτες: τον άμεσο επιλύτη (Explicit Solver) και τον έμμεσο επιλύτη (Implicit Solver). Ο Implicit Solver, που στο Abaqus εμφανίζεται και ως Standard Solver, υπολογίζει την επόμενη κατάσταση του συστήματος επιλύοντας εξισώσεις που περιλαμβάνουν τόσο την τωρινή όσο και την επόμενη κατάσταση μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας που επιδιώκει την σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Οι εξισώσεις κίνησης που επιλύονται από την έμμεση μέθοδο απαιτούν την αναστροφή του μητρώου ακαμψίας του κάθε στοιχείου, το οποίο υπολογίζεται σε κάθε χρονικό βήμα. Όσοσο, όσο μεγαλύτερο είναι το μοντέλο, τόσο μεγαλύτερο είναι και το μητρώο ακαμψίας καθιστώντας την αναστροφή του ιδιαίτερα χρονοβόρα υπολογιστικά. Από την άλλη, η άμεση μέθοδος είναι σε κάθε περίπτωση ευσταθής, γεγονός που ευνοεί την διαμέριση του χρόνου σε σχετικά μεγάλα χρονικά κομμάτια που ονομάζονται Increments, ο χρόνος των οποίων είτε προκύπτει αυτόματα από το πρόγραμμα αφού ο χρήστης ορίσει ορισμένες παραμέτρους, είτε διατηρείται σταθερός και ίσος με την τιμή που επιθυμεί ο χρήστης.

Από την άλλη, ο Explicit Solver υπολογίζει την επόμενη κατάσταση του συστήματος αποκλειστικά από την τωρινή του κατάσταση. Η άμεση μέθοδος δεν απαιτεί τα αποτελέσματα να συγκλίνουν σε κάθε increment, επομένως δεν εφαρμόζεται κάποια επαναληπτική διαδικασία. Όμως, με σκοπό να εξασφαλίζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων το μέγεθος του κάθε increment είναι υπερβολικά μικρό, υπολογίζεται αυτόματα από το λογισμικό και εξαρτάται από το χαρακτηριστικό μήκος του μικρότερου στοιχείου του πλέγματος του μοντέλου. Ωστόσο, το γεγονός ότι ο άμεσος επιλύτης αντιστρέφει το μητρώο μάζας το οποίο παραμένει σταθερό στον χρόνο και η μη ανάγκη σύγκλισης, ο υπολογιστικός χρόνος επίλυσης του κάθε increment είναι μικρότερος συγκριτικά με τον αντίστοιχο χρόνο του έμμεσου επιλύτη. Επομένως, παρ' όλο που χρειάζεται αυξημένο αριθμό χρονικών τμημάτων, η ταχύτητα της άμεσης μεθόδου την καθιστά ελκυστική.

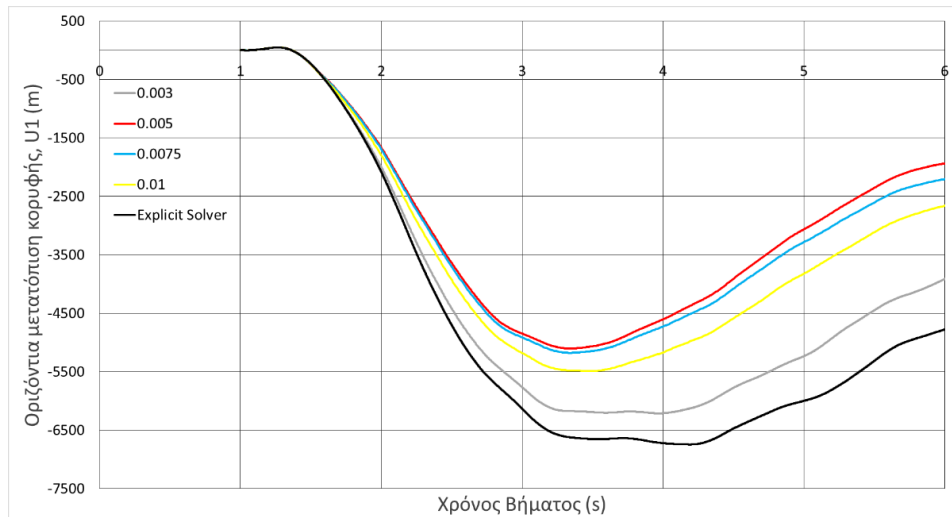
Γενικά, ανάλογα τον τύπου του προβλήματος, ο χρήστης οφείλει να επιλέξει τον επιλύτη που θα του δώσει τα ακριβέστερα αποτελέσματα στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Συνήθως, ο

Implicit Solver επιλύει επιτυχώς μη γραμμικά προβλήματα που είναι είτε στατικά είτε εξελίσσονται πολύ αργά, και ο ρυθμός παραμόρφωσης των στοιχείων είναι χαμηλός. Από την άλλη, ο Explicit Solver επιλύει με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, φαινόμενα που συμβαίνουν σε πολύ μεγάλες ταχύτητες και προβλήματα κρούσης. Ωστόσο, υπάρχουν μοντέλα τα οποία μπορούν να αναλυθούν με επιτυχία και με τις δύο μεθόδους, όπως είναι τα ψευδοστατικά προβλήματα, που μπορούν να λυθούν με την άμεση μέθοδο, αν η παραδοχή της ψευδοστατικότητας επαληθεύεται.

3.7.2 Επιλογή επιλύτη για το βασικό μοντέλο

Πριν βρεθεί ο επιλύτης που χρησιμοποιήθηκε στο βασικό μοντέλο, ο γράφων καλούταν να ορίσει τα χρονικά βήματα της προσομοίωσης. Επιλέχθηκε η ανάλυση να χωριστεί σε δύο βήματα. Το πρώτο περιελάμβανε την κίνηση του πλοίου μέχρι να συγκρουστεί με την ανεμογεννήτρια, ονομάστηκε BeforeCrash Step και είχε διάρκεια 1 s. Το δεύτερο περιέγραφε την δυναμική απόκριση της ανεμογεννήτριας κατά τη διάρκεια και μετά τη σύγκρουση και ονομάστηκε Dynamic Step. Η διάρκεια του τέθηκε ίση με 30 s, χρόνος που έπειτα από δοκιμές, κρίθηκε επαρκής για την σταθεροποίηση της απόκρισης της κατασκευής και της λήψης ασφαλών συμπερασμάτων γι' αυτήν. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν δύο βήματα αντί για ένα ενιαίο βήμα, ήταν το γεγονός ότι, με αυτόν τον τρόπο ήταν εφικτή η απενεργοποίηση της οριακής συνθήκης για την κατακόρυφη μετατόπιση της βάσης του πυθμένα από τη στιγμή της σύγκρουσης και έπειτα.

Αρχικά, για τα βήματα αυτά επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο άμεσος επιλύτης (Explicit Solver), αφού είναι αυτός που προτείνεται για την ανάλυση φαινομένων κρούσης. Ωστόσο, μέσα από τις δοκιμές, ανακαλύφθηκε πως η χρήση του άμεσου επιλύτη ήταν ιδιαίτερα κοστοβόρα υπολογιστικά. Γι' αυτόν τον λόγο, διερευνήθηκε η περίπτωση να εφαρμοστεί ο έμμεσος επιλύτης (Implicit Solver). Ο τύπος βήματος ορίστηκε ως Dynamic, Implicit, από το Step Module του Abaqus (Create Step > Dynamic, Implicit) και ο τύπος προσδιορισμού του Increment τέθηκε στο "Automatic". Το αρχικό και το ελάχιστο increment τέθηκαν ίσα με 0.001 και 10^{-10} αντίστοιχα, ενώ ο μέγιστος αριθμός των Increment ίσος με 10^9 . Για να επαληθευτεί η δυνατότητα χρήσης της έμμεσης αντί της άμεσης μεθόδου, έπρεπε να ισχύουν δύο βασικές προϋποθέσεις. Πρώτον, τα αποτελέσματα της έμμεσης μεθόδου, για διαφορετικό μέγιστο Increment, έπρεπε να συγκλίνουν και δεύτερον, να προσεγγίζουν εκείνα της άμεσης μεθόδου. Έτσι, δοκιμάστηκαν οι εξής τιμές για τη μέγιστη τιμή του Increment: 0.003, 0.005, 0.0075, 0.01. Αποδείχθηκε, όμως, πως με τη μείωση της τιμής του μέγιστου Increment, η δυναμική απόκριση και η μορφή αστοχίας της ανεμογεννήτριας δεν παρουσίαζαν συγκλίνουσα συμπεριφορά και παράλληλα δεν προσέγγιζαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τον άμεσο επιλύτη. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 3.50, φαίνεται η χρονική ιστορία της οριζόντιας μετατόπισης της κορυφής της ανεμογεννήτριας, για τις διαφορετικές τιμές του μέγιστου Increment. Επομένως, ήταν φανερό, πως υπό αυτές τις συνθήκες η χρήση του Dynamic, Implicit Step δεν ήταν δυνατή.

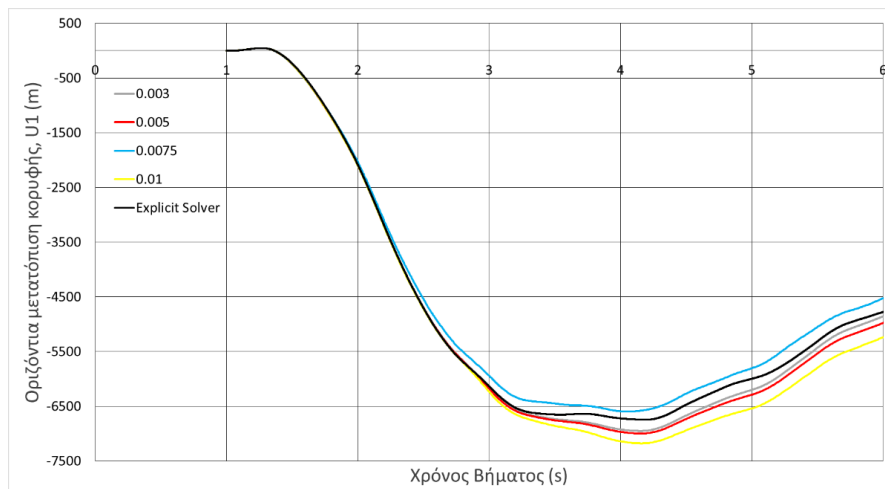


Σχήμα 3.50: Καμπύλες χρονικής ιστορίας οριζόντιας μετατόπισης κορυφής για διαφορετικές τιμές μέγιστου increment

Στη συνέχεια, με σκοπό να επιτευχθεί η σύγκλιση των αποτελεσμάτων άλλαξε ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η χρονική ολοκλήρωση σε κάθε Increment. Στο μενού του Dynamic Step, το Application τροποποιήθηκε από “Moderate Dissipation”, που χρησιμοποιείται εξ’ ορισμού για προβλήματα που περιλαμβάνουν επαφή, σε “Transient Fidelity”. Με το Application ρυθμισμένο στο “Moderate Dissipation”, η αριθμητική απόσβεση που εισάγεται κατά την επίλυση του προβλήματος είναι μεγαλύτερη από το συνηθισμένο. Ακόμη, η επίλυση των εξισώσεων σε κάθε Increment είναι ταχύτερη, αφού οι απαιτήσεις για την ισορροπία του συστήματος είναι μικρές, κάτι που όμως κοστίζει στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αντίθετα, με το “Transient Fidelity”, η αριθμητική απόσβεση είναι ελάχιστη και η ακρίβεια της επίλυσης μεγιστοποιείται, γεγονός όμως που καθιστά τη σύγκλιση σε κάθε Increment δυσκολότερη. Πράγματι, βελτιώνοντας την ακρίβεια του έμμεσου επιλύτη, η δυναμική απόκριση και η μορφή αστοχίας της ανεμογεννήτριας συνέκλιναν και ταυτόχρονα είχαν πλησιάσει τα αποτελέσματα του άμεσου επιλύτη. Έτσι, προέκυψαν οι νέες καμπύλες της οριζόντιας μετατόπισης της κορυφής συναρτήσεως του χρόνου, που φαίνονται στο Σχήμα 3.51. Ωστόσο, η επιδίωξη μεγαλύτερης ακρίβειας και οι αυστηρότερες απαιτήσεις σύγκλισης σε κάθε Increment είχαν ως αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση του υπολογιστικού χρόνου. Επίσης, εμφανίζονταν προβλήματα σύγκλισης και μνήμης τα οποία οδηγούσαν στην κατάρρευση της ανάλυσης. Αυτά, καθιστούσαν ανέφικτη την άμεση λήψη αποτελεσμάτων και όπως ήταν λογικό, η προσπάθεια χρήσης του Implicit Solver εγκαταλείφθηκε.

Τελικά, ο γράφων επέστρεψε στην αρχική του επιλογή, δηλαδή, την εφαρμογή του Explicit Solver για την προσομοίωση του βασικού μοντέλου. Τόσο στο BeforeCrash Step όσο και στο Dynamic Step ο τύπος του βήματος ήταν Dynamic Explicit (Create Step > Dynamic, Explicit) και το μέγεθος του κάθε increment αφέθηκε να υπολογίζεται από το λογισμικό, επιλέγοντας Incrementation > Type: Automatic. Για τους συντελεστές τεχνητής (αριθμητικής) απόσβεσης (Artificial/Numerical Damping) επιλέχθηκαν οι τιμές που δίνει εξ’ ορισμού το Abaqus, δηλαδή Linear bulk viscosity parameter: 0.06 και Quadratic bulk viscosity parameter : 1.2. Οι συγκεκριμένοι συντελεστές απόσβεσης εισάγονται με σκοπό την απόσβεση των ταλαντώσεων υψηλής συχνότητας. Σημειώνεται πως οι συγκεκριμένοι συντελεστές

απόσβεσης είναι οι μοναδικοί που εισάγονται στο μοντέλο, αφού δεν λαμβάνεται υπόψιν κάποιο άλλο είδος απόσβεσης της κατασκευής, όπως η απόσβεση του υλικού (Material Damping).



Σχήμα 3.51: Καμπύλες χρονικής ιστορίας οριζόντιας μετατόπισης κορυφής για διαφορετικές τιμές μέγιστου increment με εφαρμογή του Transient Fidelity

3.7.3 Μεταβλητές εξόδου

Σε κάθε ένα από τα δύο βήματα ορίζονται οι μεταβλητές εξόδου, των οποίων τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν στο 4^ο Κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, στο Dynamic Step, που είναι το βασικό βήμα του μοντέλου, αφού περιλαμβάνει όλη την εξέλιξη της σύγκρουσης ζητείται στα Field Outputs, οι τάσεις (Stresses > S) και οι ισοδύναμες τάσεις κατά Mises (Stresses > MISES), οι παραμορφώσεις (Strains > E), οι πλαστικές παραμορφώσεις (Strains > PE) και οι ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις (Strains > PEEQ). Επίσης, ζητείται η οπτικοποίηση των μετατοπίσεων και των ταχυτήτων (Displacement/Velocity/Acceleration > U, V) της κατασκευής, των δυνάμεων αντίδρασης (Forces /Reactions > RF) και των εγκάρσιων δυνάμεων (Forces /Reactions > SF). Τέλος, ζητούνται η αναπαράσταση της τριαξονικότητας (Stresses > TRIAX) και οι μεταβλητές STATUS και SDEG, ώστε να διαγράφονται τα στοιχεία τα οποία υφίστανται θραύση και στα 5 σημεία ολοκλήρωσής τους.

Από τα History Outputs, επιλέγεται να αναπαρασταθούν οι χρονικές ιστορίες όλων των ενεργειών του συνολικού συστήματος (Energy > ALLEN, Domain: Whole Model), αλλά και ξεχωριστά όλων των ενεργειών του μοντέλου της ανεμογεννήτριας (Energy > ALLEN, Domain: Wind Turbine). Επιπλέον, ζητούνται οι δυνάμεις κρούσης λόγω πίεσης και τριβής ως προς τις τρεις διευθύνσεις (Contact > CFT1, CFT2, CFT3) και τα μεγέθη που περιγράφουν την κίνηση της κορυφής της ανεμογεννήτριας και του πλοίου (Displacement/Velocity/Acceleration > U, V, A, UR, VR, AR). Τέλος, ζητείται η χρονική ιστορία της μετατόπισης (U) δύο συγκεκριμένων κόμβων της ανεμογεννήτριας για τον προσδιορισμό της εισχώρησης του πλοίου σε αυτή και η εσωτερική ενέργεια (Energy > ALLIE, Domain: Wire#) των μη γραμμικών ελατηρίων που αναπαριστούν την αλληλεπίδραση του πυθμένα με την ανεμογεννήτρια.

3.8 Σενάρια Συγκρούσεων

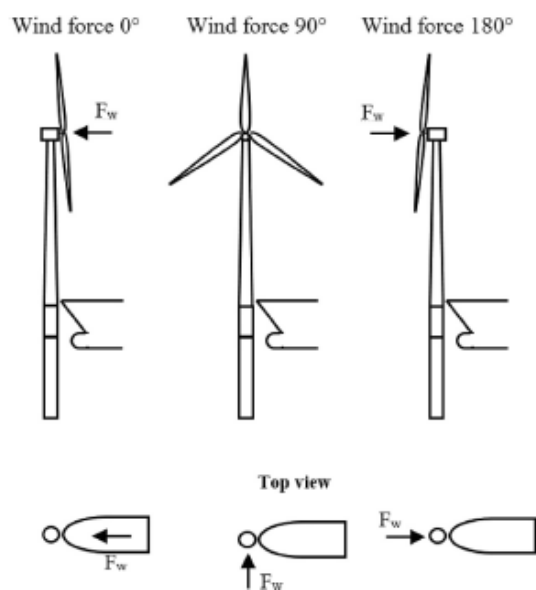
Όπως συζητήθηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο της εργασίας, σκοπός της είναι η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της ανεμογεννήτριας μετά τη σύγκρουση της με το πλοίο. Η απόκριση της, όμως, πρέπει να ελεγχθεί υπό το πρίσμα των διαφορετικών παραμέτρων που επηρεάζουν την εξέλιξη του φαινομένου. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται αντιληπτό ποιος παράγοντας είναι πιο επιδραστικός, τότε οι συνέπειες είναι πιο καταστρεπτικές και σε ποιες περιπτώσεις ελλοχεύει μεγαλύτερος κίνδυνος. Μερικοί από τους βασικότερους παράγοντες, αλλά και εκείνοι που ενδιαφέρουν στην παρούσα μελέτη, είναι η ταχύτητα με την οποία το πλοίο προσκρούει στον πυλώνα, η ταχύτητα του ανέμου, η κατεύθυνση του ανέμου σε σχέση με εκείνη του πλοίου και η οριακή συνθήκη στον πυθμένα.

Όσον αφορά την ταχύτητα του πλοίου, από τη στιγμή που η εργασία εστιάζει στην πλευρική σύγκρουση του με την ανεμογεννήτρια, η ταχύτητα του θα είναι σχετικά μικρή. Επομένως, οι ταχύτητες του πλοίου που εξετάζονται είναι οι εξής: 1 m/s, 3 m/s, 5 m/s. Όταν η ταχύτητα του πλοίου αλλάζει, αλλάζει και η απόσταση του από την ανεμογεννήτρια, με τέτοιο τρόπο ώστε για κάθε διαφορετική ταχύτητα να χρειάζεται 1 s (BeforeCrash Step), μέχρι να συγκρουστεί με τον πυλώνα. Συγκεκριμένα, για ταχύτητες 1 m/s, 3 m/s και 5 m/s, το πλοίο τοποθετείται σε απόσταση 1 m, 3m και 5 m αντίστοιχα, από τον πυλώνα. Έτσι, εξασφαλίζεται η δυνατότητα για άμεση σύγκριση των σεναρίων μεταξύ τους.

Σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου, όπως αναφέρθηκε και στο εδάφιο 3.5.3.2, τα φορτία ανέμου που απασχολούν, προκύπτουν από τις ταχύτητες των 7 m/s, 8.5 m/s, 10 m/s, 11.4 m/s, 13.5 m/s και 20 m/s. Επομένως, ανάλογα την ταχύτητα του ανέμου στο εκάστοτε σενάριο, ορίζονται τα κατάλληλα φορτία ανέμου μέσω του Load Module.

Για την κατεύθυνση του ανέμου σε σχέση με εκείνη του πλοίου, μελετώνται επίσης τρεις περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση, οι κατευθύνσεις του ανέμου και του πλοίου είναι ομόρροπες μεταξύ τους (γωνία 0°), στη δεύτερη, είναι αντίρροπες (γωνία 180°) και στην τελευταία, σχηματίζουν γωνία 90°. Στο Σχήμα 3.52 φαίνονται οι τρεις διαφορετικές σχετικές κατευθύνσεις σύγκρουσης (για μετωπική σύγκρουση). Η ανεμογεννήτρια διαθέτει ένα σύστημα περιστροφής του ατρακτίδιου γύρω από τον κατακόρυφο άξονα (yaw system), ώστε ο άνεμος να συναντά μετωπικά το επίπεδο της φτερωτής, ανεξάρτητα από τη κατεύθυνση του, και να επιτυγχάνεται η περιστροφή των λεπίδων. Επομένως, θεωρώντας στο μοντέλο, την κατεύθυνση του ανέμου σταθερή, τροποποιείται η αρχική θέση του πλοίου, ώστε η σχετική γωνία που διαμορφώνεται μεταξύ ανέμου και πλοίου να παίρνει την κατάλληλη τιμή.

Τέλος, σχετικά με την οριακή συνθήκη στον πυθμένα, ερευνάται και ένας απλούστερος τρόπος μοντελοποίησης της. Τα ελατήρια που προσομοιώνουν την αλληλεπίδραση μεταξύ πυλώνα και υπεδάφους παραλείπονται, μαζί με το τμήμα του μοντέλου που βρίσκεται κάτω από το επίπεδο του πυθμένα. Στη θέση τους, εφαρμόζεται πάκτωση, ως προς όλους τους βαθμούς ελευθερίας, της διατομής του πυλώνα που βρίσκεται στο επίπεδο του πυθμένα, η οποία πλέον είναι και η χαμηλότερη εγκάρσια διατομή της ανεμογεννήτριας. Η πάκτωση ορίζεται μέσω του Load Module (Create Boundary Condition > Encastre).



Σχήμα 3.52: Σχετικές κατευθύνσεις ανέμου – πλοίου [13]

Συνθέτοντας κατάλληλα όλα τα παραπάνω, προκύπτει ο Πίνακας 3.20, που περιλαμβάνει τα 14 διαφορετικά σενάρια σύγκρουσης, τα οποία θα προσομοιωθούν και θα συγκριθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 3.20: Πίνακας σεναρίων σύγκρουσης

Κωδικός σεναρίου	Οριακή συνθήκη πυθμένα	Ταχύτητα πλοίου (m/s)	Κατεύθυνση ανέμου (°)	Ταχύτητα ανέμου (m/s)
Str_1_0_0	Ελατήρια	1	0	0
Str_3_0_0	Ελατήρια	3	0	0
Str_5_0_0	Ελατήρια	5	0	0
Fix_3_0_0	Πάκτωση	3	0	0
Str_1_0_11.4	Ελατήρια	1	0	11.4
Str_3_0_11.4	Ελατήρια	3	0	11.4
Str_5_0_11.4	Ελατήρια	5	0	11.4
Str_3_0_7	Ελατήρια	3	0	7
Str_3_0_8.5	Ελατήρια	3	0	8.5
Str_3_0_10	Ελατήρια	3	0	10
Str_3_0_13.5	Ελατήρια	3	0	13.5
Str_3_0_20	Ελατήρια	3	0	20
Str_3_90_11.4	Ελατήρια	3	90	11.4
Str_3_180_11.4	Ελατήρια	3	180	11.4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ & ΣΥΓΚΡΙΣΗ
ΣΕΝΑΡΙΩΝ

Κεφάλαιο 4^ο: Αποτελέσματα προσομοιώσεων & σύγκριση σεναρίων

4.1 Εισαγωγή

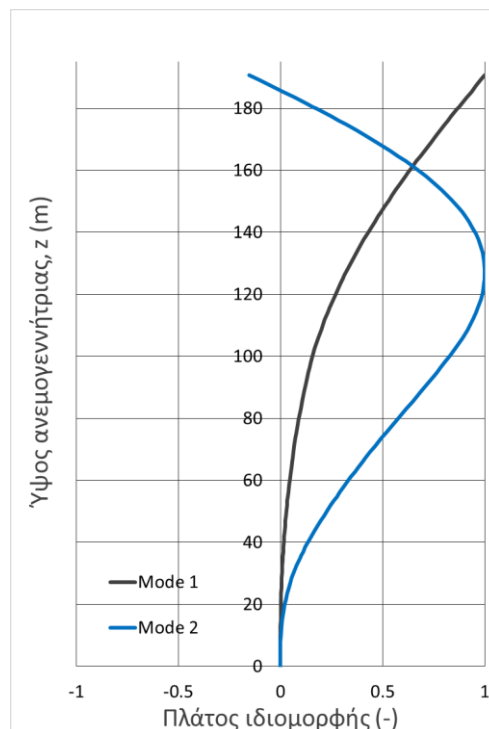
Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των σεναρίων που κατασκευάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται παράλληλα με τη σύγκριση των κατάλληλων σεναρίων, με σκοπό την αναγνώριση της επίδρασης κάθε διαφορετικής παραμέτρου στην εξέλιξη του φαινομένου. Αρχικά, αναλύεται η βασικότερη περίπτωση σύγκρουσης που μοντελοποιήθηκε, δηλαδή η σύγκρουση, με την ανεμογεννήτρια, ενός πλοίου με ταχύτητα 3 m/s, χωρίς παράλληλα να υφίστανται φορτία ανέμου. Περιγράφεται όλη η εξέλιξη της κρούσης, ο τρόπος με τον οποίο αποκρίνεται η ανεμογεννήτρια, καθώς και πως διαχέεται η ενέργεια του συστήματος λόγω της κρούσης. Έπειτα, μελετάται η επίδραση της ταχύτητας του πλοίου στην πορεία του φαινομένου, συγκρίνοντας τα σενάρια όπου το πλοίο έχει ταχύτητα 1 m/s, 3 m/s και 5 m/s, χωρίς παράλληλα να πνέει άνεμος, με σκοπό να προσδιοριστεί αποκλειστικά η επιρροή της ταχύτητας του πλοίου στην σύγκρουση. Ακολούθως, εξετάζεται πως η ευκαμψία του πυθμένα τροποποιεί την απόκριση της κατασκευής. Για τον σκοπό αυτό αναζητούνται οι διαφορές μεταξύ του σεναρίου που προσομοιώνει την αλληλεπίδραση υπεδάφους – πυλώνα και εκείνου που θεωρεί τον πυλώνα πακτωμένο στο επίπεδο του πυθμένα. Στη συνέχεια, εισάγονται και τα φορτία του ανέμου και εξακριβώνεται με ποιον τρόπο η ταχύτητα του ανέμου επηρεάζει την κινηματική συμπεριφορά της κορυφής της ανεμογεννήτριας. Η τελευταία παράμετρος που μελετάται η επίδραση της στο φαινόμενο, είναι η σχετική γωνία που σχηματίζουν η κατεύθυνση του ανέμου με την κατεύθυνση του πλοίου κατά την κρούση. Επιπλέον, στην αρχή του κεφαλαίου και πριν γίνει η σύγκριση των σεναρίων, παρατίθενται οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές της ανεμογεννήτριας. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με ορισμένες παρατηρήσεις επί των προσομοιώσεων.

4.2 Ανάλυση Ιδιομορφών

Αφού κατασκευάστηκε το μοντέλο και πριν την προσομοίωση των σεναρίων, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των ιδιομορφών της κατασκευής. Εκτελέστηκαν δύο αναλύσεις, μία για το μοντέλο στο οποίο αναπαρίσταται η αλληλεπίδραση υπεδάφους – πυλώνα και μία για το μοντέλο όπου η ανεμογεννήτρια πακτώνεται στο επίπεδο του πυθμένα. Για την κατασκευή των αναλύσεων, χρειαζόταν η πυκνότητα, η γεωμετρία και οι οριακές συνθήκες της ανεμογεννήτριας, ενώ μέσω του Step Module ορίστηκε ένα βήμα τύπου Frequency (Procedure Type: Linear Perturbation > Frequency). Οι πρώτες δύο ιδιοπερίοδοι και ιδιοσυχνότητες της κατασκευής φαίνονται στον Πίνακα 4.1, ενώ οι αντίστοιχες καμπτικές ιδιομορφές για το μοντέλο με τα ελατήρια του υπεδάφους αναπαρίστανται στο Σχήμα 4.1. Σημειώνεται πως ο κατακόρυφος άξονας των ιδιομορφών αντιστοιχεί στο ύψος της ανεμογεννήτριας το οποίο μετριέται από την χαμηλότερη διατομή της και όχι από την επιφάνεια της θάλασσας.

Πίνακας 4.1: Ιδιοπερίοδοι και ιδιοσυχνότητες των δύο μοντέλων

Τύπος Μοντέλου	1 ^η Ιδιομορφή		2 ^η Ιδιομορφή	
	T_n (s)	f_n (Hz)	T_n (s)	f_n (Hz)
Πάκτωση	3.962	0.2524	0.5543	1.804
Αλληλεπίδραση πυλώνα – υπεδάφους	4.316	0.2317	0.7485	1.336



Σχήμα 4.1: Γραφική αναπαράσταση των δύο πρώτων καμπτικών ιδιομορφών

Είναι σημαντικό να επαληθευτεί η τιμή των ιδιοσυχνοτήτων, αφού με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η ρεαλιστικότητα των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, της απόκρισης δηλαδή της ανεμογεννήτριας. Αναζητώντας στην υπάρχουσα βιβλιογραφία για την ανεμογεννήτρια των 10 MW του Πολυτεχνείου της Δανίας, βρέθηκε η δημοσίευση των Philip Alkhoury, Abdul-Hamid Soubra και άλλων με τίτλο «Natural Frequencies Estimation of a Monopile Supported DTU-10 MW Offshore Wind Turbine» [41]. Στη συγκεκριμένη μελέτη υπολογίζεται μέσω του Abaqus, οι ιδιοσυχνότητες του μοντέλου ανεμογεννήτριας που έχει χρησιμοποιηθεί και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Μάλιστα, λαμβάνεται υπόψιν και η αλληλεπίδραση του υπεδάφους με την κατασκευή. Οι βασικές διαφορές που εντοπίζονται μεταξύ των δύο αριθμητικών μοντέλων της εγκατάστασης είναι οι εξής:

- Το μήκος όλου του κορμού της ανεμογεννήτριας, που στηρίζει την φτερωτή και την άτρακτο, είναι 5 m μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μήκος στη διπλωματικής εργασίας (195.63 m έναντι 190.63 m)
- Η πυκνότητα του υλικού της κατασκευής δεν είναι σταθερή σε όλο το ύψος της κατασκευής, όπως στην παρούσα εργασία όπου η πυκνότητα έχει θεωρηθεί ίση με $7,850 \text{ kg/m}^3$ σε όλη την κατασκευή. Αντίθετα, στη δημοσίευση υπάρχουν μεγάλα τμήματα της εγκατάστασης όπου η πυκνότητα ισούται με $8,500 \text{ kg/m}^3$ και $8,880 \text{ kg/m}^3$.
- Στο άρθρο των Alkhoury και Soubra [41], έχει μοντελοποιηθεί και η γεωμετρία των λεπίδων στην κορυφή της ανεμογεννήτριας.

Δεδομένου των παραπάνω, οι ιδιοσυχνότητες της κατασκευής στην δημοσίευση προέκυψαν ίσες με $f_1 = 0.201 \text{ Hz}$ και $f_2 = 1.282 \text{ Hz}$ για την πρώτη και τη δεύτερη καμπτική ιδιομορφή αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες λοιπόν αποκλίσεις μεταξύ των ιδιοσυχνοτήτων της παρούσας εργασίας και της δημοσίευσης ισούνται με 13% και 4 %. Σημειώνεται πως συγκρίθηκαν με τις τιμές για το μοντέλο που λαμβάνει υπόψιν την αλληλεπίδραση πυλώνα – υπεδάφους, αφού έτσι συμβαίνει και στο μοντέλο της δημοσίευσης.

Το γεγονός ότι οι ιδιοσυχνότητες της εργασίας είναι λίγο μεγαλύτερες από εκείνες της δημοσίευσης μπορεί να εξηγηθεί λογικά. Συγκεκριμένα, από τη στιγμή που το μήκος του κορμού της ανεμογεννήτριας στην παρούσα εργασία είναι κατά 5 m μικρότερο, αυτό συνεπάγεται αύξηση της δυσκαμψίας και τελικά άνοδο και της ιδιοσυχνότητας. Επιπλέον, εφόσον η συνολική πυκνότητα της κατασκευής είναι μικρότερη, αυτό οδηγεί σε πτώση της μάζας και αύξηση της ιδιοσυχνότητας.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως η 1^η ιδιοσυχνότητα που έχει υπολογιστεί στην τρέχουσα μελέτη (0.201 Hz) είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων για την 1^η ιδιοσυχνότητα του συγκεκριμένου μοντέλου ανεμογεννήτριας (0.176 Hz – 0.273 Hz), όπως αυτά ορίζονται στο άρθρο των Alkhoury και Soubra [41].

Με βάση όλα τα παραπάνω, οι ιδιοσυχνότητες που υπολογίστηκαν θεωρούνται αποδεκτές, γεγονός που εξασφαλίζει πως τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια ανταποκρίνονται σε μεγάλο βαθμό στην πραγματικότητα.

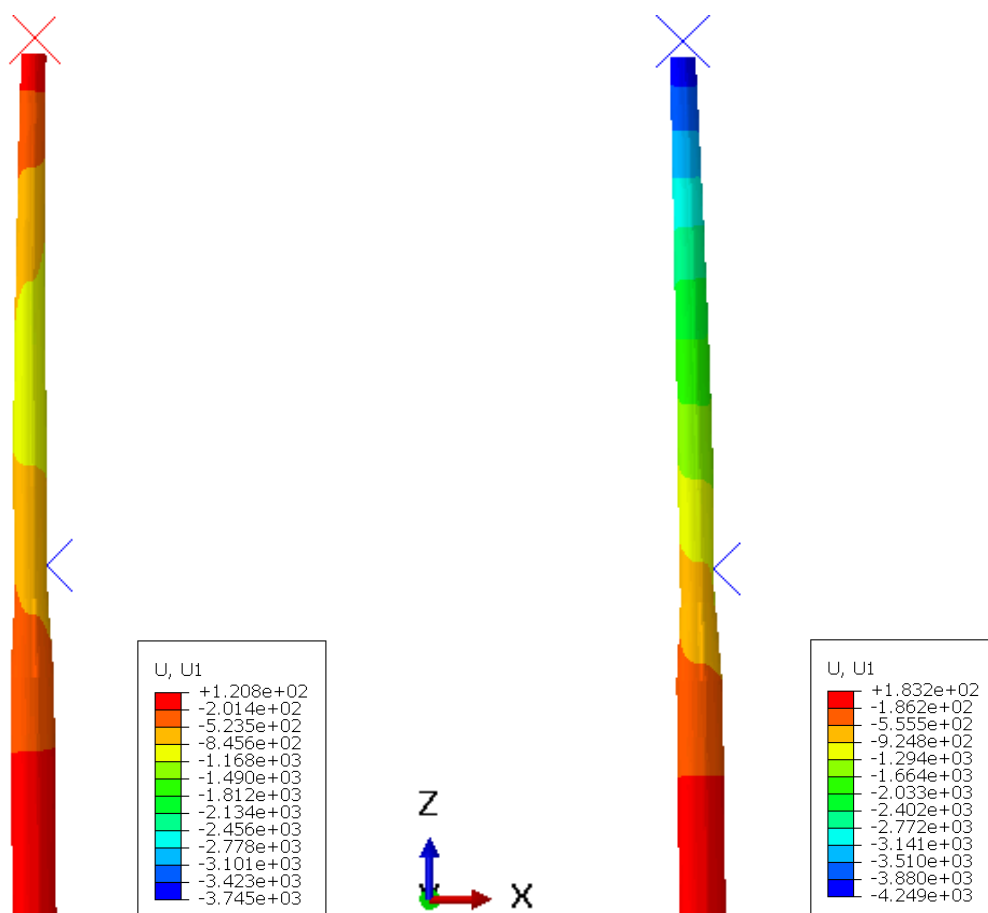
4.3 Επίδραση της ταχύτητας του πλοίου

Η πρώτη παράμετρος, που μελετάται η επίδραση της στην εξέλιξη του φαινομένου, είναι η ταχύτητα με την οποία σύγκρουεται το πλοίο στην ανεμογεννήτρια. Με σκοπό να γίνει ξεκάθαρο πως επιδρά αποκλειστικά η ταχύτητα του πλοίου στην απόκριση της ανεμογεννήτριας, και όχι σε συνδυασμό με τα φορτία του ανέμου, ο άνεμος θεωρείται μηδαμινός, η φτερωτή δεν περιστρέφεται και επομένως δεν ασκούνται φορτία ανέμου σε αυτήν.

Για τη μελέτη της επίδρασης της ταχύτητας του πλοίου στη σύγκρουση, χωρίς η ανεμογεννήτρια να βρίσκεται σε λειτουργία, συγκρίνονται τα σενάρια Str_1_0_0, Str_3_0_0 και Str_5_0_0. Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 3.20, αυτά προσομοιώνουν την σύγκρουση του πλοίου σε μια ανεμογεννήτρια με ελατήρια στο υπέδαφος (**Str_1_0_0**, **Str_3_0_0** και **Str_5_0_0**), που δεν της ασκούνται φορτία ανέμου (Str_1_0_0, Str_3_0_0 και Str_5_0_0) και με μόνη μεταβαλλόμενη παράμετρο την ταχύτητα του πλοίου (Str_1_0_0, Str_3_0_0 και Str_5_0_0). Πριν πραγματοποιηθεί η σύγκριση των σεναρίων μεταξύ τους, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του βασικότερου εξ αυτών, που είναι το σενάριο Str_3_0_0. Το συγκεκριμένο λαμβάνεται ως το βασικό σενάριο και μελετάται εκτενέστερα, καθώς σε αυτό, το πλοίο κινείται με ταχύτητα 3 m/s, που είναι η μέση τιμή των άλλων δύο ταχυτήτων, αλλά και η συνηθέστερη τιμή της ταχύτητας του πλοίου όταν παρασύρεται πλευρικά από τον άνεμο.

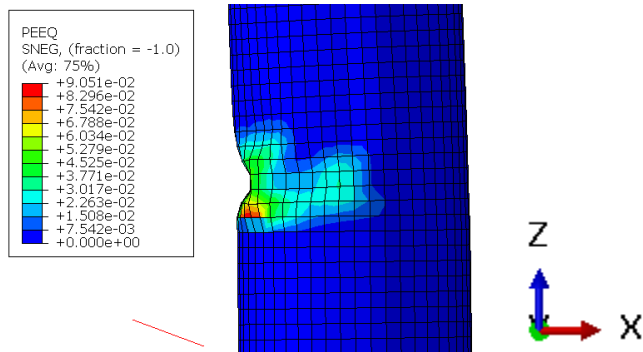
4.3.1 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων του σεναρίου Str_3_0_0

Το πλοίο, κινούμενο με ταχύτητα 3 m/s, συγκρούεται με την ανεμογεννήτρια στα 0.97 s και ξεκινάει να μετατοπίζει, σταδιακά προς τα αρνητικά του οριζόντιου άξονα x, τον πυλώνα γύρω από την περιοχή της σύγκρουσης. Η κορυφή της όμως, σε πρώτη φάση, δεν μετακινείται με τον ίδιο ρυθμό και παρουσιάζει μικρότερη αρχική μετατόπιση, λόγω της μεγάλης αδράνειας της μάζας του ατρακτίδιου και της φτερωτής, που βρίσκεται προσαρτημένη εκεί. Μετά την πάροδο του πρώτου 1.5 s, όμως, η κορυφή της ανεμογεννήτριας αρχίζει να κινείται εντονότερα προς τη φορά της σύγκρουσης, καθώς έχει αποκτήσει δυναμική ενέργεια (υπό τη μορφή ελαστικής παραμόρφωσης), με αποτέλεσμα να δρα σαν ελατήριο. Κινείται επιταχυνόμενα, με μέγιστη επιτάχυνση 14.82 m/s², προς την κατεύθυνση της σύγκρουσης πιάνοντας τελικά τη μέγιστη ταχύτητα των 5.8 m/s στα 2.18 s μετά την κρούση. Έτσι, η ανεμογεννήτρια αρχίζει και κάμπτεται υπό τη μορφή της 1^{ης} ιδιομορφής. Στο Σχήμα 4.2 φαίνονται τα δύο πρώτα στάδια της ανεμογεννήτριας μετά την σύγκρουση, όπως αναπαρίστανται γραφικά από το Abaqus. Η μεταβλητή U1 αντιστοιχεί στην μετατόπιση κατά τον οριζόντιο άξονα x, ο οποίος είναι παράλληλος στη διεύθυνση της κρούσης. Σημειώνεται πως στην παρούσα διπλωματική εργασία ως φορά, διεύθυνση ή κατεύθυνση της σύγκρουσης ορίζεται εκείνη που αντιστοιχεί στην κίνηση του πλοίου πριν τη σύγκρουση.

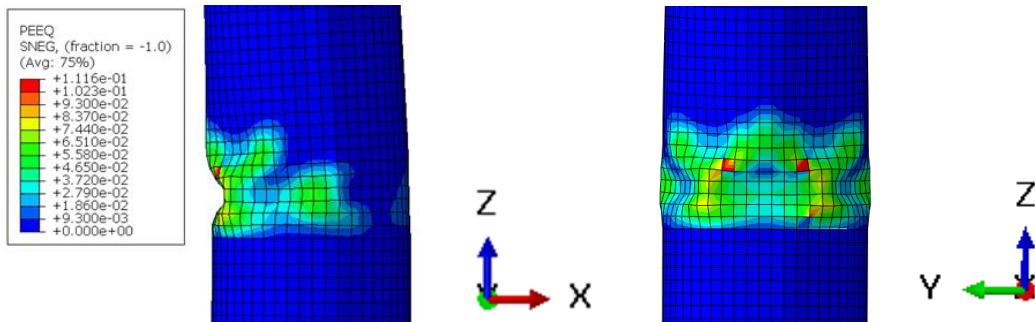


Σχήμα 4.2: Πρώτη και δεύτερη φάση απόκρισης της ανεμογεννήτριας μετά τη σύγκρουση.

Λόγω του μεγάλου βάρους στην κορυφή, δημιουργούνται μεγάλες καμπτικές ροπές στον κορμό της ανεμογεννήτριας. Αυτό, 2.5 s μετά την έναρξη της προσομοίωσης, οδηγεί στη ανάπτυξη μεγάλων πλαστικών παραμορφώσεων, στο σημείο όπου ενώνεται ο πύργος με τον πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Αυτό το σημείο ήταν, ομολογουμένως, ιδιαίτερα επίφοβο καθώς, τα τοιχώματα του πύργου έχουν πάχος 32.4 mm, ενώ εκείνα του πυλώνα 100 mm. Επομένως, η πιο απομακρυσμένη περιοχή του πύργου από την κορυφή του, δεχόταν την μεγαλύτερη καμπτική ροπή και λόγω του μικρού πάχους του τοιχώματος της, δεν μπορούσε να την παραλλάξει περαιτέρω, με αποτέλεσμα να παραμορφωθεί πλαστικά. Αντίθετα, ο πυλώνας με πάχος 100 mm είχε τη δυνατότητα να αντέξει την ασκούμενη ροπή. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά μπορεί να παρομοιωθεί σε έναν βαθμό με εκείνη μιας πρόβολου δοκού, με συγκεντρωμένο φορτίο στο ελεύθερο άκρο της. Και σε αυτήν την περίπτωση, οι μεγάλες καμπτικές ροπές στην περιοχή κοντά στο πακτωμένο άκρο της δοκού με τον απαραμόρφωτο τοίχο, οδηγούν σε έντονες πλαστικές παραμορφώσεις εκεί. Έτσι, και εδώ, ο πύργος αντιστοιχεί στην δοκό και ο πιο στιβαρός πυλώνας στον τοίχο. Οι πλαστικές παραμορφώσεις αυξάνονται δημιουργώντας τελικά έναν πλαστικό κόμβο σε εκείνη την περιοχή, ο οποίος λαμβάνει την τελική του μορφή 1 s αφού ξεκίνησε να δημιουργείται (Σχήμα 4.3, Σχήμα 4.4).

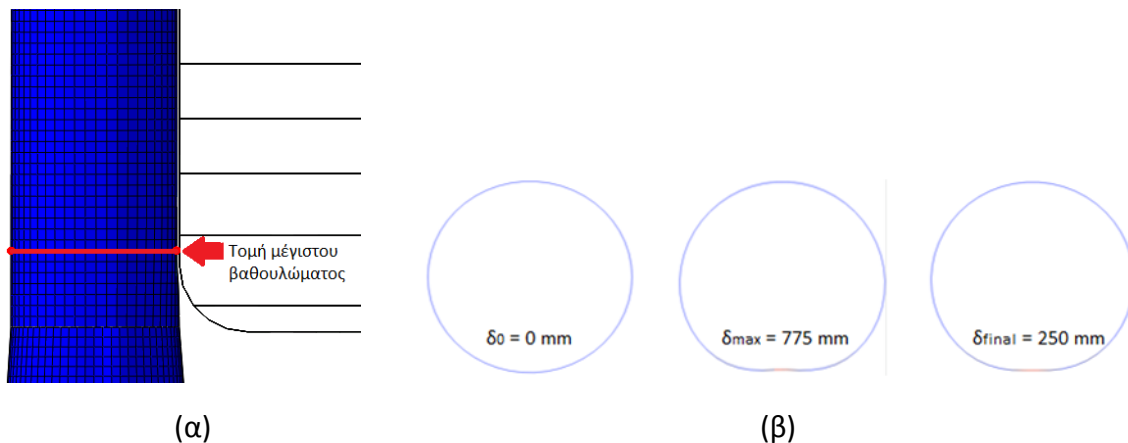


Σχήμα 4.3: Αρχικό στάδιο δημιουργίας πλαστικών παραμορφώσεων στην περιοχή ένωσης πυλώνα – πύργου. PEEQ: Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση



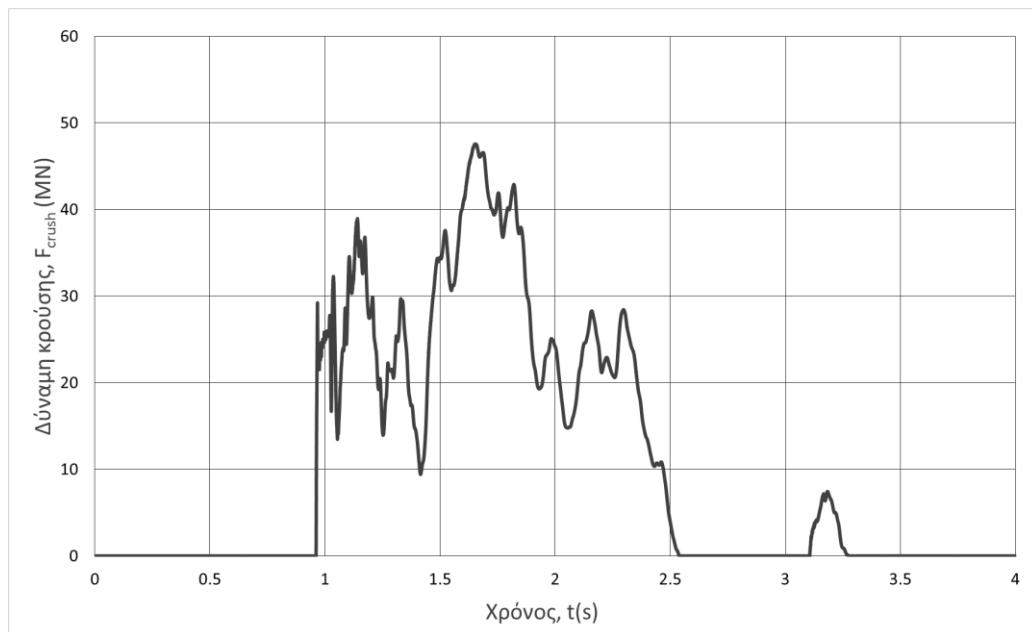
Σχήμα 4.4: Τελική μορφή κόμβου στην περιοχή ένωσης πυλώνα – πύργου.

Πέρα από τον πλαστικό κόμβο που δημιουργείται, παρατηρούνται ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις μικρότερου μεγέθους στην περιοχή όπου το πλοίο συγκρούεται με τον πυλώνα. Η πλευρά του πλοίου εισχωρεί στον πυλώνα προκαλώντας ένα βαθούλωμα, δ , στην επιφάνεια επαφής. Αυτό υπολογίζεται βρίσκοντας την απόλυτη τιμή της διαφοράς της μετατόπισης των δύο αντιδιαμετρικών σημείων της διατομής του πυλώνα κατά τη διεύθυνση της κρούσης. Η μέγιστη τιμή αυτού ισούται με 775 mm, συμβαίνει 1.72 s μετά την έναρξη της προσομοίωσης και συναντάται 1.5 m κάτω από την επιφάνεια θάλασσας, όπου για το πλοίο αντιστοιχεί στο ύψος της ένωσης του πλευρικού τοιχώματος του πλοίου με το bilge plate (Σχήμα 4.5-α). Από τη στιγμή που το πλοίο αρχίζει να κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση, η εισχώρηση μειώνεται, αποκτώντας μια τελική μέση τιμή ίση με 250 mm. Η αρχική, η μέγιστη και η τελική τιμή της εισχώρησης, δ φαίνονται στο Σχήμα 4.5-β.



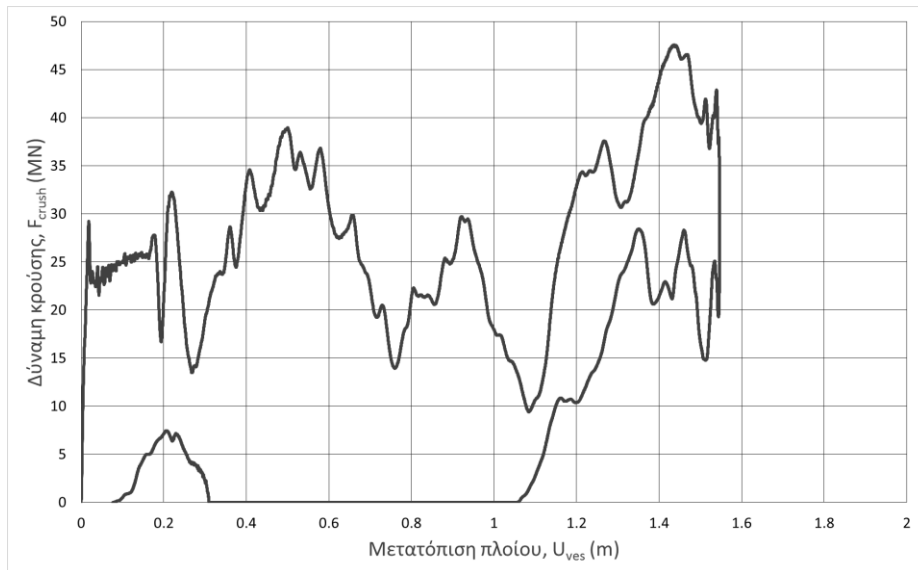
Σχήμα 4.5: (α) Θέση μέγιστης εισχώρησης (β) Αρχική, μέγιστη και τελική εισχώρηση

Κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης, μεταξύ των δύο κατασκευών ασκούνται ίσες και αντίθετες δυνάμεις πίεσης και τριβής. Η καμπύλη αυτών των δυνάμεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6. Η μέγιστη τιμή της δύναμης ισούται με 47 MN και προκύπτει στα 1.66 s, δηλαδή, λίγο πριν παρατηρηθεί η μέγιστη εισχώρηση του πλοίου στον πυλώνα. Μετά την μέγιστη τιμή της, η δύναμη, όπως και η εισχώρηση, σταδιακά υποχωρεί λόγω της οπισθοδρόμησης του πλοίου. Τελικά, μηδενίζεται στα 2.5 s, τη στιγμή που το πλοίο αποκολλάται από τον πυλώνα. Παρατηρήθηκε πως η ίδια χρονική στιγμή είναι εκείνη που ξεκινάει να δημιουργείται ο πλαστικός κόμβος στην περιοχή σύνδεσης πυλώνα – πύργου. Στη συνέχεια τα δύο σώματα συγκρούονται εκ νέου, σε μία κρούση σύντομης διάρκειας (0.15 s). Τότε, η δύναμη κρούσης αυξάνεται και πάλι, φτάνοντας σε μια νέα τοπική μέγιστη τιμή ίση με 8 MN. Μετά τη δεύτερη αποκόλληση, η δύναμη κρούσης λαμβάνει την τελική μηδενική τιμή της.



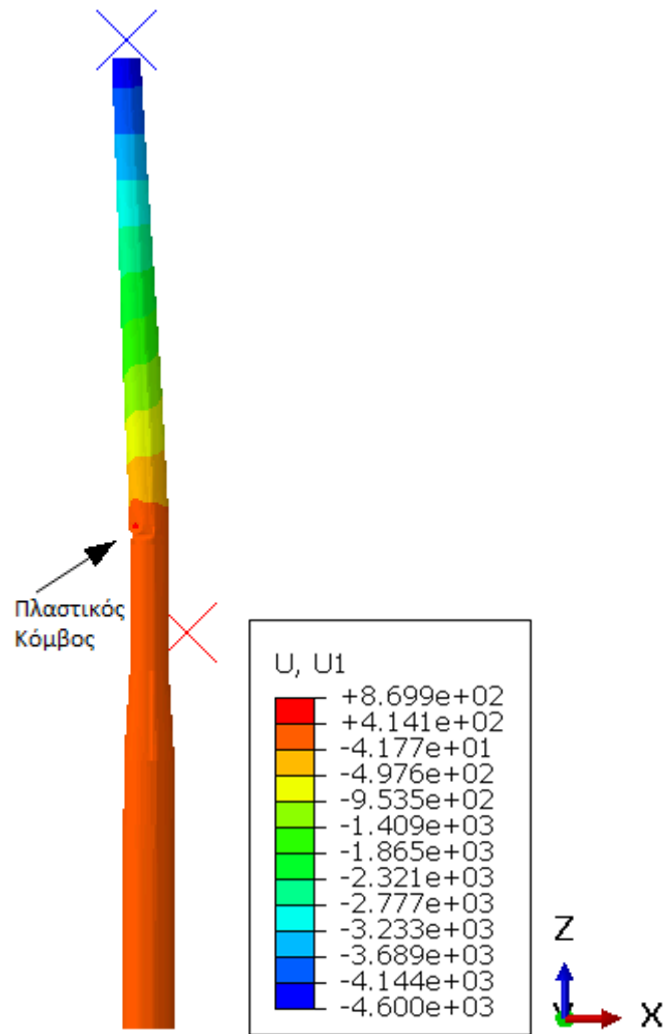
Σχήμα 4.6: Χρονική ιστορία δύναμης κρούσης

Στο Σχήμα 4.7 φαίνεται το διάγραμμα της δύναμης κρούσης συναρτήσει της μετατόπισης του πλοίου κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης. Το πλοίο, λόγω της σύγκρουσης, χάνει σταδιακά την κινητική του ενέργεια. Αυτή μετατρέπεται σε κινητική και εσωτερική ενέργεια της ανεμογεννήτριας. Το πλοίο επιβραδύνεται και αφού διανύσει 1.55 m όντας σε επαφή με την ανεμογεννήτρια, η ταχύτητα του μηδενίζεται και στη συνέχεια αρχίζει να κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Μάλιστα, η μέγιστη δύναμη κρούσης ασκείται λίγο πριν την μεγιστοποίηση της μετατόπισης του πλοίου που αντιστοιχεί και στην μέγιστη εισχώρηση του πλοίου στον πυλώνα. Κατά την οπισθοχώρηση του πλοίου ο πυλώνας παραμένει σε επαφή μαζί του. Έτσι εξηγείται και η μείωση της μετατόπισης του πλοίου στο Σχήμα 4.7.

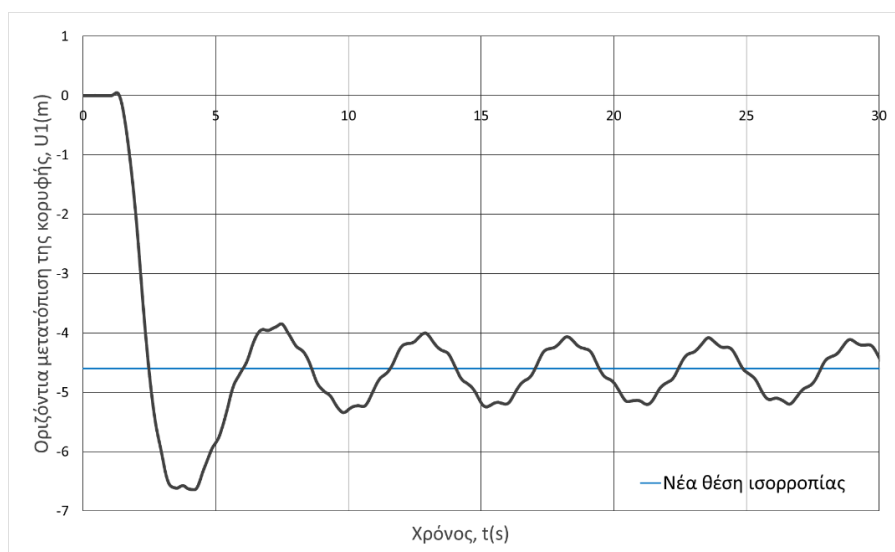


Σχήμα 4.7: Καμπύλη δύναμης κρούσης συναρτήσει της μετατόπισης του πλοίου

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η κορυφή της ανεμογεννήτριας, μετά την αρχική της αντίσταση, μετατοπίζεται έντονα κατά τη φορά της σύγκρουσης. Αυτή η κίνηση ευνοεί τη δημιουργία και την ανάπτυξη του πλαστικού κόμβου στην περιοχή σύνδεσης πύργου – πυλώνα. Αφού ο κόμβος πάρει την τελική του μορφή, η κορυφή αρχίζει να επανέρχεται κινούμενη προς την αρχική της θέση ισορροπίας. Τελικά, όμως, λόγω του πλαστικού κόμβου, αποκτά μια ταλαντωτική συμπεριφορά γύρω από μια νέα θέση ισορροπίας στα -4.6 m από την αρχική. Η ταλάντωση είναι αποσβενούμενη με αργό ρυθμό, έχει αρχική περίοδο 5.5 s, αρχικό πλάτος 0.75 m και φαίνεται μαζί με τη νέα θέση ισορροπίας στο Σχήμα 4.9. Ενώ, στο Σχήμα 4.8 διακρίνεται το μοντέλο της ανεμογεννήτριας με την κορυφή της στη νέα θέση ισορροπίας και η θέση του πλαστικού κόμβου. Λόγω της ταλαντωτικής συμπεριφοράς της κορυφής αλλά και των πολλαπλών συγκρούσεων, υποβάλλεται σε οριζόντια ταλάντωση και ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας. Το πλάτος αυτής είναι 66.5 mm και η θέση ισορροπίας της έχει μετατοπιστεί $+140$ mm σε σχέση με τη θέση του πυλώνα πριν τη σύγκρουση. Η μετατόπιση του πυλώνα προς τα θετικά του άξονα x οφείλεται στην κίνηση της κορυφής προς τα αρνητικά του ίδιου άξονα, που είχε ως αποτέλεσμα να τον ωθήσει προς την αντίθετη κατεύθυνση.

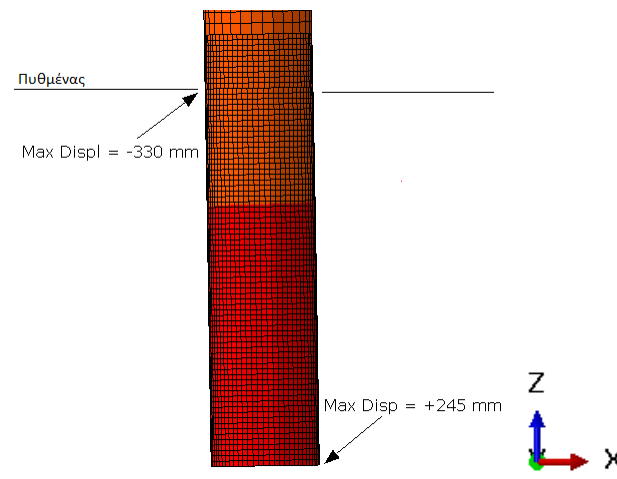


Σχήμα 4.8: Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας στη νέα θέση ισορροπίας της κορυφής της



Σχήμα 4.9: Οριζόντια ταλάντωση της κορυφής της ανεμογεννήτριας γύρω από τη νέα θέση ισορροπίας

Οι μετατοπίσεις που υφίσταται η ανεμογεννήτρια οδηγούν σε μετακίνηση του πυθμένα και του υπεδάφους που περικλείει ένα τμήμα του πυλώνα. Αυτό, ευνοείται από το γεγονός πως στο σενάριο Str_3_0_0, η αλληλεπίδραση πυλώνα – υπεδάφους έχει μοντελοποιηθεί ρεαλιστικά μέσω των μη γραμμικών ελατηρίων, με αποτέλεσμα ο πυθμένας να είναι εύκαμπτος και να επιτρέπονται οι μετατοπίσεις σε αυτή την περιοχή. Έτσι, ο πυθμένας παρουσιάζει μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κατά τη κατεύθυνση της σύγκρουσης ίση με 330 mm, ενώ η χαμηλότερη διατομή του μοντέλου της ανεμογεννήτριας έχει μέγιστη οριζόντια μετατόπιση ίση με 245 mm, προς την αντίθετη κατεύθυνση της σύγκρουσης (Σχήμα 4.10). Παράλληλα, παρατηρείται και μια σχετική περιστροφή της βάσης του πυλώνα ως προς το οριζόντιο επίπεδο, συμπεριφορά η οποία ήταν αναμενόμενη όπως σχολιάστηκε στο εδάφιο 3.6.2. Μετά την αποκόλληση του πλοίου από την εγκατάσταση, λόγω της ελαστικότητας του υπεδάφους και της ταλάντωσης που υφίστανται τα ανώτερα τμήματα της ανεμογεννήτριας, το τμήμα της κάτω από τον πυθμένα ακολουθεί και εκείνο μια παλινδρομική συμπεριφορά. Αυτή χαρακτηρίζεται ανεπαίσθητη, αφού είναι αποσβηνούμενη με αρχικό μέγιστο πλάτος 45 mm, μέγεθος που είναι μικρό σε σχέση με τα 10 m (0.45 %) που είναι η διάμετρος του πυλώνα εκεί.

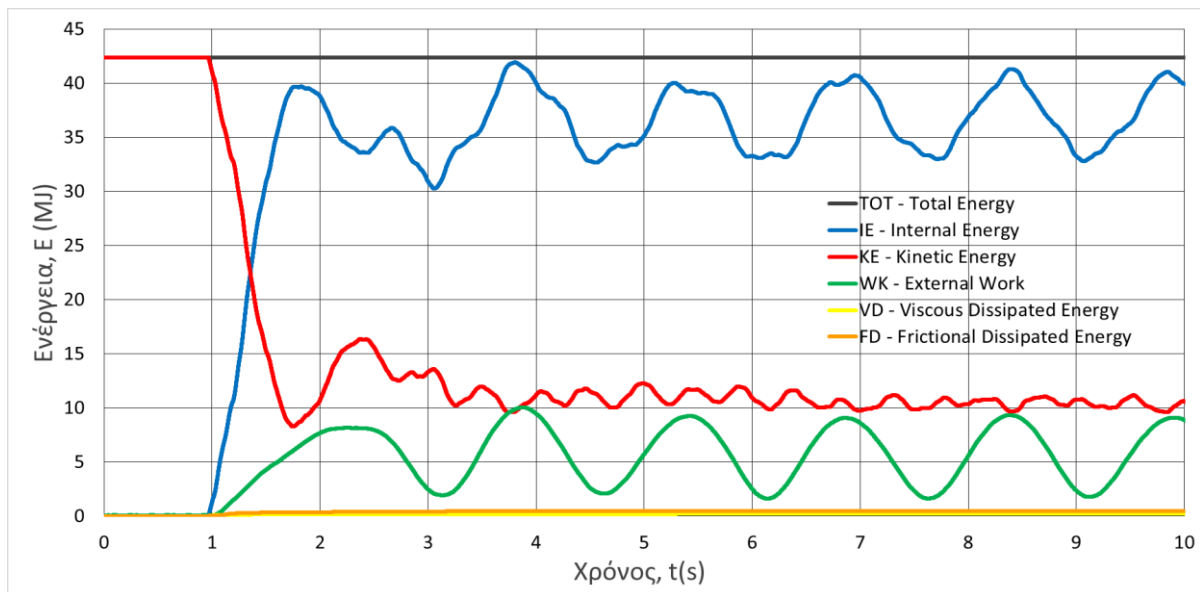


Σχήμα 4.10: Μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις πυθμένα και υπεδάφους

Πέρα όμως από τις οριζόντιες ταλαντώσεις του πυλώνα, αυτός υπόκειται και σε μια κατακόρυφη ταλάντωση. Αυτό συμβαίνει, γιατί όπως αναφέρθηκε στην παρατήρηση στο τέλος του υποκεφαλαίου στην βάση του πυλώνα έχει τοποθετηθεί ένα κατακόρυφο μη γραμμικό ελατήριο για την αντιστάθμιση της βαρύτητας. Συνέπεια αυτού, είναι η αφύσικη, κατακόρυφη ταλάντωση του πυλώνα λόγω της συνεχόμενης επίδρασης της βαρύτητας και των δυνάμεων επαναφοράς του ελατηρίου. Η ταλάντωση αυτή έχει πλάτος 150 mm, το οποίο αν συγκριθεί τόσο με τη διάμετρο της βάσης του πυλώνα, 10 m, όσο και με το συνολικό ύψος της ανεμογεννήτριας, 194 m, γίνεται κατανοητό, πως η ταλάντωση είναι μηδαμινή και πρακτικά δεν επηρεάζει την απόκριση της ανεμογεννήτριας, αφού αποτελεί το 1.5 % και 0.08 % της αντίστοιχης διάστασης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ορισμένα διαγράμματα που περιέχουν τις χρονικές ιστορίες των ενεργειών που διέπουν το μοντέλο. Για την αποτελεσματικότερη προβολή τους, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, τα διαγράμματα διακόπτονται στα πρώτα 10 s της προσομοίωσης. Άλλωστε, η ταλαντωτική συμπεριφορά της γεννήτριας εμφανίζεται και στις καμπύλες των ενεργειών, με αποτέλεσμα να έχουν παρόμοια μορφή και για τα υπόλοιπα 20 s της προσομοίωσης.

Στο Σχήμα 4.11 φαίνεται το διάγραμμα του ισοζυγίου ενέργειας του συστήματος. Σύμφωνα με αυτό, η συνολική ενέργεια του συστήματος (E_{TOT} – Total Energy) πρέπει να παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης με μέγιστη απόκλιση 1%. Αυτή είναι το άθροισμα της εσωτερικής ενέργειας (E_I – Internal Energy), της κινητικής ενέργειας (E_K – Kinetic Energy), των απωλειών ενέργειας λόγω κάθε είδους απόσβεσης (E_V – Viscous Dissipated Energy), των απωλειών ενέργειας λόγω τριβής (E_{FD} – Frictional Dissipated Energy) και του αρνητικού έργου των εξωτερικών δυνάμεων στο σύστημα (E_{WK} – External Work). Όπως διακρίνεται από το διάγραμμα, το ισοζύγιο ενέργειας επιτυγχάνεται καθώς, η συνολική ενέργεια παραμένει πρακτικά σταθερή σε όλη την προσομοίωση. Στην έναρξη της προσομοίωσης, η συνολική ενέργεια του μοντέλου (42.34 MJ) ταυτίζεται με την κινητική του ενέργεια, η οποία μέχρι να συμβεί η σύγκρουση ισούται με την κινητική ενέργεια του πλοίου, αφού αυτό είναι το μοναδικό σώμα που έχει ταχύτητα. Τη στιγμή της σύγκρουσης η κινητική ενέργεια του πλοίου και επομένως και του μοντέλου αρχίζει να μειώνεται, αφού μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια. Το πλοίο επιβραδύνεται με αποτέλεσμα κάποια στιγμή να μηδενίζεται η ταχύτητα και η κινητική του ενέργεια. Την ίδια στιγμή όμως η κινητική ενέργεια του μοντέλου δεν έχει μηδενιστεί αφού η αρχική κινητική ενέργεια του πλοίου, πέρα από εσωτερική ενέργεια της ανεμογεννήτριας, έχει μετατραπεί και σε κινητική της ενέργεια. Στη συνέχεια, η ανεμογεννήτρια ωθεί το πλοίο προς την αντίθετη κατεύθυνση προσδίδοντας του εκ νέου κινητική ενέργεια, γεγονός που εξηγεί και την άνοδο της κινητικής ενέργειας του μοντέλου. Τελικά λόγω της ταλάντωσης της ανεμογεννήτριας, η καμπύλη της κινητικής ενέργειας παρουσιάζει και εκείνη μια αντίστοιχη συμπεριφορά. Αντίθετα, η εσωτερική ενέργεια, που αφορά την παραμόρφωση του μοντέλου, αυξάνεται μετά τη σύγκρουση και τελικά παλινδρομεί λόγω των ελατηρίων και κυρίως λόγω του κατακόρυφου ελατηρίου στην βάση του πυλώνα. Η πορεία της εσωτερικής ενέργειας αναλύεται στην επόμενη παράγραφο. Όσον αφορά το έργο των εξωτερικών δυνάμεων, στο παρόν μοντέλο η μοναδική εξωτερική δύναμη είναι η δύναμη της βαρύτητας. Λόγω αυτής και του κατακόρυφου ελατηρίου που έχει τοποθετηθεί στη βάση της κατασκευής για την αντιστάθμιση της, η ανεμογεννήτρια, όπως σχολιάστηκε και νωρίτερα, υποβάλλεται σε μια ασθενή κατακόρυφη ταλάντωση. Το γινόμενο των κατακόρυφων μετατοπίσεων και της βαρυτικής δύναμης αποτελεί ουσιαστικά και το έργο των εξωτερικών δυνάμεων του μοντέλου. Αφού οι μετατοπίσεις αυτές είναι παλινδρομικής φύσεως, παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και το έργο που επάγεται από αυτές. Τέλος, οι απώλειες λόγω απόσβεσης και τριβής είναι μη μηδενικές αλλά πολύ μικρότερες από τις υπόλοιπες ενέργειες.

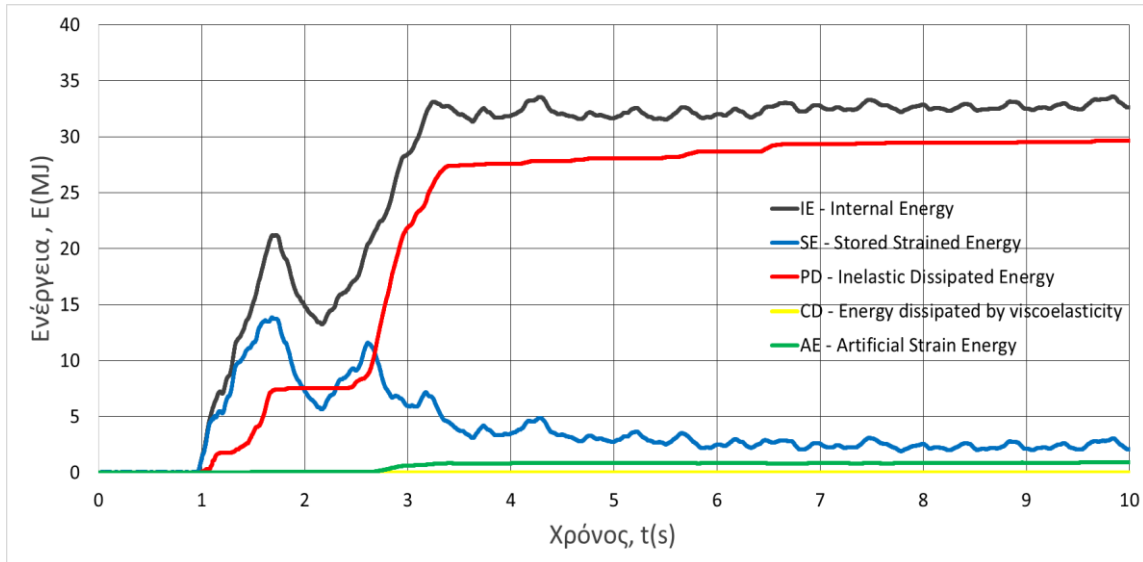


Σχήμα 4.11: Ισοζύγιο Ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η εσωτερική ενέργεια αποτελεί την ενέργεια που αποθηκεύει το σύστημα μέσω των παραμορφώσεων και επομένως, μπορούν να την αποκτήσουν μόνο τα παραμορφώσιμα σώματα και όχι τα πλήρως άκαμπτα, όπως στη συγκεκριμένη περίπτωση το πλοίο. Στο μοντέλο της διπλωματικής εργασίας εσωτερική ενέργεια εμφανίζεται στο μοντέλο της ανεμογεννήτριας, αλλά και στα μη γραμμικά ελατήρια, αφού και αυτά παραμορφώνονται ελαστικά. Στο διάγραμμα του Σχήμα 4.12 παρουσιάζονται οι συνιστώσες της εσωτερικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας, αποκλειστικά. Αποτελείται από την ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης (E_E – Stored Strain Energy), την ανελαστική – πλαστική ενέργεια παραμόρφωσης (E_P – Inelastic Dissipated Energy), τις απώλειες ενέργειας λόγω ιξωδοελαστικότητας ή ερπυσμού (E_{CD} – Energy dissipated by viscoelasticity (or creep)) και την τεχνητή ενέργεια παραμόρφωσης για την αντιμετώπιση του φαινομένου κλειψύδρας (E_A – Artificial Strain Energy).

Από τη στιγμή της σύγκρουσης, η ανεμογεννήτρια αποθηκεύει με μεγάλο ρυθμό ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης, καθώς απομακρύνεται από την αρχική της θέση ισορροπίας. Λόγω αυτής, η ανεμογεννήτρια αποκτά την τάση να επιστρέψει στην αρχική της κατάσταση. Έτσι, αρχίζει να οπισθοχωρεί, ωθώντας παράλληλα το πλοίο προς την αντίθετη φορά από εκείνη της κρούσης, προσδίδοντας του εκ νέου κινητική ενέργεια. Η αρχική αύξηση της ελαστικής ενέργειας οφείλεται και στην αντίσταση που παρουσιάζει η κορυφή της ανεμογεννήτριας στην μετατόπιση κατά την κατεύθυνση της σύγκρουσης, με αποτέλεσμα στη συνέχεια να δρά σαν ελατήριο, του οποίου η επιμήκυνση μειώνεται, ενώ αυξάνεται η ταχύτητα του (αύξηση κινητικής ενέργειας ανεμογεννήτριας). Όσο η κατασκευή επανέρχεται προς την αρχική της θέση, η ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης μειώνεται, αφού μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Έπειτα, επαν αυξάνεται, μέχρι τα 2.5 s, όπου δημιουργείται ο πλαστικός κόμβος, γεγονός που οδηγεί στη σταδιακή μείωση της. Από την άλλη η ανελαστική ενέργεια παραμόρφωσης αυξάνεται, αρχικά, λόγω των πλαστικών παραμορφώσεων στον πυλώνα στη περιοχή της σύγκρουσης και σταθεροποιείται όταν μηδενίζεται η ταχύτητα του πλοίου. Με την έναρξη της δημιουργίας του κόμβου, αυξάνεται ραγδαία μέχρι και την ολοκλήρωση της

μορφής του. Από κει και πέρα, σταθεροποιείται με αργό ρυθμό φτάνοντας τα 30 MJ. Η εξέλιξη της ελαστικής και της ανελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την χρονική ιστορία της συνολικής εσωτερικής ενέργειας. Άλλωστε, οι απώλειες ενέργειας λόγω ιξωδοελαστικότητας είναι μηδενικές και η τεχνητή ενέργεια παραμόρφωσης λαμβάνει μικρές τιμές.

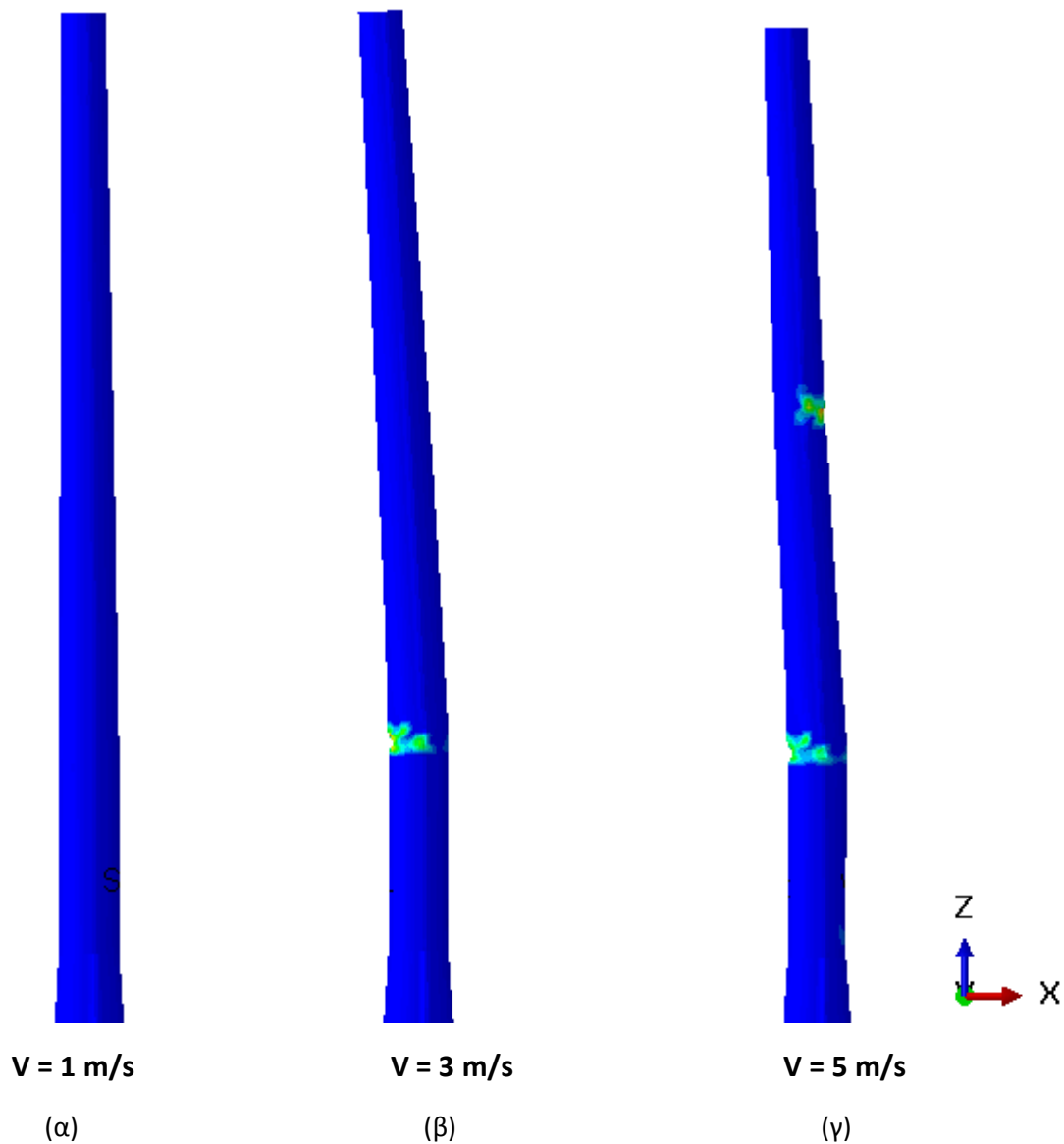


Σχήμα 4.12: Συνιστώσες εσωτερικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας

4.3.2 Σύγκριση Σεναρίων Str_1_0_0, Str_3_0_0, Str_5_0_0

Μετά την αναλυτική περιγραφή του σεναρίου Str_3_0_0, όπου το πλοίο συγκρούεται στην ανεμογεννήτρια με ταχύτητα 3 m/s, και την κατανόηση του φαινομένου και της εξέλιξης της σύγκρουσης, ο γράφων μπορεί να προχωρήσει στη σύγκριση του με τα άλλα δύο σενάρια, Str_1_0_0 και Str_5_0_0, στα οποία το πλοίο έχει ταχύτητες 1 m/s και 5 m/s αντίστοιχα.

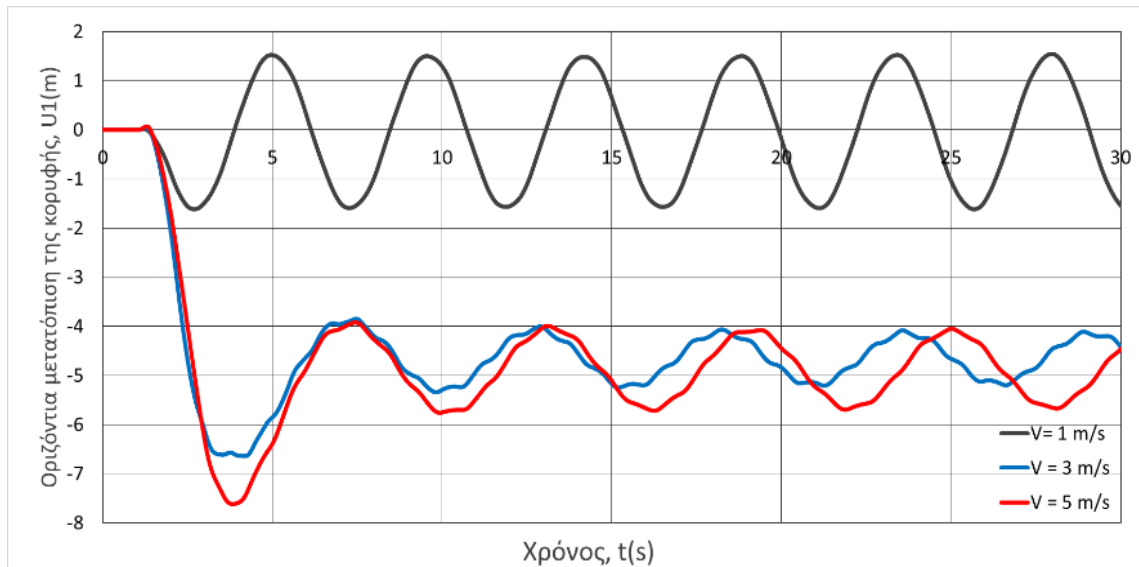
Αρχικά, στο Σχήμα 4.14 παρατίθενται ορισμένες εικόνες του παραμορφωμένου σχήματος της ανεμογεννήτριας για τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες του πλοίου. Για ταχύτητα πλοίου ίση με 1 m/s, η δομή της κατασκευής δεν υπόκειται σε μεγάλες και καταστροφικές παραμορφώσεις και δεν δημιουργείται πλαστικός κόμβος, όπως στις άλλες δύο περιπτώσεις. Η μόνη περιορισμένη ζημιά που εντοπίζεται, βρίσκεται στην περιοχή της σύγκρουσης. Η συγκεκριμένη βλάβη όμως δεν θέτει σε κίνδυνο την ευστάθεια της κατασκευής (Σχήμα 4.14-α). Για ταχύτητα πλοίου 3 m/s, είναι γνωστό από την προηγούμενη ανάλυση, πως δημιουργείται πλαστικός κόμβος στην ένωση μεταξύ πύργου και πυλώνα, με αποτέλεσμα ο πύργος να λυγίζει κατά τη φορά της σύγκρουσης (Σχήμα 4.14-β). Ο ίδιος, αλλά πιο εκτεταμένος, πλαστικός κόμβος συναντάται και στο σενάριο όπου το πλοίο έχει ταχύτητα 5 m/s. Όμως, πέρα από αυτόν, ένας επιπλέον πλαστικός κόμβος δημιουργείται στον πύργο. Βρίσκεται περίπου 65 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και εμφανίζεται στη μεριά του πύργου που «βλέπει» το πλοίο. Σχηματίζεται κατά τη διάρκεια του πρώτου δευτερολέπτου της σύγκρουσης, όσο η κορυφή της ανεμογεννήτριας αντιστέκεται λόγω αδράνειας στην μετατόπιση. Αποτέλεσμα του σχηματισμού του είναι το τμήμα του πύργου πάνω από τον κόμβο να λυγίσει αρχικά προς τη μεριά που βρίσκεται το πλοίο. Στη συνέχεια, όμως, καθώς το πλοίο επιβραδύνεται και αρχίζει να οπισθοχωρεί, η κορυφή του πύργου μετατοπίζεται κατά τη φορά της σύγκρουσης, με συνέπεια ο αρχικός λυγισμός να περιοριστεί. Τελικά, στο τρίτο δευτερόλεπτο της σύγκρουσης σχηματίζεται ο δεύτερος κόμβος στην ένωση πύργου – πυλώνα και συνολικά ο πύργος λυγίζει κατά τη φορά της σύγκρουσης (Σχήμα 4.14-γ). Γίνεται εύκολα αντιληπτό, πως στις περιπτώσεις των ταχυτήτων 3 m/s και 5 m/s, η ανεμογεννήτρια έχει υποστεί βλάβη της δομικής της ακεραιότητας. Βρίσκεται σε ιδιαίτερως ασταθή κατάσταση και ένας δυνατός άνεμος ενδεχομένως να την ανατρέψει.



Σχήμα 4.14: Παραμορφωμένο σχήμα ανεμογεννήτριας για ταχύτητες πλοίου (α) 1 m/s, (β) 3 m/s, (γ) 5 m/s

Λόγω της σύγκρουσης, η κορυφή του πύργου, ταλαντώνεται και για τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες, με διαφορετικό όμως τρόπο στην κάθε μια. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.15, για $V = 1 \text{ m/s}$, η ταλάντωση του ατρακτίδιου και της φτερωτής, γίνεται πρακτικά γύρω από την αρχική θέση ισορροπίας, αφού δεν έχει δημιουργηθεί πλαστικός κόμβος, ώστε να την μεταβάλλει. Έχει πλάτος 1.5 m και περίοδο 4.6 s. Η ταλάντωση αυτή ακολουθεί τη μορφή της 1^{ης} ιδιομορφής, έχοντας περίοδο κοντά στην ιδιοπερίοδο των 4.3 s (Πίνακας 4.1), για την οποία συμβαίνει ο συντονισμός της κατασκευής. Δηλαδή, το πλάτος απειρίζεται και η κατασκευή καταρρέει. Αντίθετα, για $V = 3 \text{ m/s}$ και $V = 5 \text{ m/s}$, η κορυφή ταλαντώνεται μακριά από την αρχική θέση ισορροπίας της, λόγω των πλαστικών κόμβων που έχουν σχηματιστεί στη βάση του πύργου. Για $V = 5 \text{ m/s}$, η κορυφή παρουσιάζει μέγιστη μετατόπιση ίση 7.62 m, που είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μέγιστη μετατόπιση για $V = 3 \text{ m/s}$ (6.64 m). Ενώ, λόγω πιο εκτεταμένου πλαστικού κόμβου, η ταλάντωση για $V = 5 \text{ m/s}$ έχει μεγαλύτερη περίοδο ($T = 6 \text{ s}$), από την περίοδο της ταλάντωσης για $V = 3 \text{ m/s}$ ($T = 5.5 \text{ s}$). Στον Πίνακας 4.2

παρουσιάζονται οι μέγιστες οριζόντιες μετατοπίσεις και επιταχύνσεις της κορυφής. Η αξιολόγηση και η καταγραφή των επιταχύνσεων της κορυφής είναι αναγκαία, καθώς οι μεγάλες επιταχύνσεις σε αυτό το σημείο εγκυμονούν κινδύνους για την γεννήτρια και την φτερωτή που βρίσκονται εκεί. Από τις τιμές του πίνακα, γίνεται κατανοητό πως για τις δύο μεγαλύτερες ταχύτητες πλοίου διατρέχει μεγάλος κίνδυνος βλάβης των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

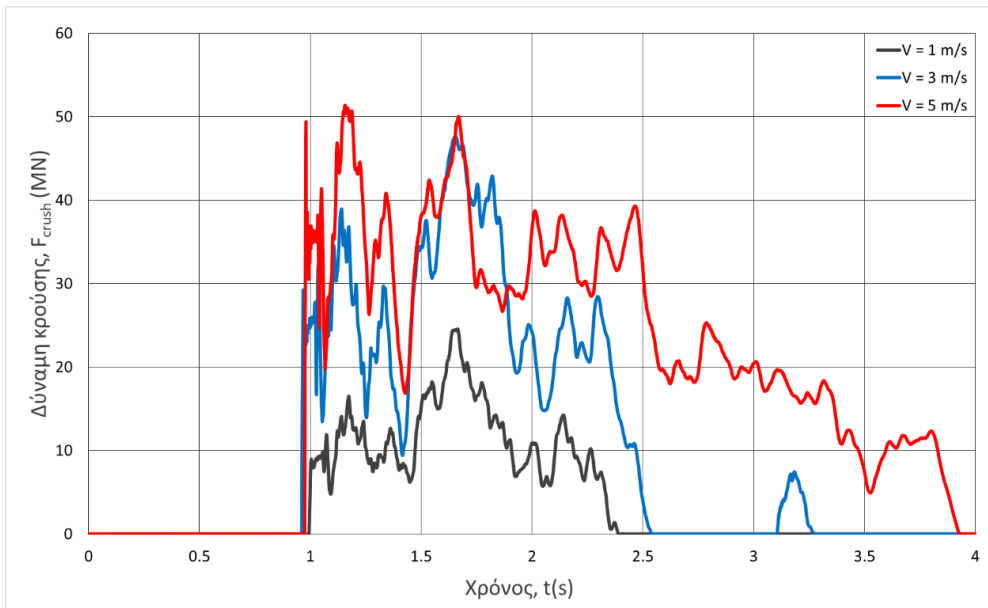


Σχήμα 4.15: Χρονική ιστορία οριζόντιας μετατόπισης κορυφής ανεμογεννήτριας για τις τρεις ταχύτητες του πλοίου

Πίνακας 4.2: Μέγιστη επιτάχυνση και μετατόπιση κορυφής για τις διαφορετικές ταχύτητες πλοίου

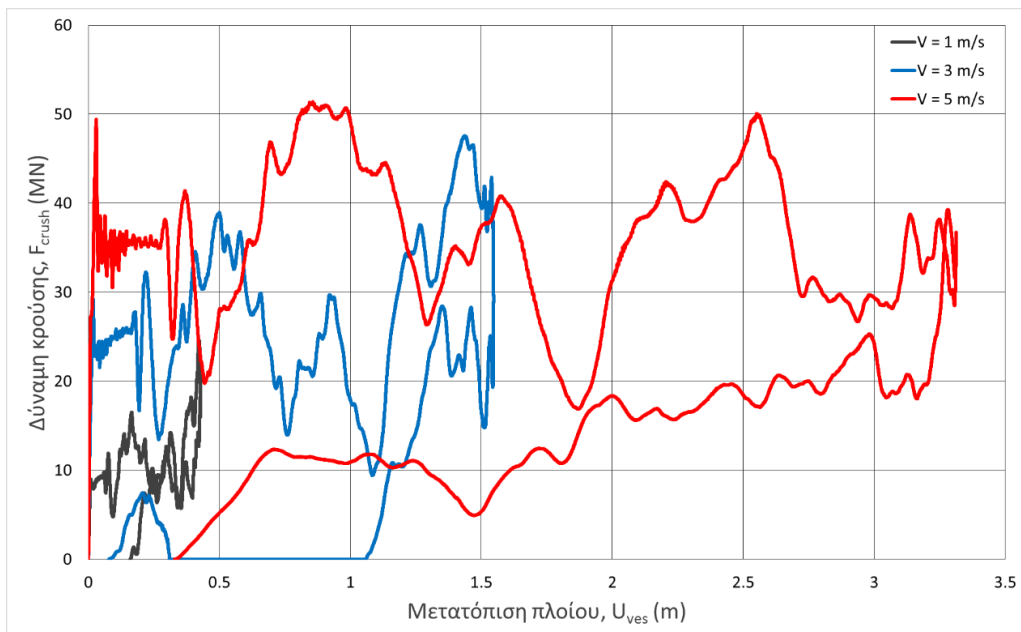
Ταχύτητα πλοίου(m/s)	Μέγιστη επιτάχυνση κορυφής (m/s ²)	Μέγιστη μετατόπιση κορυφής (m)
1	8.55	1.62
3	14.82	6.64
5	15.8	7.62

Στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η χρονική ιστορία της δύναμης κρούσης για τις τρεις ταχύτητες του πλοίου. Το διάστημα που η δύναμη κρούσης είναι διαφορετική του μηδενός αντιστοιχεί στο χρόνο που το πλοίο βρίσκεται σε επαφή με την ανεμογεννήτρια. Από το διάγραμμα φαίνεται πως για $V = 1 \text{ m/s}$, η σύγκρουση διαρκεί μόλις 1.39 s και η δύναμη κρούσης έχει μέγιστη τιμή ίση με 24.5 MN. Για $V = 3 \text{ m/s}$, συμβαίνουν δύο κρούσεις του πλοίου με την ανεμογεννήτρια. Η πρώτη και μεγαλύτερη κρούση διαρκεί 1.5 s και παρουσιάζει μέγιστη τιμή ίση με 47 MN, ενώ η δεύτερη είναι στιγμιαία και έχει μέγιστη τιμή τα 8 MN. Τέλος, για τη μέγιστη ταχύτητα πλοίου $V = 5 \text{ m/s}$, παρατηρείται μια ενιαία σύγκρουση, μεγάλης διάρκειας, σχεδόν 4 s, που έχει μέγιστη τιμή δύναμης τα 51 MN.



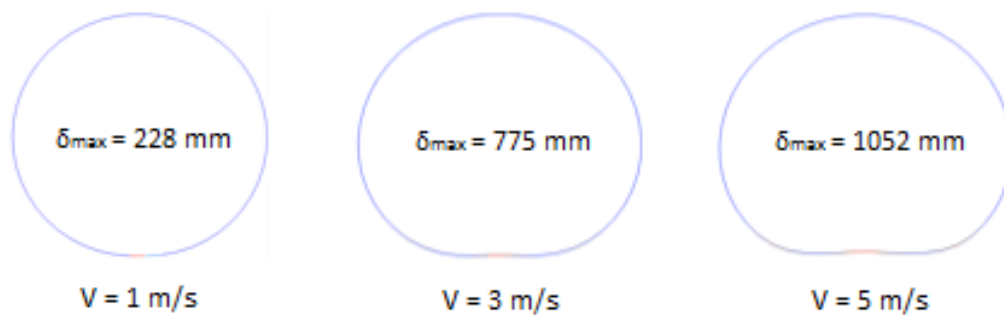
Σχήμα 4.16: Χρονική ιστορία της δύναμης κρούσης για τις τρεις ταχύτητες του πλοίου

Δίνεται επίσης το Σχήμα 4.17 στο οποίο προβάλλονται οι καμπύλες της δύναμης κρούσης συναρτήσει, αυτή τη φορά, της οριζόντιας μετατόπισης του πλοίου κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης. Είναι εμφανές πως αύξηση της ταχύτητας του πλοίου συνεπάγεται μεγαλύτερο χρόνο μέχρι τον μηδενισμό της και επομένως μεγαλύτερη οριζόντια μετατόπιση του πλοίου μέχρι την οπισθοχώρηση του. Συγκεκριμένα, για $V = 1 \text{ m/s}$, το πλοίο μετατοπίζεται κατά μόλις 0.42 m , ενώ για $V = 5 \text{ m/s}$ το πλοίο διανύει έως και 3.3 m μέχρι να μηδενιστεί η ταχύτητα του. Για $V = 3 \text{ m/s}$, αναφέρθηκε νωρίτερα, πως το πλοίο κινείται κατά την κατεύθυνση της κρούσης και όντας σε επαφή με την ανεμογεννήτρια για 1.55 m .

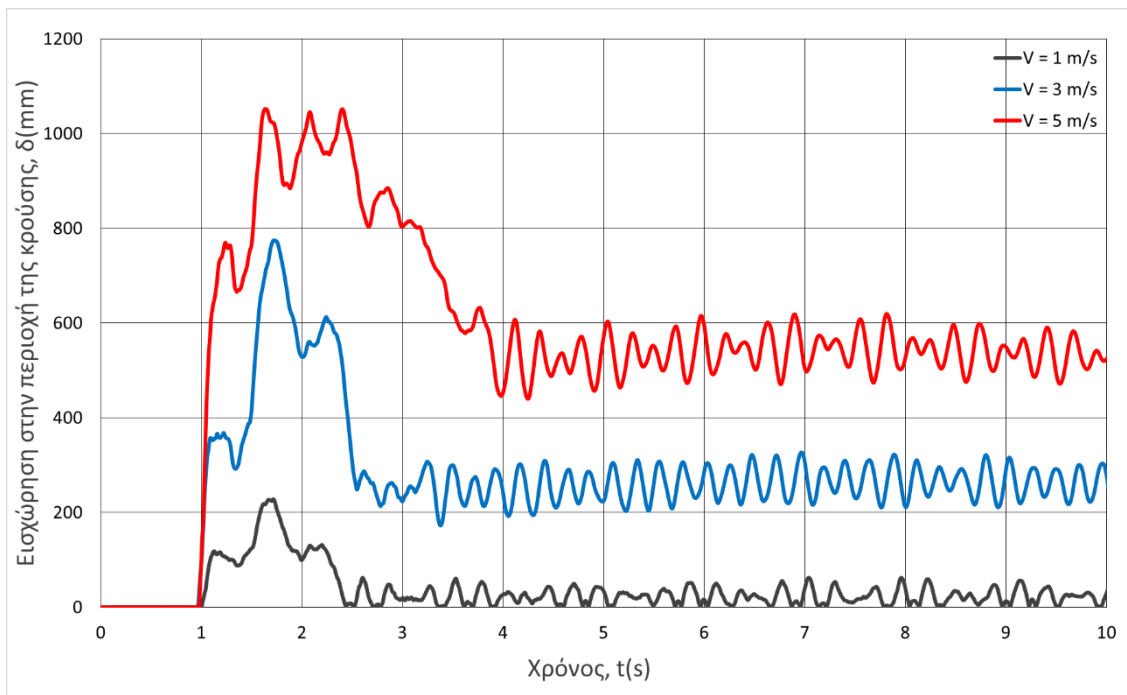


Σχήμα 4.17: Καμπύλη δύναμης κρούσης συναρτήσει της μετατόπισης του πλοίου για τις τρεις ταχύτητες πλοίου

Κατά τη διάρκεια της σύγκρουσης, το πλοίο εισχωρεί στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας προκαλώντας του ένα μόνιμο βαθούλωμα. Οι καμπύλες αυτής της εισχώρησης, συναρτήσει του χρόνου, για τις τρεις διαφορετικές ταχύτητες του πλοίου προβάλλονται στο Σχήμα 4.19. Είναι φανερό πως με αύξηση της ταχύτητας, η εισχώρηση στον πυλώνα είναι μεγαλύτερη καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επίσης, και στις τρεις περιπτώσεις ταχυτήτων, η βύθιση του ελάσματος του πυλώνα μεγιστοποιείται, λίγο πριν το πλοίο αρχίσει να οπισθοχωρεί, αφού πρώτα έχει μηδενίσει την ταχύτητα του. Από κει και πέρα, η τιμή της μειώνεται, αλλά δεν μηδενίζεται πλήρως με αποτέλεσμα, μια μόνιμη παραμόρφωση να παραμένει στον πυλώνα. Οι ταλαντώσεις που παρατηρούνται στην τιμή της εισχώρησης από το πέρας της σύγκρουσης και έπειτα, οφείλονται στις ταλαντώσεις που υφίσταται ο πυλώνας και τα τοιχώματά του. Στο Σχήμα 4.18 φαίνονται οι οριζόντιες κατόψεις του πυλώνα στο σημείο και στη στιγμή της μέγιστης εισχώρησης



Σχήμα 4.18: Οριζόντιες κατόψεις του πυλώνα στο σημείο και στη στιγμή της μέγιστης εισχώρησης



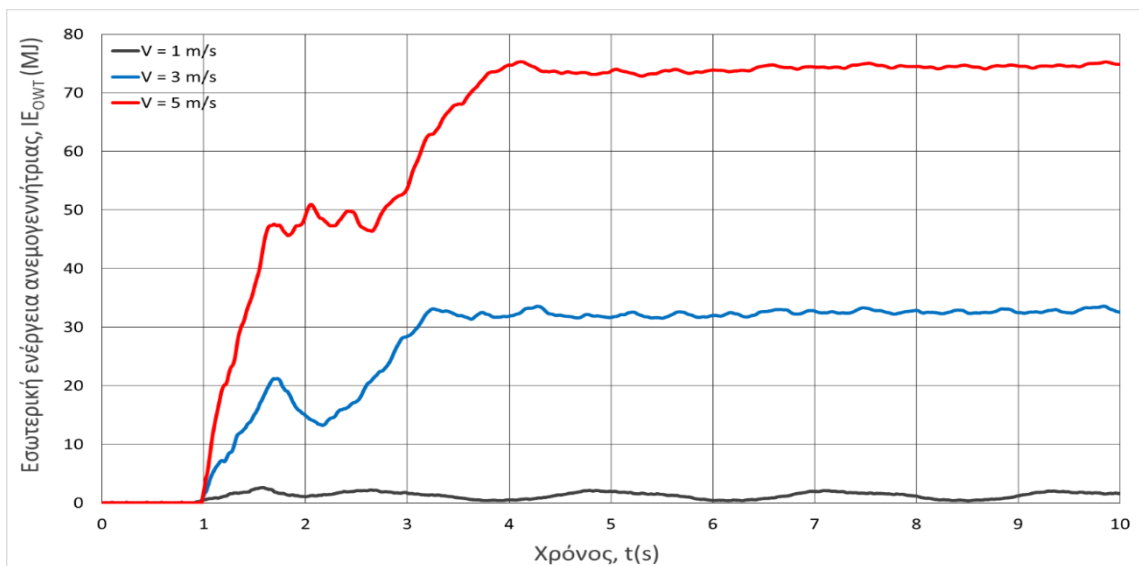
Σχήμα 4.19: Χρονική ιστορία εισχώρησης στον πυλώνα για τρεις ταχύτητες του πλοίου

Από τη στιγμή που ο πυθμένας έχει θεωρηθεί εύκαμπτος μέσω των μη γραμμικών ελατηρίων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση του, ένα δευτερεύον αποτέλεσμα της σύγκρουσης είναι η οριζόντια μετατόπιση του. Η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση του πυθμένα κατά τη διεύθυνση της σύγκρουσης και ανάλογα την ταχύτητα σύγκρουσης του πλοίου, φαίνεται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση πυθμένα για τις διαφορετικές ταχύτητες πλοίου

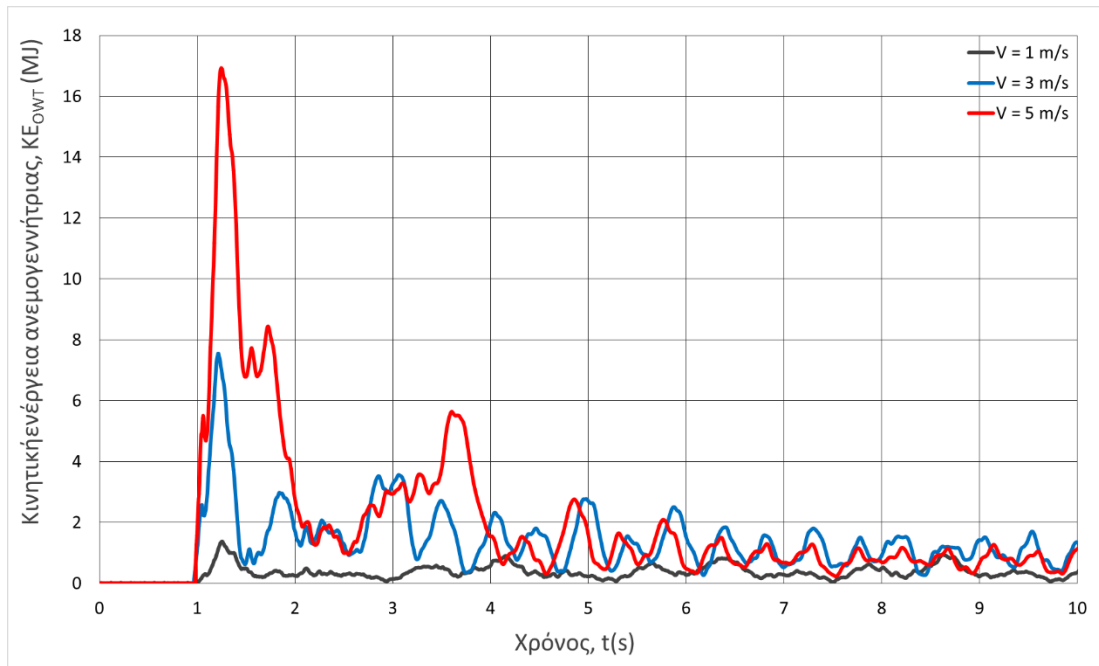
Ταχύτητα πλοίου (m/s)	Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση πυθμένα (mm)
1	90.7
3	331
5	828

Ο έλεγχος της επίδρασης της ταχύτητας του πλοίου στη σύγκρουση, χωρίς την ύπαρξη φορτίων ανέμου, ολοκληρώνεται με την παρουσίαση της εσωτερικής και της κινητικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας, για κάθε ταχύτητα πλοίου. Ξεκινώντας από την εσωτερική ενέργεια, για $V = 1$ m/s, είναι φάνερο, από το Σχήμα 4.20, πως η εσωτερική ενέργεια του πυλώνα είναι χαμηλή, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς οι παραμορφώσεις τις κατασκευής είναι ελάχιστες και περιορίζονται κυρίως στις πλαστικές παραμορφώσεις στην περιοχή της σύγκρουσης. Αντίθετα, για $V = 3$ m/s και $V = 5$ m/s, όπου δημιουργούνται πλαστικοί κόμβοι και έντονες πλαστικές παραμορφώσεις, η εσωτερική ενέργεια της κατασκευής είναι αυξημένη, φτάνοντας μέχρι τα 32 MJ και 75 MJ αντίστοιχα. Ειδικά για τη μέγιστη ταχύτητα των 5 m/s, παρατηρείται μια απότομη αύξηση της εσωτερικής ενέργειας στο πρώτο και στο τρίτο δευτερόλεπτο της σύγκρουσης, καθώς σε αυτά τα χρονικά διαστήματα σχηματίζονται οι δύο πλαστικοί κόμβοι στην κατασκευή.



Σχήμα 4.20: Χρονική ιστορία εσωτερικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας για κάθε ταχύτητα πλοίου

Όσον αφορά την κινητική ενέργεια που απορροφά η ανεμογεννήτρια από το πλοίο, είναι εμφανές από το Σχήμα 4.21, πως αυτή αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του πλοίου. Έτσι, παρουσιάζει μέγιστες τιμές ίσες με 1.38 MJ, 7.55 MJ, 16.93 MJ για $V = 1$ m/s, $V = 3$ m/s και $V = 5$ m/s αντίστοιχα. Έπειτα, η κινητική ενέργεια μειώνεται και επαναυξάνεται όταν σχηματίζονται οι κόμβοι στις 2 από τις 3 περιπτώσεις. Στο τέλος, αποκτά μια ταλαντωτική συμπεριφορά, λόγω και της ταλάντωσης της ίδιας της ανεμογεννήτριας.

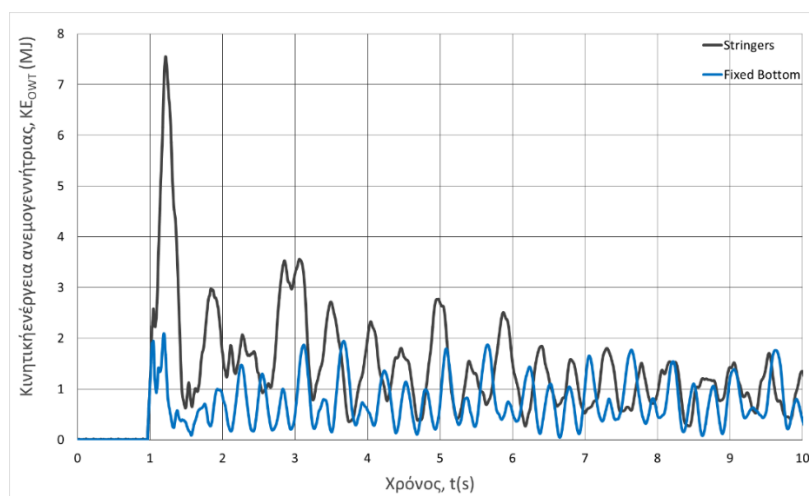


Σχήμα 4.21: Χρονική ιστορία κινητικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας για κάθε ταχύτητα πλοίου

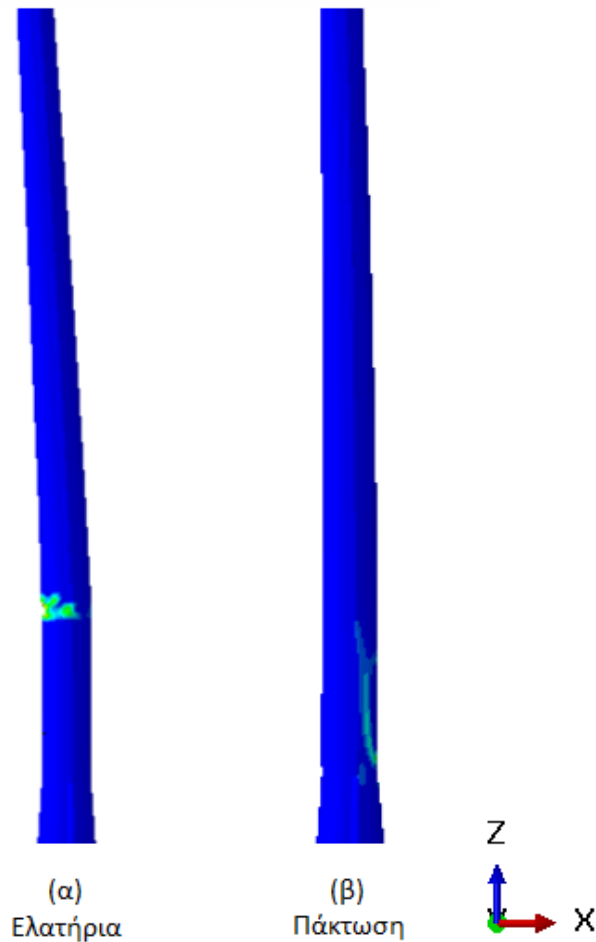
4.4 Επίδραση της ευκαμψίας του πυθμένα

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα μελετηθεί η επίδραση στην απόκριση της ανεμογεννήτριας της οριακής συνθήκης που έχει θεωρηθεί στον πυθμένα. Οι δύο περιπτώσεις οριακών συνθηκών που εξετάζονται είναι η μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης υπεδάφους – πυλώνα μέσω μη γραμμικών ελατηρίων, όπως αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 3.6, και η πάκτωση του πυλώνα, για όλους τους βαθμούς ελευθερίας, στο επίπεδο του πυθμένα. Στην πρώτη περίπτωση λαμβάνεται υπ' όψιν η ευκαμψία του πυθμένα, ενώ στην δεύτερη θεωρείται πλήρως άκαμπτος. Για τον σκοπό αυτό, τα σενάρια που συγκρίνονται είναι το Str_3_0_0 και το Fix_3_0_0. Το πλοίο, και στα δύο σενάρια, συγκρούεται με την ανεμογεννήτρια με ταχύτητα 3 m/s, ενώ δεν υπάρχουν φορτία λόγω του ανέμου.

Στο Σχήμα 4.23 φαίνεται το παραμορφωμένο σχήμα της ανεμογεννήτριας για την περίπτωση των ελατηρίων (Σχήμα 4.23-α) και της πάκτωσης στον πυθμένα (Σχήμα 4.23-β). Η βασική διαφορά που εντοπίζεται είναι το γεγονός πως στην περίπτωση της πάκτωσης δεν σχηματίζεται πλαστικός κόμβος στην ένωση πύργου – πυλώνα. Λόγω της πάκτωσης, η ελευθερία κινήσεων της ανεμογεννήτριας είναι περιορισμένη, σε σχέση με την περίπτωση των ελατηρίων. Παράλληλα, το μήκος του μοντέλου της ανεμογεννήτριας είναι κατά 18% μικρότερο, με αποτέλεσμα η κατασκευή να παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκαμψία. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα του Σχήμα 4.22, η κινητική ενέργεια της ανεμογεννήτριας, που είναι πακτωμένη στον πυθμένα, υπολείπεται εκείνης όπου προσομοιώνεται η αλληλεπίδραση της με το υπέδαφος. Συνεπώς, η κορυφή της πρώτης αναπτύσσει χαμηλότερες επιταχύνσεις (a_{max} : 10.27 m/s² έναντι 14.82 m/s²), ταχύτητες (v_{max} : 1.95 m/s έναντι 5.8 m/s) και μετατοπίσεις (u_{max} : 1.28 m έναντι 4.7 m) από την κορυφή της δεύτερης πριν την δημιουργία του κόμβου. Αυτή η ανισότητα μεταφράζεται σε αντίστοιχη ανισότητα στις ροπές κάμψης στην ένωση πυλώνα – πύργου για τους δύο τύπους ανεμογεννήτριας, τη στιγμή της μέγιστης μετατόπισης των κορυφών τους. Έτσι, η ροπή κάμψης των 288 MNm δεν επαρκεί για την δημιουργία πλαστικού κόμβου στην πακτωμένη ανεμογεννήτρια, σε αντίθεση με τα 490 MNm που ήταν η ροπή κάμψης τη στιγμή της έναρξης σχηματισμού του κόμβου στην ανεμογεννήτρια με τα ελατήρια στον πυθμένα.

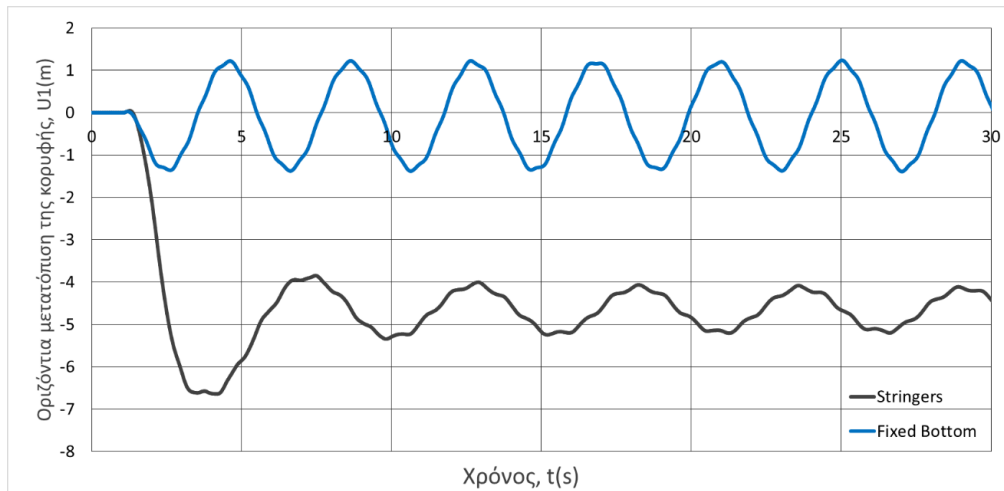


Σχήμα 4.22: Κινητική ενέργεια ανεμογεννήτριας για τους δύο τύπους οριακής συνθήκης στον πυθμένα ($V = 3$ m/s)



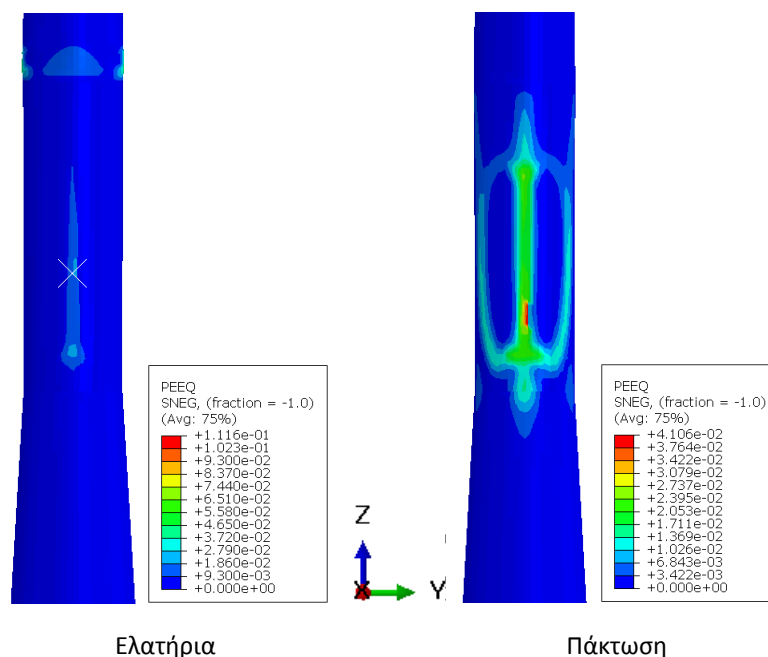
Σχήμα 4.23: Παραμορφωμένο σχήμα ανεμογεννήτριας για (α) ελατήρια, (β) πάκτωση στον πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$)

Αφού δεν δημιουργείται κόμβος ώστε να λυγίσει προς την μία κατεύθυνση ο πύργος της ανεμογεννήτριας, η οριζόντια ταλάντωση της κορυφής εκδηλώνεται πρακτικά γύρω από την αρχική θέση ισορροπίας της. Η χρονική ιστορία αυτής της ταλάντωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.24, μαζί με την ταλάντωση της ανεμογεννήτριας με ελατήρια στον πυθμένα. Η νέα ταλάντωση έχει περίοδο 4.12 s και πλάτος 1.3 m. Η μορφή της προσεγγίζει εκείνη της 1^{ης} ιδιομορφής και έχει περίοδο κοντά στην ιδιοπερίοδο της κατασκευής όταν είναι πακτωμένη στο έδαφος, που ισούται με 3.96 s (Πίνακας 4.1).

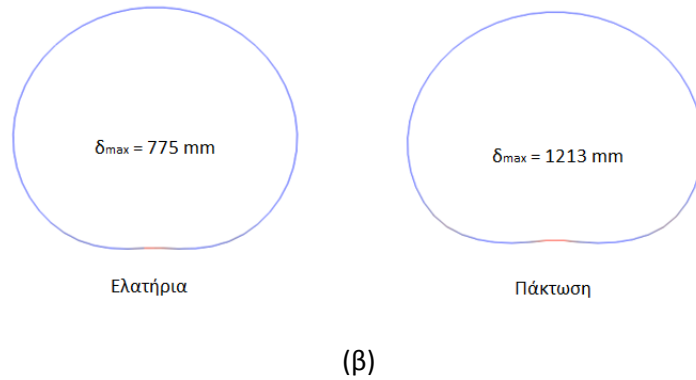


Σχήμα 4.24: Οριζόντια μετατόπιση της κορυφής συναρτήσει του χρόνου για τους δύο τύπους οριακής συνθήκης στον πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$)

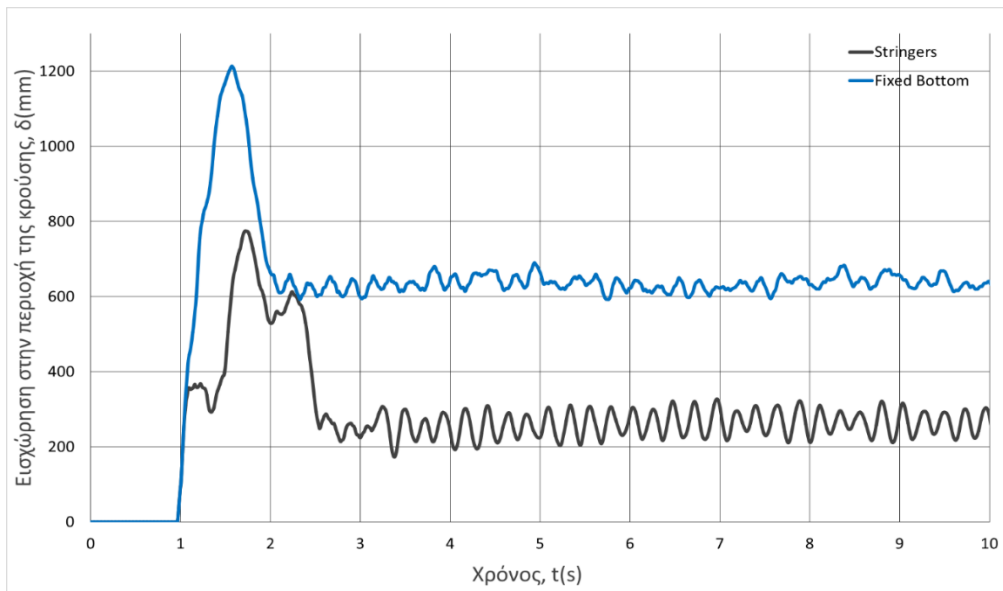
Η μη δημιουργία πλαστικού κόμβου σημαίνει πως η μεγαλύτερη βλάβη της δομής της πακτωμένης εγκατάστασης, συγκεντρώνεται στην περιοχή του πυλώνα που έχει συγκρουστεί με το πλοίο. Εκεί, έχουν αναπτυχθεί μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις, η οποίες είναι εκτενέστερες σε σχέση με το μοντέλο που λαμβάνει υπόψιν την ευκαμψία του υπεδάφους. Αυτό αποδεικνύεται από το Σχήμα 4.25-α όπου παρουσιάζεται η ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή της σύγκρουσης στο τέλος της προσομοίωσης. Παράλληλα, λόγω των έντονων παραμορφώσεων εκεί, η σχετική εισχώρηση των τοιχωμάτων του πυλώνα λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές, καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, όταν ο πυθμένα θεωρείται άκαμπτος (Σχήμα 4.26). Μάλιστα, στο ίδιο σενάριο, η μέγιστη εισχώρηση είναι κατα μισό μέτρο βαθύτερη (Σχήμα 4.25-β).



(α)

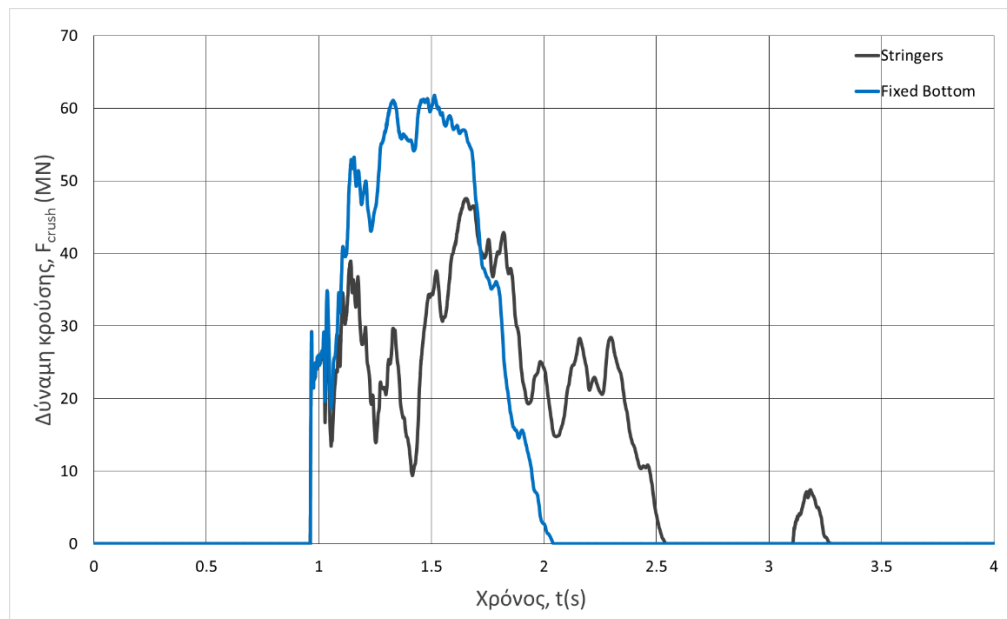


Σχήμα 4.25: (α) Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή της σύγκρουσης στο τέλος της προσομοίωσης (β) Μέγιστη σχετική εισχώρηση τοιχωμάτων πυλώνα ($V = 3 \text{ m/s}$)



Σχήμα 4.26: Χρονική ιστορία σχετικής εισχώρησης τοιχωμάτων πυλώνα για τους δύο τύπους οριακής συνθήκης στον πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$)

Ο περιορισμός της ελευθερίας κινήσεων του πυλώνα της ανεμογεννήτριας, λόγω της πάκτωσης, είναι η βασική αιτία της σημαντικής παραμόρφωσης που συμβαίνει στην περιοχή της σύγκρουσης με το πλοίο. Η αδυναμία οριζόντιας μετατόπισης της ανεμογεννήτριας σημαίνει πως η εγκατάσταση προσπαθεί να επιβραδύνει το πλοίο χωρίς η ίδια ταυτόχρονα να μπορεί να μετακινηθεί με άνεση κατά τη φορά της σύγκρουσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η επαφή μεταξύ των δύο σωμάτων να είναι εντονότερη, που συνεπάγεται στην ανάπτυξη μεγαλύτερων δυνάμεων κρούσης μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.27, όταν ο πυθμένας θεωρείται πλήρως άκαμπτος η μέγιστη δύναμη κρούσης ισούται με 61 MN, ενώ όταν λαμβάνεται υπ' όψιν η ευκαμψία του υπεδάφους ισούται με 47 MN. Συνεπώς, οι μεγαλύτερες δυνάμεις στην περιοχή της κρούσης προκαλούν μεγαλύτερες παραμορφώσεις εκεί.



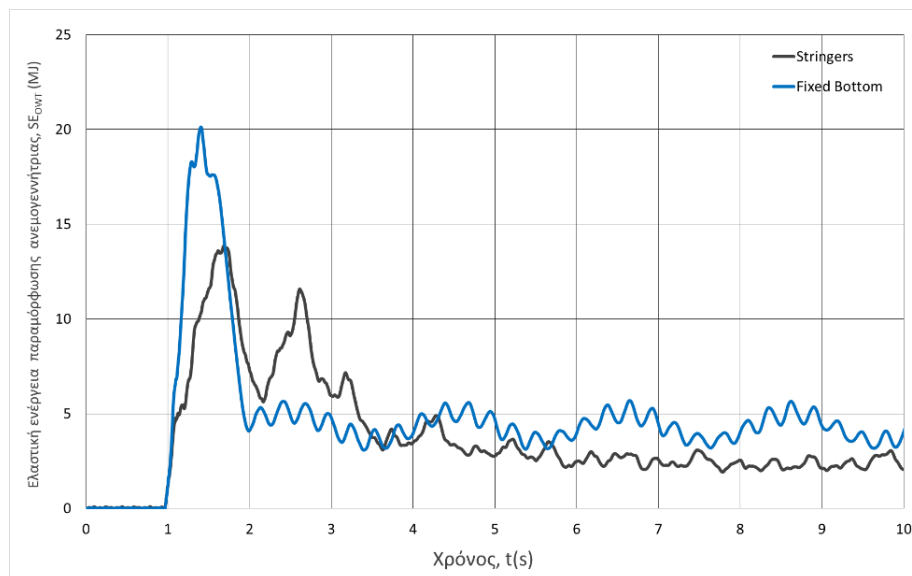
Σχήμα 4.27: Χρονική ιστορία της δύναμης κρούσης για τα σενάρια πάκτωσης και ελατηρίων ($V = 3$ m/s)

Η εξέλιξη της συγκεκριμένης σύγκρουσης μπορεί να ερμηνευθεί και μέσα από τον μηχανισμό διάχυσης της ενέργειας της σύγκρουσης και ειδικότερα μέσω της εσωτερικής ενέργειας του πυλώνα. Όταν συμβαίνει η σύγκρουση, η κινητική ενέργεια του πλοίου μετατρέπεται σταδιακά σε κινητική και εσωτερική ενέργεια του πυλώνα. Εφόσον, όμως, ο πυλώνας είναι πακτωμένος, δεν μπορεί να αναπτύξει μεγάλες ταχύτητες ώστε να απορροφήσει μεγάλο ποσοστό της ενέργειας κρούσης ως κινητική ενέργεια. Οπότε, στον αντίποδα, αυξάνεται η εσωτερική του ενέργεια. Αυτή, όπως, αναλύθηκε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, αποτελείται κυρίως από την ελαστική (Strain Energy - SE) και την ανελαστική – πλαστική ενέργεια παραμόρφωσης (Inelastic Dissipated Energy - PD). Η μεγάλη αρχική αύξηση της ελαστικής ενέργειας, έως τα 20.12 MJ, έχει σαν άμεση συνέπεια την γρήγορη επαναφορά της ανεμογεννήτριας προς την αρχική της θέση. Έτσι, η ανεμογεννήτρια ωθεί γρηγορότερα το πλοίο προς τα πίσω και γι' αυτόν τον λόγο η διάρκεια της σύγκρουσης είναι κατά μισό δευτερόλεπτο μικρότερη από, όταν μοντελοποιείται η αλληλεπίδραση του πυλώνα με το υπέδαφος. Αυτό φαίνεται και πάλι από τη καμπύλη της δύναμης κρούσης συναρτήσει του χρόνου (Σχήμα 4.27). Επιπλέον, οι μεγαλύτερες τιμές ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης μετά τη σύγκρουση για το σενάριο της πάκτωσης, εξηγούν τις ταλαντώσεις μεγαλύτερου πλάτους της κορυφής της ανεμογεννήτριας σε σχέση με το σενάριο των ελατηρίων. Στο Σχήμα 4.28 παρουσιάζεται η χρονική ιστορία της ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης για τα δύο σενάρια οριακών συνθηκών.

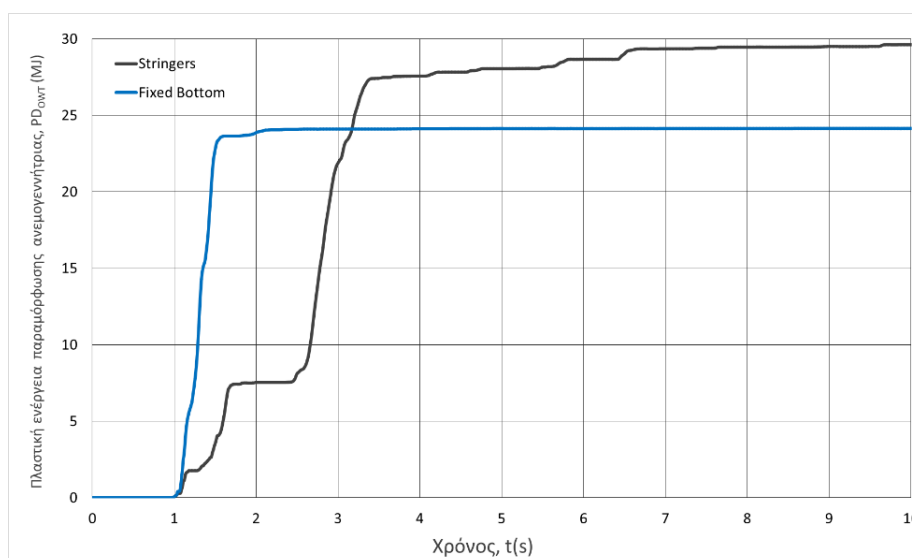
Σχετικά με την πλαστική ενέργεια παραμόρφωσης (Σχήμα 4.29), αυτή εκδηλώνεται μέσω των έντονων πλαστικών παραμορφώσεων στο σημείο της σύγκρουσης, αποκτώντας μια σταθερή τιμή (24.1 MJ), η οποία δεν αυξάνεται εκ νέου, αφού δεν δημιουργείται κάποιος πλαστικός κόμβος στην κατασκευή. Αντίθετα, όταν λαμβάνεται υπόψιν η ευκαμψία του πυλώνα, παρόλο που η ανελαστική ενέργεια στην αρχή παίρνει μικρές τιμές λόγω της περιορισμένης πλαστικής παραμόρφωσης του πυλώνα στη ζώνη σύγκρουσης, στη συνέχεια, αυξάνεται ραγδαία λόγω του σχηματισμού του πλαστικού κόμβου. Τελικά, μάλιστα,

ξεπερνάει την τιμή της ανελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης για την περίπτωση του πακτωμένου πυθμένα.

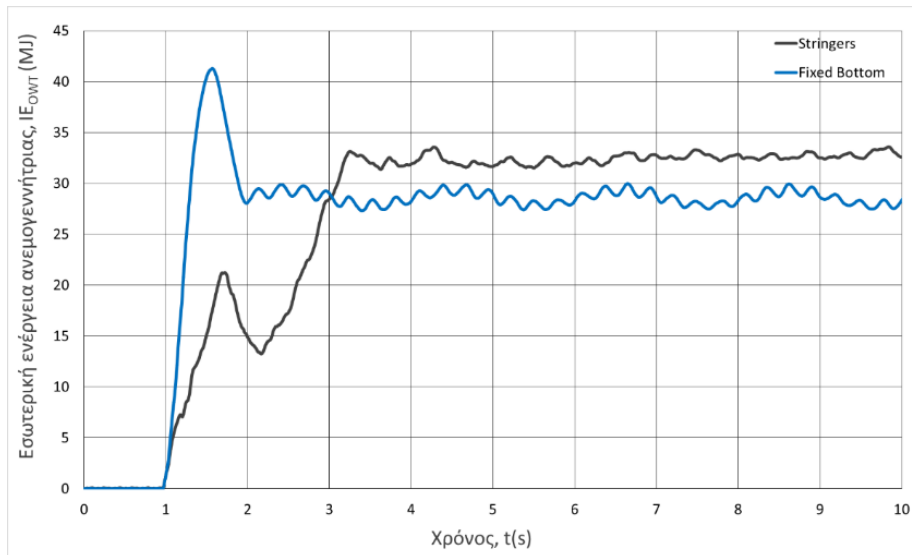
Αυτές οι δύο βασικότερες συνιστώσες της εσωτερικής ενέργειας ουσιαστικά διαμορφώνουν και την μορφή της καμπύλης της στον χρόνο (Σχήμα 4.30). Έτσι, όταν ο πυθμένας θεωρείται αμετακίνητος, λόγω των μεγάλων πλαστικών και ελαστικών παραμορφώσεων στην αρχή της προσομοίωσης, η εσωτερική ενέργεια πιάνει μέγιστη τιμή ίση με 41.27 MJ. Στη συνέχεια, αποκτά ταλαντωτική συμπεριφορά λόγω και των ταλαντώσεων της κορυφής του πύργου. Από την άλλη, όταν το υπέδαφος μπορεί να μετακινηθεί, η εσωτερική ενέργεια δεν ξεπερνάει το μέγιστο των 41.27MJ, αλλά με το πέρας της σύγκρουσης λαμβάνει σταθερά μεγαλύτερες τιμές λόγω της δημιουργίας του πλαστικού κόμβου.



Σχήμα 4.28: Ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης ανεμογεννήτριας για τους δύο τύπους οριακής συνθήκης στον πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$)



Σχήμα 4.29: Πλαστική ενέργεια παραμόρφωσης ανεμογεννήτριας για τους δύο τύπους οριακής συνθήκης στον πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$)



Σχήμα 4.30: Εσωτερική ενέργεια ανεμογεννήτριας για τους δύο τύπους οριακής συνθήκης στον πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$)

4.5 Επίδραση του ανέμου και της ταχύτητας του

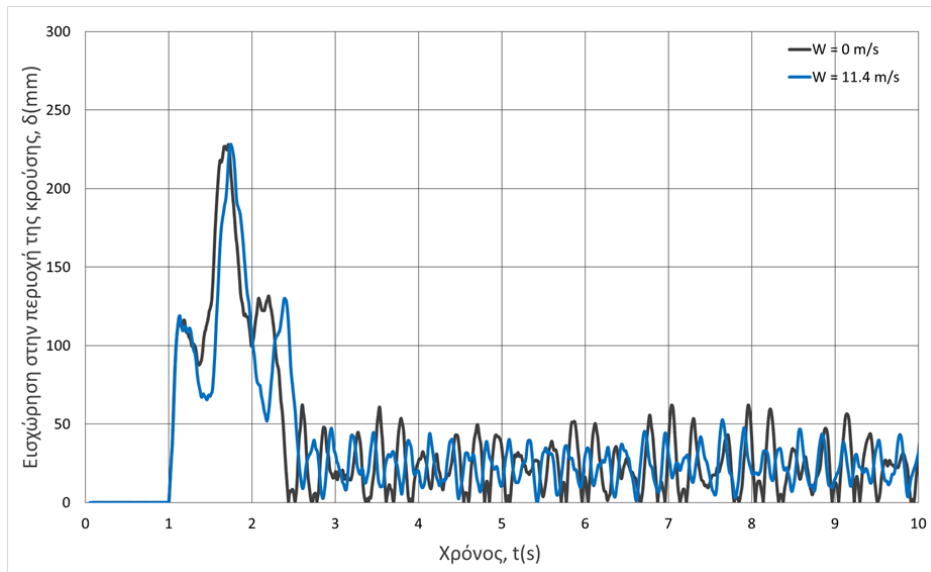
Στο παρόν υποκεφάλαιο θα μελετηθεί η επίδραση του ανέμου και της ταχύτητας του στη σύγκρουση του πλοίου με την υπεράκτια ανεμογεννήτρια. Η μελέτη θα γίνει ξεχωριστά για κάθε διαφορετική ταχύτητα σύγκρουσης του πλοίου. Ενώ, όσον αφορά την οριακή συνθήκη στον πυθμένα, σημειώνεται πως σε όλες τις περιπτώσεις λαμβάνεται υπόψιν η αλληλεπίδραση του υπεδάφους με τον πυλώνα. Υπενθυμίζεται πως σε όλες τις περιπτώσεις ανέμου, τα φορτία που προκύπτουν λόγω αυτού είναι στατικά και ανεξάρτητα με τον χρόνο. Το μόνο δυναμικό φαινόμενο είναι η σύγκρουση μεταξύ του πλοίου και της ανεμογεννήτριας.

4.5.1 Ταχύτητα πλοίου $V = 1 \text{ m/s}$

Τα σενάρια που προσομοιώθηκαν για ταχύτητα πλοίου $V = 1 \text{ m/s}$, είναι τα Str_1_0_0 και Str_1_0_11, από τον Πίνακα 3.19 του υποκεφαλαίου 3.8. Στο πρώτο τα φορτία του ανέμου θεωρούνται μηδενικά, ενώ στο δεύτερο ο άνεμος πνέει με σταθερή ταχύτητα 11.4 m/s , που είναι η ονομαστική ταχύτητα ανέμου λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Ήταν, επομένως, τα κατάλληλα σενάρια για την αναγνώριση της επίδρασης του ανέμου στην απόκριση της εγκατάστασης.

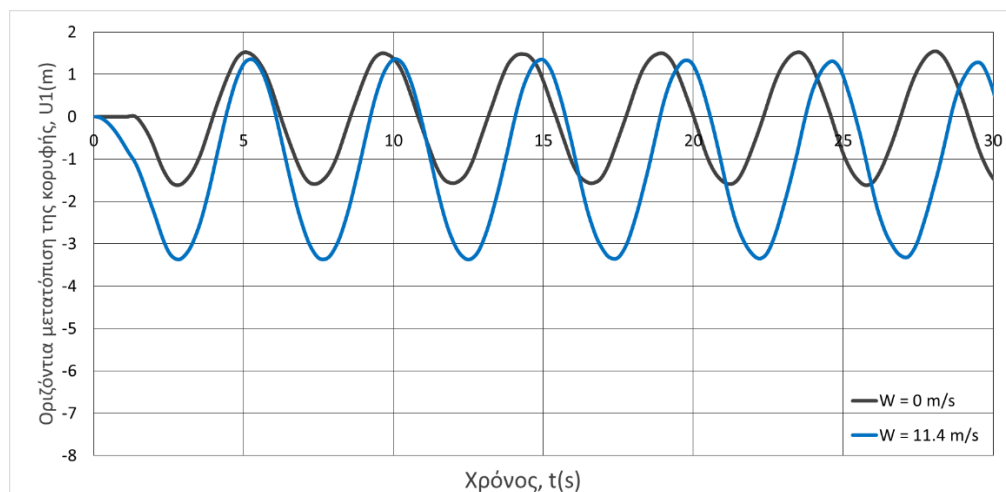
Η πρώτη βασική παρατήρηση για τα δύο σενάρια έχει να κάνει με τη φθορά που παρατηρείται στη δομή της κατασκευής. Και στις δύο περιπτώσεις δεν δημιουργείται πλαστικός κόμβος στην ένωση πυλώνα – πύργου ή σε κάποια άλλη περιοχή της ανεμογεννήτριας. Ακόμα και για την περίπτωση όπου ο άνεμος κινείται με ταχύτητα $W = 11.4 \text{ m/s}$, το επιπλέον φορτίο στην κορυφή της ανεμογεννήτριας λόγω του ανέμου, δεν επαρκεί για τον σχηματισμό πλαστικού κόμβου. Η μέγιστη ροπή κάμψης στην ευαίσθητη περιοχή ισούται με 472.7 MNm και πρόκειται μέγιστες ισοδύναμες τάσεις ίσες με 338 MPa , τιμή εντός της ελαστικής περιοχής του υλικού, που συνεπάγεται τη μη διαρροή του.

Επιπλέον, περιορισμένες είναι και οι πλαστικές παραμορφώσεις στην περιοχή της σύγκρουσης στον πυλώνα και για τις δύο περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, η μέγιστη εισχώρηση και για τα δύο σενάρια είναι περίπου ίση με 230 mm , ενώ η παραμένουσα εισχώρηση του πυλώνα μετά το πέρας της σύγκρουσης ταλαντώνεται γύρω από την μέση τιμή των 25 mm . Παράλληλα, η χρονική ιστορία του βαθουλώματος εξελίσσεται με πανομοιότυπο τρόπο και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.31. Οι μικρές πλαστικές παραμορφώσεις στην εγκατάσταση φανερώνονται και από το ποσοστό της ενέργειας που διαχύθηκε υπό τη μορφή ανελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης. Η τιμή αυτής ήταν ίση με μόλις 0.22 MJ στο τέλος της προσομοίωσης.



Σχήμα 4.31: Χρονική ιστορία σχετικής εισχώρησης τοιχωμάτων πυλώνα με και χωρίς φορτία ανέμου ταχύτητας 11.4 m/s ($V = 1$ m/s)

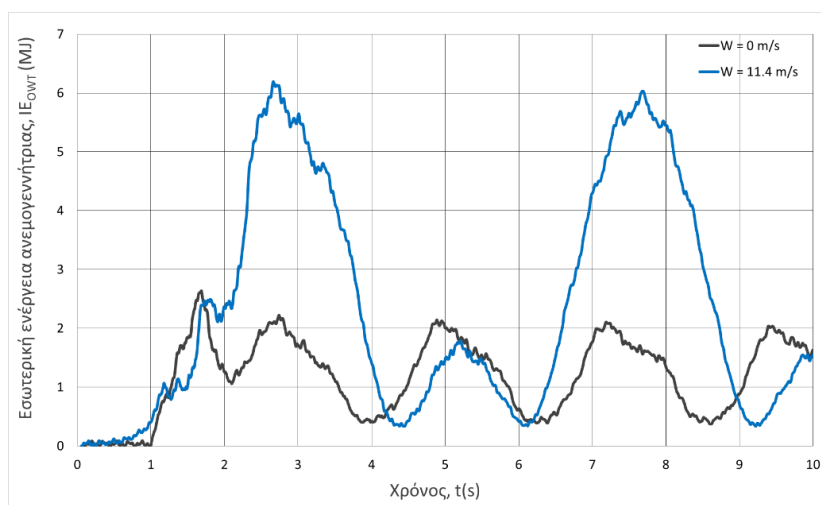
Η βασική επίδραση του ανέμου στην απόκριση της ανεμογεννήτριας σχετίζεται με την κίνηση της κορυφής της. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.32, όταν φορτία ανέμου ασκούνται στην ανεμογεννήτρια, ο πύργος της ανεμογεννήτριας ταλαντώνεται γύρω από νέα θέση ισορροπίας μετατοπισμένη κατά 1 m κατά τη κατεύθυνση της σύγκρουσης σε σχέση με την αρχική του θέση. Έτσι, η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση της κορυφής κατά αυτή τη φορά ισούται με 3.37 m. Ενώ, το πλάτος της ταλάντωσης είναι 2.36 m και η περίοδος της ισούται με 4.85 s. Η περίοδος αυτή απέχει 0.55 s, από την ιδιοπερίοδο της 1^{ης} ιδιομορφής (4.3 s). Αντίθετα, όταν δεν υπάρχει άνεμος, η ταλάντωση του ατρακτίδιου και της φτερωτής, γίνεται πρακτικά γύρω από την αρχική θέση ισορροπίας. Έχει πλάτος 1.5 m και περίοδο 4.6 s.



Σχήμα 4.32: Οριζόντια μετατόπιση της κορυφής της ανεμογεννήτριας με και χωρίς άνεμο ταχύτητας 11.4 m/s ($V = 1$ m/s)

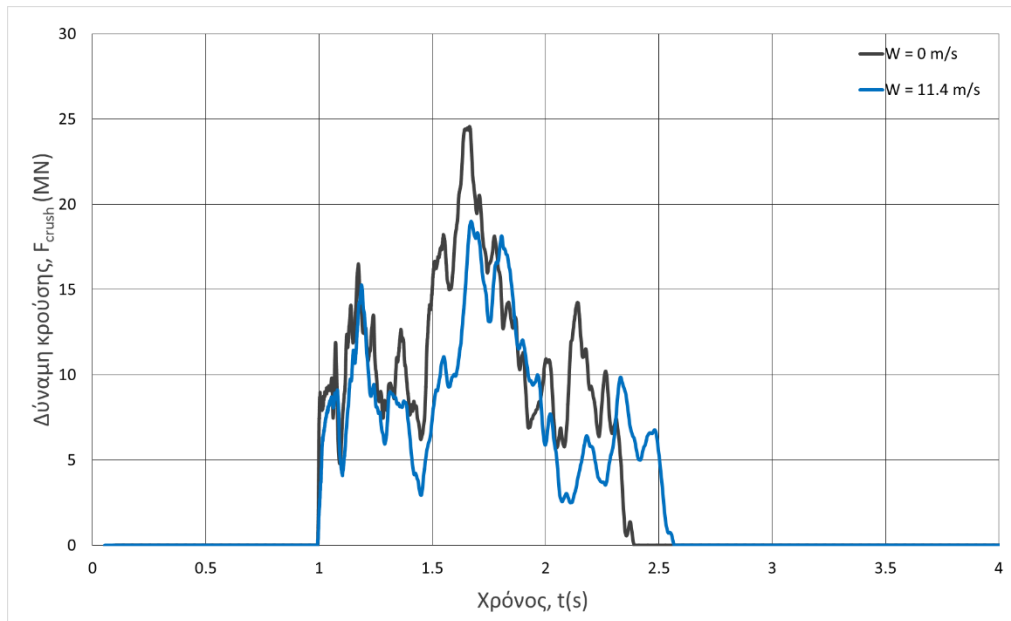
Οι ταλαντώσεις της κορυφής της ανεμογεννήτριας είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την εσωτερική ενέργεια που απορροφά. Όταν η κορυφή φτάνει στα ακρότατα σημεία της ταλάντωσης, όπου μηδενίζεται η ταχύτητα της, την ίδια στιγμή μεγιστοποιείται η ελαστική

ενέργεια παραμόρφωσης του πυλώνα, η οποία στη συνέχεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια, με αυτή τη διαδικασία να επαναλαμβάνεται καθ' όλη τη διάρκεια της ταλάντωσης. Δεδομένου ότι η ανελαστική ενέργεια παραμόρφωσης είναι ελάχιστη, η εσωτερική ενέργεια του πυλώνα ουσιαστικά ισοδυναμεί με την ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης. Στο Σχήμα 4.33 παρουσιάζεται η καμπύλη της πρώτης συναρτήσεως του χρόνου. Αξιολογώντας το διάγραμμα αυτό παράλληλα με εκείνο του Σχήμα 4.32, διακρίνεται πως τα μεγάλα τοπικά μέγιστα (6.1 MJ) της καμπύλης εσωτερικής ενέργειας αντιστοιχούν στις στιγμές που η κορυφή έχει φτάσει στη μέγιστη απόσταση από την αρχική θέση ισορροπίας κατά τη φορά της σύγκρουσης (-3.37 m). Από την άλλη τα μικρά τοπικά μέγιστα της καμπύλης (1.79 MJ) συμβαίνουν όταν η κορυφή μετατοπίζεται προς τη μεριά του πλοίου κατά μέγιστη απόσταση ίση με 1.36 m. Η ανισότητα των μεγίστων οφείλεται στη μεγαλύτερη απόκλιση από την αρχική θέση ισορροπίας της κορυφής.



Σχήμα 4.33: Χρονική ιστορία εσωτερικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας με και χωρίς άνεμο ταχύτητας 11.4 m/s ($V = 1$ m/s)

Τέλος, όσον αφορά την εξέλιξη της ίδιας της σύγκρουσης, αυτή δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη του ανέμου για τη συγκεκριμένη ταχύτητα πλοίου. Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.34, οι καμπύλες της δύναμης κρούσης είναι πανομοιότυπες. Η βασική διαφορά τους έχει να κάνει με τη μέγιστη τιμή της δύναμης. Στην περίπτωση των φορτίων ανέμου η τιμή αυτή ισούται με 19.3 MN, όντας μικρότερη από τα 25 MN, χωρίς τα φορτία ανέμου. Αυτή η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι ο άνεμος ωθεί την ανεμογεννήτρια κατά τη κατεύθυνση της κρούσης με αποτέλεσμα η επαφή των δύο σωμάτων να μην είναι το ίδιο έντονη, με την περίπτωση χωρίς φορτία ανέμου.

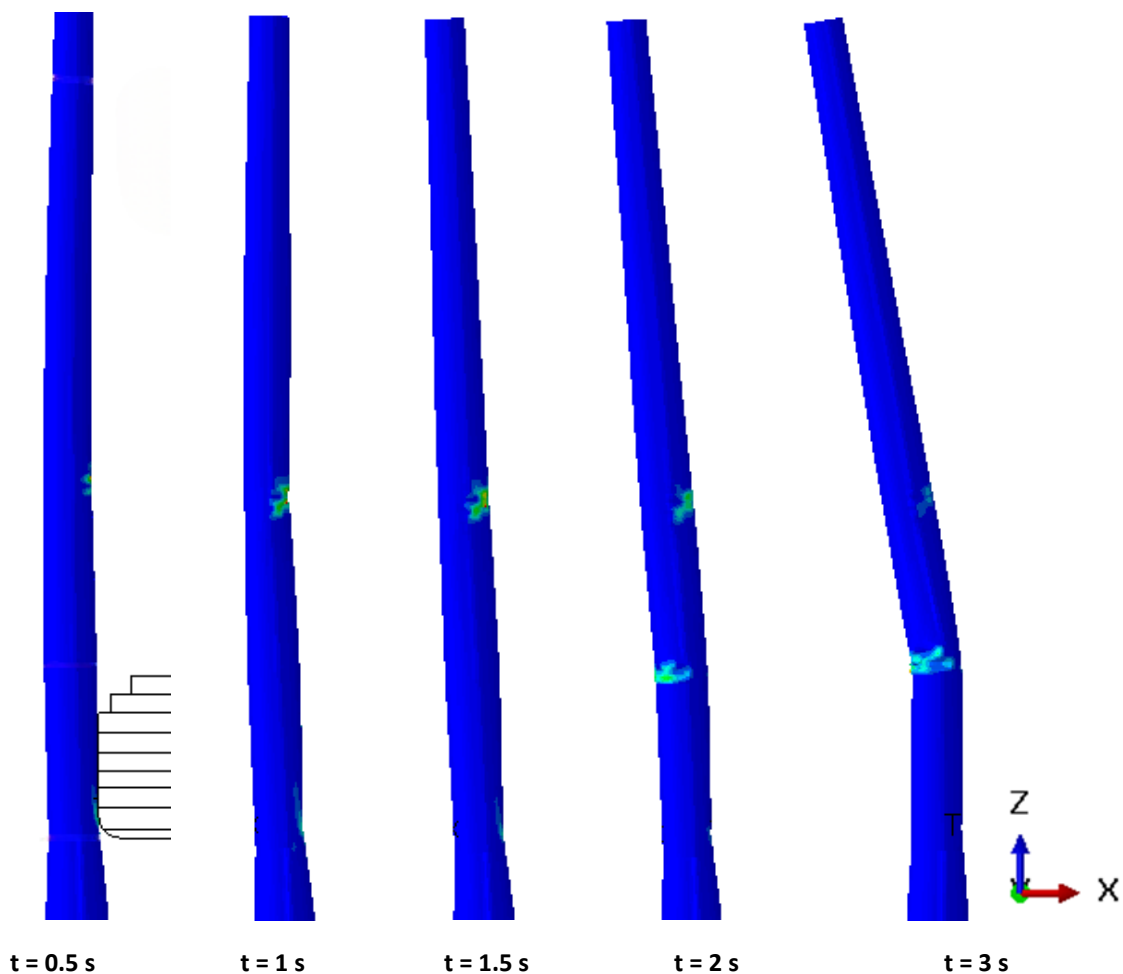


Σχήμα 4.34: Χρονική ιστορία της δύναμης κρούσης με και χωρίς άνεμο ταχύτητας 11.4 m/s ($V = 1$ m/s)

4.5.2 Ταχύτητα πλοίου $V = 5 \text{ m/s}$

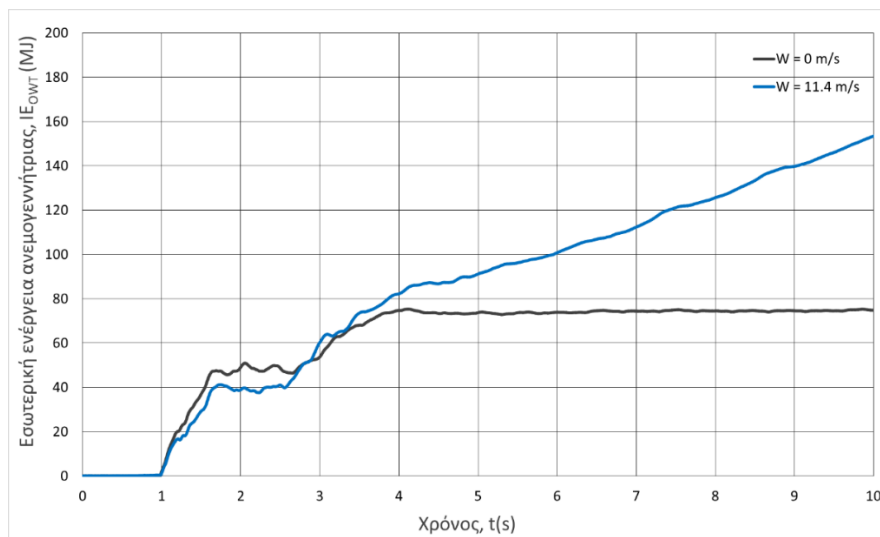
Τα σενάρια που προσομοιώθηκαν για ταχύτητα πλοίου $V = 5 \text{ m/s}$, είναι τα Str_5_0_0 και Str_5_0_11, από τον Πίνακα 3.19 του υποκεφαλαίου 3.8. Στο πρώτο τα φορτία του ανέμου θεωρούνται μηδενικά, ενώ στο δεύτερο ο άνεμος πνέει με σταθερή ταχύτητα 11.4 m/s , που είναι η ονομαστική ταχύτητα ανέμου λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Ήταν, επομένως, τα κατάλληλα σενάρια για την αναγνώριση της επίδρασης του ανέμου στην απόκριση της εγκατάστασης, για μεγάλες ενέργειες σύγκρουσης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14-γ και σχολιάστηκε στο εδάφιο 4.3.2, στην περίπτωση που το πλοίο συγκρούεται στον πυλώνα με ταχύτητα 5 m/s και δεν υπάρχουν φορτία ανέμου, δύο πλαστικοί κόμβοι σχηματίζονται στον πύργο της ανεμογεννήτριας, που είναι το τμήμα με το λεπτότερο πάχος τοιχωμάτων της κατασκευής. Ο πρώτος χρονικά οφείλεται στην αντίσταση που προβάλλει η κορυφή της ανεμογεννήτριας στην κίνηση κατά τη κατεύθυνση της κρούσης, λόγω της μεγάλης αδράνειας της, δημιουργείται από την πλευρά του πύργου που «βλέπει» το πλοίο, 45 m πάνω από την ένωση πυλώνα - πύργου. Ο κόμβος που τον ακολουθεί σχηματίζεται, στην ένωση πυλώνα - πύργου, λόγω των μεγάλων επιταχύνσεων και ταχυτήτων που αναπτύσει η κορυφή κατά τη φορά της σύγκρουσης με αποτέλεσμα την κάμψη όλου του πύργου προς τα εκεί. Στην συνέχεια η κορυφή της ανεμογεννήτριας αποκτά αποσβένουσα ταλαντωτική συμπεριφορά.



Σχήμα 4.35: Στιγμιότυπα της σταδιακής παραμόρφωσης της ανεμογεννήτριας σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές μετρημένες από τη στιγμή της κρούσης ($V = 5 \text{ m/s}$ & $W = 11.4 \text{ m/s}$)

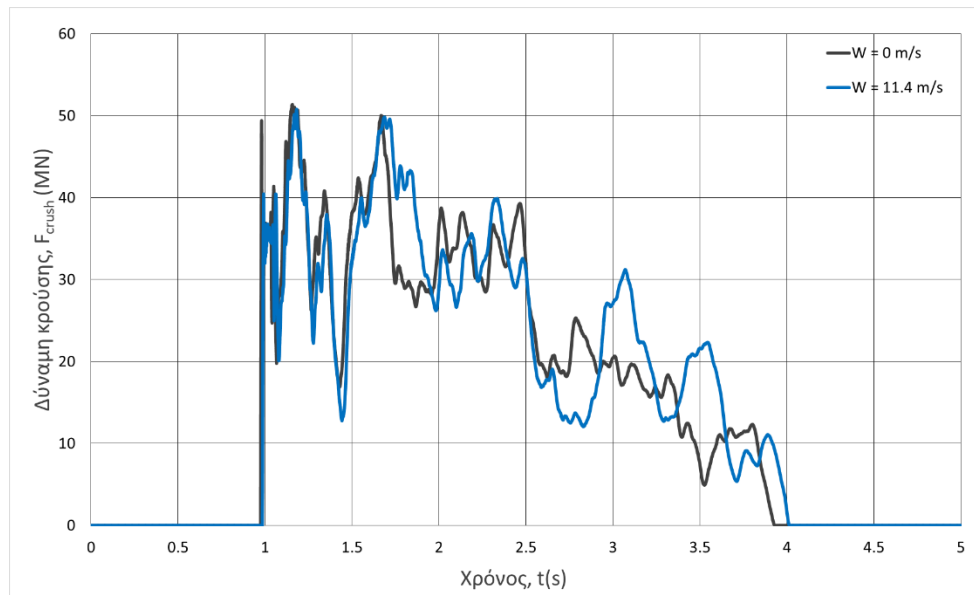
Όταν λαμβάνεται υπ' όψιν και το φορτίο του ανέμου η κατασκευή αρχικά αποκρίνεται με παρόμοιο τρόπο με την περίπτωση που δεν υπάρχει άνεμος. Στο Σχήμα 4.35 παρουσιάζεται η σταδιακή παραμόρφωση της ανεμογεννήτριας. Όπως φαίνεται, λόγω της αρχικής κάμψης του πύργου προς τη μεριά του πλοίου, δημιουργείται ο πρώτος πλαστικός κόμβος σε σημείο κοντινό σε εκείνο όπου σχηματίστηκε ο πρώτος πλαστικός κόμβος για το σενάριο χωρίς φορτία ανέμου. Η πρώτη διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων εντοπίζεται στο γεγονός πως οι παραμορφώσεις στον κόμβο είναι λιγότερο εκτεταμένες από όταν δεν υπάρχει άνεμος. Αυτό οφείλεται στα φορτία ανέμου, τα οποία από τη στιγμή που έχουν θεωρηθεί ομόρροπα με την φορά της σύγκρουσης, περιορίζουν την αρχική κάμψη του πύργου προς την αντίθετη φορά. Οι μειωμένες πλαστικές παραμορφώσεις εκεί φανερώνονται και μέσω της χρονικής ιστορίας της εσωτερικής ενέργειας. Στο Σχήμα 4.36 διακρίνεται πως στο πρώτο 1.5 s της σύγκρουσης η εσωτερική ενέργεια της ανεμογεννήτριας για άνεμο ταχύτητας $W = 11.4 \text{ m/s}$ είναι μικρότερη από όταν δεν ασκούνται φορτία ανέμου. Στη συνέχεια, ο άνεμος ωθεί διαρκώς την κορυφή της ανεμογεννήτριας, λόγω της δύναμης ώσης που επάγει σε αυτήν, προκαλώντας την κάμψη της κατά τη κατεύθυνση της σύγκρουσης. Έτσι, αρχίζει και σχηματίζεται ο δεύτερος πλαστικός κόμβος στην περιοχή ένωσης πύργου – πυλώνα. Από κει και πέρα, εντοπίζεται η δεύτερη και βασικότερη διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων. Συγκεκριμένα, λόγω των σταθερών δυνάμεων που ασκεί ο άνεμος στην κορυφή και στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας, οι πλαστικές παραμορφώσεις στον κόμβο συνεχώς αυξάνονται, με αποτέλεσμα η κατασκευή να λυγίζει ασταμάτητα και να μην αποκτά κάποια ταλαντωτική συμπεριφορά, όπως όταν δεν υπάρχει άνεμος. Τελικά, η ανεμογεννήτρια καταρρέει, από τη μεριά, όμως, που δεν βρίσκεται το πλοίο, λόγω του ανέμου και του βάρους της κορυφής της. Η διαρκής αύξηση των πλαστικών παραμορφώσεων στον κόμβο αποτυπώνεται και στο διάγραμμα της εσωτερικής ενέργειας μέσω της σταθερής αύξησης που παρουσιάζει η εσωτερική ενέργεια από τη δημιουργία του δεύτερου κόμβου και έπειτα.



Σχήμα 4.36: Χρονική ιστορία εσωτερικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας με και χωρίς άνεμο ταχύτητας 11.4 m/s ($V = 5 \text{ m/s}$)

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της κρούσης, παρατίθεται το Σχήμα 4.37 που περιέχει τις καμπύλες της δύναμης κρούσης συναρτήσει του χρόνου, με και χωρίς άνεμο ταχύτητας $W = 11.4 \text{ m/s}$. Είναι εμφανές πως πρόκειται για δύο παραπλήσιες κρούσεις, αφού διαρκούν

περίπου τον ίδιο χρόνο, 3 s, και η κατανομή της δύναμης σε αυτό το διάστημα είναι παρόμοια με τις μεγαλύτερες διαφορές να εντοπίζονται μετά τη δημιουργία του δεύτερου κόμβου. Μάλιστα, η μέγιστη δύναμη κρούσης χωρίς άνεμο ισούται με 51 MN, ενώ με άνεμο είναι 50.5 MN. Η σχετική ταύτιση που παρουσιάζουν οι δυνάμεις της κρούσης έχει ως αποτέλεσμα και η εισχώρηση του πυλώνα στην περιοχή της σύγκρουσης να λαμβάνει κοντινές τιμές για τα δύο σενάρια. Συγκεκριμένα, η μέγιστη εισχώρηση χωρίς άνεμο είναι 1052 mm, ενώ με άνεμο 1098 mm. Η τελική παραμένουσα εισχώρηση λαμβάνει μέση τιμή ίση με 550 mm έκαστος.

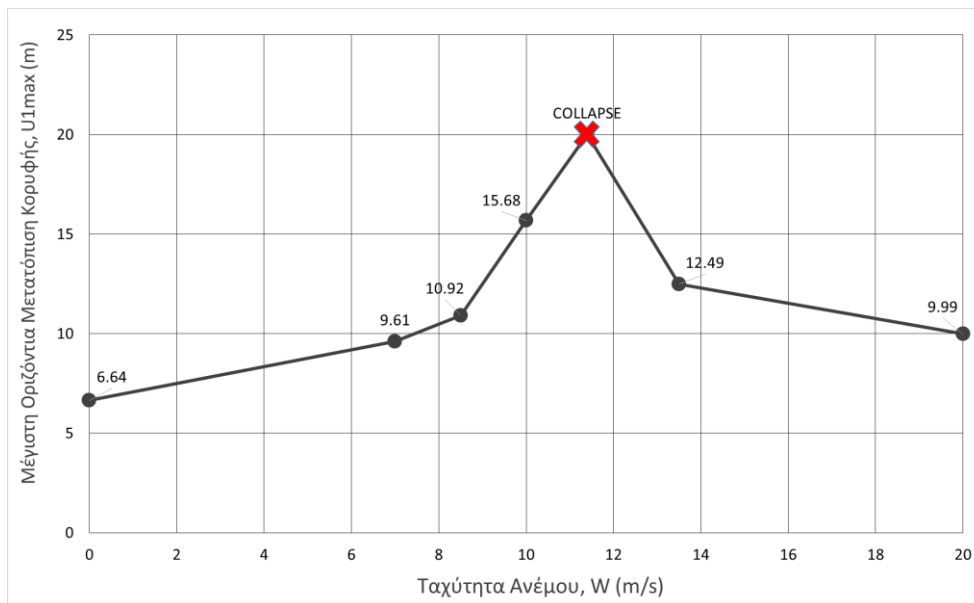


Σχήμα 4.37: Χρονική ιστορία της δύναμης κρούσης με και χωρίς άνεμο ταχύτητας 11.4 m/s ($V = 5$ m/s)

4.5.3 Ταχύτητα πλοίου $V = 3 \text{ m/s}$ – Πολλαπλές ταχύτητες ανέμου

Με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της ταχύτητας του ανέμου στην απόκριση της ανεμογεννήτριας, για ταχύτητα πλοίου $V = 3 \text{ m/s}$, μοντελοποιήθηκαν 6 σενάρια με διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, που ήταν ομόρροπες με την ταχύτητα του πλοίου. Οι ταχύτητες αυτές βρίσκονταν εντός του εύρους στο οποίο λειτουργεί η ανεμογεννήτρια (4-26 m/s) και ήταν οι εξής: 7 m/s, 8.5 m/s, 10 m/s, 11.4 m/s, 13.5 m/s και 20 m/s. Τα αποτελέσματα των σεναρίων συγκρίθηκαν μεταξύ τους αλλά και με εκείνα του σεναρίου όπου δεν υφίσταται άνεμος.

Η βασική επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στην απόκριση της ανεμογεννήτριας σχετίζεται με τη συμπεριφορά της κορυφής της. Σε όλες τις περιπτώσεις σύγκρουσης σχηματίζεται πλαστικός κόμβος στην περιοχή ένωσης πυλώνα - πύργου. Λόγω αυτού ο πύργος λυγίζει με την κορυφή του να φτάνει σε μια μέγιστη οριζόντια μετατόπιση. Το μέτρο αυτής δίνεται στο Σχήμα 4.38 για κάθε ταχύτητα ανέμου. Το μοναδικό σενάριο για το οποίο δεν λαμβάνεται κάποια μέγιστη μετατόπιση της κορυφής, είναι εκείνο όπου ο άνεμος έχει ταχύτητα ίση με την ονομαστική ταχύτητα ανέμου λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, $W = 11.4 \text{ m/s}$. Σε αυτήν την περίπτωση ο λυγισμός του πύργου συνεχίζεται αδιάκοπα, καταλήγοντας στην κατάρρευση της ανεμογεννήτριας. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις ανέμου, ο πύργος και συνεπώς και η κορυφή του αποκτούν στη συνέχεια μια ταλαντωτική συμπεριφορά γύρω από μια νέα θέση ισορροπίας διαφορετική από εκείνη πριν την κρούση.

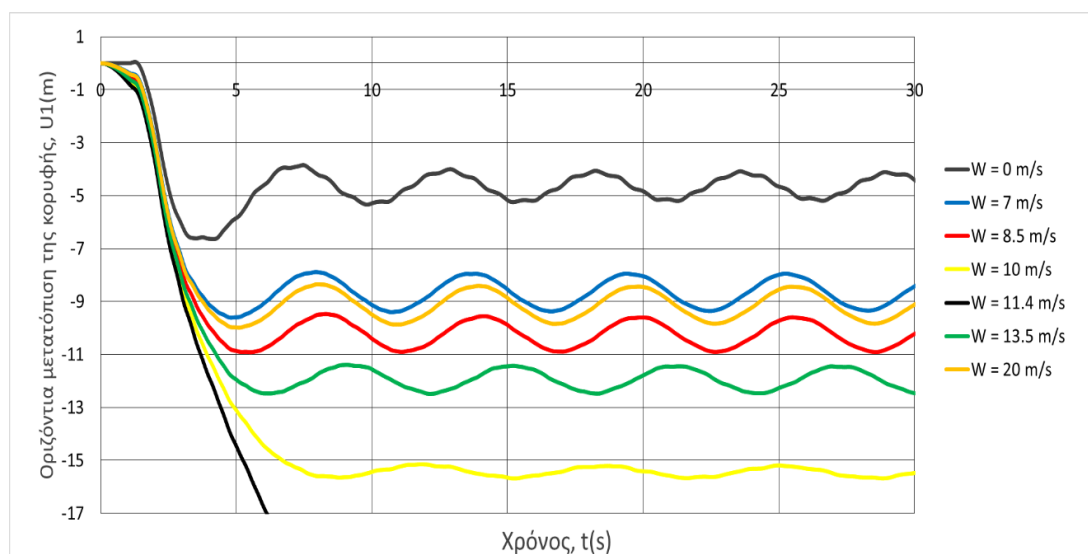


Σχήμα 4.38: Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση κορυφής για κάθε ταχύτητα ανέμου ($V = 3 \text{ m/s}$)

Παρατηρώντας την πορεία της μέγιστης μετατόπισης στο Σχήμα 4.38, γίνεται αντιληπτό πως η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου πέρα από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου λειτουργίας δεν συνεπάγεται την επιτάχυνση της κατάρρευσης της κατασκευής που συμβαίνει για $W = 11.4 \text{ m/s}$. Αντίθετα, σημειώνεται πτώση της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της κορυφής. Αξιολογώντας ταυτόχρονα το Σχήμα 4.41 και τον Πίνακα 3.13, που περιέχουν την καμπύλη και τις τιμές της ώσης, αντίστοιχα, για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου, γίνεται κατανοητό πως η πτώση αυτή οφείλεται στη μείωση της ώσης που συμβαίνει

για $W > 11 \text{ m/s}$. Η δύναμη της ώσης είναι εκείνη που οφείλεται στις κατακόρυφες (ως προς το επίπεδο περιστροφής της φτερωτής) συνιστώσες των αεροδυναμικών δυνάμεων της άνωσης και της αντίστασης που ασκούνται στις αεροτομές, καθώς τις διασχίζει ο άνεμος. Ασκείται στην κορυφή της ανεμογεννήτριας και έχει κατεύθυνση ομόρροπη με τον άνεμο. Όσο αυτή αυξάνεται τόσο μεγαλώνει και η τιμή της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της κορυφής. Η πτώση της ώσης για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη των 11 m/s , οφείλεται στην προσαρμογή της γωνίας κλίσης των λεπίδων της ανεμογεννήτριας (Σχήμα 4.43) και εξηγείται στα επιπλέον σχόλια του εδαφίου 3.5.3.2.

Στο Σχήμα 4.39 παρουσιάζεται η χρονική ιστορία της οριζόντιας μετατόπισης της κορυφής της ανεμογεννήτριας καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου. Φαίνεται πως πράγματι για $W = 11.4 \text{ m/s}$, συμβαίνει η άμεση κατάρρευση της κατασκευής και πως για τις υπόλοιπες ταχύτητες η κορυφή υπόκειται σε οριζόντια ταλάντωση που αποσβένεται με αργό ρυθμό. Η επίδραση του μεγέθους της ώσης είναι ξεκάθαρη και στα χαρακτηριστικά των ταλαντώσεων. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η ώση τόσο και η νέα θέση ισορροπίας της ταλάντωσης απομακρύνεται από την αρχική. Επιπλέον, στον Πίνακα 4.4 φαίνονται η αρχική περίοδος και το πλάτος της ταλάντωσης της κορυφής για κάθε ταχύτητα ανέμου. Η ώση επιδρά σε αυτά ως εξής: η αύξηση της συνεπάγεται τη μείωση του πλάτους και την αύξηση της περιόδου της ταλάντωσης.

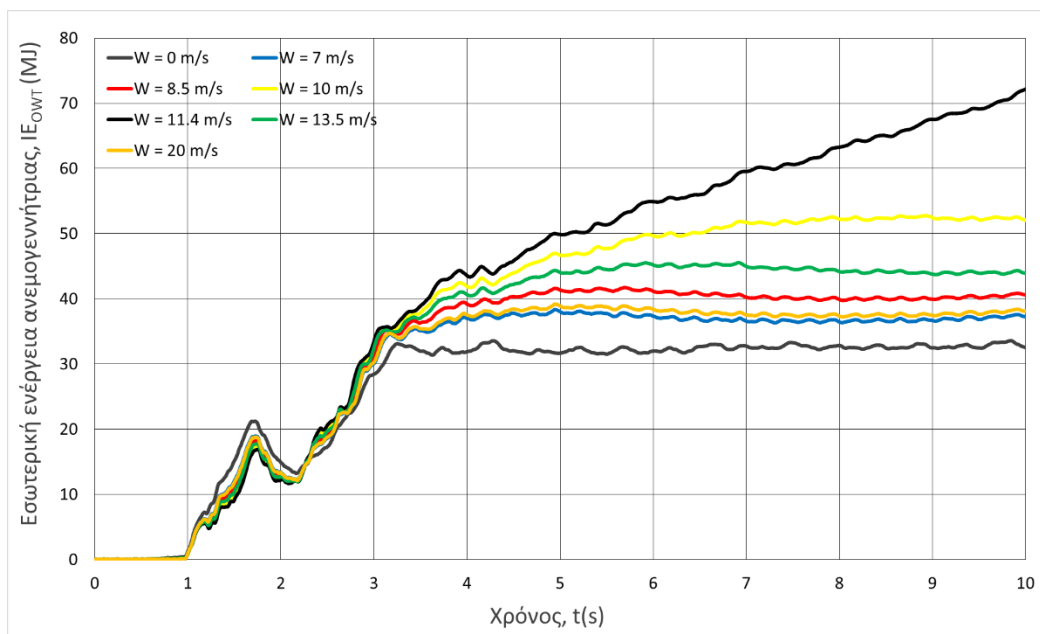


Σχήμα 4.39: Χρονική ιστορία οριζόντιας ταλάντωσης κορυφής για κάθε ταχύτητα ανέμου ($V = 3 \text{ m/s}$)

Πίνακας 4.4: Ιδιότητες ταλαντώσεων για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου ($V = 3 \text{ m/s}$)

Ταχύτητα Ανέμου $W \text{ (m/s)}$	Αρχική Περίοδος Ταλάντωσης, $T_0 \text{ (s)}$	Αρχικό Πλάτος Ταλάντωσης, $A_0 \text{ (m)}$
0	5.5	0.75
7	5.87	0.71
8.5	5.9	0.675
10	6.38	0.24
11.4	Collapse	Collapse
13.5	6.2	0.53
20	5.88	0.69

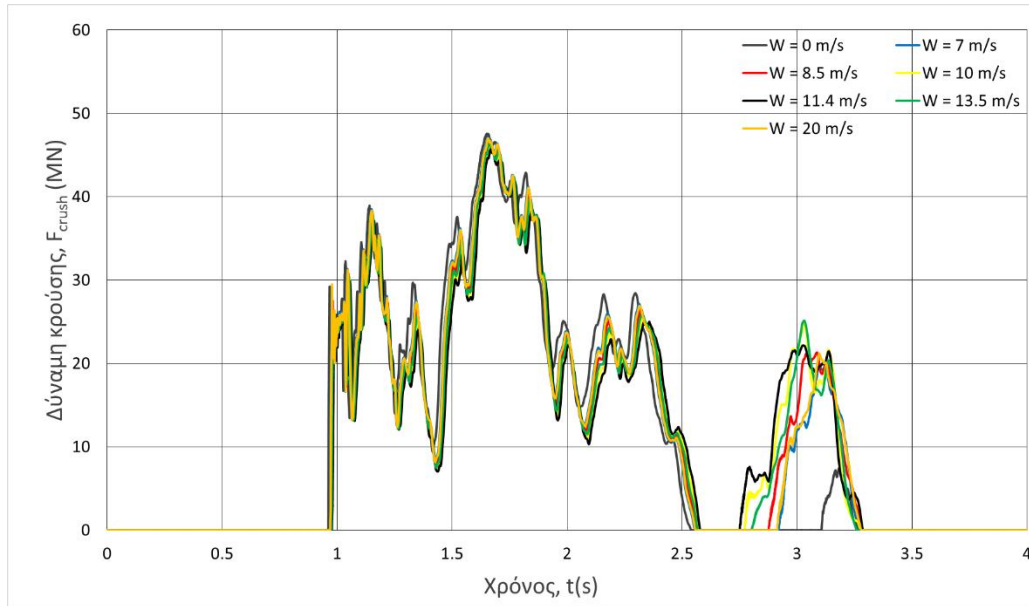
Όσον αφορά την εσωτερική ενέργεια που απορροφά η ανεμογεννήτρια, η αύξηση της τιμής της οφείλεται στην μεγέθυνση των πλαστικών παραμορφώσεων στην περιοχή του πλαστικού κόμβου. Αυτή με τη σειρά της προκαλείται από την έκταση του λυγισμού του πύργου της ανεμογεννήτριας. Δηλαδή, όσο μεγαλώνει η οριζόντια μετατόπιση της κορυφής οι πλαστικές παραμορφώσεις στον κόμβο αυξάνονται οδηγώντας και στην αύξηση της εσωτερικής ενέργειας της κατασκευής. Όταν, στη συνέχεια, ο πύργος αρχίζει να ταλαντώνεται γύρω από τον κόμβο, η τιμή της εσωτερικής ενέργειας παλινδρομεί με μικρό πλάτος γύρω από μία σταθερή τιμή. Η παραπάνω συμπεριφορά παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήμα 4.40. Σε συνδυασμό με το Σχήμα 4.38 παρατηρείται πως για τις ταχύτητες ανέμου όπου προκύπτει η μεγαλύτερη απομάκρυνση από την αρχική θέση ισορροπίας ($W = 10 \text{ m/s}$, $W = 13.5 \text{ m/s}$), η κατασκευή απορροφά μεγαλύτερο ποσό εσωτερικής ενέργειας. Στην περίπτωση του $W = 11.4 \text{ m/s}$, όπου η κατασκευή καταρρέει, η εσωτερική ενέργεια αυξάνεται συνεχώς, αφού οι πλαστικές παραμορφώσεις στον κόμβο διευρύνονται αδιάκοπα.



Σχήμα 4.40: Χρονική ιστορία εσωτερικής ενέργειας κατασκευής για κάθε ταχύτητα ανέμου ($V = 3 \text{ m/s}$)

Στο Σχήμα 4.41 δίνεται η χρονική ιστορία της δύναμης κρούσης μεταξύ των κατασκευών. Είναι εμφανές πως οι δύο κρούσεις που συμβαίνουν έχουν παρόμοια εξέλιξη και χαρακτηριστικά (διάρκεια, μέγιστη δύναμη κρούσης) για όλες τις ταχύτητες ανέμου. Αυτό είναι λογικό καθώς η πορεία της σύγκρουσης εξαρτάται πρωτίστως από την ταχύτητα με την οποία συγκρούεται το πλοίο στην κατασκευή. Η βασική διαφορά που εντοπίζεται και σχετίζεται με τα φορτία του ανέμου, αφορά τη δεύτερη κρούση στη περίπτωση όπου δεν υφίσταται άνεμος. Σε αυτήν η μέγιστη τιμή της δύναμης ισούται με 8 MN , ενώ όταν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί η κρουστική δύναμη λαμβάνει τιμές μεταξύ 20 MN και 25 MN ανάλογα την ταχύτητα του ανέμου. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός πως μετά τη έναρξη του πλαστικού κόμβου, που συμβαίνει τη στιγμή της πρώτης αποκόλλησης ($t = 2.5 \text{ s}$), η εσωτερική ενέργεια της ανεμογεννήτριας για $W = 0 \text{ m/s}$, είναι μικρότερη από τις

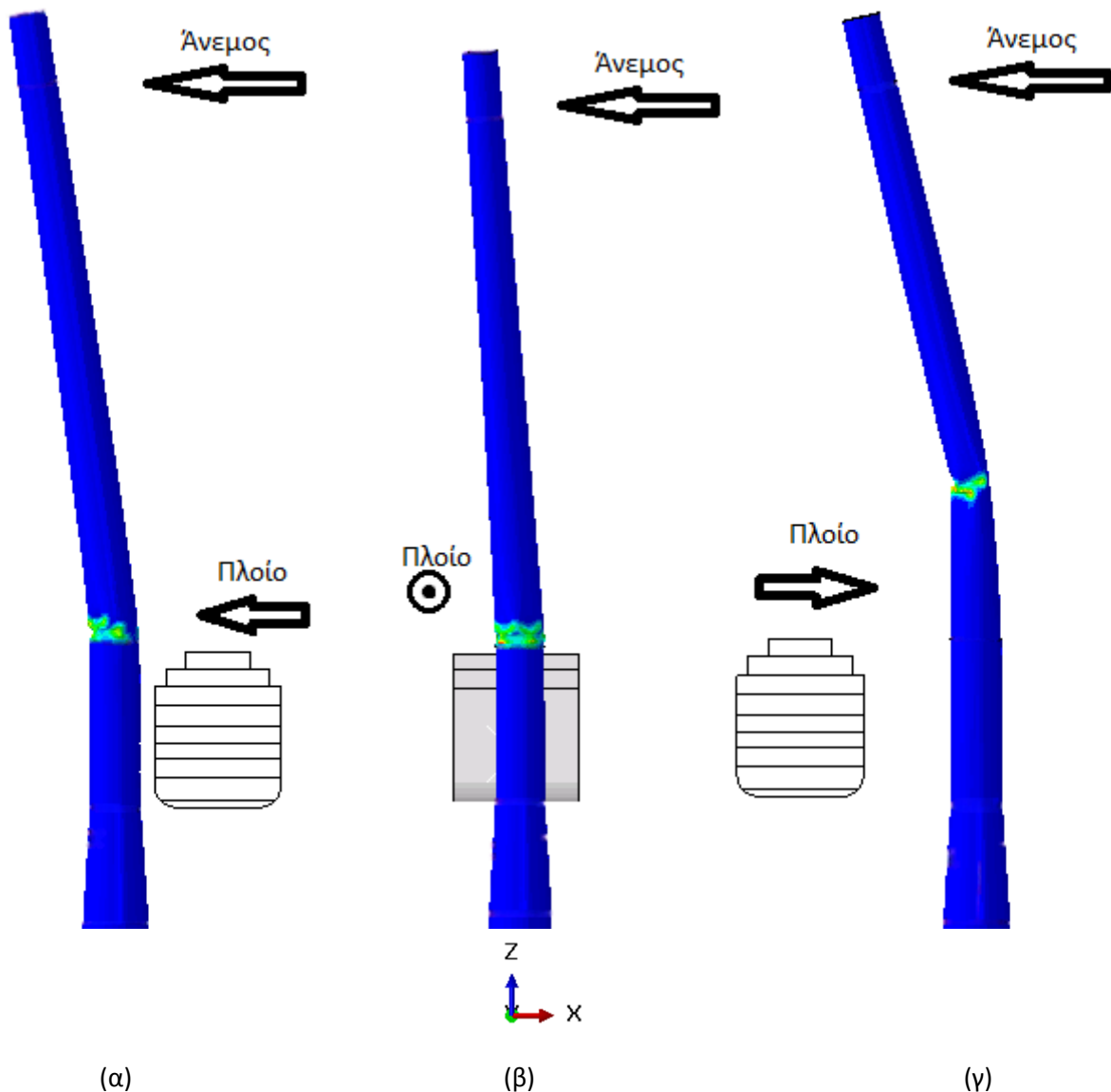
περιπτώσεις όπου $W \neq 0$ m/s (Σχήμα 4.40). Έτσι, η επαναφορά της κατασκευής προς την αρχική της θέση ώστε να συμβεί η δεύτερη κρούση γίνεται με πιο αργό ρυθμό, με αποτέλεσμα η επαφή μεταξύ των σωμάτων να μην είναι λιγότερο έντονη και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους να είναι χαμηλότερες.



Σχήμα 4.41: Χρονική ιστορία κρουστικής δύναμης για κάθε ταχύτητα ανέμου ($V = 3$ m/s)

4.6 Επίδραση της κατεύθυνσης του ανέμου σε σχέση με την κατεύθυνση του πλοίου

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα διερευνηθεί πως μεταβάλλεται η απόκριση της ανεμογεννήτριας ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου, η οποία ορίζεται σε σχέση με την κατεύθυνση του πλοίου. Έτσι, όπως περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 3.8 έχουν προσομοιωθεί τρεις περιπτώσεις, που φαίνονται γραφικά στο Σχήμα 3.52. Στην πρώτη περίπτωση, οι κατευθύνσεις του ανέμου και του πλοίου είναι ομόρροπες μεταξύ τους (γωνία 0°), στη δεύτερη, είναι αντίρροπες (γωνία 180°) και στην τελευταία, σχηματίζουν γωνία 90° . Τελικά, τα σενάρια σύγκρουσης που μελετώνται και συγκρίνονται μεταξύ τους λαμβάνονται από τον Πίνακα 3.19 και είναι τα Str_3_0_11.4, Str_3_90_11.4 και Str_3_180_11.4. Σε αυτά, το πλοίο συγκρούεται με ταχύτητα $V = 3 \text{ m/s}$, ο πυθμένας θεωρείται εύκαμπτος, η ταχύτητα του ανέμου ισούται με $W = 11.4 \text{ m/s}$ και κάθε φορά τροποποιείται η σχετική γωνία πλοίου – ανέμου.

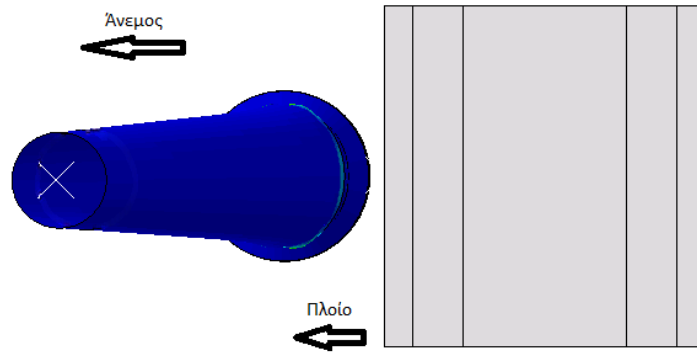


Σχήμα 4.42: Απόκριση της ανεμογεννήτριας στο επίπεδο z-x (πλάγια όψη) για γωνία ανέμου – πλοίου (α) 0° , (β) 90° , (γ) 180° , ($V = 3 \text{ m/s}$ & $W = 11.4 \text{ m/s}$)

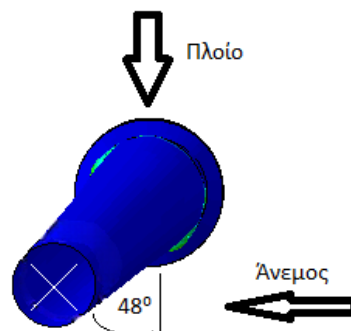
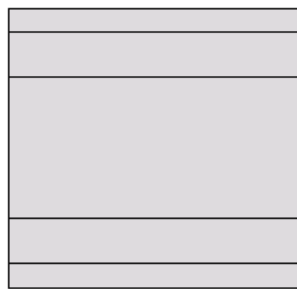
Όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, όταν η κατεύθυνση του ανέμου, ταχύτητας $W = 11.4 \text{ m/s}$, είναι ομόρροπη με εκείνη του πλοίου, δημιουργείται πλαστικός κόμβος στην περιοχή όπου ενώνεται ο πύργος με τον πυλώνα, από την μεριά της ανεμογεννήτριας που δεν «βλέπει» το πλοίο. Τελικά, λόγω του βάρους της κορυφής και των φορτίων του ανέμου, οι παραμορφώσεις στον κόμβο αυξάνονται συνεχώς οδηγώντας στην σταδιακή κατάρρευση της ανεμογεννήτριας. Η πτώση του πύργου της ανεμογεννήτριας γίνεται από τη μεριά που δεν βρίσκεται το πλοίο, ακολουθώντας τη φορά του ανέμου. Στο Σχήμα 4.42-α διακρίνεται η παραμόρφωση της κατασκευής από πλάγια όψη, ενώ η κάτοψη της ίδιας κατάστασης φαίνεται στο Σχήμα 4.43-α.

Όταν το πλοίο συγκρούεται εγκάρσια στον πυλώνα σε σχέση με τον άνεμο ταχύτητας $W = 11.4 \text{ m/s}$, δημιουργείται και σε αυτήν την περίπτωση πλαστικός κόμβος στην ένωση πύργου – πυλώνα. Αρχικά, λόγω της σύγκρουσης η κορυφή της ανεμογεννήτριας μετατοπίζεται κυρίως κατά τη κατεύθυνση της σύγκρουσης, δηλαδή τον οριζόντιο άξονα y (Σχήμα 4.43-β). Με το πέρασμα, όμως, της επαφής των δύο σωμάτων και λόγω της επίδρασης του ανέμου, η κορυφή μετατοπίζεται και κατά τη διεύθυνση του ανέμου, δηλαδή τον οριζόντιο άξονα x . Τελικά, ο πύργος της ανεμογεννήτριας έχει λυγίσει σε γωνία περίπου 48° , ως προς τη διεύθυνση του πλοίου και αντίθετα από τη μεριά του πλοίου. Η γωνία αυτή δεν παραμένει σταθερή αλλά κυμαίνεται μεταξύ των 47° και 50° , λόγω των ταλαντώσεων της κορυφής που περιγράφονται στη συνέχεια. Όσον αφορά το αν τελικά καταρρέει η κατασκευή, κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται εντός του χρονικού διαστήματος που διαρκεί η προσομοίωση, το οποίο περιλαμβάνει τα πρώτα 30 s μετά την κρούση.

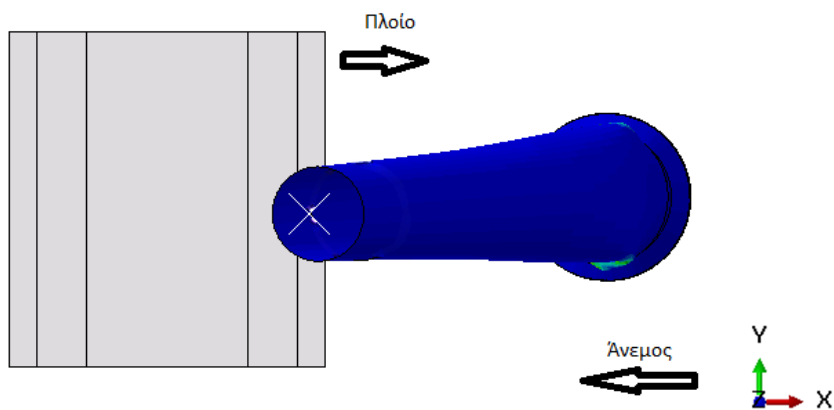
Στο τρίτο σενάριο, όπου πλοίο και άνεμος έχουν αντίθετες κατευθύνσεις, σχηματίζεται και πάλι πλαστικός κόμβος. Όμως, στη προκειμένη περίπτωση, ο χρόνος, ο λόγος σχηματισμού και η θέση του κόμβου διαφέρουν σε σχέση με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, για ομόρροπο ή εγκάρσιο, σε σχέση με το πλοίο, άνεμο ο πλαστικός κόμβος δημιουργείται με το πέρασμα της (πρώτης) σύγκρουσης, λόγω των μεγάλων επιταχύνσεων και μετατοπίσεων της κορυφής του πυλώνα και στην περιοχή ένωσης πύργου – πυλώνα, στη μεριά της ανεμογεννήτριας που δεν «βλέπει» το πλοίο. Για αντίρροπο, όμως, άνεμο, ο πλαστικός κόμβος σχηματίζεται στις πρώτες στιγμές της σύγκρουσης και οφείλεται στην αντίσταση στην μετατόπιση, που παρουσιάζει η κορυφή του πύργου λόγω της αδράνειας της και στην ταυτόχρονη συνεισφορά των φορτίων του ανέμου. Επίσης, η θέση του είναι από την πλευρά που «βλέπει» το πλοίο και ψηλότερα από την ένωση πύργου – πυλώνα. Η περιγραφή αυτή γίνεται ευκολότερα αντιληπτή μέσω του Σχήμα 4.42-γ. Στη συνέχεια του φαινομένου, τα φορτία του ανέμου επιδρούν στην κατασκευή, επεκτείνοντας τον πλαστικό κόμβο και μεγενθύνοντας τις παραμορφώσεις του. Έτσι, η κατασκευή λυγίζει συνεχώς προς τη μεριά του πλοίου. Τελικά, το βάρος της κορυφής και ο άνεμος οδηγεί στην κατάρρευση της πάνω στο πλοίο.



(α)



(β)

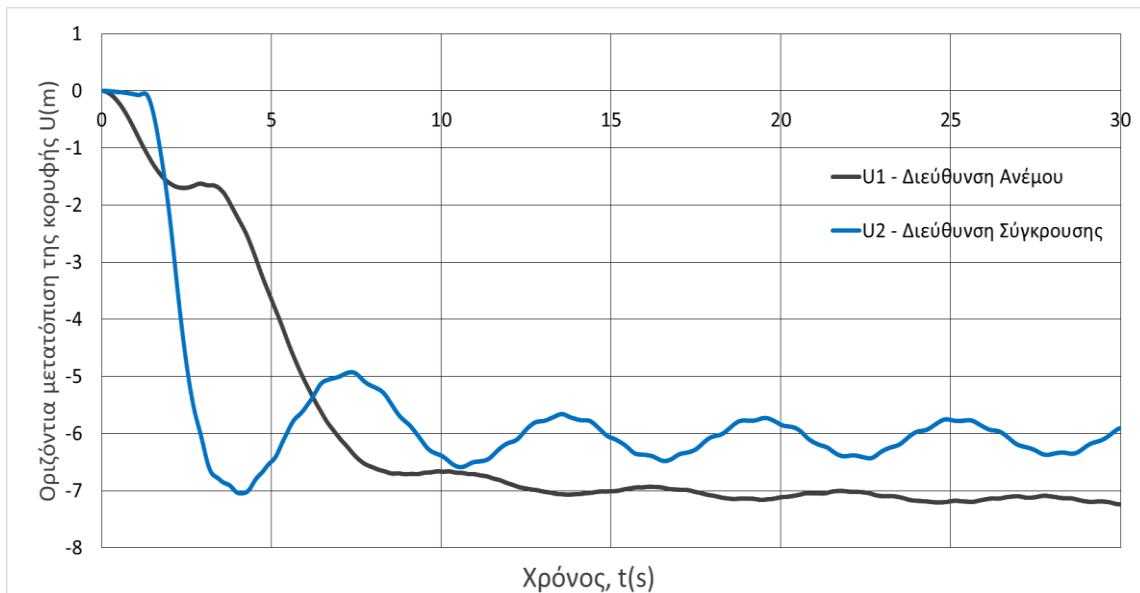


(γ)

Σχήμα 4.43: Απόκριση της ανεμογεννήτριας στο επίπεδο x-y (κάτοψη) για γωνία ανέμου – πλοίου (α) 0° , (β) 90° , (γ) 180° ($V = 3 \text{ m/s}$ & $W = 11.4 \text{ m/s}$)

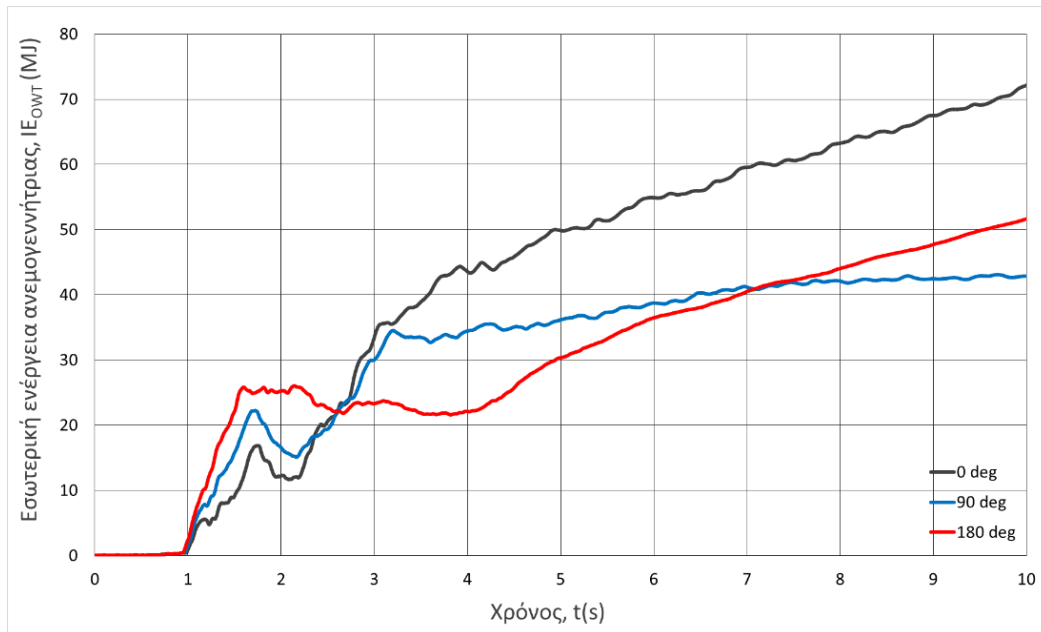
Σε αυτό το σημείο αξίζει να περιγραφεί η ταλαντωτική συμπεριφορά που αποκτά η κορυφή της ανεμογεννήτριας στην περίπτωση της εγκάρσιας σύγκρουσης. Καταρχάς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.44 και σχολιάστηκε νωρίτερα, από τη στιγμή που συμβαίνει η κρούση και έπειτα, η μετατόπιση κατά τη διεύθυνση της (U2 - άξονας y) ξεπερνά άμεσα τη μετατόπιση κατά τη διεύθυνση του ανέμου (U1 - άξονας x). Αφού, όμως, ολοκληρωθεί η σύγκρουση η μετατόπιση U2 μειώνεται και τελικά η κορυφή ταλαντώνεται κατά τον άξονα y . Η ταλάντωση είναι αποσβενούμενη έχει αρχική περίοδο $T = 5.75$ s και αρχικό πλάτος 0.4 m. Η μετατόπιση κατά τον άξονα x , από την άλλη, ξεπερνά εκ νέου εκείνη κατά τον y και όταν φτάνει τα 7 m αποκτά μία ελαφριά ταλάντωση. Λόγω των ταλαντώσεων αυτών η γωνία που διαμορφώνεται μεταξύ του πύργου και την κάθε διεύθυνση δεν είναι σταθερή.

Όπως γράφτηκε προηγουμένως, στα πρώτα 30 s που ακολουθούν την σύγκρουση δεν συμβαίνει κατάρρευση της κατασκευής. Όμως, όπως παρατηρείται στο διάγραμμα των μετατοπίσεων, η μετατόπιση της κορυφής κατά τη διεύθυνση του ανέμου παρουσιάζει μια αυξανόμενη πορεία χαμηλής κλήσης. Αυτό το χαρακτηριστικό, ενδεχομένως, να αποβεί μοιραίο στην εξέλιξη του φαινομένου. Δηλαδή, μετά τον περιορισμό της ταλάντωσης κατά τη διεύθυνση της σύγκρουσης, που συγκρατεί σε έναν βαθμό την ανεμογεννήτρια, ενδέχεται να προκύψει η κατάρρευση της εγκατάστασης. Ωστόσο, στο δυσμενές σενάριο, που η κατασκευή υποκύψει, το πλοίο δεν θα κινδυνέψει αφού δεν θα έχει λυγίσει προς τη μεριά του. Πρέπει, επίσης, να σημειωθεί πως στην περίπτωση που λαμβανόταν υπ'όψιν και η απόσβεση του υλικού της κατασκευής η μετατόπιση της κορυφής κατά τη διεύθυνση του ανέμου ενδεχομένως να σταθεροποιούταν σε μια τιμή αποφεύγοντας έτσι την πτώση της κατασκευής.



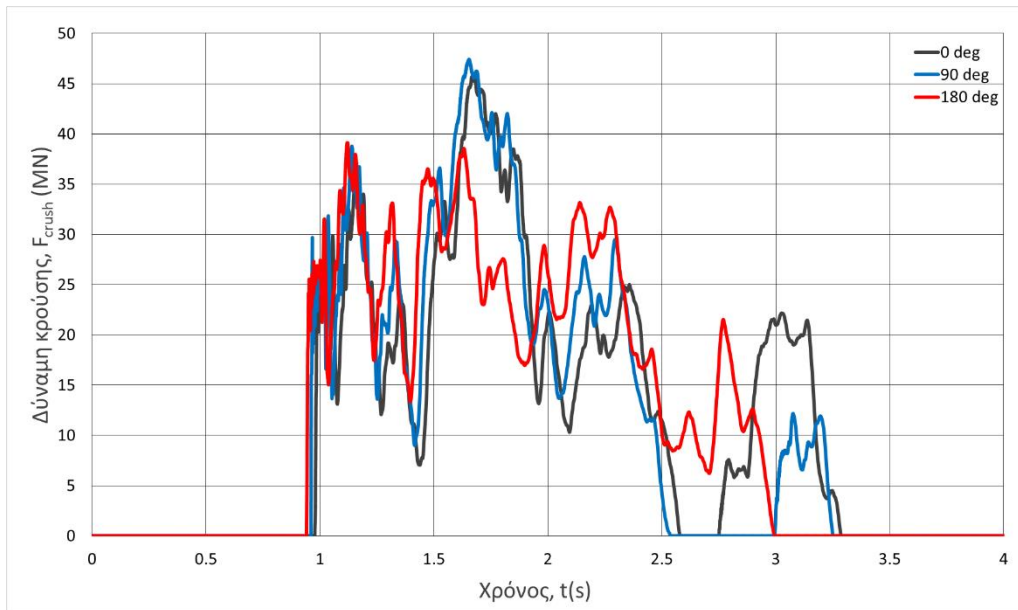
Σχήμα 4.44: Χρονική ιστορία οριζόντιας μετατόπισης της κορυφής της ανεμογεννήτριας ως προς τις δύο διευθύνσεις, για εγκάρσια σύγκρουση ($V = 3$ m/s & $W = 11.4$ m/s)

Στο Σχήμα 4.45 φαίνονται οι καμπύλες της εσωτερικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας. Παρατηρείται πως για τις περιπτώσεις που ο άνεμος είναι ομόρροπος ή αντίρροπος με το πλοίο και προκύπτει η κατάρρευση της ανεμογεννήτριας, η εσωτερική ενέργεια αυξάνεται συνεχώς λόγω της επέκτασης του πλαστικού κόμβου. Αντίθετα, στην εγκάρσια σύγκρουση η εσωτερική ενέργεια τείνει προς την σταθερή τιμή των 43.5 MJ

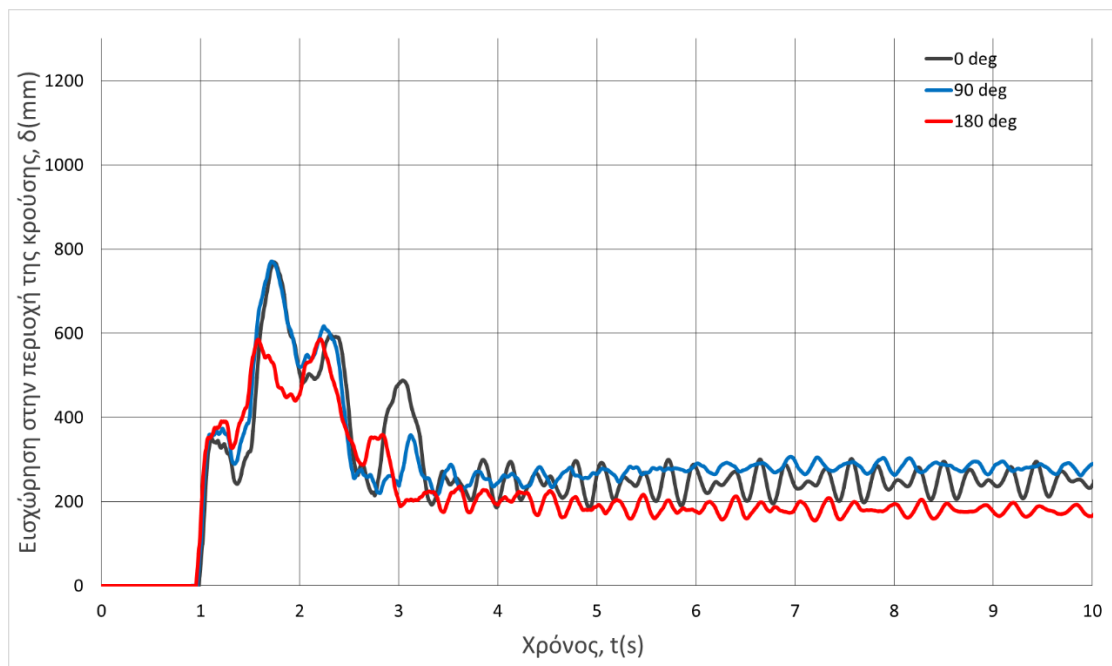


Σχήμα 4.45: Χρονική ιστορία εσωτερικής ενέργειας για τους τρεις τύπους σύγκρουσης ($V = 3 \text{ m/s}$ & $W = 11.4 \text{ m/s}$)

Σχετικά με τη δύναμη κρούσης, η καμπύλη της αναπαρίσταται γραφικά στο Σχήμα 4.46. Μέσω αυτού διακρίνεται πως όταν η σχετική γωνία κατεύθυνσης είναι 0° και 90° , το πλοίο και η εγκατάσταση συγκρούονται δύο φορές, ενώ παρουσιάζουν κοντινές μέγιστες τιμές της δύναμης κρούσης (45.5 MN και 47.5 MN αντίστοιχα). Αντίθετα, όταν ο άνεμος κινείται αντίθετα από το πλοίο η σύγκρουση συμβαίνει μία φορά και η μέγιστη τιμή της δύναμης κρούσης ισούται με 39 MN. Τέλος, όσον αφορά τη σχετική εισχώρηση του πυλώνα (Σχήμα 4.47), αυτή παρουσιάζει μεγαλύτερες μέγιστες τιμές (770 mm) αλλά και παραμένουσες τιμές για τους πρώτους δύο τύπους συγκρούσεων. Ενώ, για την τρίτη σύγκρουση η μέγιστη τιμή της εισχώρησης ισούται με 585 mm.



Σχήμα 4.46: Χρονική ιστορία δύναμης κρούσης για τους τρεις τύπους συγκρούσης ($V = 3 \text{ m/s}$ & $W = 11.4 \text{ m/s}$)



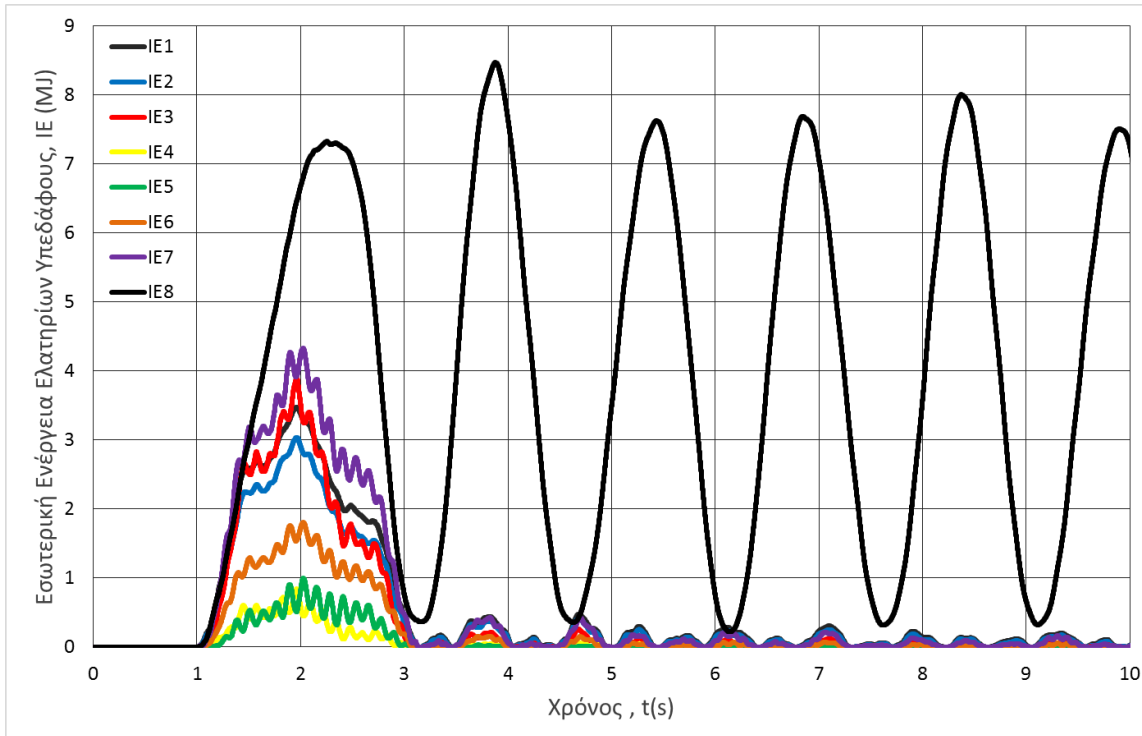
Σχήμα 4.47: Χρονική ιστορία εισχώρησης για τους τρεις τύπους συγκρούσης ($V = 3 \text{ m/s}$ & $W = 11.4 \text{ m/s}$)

4.7 Παρατηρήσεις επί των προσομοιώσεων – Συζήτηση

Στο τελευταίο υποκεφάλαιο του 4^{ου} Κεφαλαίου, σχολιάζονται, ξεχωριστά, ορισμένα στοιχεία των προσομοιώσεων που προηγήθηκαν, με σκοπό την πληρέστερη περιγραφή του φαινομένου της σύγκρουσης.

- Στη συγκεκριμένη μελέτη το πλοίο έχει θεωρηθεί ως απόλυτα άκαμπτο σώμα. Αυτό σημαίνει πως η κινητική του ενέργεια, που αντιστοιχεί και στην ενέργεια της σύγκρουσης, μετατρέπεται με την κρούση σε εσωτερική ενέργεια που μπορεί να παραλάβει, μόνο η ανεμογεννήτρια. Στην πραγματικότητα, όμως, το πλοίο θα παραμορφωνόταν και εκείνο, απορροφώντας ένα μέρος της ενέργειας της σύγκρουσης. Επομένως, το παρόν αριθμητικό μοντέλο καταλήγει σε μια συντηρητική προσέγγιση της αντοχής της ανεμογεννήτριας, αφού η απόκριση της υπερεκτιμάται.
- Όπως σχολιάστηκε και νωρίτερα, λόγω της σύγκρουσης, η αρχική κινητική ενέργεια του πλοίου μετατρέπεται σταδιακά σε εσωτερική ενέργεια. Τα στοιχεία του μοντέλου που μπορούν να παραλάβουν εσωτερική ενέργεια είναι η ανεμογεννήτρια και τα μη γραμμικά ελατήρια που μοντελοποιούν την αλληλεπίδραση της με το υπέδαφος. Το τμήμα της εσωτερικής ενέργειας που απορροφούν τα ελατήρια εκφράζει, ουσιαστικά, το πόσο παραμορφώνεται και μετατοπίζεται το υπέδαφος που στηρίζει την κατασκευή και φαίνεται στο Σχήμα 4.48. Τα ελατήρια έχουν αριθμηθεί με αύξουσα σειρά. Ξεκινώντας από εκείνο που βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια του πυθμένα, δηλαδή στην Ζώνη 0-5 m (Ελατήριο Νο1), μέχρι εκείνο που βρίσκεται πιο κοντά στη χαμηλότερη διατομή της κατασκευής, δηλαδή στην Ζώνη 30-35 m (Ελατήριο Νο7). Οι ζώνες των ελατηρίων έχουν παρουσιαστεί στους Πίνακες 3.17 και Πίνακας 3.18. Το 8^ο και τελευταίο ελατήριο είναι το κατακόρυφο ελατήριο που έχει τοποθετηθεί στη χαμηλότερη διατομή της ανεμογεννήτριας για την αντιστάθμιση της δύναμης της βαρύτητας. Σημειώνεται πως οι συγκεκριμένες καμπύλες εσωτερικής ενέργειας των ελατηρίων αφορούν το σενάριο Str_3_0_0, όπου το πλοίο έχει αρχική ταχύτητα 3 m/s και δεν υπάρχουν φορτία ανέμου. Από τα 7 πρώτα οριζόντια μη γραμμικά ελατήρια, μεγαλύτερες τιμές εσωτερικής ενέργειας παρουσιάζουν τα Ελατήρια Νο1 έως Νο3 και το Ελατήριο Νο7. Αυτό είναι λογικό καθώς τα συγκεκριμένα ελατήρια συνδέονται με τις 3 Ζώνες του πυλώνα που βρίσκονται πλησιέστερα στο επίπεδο του πυθμένα και με τη χαμηλότερη Ζώνη του πυλώνα, αντίστοιχα. Δεδομένου ότι ο πυλώνας στην περιοχή του υπεδάφους αποκρίνεται υπό τη μορφή του Σχήμα 4.10, οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες οριζόντιες μετατοπίσεις. Οι μετατοπίσεις αυτές συνεπάγονται επιμήκυνση ή σμίκρυνση του ελατηρίου με αποτέλεσμα την αύξηση της ελαστικής του ενέργειας παραμόρφωσης και επομένως και της εσωτερικής του ενέργειας. Αντίθετα, τα ελατήρια που έχουν συνδεθεί με τις ζώνες που βρίσκονται κεντρικά καθ' ύψος του πυλώνα (Νο4,5,6), αποκτούν μικρότερες τιμές εσωτερικής ενέργειας καθώς οι μετατοπίσεις τους είναι περιορισμένες. Για όλα τα οριζόντια ελατήρια παρατηρείται επίσης πως μετά το 3 s της προσομοίωσης, η εσωτερική ενέργεια που διαθέτουν είναι ιδιαίτερα χαμηλή, καθώς η σύγκρουση έχει

ολοκληρωθεί και οι μεγάλες παραμορφώσεις του υπεδάφους έχουν περιοριστεί. Από εκεί και έπειτα, ο βασικός λόγος που αναπτύσσεται εσωτερική ενέργεια στα ελατήρια είναι η ταλάντωση στην οποία έχει υποβληθεί η ανεμογεννήτρια λόγω της σύγκρουσης.



Σχήμα 4.48: Χρονική ιστορία εσωτερικής ενέργειας των ελατηρίων του πυθμένα ($V = 3 \text{ m/s}$, $W = 0 \text{ m/s}$)

Σχετικά με το κατακόρυφο ελατήριο Νο8, εκείνο εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές εσωτερικής ενέργειας από όλα τα ελατήρια, ακόμα και μετά την ολοκλήρωση της κρούσης. Το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι λογικό αφού ο σκοπός του είναι η εξισορρόπηση του βάρους της κατασκευής, το οποίο προφανώς επενεργεί καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο πρώτος λόγος που παραλαμβάνει μεγάλη ποσότητα εσωτερικής ενέργειας είναι οι μεγάλες κατακόρυφες ταλαντωτικές μετατοπίσεις, με εύρος περίπου 300 mm, που υφίσταται ο πυλώνας. Η τιμή αυτή μπορεί όπως σχολιάστηκε νωρίτερα να μην είναι μεγάλη σχετικά με το ύψος όλης της κατασκευής, αλλά αρκεί για την ανάπτυξη σημαντικής εσωτερικής ενέργειας. Άλλωστε τα 300 mm προσεγγίζουν την μέγιστη οριζόντια μετατόπιση του πυθμένα που ισούται με 330 mm, η οποία σύμφωνα και με το Σχήμα 4.10, είναι η μεγαλύτερη μετατόπιση μεταξύ όλων των διατομών του υπεδάφους. Ο δεύτερος λόγος σχετίζεται με την δυσκαμψία του ελατηρίου, k , αύξηση της οποίας συνεπάγεται και αύξηση της εσωτερικής ενέργειας. Η σχέση που εκφράζει τη συμπεριφορά των γραμμικών ελατηρίων είναι η $F = k \cdot \delta$. Σύμφωνα με αυτήν για ίδια μετατόπιση, δ , μεγαλύτερο k συνεπάγεται μεγαλύτερες δυνάμεις επαναφοράς, F , και επομένως μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια, η οποία για γραμμικά ελατήρια αντιστοιχεί στη δυναμική ενέργεια των ελατηρίων που δίνεται από τον τύπο $U = 0.5 \cdot k \cdot \delta^2$. Στην παρούσα εργασία όμως τα ελατήρια είναι μη γραμμικά. Ωστόσο, είναι καταρχάς γνωστό, πως

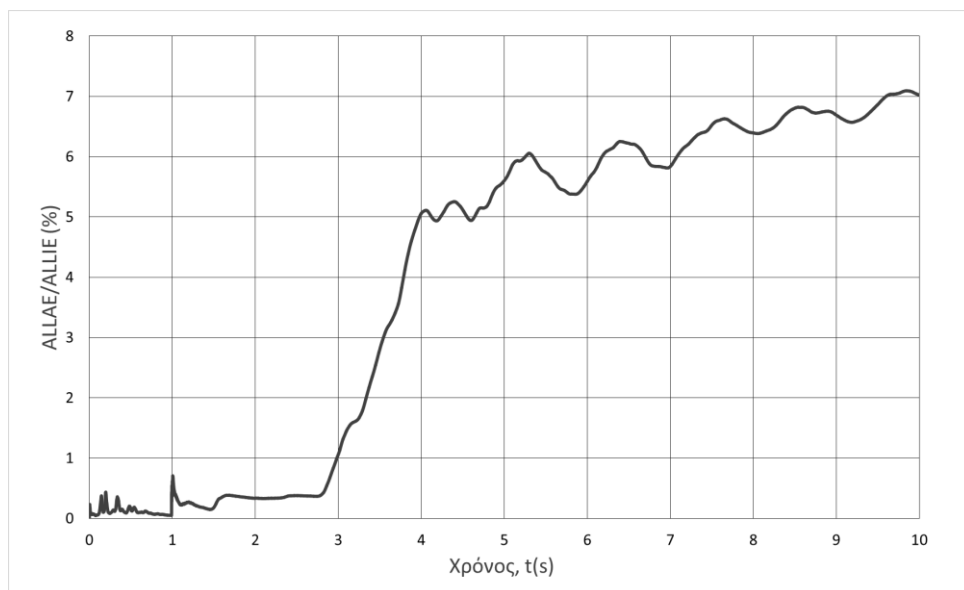
το κατακόρυφο ελατήριο Νο8 περιγράφεται από την χαρακτηριστική καμπύλη του οριζόντιου ελατηρίου Νο7 της Ζώνης 30-35 m. Επιπλέον, παρατηρείται το Σχήμα 3.47 που περιλαμβάνει τις χαρακτηριστικές καμπύλες των ελατηρίων που έχουν προσδεθεί στις Ζώνες του υπεδάφους που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες οριζόντιες μετατοπίσεις λόγω της κρούσης. Από αυτό το σχήμα γίνεται αντιληπτό πως το οριζόντιο ελατήριο Νο7, επομένως και το κατακόρυφο ελατήριο Νο8, έχει τον μεγαλύτερο συντελεστή δυσκαμψίας, αφού για ίδια μετατόπιση η δύναμη επαναφοράς είναι μεγαλύτερη από τα υπόλοιπα ελατήρια. Αυτός, είναι και ο δεύτερος λόγος της εμφάνισης μεγάλων τιμών εσωτερικής ενέργειας σε αυτό το ελατήριο.

Επιπλέον, σημειώνεται πως η εσωτερική ενέργεια που απορροφά το κατακόρυφο ελατήριο δεν οφείλεται στη διάχυση της ενέργειας της κρούσης αλλά στο έργο της δύναμης της βαρύτητας που ασκείται στο μοντέλο. Δηλαδή, η ύπαρξη του κατακόρυφου ελατηρίου και της ασθενούς κατακόρυφης ταλάντωσης που προκαλούταν λόγω αυτού δεν επηρέαζε το φαινόμενο της κρούσης και τον τρόπο με τον οποίο διαχέεται η ενέργεια στο μοντέλο. Αυτό επαληθεύτηκε μέσω της προσομοίωσης του βασικού σεναρίου σύγκρουσης Str_3_0_0, χωρίς την ύπαρξη του κατακόρυφου ελατηρίου της βάσης. Αντί αυτού, η οριακή συνθήκη εκεί διαμορφώθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε η διατομή της βάσης να έχει τη δυνατότητα περιστροφής γύρω από το οριζόντιο επίπεδο, αλλά το κέντρο της να μην μπορεί να μετατοπιστεί κατακόρυφα από την επίδραση της βαρύτητας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν πως η εσωτερική ενέργεια που απορροφά η ανεμογεννήτρια λόγω της σύγκρουσης λαμβάνει ίδιες τιμές είτε με είτε χωρίς το κατακόρυφο ελατήριο της βάσης. Επίσης, και οι δύο τρόποι μοντελοποίησης χαρακτηρίζονταν από ίδια διάρκεια και μέγιστη δύναμη κρούσης, ενώ και ο πλαστικός κόμβος σχηματιζόταν στο ίδιο σημείο στην ανεμογεννήτρια και την ίδια χρονική στιγμή.

- Ένα μέτρο ελέγχου του πλέγματος των μοντέλων είναι η αξιολόγηση της τεχνητής ενέργειας παραμόρφωσης (Artificial Strain Energy-ALLAE). Όπως ορίστηκε και στο εδάφιο 4.3.1, αυτή η συνιστώσα της εσωτερικής ενέργειας δημιουργείται με σκοπό της αντιμετώπισης του φαινομένου κλειψύδρας (hourglass) που παρουσιάζουν τα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία. Απαιτείται το ποσοστό της τεχνητής ενέργειας παραμόρφωσης ως προς την εσωτερική ενέργεια να είναι μικρότερο του 5%. Οι μεγαλύτερες τιμές υποδηλώνουν πως η χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου δεν είναι η ιδανική. Επομένως, η αποφυγή μεγάλων τιμών τεχνητής ενέργειας παραμόρφωσης επιτυγχάνεται με την εκλέπτυνση του πλέγματος.

Στην παρούσα μελέτη, το όριο του 5% ικανοποιείται με ευκολία για τα σενάρια όπου δεν προκύπτει κατάρρευση της κατασκευής. Στις περιπτώσεις όπου η κατασκευή τίθεται υπό κατάρρευση, καθώς η εσωτερική ενέργεια αυξάνεται συνεχώς, το ίδιο παθαίνει και η τεχνητή ενέργεια παραμόρφωσης ξεπερνώντας κάποια στιγμή το όριο του 5%. Αυτό συμβαίνει καθώς τα στοιχεία του κόμβου βρίσκονται υπό συνεχή κάμψη κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης της κατασκευής. Την χειρότερη συμπεριφορά

παρουσιάζει το σενάριο Str_5_0_11, για το οποίο το διάγραμμα του ποσοστού της τεχνητής εσωτερικής ενέργειας προς την εσωτερική φαίνεται στο Σχήμα 4.48. Σημειώνεται πως το παρακάτω διάγραμμα περιλαμβάνει τα πρώτα 10 s της προσομοίωσης, τα οποία είναι αυτά που ενδιαφέρουν, αφού εντός αυτών έχει γίνει ξεκάθαρα πως η κατασκευή είναι πλήρως ασταθής και καταρρέει. Διακρίνεται πως τα πρώτα 4 s που περιλαμβάνουν την σύγκρουση (1-3s) των κατασκευών, που αποτελεί και το βασικό φαινόμενο της προσομοίωσης, ο λόγος των ενεργειών είναι μικρότερος του ορίου του 5%. Το πρόβλημα εντοπίζεται στη συνέχεια, όπου και παρατηρείται συνεχή αύξηση των παραμορφώσεων στον πλαστικό κόμβο. Σε αυτό το χρονικό διάστημα το ποσοστό φτάνει μέχρι το 7%, το οποίο ωστόσο δεν είναι απαγορευτικό, δεδομένου των συνθηκών. Η λύση της εκλέπτυνσης του πλέγματος εξετάστηκε, όμως δεν κρίθηκε αποδοτική όπως σχολιάστηκε και στο εδάφιο 3.3.2.2.

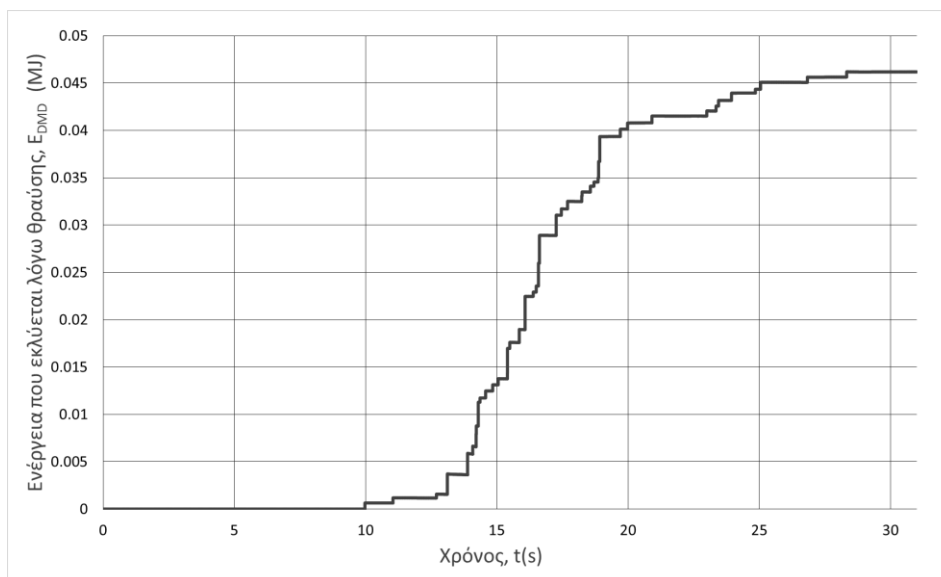


Σχήμα 4.49: Ποσοστό τεχνητής ενέργειας παραμόρφωσης ως προς την εσωτερική ενέργεια για το σενάριο Str_5_0_11

- Κατά την εισαγωγή του κριτηρίου θραύσης στο μοντέλο, έγινε η παραδοχή πως τα strain rates είναι αμελητέα και δεν θα ληφθούν υπόψιν. Γι' αυτόν τον λόγο τέθηκαν ίσα με 0 για όλες τις τιμές τριαξονικότητας. Διαθέτοντας πλέον τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ο γράφων είναι σε θέση να εξετάσει την αξιοπιστία της συγκεκριμένης παραδοχής. Οι μεγαλύτερες παραμορφώσεις εντοπίζονται φυσικά στους πλαστικούς κόμβους που δημιουργούνται. Ενώ, το σενάριο στο οποίο οι πλαστικές παραμορφώσεις αναπτύσσονται με μεγαλύτερο ρυθμό είναι το Str_5_0_11, καθώς σε αυτό ασκείται η μέγιστη δύναμη κρούσης αλλά και τα μέγιστα φορτία του ανέμου. Επίσης, η κατασκευή υπόκειται σε συνεχή κατάρρευση με αδιάκοπη πλαστική παραμόρφωση στην περιοχή του πλαστικού κόμβου. Γι' αυτούς τους λόγους το συγκεκριμένο σενάριο ήταν εκείνο με τους μεγαλύτερους ρυθμούς παραμόρφωσης των στοιχείων του. Μετά από έλεγχο των strain rates των στοιχείων στην περιοχή του κόμβου, ανακαλύφθηκε πως οι τιμές τους βρίσκονταν μεταξύ του 0 και του 1 s^{-1} , τα οποία θεωρούνται τα όρια των χαμηλών επιπέδων ρυθμού

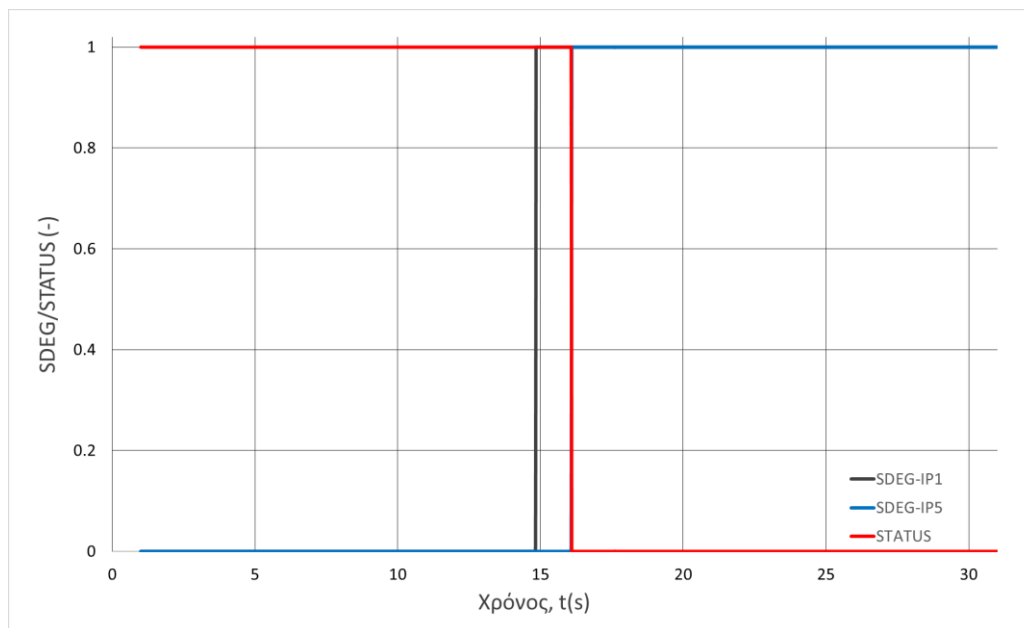
παραμόρφωσης, που χαρακτηρίζει συνήθως τα ψευδοστατικά προβλήματα. Επομένως, η παραδοχή που έγινε κατά τον ορισμό του κριτηρίου θραύσης θεωρείται αποδεκτή.

- Κατά τη διαδικασία διαμόρφωσης του μοντέλου, ορίστηκε από τον χρήστη η δυνατότητα των στοιχείων να αφαιρούνται από το πλέγμα όταν ξεπερνούν την παραμόρφωση θραύσης τους. Τελικά, εξετάζοντας τα αποτελέσματα παρατηρείται πράγματι θραύση και αφαίρεση στοιχείων στα σενάρια όπου προκύπτει η κατάρρευση της κατασκευής. Όπως είναι αναμενόμενο, τα στοιχεία που θραύονται βρίσκονται στην περιοχή του πλαστικού κόμβου, όπου για τις κατασκευές που καταρρέουν οι πλαστικές παραμορφώσεις εκεί μεγεθύνονται συνεχώς. Για να συμβεί όμως η αφαίρεση του στοιχείου από το πλέγμα, πρέπει να επέλθει θραύση σε όλα τα σημεία ολοκλήρωσης (Section Points) κατά το πάχος του στοιχείου. Με άλλα λόγια, σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης, η μεταβλητή D , Damage Degradation πρέπει να φτάσει στη μέγιστη τιμή της, δηλαδή την μονάδα. Στην συγκεκριμένη μελέτη έχουν οριστεί 5 σημεία ολοκλήρωσης κατά το πάχος των στοιχείων. Κάθε φορά που συμβαίνει θραύση σε κάποιο από τα σημεία ολοκλήρωσης του στοιχείου εκλύεται μια μορφή ενέργειας θραύσης, η οποία ονομάζεται Damage Dissipation Energy (DMD) και αποτελεί τμήμα της εσωτερικής ενέργειας της κατασκευής. Στο Σχήμα 4.50 παρουσιάζεται η χρονική ιστορία της ενέργειας θραύσης για το σενάριο Str_3_0_11.4. Σε αυτό η απελευθέρωση της ενέργειας θραύσης εκφράζεται μέσω κατακόρυφης ανόδου της τιμής της τη στιγμή που γίνεται η θραύση σε κάθε σημείο ολοκλήρωσης.



Σχήμα 4.50: Ενέργεια που εκλύεται λόγω θραύσης των στοιχείων για το σενάριο Str_3_0_11

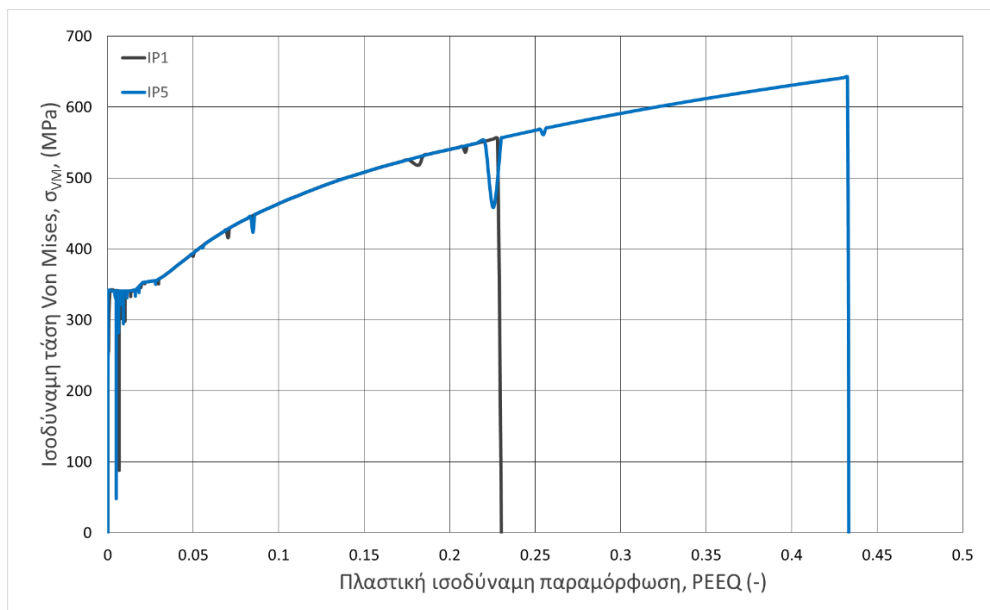
Για καλύτερη κατανόηση της θραύσης και της αφαίρεσης των στοιχείων παρατίθεται το Σχήμα 4.51 που περιλαμβάνει τις μεταβλητές που αφορούν αυτά τα φαινόμενα για ένα συγκεκριμένο στοιχείο στην περιοχή του κόμβου, το No2206. Αυτές είναι η μεταβλητή SDEG, που ονομάζεται Scalar Stiffness Degradation variable και αντιστοιχεί στην μεταβλητή D, Damage Degradation του Damage Evolution. Το SDEG δίνεται για το πρώτο (SP1) και το τελευταίο (SP5) σημείο ολοκλήρωσης του στοιχείου. Η δεύτερη μεταβλητή είναι το STATUS, το οποίο αντικατοπτρίζει την κατάσταση που βρίσκεται το στοιχείο, αν δηλαδή είναι ενεργό (STATUS = 1) ή όχι (STATUS = 0). Εφόσον, έχουμε ενεργοποιήσει την επιλογή τα στοιχεία να αφαιρούνται από το πλέγμα όταν το STATUS γίνεται 0, συμβαίνει και η αφαίρεση του στοιχείου. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως η μεταβλητή SDEG για το IP1 γίνεται από μηδενική, μονάδα ($t = 15$ s) που συνεπάγεται πως έχει επέλθει η θραύση για το πρώτο σημείο ολοκλήρωσης του στοιχείου. Το STATUS όμως του στοιχείου εξακολουθεί να ισούται με 1, που σημαίνει πως το στοιχείο δεν έχει διαγραφεί ακόμη, καθώς στα υπόλοιπα σημεία ολοκλήρωσης δεν έχει καταρρεύσει. Αυτό συμβαίνει περίπου στα 16 s, όταν και η μεταβλητή SDEG για το IP5, γίνεται ίση με τη μονάδα που συνεπάγεται τη θραύση και του τελευταίου σημείου ολοκλήρωσης. Έτσι, την ίδια στιγμή, το STATUS γίνεται μηδενικό και το στοιχείο διαγράφεται από το πλέγμα.



Σχήμα 4.51: Μεταβλητές SDEG για το πρώτο και το πέμπτο σημείο ολοκλήρωσης και STATUS, του στοιχείου No2206 στον πλαστικό κόμβο του σεναρίου Str_3_0_11.4

- Για το στοιχείο No2206 του πλαστικού κόμβου του σεναρίου Str_3_0_11.4, παρατίθεται και η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης (Σχήμα 4.52) που ακολουθεί κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης στο πρώτο (SP1) και στο τελευταίο (SP5) σημείο ολοκλήρωσής του. Προφανώς, η καμπύλη αυτή ταυτίζεται με την πραγματική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που ορίστηκε μέσω του Property Module. Και τα δύο σημεία ολοκλήρωσης διαρρέουν για όριο διαρροής ίσον με 340 MPa, ενώ

παρατηρείται πως για το συγκεκριμένο στοιχείο αυτό συμβαίνει στα 2.5 s, όταν αρχίζει να δημιουργείται ο πλαστικός κόμβος. Η διαφορά μεταξύ των καμπυλών των δύο σημείων ολοκλήρωσης είναι το γεγονός πως το SP5 παραμορφώνεται περισσότερο πριν καταλήξει στη θραύση του, παραλαμβάνοντας έτσι και μεγαλύτερες τάσεις. Αυτό άλλωστε έρχεται σε συμφωνία με το την πορεία της μεταβλητής SDEG για τα δύο σημεία από το Σχήμα 4.51. Τέλος, στο παρακάτω διάγραμμα παρατηρείται πως η ευθεία του Damage Evolution, δηλαδή η ευθεία που ενώνει τη μέγιστη τάση της κάθε καμπύλης με τη μηδενική, όταν επέρχεται η θραύση, δεν είναι κατακόρυφη, αλλά διαθέτει μια μικρή κλίση καθώς όταν ορίστηκε το Damage Evolution το Displacement at failure τέθηκε ίσο με 0.0001 αντί για 0.



Σχήμα 4.52: Καμπύλη τάσης παραμόρφωσης για το πρώτο και το πέμπτο σημείο ολοκλήρωσης του στοιχείου No2206 στον πλαστικό κόμβο του σεναρίου Str_3_0_11.4

- Η σύγκρουση του πλοίου στην ανεμογεννήτρια έχει ως αποτέλεσμα η κατασκευή της να υποβληθεί σε δύο διαφορετικές μορφές κάμψης. Η πρώτη χρονικά κάμψη συμβαίνει στις πρώτες στιγμές της σύγκρουσης. Κάμπτει την ανεμογεννήτρια προς την μεριά του πλοίου και οφείλεται στην αντίσταση που παρουσιάζει η κορυφή της εγκατάστασης λόγω της μεγάλης αδράνειας της. Όταν η ταχύτητα του πλοίου είναι χαμηλή (1 m/s και 3 m/s), και ο άνεμος είναι είτε μηδενικός είτε ομόρροπος με το πλοίο, δεν σχηματίζεται πλαστικός κόμβος λόγω της πρώτης κάμψης. Όταν όμως το πλοίο κινείται με ταχύτητα 5 m/s, σχηματίζεται πλαστικός κόμβος, που βρίσκεται περίπου στο μέσο του ύψους του πύργου της εγκατάστασης από τη μεριά του πλοίου. Μία άλλη περίπτωση σύγκρουσης, που οδηγεί σε πλαστικό κόμβο εκεί, είναι όταν το πλοίο κινείται με χαμηλότερη ταχύτητα αλλά τα φορτία ανέμου έχουν αντίθετη κατεύθυνση από αυτο (Str_3_180_11.4). Τότε, ο άνεμος ευνοεί την κάμψη προς τη μεριά του πλοίου, οδηγώντας τελικά στην εμφάνιση του κόμβου.

Η δεύτερη χρονικά κάμψη συμβαίνει λόγω της ελαστικής ενέργειας παραμόρφωσης που έχει αποθηκεύσει η ανεμογεννήτρια λόγω της σύγκρουσης. Αναλυτικότερα, καθώς το πλοίο επιβραδύνεται, η κινητική του ενέργεια μετατρέπεται σε εσωτερική και κινητική ενέργεια της εγκατάστασης. Το μεγαλύτερο τμήμα της εσωτερικής ενέργειας είναι ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης η οποία προκαλεί την τάση της ανεμογεννήτριας να επανέλθει στην αρχική της κατάσταση. Στην ουσία, θέτει την ανεμογεννήτρια σε ταλάντωση. Έτσι, λοιπόν η κορυφή που είχε αρχικά λυγίσει προς την μεριά του πλοίου, λόγω της αποθηκευμένης ελαστικής της ενέργειας κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Παράλληλα, το χαμηλότερο τμήμα της ανεμογεννήτριας, που αρχικά είχε μετακινηθεί κατά τη φορά του πλοίου, προσπαθεί να επανέλθει στην αρχική του θέση, κινούμενο προς το πλοίο. Η αντίθετη κίνηση της κορυφής και του τμήματος κοντά στην περιοχή της σύγκρουσης, οδηγούν στην κάμψη του πύργου κατά την κατεύθυνση της σύγκρουσης. Σε μέτριες (3 m/s) και σε υψηλές (5 m/s) ταχύτητες, ακόμα και χωρίς την ύπαρξη ευνοϊκού ανέμου, η δεύτερη χρονικά κάμψη καταλήγει στον σχηματισμό του πλαστικού κόμβου στην περιοχή ένωσης πύργου – πυλώνα.

- Ο βασικός κίνδυνος που εγκυμονεί από την σύγκρουση των δύο κατασκευών είναι φυσικά η κατάρρευση της ανεμογεννήτριας. Ωστόσο, μπορεί να προκύψουν ακόμα πιο δυσμενέστερες συνέπειες αν η ανεμογεννήτρια καταρρεύσει προς τη μεριά που βρίσκεται το πλοίο. Τότε ο πύργος θα πέσει πάνω στο κατάστρωμα του πλοίου με αποτέλεσμα, πέρα από την επέκταση των υλικών και οικονομικών ζημιών, να κορυφώνεται ο κίνδυνος για ανθρώπινες απώλειες αλλά και μόλυνση του περιβάλλοντος. Από τις περιπτώσεις σύγκρουσης που μοντελοποιήθηκαν, το συγκεκριμένο σενάριο κατάρρευσης συναντάται όταν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου λειτουργίας και όταν ο άνεμος και το πλοίο, που κινείται με ταχύτητα 3 m/s, έχουν αντίθετες κατευθύνσεις (Str_3_180_11.4).
- Επίδραση της ταχύτητας του πλοίου.

Για τον έλεγχο της επίδρασης της ταχύτητας του πλοίου στην απόκριση της ανεμογεννήτριας, συγκρίθηκαν 3 σενάρια όπου το πλοίο συγκρουόταν με ταχύτητα 1 m/s, 3 m/s και 5 m/s, χωρίς παράλληλα να υπάρχουν φορτία ανέμου. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του πλοίου, τόσο μεγαλύτερες επιταχύνσεις αναπτύσσει η κορυφή της ανεμογεννήτριας, το οποίο αποτελεί κίνδυνο για τη δομική ακεραιότητα του ατρακτίδιου και της φτερωτής που βρίσκονται εκεί. Παράλληλα, η αύξηση της ταχύτητας του πλοίου προκαλεί και αύξηση της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης της κορυφής. Μάλιστα, για ταχύτητες 3 m/s και 5 m/s, δημιουργείται πλαστικός κόμβος στην ένωση πυλώνα – πύργου, που θέτει τον πύργο σε ταλάντωση γύρω από μια νέα θέση ισορροπίας. Σχετικά με την ίδια την κρούση, μεγαλύτερη ταχύτητα πλοίου συνεπάγεται μεγαλύτερες κρουστικές δυνάμεις μεταξύ των κατασκευών, αλλά και μεγαλύτερη μέγιστη και παραμένουσα σχετική εισχώρηση των τοιχωμάτων του πυλώνα. Τέλος, αυξάνεται η τιμή της εσωτερικής ενέργειας που απορροφά ο πυλώνας καθώς και η οριζόντια μετατόπιση του πυθμένα.

- Επίδραση της ευκαμψίας του πυθμένα

Για τη μελέτη του πως επιδρά η ευκαμψία του πυθμένα στην απόκριση της κατασκευής συγκρίθηκαν 2 σενάρια, όπου το πλοίο είχε ταχύτητα 3 m/s, δεν έπνεε άνεμος και στο ένα η κατασκευή ήταν πακτωμένη στο επίπεδο του πυθμένα ενώ στο άλλο η αλληλεπίδραση υπεδάφους – πυλώνα είχε μοντελοποιηθεί μέσω των μη γραμμικών ελατηρίων. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο προσομοιώσεων σχετιζόταν με την φθορά που προέκυπτε στην ανεμογεννήτρια. Όταν ο πυθμένας θεωρούταν πακτωμένος οι πλαστικές παραμορφώσεις στην περιοχή της σύγκρουσης ήταν πολύ μεγαλύτερες από όταν το υπέδαφος ήταν εύκαμπτο. Παράλληλα, αυτό οδηγεί σε σχεδόν διπλάσια μέγιστη σχετική εισχώρηση των τοιχωμάτων του πυλώνα, και σε τριπλάσια παραμένουσα εισχώρηση. Από την άλλη όμως, στην περίπτωση της πάκτωσης δεν δημιουργείται πλαστικός κόμβος στην ένωση πυλώνα – πύργου.

- Επίδραση του ανέμου και της ταχύτητας του

Η αξιολόγηση της επίδρασης του ανέμου, ουσιαστικά ταυτίζεται με την αναγνώριση της απόκρισης της ανεμογεννήτριας μετά τη σύγκρουση, όταν αυτή βρίσκεται σε λειτουργία και έγινε για διάφορές ταχύτητες πλοίου.

Για χαμηλές ταχύτητες πλοίου (1 m/s) και ονομαστική ταχύτητα ανέμου λειτουργίας της ανεμογεννήτριας (11.4 m/s), δεν δημιουργείται πλαστικός κόμβος όπως και όταν δεν υπάρχει άνεμος, αλλά η κορυφή της ανεμογεννήτριας τίθεται σε ταλάντωση μεγαλύτερου πλάτους και περιόδου. Αυτό εξηγείται και από το γεγονός ότι η εσωτερική ενέργεια που απορροφά η ανεμογεννήτρια είναι μεγαλύτερη όταν υφίστανται φορτία ανέμου.

Για υψηλές ταχύτητες πλοίου (5 m/s) και ονομαστική ταχύτητα ανέμου λειτουργίας της ανεμογεννήτριας (11.4 m/s), παρατηρείται πως ο πλαστικός κόμβος, που δημιουργείται ούτως ή άλλως και όταν δεν υπάρχει άνεμος, σε συνδυασμό με τα φορτία του ανέμου οδηγούν στην πτώση της ανεμογεννήτριας.

Για μεσαίες ταχύτητες πλοίου (3 m/s), αξιολογείται η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στην απόκριση της ανεμογεννήτριας. Αποδείχθηκε πως για την ονομαστική ταχύτητα ανέμου λειτουργίας της ανεμογεννήτριας (11.4 m/s), η κατασκευή οδηγείται σε κατάρρευση. Για τις υπόλοιπες ταχύτητες ανέμου λειτουργίας (7 m/s, 8.5 m/s, 10 m/s, 13.5 m/s, 20 m/s), δημιουργείται πλαστικός κόμβος και η κορυφή της ανεμογεννήτριας τίθεται σε οριζόντια ταλάντωση. Ο τρόπος με τον οποίο αποκρίνεται τελικά η ανεμογεννήτρια εξαρτάται από το μέγεθος της δύναμης ώσης που ασκείται στη φτερωτή της.

- Επίδραση της κατεύθυνσης του ανέμου σε σχέση με την κατεύθυνση του πλοίου

Ο έλεγχος της επίδρασης της σχετικής γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ της κατεύθυνσης του πλοίου και του ανέμου γίνεται συγκρίνοντας 3 σενάρια. Σε αυτά το πλοίο προσκρούει στην εγκατάσταση κινούμενο στην ίδια (0°), σε κάθετη (90°) και σε αντίθετη (180°) κατεύθυνση σε σχέση με τον άνεμο με τον άνεμο. Φαίνεται πως αλλάζοντας τη σχετική γωνία ανέμου – πλοίου, μεταβάλλεται η περιοχή προς την οποία θα λυγίσει ο πύργος και ενδεχομένως καταρρεύσει αν η ταχύτητα του ανέμου και του πλοίου είναι αρκετά υψηλές. Συγκεκριμένα, για γωνία 0°, η ανεμογεννήτρια

«πέφτει» αντίθετα από την περιοχή που βρίσκεται το πλοίο. Όταν το πλοίο συγκρούεται κάθετα με τον άνεμο, η κατασκευή λυγίζει σε γωνία περίπου 50°, ως προς τη διεύθυνση του πλοίου αλλά όχι προς τη μεριά του. Τέλος, για αντίθετες κατευθύνσεις, ο πύργος λυγίζει και καταρρέει προς το κατάστρωμα του πλοίου, ακόμα και για μέτριες ταχύτητες (3 m/s).

- Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της εργασίας με αντίστοιχες μελέτες της βιβλιογραφίας παρουσιάζονται αρκετές ομοιότητες ως προς τη μορφή της απόκρισης της ανεμογεννήτριας. Σημειώνεται ωστόσο πως οι διαθέσιμες μελέτες αφορούσαν μετωπική σύγκρουση και διαφορετικά μοντέλα ανεμογεννήτριας και πλοίου. Επομένως, δεν μπορεί να γίνει ευθεία σύγκριση των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, μια ομοιότητα που παρατηρήθηκε με τη δημοσίευση των Song και Jiang [14], είναι πως η σύγκρουση πλοίου στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας, ο οποίος έχει μεγαλύτερο πάχος τοιχώματος από τον πύργο, οδήγησε στη δημιουργία πλαστικού κόμβου στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Μάλιστα, για σύγκρουση με αντίρροπο άνεμο ο κόμβος αυτός σχηματιζόταν υψηλότερα από ότι στην περίπτωση του ομόρροπου ανέμου, όπως και στην παρούσα μελέτη. Μελετώντας την έρευνα των Bela και Le Sourne [13] παρατηρείται πως και στο μοντέλο σύγκρουσης που χρησιμοποίησαν η κορυφή της ανεμογεννήτριας τίθεται σε ταλάντωση γύρω από μια νέα θέση ισορροπίας λόγω της δημιουργίας του πλαστικού κόμβου. Επιπλέον, και σε αυτή τη μελέτη επιβεβαιώνεται η επίδραση της κατεύθυνσης του ανέμου στο προς τα που καταρρέει η ανεμογεννήτρια, με τον αντίρροπο άνεμο να προκαλεί και σε αυτή την περίπτωση την πτώση της κατασκευής πάνω στο πλοίο. Τέλος, εξετάζεται και η μελέτη των Bela, Buldgen και Rigo [42], τα αποτελέσματα της οποίας περιείχαν τις χρονικές ιστορίες της εσωτερικής ενέργειας της ανεμογεννήτριας, της δύναμης κρούσης, της εισχώρησης στον πυλώνα αλλά και της μετατόπισης της κορυφής. Η πορεία όλων αυτών των μεγεθών ήταν παρόμοιας μορφής με την πορεία τους στην προκειμένη διπλωματική εργασία.
- Σχετικά με τον υπολογιστικό χρόνο των αναλύσεων: Τα σενάρια που προσομοιώθηκαν μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες ως προς τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτούσαν για να ολοκληρωθούν. Στην πρώτη κατηγορία περιέχονται τα 13 σενάρια που μοντελοποιούσαν την αλληλεπίδραση υπεδάφους – πυλώνα μέσω των μη γραμμικών ελατηρίων. Αυτά αποτελούνταν από 23,876 στοιχεία και χρειάστηκαν περίπου 1 εβδομάδα για 31 s ανάλυσης. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει το σενάριο όπου ο πυλώνας θεωρούταν πακτωμένος στο επίπεδο του πυθμένα. Αυτά περιείχαν 19,466 στοιχεία, αφού το τμήμα του πυλώνα στο υπέδαφος δεν είχε μοντελοποιηθεί, και απαιτούσαν μόλις 1.5 ώρα για 31 s ανάλυσης. Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως από τη στιγμή που η διαφορά στον αριθμό των στοιχείων δεν είναι τόσο μεγάλη, ο λόγος στον οποίο οφείλεται η τόσο μεγάλη διαφορά στον υπολογιστικό χρόνο είναι τα στοιχεία ελατηρίων που περιελάμβαναν επιπλέον τα σενάρια της πρώτης κατηγορίας σε σχέση με της δεύτερης και κυρίως το κατακόρυφο ελατήριο της βάσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο
ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ,
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ &
ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Κεφάλαιο 5^ο: Σύνοψη, συμπεράσματα και προτάσεις

5.1 Σύνοψη διπλωματικής εργασίας & παραδοχών

Η παρούσα διπλωματική εργασία στόχευε στην κατασκευή ενός αριθμητικού μοντέλου για την προσομοίωση της πλευρικής σύγκρουσης ενός επιβατηγού – οχηματαγωγού πλοίου με μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια. Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας βασίστηκε στην ανεμογεννήτρια αναφοράς του πολυτεχνείου της Δανίας και στην ανάλυση θεωρήθηκε πως μπορούσε να λάβει παραμορφώσεις. Το μοντέλο του πλοίου, από την άλλη, σχεδιάστηκε με βάση το Ε/Ο πλοίο BLUE STAR ΙΤΗΑΚΙ, του οποίου το σχέδιο της μέσης τομής ήταν διαθέσιμο. Στην ανάλυση το πλοίο θεωρήθηκε απόλυτα άκαμπτο, που σημαίνει πως δεν μπορούσε να παραμορφωθεί. Επομένως, όλη η ενέργεια της σύγκρουσης απορροφούταν από το μοντέλο της ανεμογεννήτριας, του οποίου και εξεταζόταν η δυναμική απόκριση. Επιπλέον, κατασκευάστηκαν διαφορετικά σενάρια σύγκρουσης τα οποία τέθηκαν υπό σύγκριση με σκοπό την μελέτη της επίδρασης τεσσάρων βασικών παραμέτρων στην εξέλιξη του φαινομένου. Οι παράμετροι αυτοί ήταν η ταχύτητα σύγκρουσης του πλοίου, η ευκαμψία του πυθμένα, η ταχύτητα του ανέμου και κατεύθυνση του ανέμου σε σχέση με την κατεύθυνση του πλοίου.

Η πρώτη φάση της εργασίας αφορούσε την κατασκευή του μοντέλου της σύγκρουσης η οποία πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων του Abaqus. Αρχικά, ο γράφων διαμόρφωσε κατάλληλα τη γεωμετρία των μοντέλων. Με στόχο την απλοποίηση της μοντελοποίησης και την εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου η γεωμετρία του ατρακτίδιου και της φτερωτής της ανεμογεννήτριας δεν μοντελοποιήθηκαν. Αντίθετα, για να ληφθεί το βάρος τους υπ' όψιν στην προσομοίωση, η μάζα τους τοποθετήθηκε ως σημειακή μάζα στην κορυφή της κατασκευής.

Στη συνέχεια, ακολούθησε η χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου. Αυτό, περιελάμβανε τον προσδιορισμό του τύπου και του μεγέθους του στοιχείου. Όσον αφορά το μοντέλο του πλοίου, από τη στιγμή που θεωρήθηκε άκαμπτο, χρησιμοποιήθηκαν άκαμπτα στοιχεία τύπου R3D4. Το ονομαστικό μήκος της πλευράς τους ορίστηκε ίσο με 1000 mm, χωρίς να πραγματοποιηθεί σύγκλιση πλέγματος αφού το μέγεθος τους δεν επηρέαζε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, δεδομένου ότι τα στοιχεία ήταν άκαμπτα. Για το μοντέλο της ανεμογεννήτριας, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους με κωδική ονομασία S4R. Το μέγεθος τους προσδιορίστηκε εφαρμόζοντας τη διαδικασία μελέτης σύγκλισης του πλέγματος. Τελικά, επιλέχθηκε το ονομαστικό μήκος της πλευράς του στοιχείου στο μεγαλύτερο τμήμα της ανεμογεννήτριας να ισούται με 500 mm.

Έπειτα, ακολούθησε διαμόρφωση του μοντέλου του υλικού. Ο γράφων επέλεξε τον χάλυβα τύπου S235JR EN10025, ως το υλικό των μοντέλων των κατασκευών και χρησιμοποιώντας τον εκθετικό νόμο προσδιόρισε την πραγματική καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης του μετά το όριο αντοχής. Παράλληλα, προσομοίωσε στο Abaqus τη δοκιμή εφελκυσμού, το οποίο αποσκοπούσε στην επαλήθευση της πραγματικής καμπύλης και την

ρύθμιση του κριτηρίου θραύσης. Η καμπύλη που προέκυψε από το αριθμητικό μοντέλο είχε ικανοποιητική ταύτιση με την καμπύλη της ρεαλιστικής δοκιμής. Η διαφορά που παρατηρήθηκε μετά το όριο αντοχής, οφειλόταν στο γεγονός ότι δεν βρέθηκε το κατάλληλο w για το καλιμπράρισμα της καμπύλης, αλλά αντίθετα εφαρμόστηκε ατόφια η εκθετική σχέση, όπου $w = 0$. Το κριτήριο θραύσης που εισήχθει ήταν το RTCL. Σε αυτό πραγματοποιήθηκε κατάλληλη ρύθμιση για το χαρακτηριστικό μέγεθος του στοιχείου, χρησιμοποιώντας την ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση θραύσης υπό συνθήκες μονοαξονικού εφελκυσμού, ϵ_{cr} . Εν τέλει, υπολογίστηκαν οι τιμές του ορίου θραύσης για τις διαφορετικές τιμές τριαξονικότητας.

Ακολούθως, καθορίστηκαν τα φορτία που δέχεται η ανεμογεννήτρια. Αυτά ήταν τα βαρυτικά φορτία, οι δυνάμεις λόγω κυματισμών/ρευμάτων, τα αεροδυναμικά φορτία και τα φορτία λόγω της κρούσης με το πλοίο. Ο συγγραφέας εστίασε στις δυνάμεις που επάγονταν λόγω του ανέμου, οι οποίες ήταν η ώση και η ροπή που ασκούνταν στην κορυφή της ανεμογεννήτριας και η πίεση στον κορμό της λόγω της αεροδυναμικής αντίστασης. Χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες σχέσεις αυτά υπολογίστηκαν για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου που διατηρούνταν σταθερές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και βρίσκονταν εντός των ορίων λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Προχωρώντας, περιγράφηκαν οι οριακές συνθήκες του μοντέλου. Η σημαντικότερη αυτών, ήταν εκείνη που αφορούσε την αλληλεπίδραση μεταξύ του υπεδάφους και του πυλώνα. Συγκεκριμένα, για την επιτυχή μοντελοποίηση αυτής, χρησιμοποιήθηκαν μη γραμμικά ελατήρια τα οποία τοποθετήθηκαν σε διαφορετικές ζώνες του τμήματος του πυλώνα που βρισκόταν στο υπέδαφος. Η χαρακτηριστική τους καμπύλη δύναμης – μετατόπισης, σχεδιάστηκε με βάση τις ιδιότητες του υπεδάφους σε αυτές τις ζώνες. Το μοντέλο ολοκληρώθηκε βρίσκοντας τον επιλύτη που θα χρησιμοποιούταν για την ανάλυση του. Αυτός, ήταν ο άμεσος επιλύτης (Explicit Solver) ο οποίος είναι εκείνος που χρησιμοποιείται συνήθως σε προβλήματα κρούσης.

Η δεύτερη φάση της εργασίας σχετιζόταν με την ανάλυση των σεναρίων σύγκρουσης, τη συλλογή και την σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων τους. Τα σενάρια που κατασκευάστηκαν φαίνονται στον Πίνακα 3.20. Αφού η ανάλυση τους στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ολοκληρώθηκε, τα κατάλληλα σενάρια συγκρίθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε ο γράφων να μπορέσει να καταλήξει σε αξιόπιστα συμπεράσματα για το πως αποκρίνεται η ανεμογεννήτρια μετά τη πλευρική σύγκρουση του πλοίο, καθώς και πως κάθε παράμετρος επηρεάζει αυτή την απόκριση. Τα συμπεράσματα αυτά παρουσιάζονται στο επόμενο υποκεφάλαιο. Προηγουμένως, όμως, συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές παραδοχές που εφαρμόστηκαν κατά τη διαδικασία κατασκευής του αριθμητικού μοντέλου, ώστε να γίνει ξεκάθαρο στον αναγνώστη υπό ποιές παραδοχές η μελέτη οδήγησε στα συγκεκριμένα συμπεράσματα.

Παραδοχές – ιδιαιτερότητες της συγκεκριμένης μοντελοποίησης

- Το πλοίο έχει θεωρηθεί απόλυτα άκαμπτο και μελετάται αποκλειστικά η πλευρική του σύγκρουση με την ανεμογεννήτρια
- Η γεωμετρία του ατρακτίδιου και της φτερωτής δεν μοντελοποιείται. Το βάρος τους λαμβάνεται υπόψιν ως σημειακή μάζα στην κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας
- Δεν λαμβάνεται υπόψιν κάποια μορφή απόσβεσης του υλικού και η επίδραση του ρυθμού μεταβολής της παραμόρφωσης (strain rates) στο κριτήριο θραύσης
- Τα φορτία της θάλασσας (άνωση, κυματισμοί, ρεύματα) δεν μοντελοποιούνται και τα φορτία του ανέμου θεωρούνται στατικά. Το μόνο δυναμικό φορτίο που ασκείται στην ανεμογεννήτρια είναι εκείνο που οφείλεται στη σύγκρουση του πλοίου
- Η αλληλεπίδραση του υπεδάφους με τον πυλώνα της ανεμογεννήτριας έχει μοντελοποιηθεί μέσω μη γραμμικών ελατηρίων των οποίων οι χαρακτηριστικές καμπύλες προκύπτουν από τις ιδιότητες του υπεδάφους. Έχει προστεθεί και ένα κατακόρυφο ελατήριο για την αντιστάθμιση της βαρύτητας

5.2 Συμπεράσματα

Με την ανάλυση των αποτελεσμάτων που προηγήθηκε ο γράφων κατέληξε στα επόμενα συμπεράσματα για τον τρόπο με τον οποίο αποκρίνεται η ανεμογεννήτρια στη σύγκρουση με το πλοίο αλλά και για το πως η κάθε διαφορετική παράμετρος επηρεάζει την απόκριση της.

- Το πλοίο κινούμενο πλευρικά προσκρούει στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Όμως, στην περιοχή της σύγκρουσης η φθορά που υφίσταται ο πυλώνας είναι περιορισμένη. Συγκεκριμένα, σε όλα τα σενάρια, κατά τη διάρκεια της κρούσης ο πυλώνας αναπτύσσει σε αυτό στο σημείο πλαστικές παραμορφώσεις και παρατηρείται εισχώρηση του πλοίου στα τοιχώματα του πυλώνα. Τμήμα της εισχώρησης μάλιστα παραμένει και με το πέρας της σύγκρουσης με αποτέλεσμα η οριζόντια διατομή της ανεμογεννήτριας να έχει αλλάξει σχήμα σε αυτή την περιοχή. Ωστόσο, η συγκεκριμένη βλάβη είναι πολύ μικρότερης έκτασης σε σχέση με την ζημιά που συμβαίνει στην περιοχή της σύγκρουσης όταν το πλοίο προσκρούει μετωπικά στην ανεμογεννήτρια. Σύμφωνα με τη διαθέσιμη βιβλιογραφία, σε αυτού του είδους σύγκρουση και για ταχύτητες πλοίου μεγαλύτερες των 3 m/s, δημιουργείται πλαστικός κόμβος στο σημείο της σύγκρουσης, ο οποίος οδηγεί σε κατάρρευση της ανεμογεννήτριας προς το πλοίο για ταχύτητες μεγαλύτερες των 5 m/s. Αυτή η διαφορά στην παραμόρφωση της ανεμογεννήτριας στο σημείο της κρούσης, οφείλεται στο γεγονός πως κατά τη μετωπική σύγκρουση το τμήμα του πλοίου που έρχεται σε επαφή με τον πυλώνα, δηλαδή η άκρη της πλώρης και ο βολβός, συγκροτούν πολύ μικρότερη επιφάνεια επαφής σε σχέση με όταν συγκρούεται η πλευρά του πλοίου. Επίσης, η αιχμηρή (σε σχέση με την πλευρά του πλοίου) μορφή της πλώρης που εισχωρεί στην ανεμογεννήτρια έχει ως αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ενός εντονότερου τασικού πεδίου στην ανεμογεννήτρια. Έτσι, δημιουργούνται υψηλότερες τάσεις που οδηγούν στην εντονότερη παραμόρφωση στην περιοχή.
- Η κύρια ζημιά που συμβαίνει στην ανεμογεννήτρια στα περισσότερα από τα σενάρια που μοντελοποιήθηκαν είναι ο πλαστικός κόμβος που δημιουργείται στον πύργο της. Ο κόμβος αυτός σχηματίζεται στην περιοχή όπου ενώνεται ο πύργος με τον πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Δημιουργείται σε αυτό το σημείο καθώς το πάχος του τοιχώματος του πύργου είναι περίπου το 1/3 του πάχους του τοιχώματος του πυλώνα. Έτσι, οι μεγάλες καμπτικές ροπές που αναπτύσσονται εκεί λόγω της ταλάντωσης της μάζας που έχει προσαρτηθεί στην κορυφή του πύργου μπορούν να παραληφθούν από τον παχύ πυλώνα αλλά όχι από τον λεπτότερο πύργο με αποτέλεσμα να προκύπτουν μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις.

Από τη στιγμή που δημιουργείται ο κόμβος, στη συνέχεια υφίστανται δύο βασικά σενάρια για την απόκριση της ανεμογεννήτριας. Είτε το τμήμα της πάνω από τον κόμβο υποβάλλεται σε αποσβένουσα ταλάντωση γύρω από μια νέα θέση ισορροπίας διαφορετική από εκείνη στην άθικτη κατάσταση, είτε η κατασκευή λυγίζει αδιάκοπα

προς τη μεριά του κόμβου με αποτέλεσμα τελικά την πλήρη κατάρρευση της. Αυτό που πρακτικά καθορίζει τι θα συμβεί είναι το μέγεθος των φορτίων του ανέμου που επενεργούν πρωτίστως στην κορυφή της ανεμογεννήτριας και δευτερευόντως στο τμήμα της που είναι εκτεθειμένο στον άνεμο. Αν ο άνεμος δημιουργεί φορτία που δεν μπορεί να παραλάβει η κατασκευή με την ταυτόχρονη ύπαρξη του κόμβου, τελικά οδηγείται στην κατάρρευση της. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά σε ποια σενάρια δημιουργείται πλαστικός κόμβος στον πύργο και τι συμβαίνει έπειτα από τον σχηματισμό του

Πίνακας 5.1: Μορφή απόκρισης της ανεμογεννήτριας του εκάστοτε σεναρίου

Σενάριο	Πλαστικός κόμβος	Ταλάντωση/Κατάρρευση
<i>Str_1_0_0</i>	✘	Ταλάντωση
<i>Str_3_0_0</i>	✓	Ταλάντωση
<i>Str_5_0_0</i>	✓	Ταλάντωση
<i>Fix_3_0_0</i>	✘	Ταλάντωση
<i>Str_1_0_11.4</i>	✘	Ταλάντωση
<i>Str_3_0_11.4</i>	✓	Κατάρρευση
<i>Str_5_0_11.4</i>	✓	Κατάρρευση
<i>Str_3_0_7</i>	✓	Ταλάντωση
<i>Str_3_0_8.5</i>	✓	Ταλάντωση
<i>Str_3_0_10</i>	✓	Ταλάντωση
<i>Str_3_0_13.5</i>	✓	Ταλάντωση
<i>Str_3_0_20</i>	✓	Ταλάντωση
<i>Str_3_90_11.4</i>	✓	Ταλάντωση
<i>Str_3_180_11.4</i>	✓	Κατάρρευση

Με βάση τα παραπάνω, το βασικότερο μέτρο προστασίας της κατασκευής, για να αποφευχθεί η δημιουργία του πλαστικού κόμβου σε εκείνο το σημείο, αφορά την τροποποίηση της σχεδίασης στην περιοχή ένωσης πυλώνα – πύργου. Αυτό περιλαμβάνει την αύξηση του πάχους του τοιχώματος του πύργου εκεί ή την τοποθέτηση διαμήκων ενισχυτικών εσωτερικά του τοιχώματος. Επίσης προτείνεται η χρήση πύργου μη ενιαίου πάχους τοιχώματος με αύξηση της τιμής του από το ψηλότερο στο χαμηλότερο ύψος

- Στα σενάρια του Πίνακα 5.1 όπου δεν δημιουργείται πλαστικός κόμβος, η κορυφή της ανεμογεννήτριας ταλαντώνεται γύρω από την αρχική θέση ισορροπίας της, η γύρω από μια νέα θέση ισορροπίας κοντινή σε αυτή για την περίπτωση που υφίστανται και φορτία ανέμου. Σε αυτήν την περίπτωση εγκυμονεί ένας διαφορετικός κίνδυνος που σχετίζεται με την περίπτωση η ταλάντωση της ανεμογεννήτριας να γίνεται με ρυθμό που αντιστοιχεί στην ιδιοσυχνότητα της κατασκευής. Σε αυτήν την περίπτωση το πλάτος της ταλάντωσης θα απειριζόταν και η κατασκευή θα κατέρρεε. Τα σενάρια όπου υφίσταται ο συγκεκριμένος κίνδυνος είναι το Str_1_0_0, το Str_1_0_11.4 και το Fix_3_0_0. Στα δύο πρώτα το πλοίο κινείται με ταχύτητα 1 m/s, ο πυθμένας είναι εύκαμπτος και στο πρώτο δεν υπάρχει άνεμος, ενώ στο δεύτερο υπάρχει άνεμος ταχύτητας 11.4 m/s. Στο τρίτο σενάριο το πλοίο έχει ταχύτητα 3 m/s, ο πυθμένας είναι άκαμπτος και δεν υπάρχουν φορτία ανέμου. Από τα τρία αυτά σενάρια, σε κανένα η ανεμογεννήτρια δεν ταλαντώνεται με την ιδιοπερίοδο της. Ωστόσο, οι περίοδοι ταλάντωσης είναι κοντινές της κρίσιμης περιόδου, με πιο επικίνδυνο σενάριο το Fix_3_0_0, όπου οι δύο περίοδοι απέχουν μόλις 0.16 s. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί, πως στην περίπτωση που λαμβανόταν υπόψιν στη μοντελοποίηση και η απόσβεση του υλικού και της κατασκευής οι ιδιοσυχνότητες θα ήταν διαφορετικές και οι συγκεκριμένες ταλαντώσεις ενδεχομένως να εξασθενούσαν χωρίς να εγκυμονούσε ο κίνδυνος κατάρρευσης.
- Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη μελέτη της επίδρασης της ταχύτητας του πλοίου στην απόκριση της ανεμογεννήτριας είναι πως η αύξηση της συνεπάγεται δυσμενέστερες συνέπειες στη δομική ακεραιότητα της κατασκευής. Πρωτίστως, προκύπτουν μεγαλύτερες επιταχύνσεις και μετατοπίσεις της κορυφής της ανεμογεννήτριας, αυξάνοντας τον κίνδυνο βλάβης της ηλεκτρικής εγκατάστασης που βρίσκεται εκεί. Επίσης, μεγαλύτερη ταχύτητα σημαίνει και επιδείνωση της ζημιάς στην περιοχή της σύγκρουσης των κατασκευών.
- Όσον αφορά την επίδραση της ευκαμψίας του υπεδάφους στα αποτελέσματα, έγινε ξεκάθαρο πως όταν η ευκαμψία του πυθμένα δεν λαμβάνεται υπ' όψιν και ο πυλώνας πακτώνεται στον πυθμένα, υπερεκτιμάται η φθορά της ανεμογεννήτριας στην περιοχή της κρούσης, αλλά υποεκτιμάται η συνολική απόκριση της αφού δεν εντοπίζεται η δημιουργία του πλαστικού κόμβου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η πάκτωση της ανεμογεννήτριας στον πυθμένα, την καθιστά πιο άκαμπτη σε σχέση με την περίπτωση των ελατηρίων του υπεδάφους.
- Σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου, η αύξηση της δεν συνεπάγεται αυτόματα δυσμενέστερες επιπτώσεις στην ανεμογεννήτρια. Η δύναμη της ώσης, που ασκείται στην φτερωτή της ανεμογεννήτριας, είναι αυτή που αύξηση της τιμής της οδηγεί σε μεγαλύτερη απομάκρυνση της κορυφής της κατασκευής από την αρχική θέση ισορροπίας και ενδεχομένως την κατάρρευση της. Η ώση αυξάνεται για μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου αλλά η τιμή της μπορεί να προσαρμοστεί από την ίδια την ανεμογεννήτρια, μέσω ενός μηχανισμού που μεταβάλλει τη γωνία κλίσης των πτερυγίων της. Έτσι, ενώ για την ονομαστική ταχύτητα ανέμου λειτουργίας (11.4 m/s)

επέρχεται η πτώση της κατασκευής, για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου αυτό αποφεύγεται. Μάλιστα, μπορεί να εκτιμηθεί μια κρίσιμη περιοχή ταχυτήτων ανέμου, για την οποία η ανεμογεννήτρια βρίσκεται υπό τον κίνδυνο πλήρους κατάρρευσης, αν ένα πλοίο με ταχύτητα 3 m/s συγκρουστεί πλευρικά με αυτήν και παράλληλα πνέει άνεμος ομόρροπος με το πλοίο. Εφόσον δεν υπάρχει κατάρρευση της κατασκευής για $W = 10$ m/s και $W = 13.5$ m/s, αλλά συμβαίνει για $W = 11.4$ m/s, αυτή η κρίσιμη περιοχή βρίσκεται μεταξύ της $W = 10$ m/s και της $W = 12.5$ m/s, όπου η ώση σε αυτήν την περιοχή είναι μεγαλύτερη των 1,200 kN (Σχήμα 3.41).

- Η κατεύθυνση του ανέμου σε σχέση με εκείνη του πλοίου παίζει σημαντικό ρόλο στην έκταση της καταστροφής που θα προκύψει λόγω της σύγκρουσης. Αποδείχθηκε πως για άνεμο εγκάρσιας ή ίδιας φοράς με εκείνη του πλοίου η ανεμογεννήτρια αν καταρρεύσει πλήρως, αυτό θα συμβεί σε σημείο που δεν βρίσκεται το πλοίο. Όμως, για άνεμο αντίθετης φοράς σε σχέση με το πλοίο, αν οι υπόλοιπες συνθήκες ευνοούν την πλήρη κατάρρευση της ανεμογεννήτριας, θα προκύψει η πτώση της πάνω στο συγκρουόμενο πλοίο. Σε αυτή την περίπτωση είναι εμφανές πως οι συνέπειες της σύγκρουσης πολλαπλασιάζονται.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική δουλειά

Οι υπάρχουσες έρευνες είναι επικεντρωμένες στη μελέτη της σύγκρουσης των επιχειρησιακών πλοίων με υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, και όχι των επιβατηγών – οχηματαγωγών πλοίων. Επίσης, η συγκεκριμένη μελέτη, που είναι από τις λίγες, αν όχι η μοναδική που αφορά E/O πλοίο, εφαρμόζει ορισμένες παραδοχές με σκοπό τη διευκόλυνση της περάτωσης της. Επομένως, συνιστάται να επεκταθεί η έρευνα στο συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο, με σκοπό την απόκτηση περισσότερων στοιχείων για την εξέλιξη του φαινομένου, την αναγνώριση των επικινδυνότερων περιπτώσεων σύγκρουσης και την κατάληξη σε ασφαλέστερα συμπεράσματα. Μερικές προτάσεις για το πως αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί ακολουθούν στη συνέχεια. Αρχικά, είναι σίφρων να πραγματοποιηθούν μελέτες όπου το πλοίο δεν θεωρείται απόλυτα άκαμπτο όπως στη συγκεκριμένη. Με αυτόν, τον τρόπο δεν θα υπερεκτιμάται η απόκριση της γεννήτριας, αφού τμήμα της ενέργειας σύγκρουσης θα το απορροφά το ίδιο το πλοίο μέσω παραμορφώσεων. Επίσης, με αυτόν τον τρόπο θα μπορεί να εκτιμηθεί η ζημιά που υφίσταται το πλοίο καθώς και να αναγνωριστούν τα σενάρια στα οποία διατρέχει μεγαλύτερο κίνδυνο. Έτσι, συνολικά, θα παραχθούν ρεαλιστικότερα αποτελέσματα. Επιπλέον, πρέπει να εξεταστεί η περίπτωση της σύγκρουσης διαφορετικού τμήματος του πλοίου στον πυλώνα, με σημαντικότερο αυτό της πλώρης. Συγκεκριμένα για τη μετωπική σύγκρουση, οι τάσεις που θα αναπτυχθούν στις κατασκευές θα είναι μεγαλύτερες από ότι στην πλευρική σύγκρουση για ίδια ταχύτητα πλοίου, λόγω μικρότερης και πιο αιχμηρής επιφάνειας επαφής. Αυτό φυσικά συνεπάγεται και τροποποίηση της εξέλιξης της σύγκρουσης. Έπειτα οι ερευνητές καλούνται να κατασκευάσουν μοντέλα στα οποία μοντελοποιείται και η γεωμετρία του ατρακτίδιου και της φτερωτής. Έτσι, κατά την απόκριση της κατασκευής θα μπορεί να εξεταστεί και το πως αντιδρούν οι λεπίδες, ειδικά στην περίπτωση που βρίσκονται σε λειτουργία. Επιπρόσθετα, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του μοντέλου, η ακρίβεια και η αξιοπιστία του θα αυξανόταν μέσω της χρήσης ενός λεπτότερου πλέγματος και την επέκταση του χρονικού διαστήματος της προσομοίωσης. Τέλος, χρήσιμη θεωρείται και η κατασκευή αναλυτικών μοντέλων αλλά κυρίως η εκτέλεση πειραμάτων μικρής ή μεγάλης κλίμακας μέσω των οποίων οι αριθμητικές προσομοιώσεις θα μπορούν να καλιμπραριστούν και φυσικά να ελεγχθούν ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων τους. Τα πειράματα αυτά ενδεχομένως να μπορούν να συνδυαστούν με την παρακολούθηση της δομικής υγείας της κατασκευής (Structural Health Monitoring) μέσω αισθητήρων, που εντοπίζουν τις αλλαγές στο υλικό και στις γεωμετρικές της ιδιότητες. Έτσι, καθίσταται δυνατή και η εκτίμηση της απόσβεσης του υλικού της ανεμογεννήτριας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Global Wind Energy Council, (2023), *Global Wind Report 2023*
- [2] Zafeiratou E., Spataru C., Bleischwitz R., (June 2016), *Wind offshore energy in the Northern Aegean Sea islanding region*, Conference Paper
- [3] Apasparitis H., (May 2023), *First offshore wind farms in Greece to be installed in five zones in Aegean Sea*, Balkan Green Energy News Magazine
- [4] Liaggou C., (May 2023), *Map of offshore wind farms*, Kathimerini Journal
- [5] Moulas D., Shafiee M., Mehmanparast A., (April 2017), *Damage analysis of ship collisions with offshore wind turbine foundations*, Article, Ocean Engineering: An International Journal of Research and Development
- [6] NORSOK STANDARD – N004, (February 2013), *Design of steel structures*
- [7] DNV-GL, DNVGL – RP – C204, (August 2017), *Design against accidental loads*
- [8] Amdahl J., Yu Z., Shen Y., Greco M., (June 2016), *Implementation of Linear Potential – Flow Theory in the 6DOF Coupled Simulation of Ship Collision and Grounding Accidents*, Article in Journal of Ship Research
- [9] Rypestol M., (June 2020), *Analysis of Floating Offshore Wind Turbine Subjected to Ship Collisions*, Master’s Thesis in Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology
- [10] Moan T., (September 2003), *“Nonlinear analysis”. Finite element modelling and analysis of marine structures*, Department of Marine Technology
- [11] Kullerud I., (June 2020), *Analyses of ship collisions with a floating offshore wind turbine*, Master’s Thesis in Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology
- [12] Samuelides M., *DESIGN AGAINST COLLISION: HALF A CENTURY OF RESEARCH*, Article, National Technical University of Athens
- [13] Bela A., Le Sourne H., Buldgen L., Rigo P., (October 2016), *Ship collision analysis on offshore wind turbine monopole foundations*, Article, Marine Structures Journal: Design, Construction & Safety
- [14] Song M., Jiang Z., Yuan W., (November 2020), *Numerical and analytical analysis of a monopile-supported offshore wind turbine under ship impacts*, Article, Renewable Energy: An international Journal
- [15] Dai L., Ehlers S., Rausand M., Bouwer Utne I., (July 2012), *Risk of collision between service vessels and offshore wind turbines*, Article, Reliability Engineering & System Safety Journal

- [16] Qiu B., Lu Y., Sun L., Qu X., Xue Y., Tong F., (October 2019), *Research on the damage prediction method of offshore wind turbine tower structure based on improved neural network*, Article, Measurement Journal
- [17] *Global Top 10 Offshore Wind turbine Manufacturers*, (June 2023), Blog, Blackridge Research & Consulting
- [18] *Scaling up the use of offshore wind turbines*. Offshore Wind Turbines | Siemens Gamesa. (n.d.)
- [19] Vestas. (n.d.). *V236-15.0 MWTM*. Global Leader in Sustainable Energy
- [20] *Haliade-X Offshore Wind Turbine*. World's Most Powerful Offshore Wind Platform: Haliade-X | GE Renewable Energy. (n.d.)
- [21] Bak C., Zahle F., Bitsche R., Kim T., Yde A., Henriksen A., Lars C. et al., (2013), *The DTU 10-MW Reference Wind Turbine*, Sound/Visual production (digital), DTU Library
- [22] Broersen A.M., (August 2020), *Analytical model to assess bending moments in wind turbine support structures subjected to ship collisions*, Master's Thesis in Offshore Engineering track of European Wind Energy Master, Delft University of Technology and Norwegian University of Science and Technology
- [23] Smith, M. (2009). *ABAQUS/Standard User's Manual*, Version 6.9. Dassault Systèmes Simulia Corp.
- [24] Παπαϊωάννου Μ., (Μάρτιος 2022), Συμπερίφορα Κατασκευαστικών Στοιχείων Γάστρας σε Ακραιές Φορτίσεις, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θαλάσσιων Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [25] Χρυσουλάκης Γ. Δ., Παντελής Δ. Ι. (2008). *Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- [26] Παπάζογλου Β. Ι., Τσούβαλης Ν. Γ. (2018). *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις μαθήματος «Ναυπηγική Τεχνολογία»*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ.
- [27] Marinatos J.N., (September 2015), *Determination of failure criteria and incorporation in FE codes for simulation of ship's hull in extreme loading conditions*, PhD Thesis, School of Naval Architecture and Marine Engineering, Marine Structures Division, National Technical University of Athens
- [28] Ling Y., (1996), *Uniaxial True Stress – Strain after Necking*, Article, AMP Journal of Technology Vol.5
- [29] Alsos S. H., Amdahl J., (October 2008), *On the resistance to penetration of stiffened plates, Part I: Experiments & Part II: Numerical analysis*, Article, International Journal of Impact Engineering
- [30] Marinatos J.N., Samuelides M.S., (June 2013), *Material characterization and implementation of the RTCL, BWH and SHEAR failure criteria to finite element codes for the*

simulation of impacts on ship structures, Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures, Editors: Amdahl J., Ehlers S., Leira B. J.

[31] Liu X., Jiang D., Liufu K., Fu J., Liu Q., Li Q., (February 2022), *Numerical investigation into impact responses of an offshore wind turbine jacket foundation subjected to ship collision*, Article, Ocean Engineering: An International Journal of Research and Development

[32] Ehlers S., Broekhuijsen J., Alsos H. S., Tabri K., (January 2008), *Simulating the collision response of ship side structures: A failure criteria benchmark study*, Article, International Shipbuilding Progress

[33] Bao Y., Wierzbicki T., (January 2004), *On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space*, Article, International Journal of Mechanical Sciences

[34] Tornqvist R., (June 2003), *Design of Crashworthy Ship Structures*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark

[35] Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L., (2009), *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, Second Edition

[36] Hansen M. O. L., (2008), *Aerodynamics of Wind Turbines*, Second Edition

[37] Wang S., Larsen T. J., Bredmose H., (2021), *Ultimate load analysis of a 10 MW offshore monopile wind turbine incorporating fully nonlinear irregular wave kinematics*, Article, Marine Structures Journal

[38] Bak C., Bitsche R., Yde A., Kim T., Hansen M.H., Zahle F. et al, (2012), *Light Rotor: The 10 – MW reference wind turbine*, Proceedings of EWEA 2012 – European Wind Energy Conference & Exhibition

[39] Anderson J., (2017), *Fundamentals of Aerodynamics*, Sixth Edition

[40] American Petroleum Institute. API, (December 2000), *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms -Working stress design*, Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference

[41] Alkhoury P., Soubra A., Rey V., Ait-Ahmed M., (August 2020), *Natural Frequencies Estimation of a Monopile Supported DTU – 10 MW Offshore Wind Turbine*, Conference Paper, 4th International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics

[42] Bela A., Buldgen L., Rigo Ph. (2015), *Numerical crashworthiness analysis of an offshore wind turbine monopile impacted by a ship*, Analysis and Design of Marine Structures