



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Μη Γραμμική Συμπεριφορά Υπεράκτιας Ανεμογεννήτριας και Έλεγχος Ευστάθειας



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Ελισσάβητ Πουλιούλου

ΕΜΚ ΜΕ 2021/14

Επιβλέπων: Θανάπουλος Παύλος

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

Πουλιπούλου Ελισσάβητ (2021).
Μη γραμμική συμπεριφορά υπεράκτιας ανεμογεννήτριας και έλεγχος ευστάθειας
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2021/14
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Pouliopoulou Elissavet (2021).
Non-linear analysis of an offshore wind turbine and stability check
Master of Science Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2021/14
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract	5
Ευχαριστίες	6
1 Εισαγωγή	8
1. Γενικά	8
1.1 Υπεράκτια αιολική ενέργεια	9
1.2 Τεχνολογία ανεμογεννητριών	10
2 Θεωρητικό υπόβαθρο	14
Εισαγωγή	14
2.1 Υπολογισμός Φορτίων	15
2.2 Έλεγχοι	28
2.3 Μέθοδοι Μη Γραμμικής Επίλυσης	29
2.4 Θεωρητικό υπόβαθρο πεπερασμένων στοιχείων	35
3 Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας ελέγχου	39
3.1 Γενικά στοιχεία	39
3.1.1 Υπολογισμοί ονομαστικής πίεσης	42
3.1.2 Γεωμετρία φορέα ελέγχου	43
3.1.3 Υλικό	44
3.1.4 Συντελεστές ασφαλείας υλικών	45
3.2 Φορτίσεις	46
3.2.1 Φόρτιση ΟΚΑ (ULS)	46
4 Προσομοιώματα	49
4.1 Προσομοιώματα φορέα	49
4.1.1 Προσομοίωση κελύφους ανεμογεννήτριας	49
4.1.2 Πυλώνας με ύπαρξη ανοίγματος χωρίς ενίσχυση	52
4.1.3 Πυλώνας με ενισχυμένο άνοιγμα	53
4.2 Αποτελέσματα αναλύσεων γραμμικής ανάλυσης λυγισμού	54
4.2.1 Συμπαγής πυλώνας χωρίς άνοιγμα	54
4.2.2 Πυλώνας με άνοιγμα χωρίς ενίσχυση	55
4.2.3 Πυλώνας με απλή ενίσχυση περιμετρικού πλαισίου $w = 400 \text{ mm}$	56
5 Μη γραμμικές Αναλύσεις και Έλεγχοι φορέα	58
5.1 Πυλώνας χωρίς άνοιγμα	58
5.1.1 Επιλογή μη γραμμικής ανάλυσης για τον έλεγχο της αντοχής	58

5.1.2 Πλαστικός Έλεγχος φορέα (LS1).....	60
5.1.3 Υπολογισμός ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών	61
5.2 Προσομοίωση πυλώνα με ανθρωποθυρίδα χωρίς ενισχυτικά	66
5.3 Τάσεις και παραμορφώσεις φορέα σε τρία χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας.	69
6 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων και παραμετρική διερεύνηση	78
6.1 Αξιολόγηση επιρροής ανοίγματος και ενίσχυσης στην αντοχή του αρχικού φορέα	78
6.2 Διερεύνηση επίδρασης πάχους ενίσχυσης στην βελτίωση της αντοχής.....	79
7 Συμπεράσματα.....	82
8 Βιβλιογραφία	84

**Μη Γραμμική Συμπεριφορά Υπεράκτιας Ανεμογεννήτριας
και Έλεγχος Ευστάθειας**
Πουλιπούλου Ε. (Επιβλέπων: Θανόπουλος Π.)

Περίληψη

Η αίσθηση επείγοντος που έχουν αποκτήσει τα πράγματα στο ζήτημα της κλιματικής κρίσης τα τελευταία χρόνια καθιστούν αναγκαία τη μετάβαση σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας και την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων. Η αιολική ενέργεια συμβάλλει ήδη σημαντικά στη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων του θερμοκηπίου, ενώ παράλληλα συμβάλλει στην οικονομική ανάπτυξη σε πολλές χώρες, ως η κορυφαία λύση κατά της κλιματικής αλλαγής παγκοσμίως. Όμως αν και οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας αυξάνονται ραγδαία, η υπεράκτια αιολική ενέργεια που παράγεται στην Ευρώπη, αποτελεί μόνο το 6,2% της συνολικής εγκατεστημένης αιολικής ενέργειας. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια η εγκατεστημένη υπεράκτια αιολική ενέργεια αυξήθηκε κατά περισσότερο από 30% δεδομένου ότι τα οφέλη της είναι προφανή. Επομένως η ανάγκη για μελέτη τέτοιων κατασκευών οι οποίες είναι εκτεθειμένες σε πιο ακραίες συνθήκες, αποκτά περισσότερη σημασία καθώς και η διερεύνηση των παραγόντων που μπορεί να τις επηρεάζουν, χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Για την εργασία αυτή, λήφθηκε ως φορέας ελέγχου μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια αναφοράς 5 MW η οποία σχεδιάστηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL).

Η προσομοίωση του φορέα έγινε για το τμήμα της βάσης 30 μέτρων, το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στην μεσαία φλάντζα σύνδεσης και τη κατώτερη της στήριξης. Το τμήμα είναι σχήματος κολουρωνικού. Η εντατική κατάσταση για την οποία πραγματοποιήθηκαν οι έλεγχοι της κατασκευής είναι για συνθήκες ανέμου ακραίας τυρβώδους ροής (ETM) και κανονική κατάσταση θάλασσας με μέσο επίπεδο θάλασσας (NSS).

Για το προσομοίωμα του κελύφους με πεπερασμένα στοιχεία, έγινε μελέτη σύγκλισης για την εύρεση του καταλληλότερου πλέγματος. Για τον έλεγχο της κατασκευής και των παραγόντων που επηρεάζουν την αντοχή της δημιουργήθηκαν ξεχωριστά προσομοιώματα, του συμπαγούς κελύφους χωρίς την ύπαρξη ανθρωποθυρίδας και αυτού με το άνοιγμα.

Επιπλέον για τον έλεγχο ευστάθειας της κατασκευής στις περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις με ύπαρξη αρχικών ατελειών, έγινε σύγκριση ανάμεσα στις κατασκευαστικές κλάσεις που προβλέπει ο Ευρωκώδικας για το μέγεθός τους, καθώς και του σχήματός τους, σύμφωνα με την ιδιομορφή από την οποία θα προκύψει η δυσμενέστερη περίπτωση αντοχής.

Παράλληλα δόθηκαν και οι μορφές αστοχίας που προέκυψαν από τις μη γραμμικές αναλύσεις με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι αυτή καθορίζεται από τη εμφάνιση τοπικού λυγισμού.

Τέλος έγινε διερεύνηση της επίδρασης του πλάτους των ενισχύσεων στην ανθρωποθυρίδα. Η ενίσχυση που ελέγχθηκε αποτελεί την πιο απλή μορφή που μπορεί να εφαρμοστεί και είναι το

περιμετρικό πλαίσιο. Εξετάστηκε το κατά πόσο η συγκεκριμένη ενίσχυση μπορεί από μόνη της και με τι επιφάνεια, να αντισταθμίσει την αντοχή που χάθηκε από την ύπαρξη της θυρίδας ή έστω να την προσεγγίζει ικανοποιητικά.

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

MSc THESIS
EMK ΔΕ 2011/04

Non-linear analysis of an offshore wind turbine and stability check

Pouliopoulou E. (supervised by Thanopoulos P.)

Abstract

The sense of urgency regarding the issue of the climate crisis in recent years makes it necessary to move towards alternative energy sources and replace fossil fuels. Wind energy is already making a major contribution to reducing the negative effects of the greenhouse, while contributing to the economic growth in many countries as the world's leading solution to climate change. However, although wind farms are growing rapidly, offshore wind power generated in Europe accounts for only 6.2% of the total installed wind energy. However, in recent years, installed offshore wind energy has increased by more than 30% as its benefits are obvious. Therefore, the need to carry out studies of such structures which are exposed to more extreme conditions is becoming increasingly important, as well as the investigation of the factors that may affect them require further research.

For this study, a 5 MW offshore reference wind turbine designed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) was taken as the control body. The carrier simulation was done for the part of the 30-meter base, which is located between the middle connection flange and the lower one of the support. The section is truncated. The intensive condition for which the construction checks were performed is for extreme turbulent model (ETM) wind conditions and normal sea state (NSS) sea condition with mean wave height.

For the shell simulation with finite elements, a convergence study was carried out to find the most suitable meshing. To control the construction and the factors that affect its strength, separate simulations of the solid shell were created without the presence of a manhole and the one with the stiffening.

In addition, to check the stability of the construction in cases where non-linear analyzes were used with initial imperfections, a comparison was made between the fabrication tolerance quality classes which provided from the Eurocode 3 for their size, as well as their shape, according to the eigenmodes which the worst case of endurance will arise. At the same time, the failure modes that resulted from the non-linear analyzes were given, with the results showing that this is determined by the occurrence of local buckling.

Finally, the effect of the width of the manhole was investigated. The stiffener which applied is the simplest form that can be applied and is the perimeter frame. It was examined whether this stiffener itself, and with what surface, can compensate for the strength lost from the existence of the hole, or even approach it at a satisfactory pace.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κτασκευών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Με την ολοκλήρωσή της, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους οι οποίοι με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια της πορείας μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα και συνέβαλαν σημαντικά στην υλοποίηση της ανά χείρας εργασίας.

Πρωτίστως, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Παύλο Θανόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο, εξαιρετικά ενδιαφέρον αντικείμενο και που με τις εύστοχες παρατηρήσεις του, όποτε χρειάστηκε, με βοήθησε να ξεπεράσω αμφιβολίες και προβλήματα που συνάντησα στην πορεία εκπόνησης της εν λόγω εργασίας.

Με τη περάτωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας κλείνει ένας ακόμη κύκλος σπουδών στη ζωή μου και θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υπόλοιπους ανθρώπους που με στήριξαν και σε αυτή τη πορεία της ζωής μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους που συνάντησα και πορευτήκαμε μαζί σε αυτό το ταξίδι της μέχρι τώρα ακαδημαϊκής μου πορείας και των φοιτητικών μου χρόνων.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου, η οποία ήταν δίπλα μου σε κάθε μου βήμα και με στήριξε ποικιλοτρόπως με την ουσιαστική και ηθική της συμπαράσταση όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω σε όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών για τις γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσαν συμβάλλοντας στην επιστημονική μου κατάρτιση και οι οποίοι επιβεβαίωσαν την αντίληψη που είχα εξαρχής, κατά την εισαγωγή μου στο εν λόγω τμήμα του πανεπιστημίου, πως πρόκειται για έναν ξεχωριστό και κορυφαίο επιστημονικό κλάδο.

1 Εισαγωγή

1. Γενικά

Εδώ και δεκαετίες, επιστήμονες προειδοποιούσαν την παγκόσμια κοινότητα σχετικά με την κλιματική κρίση που μπορεί να προκαλέσει η «ανθρώπινη δραστηριότητα». Τα τελευταία χρόνια, όμως τα πράγματα αποκτούν μια αίσθηση επείγοντος, η οποία καθιστά αναγκαία τη λήψη μέτρων που θα συμβάλλουν στη μείωση των καταστροφικών επιπτώσεων της κρίσης αυτής.

Στο κομμάτι της ενέργειας λοιπόν γίνεται φανερή η ανάγκη της μετάβασης σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας και η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων. Οι ανανεώσιμες πηγές (αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, υδροηλεκτρική ενέργεια, ενέργεια από τους ωκεανούς, γεωθερμική ενέργεια, βιομάζα και βιοκαύσιμα) αποτελούν τέτοιες λύσεις. Η αιολική ενέργεια μάλιστα, που αποτελεί και αντικείμενο της παρούσας εργασίας, συμβάλλει ήδη σημαντικά στη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων του θερμοκηπίου, ενώ συμβάλλει στην οικονομική ανάπτυξη σε πολλές χώρες ως η κορυφαία λύση κατά της κλιματικής αλλαγής παγκοσμίως.

Εκτός του βασικού πλεονεκτήματός τους, των μικρών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η αιολική ενέργεια αποτελεί ανεξάντλητη πηγή ενέργειας αλλά επιπλέον οι τρόποι και οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσής της, έχουν και μικρότερα λειτουργικά κόστη σε σχέση με τους συμβατικούς τρόπους και εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των ορυκτών καυσίμων.

Στα πλαίσια αυτής της επιτακτικής ανάγκης προσαρμόζεται και η νομοθεσία της ΕΕ, η οποία εξελίσσεται σημαντικά για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά τα τελευταία 15 έτη. [1]

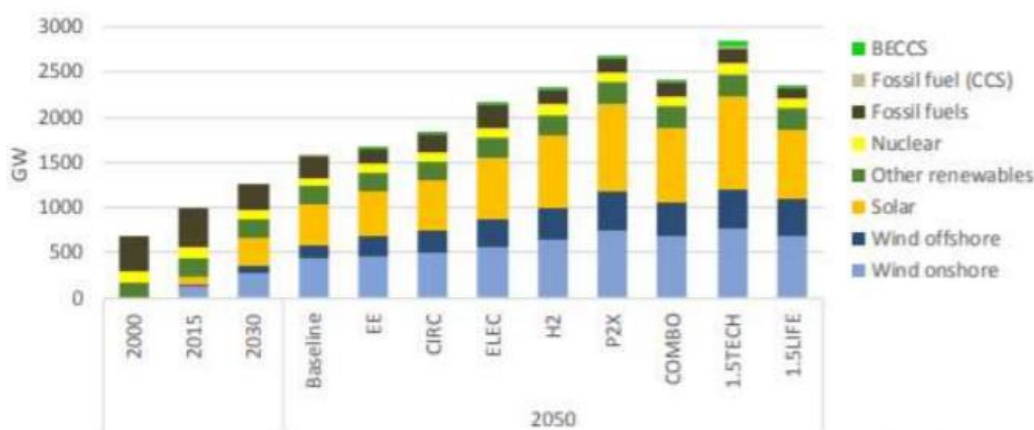
Τον Δεκέμβριο του 2019 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε μια ανακοίνωση σχετικά με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία. Η εν λόγω ανακοίνωση ανανεώνει τη δέσμευση της Επιτροπής όσον αφορά την αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με το κλίμα και το περιβάλλον, η οποία αποτελεί καθήκον ύψιστης σημασίας για τη γενιά μας, καθώς και αναπόσπαστο μέρος της στρατηγικής της Επιτροπής για την επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών για το 2030. Πρόκειται για μια στρατηγική που αποσκοπεί ως το 2050 να έχουν μηδενιστεί οι καθαρές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και στην οποία η οικονομική ανάπτυξη θα έχει αποσυνδεθεί από τη χρήση των πόρων.

Στην εν λόγω συμφωνία επισημαίνεται ο καθοριστικής σημασίας ρόλος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και ιδίως της υπεράκτιας παραγωγής αιολικής ενέργειας, για την επίτευξη αυτών των στόχων. [2]

Οι υπεράκτιες αιολικές πηγές παράγουν καθαρή ηλεκτρική ενέργεια που είναι ανταγωνιστική και, μερικές φορές, φθηνότερη από την υφιστάμενη τεχνολογία που βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα. Οι ευρωπαϊκές βιομηχανίες αναπτύσσουν με ταχείς ρυθμούς ένα φάσμα άλλων τεχνολογιών για την αξιοποίηση της ισχύος των θαλασσών με σκοπό την παραγωγή πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η στρατηγική για τις υπεράκτιες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θέτει τους πλέον φιλόδοξους στόχους για την εγκατάσταση υπεράκτιων ανεμογεννητριών (τόσο σταθερά εδραζόμενων όσο και πλωτών), τομέας στον οποίο η εμπορική δραστηριότητα βρίσκεται σε προηγμένο στάδιο. [3]

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη στρατηγική, προτείνεται αύξηση της υπεράκτιας αιολικής ισχύος της Ευρώπης από το επίπεδο των 12 GW στο οποίο ανέρχεται σήμερα ώστε να φτάσει τουλάχιστον στα 60 GW έως το 2030 και στα 300 GW έως το 2050. Η Επιτροπή σκοπεύει να συμπληρώσει αυτήν την αύξηση με 40 GW ωκεάνιας ενέργειας και άλλων αναδυόμενων τεχνολογιών, όπως πλωτές εγκαταστάσεις αιολικής και ηλιακής ενέργειας έως το 2050. [4]



Σχήμα 1.1 : Προβλεπόμενα σενάρια για τη συνολική δυναμικότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ΕΕ¹

1.1 Υπεράκτια αιολική ενέργεια

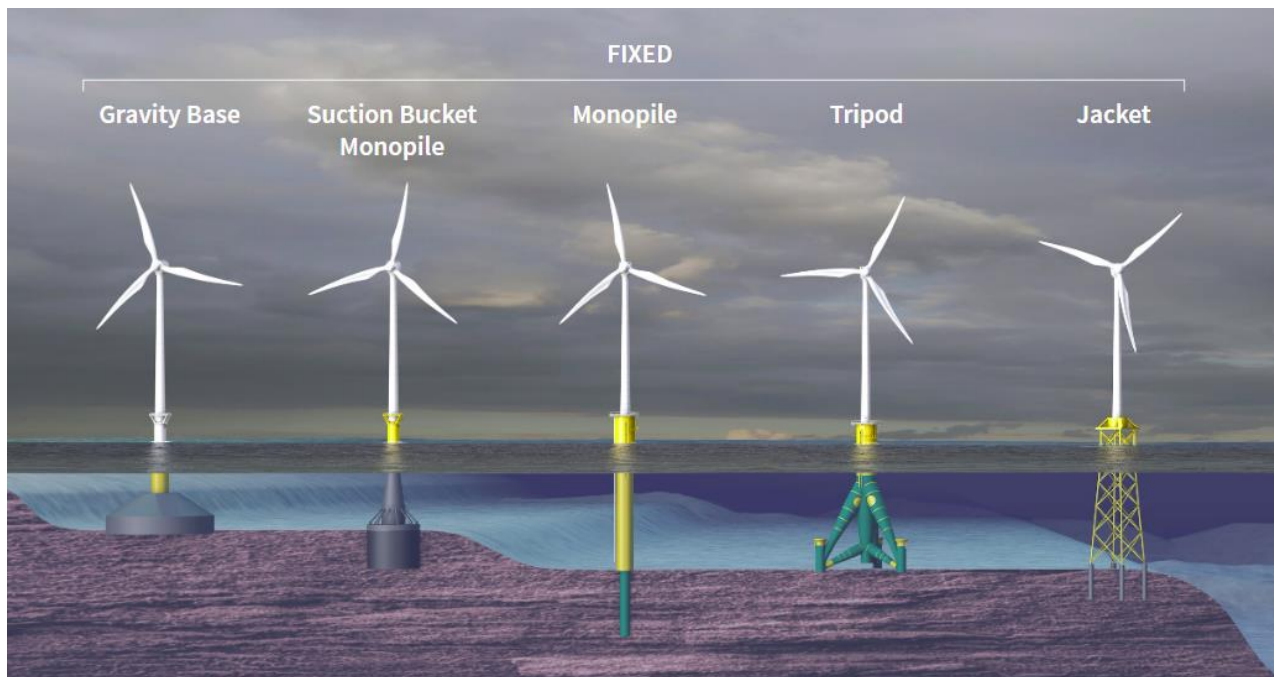
Η αιολική ενέργεια διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και είναι απαραίτητη για τους ευρωπαϊκούς στόχους ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για το 2020. Από τη συνολική εγκατεστημένη αιολική ενέργεια σχεδόν 130 GW στην Ευρώπη (2014), μόνο το 6,2% αποτελείται από υπεράκτια αιολική ενέργεια [5]. Το μειονέκτημα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι ότι τα εξαρτήματα πρέπει να είναι σε θέση να αντιστέκονται στις σκληρές συνθήκες της θάλασσας και η εγκατάσταση είναι πιο περίπλοκη, καθιστώντας την επένδυση ανά εγκατεστημένο MW για μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια, σχεδόν 40% υψηλότερη από την αντίστοιχη στην ξηρά. Ωστόσο, το 2014 η εγκατεστημένη υπεράκτια αιολική ενέργεια αυξήθηκε κατά περισσότερο από 30%.

¹ Πηγή: Eurostat (2000, 2015), σενάριο PRIMES από το έγγραφο «Διεξοδική ανάλυση για την ανακοίνωση της Επιτροπής COM(2018) 773.

Τα οφέλη είναι προφανή: στη θάλασσα ο άνεμος φυσάει συχνότερα, ο οπτικός αντίκτυπος είναι μικρότερος και η μεταφορά μεγάλων εξαρτημάτων είναι ευκολότερη. Το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό της Ευρώπης είναι τεράστιο και ικανό να καλύψει τη ζήτηση της Ευρώπης επτά φορές, όπως εκτιμάται από τις Ευρωπαϊκές Υπηρεσίες Περιβάλλοντος.

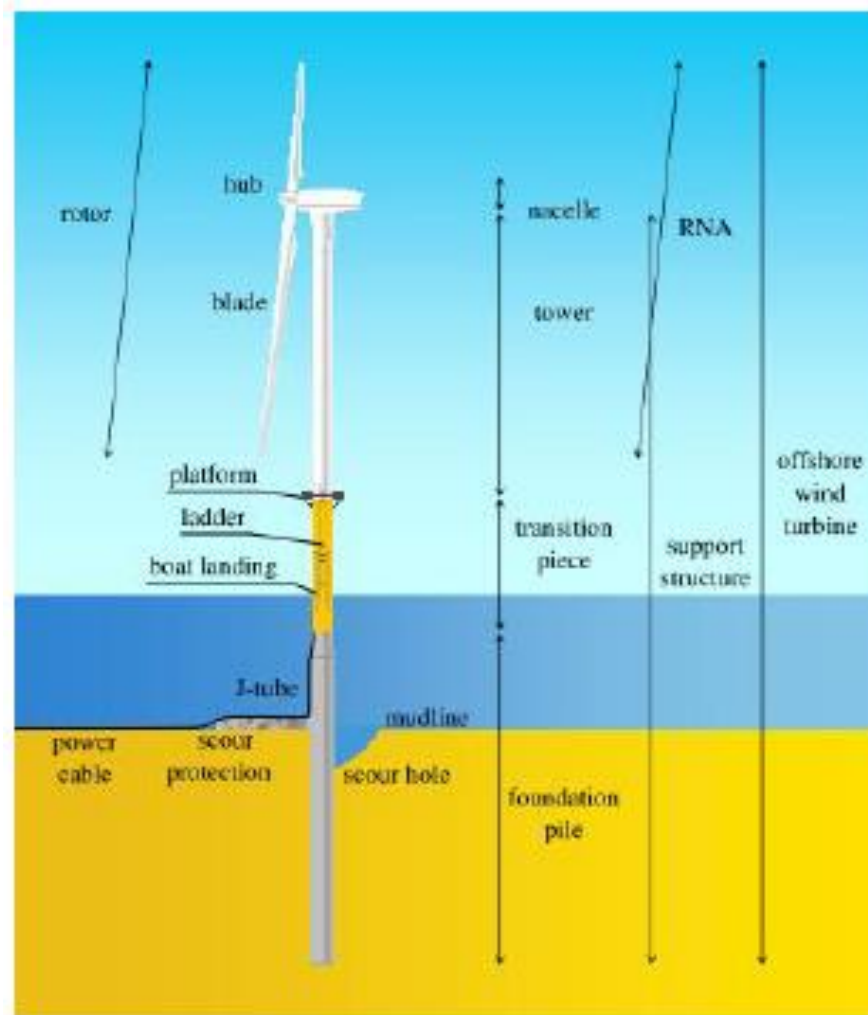
1.2 Τεχνολογία ανεμογεννητριών

Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι υπεράκτιων θεμελίωσεων. Οι τύποι θεμελίωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.2. Η επιλογή θεμελίωσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το βάρος, οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η κατάσταση του εδάφους και το βάθος της θάλασσας. Οι σωληνοειδείς πύργοι με μονοπάσσαλους είναι η πιο κοινή κατασκευή θεμελίωσης για ανεμογεννήτριες (σχεδόν το 80% των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών στην Ευρώπη [5]) για αισθητικούς, οικονομικούς, λόγους ασφαλείας αλλά και για λόγους απλότητας και εμπειρίας [6].



Σχήμα 1.2 : Τύποι θεμελίωσης

Τα ονόματα των διαφόρων συστατικών μερών μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας με μονοπάσσαλο δίνονται στο Σχήμα 1.3. Το μεταβατικό κομμάτι (transition piece), είναι αυτό που ενώνει τον πύργο με τον πάσσαλο. Εκτός από αυτό, προσφέρει πρόσδεση σκάφους, σκάλα και πλατφόρμα πρόσβασης στην ανθρωποθυρίδα για την είσοδο στον πύργο. Ο ρότορας και η άτρακτος μαζί ονομάζονται συγκρότημα RNA.



Σχήμα 1.3 : Συστατικά μέρη της ανεμογεννήτριας

1.3 Πύργος Ανεμογεννήτριας

Το 76% των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών στην Ευρώπη έχουν σωληνωτό πύργο. Οι σωληνοειδείς πύργοι είναι κατασκευασμένοι από διαφορετικά τμήματα που κατασκευάζονται στις εγκαταστάσεις παραγωγής και τελικά συναρμολογούνται επί τόπου. Στις μέρες μας οι πύργοι αποτελούνται συχνά από 2 ή 3 τμήματα, που έχουν κυλινδρικό ή κωνικό σχήμα.

Για τους χερσαίους πύργους, οι περιορισμοί μεταφοράς επιβάλλουν όρια στη διάμετρο και το μήκος των στοιχείων. Η διάμετρος πρέπει να είναι μικρότερη από περίπου 4,3 m για να περάσει κάτω από γέφυρες και το μήκος των στοιχείων κυμαίνεται μεταξύ 20m και 30m. Αυτοί οι περιορισμοί δεν ισχύουν για υπεράκτιους πύργους. Τα όριά τους καθορίζονται κυρίως από την ανυψωτική ικανότητα ή τη σταθερότητα του σκάφους.

Οι τυπικές διαμέτρους βάσης για υπεράκτιους πύργους στις μέρες μας (4-6 MW) είναι 5-6 m. Τα πάχη πλάκας για αυτούς τους πύργους ποικίλλουν από περίπου 15 mm για τα ανώτερα τμήματα έως περισσότερα από 80 mm για τα κάτω τμήματα, ανάλογα με τον τύπο του στροβίλου και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα τμήματα του πύργου έχουν τυπικό μήκος 10-36 m. Το τμήμα πύργου 1 συνδέεται με το RNA με τη χρήση της σύνδεσης άνω φλάντζας (TF). Τα τμήματα των πύργων συνδέονται μεταξύ τους με τη χρήση της σύνδεσης άνω και κάτω μεσαίας φλάντζας (UMF και LMF, αντίστοιχα) και η κάτω σύνδεση φλάντζας (BF) συνδέει τον πύργο με το μεταβατικό κομμάτι.

1.4 Περίγραμμα Εργασίας

Μετά από αυτήν την εισαγωγή, στο Κεφάλαιο 2 θα παρουσιαστούν το θεωρητικό υπόβαθρο των μη γραμμικών αναλύσεων, της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων αλλά και τα φορτία που καθορίζονται από τους κανονισμούς όπως επίσης και οι σχετικοί έλεγχοι. Στο Κεφάλαιο 3 καθορίζονται τα φορτία που καταπονούν το φορέα Ultimate Limit State (ULS), τα οποία λήφθηκαν από τη χρήση του αεροελαστικού προγράμματος HAWC2. Το Κεφάλαιο 4 εμπεριέχει τις προσομοιώσεις των κελυφών που δημιουργήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Γίνεται διερεύνηση κατάλληλου μεγέθους πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης δίνονται οι γραμμικές αναλύσεις λυγισμού. Το Κεφάλαιο 5 θα παρουσιάσει όλες τις μη γραμμικές αναλύσεις και τους ελέγχους ευστάθειας. Μια τυπική παραμετρική ανάλυση θα δοθεί στο κεφάλαιο 6 για τις ενσχύσεις που είθισται να χρησιμοποιούνται. Η εργασία θα ολοκληρωθεί με συμπεράσματα και συστάσεις.

2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Εισαγωγή

Οι ανεμογεννήτριες είναι κατασκευές που εκτίθενται σε εξωτερικές συνθήκες και πολλές φορές σε ακραίες καταστάσεις, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό τους και εξαρτώνται από τη θέση εγκατάστασής τους.

Όταν μάλιστα μιλάμε για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες όπου όπως είναι λογικό οι περιβαλλοντικές συνθήκες ανοικτής θαλάσσης είναι ακόμα πιο ακραίες, οι μηχανικοί καλούνται να αντιμετωπίσουν προβλήματα που αφορούν μια πολύπλοκη εντατική κατάσταση. Η πολυμορφία λοιπόν αυτή των φορτίων στα οποία υπόκεινται αυτές οι κατασκευές κατέστησαν αναγκαία την σύνταξη κανονισμών και προτύπων για το σχεδιασμό και τη κατασκευή υπεράκτιων ανεμογεννητριών. Η δημιουργία αυτών των κανονισμών δεν προέκυψε από το μηδεν, καθώς ήδη υπήρχαν αντίστοιχα πρότυπα στα οποία και βασίστηκαν, τα οποία αφορούσαν υπεράκτιες κατασκευές άλλων κλάδων, όπως η εξόρυξη πετρελαίου.

Οι κυριότεροι από αυτούς του κανονισμού και οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη και στη παρούσα μελέτη είναι το βρετανικό πρότυπο EC 61400-3 Wind turbines - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, ο νορβηγικός DNV-OS-J101, όπως επίσης κι ο Ευρωκώδικας 3 - Σχεδιασμός μεταλλικών κατασκευών, αφού φυσικά αποτελεί απαραίτητο κανονιστικό πλαίσιο για τις κατασκευές από χάλυβα και ειδικότερα το μέρος 1-6 καθώς μας ενδιαφέρουν στα πλαίσια της μελέτης του πυλώνα της ανεμογεννήτριας, όσα προβλέπονται για κελυφωτές κατασκευές.

Οι κύριοι τύποι φορτίων από τους οποίους καταπονείται μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια είναι αυτοί που οφείλονται στον άνεμο, στα κύματα και στα λειτουργικά φορτία. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η κατάσταση φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε για τη προσομοίωση και μελέτη της ανεμογεννήτριας αναφοράς καθώς επίσης τα αριθμητικά εργαλεία και οι μέθοδοι υπολογισμού, αλγόριθμοι και θεωρητικά στοιχεία που αφορούν στη προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία.

2.1 Υπολογισμός Φορτίων

2.1.1 Οριακές καταστάσεις

Οριακές καταστάσεις θεωρούνται οι συνθήκες για τις οποίες η κατασκευή πλέον, δεν ικανοποιεί τις σχεδιαστικές απαιτήσεις. Βάσει τον κανονισμό DNV-OS-J101, οι οριακές καταστάσεις είναι η οριακή κατάσταση αστοχίας, οριακή κατάσταση κοπώσεως, η τυχηματική κατάσταση και η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας.

- **Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (Ultimate limit states - ULS)**

Σε αυτή τη κατάσταση ελέγχεται η μέγιστη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής. Ο έλεγχος εδώ γίνεται με τη σύγκριση των δράσεων, με την αντίστοιχη αντοχή του φορέα και κριτήριο περιορισμού της αντοχής είναι η ανικανότητα της κατασκευής να φέρει οποιαδήποτε επιπλέον φορτία,

- **Οριακή Κατάσταση Κοπώσεως (Fatigue limit states - FLS)**

Στην κατάσταση αυτή η αντοχή της κατασκευής εξαντλείται όταν επέρχεται αστοχία από ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Για δυναμικές φορτίσεις, η εκτίμηση της κόπωσης είναι απαραίτητη.

- **Τυχηματική Κατάσταση (Αστοχίας Accidental limit states - ALS)**

Κι εδώ ελέγχεται η μέγιστη αντοχή του φορέα έναντι των δρώντων φορτίων τα οποία είναι τυχηματικά όπως πυρκαγιά, πρόσκρουση πλοίου, εκρήξη κ.α

- **Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (Serviceability limit states - SLS)**

Εδώ ελέγχεται η ανοχή του φορέα σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, με κριτήρια τα μέγιστα όρια τάσεων, μετακινήσεων, ευρή ρωγμών, διαφορικές καθιζήσεις κ.α

2.1.2 Περιβαλλοντικές συνθήκες

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι περιβαλλοντικές συνθήκες πρέπει να λαμβάνονται πάντα υπόψη και πάντα με κριτήριο τη θέση εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας.

Κλάσεις ανεμογεννητριών

Βάσει των χαρακτηριστικών του ανέμου σχεδιασμού, δηλαδή ταχύτητα και παράμετροι τυρβώδους ροής, οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται σε κλάσεις. Αυτός ο διαχωρισμός έγινε με στόχο τη διευκόλυνση της μαζικής παραγωγής των ανεμογεννητριών και κυρίως των βασικών μηχανολογικών μερών δρομέα-ατράκτου (RNA).

Η κατηγοριοποίηση αυτή, αφορά όλους τους τύπους ανεμογεννητριών, και έχει ως στόχο τον καθορισμό βασικών περιβαλλοντικών κατηγοριών, ανεξαρτήτως τοποθεσίας και τοπικών συνθηκών.

Για χειρσαίες ανεμογεννήτριες, οι κλάσεις και οι τιμές των παραμέτρων σχεδιασμού, παρουσιάζονται στο παρακάτω Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Κλάσεις Ανεμογεννητριών

Wind Turbine Class	V_{ref} (m/s) (at hub height)	I_{ref} (at hub height)		
		A higher turbulence	B medium turbulence	C lower turbulence
I	50	0.16	0.14	0.12
II	42.5	0.16	0.14	0.12
III	37.5	0.16	0.14	0.12
S	Special Class (explicitly defined values by the designer)			

όπου:

V_{ref} , μέση ταχύτητα αναφοράς δεκαλέπτου στο ύψος περιστροφής πτερυγίων

I_{ref} , αναμενόμενη τιμή της έντασης τυρβώδους ροής για ταχύτητα 15 m/s

Αξίζει να σημειωθεί όμως ότι από την κλάση της ανεμογεννήτριας, τα χαρακτηριστικά που καθορίζονται σχετίζονται μόνο με το φορτίο ανέμου, αφού αποτελεί και τη κρίσιμη εξωτερική δράση για το σχεδιασμό των χειρσαίων ανεμογεννητριών.

Στην περίπτωση όμως των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, κρίσιμο φορτίο αποτελεί ο συνδυασμός του ανέμου και των κυματισμών. Επομένως ως παράμετροι σχεδιασμού, πρέπει να λαμβάνονται όλα τα τοπικά περιβαλλοντικά δεδομένα που καθορίζουν τα φορτία του ανέμου και των κυματισμών.

Παρολα αυτά, ο Πίνακας 2.1 δύναται να χρησιμοποιηθεί για την κατηγοριοποίηση των κλάσεων. Αυτό συμβαίνει με βάση την παραδοχή ότι ο άνεμος παρά την έκθεση της κατασκευής και στα υπόλοιπα φορτία, παρμένει η κρίσιμη δράση για το σχεδιασμό του συστήματος ρότορα-ατράκτου και οι επιδράσεις των υπόλοιπων φορτίων, από τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα, δεν είναι καθοριστικές για τον σχεδιασμό. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να επιβεβαιωθεί ότι η παραπάνω παραδοχή ισχύει σε συνδυασμό με όλες τις υπόλοιπες τοπικές περιβαλλοντικές συνθήκες που θα καθοριστούν.

2.1.3 Συνδυασμοί Φορτίσεων

Σύμφωνα με τα παραπάνω είναι προφανές ότι μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της υφίσταται ένα μεγάλο πλήθος φορτίσεων. Για σχεδιαστικούς σκοπούς, η έκθεση της ανεμογεννήτριας μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα σύνολο καταστάσεων σχεδιασμού (load cases) που καλύπτουν τις πιο σημαντικές συνθήκες που μπορεί να υποστεί μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια.

Πίνακας 2.2: Καταστάσεις Φόρτισης Σχεδιασμού

1) Παραγωγή ενέργειας	NTM V_{in} < V_{hub} < V_{out}	NSS HS= $E[HS/V_{hub}]$	COD, UNI	Για ακραίες συνθήκες	U	N (1,25)
	NTM V_{in} < V_{hub} < V_{out}	NSS με δεσμευμένη πιθανότητα κατανομής HS, T_p , V_{hub}	COD, MUL		F	-
	ETM V_{in} < V_{hub} < V_{out}	NSS HS= $E[HS/V_{hub}]$	COD, UNI		U	N
	ECD V_{in} < V_{hub} < V_{out}	NSS (ή NWH) HS= $E[HS/V_{hub}]$	MIS, με μεταβαλλόμενη διεύθυνση ανέμου		U	N
	EWS V_{in} < V_{hub} < V_{out}	NSS (ή NWH) HS= $E[HS/V_{hub}]$	COD, UNI		U	N
	NTM V_{in} < V_{hub} < V_{out}	SSS HS= H_s ,SSS	COD, UNI		U	N
	NTM V_{in} < V_{hub} < V_{out}	SWH HS= HSWH	COD, UNI		U	N
2) Παραγωγή ενέργειας με εμφάνιση σφάλματος	NTM V_{in} < V_{hub} < V_{out}	NSS HS= $E[HS/V_{hub}]$	COD, UNI	Σύστημα ελέγχου εκτός λειτουργίας ή απώλεια δικτύου	U	N
	NTM V_{in} < V_{hub} < V_{out}	NSS HS = $E[HS/V_{hub}]$	COD, UNI	Σύστημα προστασίας εκτός λειτουργίας ή ηλεκτρική βλάβη	U	A

	EOG Vhub= Vr ± 2 m/s and Vout	NSS (ή NWH) HS= E[HS/Vhub]	COD, UNI	Εξωτερική ή εσωτερική ηλεκτρική βλάβη, συμπεριλαμβανομ ένου και έλλειψη ηλεκτρικού δικτύου	U	A
	NTM Vin <Vhub < Vout	NSS HS=E [HS/Vhub]	COD, UNI	Σύστημα προστασίας εκτός λειτουργίας ή ηλεκτρική βλάβη συμπεριλαμβανομ ένου έλλειψη ηλεκτρικού δικτύου	F	-
3) Εκκίνηση	NWP Vin < Vhub < Vout	NSS (ή NWH) HS=E [HS/Vhub]	COD, UNI		F	-
	EOG Vhub = Vr ± 2 m/s and Vout	NSS (ή NWH) HS= E[HS/Vhub]	COD, UNI		U	N
	EDC1 Vhub= Vr ± 2 m/s and Vout	NSS (ή NWH) HS=E [HS/Vhub]	MIS, με μεταβαλλόμενη διεύθυνση ανέμου		U	N
4) Κανονική πάυση λειτουργίας	NWP Vin < Vhub < Vout	NSS (ή NWH) HS= E[HS/Vhub]	COD, UNI		F	-
	EOG Vhub = Vr ± 2 m/s and Vout	NSS (ή NWH) HS= E[HS/Vhub]	COD, UNI		U	N
6) Αναμονή	EWM μοντέλο τυρβώδου ς ροής ανέμου Vhub=k1 Vref	ESS Hs=k2Hs50	MIS,MUL		U	N

EWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{zhub}=V_{e50}$	RWH $H=H_{red50}$	MIS,MUL		U	N
RWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{zhub}=V_{red50}$	EWH $H=H_{50}$	MIS,MUL		U	N
EWM μοντέλο τυρβώδους ροής ανέμου $V_{hub}=k_1 V_{ref}$	ESS $H_s=k_2 H_{s50}$	MIS,MUL	Έλλειψη ηλεκτρικού δικτύου	U	A
EWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{zhub}=V_{e50}$	RWH $H=H=$	MIS,MUL	Έλλειψη ηλεκτρικού δικτύου	U	A
EWM μοντέλο τυρβώδους ροής ανέμου $V_{hub}=k_1 V_1$	ESS $H_s=k_2 H_{s1}$	MIS,MUL	extreme yaw misalignment	U	N
EWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{zhub}=V_{e1}$	RWH $H=H_{red1}$	MIS,MUL	extreme yaw misalignment	U	N
EWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{zhub}=V$	RWH $H=H_{red1}$	MIS,MUL	extreme yaw misalignment	U	N

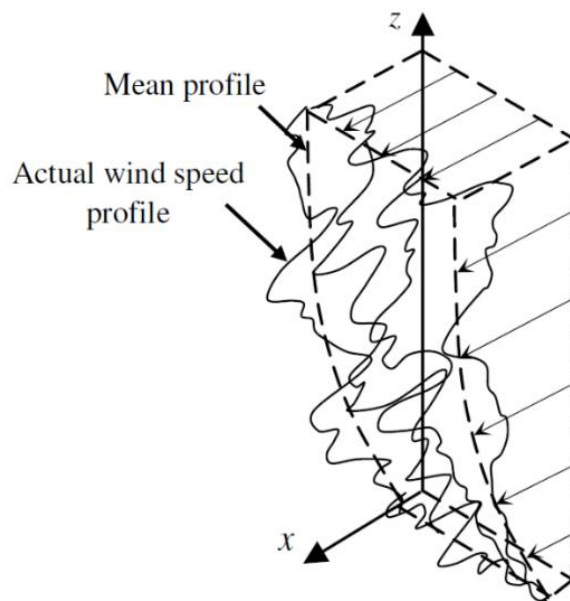
	e1					
	NTM Vhub < 0.7Vref	NSS με δεσμευμένη πιθανότητα κατανομής HS, Tr, Vhub	COD,MUL		F	-
7) Αναμονή με ταυτόχρονη εμφάνιση σφάλματος	EWM μοντέλο τυρβώδου ς ροής ανέμου Vhub=k1 Vref	ESS Hs= k2Hs1	MIS,MUL		U	A
	EWM μοντέλο σταθερού ανέμου Vzhub=V e50	RWH H=Hred1	MIS,MUL		U	A
	RWM μοντέλο σταθερού ανέμου Vzhub=Vr ed50	EWH H=H1	MIS,MUL		U	A
	NTM Vhub < 0.7Vref	NSS με δεσμευμένη πιθανότητα κατανομής HS, Tr, Vhub	COD,MUL		F	-
8) Μεταφοράς , ανέγερσης, συντήρηση ς και επισκευής	Αναφέρεται από τον κατασκευαστή				U	A
	EWM μοντέλο τυρβώδου ς ροής ανέμου Vhub=k1 Vref	ESS Hs= k2Hs1	COD, UNI		U	A

	EWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{z_{hub}} =$ V_{e50}	RWH $H = H_{red1}$	COD, UNI		U	A
	RWM μοντέλο σταθερού ανέμου $V_{z_{hub}} =$ V_{red50}	EWB $H = H1$	COD, UNI		U	A

2.1.4 Τύποι Φορτίων

- Φορτίο Ανέμου

Για τα φορτία ανέμου υπεράκτιων ανεμογεννητριών μπορούν να εφαρμοστούν οι προβλέψεις του προτύπου IEC 61400-1, με κατάλληλες τροποποιήσεις. Οι συνθήκες πνοής ανέμου διακρίνονται σε κανονικές συνθήκες (normal wind conditions) και ακραίες συνθήκες (extreme wind conditions). Στις περισσότερες περιπτώσεις το τελικό προφίλ ταχύτητας ανέμου προκύπτει από μια επαλληλία ενός μέσου-κανονικού προφίλ και ενός μοντέλου τυρβώδους ροής ή ενός προφίλ ριπής ανέμου, όπως φαίνεται στο επόμενο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 : Επαλληλία κανονικού και τυρβώδους προφίλ ανέμου.

Τα μοντέλα τυρβώδους ροής που μπορεί να χρησιμοποιηθούν, αναφέρονται στο Παράρτημα Β, του προτύπου IEC 61400-1. Προτείνεται η χρήση του μοντέλου του Mann.

Για την εκτίμηση των φορτίων σχεδιασμού κατασκευών που είναι εκτεθειμένες στον άνεμο καθορίζονται χαρακτηριστικές καταστάσεις που μπορεί να επικρατούν, κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Παρακάτω παρουσιάζονται οι συνθήκες αυτές, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές καταστάσεις ανεμολογικής φόρτισης, συμπεριλαμβανομένων και των ακραίων, και θα χρησιμοποιηθούν στους συνδυασμούς φορτίσεων. Οι συνθήκες θα αναφερθούν απλά επιγραμματικά με μοναδική έμφαση στο μοντέλο το οποίο εξετάστηκε στη μελέτη [8].

Κανονικές Συνθήκες Ανέμου

- Προφίλ κανονικής ροής ανέμου (Normal Wind Profile - NWP)
- Κανονικό μοντέλο τυρβώδους ροής (Normal Turbulence Model - NTM)

Ακραίες Συνθήκες Ανέμου

- Μοντέλο ακραίας ταχύτητας ανέμου (Extreme Wind Model – EWM)
- **Μοντέλο ακραίας τυρβώδους ροής ανέμου (Extreme Turbulence Model - ETM)**
- Μοντέλο ακραίας ριπής ανέμου (Extreme Operating Gust - EOG)
- Ακραία αλλαγή κατεύθυνσης ανέμου (Extreme Direction Change - EDC)
- Ακραία κατάσταση ταυτόχρονης ριπής και απότομης αλλαγής κατεύθυνσης ανέμου (Extreme coherent gust with direction change - ECD)
- Απότομη χρονική μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου (Extreme Wind Shear - EWS)

Τα αποτελέσματα και η φόρτιση στην οποία υποβλήθηκε η κατασκευή είναι αποτέλεσμα της προσομοίωσης του μοντέλου ακραίας τυρβώδους ροής ανέμου (ETM). Τα φορτία παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο.

Το μοντέλο ακραίας τυρβώδους ροής προκύπτει από την σύνθεση ενός προφίλ κανονικής ροής ανέμου και ενός μοντέλου τυρβώδους ροής του Mann.

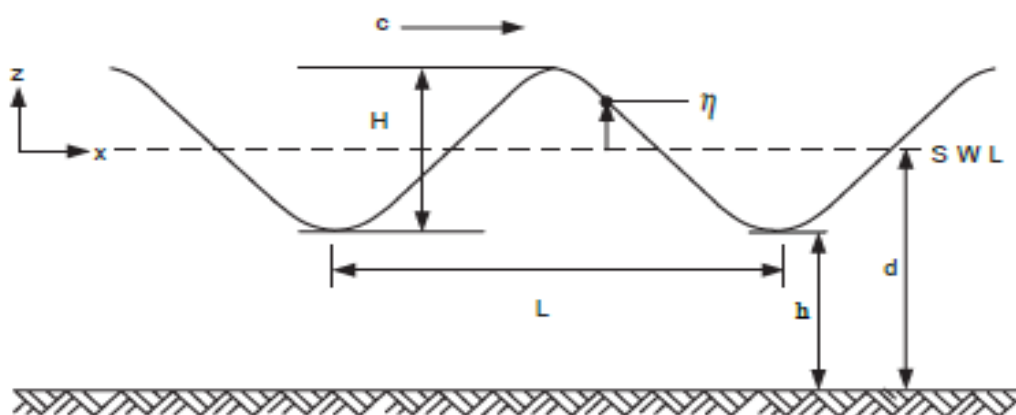
$$[ETM] = [NWP] + [TM_{Mann}(\sigma_1)] \quad (2.1)$$

με τιμή της τυπικής απόκλισης :

$$\sigma_1 = c \cdot I_{ref} \left[0.072 \cdot \left(\frac{V_{ave}}{c} + 3 \right) \cdot \left(\frac{V_{hub}}{c} - 4 \right) + 10 \right], \quad c = 2 \text{ m/s} \quad (2.2)$$

Φορτία θαλάσσιων κυμάτων

Για την εκτίμηση των φορτίων σχεδιασμού υπεράκτιων κατασκευών καθορίζονται χαρακτηριστικές καταστάσεις που μπορεί να επικρατούν, κάτω από διαφορετικές συνθήκες, στο θαλάσσιο περιβάλλον. Παρακάτω παρουσιάζονται οι συνθήκες αυτές, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές καταστάσεις κυματικής φόρτισης, συμπεριλαμβανομένων και των ακραίων, και θα χρησιμοποιηθούν στους συνδυασμούς φορτίσεων. Οι παράμετροι σχεδιασμού με βάση τις συνθήκες θάλασσας (design sea-state) μπορούν να περιγραφούν μέσω του φάσματος του κυματισμού, S_{η} , μαζί με το χαρακτηριστικό ύψος του κύματος, H_S , την περίοδο της μέγιστης τιμής (κορυφής) του φάσματος, T_p , καθώς και τη μέση κατεύθυνση δράσης του κυματισμού, θ_{wm} [8].



Σχήμα 2.2: Φάσμα κυματισμού

Κανονικές Συνθήκες Θάλασσας

– Κανονική (Συνήθης) Κατάσταση Θάλασσας (Normal Sea State - NSS):

Περιγράφεται από ένα χαρακτηριστικό ύψος κύματος, την περίοδο κορυφής και την κατεύθυνση του κυματισμού και σχετίζεται με την ταυτόχρονη μέση ταχύτητα του ανέμου. Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος, $H_{S,NSS}$, που χαρακτηρίζει την κανονική κατάσταση της θάλασσας, ορίζεται ως η αναμενόμενη τιμή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος εξαρτώμενου από την ταυτόχρονη μέση ταχύτητα ανέμου που πνέει στην περιοχή. Η κανονική κατάσταση θάλασσας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των οριακών φορτίων ελέγχου αντοχής, καθώς και των φορτίων ελέγχου κόπωσης. Ειδικότερα, για τον υπολογισμό των φορτίων ελέγχου κόπωσης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη μια σειρά κανονικών συνθηκών θάλασσας, που συνδέονται με διαφορετικές μέσες ταχύτητες του ανέμου που πνέουν στην υπό μελέτη περιοχή. Επιπλέον, θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι το πλήθος και η ανάλυση αυτών των κανονικών συνθηκών είναι επαρκείς για να προβλέψουν τις επιπτώσεις από τα φορτία ελέγχου κόπωσης και αντιπροσωπεύουν πλήρως την μακροπρόθεσμη κατανομή των θαλασσιών παραμέτρων της βάσης περιβαλλοντικών δεδομένων (meteocean database). Για κάθε χαρακτηριστικό ύψος

κύματος θα πρέπει να θεωρηθεί το κατάλληλο εύρος των περιόδων κορυφής. Για τις ανάγκες του σχεδιασμού οι υπολογισμοί θα πρέπει να βασίζονται στις τιμές της περιόδου κορυφής που δίδουν ως αποτέλεσμα τα υψηλότερα φορτία ή τις δυσμενέστερες επιπτώσεις φόρτισης στην κατασκευή.

- Το Κανονικό Ύψος Κύματος (Normal Wave Height - NWH)

Ορίζεται ως η αναμενόμενη τιμή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος εξαρτώμενου από την ταυτόχρονη μέση ταχύτητα του ανέμου, δηλαδή $H_{NWH} = H_{S,NSS}$. Θεωρείται ότι το εύρος των περιόδων του κύματος T είναι ανάλογο με το κανονικό ύψος κύματος. Για τις ανάγκες του σχεδιασμού οι υπολογισμοί θα πρέπει να βασίζονται στις τιμές της περιόδου του κυματισμού μέσα στο εύρος των τιμών που δίδουν ως αποτέλεσμα τα υψηλότερα (μεγαλύτερα) φορτία ή τις δυσμενέστερες επιπτώσεις φόρτισης στην κατασκευή. Ειδικότερα, για την περίπτωση κυμάτων στα βαθιά, η περίοδος κύματος που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί με το κανονικό ύψος κύματος, H_{NWH} , θα πρέπει να θεωρηθεί εντός του εύρους τιμών που δίδονται από την παρακάτω έκφραση [8] :

$$11.1 \sqrt{H_{S,NSS}(U_{10})/g} \leq T \leq 14.3 \sqrt{H_{S,NSS}(U_{10})/g} \quad (2.3)$$

Ακραίες Συνθήκες Θάλασσας

- Δριμεία Κατάσταση Θάλασσας (Severe Sea State - SSS)
- Δριμύ Ύψος Κύματος (Severe Wave Height - SWH),
- Ακραία Κατάσταση Θάλασσας (Extreme Sea State - ESS)
- Ακραίο Ύψος Κύματος (Extreme Wave Height - EWH),
- Μειωμένο Ύψος Κύματος (Reduced Wave Height - RWH),
- Φορτία Ανεμογενών και Παλιρροιακών Θαλασσιών Ρευμάτων

Η επίδραση των ρευμάτων που προκαλούνται από τη δράση του ανέμου και της παλίρροιας θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό και στη λειτουργία υπεράκτιων (offshore) κατασκευών. Ειδικότερα, η παρουσία ισχυρών ρευμάτων μπορεί να επηρεάσει την κατασκευή με βάση τα ακόλουθα (DNV-RP-C205, 2010):

- (α) Τα ρεύματα μπορούν να προκαλέσουν εκτροπή και αργή μετακίνηση σε υπεράκτιες αγκυροβολημένες κατασκευές.
- (β) Να προκαλέσουν ή να αυξήσουν τις ανωστικές δυνάμεις σε βυθισμένες κατασκευές.
- (γ) Να οδηγήσουν σε ταλαντώσεις των λεπτών τμημάτων της κατασκευής και πρόκληση πεδίου δινών (στροβίλων) λόγω της παρουσίας κατασκευών μεγάλων διαστάσεων εντός του θαλασσιού ροϊκού πεδίου.
- (δ) Η αλληλεπίδραση μεταξύ ισχυρών ρευμάτων και κυμάτων οδηγεί σε μεταβολές του ύψους και της περιόδου του κυματισμού.

(ε) Τέλος, τα θαλάσσια ρεύματα προκαλούν διάβρωση του πυθμένα, ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου οι κατασκευές συνδέονται απευθείας ή αγκυρώνονται στον πυθμένα.

Για πρακτικές εφαρμογές, τα ρεύματα που επιδρούν στις κατασκευές που εγκαθίστανται στο θαλάσσιο περιβάλλον, αν και κατά βάση μεταβάλλονται χωρικά και χρονικά, ωστόσο θεωρούνται ομοιόμορφα με σταθερή ταχύτητα και κατεύθυνση κατά την οριζόντια διεύθυνση και μεταβάλλονται μόνο κατά το βάθος. Τα ρεύματα, που συνήθως λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση παράκτιων και υπεράκτιων κατασκευών, είναι: (1) τα επιφανειακά ρεύματα που προκαλούνται από τη δράση του ανέμου (ανεμογενή), (2) τα υπο-επιφανειακά ρεύματα που προκαλούνται από τη δράση της παλίρροιας (παλιρροιακά) και (3) τα παράκτια ρεύματα που προκαλούνται από τη θραύση των κυμάτων και αναπτύσσονται παράλληλα στην ακτογραμμή (κυματογενή) [BS EN 61400-3, 2009].

Οι πληροφορίες για την στατιστική κατανομή των ρευμάτων, με έμφαση στην κατανομή του πεδίου ταχύτητας κατά το βάθος, είναι συνήθως σποραδικές για τις περισσότερες περιοχές όπου πρόκειται να κατασκευαστούν υπεράκτιες ή παράκτιες κατασκευές. Στα πλαίσια της αρχικής εκτίμησης της καταλληλότητας της περιοχής ενδιαφέροντος προτείνεται, σε πρώτο στάδιο, η εκτίμηση των ρευμάτων μέσω μετρήσεων και στη συνέχεια η πραγματοποίηση αναλυτικότερων μετρήσεων εστιασμένων αφενός στην περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος και αφετέρου καθ' όλο το βάθος της υδάτινης στήλης. Στοιχεία για τις συνθήκες ρευμάτων δίνονται αναλυτικότερα στο ISO 19901-1 (2005).

Θερμοκρασιακές μεταβολές

Όπως και στην περίπτωση του ανέμου και των κυματισμών, διακρίνονται και για τις θερμοκρασιακές μεταβολές κανονικές και ακραίες καταστάσεις.

- Υπό κανονικές συνθήκες: Θερμοκρασία Περιβάλλοντος μεταξύ -10°C και $+40^{\circ}\text{C}$
- Υπό ακραίες συνθήκες: Θερμοκρασία Περιβάλλοντος μεταξύ -20°C και $+50^{\circ}\text{C}$

Χιόνι - πάγος

Δεν προδιαγράφονται ελάχιστες απαιτούμενες τιμές φορτίων που σχετίζονται με ύπαρξη πάγου ή χιονιού στα διάφορα τμήματα της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Η ανάγκη ή μη του να συμπεριληφθούν στον σχεδιασμό, θα προκύψει κατόπιν της εκτίμησης των τοπικών περιβαλλοντικών παραμέτρων σύμφωνα με τις αντίστοιχες προβλέψεις του προτύπου IEC 61400-3. Στο Παράρτημα E, του προτύπου IEC 61400-3, παρουσιάζεται μια μεθοδολογία σύμφωνα με την οποία θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν τα εν λόγω φορτία στον σχεδιασμό.

Μεταβολές της επιφάνειας πυθμένα & υποσκαφές

Αλλαγές της επιφάνειας του πυθμένα μπορεί να προκύψουν, κυρίως σε αμμώδη βυθό, από ρεύματα και κυματισμούς, δημιουργώντας αλλαγές στην μορφολογία του. Αυτό ενδέχεται να

οδηγήσει σε συνολική ανύψωση ή υποβάθμιση του πυθμένα ή στην εναλλαγή ανύψωσης-υποβάθμισης.

Η τοπική υποσκαφή και διάβρωση του πυθμένα στην περιοχή των θεμελιώσεων, είναι μία περιβαλλοντική παράμετρος με ιδιαίτερη βαρύτητα που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην φάση σχεδιασμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η υποσκαφή θεμελιώσεων μονοπάσσαλων υπεράκτιων ανεμογεννητριών ενδέχεται να είναι της τάξης του 1m με 2m , με δυσμενείς επιρροές στο σύνολο του φορέα. Η εκτίμηση των εν λόγω περιβαλλοντικών παραμέτρων πρέπει να γίνει σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στο IEC 61400-3.

Φορτία απορρεύματος (Wake loads)

Η επίδραση που έχει η λειτουργία άλλων υπεράκτιων ανεμογεννητριών στα ανάντη της εξεταζόμενης (εντός υπεράκτιου αιολικού πάρκου), μπορεί να ληφθεί υπόψη μέσω της χρήσης μιας δρώσας τιμής της έντασης τυρβώδους ροής I_{eff} . Στο Παράρτημα D, του IEC61400-1, δίνεται η μεθοδολογία υπολογισμού της I_{eff} για συνδυασμούς κόπωσης και για συνδυασμούς αστοχίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο του παραπάνω παραρτήματος ισχύει για αποστάσεις μεταξύ ανεμογεννητριών, μεγαλύτερες από 3 διαμέτρους ρότορα.

Σεισμικά φορτία

Γενικά δεν προβλέπονται ελάχιστα σεισμικά φορτία για τον σχεδιασμό υπεράκτιων ανεμογεννητριών, επειδή πρόκειται για μία παράμετρο η οποία έχει αποκλειστικά τοπικό περιβαλλοντικό χαρακτήρα.

Τα σεισμικά φορτία πρέπει να ληφθούν υπόψη σύμφωνα με τον ισχύοντα στην περιοχή ανέγερσης αντισεισμικό κανονισμό και να συνδυάζονται με φορτία: (α) κανονικής λειτουργίας της ανεμογεννήτριας (normal operational load) ή (β) φορτία σε κατάσταση επείγουσας διακοπής (emergency shut down), όποια είναι δυσμενέστερα.

Περιβαλλοντικές φορτίσεις σχεδιασμού

Προκειμένου να εξασφαλισθεί η ακεραιότητα της κατασκευής καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στον σχεδιασμό διάφορες φορτιστικές καταστάσεις της ανεμογεννήτριας σε σχέση με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, μέσω της υιοθέτησης περιβαλλοντικών φορτίσεων. Η κάθε περιβαλλοντική φόρτιση, περιλαμβάνει έναν συγκεκριμένο συνδυασμό περιβαλλοντικών φορτίων, ο οποίος εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας (παραγωγή ενέργειας, προγραμματισμένη ή επείγουσα διακοπή, διακοπή λόγω επισκευής κτλ.). Με αυτόν τον τρόπο περιγράφεται πιο ορθολογικά η συνύπαρξη των διάφορων περιβαλλοντικών συνιστωσών.

Τα περιβαλλοντικά φορτία που μπορεί να περιλαμβάνονται σε μια περιβαλλοντική φόρτιση είναι μόνο αυτά που η επιρροή τους μπορεί να είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό, όπως:

- Άνεμος
- Κυματισμοί

- Ρεύματα
- Στάθμη θάλασσας
- Πάγος

Άλλες περιβαλλοντικές δράσεις που ενδεχομένως συνυπάρχουν, αλλά η επιρροή τους θεωρείται αμελητέα, δεν συμμετέχουν στην περιβαλλοντική φόρτιση. Λαμβάνονται όμως υπόψη στην συνολική ανίσωση ασφαλείας κατά τον σχεδιασμό. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα φορτία ανέμου και κυματισμών, μιας περιβαλλοντικής φόρτισης σχεδιασμού, λαμβάνονται υπόψη είτε με την ίδια διεύθυνση (co-directional) ή με διαφορετική (misaligned). [8]

2.1.5 Μερικοί συντελεστές ασφαλείας φορτίσεων

Οι μερικοί συντελεστές ασφαλείας των φορτίων ορίζονται με βάση την οριακή κατάσταση που εξετάζεται, την κατάσταση σχεδιασμού από την οποία εξάγονται τα φορτία, το αίτιο του φορτίου και την επίδραση που έχει στην αντοχή της κατασκευής (ευμενής/δυσμενής). Για τον υπολογισμό των φορτίων στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, κατά την διάρκεια δράσης του σεισμού και κατά την εξέταση της κόπωσης, ο συντελεστής ασφαλείας τίθεται $\gamma_F=1$. Για την οριακή κατάσταση αστοχίας, όπου εξετάζεται η αντοχή, η απώλεια ευστάθειας και η απώλεια στατικής ισορροπίας οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας λαμβάνονται από τον πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Συντελεστές ασφαλείας φορτίσεων για την οριακή κατάσταση αστοχίας

Source of loading	Unfavourable loads			Favourable loads
	Type of design situation (see Tables 4.3.1 and 4.3.2)			All design situations
	N Normal and extreme	A Abnormal	T Transport and erection	
Aerodynamic	1.35	1.1	1.5	0.9
Operational	1.35	1.1	1.5	0.9
Gravity	1.1/1.35*	1.1	1.25	0.9
Other inertial forces	1.25	1.1	1.3	0.9
Heat influence	1.35	–	–	–

* in the event of the masses not being determined by weighing.

2.2 Έλεγχοι

2.2.1 Πλαστικός έλεγχος (LS1 - Plastic Limit State)

Ο έλεγχος οριακής κατάστασης πλαστικοποίησης είναι από τους βασικούς ελέγχους για την εξασφάλιση της ακαιρεότητας της κατασκευής. Η κατάσταση αυτή αναφέρεται στη συνθήκη όπου η ικανότητα της κατασκευής να παραλάβει κι άλλο φορτίο, εξαντλείται από την διαρροή του υλικού. Η αντοχή της κατασκευής στη κατάσταση αυτή προσδιορίζεται από τη θεώρηση μικρών μετατοπίσεων.

Όλοι οι σχετικοί συνδυασμοί φορτίων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον έλεγχο του LS1.

Βάσει Ευρωκώδικα 3, Part 1-6: Μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες μεθόδους ανάλυσης πρέπει να χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τάσεων σχεδιασμού και των συνεπειών τάσης κατά τον έλεγχο του LS1:

- θεωρία μεμβράνης
- Γραμμική ελαστική ανάλυση (LA).
- Μη γραμμική ανάλυση υλικού (MNA).
- Μη γραμμική ανάλυση υλικού & γεωμετρίας (GMNA)

Παρ' όλο που ο σχεδιασμός σε όρους τάσεων βασίζεται σε ελαστική ανάλυση και συνεπώς δεν μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια την οριακή κατάσταση πλαστικότητας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα κάτω όριο, παρέχοντας μία συντηρητική εκτίμηση. Ο προσδιορισμός της αντοχής της κατασκευής με την χρήση καθολικής αριθμητικής ανάλυσης περιλαμβάνει την προσομοίωση με την βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων. Παρέχει αποτελέσματα καλύτερης ακρίβειας, καθώς μπορεί να εκτιμήσει και την μετελαστική συμπεριφορά του φορέα.

2.1.6 Έλεγχος ευστάθειας

Η οριακή κατάσταση λυγισμού πρέπει να ληφθεί ως η κατάσταση κατά την οποία ολόκληρη ή μέρος της κατασκευής αναπτύσσει ξαφνικά μεγάλες μετατοπίσεις κάθετα στην επιφάνεια του κελύφους, που προκαλούνται από απώλεια ευστάθειας υπό θλιπτικές ή διατμητικές τάσεις, οδηγώντας σε αδυναμία ανάληψης οποιασδήποτε αύξησης των φορτίων καταπόνησης, πιθανώς προκαλώντας ολική κατάρρευση της κατασκευής. Για τις ανεμογεννήτριες, ως κελυφωτές κατασκευές, όπου ο λόγος μήκους προς πάχος (t/r), είναι μεγάλος, ο έλεγχος ευστάθειας είναι από τους κρισιμότερους.

Βάσει Ευρωκώδικα 3, Part 1-6, μία ή περισσότερες από τις ακόλουθες μεθόδους ανάλυσης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των τάσεων σχεδιασμού κατά τον έλεγχο του LS3:

- θεωρία μεμβράνης μόνο για αξονοσυμμετρικές συνθήκες
- γραμμική ελαστική ανάλυση (LA),
- γραμμική ελαστική ανάλυση ιδιομορφών (LBA),

- Μη γραμμική ανάλυση υλικού (MNA),
- GMNIA, σε συνδυασμό με MNA, LBA και GMNA, χρησιμοποιώντας κατάλληλες ατέλειες και υπολογισμένους συντελεστές βαθμονόμησης.

Όλοι οι σχετικοί συνδυασμοί φορτίου που προκαλούν θλιπτικές μεμβρανικές ή διατμητικές τάσεις στο κέλυφος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον έλεγχο του LS3.

Γενικά καθώς αναμένεται η κατασκευή να εκτεθεί και άλλες δράσεις, οι καταστάσεις εκείνες όπως, οριακή κατάσταση κόπωσης, σεισμικές δράσεις, συντονισμός, θα πρέπει να ελέγχονται. Παρόλα αυτά, δεν περιγράφονται αναλυτικά καθώς δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας μελέτης.

2.3 Μέθοδοι Μη Γραμμικής Επίλυσης

2.3.1 Newton – Raphson

Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που παράγονται στο Abaqus είναι συνήθως μη γραμμικά και μπορούν να περιλαμβάνουν από μερικές έως χιλιάδες μεταβλητών. Από την άποψη αυτών των μεταβλητών, οι εξισώσεις ισορροπίας λαμβάνονται με τη διακριτοποίηση της εικονικής εξίσωσης εργασίας.

Η εξίσωση μπορεί να γραφτεί συμβολικά ως:

$$F^N(u^M) = 0 \quad (2.4)$$

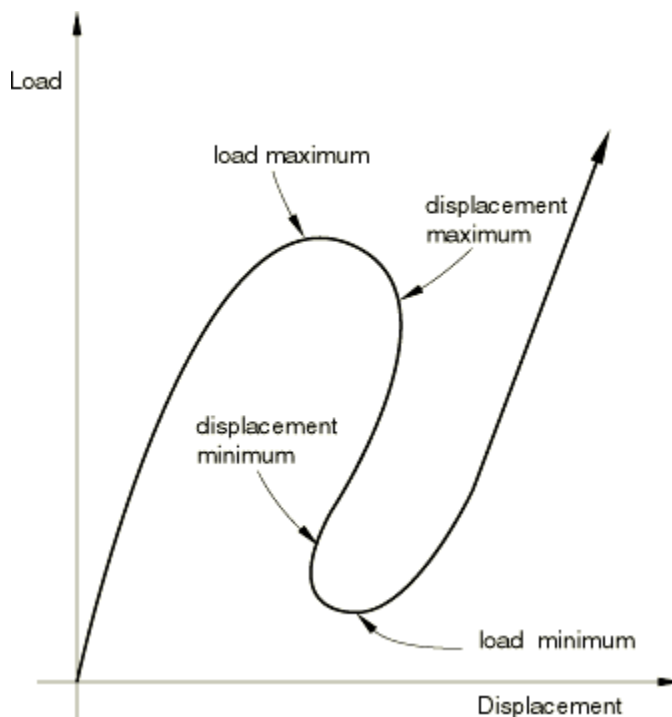
όπου F^N είναι η συνιστώσα δύναμης συζευγμένη με την μεταβλητή N στο πρόβλημα και u^M είναι η τιμή της M μεταβλητής. Το βασικό πρόβλημα είναι η επίλυση της εξίσωσης (2.4) για το u^M σε όλη την περιοχή που μας ενδιαφέρει.

Πολλά από τα προβλήματα που θα αντιμετωπίσει το Abaqus εξαρτώνται από την πορεία επίλυσης, οπότε η λύση πρέπει να αναπτύσσεται με μια σειρά "μικρών" αυξήσεων. Έτσι λοιπόν ανακύπτουν δύο ζητήματα. Το ένα αφορά το πώς η διακριτοποιημένη εξίσωση λύνεται σε κάθε αύξηση και το δεύτερο πώς επιλέγεται το μέγεθος της προσαύξησης αυτής.

Το Abaqus / Standard γενικά χρησιμοποιεί τη μέθοδο του Newton ως αριθμητική τεχνική για την επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων ισορροπίας. Το κίνητρο για αυτή την επιλογή είναι κατά κύριο λόγο το ποσοστό σύγκλισης που προκύπτει από τη χρήση της μεθόδου της Newton σε σύγκριση με τα ποσοστά σύγκλισης που παρουσιάζονται με εναλλακτικές μεθόδους. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη εναλλακτική λύση από αυτές αποτελεί η τροποποιημένη μέθοδος Newton (modified Newton). Άλλη είναι η quasi-Newton. Δεν αξίζει όμως περαιτέρω αναφορά των ανωτέρω μεθόδων καθώς δεν έγινε χρήση καμίας στη επίλυση των προβλημάτων της παρούσας εργασίας [9].

2.3.2 ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΘΟΔΟΥ RIKS

Η μέθοδος Riks είναι ένας αλγόριθμος που επιφέρει την αποτελεσματική λύση περιπτώσεων όπου κατά τη διάρκεια των περιόδων απόκρισης το φορτίο ή/και η μετατόπιση μπορεί να μειωθεί όσο η λύση προχωράει. Χρησιμοποιείται λοιπόν σε ασταθή προβλήματα για την εύρεση των μη γραμμικών στατικών καταστάσεων ισορροπίας τους και ο τύπος συμπεριφοράς αυτός με τις διακυμάνσεις στην απόκριση του φορτίου μετατόπισης σκιαγραφείται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 2.3 : Παράδειγμα καμπύλης φορτίου – μετατόπισης.

Η μέθοδος RIKS τροποποιείται στο ABAQUS στη βάση που προτείνει και ο Crisfield (1980) ούτως ώστε να εφαρμοστεί στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Θεωρείται ότι η φόρτιση είναι ευθέως ανάλογη, δηλαδή ότι όλα τα μεγέθη των μεταβαλλόμενων φορτίων εξαρτώνται από ένα κοινό βαθμωτό συντελεστή. Επιπρόσθετα, θεωρείται ότι η απόκριση είναι λογικώς ομαλή, ότι δεν προκύπτουν δηλαδή απότομες αλλαγές (με γωνίες) στη σχέση φόρτισης μετατόπισης.

Η ουσία της μεθόδου είναι ότι ως λύση θεωρείται η εύρεση μιας μοναδικής διαδρομής ισορροπίας σε ένα χώρο που ορίζεται από τις μεταβλητές του κόμβου και την παράμετρο φόρτισης. Η ανάπτυξη της λύσης απαιτεί να διασχίζουμε αυτή τη διαδρομή όσο απαιτείται. Ο βασικός αλγόριθμος παραμένει η μέθοδος Newton, επομένως κάθε στιγμή θα υπάρχει μια πεπερασμένη ακτίνα σύγκλισης. Επιπλέον, πολλά από τα υλικά (και πιθανώς φορτίσεις) ενδιαφέροντος θα έχουν απόκριση εξαρτώμενη από τη διαδρομή. Για αυτούς τους λόγους, είναι σημαντικό να περιοριστεί το μέγεθος της αύξησης. Στον τροποποιημένο αλγόριθμο Riks, όπως εφαρμόζεται στο ABAQUS, το μέγεθος προσαύξησης περιορίζεται μετακινώντας μια δεδομένη απόσταση κατά μήκος της εφαπτομένης γραμμής στο τρέχον σημείο ισορροπίας στο επίπεδο και έπειτα αναζητώντας για ισορροπία στο επίπεδο που διέρχεται από το σημείο που λαμβάνεται,

και το οποίο είναι ορθογώνιο στην ίδια εφαπτόμενη γραμμή. Εδώ η γεωμετρία που αναφέρεται είναι ο χώρος των μετατοπίσεων, των περιστροφών και της παραμέτρου φορτίου που αναφέρθηκε παραπάνω.

Ορισμοί βασικών μεταβλητών

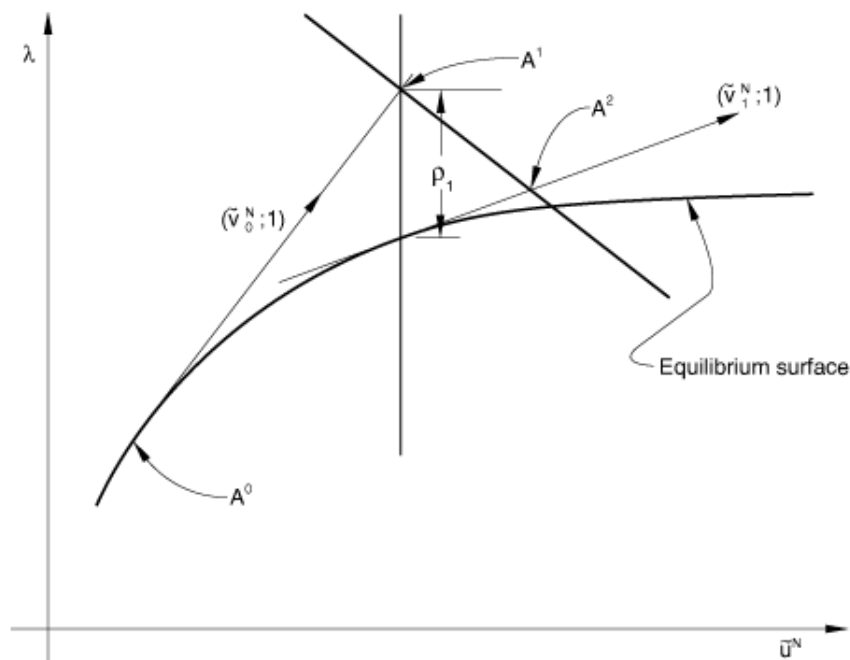
Έστω ότι P^N ($N=1,2,\dots$ = οι βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου) είναι το πρότυπο φόρτωσης, όπως ορίζεται με μία ή περισσότερες από τις δυνατότητες της φόρτισης. Και έστω λ η παράμετρος μεγέθους του φορτίου, επομένως ανά πάσα στιγμή η πραγματική κατάσταση φορτίου είναι $\lambda \times P^N$, και οι μετατοπίσεις είναι u^N εκείνη τη στιγμή.

Ο χώρος διαλύματος κλιμακώνεται ώστε οι διαστάσεις να έχουν περίπου το ίδιο μέγεθος σε κάθε άξονα. Αυτό γίνεται με τη μέτρηση της μέγιστης απόλυτης τιμής όλων των μεταβλητών μετατοπίσεων, \bar{u} , στην αρχική γραμμική επανάληψη. Επίσης ορίζουμε $\bar{P} = (P^N)^{1/2}$.

Ο χώρος καθορίζεται από:

- Φορτίο $\lambda \cdot \bar{P}^N$, $\bar{P}^N = \frac{P^N}{\bar{P}}$
- Μετατοπίσεις $\tilde{u}^N = \frac{u^N}{\bar{u}}$

και η διαδρομή λύσης είναι τότε το συνεχές σύνολο σημείων ισορροπίας που περιγράφονται από το διάνυσμα $(\tilde{u}^N; \lambda)$ σε αυτό το χώρο που αναφέρθηκε προηγουμένως. Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4 και περιγράφεται παρακάτω.



Σχήμα 2.4 : Αλγόριθμός Riks

Ας υποθέσουμε ότι η λύση έχει αναπτυχθεί στο σημείο $A^0 = (\tilde{u}_0^N, \lambda_0)$

Η εφαπτόμενη ακαμψία, K_0^{NM} , έχει σχηματιστεί και λύνουμε,

$$K_0^{NM} u_0^M = P \quad (2.5)$$

Το μέγεθος της προσαύξεσης επιλέγεται από ένα συγκεκριμένο μήκος, Δl , στο χώρο λύσης, έτσι ώστε $\Delta \lambda_0^2 (\tilde{u}_0^N; 1) : (\tilde{u}_0^N; 1) = \Delta l^2$, και επομένως:

$$\Delta \lambda_0 = \frac{\pm \Delta l}{(\tilde{u}_0^N \tilde{u}_0^N + 1)^{1/2}} \quad (2.6)$$

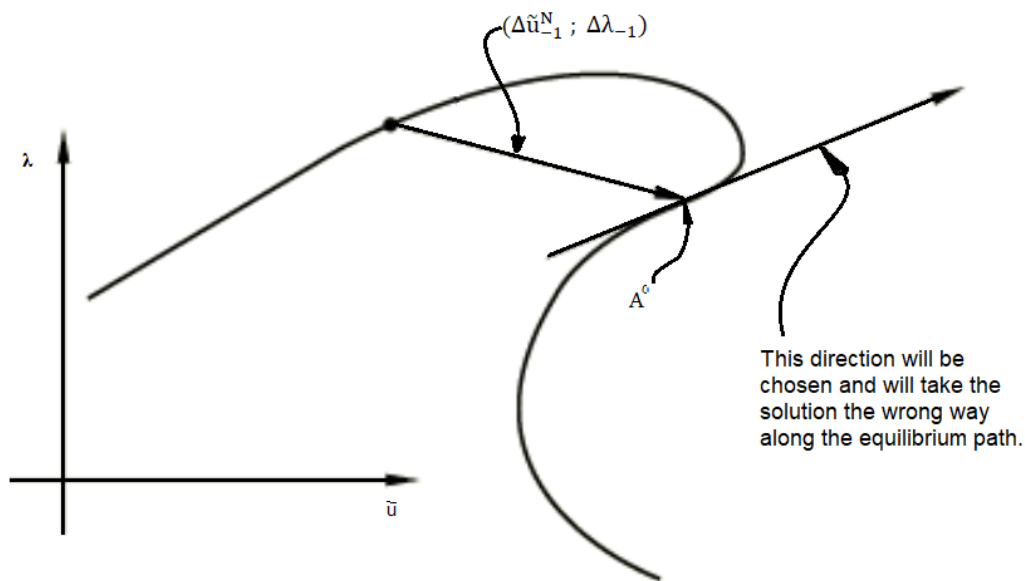
(Εδώ το \tilde{u}_0^N είναι το u_0^N διαιρεμένο με το \bar{u}).

Η τιμή του Δl αρχικά εισάγεται από το χρήστη και προσαρμόζεται από το πρόγραμμα με τον αυτόματο αλγόριθμο αύξησης φορτίου για στατικά προβλήματα, βασισμένο στο ποσοστό σύγκλισης. Το πρόσημο του $\Delta \lambda_0$ (η κατεύθυνση της απόκρισης κατά μήκος της εφαπτόμενης ευθείας) επιλέγεται έτσι ώστε το εσωτερικό γινόμενο του $\Delta \lambda_0 (\tilde{u}_0^N; 1)$ στη λύση της προηγούμενης αύξησης, $(\Delta \tilde{u}_{-1}^N; \Delta \lambda_{-1})$, να είναι θετικό:

$$\Delta \lambda_0 (\tilde{u}_0^N; 1) : (\Delta \tilde{u}_{-1}^N; \Delta \lambda_{-1}) > 0 \quad (2.7)$$

Άρα,

$$\Delta \lambda_0 (\tilde{u}_0^N \Delta \tilde{u}_{-1}^N + \Delta \lambda_{-1}) > 0 \quad (2.8)$$



Σχήμα 2.5 : Λάθος σημείο στο δρόμο ισορροπίας

Είναι πιθανό σε ορισμένες περιπτώσεις που η απόκριση σημειώνει πολύ μεγάλη καμπυλότητα στον $(\tilde{u}^N; \lambda)$ χώρο, το κριτήριο να προκαλέσει την επιλογή του λάθους σημείου (λάθος πρόσημο), όπως φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα 2.5.

Το λάθος πρόσημο σπανίως επιλέγεται σε πρακτικές περιπτώσεις, εκτός και αν το μέγεθος της αύξησης είναι πολύ μεγάλο ή η λύση αλλάζει καμπυλότητα με οξεία γωνία. Ο έλεγχος σε τέτοιες περιπτώσεις είναι πολύ δαπανηρός, δηλαδή έχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος.

Μια προσέγγιση θα ήταν η λύση να βρίσκεται στο διάστημα $\lambda_0 - \varepsilon \Delta\lambda_{-1}$, $0 < \varepsilon \ll 1$, έτσι παίρνουμε ένα διάνυσμα το οποίο δίνει μια κοντινή προσέγγιση της προσανατολισμένης εφαπτομένης στο A^0 . Επειδή η περίπτωση είναι τόσο σπάνια, δεν περιλαμβάνεται ένας τέτοιος έλεγχος και το απλό εσωτερικό γινόμενο που δίνεται παραπάνω χρησιμοποιείται για την εύρεση του πρόσημου. Έτσι λοιπόν, έχουμε βρει το σημείο $A^1 (\tilde{u}_0^N + \Delta\lambda_0 \tilde{u}_0^N; \lambda_0 + \Delta\lambda_0)$. Η λύση τώρα είναι διορθωμένη στη διαδρομή ισορροπίας, στο επίπεδο που περνάει από το A^1 και είναι κάθετο στο $(\tilde{u}_0^N; 1)$, από τον επαναληπτικό αλγόριθμο που παρουσιάζεται κάτω.

- Έναρξη:

$$\Delta\lambda_i = \Delta\lambda_0, \quad \Delta u_i^N = \Delta\lambda_0 u_0^N \quad (2.9)$$

- Για την επανάληψη i ($i=1,2,3,\dots$)

α. Διαμόρφωση I^N, K^{NM} , οι εσωτερικές δυνάμεις στους κόμβους και

$$I^N = \int_V \boldsymbol{\beta}^N: \boldsymbol{\sigma} dV, \quad K^{NM} = \frac{\partial I^N}{\partial u^M} \quad (2.10)$$

στην κατάσταση $(u_0^N + \Delta u_i^N; \lambda_0 + \Delta\lambda_i)$ που βρίσκεται στο σημείο του A^i .

β. Έλεγχος ισορροπίας:

$$R_i^N = (\lambda_0 + \Delta\lambda_i) P^N - I^N \quad (2.11)$$

Αν οι παράμετροι R_i^N που έχουν εισαχθεί είναι αρκούντως μικρές, η επανάληψη έχει συγκλίνει. Αν όχι συνεχίζουμε.

γ. Επίλυση:

$$K^{NM} \{ u_i^M; c_i^M \} = \{ P^N; R_i^N \} \quad (2.12)$$

Έτσι λύνουμε ταυτόχρονα με δύο διανύσματα φόρτισης P^N και R^N και λαμβάνουμε δύο διανύσματα μετατόπισης u_i^N και c_i^N .

δ. Τώρα το διάνυσμα $(\tilde{u}_i^N; 1)$ τίθεται υπό κλίμακα και αθροίζεται στο $(\tilde{c}_i^N; \rho_i)$

Όπου $\rho_i = R_i^N P^N / \overline{P^2}$ είναι η προβολή των υπολειμματικών, που έχουν τεθεί υπό κλίμακα στο \tilde{P}^N , έτσι ώστε να μετακινούμαστε από το A^i στο A^{i+1} πάνω στο επίπεδο που είναι κάθετο στο $(\tilde{u}_0^N; 1)$.

Αυτό δίνει την εξίσωση:

$$\{(0; -\rho_i) + (\tilde{c}_i^N; \rho_i) + \mu (\tilde{u}_i^N; 1)\} : (\tilde{u}_0^N; 1) = 0, \quad (2.13)$$

που απλοποιείται στην:

$$\mu = - \frac{\tilde{c}_i^N \tilde{u}_0^N}{\tilde{u}_i^N \tilde{u}_0^N + 1} \quad (2.14)$$

Και το σημείο της λύσης ώρα είναι το A^i :

$$(u_0^N + \Delta u_i^N + c_i^N + \mu u_i^N; \lambda_0 + \Delta \lambda_i + \mu) \quad (2.15)$$

ε. Ενημέρωση δεδομένων για την επόμενη επανάληψη

$$\begin{aligned} \Delta u_{i+1}^N &= \Delta u_i^N + c_i^N + \mu u_i^N \\ \Delta \lambda_{i+1} &= \Delta \lambda_i + \mu \\ i &= i + 1 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Και επιστροφή στην αρχική.

Η εκτέλεση στο πρόγραμμα περιλαμβάνει μια επιπλέον ενημέρωση μετά από κάθε επανάληψη: $u_0^N = u_i^N$. Αυτό οδηγεί την έρευνα για την εύρεση ισορροπίας να είναι ορθογώνια στην τελευταία εφαπτομένη, αντί για την εφαπτομένη στην αρχή της αύξησης. Το κύριο κίνητρο για αυτή την πρόσθετη τροποποίηση προέρχεται από τη χρήση της μεθόδου σε προβλήματα πλαστικότητας, όπου η πρώτη επανάληψη κάθε αύξησης χρησιμοποιεί το ελαστικό μητρώο ακαμψίας για να ορίσει την κατεύθυνση της παραμόρφωσης και έτσι έχει ως αποτέλεσμα μια ακαμψία η οποία δεν είναι αντιπροσωπευτική της εφαπτομένης στη διαδρομή ισορροπίας εφόσον προκύπτει ενεργός πλαστικότητα.

Το συνολικό μήκος της διαδρομής που διασχίζεται καθορίζεται από τα μεγέθη των φορτίων που εισάγονται, καθώς και ο αριθμός των αυξήσεων καθορίζεται από αντίστοιχες παραμέτρους εισαγωγής [9].

2.4 Θεωρητικό υπόβαθρο πεπερασμένων στοιχείων

Γενικά

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η δυνατότητα διακριτοποίησης του χώρου, δηλαδή ο διαχωρισμός του σε μικρών διαστάσεων υποχώρους (στοιχεία). Με αυτόν τον τρόπο ένα ανομοιογενές συνεχές μέσο μπορεί να μετατραπεί σε διακριτό μέσο αποτελούμενο από μικρότερα στοιχεία με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες το καθένα, τα οποία αλληλεπιδρούν μέσω των κοινών κόμβων. Η μέθοδος εξασφαλίζει τη συνολική ισορροπία του κάθε στοιχείου καθώς και την ισορροπία των δράσεων στους κόμβους. Για την περιγραφή της συμπεριφοράς των στοιχείων που προκύπτουν από την διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου χρησιμοποιούνται μαθηματικά προσομοιώματα που βασίζονται σε διάφορες θεωρίες.

Επιλογή στοιχείων βάσει χαρακτηριστικών προβλήματος

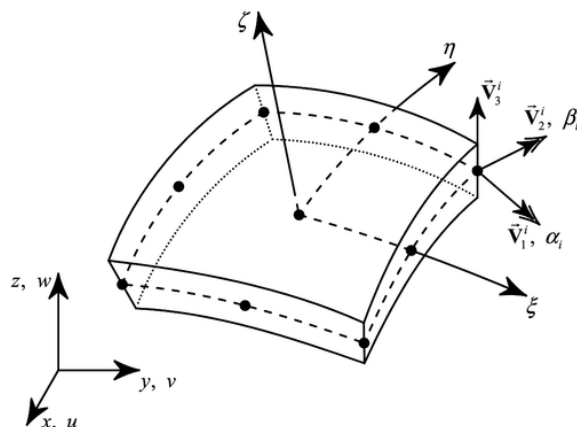
Τα στοιχεία κελύφους χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση στοιχείων και κατασκευών στις οποίες η μία διάσταση, το πάχος, είναι σημαντικά μικρότερη από τις άλλες διαστάσεις. Μια κατασκευή της οποίας το πάχος είναι μικρότερο από 1/10 μιας διάστασης, μπορεί να μοντελοποιηθεί με στοιχεία κελύφους. Τα συμβατικά στοιχεία κελύφους (Conventional shell elements) χρησιμοποιούν αυτήν τη συνθήκη για να διακρίνουν ένα σώμα καθορίζοντας τη γεωμετρία σε μια επιφάνεια αναφοράς. Σε αυτή την περίπτωση το πάχος ορίζεται μέσω του ορισμού της ιδιότητας της τομής. Τα συμβατικά στοιχεία κελύφους έχουν μετατόπιση και περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας.

Αντίθετα, τα continuum shell elements διακρίνουν ένα ολόκληρο τρισδιάστατο σώμα. Το πάχος καθορίζεται από την γεωμετρία που σχηματίζουν η κόμβοι στην τομή του στοιχείου. Τα εν λόγω στοιχεία κελύφους έχουν μόνο βαθμούς ελευθερίας μετατόπισης. Από την άποψη της μοντελοποίησης, αυτά τα στοιχεία κελύφους μοιάζουν με τρισδιάστατα, αλλά η κινηματική και συστατική τους συμπεριφορά είναι παρόμοια με τα συμβατικά στοιχεία κελύφους.

Για τα δεδομένα της παρούσας εργασίας το γεγονός ότι το πάχος του πυλώνα της ανεμογεννήτριας είναι πολύ μικρό πάχος σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις μας δίνει τη δυνατότητα να κάνουμε χρήση των στοιχείων κελύφους (shell elements).

Βαθμοί ελευθερίας

Οι βαθμοί ελευθερίας (dof) είναι οι βασικές μεταβλητές που υπολογίζονται κατά την ανάλυση. Οι μετατοπίσεις, οι περιστροφές και οι άλλοι βαθμοί ελευθερίας υπολογίζονται μόνο στους κόμβους του στοιχείου. Σε οποιοδήποτε άλλο σημείο του στοιχείου, οι μετατοπίσεις λαμβάνονται με παρεμβολή από τις κομβικές μετατοπίσεις.



Σχήμα 2.6: Βαθμοί ελευθερίας στοιχείου

Όπως φαίνεται και στην Σχήμα 2.6 σε κάθε κόμβο καθορίζονται πέντε βαθμοί ελευθερίας. Αυτοί αντιστοιχούν στις τρεις μεταφορικές μετατοπίσεις και στις δυο στροφές του κάθετου στη διεπιφάνεια του κελύφους στη θέση του αντίστοιχου κόμβου. Ο καθορισμός ανεξάρτητων στροφικών και μεταφορικών βαθμών ελευθερίας επιτρέπει να ληφθεί υπόψη και η εγκάρσια διατμητική παραμόρφωση και ισοδυναμεί με τη θεώρηση μιας γενικής θεωρίας κελυφών ανάλογη με εκείνη της θεωρίας Mindlin των πλακών.

Μειωμένη ολοκλήρωση (Reduced integration)

Οι προσομοιώσεις του πυλώνα και των λοιπών μερών, πραγματοποιήθηκαν με στοιχεία τετρακομβικά S4, διπλής καμπυλότητας γενικής χρήσης, παρόλα αυτά αξίζει να γίνει ανάφορά και στα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης.

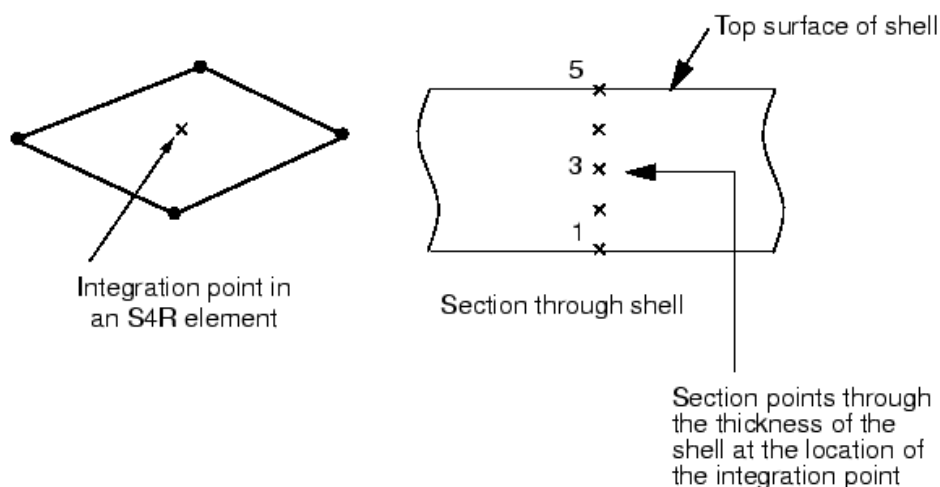
Τα στοιχεία S4R έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τα στοιχεία S4, δηλαδή τη μεγάλη τους ευελιξία στη χρήση καθώς και της δυνατότητας τους για μοντελοποίηση τόσο plane stress όσο και plane strain elements. Το γράμμα "R" που χρησιμοποιείται στο τέλος του ονόματος στοιχείων δηλώνει τα στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης (reduced integration). Η μοναδική διαφορά που παρουσιάζουν αυτά τα στοιχεία, έγκειται στα σημεία ολοκλήρωσης. Το S4R χρησιμοποιεί μόνο ένα σημείο ολοκλήρωσης σε αντίθεση με τα 4 σημεία των στοιχείων του S4 και συνεπώς είναι πιο οικονομικά. Είναι σαφές όμως ότι, όσο περισσότερες συντεταγμένες Gauss έχουμε για κάθε στοιχείο, τόσο πιο ακριβής θα είναι τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Πιο συγκεκριμένα, οι περισσότεροι κώδικες πεπερασμένων στοιχείων (FE) βρίσκουν μια λύση με τον υπολογισμό του μητρώου ακαμψίας στοιχείων και κατόπιν με την αναστροφή του για την επίλυση των μετατοπίσεων στο στοιχείο. Για περίπλοκα προβλήματα πεπερασμένων στοιχείων, χρησιμοποιώντας στοιχεία υψηλής τάξης, καθίσταται αναγκαία η χρήση αριθμητικής ολοκλήρωσης για τον υπολογισμό του μητρώου ακαμψίας σε κάθε σημείο διατομής μέσω του πάχους του κελύφους, επιτρέποντας έτσι τη συμπεριφορά μη γραμμικού υλικού.

Οι διατυπώσεις πεπερασμένων στοιχείων που βασίζονται σε επιβολή μετακινήσεων, πάντα υπερεκτιμούν το μητρώο ακαμψίας και η χρήση λιγότερων σημείων ολοκλήρωσης πρέπει να παράγει ένα λιγότερο άκαμπτο στοιχείο. Επομένως, σε ορισμένες περιπτώσεις, ιδιαίτερα μη γραμμικά προβλήματα, όπως πλαστικότητα, ερπυσμός ή ασυμπίεστα υλικά, είναι σκόπιμο να

χρησιμοποιηθεί μειωμένη ολοκλήρωση αντί για πλήρη ολοκλήρωση. Η ελαφρά απώλεια ακρίβειας αντισταθμίζεται από τη βελτίωση της προσέγγισης με την πραγματική συμπεριφορά. Πρέπει όμως να δίνεται προσοχή όταν χρησιμοποιείται μειωμένη ολοκλήρωση καθώς σε ορισμένες εφαρμογές μπορεί να προκύψει αστάθεια λόγω μηδενικού μητρώου ακαμψίας, αυτό άλλωστε είναι γνωστό ως λειτουργία hour glass.

Η διαμόρφωση των σημείων διατομής μέσω του πάχους του κελύφους φαίνονται στο Σχήμα 2.7 που ακολουθεί.



Σχήμα 2.7. Απεικόνιση σημείου/ων ολοκλήρωσης

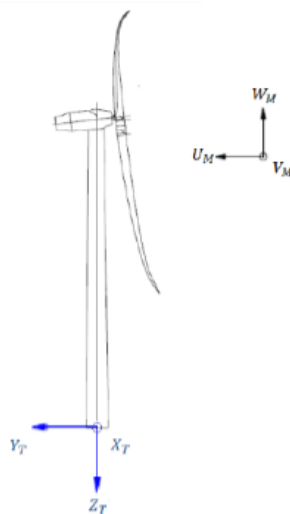
Προεπιλεγμένα σημεία εξαγωγής πληροφορίας

Στο Abaqus/Standard τα προεπιλεγμένα σημεία εξόδου μέσω του πάχους ενός τμήματος κελύφους είναι τα σημεία που βρίσκονται στην κάτω και πάνω επιφάνεια του τμήματος του κελύφους (για ενσωμάτωση με τον κανόνα του Simpson) ή τα σημεία που είναι πιο κοντά στην κάτω και στην κορυφή επιφάνειες (για το τετράγωνο του Gauss). Για παράδειγμα, εάν χρησιμοποιούνται πέντε σημεία ολοκλήρωσης μέσω ενός κελύφους, θα παρέχεται έξοδος για τα σημεία τομών 1 (κάτω) και 5 (επάνω) [9].

3 Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας ελέγχου

3.1 Γενικά στοιχεία

Για τους ελέγχους που αποτελούν αντικείμενο αυτής της μελέτης έγινε χρήση δεδομένης γεωμετρίας, υλικών και φορτίων της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας αναφοράς 5MW. Η πλασματική ανεμογεννήτρια αναφοράς σχεδιάστηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (5MW-NREL) [10]. Τα φορτία που θεωρήθηκαν για την εντατική κατάσταση της κατασκευής, προήλθαν από σχετική μελέτη του τμήματος Υπεράκτιας μηχανικής του Πανεπιστημίου Ντελφτ της Ολλανδίας (Offshore Engineering -TU Delft) σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο Επιστημών και Τεχνολογίας της Νορβηγίας (NTNU). Αυτό συνέβη για το λόγο ότι η εξαγωγή των αποτελεσμάτων από προσομοιώσεις για την εύρεση των φορτίων σχεδιασμού και με τα εργαλεία που απαιτούνται για το σκοπό αυτό, αποτελεί από μόνη της μια ολόκληρη μελέτη και δεν αποτελεί στόχο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Ο υπολογισμός και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων της φόρτισης έγινε με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου HAWC2. Πρόκειται για έναν κώδικα που προορίζεται καθαρά για τον υπολογισμό της απόκρισης των ανεμογεννητριών με χρονικά δεδομένα. Ενδεικτικό μοντέλο με το σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιείται για τη προσομοίωση στο εν λόγω πρόγραμμα φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

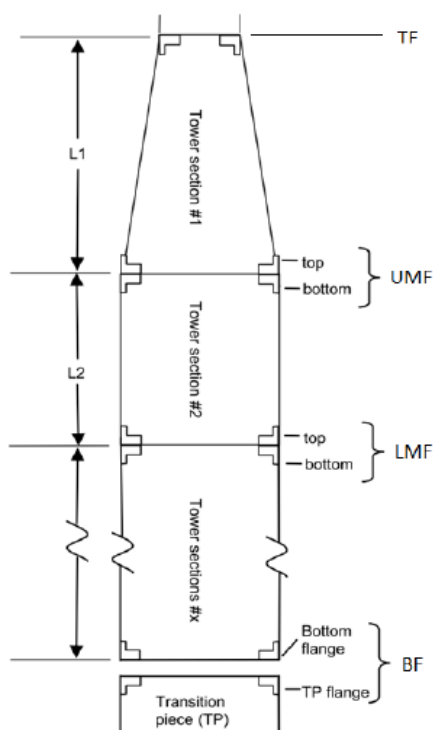


Σχήμα 3.1 : Ενδεικτικό μοντέλο

Η ανεμογεννήτρια, που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των φορτίων στις περιοχές φλάντζας, βρίσκεται στη Βόρεια Ολλανδική Θάλασσα 70 χλμ βορειοδυτικά του Den Helder). Τα περιβαλλοντικά δεδομένα ανακτώνται από αυτήν τη θέση.

Η κατασκευή στήριξης είναι σε αυτήν την περίπτωση μονοπάσσαλος (monopile). Στην ανάλυση HAWC2 το μεταβατικό κομμάτι (transition piece) που περιγράφηκε στο Κεφ. 2 αλλά φαίνεται και στο Σχήμα 3.2 θεωρείται μέρος του monopile. Για να δημιουργηθεί ένα ρεαλιστικό μοντέλο για τις προσομοιώσεις HAWC2, πρέπει να καθοριστεί το λεγόμενο επίπεδο διασύνδεσης (interface level). Το ύψος της διασύνδεσης αυτής μετράται από την απόσταση της μέσης στάθμης της θάλασσας έως την κορυφή του τμήματος μετάβασης (transition piece). Μετά τον υπολογισμό αυτού του τμήματος, μπορεί να προσδιοριστεί το ύψος της πλήμνης (υποθέτοντας ένα σταθερό ύψος πύργου, σύμφωνα με τις προδιαγραφές 5MW NREL). Το ύψος του κάθε τμήματος μετρούμενο από την μέση στάθμη θάλασσας (MSL) ως φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

Ο πυλώνας της ανεμογεννήτριας αναφοράς φαίνεται να μοιάζει ως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2. Το τμήμα πύργου 1 συνδέεται με το RNA με τη χρήση της σύνδεσης άνω φλάντζας (TF). Τα τμήματα των πύργων συνδέονται μεταξύ τους με τη χρήση της σύνδεσης άνω και κάτω μεσαίας φλάντζας (UMF και LMF, αντίστοιχα) και η κάτω σύνδεση φλάντζας (BF) συνδέει τον πύργο με το μεταβατικό κομμάτι.

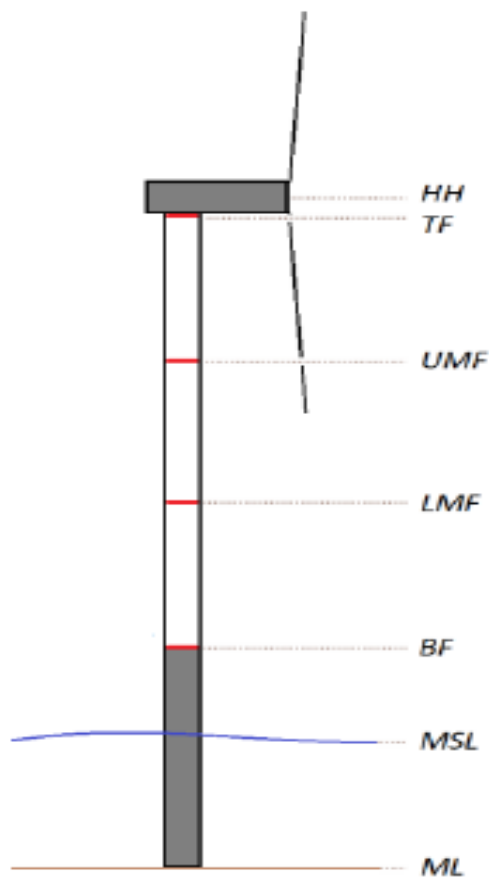


Σχήμα 3.2 : Τμήματα του πύργου με τις αντίστοιχες φλάντζες σύνδεσής τους. [11]

Οι διαφορετικές θέσεις φλάντζας απεικονίζονται αριθμητικά στο Πίνακα 3.1 αλλά και στο Σχήμα 3.3.

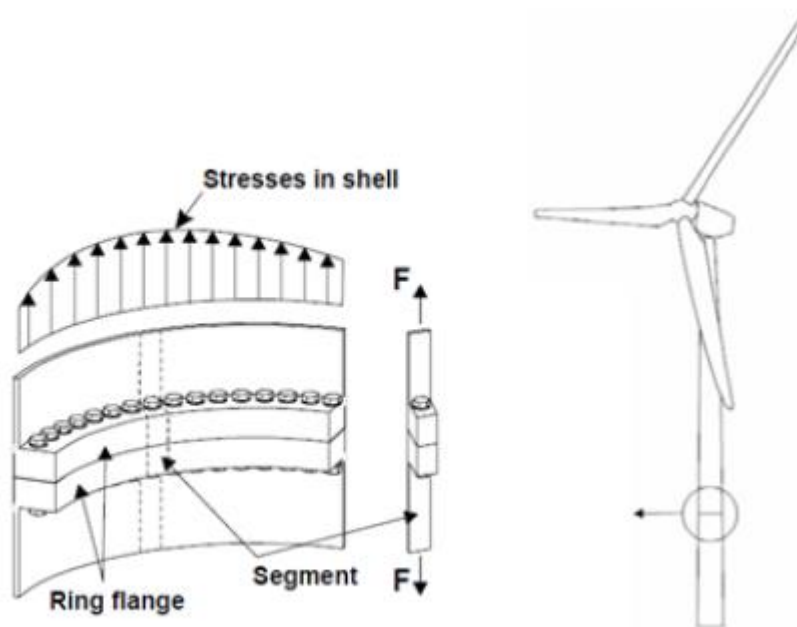
Πίνακας 3.1 : Θέσεις συνδέσεων

Abbreviation	Level	Relative height [m]
HH	Hub height	107.5
TF	Top flange	105
UMF	Upper middle flange	77
LMF	Lower middle flange	47
BF	Bottom flange	17.3
MSL	Mean sea level	0
ML	Mudline	-25



Σχήμα 3.3 :Όψη ανεμογεννήτριας με τις θέσεις των φλαντζών σύνδεσης.

Για την διαμόρφωση των συνδέσεων τοποθετούνται εγκάρσια στην κατακόρυφη διεύθυνση ελάσματα στα άκρα κάθε τμήματος και η σύνδεση μεταξύ τους πραγματοποιείται με προεντεταμένους κοχλίες, όπως τυπικά φαίνεται στο Σχήμα 3.4.. Παρόλα αυτά, οι προσομοιώσεις των συνδέσεων δύναται να απλοποιηθούν ορίζοντας απλώς τις συνοριακές συνθήκες όπως θα εξηγηθεί παρακάτω.



Σχήμα 3.4 : Φλάντζες συγκολλημένες στα άκρα του κελύφους του πύργου .

3.1.1 Υπολογισμοί ονομαστικής πίεσης

Με τη χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης όπως το HAWC2 οι ροπές και οι δυνάμεις σε μια συγκεκριμένη θέση στον πύργο μπορούν να προσομοιωθούν. Με τις ακόλουθες βασικές μηχανικές εξισώσεις αυτές οι ροπές και δυνάμεις μπορούν να αναχθούν σε δυνάμεις κελύφους πυλώνα.

$$F_{sh} = \frac{M}{W_{sh}} A_{sh} - F_{z.mass} \quad (3.1)$$

Η ροπή αντίστασης W μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$W = I/c \quad (3.2)$$

το I αντιπροσωπεύει τη ροπή της αδράνειας και είναι η κάθετη απόσταση από τον ουδέτερο άξονα έως το εξωτερικό κέλυφος.

Ο συντελεστής διατομής του κελύφους μπορεί τώρα να γραφτεί με χρήση της εξωτερικής διαμέτρου του κελύφους και του πάχους του κελύφους:

$$W_{sh} = \pi \cdot \frac{(d_{out})^4 - (d_{out} - 2 \cdot t_{sh})^4}{32 \cdot d_{out}} \quad (3.3)$$

Και το εμβαδόν του κελύφους είναι :

$$A_{sh} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \frac{(d_{sh})^2 - (d_{out} - 2 \cdot t_{sh})^2}{2} \quad (3.4)$$

Όπου $F_{z,mass}$ είναι το συνολικό βάρος πάνω από την θεωρούμενη στάθμη κελύφους.

3.1.2 Γεωμετρία φορέα ελέγχου

Πρόκειται για πυλώνα συνολικού ύψους σχεδόν 90 m με μεταβαλλόμενη διάμετρο που στη βάση είναι 6,00 μέτρα και στην κορυφή καταλήγει στα 4,00 m και πάχος τοιχωμάτων που στη βάση είναι 35 mm και στη κορυφή 25 mm, όπως αναφέρεται και κάτωθι.

Πίνακας 3.2 : Χαρακτηριστικά κελύφους [11].

Παράμετροι		BF	LMF	UMF	TF
Απόσταση από την κορυφή [m]	z_{top}	87	57	27	0
Εξωτερική διάμετρος κελύφους [m]	d_{out}	6.0	5.2	4.6	4.0
Πάχος κελύφους [mm]	t_{sh}	35	32	28	25

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά της 5MW-NREL [11].

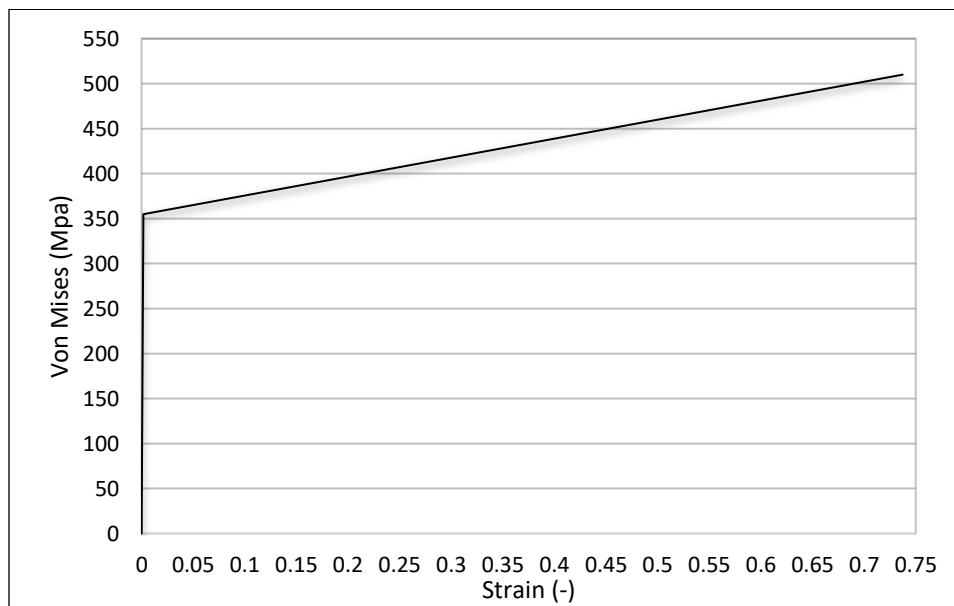
Ρότορας	
Διάμετρος	126 m
Περιοχή λειτουργίας (Swept area)	12469 m ²
Cut-in, Ονομαστική ταχύτητα ρότορα	6.9 -12.1 rpm
Αριθμός πτερυγίων	3
Ρύθμιση ισχύος	Μεταβλητή ταχύτητα, Pitch
Ονομαστική ταχύτητα αιχμής	80 m/s
Πύργος	
Ύψος πλήμνης (Hub height)	90 m
Βάση-Κορυφή διάμετρος	6.00 - 3.87 m
Βάση-Κορυφή πάχος τοιχώματος	35 - 25 mm
Σχήμα	Κωνικό
Μάζα	
Nacelle-Rotor	350 t

3.1.3 Υλικό

Σύμφωνα με το πρότυπο σχεδιασμού DNV J101, οι υπεράκτιες κατασκευές πάνω από τη χαμηλότερη στάθμη νερού πρέπει να σχεδιάζονται με θερμοκρασίες λειτουργίας ίσες με τη χαμηλότερη μέση ημερήσια θερμοκρασία για την περιοχή όπου πρόκειται να λειτουργήσει η μονάδα.

Το υλικό κατασκευής του πυλώνα είναι χάλυβας ποιότητας S355. Οι ιδιότητες του υλικού λαμβάνονται όπως προτείνονται από το πρότυπο πιστοποίησης EN 10025. Από τον EN1993/1.1/3.2.6 λήφθηκε μέτρο ελαστικότητας $E = 210 \text{ GPa}$ και $\nu = 0.3$, ενώ πυκνότητα χάλυβα $\rho = 7.85 \text{ Mg/m}^3$.

Λήφθηκε επίσης υπόψη κράτυνση του χάλυβα. Για τον μετελαστικό κλάδο με κράτυνση, θεωρήθηκε η κλίση να ισούται με το ένα χιλιοστό του μέτρου Ελαστικότητας, $E_2 = E_1/1000$. Η αντίστοιχη τάση αστοχίας λαμβάνεται 510 MPa και κατά τα γνωστά υπολογίζεται και η ανηγμένη παραμόρφωση ίση με $\epsilon_2 = 0.73736$. Γίνεται αντιληπτό ότι η τιμή αυτή της παραμόρφωσης είναι ένα μέγεθος στο οποίο δε θα φτάσουμε ποτέ. Για λόγους όμως απόδοσης του υλικού στο πρόγραμμα Abaqus, εισάγεται η καμπύλη με ζεύγη συντεταγμένων τάσης – ανηγμένης πλαστικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 3.5 : Νόμος του υλικού

Πίνακας 3.4: Τάση διαρροής δομικού χάλυβα

Designation		Minimum yield strength R_{eH}^a MPa ^b								
		Nominal thickness mm								
		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	> 250 ≤ 400 ^c
According EN 10027-1 and CR 10260	According EN 10027-2									
S235JR	1.0038	235	225	215	215	215	195	185	175	-
S235J0	1.0114	235	225	215	215	215	195	185	175	-
S235J2	1.0117	235	225	215	215	215	195	185	175	165
S275JR	1.0044	275	265	255	245	235	225	215	205	-
S275J0	1.0143	275	265	255	245	235	225	215	205	-
S275J2	1.0145	275	265	255	245	235	225	215	205	195
S355JR	1.0045	355	345	335	325	315	295	285	275	-
S355J0	1.0553	355	345	335	325	315	295	285	275	-
S355J2	1.0577	355	345	335	325	315	295	285	275	265
S355K2	1.0596	355	345	335	325	315	295	285	275	265
S450J0 ^d	1.0590	450	430	410	390	380	380	-	-	-

3.1.4 Συντελεστές ασφαλείας υλικών

Οι συντελεστές ασφαλείας υλικών λαμβάνουν υπόψη την επιρροή που έχει ο τύπος, η επεξεργασία και η γεωμετρία του υλικού, όπως και η διαδικασία παραγωγής του στην τελική αντοχή. Η αντοχή σχεδιασμού λαμβάνεται σύμφωνα με την σχέση:

$$R_d = R_k / \gamma_M \quad (3.5)$$

όπου:

R_d τιμή αντίστασης σχεδιασμού

γ_M μερικός συντελεστής ασφαλείας υλικού

R_k χαρακτηριστική τιμή αντίστασης

Πίνακας 3.5: Συντελεστές ασφαλείας ΟΚΑ

Τύπος συντελεστή ασφαλείας	Τιμή συντελεστή
γ_{M0}	1.00
γ_{M1}	1.10
γ_{M2}	1.25

3.2 Φορτίσεις

3.2.1 Φόρτιση ΟΚΑ (ULS)

Για σκοπούς σχεδιασμού, η διάρκεια ζωής μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας μπορεί να αντιπροσωπεύεται από ένα σύνολο καταστάσεων σχεδιασμού που καλύπτουν τις πιο σημαντικές συνθήκες που μπορεί να αντιμετωπίσει μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της ανεμογεννήτριας στο HAWC2 θα καθοριστεί η φόρτιση στο επίπεδο των φλατζών.

Σε αυτήν την μελέτη θα εξεταστούν η απόκριση της κατασκευής στην περίπτωση φόρτισης "Παραγωγή ισχύος με ακραίο στροβιλισμό (Power Production with Extreme Turbulence - **ETM**)" που σύμφωνα με την οδηγία IEC 61400-3 [12] αναφέρεται στην περίπτωση φόρτισης DLC 1.3.

Παρότι υπάρχει το ενδεχόμενο να υπάρχουν και άλλες περιπτώσεις φόρτισης που να δώσουν υψηλότερα φορτία σε οριακή κατάσταση αστοχίας (π.χ απενεργοποίηση/παύση έκτακτης ανάγκης και συνθήκες βλάβης), αυτή η φορτική κατάσταση έχει πολύ καλή δυνατότητα να δώσει τα υψηλότερα φορτία από όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

Το HAWC2 μπορεί να υπολογίσει τις ροπές γύρω από τους άξονες και τις δυνάμεις κατά μήκος του άξονα σε καθορισμένες θέσεις στη δομή. Στις ακόλουθες αναλύσεις οι ροπές δεν υπολογίζονται σε ένα συγκεκριμένο σημείο στην περιφέρεια του πύργου, αλλά για απλότητα υπολογίζονται ως:

$$M_{tot} = \max(\sqrt{M_x^2 + M_y^2}) \quad (3.6)$$

3.2.1.1 Περίπτωση φόρτισης 1.3 (ULS, DLC)

Η περίπτωση φόρτισης καθορίζεται από τις συνθήκες που περιγράφονται στον Πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6 : Συνθήκες φόρτισης για DLC 1.3

Συνθήκες λειτουργίας	Παραγωγή ενέργειας
Συνθήκες ανέμου	Ένταση αναταραχής (TI) σύμφωνα με το Μοντέλο Extreme Turbulence (ETM)
Συνθήκες θάλασσας	Κανονική κατάσταση θάλασσας, Κανονικό τρέχον μοντέλο, Μέσο επίπεδο θάλασσας
Κατεύθυνση ανέμου και κύματος	Codirectional (ίδια κατεύθυνση), Μονοκατευθυντικός (κατεύθυνση κύματος και ανέμου δεν αλλάζουν στο χρόνο)

3.3.1.1 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων εμφανίζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 3.7 : Αποτελέσματα DLC 1.3 από HAWC2 [11].

DLC	M_{BF} [MNm]	M_{LMF} [MNm]	M_{UMF} [MNm]	M_{TF} [MN m]		F_{BF} [MN]	F_{LMF} [MN]	F_{UMF} [MN]	F_{TF} [MN]
1.3	84.5	56.1	28.9	10.4		50.6	38	21.8	7.5

Από τον Πίνακα 3.7 μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι ροπές στον πύργο στην κάτω φλάντζα είναι οι υψηλότερες. Αυτό είναι λογικό, καθώς ο μοχλοβραχίονας της ροπής είναι ο μεγαλύτερος σε αυτό το σημείο. Μαζί με τις ροπές, οι δυνάμεις στο κέλυφος του πύργου (Εξίσωση 3.1) είναι οι υψηλότερες στο κάτω μέρος. Αυτό σημαίνει ότι η κάτω φλάντζα πρέπει να μπορεί να αντιστέκεται στα υψηλότερα φορτία.

Η φόρτιση λοιπόν και η "αναλογία" ανάμεσα στις συνιστώσες της, τηρήθηκε στην εφαρμογή τους σε κάθε προσομοίωση που ακολουθεί και αποσπασματικά φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 3.8.

Πίνακας 3.8 : Τελικά Εντατικά Φορτία

F_v (MN)	F_H (MN)	M (MNm)
0,946	38,0	56,1

4 Προσομοιώματα

4.1 Προσομοιώματα φορέα

Τα προσομοιώματα μιας κατασκευής και των συστατικών μερών της, αποτελούν τους πιο σημαντικούς παράγοντες που θα καθορίσουν την αξιοπιστία της μελέτης και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Από την επιλογή του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων, την επιλογή των κατάλληλων στοιχείων και χαρακτηριστικών αλλά τις συνοριακές συνθήκες, αποτελούν όλα κρίσιμες παραμέτρους για την απόδοση του προσομοιώματος όσο πιο κοντά γίνεται στη πραγματική του κατάσταση. Για την διερεύνηση της επιρροής στην αντοχή της ανεμογεννήτριας, της ύπαρξης ανοίγματος δημιουργήθηκαν ξεχωριστά προσομοιώματα, α) του συμπαγούς κελύφους, β) του κελύφους με άνοιγμα καθώς και γ) με ενισχυμένο άνοιγμα από περιμετρικό πλαίσιο.

4.1.1 Προσομοίωση κελύφους ανεμογεννήτριας

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η κατασκευή αποτελείται από επιμέρους τμήματα που συνδέονται μεταξύ τους με προεντεταμένους κοχλίες και το κάθε ένα αποτελείται με την σειρά του από περισσότερα μέρη με εναλλαγή παχών συγκολλημένα μεταξύ τους.

Για τον έλεγχο της ανεμογεννήτριας επιλέχθηκε να προσομοιωθεί ένα τμήμα 30 μέτρων δηλαδή το κατώτερο τμήμα του κυλινδρικού κελύφους που μεσολαβεί από τη κατώτατη ως τη μεσαία φλάντζα σύνδεσης της ανεμογεννήτριας. Η διάμετρος του τμήματος αυτού, μεταβάλλεται από 6 m στη βάση του καταλήγοντας στη κορυφή στα 5,2 m. Το πάχος της διατομής του κελύφους παρότι επίσης μειώνεται σταδιακά, στη παρούσα μελέτη λήφθηκε σταθερό και θεωρήθηκε ο μέσος όρος των παχών των αντίστοιχων τοιχωμάτων και ίσο με 33.5 mm. Το πρόβλημα επιλύθηκε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, Abaqus. Στην ακραία επιφάνεια της βάσης έγινε χρήση στοιχείων άπειρης δυσκαμψίας (rigid links) και η απόδοση των συνοριακών συνθηκών επιβλήθηκε μέσω του σημείου αναφοράς, δεσμεύοντας όλους τους β.ε στο γεωμετρικό κέντρο της επιφάνειας. Ομοίως και στη κορυφή του πυλώνα όπου αντίστοιχα εισήχθησαν στο κέντρικό σημείο αναφοράς οι δυνάμεις ως συγκεντρωμένες.

4.1.1.1 Μελέτη σύγκλισης και ανεξαρτησίας πλέγματος

Αρχικά πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση ευαισθησίας για την εύρεση του κατάλληλου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Στη μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων, ένα λεπτότερο πλέγμα καταλήγει συνήθως σε πιο ακριβή λύση. Ωστόσο, καθώς ένα πλέγμα γίνεται πιο λεπτό, ο χρόνος υπολογισμού αυξάνεται. Η βέλτιστη λύση προφανώς παρέχεται από ένα πλέγμα που εξισορροπεί ικανοποιητικά την ακρίβεια και τους υπολογιστικούς πόρους. Για τον σκοπό αυτό τίθενται απαραίτητη η μελέτη σύγκλισης πλέγματος.

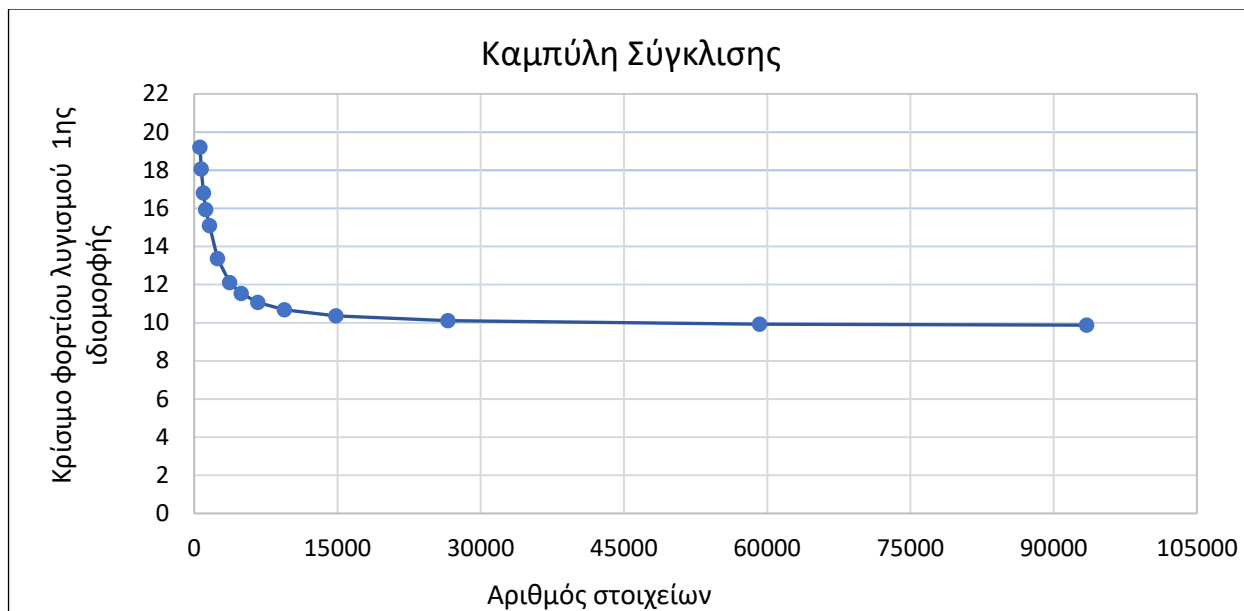
Η μελέτη σύγκλισης πλέγματος πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας πλέγματα $n \times n$ (όπου $n = 0.1, 0.2, 0.3, \dots, m$) με στοιχεία κελύφους, και εφαρμόζοντας σταθερές συνοριακές συνθήκες και δεδομένη εντατική κατάσταση του φορέα. Τουλάχιστον τρεις διαδρομές σύγκλισης απαιτούνται για τον σχεδιασμό μιας καμπύλης η οποία δηλώνει πότε επιτυγχάνεται σύγκλιση ή, πόσο μακριά είναι το πιο εκλεπτυσμένο πλέγμα από την πλήρη σύγκλιση.

Η σύγκλιση καθορίζει πόσα στοιχεία απαιτούνται σε ένα μοντέλο για να διασφαλιστεί ότι τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης δεν επηρεάζονται από την αλλαγή του μεγέθους του πλέγματος.

Μεταβάλλοντας τον αριθμό των στοιχείων κατά μήκος κάθε άκρου, αναπτύσσεται ο Πίνακας 4.1 μεγέθους πλέγματος έναντι του κρίσιμου φορτίου λυγισμού της 1ης ιδιομορφής. Λαμβάνεται έτσι το στοιχείο για το οποίο η απόκριση του συστήματος συγκλίνει σε μια λύση. Η τελειοποίηση (ελάχιστη μεταβολή) του πλέγματος με προσθήκη περισσότερων στοιχείων, δεν θα πρέπει απο και πέρα να επηρεάζει τα αποτελέσματα.

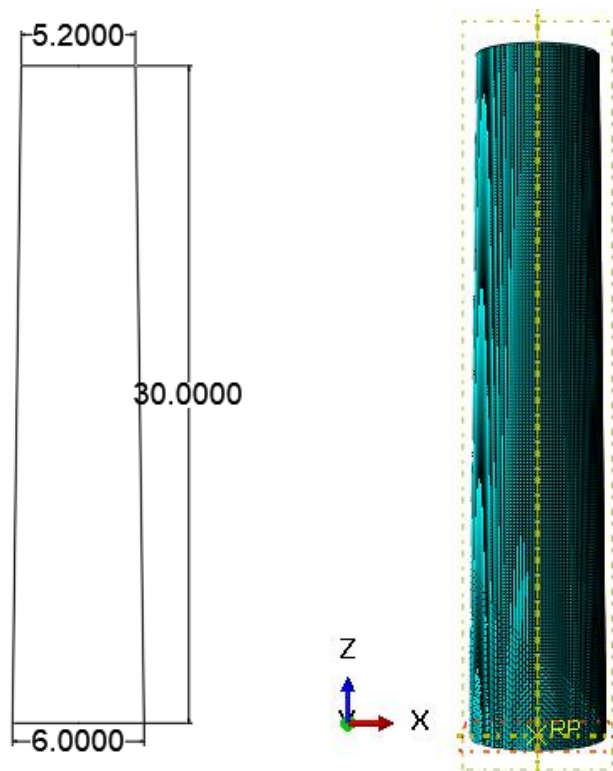
Πίνακας 4.1 : Πίνακας δοκιμασικών πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων

Χαρακτηριστικά Πλέγματος Πεπερασμένων στοιχείων	Περίπτωση		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Διαστάσεις πλευράς στοιχείου	Μήκος	0.08	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.5	0.6
		Πλάτος	0.08	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.5	0.6
Αριθμός στοιχείων		9.35E+04	59220	26586	14852	9450	6678	4914	3713	2432	1612	
Αποτελέσματα ΠΣ	Κρίσιμο Φορτίο Λυγισμού		9.8763	9.9293	10.106	10.358	10.69	11.063	11.53	12.108	13.36	15.09



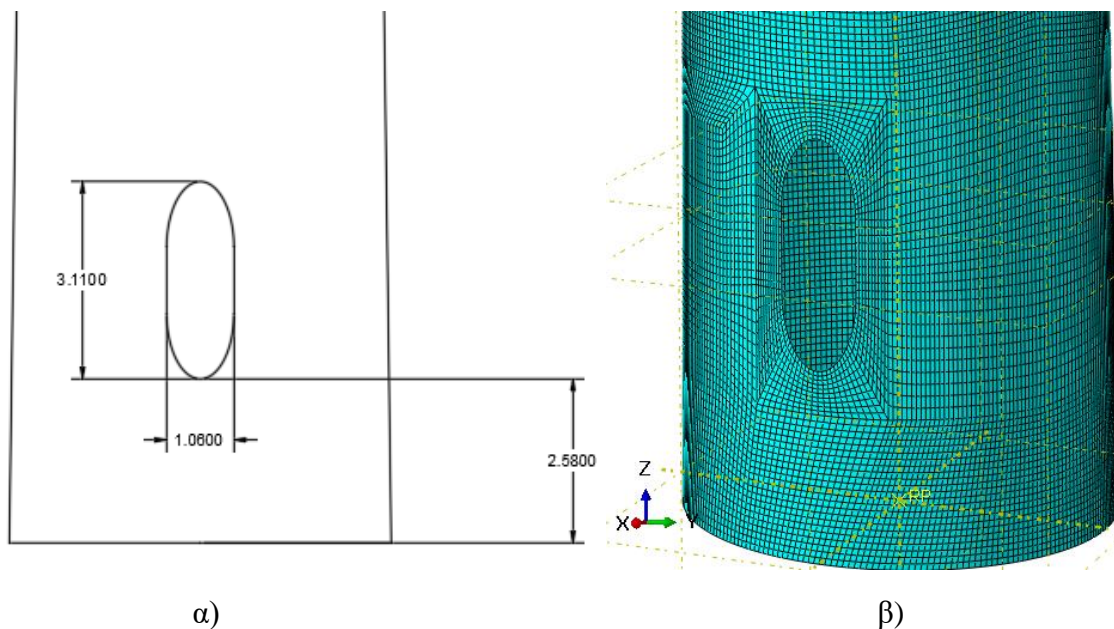
Σχήμα 4.1 : Καμπύλη σύγκλισης

Από την παραπάνω καμπύλη θεωρήθηκε ότι το σημείο που αντιστοιχεί σε πυκνώση πλέγματος 26586 στοιχείων, δηλαδή πλευράς 0.15 είναι επαρκές. Πέρα από την αποτύπωση της καμπύλης σύγκλισης, συγκρίνοντας και τα διαδοχικά αποτελέσματα μεταξύ τους βρέθηκε ποσοστό σύγκλισης κατά 97.56 %.



Σχήμα 4.2: Γεωμετρία ποσομοιώματος και διακριτοποιημένος φορέας, αντίστοιχα.

4.1.2 Πυλώνας με ύπαρξη ανοίγματος χωρίς ενίσχυση

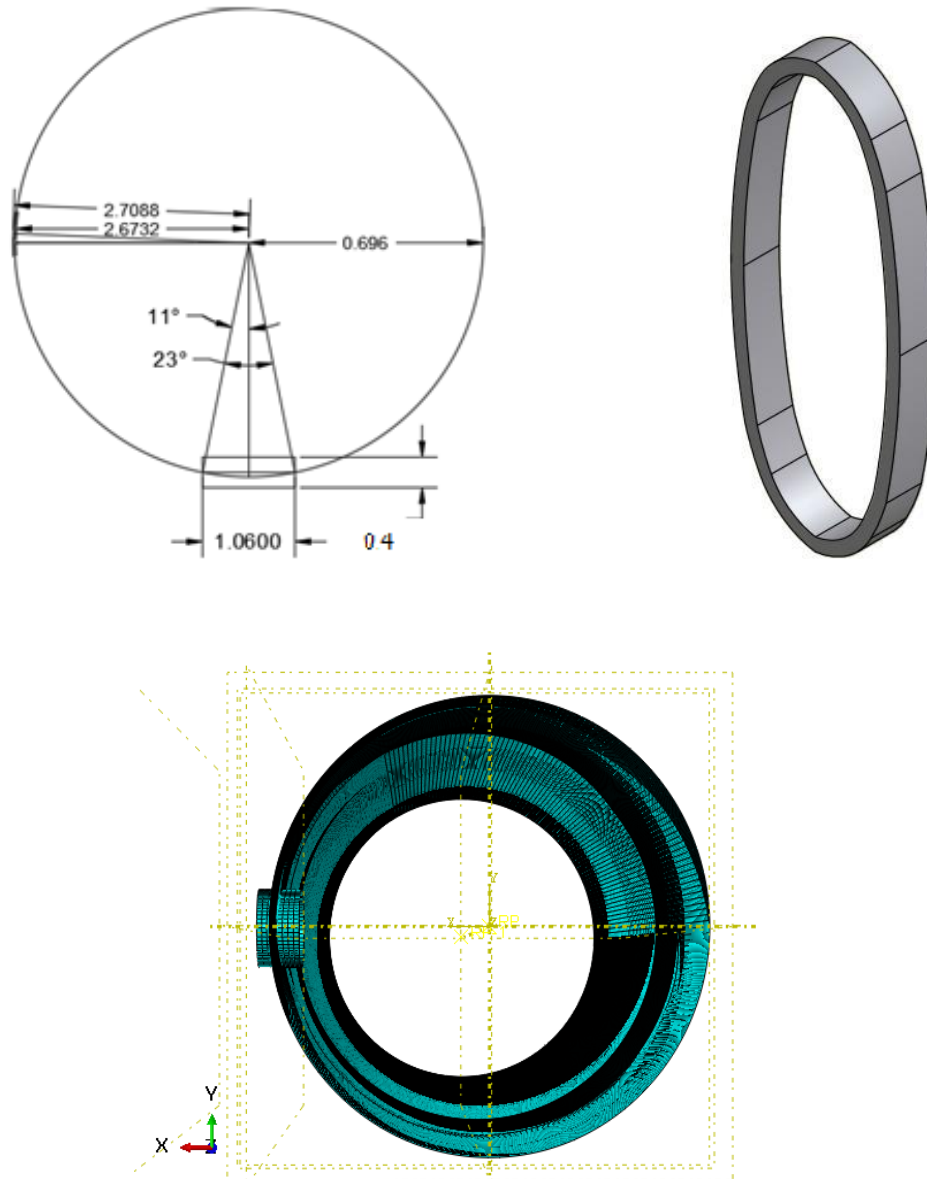


Σχήμα 4.3 : Γεωμετρία φορέα με άνοιγμα και διακριτοποίηση φορέα περιμετρικά του ανοίγματος

Οι διαστάσεις του ανοίγματος, όπως φαίνονται και στο Σχήμα 4.3 καθορίστηκαν για ύψος θυρίδας 3.110 m και πλάτος ανοίγματος 1.06 m. Η ανθρωποθυρίδα τοποθετήθηκε σε απόσταση 2.58 m, από τη βάση του πυλώνα. Η περαιτέρω πύκνωση του φορέα έγινε με επιλογή πύκνωσης των στοιχείων των αιχμών της ανθρωπθρίδας και του ορθογωνικού τμήματος περιμετρικά της, το οποίο "αποκόπηκε" και διακριτοποιήθηκε ξεχωριστά με το "χέρι", για διευκόλυνση της διαχείρισης της διακριτοποίησης.

4.1.3 Πυλώνας με ενίσχυμένο άνοιγμα

Την πιο απλή ενίσχυση αποτελεί το περιμετρικό πλαίσιο. Για την αρχική διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε πλαίσιο πλάτους 400 mm με πάχος 55 mm. Στην συνέχεια της μελέτης θα παρουσιαστούν αποτελέσματα, που προέκυψαν από πλαίσιο διαφόρων πλατών, διατηρώντας πάντα σταθερό πάχος. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η διατομή της ενίσχυσης, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά καθώς και σε κάτοψη η προσομοίωση του πυλώνα με το πέρασμα της, από τη μέση επιφάνεια του κελύφους.

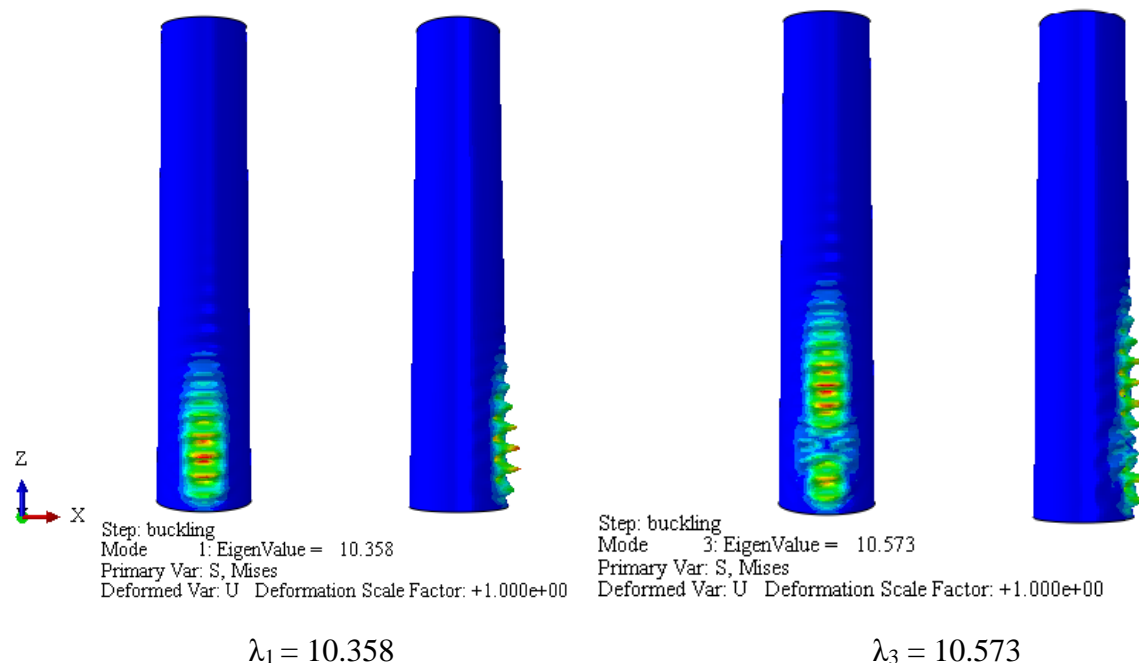


Σχήμα 4.4: Κάτοψη πυλώνα και διατομή ενισχυτικού περιμετρικού πλαισίου

4.2 Αποτελέσματα αναλύσεων γραμμικής ανάλυσης λυγισμού

4.2.1 Συμπαγής πυλώνας χωρίς άνοιγμα

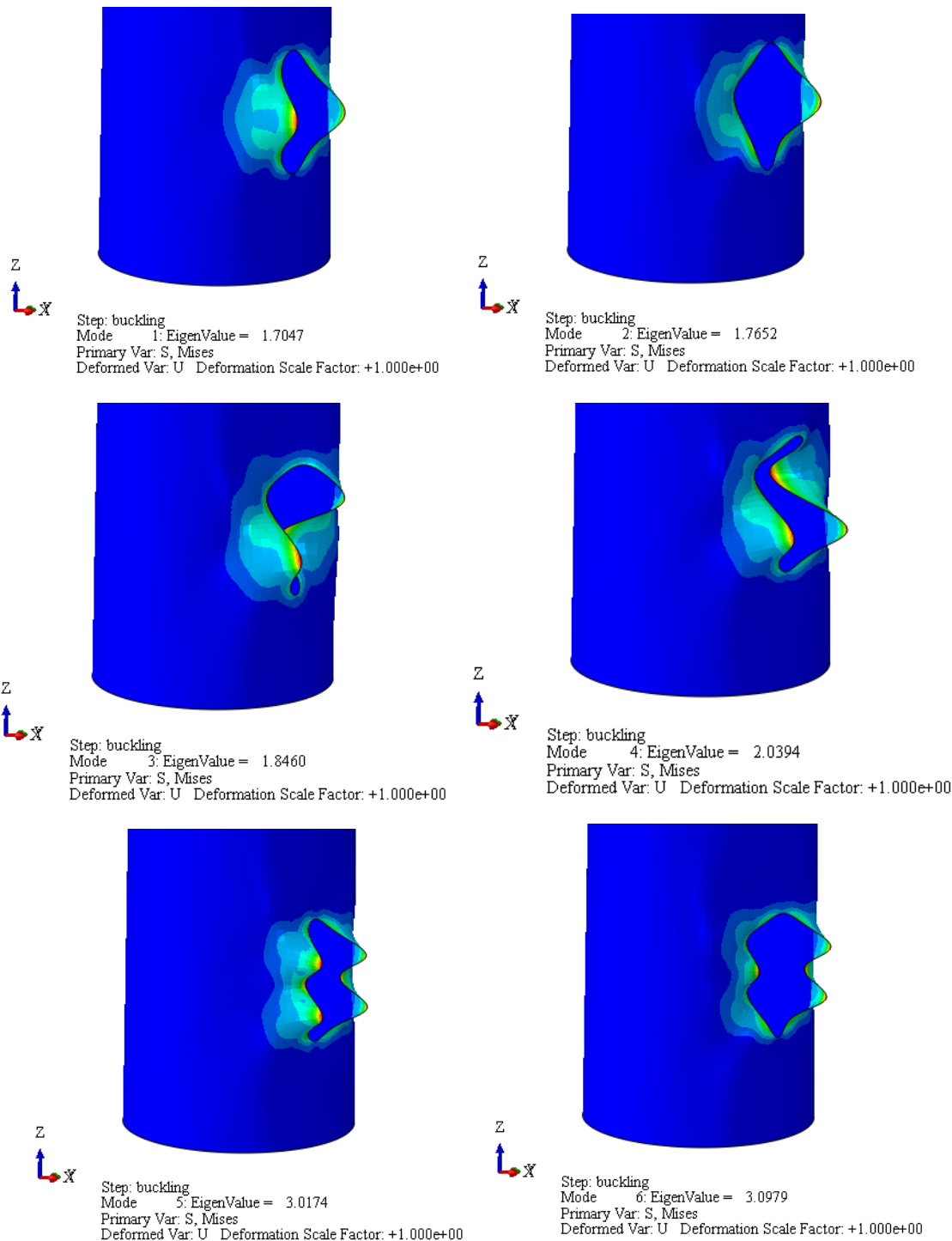
Όπως αναφέρθηκε και πριν, η σύγκριση για τα αποτελέσματα της σύγκλισης του πλέγματος πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση των κρίσιμων φορτίων της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού. Η γραμμική ανάλυση λυγισμού δεν δίνει πληροφορίες για τη συμπεριφορά του φορέα μετά το λυγισμό, και χρησιμοποιείται για μια αρχική εκτίμηση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού αλλά και για τη παραγωγή των ιδιομορφών, δηλαδή του παραμορφωμένου σχήματος του φορέα εάν αυτός λυγίσει με το αντίστοιχο κρίσιμο φορτίο. Οι ιδιομορφές λυγισμού θα χρησιμοποιηθούν αργότερα για την εισαγωγή αρχικών ατελειών σύμφωνα με το σχήμα τους. Διερεύνηση της πιο χαρακτηριστικής ιδιομορφής λυγισμού πραγματοποιήθηκε με σκοπό τον εντοπισμό εκείνης η οποία θα οδηγήσει στην μικρότερη αντοχή. Συνήθως γίνεται χρήση της πρώτης ιδιομορφής ως πιο χαρακτηριστική. Άλλες φορές προκύπτουν δυσμενέστερα αποτελέσματα από επαλληλία παραπάνω της μιας ιδιομορφής. Στην παρούσα μελέτη, η σύγκριση πραγματοποιήθηκε ανάμεσα στην 1^η και 3^η ιδιομορφή, οι μορφές των οποίων φαίνονται και στο ακόλουθο Σχήμα 4.5. Οι φορτιστικοί συντελεστές των κρίσιμων φορτίων λυγισμού συμβολίζονται με λ_i όπου i ο αριθμός της ιδιομορφής. Η επιλογή της ιδιομορφής για την οποία εισήχθησαν ατέλειες θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 4.5 : 1^η και 3^η ιδιομορφή λυγισμού

4.2.2 Πυλώνας με άνοιγμα χωρίς ενίσχυση

Αντίστοιχα γραμμικές αναλύσεις λυγισμού λήφθηκαν και για την περίπτωση της ύπαρξης οπής για ανθρωποθυρίδα κοτνά στη βάση του πύργου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πρώτες 6 ιδιομορφές.



Σχήμα 4.6 : Έξι πρώτες ιδιομορφές λυγισμού πυλώνα με ανθρωποθυρίδα.

4.2.3 Πυλώνας με απλή ενίσχυση περιμετρικού πλαισίου $w = 400 \text{ mm}$

Ενδεικτικά παρουσιάζονται και τρεις ιδιομορφές λυγισμού του φορέα με την ενίσχυση, παρότι όπως θα εξηγηθεί και στη συνέχεια, δεν θα χρησιμοποιηθούν για την εισαγωγή αρχικών ατελειών, όπως στα άλλα δυο προσομοιώματα.



Σχήμα 4.6 : 1^η , 2^η και 5^η Ιδιομορφή κελύφους με ενισχυτικό πλαίσιο πλάτους 400 m

5 Μη γραμμικές Αναλύσεις και Έλεγχοι φορέα

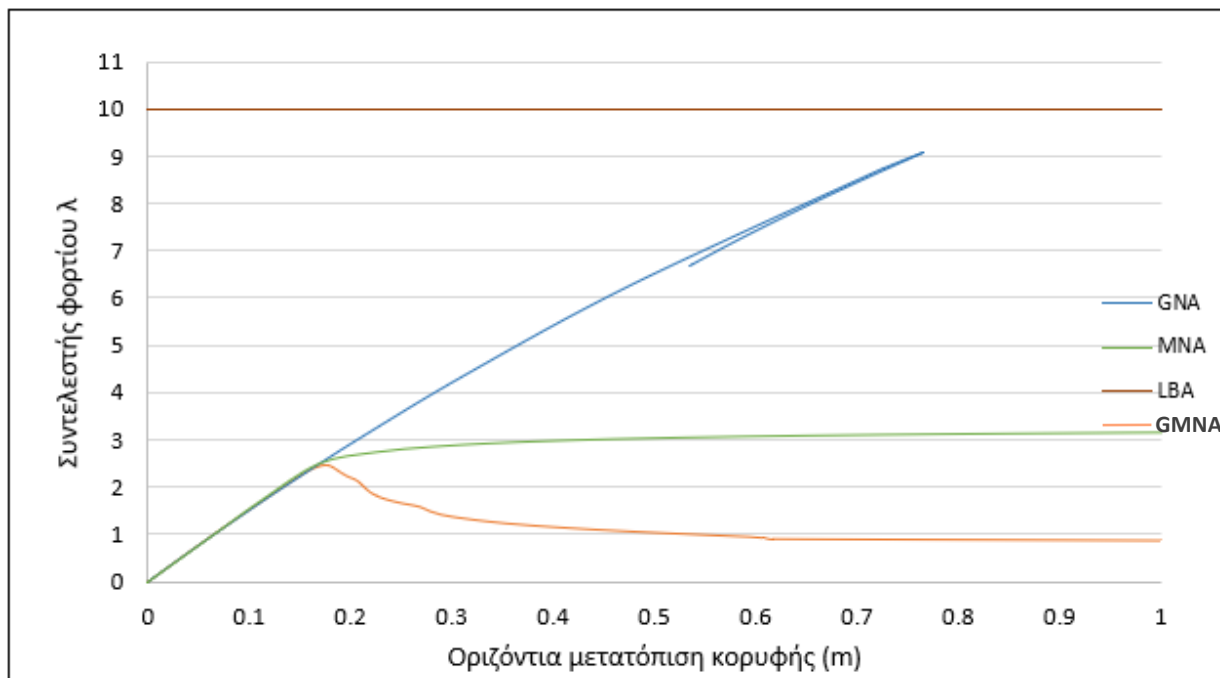
Ο έλεγχος ευστάθειας πραγματοποιείται για το καθορισμό της αντοχής του φορέα. Για το σκοπό αυτό διενεργήθηκε μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού. Τα φορτία εφαρμόστηκαν στην κατασκευή στην κορυφή του τμήματος των 30 μέτρων, δηλαδή στη στάθμη της μεσαίας φλάντζας. Στις αναλύσεις αυτές λήφθηκαν υπόψη και αρχικές ατέλειες. Ο καθορισμός του μεγέθους καθορίζεται από τον κανονισμό EN 1993-1-6, Παρ.2.8.3 και εφαρμόστηκαν και οι τρεις κατασκευαστικές κλάσεις, με τα αντίστοιχα μεγέθη. Για το σχήμα τους έπειτα από εκτίμηση των πιο χαρακτηριστικών σχημάτων των ιδιομορφών γραμμικής ανάλυσης, έγινε διερεύνηση ανάμεσα στη 1^η και 3^η ιδιομορφή με σκοπό τον εντοπισμό εκείνης η οποία θα οδηγήσει στην μικρότερη αντοχή.

5.1 Πυλώνας χωρίς άνοιγμα

5.1.1 Επιλογή μη γραμμικής ανάλυσης για τον έλεγχο της αντοχής

Με κριτήριο πάντα τα χαρακτηριστικά της κατασκευής που μελετάται και τις ιδιαιτερότητες της, θεωρήθηκε σκόπιμο να γίνει μια αρχική διερεύνηση όλων των μη γραμμικών αναλύσεων με σκοπό να φανεί ποια ανάλυση είναι η πιο αξιόπιστη και ακριβής. Στα πλαίσια λοιπόν της διερεύνησης αυτής πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις τόσο μη γραμμικότητας γεωμετρίας, υλικού και συνδυασμού των δυο.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι αναλύσεις με σκοπό τη σύγκριση τους στην απόδοση της αντοχής της κατασκευής. Επιλέχθηκε να χαραχθεί ο δρόμος ισορροπίας κάθε ανάλυσης που προκύπτει από τον φορτικό συντελεστή και την οριζόντια μετατόπιση στη κορυφή του τμήματος του κελύφους.



Σχήμα 5.1 : Δρόμος ισορροπίας για κάθε μη γραμμική ανάλυση

Για τη σύγκριση των μη γραμμικών αναλύσεων δεν επιλέχθηκε ο περιορισμός της μετακίνησης στο κόμβο ελέγχου παρόλα αυτά στη συνέχεια των αναλύσεων τέθηκε τέτοιο όριο στον ακραίο κόμβο στο 2% περίπου του συνολικού μήκους, επομένως η μέγιστη μετατόπιση που θα παρουσιάζεται φτάνει στη μέγιστη τιμή των 0,6 m.

Στην παρούσα μελέτη, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν αναλύσεις GMNA, για την εκτίμηση των φορτικών συντελεστών που δίνουν το οριακό φορτίο. Συμπληρωματικά βέβαια πραγματοποιήθηκαν και αναλύσεις που λαμβάνουν υπόψη και την ύπαρξη αρχικών ατελειών (GMNIA) κυρίως για το συμπαγή φορέα χωρίς την ύπαρξη θυρίδας. Αν και το υπολογιστικό κόστος ανάμεσα στις δυο αναλύσεις είναι σχεδόν το ίδιο, επομένως από πλευράς χρόνου προσομοίωσης δεν επωφελείται ο μελετητής, η εκτίμηση όμως των κατάλληλων ατελειών στη περιοχή της ανθρωποθυρίδας η οποία αποτελεί μια πιο περίπλοκη συνθήκη, καθιστά προτιμότερη τη χρήση της GMNA ανάλυσης για την περίπτωση της ύπαρξης θυρίδας με ή χωρίς ενίσχυση.

Επομένως έγινε εκτίμηση αρχικών ατελειών και διερεύνηση μεγέθους και σχήματος, για την περίπτωση μόνο του συμπαγούς φορέα και του φορέα με μη ενισχυμένο άνοιγμα, με σκοπό την διαπίστωση της ευαισθησίας του στην ύπαρξη τους τόσο ως προς το μέγεθος τους όσο και ως προς το σχήμα τους.

5.1.2 Πλαστικός Έλεγχος φορέα (LS1)

Πραγματοποιήθηκε ο πλαστικός έλεγχος για τον οποίο αναμέναμε τα αποτελέσματα του να είναι πιο συντηρητικά. Βάσει κανονισμών ο συγκεκριμένος έλεγχος δύναται να παραληφθεί εφόσον ικανοποιείται ο έλεγχος ευστάθειας. Παρόλα αυτά παρουσιάζεται παρακάτω.

Έλεγχος με καθολική αριθμητική ανάλυση μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας (GMNA).

Ο πλαστικός έλεγχος δύναται να πραγματοποιηθεί είτε με ανάλυση μη γραμμικότητας υλικού (MNA) είτε με μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας (GMNA). Στην περίπτωση μας έγινε ο έλεγχος με ανάλυση μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας GMNA.

Παρακάτω φαίνεται η χαρακτηριστική τιμή του φορτικού συντελεστή που υπολογίζεται από το πρόγραμμα και η μέγιστη τιμή της οποίας πολλαπλασιασμένη με τα εντατικά φορτία F_{Ed} που επιβλήθηκαν δίνει το οριακό φορτίο, είναι ίση με 0.246.

Επομένως σύμφωνα με τον έλεγχο:

$$F_{Rd} = \frac{F_{Rk}}{\gamma_{M0}} = \frac{\gamma_{Rk} F_{Ed}}{\gamma_{M0}} = \gamma_{Rd} F_{Ed} \quad (5.1)$$

Και έτσι προκύπτει ότι ο ζητούμενος έλεγχος ικανοποιείται όταν :

$$F_{Ed} \leq F_{Rd} = \gamma_{Rd} F_{Ed} \rightarrow \gamma_{Rd} \geq 1 \quad (5.2)$$

Στην περίπτωση μας η τιμή που λήφθηκε από το πρόγραμμα και είναι ίση με $\gamma_{Rk} = 2.461$,

$$\frac{\gamma_{Rk}}{\gamma_{M0}} = \frac{2.461}{1} \geq 1$$

Επομένως γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι ο έλεγχος ικανοποιείται με μεγάλο μάλιστα περιθώριο.

Αυτό σημαίνει ότι ο βαθμός εκμετάλλευσης της διατομής της ανεμογεννήτριας αναφοράς είναι αρκετά μικρός της τάξης του 42 %.

5.1.3 Υπολογισμός ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών

Το μέγεθος των εισαγόμενων ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών εξαρτάται από την κατασκευαστική κλάση της ανεμογεννήτριας και υπολογίζεται ως η μεγαλύτερη τιμή από τους συντελεστές $\Delta w_{0,eq,1}$ και $\Delta w_{0,eq,2}$, η οποία αναφέρεται στη μέγιστη απόκλιση οποιουδήποτε σημείου από την τέλεια γεωμετρία.

Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται οι προτεινόμενες τιμές βάσει EN 1993-1-6.

Πίνακας 2.12 : Προτεινόμενες τιμές U_{n1} , U_{n2}

Fabrication tolerance quality class	Description	Reccomended value of U_{n1}	Reccomended value of U_{n2}
Class A	Excellent	0.010	0.010
Class B	High	0.0160	0.0160
Class C	Normal	0.0250	0.0250

$$\Delta w_{0,eq,1} = I_g \cdot U_{n1} \quad (5.3)$$

$$\Delta w_{0,eq,2} = n_i \cdot t \cdot U_{n2} \quad (5.4)$$

όπου :

I_t είναι όλα τα σχετικά μήκη μετρήσεων

t είναι το τοπικό πάχος των τοιχωμάτων

U_{n1} , U_{n2} είναι πολλαπλασιαστές για την επίτευξη κατάλληλου επιπέδου κατασκευαστικής ανοχής.

Η τιμή n_i λαμβάνεται ως $n_i = 25$

Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται τα στοιχεία που υπολογίστηκαν εφαρμόζοντας τα χαρακτηριστικά της μελέτης, για την εισαγωγή ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών βάσει του σχήματος της 3^{ης} ιδιομορφής.

Πίνακας 5.1 : Ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες

	A (0.01)	B (0.016)	C (0.025)
$\Delta_{w0,eq,1}$	0,01268	0,02029	0,03170
$\Delta_{w0,eq,2}$	0,00837	0,0134	0,02093
MAX	0,01268	0,02029	0,03170

Με :

$$t = 0,0335 \text{ m}$$

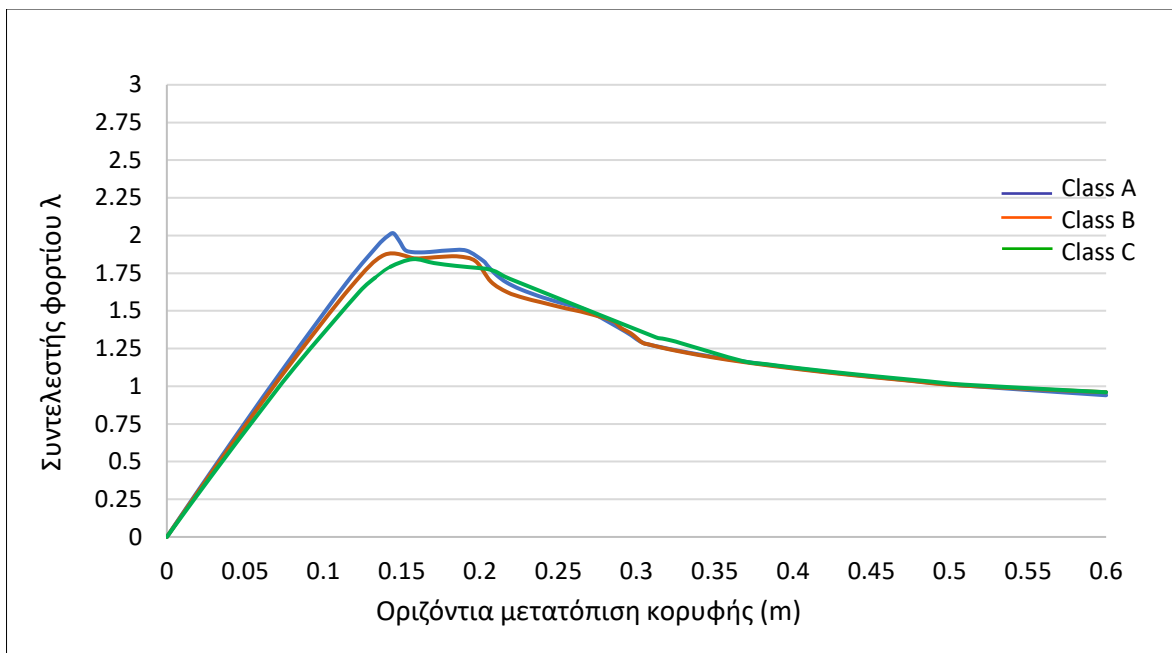
$$r = 3 \text{ m}$$

$$l_{gx} = 1,268069$$

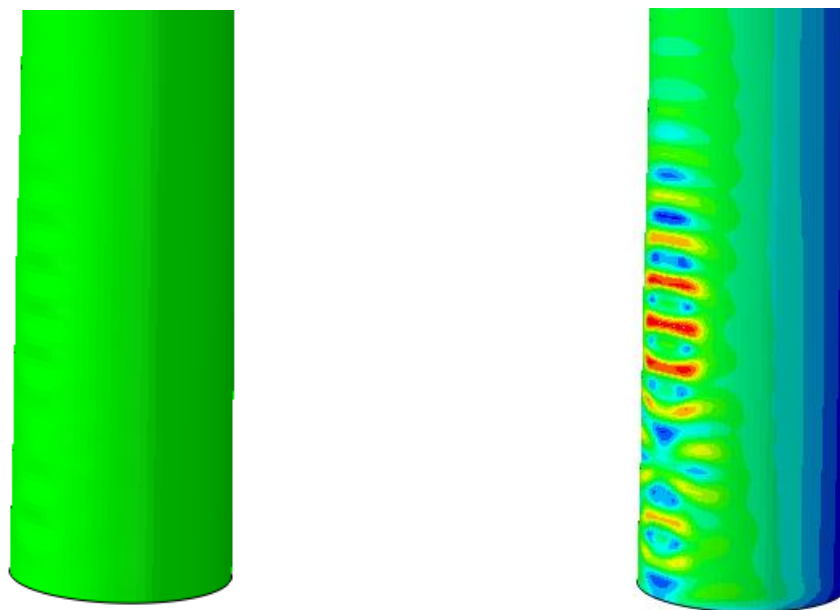
Σε περιοχές όπου παρουσιάζονται θλιπτικές τάσεις εντός του επιπέδου το κελύφους πρέπει να πραγματοποιούνται μετρήσεις στην περιφερειακή και μεσημβρινή διεύθυνση της διάστασης l_{gx} η οποία δίνεται από τη σχέση :

$$l_{gx} = 4 \sqrt{rt}$$

Για κάθε μια κατασκευαστική κλάση όπως υπολογίστηκε προηγουμένως παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας του φορέα, χρησιμοποιώντας κατά τα γνωστά, την οριζόντια μετατόπιση της κορυφής, ενώ ακολούθως στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η μορφή αστοχίας για κατασκευαστική κλάση C στο σημείο της πρώτης διαρροής του φορέα, η οποία δεν διαφέρει καθόλου από τις άλλες δυο κατηγορίες.

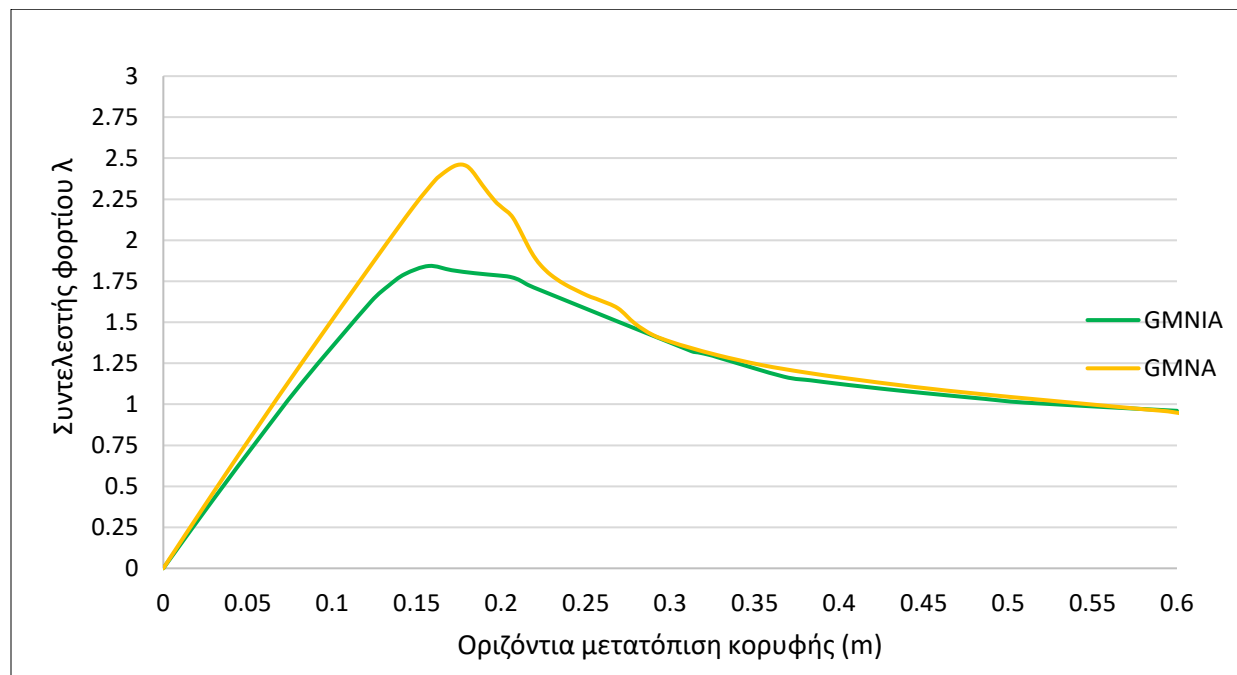


Σχήμα 5.2 : Δρόμοι ισορροπίας συμπαγούς φορέα



Σχήμα 5.3: Μορφή αστοχίας και τάσεις von Mises, αντίστοιχα στο σημείο πρώτης διαρροής μετά από αναλύσεις GMNIA με εισαγωγή κατασκευαστικής κλάσης C

Στα πλαίσια της αξιολόγησης της ευαισθησίας στην ύπαρξη ατελειών της κατασκευής στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζονται οι δρόμοι ισορροπίας για την μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας χωρίς ατέλειες και για ατέλειες σύμφωνα με τη κλάση C και το σχήμα της 3^{ης} ιδιομορφής.



Σχήμα 5.4 : Σύγκριση αναλύσεων για ύπαρξη και μη ατελειών

Φαίνεται ότι για την περίπτωση του συμπαγούς πυλώνα, οι αρχικές ατέλειες, έχουν σημαντική επίδραση στην αντοχή του.

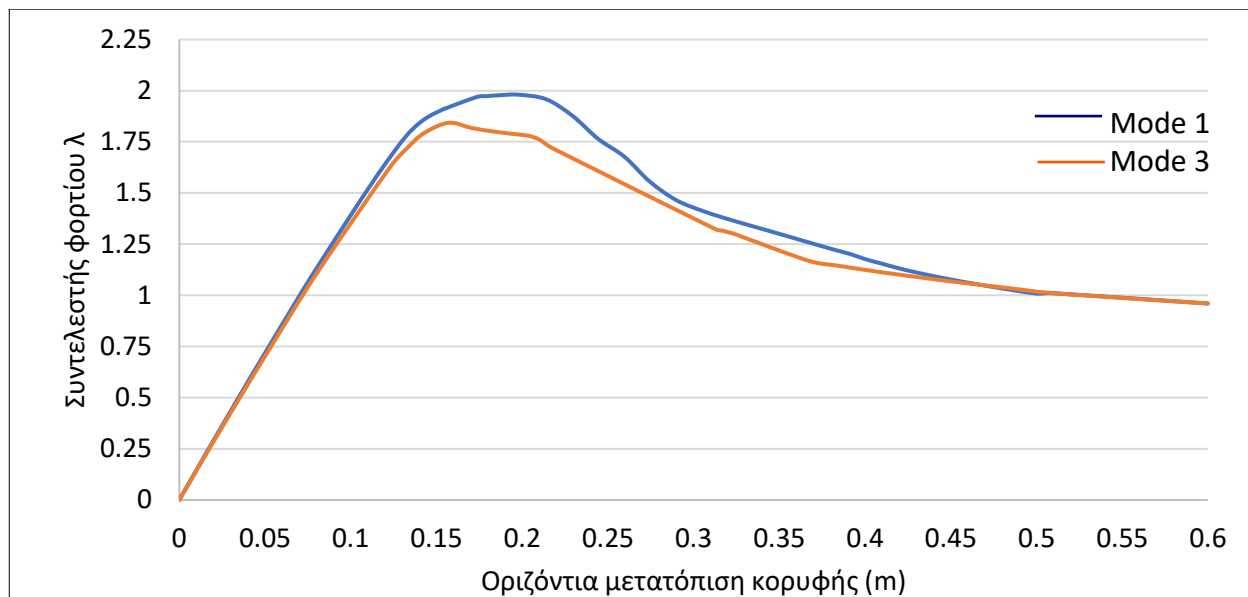
Με τα αποτελέσματα που έχουν μέχρι τώρα παρουσιαστεί έγινε κι ο έλεγχος της ευστάθειας (LS3) της κατασκευής με καθολική αριθμητική ανάλυση.

Πίνακας 5.2 : Οριακή αντοχή για κάθε κατασκευαστική κλάση

Κατασκευαστική Κλάση	Σχήμα ιδιομορφής ως αρχική ατέλεια	$\gamma_{R,GMNIA}$
A	3	2.015
B	3	1.871
C	3	1.843

Για την επιβεβαίωση πως η χρήση της 3^η ιδιομορφής ως αρχική ατέλεια αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση για την οποία προκύπτει δηλαδή το μικρότερο οριακό φορτίο, τα αποτελέσματα της ανάλυσης συγκρίνονται με αυτά που προκύπτουν αν εφαρμοζόταν ατέλεια κατά την 1^η ιδιομορφή.

Δρόμοι ισορροπίας παρουσιάζονται για μέγεθος ατέλειας κατασκευαστικής κλάσης C.



Σχήμα 5.5 : Σύγκριση οριακής αντοχής για διαφορετικά σχήματα αρχικών ατελειών κατασκευαστικής κλάσης C

Από το παραπάνω διάγραμμα και τη σύγκριση των 2 ιδιομορφών επιβεβαιώνεται ότι η οριακή αντοχή για σχήμα αρχικών ατελειών σύμφωνα με τη 3^η είναι όντως η δυσμενέστερη και με λόγο αντοχών :

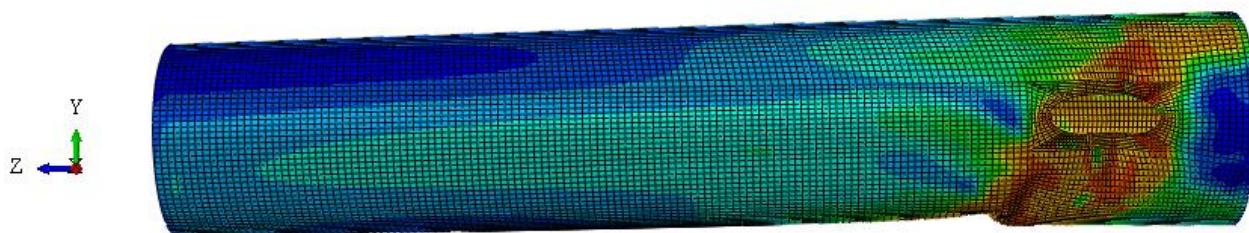
$$\frac{r_{R,GMNIA}^1}{r_{R,GMNIA}^3} = \frac{1.98}{1.84} = 1.076 \quad (5.5)$$

5.2 Προσομοίωση πυλώνα με ανθρωποθυρίδα χωρίς ενισχυτικά

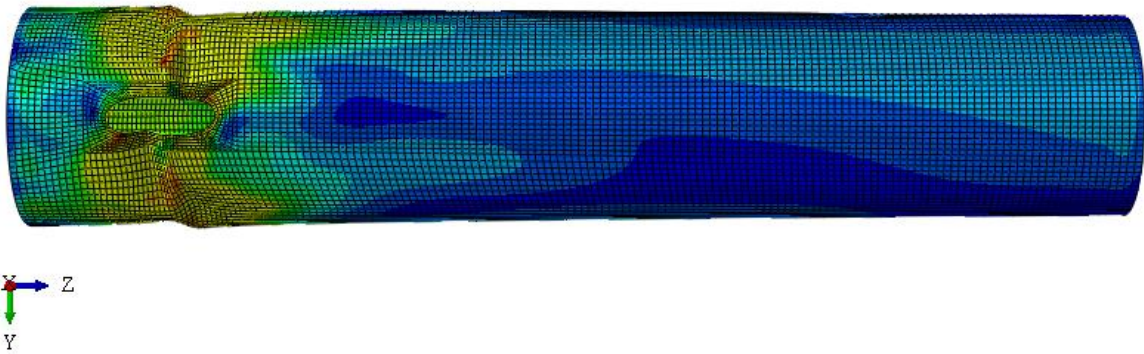
Για τον έλεγχο του πυλώνα με το άνοιγμα χωρίς ενίσχυση πραγματοποιήθηκε αρχικά ανάλυση GMNA και έγινε διερεύνηση του δυσμενέστερου σεναρίου διεύθυνσης φορτίου, για την αντοχή της κατασκευής. Παρακάτω παρατίθενται εικόνες που παρήχθησαν από το πρόγραμμα και δείχνουν την μορφή αστοχίας του φορέα για κάθε έναν πιθανό συνδυασμό ροπής τέμνουσας για τις τέσσερις διευθύνσεις, όπως φαίνεται και στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.3 : Περιπτώσεις φόρτισης φορίου επιβολής

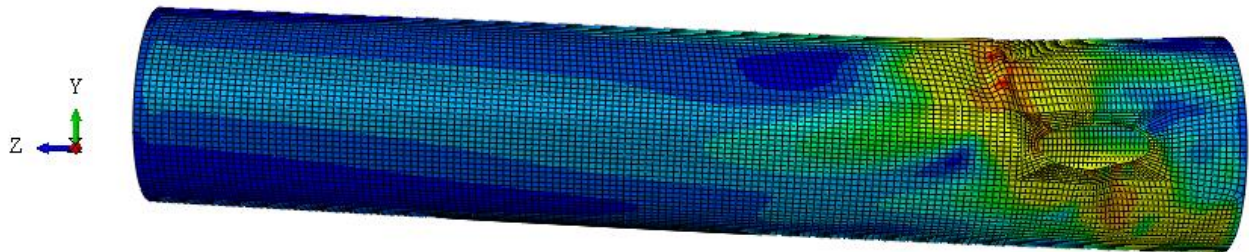
Περίπτωση (LC)	Διεύθυνση Φορτίων
1η	+M _x , - F _y
2η	+M _y , + F _x
3η	+M _x , + F _y
4η	-M _y , - F _x



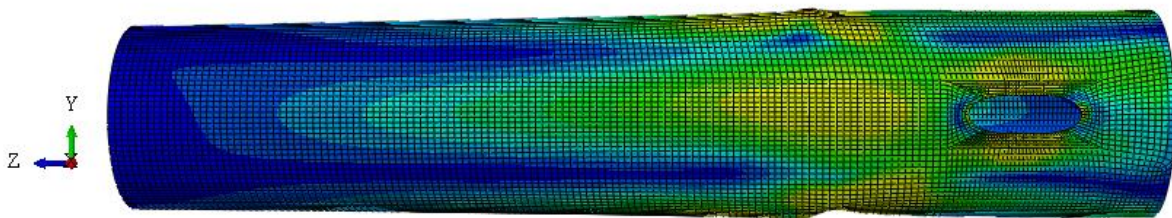
Σχήμα 5.6 : Μορφή αστοχίας φορέα με άνοιγμα για περίπτωση διεύθυνσης φορτίου LC1



Σχήμα 5.7 : Μορφή αστοχίας φορέα με άνοιγμα για περίπτωση διεύθυνσης φορτίου LC2



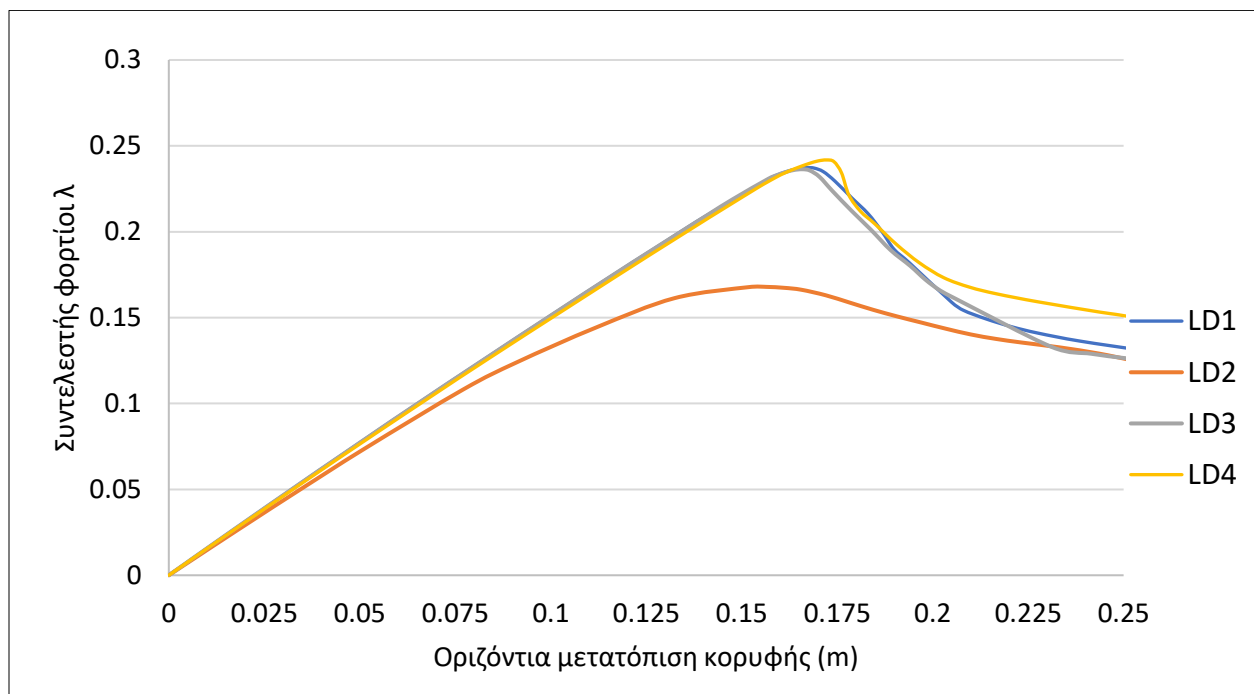
Σχήμα 5.8 : Μορφή αστοχίας φορέα με άνοιγμα για περίπτωση διεύθυνσης φορτίου LC3



Σχήμα 5.9 : Μορφή αστοχίας φορέα με άνοιγμα για περίπτωση διεύθυνσης φορτίου LC4

Οι περιπτώσεις φορτίων των συνδυασμών 1 και 3 αναμένεται να επιφέρουν στο φορέα την ίδια ακριβώς απόκριση αφού απλά αποτελούν την αντισυμμετρική του καταπόνηση. Επίσης αναμένουμε η 4^η περίπτωση να είναι η πιο ευνοϊκή καθώς κατά τη διεύθυνση κάμψης – My, η πλευρά του ανοίγματος εφελκύεται. Βλέπουμε παρόλα αυτά στο παρακάτω διάγραμμα με τους δρόμους ισορροπίας για κάθε μια διεύθυνση φόρτισης, ότι και οι τρεις περιπτώσεις 1^η, 3^η και 4^η δίνουν σχεδόν ίδια αποτελέσματα και αρκετά όντως πιο ευνοϊκά σε σχέση με τη περίπτωση τη 2^{ης}.

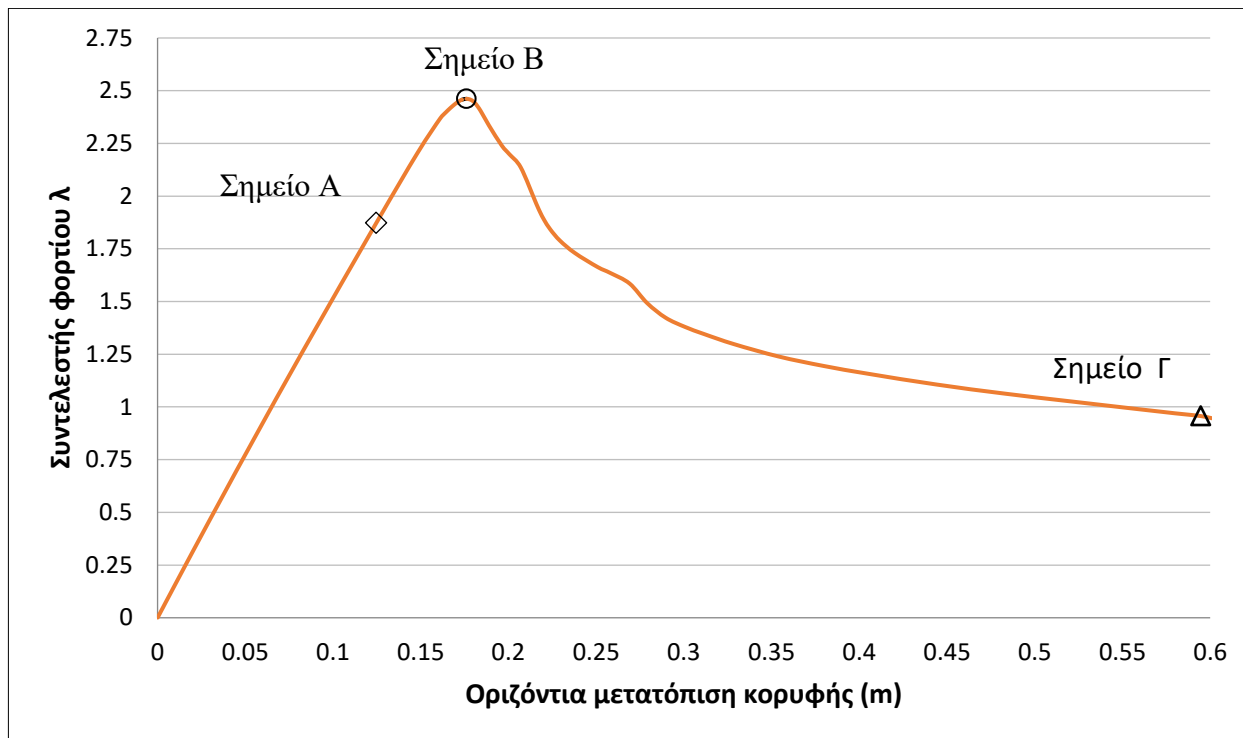
Επομένως όλες οι αναλύσεις του φορέα με το άνοιγμα θα πραγματοποιηθούν για φορτία +My, +Fx και σαφώς και το αξονικό φορτίο.



Σχήμα 5.10 : Δρόμοι ισορροπίας για κάθε διεύθυνση φορτίου

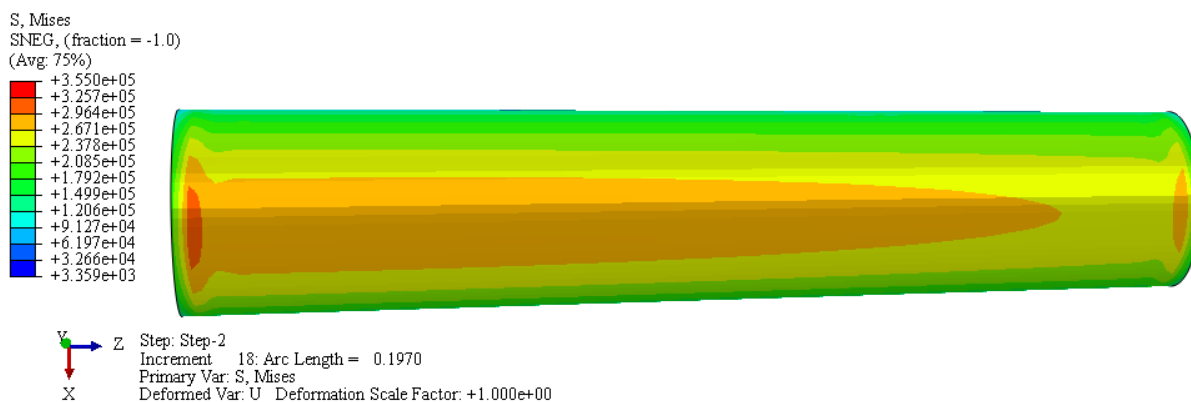
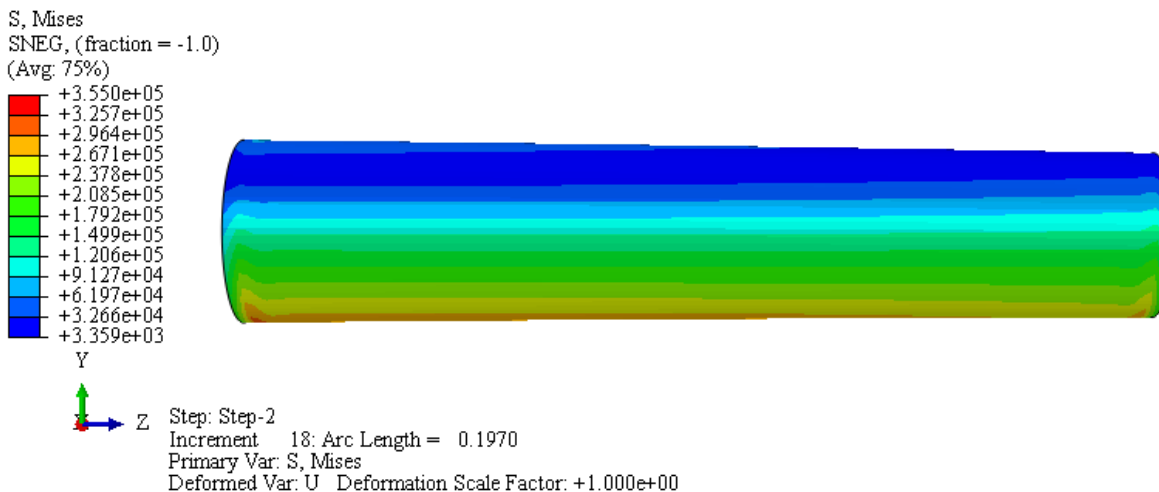
5.3 Τάσεις και παραμορφώσεις φορέα σε τρία χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας.

Στο παρακάτω διάγραμμα για τη προσομοίωση του αρχικού φορέα, δηλαδή κελύφους χωρίς άνοιγμα, δίνεται ο δρόμος ισορροπίας που προέκυψε από μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού. (GMNA). Στο διάγραμμα σημειώνονται 3 χαρακτηριστικά σημεία. Το πρώτο (Σημείο Α) αντιστοιχεί στην στιγμή της πρώτης διαρροής, το δεύτερο (Σημείο Β) στο οριακό φορτίο και το τρίτο (Σημείο Γ) σε ένα σημείο του μετελαστικού κλάδου δηλαδή μετά τη κατάρρευση.

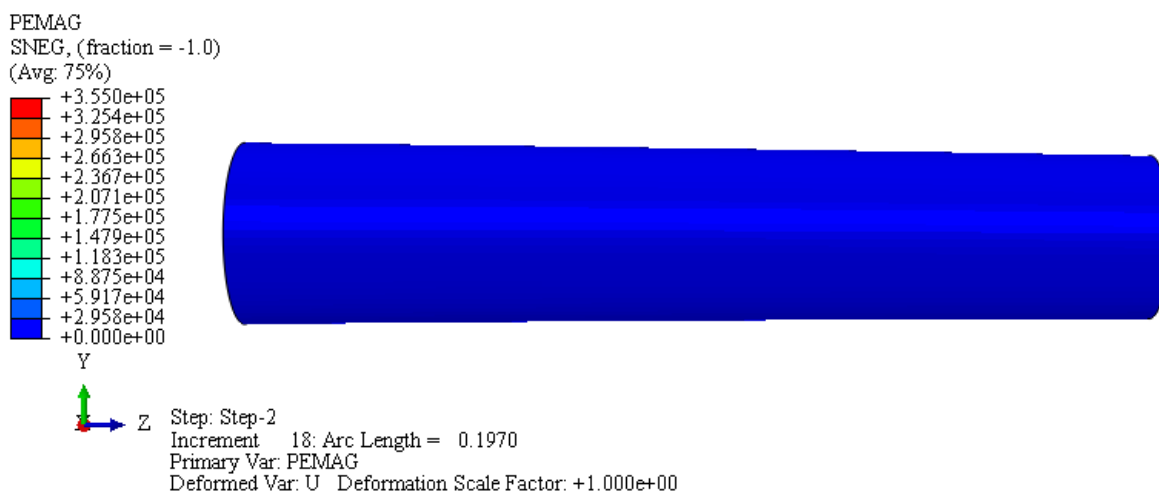


Σχήμα 5.11 : Δρόμος ισορροπίας και χαρακτηριστικά σημεία

Στη συνέχεια για τα τρία αυτά χαρακτηριστικά σημεία δίνονται εικόνες του φορέα με τις τάσεις Von Mises αλλά και την PEMAG, δηλαδή τις ισοδύναμες πλαστικές παραμορφώσεις.



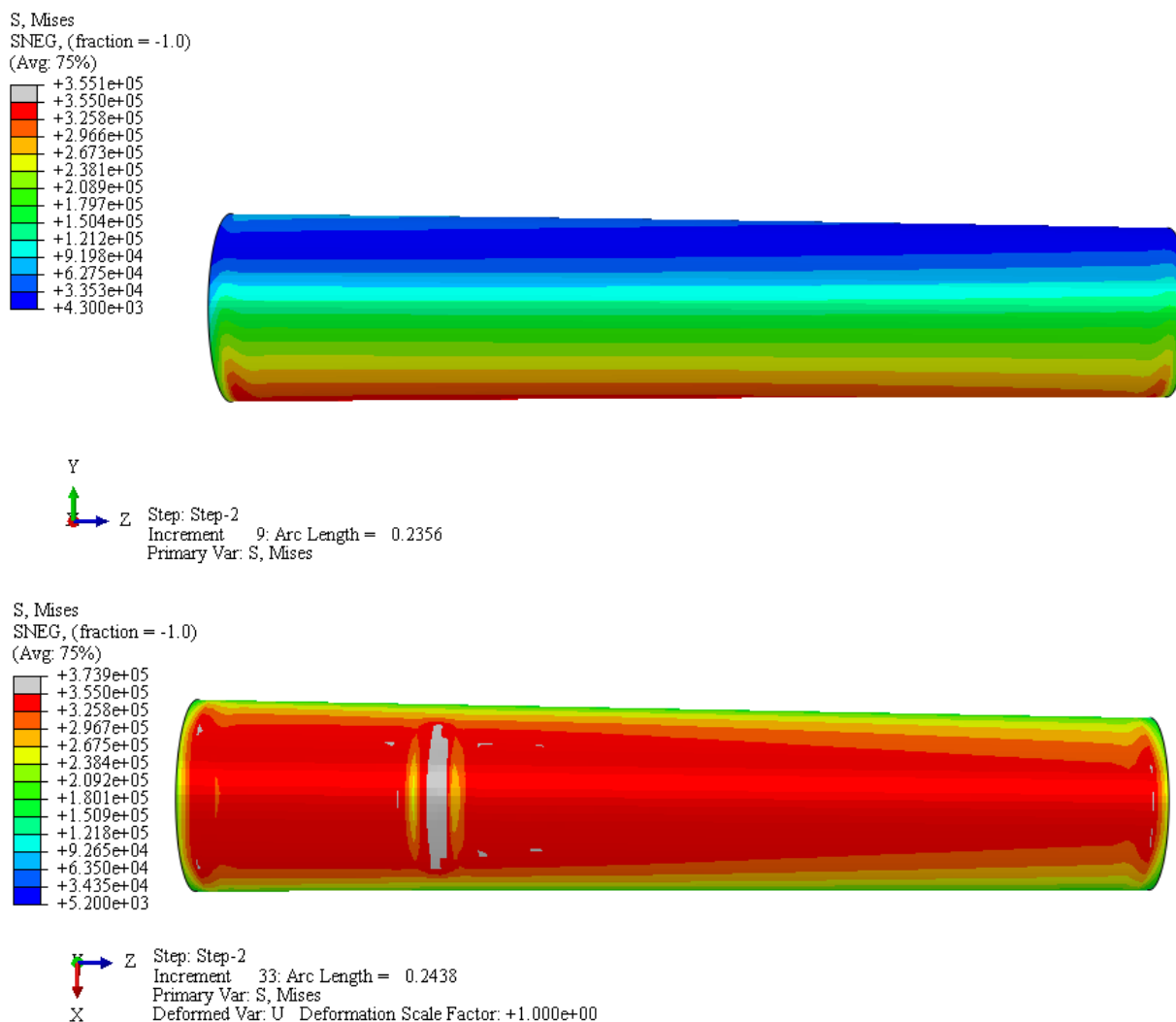
Σχήμα 5.12 : Τάσεις Von Mises για το σημείο A, της πρώτης διαρροής. Όψη αξόνων Y-Z η πρώτη και X-Z στην δεύτερη



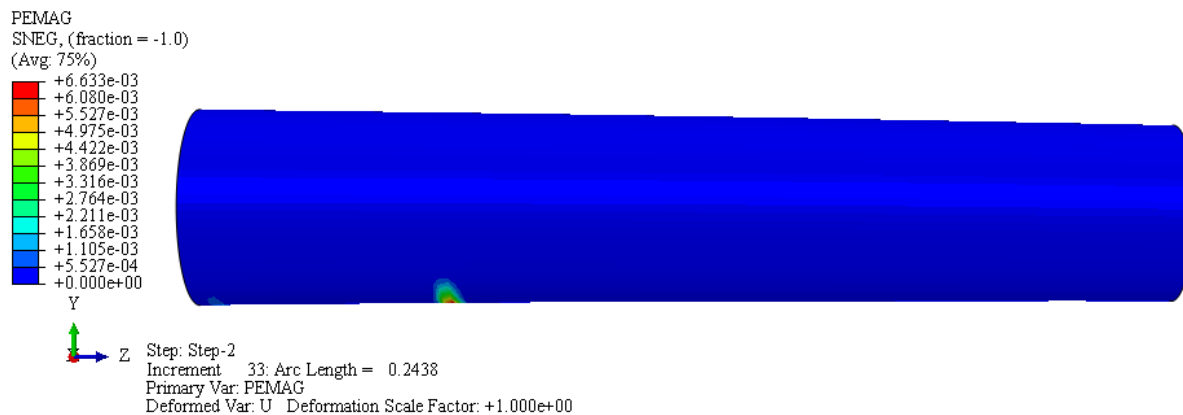
Σχήμα 5.13 : Πλαστική παραμόρφωση PEMAG για το σημείο A, της πρώτης διαρροής.

Έπειτα στο δεύτερο σημείο B, που αντιστοιχεί στο οριακό φορτίο της κατασκευής.

Έχει επιλεγθεί να χρωματίζονται οι περιοχές μέχρι τη μέγιστη τιμή της τάσης διαρροής των 355 MPa και έπειτα όσες επιφάνειες έχουν διαρρεύσει αποτυπώνονται με γκρίζο χρώμα. Αυτό έγινε για διευκόλυνση του αναγνώστη, ώστε να είναι ευδιάκριτες οι περιοχές που έχουν διαρρεύσει και να μην αποπροσανατολίζεται από την απόδοση των χρωμάτων που δίνει το πρόγραμμα.

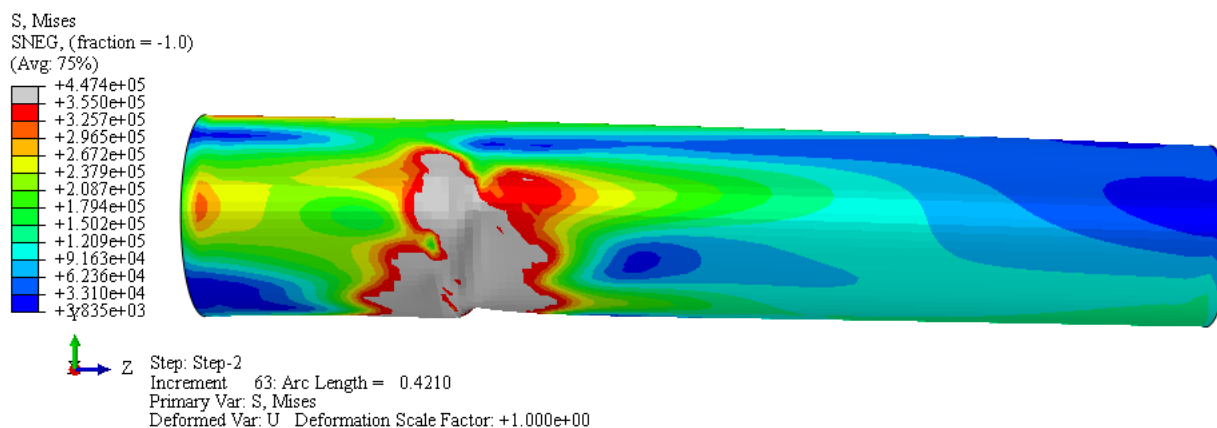


Σχήμα 5.14 : Τάσεις Von Mises για το σημείο B, της οριακής αντοχής. Όψη αξόνων Y-Z η πρώτη και X-Z στην δεύτερη.

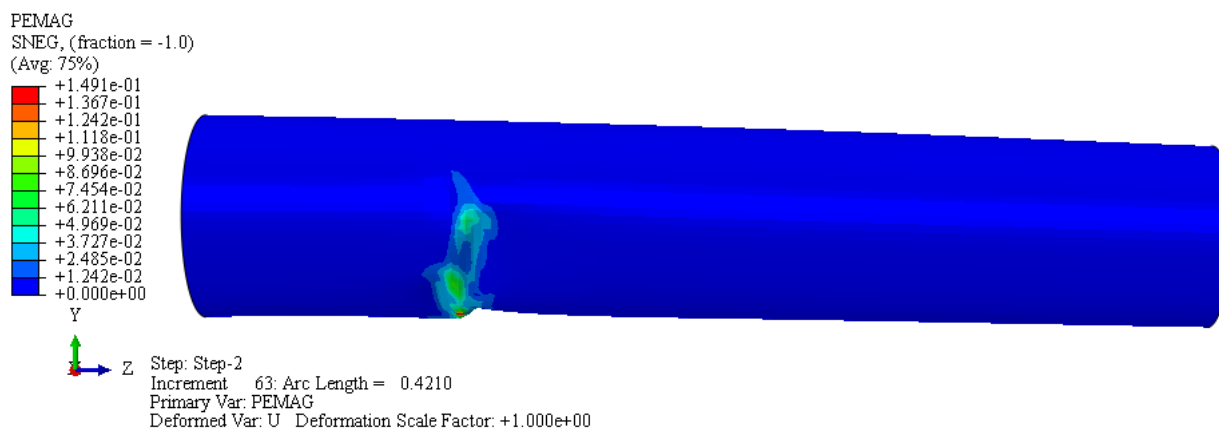


Σχήμα 5.15 : Πλαστική παραμόρφωση PEMAG για το σημείο Β, της οριακής αντοχής.

Και ακολούθως και στο σημείο Γ, του μετελαστικού κλάδου. Έχει επέλθει κατάρρευση του φορέα.

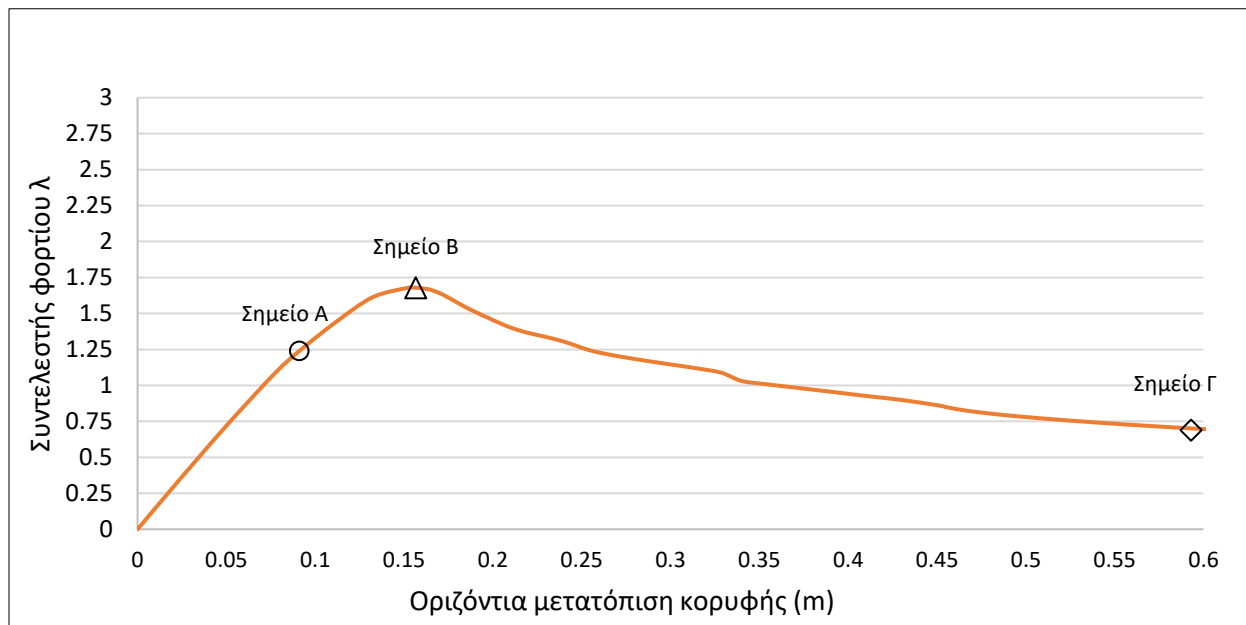


Σχήμα 5.16 : Τάσεις Von Mises για το σημείο Γ.



Σχήμα 5.17 : Πλαστική παραμόρφωση PEMAG για το σημείο Γ.

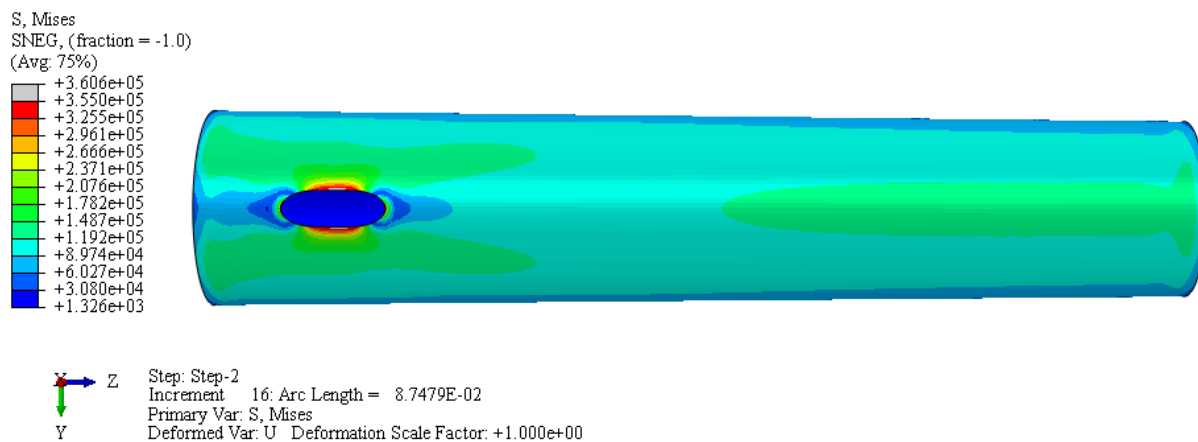
Αντίστοιχα η ίδια ακριβώς διαδικασία και τα αποτελέσματα της παρατίθενται και για την περίπτωση της ύπαρξης ανοίγματος χωρίς ενίσχυση.



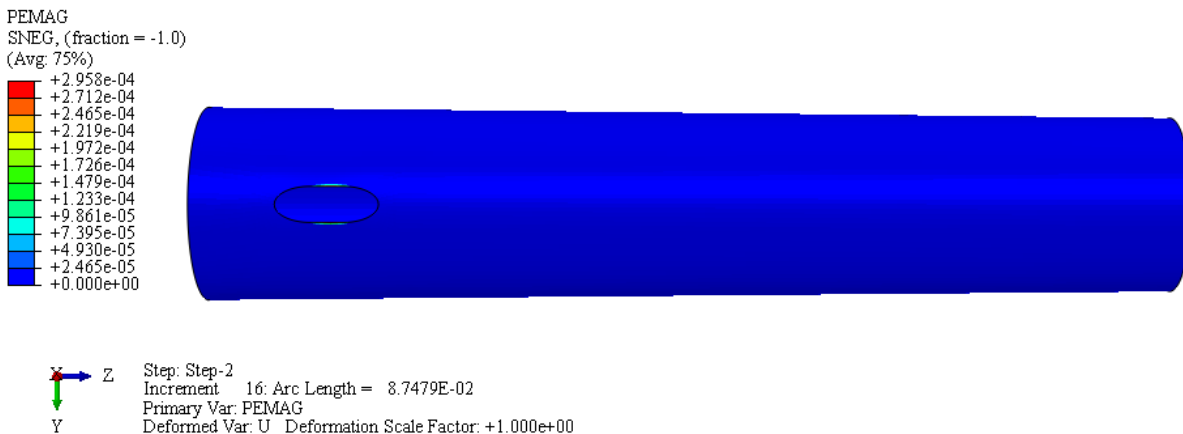
Σχήμα 5.18 : Δρόμος ισορροπίας και χαρακτηριστικά σημεία για ύπαρξη θυρίδας



Σχήμα 5.19: Παραμορφωμένο σχήμα φορέα



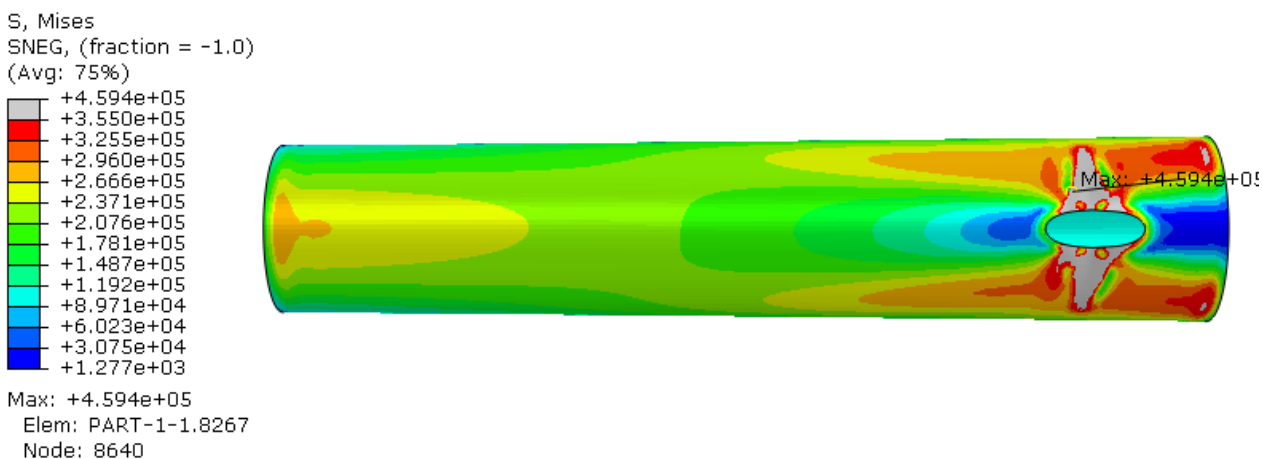
Σχήμα 5.20 : Τάσεις Von Mises για το σημείο Α



Σχήμα 5.21 : Πλαστική παραμόρφωση PEMAG για το σημείο Α.



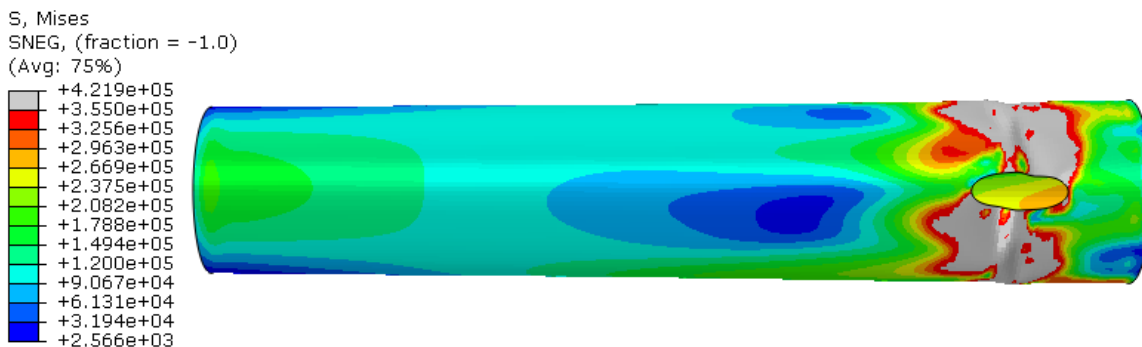
Σχήμα 5.22 : Παραμορφωμένο σχήμα φορέα για το σημείο Β.



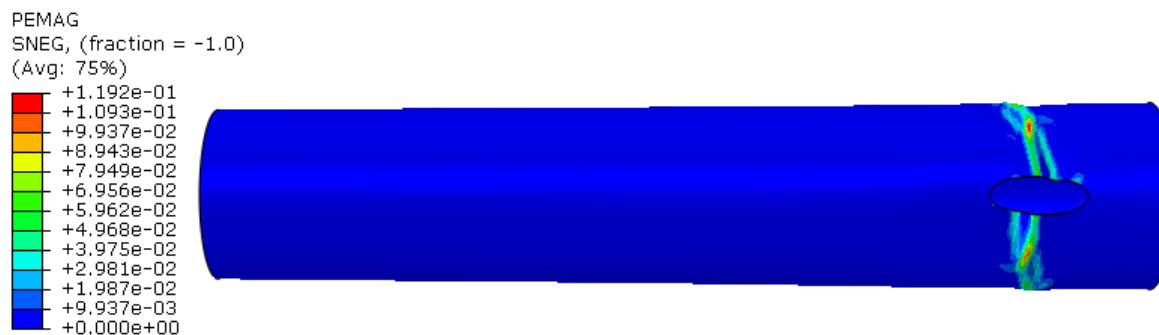
Σχήμα 5.23 : Τάσεις Von Mises για το σημείο Β



Σχήμα 5.24 : Πλαστική παραμόρφωση PEMAG για το σημείο Β.

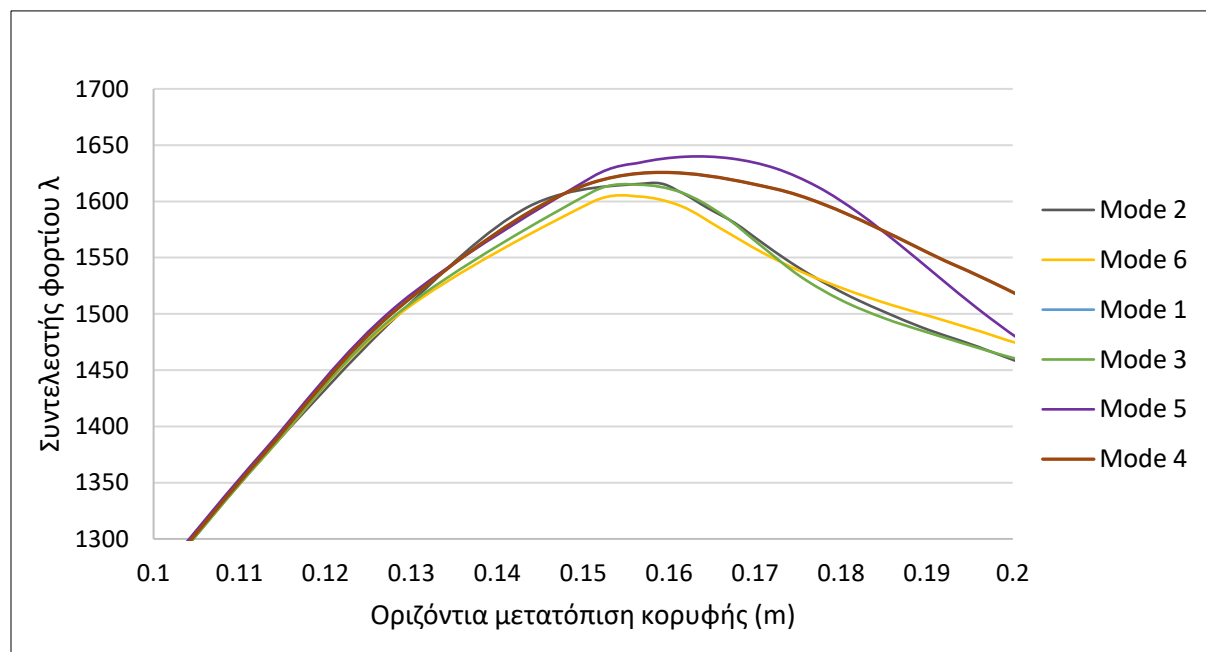


Σχήμα 5.25 : Τάσεις Von Mises για το σημείο Γ



Σχήμα 5.26 : Πλαστική παραμόρφωση PEMAG για το σημείο Γ.

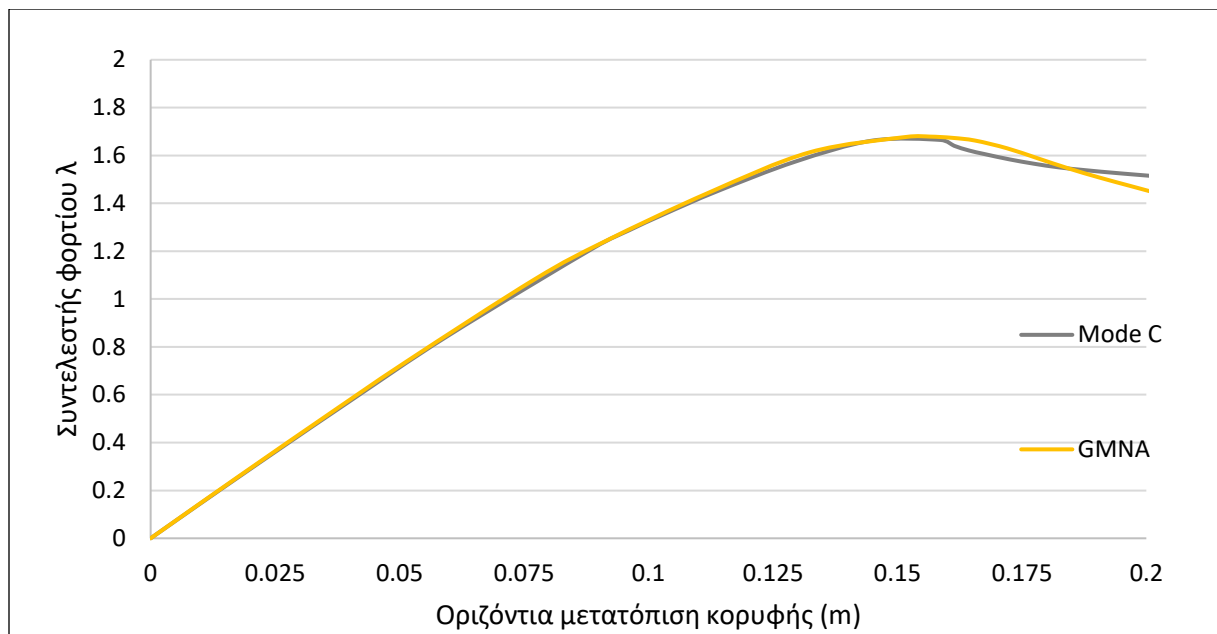
Μέχρι στιγμής τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν για την περίπτωση του φορέα με το άνοιγμα χωρίς ενίσχυση, προερχόταν από μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού χωρίς ατέλειες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας για αρχική ατέλεια σύμφωνα με τα σχήματα των 6 πρώτων ιδιομορφών που παρήχθησαν από την γραμμική ανάλυση λυγισμού και η οποία παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 5.27 : Αρχικές ατέλειες σύμφωνα με τα σχήματα των 6 πρώτων ιδιομορφών.

Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε λοιπόν τα αποτελέσματα αυτά, συγκρίθηκαν με την ανάλυση μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού χωρίς ατέλειες.

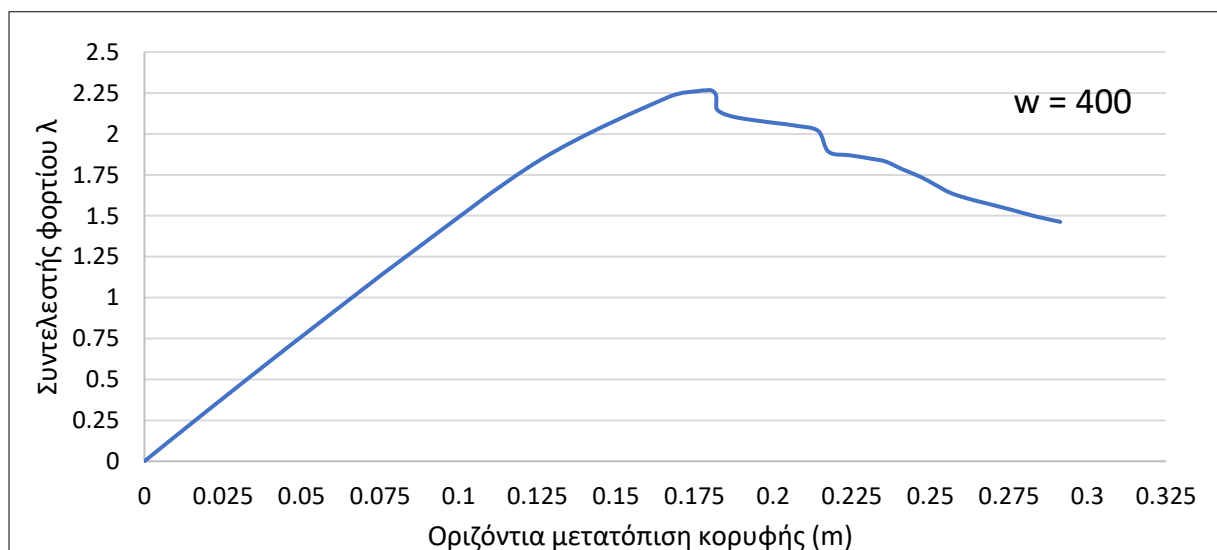
Η σύγκριση έγινε με το δρόμο ισορροπίας που προέκυψε από την εισαγωγή ατελειών σύμφωνα με το σχήμα της 6^η ιδιομορφής, καθώς όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.27, ο φορτικός συντελεστής για την συγκεκριμένη περίπτωση είναι ο μικρότερος όλων.



Σχήμα 5.28 : Σύγκριση αναλύσεων με και χωρίς την εισαγωγή αρχικών ατελειών.

Από το Σχήμα 5.28 φαίνεται ότι στην περίπτωση του φορέα με άνοιγμα, οι αρχικές ατέλειες που ορίστηκαν κατά τα σχήματα των ιδιομορφών δεν έχουν σχεδόν καμία επίδραση στην αντοχή του.

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας του πυλώνα με την περιμετρική ενίσχυση πλάτους 400 mm.

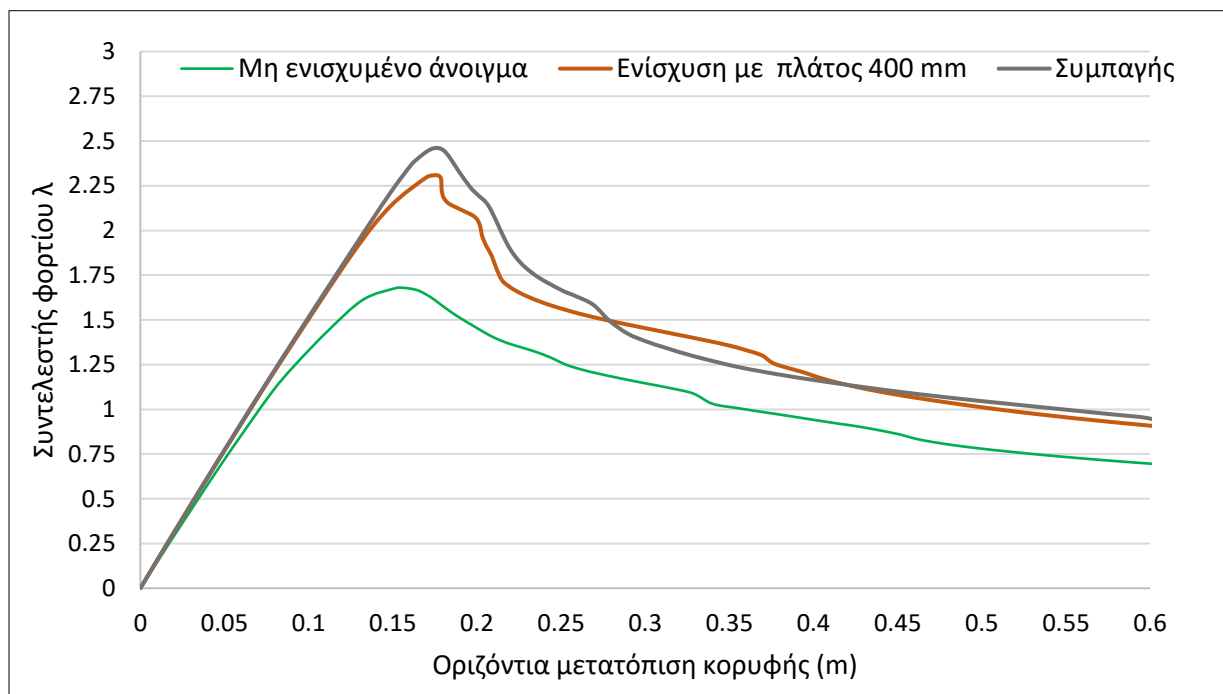


Σχήμα 5.29 : Δρόμος ισορροπίας πυλώνα με ενισχυμένο άνοιγμα από ανάλυση GMNA.

6 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων και παραμετρική διερεύνηση

6.1 Αξιολόγηση επιρροής ανοίγματος και ενίσχυσης στην αντοχή του αρχικού φορέα

Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα των αναλύσεων και να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της ύπαρξης ανοίγματος στο κέλυφος του πυλώνα αλλά και της επιρροής της ενίσχυσης περιμετρικά του ανοίγματος, παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας κάθε προσομοιώματος στο ίδιο διάγραμμα.



Σχήμα 6.1 : Δρόμοι ισορροπίας κάθε προσομοιώματος

Γίνεται λοιπόν φανερό πως η ύπαρξη ανθρωποθυρίδας όντως απομειώνει την αντοχή του φορέα σημαντικά.

Από την ανάλυση η χαρακτηριστική τιμή του φορτικού συντελεστή για το συμπαγή φορέα προέκυψε ίση με $r_{Rk,1} = 2.461$.

Για το φορέα με το μη ενισχυμένο άνοιγμα ισούται με $r_{Rk,2} = 1.67$.

Η μείωση λοιπόν της αντοχής λόγω ανθρωποθυρίδας διαπιστώνεται πως είναι της τάξης του 32 %.

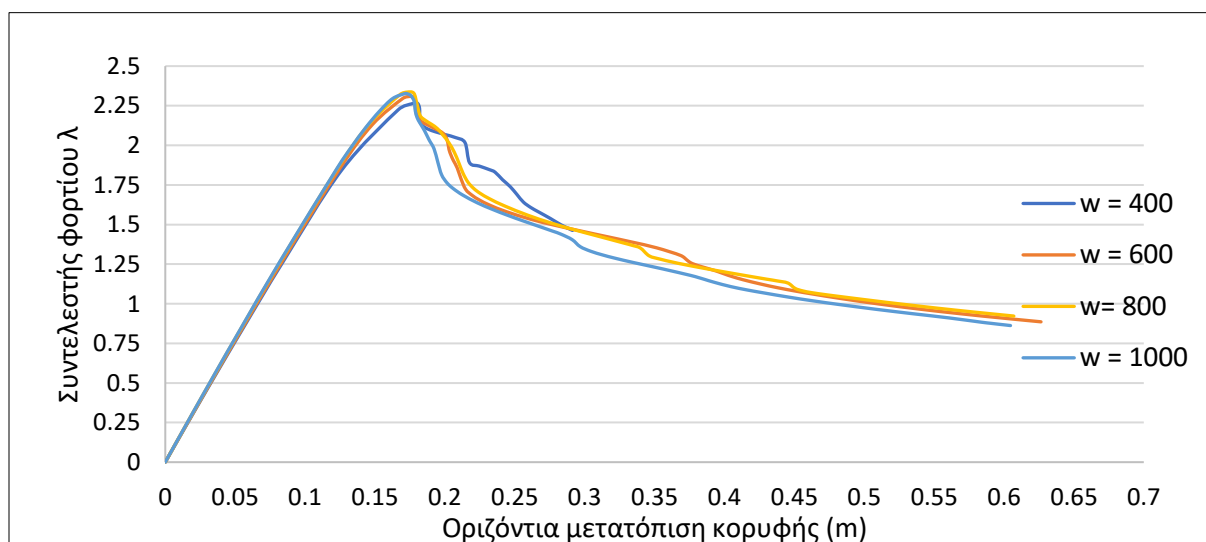
Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων με ενίσχυση του ανοίγματος λαμβάνεται χαρακτηριστική τιμή του φορτικού συντελεστή $r_{Rk,3} = 2.33$.

Για το συγκεκριμένο τύπο ενίσχυσης λοιπόν μπορεί να μην αντισταθμίζεται πλήρως η αντοχή που χάθηκε από την απομείωση της επιφάνειας λόγω ύπαρξης θυρίδας αλλά κρίνεται πως προσεγγίζει την αρχική αντοχή ικανοποιητικά.

6.2 Διερεύνηση επίδρασης πάχους ενίσχυσης στην βελτίωση της αντοχής

Για να καταφέρουμε να αντισταθμίσουμε πλήρως την αντοχή που χάθηκε από το πυλώνα με την δημιουργία της ανθρωποθυρίδας, κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μια διερεύνηση ως προς το εμβαδόν του περιμετρικού πλαισίου ενίσχυσης για το οποίο θα φτάσουμε στις αρχικές τιμές αντοχής.

Δημιουργήθηκαν λοιπόν ενισχύσεις με πλάτη 600, 800 και 1000 mm διατηρώντας σταθερό το πάχος και τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.2.

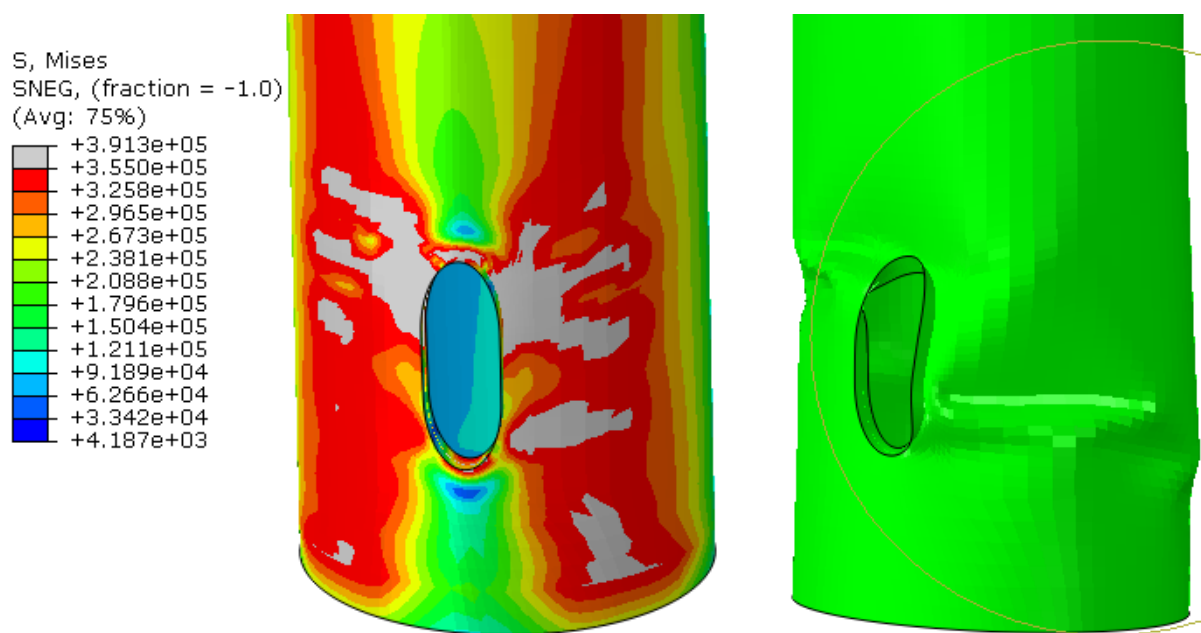


Σχήμα 6.2 : Παραμετρική διερεύνηση για διάφορα πλάτη ενισχύσεων

Παρατηρήθηκε ότι ακόμα κι όταν αυξήθηκε το πλάτος της ενίσχυσης μέχρι του ενός μέτρου, η αρχική αντοχή του συμπαγούς κελύφους πάλι δεν επιτεύχθηκε. Μάλιστα τα αποτελέσματα των φορτικών συντελεστών για τα τρία δοκιμαστικά ενισχυτικά πλαίσια είναι σχεδόν πανομοιότυπα.

Για το λόγο αυτό ελέγχθηκε η μορφή αστοχίας του πυλώνα με στόχο τη προσπάθεια αξιολόγησης του λόγου που συμβαίνει αυτό.

Στην παρακάτω εικόνα λοιπόν με τον παραμορφωμένο φορέα, παρατηρείται ότι η μορφή αστοχίας δεν είναι κυρίως περιμετρικά του ανοίγματος αλλά πιο διευρυμένη στην επιφάνεια του κελύφους.



Σχήμα 6.3 : Μορφή αστοχίας του κελύφους με περιμετρική ενίσχυση

Με βάση αυτή τη παρατήρηση κρίνουμε πως ίσως ένας άλλος τύπος ενίσχυσης, είτε με συνδυασμό διαμήκων ενισχυτικών, είτε και με πάχυνση του κελύφους στην περιοχή της βάσης του πυλώνα και για κάποια μέτρα, θα ήταν πιο αποδοτικά στην αύξηση της αντοχής του.

7 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούν κάποια συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία και τα οποία μπορεί να χρησιμεύσουν σε άλλες μελέτες σχετικές με το παρών αντικείμενο ή να αποτελέσουν αφορμή να διερευνηθούν περαιτέρω ζητήματα με τα οποία αυτή η μελέτη ασχολήθηκε.

Προέκυψαν λοιπόν τα εξής:

- Τα στοιχεία κελύφους που χρησιμοποιήθηκαν για τον πυλώνα είναι επαρκή και δίνουν πολύ ακριβή αποτελέσματα.
- Επιβεβαιώνεται ότι ο πλαστικός έλεγχος δίνει αρκετά συντηρητικά αποτελέσματα και εφόσον ο έλεγχος ευστάθειας ικανοποιείται, αυτός δύναται να παραληφθεί.
- Ο έλεγχος ευστάθειας της κατασκευής ικανοποιείται ακόμη και για τις πιο δυσμενείς συνθήκες.
- Οι αρχικές ατέλειες στο συμπαγή προσομοίωμα έδωσαν μια αξιοσημείωτη μείωση έναντι μη γραμμικών αναλύσεων χωρίς την ύπαρξη τους.
- Στο φορέα με το μη ενισχυμένο άνοιγμα αντίθετα η επίδραση των αρχικών ατελειών σύμφωνα με το σχήμα των ιδιομορών, είναι σχεδόν αμελητέα.
- Η μείωση της αντοχής λόγω ανθρωποθυρίδας, είναι αρκετά σημαντική, της τάξης του 32 %. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η ύπαρξη ενισχύσεων.
- Παρατηρήθηκε ότι μετά από κάποιο ποσοστό αύξησης της αντοχής της απομειωμένης γεωμετρίας από το άνοιγμα, η ενίσχυση με περιμετρικά πλαίσια δεν επιφέρει περαιτέρω βελτίωση, όσο αυξάνουμε το πλάτος τους.
- Παρατηρείται ότι η μορφή αστοχίας του προσομοιώματος με την ενίσχυση δεν είναι κυρίως περιμετρικά του ανοίγματος αλλά πιο διευρυμένη στην επιφάνεια του κελύφους.
Από αυτό προκύπτει το συμπέρασμα ότι αν θέλουμε να επιτύχουμε ή να ξεπεράσουμε την αρχική αντοχή πρέπει να υπάρξει πάχυνση της περιοχής ή άλλου τύπου ενισχύσεις ή συνδυασμός του περιμετρικού πλαισίου με διαμήκεις.

8 Βιβλιογραφία

- [1] <https://www.europarl.europa.eu>
- [2] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο (2018). Οδηγία (ΕΕ) 2018/2001.
- [3] Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2020). Ανακοίνωση C(2020) 7730 final, Βρυξέλλες.
- [4] "An EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future", COM(2020) 741 final, Brussels.
- [5] EWEA, "European Wind Energy Association: Wind in power, 2014 European statistics," 2013.
- [6] UKRAB, "UK Renewables Advisory Board: Value breakdown for the offshore wind sector," 2010.
- [7] DNV 2010, Environmental Conditions and Environmental Loads, DNV-RP-C205 (RECOMMENDED PRACTICE), DET NORSKE VERITAS AS.
- [8] DNV 2011, Design of Offshore Wind Turbine Structures, DNV-OS-J101 (OFFSHORE STANDARD), DET NORSKE VERITAS AS
- [9] Abaqus 6.11 Theory Manual, Dassault Systemes, 2011
- [10] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott, Definiton of a 5MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, USA: NREL, 2009.
- [11] R. L. B. Voortman., State-of-the-art design methods for wind turbine towers [MSc]. Delft University of Technology; 2015.
- [12] IEC, "International European Code 61400-3: Wind turbines part 3: Design requirements for offshore wind turbines," 2007.
- [13] International Standard, IEC 61400-1: Wind Turbines – Part 1: "Design Requirements", 2005.
- [14] European Committee for Standardization, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-6: "Strength and Stability of Shell Structures", 2007.
- [15] European Committee for Standardization, Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-4: "General Actions – Wind Actions", 2010.
- [16] European Committee for Standardization, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 3-1: "Towers, masts and chimneys – Towers and masts", 2006.

- [17] Det Norske Veritas (DNV), Wind Energy Department, Risø National Laboratory, "Guidelines for Design of Wind Turbines", 2002.
- [18] Abaqus 6.11, User's manual, Dassault Systemes, 2011
- [19] Dimopoulos, C.A.; Gantes, C.J. Comparison of stiffening types of the cutout in tubular wind turbine towers. *J. Constr. Steel Res.* 2013, 83, 62–74.
- [20] Παπαδρακάκης, Μ. (2001). «Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, Ελλάδα, 2001.
- [21] Ψαρράς, Λ. (2005). «Χειρισμός Προγραμματιστικά του ABAQUS σε Γραμμικά και μη Γραμμικά Προβλήματα», Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- [22] Α. Κουνάδης, "Μη γραμμική θεωρία ελαστικής ευστάθειας", Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, Ελλάδα 2012.
- [23] Κ. Α. Χονδρογιάννης "Μελέτη λυγισμού πυλώνων ανεμογεννητριών με χρήση μη γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων" Αθήνα, Ιούλιος 2019