

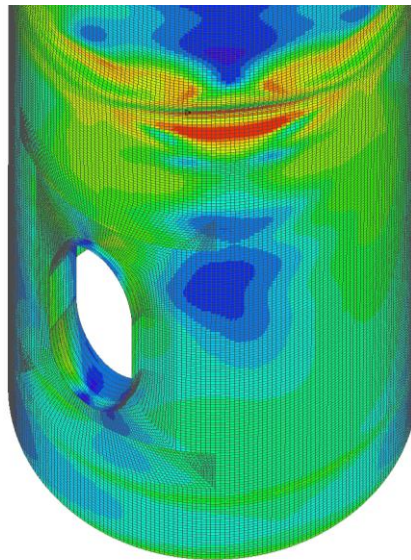


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΜΕΛΕΤΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΠΥΛΩΝΩΝ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ
ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



Διπλωματική Εργασία

Κυριάκος-Αλέξανδρος Χονδρογιάννης

ΕΜΚ ΔΕ 2019 11

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υ.Δ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019

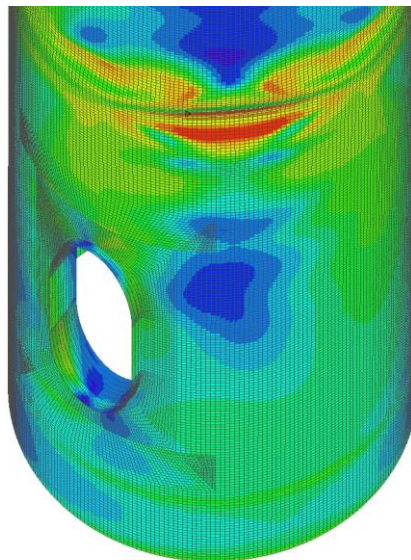


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΜΕΛΕΤΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΠΥΛΩΝΩΝ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ
ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



Διπλωματική Εργασία

Κυριάκος-Αλέξανδρος Χονδρογιάννης

ΕΜΚ ΔΕ 2019 11

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υ.Δ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019

Copyright © Κυριάκος-Αλέξανδρος Χονδρογιάννης, 2019
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Kyriakos-Alexandros Chondrogiannis, 2019
All Rights Reserved

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

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

Κυριάκος Αλέξανδρος Χονδρογιάννης (2019)
Μελέτη λυγισμού πυλώνων ανεμογεννητριών με χρήση μη γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων
στοιχείων
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2019 11
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Kyriakos-Alexandros Chondrogiannis (2019)
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2019 11
Buckling design of wind turbine towers with the use of nonlinear finite element analysis
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου Χάρη Γαντέ για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο, πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο. Η συμβολή του στην εκπόνηση αυτής της εργασίας ήταν καθοριστική καθ' όλη την διάρκεια της μελέτης και οι συμβουλές του ήταν εξαιρετικά χρήσιμες και σαφείς δίνοντάς μου σημαντικές ιδέες και βοήθεια σε κομβικά σημεία. Εκτός από το επιστημονικό μέρος ο καθηγητής μου, μου μετέδωσε πολύτιμες δεξιότητες, που δύσκολα διδάσκονται στην τάξη, όπως η συνέπεια και η οργάνωση.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την Κωνσταντίνα Κουλάτσου που με βοήθησε παρέχοντάς μου χρήσιμες πληροφορίες και δεδομένα για την προς έλεγχο κατασκευή, καθώς και για τις συμβουλές της σχετικά με την χρήση του λογισμικού που χρησιμοποίησα.

Για την εκπόνηση της εργασίας, καθοδήγηση μου έδωσε επίσης ο καθηγητής μου Μανόλης Παπαδρακάκης σχετικά με εξειδικευμένα θέματα επί των πεπερασμένων στοιχείων, τον οποίο και ευχαριστώ ιδιαίτερα για την συνεισφορά του.

Δεν θα μπορούσα να παραλείψω από τις ευχαριστίες την οικογένειά μου, που μου παρείχε τόσο ηθική όσο και πρακτική βοήθεια σε όλη την διάρκεια της διπλωματικής αλλά και όλων των φοιτητικών μου χρόνων.

Τέλος, ευχαριστώ όλους τους καθηγητές μου στην σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ που βοήθησαν στην επιστημονική μου κατάρτιση και επιβεβαίωσαν την αντίληψη που είχα πρωτίστως της εισαγωγής μου στην σχολή για την κορυφαία αυτή επιστήμη.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2019 11

Μελέτη λυγισμού πυλώνων ανεμογεννητριών με χρήση μη γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

Κυριάκος-Αλέξανδρος Χονδρογιάννης

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υ.Δ. Ε.Μ.Π.
Ιούλιος 2019

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην σύγχρονη εποχή, όπου οι απαιτήσεις στην ενέργεια αυξάνονται διαρκώς, παρουσιάζεται έντονο ενδιαφέρον προς την εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών, με την αιολική ενέργεια να αποτελεί ένα ιδιαίτερα αναπτυσσόμενο τομέα. Καθοριστικός για την εφαρμογή της μεθόδου είναι ο βέλτιστος οικονομικά σχεδιασμός των ανεμογεννητριών, με τον πυλώνα αυτών να έχει την μεγαλύτερη βαρύτητα. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται επιπλέον προσπάθεια αύξησης του ύψους των πυλώνων για την αξιοποίηση ισχυρότερων ανέμων που εμφανίζονται σε μεγαλύτερα υψόμετρα.

Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ως αντιπροσωπευτική γεωμετρία ελέγχου χαλύβδινος πυλώνας ύψους περί τα 118m, σχήματος κυλινδρικού και κολουροκωνικού κελύφους. Πέραν της ακριβούς γεωμετρίας, παρασχέθηκαν επιπλέον δεδομένα περιβάλλουσας εντατικών μεγεθών σε συγκεκριμένες διατομές της κατασκευής, από τα οποία επιλέχθηκαν οι δυσμενέστεροι συνδυασμοί.

Για την πραγματοποίηση των ελέγχων στον πυλώνα δημιουργήθηκαν μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων στα οποία εφαρμόστηκαν μη γραμμικές αναλύσεις. Προκειμένου τα προσομοιώματα να είναι αποδοτικά από άποψη υπολογιστικού κόστους, διερευνήθηκε ο βέλτιστος τρόπος προσομοίωσης των συστατικών μερών της κατασκευής, χωρίς επίδραση στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Κατά τους ελέγχους έγινε σύγκριση μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστικών ποιτήτων, οι οποίες αναφέρονται στο ανεκτό μέγεθος αρχικών ατελειών. Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν διαγράμματα του βαθμού εκμετάλλευσης των διατομών στο ύψος του πυλώνα, για τις διαφορετικές κατασκευαστικές κατηγορίες. Η αντοχή του φορέα προέκυψε από τους ελέγχους ευστάθειας με την χρήση μη γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας και υλικού με εισαγωγή ατελειών, με την μορφή αστοχίας να καθορίζεται από την εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Επιπλέον μελετήθηκε η επίδραση της θεμελίωσης στην δυναμική απόκριση της κατασκευής και προσδιορίστηκαν οι συνθήκες που πρέπει να πληρούνται ούτως ώστε να αποφευχθεί ο συντονισμός της κατασκευής με τις δυναμικές και περιοδικές φορτίσεις.

Τέλος διερευνήθηκε η δυνατότητα βελτιστοποίησης σχετικά με τις διατομές των φλαντζών στις θέσεις συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας, με κριτήριο την επάρκεια της αντοχής του φορέα σε λυγισμό. Η αποτελεσματικότητα των τροποποιήσεων επιβεβαιώθηκε από εφαρμογή μη γραμμικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων, όπου διαπιστώθηκε η διατήρηση της αντοχής του φορέα. Ως εκ τούτου εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα για τα περιθώρια εξοικονόμησης υλικού της κατασκευής.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2019 11

Buckling design of wind turbine towers with the use of nonlinear finite element analysis

Kyriakos-Alexandros Chondrogiannis

Supervisor: Professor Charis Gantes
Co-supervisor: Konstantina Koulatsou, PhD Candidate, NTUA
July 2019

ABSTRACT

In the modern era, where energy requirements are constantly increasing, there is a strong interest in exploiting renewable sources, with one of the most growing sectors being wind power. Determining factor for the application of the method is the economically optimum design of wind turbines, in which the tower has the greatest role. In recent years an effort has been made to increase its height to take advantage of the stronger winds at higher altitudes.

In this work a representative control geometry of a steel tower of about 118m in height, shaped as a cylindrical and frusto-conical shell was used. In addition to the exact geometry, detailed data was provided regarding the internal forces in the form of an envelope, for specific sections of the structure, from which the most unfavorable combinations were selected.

For the tower checks, finite element models were created to which non-linear analyses were applied. For calculations to be effective, regarding the computational cost, the best way to simulate the components of the construction without affecting the reliability of the results was investigated. During the tests a comparison was made between different manufacturing qualities, which refer to the tolerable size of the initial imperfections. Utilization factor diagrams of the of cross sections at the height of the tower were then created for the different manufacturing categories. The capacity of the structure was derived from stability tests using geometrically and materially nonlinear analysis with imperfections, while the form of failure is determined by the occurrence of local buckling. In addition, the effect of the foundation on the dynamic response of the structure was studied and the conditions to be met in order to avoid the resonance of the structure with the dynamic and periodic loads were determined.

Finally, the possibility of optimizing the flange cross sections at the connection points was investigated, based on the sufficiency of the buckling resistance. The effectiveness of the modifications was confirmed by the application of non-linear finite element analyses, where the capacity of the structure was found to be maintained. Therefore, significant conclusions were reached for the material saving margins of the construction.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Ιστορικά στοιχεία	1
1.2	Εφαρμογή εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας	1
1.3	Αποθήκευση αιολικής ενέργειας	3
1.4	Διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας	4
1.5	Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική ενέργεια	4
1.6	Λειτουργία ανεμογεννητριών	5
1.7	Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα	5
1.7.1	Πυλώνας	7
1.8	Ανεμογεννήτριες κατακορύφου άξονα	7
1.9	Παραγόμενη ισχύς	8
2	ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	9
2.1	Οριακές καταστάσεις	9
2.2	Εξωτερικές συνθήκες	9
2.3	Καταστάσεις ελέγχου	11
2.4	Τύποι φορτίων	13
2.4.1	Αεροδυναμικά φορτία	13
2.4.1.1	Πτερύγια	13
2.4.1.2	Πυλώνας	14
2.4.2	Αδρανειακά φορτία	15
2.4.3	Ίδιον βάρος κατασκευής	15
2.4.4	Φορτία λειτουργίας	15
2.4.5	Άλλα φορτία	15
2.5	Συντελεστές ασφαλείας φορτίσεων	16
2.6	Συντελεστές ασφαλείας υλικών	16
2.7	Έλεγχοι	17
2.7.1	Πλαστικός έλεγχος	17
2.7.2	Έλεγχος ευστάθειας	17
2.7.2.1	Έλεγχος σε όρους τάσεων	17
2.7.2.2	Έλεγχος με καθολική αριθμητική ανάλυση	23
2.7.3	Έλεγχος σεισμού	24
2.7.4	Έλεγχος κόπωσης	24
2.7.5	Έλεγχος συντονισμού	24
2.8	Ατέλειες	25
2.8.1	Ατέλειες του υλικού	25

2.8.2	Γεωμετρικές ατέλειες	25
2.8.2.1	Απόκλιση από την κυκλικότητα.....	25
2.8.2.2	Αθέλητη εκκεντρότητα	26
2.8.2.3	Ανοχή κοιλώματος.....	27
2.8.3	Ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες	30
3	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ	31
3.1	Γεωμετρία	31
3.2	Υλικά.....	36
3.2.1	Πυλώνας.....	36
3.2.2	Κοχλίες	36
3.2.3	Κατασκευαστική κλάση	36
3.3	Φορτία	36
4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΕΑ	39
4.1	Διερεύνηση τύπου προσομοίωσης	39
4.1.1	1ο δοκιμαστικό μοντέλο	40
4.1.1.1	Αποτελέσματα αναλύσεων γραμμικής ανάλυσης λυγισμού	42
4.1.1.2	Έλεγχος σύγκλισης	44
4.1.2	2ο δοκιμαστικό μοντέλο	47
4.1.2.1	Αποτελέσματα γραμμικής ανάλυσης λυγισμού	49
4.1.2.2	Ατέλειες.....	50
4.1.2.3	Αποτελέσματα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες	51
4.1.2.4	Έλεγχος σύγκλισης	56
4.1.3	Επιλογή καταλληλότερου τύπου προσομοίωσης.....	59
4.2	Προσομοίωση φορέα.....	60
5	ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ.....	63
5.1	Στάθμη εφαρμογής φορτίων 1,15m.....	63
5.2	Στάθμη εφαρμογής φορτίων 11,48m.....	66
5.3	Στάθμη εφαρμογής φορτίων 26,32m.....	69
5.4	Στάθμη εφαρμογής φορτίων 46,20m.....	72
5.5	Στάθμη εφαρμογής φορτίων 64,40m.....	75
5.6	Στάθμη εφαρμογής φορτίων 89,60m.....	78
5.7	Στάθμη εφαρμογής φορτίων 117,67m.....	82
5.8	Βαθμονόμηση αποτελεσμάτων	86
5.9	Υπολογισμός αντοχής σχεδιασμού	86
6	ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ	89
7	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΗΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ	93

7.1	Σύνδεση μέρους 1 και 2	94
7.2	Σύνδεση μέρους 2 και 3	97
7.3	Σύνδεση μέρους 3 και 4	99
7.4	Σύνδεση μέρους 4 και 5	101
7.5	Σύνδεση μέρους 5 και 6	103
7.6	Σύνδεση μέρους 6 και 7	105
7.7	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.....	107
7.7.1	Έλεγχος ευστάθειας	107
7.7.2	Έλεγχος συντονισμού	109
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	111
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	113

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

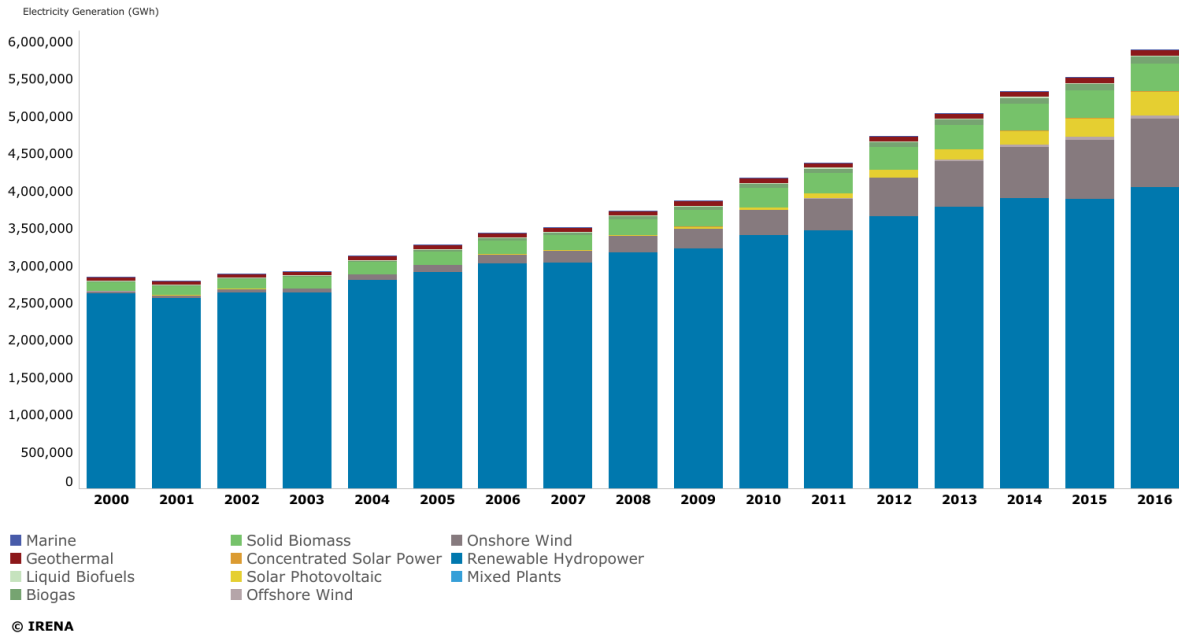
Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η χρήση αυξάνεται παγκοσμίως, εν μέρει επειδή το κόστος μειώνεται. Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς της αιολικής ενέργειας σε χερσαίες και υπεράκτιες εγκαταστάσεις έχει αυξηθεί κατά 75 περίπου φορές τις τελευταίες δύο δεκαετίες, από 7.5GW το 1997 σε περίπου 564GW έως το 2018. Η παραγωγή αιολικής ενέργειας διπλασιάστηκε μεταξύ 2009 και 2013 και το 2016 η αιολική ενέργεια αντιπροσώπευε το 16% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Πολλά μέρη του κόσμου έχουν ισχυρές ταχύτητες ανέμου, αλλά οι καλύτερες θέσεις για την παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι μερικές φορές απομακρυσμένες.

1.1 Ιστορικά στοιχεία

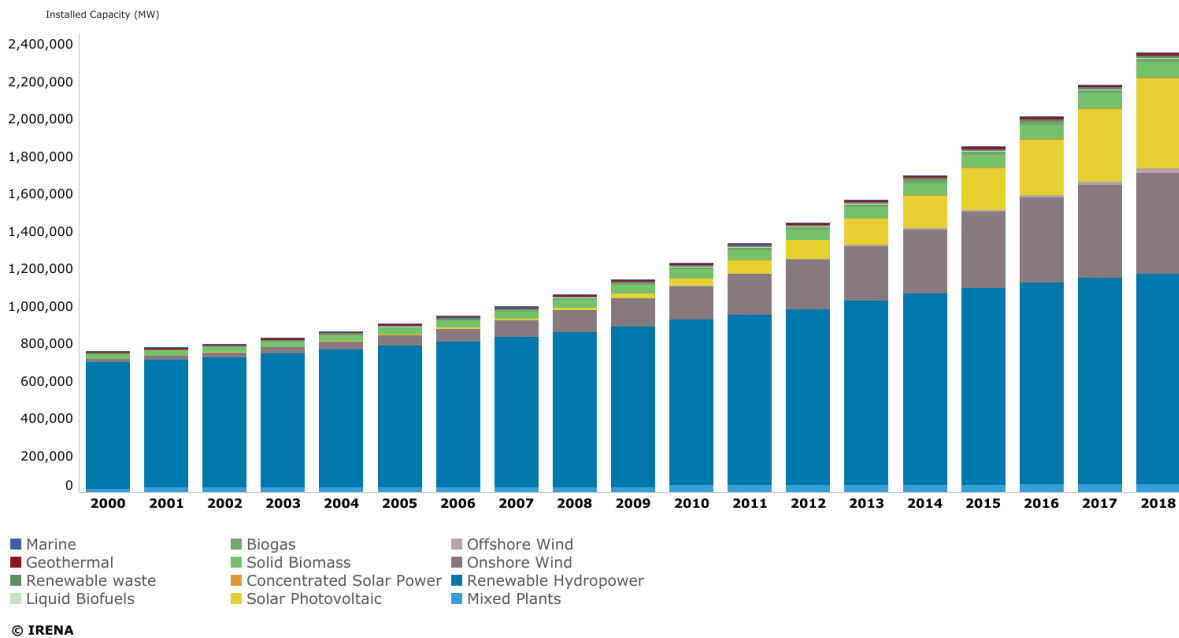
Οι ανεμογεννήτριες πρωτοεμφανίστηκαν, καθώς μετά την εφεύρεση της ηλεκτρικής γεννήτριας στη δεκαετία του 1830, οι μηχανικοί άρχισαν να προσπαθούν να αξιοποιήσουν την αιολική ενέργεια για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγωγή αιολικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο και τις Ηνωμένες Πολιτείες το 1887 και 1888, αλλά η σύγχρονη αιολική ενέργεια θεωρείται ότι αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στη Δανία, όπου ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα κατασκευάστηκαν το 1891 και ανεμογεννήτρια 22,8 μέτρων ξεκίνησε τη λειτουργία της το 1897. Η ισχύς των ανεμογεννητριών έχει αυξηθεί με την πάροδο του χρόνου. Το 1985, οι τυπικές ανεμογεννήτριες είχαν ονομαστική ισχύ 0,05 MW και διάμετρο έλικα 15m, ενώ οι σημερινές έχουν ισχύ περίπου 2 MW για χερσαίες και 3-5 MW για υπεράκτιες εγκαταστάσεις. Οι εμπορικά διαθέσιμες ανεμογεννήτριες έχουν φθάσει στα 8 MW, με διάμετρο έλικας έως 164 μέτρα, ενώ η μέση ισχύς των ανεμογεννητριών αυξήθηκε από 1,6 MW το 2009 σε 2 MW το 2014.

1.2 Εφαρμογή εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ραγδαία αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, γεγονός το οποίο οφείλεται κυρίως στις επιπτώσεις των συμβατικών μεθόδων παραγωγής ενέργειας στην κλιματική αλλαγή, με την εκμετάλλευση της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας να γνωρίζουν την μεγαλύτερη ανάπτυξη στην εφαρμογή τους.

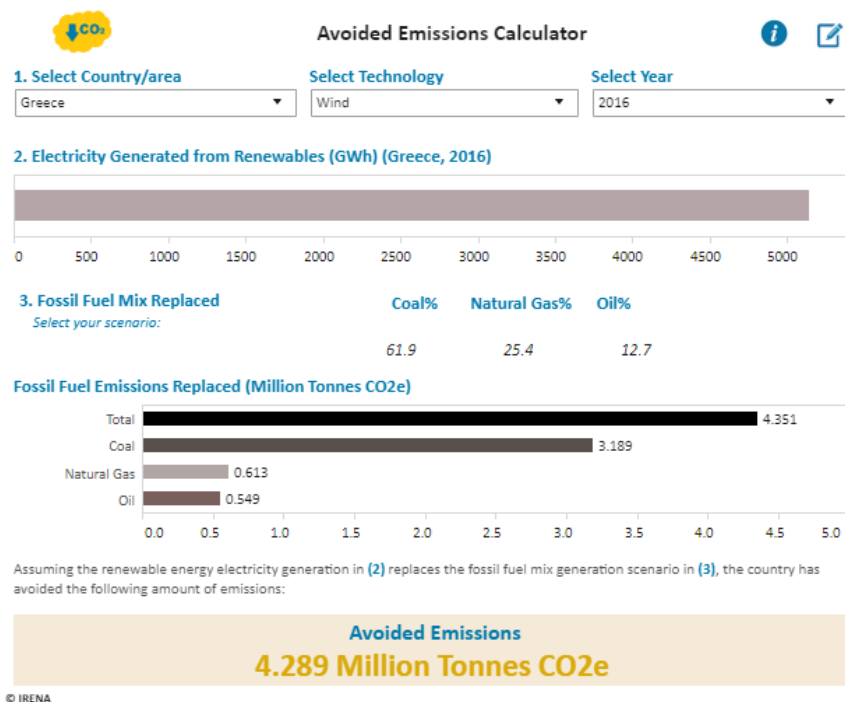


Γράφημα 1.1: Παραγόμενη ισχύς ανά τομέα ανανεώσιμης πηγής ενέργειας [23]



Γράφημα 1.2: Εγκατεστημένη ισχύς ανά τομέα ανανεώσιμης πηγής ενέργειας [23]

Ένας πολύ σημαντικό κριτήριο για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην πρόληψη της περαιτέρω επιδείνωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι ο περιορισμός των εκπομπών CO₂. Στο γράφημα 1.3 παρουσιάζεται ο περιορισμός των εκπομπών CO₂ στην Ελλάδα για το έτος 2016 από την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.



Γράφημα 1.3: Περιορισμός των εκπομπών CO₂ στην Ελλάδα για το έτος 2016 [23]

1.3 Αποθήκευση αιολικής ενέργειας

Σήμερα, η ανάπτυξη προηγμένων και οικονομικά αποδοτικών τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας παραμένει μια πρόκληση, η οποία μπορεί να περιορίσει την ευρεία εφαρμογή της τεχνολογίας για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Η έρευνα και ανάπτυξη νέων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι ιδιαίτερα επιθυμητή για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών και τη σταθεροποίηση της παραγωγής ενέργειας, ειδικά για της μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης αιολικής ενέργειας έχουν αναπτυχθεί εδώ και αρκετές δεκαετίες για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε διάφορες μορφές ενέργειας, όπως:

- Ηλεκτροχημική ενέργεια σε μπαταρίες και πυκνωτές
- Δυναμική ενέργεια με άντληση νερού σε υψηλότερα υψόμετρα
- Χημική ενέργεια με ηλεκτρόλυση νερού

Μεταξύ αυτών των τεχνικών, η πιο δημοφιλής μέθοδος είναι η χρήση μπαταριών. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα για τις συνηθισμένες μπαταρίες, όπως το κόστος, η μικρή διάρκεια ζωής, η διάβρωση και ζητήματα ρύπανσης κατά την αποβολή. Η έρευνα και η ανάπτυξη καινοτόμων μπαταριών βρίσκονται σε εξέλιξη. Έχει αναφερθεί ότι η τεχνολογία μπαταριών ιόντων λιθίου αναμένεται να παρέχει σταθερές λύσεις ηλεκτρικής ενέργειας για την αποτελεσματική χρήση στις ανανεώσιμες πηγές. Αναμένεται ότι οι ασφαλείς και αξιόπιστες μπαταρίες ιόντων λιθίου σύντομα θα συνδεθούν με φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες. Ο τύπος μπαταριών νατρίου-θείου είναι επίσης μία άλλη λύση για την αποθήκευση ενέργειας, που χρησιμοποιείται κατά προτίμηση για την αποθήκευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως η αιολική, η ηλιακή και η γεωθερμία.

1.4 Διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται για τη διάρκεια ζωής 20-30 έτη. Μια κρίσιμη πρόκληση που αντιμετωπίζουν οι κατασκευαστές είναι ο τρόπος επίτευξης των στόχων ζωής με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης και επισκευής. Η βελτίωση της αξιοπιστίας κατά την λειτουργία και η παράταση της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών είναι ιδιαίτερα απαιτητικές διαδικασίες για διάφορους λόγους:

- Οι ανεμογεννήτριες να εκτίθενται σε εξωτερικές συνθήκες όπως ακραίες θερμοκρασίες, διακυμάνσεις ταχύτητας ανέμου, υγρασία, σκόνη, ηλιακή ακτινοβολία, αστραπές, αλατότητα, βροχή, χαλαζόπτωση, χιόνι και πάγο
- Μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια αποτελείται από μεγάλο αριθμό εξαρτημάτων και συστημάτων, όπου κάθε ένα από αυτά έχει τη δική του διάρκεια ζωής

Μία ανεμογεννήτρια υπόκειται σε μεγάλη ποικιλία δυναμικών φορτίων εξαιτίας των διακυμάνσεων στην ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου και των πολυάριθμων εκκινήσεων και διακοπών της λειτουργίας με αποτέλεσμα ορισμένα κύρια μέλη ή εξαρτήματα πρέπει να αντέχουν σημαντικά φορτία κόπωσης. Η χρήση προηγμένων, υψηλής αντοχής υλικών, ανθεκτικών στην κόπωση, είναι ζωτικής σημασίας για ορισμένα βασικά μέρη των σύγχρονων μεγάλων ανεμογεννητριών λόγω της συνεχούς αύξησης του μήκους των πτερυγίων, του ύψους του πυλώνα, όπως και του βάρους.

1.5 Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική ενέργεια

Παρόλο που η βιομηχανία αιολικής ενέργειας εμφανίζεται αναπτυσσόμενη τα τελευταία χρόνια παγκοσμίως, η επίτευξη συνεχούς μείωσης του κόστους στην παραγωγή της εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση. Η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από χαμηλό μεταβλητό κόστος και σχετικά υψηλό σταθερό κόστος. Οι κύριοι παράγοντες που διέπουν την οικονομία της αιολικής ενέργειας είναι:

- Επενδυτικό κόστος, συμπεριλαμβανομένων των ανεμογεννητριών, των θεμελίων και της σύνδεσης στο δίκτυο
- Έξοδα λειτουργίας και συντήρησης, συμπεριλαμβανομένης της τακτικής συντήρησης, επισκευών και ανταλλακτικών
- Το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες, το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ισχύ των ανεμογεννητριών, το μέγεθος του αιολικού πάρκου και τη μέση ταχύτητα ανέμου στην επιλεγείσα τοποθεσία
- Διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας

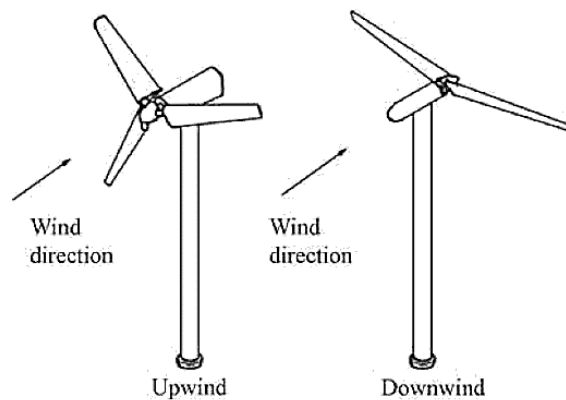
Οι σημαντικότεροι παράγοντες είναι η παραγωγή ηλεκτρισμού και το επενδυτικό κόστος. Η τάση προς μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα συμβάλλει στην μείωση τόσο των επενδύσεων όσο και των δαπανών ανά κιλοβατώρα (kWh) που παράγονται. Παρ' όλο που η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο έχει μειωθεί κατά περίπου 90% τα τελευταία 30 χρόνια λόγω των εξελίξεων στην τεχνολογία, είναι ακόμη πιο ακριβή από εκείνη που προέρχεται από τον άνθρακα ή το φυσικό αέριο. Για το έτος 2015 έχει υπολογιστεί το κόστος της αιολικής ενέργειας ως 30% περισσότερο από τον άνθρακα και περίπου 14% περισσότερο από το φυσικό αέριο. Αυτό είναι το μεγαλύτερο εμπόδιο στην αιολική ενέργεια να αυξήσει το μερίδιό της στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η παγκόσμια χρηματοπιστωτική και οικονομική κρίση, η οποία άρχισε από τις αρχές του 2008, έχει αλλάξει τον ρυθμό ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας. Με μειωμένη κατανάλωση, οι τιμές των ορυκτών καυσίμων (π.χ. άνθρακας και φυσικό αέριο) μειώθηκαν σημαντικά, ασκώντας ακόμη περισσότερες πιέσεις στη βιομηχανία αιολικής ενέργειας για να μειώσουν το κόστος της ούτως ώστε να παραμείνει ανταγωνιστική.

1.6 Λειτουργία ανεμογεννητριών

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται η κινητική ενέργεια που δημιουργείται από τον αέρα σε κίνηση. Αυτή μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας ανεμογεννήτριες ή άλλα συστήματα μετατροπής αιολικής ενέργειας. Ο αέρας προσπίπτει πρώτα στα πτερύγια, προκαλώντας την περιστροφή τους, φαινόμενο κατά το οποίο μεταβάλλεται η κινητική ενέργεια σε περιστροφική, στρέφοντας έναν άξονα ο οποίος συνδέεται με μια γεννήτρια, παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτρομαγνητισμού.

1.7 Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα

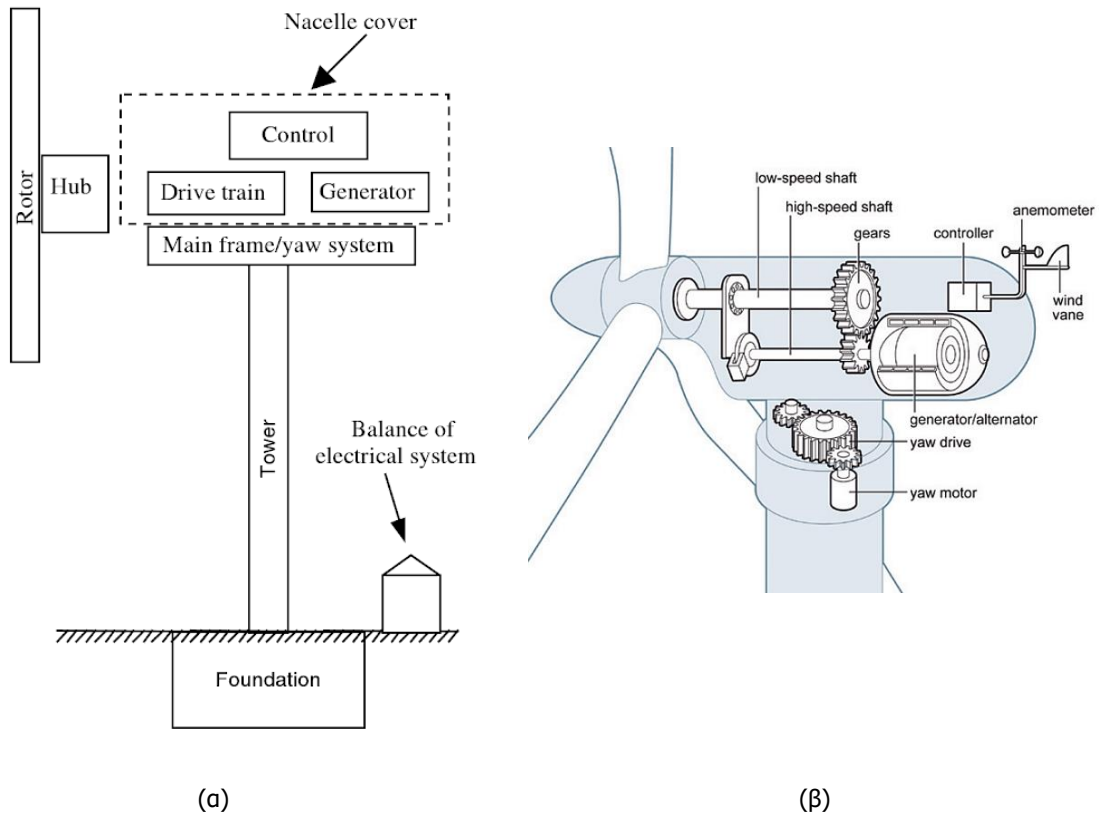
Σήμερα, ο συνηθέστερος τύπος ανεμογεννήτριας είναι οριζοντίου άξονα, δηλαδή ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος προς το έδαφος. Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα ταξινομούνται συνήθως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των πτερυγίων (στο εμπρός μέρος ή το πίσω της ροής του ανέμου), τον σχεδιασμό της πλήμνης, τον έλεγχο των πτερυγίων αναφορικά με την γωνία πρόσπτωσης της ροής (έλεγχος βήματος), τον αριθμό των πτερυγίων (συνήθως δύο ή τριών) και την δυνατότητα ευθυγράμμισης με την ροή του ανέμου ελεύθερα ή ενεργά.



Εικόνα 1: Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα με πτερύγια στο εμπρός ή πίσω μέρος της ροής του ανέμου [24]

Τα κύρια υποσυστήματα μίας τυπικής (χερσαίας) ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα είναι:

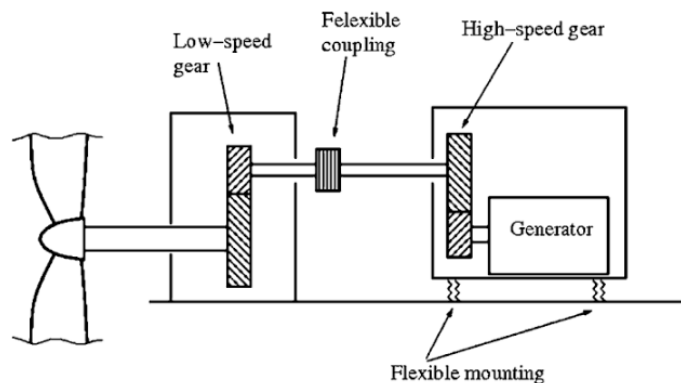
- Ο ρότορας, που αποτελείται από τα πτερύγια και την πλήμνη στήριξης
- Η μονάδα κίνησης, η οποία περιλαμβάνει τα περιστρεφόμενα μέρη της ανεμογεννήτριας (εκτός του ρότορα). Συνήθως αποτελείται από άξονες, κιβώτιο ταχυτήτων, σύνδεσμο, μηχανικό φρένο και την γεννήτρια
- Ο θάλαμος και το κυρίως πλαίσιο, συμπεριλαμβανομένου του περιβλήματος και του συστήματος περιστροφής
- Ο πυλώνας
- Η θεμελίωση
- Τα χειριστήρια του μηχανήματος
- Το ηλεκτρικό σύστημα, συμπεριλαμβανομένων των καλωδίων, των συσκευών μεταγωγής, των μετασχηματιστών και των ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος



Εικόνα 2: (α) Γενική διάταξη ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα^[24], (β) Λεπτομέρεια μηχανισμού λειτουργίας^[22]

Οι βασικές επιλογές σχεδιασμού και κατασκευής ανεμογεννητριών περιλαμβάνουν:

- Τον αριθμό των πτερυγίων (συνήθως δύο ή τρία)
- Τον προσανατολισμό του ρότορα: στο εμπρός μέρος ή το πίσω της ροής του ανέμου
- Το υλικό, την μέθοδο κατασκευής και το προφίλ των πτερυγίων
- Τον σχεδιασμό της πλήμνης: σταθερή ή ελαστικά στηριγμένη
- Τον έλεγχο της ισχύος με διακοπή λειτουργίας ή λεπίδων μεταβλητού βήματος
- Σταθερή ή μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής του ρότορα
- Ελεύθερη ή ελεγχόμενη ευθυγράμμιση με την ροή του ανέμου
- Παρεμβολή κιβωτίου ταχυτήτων ή γεννήτρια άμεσης κίνησης



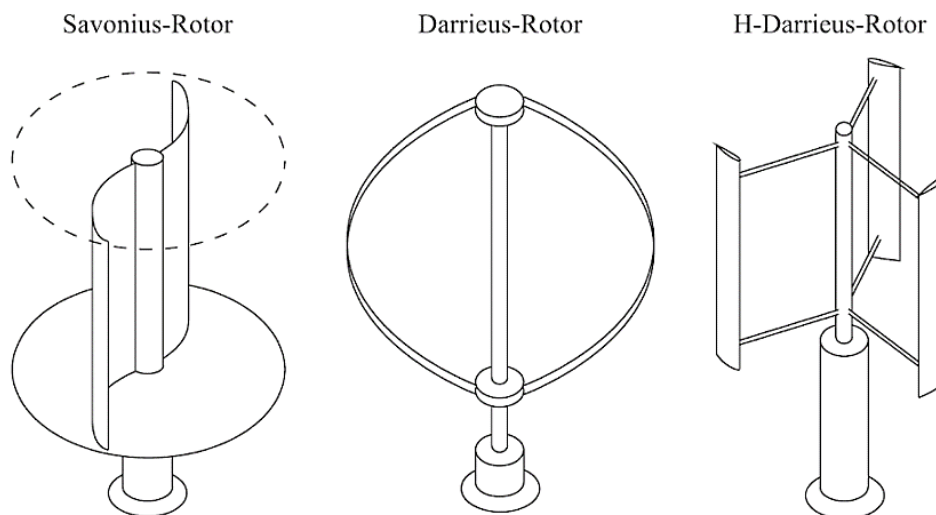
Εικόνα 3: Ελαστική στήριξη μηχανισμού ανεμογεννήτριας ^[25]

1.7.1 Πυλώνας

Οι κύριοι τύποι πυλώνων ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται σήμερα περιλαμβάνουν την χρήση χαλύβδινων σωλήνων, δικτυωμάτων, συμβατικού και προεντεταμένου σκυροδέματος, ενώ μπορεί να περιλαμβάνουν και συνδυασμό αυτών. Το ύψος του πυλώνα είναι τυπικά 1 έως 1,5 φορές μεγαλύτερο από την διάμετρο του ρότορα, ενώ συνήθως υπερβαίνει τουλάχιστον τα 20m. Η επιλογή του τύπου του πυλώνα επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας. Η δυσκαμψία του πύργου είναι ένας σημαντικός παράγοντας στη δυναμική απόκριση του συστήματος λόγω της πιθανότητας συντονισμού μεταξύ της περιστροφής ρότορα και του πυλώνα.

1.8 Ανεμογεννήτριες κατακορύφου άξονα

Μία άλλη λιγότερο επιτυχημένη εφαρμογή είναι η ανεμογεννήτρια κατακορύφου άξονα. Αυτή η ιδέα μελετήθηκε εκτενώς τόσο στις Ηνωμένες Πολιτείες όσο και στον Καναδά τη δεκαετία του 1970 και του 1980. Αναπτύχθηκαν δύο τύποι, όπου ο πρώτος εκμεταλλεύεται την οπισθέλκουσα δύναμη και ονομάζεται τύπου Savonius, ενώ ο δεύτερος εκμεταλλεύεται την κάθετη αεροδυναμική συνιστώσα και ονομάζεται τύπου Darrieus. Παρά τα ορισμένα ευνοϊκά χαρακτηριστικά, οι ανεμογεννήτριες κατακορύφου άξονα έχουν μερικά σημαντικά προβλήματα, όπως σημαντικά χαμηλότερη απόδοση, δυσκολία εκκίνησης που οδηγεί σε χρήση επιπλέον μηχανισμού για την εκκίνηση της περιστροφής, αδυναμία εκμετάλλευσης ισχυρών ανέμων εξαιτίας του περιορισμένου ύψους τους και θέματα αξιοπιστίας.



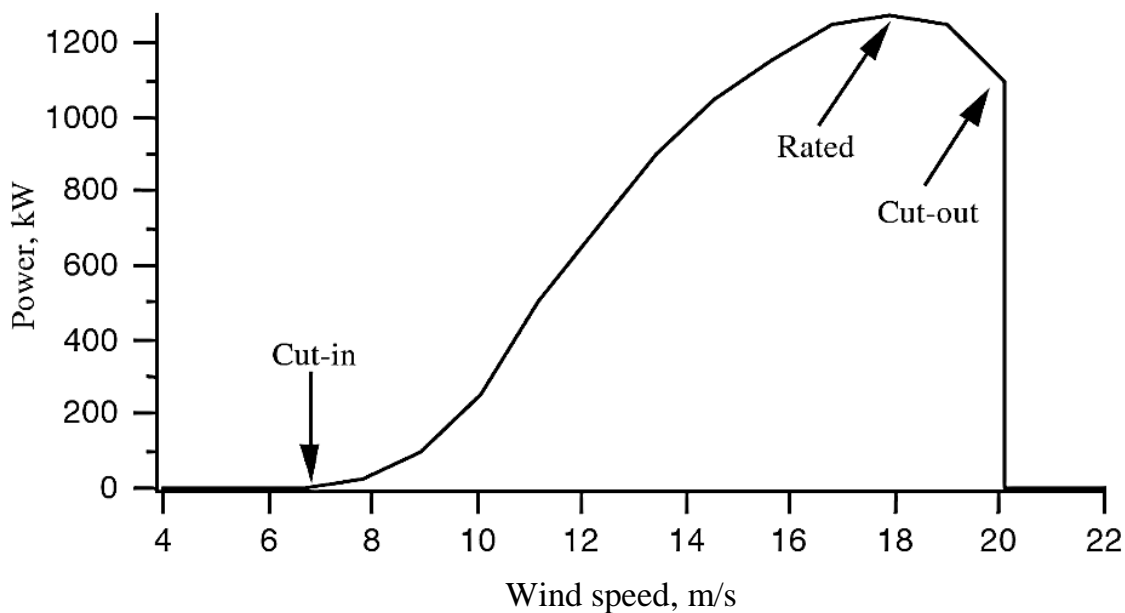
Εικόνα 4: Τύποι ανεμογεννητριών κατακορύφου άξονα [25]

1.9 Παραγόμενη ισχύς

Η ισχύς μιας ανεμογεννήτριας ποικίλλει ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου, ενώ κάθε ανεμογεννήτρια έχει μία χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος. Με την χρήση αυτής της καμπύλης είναι δυνατόν να προβλεφθεί η παραγωγή ενέργειας μιας ανεμογεννήτριας χωρίς να ληφθούν υπόψη οι τεχνικές λεπτομέρειες των διαφόρων συνιστωσών της. Η καμπύλη ισχύος δίνει την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ως συνάρτηση της ταχύτητας ανέμου στο ύψος της πλήμνης. Οι καμπύλες ισχύος για δεδομένες εγκαταστάσεις παρέχονται από τον κατασκευαστή, οι οποίες υπολογίζονται από δοκιμές που πραγματοποιούνται.

Η απόδοση μιας δεδομένης γεννήτριας μπορεί να σχετίζεται με τρία βασικά σημεία της κλίμακας ταχύτητας ανέμου:

- Ελάχιστη ταχύτητα αποκοπής: η ελάχιστη ταχύτητα ανέμου στην οποία η γεννήτρια θα παρέχει χρήσιμη ισχύ
- Ονομαστική ταχύτητα ανέμου: η ταχύτητα ανέμου στην οποία επιτυγχάνεται η ονομαστική ισχύς
- Μέγιστη ταχύτητα αποκοπής: η μέγιστη ταχύτητα ανέμου με την οποία επιτρέπεται η παροχή ισχύος



Γράφημα 1.4: Παράδειγμα καμπύλης απόδοσης ανεμογεννήτριας [24]

2 ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

2.1 Οριακές καταστάσεις

Ως μέρος της διαδικασίας του σχεδιασμού πρέπει να γίνουν έλεγχοι για τις φορτίσεις τις οποίες η ανεμογεννήτρια αναμένεται να αντιμετωπίσει στην διάρκεια ζωής της κατασκευής. Αναγκαία συνθήκη είναι η αντοχή του φορέα να υπερβαίνει τις δράσεις με σημαντική ασφάλεια, ώστε η κατασκευή να θεωρείται επαρκής. Οι έλεγχοι πραγματοποιούνται σε δύο κατηγορίες οριακών καταστάσεων με διαφορετικά κριτήρια για την κάθε μία.

Στην οριακή κατάσταση αστοχίας αντικείμενο ελέγχου είναι η σύγκριση των δράσεων της κατάστασης αυτής με την αντίστοιχη αντοχή του φορέα. Κριτήριο περιορισμού της αντοχής είναι η ανικανότητα της κατασκευής να φέρει οποιαδήποτε επιπλέον φορτία, γεγονός το οποίο μπορεί να προκληθεί από:

- Απώλεια μελών λόγω αστοχίας υλικού
- Απώλεια ευστάθειας
- Κόπωση
- Απώλεια στατικής ισορροπίας

Στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας χρησιμοποιούνται διάφορα κριτήρια για τον έλεγχο της επάρκειας της κατασκευής όπως:

- Μετακινήσεις
- Ταλαντώσεις
- Τάσεις
- Εύρος ρωγμής

2.2 Εξωτερικές συνθήκες

Οι εξωτερικές συνθήκες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό εξαρτώνται από την τοποθεσία της εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας. Σύμφωνα με το πρότυπο πιστοποίησης του οργανισμού "Germanischer Lloyd" ^[8] γίνεται κατάταξη των ανεμογεννητριών σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου και των παραμέτρων τυρβώδους ροής. Οι παράμετροι αυτές είναι ενδεικτικές των χαρακτηριστικών τιμών που αντιπροσωπεύουν κάθε τοποθεσία χωρίς ιδιαίτερη ακρίβεια. Για τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την ταχύτητα του ανέμου γίνεται χρήση των κατηγοριών I, II, III ενώ για τον διαχωρισμό της επίδρασης της τύρβης γίνεται χρήση των κατηγοριών A, B. Επιπλέον ορίζεται η κατηγορία S στην οποία οι τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών παρέχονται από τον κατασκευαστή.

Πίνακας 2.1: Κατηγορίες χαρακτηριστικών ροής ανέμου ^[8]

Wind turbine class	I	II	III	S
- V_{ref} [m/s]	50	42.5	37.5	Values to be specified by the manufacturer
- V_{ave} [m/s]	10	8.5	7.5	
- A I_{15} (-)	0.18	0.18	0.18	
- a (-)	2	2	2	
- B I_{15} (-)	0.16	0.16	0.16	
- a (-)	3	3	3	

όπου:

- V_{ref} η ταχύτητα ανέμου αναφοράς. Άνεμος αναφοράς ορίζεται ο άνεμος με μέγιστη μέση ταχύτητα για δεκάλεπτη πνοή και περίοδο επαναφοράς τα πενήντα έτη.
- V_{ave} μέση ταχύτητα ανέμου για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (δευτερόλεπτα, λεπτά, έτη). Στην προκειμένη περίπτωση αναφέρεται σε διάστημα αρκετών ετών.
- I_{15} χαρακτηριστική τιμή της έντασης τύρβης για ταχύτητα ανέμου 15 m/s.
- α παράμετρος για τον προσδιορισμό της έντασης τύρβης στο ύψος της πλήμνης.

Η κυριότερη εξωτερική συνθήκη που επηρεάζει τον σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας είναι ο άνεμος. Σύμφωνα με το πρότυπο πιστοποίησης του οργανισμού "Germanischer Lloyd" ^[8] γίνεται διαχωρισμός μεταξύ των κανονικών συνθηκών ανέμου, οι οποίες αναμένεται να παρουσιάζονται συχνά κατά την διάρκεια λειτουργίας της κατασκευής και των ακραίων συνθηκών ανέμου που ορίζονται ως οι συνθήκες εκείνες με περίοδο επαναφοράς 1 έτος και 50 έτη. Οι συνθήκες αυτές είναι:

Κανονικές συνθήκες ανέμου

- Κατανομή ταχύτητας ανέμου (Wind speed distribution)
- Κανονική τομή κατανομής ανέμου (Normal profile wind model-**NWP**)
- Κανονικές συνθήκες τύρβης (Normal turbulence model-**NTM**)

Ακραίες συνθήκες ανέμου

- Ταχύτητα ανέμου σε ακραίες συνθήκες (Extreme wind model-**EWM**)
- Ακραία τιμή ταχύτητας ριπής ανέμου για συνθήκες λειτουργίας (Extreme operating gust-**EOG**)
- Ακραία αλλαγή διεύθυνσης ανέμου (Extreme direction change-**EDC**)
- Ακραία παρατεταμένη ριπή (Extreme coherent gust-**ECG**)
- Ακραία παρατεταμένη ριπή με αλλαγή διεύθυνσης (**ECD**)
- Ακραία εναλλαγή κλίσης ανέμου (Extreme wind shear-**EWS**)

Εκτός από τον άνεμο πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν και άλλες περιβαλλοντικές συνθήκες που μπορεί να επηρεάσουν την ακεραιότητα και την ασφάλεια της ανεμογεννήτριας, όπως οι θερμοκρασιακές, φωτοχημικές, διαβρωτικές, μηχανικές και ηλεκτρικές δράσεις. Οι κυριότερες συνθήκες οι οποίες πρέπει κατ' ελάχιστον να ελέγχονται είναι:

- Κανονικές και ακραίες μεταβολές θερμοκρασίας
- Υγρασία
- Πυκνότητα αέρα
- Ηλιακή ακτινοβολία
- Βροχή, χαλάζι, χιόνι και σχηματισμός πάγου
- Χημικά δραστικές ουσίες
- Κεραυνός
- Σεισμός
- Αλατότητα

2.3 Καταστάσεις ελέγχου

Οι καταστάσεις φόρτισης που ελέγχονται για μία ανεμογεννήτρια δημιουργούνται από τον συνδυασμό των καταστάσεων σχεδιασμού και των αντίστοιχων εξωτερικών συνθηκών. Οι ακόλουθοι συνδυασμοί πρέπει να συμπεριλαμβάνουν κατ' ελάχιστον:

- Κανονική λειτουργία με συνήθεις εξωτερικές συνθήκες
- Κανονική λειτουργία με ακραίες εξωτερικές συνθήκες
- Βλάβη στην λειτουργία με κατάλληλες εξωτερικές συνθήκες, όπως βραχυκύκλωμα του κινητήρα, σφάλμα του δικτύου ή σφάλμα του μηχανισμού πέδησης
- Καταστάσεις μεταφοράς, εγκατάστασης και συντήρησης με τις κατάλληλες εξωτερικές συνθήκες

Προκειμένου να ληφθούν υπόψιν οι παραπάνω καταστάσεις παράγονται οι εξής συνθήκες προς έλεγχο:

- Παραγωγή ενέργειας
- Παραγωγή ενέργειας με την παρουσία βλάβης
- Εκκίνηση γεννήτριας
- Κανονική διακοπή λειτουργίας
- Διακοπή λειτουργίας εκτάκτου ανάγκης
- Κατάσταση αναμονής
- Κατάσταση αναμονής με την παρουσία βλάβης
- Μεταφορά, ανέγερση, συντήρηση και επιδιόρθωση
- Κατάσταση παραγωγής ενέργειας ή αναμονής με παρατεταμένη παρουσία δευτερευουσών συνθηκών

Πίνακας 2.2: Καταστάσεις φόρτισης σχεδιασμού [8]

Design situation	DLC	Wind conditions ¹	Other conditions	Type of analysis	Partial safety factors
1. Power production	1.1	NTM $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		F / U	* / N
	1.2	omitted			
	1.3	ECD $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_T$		U	N
	1.4	NWP $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Grid loss	F / U	* / N
	1.5	EOG ₁ $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Grid loss	U	N
	1.6	EOG ₅₀ $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		U	N
	1.7	EWS $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		U	N
	1.8	NWP $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Ice formation	F / U	* / N
2. Power production plus occurrence of fault	2.1	NWP $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Fault in the control system	F / U	* / N
	2.2	NWP $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Fault in the safety system or preceding internal electrical fault	F / U	* / A
3. Start-up	3.1	NWP $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		F / U	* / N
	3.2	EOG ₁ $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		U	N
4. Normal shut-down	4.1	NWP $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		F / U	* / N
	4.2	EOG ₁ $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		U	N
5. Emergency shut-down	5.1	NWP $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$		U	N
6. Parked (standstill or idling)	6.1	EWM Recurrence period 50 years		U	N
	6.2	EWM Recurrence period 50 years	Grid loss	U	A
	6.3	EWM Recurrence period 1 year	Extreme oblique inflow	U	N
	6.4	NTM $V_{hub} < V_{in}$ and $V_{out} < V_{hub} < 0.8 V_{ref}$		F / U	* / N
7. Parked plus fault conditions	7.1	EWM Recurrence period 1 year		U	A
8. Transport, erection, maintenance and repair	8.1	EOG ₁ $V_{hub} = V_T$ or NWP $V_{hub} = \max(EOG_1 \text{ based on } V_T)$	To be specified by the manufacturer	U	T
	8.2	EWM Recurrence period 1 year	Locked state	U	A
* Partial safety factor for fatigue strength (see Section 4.3.5.2.2)					
¹ If no cut-out wind speed V_{out} is defined, V_{ref} shall be used.					

Πίνακας 2.3: Καταστάσεις φόρτισης σχεδιασμού με παρουσία δευτερευόντων συνθηκών [8]

Design situation	DLC	Wind conditions ¹	Other conditions	Type of analysis	Partial safety factors
Power production	9.1	NWP $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Ice formation	F / U	* / N
	9.2	NWP $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Grid failure	F / U	* / N
	9.3	NTM $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Wind farm influence	F / U	* / N
	9.4	NWP $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Temperature effects	F / U	* / N
	9.5	NTM $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Earthquake	U	**
	9.6	NWP $V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$	Earthquake plus grid loss and, if applicable, activation of the safety system by vibration sensor	U	**
Parked (standstill or idling)	9.7	NWP $V_{hub} = 0.8 V_{ref}$	Earthquake and grid loss	U	**
	9.8	NWP $V_{hub} = 0.8 V_{ref}$	Temperature effects	U	N
* Partial safety factor for fatigue strength (see Section 4.3.5.2.2)					
** Partial safety factor for earthquakes (see Section 4.3.5.4)					
¹ If no cut-out wind speed V_{out} is defined, V_{ref} shall be used.					

2.4 Τύποι φορτίων

2.4.1 Αεροδυναμικά φορτία

Τα φορτία τα οποία δέχεται η κατασκευή από τον άνεμο δημιουργούνται από την διαφορά πίεσης που δημιουργείται στην ροή όταν αυτή προσπίπτει στα πτερύγια και τον πυλώνα. Η πλέον ακριβής μέθοδος προσδιορισμού των φορτίων αυτών είναι οι αεροελαστικές αναλύσεις, κατά τις οποίες λαμβάνονται υπόψιν τα χαρακτηριστικά της ροής του ρευστού στην παραμορφωμένη γεωμετρία εξαιτίας των αεροδυναμικών πιέσεων.

2.4.1.1 Πτερύγια

Ο υπολογισμός των αεροδυναμικών φορτίων στα πτερύγια είναι αρκετά σύνθετος εξαιτίας της ροής του αέρα η οποία επηρεάζεται από την περιστροφή αυτών. Προκειμένου να γίνει εκτίμηση πολύ καλής ποιότητας απαιτούνται λογισμικά τα οποία να εκτελέσουν αναλύσεις υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), ή πειραματικές διατάξεις. Προτείνονται επιπλέον απλοποιημένες μέθοδοι για τον υπολογισμό αυτού του φαινομένου, βασισμένες στην κλασική μηχανική των ρευστών με μικρές τροποποιήσεις ούτως ώστε να ληφθεί υπόψιν η περιστροφή, μία εξ αυτών περιγράφεται στο πρότυπο του οργανισμού "DNV/Riso":

Η άντωση υπολογίζεται ως:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho c W^2 \quad (2.1)$$

Η οπισθέλκουσα δύναμη υπολογίζεται ως:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho c W^2 \quad (2.2)$$

όπου:

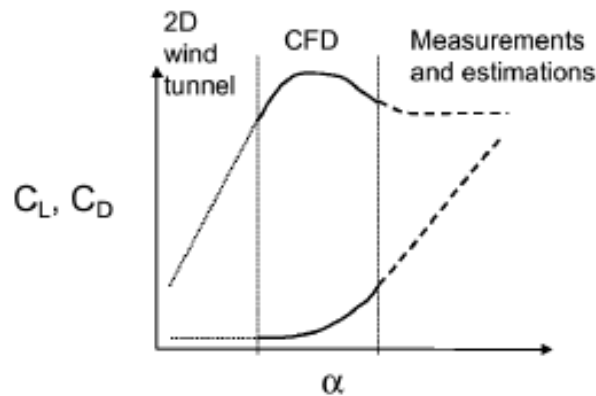
C_L συντελεστής άντωσης

C_D συντελεστής οπισθέλκουσας

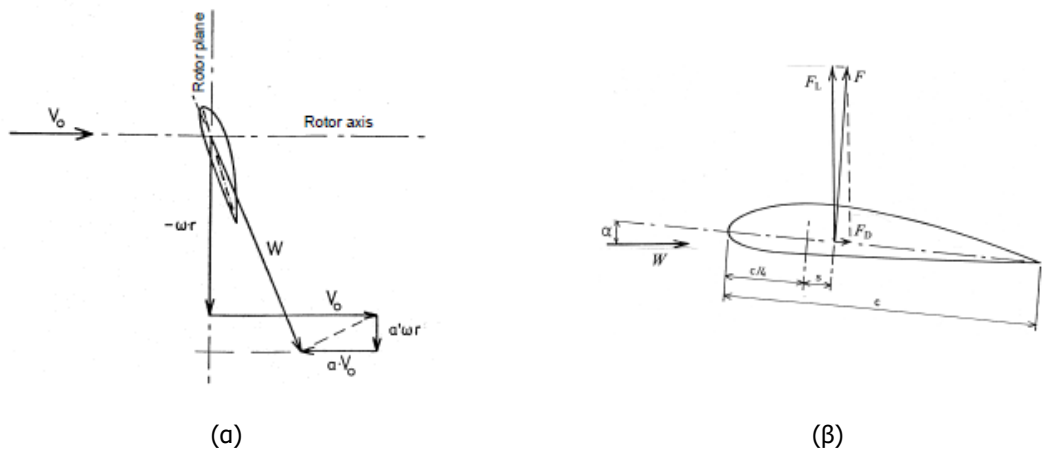
ρ πυκνότητα του αέρα

c μήκος προφίλ του πτερυγίου

W η ταχύτητα της ροής που συναντά η περιστρεφόμενη πτέρυγα η οποία επηρεάζεται από την κίνηση και των υπολοίπων μέσα στην ροή



Γράφημα 2.1: Μεταβολή των συντελεστών C_L , C_D για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης της ροής του ανέμου στα πτερύγια [7]



Εικόνα 5: (α) Συστοιχίες ταχύτητας ροής ανέμου κατά την περιστροφή των πτερυγίων (β) Συστοιχίες δυνάμεων άνωσης και οπισθέλκουσας [7]

2.4.1.2 Πυλώνας

Εξαιτίας του απλού σχήματος του πυλώνα η εξαγωγή των αεροδυναμικών φορτίων σε αυτόν είναι σχετικά απλή και ανάγεται στον υπολογισμό της αεροδυναμικής αντίστασης κυλίνδρου από την σχέση:

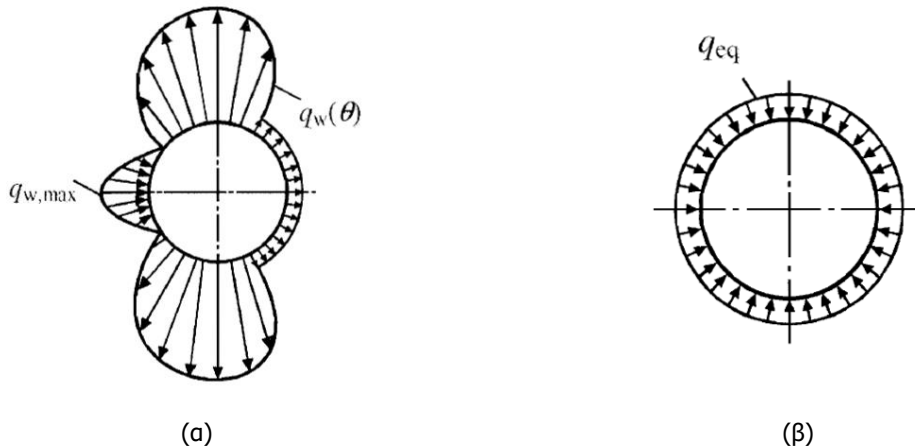
$$F_D = 0,5\rho AV_0^2 C_D \quad (2.3)$$

όπου:

C_D συντελεστής οπισθέλκουσας

A προσιπτόουσα επιφάνεια (προβολή της επιφάνειας κάθετα στην ροή)

Η κατανομή των πιέσεων στην επιφάνεια του πυλώνα δεν είναι ομοιόμορφη εμφανίζοντας εναλλαγές πίεσης και υποπίεσης. Προκειμένου να γίνεται ευκολότερα η μοντελοποίηση αυτών των φορτίων για τον έλεγχο σε περιφερειακή θλίψη του κελύφους υιοθετείται στον EN 1993-1-6 ^[1] μία ισοδύναμη κατανομή ως προς την επίδρασή της στον λυγισμό κατά την εγκάρσια έννοια και προφανώς όχι ως προς την συνισταμένη των δυνάμεων όπως φαίνεται και στην εικόνα 6.



Εικόνα 6: (α) Εξιδανικευμένη κατανομή αεροδυναμικών πιέσεων σε κυκλική διατομή (β) Ισοδύναμη κατανομή για έλεγχο σε περιφερειακή θλίψη ^[1]

2.4.2 Αδρανειακά φορτία

Τα φορτία αυτά είναι δυναμικά και προκαλούνται από την περιστροφή των πτερυγίων η οποία αφενός δημιουργεί μία συγκεντρωμένη ροπή λόγω της αρχής διατήρησης της στροφορμής και αφετέρου προκαλεί κεντρομόλο δύναμη.

2.4.3 Ίδιον βάρος κατασκευής

Το ίδιο βάρος της κατασκευής συνίσταται από το βάρος του πυλώνα και από το βάρος των εξαρτημάτων της κορυφής το οποίο δρα έκκεντρα ως προς τον άξονα του πυλώνα.

2.4.4 Φορτία λειτουργίας

Τα φορτία αυτά προκαλούνται κατά την λειτουργία της ανεμογεννήτριας και κατατάσσονται σε συγκεκριμένες κατηγορίες όπως ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων, η αλλαγή κλίσης πτερυγίων, η επιβράδυνση και επιτάχυνση αυτών όπως επίσης η σύμπλεξη ή αποσύμπλεξη της γεννήτριας.

2.4.5 Άλλα φορτία

Άλλα φορτία, όπως για παράδειγμα φορτία κυματισμών ή πρόσκρουσης, πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν στις κατάλληλες περιπτώσεις.

2.5 Συντελεστές ασφαλείας φορτίσεων

Οι μερικοί συντελεστές ασφαλείας των φορτίων ορίζονται με βάση την οριακή κατάσταση που εξετάζεται, την κατάσταση σχεδιασμού από την οποία εξαγονται 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 2.4.

Πίνακας 2.4: Συντελεστές ασφαλείας φορτίσεων για την οριακή κατάσταση αστοχίας [8]

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.

Τα φορτία σχεδιασμού υπολογίζονται ως:

$$F_d = \gamma_F F_k \quad (2.4)$$

όπου:

- F_d τιμές σχεδιασμού φορτίσεων
- γ_f μερικός συντελεστής ασφαλείας φορτίσεων
- F_k χαρακτηριστικές τιμές των φορτίσεων

2.6 Συντελεστές ασφαλείας υλικών

Οι μερικοί 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:

$$R_d = R_k / \gamma_M \quad (2.5)$$

όπου:

- R_d τιμή αντίστασης σχεδιασμού
- γ_M μερικός συντελεστής ασφαλείας υλικού
- R_k χαρακτηριστική τιμή αντίστασης

2.7 Έλεγχοι

2.7.1 Πλαστικός έλεγχος

Ο έλεγχος αυτός αναφέρεται στην οριακή κατάσταση πλαστικότητας (Plastic Limit State, LS1 ^[1]). Λαμβάνεται ως η κατάσταση στην οποία η αντοχή της κατασκευής στην περαιτέρω παραλαβή φορτίων εξαντλείται από την διαρροή του υλικού. Η αντοχή που διαθέτει η κατασκευή στην κατάσταση αυτή μπορεί να προσδιοριστεί από θεώρηση μικρών μετατοπίσεων. Για τον έλεγχο αυτόν μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο μέθοδοι: περιορισμού των τάσεων και καθολικής αριθμητικής ανάλυσης. 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. Ο έλεγχος αυτός παρέχει συντηρητικά αποτελέσματα και δύναται να παραλειφθεί εφόσον ικανοποιείται ο έλεγχος της παραγράφου 2.7.2.

2.7.2 Έλεγχος ευστάθειας

Ο έλεγχος αυτός αναφέρεται ως οριακή κατάσταση του λυγισμού (Buckling Limit State, LS3 ^[1]). Θεωρείται ως η κατάσταση στην οποία ολόκληρη ή μέρος της κατασκευής ξαφνικά αναπτύσσει μεγάλες μετατοπίσεις κάθετα στην επιφάνεια του κελύφους, που προκαλούνται από απώλεια ευστάθειας, εξαιτίας θλιπτικών ή/και διατμητικών τάσεων, οδηγώντας σε αδυναμία της κατασκευής να φέρει οποιαδήποτε επιπλέον φορτία, καταλήγοντας πιθανώς σε ολική κατάρρευση. Για τον έλεγχο αυτόν μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο μέθοδοι: περιορισμού των τάσεων και καθολικής αριθμητικής ανάλυσης.

2.7.2.1 Έλεγχος σε όρους τάσεων

Ο έλεγχος σε όρους τάσεων στηρίζεται σε ελαστική ανάλυση, προσδιορίζοντας τη οριακή κατάσταση με απομειωμένη αντοχή του υλικού. Η αντοχή, λαμβάνοντας υπόψιν και φαινόμενα λυγισμού, προσδιορίζεται από την απομείωση της αντοχής του υλικού.

Οι τιμές της αντοχής σχεδιασμού σε όρους τάσεων υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\sigma_{\chi,Rd} = \frac{\sigma_{\chi,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad \sigma_{\theta,Rd} = \frac{\sigma_{\theta,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad \tau_{\chi\theta,Rd} = \frac{\tau_{\chi\theta,Rk}}{\gamma_{M1}} \quad (2.6)$$

$$\sigma_{\chi,Rk} = \chi_x f_{yk} \quad \sigma_{\theta,Rd} = \chi_{\theta} f_{yk} \quad \tau_{\chi\theta,Rd} = \frac{\chi_{\tau} f_{yk}}{\sqrt{3}} \quad (2.7)$$

Οι συντελεστές απομείωσης χ_x , χ_{θ} και χ_{τ} είναι συνάρτηση της ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}$:

$$\chi = 1 \quad \text{όταν } \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad (2.8)$$

$$\chi = 1 - \beta \left(\frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^{\eta} \quad \text{όταν } \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda} < \bar{\lambda}_p \quad (2.9)$$

$$\chi = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2} \quad \text{όταν } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda} \quad (2.10)$$

όπου:

- α συντελεστής απομείωσης ατελειών
- β συντελεστής διαστήματος πλαστικότητας
- η εκθέτης αλληλεπίδρασης
- $\bar{\lambda}_0$ όριο σύνθλιψης της ανηγμένης λυγηρότητας

Η τιμή του ορίου ανηγμένης πλαστικότητας $\bar{\lambda}_p$ υπολογίζεται από την σχέση :

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad (2.11)$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα, ανάλογα με την υπολογιζόμενη τάση, ορίζεται ως:

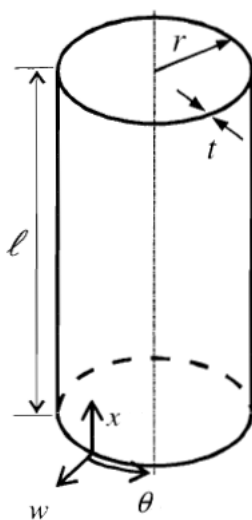
$$\bar{\lambda}_\chi = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\chi,Rcr}}} \quad \bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{\theta,Rcr}}} \quad \bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sqrt{3}\tau_{\chi\theta,Rcr}}} \quad (2.12)$$

όπου:

- $\sigma_{\chi,Rcr}$ η ιδεατή τάση κύρτωσης λόγω αξονικής θλίψης
- $\sigma_{\theta,Rcr}$ η ιδεατή τάση κύρτωσης λόγω περιφερειακής θλίψης
- $\tau_{\chi\theta,Rcr}$ η ιδεατή τάση διατμητικής κύρτωσης

Υπολογισμός ιδεατής τάσης κύρτωσης σύμφωνα με το παράρτημα D του EN1993-1-6 [1]

Οι τάσεις από τις οποίες καταπονείται κυρίως ο φορέας είναι ορθές θλιπτικές κατά την αξονική διεύθυνση. Ενδεικτικά παρατίθεται η διαδικασία και ο υπολογισμός για την $\sigma_{\chi,Rcr}$.



l το μήκος του κυλίνδρου μεταξύ συνοριακών συνθηκών

r ακτίνα της μέσης επιφάνειας του κυλίνδρου

t πάχος του κυλίνδρου

Δw_k χαρακτηριστικό μέγεθος ατέλειας

Εικόνα 7: Δοκιμαστική γεωμετρία ελέγχου [1]

Για να χαρακτηριστεί το μήκος του εξεταζόμενου τμήματος υπολογίζεται η αδιάστατη παράμετρος μήκους ω :

$$\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}} \quad (2.13)$$

Η ιδεατή τάση κύρτωσης δίνεται από την σχέση :

$$\sigma_{x,Rcr} = 0.605EC_x \frac{t}{r} \quad (2.14)$$

Ο συντελεστής C_x εξαρτάται από το αδιάστατο μήκος του κυλίνδρου ω .

Για κυλίνδρους μεσαίου μήκους που ορίζονται για :

$$1,7 \leq \omega \leq 0,5 \frac{r}{t} \quad (2.15)$$

ο συντελεστής πρέπει να ληφθεί ίσος με την μονάδα ($C_x = 1$).

Για κοντούς κυλίνδρους που ορίζονται για :

$$\omega \leq 1,7 \quad (2.16)$$

ο συντελεστής C_x λαμβάνεται από την εξίσωση 2.17

$$C_x = 1,36 - \frac{1,83}{\omega} + \frac{2,07}{\omega^2} \quad (2.17)$$

Για κυλίνδρους μεγάλου μήκους που ορίζονται για :

$$\omega \leq 0,5 \frac{r}{t} \quad (2.18)$$

Ο συντελεστής λαμβάνεται από την εξίσωση 2.19

$$C_x = C_{x,N} \quad (2.19)$$

Όπου $C_{x,N}$ λαμβάνεται το μεγαλύτερο από τις εξισώσεις 2.20 και 2.21.

$$C_{x,N} = 1 + \frac{0,2}{C_{xb}} \left(1 - 2\omega \frac{t}{r} \right) \quad (2.20)$$

$$C_{x,N} = 0,6 \quad (2.21)$$

Ο συντελεστής C_{xb} σχετίζεται με τις συνοριακές συνθήκες οι οποίες περιγράφονται στον πίνακα 2.6 και λαμβάνεται σύμφωνα με τον πίνακα 2.5.

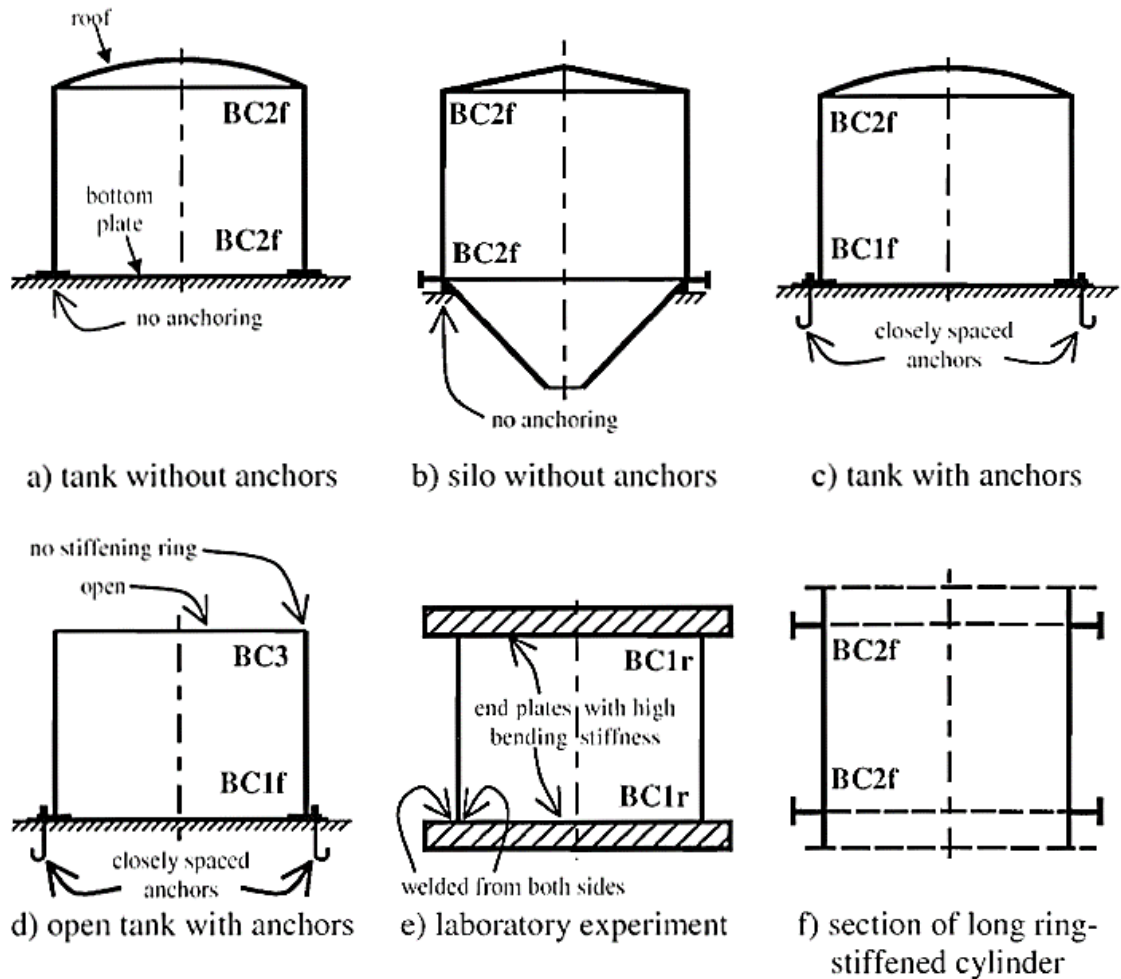
Πίνακας 2.5: Τιμές συντελεστή C_{xb} ανάλογα με τις συνοριακές συνθήκες ^[1]

Case	Cylinder end	Boundary condition	C_{xb}
1	end 1	BC 1	6
	end 2	BC 1	
2	end 1	BC 1	3
	end 2	BC 2	
3	end 1	BC 2	1
	end 2	BC 2	

Πίνακας 2.6: Είδη συνοριακών συνθηκών ^[1]

Boundary condition code	Simple term	Description	Normal displacement s	Meridional displacements	Meridional rotation
BC1r	Clamped	radially restrained meridionally restrained rotation restrained	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_\phi = 0$
BC1f		radially restrained meridionally restrained rotation free	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_\phi \neq 0$
BC2r		radially restrained meridionally free rotation restrained	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_\phi = 0$
BC2f	Pinned	radially restrained meridionally free rotation free	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_\phi \neq 0$
BC3	Free edge	radially free meridionally free rotation free	$w \neq 0$	$u \neq 0$	$\beta_\phi \neq 0$

NOTE: The circumferential displacement v is closely linked to the displacement w normal to the surface, so separate boundary conditions are not identified for these two parameters (see (4)) but the values in column 4 should be adopted for displacement v .



Εικόνα 8: Είδη συνοριακών συνθηκών [1]

Ο συντελεστής απομείωσης λόγω ατελειών α_χ εξαγεται από την σχέση :

$$\alpha_\chi = \frac{0,62}{1 + 1,91 \left(\frac{\Delta w_k}{t}\right)^{1.44}} \tag{2.22}$$

Όπου Δw_k να είναι το χαρακτηριστικό μέγεθος ατέλειας και δίνεται από την σχέση:

$$\Delta w_k = \frac{t}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} \tag{2.23}$$

όπου:

Q η παράμετρος κατασκευαστικής ποιότητας για αξονική καταπόνηση.

Πίνακας 2.7: Τιμές παραμέτρου Q ανάλογα με την κατασκευαστική κλάση ^[1]

Fabrication tolerance quality class	Description	Q
Class A	Excellent	40
Class B	High	25
Class C	Normal	16

Οι παράμετροι $\bar{\lambda}_{x0}$, β και η λαμβάνονται ίσοι με 0,2, 0,6 και 1,0 αντίστοιχα.

Τέλος δεν απαιτείται έλεγχος έναντι κύρτωσης κατά την αξονική έννοια εφόσον ισχύει :

$$\frac{r}{t} = 0,03 \frac{E}{f_{yk}} \quad (2.24)$$

Ειδικές περιπτώσεις

Σε κυλίνδρους μεγάλου μήκους οι οποίοι ικανοποιούν επιπλέον τις προϋποθέσεις των εξισώσεων 2.25, 2.26 και 2.27, δύναται να ληφθεί υπόψη η αυξημένη αντοχή έναντι κύρτωσης λόγω αξονικών θλιπτικών τάσεων που προέρχονται από καμπτική καταπόνηση.

$$\frac{r}{t} \leq 150 \quad (2.25)$$

$$\omega \leq 6 \left(\frac{r}{t} \right) \quad (2.26)$$

$$500 \leq \frac{E}{f_{y,k}} \leq 1000 \quad (2.27)$$

Συγκεκριμένα ο συντελεστής C_x της εξίσωσης 2.19 μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση :

$$C_x = C_{x,N} \left(\frac{\sigma_{xE,N}}{\sigma_{xE}} \right) + \left(\frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}} \right) \quad (2.28)$$

όπου:

$C_{x,N}$ συντελεστής όπως αυτός προκύπτει από τις εξισώσεις 2.20 και 2.21

σ_{xE} η συνολική αξονική τάση στο κέλυφος

$\sigma_{xE,N}$ η συνιστώσα της αξονικής τάσης που προέρχεται από ομοιόμορφη αξονική καταπόνηση

$\sigma_{xE,M}$ η συνιστώσα της αξονικής τάσης που προέρχεται από καμπτική καταπόνηση

Επιπλέον, το όριο σύνθλιψης $\bar{\lambda}_0$ μπορεί να ληφθεί ίσο με :

$$\bar{\lambda}_{x0} = 0,2 + 0,1 \left(\frac{\sigma_{xE,M}}{\sigma_{xE}} \right) \quad (2.29)$$

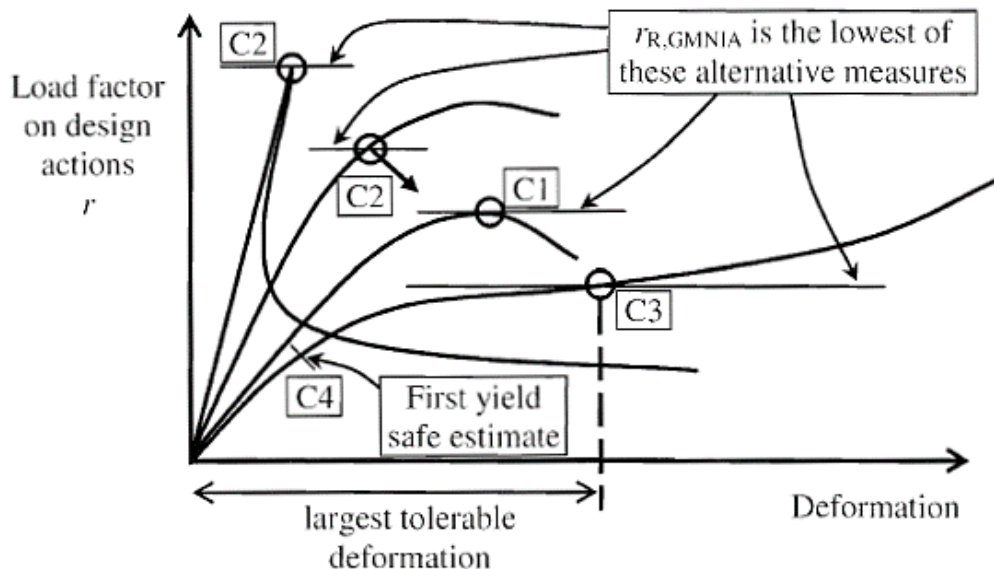
2.7.2.2 Έλεγχος με καθολική αριθμητική ανάλυση

Ο έλεγχος με καθολική αριθμητική ανάλυση επιτρέπεται να πραγματοποιηθεί με δύο προσεγγίσεις. Στην πρώτη απαιτείται γραμμική ανάλυση λυγισμού (LBA) και μη γραμμική ανάλυση υλικού (MNA), από των οποίων τα αποτελέσματα παράγεται ένας συντελεστής απομείωσης με την βοήθεια του οποίου προσδιορίζεται η αντοχή της κατασκευής. Η δεύτερη και πιο λεπτομερής μέθοδος είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη μελέτη. Περιλαμβάνει μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού με την εισαγωγή αρχικών ατελειών (GMNIA) αλλά και χωρίς ατέλειες (GMNA) και γραμμικής ανάλυσης λυγισμού (LBA). Προσδιορίζεται η οριακή αντοχή $r_{R,GMNIA}$ λαμβάνοντας υπόψιν την χαμηλότερη τιμή από τα εξής κριτήρια:

1. Κριτήριο C1: Ο συντελεστής του μέγιστου φορτίου που εμφανίζεται στον δρόμο ισορροπίας φορτίου-παραμόρφωσης (οριακό φορτίο).
2. Κριτήριο C2: Ο συντελεστής του φορτίου διακλάδωσης, όταν αυτή συμβαίνει πριν το οριακό φορτίο του δρόμου ισορροπίας φορτίου-παραμόρφωσης.
3. Κριτήριο C3: Η μέγιστη ανεκτή παραμόρφωση, όταν αυτή συμβαίνει κατά τη διάρκεια του δρόμου ισορροπίας φορτίου-παραμόρφωσης πριν το οριακό φορτίο ή το φορτίο διακλάδωσης.

Σε περίπτωση που η μη γραμμικότητα του υλικού δεν λαμβάνεται υπόψιν στο αριθμητικό προσομοίωμα, μπορεί να γίνει η χρήση του συντηρητικού κριτηρίου:

4. Κριτήριο C4: Ο συντελεστής του φορτίου όπου στο σημείο με την μεγαλύτερη τάση von Mises στην επιφάνεια του κελύφους, αυτή εξισώνεται με την τάση διαρροής $f_{yd}=f_{yk}/\gamma_{M0}$.



Γράφημα 2.2: Παραδείγματα δρόμων ισορροπίας και κρίσιμα σημεία επ' αυτών που καθορίζουν την αντοχή ^[1]

Προκειμένου να γίνει αξιολόγηση της αξιοπιστίας της μεθόδου εισαγωγής ατελειών στο μοντέλο για την ανάλυση GMNIA πραγματοποιείται ένας επιπλέον έλεγχος ο οποίος έχει ως στόχο την βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων με την χρήση ως μέτρο αναφοράς τον υπολογισμό της αντοχής για μία γεωμετρία και εντατική κατάσταση που είναι ήδη γνωστή. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί με δύο τρόπους: α) με την χρήση αποτελεσμάτων για δεδομένες γεωμετρίες και φορτίσεις με γνωστή συμπεριφορά η οποία προσδιορίζεται στον EN 1993-1-6 ^[1] ή β) με την χρήση πειραματικών αποτελεσμάτων. Από τους αντίστοιχους υπολογισμούς προσδιορίζεται ο συντελεστής βαθμονόμησης k_{GMNIA} ως εξής:

$$k_{GMNIA} = \frac{r_{Rk,known,check}}{r_{R,GMNIA,check}} \quad \text{ή} \quad k_{GMNIA} = \frac{r_{R,test,known,check}}{r_{R,GMNIA,check}} \quad (2.30)$$

όπου:

$\Gamma_{Rk,known,check}$	είναι η γνωστή χαρακτηριστική τιμή
$\Gamma_{R,test,known,check}$	είναι το γνωστό πειραματικό αποτέλεσμα
$\Gamma_{R,GMNIA,check}$	είναι το αποτέλεσμα του υπολογισμού από το λογισμικό για την γεωμετρία και φόρτιση ελέγχου

Αν $k_{GMNIA} > 1$ τότε λαμβάνεται $k_{GMNIA} = 1$ ενώ αν δεν ικανοποιείται η συνθήκη $0,8 < k_{GMNIA} < 1,2$ τότε η υπολογιστική διαδικασία κρίνεται ακατάλληλη και τα αποτελέσματά της δεν μπορούν να ληφθούν υπόψιν.

Η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής του φορέα υπολογίζεται ως:

$$\Gamma_{Rk} = k_{GMNIA} \Gamma_{R,GMNIA} \quad (2.31)$$

όπου:

$\Gamma_{R,GMNIA}$ είναι η αντοχή που υπολογίζεται για τον ατελή φορέα

Η τιμή της αντοχής σχεδιασμού υπολογίζεται ως:

$$\Gamma_{Rd} = \Gamma_{Rk} / \gamma_{M1} \quad (2.32)$$

Προκειμένου να διαπιστωθεί η επάρκεια της αντοχής του φορέα πρέπει να ικανοποιείται:

$$F_{Ed} \leq F_{Rd} = r_{Rd} F_{Ed} \quad \text{ή} \quad r_{Rd} \geq 1 \quad (2.33)$$

2.7.3 Έλεγχος σεισμού

Για ανεμογεννήτριες μεγάλου ύψους δεν αναμένεται συνήθως να είναι κρίσιμος ο έλεγχος για σεισμικά φορτία, κυρίως εξαιτίας των υψηλών ιδιοσυχνοτήτων που αυτές εμφανίζουν. Στα περισσότερα πρότυπα προτείνονται απλουστευτικοί έλεγχοι με απλοποιητικές παραδοχές υπέρ της ασφαλείας, όπου αν δεν ικανοποιούνται επιτρέπεται ακριβέστερος έλεγχος με φασματική ανάλυση.

2.7.4 Έλεγχος κόπωσης

Η κόπωση προκαλείται στα υλικά από έντονη εναλλαγή τάσεων από επαναλαμβανόμενες φορτίσεις, ενώ παρουσιάζει χαρακτηριστικά ψαθυρής αστοχίας λόγω της ξαφνικής θραύσης. Στις ανεμογεννήτριες παρουσιάζονται εκτεταμένες εναλλαγές στις φορτίσεις, άρα ο έλεγχος κόπωσης έχει ιδιαίτερη σημασία και μπορεί να γίνει με δύο μεθόδους: α) με την μέθοδο ανοχής βλαβών και β) με την μέθοδο ασφάλειας ζωής.

2.7.5 Έλεγχος συντονισμού

Ο έλεγχος συντονισμού αναφέρεται στις ιδιοσυχνότητα ολόκληρης της κατασκευής και στις συχνότητες λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, με σκοπό την αποφυγή της σύμπτωσης των δύο τιμών. Από τον κατασκευαστή της ανεμογεννήτριας προδιαγράφεται η συχνότητα περιστροφής των πτερυγίων η οποία είναι σταθερή και ορίζεται ως συχνότητα 1P από την οποία μπορεί να υπολογιστεί η συχνότητα διέλευσης διαδοχικών πτερυγίων έμπροσθεν του πυλώνα, στην περίπτωση όπου η ανεμογεννήτρια

διαθέτει τρία πτερύγια η συχνότητα αυτή χαρακτηρίζεται ως 3P. Η επιθυμητή συνθήκη προς ικανοποίηση περιλαμβάνει την επαρκή διαφορά μεταξύ και των δύο συχνοτήτων λειτουργίας 1P και 3P με την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής.

2.8 Ατέλειες

Κατά την εφαρμογή αναλύσεων GMNIA ή GNIA, θα πρέπει να ενσωματωθούν οι κατάλληλες ανοχές για την κάλυψη των επιπτώσεων των ατελειών που δεν μπορούν να αποφευχθούν στην πράξη, όπως εκείνες των παραγράφων 2.8.1 και 2.8.2.

2.8.1 Ατέλειες του υλικού

Οι ατέλειες του υλικού αναφέρονται κυρίως στην ανομοιογένεια αυτού και τις παραμένουσες τάσεις

2.8.2 Γεωμετρικές ατέλειες

Οι γεωμετρικές ατέλειες προκύπτουν από τις κατασκευαστικές επιτρεπόμενες ανοχές οι οποίες εξαρτώνται από την κλάση της ποιότητας κατασκευής και έχουν διάφορες μορφές:

2.8.2.1 Απόκλιση από την κυκλικότητα

Προσδιορίζεται ο συντελεστής:

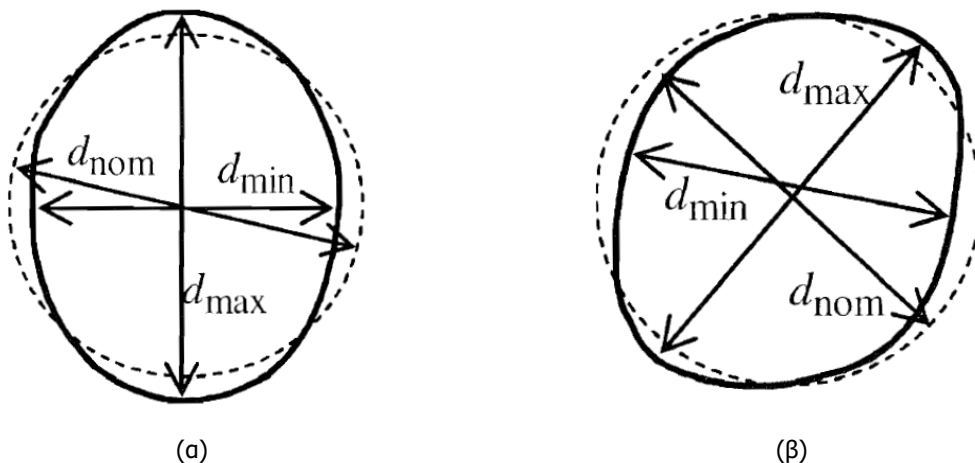
$$U_r = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}} \quad (2.34)$$

όπου:

d_{\max} είναι η μέγιστη μετρούμενη εσωτερική διάμετρος

d_{\min} είναι η ελάχιστη μετρούμενη εσωτερική διάμετρος

d_{nom} είναι η ονομαστική εσωτερική διάμετρος



Εικόνα 9: Απόκλιση από την κυκλικότητα (α) συμμετρική (β) μη συμμετρική ^[1]

Πρέπει ικανοποιείται η συνθήκη: $U_r \leq U_{r,max}$, όπου ο συντελεστής $U_{r,max}$ εξαρτάται από την ποιότητα της κλάσης της κατασκευής και λαμβάνεται από τον πίνακα 2.8.

Πίνακας 2.8: Προτεινόμενες τιμές $U_{r,max}$ [1]

	Diameter range	$d [m] \leq 0,50m$	$0,50m < d [m] < 1,25m$	$1,25m \leq d [m]$
Fabrication tolerance quality class	Description	Recommended value of $U_{r,max}$		
Class A	Excellent	0,014	$0,007 + 0,0093(1,25-d)$	0,007
Class B	High	0,020	$0,010 + 0,0133(1,25-d)$	0,010
Class C	Normal	0,030	$0,015 + 0,0200(1,25-d)$	0,015

2.8.2.2 Αθέλητη εκκενρότητα

Σε συνδέσεις συνέχειας μεταξύ κελυφωτών τοιχωμάτων η αθέλητη εκκενρότητα υπολογίζεται ως:

$$e_a = e_{tot} - e_{int} \quad (2.35)$$

όπου:

e_{tot} είναι η συνολική εκκενρότητα των μέσων επιφανειών των συνδεόμενων τμημάτων

e_{int} είναι η ηθελημένη εκκενρότητα των μέσων επιφανειών των συνδεόμενων τμημάτων

e_a είναι η αθέλητη εκκενρότητα των μέσων επιφανειών των συνδεόμενων τμημάτων

Πρέπει ικανοποιείται η συνθήκη: $e_a \leq e_{a,max}$, όπου ο συντελεστής $e_{a,max}$ εξαρτάται από την ποιότητα της κλάσης της κατασκευής και λαμβάνεται από τον πίνακα 2.9.

Πίνακας 2.9: Προτεινόμενες τιμές $e_{a,max}$ [1]

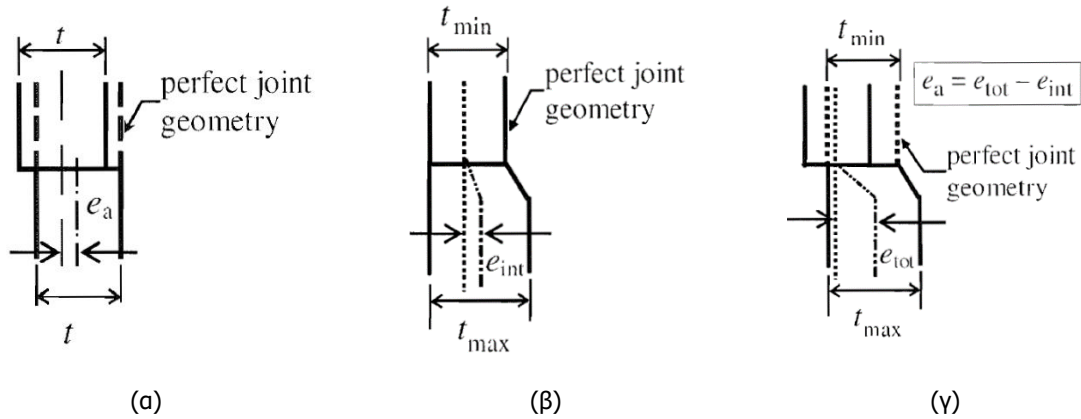
Fabrication tolerance quality class	Description	Recommended values for maximum permitted $\overline{AC_1}$ non-intended $\overline{AC_1}$ eccentricity $e_{a,max}$
Class A	Excellent	2 mm
Class B	High	3 mm
Class C	Normal	4 mm

Η αθέλητη εκκενρότητα e_a πρέπει επίσης να εκτιμάται από την παράμετρο αθέλητης εκκενρότητας U_e :

$$U_e = \frac{e_a}{t_{av}} \quad \text{ή} \quad U_e = \frac{e_a}{t} \quad (2.36)$$

όπου:

t_{av} είναι το μέσο πάχος των δύο τμημάτων της σύνδεσης



Εικόνα 10: (α) Αθέλητη εκκεντρότητα χωρίς μεταβολή παχών (β) Ηθελημένη εκκεντρότητα για την μεταβολή παχών (γ) Συνολική εκκεντρότητα αθέλητης και ηθελημένης [1]

Πρέπει ικανοποιείται η συνθήκη: $U_e \leq U_{e,max}$, όπου ο συντελεστής $U_{e,max}$ εξαρτάται από την ποιότητα της κλάσης της κατασκευής και λαμβάνεται από τον πίνακα 2.10.

Πίνακας 2.10: Προτεινόμενες τιμές $U_{e,max}$ [1]

Fabrication tolerance quality class	Description	Recommended value of $U_{e,max}$
Class A	Excellent	0,14
Class B	High	0,20
Class C	Normal	0,30

2.8.2.3 Ανοχή κοιλώματος

Τα κοιλώματα είναι αποκλίσεις της κατασκευής από την τέλεια γεωμετρία κατά την κάθετη στην εκάστοτε επιφάνεια διεύθυνση. Προκειμένου να προσδιοριστεί το βάθος του κοιλώματος χρησιμοποιείται η μέτρηση του εύρους της ατέλειας στην περιφερειακή και την μεσημβρινή διεύθυνση. Η μέτρηση για το βάθος Δ_{w0} της αρχικής ατέλειας του κελύφους προσδιορίζεται από τα μετρούμενα μήκη l_g τα οποία υπολογίζονται ως εξής:

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

$$l_{gx} = 4\sqrt{rt} \tag{2.37}$$

- 2) Σε περιοχές όπου παρουσιάζονται θλιπτικές ή διατμητικές τάσεις κατά την περιφερειακή διεύθυνση, πρέπει να πραγματοποιούνται μετρήσεις στην περιφερειακή διεύθυνση της διάστασης $l_{g\theta}$ η οποία υπολογίζεται από την σχέση:

$$l_{g\theta} = 2,3(l^2rt)^{0,25}, \quad l_{g\theta} \leq r \tag{2.38}$$

όπου:

l είναι το μήκος κατά την μεσημβρινή διεύθυνση του τμήματος του κελύφους

- 3) Σε περιοχές συγκολλήσεων χρησιμοποιείται η μέτρηση l_{gw} κατά την περιφερειακή και μεσημβρινή διεύθυνση:

$$l_{gw} = 25t \quad \text{ή} \quad l_{gw} = 25t_{\min}, \quad l_{gw} \leq 500\text{mm} \quad (2.39)$$

Το βάθος των αρχικών ατελειών πρέπει να εκτιμάται σχετικά με τις παραμέτρους U_{0x} , $U_{0\theta}$, U_{0w} οι οποίες δίνονται από τις σχέσεις:

$$U_{0x} = \Delta w_{0x}/l_{gx} \quad U_{0\theta} = \Delta w_{0\theta}/l_{g\theta} \quad U_{0w} = \Delta w_{0w}/l_{gw} \quad (2.40)$$

Οι τιμές των παραμέτρων U_{0x} , $U_{0\theta}$, U_{0w} πρέπει να ικανοποιούν τις σχέσεις:

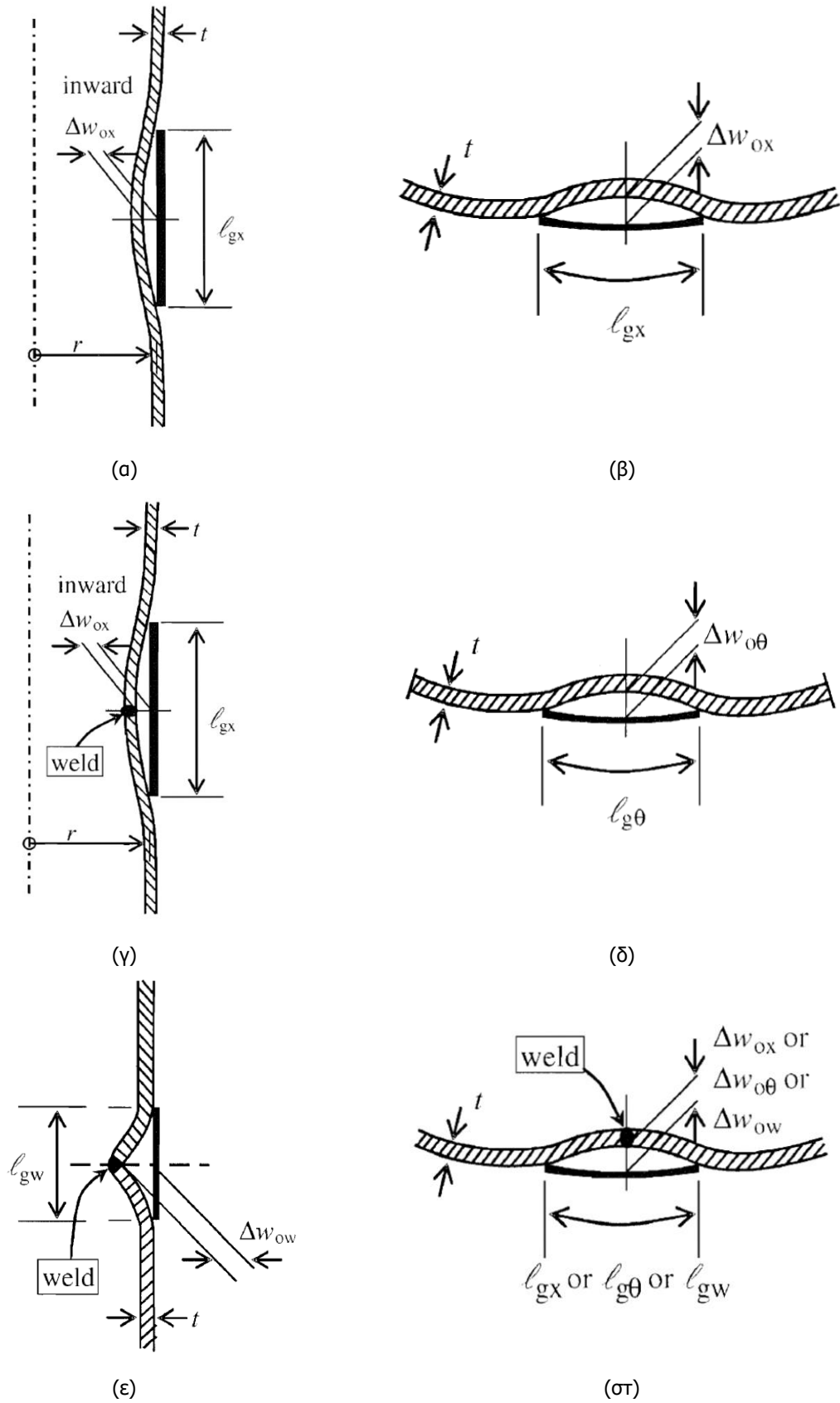
$$U_{0x} \leq U_{0,\max} \quad U_{0\theta} \leq U_{0,\max} \quad U_{0w} \leq U_{0,\max} \quad (2.41)$$

όπου:

$U_{0,\max}$ είναι η παράμετρος ανοχής κοιλώματος και εξαρτάται από την ποιότητα της κλάσης της κατασκευής και λαμβάνεται από τον πίνακα 2.11

Πίνακας 2.11: Προτεινόμενες τιμές $U_{0,\max}$ ^[1]

Fabrication tolerance quality class	Description	Recommended value of $U_{0,\max}$
Class A	Excellent	0,006
Class B	High	0,010
Class C	Normal	0,016



Εικόνα 11: Μετρήσεις κατασκευαστικών αποκλίσεων από την τέλεια γεωμετρία [1]

2.8.3 Ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες

Το μέγεθος καθώς και το σχήμα των αρχικών ατελειών παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην αντοχή της κατασκευής, άρα είναι κρίσιμος ο ορισμός κατάλληλων ατελειών στο υπολογιστικό μοντέλο. Η πιο τυπική διαδικασία εισαγωγής αρχικών ατελειών σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων σχετίζεται με γεωμετρικές αποκλίσεις από την αρχική γεωμετρία. Προκειμένου να συμπεριληφθούν όλα τα είδη ατελειών (γεωμετρικές και υλικού) στον EN 1993-1-6 ^[1] εισάγεται η έννοια των ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών, οι οποίες είναι επαρκώς επαυξημένες γεωμετρικές ατέλειες που λαμβάνουν υπόψιν και τα δύο είδη. Η επιλογή του σχήματος του ατελούς φορέα πρέπει να επιλέγεται με κατάλληλο τρόπο ώστε να έχει την πιο δυσμενή επίδραση στους ελέγχους ευστάθειας της κατασκευής. Τα σχήματα αυτά δεν είναι σε όλες τις περιπτώσεις προφανή και απαιτείται εκτεταμένη διερεύνηση ως προς αυτόν τον τομέα. Η πιο ενδεδειγμένη πρακτική είναι η χρήση των σχημάτων των ιδιομορφών που προκύπτουν από την γραμμική ανάλυση λυγισμού, με αναζήτηση της τάξης της ιδιομορφής που θα επιφέρει τα δυσμενέστερα αποτελέσματα. Επιπλέον ο ορισμός των αρχικών ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε η μέγιστη απόκλιση από την τέλεια γεωμετρία να έχει κατεύθυνση προς το κέντρο της καμπύλης του κελύφους. 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 στην μέγιστη απόκλιση οποιουδήποτε σημείου από την τέλεια γεωμετρία.

$$\Delta w_{0,eq,1} = l_g U_{n1} \quad (2.42)$$

$$\Delta w_{0,eq,2} = n_i t U_{n2} \quad (2.43)$$

όπου:

l_g είναι όλα τα σχετικά μήκη μετρήσεων σύμφωνα με την παράγραφο 2.8.2.3

t είναι το τοπικό πάχος των τοιχωμάτων

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

U_{n2}

Η τιμή n_i λαμβάνεται ως $n_i = 25$.

Πίνακας 2.12: Προτεινόμενες τιμές U_{n1} , U_{n2} ^[1]

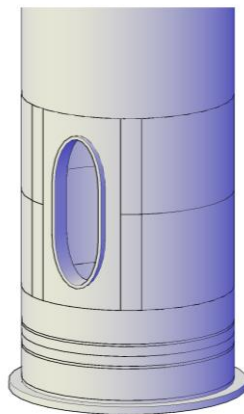
Fabrication tolerance quality class	Description	Recommended value of U_{n1}	Recommended value of U_{n2}
Class A	Excellent	0,010	0,010
Class B	High	0,016	0,016
Class C	Normal	0,025	0,025

3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

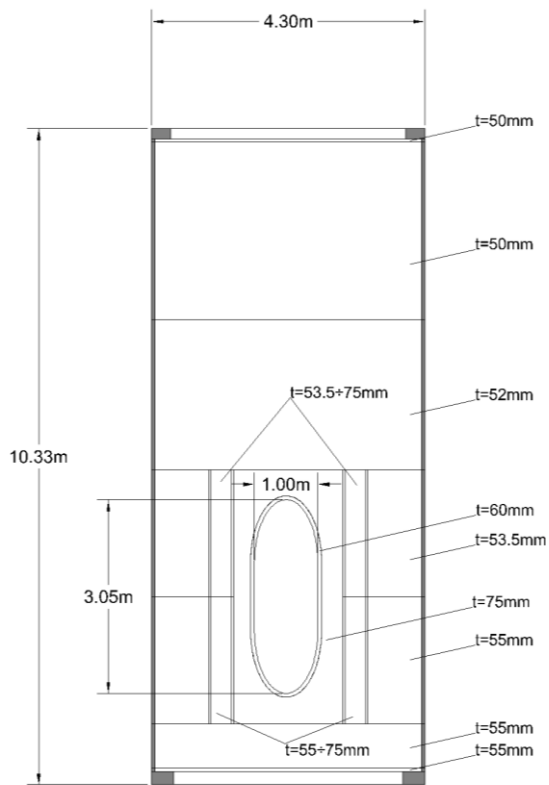
Στην παρούσα μελέτη έγινε χρήση δεδομένης γεωμετρίας, υλικών και φορτίων με στοιχεία από κατασκευαστική εταιρεία ανεμογεννητριών. Τα δεδομένα αυτά περιορίζονται στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας, τα οποία παρουσιάζονται στην συνέχεια.

3.1 Γεωμετρία

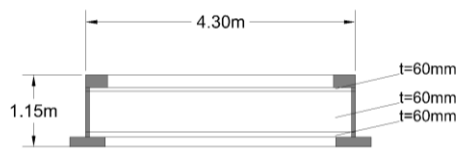
Η κατασκευή αποτελείται από επτά μέρη συνδεδεμένα μεταξύ τους με προεντεταμένες κοχλιώσεις στο εργοτάξιο όπου το καθένα αποτελείται με την σειρά του από περισσότερα τμήματα με εναλλαγή παχών συγκολλημένα μεταξύ τους από εργοστάσιο. Οι διαστάσεις των μερών περιορίζονται από παράγοντες που σχετίζονται κυρίως με την μεταφορά τους στην τοποθεσία του έργου. Πρόκειται για πυλώνα συνολικού ύψους 117,7m με σταθερή διάμετρο 4,3m εκτός του τελευταίου μέρους το οποίο έχει μεταβλητή διάμετρο η οποία στην κορυφή καταλήγει στα 3,68m. Πλησίον της βάσης του πυλώνα υφίσταται οπή για σκοπούς ανθρωποθυρίδας με περιφερειακή εγκάρσια ενίσχυση. Η περιοχή του κελύφους του πυλώνα γύρω από την οπή έχει αυξημένο πάχος το οποίο σταδιακά μεταβάλλεται προκειμένου να συμβαδίζει με το τυπικό πάχος εκείνης της περιοχής.



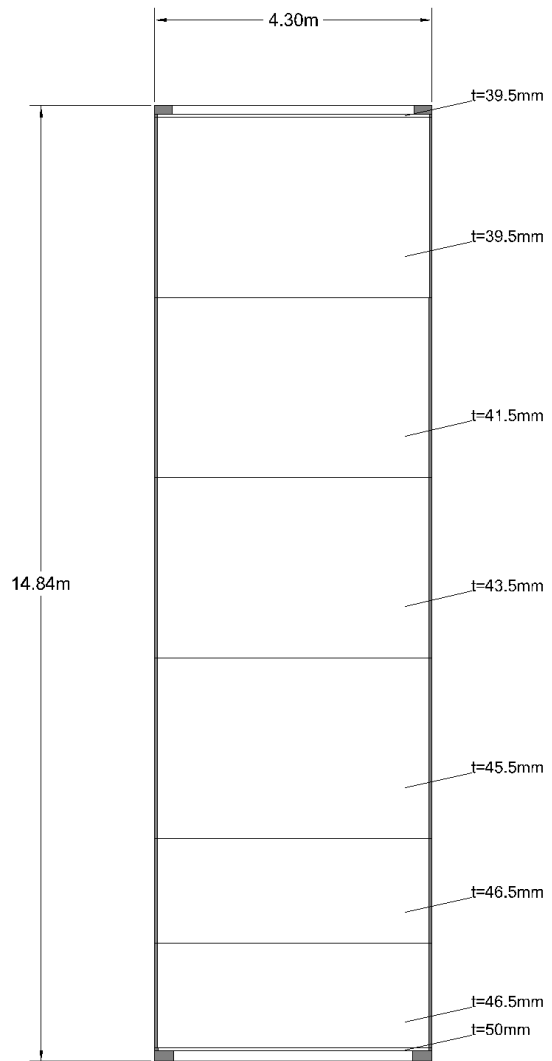
Εικόνα 12: λεπτομέρεια ανθρωποθυρίδας



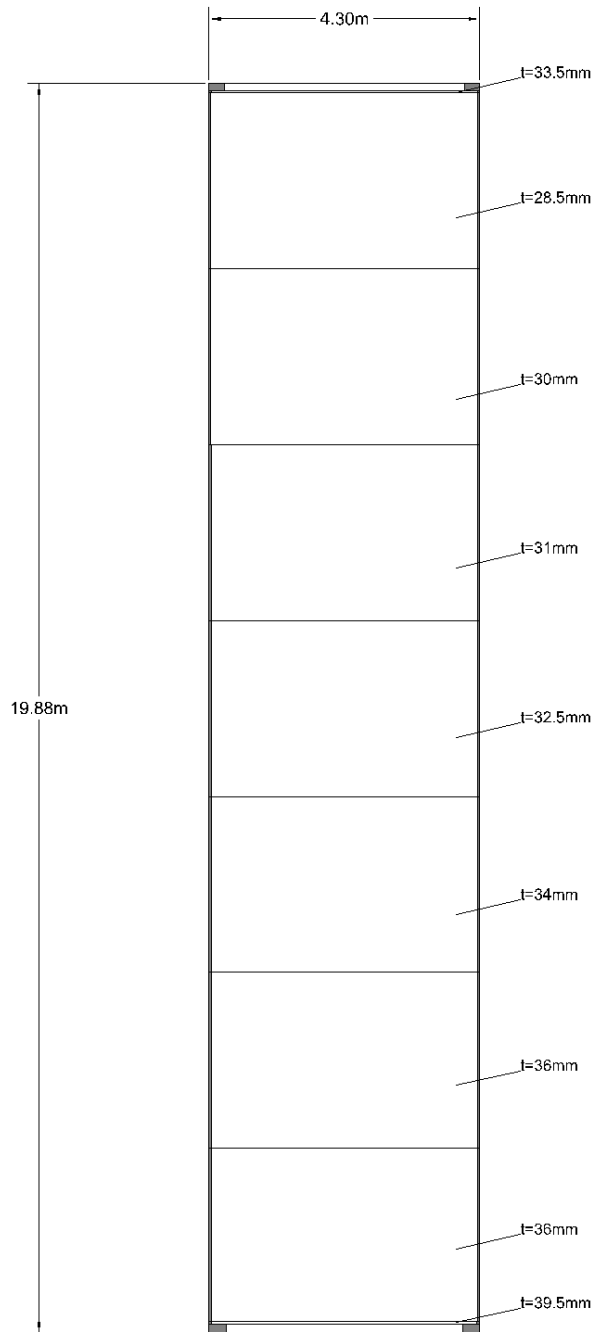
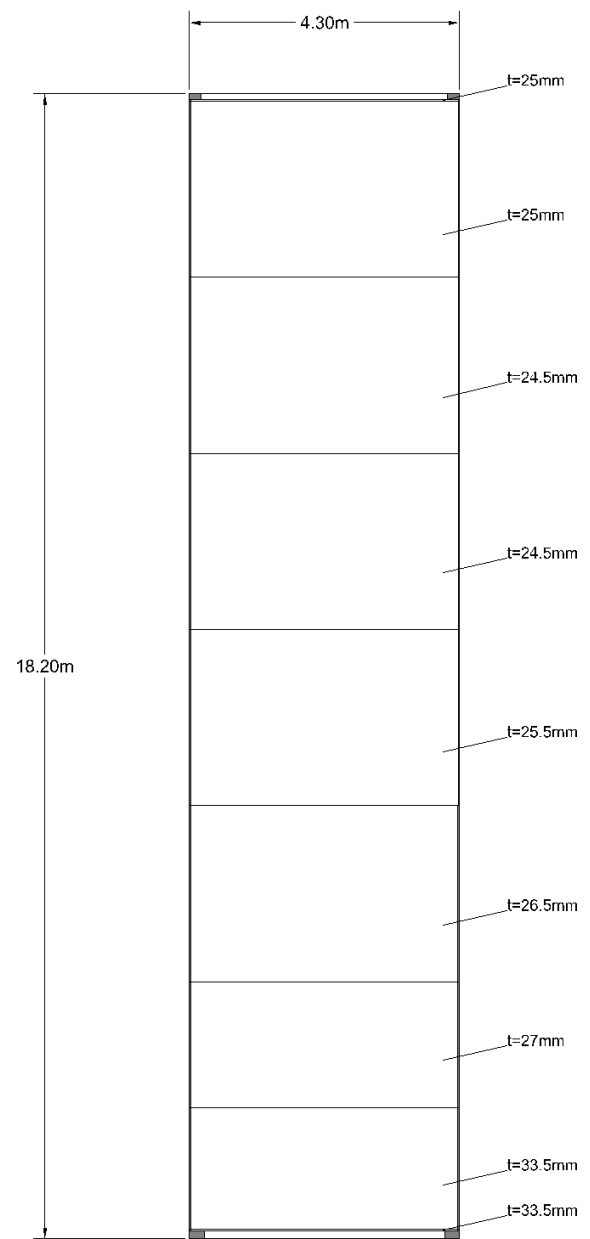
ΜΕΡΟΣ 2

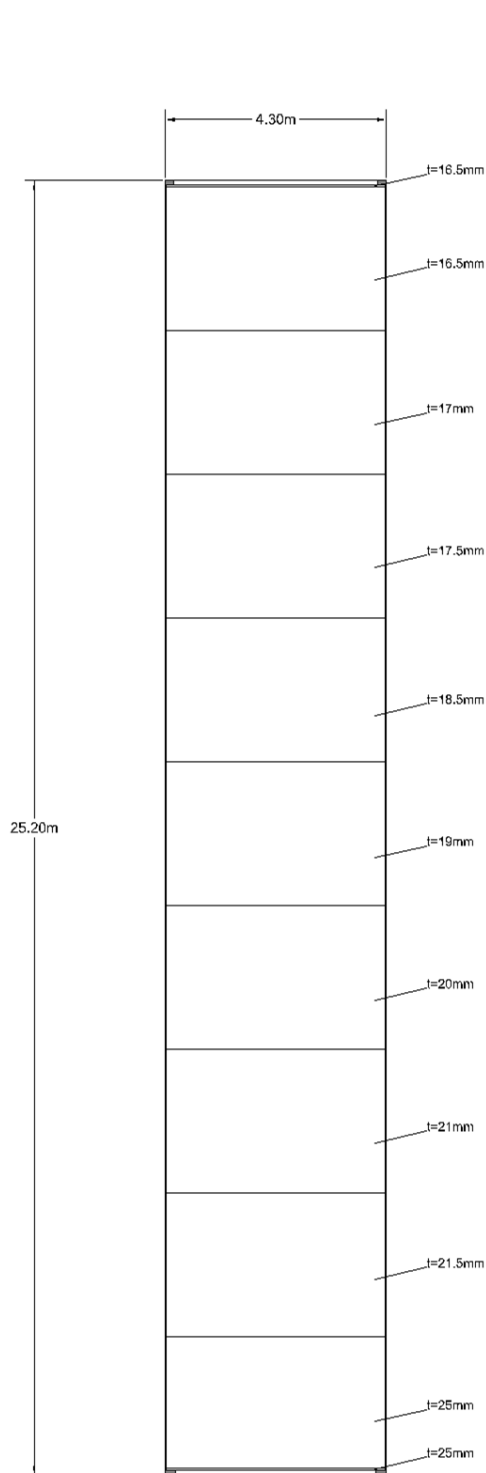


ΜΕΡΟΣ 1

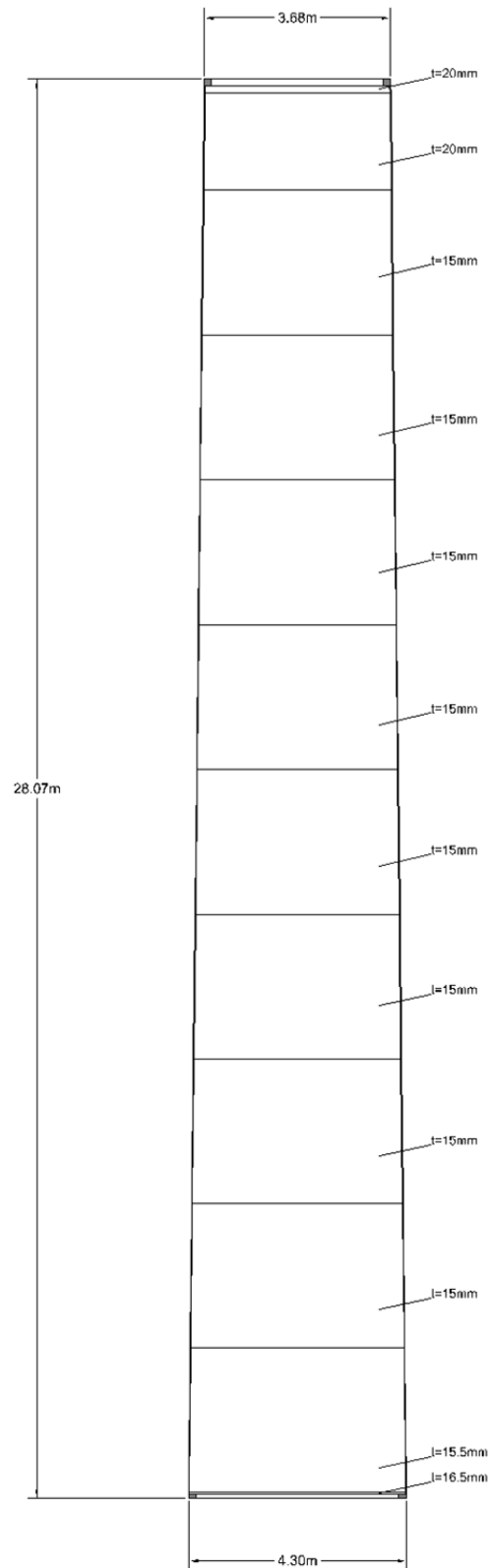


ΜΕΡΟΣ 3

**ΜΕΡΟΣ 4****ΜΕΡΟΣ 5**

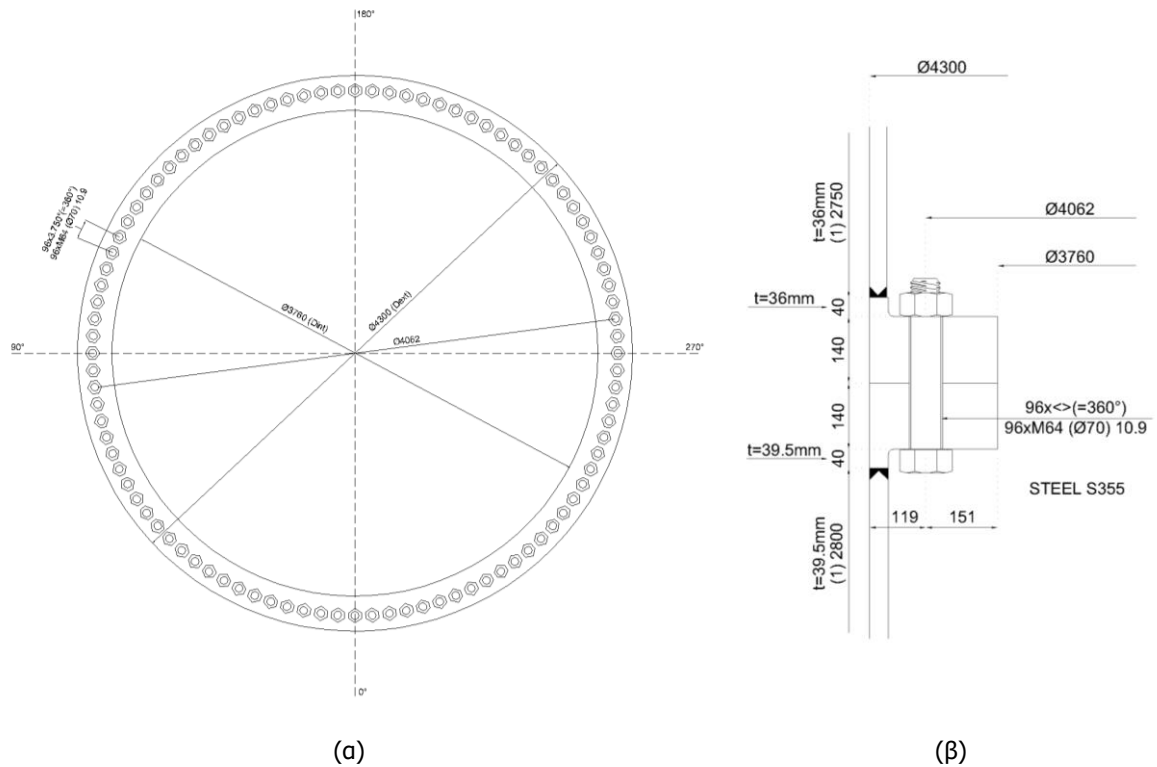


ΜΕΡΟΣ 6



ΜΕΡΟΣ 7

Για την διαμόρφωση των συνδέσεων τοποθετούνται εγκάρσια στην κατακόρυφη διεύθυνση ελάσματα στα άκρα κάθε τμήματος τα οποία συγκρατούνται με τα αντιπασσόμενα το από προεντεταμένους κοχλίες όπως παρουσιάζεται στα σχέδια της εικόνας 13. Οι διαστάσεις κάθε ελάσματος παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1.



Εικόνα 13: Τυπική σύνδεση (α) κάτοψη (β) κατακόρυφη τομή

Πίνακας 3.1: Πάχη ελασμάτων σύνδεσης

Συνδεόμενα μέρη	Πάχος [mm]	Πλάτος [mm]
Έλασμα βάσης πυλώνα	150,0	560,0
1-2	205,0	347,5
2-3	165,0	300,0
3-4	140,0	270,0
4-5	120,0	237,5
5-6	91,0	194,0
6-7	91,0	157,5
Έλασμα κορυφής πυλώνα	150,0	140,0

3.2 Υλικά

3.2.1 Πυλώνας

Το υλικό κατασκευής του πυλώνα είναι χάλυβας ποιότητας S355. Οι ιδιότητες του υλικού λαμβάνονται όπως προτείνονται από το πρότυπο πιστοποίησης του οργανισμού "DNV/Riso" [7].

Πίνακας 3.2: Ιδιότητες δομικού χάλυβα [7]

Modulus of elasticity	E	210 000 MPa
Poisson's ratio	ν	0.3
Shear modulus	G	$E/2(1-\nu)$
Unit mass	ρ	7850 kg/m ³
Coefficient of linear thermal expansion	α	12·10 ⁻⁶ °C ⁻¹

Πίνακας 3.3: Τάση διαρροής δομικού χάλυβα [7]

Reference Standard	Grade	Minimum yield strength f_y [MPa]							
		Thickness t [mm]							
		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250
EN 10 025	S235	235	225	215	215	215	195	185	175
EN 10 025	S275	275	265	255	245	235	225	215	205
EN 10 025	S355	355	345	335	325	315	295	285	275

3.2.2 Κοχλίες

Οι κοχλίες που χρησιμοποιούνται για τις συνδέσεις είναι ποιότητας 10.9.

3.2.3 Κατασκευαστική κλάση

Η ποιότητα της κατασκευαστικής κλάσης, συμβατής με τον EN 1993-1-6 [1], όπως αυτή προδιαγράφεται από τον κατασκευαστή είναι B (High).

3.3 Φορτία

Για την συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν τα φορτία σχεδιασμού που παρείχε ο μελετητής της ανεμογεννήτριας. Τα φορτία αυτά παραδόθηκαν σε μορφή περιβάλλουσας εντατικών μεγεθών για πολυάριθμες διατομές καθ' ύψος, χωρίς να είναι γνωστός ο συνδυασμός φόρτισης και η συσχέτιση των φορτίων μεταξύ διαφορετικών διατομών. Στον πίνακα 3.4 παρατίθενται τα φορτία σχεδιασμού της μέγιστης συνισταμένης ροπής κάμψης με τα αντίστοιχα συνοδευτικά εντατικά μεγέθη για τις διατομές στα σημεία των συνδέσεων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της αντοχής του πυλώνα.

Πίνακας 3.4: Φορτίσεις σχεδιασμού οριακής κατάστασης αστοχίας για τους συνδυασμούς φόρτισης με την μέγιστη ροπή κάμψεως και τα συνοδευτικά εντατικά μεγέθη στις θέσεις των αποκαταστάσεων συνέχειας

Ύψος από βάση [m]	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]	Fr [kN]	Mr [kNm]	Vhub [m/s]	Vdir [deg]
1,15	1204,8	26,5	-8740,8	6722,8	148483,8	3169,9	1205,1	148635,9	14,7	-33,8
11,48	1244,5	24,2	-7842,8	7029,8	135943,0	3199,9	1224,7	136124,7	14,8	-34,3
26,32	1247,9	20,1	-6794,3	7360,5	117576,8	3200,3	1248,1	117807,0	14,8	-34,3
46,20	1258,6	13,8	-5779,2	7826,0	92640,9	3263,9	1258,6	92970,9	15,1	-35,9
64,40	1263,6	6,1	-5021,8	8094,4	69672,3	3299,7	1263,0	70140,9	15,3	-36,9
89,60	1259,7	-4,8	-4252,2	8109,0	37840,9	3226,0	1259,7	38700,0	15,3	-36,9
117,67	798,6	-141,1	-3613,5	10265,2	-10736,0	1236,5	811,0	14853,8	10,5	38,4

όπου:

- x άξονας παράλληλος στην διεύθυνση του ανέμου
- y άξονας κάθετος στον διεύθυνση του ανέμου
- z κατακόρυφος άξονας
- Fr συνισταμένη τέμνουσα
- Mr συνισταμένη ροπή κάμψεως
- Vhub ταχύτητα ανέμου στην κορυφή
- Vdir γωνία πρόσπτωσης ανέμου

4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΦΟΡΕΑ

4.1 Διερεύνηση τύπου προσομοίωσης

Για να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες αναλύσεις δημιουργήθηκε προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων με τα ακριβή γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυλώνα. Ένα μέρος στο οποίο δόθηκε ιδιαίτερη σημασία ήταν ο τρόπος προσομοίωσης της κατασκευής. Θεωρήθηκε θεμελιώδης η ύπαρξη αριθμητικού μοντέλου το οποίο να αντιπροσωπεύει με πολύ καλή προσέγγιση την πραγματική συμπεριφορά του φορέα, ούτως ώστε να μπορούν να διεξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την υπόλοιπη μελέτη. Για τον σκοπό αυτό έγινε διερεύνηση σχετικά με τον τύπο της προσομοίωσης. Το κύριο κριτήριο, με το οποίο έγινε η αξιολόγηση κάθε μεθόδου, είναι η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων σε συνδυασμό με το μικρότερο δυνατό υπολογιστικό κόστος. Προκειμένου να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος πραγματοποιήθηκε σύγκριση ως προς την εξαγωγή αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών τύπων στοιχείων. Από βιβλιογραφική αναζήτηση, αλλά όπως επιβεβαιώθηκε και στην συνέχεια, η αστοχία του φορέα υπό τα αντίστοιχα φορτία που αυτός δέχεται επέρχεται από την εμφάνιση τοπικού λυγισμού, οπότε αποκλείστηκε το ενδεχόμενο προσομοίωσης του πυλώνα με στοιχεία δοκού. Επίσης, ένα στοιχείο της κατασκευής του οποίου η προσφορά στην αντοχή αυτής θεωρήθηκε υπολογίσιμη και άρα απαραίτητη να προσομοιωθεί είναι οι ενισχυτικές νευρώσεις στις περιοχές των συνδέσεων.

Επιλέχθηκαν τρεις πιθανοί τρόποι προσομοίωσης του φορέα:

1. **Πυλώνας** → στοιχεία κελύφους, **Φλάντζες** → στοιχεία δοκού
2. **Πυλώνας** → στοιχεία κελύφους, **Φλάντζες** → στοιχεία κελύφους
3. **Πυλώνας** → τρισδιάστατα στοιχεία, **Φλάντζες** → τρισδιάστατα στοιχεία

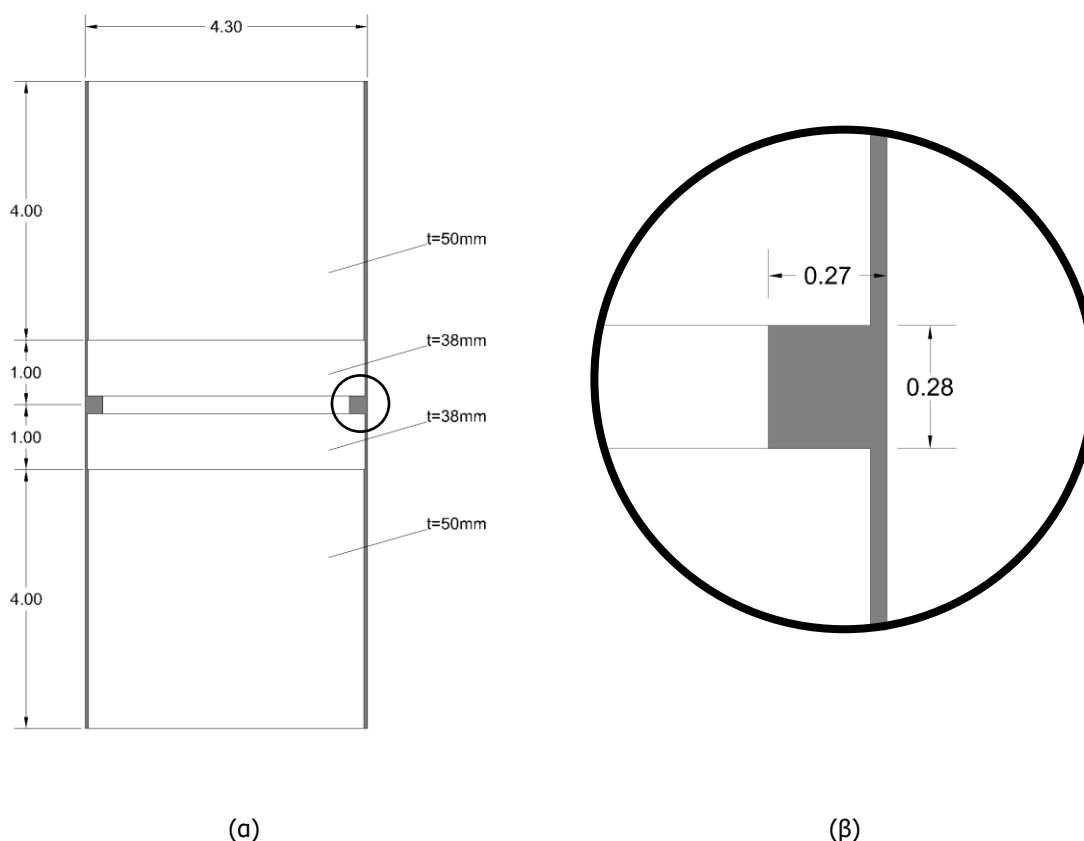
Η παραπάνω διερεύνηση δεν πραγματοποιήθηκε σε ολόκληρο το προσομοίωμα του μοντέλου, εξαιτίας του μεγάλου υπολογιστικού όγκου, αλλά σε αντιπροσωπευτικά τμήματα αυτού. Έγινε σύγκριση αποτελεσμάτων σε δύο μοντέλα. Το πρώτο επιλέχθηκε να είναι απλούστερης γεωμετρίας ως προς την εναλλαγή των διαφορετικών παχών του πυλώνα, εφόσον θα υπήρχε προσομοίωση με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, ενώ το δεύτερο τμήμα είναι ακριβές μέρος του πυλώνα. Η απλούστερη γεωμετρία προσομοιώθηκε και με τις τρεις μεθόδους ενώ η ακριβής δεν προσομοιώθηκε με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία. Καθώς στόχος αυτής της διερεύνησης δεν ήταν μόνο η επιλογή τύπου προσομοίωσης του πυλώνα, αλλά και των φλαντζών, κρίθηκε επιθυμητό η αστοχία κάθε μοντέλου να γίνει σε περιοχή πλησίον σύνδεσης, οπότε αφενός να αξιολογηθεί η αστοχία του πυλώνα και αφετέρου η εξασφάλιση που παρέχει σε αυτόν η ενισχυτική νευρώση. Παρ' όλα αυτά ασκώντας τα ακριβή φορτία σε κάθε μοντέλο παρατηρήθηκε ότι η αστοχία επερχόταν σε σημείο απομακρυσμένο από την σύνδεση.

Προκειμένου να υπερβληθεί αυτό το εμπόδιο με τον μικρότερο δυνατό συμβιβασμό, αποφασίσθηκε να γίνει μικρή αύξηση του πάχους στις ευάλωτες περιοχές μακριά από τις ενισχύσεις, ούτως ώστε να μεταφερθεί η περιοχή της αστοχίας στο επιθυμητό σημείο.

Για την διεξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων ως προς την αξιοπιστία κάθε τύπου προσομοίωσης ιδιαίτερης σημασίας είναι και ο τύπος της ανάλυσης που θα εφαρμοστεί. Επιλέχθηκαν ως πιο αντιπροσωπευτικές αναλύσεις, εφ' όσον αυτές θα καθορίσουν και την αντοχή ολοκλήρου του φορέα, η γραμμική ανάλυση λυγισμού και η μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με ατέλειες. Όλες οι αναλύσεις καθώς και η δημιουργία των μοντέλων έγινε με την χρήση του λογισμικού ADINA 9.3.

4.1.1 1ο δοκιμαστικό μοντέλο

Στόχος του συγκεκριμένου μοντέλου είναι η σύγκριση των διαφορετικών προσομοιώσεων με την προσομοίωση με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, η οποία θεωρήθηκε η πιο αξιόπιστη. Η γεωμετρία επιλέχθηκε απλούστερη και με περιορισμένες διαστάσεις, ούτως ώστε να είναι δυνατή η τρίτη προσομοίωση λόγω των ιδιαίτερων απαιτήσεων αυτής σε υπολογιστικό χρόνο. Το μοντέλο αυτό είναι ένα τμήμα ύψους 10 m και διαμέτρου 4,3 m με φλάντζα στο μέσον του ύψους. Το πάχος του κελύφους επιλέχθηκε 50 mm, ενώ σε μία ζώνη ύψους 2 m γύρω από την ενίσχυση αυτό μειώθηκε στα 38 mm. Η σύνδεση αποτελείται από δύο ίδια πέλματα πάχους 14 cm έκαστο και πλάτους 27 cm. Όπως προαναφέρθηκε το μοντέλο προσομοιώθηκε και με τους τρεις συνδυασμούς υπό διερεύνηση. Εξαιτίας του μεγάλου υπολογιστικού όγκου για αυτό το μοντέλο έγινε σύγκριση μόνο στα κρίσιμα φορτία της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού. Ως συνοριακές συνθήκες ορίσθηκαν πλήρης δέσμευση όλων των βαθμών ελευθερίας στην βάση και ελεύθερο άκρο στην κορυφή, ενώ τα φορτία ασκούνται ως συγκεντρωμένες δυνάμεις και ροπές στην κορυφή όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 4.1.



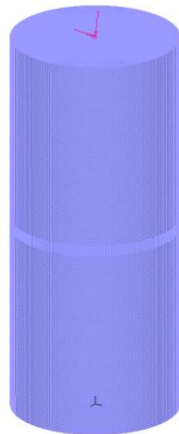
Εικόνα 14: 1^ο δοκιμαστικό μοντέλο (α) κατακόρυφη τομή (β) λεπτομέρεια φλάντζας

Πίνακας 4.1: Εξωτερικά φορτία κορυφής 1^{ου} δοκιμαστικού μοντέλου

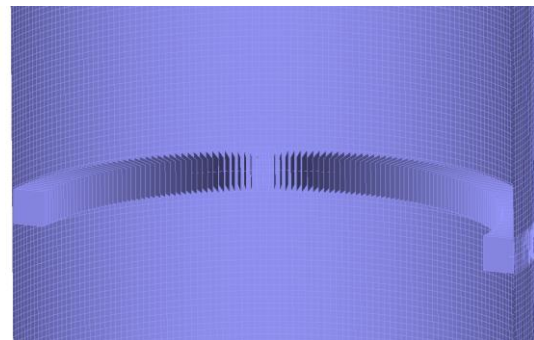
F_H [kN]	F_V [kN]	M_H [kNm]	M_V [kNm]
1253,6	-6145,4	103667,6	3244,0

1^η προσομοίωση

Σε αυτή την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους για το σώμα του πυλώνα και στοιχεία δοκού για την φλάντζα. Εξαιτίας της εκκεντρότητας μεταξύ του γεωμετρικού κέντρου της διατομής της φλάντζας και της μέσης επιφάνειας του κελύφους πυλώνα χρησιμοποιήθηκαν άκαμπτοι σύνδεσμοι μεταξύ των δύο.



(a)

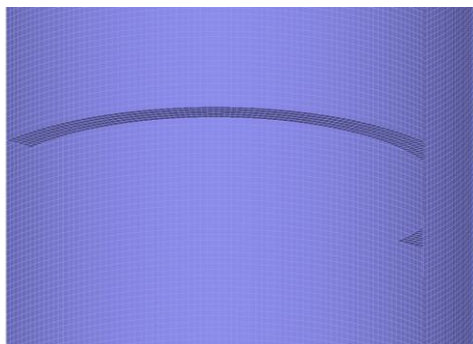


(β)

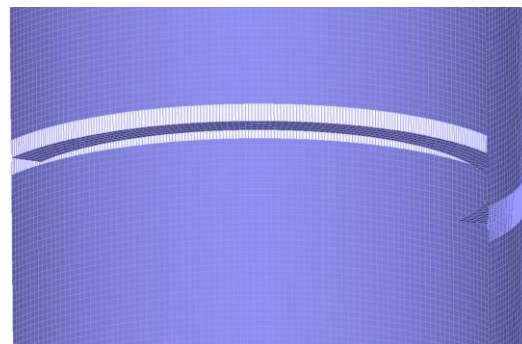
Εικόνα 15: Προσομοίωση 1 (α) τρισδιάστατη απεικόνιση φορέα (β) προσομοίωση φλάντζας με στοιχεία δοκού

2^η προσομοίωση

Σε αυτή την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους για το σώμα του πυλώνα και επίσης στοιχεία κελύφους για την φλάντζα. Για την διερεύνηση της καλύτερης δυνατής προσέγγισης της ενισχυτικής νεύρωσης εξετάστηκαν δύο τρόποι: α) απλή σύνδεση μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων κελύφους και β) με την χρήση άκαμπτων συνδέσμων μεταξύ της φλάντζας και του πυλώνα κατά το πάχος της πρώτης.



προσομοίωση 2α

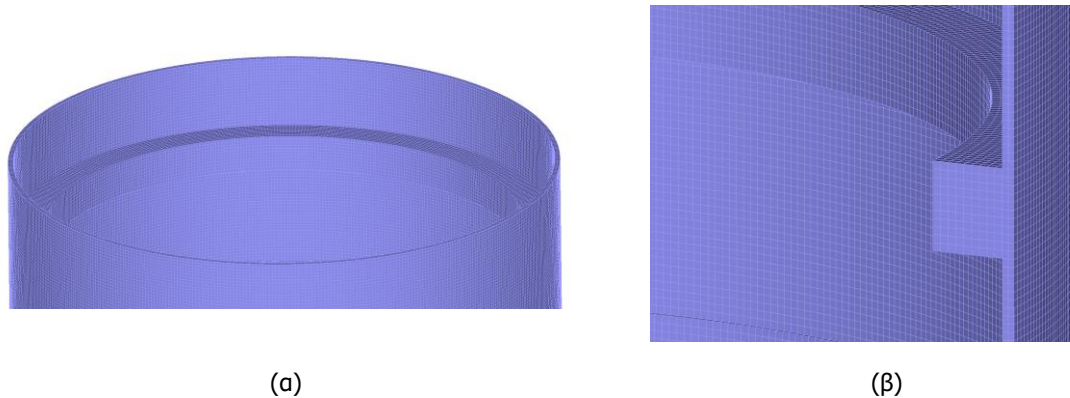


Προσομοίωση 2β

Εικόνα 16: Προσομοίωση φλάντζας με στοιχεία κελύφους

3^η προσομοίωση

Σε αυτή την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία για όλα τα τμήματα του φορέα.



Εικόνα 17: Προσομοίωση φορέα με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία κατά την προσομοίωση 3

4.1.1.1 Αποτελέσματα αναλύσεων γραμμικής ανάλυσης λυγισμού

Όπως προαναφέρθηκε, για το συγκεκριμένο μοντέλο η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε στα κρίσιμα φορτία της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού και στα σχήματα των αντίστοιχων ιδιομορφών. Οι φορτιστικοί συντελεστές των κρίσιμων φορτίων λυγισμού συμβολίζονται με λ_i^1 όπου η είναι ο συμβολισμός του τύπου της προσομοίωσης και i ο αριθμός της ιδιομορφής.



Εικόνα 18: 1^η ιδιομορφή λυγισμού των τεσσάρων ειδών προσομοίωσης

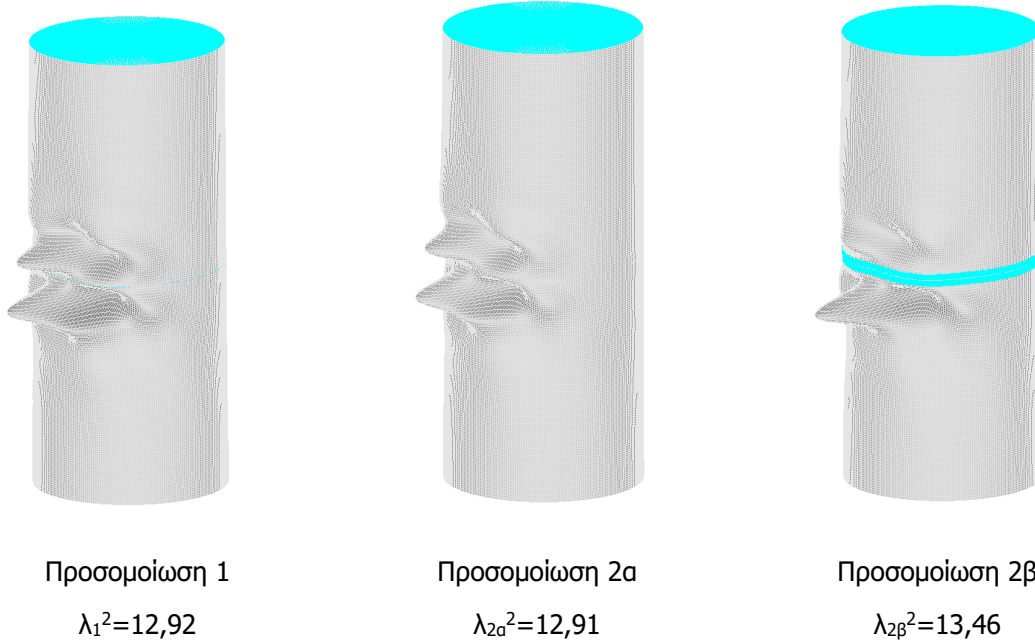
Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων κρίθηκε καταλληλότερη η σύγκριση όλων των μοντέλων με την προσομοίωση όπου χρησιμοποιήθηκαν τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία.

$$\lambda_1^1 / \lambda_3^1 = 97,8 \%$$

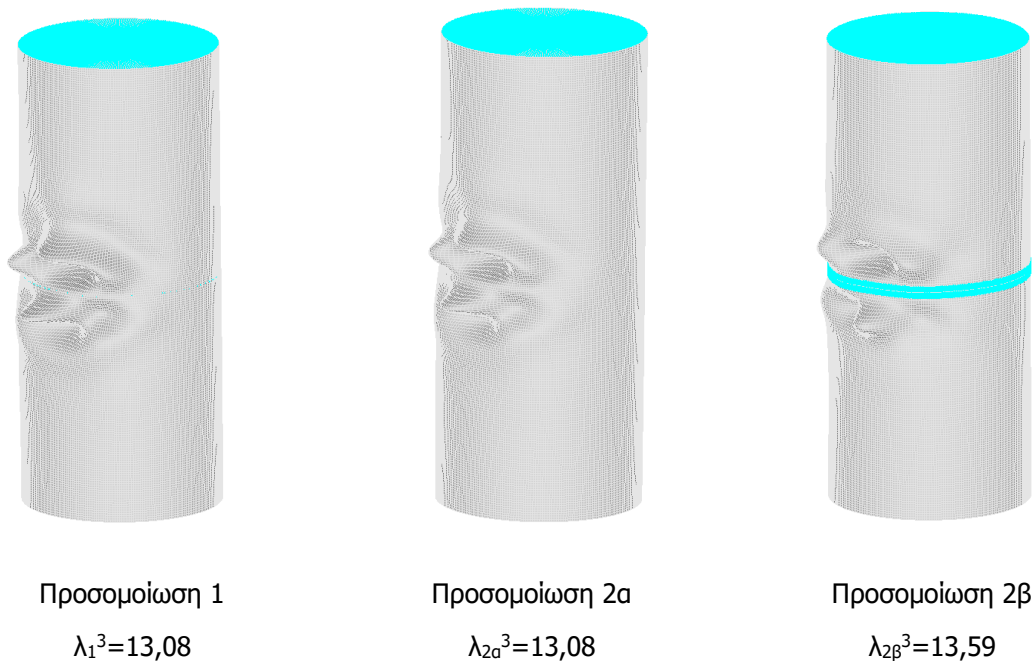
$$\lambda_{2\alpha}^1 / \lambda_3^1 = 97,7 \%$$

$$\lambda_{2\beta}^1 / \lambda_3^1 = 102,5 \%$$

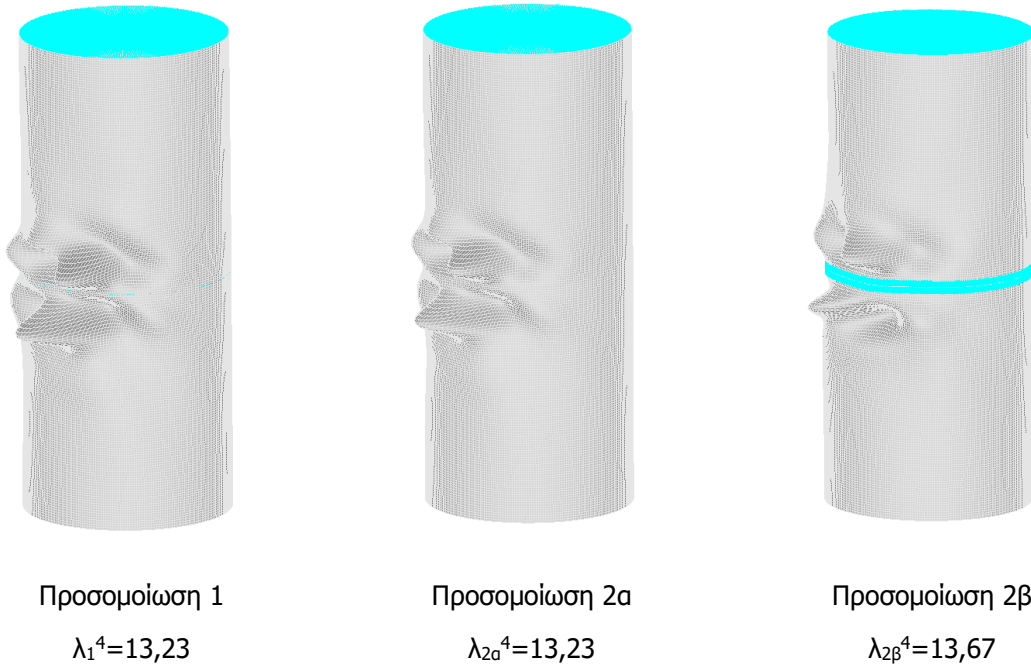
Σε μία πρώτη ερμηνεία φαίνεται ότι όλες οι προσομοιώσεις καταλήγουν σε πολύ κοντινά κρίσιμα φορτία όπου η προσομοίωση 1 και 2α να είναι εκείνες με την μικρότερη απόκλιση από την 3, ενώ η 2β ακολουθεί, αλλά με μικρή υπερεκτίμηση του φορτίου σε σχέση με τις υπόλοιπες. Για την περαιτέρω διερεύνηση γίνεται επιπλέον εποπτικός έλεγχος ορισμένων ανώτερων ιδιομορφών. Εξαιτίας του εξαιρετικά μεγάλου υπολογιστικού όγκου της προσομοίωσης 3 δεν ήταν δυνατός ο υπολογισμός ανώτερων ιδιομορφών αυτής, οπότε η σύγκριση έγινε μεταξύ των υπολοίπων, λαμβάνοντας υπόψιν ότι όλες οι προσομοιώσεις παρέχουν αρκετά όμοια με την προσομοίωση 3 αποτελέσματα.



Εικόνα 19: 2^η ιδιομορφή λυγισμού των τεσσάρων ειδών προσομοίωσης



Εικόνα 20: 3^η ιδιομορφή λυγισμού των τεσσάρων ειδών προσομοίωσης



Εικόνα 21: 4^η ιδιομορφή λυγισμού των τεσσάρων ειδών προσομοίωσης

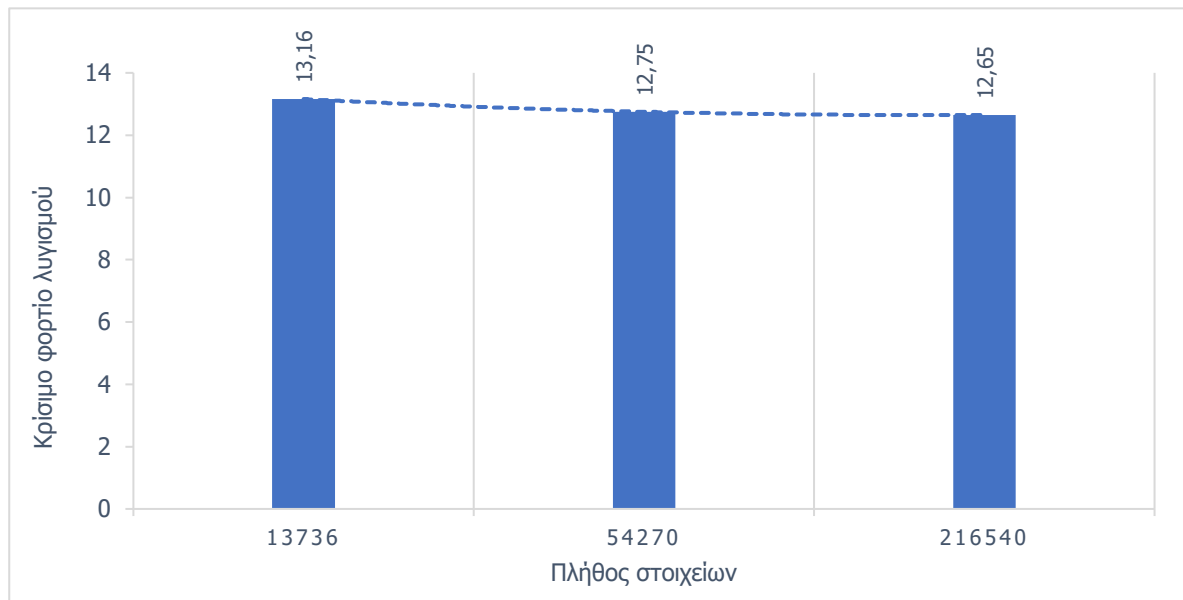
Παρατηρώντας τους φορτιστικούς συντελεστές για τα κρίσιμα φορτία εντοπίζεται μία σχετικά σταθερή σχέση μεταξύ των τριών προσομοιώσεων για κάθε ιδιομορφή, με τις 1 και 2α να παρέχουν πανομοιότυπα αποτελέσματα. Σχετικά με τα σχήματα των ιδιομορφών ανώτερης τάξης υπάρχει απόλυτη συμφωνία μεταξύ της προσομοίωσης 1 και 2α, ενώ υπάρχει σχετική απόκλιση της προσομοίωσης 2β, παρ' όλα αυτά παρατηρείται ότι συμβαδίζει σε ικανοποιητικό βαθμό.

Οι δυνατότητες εξαγωγής συμπερασμάτων για την συγκεκριμένη ανάλυση περιορίζονται στις προηγούμενες παρατηρήσεις. Έχοντας υπόψιν τον τύπο της ανάλυσης η οποία θα εφαρμοστεί για τον προσδιορισμό της αντοχής ολόκληρου του φορέα, η οποία είναι μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες, γίνεται αντιληπτό ότι η διερεύνηση αυτή είναι ελλιπής και απαιτούνται πιο ακριβείς αναλύσεις, όπως περιγράφονται στην παράγραφο 4.1.2.

4.1.1.2 Έλεγχος σύγκλισης

Προκειμένου να υπάρξει εκμετάλλευση της πλήρους ακρίβειας που έχει δυνατότητα να παρέχει κάθε είδος προσομοίωσης, αλλά και να υπάρχει αντικειμενική σύγκριση μεταξύ αυτών, είναι απαραίτητη η σύγκλιση της πυκνότητας του εκάστοτε πλέγματος. Για το συγκεκριμένο μοντέλο θεωρήθηκε επαρκής η σύγκλιση κατά 95 %, ενώ ως μέτρο ελέγχου χρησιμοποιήθηκε το κρίσιμο φορτίο λυγισμού της 1^{ης} ιδιομορφής κάθε ανάλυσης.

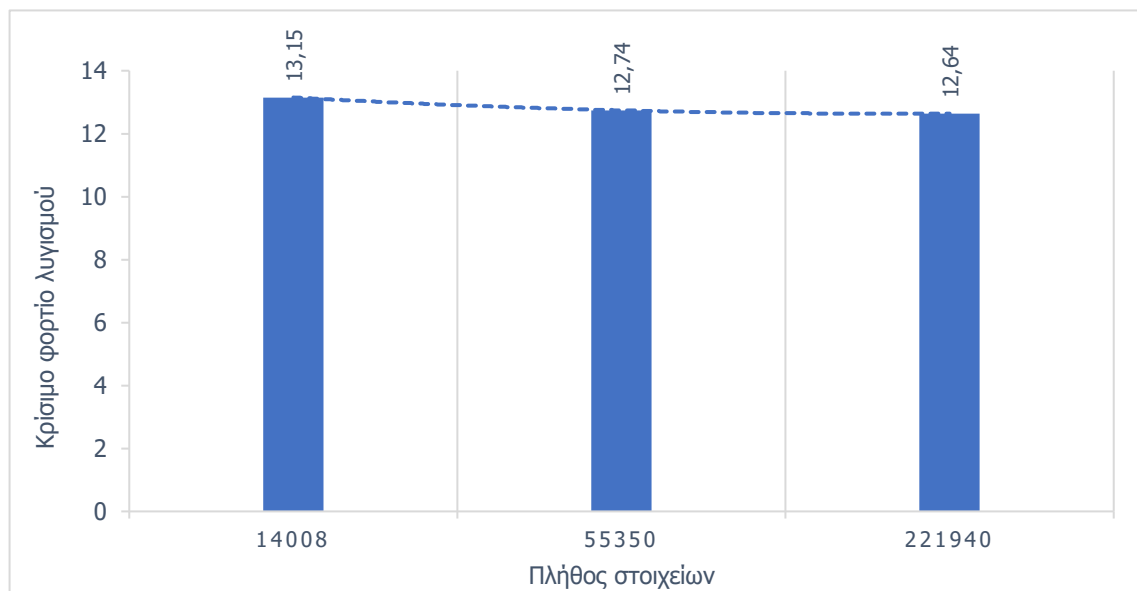
Προσομοίωση 1



Γράφημα 4.1: Έλεγχος σύγκλισης προσομοίωσης 1 με 4-κομβικά στοιχεία κελύφους

Για τα δύο αραιότερα πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 10 cm και 5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 97 %, άρα επιτυγχάνεται σύγκλιση, η οποία επιβεβαιώθηκε και από μία επιπλέον πύκνωση με διαστάσεις πλευρών στοιχείων 2,5 cm.

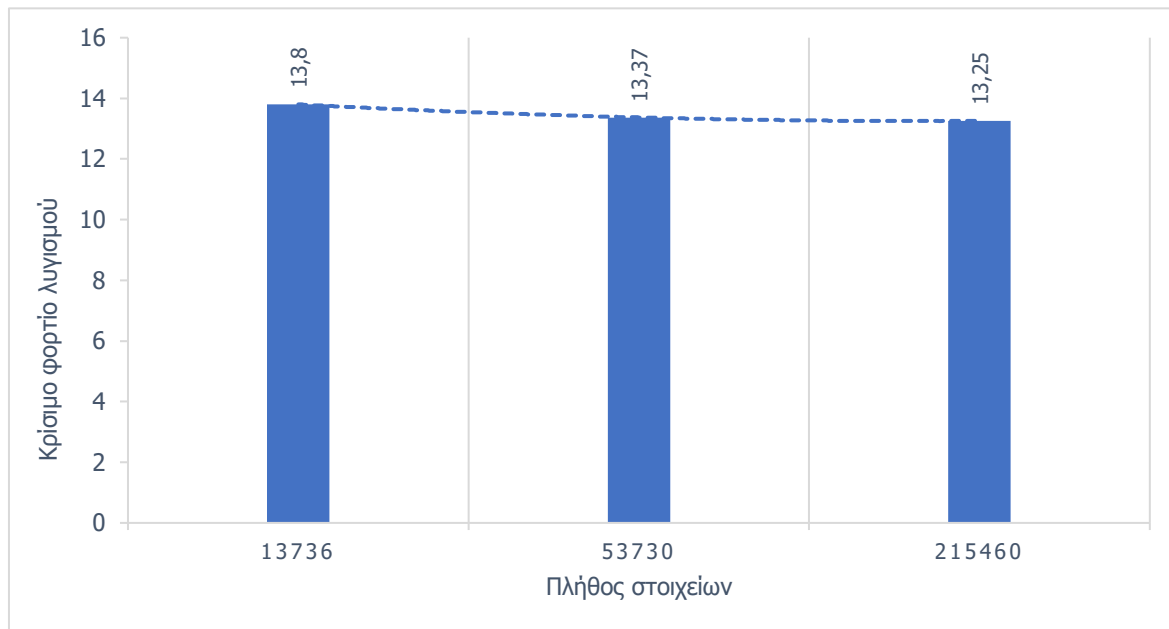
Προσομοίωση 2a



Γράφημα 4.2: Έλεγχος σύγκλισης προσομοίωσης 2a με 4-κομβικά στοιχεία κελύφους

Για τα δύο αραιότερα πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 10 cm και 5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 97 %, άρα επιτυγχάνεται σύγκλιση, η οποία επιβεβαιώθηκε και από μία επιπλέον πύκνωση με διαστάσεις πλευρών στοιχείων 2,5 cm.

Προσομοίωση 2β

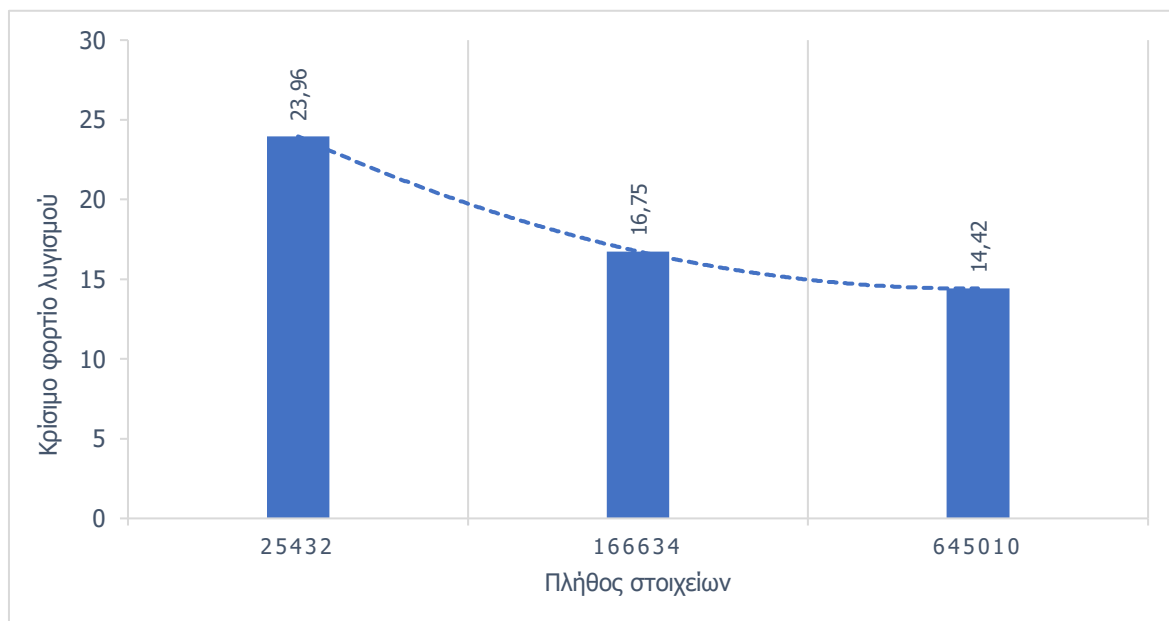


Γράφημα 4.3: Έλεγχος σύγκλισης προσομοίωσης 2β με 4-κομβικά στοιχεία κελύφους

Για τα δύο αραιότερα πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 10 cm και 5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 97 %, άρα επιτυγχάνεται σύγκλιση, η οποία επιβεβαιώθηκε και από μία επιπλέον πύκνωση με διαστάσεις πλευρών στοιχείων 2,5 cm.

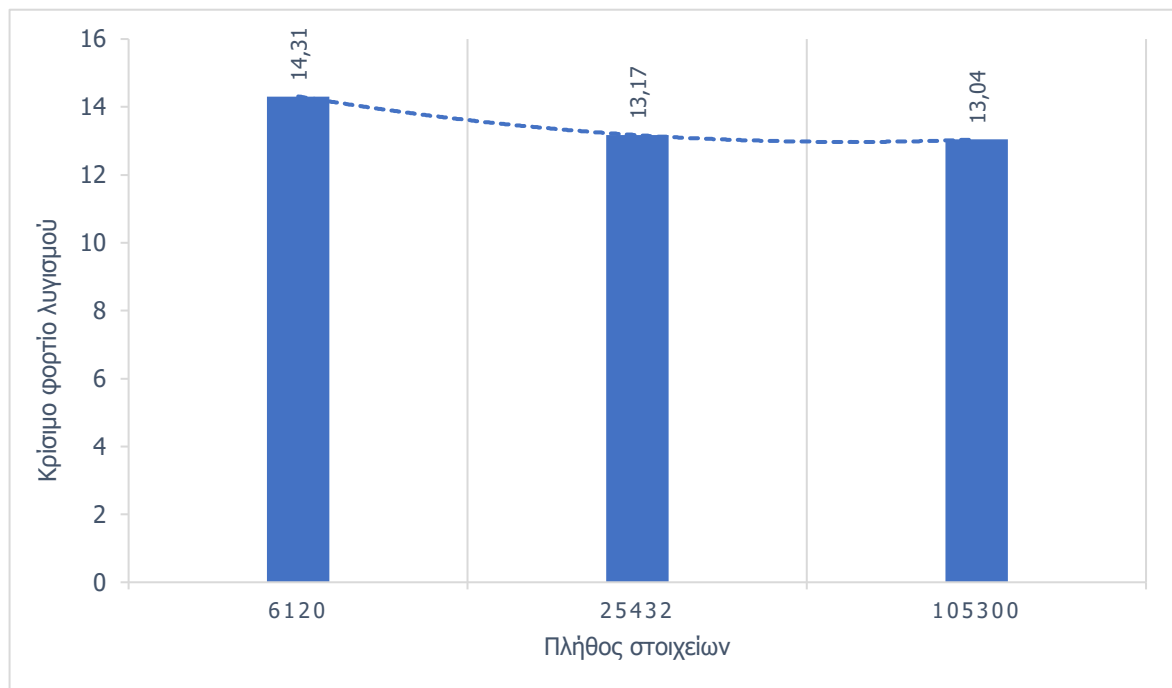
Προσομοίωση 3

Η προσομοίωση αυτή αποδείχθηκε η πιο απαιτητική και η πιο ευαίσθητη ως προς την πυκνότητα της διακριτοποίησης του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση 8-κομβικά τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, δηλαδή στοιχεία με κόμβους μόνο στις κορυφές. Οι έλεγχοι σύγκλισης παρουσιάζονται στα γραφήματα 4.4 και 4.5.



Γράφημα 4.4: Έλεγχος σύγκλισης προσομοίωσης 3 με 8-κομβικά τρισδιάστατα στοιχεία

Για τα δύο πυκνότερα πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 5 cm και 2,5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 86 %, άρα δεν επιτυγχάνεται η σύγκλιση. Παρ' όλα αυτά η περαιτέρω πύκνωση του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων ήταν απαγορευτική, λαμβάνοντας υπόψιν τον εξαιρετικά μεγάλο αριθμό στοιχείων και υπολογιστικό χρόνο που ήδη χρειάστηκε για την ολοκλήρωση της πυκνότερης διαθέσιμης ανάλυσης. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν 20-κομβικά τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία με ενδιάμεσους κόμβους στις πλευρές, τα οποία διαθέτουν καλύτερης ακρίβειας συναρτήσεις σχήματος (2ου βαθμού) σε σχέση με τα 8-κομβικά.



Γράφημα 4.5: Έλεγχος σύγκλισης προσομοίωσης 3 με 20-κομβικά τρισδιάστατα στοιχεία

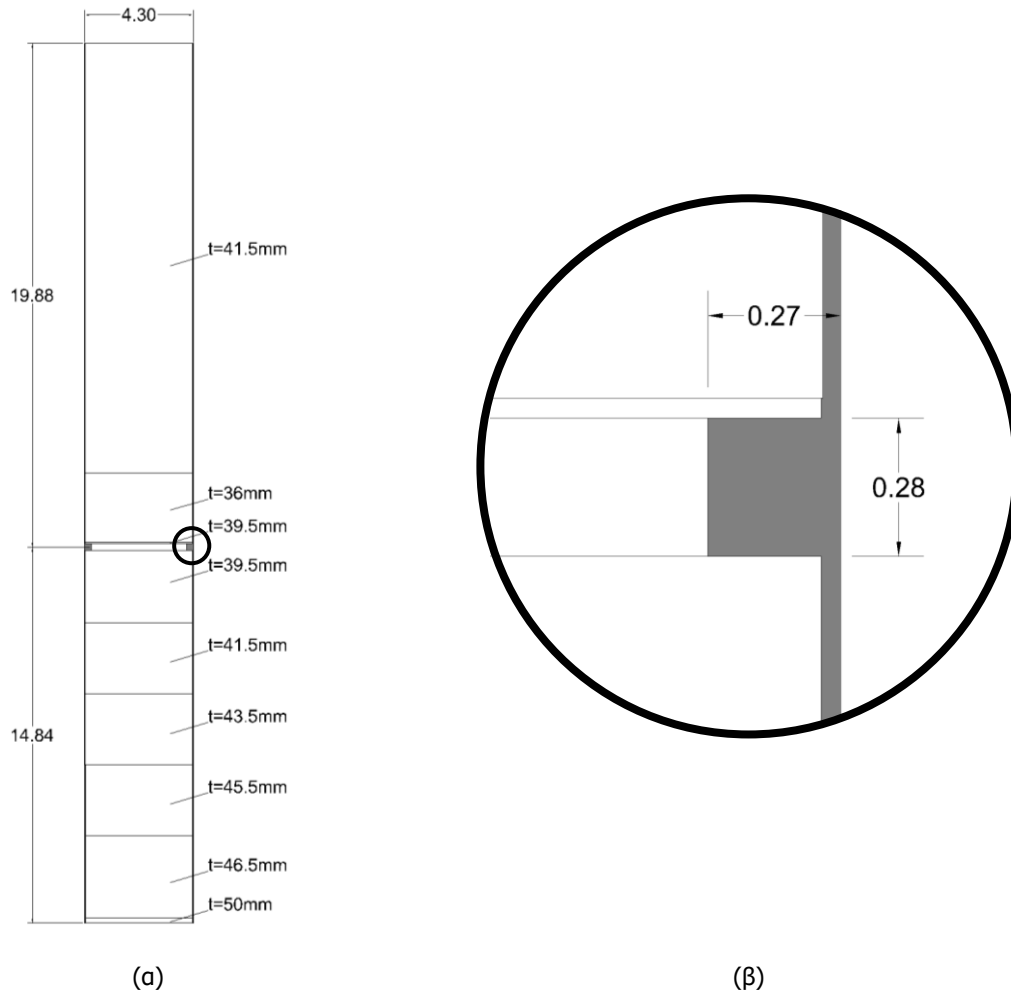
Για τα δύο πυκνότερα πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 10 cm και 5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 99 %, άρα επιτυγχάνεται σύγκλιση.

4.1.2 2ο δοκιμαστικό μοντέλο

Προκειμένου να σχηματιστεί μία ακόμη καλύτερη εικόνα σχετικά με την αξιοπιστία των διαφορετικών τύπων προσομοίωσης πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις. Στο μοντέλο αυτό έγιναν οι προσομοιώσεις 1, 2α και 2β ομοίως με το προηγούμενο, ενώ δεν πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση 3, στις οποίες εφαρμόστηκε γραμμική ανάλυση λυγισμού και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες. Εφόσον δεν υπήρξε περιορισμός ως προς το μέγεθος του φορέα λόγω της απουσίας προσομοίωσης με τρισδιάστατα στοιχεία, προκειμένου να υπάρχει μεγαλύτερη συμβατότητα με τον πραγματικό φορέα, επιλέχθηκε ένα ακριβές τμήμα αυτού και συγκεκριμένα το 3^ο και 4^ο τμήμα με την μεταξύ τους σύνδεση. Πρόκειται για τμήματα ύψους περίπου 15 και 20 μέτρων αντίστοιχα με σταθερή ακτίνα 4,30 m και εναλλαγή στα πάχη τα οποία κυμαίνονται από τα 50 mm έως τα 36 mm. Όπως προαναφέρθηκε υπήρξε μικρή διαφοροποίηση από την ακριβή γεωμετρία με αύξηση του πάχους στα ανώτερα σημεία με σκοπό την καθοδήγηση της αστοχίας σε περιοχή κοντά στην σύνδεση για να μπορεί να αξιολογηθεί η προσομοίωση αυτής. Ως συνοριακές συνθήκες ορίστηκαν πλήρης δέσμευση όλων των βαθμών ελευθερίας στην βάση και ελεύθερο άκρο στην κορυφή, ενώ τα φορτία ασκούνται ως συγκεντρωμένες δυνάμεις και ροπές στην κορυφή όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Εξωτερικά φορτία κορυφής 2^{ου} δοκιμαστικού μοντέλου

F_H [kN]	F_V [kN]	M_H [kNm]	M_V [kNm]
1258,7	5779,2	92970,9	-3263,9

Εικόνα 22: 2^ο δοκιμαστικό μοντέλο (α) κατακόρυφη τομή (β) λεπτομέρεια φλάντζας

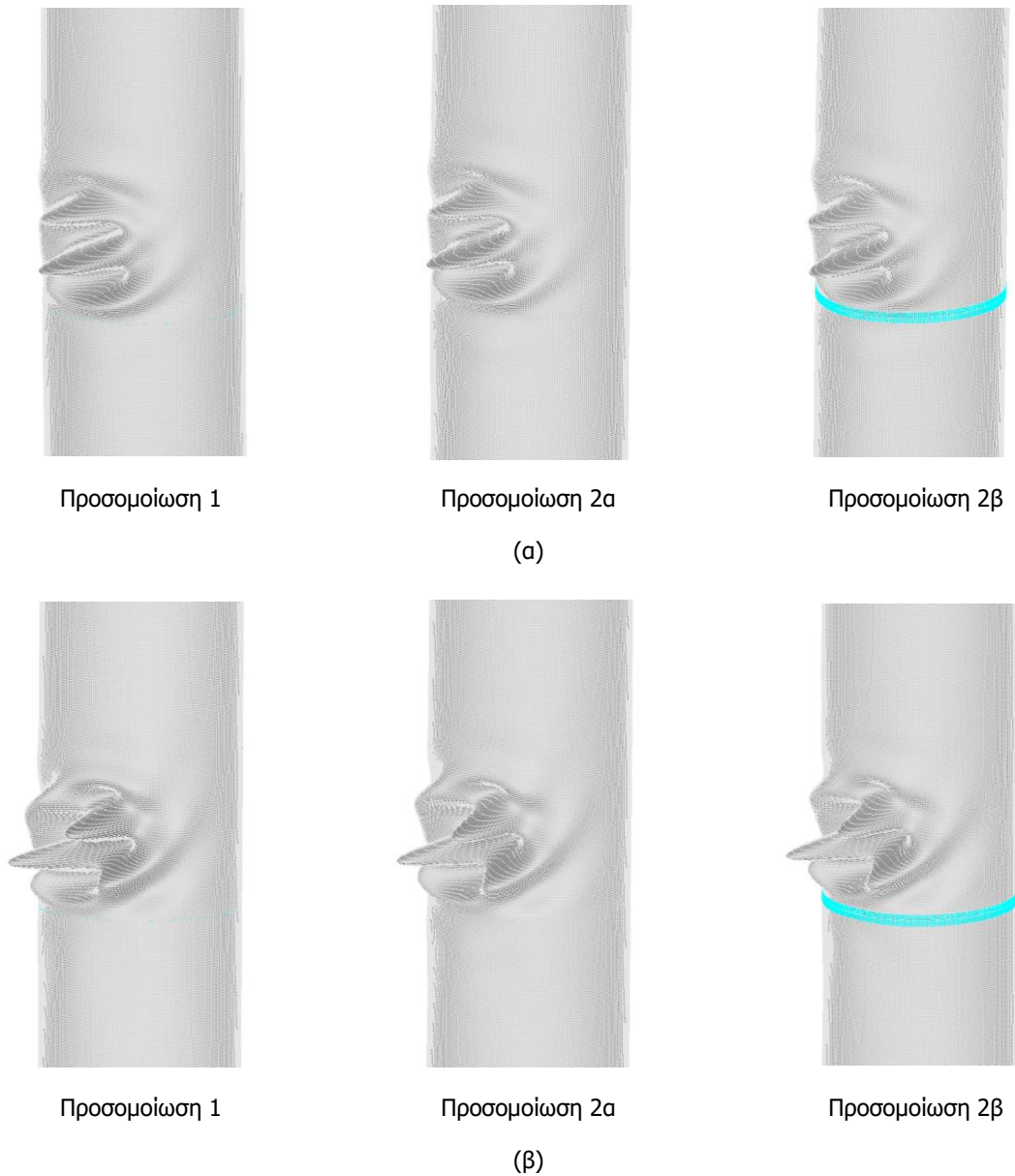
Οι τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις έγιναν ομοίως με το 1^ο δοκιμαστικό μοντέλο όπως φαίνεται στην εικόνα 23.



Εικόνα 23: Τύποι προσομοίωσης

4.1.2.1 Αποτελέσματα γραμμικής ανάλυσης λυγισμού

Σε όλα τα μοντέλα πραγματοποιήθηκε αρχικά μία γραμμική ανάλυση λυγισμού. Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι ιδιαίτερης σημασίας τόσο τα κρίσιμα φορτία όσο τα σχήματα των ιδιομορφών, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια ως αρχικές ατέλειες για τις μη γραμμικές αναλύσεις.

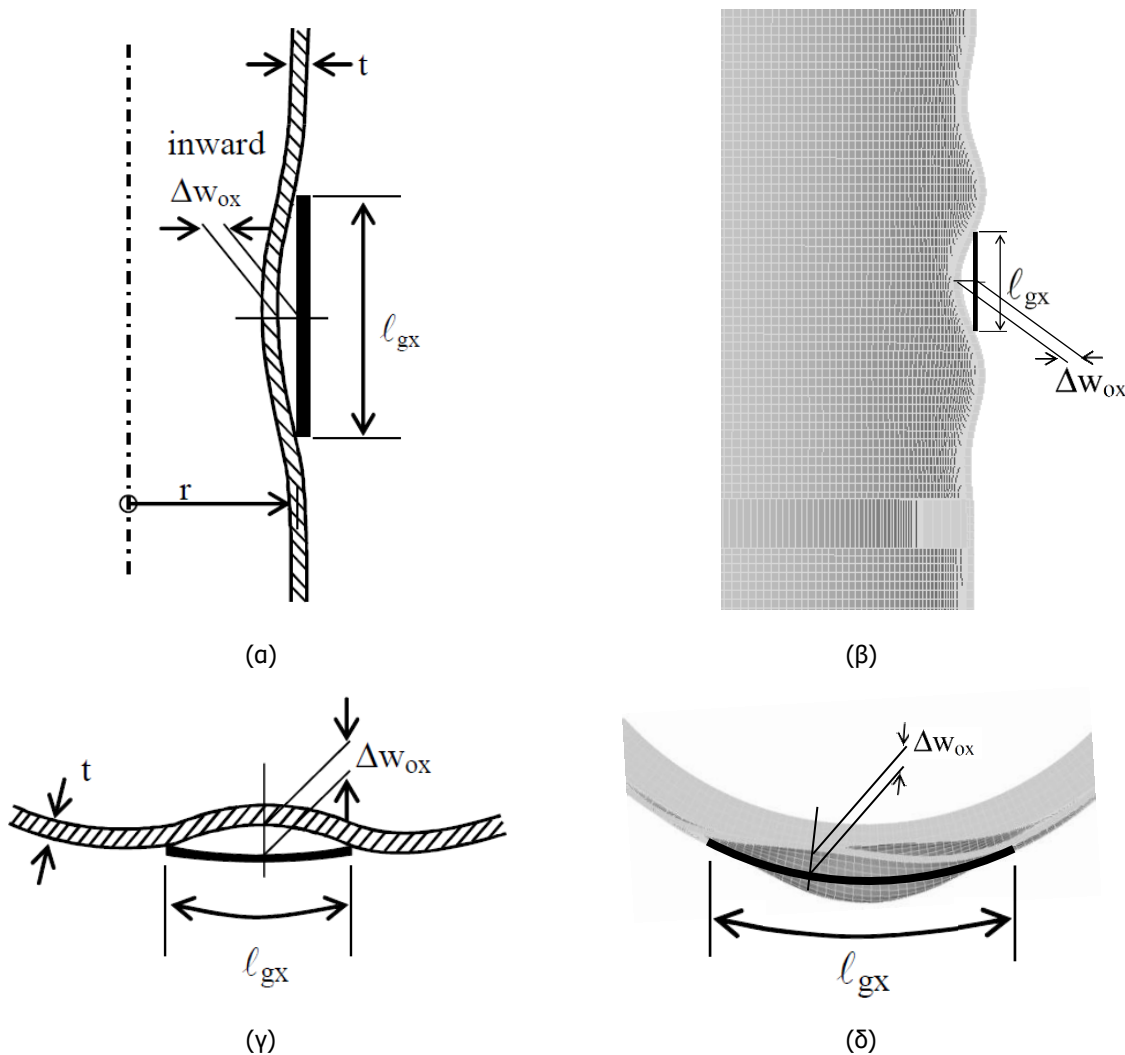


Εικόνα 24: Σχήματα ιδιομορφών λυγισμού (α) 1^η ιδιομορφή (β) 3^η ιδιομορφή

Είναι αντιληπτό ότι υπάρχει απόλυτη συμφωνία μεταξύ του σχήματος κάθε ιδιομορφής και για τις τρεις προσομοιώσεις σε αυτή την περίπτωση. Αυτό συμβαίνει αντίθετα από το προηγούμενο μοντέλο εφόσον η περιοχή του λυγισμού είναι ελαφρώς περισσότερο απομακρυσμένη από την ενισχυτική νεύρωση.

4.1.2.2 Ατέλειες

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι μη γραμμικές αναλύσεις έγινε εισαγωγή αρχικών ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών με δυσμενή επίδραση σύμφωνα με την παράγραφο 2.8.3. Όπως συστήνεται και στον EN 1993-1-6 ^[1] οι αρχικές ατέλειες πρέπει να επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν την μεγαλύτερη δυνατή δυσμενή επίδραση. Η πιο ενδεδειγμένη μέθοδος για την λήψη των δυσμενέστερων αρχικών ατελειών είναι η χρήση των σχημάτων των ιδιομορφών της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού, η οποία χρησιμοποιήθηκε και στην συγκεκριμένη μελέτη. Συγκεκριμένα έγινε χρήση της 1^{ης} ιδιομορφής ως αρχική ατέλεια και για τις τρεις προσομοιώσεις. Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την αντοχή του φορέα είναι η επιλογή του μεγέθους των αρχικών ατελειών. Κατά τον κανονισμό οι αρχικές ατέλειες εξαρτώνται από την κατασκευαστική κλάση της ανεμογεννήτριας και εισάγονται ως ισοδύναμες γεωμετρικές. Στην συγκεκριμένη διερεύνηση έγινε εφαρμογή των δύο ακραίων κατασκευαστικών κατηγοριών, της χαμηλότερης κλάσης C (Normal) και της υψηλότερης A (Excellent). Η απόκλιση από την τέλεια γεωμετρία της ισοδύναμης γεωμετρικής ατέλειας επιλέγεται ως η μεγαλύτερη τιμή των δύο σχέσεων. Στην εικόνα 25 παρουσιάζεται η αντιστοίχιση των ανοχών που περιγράφονται στους κανονισμούς με τις εισαχθείσες στο υπολογιστικό μοντέλο αρχικές ατέλειες.



Εικόνα 25: Αντιστοίχιση κανονιστικών ατελειών με τις εισαχθείσες αρχικές ατέλειες στο αριθμητικό προσομοίωμα

Ως l_{gx} λαμβάνεται το ελάχιστο εκ της μεσημβρινής και περιφερειακής μέτρησης, οι οποίες είναι ίδιες και για τις τρεις προσομοιώσεις εφόσον έχουν πανομοιότυπα σχήματα ιδιομορφών.

$$l_{gx} = \min(l_{gx,mer} ; l_{gx,cir}) = \min(1,05\text{m} ; 2,81\text{m}) = 1,05\text{ m}$$

$$t = 36\text{ mm}$$

Για κατασκευαστική κλάση C:

$$\Delta w_{0,eq} = \max(\Delta w_{0,eq,1} ; \Delta w_{0,eq,2}) = \max(26,2\text{mm} ; 22,5\text{mm}) = 26,2\text{ mm}$$

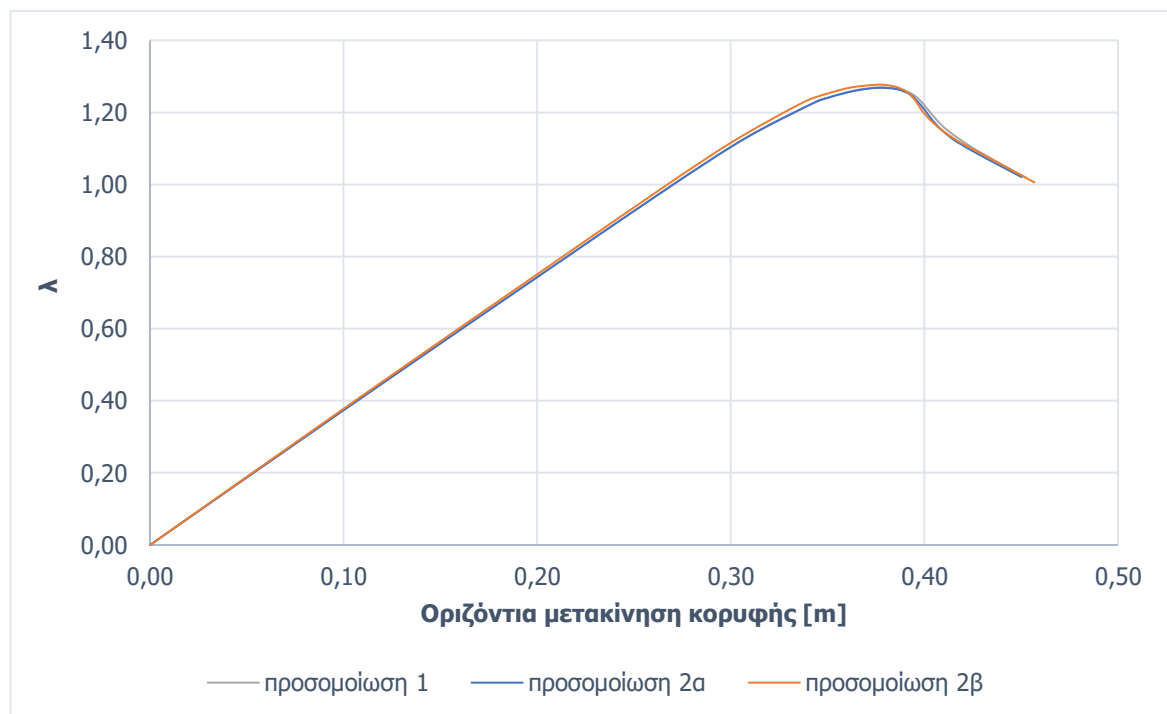
Για κατασκευαστική κλάση A:

$$\Delta w_{0,eq} = \max(\Delta w_{0,eq,1} ; \Delta w_{0,eq,2}) = \max(10,5\text{mm} ; 9\text{mm}) = 10,5\text{ mm}$$

4.1.2.3 Αποτελέσματα μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με ατέλειες

Η ανάλυση αυτή είναι η περισσότερο ακριβής και αξιόπιστη, τα αποτελέσματα της οποίας αποτέλεσαν για το συγκεκριμένο μοντέλο το τελικό κριτήριο επιλογής τύπου προσομοίωσης ολόκληρης της κατασκευής. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται με την χάραξη του δρόμου ισορροπίας του φορέα χρησιμοποιώντας ως μέτρο ελέγχου την οριζόντια μετακίνηση της κορυφής. Ο φορτιστικός συντελεστής συμβολίζεται με λ_n όπου n είναι ο συμβολισμός του τύπου της προσομοίωσης.

Αναλύσεις με θεώρηση κατασκευαστικών ανοχών κατηγορίας C

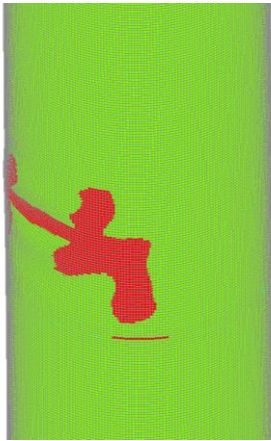


Γράφημα 4.6: Δρόμος ισορροπίας για κατασκευαστική κλάση C

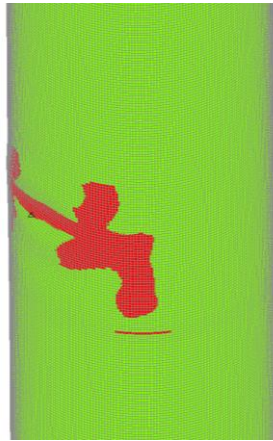
Στο οριακό σημείο κάθε προσομοίωσης:

- $\lambda_{1,lim} = r_{R,GMNIA} = 1,270$
- $\lambda_{2\alpha,lim} = r_{R,GMNIA} = 1,268$
- $\lambda_{2\beta,lim} = r_{R,GMNIA} = 1,277$

■ PLASTIC
■ ELASTIC



Προσομοίωση 1

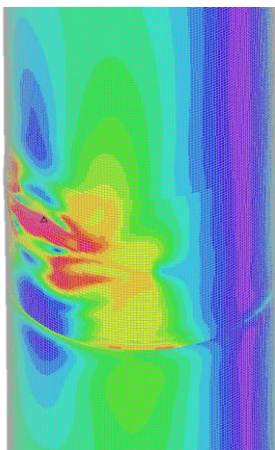


Προσομοίωση 2α

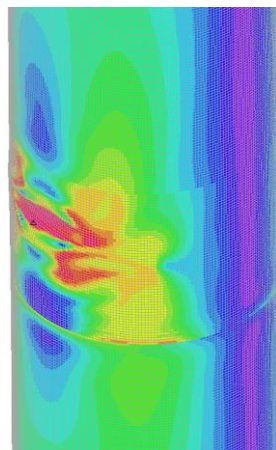


Προσομοίωση 2β

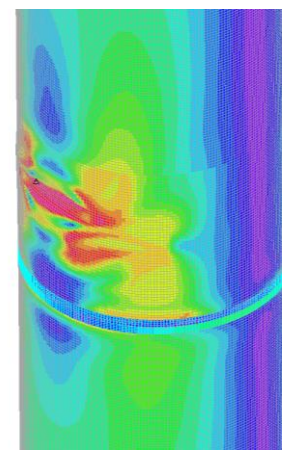
Εικόνα 26: Περιοχή διαρροής υλικού στο οριακό σημείο για κατασκευαστική κλάση C



Προσομοίωση 1



Προσομοίωση 2α



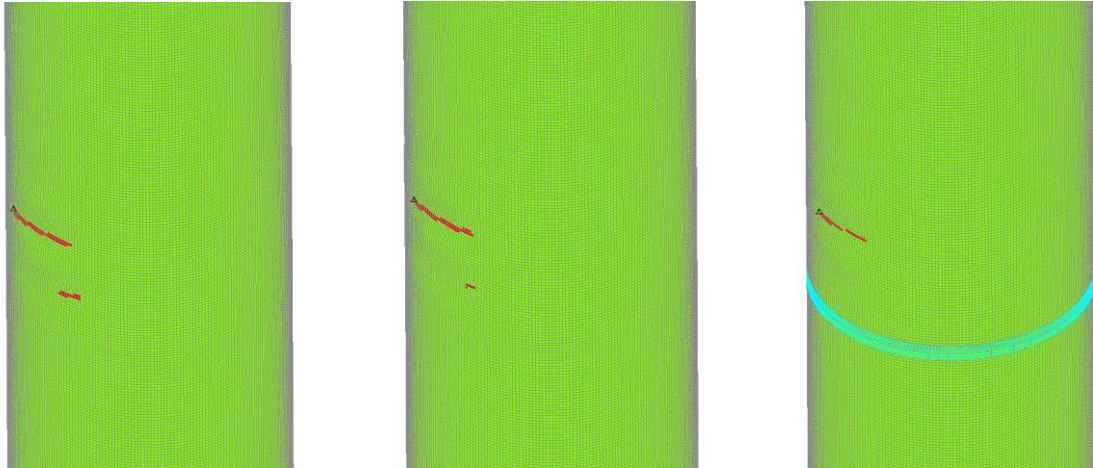
Προσομοίωση 2β

Εικόνα 27: Κατανομή τάσεων von Mises στο οριακό σημείο για κατασκευαστική κλάση C

Στο σημείο πρώτης διαρροής του υλικού κάθε προσομοίωσης:

- $\lambda_{1,pl}=0,970$
- $\lambda_{2a,pl}=0,971$
- $\lambda_{2\beta,pl}=0,981$

— PLASTIC
— ELASTIC

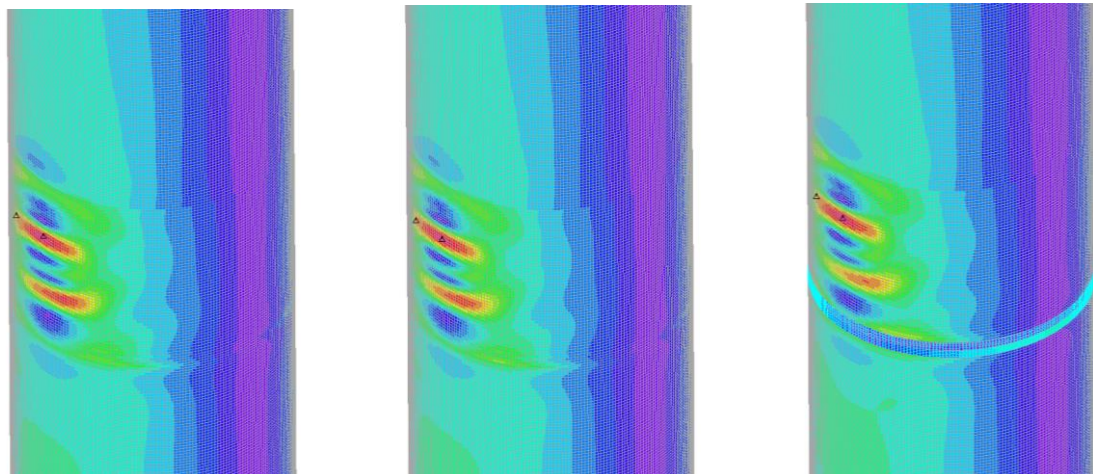


Προσομοίωση 1

Προσομοίωση 2α

Προσομοίωση 2β

Εικόνα 28: Περιοχή πρώτης διαρροής υλικού για κατασκευαστική κλάση C



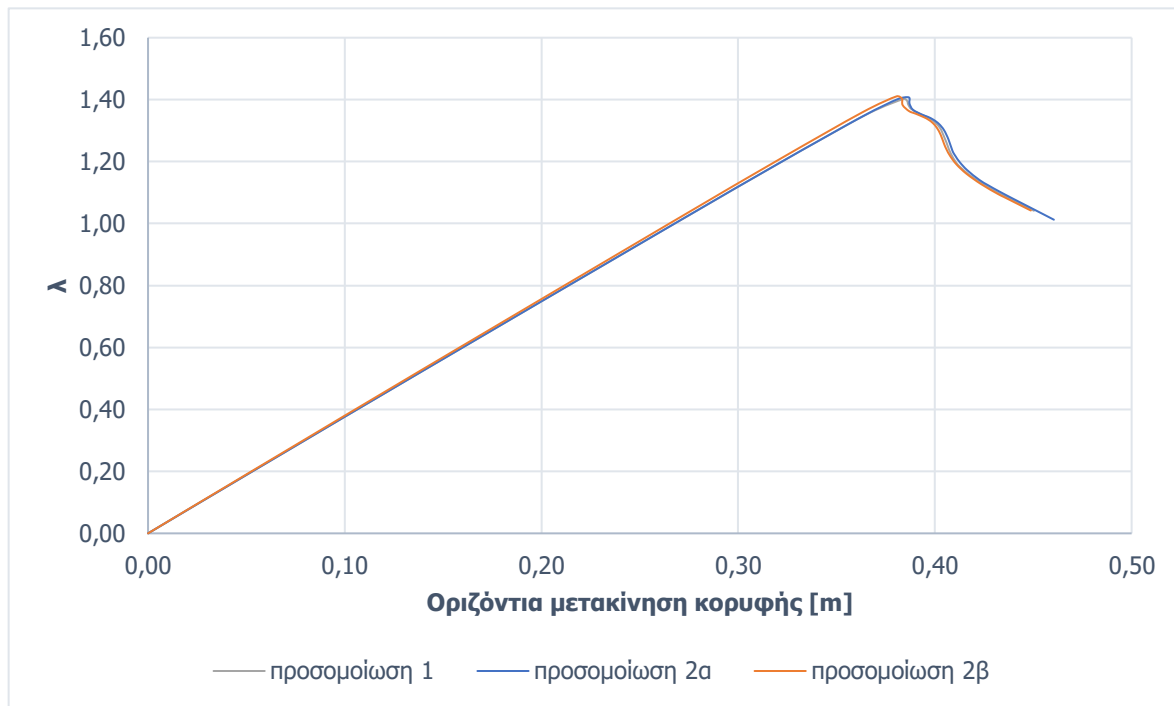
Προσομοίωση 1

Προσομοίωση 2α

Προσομοίωση 2β

Εικόνα 29: Κατανομή τάσεων von Mises στο σημείο πρώτης διαρροής υλικού για κατασκευαστική κλάση C

Αναλύσεις με θεώρηση κατασκευαστικών ανοχών κατηγορίας A

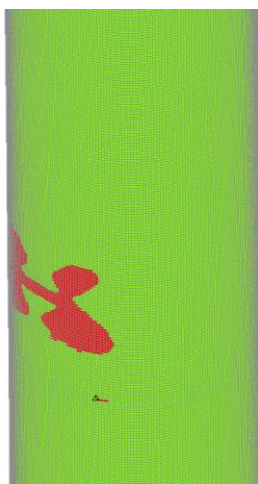


Γράφημα 4.7: Δρόμος ισορροπίας για κατασκευαστική κλάση A

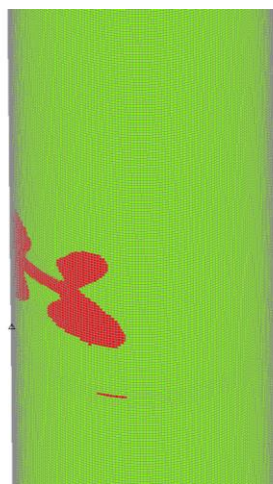
Στο οριακό σημείο κάθε προσομοίωσης:

- $\lambda_{1,lim} = r_{R,GMNIA} = 1,402$
- $\lambda_{2\alpha,lim} = r_{R,GMNIA} = 1,407$
- $\lambda_{2\beta,lim} = r_{R,GMNIA} = 1,410$

— PLASTIC
— ELASTIC



Προσομοίωση 1

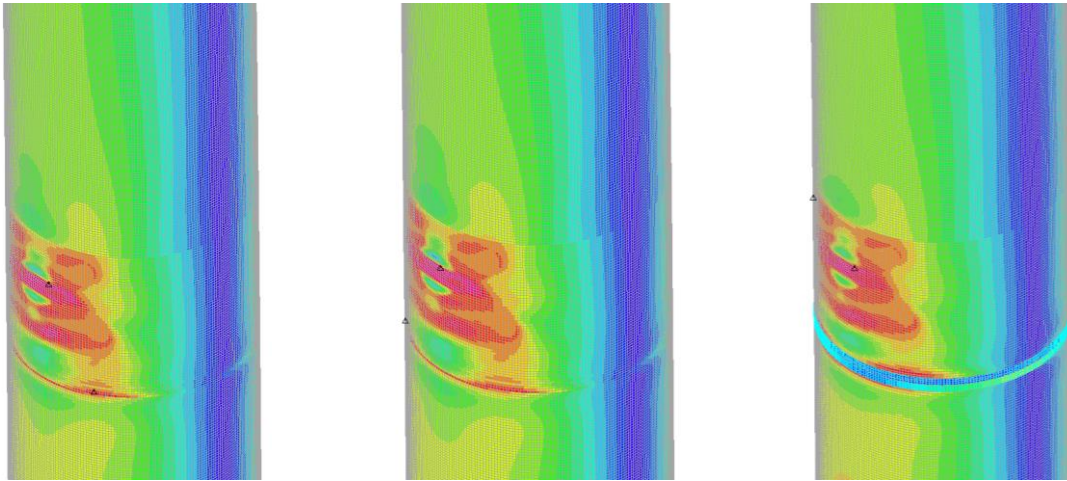


Προσομοίωση 2α



Προσομοίωση 2β

Εικόνα 30: Περιοχή διαρροής υλικού στο οριακό σημείο για κατασκευαστική κλάση A



Προσομοίωση 1

Προσομοίωση 2α

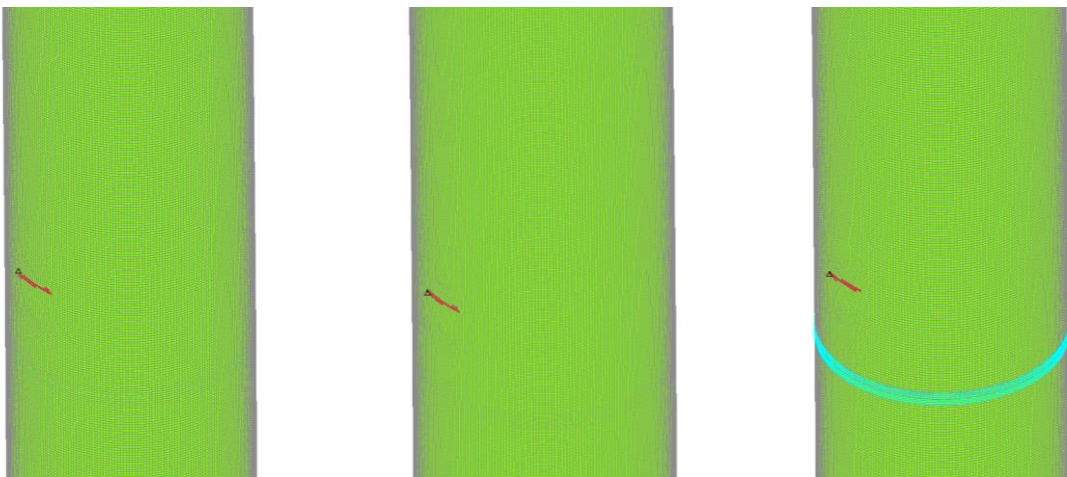
Προσομοίωση 2β

Εικόνα 31: Κατανομή τάσεων von Mises στο οριακό σημείο για κατασκευαστική κλάση A

Στο σημείο πρώτης διαρροής του υλικού κάθε προσομοίωσης:

- $\lambda_{1,pl}=1,192$
- $\lambda_{2a,pl}=1,192$
- $\lambda_{2\beta,pl}=1,204$

— PLASTIC
— ELASTIC

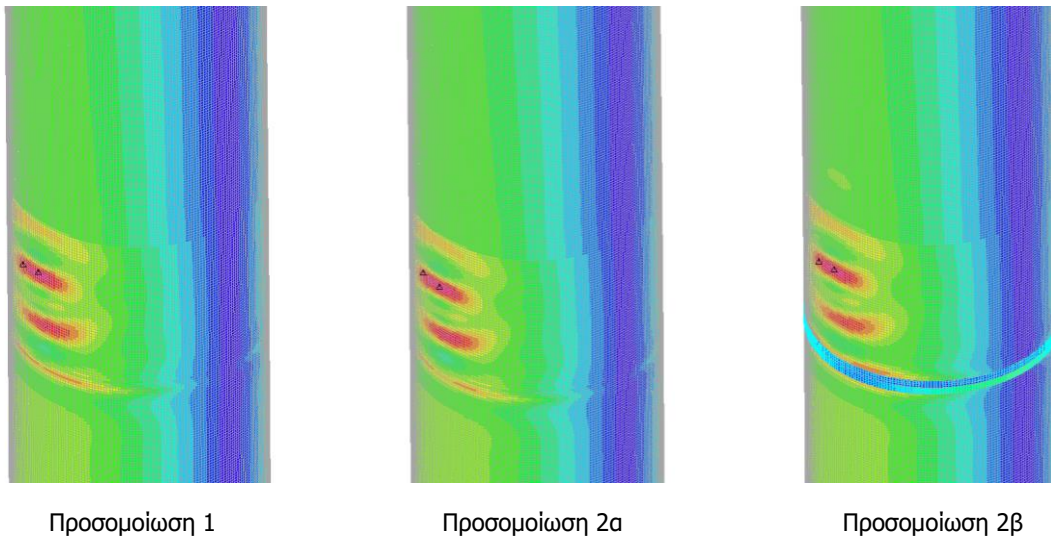


Προσομοίωση 1

Προσομοίωση 2α

Προσομοίωση 2β

Εικόνα 32: Περιοχή πρώτης διαρροής υλικού για κατασκευαστική κλάση A



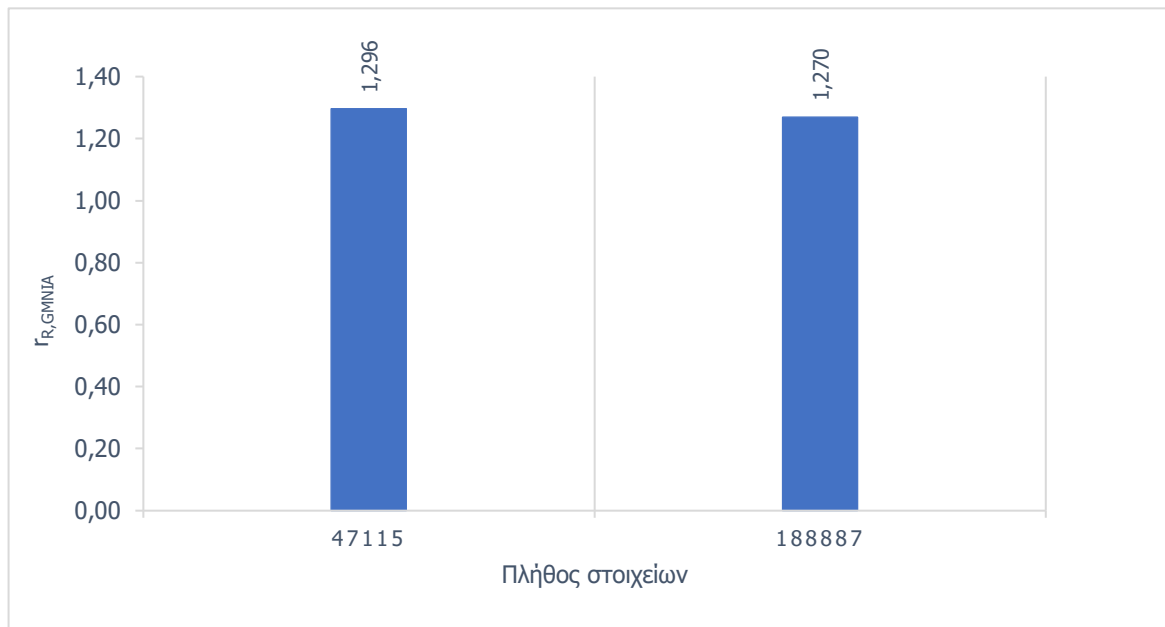
Εικόνα 33: Κατανομή τάσεων von Mises στο σημείο πρώτης διαρροής υλικού για κατασκευαστική κλάση A

Όπως φαίνεται από την σύγκριση των δρόμων ισορροπίας και οι τρεις αναλύσεις δίνουν πολύ κοντινά αποτελέσματα. Κυρίως παρατηρείται μικρή υπερεκτίμηση της αντοχής στην προσομοίωση 2β και στις δύο περιπτώσεις κατασκευαστικών ανοχών. Επιπλέον στην προσομοίωση 2β εμφανίζεται μικρή διαφοροποίηση στο δρόμο ισορροπίας, συγκριτικά με τις άλλες δύο, όσον αφορά στην εκτίμηση της δυσκαμψίας. Έχοντας ως κριτήριο την ταύτιση των δρόμων ισορροπίας μεταξύ των προσομοιώσεων 1 και 2α, για φορτία μικρότερα του οριακού, κρίθηκε ότι η 2β παρουσιάζει μικρότερη αξιοπιστία σε αυτόν τον τομέα. Επιπροσθέτως και οι τρεις προσομοιώσεις παρέχουν πολύ κοντινά αποτελέσματα ως προς το σημείο πρώτης διαρροής του υλικού και τον αντίστοιχο φορτιστικό συντελεστή. Τέλος παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση στην εκτίμηση της αντοχής του φορέα αλλά και της μορφής του δόμου ισορροπίας ανάλογα με το μέγεθος των αρχικών ατελειών.

4.1.2.4 Έλεγχος σύγκλισης

Προκειμένου να υπάρξει εκμετάλλευση της πλήρους ακρίβειας που έχει δυνατότητα να παρέχει κάθε είδος προσομοίωσης, αλλά και να υπάρχει αντικειμενική σύγκριση μεταξύ αυτών, είναι απαραίτητη η σύγκλιση της πυκνότητας του εκάστοτε πλέγματος. Για το συγκεκριμένο μοντέλο θεωρήθηκε επαρκής η σύγκλιση κατά 95 %. Σχετικά με το μέτρο ελέγχου θεωρήθηκε καταλληλότερη η χρήση του οριακού φορτίου αντοχής του φορέα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι έλεγχοι για κατασκευαστική κλάση C.

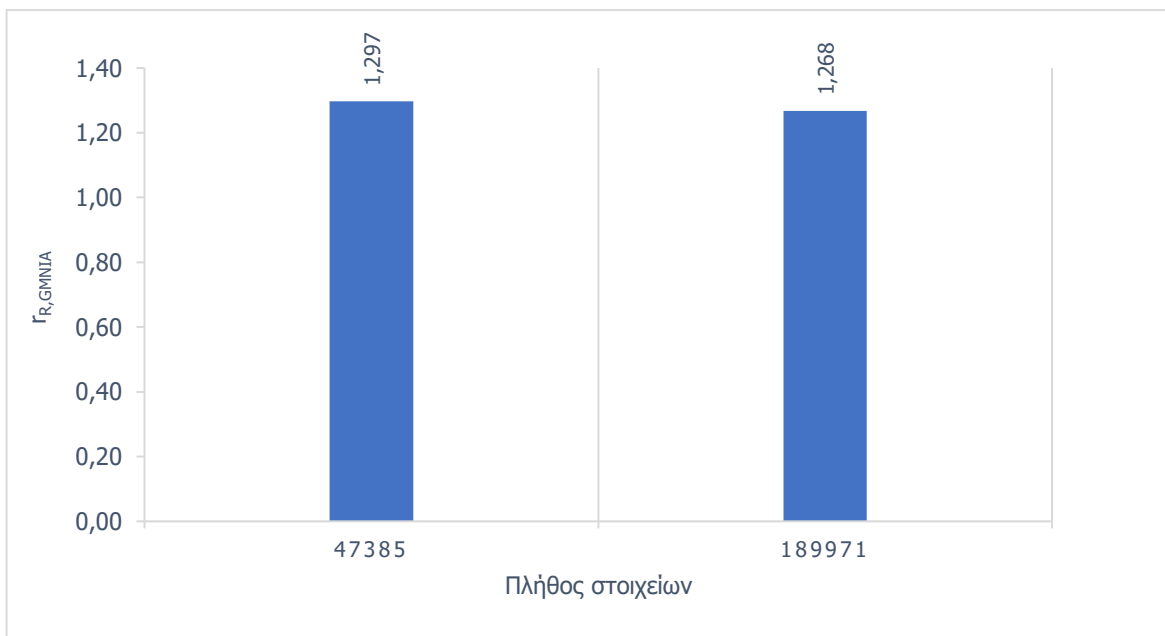
Προσομοίωση 1



Γράφημα 4.8: Έλεγχος σύγκλισης προσομοίωσης 1 με 4-κομβικά στοιχεία κελύφους

Για τα δύο πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 10 cm και 5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 98 %, άρα επιτυγχάνεται σύγκλιση.

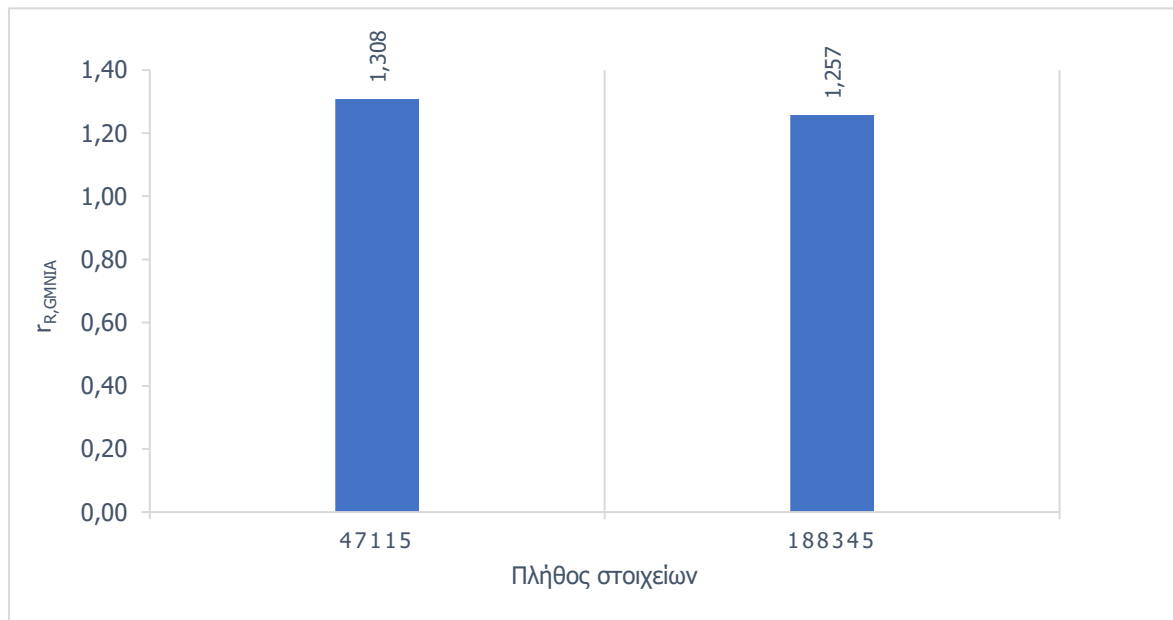
Προσομοίωση 2a



Γράφημα 4.9: Έλεγχος σύγκλισης προσομοίωσης 2a για κατασκευαστική κλάση C

Για τα δύο πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 10 cm και 5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 98 %, άρα επιτυγχάνεται σύγκλιση.

Προσομοίωση 2β



Γράφημα 4.10: Έλεγχος σύγκλισης προσομοίωσης 2B με 4-κομβικά στοιχεία κελύφους

Για τα δύο πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 10 cm και 5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 96 %, άρα επιτυγχάνεται σύγκλιση.

4.1.3 Επιλογή καταλληλότερου τύπου προσομοίωσης

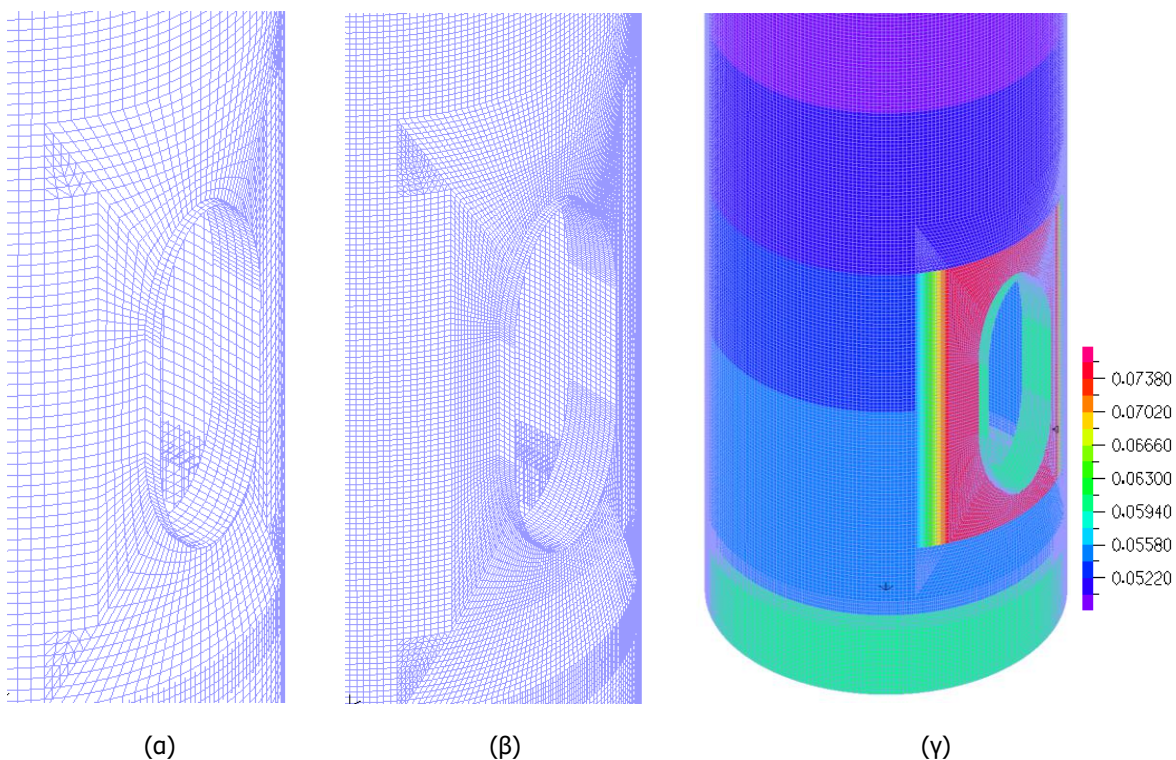
Για την συνέχεια της μελέτης και της προσομοίωσης ολόκληρου του φορέα επιλέχθηκε ως καταλληλότερη η προσομοίωση 1. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κύρια κριτήρια που οδήγησαν σε αυτή την επιλογή:

Πίνακας 4.3: Σύγκριση τύπων προσομοίωσης

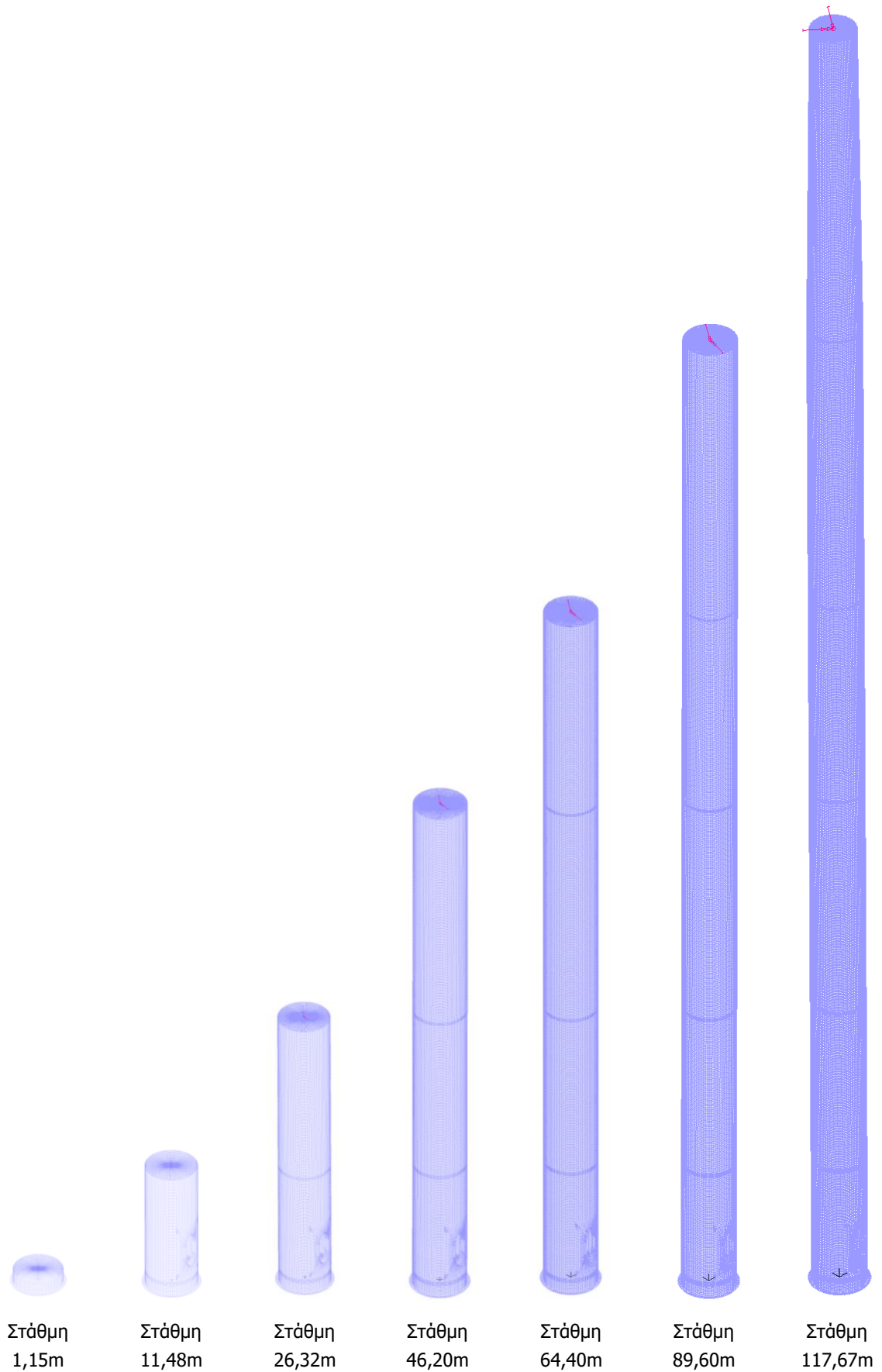
Σύγκριση προσομοίωσης 1 με προσομοίωση 2α	
Πλεονεκτήματα	Μειονέκτημα:
<ul style="list-style-type: none"> Μικρότερο υπολογιστικό κόστος Διευκόλυνση μεταβολής και των δύο διαστάσεων των φλαντζών σε περίπτωση παραμετρικής διερεύνησης 	<ul style="list-style-type: none"> Εκτεταμένη χρήση άκαμπτων συνδέσμων με την οποία υποβαθμίζεται ελαφρώς το πλεονέκτημα του υπολογιστικού κόστους
Σύγκριση προσομοίωσης 1 με προσομοίωση 2β	
Πλεονεκτήματα	Μειονέκτημα:
<ul style="list-style-type: none"> Συντηρητικότερα αποτελέσματα Καλύτερη αξιοπιστία και συνέπεια των αποτελεσμάτων, λαμβάνοντας υπόψιν τα ελαφρώς διαφοροποιημένα σχήματα ιδιομορφών ανώτερης τάξης της προσομοίωσης 2β συγκριτικά με τις υπόλοιπες στην γραμμική ανάλυση λυγισμού και ορισμένες αποκλίσεις που παρουσιάζει η ίδια προσομοίωση στον δρόμο ισορροπίας στις μη γραμμικές αναλύσεις 	<ul style="list-style-type: none"> Σημαντικότερη απλοποίηση στην μοντελοποίηση της σύνδεσης της φλάντζας με το κέλυφος του πυλώνα εφόσον αυτή πραγματοποιείται σε μία μόνο ακμή, αντίθετα με την προσομοίωση 2β που λαμβάνει υπόψιν και το πάχος της φλάντζας
Σύγκριση προσομοίωσης 1 με προσομοίωση 3	
Πλεονέκτημα	Μειονέκτημα:
<ul style="list-style-type: none"> Σημαντικά μικρότερο υπολογιστικό κόστος. Η προσομοίωση ολόκληρου του φορέα με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία αποδείχθηκε αδύνατη με την διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ 	<ul style="list-style-type: none"> Ακριβέστερα και πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Με επαρκή πύκνωση τα τρισδιάστατα πεπερασμένα μπορούν να αποτελέσουν πολύ καλή εκτίμηση της πραγματικής συμπεριφοράς

4.2 Προσομοίωση φορέα

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητες αναλύσεις δημιουργήθηκε προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων του πυλώνα. Σύμφωνα με τα συμπεράσματα της διερεύνησης που παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.1.3 χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους για την προσομοίωση των λεπτότοιχων μερών του πυλώνα και στοιχεία δοκού για την προσομοίωση των ελασμάτων στις περιοχές των συνδέσεων. Επιπλέον, για την προσομοίωση του ενισχυτικού ελάσματος περιμετρικά της ανθρωποθυρίδας χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους. Λαμβάνοντας υπόψιν την μορφή των δεδομένων αναφορικά με τις φορτίσεις της κατασκευής, τα οποία συμπεριλαμβάνουν εντατικά μεγέθη πεπερασμένων διατομών καθ' ύψος του πυλώνα, κρίθηκε καταλληλότερη η εκμετάλλευση αυτών για διαφορετικές στάθμες φόρτισης. Γι' αυτό τον λόγο επιλέχθηκε η εφαρμογή των εντατικών μεγεθών υπό την μορφή εξωτερικών φορτίων στις στάθμες των συνδέσεων, όπου για κάθε στάθμη φόρτισης προσομοιώθηκε το υποκείμενο τμήμα της στάθμης αυτής, αλλά όχι και το υπερκείμενο. Η μέθοδος αυτή οδήγησε στην δημιουργία επτά προσομοιωμάτων. Σε όλα τα προσομοιώματα η αρχική διακριτοποίηση πραγματοποιήθηκε με διάσταση πλευράς στοιχείων 10cm, ενώ προκειμένου να επιβεβαιωθεί η σύγκλιση στα μοντέλα δημιουργήθηκε επιπλέον πυκνότερο πλέγμα με διάσταση πλευράς στοιχείων 5cm.



Εικόνα 34: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων περιμετρικά της ανθρωποθυρίδας (α) αραιότερο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων (β) δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων μεγαλύτερης πυκνότητας (γ) μεταβολή πάχους του κελύφους



Εικόνα 35: Αριθμητικά προσομοιώματα για διαφορετικές στάθμες φόρτισης

5 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

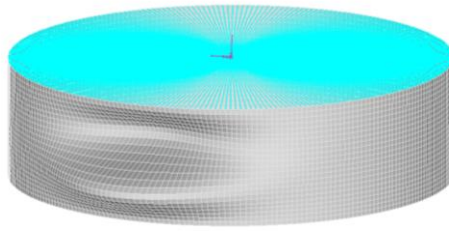
Προκειμένου να προσδιοριστεί η αντοχή της συνολικής κατασκευής πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος ευστάθειας αυτής. Ο έλεγχος αυτός έγινε εφαρμόζοντας τα εντατικά μεγέθη του πίνακα 3.4 ως εξωτερικά συγκεντρωμένα φορτία σε κάθε στάθμη αποκατάστασης συνέχειας και στην συνέχεια εκτελώντας μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού με την χρήση αρχικών ατελειών. Όλες οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό ADINA 9.3. Επιπλέον έγινε διερεύνηση ως προς το μέγεθος των αρχικών ατελειών εφαρμόζοντας τις κανονιστικές οδηγίες του EN 1993-1-6 ^[1] όπως περιγράφονται στην παράγραφο 2.8.3 και για τις τρεις κατασκευαστικές κλάσεις A, B και C, όπως επίσης και για το σχήμα αυτών εντοπίζοντας κάθε φορά το σχήμα ή συνδυασμό σχημάτων από τις ιδιομορφές γραμμικής ανάλυσης λυγισμού το οποίο οδηγεί στην μικρότερη δυνατή αντοχή. Σε ορισμένες προσομοιώσεις παρατηρήθηκε ότι η επαλληλία δύο σχημάτων ιδιομορφών επιφέρει δυσμενέστερα αποτελέσματα στην αντοχή του φορέα, διαδικασία κατά την οποία ορίστηκε η μέγιστη απόκλιση από την τέλεια γεωμετρία όπως στην παράγραφο 4.1.2.2 στο ένα σχήμα ενώ στο άλλο επιβλήθηκε μέγιστη απόκλιση 10% του πρώτου, με προσοχή να μην συμπίπτουν οι μέγιστες αποκλίσεις κάθε σχήματος στο ίδιο σημείο. Σε όλες τις αναφορές η ιδιομορφή με την μεγαλύτερη συμμετοχή στο σχήμα αρχικών ατελειών αναφέρεται πρώτη.

5.1 Στάθμη εφαρμογής φορτίων 1,15m

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα σχήματα των ιδιομορφών που χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές ατέλειες, τα στοιχεία και μεγέθη των ατελειών, καθώς και η οριακή αντοχή.

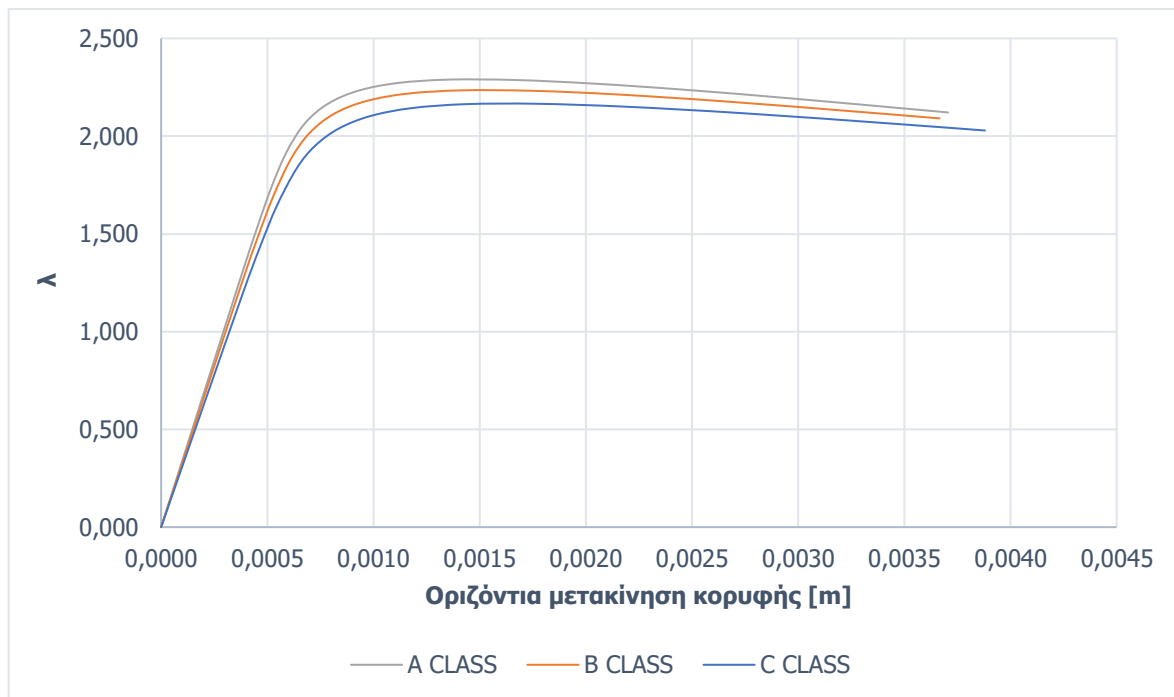
Πίνακας 5.1: Στοιχεία ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών και οριακή αντοχή για στάθμη φόρτισης 1,15m

Κατασκευαστική κλάση	Σχήμα διομορφής λυγισμού ως αρχική ατέλεια	l_{gx} [m]	t [mm]	$\Delta_{w,eq}$ [mm]	$r_{R,G,MNIA}$
A	3	0,2	60	15	2,289
B	3	0,2	60	24	2,234
C	3	0,2	60	37,5	2,166

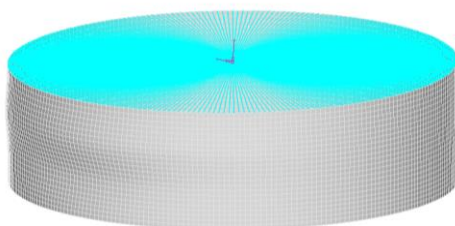


Εικόνα 36: 1η ιδιομορφή λυγισμού

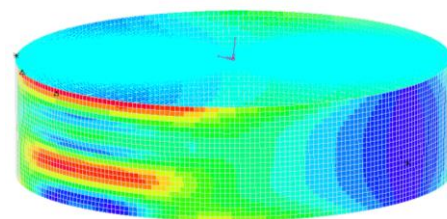
Στο γράφημα 5.1 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της κατασκευής για τις διαφορετικές κατασκευαστικές κλάσεις υπό την στάθμη 1,15m χρησιμοποιώντας ως μέτρο αναφοράς την οριζόντια μετακίνηση της κορυφής, ενώ στην εικόνα 37 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα της μορφής της αστοχίας για κατασκευαστική ποιότητα C τα οποία είναι πανομοιότυπα, ανεξαρτήτως της ποιότητας.



Γράφημα 5.1: Δρόμος ισορροπίας φορέα για στάθμη φόρτισης 1,15m



(α)



(β)

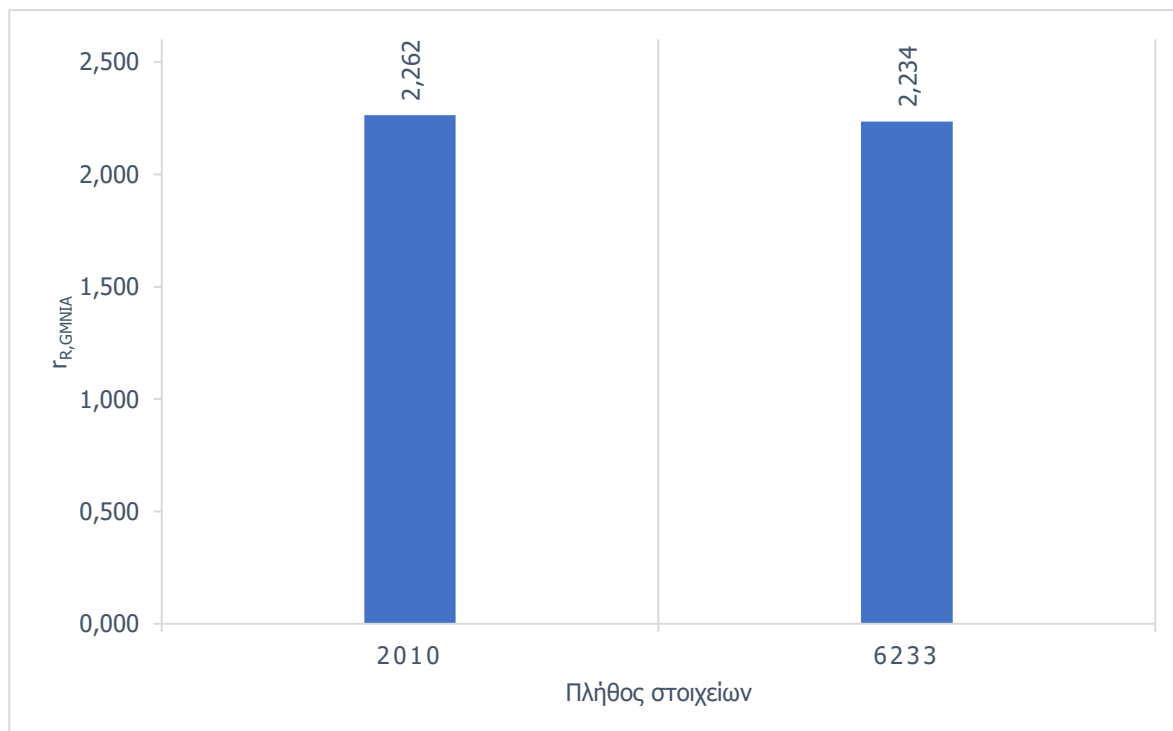
Εικόνα 37: Αποτελέσματα GMNIA για κατασκευαστική κλάση C (α) μορφή αστοχίας (β) κατανομή τάσεων von Mises στο σημείο πρώτης διαρροής

Προκειμένου να εντοπιστεί το σχήμα των αρχικών ατελειών με την δυσμενέστερη επίδραση στην οριακή αντοχή πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των πρώτων ιδιομορφών, για την οποία χρησιμοποιήθηκε το αραιότερο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζεται η σύγκριση της οριακής αντοχής του μοντέλου για κατασκευαστική κατηγορία Β για διαφορετικά σχήματα αρχικών ατελειών σύμφωνα με τις πρώτες ιδιομορφές, έναντι εκείνης η οποία επιλέχθηκε (3^η) όντας η δυσμενέστερη.

Πίνακας 5.2: Σύγκριση οριακής αντοχής για διαφορετικά σχήματα αρχικών ατελειών μοντέλου στάθμης φόρτισης 1,15m κατασκευαστικής κλάσης Β

Σχήμα ιδιομορφής λυγισμού (i) ως αρχική ατέλεια	$r_{R,GMNIA}^i / r_{R,GMNIA}^3$
1 ^η	1,052
2 ^η	1,046
4 ^η	1,050
5 ^η	1,053

Προκειμένου να υπάρξει εκμετάλλευση της πλήρους ακρίβειας που μπορεί να παρέχει η αριθμητική ανάλυση, είναι απαραίτητη η σύγκλιση της πυκνότητας του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων. Θεωρήθηκε επαρκής η σύγκλιση κατά 95%, ενώ ως μέτρο ελέγχου χρησιμοποιήθηκε το οριακό φορτίο αντοχής. Στο γράφημα 5.2 παρατίθεται ο έλεγχος σύγκλισης για κατασκευαστική κατηγορία Β.



Γράφημα 5.2: Έλεγχος σύγκλισης πυκνότητας δικτύου πεπερασμένων στοιχείων για στάθμη φόρτισης 1,15m. Για τα δύο πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 10 cm και 5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 98,8 %, άρα επιτυγχάνεται σύγκλιση.

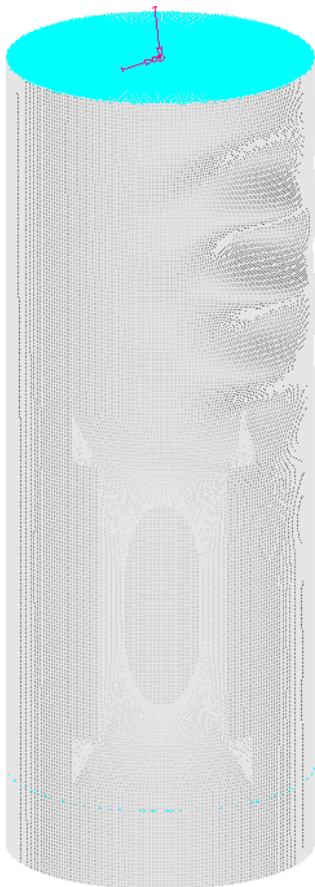
5.2 Στάθμη εφαρμογής φορτίων 11,48m

Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα σχήματα των ιδιομορφών που χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές ατέλειες, τα στοιχεία και μεγέθη των ατελειών, καθώς και η οριακή αντοχή.

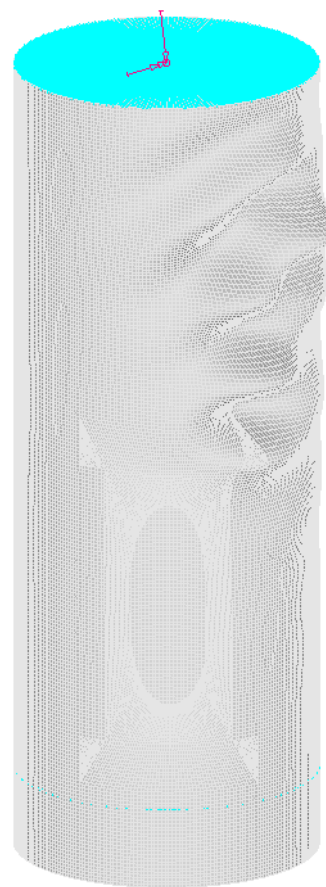
Πίνακας 5.3: Στοιχεία ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών και οριακή αντοχή για στάθμη φόρτισης 11,48m

Κατασκευαστική κλάση	Σχήμα διομορφής λυγισμού ως αρχική ατέλεια	l_{gx} [m]	t [mm]	$\Delta_{w,eq}$ [mm]	$\Gamma_{R,GMNIA}$
A	1 και 3	0,6	50	12,5	1,822
B	1 και 3	0,6	50	20,0	1,744
C	1 και 3	0,6	50	31,3	1,672

Για το συγκεκριμένο τμήμα πραγματοποιήθηκε επιπλέον διερεύνηση ως προς την διεύθυνση των φορτίων και την επιρροή της θέσεως της ανθρωποθυρίδας στην αντοχή. Δυσμενέστερη διεύθυνση απεδείχθη εκείνη κατά την οποία η συνισταμένη τέμνουσα σχηματίζει γωνία 45° με την διεύθυνση που σχηματίζεται από το κέντρο του κελύφους και ο γεωμετρικό κέντρο της οπής. Από αντίστοιχες συγκρίσεις με εφαρμογή φορτίων σε άλλες στάθμες έγινε αντιληπτό ότι η θέση της οπής δεν επηρεάζει τις ανώτερες στάθμες.



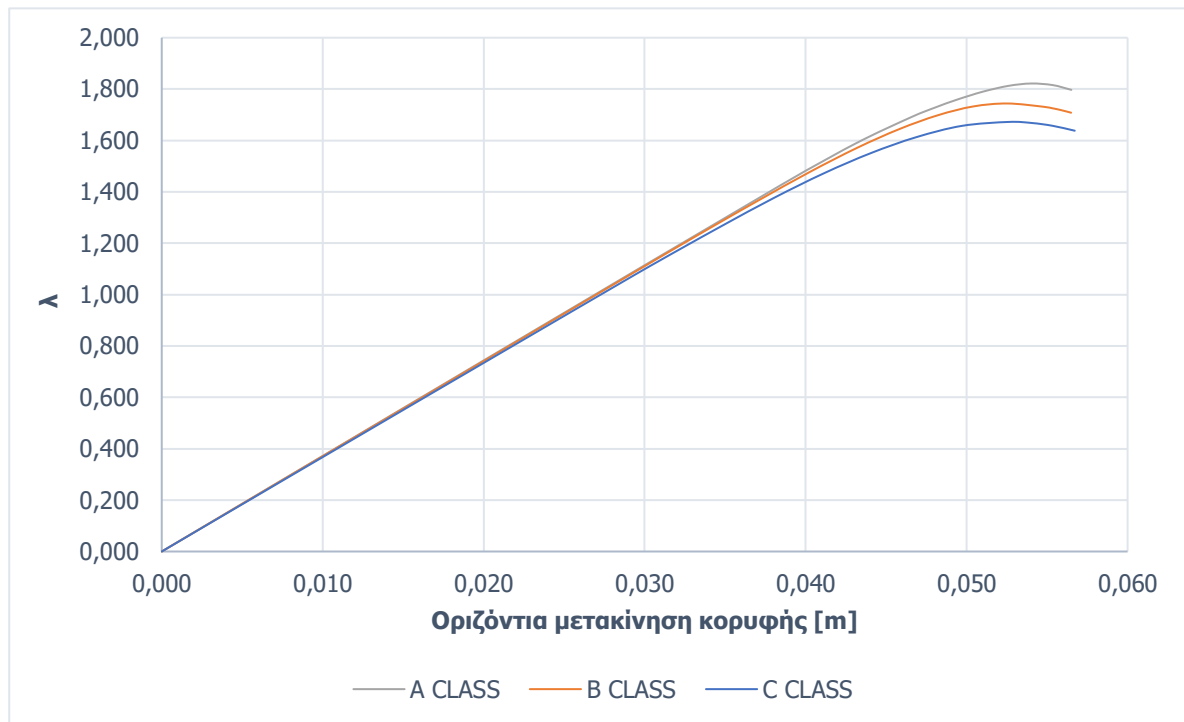
1^η ιδιομορφή λυγισμού



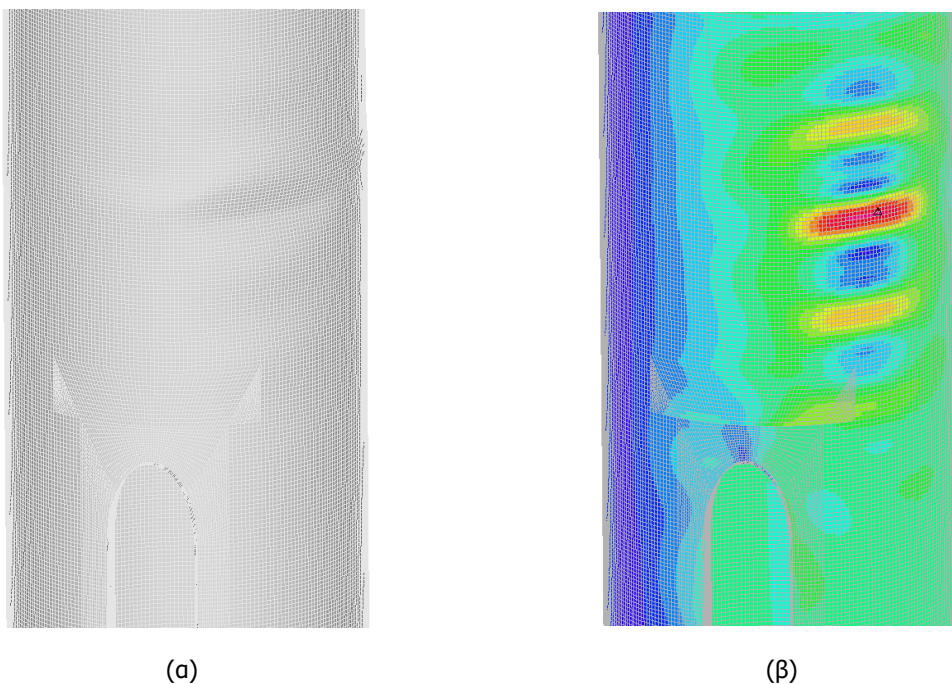
3^η ιδιομορφή λυγισμού

Εικόνα 38: Σχήματα ιδιομορφών που χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές ατέλειες

Στο γράφημα 5.3 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της κατασκευής για τις διαφορετικές κατασκευαστικές κλάσεις υπό την στάθμη 11,48m χρησιμοποιώντας ως μέτρο αναφοράς την οριζόντια μετακίνηση της κορυφής, ενώ στην εικόνα 39 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα της μορφής της αστοχίας για κατασκευαστική ποιότητα C τα οποία είναι πανομοιότυπα, ανεξαρτήτως της ποιότητας.

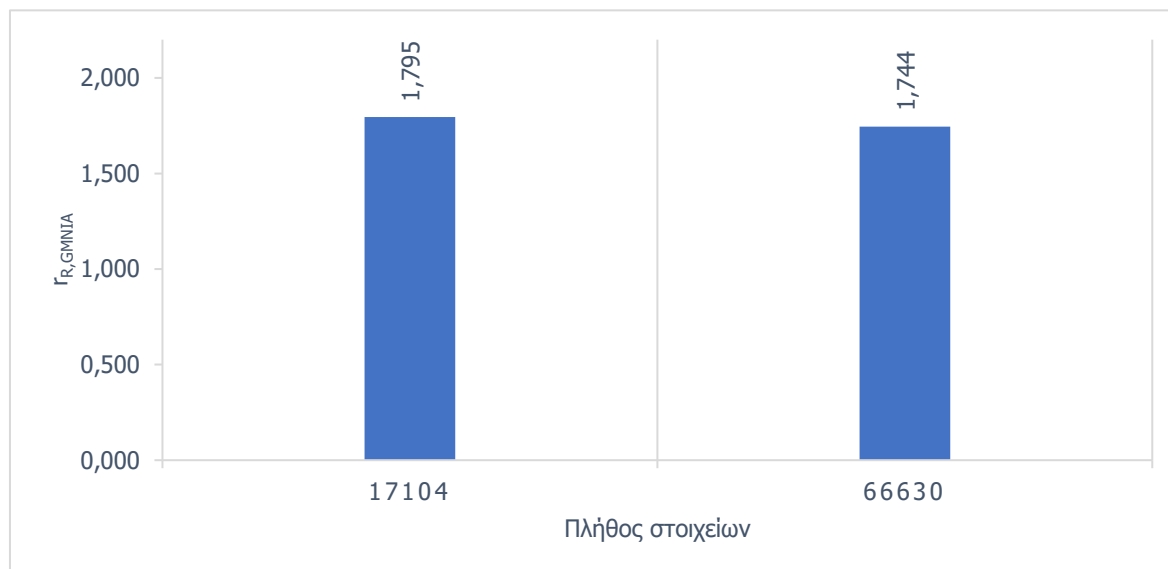


Γράφημα 5.3: Δρόμος ισορροπίας φορέα για στάθμη φόρτισης 11,48m



Εικόνα 39: Αποτελέσματα GMNIA για κατασκευαστική κλάση C (α) μορφή αστοχίας (β) κατανομή τάσεων von Mises στο σημείο πρώτης διαρροής

Προκειμένου να υπάρξει εκμετάλλευση της πλήρους ακρίβειας που μπορεί να παρέχει η αριθμητική ανάλυση, είναι απαραίτητη η σύγκλιση της πυκνότητας του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων. Θεωρήθηκε επαρκής η σύγκλιση κατά 95%, ενώ ως μέτρο ελέγχου χρησιμοποιήθηκε το οριακό φορτίο αντοχής. Στο γράφημα 5.4 παρατίθεται ο έλεγχος σύγκλισης για κατασκευαστική κατηγορία B.



Γράφημα 5.4: Έλεγχος σύγκλισης πυκνότητας δικτύου πεπερασμένων στοιχείων για στάθμη φόρτισης 11,48m

Για τα δύο πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 10 cm και 5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 97,2 %, άρα επιτυγχάνεται σύγκλιση.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, όντας η στάθμη εφαρμογής των φορτίων πλησίον της ανθρωποθυρίδας, έγινε επιπλέον διερεύνηση ως προς την διεύθυνση των φορτίων με τα δυσμενέστερα αποτελέσματα. Στον πίνακα 5.4 παρατίθενται τα αποτελέσματα της οριακής αντοχής του τμήματος για διαφορετικές γωνίες τέμνουσας, με την διεύθυνση από το κέντρο του κελύφους ως το γεωμετρικό κέντρο της οπής να ορίζεται ως γωνία 0°, η σύγκριση των οποίων έγινε για το αραιότερο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων και κατασκευαστική κλάση B, εντοπίζοντας το δυσμενέστερο σχήμα αρχικών ατελειών ομοίως με την παράγραφο 5.1.

Πίνακας 5.4: Σύγκριση οριακής αντοχής για διαφορετικά σχήματα αρχικών ατελειών μοντέλου στάθμης φόρτισης 64,40m

Διεύθυνση συνισταμένης τέμνουσας [μοίρες]	Δυσμενέστερη ιδιομορφή λυγισμού ως σχήμα αρχικών ατελειών	Γ _{R,GMNIA}
0	1 ^η και 3 ^η	1,989
30	5 ^η	1,963
45	1 ^η και 3 ^η	1,795
90	1 ^η	1,953
180	1 ^η	1,962

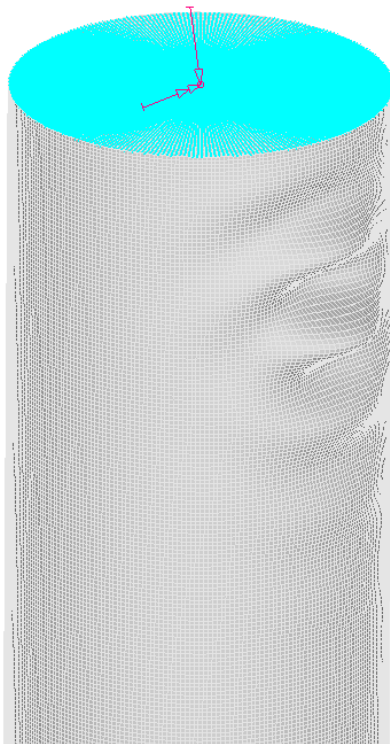
Δυσμενέστερη είναι η διεύθυνση της συνισταμένης τέμνουσας 45°, εφόσον καταλήγει στην μικρότερη αντοχή.

5.3 Στάθμη εφαρμογής φορτίων 26,32m

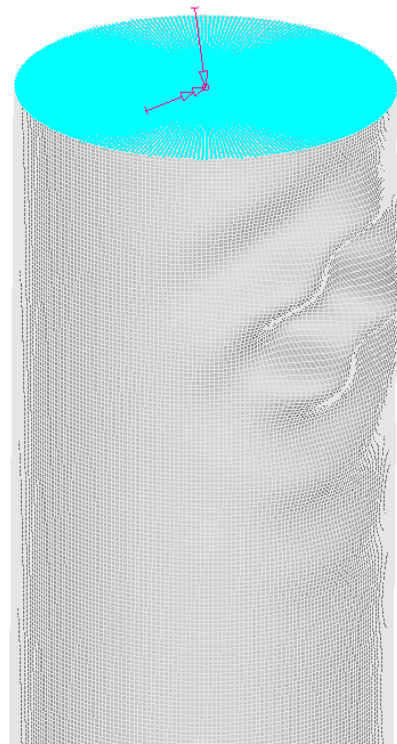
Στον πίνακα 5.5 παρουσιάζονται τα σχήματα των ιδιομορφών που χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές ατέλειες, τα στοιχεία και μεγέθη των ατελειών, καθώς και η οριακή αντοχή.

Πίνακας 5.5: Στοιχεία ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών και οριακή αντοχή για στάθμη φόρτισης 26,32m

Κατασκευαστική κλάση	Σχήμα διομορφής λυγισμού ως αρχική ατέλεια	l_{gx} [m]	t [mm]	$\Delta_{w,eq}$ [mm]	$\gamma_{R,GMNIA}$
A	3 και 1	0,58	39,5	9,9	1,603
B	3 και 1	0,58	39,5	15,8	1,525
C	3 και 1	0,58	39,5	24,7	1,475



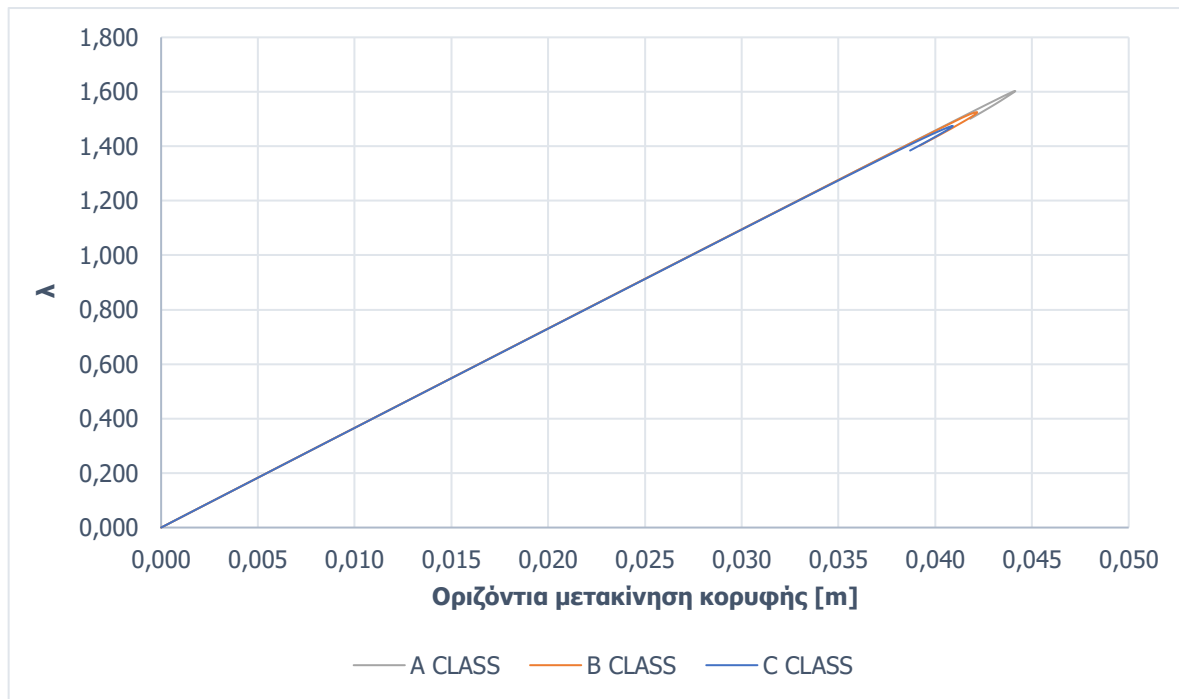
1^η ιδιομορφή λυγισμού



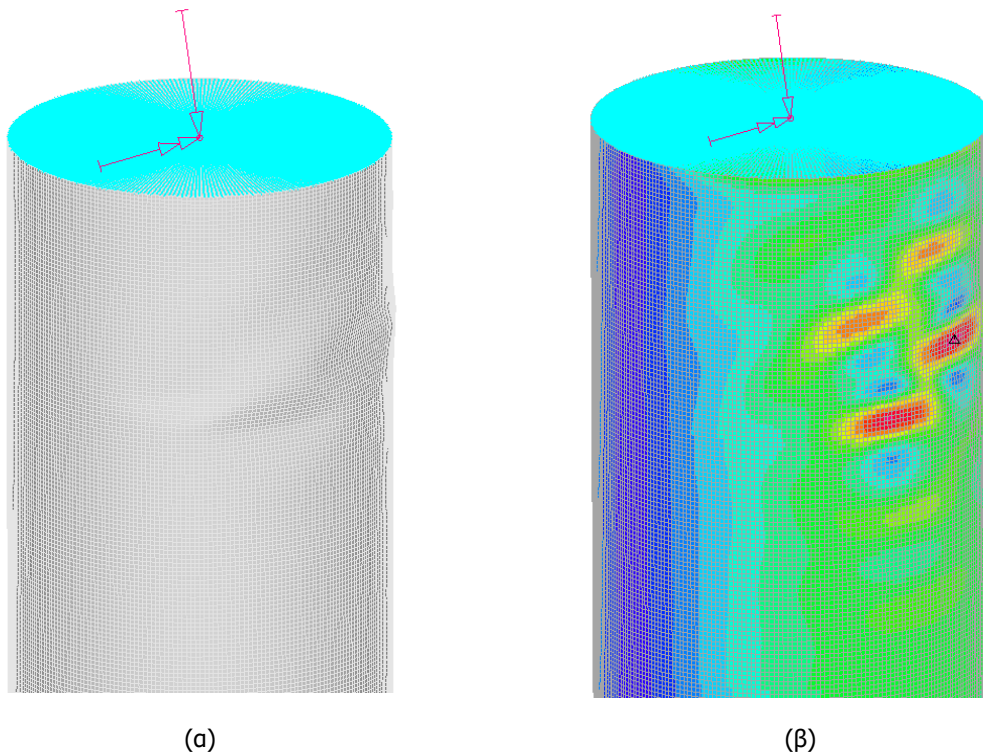
3^η ιδιομορφή λυγισμού

Εικόνα 40: Σχήματα ιδιομορφών που χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές ατέλειες

Στο γράφημα 5.5 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της κατασκευής για τις διαφορετικές κατασκευαστικές κλάσεις υπό την στάθμη 26,32m χρησιμοποιώντας ως μέτρο αναφοράς την οριζόντια μετακίνηση της κορυφής, ενώ στην εικόνα 41 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα της μορφής της αστοχίας για κατασκευαστική ποιότητα C τα οποία είναι πανομοιότυπα, ανεξαρτήτως της ποιότητας.



Γράφημα 5.5: Δρόμος ισορροπίας φορέα για στάθμη φόρτισης 26,32m



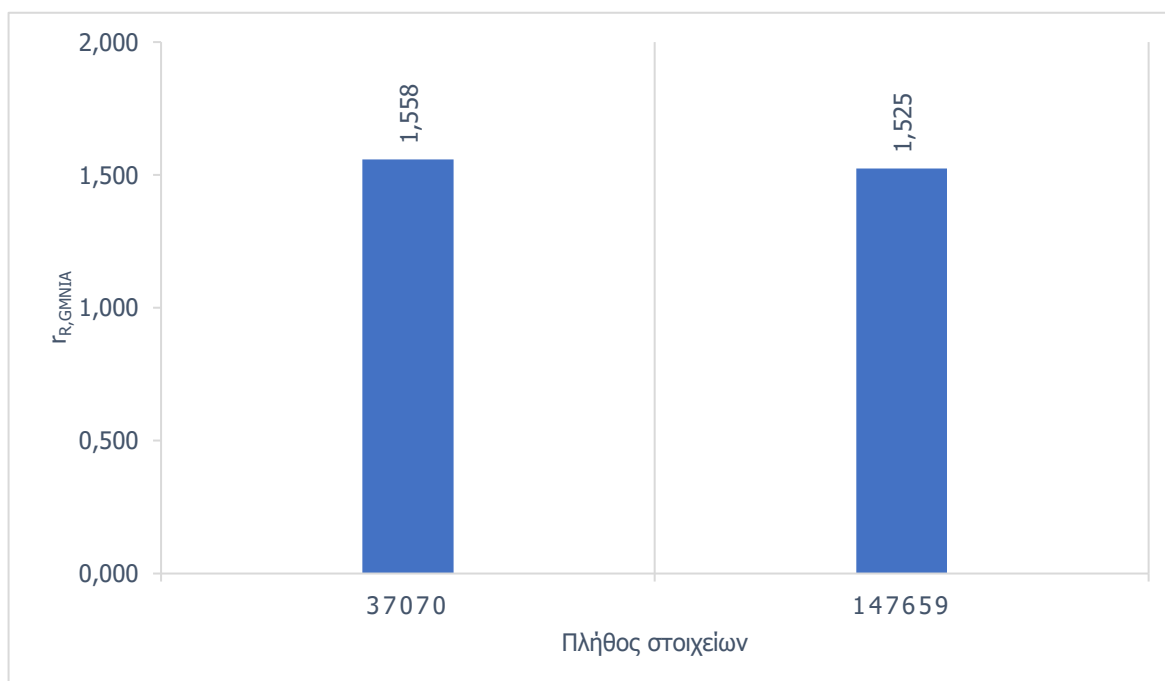
Εικόνα 41: Αποτελέσματα GMNIA για κατασκευαστική κλάση C (α) μορφή αστοχίας (β) κατανομή τάσεων von Mises στο σημείο πρώτης διαρροής

Προκειμένου να εντοπιστεί το σχήμα των αρχικών ατελειών με την δυσμενέστερη επίδραση στην οριακή αντοχή, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των πρώτων ιδιομορφών, για την οποία χρησιμοποιήθηκε το αραιότερο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Στον πίνακα 5.6 παρουσιάζεται η σύγκριση της οριακής αντοχής του μοντέλου για κατασκευαστική κατηγορία Β για διαφορετικά σχήματα αρχικών ατελειών σύμφωνα με τις πρώτες ιδιομορφές, έναντι εκείνης η οποία επιλέχθηκε ($3^{\text{η}}+1^{\text{η}}$) όντας η δυσμενέστερη.

Πίνακας 5.6: Σύγκριση οριακής αντοχής για διαφορετικά σχήματα αρχικών ατελειών μοντέλου στάθμης φόρτισης 26,32m

Σχήμα ιδιομορφής λυγισμού (i) ως αρχική ατέλεια	$r_{R,GMNIA}^i / r_{R,GMNIA}^{3+1}$
1 ^η	1,028
2 ^η	1,025
3 ^η	1,005
4 ^η	1,031
5 ^η	1,034

Προκειμένου να υπάρξει εκμετάλλευση της πλήρους ακρίβειας που μπορεί να παρέχει η αριθμητική ανάλυση, είναι απαραίτητη η σύγκλιση της πυκνότητας του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων. Θεωρήθηκε επαρκής η σύγκλιση κατά 95%, ενώ ως μέτρο ελέγχου χρησιμοποιήθηκε το οριακό φορτίο αντοχής. Στο γράφημα 5.6 παρατίθεται ο έλεγχος σύγκλισης για κατασκευαστική κατηγορία Β.



Γράφημα 5.6: Έλεγχος σύγκλισης πυκνότητας δικτύου πεπερασμένων στοιχείων για στάθμη φόρτισης 26,32m

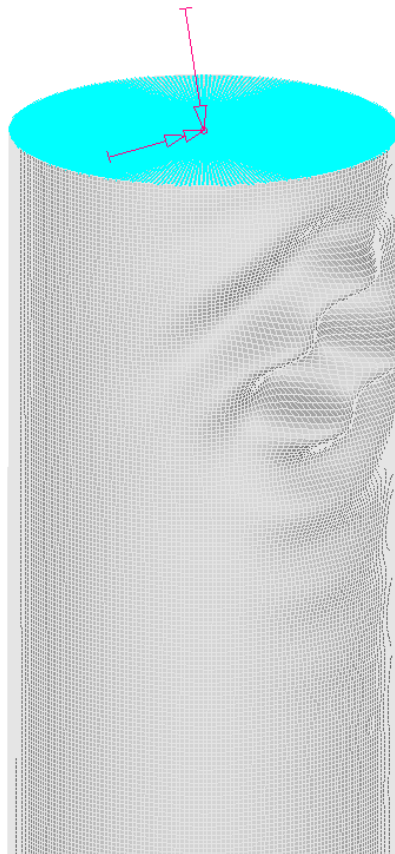
Για τα δύο πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 10 cm και 5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 97,9 %, άρα επιτυγχάνεται σύγκλιση.

5.4 Στάθμη εφαρμογής φορτίων 46,20m

Στον πίνακα 5.7 παρουσιάζονται τα σχήματα των ιδιομορφών που χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές ατέλειες, τα στοιχεία και μεγέθη των ατελειών, καθώς και η οριακή αντοχή:

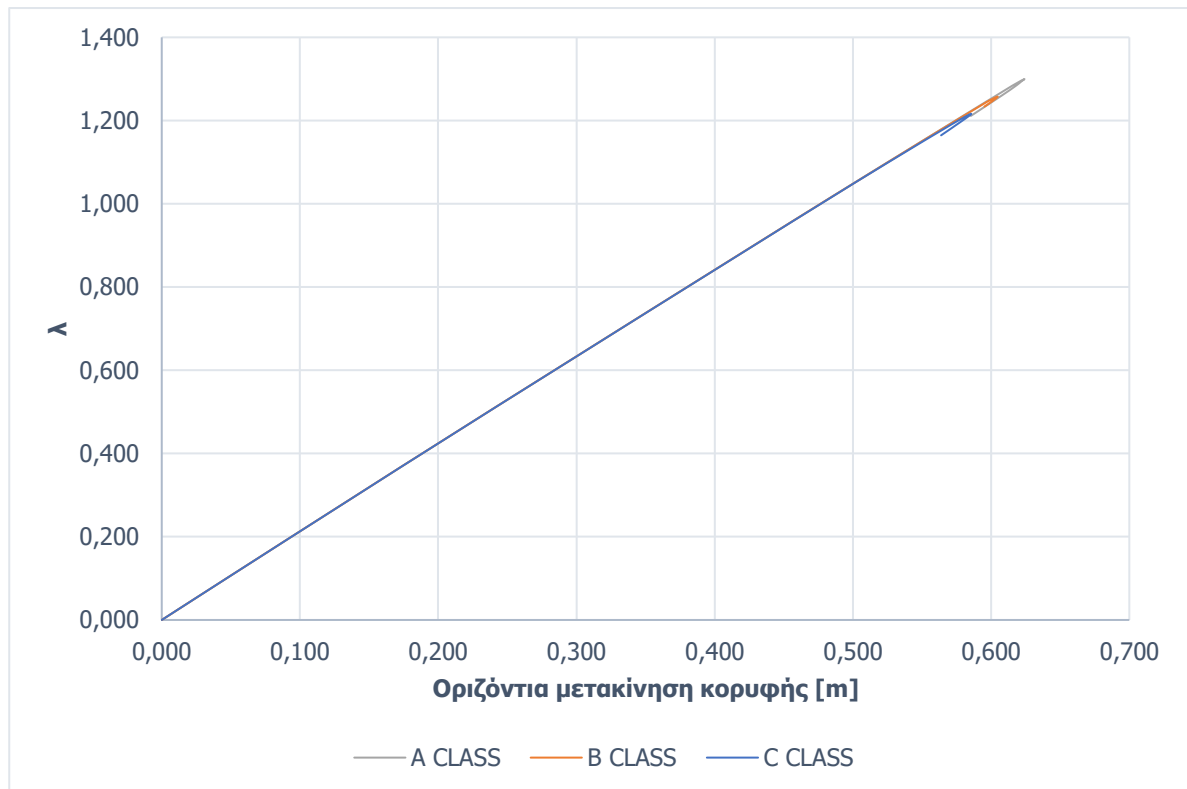
Πίνακας 5.7: Στοιχεία ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών και οριακή αντοχή για στάθμη φόρτισης 46,20m

Κατασκευαστική κλάση	Σχήμα διομορφής λυγισμού ως αρχική ατέλεια	I_{gx} [m]	t [mm]	$\Delta_{w,eq}$ [mm]	$\Gamma_{R,GMNIA}$
A	3	0,80	28,5	8,0	1,300
B	3	0,80	28,5	12,8	1,257
C	3	0,80	28,5	20,0	1,217

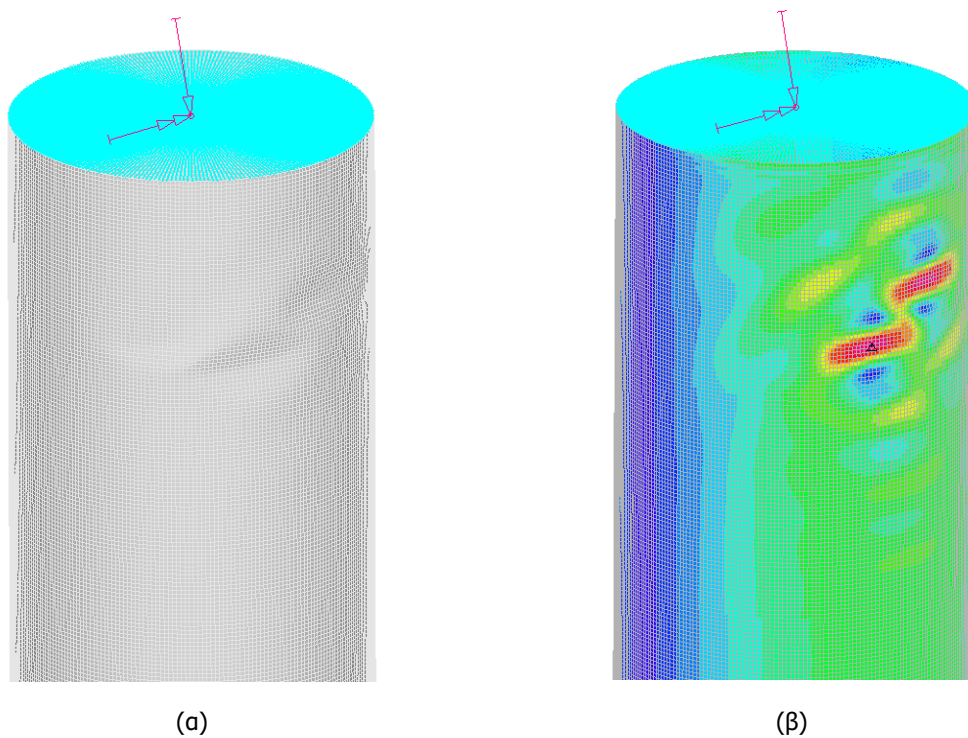


Εικόνα 42: 3^η ιδιομορφή λυγισμού

Στο γράφημα 5.7 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της κατασκευής για τις διαφορετικές κατασκευαστικές κλάσεις υπό την στάθμη 46,20m χρησιμοποιώντας ως μέτρο αναφοράς την οριζόντια μετακίνηση της κορυφής, ενώ στην εικόνα 43 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα της μορφής της αστοχίας για κατασκευαστική ποιότητα C τα οποία είναι πανομοιότυπα, ανεξαρτήτως της ποιότητας.



Γράφημα 5.7: Δρόμος ισορροπίας φορέα για στάθμη φόρτισης 46,20m



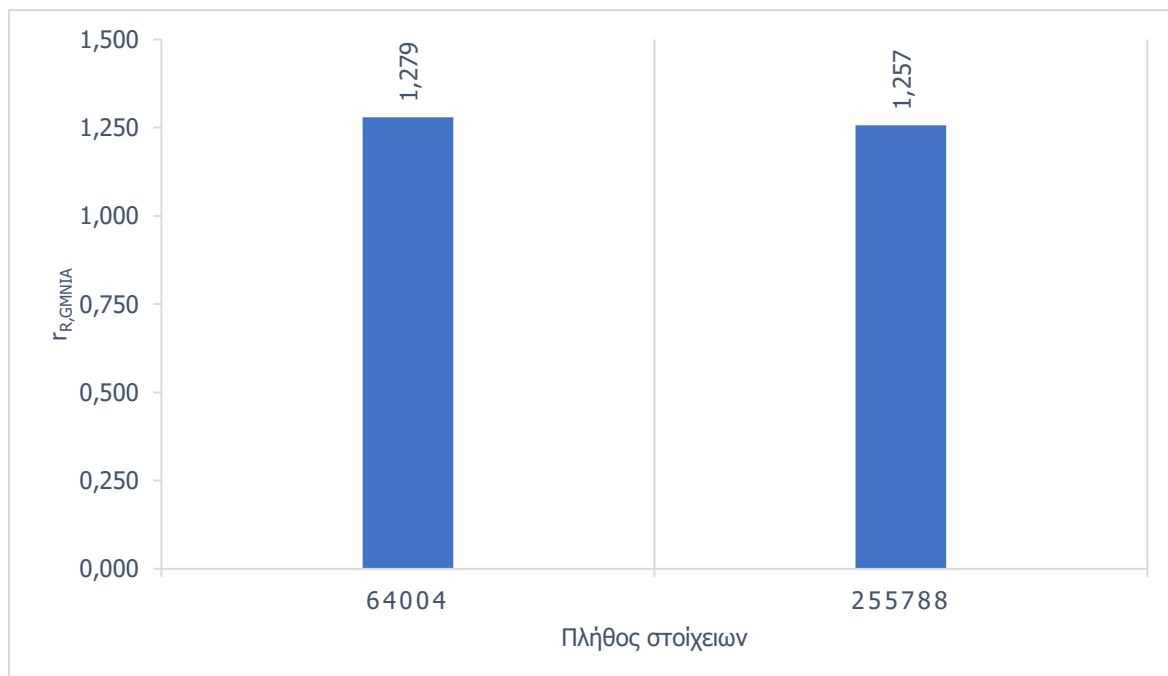
Εικόνα 43: Αποτελέσματα GMNIA για κατασκευαστική κλάση C (α) μορφή αστοχίας (β) κατανομή τάσεων von Mises στο σημείο πρώτης διαρροής

Προκειμένου να εντοπιστεί το σχήμα των αρχικών ατελειών με την δυσμενέστερη επίδραση στην οριακή αντοχή, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των πρώτων ιδιομορφών, για την οποία χρησιμοποιήθηκε το αραιότερο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Στον πίνακα 5.8 παρουσιάζεται η σύγκριση της οριακής αντοχής του μοντέλου για κατασκευαστική κατηγορία Β για διαφορετικά σχήματα αρχικών ατελειών σύμφωνα με τις πρώτες ιδιομορφές, έναντι εκείνης η οποία επιλέχθηκε (3^η) όντας η δυσμενέστερη:

Πίνακας 5.8: Σύγκριση οριακής αντοχής για διαφορετικά σχήματα αρχικών ατελειών μοντέλου στάθμης φόρτισης 46,20m

Σχήμα ιδιομορφής λυγισμού (i) ως αρχική ατέλεια	$r_{R,GMNIA}^i / r_{R,GMNIA}^3$
1 ^η	1,009
2 ^η	1,011
4 ^η	1,023
5 ^η	1,021

Προκειμένου να υπάρξει εκμετάλλευση της πλήρους ακρίβειας που μπορεί να παρέχει η αριθμητική ανάλυση, είναι απαραίτητη η σύγκλιση της πυκνότητας του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων. Θεωρήθηκε επαρκής η σύγκλιση κατά 95%, ενώ ως μέτρο ελέγχου χρησιμοποιήθηκε το οριακό φορτίο αντοχής. Στο γράφημα 5.8 παρατίθεται ο έλεγχος σύγκλισης για κατασκευαστική κατηγορία Β.



Γράφημα 5.8: Έλεγχος σύγκλισης πυκνότητας δικτύου πεπερασμένων στοιχείων για στάθμη φόρτισης 46,20m

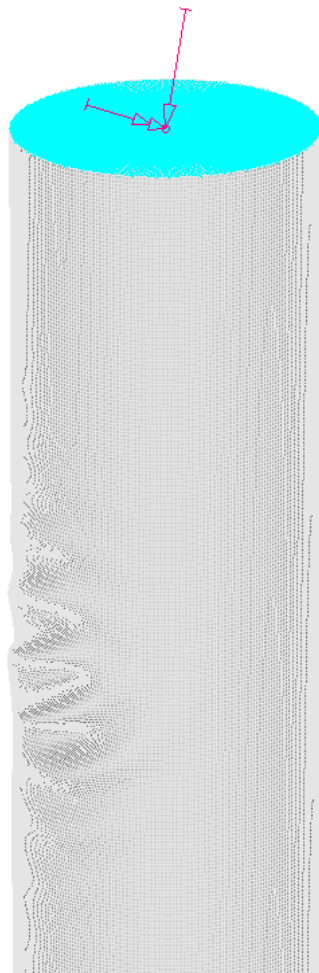
Για τα δύο πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 10 cm και 5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 98,3 %, άρα επιτυγχάνεται σύγκλιση.

5.5 Στάθμη εφαρμογής φορτίων 64,40m

Στον πίνακα 5.9 παρουσιάζονται τα σχήματα των ιδιομορφών που χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές ατέλειες, τα στοιχεία και μεγέθη των ατελειών, καθώς και η οριακή αντοχή:

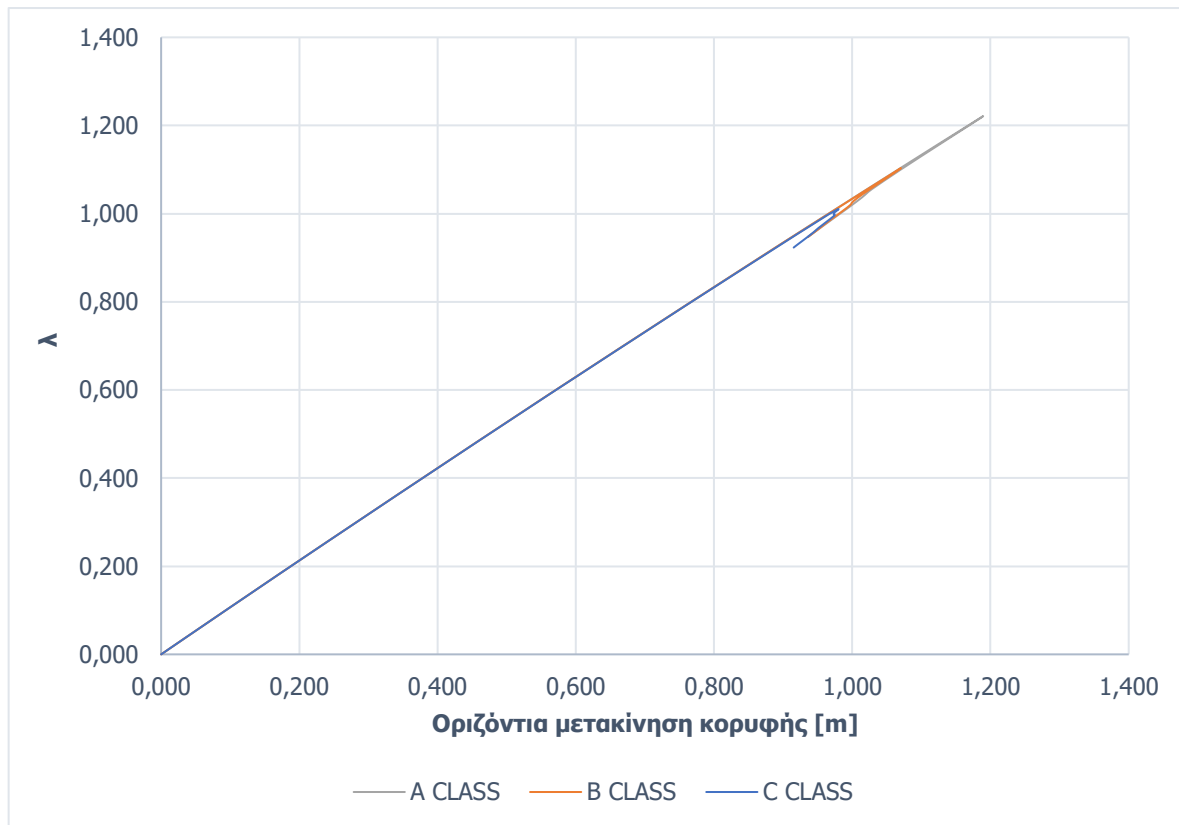
Πίνακας 5.9: Στοιχεία ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών και οριακή αντοχή για στάθμη φόρτισης 64,40m

Κατασκευαστική κλάση	Σχήμα διομορφής λυγισμού ως αρχική ατέλεια	l_{gx} [m]	t [mm]	$\Delta_{w,eq}$ [mm]	$\gamma_{R,GMNIA}$
A	1	0,43	24,5	6,1	1,221
B	1	0,43	24,5	9,8	1,101
C	1	0,43	24,5	15,3	1,010

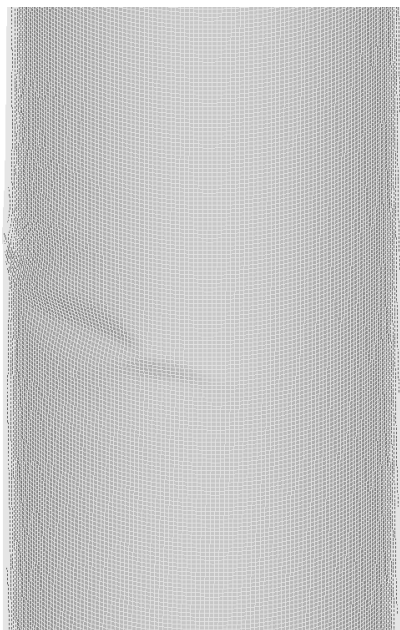


Εικόνα 44: 1^η ιδιομορφή λυγισμού

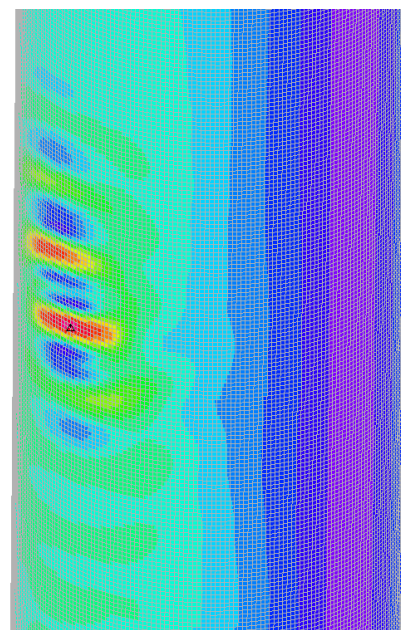
Στο γράφημα 5.9 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της κατασκευής για τις διαφορετικές κατασκευαστικές κλάσεις υπό την στάθμη 46,20m χρησιμοποιώντας ως μέτρο αναφοράς την οριζόντια μετακίνηση της κορυφής, ενώ στην εικόνα 45 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα της μορφής της αστοχίας για κατασκευαστική ποιότητα C τα οποία είναι πανομοιότυπα, ανεξαρτήτως της ποιότητας.



Γράφημα 5.9: Δρόμος ισορροπίας φορέα για στάθμη φόρτισης 64,40m



(α)



(β)

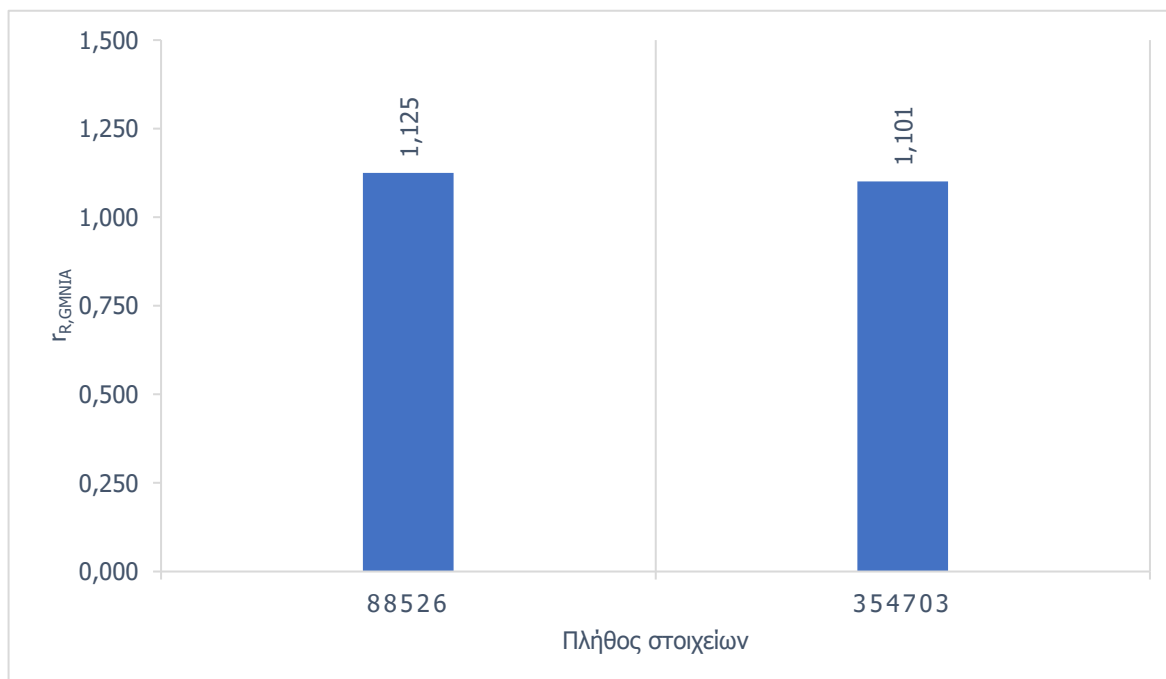
Εικόνα 45: Αποτελέσματα GMNIA για κατασκευαστική κλάση C (α) μορφή αστοχίας (β) κατανομή τάσεων von Mises στο σημείο πρώτης διαρροής

Προκειμένου να εντοπιστεί το σχήμα των αρχικών ατελειών με την δυσμενέστερη επίδραση στην οριακή αντοχή, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των πρώτων ιδιομορφών, για την οποία χρησιμοποιήθηκε το αραιότερο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Στον πίνακα 5.10 παρουσιάζεται η σύγκριση της οριακής αντοχής του μοντέλου για κατασκευαστική κατηγορία Β για διαφορετικά σχήματα αρχικών ατελειών σύμφωνα με τις πρώτες ιδιομορφές, έναντι εκείνης η οποία επιλέχθηκε (3^η) όντας η δυσμενέστερη:

Πίνακας 5.10: Σύγκριση οριακής αντοχής για διαφορετικά σχήματα αρχικών ατελειών μοντέλου στάθμης φόρτισης 64,40m

Σχήμα ιδιομορφής λυγισμού (i) ως αρχική ατέλεια	$r_{R,GMNIA}^i / r_{R,GMNIA}^2$
2 ^η	1,003
3 ^η	1,012
4 ^η	1,018
5 ^η	1,021

Προκειμένου να υπάρξει εκμετάλλευση της πλήρους ακρίβειας που μπορεί να παρέχει η αριθμητική ανάλυση, είναι απαραίτητη η σύγκλιση της πυκνότητας του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων. Θεωρήθηκε επαρκής η σύγκλιση κατά 95%, ενώ ως μέτρο ελέγχου χρησιμοποιήθηκε το οριακό φορτίο αντοχής. Στο γράφημα 5.10 παρατίθεται ο έλεγχος σύγκλισης για κατασκευαστική κατηγορία Β.



Γράφημα 5.10: Έλεγχος σύγκλισης πυκνότητας δικτύου πεπερασμένων στοιχείων για στάθμη φόρτισης 64,40m

Για τα δύο πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 10 cm και 5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 97,9 %, άρα επιτυγχάνεται σύγκλιση.

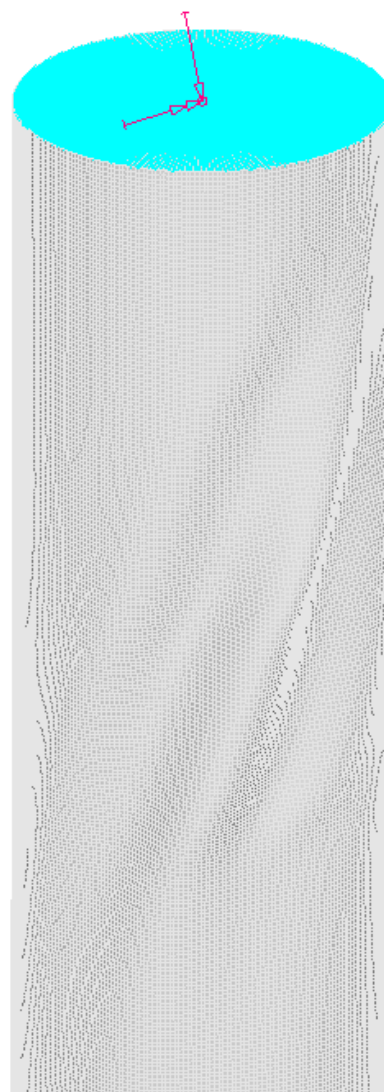
5.6 Στάθμη εφαρμογής φορτίων 89,60m

Στον πίνακα 5.11 παρουσιάζονται τα σχήματα των ιδιομορφών που χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές ατέλειες, τα στοιχεία και μεγέθη των ατελειών, καθώς και η οριακή αντοχή.

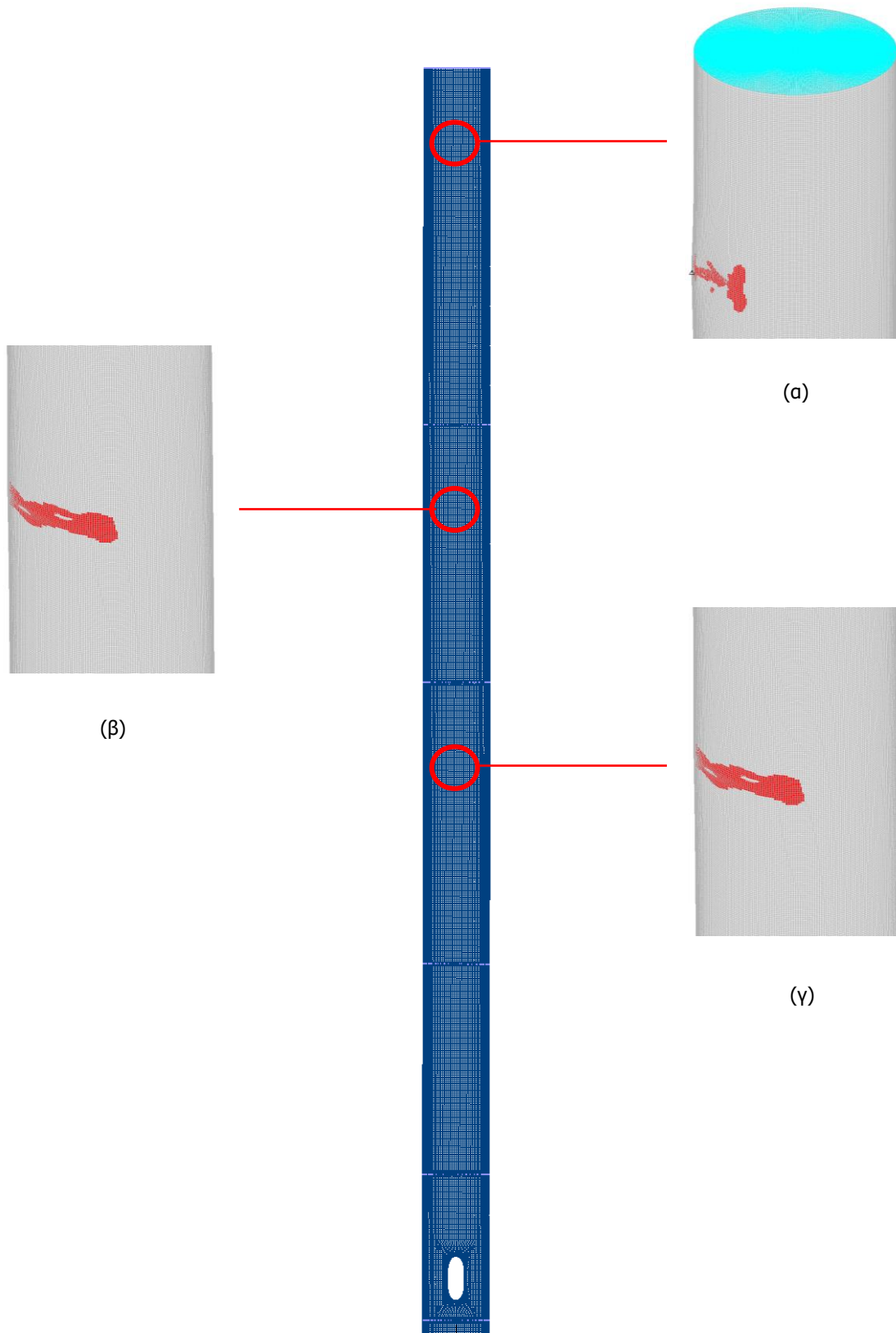
Πίνακας 5.11: Στοιχεία ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών και οριακή αντοχή για στάθμη φόρτισης 89,60m

Κατασκευαστική κλάση	Σχήμα διομορφής λυγισμού ως αρχική ατέλεια	I_{gx} [m]	t [mm]	$\Delta_{w,eq}$ [mm]	$\Gamma_{R,GMNIA}$
A	1	0,78	20,0	7,8	1,345
B	1	0,78	20,0	12,5	1,345
C	1	0,78	20,0	19,5	1,253

Στο συγκεκριμένο τμήμα παρουσιάστηκε διαφορετική συμπεριφορά από εκείνη που εμφανίζουν τα τμήματα κάτω από αυτήν την στάθμη. Η πρώτη παρατήρηση είναι ότι στην γραμμική ανάλυση λυγισμού οι κύριες ιδιομορφές είναι στρεπτικές, χωρίς να εμφανίζεται τοπικός λυγισμός από θλιπτικές τάσεις στις εκατό πρώτες. Μία δεύτερη παρατήρηση είναι ότι ενώ για την χαμηλότερη κατασκευαστική ποιότητα η οριακή αντοχή είναι με την σειρά της χαμηλότερη των άλλων δύο κατηγοριών, για τις κατασκευαστικές κλάσεις A και B δεν παρουσιάζεται καμία μεταβολή στην αντοχή παρά την διαφοροποίηση στις αρχικές ατέλειες. Παρατηρώντας την μορφή της αστοχίας σε κάθε περίπτωση διακρίνεται μεταβολή αυτής για διαφορετικά μεγέθη ατελειών. Για την κατασκευαστική κατηγορία C πραγματοποιείται η αστοχία όπως αναμένεται στην περιοχή με τις έντονες ατέλειες, οι οποίες έχουν οριστεί από την αντίστοιχη ιδιομορφή λυγισμού (Εικόνα 46). Αντίθετα, για τις δύο υψηλότερες κατασκευαστικές ποιότητες η αστοχία δεν πραγματοποιείται λόγω στρεπτικής έντασης, αλλά λόγω θλιπτικών τάσεων σε περιοχές απομακρυσμένες από εκείνη με έντονες αρχικές ατέλειες, σε σημεία όπου ο φορέας αποκλίνει ελάχιστα από τον τέλειο. Η αστοχία συμβαίνει σε χαμηλότερες στάθμες, στα μέρη 4 και 5, όπου ήδη είχαν προσδιοριστεί ως κρίσιμες, επιβεβαιώνοντας τα προηγούμενα αποτελέσματα. Παρ' όλα αυτά καθίσταται αδύνατη η εισαγωγή αντίστοιχων αρχικών ατελειών, εφόσον κατά την αναζήτηση ανώτερων ιδιομορφών, καμία δεν εμφανίζεται να είναι της επιζητούμενης μορφής και θέσεως, γεγονός το οποίο είναι μικρής σημασίας εφόσον η αντοχή αυτών των τμημάτων έχει προσδιοριστεί. Ένα ασφαλές συμπέρασμα το οποίο μπορεί να εξαχθεί είναι ότι η αντοχή του τμήματος προς αναζήτηση είναι μεγαλύτερη ή ίση από την υπολογισμένη στις θέσεις της αστοχίας.

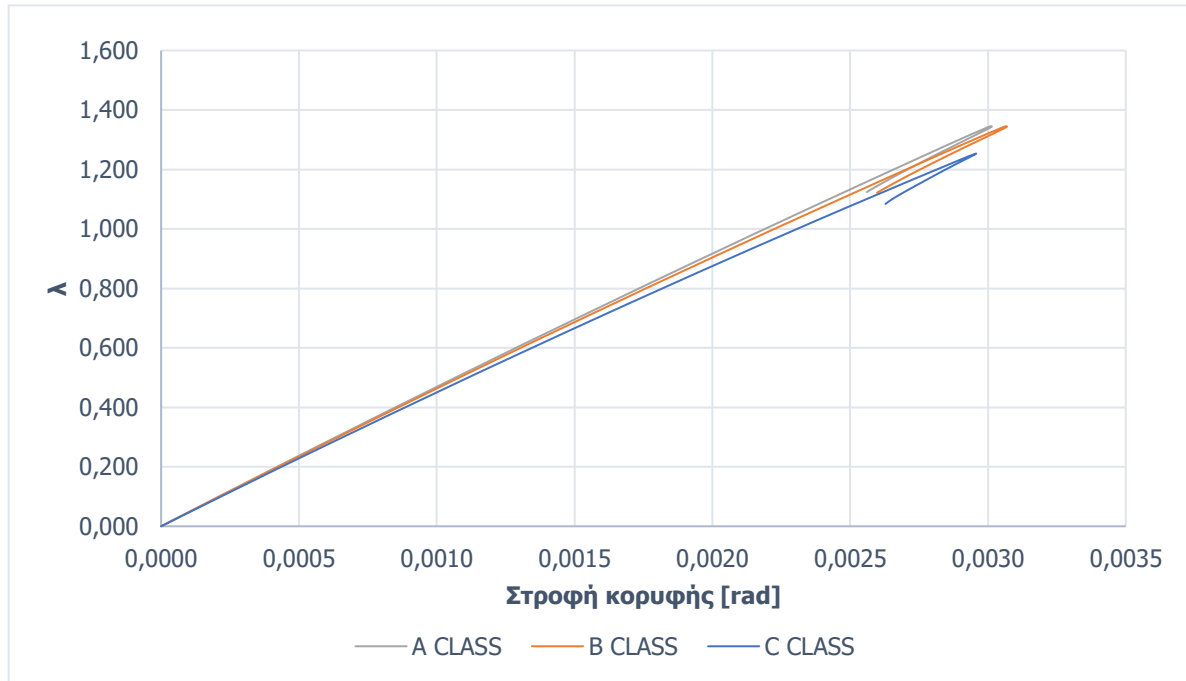


Εικόνα 46: 1^η ιδιομορφή λυγισμού

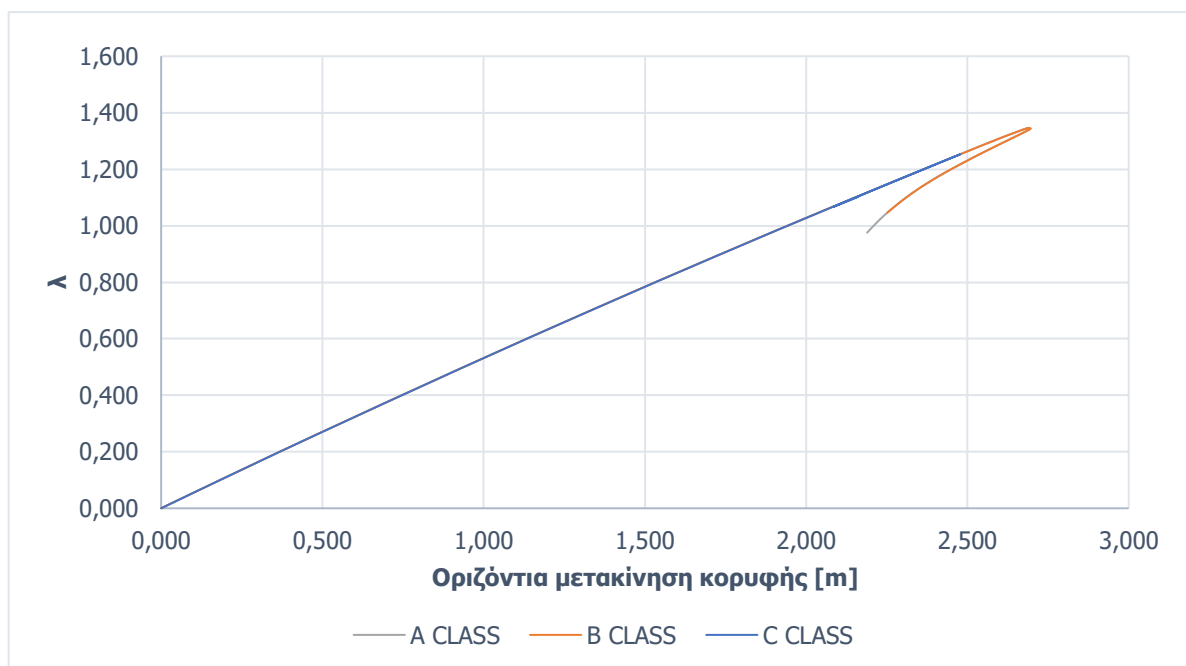


Εικόνα 47: Θέσεις αστοχίας και περιοχή διαρροής υλικού GMNIA (a) για κατασκευαστική κλάση C, (β) και (γ) για κατασκευαστική κλάση A και B

Στο γράφημα 5.11 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της κατασκευής για τις διαφορετικές κατασκευαστικές κλάσεις υπό την στάθμη 89,60m χρησιμοποιώντας ως μέτρο ελέγχου την στροφή της κορυφής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. Εφόσον στις κατασκευαστικές κατηγορίες A και B η στρεπτική ένταση δεν είναι κρίσιμη είναι απαραίτητη η σύγκριση των δόμων ισορροπίας χρησιμοποιώντας επιπλέον ως μέτρο ελέγχου την οριζόντια μετακίνηση της κορυφής, οι οποίοι παρουσιάζονται στο γράφημα 5.12.



Γράφημα 5.11: Δρόμος ισορροπίας φορέα για στάθμη φόρτισης 89,60m



Γράφημα 5.12: Δρόμος ισορροπίας φορέα για στάθμη φόρτισης 89,60m

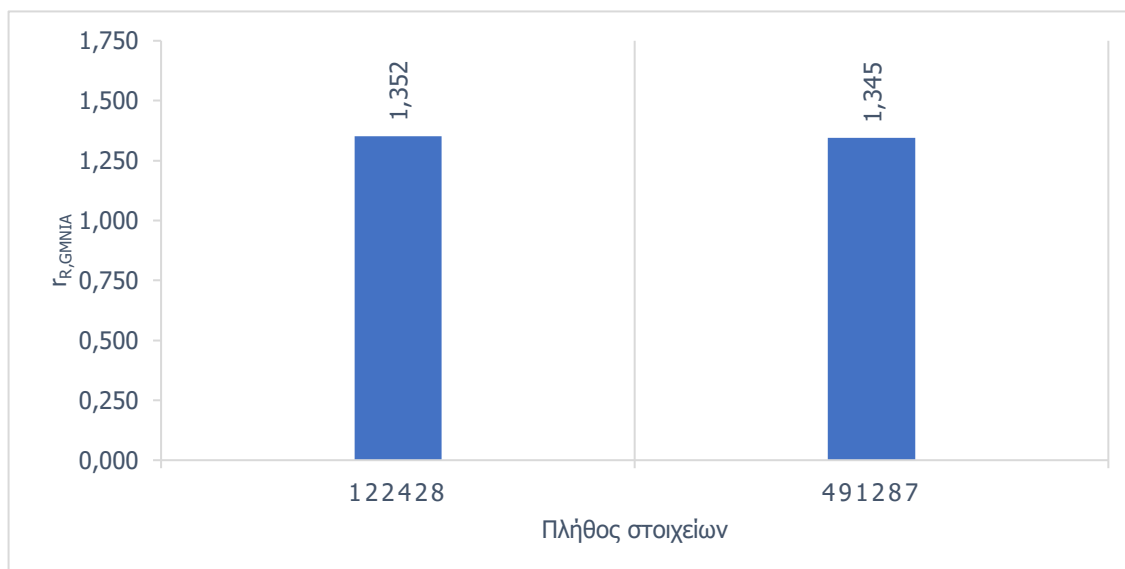
Αναφορικά με την δυστρεψία της κατασκευής, αυτή φαίνεται να μεταβάλλεται ελαφρώς για οποιαδήποτε μεταβολή των αρχικών ατελειών, όπως είναι αναμενόμενο με πολύ μικρή διαφοροποίηση για τις κατασκευαστικές ποιότητες A και B. Συγκρίνοντας τον δρόμο ισορροπίας με έλεγχο στην μετακίνηση της κορυφής υπάρχει απόλυτη ταύτιση για τις κλάσεις A και B ενώ επίσης παρατηρείται πανομοιότυπη συμπεριφορά της κλάσης C για φορτία μικρότερα της αστοχίας.

Προκειμένου να εντοπιστεί το σχήμα των αρχικών ατελειών με την δυσμενέστερη επίδραση στην οριακή αντοχή, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των πρώτων ιδιομορφών, για την οποία χρησιμοποιήθηκε το αραιότερο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Στον πίνακα 5.12 παρουσιάζεται η σύγκριση της οριακής αντοχής του μοντέλου για κατασκευαστική κατηγορία C για διαφορετικά σχήματα αρχικών ατελειών σύμφωνα με τις πρώτες ιδιομορφές, έναντι εκείνης η οποία επιλέχθηκε (3^η) όντας η δυσμενέστερη.

Πίνακας 5.12: σύγκριση οριακής αντοχής για διαφορετικά σχήματα αρχικών ατελειών μοντέλου στάθμης φόρτισης 89,60m

Σχήμα ιδιομορφής λυγισμού (i) ως αρχική ατέλεια	$\Gamma_{R,GMNIA}^i / \Gamma_{R,GMNIA}^1$
2 ^η	1,003
3 ^η	1,004
4 ^η	1,008
5 ^η	1,007

Προκειμένου να υπάρξει εκμετάλλευση της πλήρους ακρίβειας που μπορεί να παρέχει η αριθμητική ανάλυση, είναι απαραίτητη η σύγκλιση της πυκνότητας του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων. Θεωρήθηκε επαρκής η σύγκλιση κατά 95%, ενώ ως μέτρο ελέγχου χρησιμοποιήθηκε το οριακό φορτίο αντοχής. Στο γράφημα 5.13.12 παρατίθεται ο έλεγχος σύγκλισης για κατασκευαστική κατηγορία B.



Γράφημα 5.13: Έλεγχος σύγκλισης πυκνότητας δικτύου πεπερασμένων στοιχείων για στάθμη φόρτισης 89,60m

Για τα δύο πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 10 cm και 5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 99,5 %, άρα επιτυγχάνεται σύγκλιση.

5.7 Στάθμη εφαρμογής φορτίων 117,67m

Στον πίνακα 5.13 παρουσιάζονται τα σχήματα των ιδιομορφών που χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές ατέλειες, τα στοιχεία και μεγέθη των ατελειών, καθώς και η οριακή αντοχή:

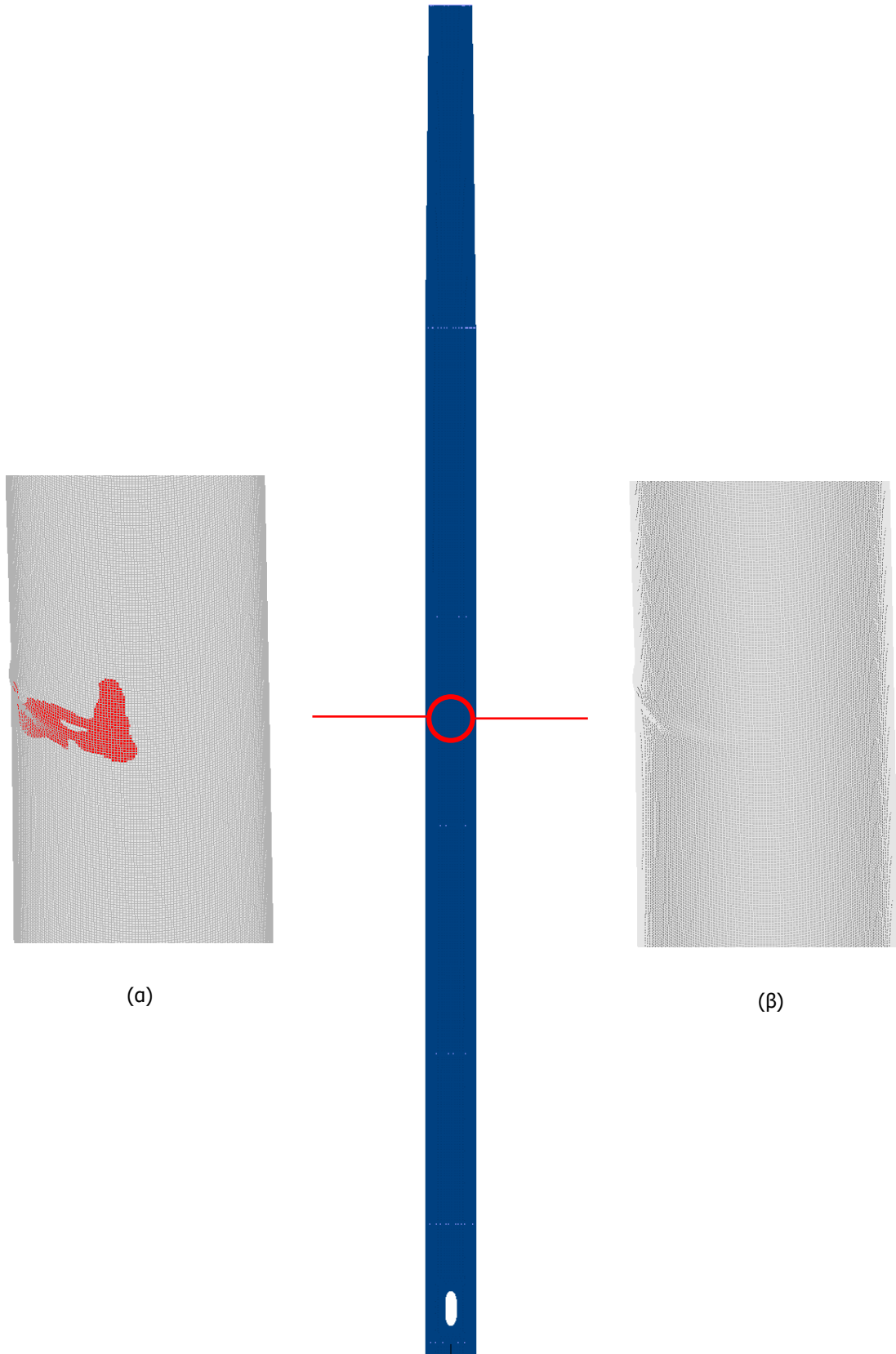
Πίνακας 5.13: στοιχεία ισοδύναμων γεωμετρικών ατελειών και οριακή αντοχή για στάθμη φόρτισης 117,67m

Κατασκευαστική κλάση	Σχήμα διομορφής λυγισμού ως αρχική ατέλεια	l_{gx} [m]	t [mm]	$\Delta_{w,eq}$ [mm]	$\Gamma_{R,GMNIA}$
A	3	0,92	15,0	9,2	2,030
B	3	0,92	15,0	14,7	2,030
C	3	0,92	15,0	23,0	2,030

Στο συγκεκριμένο τμήμα παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο με το προηγούμενο αλλά και για τα τρία μεγέθη αρχικών ατελειών. Ενώ τίθενται αρχικές ατέλειες σύμφωνα με στρεπτικές ιδιομορφές, η αστοχία παρουσιάζεται σε άλλη θέση και συγκεκριμένα στο μέρος 4. Παρ' όλα αυτά καθίσταται αδύνατη η εισαγωγή αντίστοιχων αρχικών ατελειών, εφόσον κατά την αναζήτηση ανώτερων ιδιομορφών, καμία εκ των εκατό πρώτων δεν εμφανίζεται να είναι της επιζητούμενης μορφής και θέσεως, γεγονός το οποίο είναι μικρής σημασίας εφόσον η αντοχή αυτού του τμήματος έχει προσδιοριστεί. Ένα ασφαλές συμπέρασμα το οποίο μπορεί να εξαχθεί είναι ότι η αντοχή του τμήματος προς αναζήτηση είναι μεγαλύτερη ή ίση από την υπολογισμένη στη θέση της αστοχίας. Επιπλέον παρατηρείται ότι οι δύο πρώτες ιδιομορφές είναι καμπτικού λυγισμού καθολικά στον πυλώνα οι οποίες δεν χρησιμοποιήθηκαν ως αρχικές ατέλειες εφόσον υπάρχει δράση συγκεντρωμένων δυνάμεων στην κορυφή που δημιουργούν οριζόντιες μετατοπίσεις.

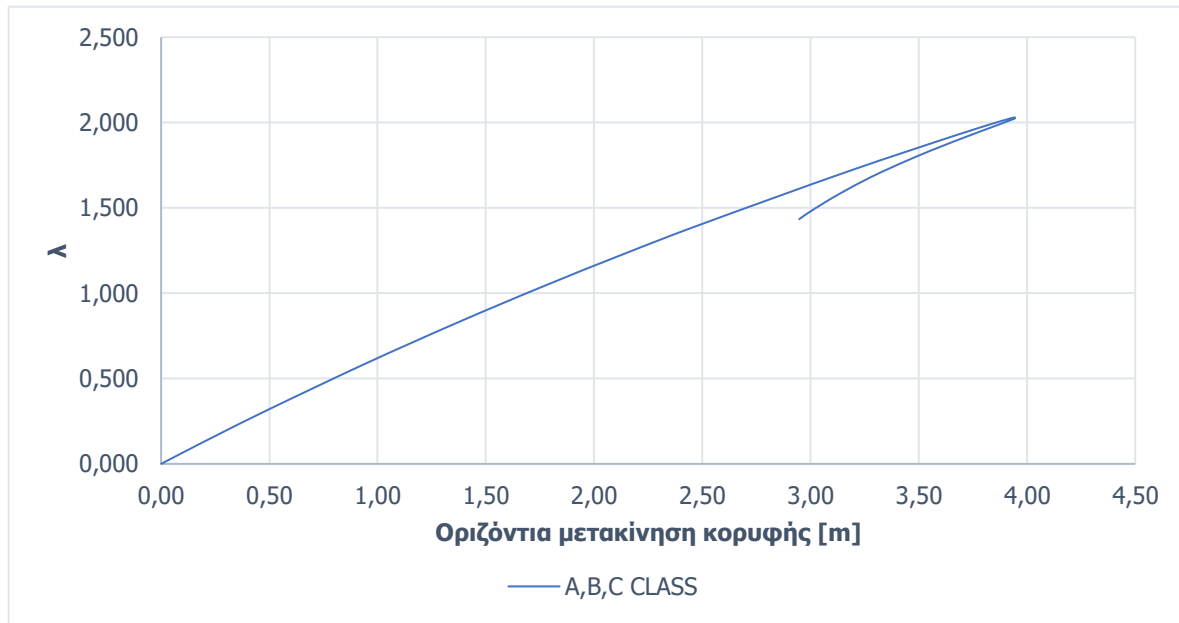


Εικόνα 48: 3^η ιδιομορφή λυγισμού

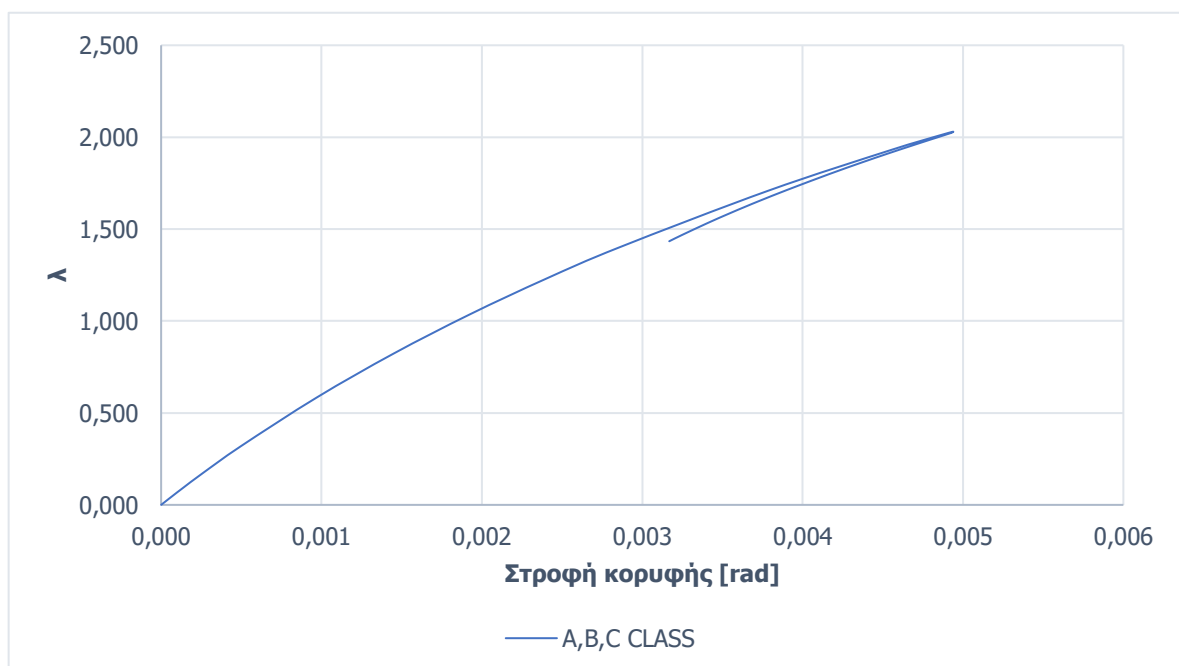


Εικόνα 49: Θέση αστοχίας GMNIA για κατασκευαστική κλάση A, B, C (α) περιοχή διαρροής υλικού (β) μορφή αστοχίας

Όπως διαπιστώθηκε από τις μη γραμμικές αναλύσεις στην στάθμη 89,6m, εφόσον η αστοχία δεν πραγματοποιείται από στρεπτική ένταση για την οποία έχουν δοθεί αντίστοιχες αρχικές ατέλειες, αλλά από άλλο αίτιο, συγκεκριμένα θλιπτικές τάσεις, και σε περιοχή απομακρυσμένη από έντονες αρχικές ατέλειες, δεν υπάρχει διαφοροποίηση της συμπεριφοράς για διαφορετικά μεγέθη αρχικών ατελειών. Στα γραφήματα 5.14 και 5.15 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της κατασκευής, ο οποίος ταυτίζεται για όλες τις διαφορετικές κατασκευαστικές κλάσεις υπό την στάθμη 117,67m χρησιμοποιώντας ως μέτρο ελέγχου την οριζόντια μετακίνηση της κορυφής και την στροφή αυτής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα αντίστοιχα.



Γράφημα 5.14: Δρόμος ισορροπίας φορέα για στάθμη φόρτισης 117,67m με μέτρο ελέγχου την οριζόντια μετακίνηση κορυφής



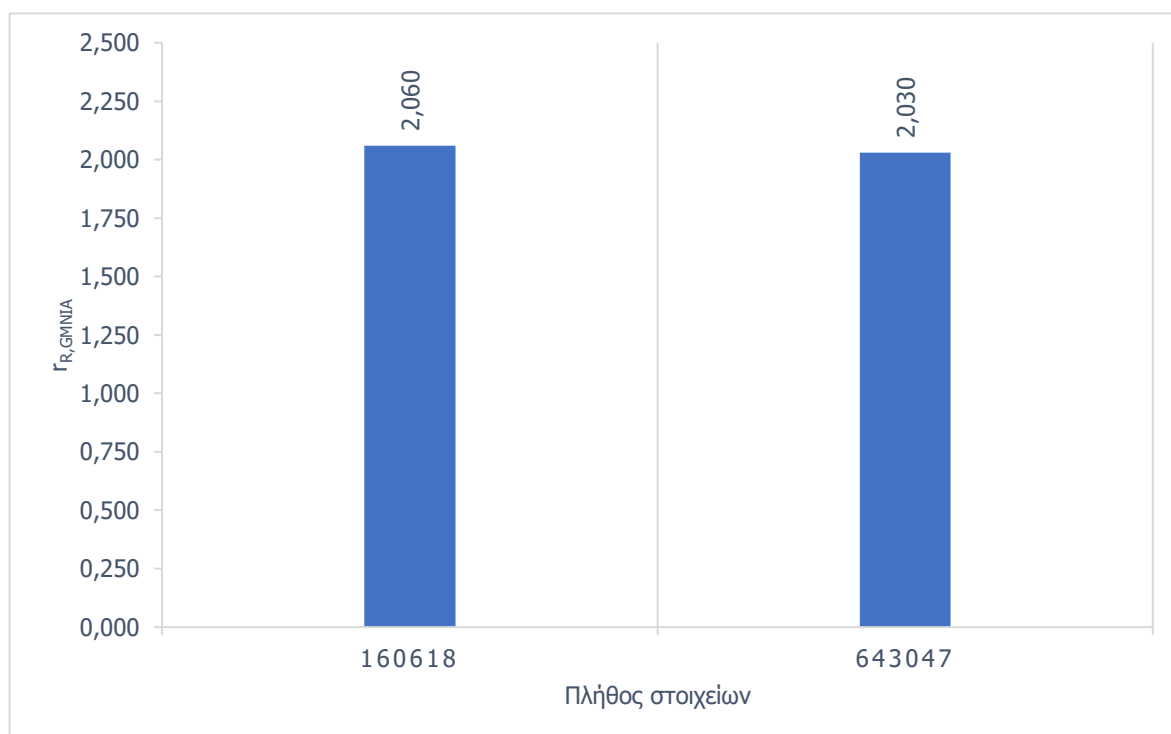
Γράφημα 5.15: Δρόμος ισορροπίας φορέα για στάθμη φόρτισης 117,67m με μέτρο ελέγχου την στροφή της κορυφής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα

Προκειμένου να εντοπιστεί το σχήμα των αρχικών ατελειών με την δυσμενέστερη επίδραση στην οριακή αντοχή, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των πρώτων ιδιομορφών, για την οποία χρησιμοποιήθηκε το αραιότερο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Στον πίνακα 5.14 παρουσιάζεται η σύγκριση της οριακής αντοχής του μοντέλου για κατασκευαστική κατηγορία C για διαφορετικά σχήματα αρχικών ατελειών σύμφωνα με τις πρώτες ιδιομορφές, έναντι εκείνης η οποία επιλέχθηκε (3^η) όντας η δυσμενέστερη:

Πίνακας 5.14: Σύγκριση οριακής αντοχής για διαφορετικά σχήματα αρχικών ατελειών μοντέλου στάθμης φόρτισης 117,67m

Σχήμα ιδιομορφής λυγισμού (i) ως αρχική ατέλεια	$f_{R,GMNIA}^i / f_{R,GMNIA}^3$
4 ^η	1,000
5 ^η	1,001

Προκειμένου να υπάρξει εκμετάλλευση της πλήρους ακρίβειας που μπορεί να παρέχει η αριθμητική ανάλυση, είναι απαραίτητη η σύγκλιση της πυκνότητας του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων. Θεωρήθηκε επαρκής η σύγκλιση κατά 95%, ενώ ως μέτρο ελέγχου χρησιμοποιήθηκε το οριακό φορτίο αντοχής. Στο γράφημα 5.16 παρατίθεται ο έλεγχος σύγκλισης για κατασκευαστική κατηγορία B.

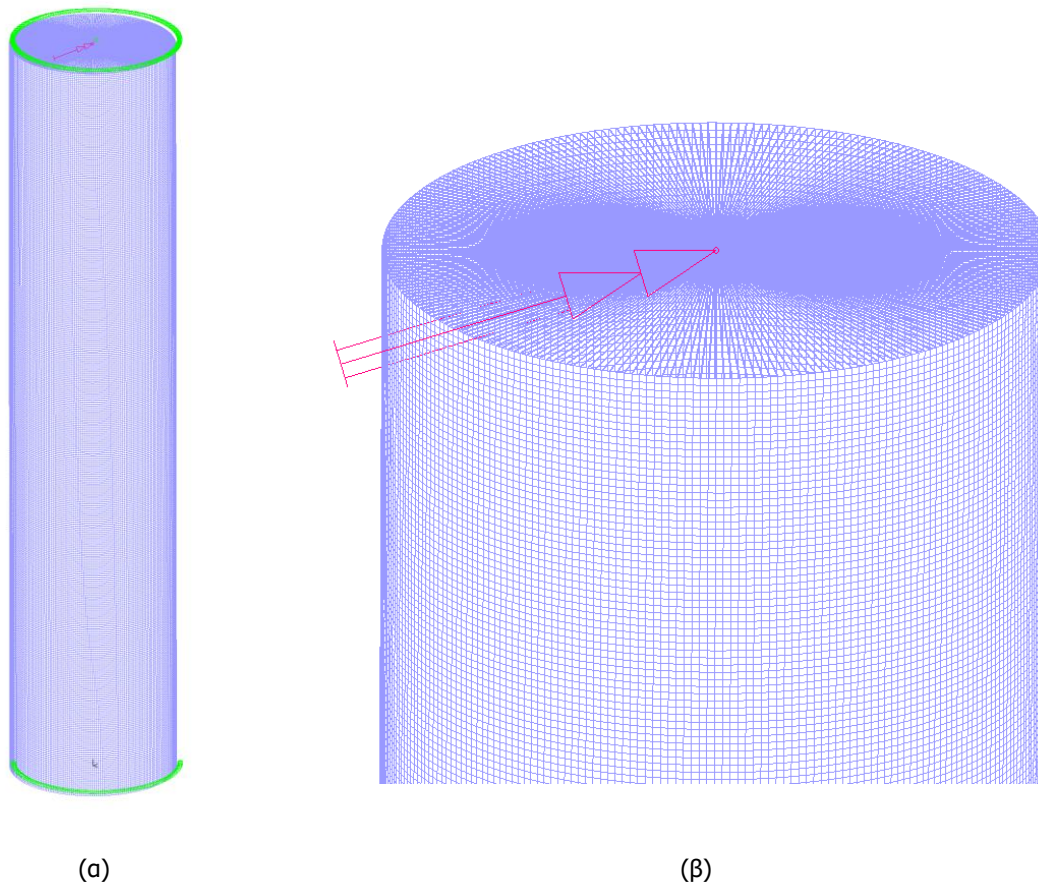


Γράφημα 5.16: έλεγχος σύγκλισης πυκνότητας δικτύου πεπερασμένων στοιχείων για στάθμη φόρτισης 117,67m

Για τα δύο πλέγματα, με διαστάσεις πλευρών των στοιχείων 10 cm και 5 cm αντίστοιχα, υπάρχει σύμπτωση 98,5 %, άρα επιτυγχάνεται σύγκλιση.

5.8 Βαθμονόμηση αποτελεσμάτων

Προκειμένου να γίνει βαθμονόμηση των υπολογιστικών αντοχών ούτως ώστε αυτές να είναι συμβατές με ρεαλιστικές τιμές οι οποίες προδιαγράφονται στον EN 1993-1-6 ^[1] γίνεται επιπλέον δοκιμαστική ανάλυση. Για την ανάλυση αυτή χρησιμοποιείται γεωμετρία 20m ύψους, διαμέτρου 4,30m και σταθερού πάχους τοιχωμάτων 25mm, με συνοριακές συνθήκες δέσμευσης όλων των βαθμών ελευθερίας στην βάση και δέσμευσης της εκτός επιπέδου οριζόντιας μετακίνησης στην κορυφή. Το μοντέλο φορτίστηκε με συγκεντρωμένη ροπή στην κορυφή, γύρω από οριζόντιο άξονα, μέτρου 98098 kNm.



Εικόνα 50: Μοντέλο βαθμονόμησης

Εφαρμόζοντας υπολογισμούς σε όρους τάσεων όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.7.2.1 για τον προσδιορισμό της αντοχής της ίδιας γεωμετρίας και συνοριακών συνθηκών προκύπτει $\Gamma_{Rk,known,check}=1,085$. Αντίστοιχα εφαρμόζοντας μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες, ορισμένες ομοίως με τα μοντέλα του πυλώνα, προκύπτει $\Gamma_{R,GMNIA,check}=1,082$. Από τον λόγο των δύο αυτών τιμών υπολογίζεται ο συντελεστής βαθμονόμησης k_{GMNIA} :

$$k_{GMNIA} = \frac{\Gamma_{Rk,known,check}}{\Gamma_{R,GMNIA,check}} = 1,003 > 1 \rightarrow k_{GMNIA} = 1$$

5.9 Υπολογισμός αντοχής σχεδιασμού

Για τον υπολογισμό της αντοχής της κατασκευής με την οποία θα γίνει ο έλεγχος επάρκειας συγκριτικά με τα φορτία σχεδιασμού υπολογίζεται η αντοχή σχεδιασμού r_{Rd} σύμφωνα με την εξίσωση 5.1, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στους πίνακες 5.15, 5.16 και 5.17.

$$r_{Rd} = \frac{k_{GMNIA} \times r_{R,GMNIA}}{\gamma_{M1}} \quad (5.1)$$

όπου η τιμή γ_{M1} προτείνεται μην λαμβάνεται μικρότερη από 1,1 σε είδη φορέων όπου δεν υπάρχει αντίστοιχος κανονισμός, άρα στην συγκεκριμένη μελέτη λήφθηκε $\gamma_{M1}=1,1$

Πίνακας 5.15: Υπολογιστική αντοχή και αντοχή σχεδιασμού καθ' ύψος του φορέα για κατασκευαστική κλάση A

Στάθμη εφαρμογής φορτίων (m)	Στάθμη περιοχής αστοχίας (m)	$r_{R,GMNIA}$	r_{Rd}
1,15	0,5	2,289	2,081
11,48	8,6	1,822	1,656
26,32	24,1	1,603	1,457
46,20	44,4	1,300	1,182
64,40	56,4	1,221	1,110
89,60	38,0 & 56,0	1,345	1,223
117,67	38,0	2,030	1,845

Πίνακας 5.16: Υπολογιστική αντοχή και αντοχή σχεδιασμού καθ' ύψος του φορέα για κατασκευαστική κλάση B

Στάθμη εφαρμογής φορτίων (m)	Στάθμη περιοχής αστοχίας (m)	$r_{R,GMNIA}$	r_{Rd}
1,15	0,5	2,234	2,031
11,48	8,6	1,744	1,585
26,32	24,1	1,525	1,386
46,20	44,4	1,257	1,143
64,40	56,4	1,101	1,001
89,60	38,0 & 56,0	1,345	1,223
117,67	38,0	2,030	1,845

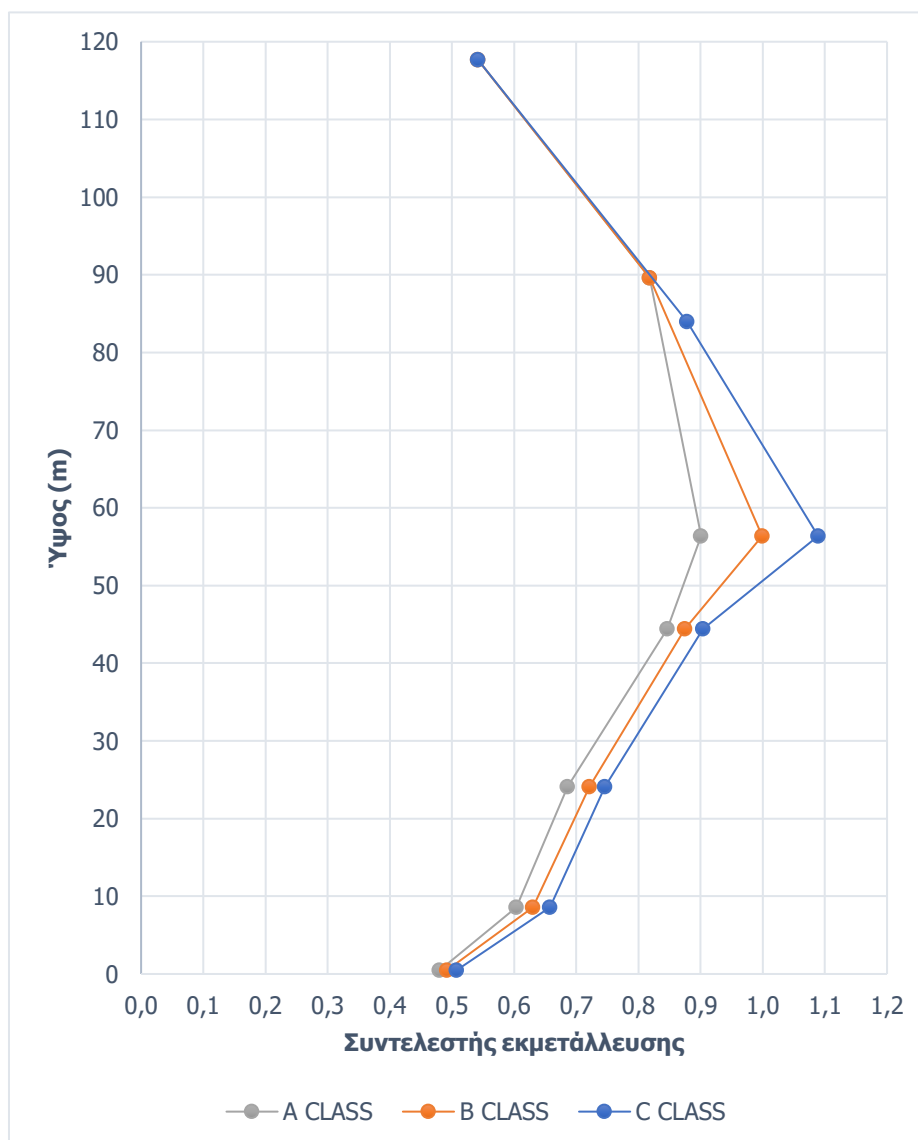
Πίνακας 5.17: Υπολογιστική αντοχή και αντοχή σχεδιασμού καθ' ύψος του φορέα για κατασκευαστική κλάση C

Στάθμη εφαρμογής φορτίων (m)	Στάθμη περιοχής αστοχίας (m)	$r_{R,GMNIA}$	r_{Rd}
1,15	0,5	2,166	1,969
11,48	8,6	1,672	1,520
26,32	24,1	1,475	1,341
46,20	44,4	1,217	1,106
64,40	56,4	1,010	0,918
89,60	84,0	1,253	1,139
117,67	38,0	2,030	1,845

Από τους παραπάνω υπολογισμούς προκύπτει η συνολική αντοχή του πυλώνα της ανεμογεννήτριας για κάθε κατασκευαστική ποιότητα, η οποία είναι η μικρότερη τιμή που εμφανίζεται καθ' ύψος. Παρατηρείται ότι η κατασκευή επαρκεί για τις κατασκευαστικές ποιότητες A και B ενώ δεν επαρκεί για την ποιότητα C, εφόσον ο συντελεστής αντοχής σχεδιασμού είναι μικρότερος της μονάδας. Στο γράφημα 5.17 παρουσιάζεται ο βαθμός εκμετάλλευσης κάθε διατομής καθ' ύψος της κατασκευής με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων της αστοχίας.

Πίνακας 5.18: Αντοχή σχεδιασμού φορέα για κατασκευαστική κλάση A, B, C

Κατασκευαστική κλάση	Γ_{Rd}
A	1,110
B	1,001
C	0,918



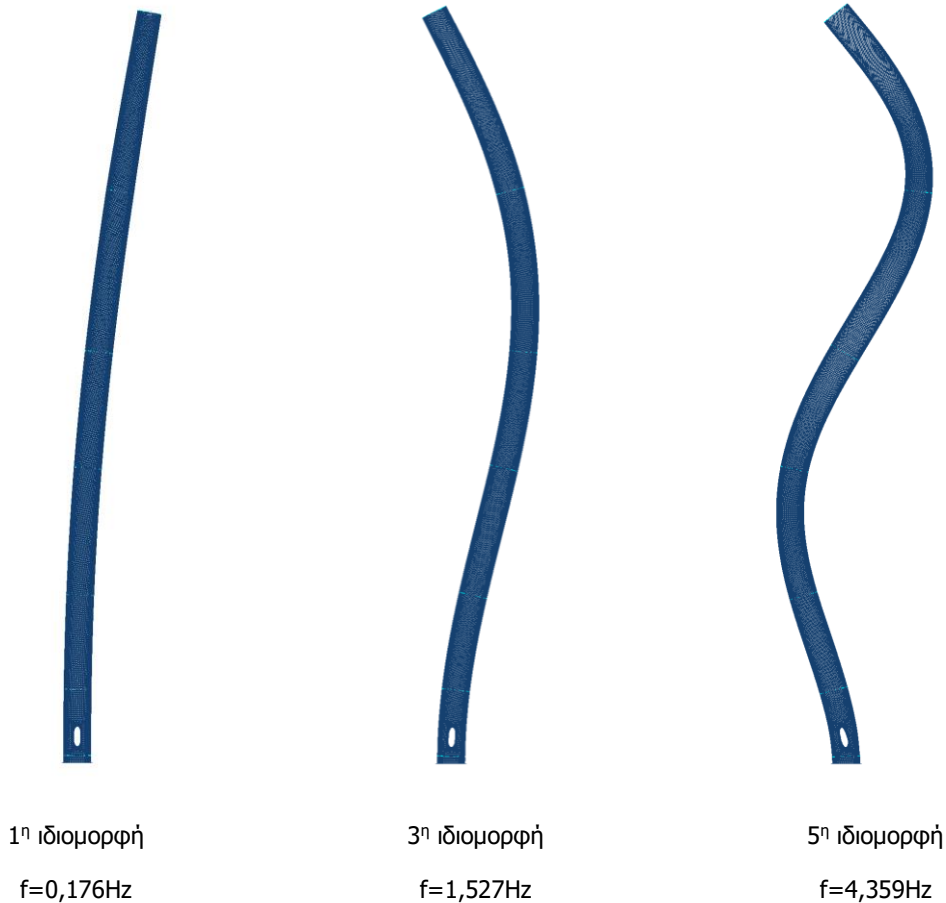
Γράφημα 5.17: Βαθμός εκμετάλλευσης διατομών του πυλώνα

6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

Ένας εκ των ελέγχων λειτουργικότητας ο οποίος πρέπει να πραγματοποιηθεί είναι ο έλεγχος των ταλαντώσεων. Ως διεγείρουσα περιοδική δράση η οποία μπορεί να προκαλέσει ταλαντώσεις στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας είναι η πνοή του ανέμου, καθώς και η περιστροφή των πτερυγίων αυτής. Για την δεύτερη δράση ο έλεγχος υπόκειται στην σύγκριση της συχνότητας λειτουργίας με την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής. Γι' αυτό τον λόγο έγινε υπολογισμός των ιδιοσυχνοτήτων και αντίστοιχων ιδιομορφών, πραγματοποιώντας παραμετρική διερεύνηση σχετικά με την θεμελίωση. Εξαιτίας της διπλής συμμετρίας του πυλώνα στους υπολογισμούς των ιδιοσυχνοτήτων, εμφανίζονται δύο συζυγείς ιδιομορφές με συμμετρικά σχήματα κάθετα μεταξύ τους με παραπλήσιες συχνότητες με ελάχιστη διαφοροποίηση εξαιτίας της ασυμμετρίας που δημιουργεί η οπή της ανθρωποθυρίδας. Από τον κατασκευαστή ορίζεται η συχνότητα περιστροφής του μηχανισμού η οποία είναι 0,98 rad/s και χαρακτηρίζεται συχνότητα λειτουργίας 1P, από την οποία προκύπτει και η συχνότητα διέλευσης διαδοχικών πτερυγίων έμπροσθεν του πυλώνα 2,94 rad/s, η οποία χαρακτηρίζεται συχνότητα διέλευσης πτερυγίων 3P. Σύμφωνα με το πρότυπο πιστοποίησης του οργανισμού "Germanischer Lloyd" ^[8] αν υπάρχει απόκλιση της ιδιοσυχνότητας της κατασκευής μεγαλύτερη του $\pm 5\%$ από τις συχνότητες 1P και 3P δεν απαιτείται αναλυτικότερος έλεγχος ταλαντώσεων, ενώ σύμφωνα με το πρότυπο του οργανισμού "DNV/Riso" ^[7] ο έλεγχος μπορεί να αποφευχθεί αν πληρείται το αυστηρότερο κριτήριο απόκλισης $\pm 10\%$. Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζεται η τιμή των ιδιοσυχνοτήτων για συνθήκες πλήρους δεσμεύσεως όλων των βαθμών ελευθερίας στην βάση του πυλώνα:

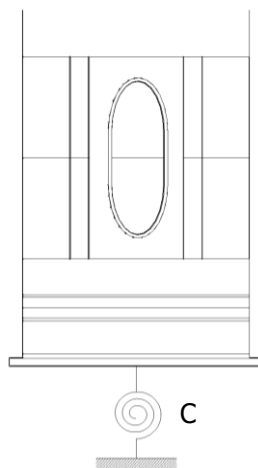
Πίνακας 6.1: Ιδιοσυχνότητες ελεύθερης ταλάντωσης

Ιδιομορφή	Ιδιοσυχνότητα [rad/s]	Ιδιοσυχνότητα [Hz]	Ιδιοπερίοδος [s]
1	1,105	0,176	5,684
2	1,106	0,176	5,682
3	9,591	1,527	0,655
4	9,598	1,527	0,655
5	27,390	4,359	0,229
6	27,430	4,366	0,229



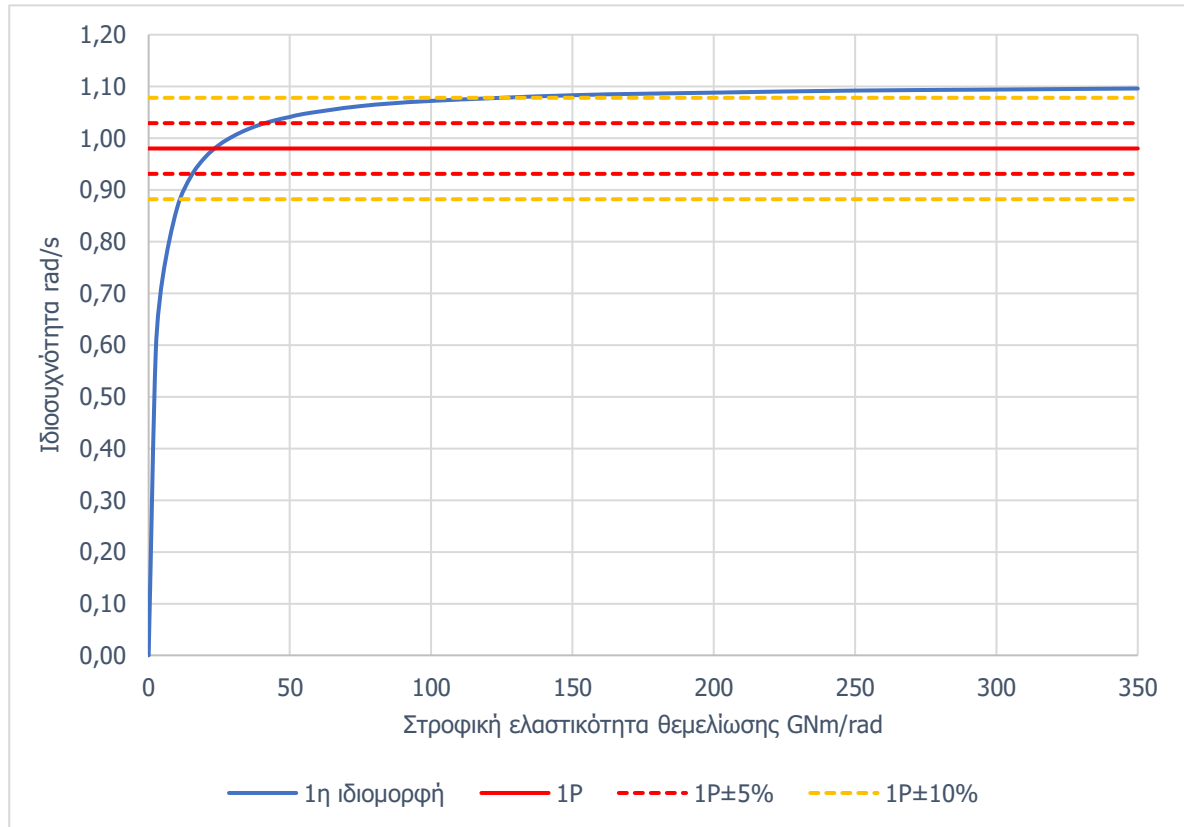
Εικόνα 51: Ιδιομορφές ελεύθερης ταλάντωσης

Παρατηρείται ότι οι συχνότητες ελεύθερης ταλάντωσης του πυλώνα απέχουν επαρκώς από τα όρια που τίθενται και από τα δύο πρότυπα. Παρ' όλα αυτά οι συνθήκες στήριξης που ορίστηκαν πλήρους δεσμεύσεως στην βάση δεν αντιπροσωπεύουν εφικτή θεώρηση, οπότε μία περισσότερο ακριβής ανάλυση πρέπει να περιλαμβάνει την ελαστικότητα της θεμελίωσης. Προκειμένου να προσομοιωθεί η στροφική ελαστικότητα της θεμελίωσης εισήχθησαν στο μοντέλο στροφικά ελατήρια με ίδια σταθερά C περί τους δύο οριζόντιους άξονες, ενώ ορίστηκε δέσμευση σε όλους τους υπολοίπους βαθμούς ελευθερίας.



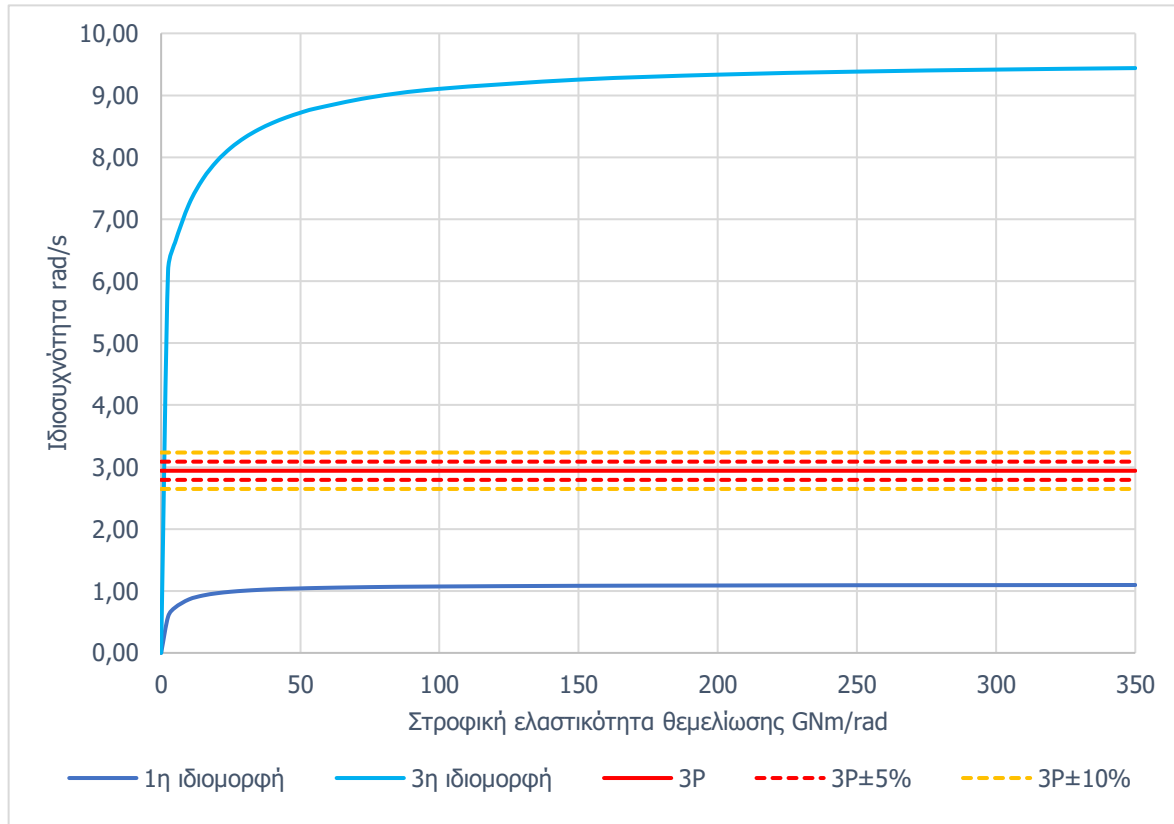
Εικόνα 52: Προσομοίωση θεμελίωσης με στροφικό ελατήριο

Στο γράφημα 6.1 παρουσιάζεται η τιμή της 1^{ns} ιδιοσυχνότητας συναρτήσει της σταθεράς του στροφικού ελατηρίου στην βάση καθώς και τα όρια τα οποία ορίζονται για την αποφυγή συντονισμού με την συχνότητα 1P. Είναι εμφανές ότι η αποφυγή του συντονισμού κατασκευής και λειτουργίας μηχανισμού 1P εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από την αποτελεσματικότητα της θεμελίωσης, καθώς και από το επιλεγόμενο πρότυπο πιστοποίησης. Προκειμένου ο έλεγχος να ικανοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο πιστοποίησης του οργανισμού "Germanischer Lloyd" ^[8] επιβάλλεται η θεμελίωση να είναι σε θέση να προσφέρει στροφική ελαστικότητα μεγαλύτερη των 41.000 MNm/rad, ενώ αν επιλεγθεί η κατασκευή να είναι συμβατή επιπλέον και με το πρότυπο του οργανισμού "DNV/Riso" ^[7] πρέπει η ικανότητα αυτή της θεμελίωσης να υπερβαίνει τα 124.000 MNm/rad.



Γράφημα 6.1: Έλεγχος συντονισμού 1P

Στο γράφημα 6.2 παρουσιάζεται η τιμή της 1^{ης} και 3^{ης} ιδιοσυχνότητας συναρτήσει της σταθεράς του στροφικού ελατηρίου στην βάση καθώς και τα όρια τα οποία ορίζονται για την αποφυγή συντονισμού με την συχνότητα 3P. Η αποφυγή του συντονισμού κατασκευής και διέλευσης πτερυγίων 3P παρατηρείται ότι δεν είναι κρίσιμη και ικανοποιείται για οποιαδήποτε ρεαλιστική τιμή στροφικής ελαστικότητας της θεμελίωσης. Συμπερασματικά η απαίτηση για την θεμελίωση προκύπτει από τον έλεγχο συντονισμού με την συχνότητα 1P, όπως προσδιορίστηκε προηγουμένως.



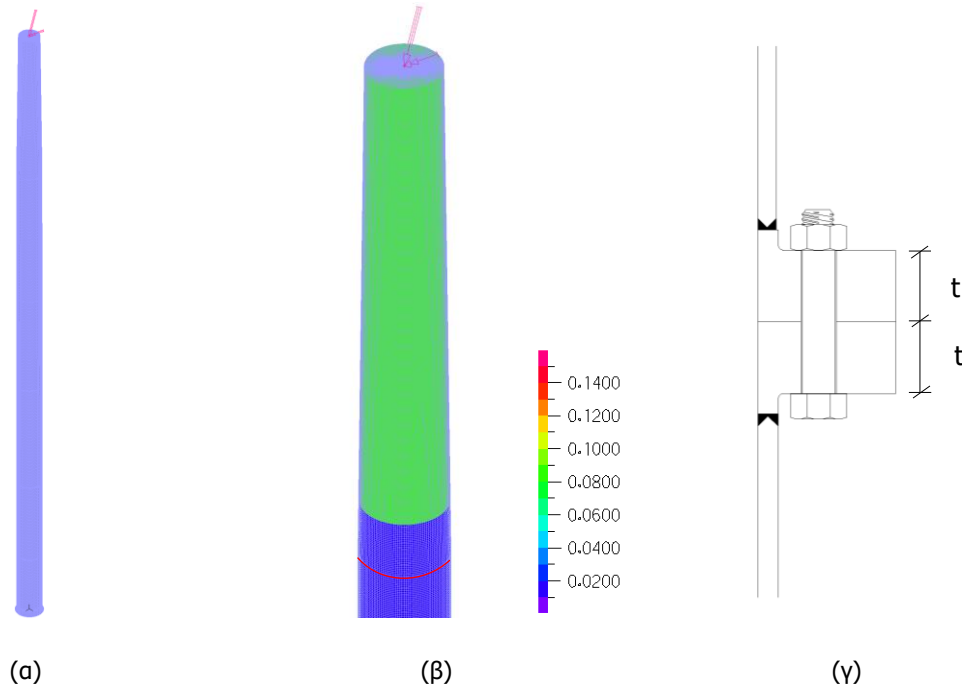
Γράφημα 6.2: Έλεγχος συντονισμού 3P

7 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΗΣΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ

Στην συγκεκριμένη μελέτη διερευνήθηκε η δυνατότητα βελτίωσης της χρήσης του υλικού βελτιστοποιώντας τις διαστάσεις των ελασμάτων στις περιοχές των συνδέσεων. Λόγω γεωμετρικών περιορισμών της σύνδεσης το πλάτος των ελασμάτων θεωρήθηκε ότι διαθέτει μικρό περιθώριο τροποποίησης, οπότε η βελτιστοποίηση επικεντρώθηκε στο πάχος αυτών. Επιπλέον τα ελάσματα αυτά μελετήθηκαν ως ενισχυτικές νευρώσεις οι οποίες προσφέρουν πλευρική εξασφάλιση στο λεπτότοιχο κέλυφος του πυλώνα. Ως κριτήρια της αποτελεσματικότητάς τους χρησιμοποιήθηκαν η ικανότητα διατήρησης του σχήματός τους στην παραμορφωμένη κατάσταση καθώς επίσης και η εξασφάλιση που παρέχουν στο κέλυφος. Για τον σκοπό αυτό η μέθοδος που εφαρμόστηκε περιελάμβανε πραγματοποίηση γραμμικών αναλύσεων λυγισμού, αξιολόγηση του σχήματος των ιδιομορφών και σύγκριση των κρίσιμων φορτίων, με την λογική ότι τα σχήματα αυτά χρησιμοποιούνται ως αρχικές ατέλειες στις μη γραμμικές αναλύσεις, και στην συνέχεια επιβεβαίωση επάρκειας της αντοχής με εφαρμογή μη γραμμικών αναλύσεων. Για την πραγματοποίηση των αναλύσεων χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του πλήρους πυλώνα με συγκεντρωμένα φορτία στην κορυφή. Προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα κάθε συνδετήριου ελάσματος έγινε τροποποίηση στις περιοχές άνω της σύνδεσης μέχρι την κορυφή, με αύξηση του πάχους του κελύφους, διατηρώντας αναλλοίωτα τα πάχη των τμημάτων εκατέρωθεν κάθε φλάντζας, ούτως ώστε να αποτρέπεται η εμφάνιση λυγισμού σε ανώτερα τμήματα. Ως φόρτιση, η οποία φαίνεται στον πίνακα 7.1, ορίσθηκε ο συνδυασμός εκείνος, ο οποίος προκαλεί την μέγιστη τέμνουσα στην κορυφή, ενώ στις χαμηλότερες στάθμες προκαλεί την μέγιστη ροπή, γεγονός το οποίο συμβαδίζει με την ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου που προκαλεί την μέγιστη ροπή στις χαμηλότερες στάθμες.

Πίνακας 7.1: Εξωτερικά φορτία κορυφής μοντέλων βελτιστοποίησης

F_H [kN]	F_V [kN]	M_H [kNm]	M_Z [kNm]
1240,0	-3632,5	8131,6	-2901,2



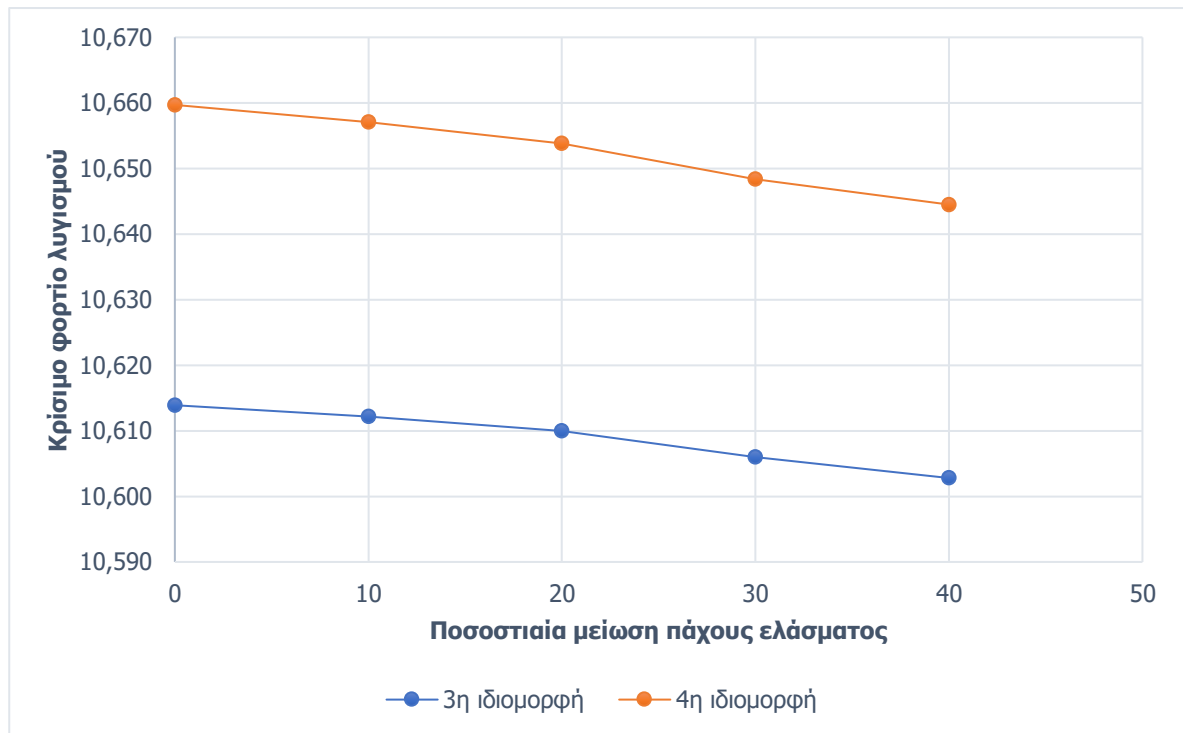
Εικόνα 53: (α) τρισδιάστατη απεικόνιση μοντέλου (β) τροποποίηση υπερκείμενων της φλάντζας παχών (γ) προσδιορισμός πάχους ελασμάτων t

7.1 Σύνδεση μέρους 1 και 2

Η σύνδεση αποτελείται από δύο εγκάρσια ελάσματα πάχους 205mm και πλάτους 347,5mm έκαστο. Κατά την εφαρμογή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού οι δύο πρώτες ιδιομορφές παρουσιάζονται καμπτικές, οπότε αμελούνται στην διερεύνηση αποτελεσματικότητας των φλαντζών, εφόσον δεν σχετίζονται με την εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Στον πίνακα 7.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων φορτίων λυγισμού για τα διαφορετικά πάχη ελασμάτων που διερευνώνται και χαράσσεται το αντίστοιχο γράφημα (7.1) για τις δύο πρώτες ιδιομορφές τοπικού λυγισμού.

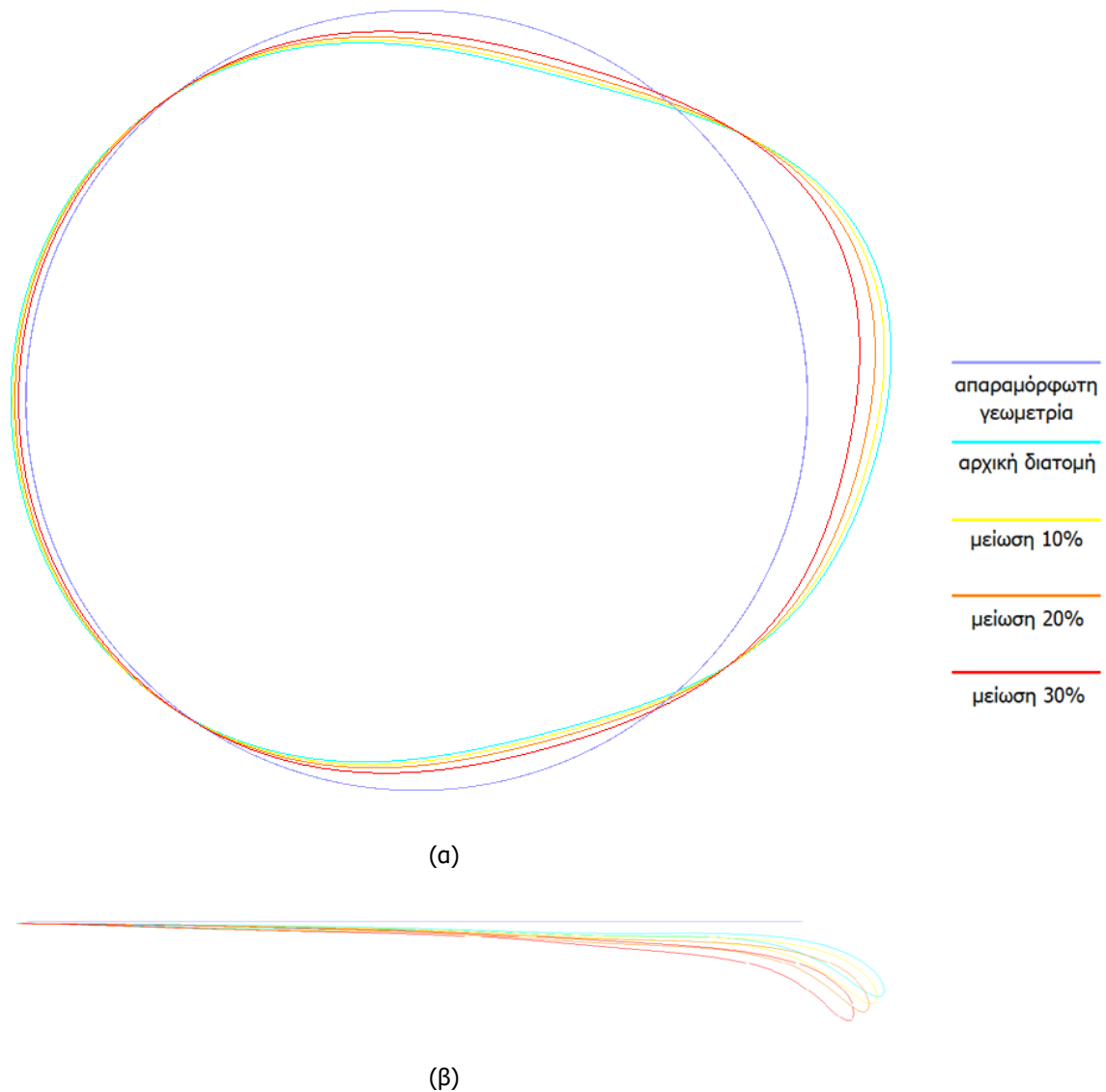
Πίνακας 7.2: Ιδιοτιμές λυγισμού συναρτήσει του πάχους των ελασμάτων της σύνδεσης του μέρους 1 και 2

Ιδιομορφή	Πάχος ελασμάτων (t)				
	205mm	185mm (-10%)	164mm (-20%)	143,5mm (-30%)	123mm (-40%)
3 ^η	10,6139	10,6122	10,6100	10,6060	10,6028
4 ^η	10,6597	10,6571	10,6538	10,6484	10,6445
5 ^η	10,8449	10,8430	10,8406	10,8369	10,8343
6 ^η	10,8816	10,8805	10,8792	10,8770	10,8754
7 ^η	11,2352	11,2309	11,2258	11,2179	11,2128
8 ^η	11,3011	11,2982	11,2946	11,2883	11,2835
9 ^η	11,5898	11,5834	11,5760	11,5651	11,5582
10 ^η	11,8016	11,7981	11,7942	11,7881	11,7840



Γράφημα 7.1: Κρίσιμα φορτία λυγισμού για μείωση πάχους ελάσματος σύνδεσης του τμήματος 1 και 2

Παρατηρείται ότι η μεταβολή του πάχους των ελασμάτων δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στα κρίσιμα φορτία λυγισμού. Για μεταβολή πάχους μεγαλύτερης του 20% παρατηρείται αύξηση της κλίσης του διαγράμματος, δηλαδή εντονότερη μεταβολή του κρίσιμου φορτίου. Παρ' όλα αυτά, εφόσον η μεταβολή αυτή είναι ιδιαίτερα περιορισμένη είναι απαραίτητη η σύγκριση των σχημάτων ιδιομορφών για τα διαφορετικά πάχη ελασμάτων. Στην εικόνα 54 παρουσιάζεται ενδεικτικά η σύγκριση μεταξύ των παραμορφωμένων σχημάτων των φλαντζών για διαφορετικά πάχη αυτών, κατά την 3^η ιδιομορφή, ορίζοντας αυξημένο μέτρο παραμόρφωσης για πιο ευδιάκριτη σύγκριση.



Εικόνα 54: Παραμόρφωση φλάντζας κατά την 1^η ιδιομορφή λυγισμού (α) κάτοψη (β) πλάγια όψη

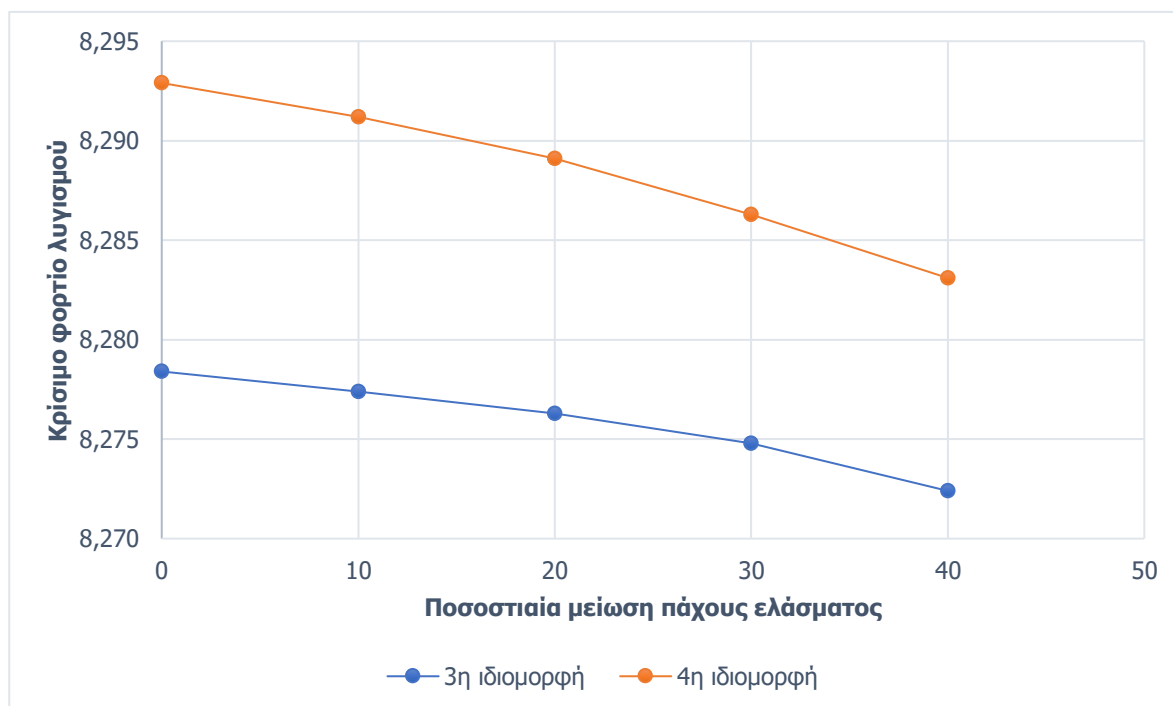
Παρατηρείται ότι το παραμορφωμένο σχήμα της φλάντζας είναι σχετικά όμοιο για πάχος έως και 20% μειωμένο, ενώ για περαιτέρω μείωση αυτό αλλάζει με αποτέλεσμα την δυνητική τροποποίηση στην συμπεριφορά του φορέα. Για μείωση κατά 20% το έλασμα κατατάσσεται στην κατηγορία 1, άρα δεν απαιτείται έλεγχος τοπικού λυγισμού σε αυτό.

7.2 Σύνδεση μέρους 2 και 3

Η σύνδεση αποτελείται από δύο εγκάρσια ελάσματα πάχους 165mm και πλάτους 300mm έκαστο. Κατά την εφαρμογή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού οι δύο πρώτες ιδιομορφές παρουσιάζονται καμπικές, οπότε αμελούνται στην διερεύνηση αποτελεσματικότητας των φλαντζών, εφόσον δεν σχετίζονται με την εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Στον πίνακα 7.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων φορτίων λυγισμού για τα διαφορετικά πάχη ελασμάτων που διερευνώνται και χαράσσεται το αντίστοιχο γράφημα (7.2) για τις δύο πρώτες ιδιομορφές τοπικού λυγισμού.

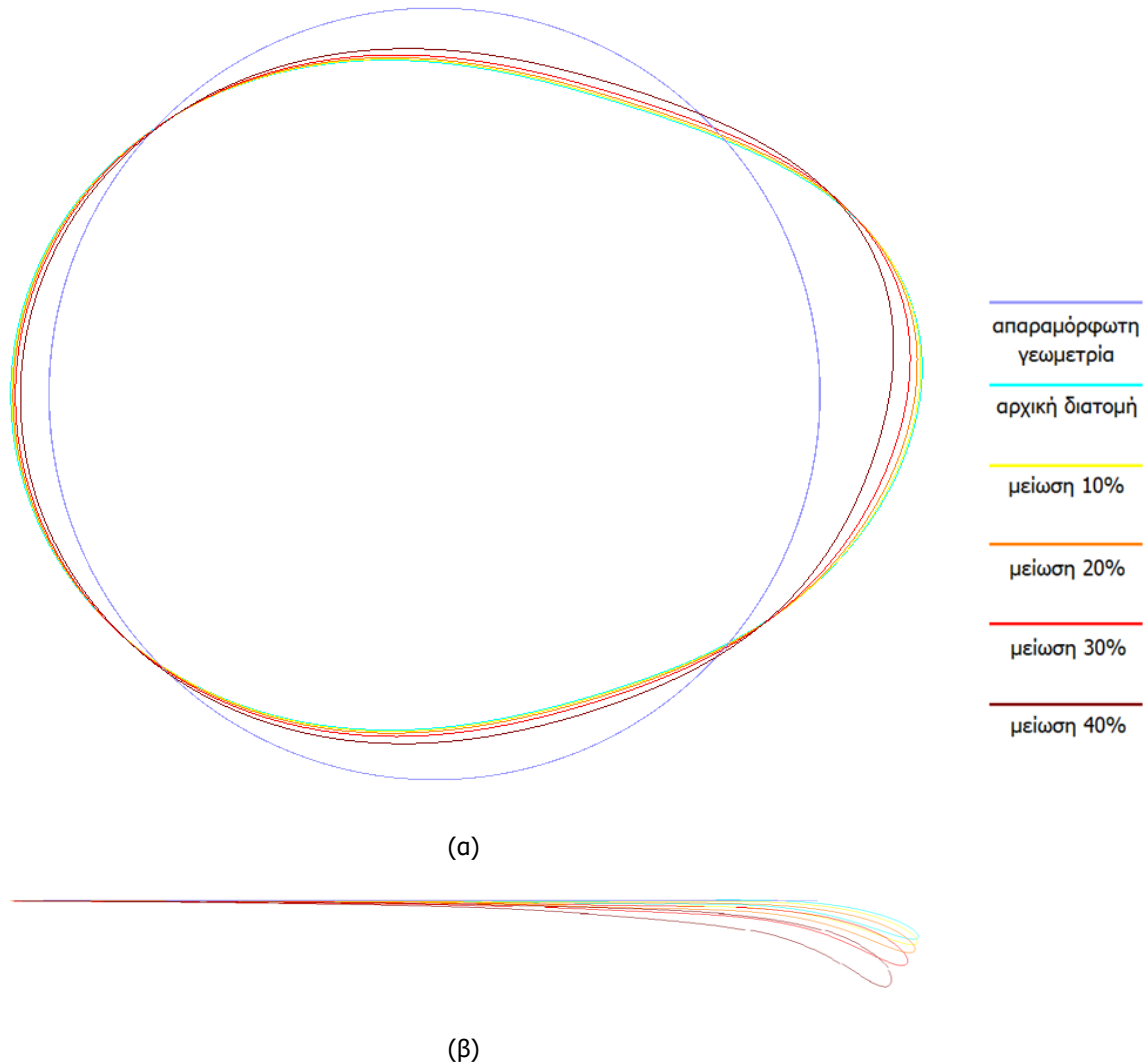
Πίνακας 7.3: Ιδιοτιμές λυγισμού συναρτήσει του πάχους των ελασμάτων της σύνδεσης του μέρους 2 και 3

Ιδιομορφή	Πάχος ελασμάτων (t)				
	165mm	148,5mm (-10%)	132mm (-20%)	115,5mm (-30%)	99mm (-40%)
3 ^η	8,2784	8,2774	8,2763	8,2748	8,2724
4 ^η	8,2929	8,2912	8,2891	8,2863	8,2831
5 ^η	8,4517	8,4507	8,4496	8,4481	8,4464
6 ^η	8,4562	8,4553	8,4543	8,4531	8,4516
7 ^η	8,6558	8,6540	8,6521	8,6497	8,6466
8 ^η	8,6591	8,6575	8,6557	8,6535	8,6508
9 ^η	8,8379	8,8356	8,8330	8,8300	8,8264
10 ^η	8,8985	8,8959	8,8931	8,8901	8,8866



Γράφημα 7.2: κρίσιμα φορτία λυγισμού για μείωση πάχους ελάσματος σύνδεσης του τμήματος 2 και 3

Παρατηρείται ότι η μεταβολή του πάχους των ελασμάτων δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στα κρίσιμα φορτία λυγισμού. Για μεταβολή πάχους μεγαλύτερης του 30% παρατηρείται αύξηση της κλίσης του διαγράμματος, δηλαδή εντονότερη μεταβολή του κρίσιμου φορτίου. Παρ' όλα αυτά, εφόσον η μεταβολή αυτή είναι ιδιαίτερα περιορισμένη είναι απαραίτητη η σύγκριση των σχημάτων ιδιομορφών για τα διαφορετικά πάχη ελασμάτων. Στην εικόνα 55 παρουσιάζεται ενδεικτικά η σύγκριση μεταξύ των παραμορφωμένων σχημάτων των φλάντζων για διαφορετικά πάχη αυτών, κατά την 3^η ιδιομορφή, ορίζοντας αυξημένο μέτρο παραμόρφωσης για πιο ευδιάκριτη σύγκριση.



Εικόνα 55: Παραμόρφωση φλάντζας κατά την 1^η ιδιομορφή λυγισμού (α) κάτοψη (β) πλάγια όψη

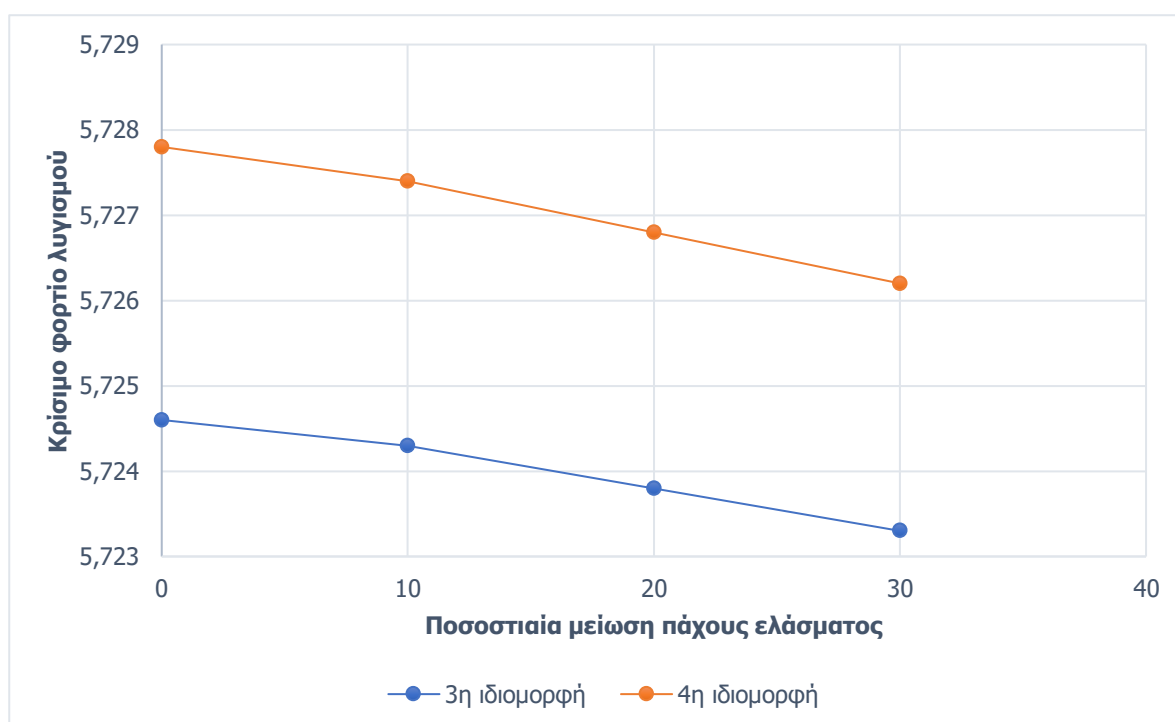
Παρατηρείται ότι το παραμορφωμένο σχήμα της φλάντζας είναι σχετικά όμοιο για πάχος έως και 30% μειωμένο, ενώ για περαιτέρω μείωση αυτό αλλάζει αισθητά με αποτέλεσμα την δυνητική τροποποίηση στην συμπεριφορά του φορέα. Για μείωση κατά 30% το έλασμα κατατάσσεται στην κατηγορία 1, άρα δεν απαιτείται έλεγχος τοπικού λυγισμού σε αυτό.

7.3 Σύνδεση μέρους 3 και 4

Η σύνδεση αποτελείται από δύο εγκάρσια ελάσματα πάχους 140mm και πλάτους 270mm έκαστο. Κατά την εφαρμογή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού οι δύο πρώτες ιδιομορφές παρουσιάζονται καμπτικές, οπότε αμελούνται στην διερεύνηση αποτελεσματικότητας των φλαντζών, εφόσον δεν σχετίζονται με την εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Στον πίνακα 7.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων φορτίων λυγισμού για τα διαφορετικά πάχη ελασμάτων που διερευνώνται και χαράσσεται το αντίστοιχο γράφημα (7.3) για τις δύο πρώτες ιδιομορφές τοπικού λυγισμού.

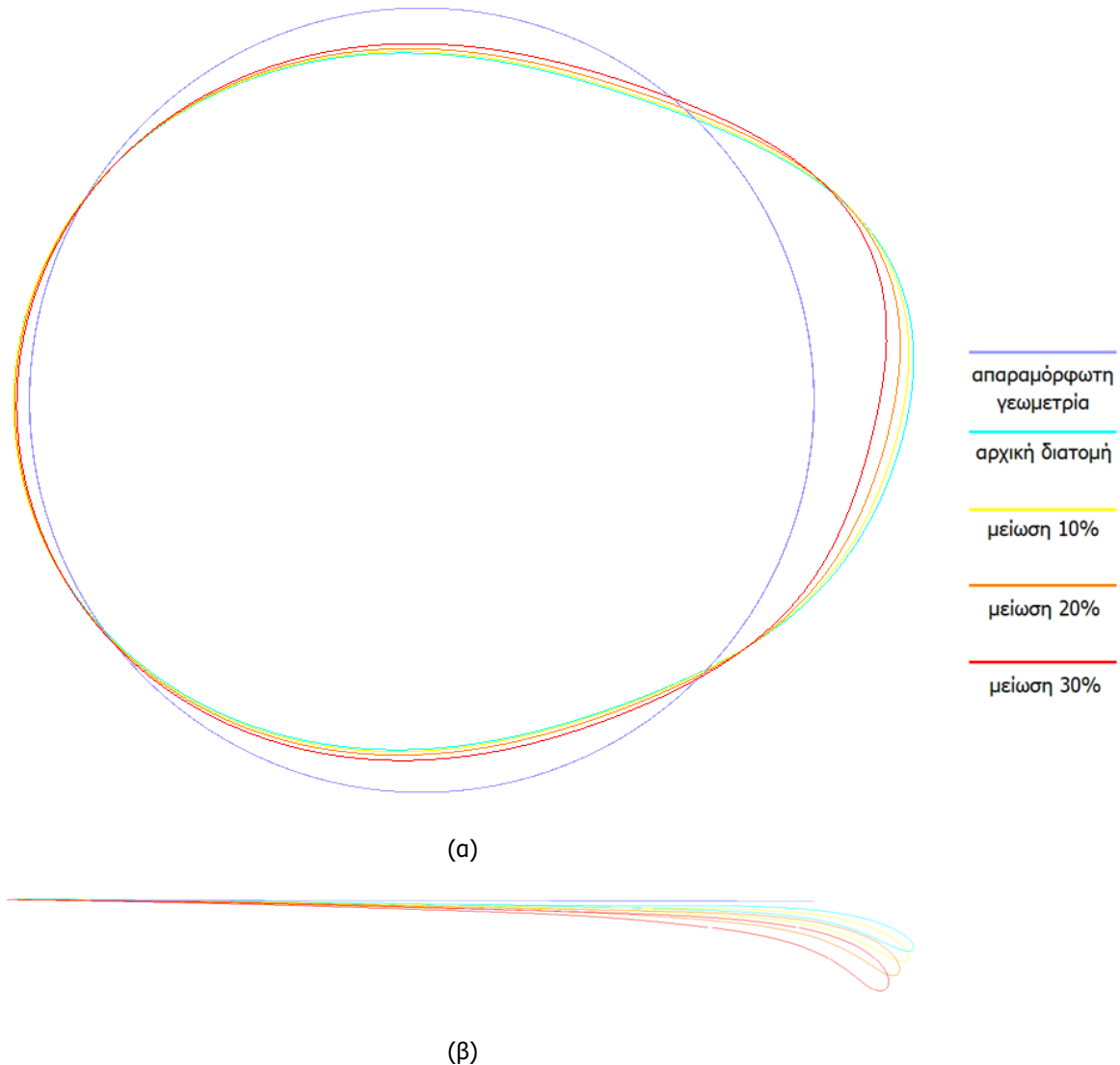
Πίνακας 7.4: Ιδιοτιμές λυγισμού συναρτήσει του πάχους των ελασμάτων της σύνδεσης του μέρους 3 και 4

Ιδιομορφή	Πάχος ελασμάτων (t)			
	140mm	126mm (-10%)	112mm (-20%)	98mm (-30%)
3 ^η	5,7246	5,7243	5,7238	5,7233
4 ^η	5,7278	5,7274	5,7268	5,7262
5 ^η	5,8396	5,8394	5,8390	5,8387
6 ^η	5,8416	5,8412	5,8408	5,8404
7 ^η	5,9008	5,9004	5,9000	5,9000
8 ^η	5,9022	5,9017	5,9012	5,9007
9 ^η	5,9550	5,9545	5,9538	5,9531
10 ^η	5,9560	5,9556	5,9551	5,9516



Γράφημα 7.3: Κρίσιμα φορτία λυγισμού για μείωση πάχους ελάσματος σύνδεσης του τμήματος 3 και 4

Παρατηρείται ότι η μεταβολή του πάχους των ελασμάτων δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στα κρίσιμα φορτία λυγισμού. Για μεταβολή πάχους μεγαλύτερης του 10% παρατηρείται αύξηση της κλίσης του διαγράμματος, δηλαδή εντονότερη μεταβολή του κρίσιμου φορτίου. Παρ' όλα αυτά, εφόσον η μεταβολή αυτή είναι ιδιαίτερα περιορισμένη είναι απαραίτητη η σύγκριση των σχημάτων ιδιομορφών για τα διαφορετικά πάχη ελασμάτων. Στην εικόνα 56 παρουσιάζεται ενδεικτικά η σύγκριση μεταξύ των παραμορφωμένων σχημάτων των φλάντζων για διαφορετικά πάχη αυτών, κατά την 3^η ιδιομορφή, ορίζοντας αυξημένο μέτρο παραμόρφωσης για πιο ευδιάκριτη σύγκριση.



Εικόνα 56: Παραμόρφωση φλάντζας κατά την 1^η ιδιομορφή λυγισμού (α) κάτοψη (β) πλάγια όψη

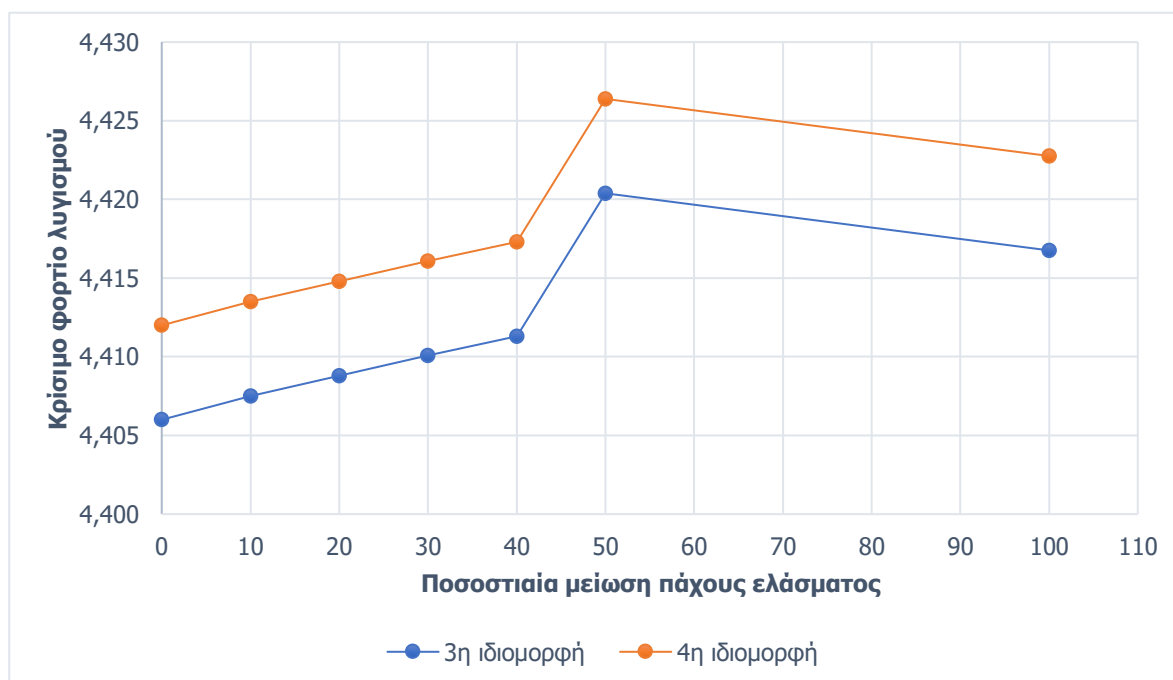
Παρατηρείται ότι το παραμορφωμένο σχήμα της φλάντζας είναι σχετικά όμοιο για πάχος έως και 10% μειωμένο, ενώ για περαιτέρω μείωση αυτό αλλάζει αισθητά με αποτέλεσμα την δυνητική τροποποίηση στην συμπεριφορά του φορέα. Για μείωση κατά 10% το έλασμα κατατάσσεται στην κατηγορία 1, άρα δεν απαιτείται έλεγχος τοπικού λυγισμού σε αυτό.

7.4 Σύνδεση μέρους 4 και 5

Η σύνδεση αποτελείται από δύο εγκάρσια ελάσματα πάχους 120mm και πλάτους 237,5mm έκαστο. Κατά την εφαρμογή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού οι δύο πρώτες ιδιομορφές παρουσιάζονται καμπτικές, οπότε αμελούνται στην διερεύνηση αποτελεσματικότητας των φλαντζών, εφόσον δεν σχετίζονται με την εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Στον πίνακα 7.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων φορτίων λυγισμού για τα διαφορετικά πάχη ελασμάτων που διερευνώνται και χαράσσεται το αντίστοιχο γράφημα (7.4) για τις δύο πρώτες ιδιομορφές τοπικού λυγισμού.

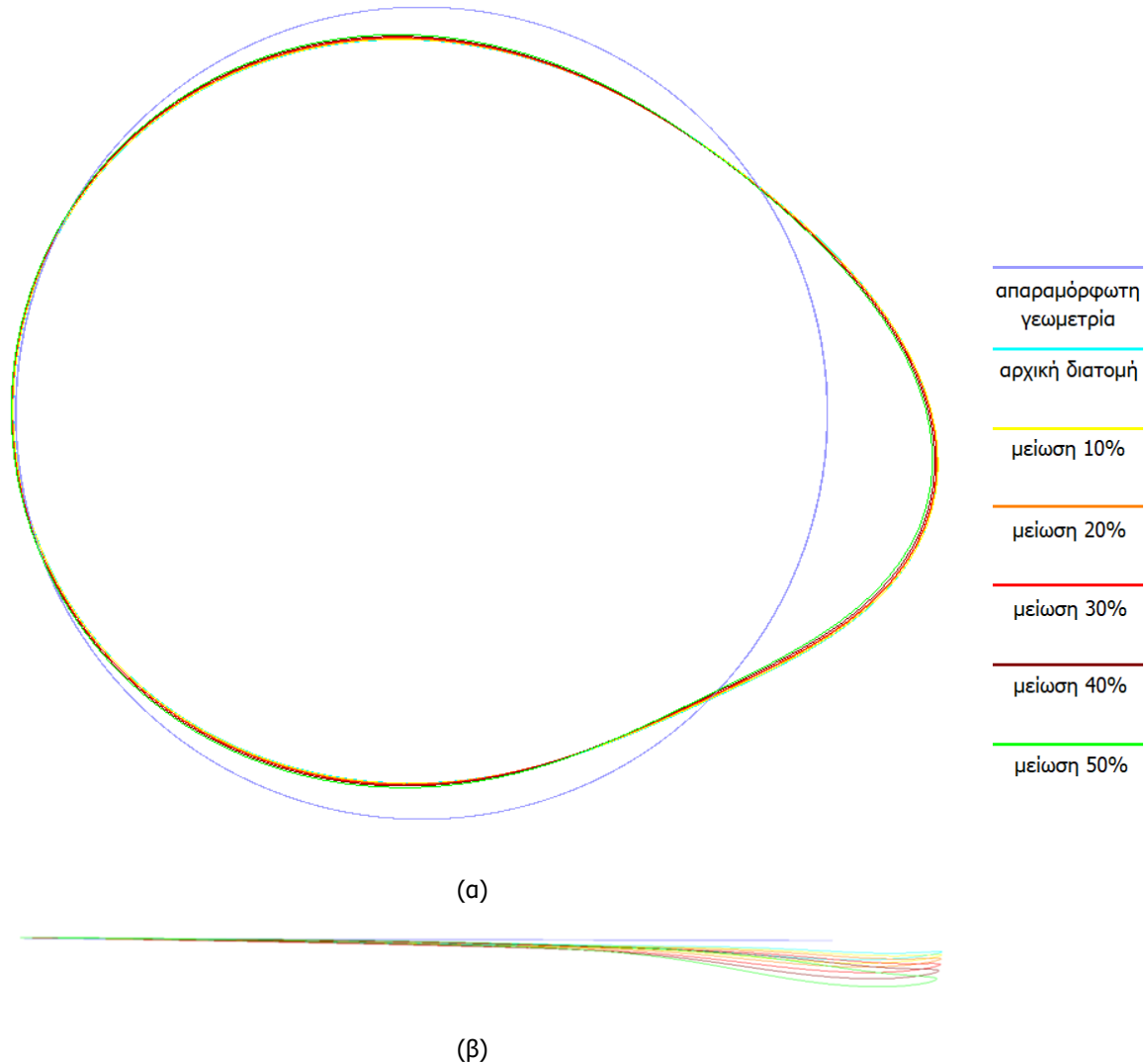
Πίνακας 7.5: Ιδιοτιμές λυγισμού συναρτήσει του πάχους των ελασμάτων της σύνδεσης του μέρους 4 και 5

Ιδιομορφή	Πάχος ελασμάτων (t)						
	120mm	108mm (-10%)	96mm (-20%)	84mm (-30%)	72mm (-40%)	60mm (-50%)	Απουσία ελάσματος
3 ^η	4,4060	4,4075	4,4088	4,4101	4,4113	4,4204	4,4168
4 ^η	4,4120	4,4135	4,4148	4,4161	4,4173	4,4264	4,4228
5 ^η	4,4752	4,4767	4,4781	4,4795	4,4807	4,4901	4,4868
6 ^η	4,4810	4,4826	4,4841	4,4855	4,4870	4,4966	4,4945
7 ^η	4,5391	4,5406	4,5421	4,5436	4,5450	4,5548	4,5508
8 ^η	4,5461	4,5477	4,5491	4,5505	4,5518	4,5614	4,5552
9 ^η	4,6113	4,6128	4,6143	4,6156	4,6169	4,6267	4,6171
10 ^η	4,6133	4,6147	4,6160	4,6172	4,6183	4,6279	4,6187



Γράφημα 7.4: Κρίσιμα φορτία λυγισμού για μείωση πάχους ελάσματος σύνδεσης του τμήματος 4 και 5

Παρατηρείται ότι η μεταβολή του πάχους των ελασμάτων δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στα κρίσιμα φορτία λυγισμού για μείωση πάχους ελάσματος έως και 40%, ενώ για περαιτέρω μείωση παρατηρείται ασυνέπεια στην μεταβολή του κρίσιμου φορτίου. Εφόσον η μεταβολή αυτή είναι ιδιαίτερα περιορισμένη είναι απαραίτητη η σύγκριση των σχημάτων ιδιομορφών για τα διαφορετικά πάχη ελασμάτων. Στην εικόνα 57 παρουσιάζεται ενδεικτικά η σύγκριση μεταξύ των παραμορφωμένων σχημάτων των φλάντζων για διαφορετικά πάχη αυτών, κατά την 3^η ιδιομορφή, ορίζοντας αυξημένο μέτρο παραμόρφωσης για πιο ευδιάκριτη σύγκριση.



Εικόνα 57: Παραμόρφωση φλάντζας κατά την 1^η ιδιομορφή λυγισμού (α) κάτοψη (β) πλάγια όψη

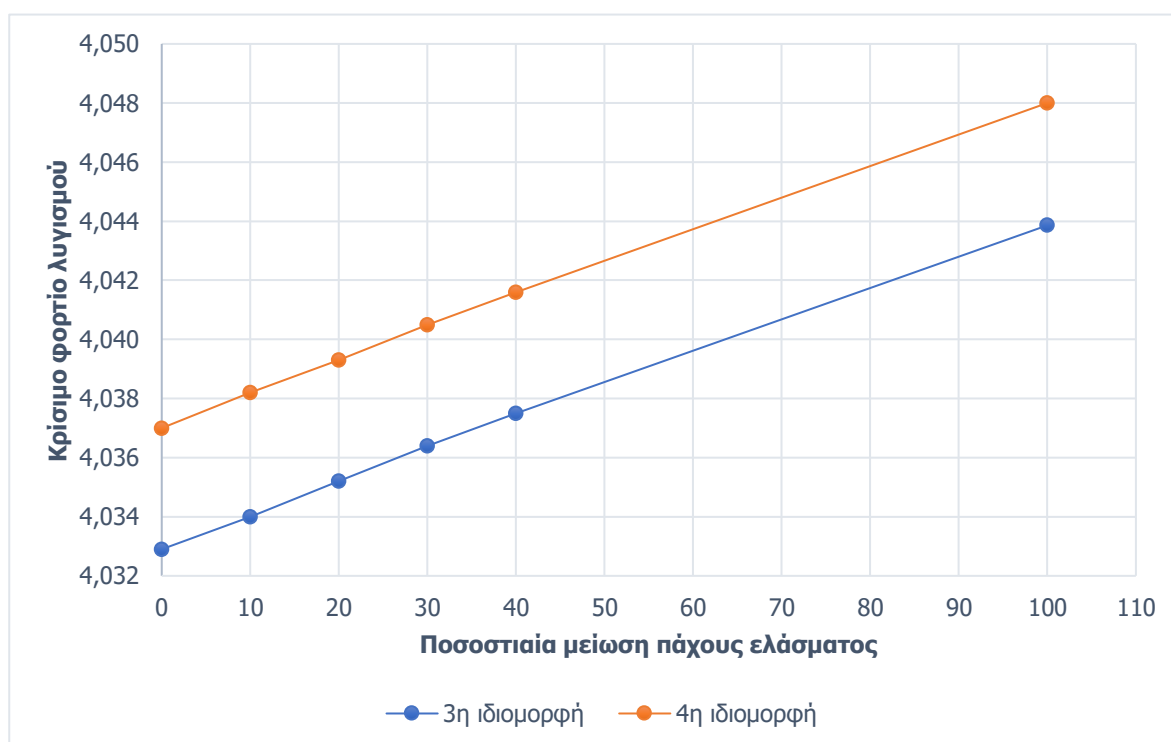
Παρατηρείται ότι το παραμορφωμένο σχήμα της φλάντζας είναι όμοιο για όλες τις μειωμένες διατομές φλάντζας που ελέγχθηκαν. Για μειωμένο πάχος φλάντζας 50% παρουσιάζεται μία ελαφρώς αυξημένη απόκλιση από τις υπόλοιπες. Συμπερασματικά η ελάχιστη διατομή της φλάντζας για την οποία η συμπεριφορά του φορέα είναι όμοια με τον αρχικό, χωρίς να απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση, προσδιορίζεται για πάχος μειωμένο κατά 40%. Για μείωση κατά 40% το έλασμα κατατάσσεται στην κατηγορία 1, άρα δεν απαιτείται έλεγχος τοπικού λυγισμού σε αυτό.

7.5 Σύνδεση μέρους 5 και 6

Η σύνδεση αποτελείται από δύο εγκάρσια ελάσματα πάχους 91mm και πλάτους 194mm έκαστο. Κατά την εφαρμογή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού οι δύο πρώτες ιδιομορφές παρουσιάζονται καμπικές, οπότε αμελούνται στην διερεύνηση αποτελεσματικότητας των φλαντζών, εφόσον δεν σχετίζονται με την εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Στον πίνακα 7.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων φορτίων λυγισμού για τα διαφορετικά πάχη ελασμάτων που διερευνώνται και χαράσσεται το αντίστοιχο γράφημα (7.5) για τις δύο πρώτες ιδιομορφές τοπικού λυγισμού.

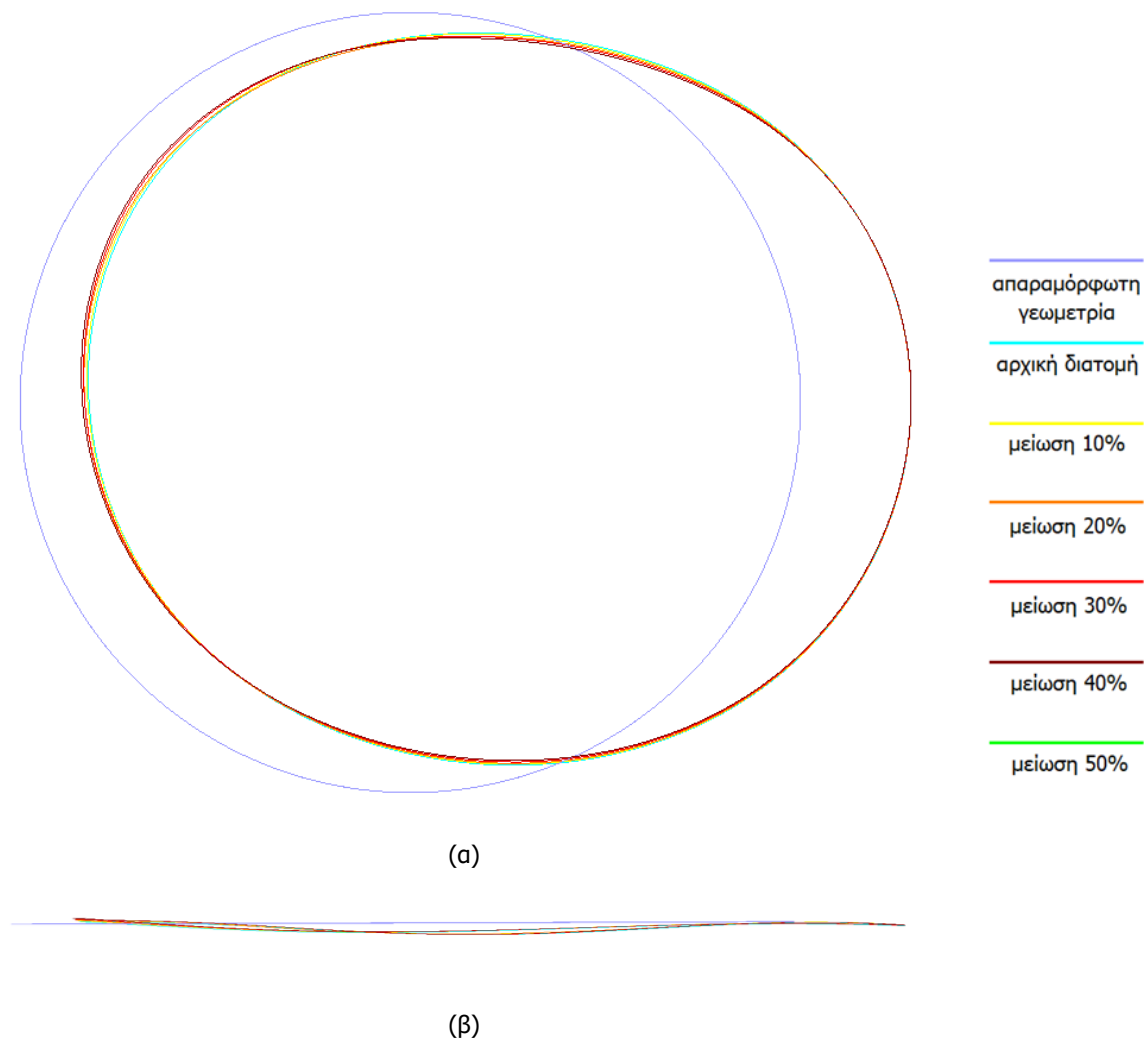
Πίνακας 7.6: Ιδιοτιμές λυγισμού συναρτήσει του πάχους των ελασμάτων της σύνδεσης του μέρους 5 και 6

Ιδιομορφή	Πάχος ελασμάτων (t)					
	91mm	82mm (-10%)	73mm (-20%)	64mm (-30%)	54,5mm (-40%)	Απουσία ελάσματος
3 ^η	4,0329	4,0340	4,0352	4,0364	4,0375	4,0439
4 ^η	4,0370	4,0382	4,0393	4,0405	4,0416	4,0480
5 ^η	4,0873	4,0885	4,0896	4,0908	4,0920	4,0986
6 ^η	4,0902	4,0914	4,0925	4,0938	4,0949	4,1015
7 ^η	4,1350	4,1361	4,1374	4,1386	4,1398	4,1465
8 ^η	4,1377	4,1389	4,1401	4,1413	4,1425	4,1492
9 ^η	4,1524	4,1535	4,1548	4,1560	4,1572	4,1638
10 ^η	4,1571	4,1583	4,1595	4,1608	4,1619	4,1685



Γράφημα 7.5: κρίσιμα φορτία λυγισμού για μείωση πάχους ελάσματος σύνδεσης του τμήματος 5 και 6

Παρατηρείται ότι η μεταβολή του πάχους των ελασμάτων δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στα κρίσιμα φορτία λυγισμού, ενώ φαίνεται παραδόξως να αυξάνεται το κρίσιμο φορτίο για μειωμένο πάχος φλάντζας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο τοπικός λυγισμός συμβαίνει σε περιοχή απομακρυσμένη από την σύνδεση οπότε η συμβολή της στην πλευρική εξασφάλιση του κελύφους δεν είναι καθοριστική. Επιπλέον παρατηρείται ότι ακόμη και για απουσία ελάσματος η απόκλιση των κρίσιμων φορτίων είναι πολύ μικρή, όπως ενδεικτικά για την 3η ιδιομορφή αυτή υπολογίζεται 0,27%. Εφόσον η μεταβολή αυτή είναι ιδιαίτερα περιορισμένη είναι απαραίτητη η σύγκριση των σχημάτων ιδιομορφών για τα διαφορετικά πάχη ελασμάτων. Στην εικόνα 58 παρουσιάζεται ενδεικτικά η σύγκριση μεταξύ των παραμορφωμένων σχημάτων των φλάντζων για διαφορετικά πάχη αυτών, κατά την 3^η ιδιομορφή, ορίζοντας αυξημένο μέτρο παραμόρφωσης για πιο ευδιάκριτη σύγκριση:



Εικόνα 58: Παραμόρφωση φλάντζας κατά την 1^η ιδιομορφή λυγισμού (α) κάτοψη (β) πλάγια όψη

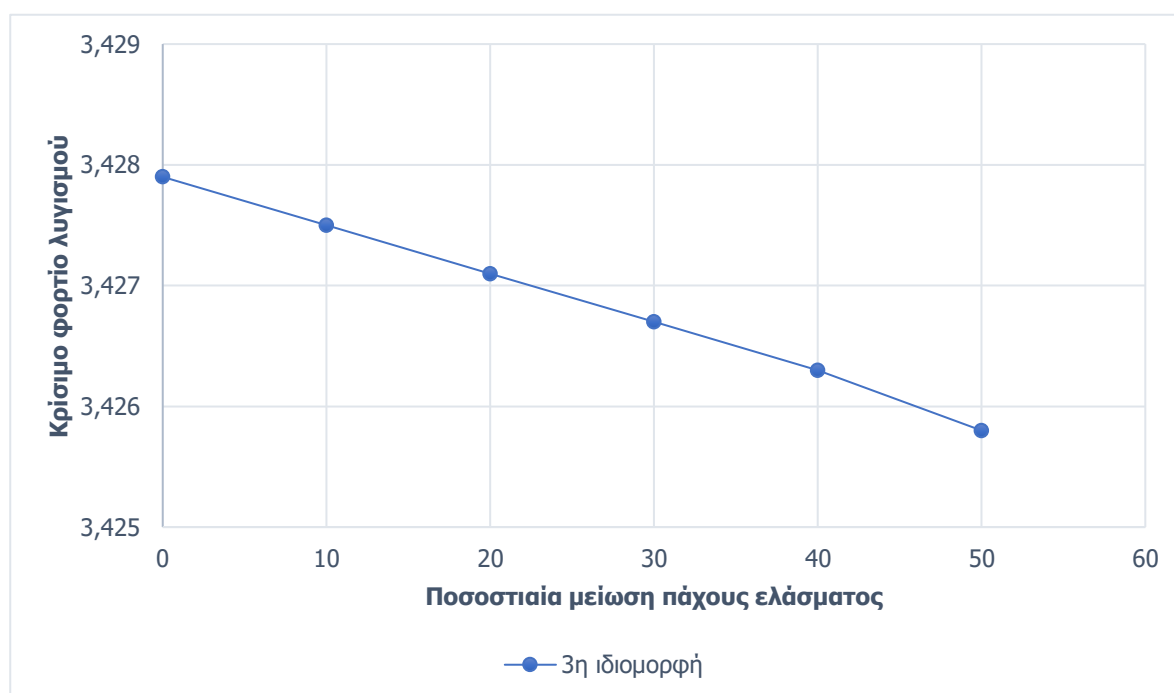
Παρατηρείται ότι το παραμορφωμένο σχήμα της φλάντζας είναι όμοιο για όλες τις μειωμένες διατομές φλάντζας που ελέγχθηκαν. Συμπερασματικά η διατομή της φλάντζας δεν συμβάλει στο σχήμα της ιδιομορφής, οπότε δεν είναι κρίσιμη η διάστασή της για τον προσδιορισμό της αντοχής του φορέα.

7.6 Σύνδεση μέρους 6 και 7

Η σύνδεση αποτελείται από δύο εγκάρσια ελάσματα πάχους 91mm και πλάτους 157,4mm έκαστο. Κατά την εφαρμογή γραμμικής ανάλυσης λυγισμού οι δύο πρώτες ιδιομορφές παρουσιάζονται καμπικές, οπότε αμελούνται στην διερεύνηση αποτελεσματικότητας των φλαντζών, εφόσον δεν σχετίζονται με την εμφάνιση τοπικού λυγισμού. Στον πίνακα 7.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των κρίσιμων φορτίων λυγισμού για τα διαφορετικά πάχη ελασμάτων που διερευνώνται και χαράσσεται το αντίστοιχο γράφημα (7.6) για τις δύο πρώτες ιδιομορφές τοπικού λυγισμού.

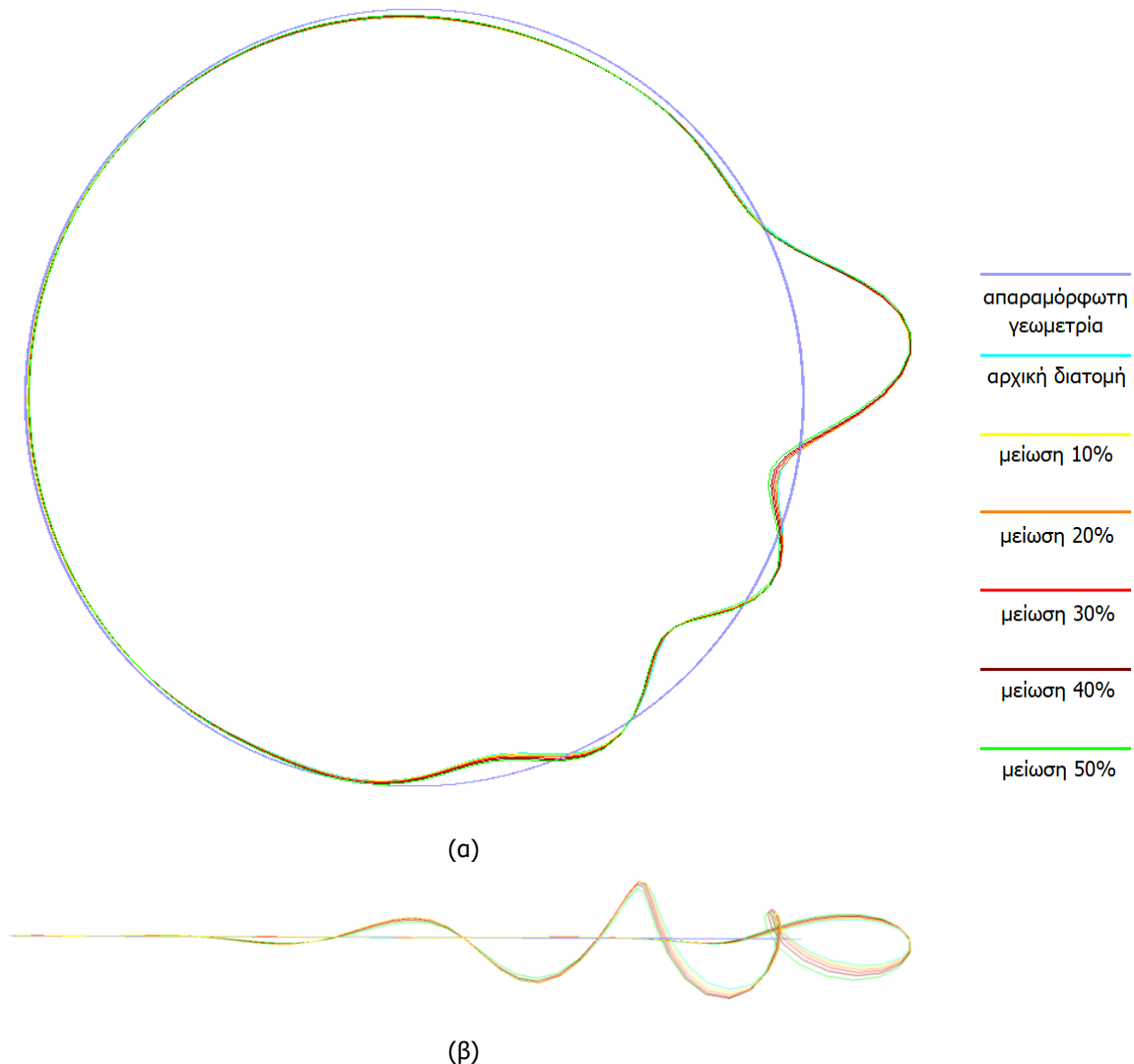
Πίνακας 7.7: Ιδιοτιμές λυγισμού συναρτήσει του πάχους των ελασμάτων της σύνδεσης του μέρους 6 και 7

Ιδιομορφή	Πάχος ελασμάτων (t)					
	91mm	82mm (-10%)	73mm (-20%)	64mm (-30%)	54,5mm (-40%)	45,5mm (-50%)
3 ^η	3,4279	3,4275	3,4271	3,4267	3,4263	3,4258
4 ^η	3,4279	3,4275	3,4271	3,4267	3,4263	3,4259
5 ^η	3,4834	3,4828	3,4822	3,4815	3,4807	3,4800
6 ^η	3,4836	3,4830	3,4824	3,4817	3,4809	3,4802
7 ^η	3,5661	3,5670	3,5665	3,5655	3,5642	3,5627
8 ^η	3,5661	3,5672	3,5682	3,5688	3,5678	3,5661
9 ^η	3,5689	3,5682	3,5686	3,5697	3,5709	3,5721
10 ^η	3,5736	3,5725	3,5714	3,5706	3,5711	3,5722



Γράφημα 7.6: Κρίσιμα φορτία λυγισμού για μείωση πάχους ελάσματος σύνδεσης του τμήματος 6 και 7

Παρατηρείται ότι η μεταβολή του πάχους των ελασμάτων δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στα κρίσιμα φορτία λυγισμού. Για μεταβολή πάχους μεγαλύτερης του 40% παρατηρείται αύξηση της κλίσης του διαγράμματος, δηλαδή εντονότερη μεταβολή του κρίσιμου φορτίου. Παρ' όλα αυτά, εφόσον η μεταβολή αυτή είναι ιδιαίτερα περιορισμένη είναι απαραίτητη η σύγκριση των σχημάτων ιδιομορφών για τα διαφορετικά πάχη ελασμάτων. Στην εικόνα 59 παρουσιάζεται ενδεικτικά η σύγκριση μεταξύ των παραμορφωμένων σχημάτων των φλάντζων για διαφορετικά πάχη αυτών, κατά την 3^η ιδιομορφή, ορίζοντας αυξημένο μέτρο παραμόρφωσης για πιο ευδιάκριτη σύγκριση:



Εικόνα 59: Παραμόρφωση φλάντζας κατά την 1^η ιδιομορφή λυγισμού (α) κάτοψη (β) πλάγια όψη

Παρατηρείται ότι το παραμορφωμένο σχήμα της φλάντζας είναι σχετικά όμοιο για όλες τις μειωμένες διατομές φλάντζας που ελέγχθηκαν. Για μείωση κατά 50% παρατηρείται μία ελαφρώς αυξημένη απόκλιση του παραμορφωμένου σχήματος, οπότε η μείωση κατά 40% θεωρείται τυπικά ως το κατώτερο όριο. Για μείωση κατά 40% το έλασμα κατατάσσεται στην κατηγορία 1, άρα δεν απαιτείται έλεγχος τοπικού λυγισμού σε αυτό.

7.7 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Στον πίνακα 7.8 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης αναφορικά με το περιθώριο μείωσης του πάχους των ελασμάτων σύνδεσης χωρίς να επηρεάζεται ο έλεγχος ευστάθειας με τον οποίο προσδιορίζεται η αντοχή του φορέα:

Πίνακας 7.8: Μειώσεις στα πάχος των φλαντζών που δεν επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στην ευστάθεια του φορέα

Συνδεόμενα μέρη	Μείωση πάχους ελάσματος
1 και 2	20%
2 και 3	30%
3 και 4	10%
4 και 5	40%
5 και 6	Δεν επηρεάζει την αντοχή
6 και 7	40%

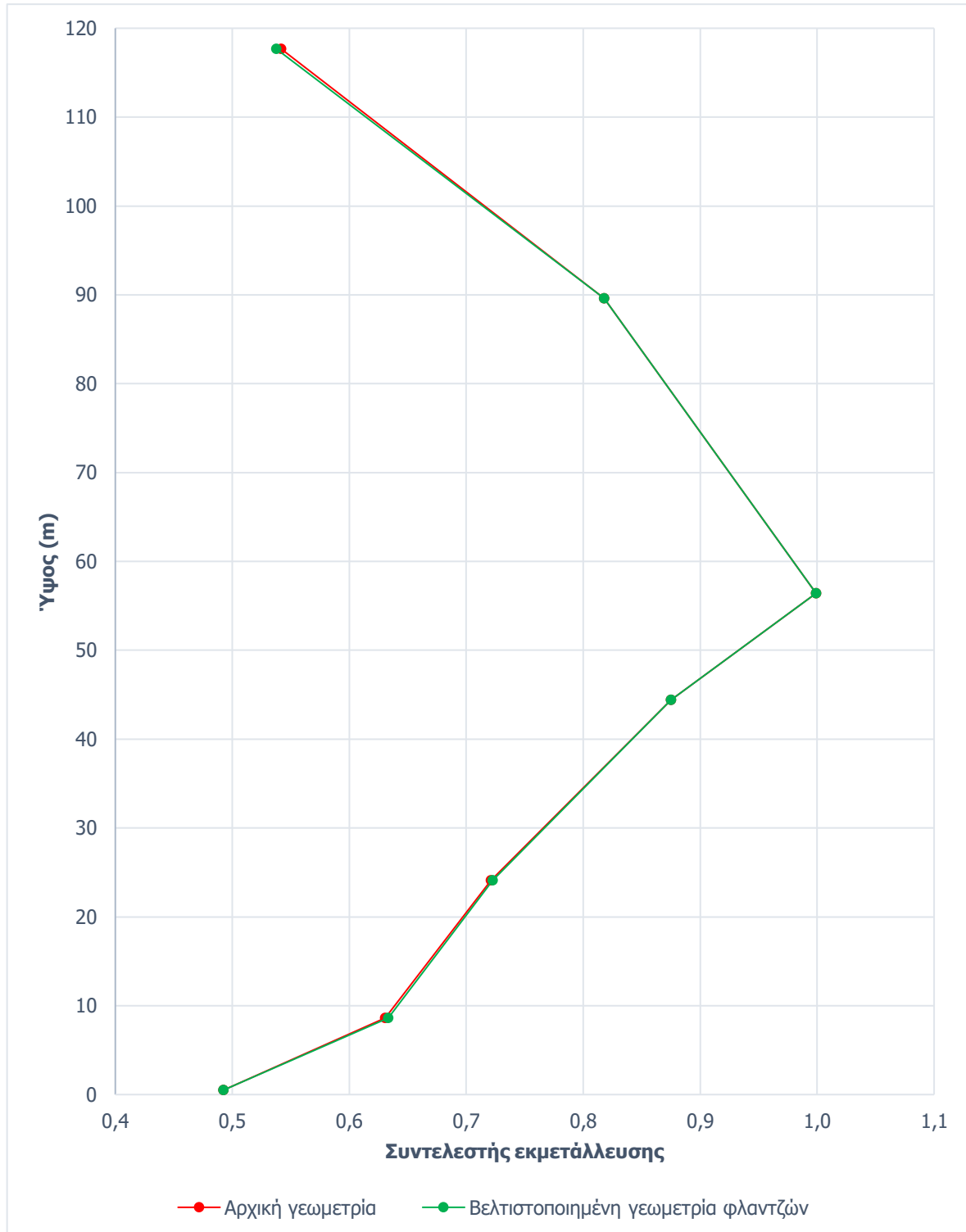
7.7.1 Έλεγχος ευστάθειας

Σύμφωνα με τις προηγούμενες τροποποιήσεις πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού με χρήση αρχικών ατελειών, ομοίως με τον αρχικό φορέα, για τις βελτιστοποιημένες διατομές συνδετήριων ελασμάτων και κατασκευαστική κλάση Β. Συμβατικά το πάχος των ελασμάτων της σύνδεσης των τμημάτων 5 και 6 ορίσθηκε μειωμένο κατά 40%. Στον πίνακα 7.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μη γραμμικής ανάλυσης:

Πίνακας 7.9: Αντοχή σχεδιασμού του πυλώνα για την αρχική και βελτιστοποιημένη γεωμετρία των φλαντζών

Στάθμη εφαρμογής φορτίων (m)	Γ_{Rd}	
	Αρχική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη γεωμετρία φλαντζών
1,15	2,031	2,031
11,48	1,585	1,579
26,32	1,386	1,384
46,20	1,143	1,143
64,40	1,001	1,001
89,60	1,223	1,223
117,67	1,845	1,860

Παρατηρείται ότι η συνολική αντοχή του φορέα παραμένει αμετάβλητη με $\Gamma_{Rd} = 1,001$, η οποία επαρκεί για την ευστάθεια του, άρα η προσπάθεια για οικονομικότερο σχεδιασμό των διατομών των ελασμάτων στις περιοχές των συνδέσεων καθίσταται βάσιμη, με επιπλέον απαίτηση επάρκειας της αντοχής της ίδιας της σύνδεσης. Στο γράφημα 7.7 παρουσιάζεται ο συντελεστής εκμετάλλευσης κάθε διατομής καθ' ύψος της κατασκευής με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων της αστοχίας.



Γράφημα 7.7: Βαθμός εκμετάλλευσης διατομών του πυλώνα για την αρχική και βελτιστοποιημένη γεωμετρία

7.7.2 Έλεγχος συντονισμού

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η επάρκεια του φορέα είναι απαραίτητος ο έλεγχος συντονισμού της κατασκευής με τις συχνότητες περιστροφής του ρότορα όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 6 λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της θεμελίωσης. Για τον σκοπό αυτό διενεργείται υπολογισμός των ιδιοσυχνοτήτων ελεύθερης ταλάντωσης για τις οριακές τιμές στροφικής ελαστικότητας της θεμελίωσης που έχουν προκύψει από το κεφάλαιο 6, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στον πίνακα 7.10.

Πίνακας 7.10: Ιδιοσυχνότητες της κατασκευής για την αρχική και βελτιστοποιημένη γεωμετρία των φλαντζών

Στροφική ελαστικότητα θεμελίωσης (MNm/rad)	1 ^η Ιδιοσυχνότητα		3 ^η Ιδιοσυχνότητα	
	(rad/s)	Απόκλιση από αρχική	(rad/s)	Απόκλιση από αρχική
41.000	1,030	+1‰	8,683	+1,3%
124.000	1,079	+1‰	9,307	+1,3%

Με βάση τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων διαπιστώνεται ότι αυτές παρουσιάζουν πολύ μικρή απόκλιση με τις αρχικές και ομοίως με τον αρχικό φορέα ο έλεγχος συντονισμού ικανοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο πιστοποίησης του οργανισμού "Germanischer Lloyd" ^[8] για θεμελίωση με στροφική ελαστικότητα μεγαλύτερη των 41.000 MNm/rad, ενώ αν επιλεγθεί η κατασκευή να είναι συμβατή επιπλέον και με το πρότυπο του οργανισμού "DNV/Riso" ^[7] υπάρχει ικανοποίηση του ελέγχου για στροφική ελαστικότητα θεμελίωσης μεγαλύτερη των 124.000 MNm/rad.

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά δεδομένου πυλώνα ανεμογεννήτριας υπό τα φορτία και καταστάσεις που δρουν σε αυτή. Πρόκειται για κατασκευή ύψους 117.7m , μορφής κυλινδρικού και κολουροκωνικού κελύφους με αποκατάσταση συνέχειας καθ' ύψος με την χρήση μετωπικών πλακών.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε διερεύνηση σχετικά με τον τρόπο προσομοίωσης των συνδέσεων. Εφόσον αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν ο προσδιορισμός της αντοχής του κελύφους με τον συνυπολογισμό φαινομένων λυγισμού, σημαντική ήταν η εξασφάλιση που προσφέρουν τα ενισχυτικά ελάσματα των συνδέσεων στην εκτροπή του κελύφους. Η επιλογή του καταλληλότερου τρόπου προσομοίωσης των φλαντζών έγινε με κριτήριο το μικρότερο υπολογιστικό κόστος συναρτήσει της αξιόπιστης εξαγωγής αποτελεσμάτων.

Στην συνέχεια δημιουργήθηκαν τα προσομοιώματα του πυλώνα βάσει των συμπερασμάτων αναφορικά με την μοντελοποίηση των φλαντζών. Εξαιτίας της απουσίας πληροφοριών σχετικά με τις εξωτερικές φορτίσεις, αλλά έχοντας δεδομένα για τα εντατικά μεγέθη που αυτές προκαλούν, κρίθηκε σκόπιμη η εφαρμογή φορτίσεων ίσων με τα αντίστοιχα εντατικά μεγέθη σε διαφορετικές στάθμες της κατασκευής.

Ακολούθως πραγματοποιήθηκαν οι κύριοι έλεγχοι του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Παρουσιάστηκαν οι διαδικασίες ελέγχου, όπως αυτές περιγράφονται σε κανονιστικά έγγραφα και οδηγίες προτύπων πιστοποίησης. Οι έλεγχοι έγιναν με αριθμητικές προσομοιώσεις με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων στις οποίες εφαρμόστηκαν μη γραμμικές αναλύσεις. Σημαντική παράμετρος της μελέτης ήταν οι αρχικές ατέλειες του φορέα, όπου διερευνήθηκε η συμπεριφορά αυτού για διαφορετικά μεγέθη αποκλίσεων από την τέλεια γεωμετρία, σύμφωνα με τις κατασκευαστικές ποιότητες, όπως αυτές ορίζονται στους κανονισμούς. Επιπλέον μελετήθηκε η επιρροή της θεμελίωσης στην συμπεριφορά του φορέα για δυναμικές φορτίσεις τις οποίες αυτός καλείται να αντιμετωπίσει.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της επίδρασης στην αντοχή του φορέα σε λυγισμό της μεταβολής των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών και συγκεκριμένα της διατομής των ελασμάτων στα σημεία των συνδέσεων. Επακολούθησε πρόταση βελτιστοποίησης αυτών με κριτήριο την διατήρηση της συμπεριφοράς του φορέα αναφορικά με την παραμορφωμένη κατάσταση και μορφή αστοχίας υπό τα αντίστοιχα φορτία.

Από την παρούσα εργασία προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία μπορούν να χρησιμεύσουν σε περαιτέρω έρευνα και μελέτη παρόμοιων φορέων.

- Η προσομοίωση του πυλώνα με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους είναι επαρκής και παρέχει υψηλής ακρίβειας αποτελέσματα.
- Η προσομοίωση του πυλώνα με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία απαιτεί ιδιαίτερη πύκνωση για την σύγκλιση της. Σχετικά με την πύκνωση της διακριτοποίησης αποδείχθηκε αποτελεσματικότερη η αύξηση τάξης στοιχείων με περισσότερους κόμβους το κάθε ένα από την αύξηση του πλήθους των στοιχείων.
- Η προσομοίωση των φλαντζών, για την περίπτωση που αυτές μελετώνται ως προς την πλευρική εξασφάλιση που προσφέρουν στο λεπτότοιχο κέλυφος, μπορεί να πραγματοποιηθεί παρέχοντας επαρκώς ακριβή αποτελέσματα με στοιχεία δοκού.
- Η επιλογή των αρχικών ατελειών είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον υπολογισμό της συνολικής αντοχής του φορέα κατά τον έλεγχο ευστάθειας, τόσο ως προς το σχήμα όσο και ως προς το μέγεθος. Για διαφοροποίηση του μεγέθους των αρχικών ατελειών ενδέχεται να παρατηρηθεί μεταβολή στην μορφή και περιοχή της αστοχίας, όπως παρατηρήθηκε στις ανώτερες στάθμες φόρτισης (89,60m και 117,67m).
- Η επίδραση του μεγέθους των αρχικών ατελειών δεν παρουσιάζεται όμοια στα προσδιορισμένα σημεία αστοχίας. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι στο κρίσιμο σημείο (στάθμη αστοχίας 56,4m), η μεταβολή της αντοχής $r_{R,GMNIA}$ εμφανίστηκε ιδιαίτερα ευαίσθητη στα μεγέθη αρχικών αποκλίσεων από την τέλεια γεωμετρία, φαινόμενο το οποίο δεν παρατηρείται για τις υπόλοιπες στάθμες.
- Η αντοχή του φορέα καθορίζεται από την κύρτωση του κελύφους του πυλώνα, όπως ήταν αναμενόμενο, με κρισιμότερες τις περιοχές στα ενδιάμεσα ύψη αυτού.
- Η επίδραση της θεμελίωσης δεν μπορεί να αμεληθεί για τον έλεγχο της κατασκευής σε δυναμικές φορτίσεις, καθώς υπάρχει σημαντικό ενδεχόμενο συντονισμού του φορέα με περιοδικές δράσεις που αναμένεται να εμφανιστούν.
- Η επιλογή προτύπου πιστοποίησης μπορεί να οδηγήσει σε υπολογίσιμες διαφοροποιήσεις στις απαιτήσεις της κατασκευής.
- Τα ελάσματα στις περιοχές των συνδέσεων προσφέρουν πλευρική εξασφάλιση στο κέλυφος σε περιοχές πλησίον αυτών, ενώ η συμβολή τους είναι αμελητέα σε απομακρυσμένα σημεία. Για τον λόγο αυτόν είναι αξιόλογη η εύρεση της ελάχιστης διατομής φλάντζας η οποία εξασφαλίζει όμοια παραμορφωμένη συμπεριφορά στον φορέα, ειδικά σε τμήματα όπου η αστοχία προβλέπεται να γίνει μακριά από σύνδεση.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] European Committee for Standardization, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-6: “Strength and Stability of Shell Structures”, 2007.
- [2] European Committee for Standardization, Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-4: “General Actions – Wind Actions”, 2010.
- [3] European Committee for Standardization, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 3-1: “Towers, masts and chimneys – Towers and masts”, 2006.
- [4] European Committee for Standardization, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 3-2: “Towers, masts and chimneys – Chimneys”, 2006.
- [5] European Committee for Standardization, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-9: “Fatigue”, 2005.
- [6] International Standard, IEC 61400-1: Wind Turbines – Part 1: “Design Requirements”, 2005.
- [7] Det Norske Veritas (DNV), Wind Energy Department, Risø National Laboratory, “Guidelines for Design of Wind Turbines”, 2002.
- [8] Germanischer Lloyd, “Guideline for the Certification of Wind Turbines”, 2010.
- [9] International Electrotechnical Commission, “Wind turbines – Part 1: Design Requirements”, International standard, 3rd edition, 2005.
- [10] Μ. Παπαδρακάκης, “Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, Ελλάδα, 2001.
- [11] Α. Κουνάδης, “Μη γραμμική θεωρία ελαστικής ευστάθειας”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, Ελλάδα 2012.
- [12] Ι. Κατσικαδέλης, “Δυναμική ανάλυση των κατασκευών”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, Ελλάδα 2004.
- [13] Deutscher Bundestag, “Bauaufsichtliche Anforderungen an die Standsicherheit von Windenergieanlagen”, 2016
- [14] Deutsches Institut für Bautechnik, “Richtlinie für Windenergieanlagen”, 2015.

- [15] P. Passon and K. Branner, "Load calculation methods for offshore wind turbine foundations", 2013.
- [16] M. Gettel, W. Schneider, "Buckling strength verification of cantilevered cylindrical shells subjected to transverse load using Eurocode 3", 2007.
- [17] E. Dunphy, "Study and Comparison of Shell Design Codes", 2013.
- [18] J. Holierhoek, "Aeroelasticity of Large Wind Turbines", 2008.
- [19] F. Blaabjerg, "Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems", 2012.
- [20] P. W. Carlin et al, "The History and State of the Art of Variable-Speed wind Turbine Technology", 2003.
- [21] L. Viterna and R. Corrigan, "Fixed pitch rotor performance of large horizontal axis wind turbines", 1982.
- [22] World Steel association, "Steel solutions in the green economy-Wind turbines", 2012.
- [23] <https://www.irena.org>
- [24] J. Manwell, J. Mcgowan, A. Rogers, "Wind energy explained", Wiley editions, Massachusetts, Washington, USA 2009.
- [25] W. Tong, "Wind power generation and wind turbine design", Wit press editions, Massachusetts, Billerica, USA 2009.
- [26] Ν. Κόρακας, "Σχεδιασμός πυλώνων ανεμογεννητριών μορφής κυλινδρικού ή κολουροκωνικού κελύφους", 2018.
- [27] ADINA R & D, Inc., "ADINA Theory and Modeling Guide", 2012.
- [28] Β. Μελισσιανός, Σ. Βερνάρδος, Η. Θανασούλας, "Οδηγίες χρήσης λογισμικού ADINA", 2016.
- [29] Ι. Βασιλοπούλου, "Χρήση λογισμικού ADINA για ανάλυση καλωδίων υπό στατικά και δυναμικά φορτία", 2017.