

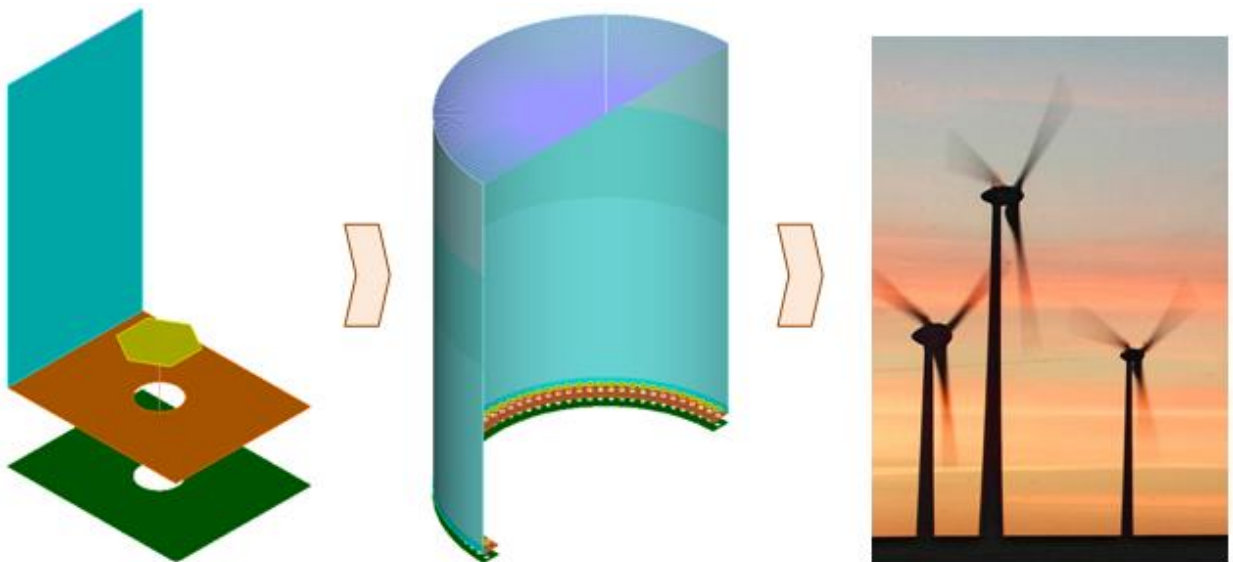


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ, ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΠΥΛΩΝΩΝ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**



Διπλωματική Εργασία
Αθηνά Σπινάσα

ΕΜΚ ΔΕ 2020 23

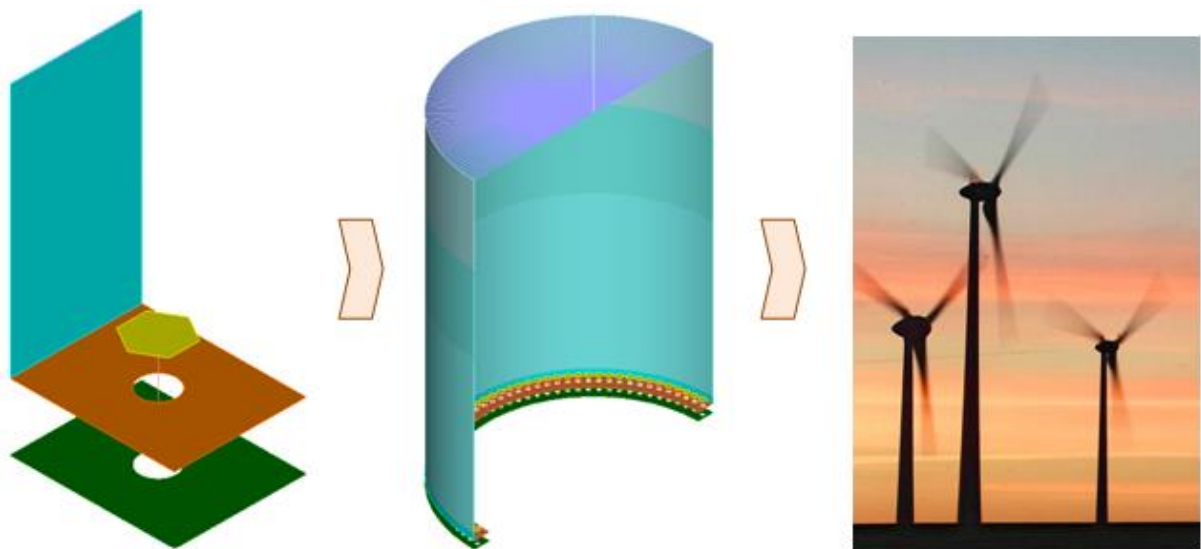
Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτορας

Αθήνα, Ιούλιος, 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ, ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΠΥΛΩΝΩΝ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ**



Διπλωματική Εργασία
Αθηνά Σπινάσα

ΕΜΚ ΔΕ 2020 23

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτορας

Αθήνα, Ιούλιος, 2020

Copyright © Αθηνά Σπινάσα, 2020
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 της συγγραφέως. 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 τη συγγραφέα.

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

Copyright © Athina Spinasa, 2020
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).

Αθηνά Ι. Σπινάσα (2020)

Αριθμητική Προσομοίωση, Μελέτη Απόκρισης και Παραμετρική Διερεύνηση Συνδέσεων Αποκατάστασης
Συνδέσεων Αποκατάστασης Συνέχειας Πυλώνων Ανεμογεννητριών
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2020 23
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Athina I. Spinasa (2020)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2020 23
Numerical Simulation, Response Evaluation and Parametric Analysis of Splice Connections in Tubular
Wind Turbine Towers
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Θέλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα Καθηγητή, κύριο Χάρη Γαντέ όχι μόνο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την βοήθεια του στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αλλά κυρίως για τη μύηση μου στις μεταλλικές κατασκευές. Η επιστημονική καθοδήγηση του, η διαθεσιμότητα του για την επίλυση των αποριών μου και οι συμβουλές του ήταν κεφαλαιώδους σημασίας και θα με συνοδεύουν εφεξής στην πορεία μου ως Πολιτικό Μηχανικό.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Κωνσταντίνα Κουλάτσου για τη σημαντική συνεισφορά της, στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Τέλος, ευχαριστίες οφείλονται και στον Δρ Πολιτικό Μηχανικό Ηλία Θανασούλα, για την συμβολή του σε θέματα προσομοίωσης.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2020 23

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ, ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Αθηνά Ι. Σπινάσα

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτορας
Ιούλιος 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον αναπτύσσεται για την αιολική ενέργεια, με αποτέλεσμα η απαίτηση για τη διερεύνηση διαφόρων θεμάτων όσον αφορά το σχεδιασμό, την κατασκευή αλλά και τη λειτουργία των ανεμογεννητριών να αυξάνεται συνεχώς. Οι ανεμογεννήτριες μεγαλώνουν όλο και περισσότερο, τόσο ως προς την προσβαλλόμενη από τον άνεμο επιφάνεια, λόγω αύξησης του μήκους των πτερυγίων, όσο και σε ύψος των πυλώνων, προκειμένου να αξιοποιηθεί καλύτερα το αιολικό δυναμικό, με αποτέλεσμα να αυξάνονται και τα φορτία του ανέμου που καταπονούν τα δομικά μέρη των ανεμογεννητριών. Συνεπώς, η μελέτη της αντοχής και κόπωσης των συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας του πυλώνα έναντι αυτών των φορτίων κρίνεται απαραίτητη. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να προταθεί μία βέλτιστη αριθμητική προσομοίωση για την παραμετρική διερεύνηση και τη μελέτη απόκρισης των συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας των πυλώνων ανεμογεννητριών.

Αρχικά, με τη βοήθεια κατάλληλων λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων μελετάται η συμπεριφορά ενός προσομοιώματος βραχέος «L», οι διαστάσεις του οποίου προέκυψαν υπό κλίμακα από μια πραγματική σύνδεση πυλώνα ανεμογεννήτριας. Αποτελεί τμήμα μιας σύνδεσης που περιλαμβάνει έναν κοχλία και το τμήμα που του αντιστοιχεί από τα δακτυλιοειδή ελάσματα καθώς και ένα τμήμα του πυλώνα. Χρησιμοποιούνται επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία για το τμήμα των δακτυλιοειδών ελασμάτων και του πυλώνα, γραμμικά στοιχεία τύπου "κοχλία" για τον κοχλία και στοιχεία επαφής για τις διεπιφάνειες μεταξύ ελασμάτων και μεταξύ του κοχλία και των ελασμάτων. Στις αναλύσεις εξετάζονται η επίδραση του τύπου των παραμορφώσεων, μικρές ή μεγάλες, και η επίδραση του τρόπου προσομοίωσης της σύνδεσης μεταξύ του κελύφους του πυλώνα και του δακτυλιοειδούς ελάσματος, ώστε να λαμβάνεται υπόψη το πάχος του ελάσματος. Επίσης, το προσομοίωμα των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων συγκρίνεται με αντίστοιχο προσομοίωμα τρισδιάστατων στοιχείων όγκου αλλά και με τα αποτελέσματα πειράματος που έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ. Επιπλέον, γίνονται δύο ομάδες παραμετρικών αναλύσεων, που αφορούν στα πάχη των δακτυλιοειδών ελασμάτων και στην διάμετρο του κοχλία σύνδεσης, ώστε να διερευνηθεί η επιρροή τους στην στατική συμπεριφορά του βραχέος L.

Στη συνέχεια, διερευνάται η αντοχή ολόκληρης σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας με χρήση κατάλληλου αριθμητικού προσομοιώματος από επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία που περιλαμβάνει το άνω και κάτω δακτυλιοειδές έλασμα της σύνδεσης, τους κοχλίες και τμήμα του πυλώνα. Τα αριθμητικά αποτελέσματα των αναλύσεων συγκρίνονται με τα αποτελέσματα αναλυτικού υπολογισμού των ορθών τάσεων του πυλώνα. Τέλος, με το υπόψη προσομοίωμα πραγματοποιούνται παραμετρικές αναλύσεις όπως και με το προσομοίωμα του βραχέος L διερευνώντας επιπλέον την επιρροή της δύναμης προέντασης των κοχλιών.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2020 23

Numerical Simulation, Response Evaluation and Parametric Analysis of Splice Connections in Tubular Wind Turbine Towers

Athina I. Spinasa

Supervisor: Professor Charis Gantes
Co-supervisor: Konstantina Koulatsou, PhD candidate
July, 2020

ABSTRACT

Nowadays, there has been a growing interest in wind energy. Thus, the demand for investigation of various issues related to the design, construction and operation of wind turbines is constantly increasing. Wind turbines are continuously growing, both in terms of wind-blown surface, due to increased blades length, as well as regarding the height of the tower, in order to make better use of wind capacity, resulting in increasing wind loads, which are demanding for the structural parts of wind turbines. Therefore, the study of the strength and fatigue of wind turbine tower connections against these loads is considered necessary. The aim of this paper is to propose an optimal numerical simulation for the parametric and response analysis of the wind turbine tower connections.

Initially, a detailed L-stub model of the part of the connection corresponding to a single bolt, scaled from a real wind turbine tower connection, is studied by means of an appropriate finite element software. This model includes a bolt and the corresponding parts of the ring flanges and the pylon. For the two ring flanges and the pylon shell finite elements are used, while the bolt shank is modeled with "bolt-type" beam elements and contact elements are appropriately used between the top flange and bolt head and between the two flanges. Comparative analyses are performed regarding the type of strains, small or large, and the influence of the tower shell trim by means of rigid elements in order to account for the effect of flange thickness. Moreover, the model with shell finite elements is compared with a corresponding model comprising 3d solid finite elements and with the results of an experiment that took place at the Institute of Steel Structures of NTUA. In addition, two groups of parametric analyses are performed, concerning the thickness of the ring flanges and the diameter of the bolt, in order to investigate their influence on the static behavior of the model.

Then, the strength of the entire wind turbine tower connection is examined using a shell finite element model, which includes the upper and lower ring flange of the connection, the bolts and part of the pylon. The vertical normal stresses of the pylon obtained from the numerical analyses are compared with those of a detailed analytical model. Lastly, similar parametric analyzes as for the L-stub model, investigating in addition the influence of the prestressing force of the bolts.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ	1
1.1	ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	1
1.2	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	3
1.3	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	5
1.4	ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	6
1.4.1	Κύρια μέρη ανεμογεννήτριας ^[7]	6
1.4.2	Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα	8
1.4.3	Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα	9
1.4.4	Αριθμός πτερυγίων	9
1.5	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ	10
2	ΠΥΛΩΝΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	13
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
2.2	ΤΥΠΟΙ ΠΥΛΩΝΑ	14
2.2.1	Δικτυωτοί πυλώνες	14
2.2.2	Χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες με καλώδια	15
2.2.3	Πυλώνες από σκυρόδεμα	16
2.2.4	Αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες	17
2.2.5	Υβριδικοί πυλώνες από οπλισμένο σκυρόδεμα και χάλυβα	18
2.3	ΑΥΤΟΝΟΜΟΙ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΙ ΣΩΛΗΝΩΤΟΙ ΠΥΛΩΝΕΣ	19
2.3.1	Παράμετροι σχεδιασμού	20
2.3.2	Φορτία σχεδιασμού	21
2.3.3	Διαδικασία παραγωγής και κατασκευής	22
3	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΑ ΕΝΟΣ ΚΟΧΛΙΑ	35
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	35
3.2	ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΓΚΟΥ	36
3.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΑΤΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	41
3.3.1	Γεωμετρία του αριθμητικού προσομοιώματος	41
3.3.2	Διακριτοποίηση του αριθμητικού προσομοιώματος	42
3.3.3	Παραδοχές αριθμητικής προσομοίωσης	44
3.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΕΩΝ	46
3.4.1	Σύγκριση μοντέλου επιφανειακών στοιχείων (shell elements), στοιχείων όγκου (solid elements) και πειράματος (experiment)	47
3.4.2	Επίδραση της θεωρίας μεγάλων ή μικρών παραμορφώσεων	48

3.4.3	Επίδραση προσομοίωσης σύνδεσης κελύφους - δακτυλίου	49
3.5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	51
4	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΕΝΟΣ ΚΟΧΛΙΑ	57
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	57
4.2	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ	57
4.3	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ	68
5	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΠΥΛΩΝΑ.....	81
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	81
5.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ	81
5.2.1	Γεωμετρία της υπό μελέτη σύνδεσης	82
5.2.2	Διακριτοποίηση αριθμητικού προσομοιώματος	84
5.2.3	Παραδοχές αριθμητικής προσομοίωσης	85
5.3	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΥΠΟ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΑ ΣΤΑΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ	87
5.4	ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΑ	96
5.5	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΥΠΟ ΣΤΑΘΕΡΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΗ ΡΟΠΗ ΚΑΙ ΤΕΜΝΟΥΣΑ	99
6	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΠΥΛΩΝΑ	107
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	107
6.2	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ	107
6.3	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΠΡΟΕΝΤΑΣΕΩΣ ΤΩΝ ΚΟΧΛΙΩΝ	119
7	ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	131
7.1	ΣΥΝΟΨΗ	131
7.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	132
7.3	ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ	134
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	135

1 Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ

1.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η αιολική ενέργεια είναι μία από τις παλαιότερες φυσικές μορφές ενέργειας, που παράγεται από την αξιοποίηση του ανέμου με ποικίλους τρόπους και προκαλείται από την ανομοιογενή θέρμανση της ατμόσφαιρας από τον ήλιο εξαιτίας:

- i. του τρόπου με τον οποίο φτάνει η ηλιακή ακτινοβολία στη Γη
- ii. των διακυμάνσεων στην επιφάνεια της γης. Τα βουνά, τα υδάτινα σώματα και η βλάστηση επηρεάζουν όλες τις μορφές ροής ανέμου
- iii. της περιστροφικής κίνησης της Γης.

Όταν μια αέρια μάζα θερμανθεί, εκτονώνεται, γίνεται ελαφρύτερη και κινείται προς τα πάνω. Ο αέρας της ατμόσφαιρας θερμαίνεται κυρίως από την επαφή του με τη θερμή επιφάνεια της γης. Ο θερμός αέρας είναι ελαφρύτερος με μικρότερη πυκνότητα από τον ψυχρό. Ένα στρώμα αέρα, που θα έρθει σε επαφή με τη γήινη επιφάνεια, θα θερμανθεί και θα ανέλθει. Στη συνέχεια, τη θέση του θα καλύψει ένα στρώμα ψυχρότερου αέρα, το οποίο θα ακολουθήσει την ίδια πορεία. Αυτή η κυκλική-ανοδική-καθοδική κίνηση θερμών και ψυχρών ρευστών μαζών, ονομάζεται Κατακόρυφη Μεταφορά.^[1]

Ο Ισημερινός θερμαίνεται πολύ περισσότερο από τους πόλους. Έτσι, οι αέριες μάζες στον Ισημερινό ακολουθούν την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Όμως, η Γη περιστρέφεται ημερησίως και αυτό οδηγεί στην εκτροπή των ανέμων, γεγονός που περιπλέκει την κυκλοφορία της ατμόσφαιρας και η κίνηση του αέρα δεν ακολουθεί τελικά τη διαδικασία της Κατακόρυφης Μεταφοράς.

Συνεπώς, οι άνεμοι είναι αέριες μάζες, που κινούνται εξαιτίας των διαφορετικών βαρομετρικών πιέσεων που προκαλούνται κυρίως από την άνιση θέρμανση των διαφόρων περιοχών της γης από τον ήλιο. Συγκεκριμένα, η στεριά έχει μικρότερη θερμοχωρητικότητα από τη θάλασσα κι αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ψύχεται και να θερμαίνεται πιο γρήγορα από τη θάλασσα. Έτσι, η στεριά την ημέρα είναι θερμότερη από τη θάλασσα, με αποτέλεσμα, ψυχρότερες αέριες μάζες να μετακινούνται από τη θάλασσα προς τη στεριά για να αντικαταστήσουν τις θερμές μάζες. Το αντίθετο συμβαίνει κατά τη διάρκεια της νύχτας που η θάλασσα είναι θερμότερη από την ξηρά. Ο αέρας που είναι σε επαφή με τη θάλασσα θερμαίνεται, ανέρχεται και αντικαθίσταται από ψυχρότερο που προέρχεται από τη στεριά (Σχήμα 1-1).



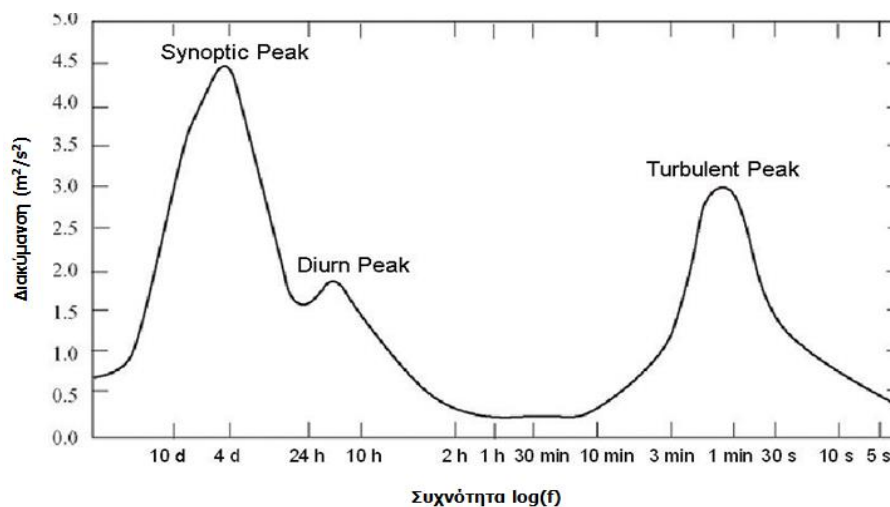
Σχήμα 1-1: Διαδρομή αέριας μάζας (Πηγή: okeanis.lib2.uniwa.gr)

Σημαντικός παράγοντας για την πρόβλεψη των ανέμων είναι και ο χρόνος για τα μεγέθη ανέμου που αναμένεται να εμφανιστούν.

Σε δεδομένη περιοχή ο άνεμος μπορεί να διαφέρει από χρόνο σε χρόνο και πιο αισθητά σε μεγαλύτερη κλίμακα όπως σε δεκάδες χρόνια (long-term variations). Αυτό μπορεί να οφείλεται στη διακύμανση της θερμοκρασίας του πλανήτη με τα χρόνια ή στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Παρόλα αυτά η αιτία του φαινομένου δεν έχει εξηγηθεί πλήρως και αυτό δυσχεραίνει το σχεδιασμό αιολικών πάρκων σε βάθος χρόνου.

Σε κλίμακα μικρότερη του ενός έτους, η διακύμανση του ανέμου από εποχή σε εποχή (Annual and Seasonal Variations) οφείλεται στην αλλαγή της θερμοκρασίας λόγω της αλλαγής κλίσης του άξονα περιστροφής της Γης. Σε κλίμακα μερικών ημερών (synoptic variations), παρατηρείται αύξηση των ανέμων ανά τέσσερις περίπου ημέρες λόγω μεταφοράς μεγάλων αερίων μαζών από περιοχές υψηλών βαρομετρικών πιέσεων σε χαμηλότερων. Διακύμανση του ανέμου εντός της ημέρας (Diurnal variations) οφείλεται στην πτώση της θερμοκρασίας τη νύχτα και στη μεταφορά αερίων μαζών από τη στεριά στη θάλασσα και από τα βουνά στις κοιλάδες, γεγονός που οδηγεί στην αυξομείωση της ταχύτητας των ανέμων ανά 12 ώρες. Τέλος η διακύμανση του ανέμου σε χρόνο μικρότερο των 10 λεπτών ονομάζεται τύρβη και δημιουργείται λόγω της ακανόνιστης ροής του ανέμου και λόγω της τριβής του με την επιφάνεια της Γης.

Ο Van der Hoven (1957) παρουσίασε ένα φάσμα συχνοτήτων (Σχήμα 1-2) με τις μεταβολές της ταχύτητας ανέμου στο εργαστήριο Brookhaven, της Νέας Υόρκης, δείχνοντας τις αιχμές στην ταχύτητα του ανέμου, που αντιστοιχούν στα προαναφερθέντα χρονικά διαστήματα. [2]



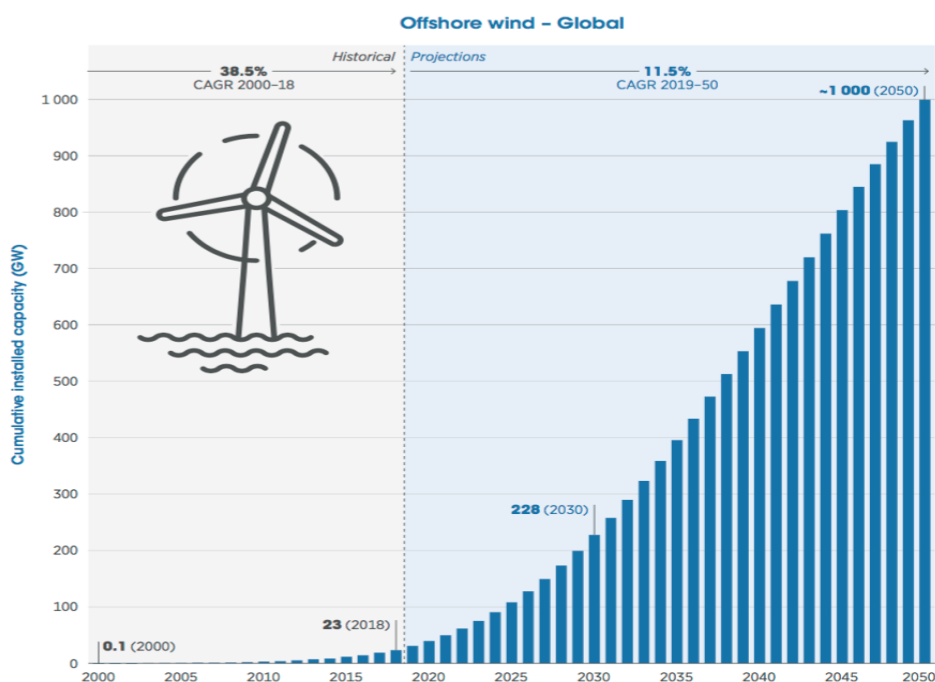
Σχήμα 1-2: Φάσμα συχνοτήτων με τις μεταβολές ταχυτήτων επεξεργασμένο από: Van der Hoven, 1957

1.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

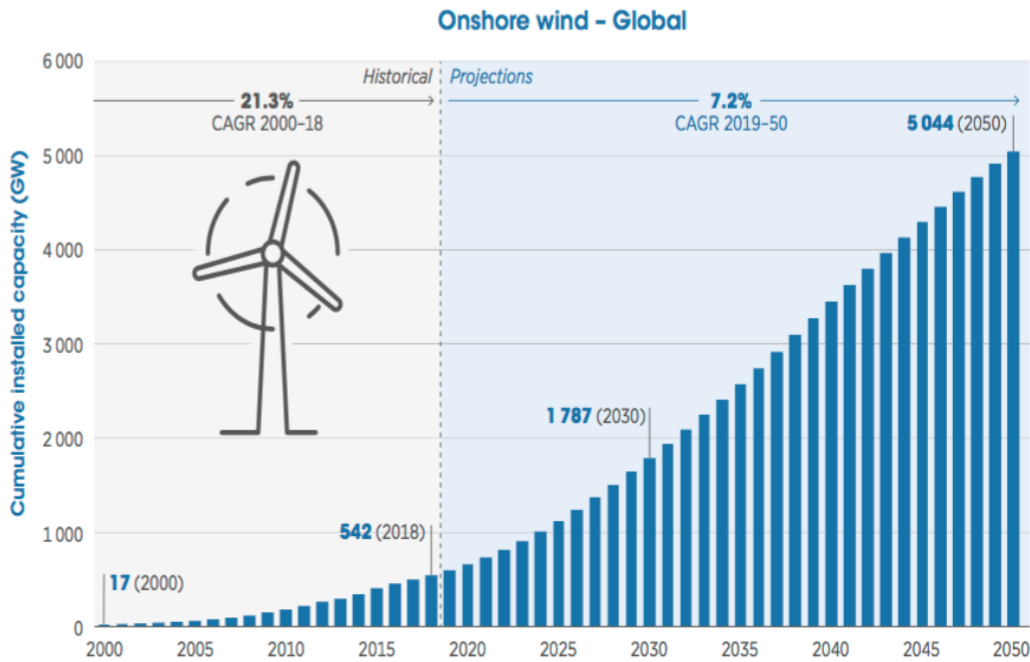
Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια καθαρή και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας μιας και δεν εκπέμπει ούτε προκαλεί ρύπους. Επίσης, είναι μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες πηγές ενέργειας στον κόσμο λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων της. Μερικά από αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Είναι οικονομικά αποδοτική σε πολλές περιοχές.
- Είναι μια εγχώρια πηγή ενέργειας, αξιοποιώντας έναν απεριόριστο τοπικό πόρο.
- Έχει μικρό εδαφικό αποτύπωμα, μιας και η γύρω περιοχή αυτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καλλιέργειες.
- Παρέχει ενέργεια σε απομακρυσμένες περιοχές.
- Έχει μικρή ανάγκη σε συντήρηση και έξοδα λειτουργίας.
- Είναι άφθονη, πρακτικά ανεξάντλητη, άμεσα διαθέσιμη και δεν καταστρέφει τους πολύτιμους φυσικούς πόρους.
- Αποτελεί μια αειφόρο πηγή ενέργειας, καθώς η λειτουργία των ανεμογεννητριών δεν εκπέμπει άμεσα CO₂ και άλλα αέρια θερμοκηπίου, βοηθώντας στην αντιμετώπιση των επιζήμιων επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

Η παγκόσμια πρόβλεψη, σύμφωνα με την εταιρεία GE Renewable Energy, για την αιολική ενέργεια προβλέπει ότι μέχρι το 2030 η αιολική ενέργεια θα αντισταθμίσει 2,5 δισεκατομμύρια τόνους άνθρακα ανά έτος. [3] Επίσης, η εξάπλωση της υπεράκτιας (offshore) αιολικής ενέργειας θα αυξηθεί σταδιακά σε σχεδόν 1.000GW της συνολικής εγκατεστημένης δυναμικότητας έως το 2050 (Σχήμα 1-3). Αντίθετα, η εγκατεστημένη δυναμικότητα αιολικής αθροιστικής αιολικής ενέργειας θα αυξηθεί περισσότερο από τρεις φορές έως το 2030 και σχεδόν δεκαπλάσια έως το 2050 σε σχέση με τα επίπεδα του 2018 (Σχήμα 1-4). [4]

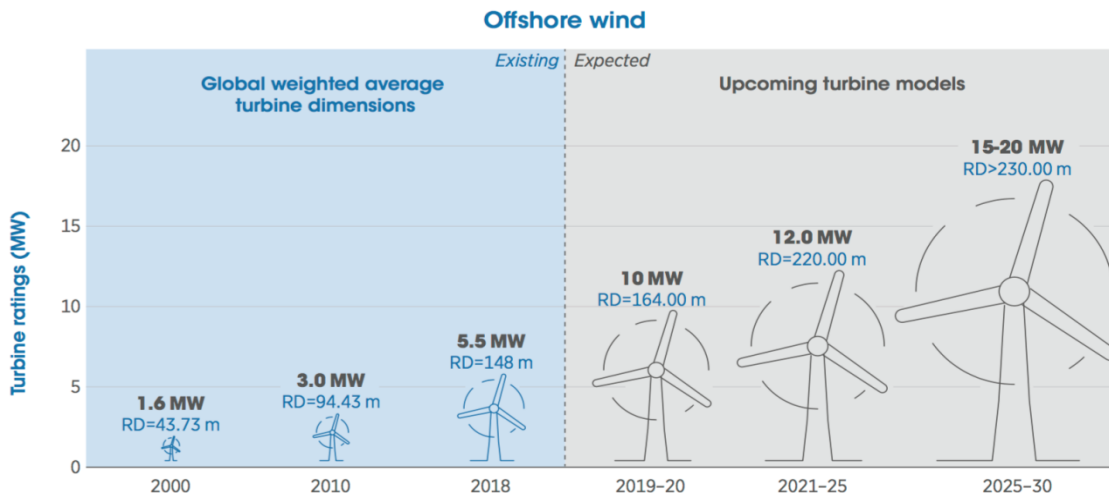


Σχήμα 1-3: Η προβλεπόμενη εξάπλωση της υπεράκτιας(offshore) αιολικής ενέργειας έως το 2050 (Πηγή:www.irena.org)

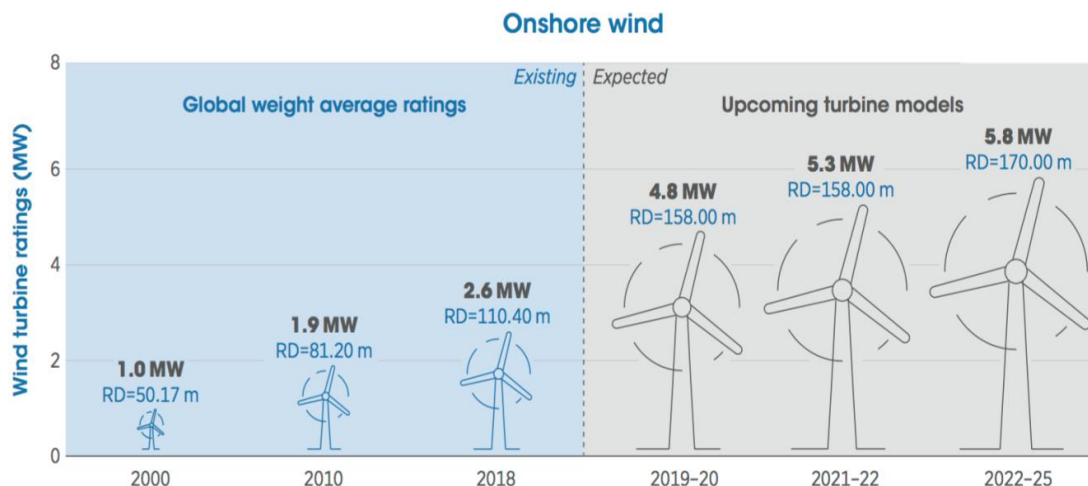


Σχήμα 1-4: Η προβλεπόμενη εξαπλώση της αιολικής ενέργειας που παράγεται από ανεμογεννήτριες στεριάς (onshore) έως το 2050 (Πηγή:www.irena.org)

Τέλος, οι συνεχείς καινοτομίες και οι βελτιώσεις της τεχνολογίας ως προς τους στρόβιλους μεγαλύτερης χωρητικότητας καθώς και η αύξηση του ύψους της πλήμνης και της διαμέτρου του δρομέα θα βελτιώσουν τις ενεργειακές αποδόσεις και θα μειώσουν το κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος. Ειδικότερα, το μέσο μέγεθος των υπεράκτιων ανεμογεννητριών αυξήθηκε κατά συντελεστή 3.4 σε λιγότερο από δύο δεκαετίες και αναμένεται να αυξηθεί σε παραγωγική ικανότητα 15-20 MW μέχρι το 2030 όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1-5. Στο Σχήμα 1-6 φαίνεται η αντίστοιχη αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών που βρίσκονται στη στεριά.^[5]



Σχήμα 1-5: Μέσο μέγεθος των υπεράκτιων ανεμογεννητριών (Πηγή:GE Renewable Energy,2018-IRENA 2019c,2016b-MHI Vestas 2018)



Σχήμα 1-6: Μέσο μέγεθος των ανεμογεννητριών της στεριάς (Πηγή: IRENA 2019c, Wind Power Monthly, 2019, 2018)

1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για όλους τους παραπάνω λόγους η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας από τον άνθρωπο αποτελεί μία πρακτική που βρίσκει τις ρίζες της στην αρχαιότητα. Αρχικά, η αρχαιότερη μορφή εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας ήταν τα ιστία των πρώτων ιστιοφόρων πλοίων. Στη συνέχεια, η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε για την άντληση νερού από πηγάδια αλλά και για την άλεση σιτηρών στους ανεμόμυλους.^[6]



Σχήμα 1-7: Παραδοσιακοί Ανεμόμυλοι (Πηγές: www.grtimes.gr, www.anatolh.com)

Η ανακάλυψη της ατμομηχανής από τον James Watt όμως το 1796 άρχισε να αντικαθιστά τους ανεμόμυλους αφού ήταν πιο εύκολη στη χρήση, πιο παραγωγική και ανεξάρτητη από τις μετεωρολογικές συνθήκες. Παρόλα αυτά, το 1860 στο βιομηχανικό κέντρο της Αμερικής, στο Σικάγο, συνέχισαν να κατασκευάζονται οι πολυπτερυγοί ανεμόμυλοι για άντληση. Το 1900, οι Δανοί παρήγαγαν ηλεκτρισμό από τον άνεμο και το 1940 στο Βερμόντ (ΗΠΑ) κατασκευάστηκε μια δοκιμαστική ανεμογεννήτρια με δύο πτερύγια σημαντικής ισχύος. Σήμερα, η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας γίνεται μέσω ανεμογεννητριών και γνωρίζει μεγάλη άνθηση σε πολλά κράτη του κόσμου.



Σχήμα 1-8: Ανεμογεννήτριες (Πηγή:www.eleftheriaonline.gr)

1.4 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι "ανεμογεννήτριες" χρησιμοποιούνται ως γενικός όρος για μηχανές με περιστρεφόμενα πτερύγια που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε χρήσιμη ισχύ.

Τον 20ο αιώνα, τα σχέδια των πρώτων ανεμογεννητριών οδηγήθηκαν από την αντοχή των φορτίων και τη διαχείρισή τους με μηχανικό ή και ηλεκτρικό τρόπο. Δημιουργήθηκαν πολλά σχέδια ανεμογεννητριών, συμπεριλαμβανομένου του οριζώντιου άξονα και των στροβίλων κάθετου άξονα. Οι στρόβιλοι αυτοί περιστρέφονται γύρω από τους οριζόντιους και κατακόρυφους άξονες, αντίστοιχα, και είναι εξοπλισμένοι με ένα, δύο, τρία ή πολλαπλά πτερύγια.

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες εξελίχθηκαν από τα αρχικά σχέδια και μπορούν να ταξινομηθούν ως ανεμογεννήτριες δύο ή τριών πτερυγίων με οριζόντιους άξονες και δρομείς προς τα εμπρός. Σήμερα, η επιλογή μεταξύ ανεμογεννητριών δύο ή τριών πτερυγίων είναι απλώς θέμα ανταλλαγής μεταξύ της αεροδυναμικής απόδοσης, της πολυπλοκότητας, του κόστους, του θορύβου και της αισθητικής.

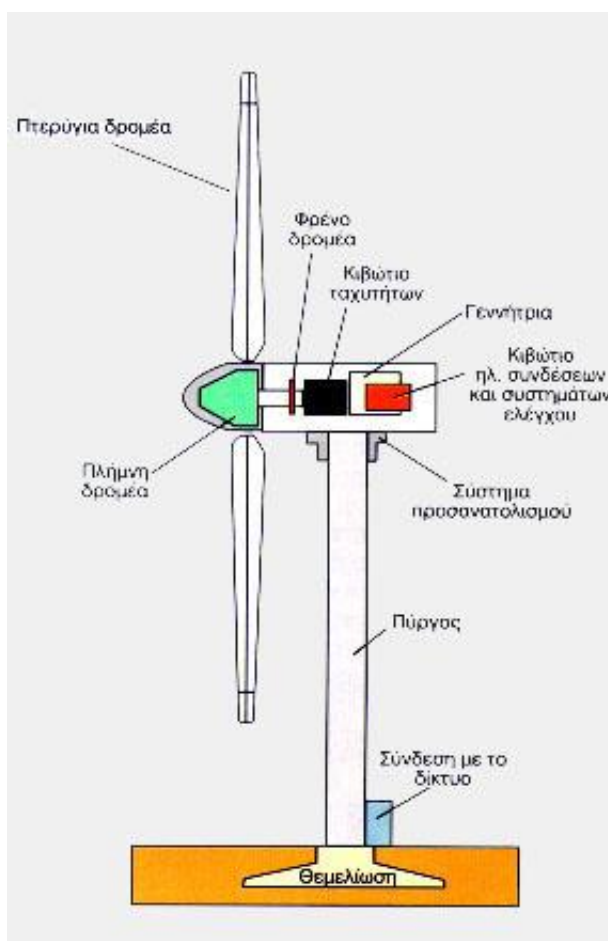
Πρόσθετες θεωρήσεις σχεδιασμού βασικών στροβίλων περιλαμβάνουν το κλίμα του ανέμου, τον τύπο του δρομέα, τον τύπο της γεννήτριας, τη μείωση του φορτίου και του θορύβου και την πρόσβαση για έλεγχο, επιθεώρηση και συντήρηση. Επιπλέον, οι τρέχουσες τάσεις, που οφείλονται στο λειτουργικό καθεστώς και στο περιβάλλον της αγοράς, περιλαμβάνουν την ανάπτυξη αεριοστροβίλων χαμηλού κόστους, ισχύος και ελαφρών στροβίλων. Ενώ οι στρόβιλοι που λειτουργούν με σταθερή ταχύτητα στροφέα κυριαρχούν μέχρι τώρα, οι στρόβιλοι με μεταβαλλόμενη ταχύτητα στροφέα γίνονται όλο και πιο συνηθισμένοι σε μια προσπάθεια να βελτιστοποιηθεί η δέσμευση ενέργειας, να μειωθούν τα φορτία, να επιτευχθεί καλύτερη ποιότητα ισχύος και να δοθεί η δυνατότητα πιο προηγμένων πτυχών ελέγχου ισχύος.

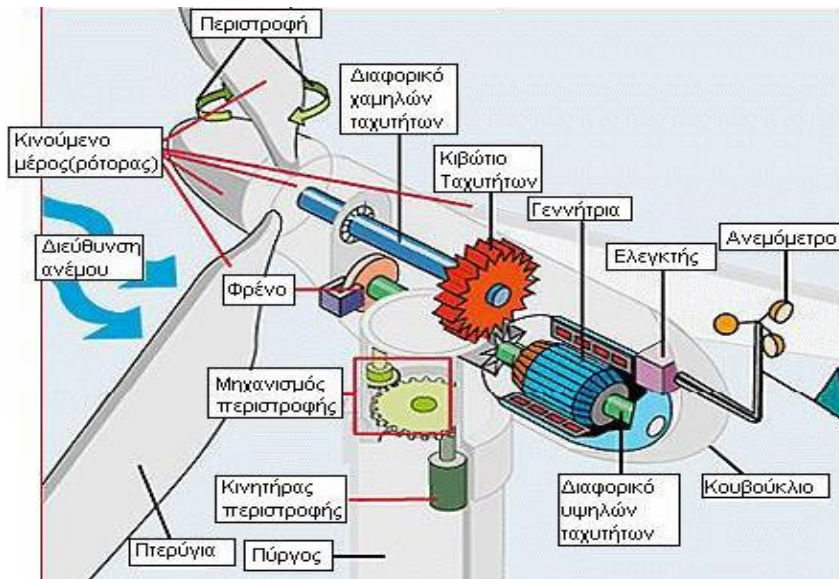
1.4.1 Κύρια μέρη ανεμογεννήτριας ^[7]

- **Δρομέας :** Μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε στροφική κινητική ενέργεια. Αποτελείται από την πλήμνη και δύο ή τρία πτερύγια ενισχυμένου πολυεστέρα, τα οποία συνδέονται με την πλήμνη και είτε παραμένουν σταθερά είτε περιστρέφονται γύρω από τη διαμήκη άξονα.
- **Σύστημα μετάδοσης :** Αποτελείται από τον κύριο άξονα, τα έδρανά του και το κιβώτιο

πολλαπλασιασμού στροφών. Ο άξονας του δρομέα περιστρέφεται εντός της γεννήτριας και μεταφέρει τη στροφική κινητική ενέργεια στην ηλεκτρική γεννήτρια. Το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών ρυθμίζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρικής γεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία του μηχανήματος.

- **Ηλεκτρική γεννήτρια:** Μπορεί να είναι σύγχρονη ή επαγωγική με 4 έως 6 πόλους. Συνδέεται με το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών με ένα εύκαμπτο ή υδραυλικό σύνδεσμο και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια ώστε να μεταφερθεί στο δίκτυο παροχής ενέργειας. Βρίσκεται πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Επίσης διαθέτει το σύστημα πέδησης, που είναι ένα κανονικό δισκόφρενο το οποίο τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.
- **Σύστημα προσανατολισμού:** Διατηρεί τον άξονα περιστροφής του δρομέα συνεχώς παράλληλο προς την κατεύθυνση του ανέμου.
- **Πύργος:** Υποστηρίζει όλους τους παραπάνω ηλεκτρομηχανολογικούς εξοπλισμούς και η μορφή του διαφέρει από ανεμογεννήτρια σε ανεμογεννήτρια.
- **Ηλεκτρονικός πίνακας και πίνακας ελέγχου :** Βρίσκεται στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, διασφαλίζοντας έτσι την αδιάλειπτη λειτουργία του.





Σχήματα 1-9: Κύρια Μέρη μιας ανεμογεννήτριας (Πηγές: www.digilib.teiimt.gr, www.cres.gr)

1.4.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Στις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, ο άξονας του δρομέα τοποθετείται κάθετα ως προς το έδαφος, ενώ ο μηχανολογικός εξοπλισμός βρίσκεται στη βάση τους. Σχεδιάζονται έτσι ώστε να δρουν αντίστοιχα προς τον αέρα. Αν και ένας τέτοιος σχεδιασμός θα λειτουργούσε κατ' αρχήν και με έναν οριζόντιο άξονα, θα απαιτούσε έναν πιο σύνθετο σχεδιασμό, ο οποίος δύσκολα θα μπορούσε να κερδίσει την απόδοση ενός στροβίλου τύπου έλικα.

Τα κύρια πλεονεκτήματα μιας ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα είναι ότι η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων τοποθετούνται στο έδαφος και έτσι είναι εύκολα προσβάσιμα και ότι δεν απαιτείται μηχανισμός περιστροφής. Τα μειονεκτήματα είναι ένα συνολικά πολύ χαμηλότερο επίπεδο απόδοσης, εξαιτίας των οπισθελκουσών δυνάμεων από την περιστροφή των πτερυγίων της, η θέση του δρομέα κοντά στο έδαφος, όπου δεν υπάρχει πολύς άνεμος και η δυσκολία εκκίνησης, που απαιτεί την παρουσία εξοπλισμού ώστε να ξεκινήσει η περιστροφή.



Σχήματα 1-10: Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (Πηγή: www.zeroenergybuildings.org)

1.4.3 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα αποτελούν τον πιο συνηθισμένο τύπο ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιείται σήμερα. Στην πραγματικότητα, όλες οι εμπορικές ανεμογεννήτριες που συνδέονται με το δίκτυο είναι σήμερα σχεδιασμένες με δρομείς τύπου έλικας τοποθετημένους σε οριζόντιο άξονα πάνω από κάθετο πύργο. Σε αντίθεση με τον τρόπο λειτουργίας των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα πρέπει να ευθυγραμμίζονται με την κατεύθυνση του ανέμου, επιτρέποντας έτσι στον αέρα να ρέει παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής και κάθετα στα πτερύγια.

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, διακρίνονται σε προσήνεμες και σε υπήνεμες.

Οι προσήνεμοι δρομείς αντιμετωπίζουν τον άνεμο μπροστά από τον κατακόρυφο πύργο αφού ο άνεμος πρώτα προσπίπτει στα πτερύγια και μετά στον πυλώνα. Οι συγκεκριμένοι δρομείς έχουν το πλεονέκτημα ότι εξασφαλίζεται καλύτερης ποιότητας άνεμος με λιγότερη ένταση τύρβης. Παρόλα αυτά έχουν ένα επιπλέον κόστος εγκατάστασης μηχανισμού περιστροφής της ατράκτου, η οποία στεγάζει τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό.

Οι υπήνεμοι δρομείς τοποθετούνται στην υπήνεμη πλευρά του πύργου και χρειάζονται μηχανισμό εκτροπής για να διατηρούν τον άξονα του δρομέα ευθυγραμμισμένο με την κατεύθυνση του ανέμου. Η άτρακτος είναι ελεύθερη να περιστραφεί και ο άνεμος διέρχεται από το νοητό δίσκο των πτερυγίων αφού έχει διέλθει από τον πυλώνα και την άτρακτο. Ένα μεγάλο μειονέκτημα σ' αυτό το είδος είναι οι διακυμάνσεις της αιολικής ενέργειας εξαιτίας του δρομέα και άρα της αυξημένης έντασης τύρβης με αποτέλεσμα να προκαλεί περισσότερα φορτία κόπωσης. Για την μεγιστοποίηση της απόδοσης προτείνεται τα πτερύγια να μπορούν να περιστρέφονται περί τον διαμήκη άξονα, επιτυγχάνοντας έτσι την βέλτιστη κλίση τους ως προς τον άνεμο. Η συντριπτική πλειονότητα των ανεμογεννητριών που λειτουργούν σήμερα έχουν προσήνεμους δρομείς.

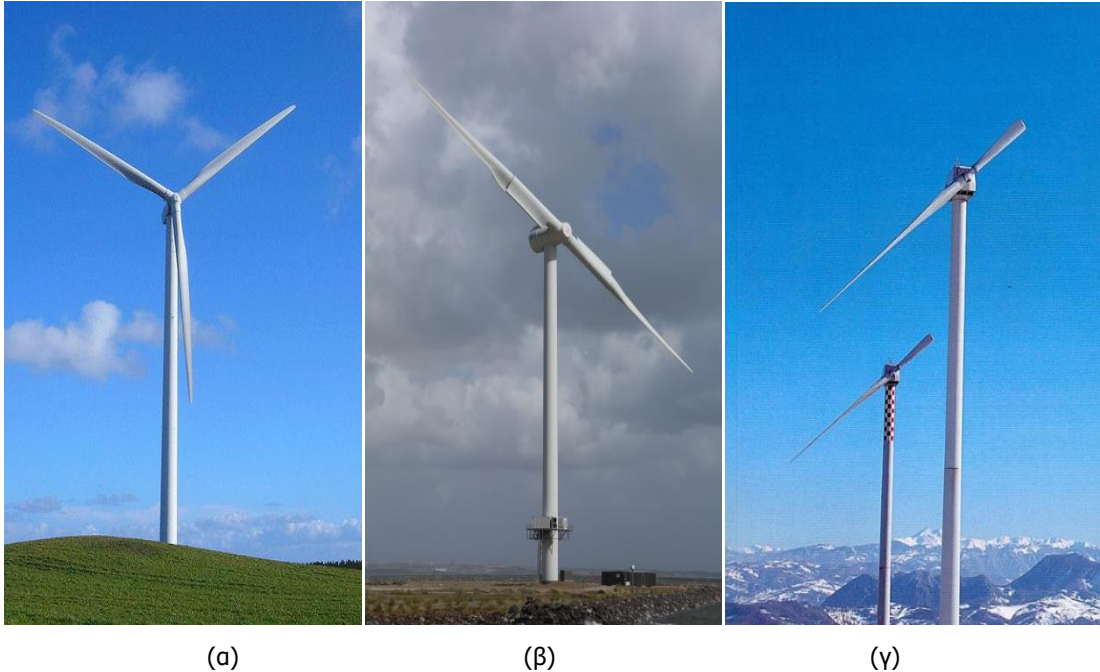


Σχήμα 1-11: Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (Πηγή:www.bigbusiness.gr)

1.4.4 Αριθμός πτερυγίων

Το πιο κοινό μοντέλο ανεμογεννήτριας είναι αυτό με τα τρία πτερύγια. Σε σχέση με την ιδέα των τριών πτερυγίων, οι έννοιες των δύο και του ενός πτερυγίου έχουν το πλεονέκτημα ότι αντιπροσωπεύουν μια πιθανή εξοικονόμηση σε σχέση με το κόστος και το βάρος του δρομέα. Ωστόσο, η χρήση λιγότερων πτερυγίων συνεπάγεται την απαίτηση υψηλότερης ταχύτητας περιστροφής ή μεγαλύτερης χορδής για την απόδοση της ίδιας ενεργειακής απόδοσης με έναν τριπλό στρόβιλο παρόμοιας διατομής. Η χρήση

ενός ή δύο πτερυγίων θα έχει επίσης ως αποτέλεσμα μεγαλύτερα κυμαινόμενα φορτία λόγω της μεταβολής της αδράνειας, ανάλογα με τα πτερύγια που βρίσκονται σε οριζόντια ή κατακόρυφη θέση και την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου όταν το πτερύγιο δείχνει προς τα πάνω και προς τα κάτω. Τέλος, για περισσότερα πτερύγια των τριών υπάρχει μείωση της απόδοσης λόγω των οπισθελκουσών δυνάμεων.

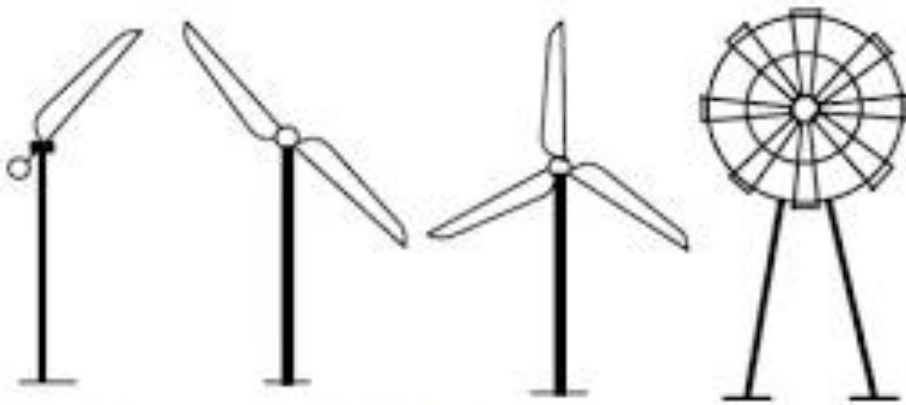


(α)

(β)

(γ)

Σχήματα 1-12: Ανεμογεννήτριες με (α)ένα πτερύγιο (Πηγή:www.nucleus2012.wordpress.com), (β)δύο πτερύγια (Πηγή:www.en.wind-turbine-models.com), (γ)τρία πτερύγια (Πηγή:www.wind-energy-the-facts.org)



Σχήμα 1-13: Διάφοροι τύποι οριζόντιου άξονα ανεμογεννήτριες ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων (Πηγή: www.file.scirp.org)

1.5 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Στη συνέχεια, στη διπλωματική αυτή θα διερευνηθεί η συμπεριφορά της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας. Αρχικά, στο πρώτο μέρος, μελετάται η συμπεριφορά ενός προσομοιώματος βραχέος «L», οι διαστάσεις του οποίου προέκυψαν υπό κλίμακα από μια πραγματική σύνδεση πυλώνα ανεμογεννήτριας. Αποτελείται από ένα τμήμα μιας σύνδεσης που περιλαμβάνει έναν κοχλία και το τμήμα που του αντιστοιχεί από τα δακτυλιοειδή ελάσματα καθώς και ένα τμήμα του πυλώνα. Χρησιμοποιούνται επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία για το τμήμα των δακτυλιοειδών ελασμάτων και του πυλώνα, γραμμικά στοιχεία τύπου “κοχλία” για τον κοχλία και στοιχεία επαφής για

τις διεπιφάνειες μεταξύ ελασμάτων και μεταξύ του κοχλία και των ελασμάτων. Γίνονται τρεις συγκρίσεις των αριθμητικών αποτελεσμάτων του παραπάνω προσομοιώματος. Εξετάζεται η επίδραση του τύπου των παραμορφώσεων, μικρές ή μεγάλες (large and small strains), η επίδραση του τρόπου προσομοίωσης της σύνδεσης μεταξύ του πυλώνα και του δακτυλιοειδούς ελάσματος, ώστε να λαμβάνεται υπόψη το πάχος του ελάσματος. Ακόμη, το προσομοίωμα των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων συγκρίνεται με αντίστοιχο προσομοίωμα που αποτελείται από τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία αλλά και με πειραματικά αποτελέσματα. Επιπλέον, γίνονται δύο ομάδες παραμετρικών αναλύσεων για να διερευνηθεί η επιρροή δύο σημαντικών παραμέτρων απόκρισης του βραχέος L. Πρώτον, εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής του πάχους των δακτυλιοειδών ελασμάτων συγκρίνοντας τέσσερα διαφορετικά προσομοιώματα στα οποία μεταβάλλονται τα πάχη των δακτυλιοειδών ελασμάτων με βήμα 5mm. Η δεύτερη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων αφορά την επίδραση της αλλαγής της διαμέτρου του κοχλία.

Στο δεύτερο μέρος της παρούσας διπλωματικής μελετάται ολόκληρη η σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας. Δημιουργείται κατάλληλο αριθμητικό προσομοίωμα από επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία το οποίο αποτελείται από τη μέση επιφάνεια του άνω και κάτω δακτυλιοειδούς ελάσματος της σύνδεσης, τους κοχλίες και ένα μεγάλο τμήμα του πυλώνα ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση του πυλώνα στη μεταφορά των δυνάμεων στην υπό μελέτη σύνδεση. Εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για το προσομοίωμα αυτό και στη συνέχεια οι ορθές τάσεις που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος και πυλώνα συγκρίνονται και με τη χρήση αναλυτικής μεθόδου. Τέλος, πραγματοποιούνται και πάλι παραμετρικές αναλύσεις για να διερευνηθεί η επιρροή τους στη συμπεριφορά ολόκληρης της σύνδεσης. Στην πρώτη παραμετρική ανάλυση, εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής του πάχους των δακτυλιοειδών ελασμάτων, συγκρίνοντας τρία διαφορετικά προσομοιώματα στα οποία τα πάχη των δακτυλιοειδών ελασμάτων μεταβάλλονται με βήμα 20mm, ενώ στη δεύτερη ομάδα παραμετρικών αναλύσεων εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής της δύναμης προέκτασης που επιβάλλεται στους κοχλίες της σύνδεσης.

2 ΠΥΛΩΝΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο πυλώνας μιας ανεμογεννήτριας είναι ο κύριος φορέας, η οποία στηρίζει τον δρομέα, τη μετάδοση ισχύος και τα συστήματα ελέγχου. Το ύψος του καθορίζει το μέγεθος των πτερυγίων επομένως και το μέγεθος της ηλεκτρικής ενέργειας που θα παραχθεί. Μια επιτυχημένη δομική σχεδίασμού του πυλώνα, θα πρέπει να διασφαλίζει τον αποτελεσματικό, ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό του καθολικού συστήματος ανεμογεννήτριας.

Στο πλαίσιο των ανεμογεννητριών, ο πυλώνας αποτελεί ένα συστατικό χαμηλής τεχνολογίας, του οποίου ο σχεδιασμός είναι εύκολος στη βελτιστοποίηση και ως εκ τούτου - κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδίασμού - προσφέρεται εύκολα ως αντικείμενο για ενδεχόμενη μείωση του κόστους. Αυτό μπορεί να είναι χρήσιμο καθώς το κόστος ενός πυλώνα αποτελεί συνήθως ένα σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους μιας ανεμογεννήτριας.

Οι ψηλότεροι πυλώνες επιτρέπουν τη θέση των στροβίλων σε λιγότερο παραχώδεις ανέμους, μειώνοντας έτσι τη φθορά και την κόπωση. Επιπλέον, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση αφού η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος και άρα γίνεται καλύτερη ή μεγαλύτερη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Όσο υψηλότερος είναι ο πυλώνας, τόσο μεγαλύτερο το ποσό της ενέργειας που παράγεται. Για παράδειγμα, με αύξηση κατά 20 μέτρα από το ένα πρότυπο ύψος 80 μέτρων μπορεί να επιτευχθεί μία επιπλέον παραγωγή ενέργειας γύρω στο 5%. Κατά τα τελευταία χρόνια παρατηρείται η τάση για κατασκευή ολοένα και υψηλότερων πυλώνων. Αυτό συμβαίνει διότι ψηλότερα υπάρχει καλύτερο διαθέσιμο αιολικό δυναμικό και μειώνεται η επιρροή των εμποδίων του εδάφους, όπως δέντρων και κτηρίων, που δημιουργούν αναταράξεις στην ροή του ανέμου. Στο μέλλον αναμένονται ακόμα ψηλότεροι πυλώνες, καθώς στην ώριμη πλέον αγορά αιολικής ενέργειας οι πιο παραγωγικές θέσεις έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί. Παρόλα αυτά οι ψηλοί πυλώνες έχουν και μειονεκτήματα όπως είναι η δυσκολία στη μεταφορά τους, τη συναρμολόγησή τους, την ανέγερσή τους και τη συντήρηση των συστατικών μερών της ανεμογεννήτριας. Πιο συγκεκριμένα, αν απαιτείται ύψος πυλώνα πάνω από 100m και η κεφαλή ζυγίζει μερικούς τόνους, η διάμετρος στη βάση του πυλώνα θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 5m. Έτσι, το κόστος του πυλώνα μπορεί να αυξηθεί, φθάνοντας να αποτελεί έως και το 20% του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας.

Συνεπώς, θεωρητικά το βέλτιστο ύψος πυλώνα θα ήταν αυτό με το οποίο επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη δυνατή απόδοση με το μικρότερο δυνατό κόστος. Παρόλα αυτά, αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Για παράδειγμα, σε ανεμογεννήτριες με ψηλούς πυλώνες, το κόστος του πυλώνα αυξάνεται με

γρηγορότερο ρυθμό αυξάνοντας το ύψος του σε αντίθεση με ανεμογεννήτριες με μικρό ύψος. Επίσης σε περιοχές με υψηλό βαθμό επιφανειακής τραχύτητας, η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται γρηγορότερα με το ύψος σε αντίθεση με χερσαίες περιοχές.

Τέλος, μια ακόμα σημαντική παράμετρος για το βέλτιστο σχεδιασμό του πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας είναι η δυσκαμψία του πυλώνα για την οποία καθοριστικός παράγοντας είναι το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί στον πυλώνα. Άρα ο πυλώνας μπορεί να κατασκευαστεί από διάφορα υλικά, με διαφορετικούς σχεδιασμούς. Οι πύργοι για μεγάλες ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται συνήθως από χάλυβα, αλλά μερικές φορές χρησιμοποιούνται πύργοι από σκυρόδεμα. Σήμερα, οι περισσότεροι πύργοι είναι σωληνοειδείς πύργοι, ωστόσο, πύργοι δικτυώματος είναι επίσης σε χρήση.

2.2 ΤΥΠΟΙ ΠΥΛΩΝΑ

Οι πρώτοι τύποι ανεμογεννητριών, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι οι ανεμόμυλοι. Οι πρώτοι ανεμόμυλοι στην Ευρώπη δημιουργήθηκαν κυρίως από ξύλο, και στη συνέχεια οι κατασκευαστές άρχισαν να σχεδιάζουν πιο ανθεκτικές κατασκευές. Αυτές αποτελούνται από μια ψηλή κατακόρυφη δομή από πέτρα ή τούβλο στην οποία στεγάζεται μια ξύλινη δομή οροφής, που θα μπορούσε να περιστραφεί και να πιάσει περισσότερο αέρα όπως απαιτείται. Αργότερα, αναγνωρίζοντας περισσότερο τα πλεονεκτήματα των ψηλών πυλώνων, οι μύλοι γίνονταν πιο ψηλοί και πιο λιγυροί ομοιάζοντας σε πύργο. Πλέον, οι πυλώνες των ανεμογεννητριών κατασκευάζονται από δύο κυρίως υλικά, το χάλυβα και το σκυρόδεμα. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι πυλώνων είναι οι παρακάτω: ^[8]

2.2.1 Δικτυωτοί πυλώνες

Οι πυλώνες με δικτύωμα κατασκευάζονται με τη χρήση προφίλ από συγκολλημένο χάλυβα ή προφίλ χάλυβα διατομής L. Αποτελούνται από δικτυώματα τριών διαστάσεων και επιτρέπουν στον άνεμο να διέρχεται από τα τμήματα της βάσης και του πύργου μειώνοντας την πίεση και την αντίσταση στη δομή. Οι πυλώνες αυτοί μοιάζουν με τον παραδοσιακό πύργο τηλεπικοινωνιών. Μερικά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των δικτυωτών πυλώνων μιας ανεμογεννήτριας είναι:

Πλεονεκτήματα:

- Απαιτείται μικρός εξοπλισμός κατασκευής.
- Απαιτείται λιγότερη εργασία συγκόλλησης. Υψηλή διαδικασία αυτοματισμού.
- Ο σχεδιασμός είναι πιο ευέλικτος. Με την αλλαγή του χάλυβα και με τη διεύρυνση του χώρου, μπορεί να κατασκευαστεί διαφορετικός πύργος ανεμογεννητριών για να καλύψει διαφορετικές ανάγκες.
- Η μεταφορά είναι ευκολότερη.
- Το κόστος παραγωγής είναι χαμηλότερο κατά 20% από αυτό των χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων.
- Απαιτεί μόνο περίπου το μισό υλικό από τον ελεύθερο σωληνοειδή πύργο άρα έχει μικρότερο βάρος με παρόμοια δυσκαμψία.

Μειονεκτήματα:

- Η καλωδίωση και ο άλλος μηχανισμός στήριξης χρειάζονται πρόσθετη προστασία.
- Η οπτική τους εμφάνιση.
- Το κόστος συντήρησης και συναρμολόγησης είναι υψηλότερο από αυτό των χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων.

Για αισθητικούς λόγους, ο δικτυωτοί πυλώνες έχουν σχεδόν εξαφανιστεί από τη χρήση για μεγάλες, σύγχρονες ανεμογεννήτριες και χρησιμοποιούνται ως εναλλακτική λύση όταν πρόκειται για ψηλές και μεγάλες ανεμογεννήτριες σε νησιωτικές περιοχές.



Σχήμα 2-1: Δικτυωτός πυλώνας ανεμογεννήτριας (Πηγή:www.en.wind-turbine-models.com)

2.2.2 Χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες με καλώδια

Οι πυλώνες αυτοί διαθέτουν εκτός από τον χαλύβδινο σωληνωτό πυλώνα, αγκυρούμενα χαλύβδινα καλώδια ή δύσκαμπτα δικτυώματα τα οποία είναι συνδεδεμένα στον πύργο ακριβώς κάτω από τον στρόφρα του στροβίλου^[9]. Μερικά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτού του είδους πυλώνων είναι τα ακόλουθα:

Πλεονεκτήματα:

- Ψηλότεροι πυλώνες μπορούν να κατασκευαστούν με μικρότερη διατομή.
- Ενισχύεται η καμπτική δυσκαμψία του πυλώνα.
- Τα τμήματα του πυλώνα είναι καλά τοποθετημένα εντός των χερσαίων περιορισμών μεταφοράς.
- Επιτυγχάνεται χαμηλότερη κατανάλωση χάλυβα.

Μειονεκτήματα:

- Υψηλό κόστος λόγω του υψηλού κόστους των αγκυριών και των πρόσθετων θεμελίων ακύρωσης που απαιτούνται για την ανέγερση τους.
- Δυσκολία πρόσβασης στους πυλώνες αφού τα αγκύρια αυτά αποτελούν εμπόδια. Αυτό είναι ένα σημαντικό πρόβλημα κυρίως στις αγροτικές περιοχές.
- Πυλώνας επιρρεπής σε βανδαλισμούς, θέτοντας έτσι σε κίνδυνο τη συνολική ασφάλεια.



Σχήμα 2-2: Χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες ανεμογεννητριών με καλώδια
(Πηγή:Μεταπτυχιακή Εργασία Αικατερίνας Η. Νταιφιώτη)

2.2.3 Πυλώνες από σκυρόδεμα

Χρησιμοποιήθηκαν για τις πρώτες πειραματικές ανεμογεννήτριες στη Δανία. Σήμερα, οι πυλώνες από σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται όταν το απαιτούμενο ύψος ξεπερνά τα 80m. Μερικά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτού του είδους πυλώνων είναι τα ακόλουθα:

Πλεονεκτήματα:

- Ιδανικοί για ψηλούς πυλώνες και μεγάλους δρομείς.
- Μείωση του κόστους μεταφοράς και άμεση διαθεσιμότητα αφού γίνεται επιτόπου σκυροδέτηση.
- Μεγάλη διάρκεια.
- Χαμηλό κόστος, ειδικά στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένα προεντεταμένα τμήματα από σκυρόδεμα.

Μειονεκτήματα:

- Αύξηση της συνολικής μάζας.
- Μεγαλύτερο βάρος.
- Απαίτηση μεγαλύτερων θεμελίων.



Σχήμα 2-3: Πυλώνας ανεμογεννήτριας από ωπλισμένο σκυρόδεμα (Πηγή: www.windpowerengineering.com)

2.2.4 Αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες

Οι αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες είναι οι πιο κοινοί τύποι πύργων στον κόσμο. Έχουν μικρή μάζα με αποτέλεσμα να μειώνεται και η μάζα της κατασκευής και συνεπώς το κόστος της. Στη συνέχεια θα αναφερθεί εκτενέστερα αυτό το είδος πυλώνα μιας και είναι αυτό με το οποίο ασχολείται η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.



Σχήμα 2-4: Αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες ανεμογεννητριών (Πηγή: www.wikipedia.org)

2.2.5 Υβριδικοί πυλώνες από οπλισμένο σκυρόδεμα και χάλυβα

Οι υβριδικοί πυλώνες κατασκευάζονται από χάλυβα και σκυρόδεμα και είναι ιδανικοί για ψηλότερες ανεμογεννήτριες, αφού συνδυάζουν αυτά τα δύο υλικά. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται σκυρόδεμα για το ευρύ κάτω μέρος και χάλυβας στο άνω μέρος του πυλώνα. Στο άνω μέρος σχεδιάζεται ένας συμβατικός χαλύβδινος σωληνοειδής πυλώνας χωρίς να υπάρχει κίνδυνος σύγκρουσης με τους περιορισμούς μεταφοράς, καθώς θα έχει μικρότερο ύψος και συνεπώς μικρότερη διάμετρο βάσης.

Πλεονεκτήματα:

- Ευκολότερος ο σχεδιασμός του μέρους του σκυροδέματος ώστε να πάρει τις ιδιοσυχνότητες που θέλουμε.
- Εφαρμογή σε κράτη όπου το κόστος του χάλυβα είναι πολύ ψηλό (όπως για παράδειγμα στην Βραζιλία).
- Μείωση του συνολικού κόστους λόγω μικρότερων διαστάσεων των τμημάτων του μεταλλικού πυλώνα.
- Ευκολότερη μεταφορά λόγω μικρότερων διαστάσεων των τμημάτων του μεταλλικού πυλώνα.

Μειονεκτήματα:

- Αυξημένο βάρος.
- Επιπλέον κόστος που αφορά τη σύνδεση του τμήματος από σκυρόδεμα με το τμήμα του χαλύβδινου πυλώνα.



Σχήμα 2-5: Υβριδικός πυλώνας ανεμογεννήτριας από οπλισμένο σκυρόδεμα και χάλυβα (Πηγή:www.suzlon.com)



Σχήμα 2-6: Κύρια είδη πυλώνων ανεμογεννήτριας (Πηγή:www.steelwindtower.com)

2.3 ΑΥΤΟΝΟΜΟΙ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΙ ΣΩΛΗΝΩΤΟΙ ΠΥΛΩΝΕΣ

Οι αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες είναι οι πιο κοινοί τύποι πυλώνων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σύγχρονων ανεμογεννητριών. Οι πυλώνες αυτοί μπορεί να αποτελούνται από ένα τμήμα αν έχουν ύψος μέχρι και 20m. Όταν όμως το ύψος τους φτάνει τα 100m οι πυλώνες αυτοί κατασκευάζονται από επιμέρους τμήματα ώστε να διευκολύνεται η μεταφορά τους. Στα τμήματα αυτά συγκολλούνται δακτυλιοειδή ελάσματα στο εργοστάσιο τα οποία στη συνέχεια συνδέονται κοχλιωτά στο εργοτάξιο. Συνήθως, όλος ο πυλώνας είναι σε κωνικό σχήμα, που σημαίνει ότι η διάμετρος κάθε τμήματος μειώνεται καθώς το ύψος του πυλώνα αυξάνεται. Όπως όλα τα είδη πυλώνων ανεμογεννήτριας, έτσι και αυτό, έχει τα μειονεκτήματά του αλλά όμως έχει ακόμα περισσότερα πλεονεκτήματα, τα οποία δικαιολογούν την ευρεία χρήση του.

Πλεονεκτήματα:

- Μεγάλη αντοχή λόγω της χρήσης χάλυβα.
- Ο απαιτούμενος ανυψωτικός εξοπλισμός πρέπει να έχει μια μικρή ανυψωτική ικανότητα της τάξεως των 30-60 τόνων.
- Μικρός χρόνος επιτόπου συναρμολόγησης και εγκατάστασης, ίσος περίπου με 1-2 ημέρες.
- Τα εσωτερικά μέρη είναι καλά προστατευμένα λόγω της κλειστής δομής του πυλώνα.
- Μεγάλη αντοχή σε φορτία ανέμου.
- Χαμηλή τιμή χάλυβα στη σημερινή εποχή.

Μειονεκτήματα:

- Δυσκολία στην κατασκευή μεγαλύτερων και ψηλότερων πυλώνων. Υπάρχει περιορισμένη ικανότητα ανύψωσης όταν απαιτείται γερανός για να ανυψώσει τμήματα βάρους μεγαλύτερου των 100 τόνων.
- Η μεταφορά περιορίζεται από το μέγεθος του οχήματος και από τις διαστάσεις και την κατάσταση του δρόμου.
- Υψηλό κόστος μεταφοράς.
- Η αντοχή στη διάβρωση μπορεί να είναι δαπανηρή.
- Απαιτήση περιβάλλοντος με σταθερή θερμοκρασία και υγρασία.
- Απαιτήση μεγάλου εργοστασίου για την κατασκευή του πυλώνα μεγάλου ύψους λόγω του μεγέθους του.



Σχήμα 2-7: Επιμέρους τμήματα αυτόνομων χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων (Πηγή:www.lagerwey.com)

2.3.1 Παράμετροι σχεδιασμού

Μία απλή και ασφαλής λύση σχεδιασμού είναι ένας δύσκαμπτος πυλώνας, που όμως έχει το μειονέκτημα ότι αυξάνεται αρκετά η μάζα του πυλώνα. Για το λόγο αυτό, σε ανεμογεννήτριες όπου το ύψος του πυλώνα ξεπερνά τα 80m, θα πρέπει η δυσκαμψία να είναι χαμηλή, με την προϋπόθεση ότι αυτό είναι τεχνικά εφικτό, ώστε να διατηρείται το κόστος σε χαμηλά επίπεδα. Συνεπώς, η διαστασιολόγηση ενός πυλώνα καθορίζεται από ορισμένες απαιτήσεις που αφορούν την αντοχή και τη δυσκαμψία του και οι κυριότερες παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό είναι οι ακόλουθες:

- **Η αντοχή έναντι αναπτυσσόμενων τάσεων:** Ο πυλώνας θα πρέπει να έχει επαρκή αντοχή σε θραύση ώστε να μπορεί να αντισταθεί στις ακραίες ταχύτητες του ανέμου. Συνήθως, το φορτίο θραύσης είναι αυτό που θα δώσει την καμπτική ροπή που δρα στην βάση του πυλώνα.
- **Η αντοχή σε κόπωση:** Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να ικανοποιείται η αντοχή σε κόπωση για διάρκεια ζωής 20 έως 30 χρόνια λειτουργίας. Η ώθηση του ρότορα προκαλεί κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας δυναμικό φορτίο το οποίο καθορίζει την αντοχή των λυγερών πυλώνων σε κόπωση. Επιπλέον, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και τα πρόσθετα φορτία που προκαλούνται από τυχόν δονητική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας σε περιπτώσεις συντονισμού.
- **Η δυσκαμψία του πυλώνα:** Είναι συνήθως το σημαντικότερο κριτήριο για τη διαστασιολόγηση του πυλώνα αφού καθορίζει το απαραίτητο πάχος τοιχώματος.
- **Η αντοχή σε λυγισμό:** Η αντίσταση σε τοπικό λυγισμό του τοιχώματος του πυλώνα είναι μια ιδιαίτερη κρίσιμη παράμετρος κυρίως στους λεπτότοιχους χαλύβδινους σωληνωτούς πυλώνες. Πλέον, λόγω βελτιστοποίησης του αυξανόμενου βάρους στους σύγχρονους χαλύβδινους σωληνωτούς πυλώνες, η αντοχή σε λυγισμό είναι αυτή που καθορίζει το απαιτούμενο πάχος του τοιχώματος του πυλώνα.
- **Οι διαστάσεις:** Η δυσκολία στη μεταφορά των πυλώνων δημιουργεί ορισμένους περιορισμούς. Η εξωτερική διάμετρος του πύργου καλό θα ήταν να μην ξεπερνάει τα 4.50m ενώ, λόγω του περιορισμένου χάλυβα που μπορεί να επεξεργαστεί σε κύλινδρο ο βασικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του, το πάχος δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 50mm.
- **Η μετατόπιση της κορυφής του πύργου:** Η μέγιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση της

κορυφής του πύργου, τίθεται 1,00% του ύψους του πύργου ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική κίνηση του πύργου, πράγμα που θα παρεμπόδιζε την ομαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

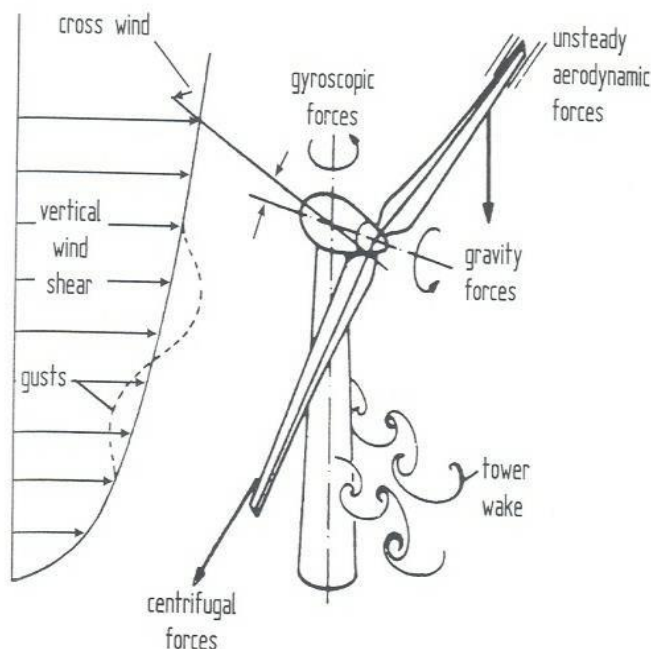
- **Θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα:** Για την αποφυγή του φαινομένου του συντονισμού, η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα της κατασκευής πρέπει να απέχει από τις συχνότητες διέγερσης στη φάση λειτουργίας του ρότορα της ανεμογεννήτριας. Συνηθισμένες τιμές για συχνότητες λειτουργίας είναι ανάμεσα σε 0.23Hz με 0.52Hz για μικρές ανεμογεννήτριες, και 0.10Hz με 0.30Hz για μεγάλες ανεμογεννήτριες.

2.3.2 Φορτία σχεδιασμού

Τα κύρια φορτία σχεδιασμού του πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας είναι τα εξής:

- **Το ίδιο βάρος του πύργου:** Αποτελείται από το βάρος της κεφαλής του πύργου, δηλαδή το βάρος της νασέλας και του δρομέα, τα οποία δίνονται από την κατασκευάστρια εταιρία της ανεμογεννήτριας, καθώς και από το ίδιο βάρος του πυλώνα. Τα δύο αυτά φορτία καθορίζουν το στατικό φορτίο, ενώ σημαντικό ρόλο στην τιμή αυτού του φορτίου παίζει το σύστημα έλεγχου των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι γνωστά με τις ονομασίες pitch control ή stall control.
- **Ο άνεμος:** Ο άνεμος είναι το φορτίο που προκαλεί μια αεροδυναμική ώθηση του πυλώνα.

Γενικά, οι δράσεις που σχετίζονται με τον άνεμο αποτελούν την αιτία των δύο πιο συνηθισμένων τύπων δομικών βλαβών, της βλάβης του λαιμού του κελύφους του πύργου και της κόπωσης στις συνδέσεις του, λόγω της δυναμικής φύσης του φορτίου ανέμου. Έτσι, ο σχεδιασμός του πύργου οδηγείται κυρίως από τη δύναμη ενάντια στο λυγισμό και την κόπωση. Ωστόσο, για πύργους ανεμογεννητριών σημαντικού ύψους και μάζας στην κορυφή, ο συντονισμός μπορεί να καταστεί κρίσιμος σε σύγκριση με άλλους ελέγχους σχεδιασμού και πρέπει επίσης να διερευνηθεί.



Σχήμα 2-7: Φορτία ανεμογεννήτριας (Πηγή:www.researchgate.net)

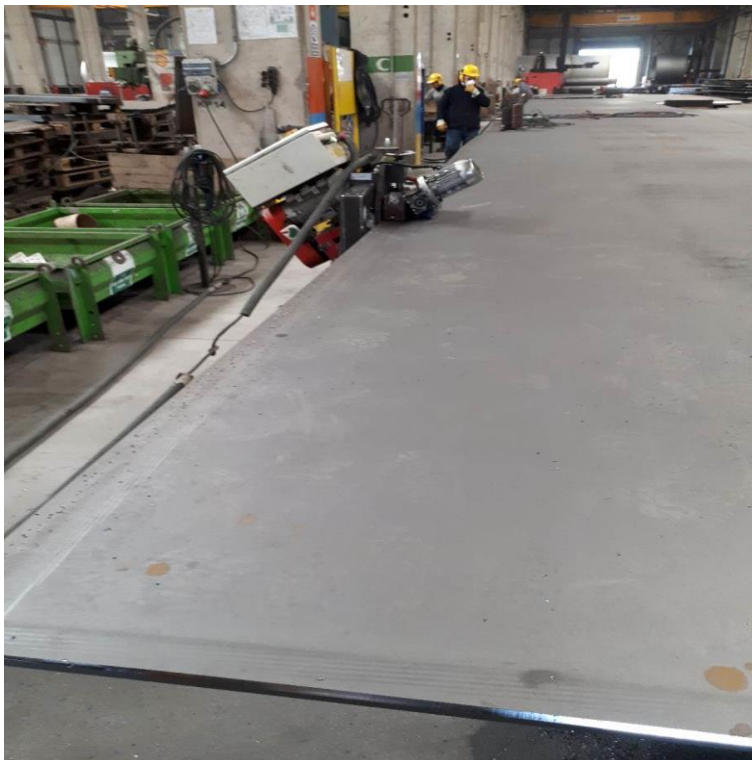
2.3.3 Διαδικασία παραγωγής και κατασκευής

Όπως προαναφέρθηκε ο σωληνωτός πυλώνας από χάλυβα, ο οποίος αποτελείται από έναν αριθμό κυλινδρικών και/ή κωνικών κελυφών είναι ο πλέον χρησιμοποιούμενος τύπος πύργου ανεμογεννήτριας. Οι κωνικοί σωληνοειδείς πύργοι σταδιακά στενεύουν προς την κορυφή, αφού η διάμετρός τους μειώνεται από τη βάση προς την κεφαλή. Αυτός ο τύπος πυλώνα είναι και ο βέλτιστος αφού μειώνεται η συνολική μάζα και ταυτόχρονα επιτυγχάνεται η απαιτούμενη δυσκαμψία. Επίσης, οι πυλώνες αυτοί είναι εύκολο και γρήγορο να ανεγερθούν και απαιτούν χαμηλή συντήρηση καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους.

Περίληπτικά, η κατασκευή τους επιτυγχάνεται με πλατιές χαλύβδινες πλάκες ψυχρής καμπύλης στο επιθυμητό κωνικό σχήμα, συγκόλληση των δύο άκρων, για να ληφθεί ένα κλειστό κωνικό κέλυφος, συνήθως μήκους 2.50m έως 3.00 m, όπως επιβάλλεται από την βιομηχανική συγκόλληση διαδοχικών κομματιών κελύφους μαζί, ώστε να δημιουργηθούν περιβλήματα μήκους 15m έως 30m και πάχους 10mm-50mm. Οι διαστάσεις αυτές επιβάλλονται από περιορισμούς μεταφορικής ικανότητας, δηλαδή για τη μεταφορά αυτών των τμημάτων στο αιολικό πάρκο και την ανύψωσή τους με γεραμούς ή ελικόπτερα. Όταν το ύψος του πυλώνα ξεπερνάει τα 90m, η διάμετρος της βάσης είναι μεγαλύτερη από 4.50m και το πάχος μπορεί να ξεπεράσει τα 40mm. Συνεπώς, σε αυτές τις περιπτώσεις το κουρμπάρισμα των φύλλων χάλυβα θα γίνει σε ειδικά μηχανήματα και τα χαμηλά τμήματα του πυλώνα δεν θα μπορούν να μεταφερθούν οδικώς.

Αναλυτικότερα, η διαδικασία παραγωγής των χαλύβδινων πυλώνων ανεμογεννήτριας αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα.

- i. Διαμόρφωση των ακμών (φρεζάρισμα) επίπεδων ελασμάτων πλάτους περίπου 2m ως 3m. (Εικόνες 2-8, 2-9)
- ii. Καμπύλωση των επίπεδων ελασμάτων με ψυχρή έλαση, ώστε να αποκτήσουν το επιθυμητό κυλινδρικό σχήμα με διάμετρο που συνήθως κυμαίνεται περί τα 3m ως 4m. (Εικόνα 2-10)



Σχήμα 2-8: Διαμόρφωση των ακμών (φρεζάρισμα) επίπεδων ελασμάτων (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)



Σχήμα 2-9: Επίπεδα ελάσματα με διαμορφωμένες (φρεζαρισμένες) ακμές (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)



Σχήμα 2-10: Διαδικασία καμπύλωσης επίπεδων ελασμάτων (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)

- iii. Συγκόλληση της κοινής ακμής των ελασμάτων αυτών με διαμήκη εσωραφή πλήρους διείσδυσης ώστε να δημιουργηθεί ένα κλειστό κέλυφος.



Σχήμα 2-11: Δημιουργία κλειστού κυλινδρικού κελύφους με διαμήκη εσωραφή πλήρους διείσδυσης (εσωτερική πλευρά) (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)



Σχήμα 2-12: Δημιουργία κλειστού κυλινδρικού κελύφους με διαμήκη εσωραφή πλήρους διείσδυσης (εξωτερική πλευρά) (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)



Σχήμα 2-13: Κυλινδρικά τμήματα διαμέτρου 3m ως 4m και ύψους 2m ως 3m (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)

iv. Συγκόλληση στις άκρες κάποιων από αυτά τα τμήματα δακτυλιοειδών πελμάτων για τη σύνδεση με άλλα τμήματα ή με την θεμελίωση.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στους σύγχρονους πυλώνες, τα δακτυλιοειδή πέλατα είναι εσωτερικά, καθώς η διάμετρος του πυλώνα έχει διαστάσεις, που επιτρέπουν την παρουσία των τεχνικών στο εσωτερικό του πυλώνα και την πραγματοποίηση της σύνδεσης.



Σχήμα 2-14: Δακτυλιοειδές πέλαμα σύνδεσης μεταξύ διαδοχικών τμημάτων πυλώνων ανεμογεννητριών (οπές για απλή σειρά κοχλιών) (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)



Σχήμα 2-15: Κυλινδρικά τμήματα με συγκολλημένα δακτυλιοειδή πέλματα στο ένα άκρο
(Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)

- v. Συγκόλληση κυλινδρικών τμημάτων μεταξύ τους με περιφερειακές εσωραφές πλήρους διείσδυσης, ώστε να δημιουργηθεί ένα κυλινδρικό κέλυφος μεγαλύτερου μήκους, περίπου 20m ως 30m, με κριτήριο τη δυνατότητα μεταφοράς και ανέγερσής του και με δακτυλιοειδή πέλματα στα δύο άκρα του.



Σχήμα 2-16: Συγκόλληση διαδοχικών κυλινδρικών τμημάτων μεταξύ τους (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)



Σχήμα 2-17: Κυλινδρικό τμήμα μήκους 20m ως 30m με συγκολλημένα δακτυλιοειδή πέλαμα στα άκρα του (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)

vi. Διάνοιξη οπής ανθρωποθυρίδας και συγκόλληση ενισχυτικού πλαισίου.

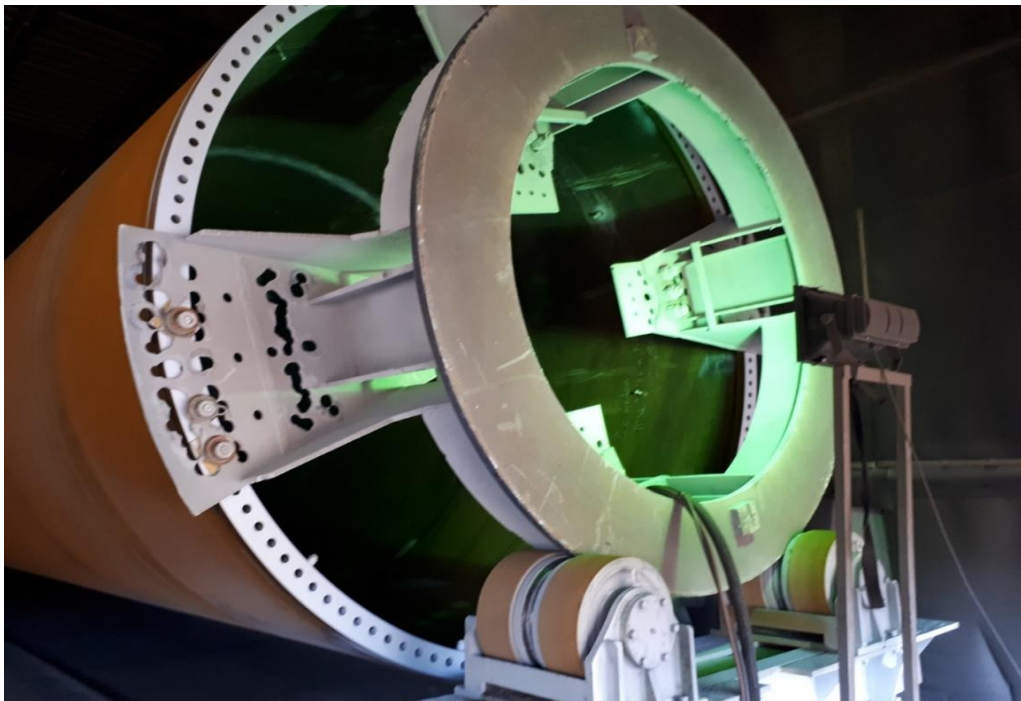


Σχήμα 2-18: Τμήμα που αποκόπτεται μετά τη διάνοιξη οπής ανθρωποθυρίδας (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)



Σχήμα 2-19: Κυλινδρικό τμήμα με διανοιγμένη και ενισχυμένη οπή ανθρωποθυρίδας (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)

vii. Τοποθέτηση προσωρινών ακραίων στοιχείων για τη μεταφορά.



Σχήμα 2-20: Τοποθέτηση προσωρινών ακραίων στοιχείων για τη μεταφορά (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)

viii. Βαφή με δύο και τρεις στρώσεις.



Σχήμα 2-21: Κυλινδρικό τμήμα μήκους 20m έως 30m μετά τη βαφή (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)

ix. Τοποθέτηση θυρών, κλιμάκων, πλατφορμών και απαραίτητων βοηθητικών εξαρτημάτων.

Ειδικότερα, θα πρέπει να προβλέπονται ορισμένες εσωτερικές εγκαταστάσεις ώστε να επιτυγχάνεται η ασφαλής πρόσβαση στην άτρακτο ώστε να τοποθετηθούν ειδικές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις όπως τα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στη βάση του πυλώνα. Επίσης, ανάλογα με το ύψος του πυλώνα τοποθετούνται καθ' ύψος ενδιάμεσες πλατφόρμες, συνήθως μία σε κάθε τμήμα του πυλώνα. Τέλος, για ύψη πυλώνων 60-70m χρησιμοποιούνται απλές κάθετες σκάλες για την ανάβαση ενώ σε κάποιες περιπτώσεις, σε πυλώνες ύψους μεγαλύτερου των 80m, εγκαθίστανται ανελκυστήρες αναρρίχησης.



Σχήμα 2-22: Τοποθέτηση θύρας ανθρωποθυρίδας (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)

χ. Μεταφορά από το εργοστάσιο βιομηχανοποίησης στη θέση ανέγερσης.



Σχήμα 2-23: Μεταφορά τμημάτων πυλώνα ανεμογεννητριών (Πηγή:Εταιρεία Ates Wind Power)

xi. Όπλιση και σκυροδέτηση θεμελίου και τοποθέτηση αγκυριών.

Οι συνθήκες εδάφους στην τοποθεσία εγκατάστασης του πυλώνα καθορίζουν συνήθως εάν θα επιλεγεί επιφανειακή θεμελίωση ή θεμελίωση με πασσάλους. Αρχικά, τα φορτία που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαστασιολόγηση της θεμελίωσης είναι τα μεγαλύτερα φορτία που δρουν στην ανεμογεννήτρια σε περίπτωση ακινητοποίησης και κυρίως η μέγιστη θεωρητική κανονιστική ταχύτητα του ανέμου. Επιπλέον, μια εξίσου σημαντική επαλληλία φορτίων που πρέπει να ληφθεί υπόψη στη διαστασιολόγηση είναι αυτή στην οποία συμμετέχουν τα μέγιστα φορτία κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Για παράδειγμα, η μέγιστη ροπή ανατροπής για τη θεμελίωση προσδιορίζεται με την ώθηση του ρότορα.

Χερσαίες ανεμογεννήτριες:

Θεμελιώνονται συνήθως είτε σε επιφανειακή θεμελίωση είτε σε βαθιά θεμελίωση μέσω πασσάλων. Μια επιφανειακή θεμελίωση προτιμάται συνήθως όταν το ανώτερο έδαφος είναι αρκετά ισχυρό για να αντέξει τα επιβαλλόμενα φορτία από την ανεμογεννήτρια. Το πέδιλο μπορεί να είναι είτε κυκλικό, είτε ορθογωνικό, είτε πολυγωνικό. Αντίθετα, μια θεμελίωση επί πασσάλων προτιμάται όταν το ανώτερο έδαφος είναι πιο χαμηλής ποιότητας οπότε τα φορτία πρέπει να μεταφερθούν σε μεγαλύτερα βάθη όπου υπάρχουν ισχυρότερα εδάφη για να παραλάβουν τα φορτία. Αυτός ο τρόπος θεμελίωσης αποτελείται από μια πλάκα έδρασης η οποία στηρίζεται πάνω σε πασσάλους.

Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες:

Το υπόβαθρο είναι μια πιο ολοκληρωμένη δομή, δεδομένου ότι περιλαμβάνει μια ξεχωριστή δομή για τη μεταφορά φορτίων από τον πυθμένα του πύργου ανεμογεννητριών μέσω του νερού στα εδάφη στήριξης. Εκτός από τα φορτία από την ανεμογεννήτρια, μια τέτοια δομή θεμελίωσης δέχεται και φορτία από ρεύμα, κύματα και πάγο λόγω της τοποθέτησής της σε θαλάσσιο περιβάλλον. Στις παράκτιες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικοί τρόποι θεμελίωσης:

- Μονοπάσσαλος
- Βάση βαρύτητας
- Τρίποδας



Σχήμα 2-24: Διαδικασία σκυροδέτησης θεμελίου ανεμογεννήτριας (Πηγή: www.hellinikimeletitiki.gr)



Σχήμα 2-25: Σκυροδετημένο θεμέλιο με τα αγκύρια να προεξέχουν ώστε να τοποθετηθεί το τεμάχιο βάσης (Πηγή: www.riley-group.com)

xii. Ανέγερση πυλώνα που πραγματοποιείται με χρήση γερανών και κοχλίωση των διαδοχικών τμημάτων μεταξύ τους μέσω των δακτυλιοειδών πελμάτων με προεντεταμένους κοχλίες .

Κατά την ανέγερση της ανεμογεννήτριας πρώτα κατασκευάζεται το θεμέλιο στο οποίο ενσωματώνεται το τμήμα θεμελίωσης του πυλώνα. Το κατώτερο τμήμα του πυλώνα κοχλιώνεται στο τμήμα θεμελίωσης και στη συνέχεια το επόμενο τμήμα του πυλώνα ανυψώνεται από το γερανό και πραγματοποιείται η σύνδεση. Οι κοχλίες τοποθετούνται με την κεφαλή τους προς τα κάτω και το περικόχλιο προς τα πάνω, έτσι ώστε σε περίπτωση χαλάρωσης και αστοχίας λόγω της εναλλασσόμενης φόρτισης, ο κοχλίας να γίνει αντιληπτός κατά τη συντήρηση, εφόσον θα πέσει κάτω. Η χρήση μη προεντεταμένων κοχλίων πρέπει να αποφεύγεται για λόγους κόπωσης, διότι ο κορμός μη προεντεταμένων κοχλίων υπόκειται σε διακύμανση τάσεων περίπου κατά μία τάξη μεγαλύτερη από αυτή των προεντεταμένων κοχλίων.



Σχήμα 2-26: Σύσφιγξη προεντεταμένων κοχλιών (Πηγή:www.ith.com)



Σχήμα 2-27: Ανέγερση με χρήση γερανών (Πηγή:www.wind-science.org)

xiii. Τέλος, τοποθετούνται η άτρακτος και τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, επίσης με χρήση γερανών και κοχλίωση επιτόπου.

Όσον αφορά την τοποθέτηση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, υπάρχουν δύο πιθανοί τρόποι τοποθέτησης, είτε κοχλιώνονται όλα τα πτερύγια στην άτρακτο στο έδαφος και στη συνέχεια όλο το σύστημα αυτό ανυψώνεται από γερανό και κοχλιώνεται στο ρότορα, είτε τοποθετείται πρώτα η άτρακτος στο ρότορα και στη συνέχεια ένα ένα τα πτερύγια.



Σχήμα 2-28: Ανέγερση ατράκτου (Πηγή:offshorewindindustry.com)



Σχήμα 2-29: Ανέγερση πτερυγίων (Πηγή:www.sarens.com)

3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΕΝΟΣ ΚΟΧΛΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο μελετάται η συμπεριφορά ενός προσομοιώματος βραχέος «L», του οποίου οι διαστάσεις προέκυψαν υπό κλίμακα από μια πραγματική σύνδεση πυλώνα ανεμογεννήτριας. Περιλαμβάνει έναν κοχλία και το τμήμα που του αντιστοιχεί από τα δακτυλοειδή πέλματα καθώς και ένα τμήμα του κελύφους του πυλώνα. Ειδικότερα χρησιμοποιούνται επιφανειακά στοιχεία για το τμήμα του δακτυλοειδούς ελάσματος και του πυλώνα, γραμμικά στοιχεία τύπου “κοχλία” για τον κοχλία και στοιχεία επαφής για τις διεπιφάνειες μεταξύ ελασμάτων και μεταξύ του κοχλία και των ελασμάτων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα του παραπάνω προσομοιώματος συγκρίνονται με τα αποτελέσματα ενός προσομοιώματος που αποτελείται από στοιχεία όγκου και με πειραματικά αποτελέσματα, τα οποία έχουν πραγματοποιηθεί και μελετηθεί στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής της υποψήφιας Διδάκτορος Κωνσταντίνας Κουλάτσου.

Επιπλέον, για τα προσομοιώματα με επιφανειακά στοιχεία, εξετάζεται η επίδραση του τύπου των παραμορφώσεων, μικρές ή μεγάλες (large and small strains), αλλά και η επίδραση του τρόπου προσομοίωσης της σύνδεσης μεταξύ του κελύφους του πυλώνα και του δακτυλοειδούς ελάσματος, ώστε να λαμβάνεται υπόψη το πάχος του ελάσματος. Σε όλα τα αριθμητικά προσομοιώματα επιβάλλεται το ίδιο φορτίο και πραγματοποιούνται μη γραμμικές στατικές αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα υλικού του κελύφους και του ελάσματος, τη μη γραμμικότητα γεωμετρίας, καθώς και τη μη γραμμικότητα της επαφής των δακτυλοειδών ελασμάτων της σύνδεσης και των κοχλίων με τα ελάσματα.

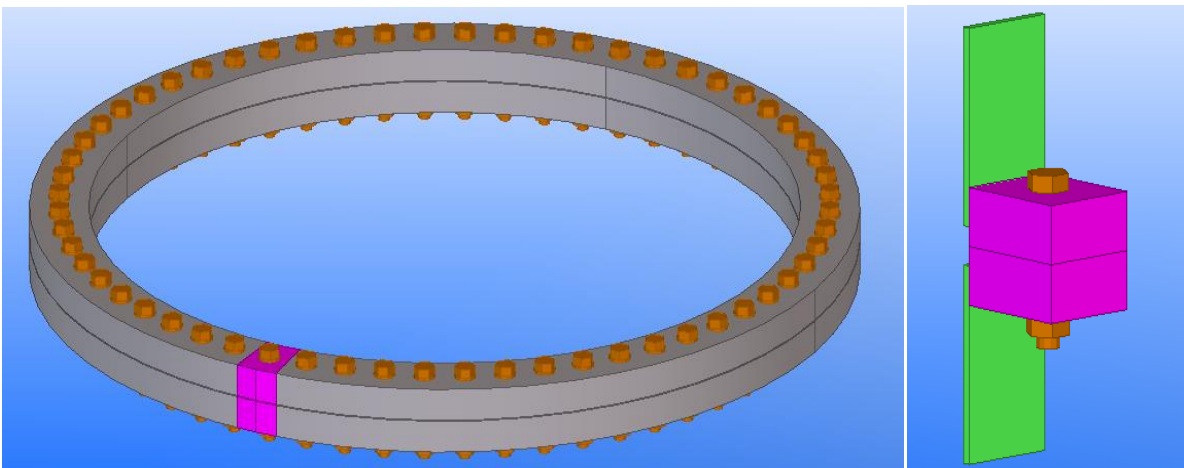
Συνεπώς, οι συγκρίσεις που θα παρουσιαστούν στο συγκεκριμένο κεφάλαιο συνοψίζονται ως εξής:

- Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων του προσομοιώματος επιφανειακών στοιχείων και του προσομοιώματος στοιχείων όγκου με τα πειραματικά αποτελέσματα.
- Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων του προσομοιώματος επιφανειακών στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των μεγάλων και των μικρών παραμορφώσεων.
- Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων του προσομοιώματος επιφανειακών στοιχείων για εναλλακτικούς τρόπους προσομοίωσης της σύνδεσης μεταξύ του κελύφους του πυλώνα και του δακτυλοειδούς ελάσματος.

3.2 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΓΚΟΥ

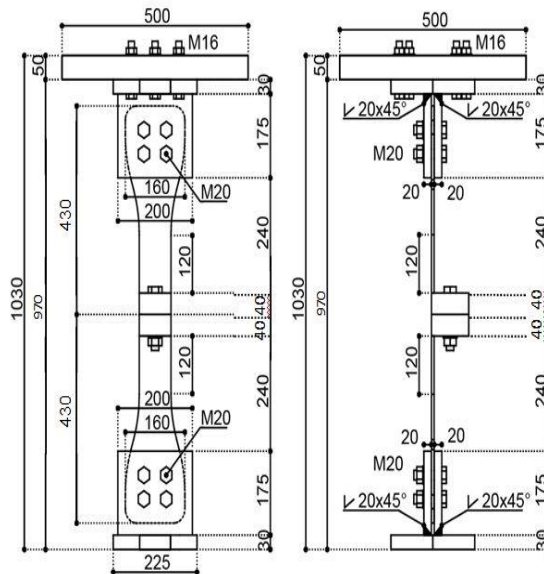
Το προσομοίωμα των επιφανειακών στοιχείων που θα περιγραφεί στη συνέχεια θα συγκριθεί με τα αποτελέσματα ενός αντίστοιχου πειραματικού δοκιμίου αλλά και αντίστοιχου προσομοιώματος με πεπερασμένα στοιχεία όγκου, τα οποία πραγματοποιήθηκαν από την υποψήφια Διδάκτορα Κωνσταντίνα Κουλάτσου στο πλαίσιο της διδακτορικής της διατριβής στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ και περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια.

Αρχικά, τα δοκίμια, που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα υπό στατική φόρτιση αποτελούν ένα μέρος της συνολικής σύνδεσης που περιλαμβάνει έναν κοχλία και το τμήμα που του αντιστοιχεί από τα δακτυλιοειδή πέλματα και το έλασμα του πυλώνα (Σχήμα 3-2). Οι διαστάσεις των δοκιμίων προέκυψαν υπό κλίμακα από μια πραγματική σύνδεση πυλώνα ανεμογεννήτριας. Πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές δοκιμές που αφορούν το πάχος του πέλματος, τη διάμετρο του κοχλία και τη θέση του κοχλία σε σχέση με το έλασμα του πυλώνα. Επίσης, για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της σύνδεσης, κατασκευάστηκαν δοκίμια με τους διάφορους τύπους συγκόλλησης μεταξύ πέλματος και ελάσματος πυλώνα, όπως απλή εσωραφή, εσωραφή με προέκταση του ελάσματος του πέλματος, διπλή εξωραφή και εξωραφή με προεξοχή του πέλματος.

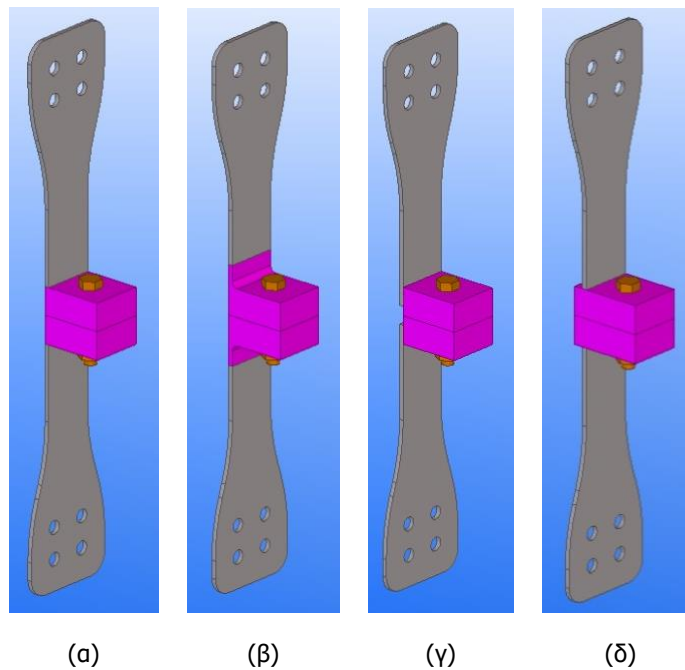


Σχήμα 3-2: Τμήμα σύνδεσης προς διερεύνηση

Αναλυτικότερα, το τμήμα της σύνδεσης που επιλέχθηκε για τη διερεύνηση (Σχήμα 3-3) αποτελείται από πέλματα πάχους 40mm, πλάτους 100mm και μήκους 80mm. Το έλασμα του πυλώνα έχει πάχος 6mm και ο χάλυβας είναι ποιότητας S235. Χρησιμοποιήθηκε προεντεταμένος κοχλίας M20 ποιότητας 10.9, ο οποίος προεντάθηκε με ροπή σύσφιγξης 600Nm. Τέλος, ο τύπος συγκόλλησης μεταξύ πέλματος και ελάσματος πυλώνα επιλέχθηκε να είναι απλή εσωραφή με προέκταση του ελάσματος του πέλματος μιας και αποτελεί τη συνηθέστερη μορφή συγκόλλησης στις ανεμογεννήτριες της πράξης. (Σχήμα 3-4β).



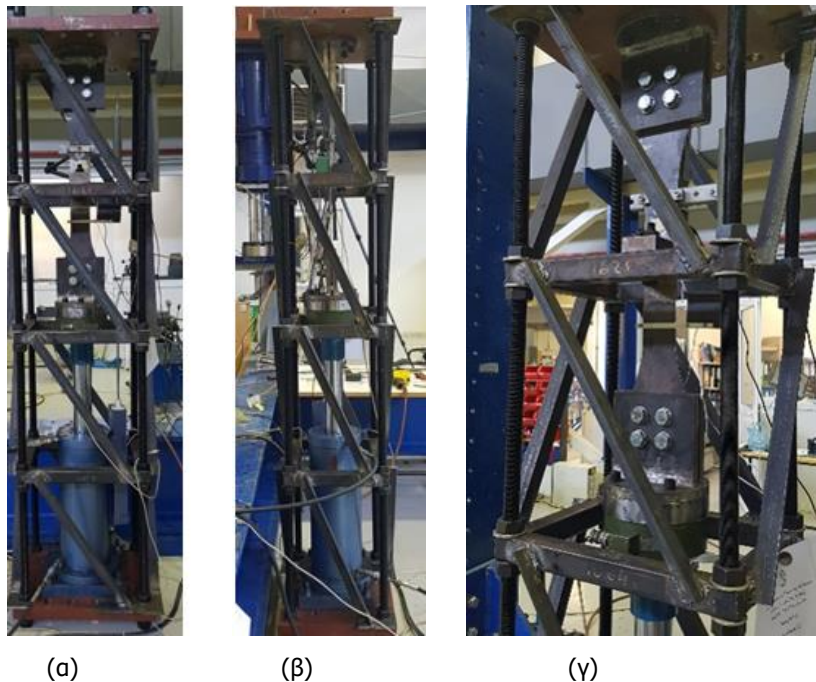
Σχήμα 3-3: Γεωμετρία πειραματικού δοκιμίου



Σχήμα 3-4: Διαφορετικοί τύποι δοκιμών με βάση τον τρόπο συγκόλλησης, (α) απλή εσωραφή (β) εσωραφή με προέκταση πέλματος (γ) διπλή εξωραφή (δ) εξωραφή με προεξοχή πέλματος

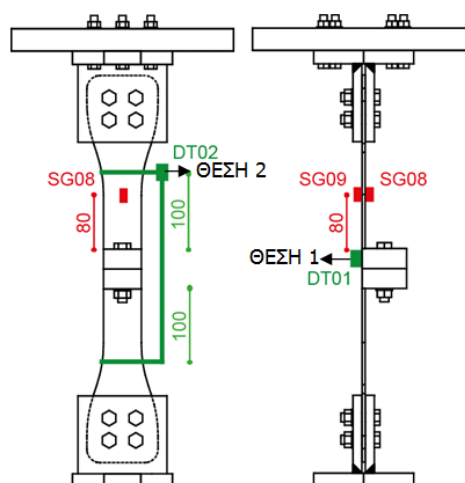
Στην πειραματική διάταξη (Σχήμα 3-5), το άνω τμήμα των δοκιμών είναι συνδεδεμένο σε ένα παχύ έλασμα μέσω διπλών πελμάτων και 4 προεντεταμένων κοχλιών M20 8.8 (ροπή προέντασης 300Nm), ώστε να θεωρείται ακλόνητο, ενώ το κάτω τμήμα είναι συνδεδεμένο με τα αντίστοιχα ελάσματα στο έμβολο. Το άνω και το κάτω μέρος της διάταξης συνδέονται μεταξύ τους με ντίζες διαμέτρου Ø33, οι οποίες είναι πυκνά εξασφαλισμένες για την αποφυγή λυγισμού τους κατά τη διάρκεια επιβολής της δύναμης. Για τη διαμόρφωση της σύνδεσης του δοκιμίου με το έμβολο και με την άνω πλάκα, το έλασμα του πυλώνα διευρύνθηκε ομαλά προκειμένου να διαμορφωθεί χώρος για τη σύνδεση αλλά και για να ομαλοποιηθεί η μεταφορά των τάσεων (Σχήμα 3-5). Το συνολικό ύψος της πειραματικής διάταξης πάνω από το έμβολο είναι περίπου 1.00m, το συνολικό ύψος κάθε τμήματος του δοκιμίου μαζί με τη διεύρυνση είναι 430mm, ενώ η διεύρυνση ξεκινά 120mm πάνω από το πέλμα. Το πλάτος

των τμημάτων αυτών από 80mm διευρύνεται στα 160mm. Στα πειράματα στατικής φόρτισης, προκειμένου να προσδιοριστεί η αντοχή, τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό μέχρι να αστοχήσει η συγκόλληση, ή ο κοχλίας ή το έλασμα του πυλώνα.



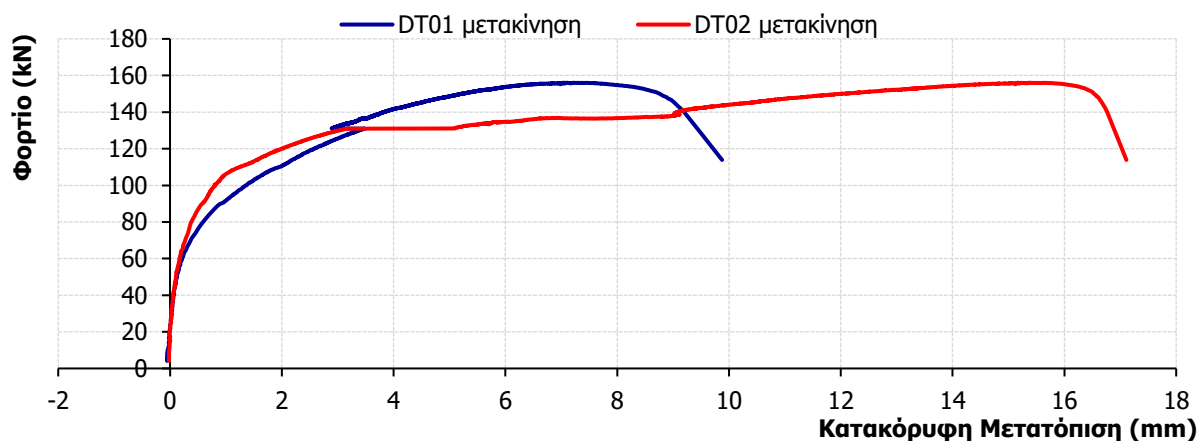
Σχήματα 3-5: Πειραματική διάταξη

Για την καταγραφή των μετρήσεων των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο μετρητές τάσεων (strain gauges), οι οποίοι τοποθετήθηκαν στο εμπρός (SG08) και πίσω μέρος (SG09) του ελάσματος του πυλώνα του άνω τμήματος του δοκιμίου, 80mm πάνω από το πέλμα (Σχήμα 3-6 **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**). Η τοποθέτηση των δύο μετρητών τάσεων στο ίδιο ύψος αλλά στις διαφορετικές παρειές του ελάσματος του πυλώνα κρίθηκε σκόπιμο να γίνει, έτσι ώστε να αποτυπωθεί κατά πόσο στο δοκίμιο επιβάλλεται και στροφή λόγω κάμψης. Για την καταγραφή των μετακινήσεων, τοποθετήθηκαν δύο επιμηκυνσιόμετρα, ένα στο πίσω μέρος του πέλματος (DT01)(Θέση 1), το οποίο αποτυπώνει το άνοιγμα μεταξύ των δύο πελμάτων, και ένα στο άνω τμήμα του δοκιμίου σε σχέση με το άλλο.

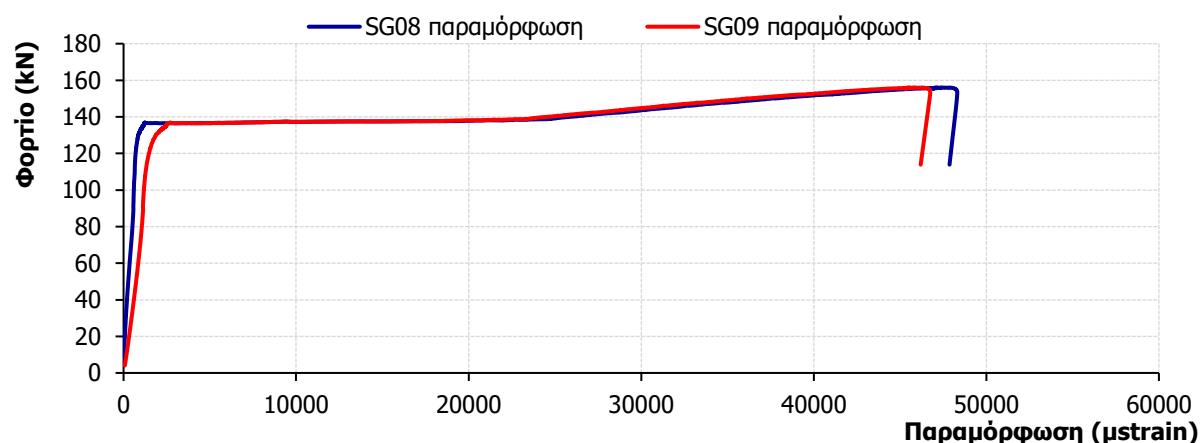


Σχήμα 3-6: Στοιχεία μέτρησης τάσεων και επιμηκυνσιόμετρα

Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων του δοκιμίου, δίνονται στη συνέχεια το διάγραμμα φορτίου – μετακινήσεων που καταγράφηκε από τα επιμηκυνσιόμετρα DT01 και DT02 (Σχήμα 3-7) και το διάγραμμα φορτίου – παραμορφώσεων που καταγράφηκαν από τους μετρητές τάσεων SG08 και SG09 (Σχήμα 3-8).

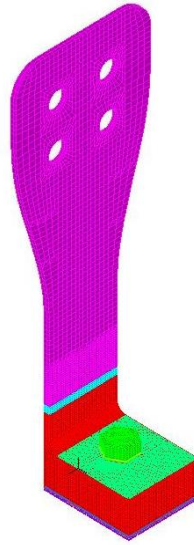


Σχήμα 3-7: Διάγραμμα φορτίου – μετακινήσεων



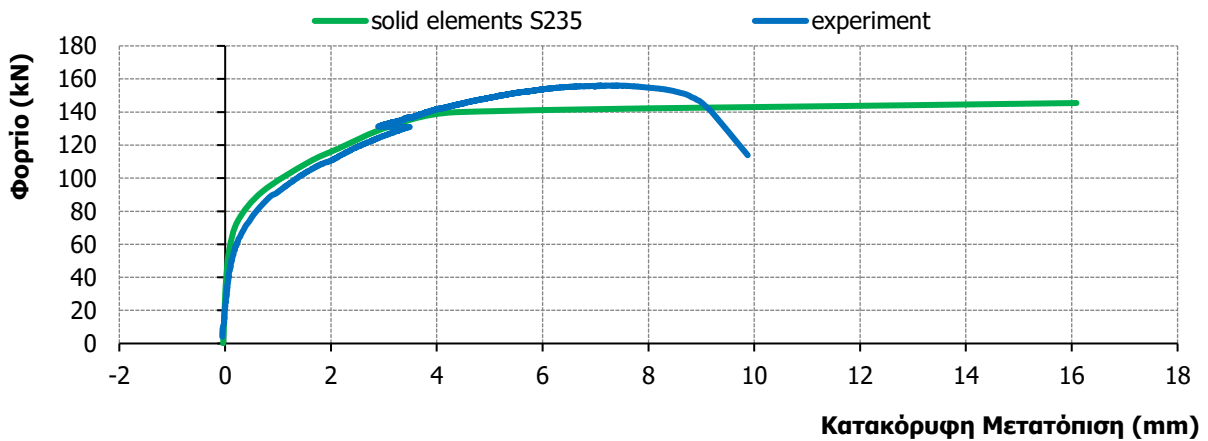
Σχήμα 3-8: Διάγραμμα φορτίου – παραμορφώσεων

Όσον αφορά το προσομοίωμα με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (Σχήμα 3-9), αυτό αποτελείται, όπως και το αντίστοιχο πειραματικό δοκίμιο, από έναν κοχλία καθώς και τα αντίστοιχα τμήματα των ελασμάτων και του κελύφους του πυλώνα. Το κέλυφος του πυλώνα και το άνω έλασμα προσομοιώνεται με πεπερασμένα στοιχεία όγκου, ενώ το κάτω έλασμα προσομοιώνεται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνοντας υπόψη την άνω επιφάνειά του. Ο κοχλίας διαμορφώνεται επίσης με πεπερασμένα στοιχεία όγκου και λαμβάνονται υπόψη οι κατάλληλες ιδιότητες των κοχλιών. Επιπλέον, εκτός από το μη γραμμικό υλικό, τα στοιχεία επαφής είναι το άλλο στοιχείο που χρησιμοποιείται για την εισαγωγή της μη γραμμικής συμπεριφοράς της σύνδεσης, λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ του άνω ελάσματος και της κεφαλής του κοχλία, μεταξύ του κορμού του κοχλία και των δύο ελασμάτων και μεταξύ των δύο ελασμάτων. Τέλος, η βάση του προσομοιώματος σταθεροποιείται, δεσμεύοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας του κάτω ελάσματος. Ταυτόχρονα, σε όλους τους μεσαίους κόμβους του κελύφους του πυλώνα και των ελασμάτων ορίζονται συνοριακές συνθήκες συμμετρίας.

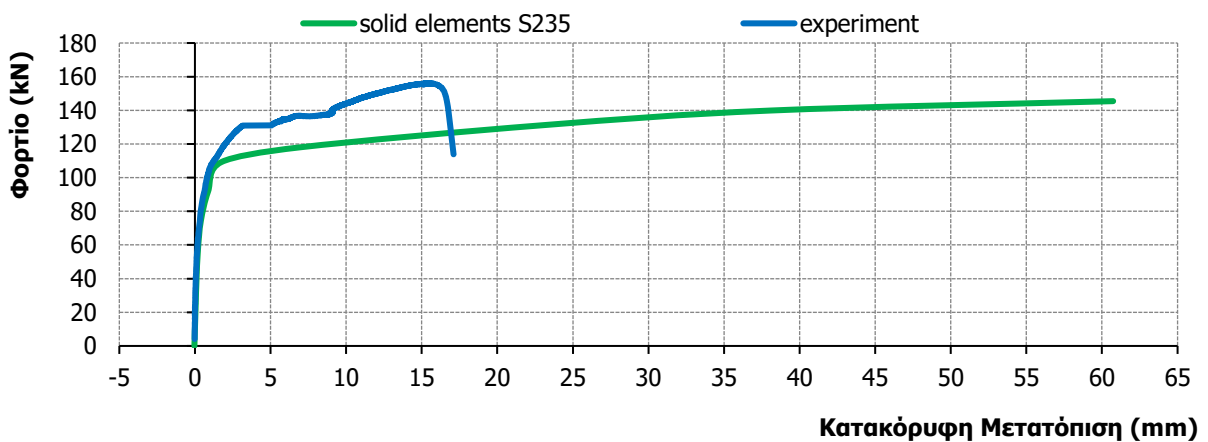


Σχήμα 3-9: Αριθμητικό προσομοίωμα με πεπερασμένα στοιχεία όγκου

Στα Σχήματα 3-10 και 3-11 παρουσιάζεται μια πρώτη σύγκριση των δρόμων ισορροπίας που προέκυψαν από το πείραμα και από το προσομοίωμα με πεπερασμένα στοιχεία όγκου στις θέσεις 1 και 2 αντίστοιχα.



Σχήμα 3-10: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 1



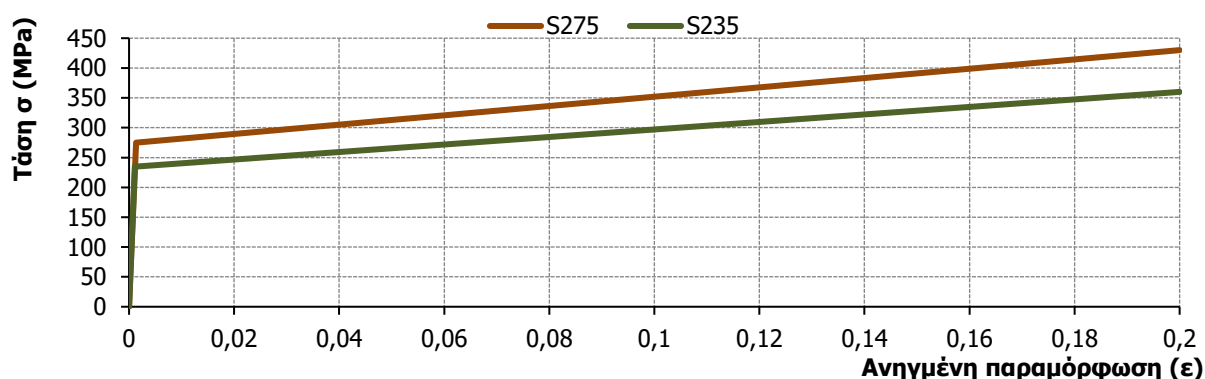
Σχήμα 3-11: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 2

3.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το αριθμητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιείται για τις συγκρίσεις με το παραπάνω πείραμα αλλά και το προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων όγκου αποτελείται και αυτό από έναν κοχλία καθώς και τα αντίστοιχα τμήματα των ελασμάτων και του κελύφους του πυλώνα. Οι διαστάσεις του προσομοιώματος προέκυψαν υπό κλίμακα από μια πραγματική σύνδεση πυλώνα ανεμογεννήτριας (Σχήμα 3-2). Πρόκειται για ένα απλούστερο και υπολογιστικά λιγότερο απαιτητικό προσομοίωμα από αυτό με τα στοιχεία όγκου, το οποίο επομένως προσφέρεται καλύτερα για τη διενέργεια παραμετρικών αναλύσεων.

3.3.1 Γεωμετρία του αριθμητικού προσομοιώματος

Το προσομοίωμα βραχέος «L» με το οποίο θα γίνουν οι πρώτες συγκρίσεις αποτελεσμάτων αποτελείται από δύο ελάσματα πάχους $t=40\text{mm}$, πλάτους $b=100\text{mm}$, μήκους $l=80\text{mm}$ και υλικού χάλυβα S235 και στη συνέχεια S275 με κράτυνση. Το πάχος του κελύφους του πυλώνα είναι ίσο με $t_p=6\text{mm}$. Το υλικό του κελύφους του πυλώνα είναι και αυτό χάλυβας ποιότητας αρχικά S235 και μετά S275, με ονομαστική τάση διαρροής ίση με $f_y=235\text{MPa}$ και $f_y=275\text{MPa}$ αντίστοιχα και μέτρο ελαστικότητας $E=210\text{GPa}$, με γραμμική κράτυνση από τη διαρροή ως την θραύση, η οποία ορίζεται σε τιμές $f_u=360\text{MPa}$ και $f_u=430\text{MPa}$ για S235 και S275 αντίστοιχα (Σχήμα 3-12). Επίσης, χρησιμοποιείται προεντεταμένος κοχλίας M20, ποιότητας 10.9, οποίος προσομοιώνεται με ελαστικό χάλυβα, τόσο στον κορμό του όσο και στην κεφαλή του, ενώ θεωρείται πλήρης συνέχεια μεταξύ των δακτυλιοειδών ελασμάτων και του κελύφους του πυλώνα.

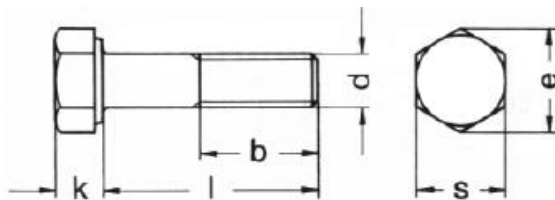


Σχήμα 3-12: Καταστατικός νόμος υλικού κελύφους πυλώνα και δακτυλιοειδών πελμάτων S235 και S275

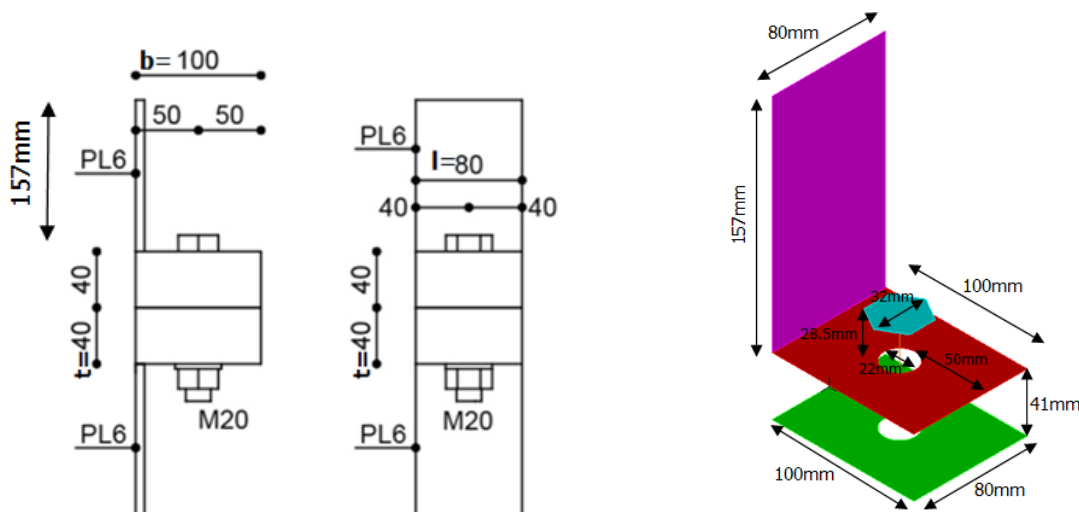
Ορίζεται η γεωμετρία του μισού προσομοιώματος στο λογισμικό Autocad και στα επόμενα βήματα θα παραχθεί η συνολική γεωμετρία. Αρχικά, για τα δύο δακτυλιοειδή ελάσματα και για την κεφαλή του κοχλία επιλέγεται να προσομοιωθούν οι μέσες επιφάνειες. Η οπή των δύο αυτών ελασμάτων έχει διάμετρο ίση με 22mm, 2mm δηλαδή περισσότερο από τη διάμετρο του κοχλία (M20), όπως ορίζει και ο EN1993-1-8. Οι ακριβείς διαστάσεις του κοχλία M20 ελήφθησαν σύμφωνα με το DIN6914 και σύμφωνα με το συμβολισμό του Σχήματος 3-13, αυτές είναι:

- διάμετρος κοχλία $d=20\text{mm}$
- διάμετρος οπής $d_o=20\text{mm}+2\text{mm}=22\text{mm}$
- διάμετρος εγγεγραμμένου κύκλου κεφαλής κοχλία $s=32\text{mm}$
- διάμετρος περιγεγραμμένου κύκλου κεφαλής κοχλία $e=35,07\text{mm}$
- πάχος κεφαλής κοχλία $k=13\text{mm}$

Η κεφαλή του κοχλία προσομοιώθηκε ως κυκλική με διάμετρο 32mm. Επιπλέον, μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και του άνω ελάσματος θεωρείται μία ανοχή 2mm, ενώ μεταξύ των δύο ελασμάτων αφήνεται μία ανοχή 1mm. Άρα, οι δύο πρώτες επιφάνειες, από πάνω, απέχουν 28.5mm, ενώ τα δύο ελάσματα απέχουν 41mm. Οι επιφάνειες αυτές, επιλέγεται να χωριστούν σε επιμέρους περιοχές, ώστε να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερη διακριτοποίηση. Το ύψος του τμήματος του πυλώνα που προσομοιώνεται είναι 157mm και εκτείνεται μέχρι τη μέση επιφάνεια του άνω ελάσματος. Τέλος, ο κορμός του κοχλία επιλέγεται να προσομοιωθεί ως ένα ευθύγραμμο ραβδωτό στοιχείο που ξεκινά από το έλασμα της κεφαλής του κοχλία και καταλήγει στο κάτω δακτυλιοειδές έλασμα. Η παραπάνω γεωμετρία παρουσιάζεται στα Σχήματα 3-13.



Σχήμα 3-13: Γεωμετρία κοχλία M20

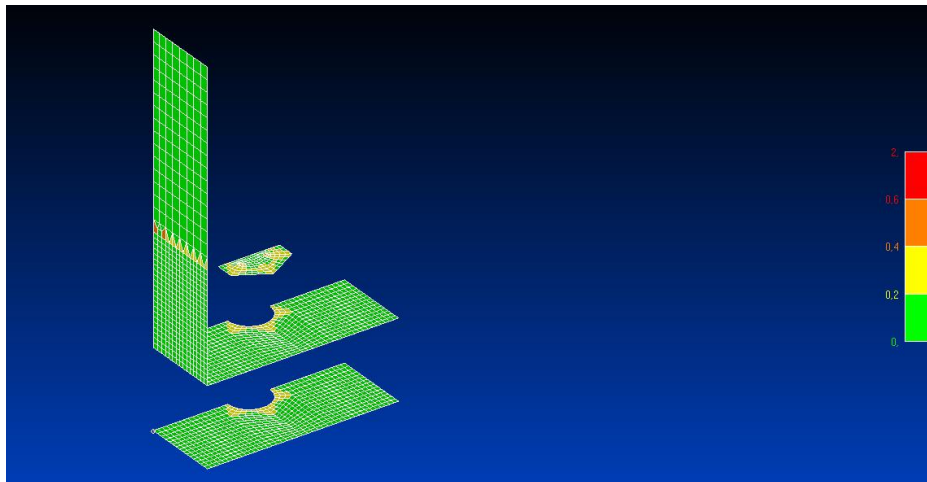


Σχήμα 3-14: Γεωμετρία σύνδεσης

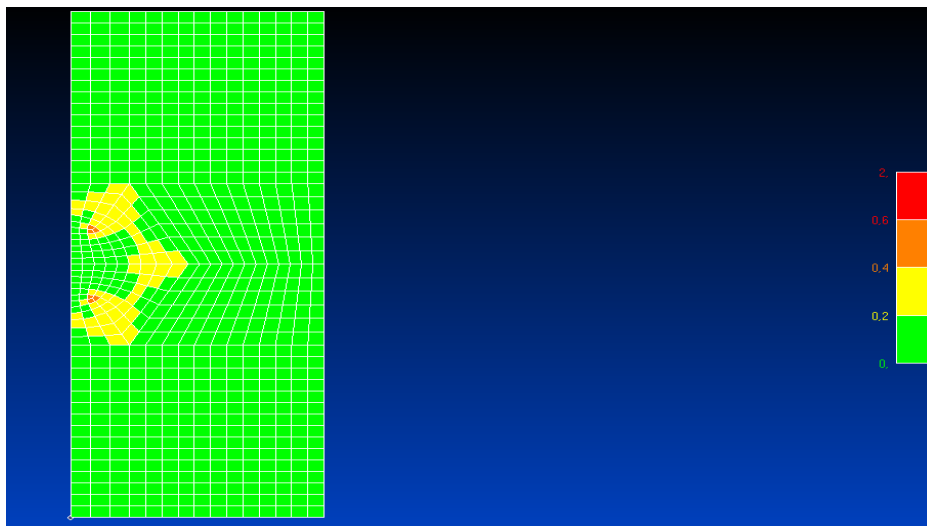
3.3.2 Διακριτοποίηση του αριθμητικού προσομοιώματος

Για τη διακριτοποίηση του προσομοιώματος επιλέγεται κατάλληλο πρόγραμμα. Πιο συγκεκριμένα, εισάγεται η γεωμετρία του προσομοιώματος από το AutoCAD και κάθε μέρος του διακριτοποιείται ως εξής:

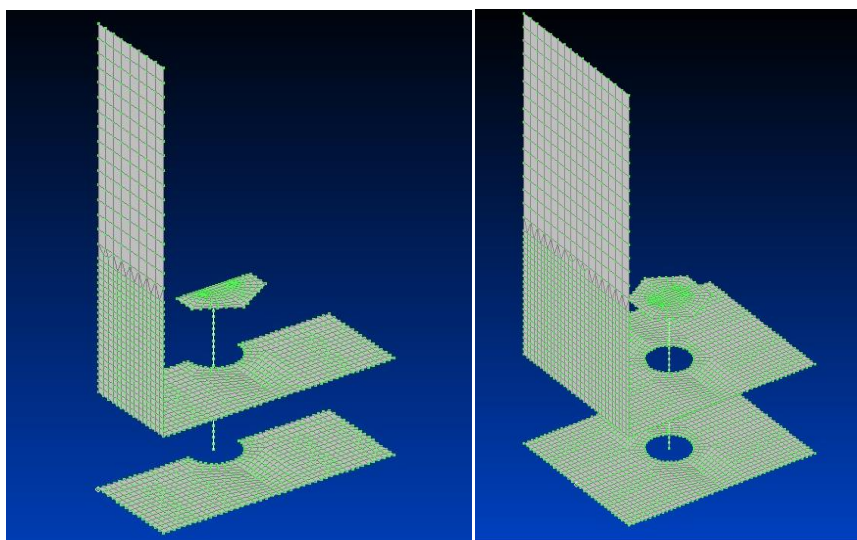
Η μέση επιφάνεια της κεφαλής του κοχλία, οι μέσες επιφάνειες των δύο ελασμάτων και το κέλυφος του πυλώνα προσομοιώνονται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements). Στον πυλώνα συγκεκριμένα επιλέγεται μετά τα 57mm να γίνει αραιώση του πλέγματος των πεπερασμένων για να περιοριστεί το υπολογιστικό κόστος. Επίσης, στα Σχήματα 3-15α,β παρουσιάζεται η ποιότητα του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Στην κλίμακα ποιότητας που φαίνεται δεξιά του σχήματος παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα η καλύτερη ποιότητα πλέγματος, ενώ με κόκκινο η χειρότερη. Θεωρητικά, θα μπορούσε να γίνει μια ακόμη μεγαλύτερη πυκνωση του πλέγματος, ώστε να αυξηθεί η ποιότητα όμως και αυτό θα σήμαινε ακόμα μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος. Τέλος, ο κορμός του κοχλία προσομοιώνεται με γραμμικά στοιχεία δοκού (beam elements). Όλα τα ανωτέρω φαίνονται στο Σχήμα 3-16α, ενώ στο Σχήμα 3-16β παρουσιάζεται ολόκληρο το προσομοίωμα, αξιοποιώντας τη συμμετρία του ως προς τον κορμό του κοχλία.



Σχήμα 3-15α: Διαβάθμιση ποιότητας πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων



Σχήμα 3-15β: Διαβάθμιση ποιότητας πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων



(α)

(β)

Σχήματα 3-16: Αριθμητικά προσομοιώματα της σύνδεσης στο Femap

3.3.3 Παραδοχές αριθμητικής προσομοίωσης

Μετά τη διακριτοποίηση του προσομοιώματος, γίνεται η ανάλυσή του στο λογισμικό ADINA. Αρχικά, χωρίζονται ομάδες πεπερασμένων στοιχείων ανάλογα με τις ιδιότητές τους (element groups) και δίνονται τα πάχη τους.

Όσον αφορά τον κοχλία (Σχήμα 3-17), όπως προαναφέρθηκε, πρέπει να είναι απαραίτητα προεντεταμένος μιας και σε τέτοιες κατασκευές η κόπωση αποτελεί μια από τις κυριότερες μορφές αστοχίας. Η ύπαρξη της δύναμης προέντασης είναι ευεργετική έναντι της κόπωσης και μπορεί να αυξήσει σημαντικά την αντοχή του κοχλία σε κόπωση, σε σχέση με έναν μη προεντεταμένο κοχλία. Η επιβαλλόμενη δύναμη προέντασης ενός κοχλία, σύμφωνα με τον EC3, είναι ίση με το 70% της εφελκυστικής του αντοχής και δίνεται από τη σχέση της εξίσωσης 3-1:

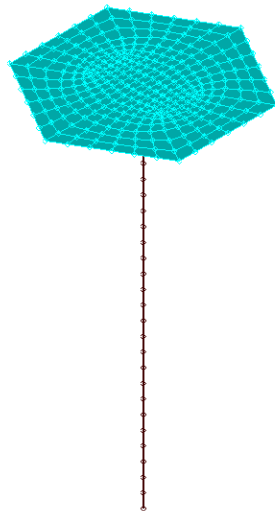
$$F_{p,c} = 0.7 \times f_{ub} \times A_s$$

όπου: f_{ub} είναι η εφελκυστική αντοχή του κοχλία και A_s το εμβαδόν σπειρώματος

Για κοχλία M20: $A_s=2.45\text{cm}^2$

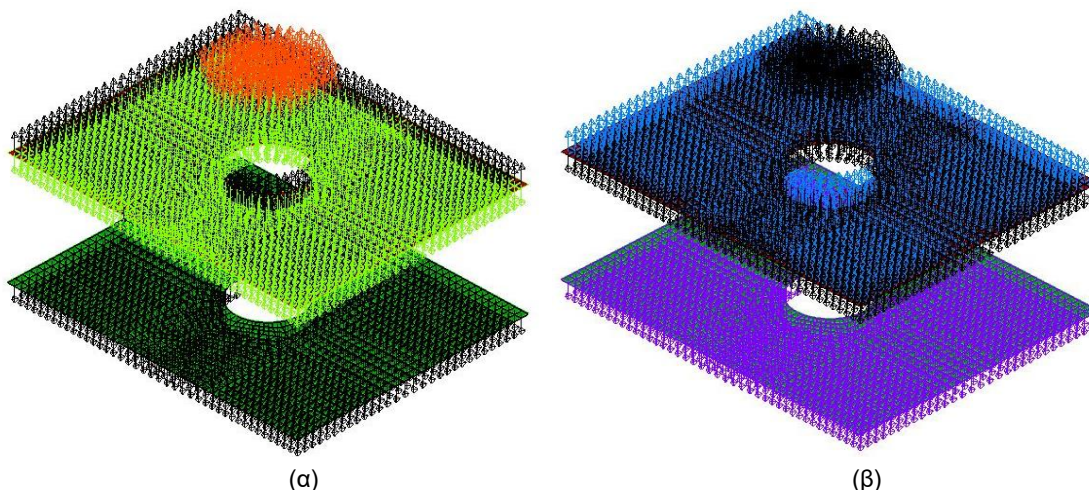
Για ποιότητα κοχλία 10.9: $f_{ub}=1000\text{MPa}$ από την ανωτέρω σχέση προκύπτει:

$$F_{p,c} = 0.7 \times 100 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 2.45\text{cm}^2 = 171.5\text{kN}$$



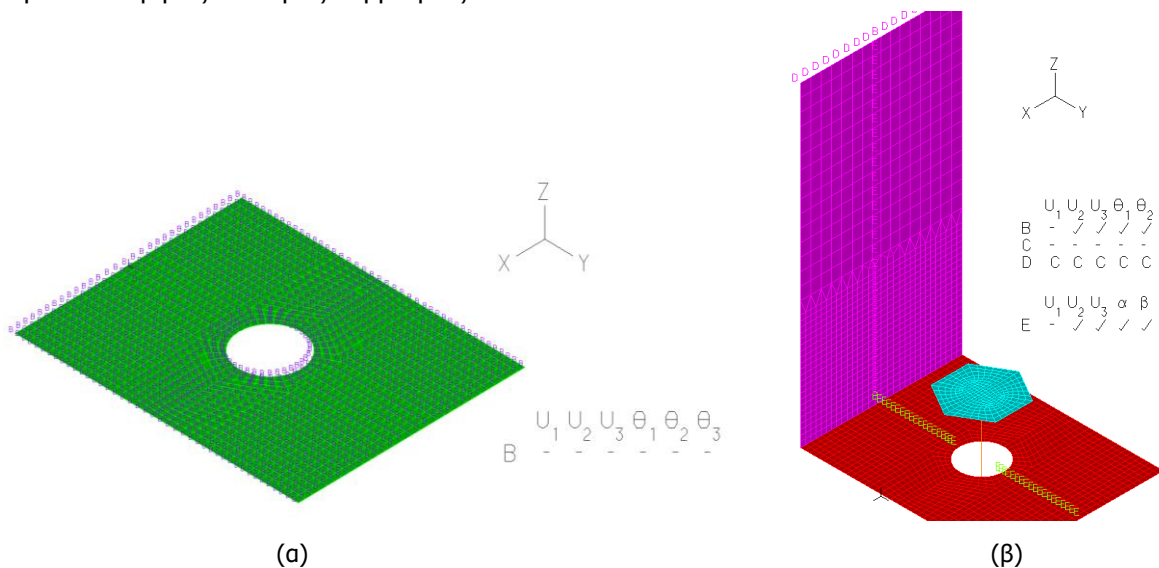
Σχήμα 3-17: Τρόπος προσομοίωσης του κοχλία

Η επαφή μεταξύ του άνω ελάσματος της σύνδεσης και της κεφαλής του κοχλία, καθώς και η επαφή στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων πραγματοποιείται με κατάλληλα στοιχεία επαφής. Η ύπαρξη αυτών των στοιχείων επαφής είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού αποτελεί την κυρίαρχη μορφή μη γραμμικότητας του προβλήματος. Λόγω της προσομοίωσης του κορμού του κοχλία με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία δοκού, η επαφή του κορμού του κοχλία με την άντυγα των ελασμάτων δεν είναι δυνατόν να ληφθεί υπόψη. Στα σχήματα 3-18α,β απεικονίζονται τα στοιχεία επαφής, με τα μαύρα βέλη, μεταξύ των δύο ζευγών επιφανειών που αναφέρθηκαν παραπάνω.



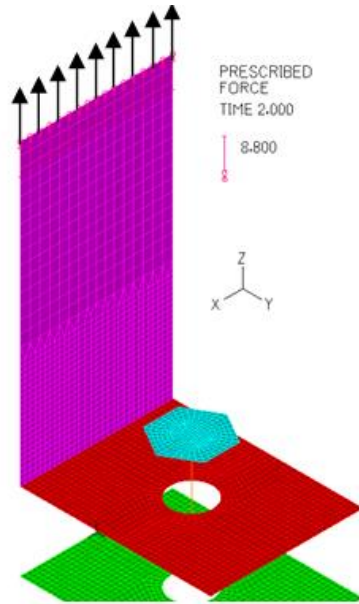
(α) (β)
 Σχήματα 3-18: Στοιχεία επαφής (α)μεταξύ του άνω ελάσματος της σύνδεσης και της κεφαλής του κοχλία (β)στη διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων

Επειδή η προσομοίωση αφορά σε τμήμα του πυλώνα απαιτούνται κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, σταθεροποιείται η βάση του μοντέλου, δηλαδή το κάτω έλασμα και ο κάτω κόμβος του κοχλία πακτώνονται, χωρίς να αφήνεται καμία δυνατότητα μετακίνησης και στροφής (Σχήμα 3-19α). Επίσης, σε όλους τους κόμβους του πυλώνα και του άνω ελάσματος που βρίσκονται στον άξονα συμμετρίας του προσομοιώματος δεσμεύεται η μετακίνηση κατά x ενώ όλες οι υπόλοιπες μετακινήσεις και στροφές αφήνονται ελεύθερες (Σχήμα 3-19β). Αυτές οι συνοριακές συνθήκες έχουν ως στόχο να λάβουν υπόψη τις συνθήκες συμμετρίας.



Σχήματα 3-19: Συνοριακές συνθήκες (α) κάτω ελάσματος, (β) συμμετρίας στον πυλώνα και το άνω έλασμα

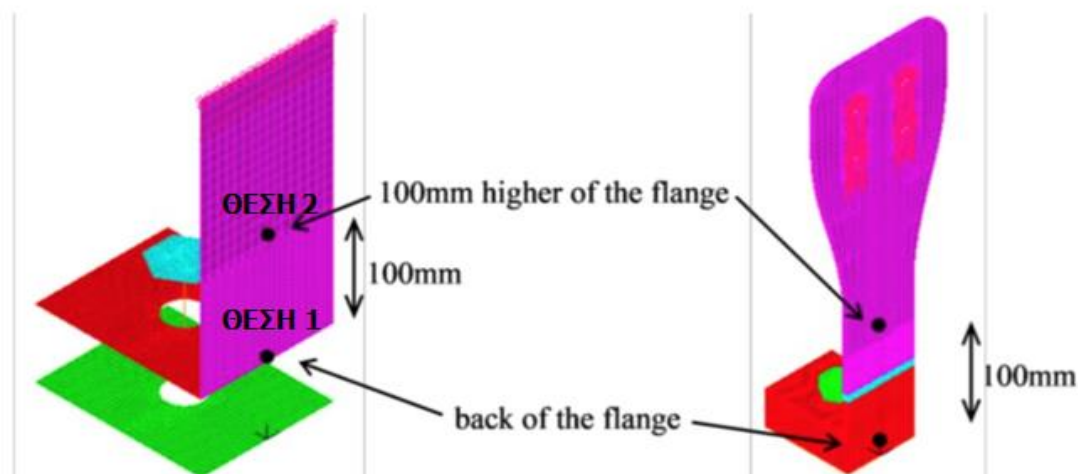
Τέλος, η ανάλυση πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Στην 1^η φάση επιβάλλεται η δύναμη προεντάσεως στους κοχλίες και στη 2^η φάση επιβάλλεται φόρτιση 8.8 kN/κόμβο κατά τον άξονα z (Σχήμα 3-20), που αντιστοιχεί σε 6.5kN/m, στην άνω παρειά του κελύφους του πυλώνα.



Σχήμα 3-20: Επιβαλλόμενη φόρτιση στην κορυφή του πυλώνα

3.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΕΩΝ

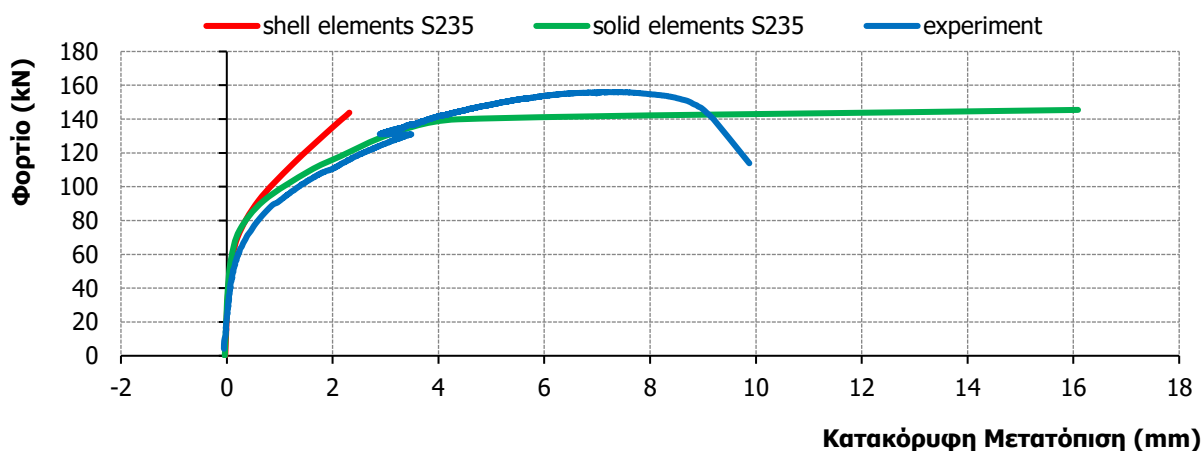
Όλα τα αποτελέσματα συγκρίσεων παρουσιάζονται μέσω των δρόμων ισορροπίας σε δύο χαρακτηριστικές θέσεις των μοντέλων. Η μία θέση (Θέση 1) βρίσκεται στο μεσαίο κόμβο της εξωτερικής πλευράς του άνω ελάσματος ενώ η δεύτερη (Θέση 2) βρίσκεται 100mm υψηλότερα από το άνω δακτυλιοειδές έλασμα (Σχήμα 3-21). Η καταγραφή της απόκρισης στις δύο αυτές θέσεις βοηθά ώστε να επιτευχθεί καλύτερη κατανόηση του τρόπου συμπεριφοράς της σύνδεσης. Ειδικότερα, η πρώτη θέση είναι βασική αφού αφορά το έλασμα, ενώ η δεύτερη δείχνει αν και τι αλλάζει αν απομακρυνθούμε από το έλασμα προς τον πυλώνα. Επίσης, ο οριζόντιος άξονας των διαγραμμάτων των δρόμων ισορροπίας αντιστοιχεί στην κατακόρυφη μετατόπιση των προαναφερθεισών θέσεων ενώ ο κατακόρυφος αντιστοιχεί στο φορτίο που αντιστοιχεί σε κάθε μετατόπιση.



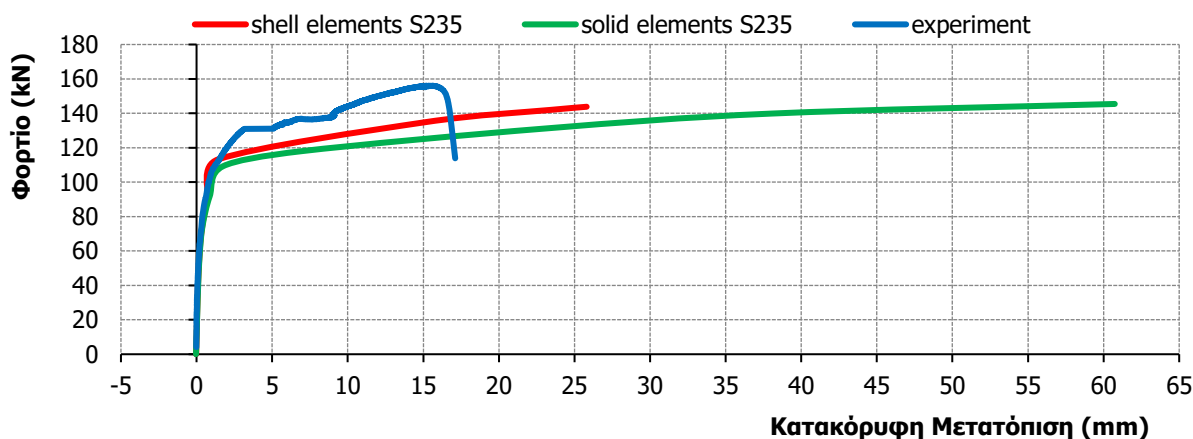
Σχήμα 3-21: Χαρακτηριστικές θέσεις προσομοιώματος

3.4.1 Σύγκριση μοντέλου επιφανειακών στοιχείων (shell elements), στοιχείων όγκου (solid elements) και πειράματος (experiment)

Αρχικά, οι πρώτες συγκρίσεις θα γίνουν μεταξύ των δρόμων ισορροπίας για το προσομοίωμα των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων με χάλυβα S235, των στοιχείων όγκου με χάλυβα S235 αλλά και των δρόμων ισορροπίας που πρόεκυψαν από τα αντίστοιχα πειράματα που έγιναν (Σχήματα 3-22, 3-23). Ειδικότερα, στο Σχήμα 3-22 απεικονίζονται οι δρόμοι ισορροπίας της χαρακτηριστικής θέσης 1 που βρίσκεται στο πίσω μέρος του άνω ελάσματος, ενώ στο Σχήμα 3-23 απεικονίζεται η χαρακτηριστική θέση 2 που βρίσκεται 100mm ψηλότερα από το άνω έλασμα. Για τις αναλύσεις αυτές χρησιμοποιείται η θεωρία των μεγάλων παραμορφώσεων (large strains) και συντελεστής ενδοσιμότητας (compliance factor) ίσος με $c_f=1 \times 10^{-9}$. Κανονικά, οι επιφάνειες επαφής θεωρούνται άκαμπτες. Παρόλα αυτά, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανάλυση χρειάστηκε να δοθεί μια πολύ μικρή τιμή ως η επιτρεπόμενη διείσδυση μεταξύ των παραπάνω επιφανειών επαφής.

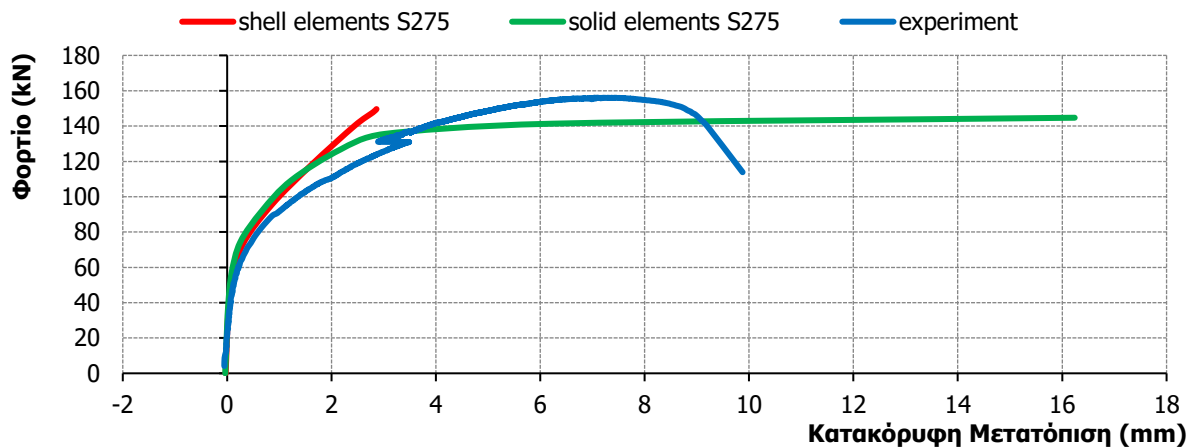


Σχήμα 3-22: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 1

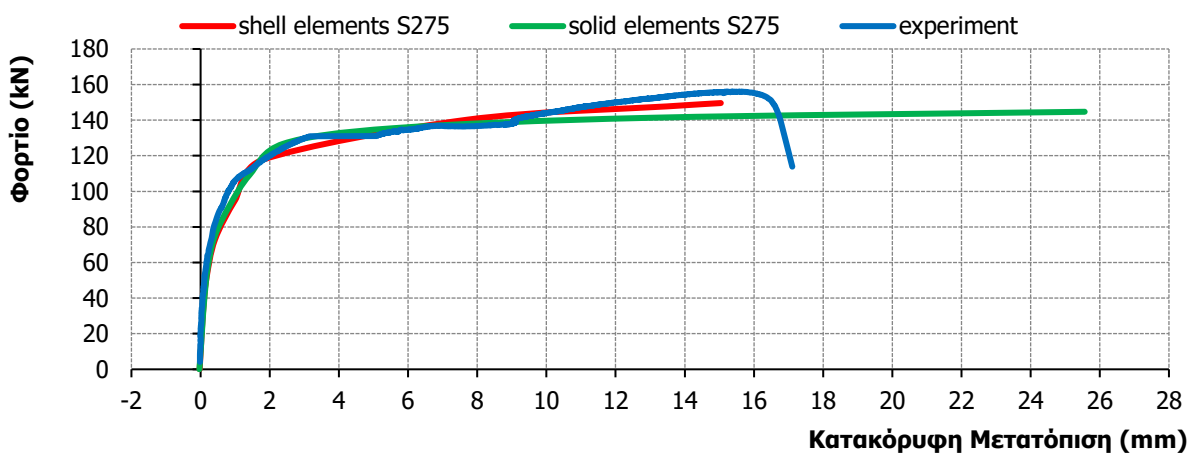


Σχήμα 3-23: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 2

Στη συνέχεια, παρατηρώντας ότι τα προσομοιώματα με χάλυβα S235 δεν προσεγγίζουν αρκετά το πείραμα γίνονται αριθμητικές αναλύσεις με τα ίδια προσομοιώματα μεταβάλλοντας το χάλυβα σε S275. Στο Σχήμα 3-24 απεικονίζονται οι δρόμοι ισορροπίας της χαρακτηριστικής θέσης 1 που βρίσκεται στο πίσω μέρος του άνω ελάσματος για τα προσομοιώματα με χάλυβα S275 και για το πείραμα με χάλυβα S235. Στο Σχήμα 3-25 απεικονίζονται οι δρόμοι ισορροπίας για τη χαρακτηριστική θέση 2 που βρίσκεται 100mm ψηλότερα από το άνω έλασμα αντίστοιχα.



Σχήμα 3-24: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 1



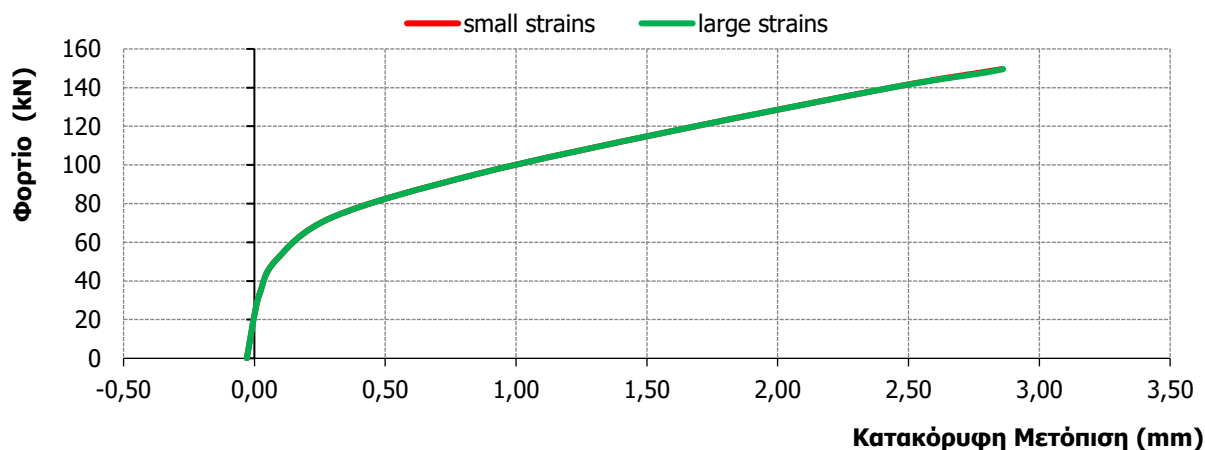
Σχήμα 3-25: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 2

Τελικά, συγκρίνοντας τους δρόμους ισορροπίας του πειράματος και των αριθμητικών αναλύσεων για τις δύο διαφορετικές ποιότητες χάλυβα, παρατηρείται ότι η συμπεριφορά του προσομοιώματος με χάλυβα S275 προσεγγίζει καλύτερα τη συμπεριφορά του δοκιμίου του πειράματος και συνεπώς οι υπόλοιπες αριθμητικές αναλύσεις θα γίνουν με χάλυβα ποιότητας S275.

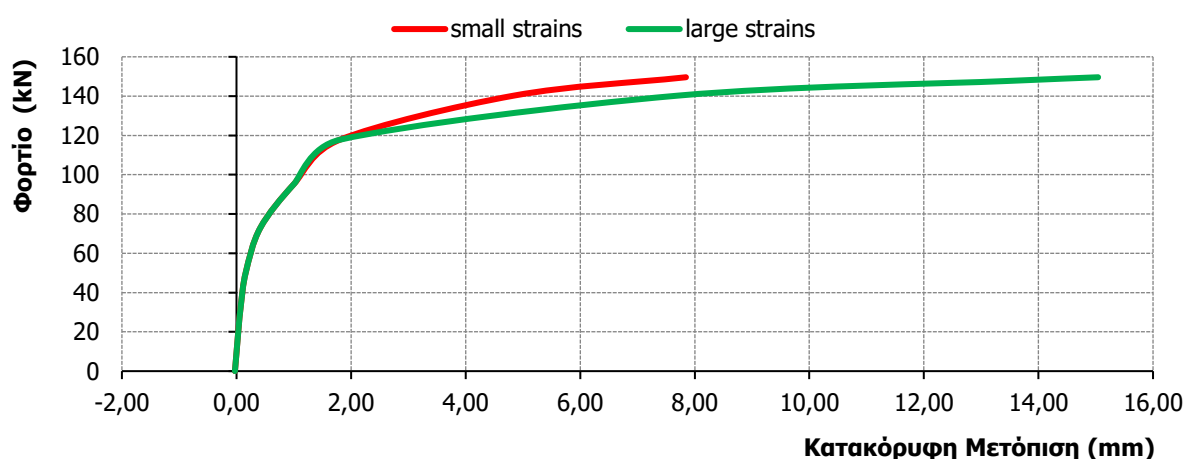
Ειδικότερα, όσον αφορά την χαρακτηριστική θέση 1 πίσω από το άνω έλασμα, το προσομοίωμα των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων δεν φθάνει την αναμενόμενη μετατόπιση, παρουσιάζοντας μια αρκετά μικρότερη. Αυτό αποδίδεται σε λόγους δυσκολίας σύγκλισης της αριθμητικής ανάλυσης. Παρόλα αυτά, η δυσκαμψία του προσομοιώματος αυτού συγκλίνει αρκετά στην δυσκαμψία των άλλων δύο. Η ίδια καλή ταύτιση σε δυσκαμψία παρουσιάζεται στη χαρακτηριστική θέση 2, που βρίσκεται 100mm πάνω από την άλλη, ενώ η μετατόπιση του προσομοιώματος με τα επιφανειακά στοιχεία δείχνει να πλησιάζει αυτή των άλλων δύο. Συνεπώς, το προσομοίωμα των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω αναλύσεις.

3.4.2 Επίδραση της θεωρίας μεγάλων ή μικρών παραμορφώσεων

Για το προσομοίωμα επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων γίνεται σύγκριση μεταξύ αναλύσεων στις οποίες χρησιμοποιούνται μεγάλες ή μικρές παραμορφώσεις. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων απεικονίζονται στα δύο παρακάτω διαγράμματα. Στο Σχήμα 3-26, παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας της χαρακτηριστικής θέσης πίσω από το άνω έλασμα (Θέση 1), ενώ στο Σχήμα 3-27 οι δρόμοι ισορροπίας της χαρακτηριστικής θέσης που βρίσκεται 100mm πάνω από το άνω έλασμα (Θέση 2).



Σχήμα 3-26: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 1



Σχήμα 3-27: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 2

Από τα δύο παραπάνω διαγράμματα γίνεται αντιληπτό ότι οι δρόμοι ισορροπίας που αντιστοιχούν στην πρώτη χαρακτηριστική θέση, πίσω από το έλασμα, είναι πανομοιότυποι και οι δρόμοι ισορροπίας που αντιστοιχούν στη θέση των 100mm πάνω από το έλασμα συγκλίνουν αρκετά. Πιο συγκεκριμένα, η δυσκαμψία των δύο προσομοιωμάτων είναι ταυτόσημη ενώ η απόκριση μετά τη διαρροή διαφέρει ελαφρώς. Όπως γίνεται αντιληπτό και από το διάγραμμα του Σχήματος 3-27 η ανάλυση με μεγάλες παραμορφώσεις οδηγεί σε μεγαλύτερες μετατοπίσεις σε αντίθεση με την ανάλυση σε μικρές. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τις μεγάλες μετατοπίσεις που αναπτύχθηκαν στο προσομοίωμα αυτό και ειδικά στην περιοχή μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και του άνω ελάσματος, κυρίως λόγω της προέντασης, η διεξαγωγή των επόμενων παραμετρικών αναλύσεων έγινε λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρία των μεγάλων παραμορφώσεων (large strains).

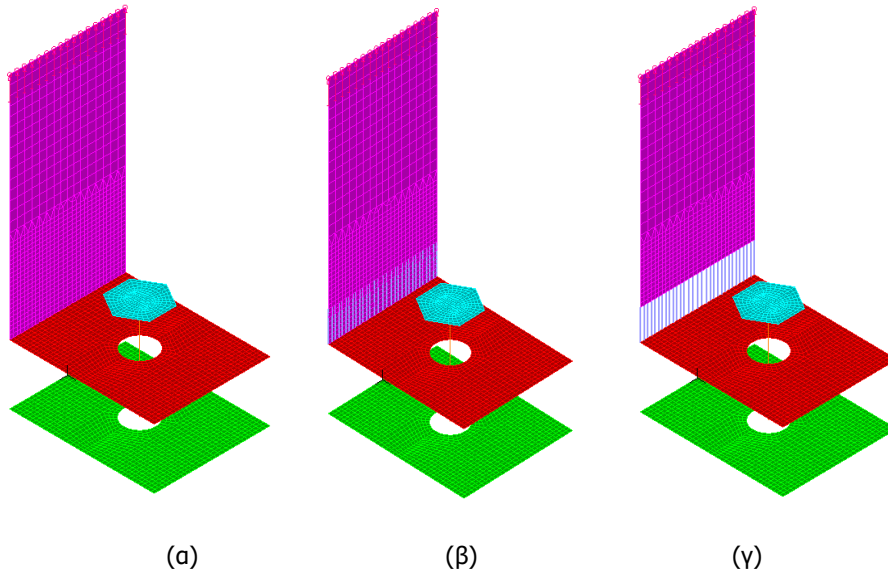
3.4.3 Επίδραση προσομοίωσης σύνδεσης κελύφους - δακτυλίου

Για το προσομοίωμα των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων εξετάζεται στη συμπεριφορά του προσομοιώματος η επιρροή της προσομοίωσης του ελάσματος με shell elements στη μέση επιφάνειά του, αγνοώντας το τμήμα του κελύφους που στο προσομοίωμα βρίσκεται εκεί όπου στην πραγματικότητα υπάρχει κάτι πολύ πιο δύσκαμπτο, το παχύ δακτυλιοειδές έλασμα.

Ο πρώτος είναι τα πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους του πυλώνα να εκτείνονται μέχρι τη μεσαία επιφάνεια του άνω ελάσματος (shell to mid-surface), αυτό που περιγράφηκε παραπάνω και με το οποίο έγιναν και οι συγκρίσεις με το πείραμα και το προσομοίωμα με τα στοιχεία όγκου (Σχήμα 3-28α).

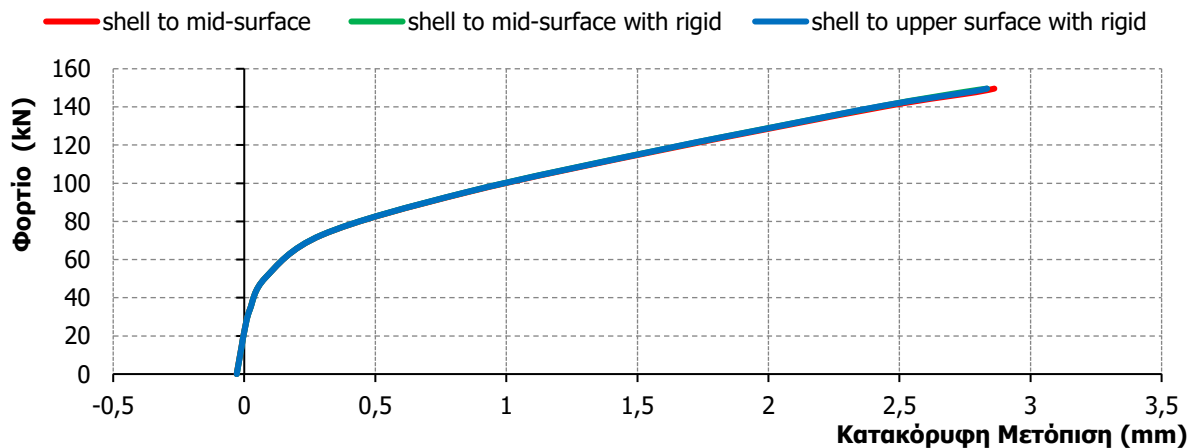
Ο δεύτερος τρόπος είναι τα στοιχεία του κελύφους του πυλώνα να εκτείνονται μέχρι τη μεσαία επιφάνεια του άνω ελάσματος αλλά όλοι οι κόμβοι του πυλώνα που βρίσκονται στο πάχος του άνω ελάσματος να συγκρατούνται με άκαμπτους συνδέσμους (rigid links) (shell to mid-surface with rigid) (Σχήμα 3-28β).

Τέλος, ο τρίτος τρόπος σύνδεσης είναι τα στοιχεία του κελύφους του πυλώνα να εκτείνονται μέχρι την ανώτερη επιφάνεια του ελάσματος. Η κάλυψη του κενού που δημιουργείται και είναι ίσο με το μισό πάχος του άνω ελάσματος γίνεται με την χρήση άκαμπτων συνδέσμων (rigid links), όπως και προηγουμένως (shell to upper surface with rigid) (Σχήμα 3-28γ).

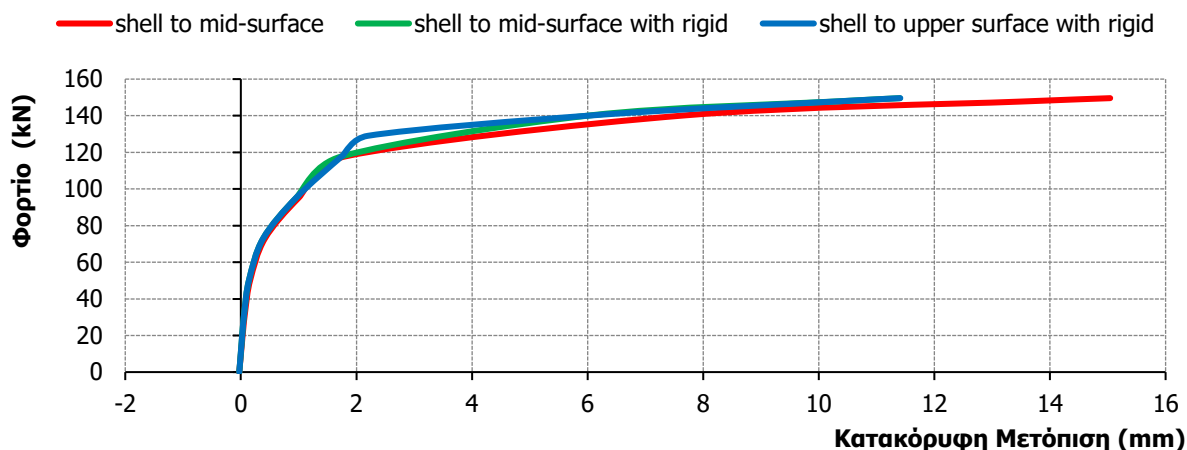


Σχήμα 3-28: Αριθμητικά προσομοιώματα με επιφανειακά στοιχεία που εκτείνονται μέχρι, (α) τη μεσαία επιφάνεια του άνω ελάσματος, (β) τη μεσαία επιφάνεια του άνω ελάσματος με άκαμπτους συνδέσμους, (γ) την ανώτερη επιφάνεια του άνω ελάσματος με άκαμπτους συνδέσμους

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 3-29, παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας της χαρακτηριστικής θέσης πίσω από το άνω έλασμα (Θέση 1), ενώ στο Σχήμα 3-30, οι δρόμοι ισορροπίας της χαρακτηριστικής θέσης που βρίσκεται 100mm πάνω από το άνω έλασμα (Θέση 2).



Σχήμα 3-29: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 1

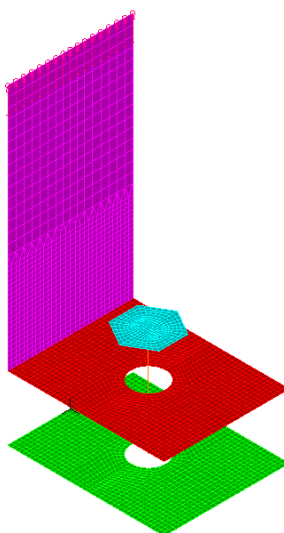


Σχήμα 3-30: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 2

Μέσω των δύο παραπάνω διαγραμμάτων συμπεραίνεται ότι οι δρόμοι ισορροπίας της χαρακτηριστικής θέσης πίσω από το άνω έλασμα είναι πανομοιότυποι. Παράλληλα, οι δρόμοι ισορροπίας και της δεύτερης θέσης, 100mm παραπάνω δηλαδή, μοιάζουν αρκετά. Συμπερασματικά, η χρήση του προσομοιώματος στο οποίο τα πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους του πυλώνα επεκτείνονται μέχρι τη μέση επιφάνεια του άνω ελάσματος μπορεί να γίνει με ασφάλεια για περισσότερες αναλύσεις και για την περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς των ελασμάτων δακτυλιοειδούς σύνδεσης.

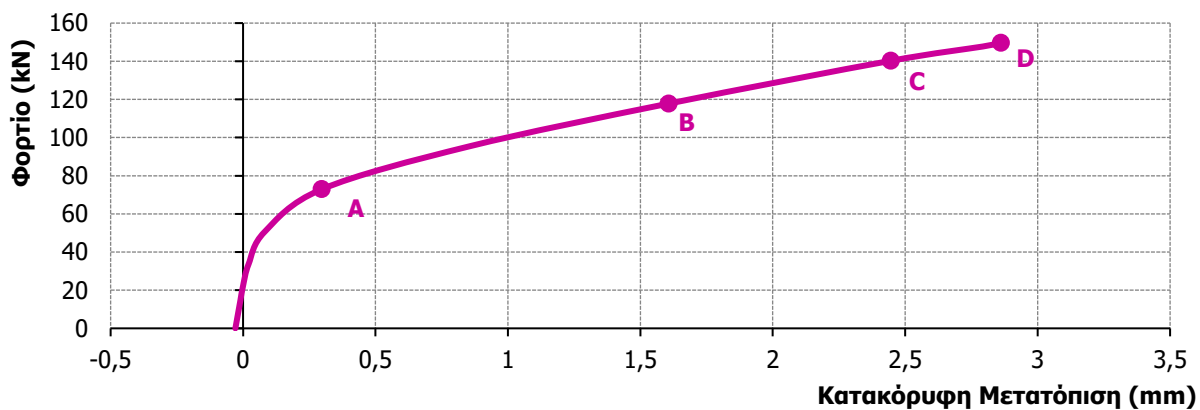
3.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο Κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια αναλυτική διερεύνηση της συμπεριφοράς του προσομοιώματος με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, που περιγράφηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.3 (Σχήμα 3-31), αξιοποιώντας τους δρόμους ισορροπίας στις Θέσεις 1 και 2 του Σχήματος 3-21.

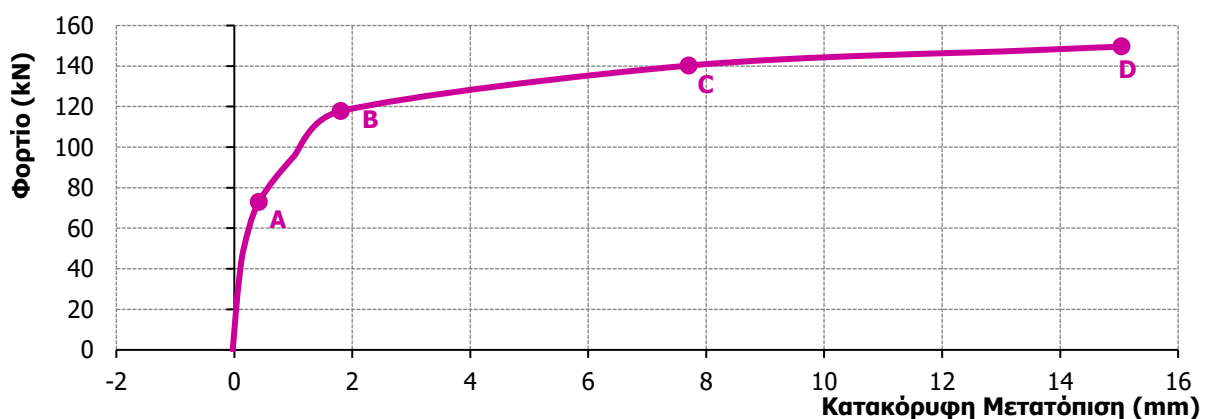


Σχήμα 3-31: Αριθμητικό προσομοίωμα αναλύσεων

Στο Σχήμα 3-32 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας στη Θέση 1 (Σχήμα 3-21) ενώ στο Σχήμα 3-33 απεικονίζεται ο δρόμος ισορροπίας στη Θέση 2 (Σχήμα 3-21). Πάνω στους δρόμους αυτούς έχουν επισημανθεί τα τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Επιπλέον, οι δρόμοι αυτοί ξεκινούν από αρνητική κατακόρυφη μετατόπιση, διότι στην πρώτη φάση της ανάλυσης κλείνει το κενό (ανοχή), που είχε δοθεί στα δύο δακτυλιοειδή ελάσματα.



Σχήμα 3-32: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 1



Σχήμα 3-33: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 2

Μέσω των δύο παραπάνω διαγραμμάτων μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα τα οποία αφορούν τη συμπεριφορά του συγκεκριμένου προσομοιώματος.

Αρχικά, στο Σχήμα 3-34 παρουσιάζονται σε Πίνακες οι δυσκαμψίες του προσομοιώματος που προκύπτουν από τους παραπάνω δρόμους ισορροπίας στις δύο θέσεις και ο τρόπος υπολογισμού αυτών. Η αρχική δυσκαμψία K_1 του πίνακα αντιστοιχεί στη Θέση 1 πίσω από το άνω έλασμα και είναι καμπτική δυσκαμψία αφού το άνω έλασμα δέχεται φορτίο κάθετα στο επίπεδό του, επομένως κάμπτεται. Αντίθετα, η K_2 αντιστοιχεί στη Θέση 2, 100mm παραπάνω από την πρώτη και αφορά τη δυσκαμψία του πυλώνα σε εφελκυστικό φορτίο, μιας και έχει αφαιρεθεί για τον υπολογισμό της η παραμόρφωση που οφείλεται στην κάμψη του δακτυλίου. Στο Σχήμα 3-35 παρουσιάζεται με μεγέθυνση το αρχικό τμήμα των δύο παραπάνω δρόμων ισορροπίας.

ΘΕΣΗ 1

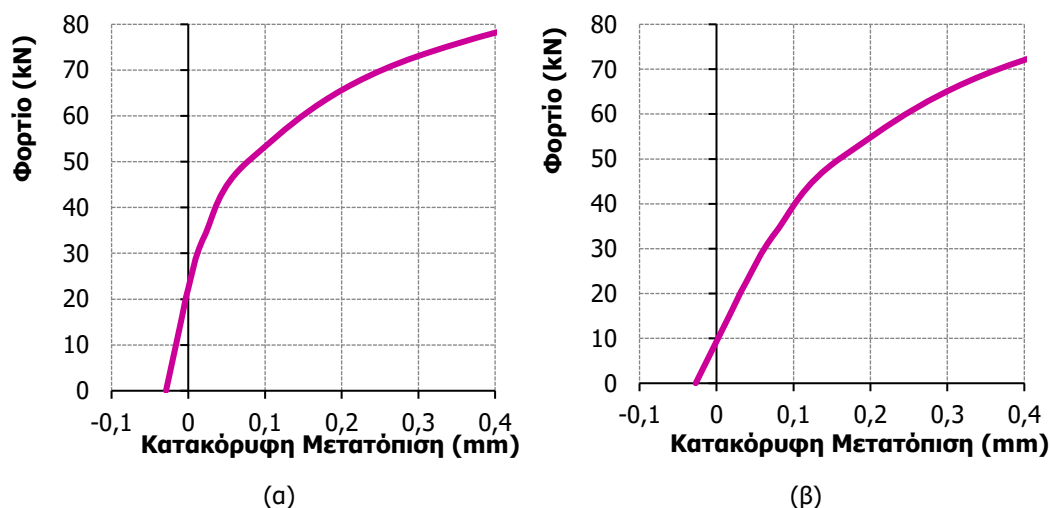
Αρχική Κατακόρυφη Μετατόπιση(δ_{10})	Κατακόρυφη Μετατόπιση δ_1	Φορτίο F	Δυσκαμψία K_1
-0,029	0,00017	22,44	$K_1=F/(\delta_1-\delta_{10})$

ΘΕΣΗ 2

Αρχική Κατακόρυφη Μετατόπιση(δ_{20})	Κατακόρυφη Μετατόπιση δ_2	Φορτίο F	Δυσκαμψία K_2
-0,02702	0,038228	22,44	$K_2=F/((\delta_2-\delta_{20})-(\delta_1-\delta_{10}))$

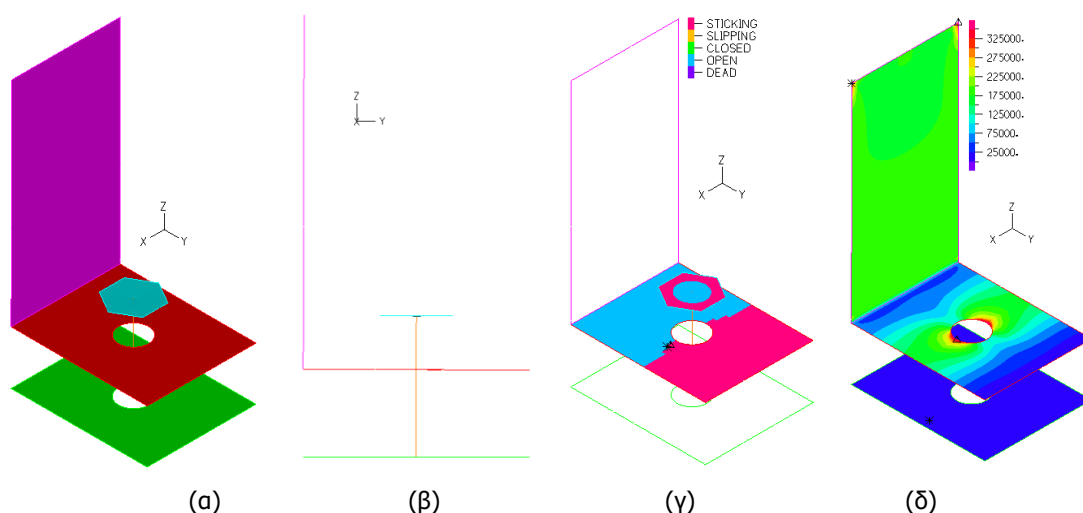
Δυσκαμψία K_1 (KN/m)	769283,51
Δυσκαμψία K_2 (KN/m)	621985,70

Σχήμα 3-34: Πίνακας αρχικών δυσκαμψιών προσομοιώματος 40mm

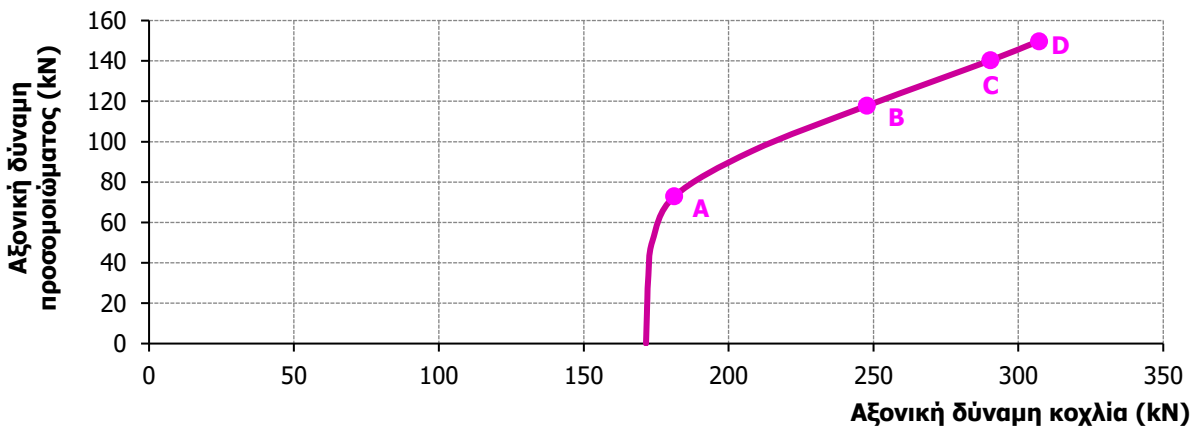


Σχήμα 3-35: Μεγέθυνση σχημάτων 3-32 και 3-33 στην αρχή τους τμήμα (α)Θέση1 και (β)Θέση 2

Στη συνέχεια, στους δρόμους ισορροπίας των Σχημάτων 3-32, 3-33 παρουσιάζεται το πρώτο σημείο αλλαγής κλίσης, Σημείο A, το οποίο αντιστοιχεί σε φορτίο περίπου 60-70kN. Μέσω του διαγράμματος του Σχήματος 3-37, που απεικονίζει τη μεταβολή της αξονικής δύναμης του κοχλία κατά τη διάρκεια της αριθμητικής ανάλυσης, γίνεται αντιληπτό ότι στο φορτίο των 60-70kN ο ρυθμός αύξησης της δύναμης του κοχλία αρχίζει να αυξάνεται. Μέσω της εικόνας των τάσεων von Mises (Σχήμα 3-36δ), εξάγεται το συμπέρασμα ότι στο διάστημα πριν το σημείο αυτό το επιβαλλόμενο φορτίο παραλαμβάνεται κυρίως μέσω ανακατανομής των εγκάρσιων τάσεων επαφής μεταξύ των πελμάτων και στη συνέχεια παραλαμβάνεται και από τον κοχλία. Επιπλέον, στο Σημείο αυτό αρχίζει να διαρρέει το άνω δακτυλιοειδές έλασμα στην περιοχή γύρω από το κοχλία. Ειδικότερα, στην κλίμακα των τάσεων δίπλα από το προσομοίωμα στο Σχήμα 3-36δ, τα χρώματα πάνω από το πορτοκαλί απεικονίζουν τα σημεία στα οποία έχει διαρρεύσει το προσομοίωμα. Τέλος, έχει αρχίσει να ανασηκώνεται το άνω δακτυλιοειδές έλασμα χάνοντας την επαφή του με το κάτω (Σχήμα 3-36β) όπως φαίνεται με το γαλάζιο χρώμα (open), ενώ με το ροζ απεικονίζεται η περιοχή που βρίσκεται ακόμα σε επαφή (sticking). Η παραμορφωμένη εικόνα του προσομοιώματος φαίνεται στα Σχήματα 3-36α, β.



Σχήματα 3-36: Σημείο A (α)παραμορφωμένη εικόνα 3D, (β)παραμορφωμένη εικόνα 2D, (γ)επιφάνειες σε επαφή, (δ) τάσεις von Mises



Σχήμα 3-37: Διάγραμμα αξονικής δύναμης κοχλίας – αξονικής δύναμης προσομοιώματος

Ο κοχλίας του προσομοιώματος, σύμφωνα με την ονομαστική του αντοχή, θα αστοχούσε σε εφελκυσμό σε αρκετά μικρότερο φορτίο από αυτό που σταματάει η ανάλυση. Ειδικότερα, ο κοχλίας θα αστοχούσε όταν αναπτύσσει εφελκυστική δύναμη 245kN, που αντιστοιχεί σε ασκούμενο φορτίο προσομοιώματος περίπου 120kN (Σχήμα 3-35). Η εφελκυστική αντοχή του κοχλίας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_{max} = f_{ub} \times A_s = 100 \frac{kN}{cm^2} \times 2.45cm^2 = 245kN$$

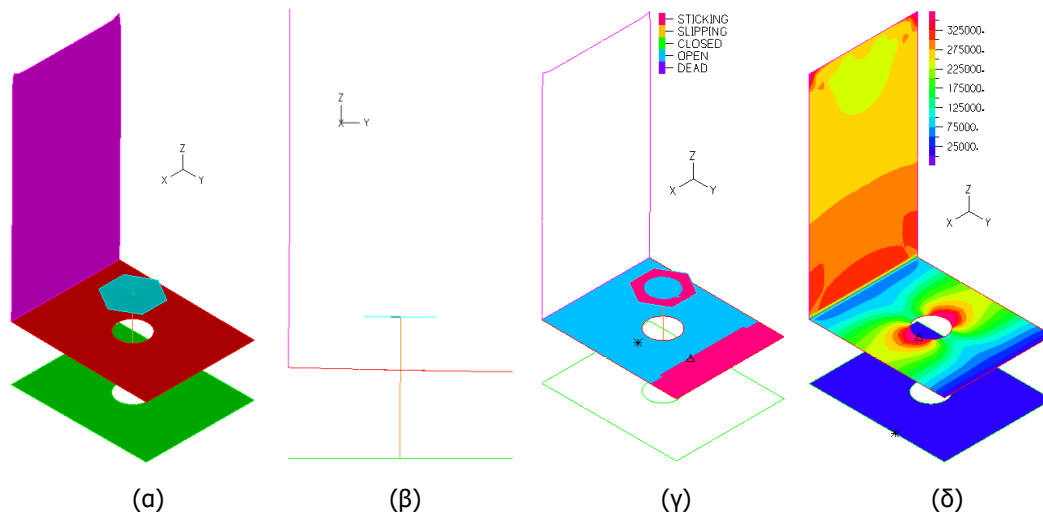
Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, ο κοχλίας έχει προσομοιωθεί με γραμμικό ελαστικό υλικό, λόγω αδυναμίας του λογισμικού να αποδοθεί μη γραμμικό υλικό σε στοιχεία αυτού του τύπου και άρα οι συγκεκριμένες αριθμητικές αναλύσεις δεν μπορούν να λάβουν υπόψη αυτήν την αστοχία. Συνεπώς, η ανάλυση θα έπρεπε να σταματάει σε ασκούμενο φορτίο 120kN. Παρόλα αυτά, το διάγραμμα στο Σχήμα 3-37 μπορεί να μην είναι επαρκώς ακριβές αφού λόγω της προσομοίωσης του κορμού του κοχλίας με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία είναι επίσης αδύνατη η προσομοίωση της επαφής της άντυγας με τον κορμό. Επιπλέον, όπως φαίνεται και από τους δρόμους ισορροπίας των πειραμάτων, το δοκίμιο αστοχεί σε φορτίο περίπου 155kN γιατί οι κοχλίες των πειραμάτων ενδεχομένως ήταν λίγο καλύτερης ποιότητας. Για τους δύο παραπάνω λόγους θεωρήθηκε ασκούμενο φορτίο ανάλυσης μέχρι 150kN, παρόλο που μετά τα 120kN δεν θα είχε νόημα η υπόλοιπη ανάλυση αν είχε αστοχήσει ο κοχλίας. Είναι πιθανό, αν ο κοχλίας ήταν από χάλυβα καλύτερης ποιότητας, να υπήρχαν μεγαλύτερα περιθώρια για περαιτέρω ανάλυση.

Το επόμενο χαρακτηριστικό σημείο του δρόμου ισορροπίας του παραπάνω προσομοιώματος είναι το Σημείο Β. Πιο συγκεκριμένα, στο δρόμο ισορροπίας στη Θέση 2 εμφανίζεται μια δεύτερη αισθητή μείωση της κλίσης του διαγράμματος. Η αλλαγή αυτή γίνεται σε φορτίο περίπου ίσο με 120-125 kN, το οποίο είναι κοντά στο φορτίο διαρροής του προσομοιωμένου τμήματος του κελύφους:

$$F_{p,c} = f_{yd} \times A = 27.5 \frac{kN}{cm^2} \times 8cm \times 0.6cm = 132kN$$

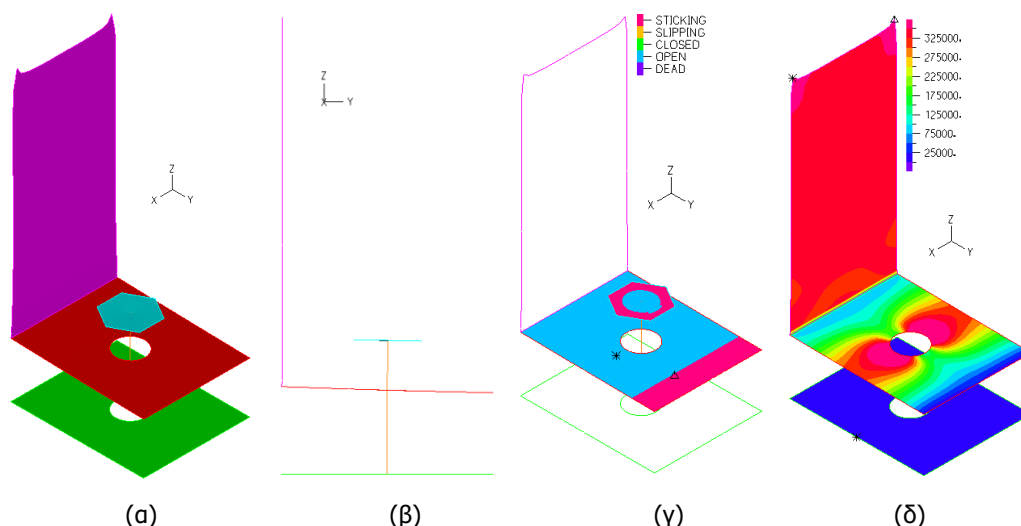
Συνεπώς, αφού η μέτρηση αφορά τη Θέση 2, που ανήκει στο τμήμα του πυλώνα είναι φυσιολογικό αυτό το σημείο αλλαγής της δυσκαμψίας να απεικονίζεται στο δρόμο ισορροπίας του Σχήματος 3-33. Το γεγονός ότι ο κλάδος του δρόμου ισορροπίας μετά το σημείο αυτό ακολουθεί μια ανοδική πορεία και δεν οριζοντιώνεται εξηγείται από το υλικό του πυλώνα, που όπως αναφέρθηκε παραπάνω είναι χάλυβας S275 με κράτυνση. Στα Σχήματα 3-38α,β,γ,δ παρουσιάζονται η παραμορφωμένη εικόνα του προσομοιώματος, οι επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή αλλά και οι τάσεις von Mises αντίστοιχα, στο σημείο αυτό. Μάλιστα, στην εικόνα 3-38δ φαίνεται ξεκάθαρα πως το κάτω τμήμα του πυλώνα έχει διαρρεύσει (κόκκινο χρώμα) και το άνω μισό τμήμα του αρχίζει να διαρρέει τότε (πορτοκαλί χρώμα).

Επίσης, στην εικόνα 3-38γ φαίνεται ότι όλο και μεγαλύτερο τμήμα του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος αποκολλάται από το κάτω.



Σχήματα 3-38: Σημείο Β (α) παραμορφωμένη εικόνα 3D, (β) παραμορφωμένη εικόνα 2D, (γ) επιφάνειες σε επαφή, (δ) τάσεις von Mises

Το επόμενο χαρακτηριστικό σημείο (Σημείο C) που παρατηρείται στο δρόμο ισορροπίας του προσομοιώματος και αφορά και αυτό τη Θέση 2, δείχνει μια μικρή μείωση της κλίσης του δρόμου στα 140kN περίπου. Στο Σημείο αυτό παρατηρείται πλήρης διαρροή όλου του πυλώνα καθώς και διαρροή του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος δεξιά και αριστερά από την οπή μέχρι και τις ακμές του. Επίσης, το άνω δακτυλιοειδές έλασμα συνεχίζει να χάνει την επαφή του από το κάτω σε όλο και μεγαλύτερη επιφάνεια. Στα Σχήματα 3-39α,β,γ,δ παρουσιάζονται η παραμορφωμένη εικόνα του προσομοιώματος, οι επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή αλλά και οι τάσεις von Mises, αντίστοιχα, στο Σημείο C.

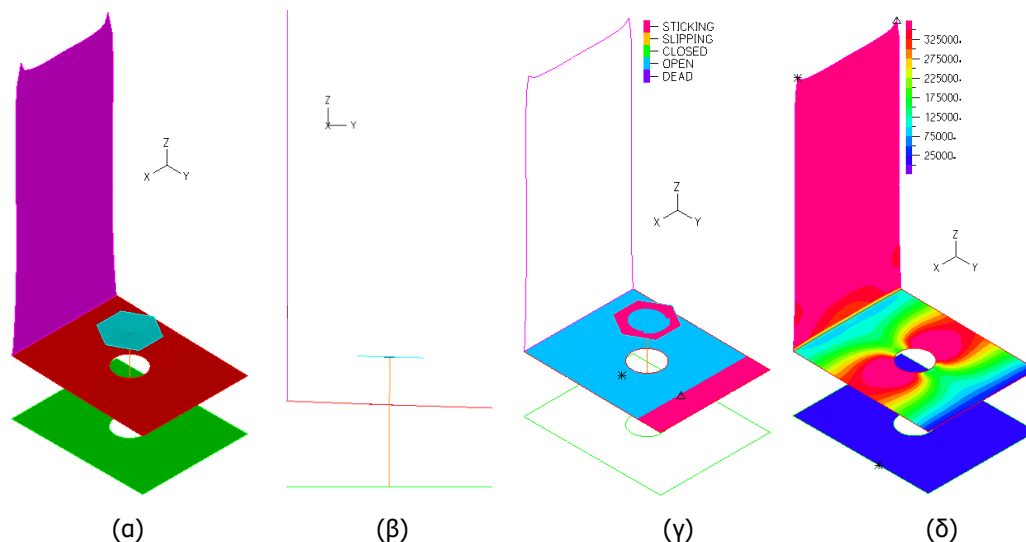


Σχήματα 3-39: Σημείο C (α) παραμορφωμένη εικόνα 3D, (β) παραμορφωμένη εικόνα 2D, (γ) επιφάνειες σε επαφή, (δ) τάσεις von Mises

Τέλος, ο δρόμος ισορροπίας που αφορά τη Θέση 1 φτάνει σε μικρότερες μετατοπίσεις σε σύγκριση με το δρόμο που αφορά τη Θέση 2 που βρίσκεται πάνω στον πυλώνα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο κοχλίας παρεμποδίζει την ελεύθερη μετατόπιση του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος. Αντίθετα, η θέση πάνω στον πυλώνα εμφανίζει μεγαλύτερη μετατόπιση αφού όσο εφελκείται ο πυλώνας είναι

ελεύθερος να μετατοπιστεί και κυρίως μετά τη διαρροή του, που περνάει στην πλαστική περιοχή, οι μετατοπίσεις είναι αρκετά μεγάλες και αφορούν και τη μετατόπιση του άνω ελάσματος λόγω κάμψης. Ακόμη, στο Σχήμα 3-40γ φαίνεται να αυξάνεται το κομμάτι του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος που αποκολλάται, αφού η γαλάζια επιφάνεια που απεικονίζει το χάσιμο της επαφής συνέχεια αυξάνεται μέχρι και το τέλος της ανάλυσης ενώ δεν παρουσιάζεται κάποια έντονη κάμψη αυτού. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι το δακτυλιοειδές έλασμα των 40mm είναι αρκετά δύσκαμπτο, με αποτέλεσμα να μην παραμορφώνεται παρά μόνο να χάνει την επαφή του από το κάτω έλασμα σε όλο και μεγαλύτερο τμήμα καθώς φτάνει στο τέλος η ανάλυση.

Παρόλα αυτά, οι συγκεκριμένες αριθμητικές αναλύσεις δεν προβλέπουν με ακρίβεια ούτε την τελική μετατόπιση του προσομοιώματος ούτε το οριακό φορτίο και συνεπώς τον δρόμο ισορροπίας μέχρι την αστοχία. Αυτό οφείλεται σε προβλήματα σύγκλισης των αναλύσεων και στο γεγονός ότι με το συγκεκριμένο προσομοίωμα δεν προβλέπεται αστοχία της συγκόλλησης ή του κοχλία όπως αναφέρθηκε παραπάνω αφού λειτουργούν ελαστικά και θα ήταν αυτά που λογικά θα επέφεραν την τελική αστοχία. Τέλος, στα Σχήματα 3-40α,β,γ,δ παρουσιάζονται η παραμορφωμένη εικόνα του προσομοιώματος, οι επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή αλλά και οι τάσεις von Mises, αντίστοιχα, στο τέλος της ανάλυσης.



Σχήματα 3-40: Σημείο D (α)παραμορφωμένη εικόνα 3D, (β)παραμορφωμένη εικόνα 2D, (γ)επιφάνειες σε επαφή, (δ) τάσεις von Mises

4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΕΝΟΣ ΚΟΧΛΙΑ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνονται δύο ομάδες παραμετρικών αναλύσεων για να διερευνηθεί η επιρροή δύο σημαντικών παραμέτρων απόκρισης του βραχέος L, χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων με χάλυβα S275 που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

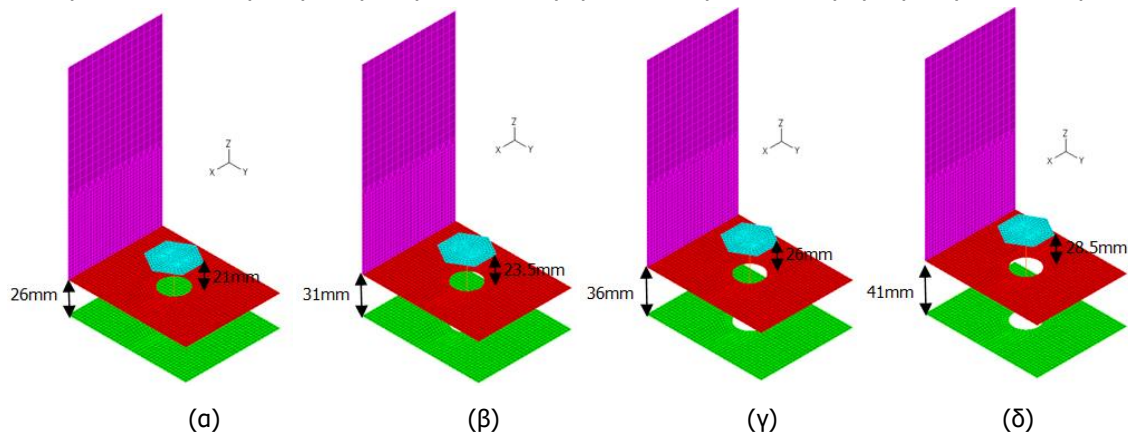
Αρχικά, εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής του πάχους των δακτυλιοειδών ελασμάτων. Συγκρίνονται τέσσερα διαφορετικά προσομοιώματα στα οποία μεταβάλλονται τα πάχη των δακτυλιοειδών ελασμάτων με βήμα 5mm. Ειδικότερα, εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για προσομοιώματα με πάχη ελασμάτων 25mm, 30mm και 35mm και συγκρίνονται με το ήδη υπάρχον προσομοίωμα με πάχος ελάσματος 40mm.

Στη δεύτερη παραμετρική ανάλυση, εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής της διαμέτρου του κοχλία. Συγκρίνονται τρία διαφορετικά προσομοιώματα στα οποία μεταβάλλεται η διάμετρος του κοχλία και συνεπώς μεταβάλλεται ανάλογα και η διάμετρος της οπής των δακτυλιοειδών ελασμάτων, όπως ορίζεται στο πρότυπο EN1993-1-8. Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται κοχλίες με διάμετρο 16mm και 22mm και εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα, τα οποία συγκρίνονται με το ήδη υπάρχον προσομοίωμα με διάμετρο κοχλία 20mm.

4.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

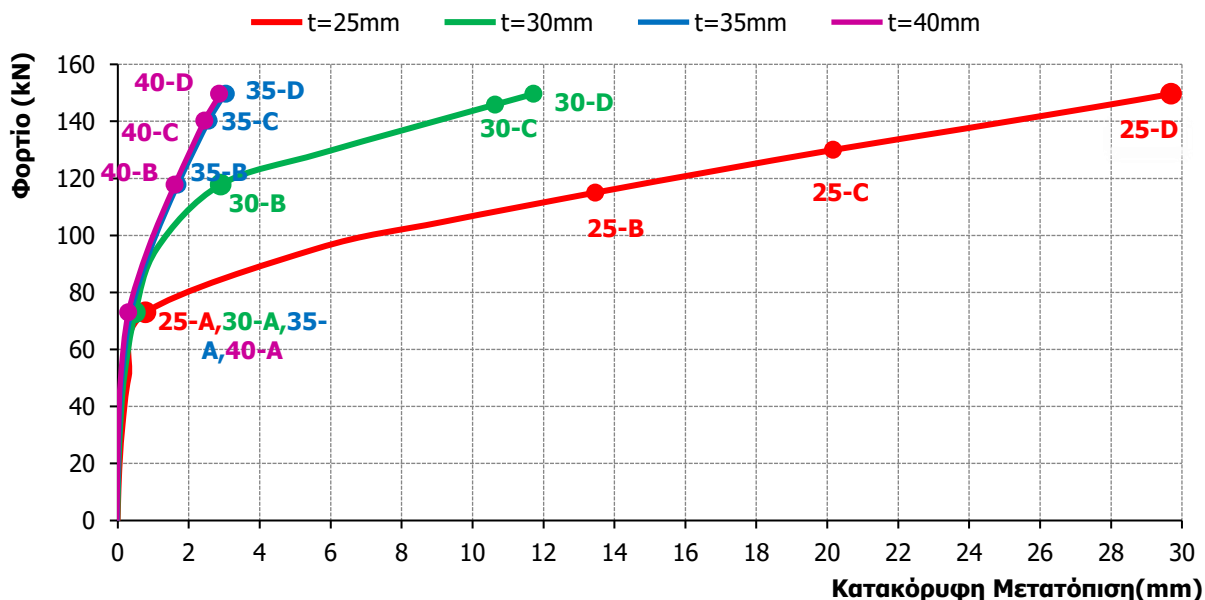
Το πρώτο σύνολο παραμετρικών αναλύσεων για τη σύνδεση των δακτυλιοειδών ελασμάτων αφορά την επίδραση του πάχους των ελασμάτων στην απόκριση της συγκεκριμένης σύνδεσης που μελετάται. Για τις αναλύσεις αυτές δημιουργούνται αντίστοιχα προσομοιώματα με αυτό των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μόνη διαφορά των προσομοιωμάτων αυτών είναι τα πάχη των ελασμάτων τους. Ειδικότερα, δημιουργούνται τρία νέα προσομοιώματα με πάχη ελασμάτων 35mm, 30mm και 25mm και ασκείται κατακόρυφα σε καθένα από αυτά στην κορυφή του πυλώνα κατανεμημένο φορτίο 8.8kN/κόμβο. Σε όλα αυτά τα μοντέλα το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων διατηρείται σταθερό, η γεωμετρία το ίδιο και το μόνο που

αλλάζει είναι η απόσταση των μέσων επιφανειών που προσομοιώνονται. Είναι λογικό ότι στο προσομοίωμα με πάχος ελάσματος 25mm, η απόσταση των δύο δακτυλιοειδών ελασμάτων είναι 26mm ενώ η απόσταση κεφαλής κοχλίου και άνω ελάσματος 21mm, λαμβάνοντας υπόψη και τις απαιτούμενες ανοχές. Αντίστοιχα, αυτές οι αποστάσεις στο προσομοίωμα των 30mm είναι 31mm και 23.5mm, ενώ στο προσομοίωμα των 35mm είναι 36mm και 26mm αντίστοιχα. Στα Σχήματα 4-1α,β,γ,δ απεικονίζονται τα τέσσερα προσομοιώματα που αφορούν οι παρακάτω παραμετρικές αναλύσεις.

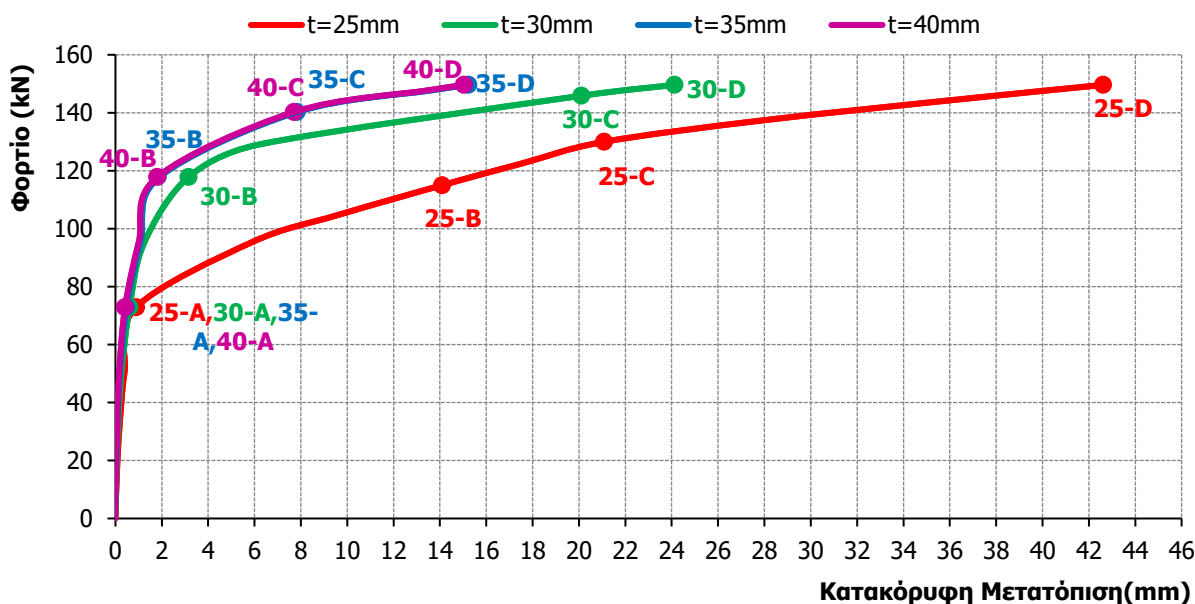


Σχήμα 4-1: Αριθμητικά προσομοιώματα με πάχη δακτυλιοειδών ελασμάτων, (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm

Στο Σχήμα 4-2, παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 1 (Σχήμα 3-21), πίσω από το άνω έλασμα για τα τέσσερα παραπάνω προσομοιώματα. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 4-3 απεικονίζονται οι δρόμοι ισορροπίας στη Θέση2 (Σχήμα 3-21), που βρίσκεται στον πυλώνα, 100mm πάνω από το άνω έλασμα. Πάνω στους δρόμους αυτούς έχουν επισημανθεί τα τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία που θα αναλυθούν στη συνέχεια και είναι αντίστοιχα με τα τέσσερα σημεία που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3.5 στο προσομοίωμα των 40mm.



Σχήμα 4-2: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 1

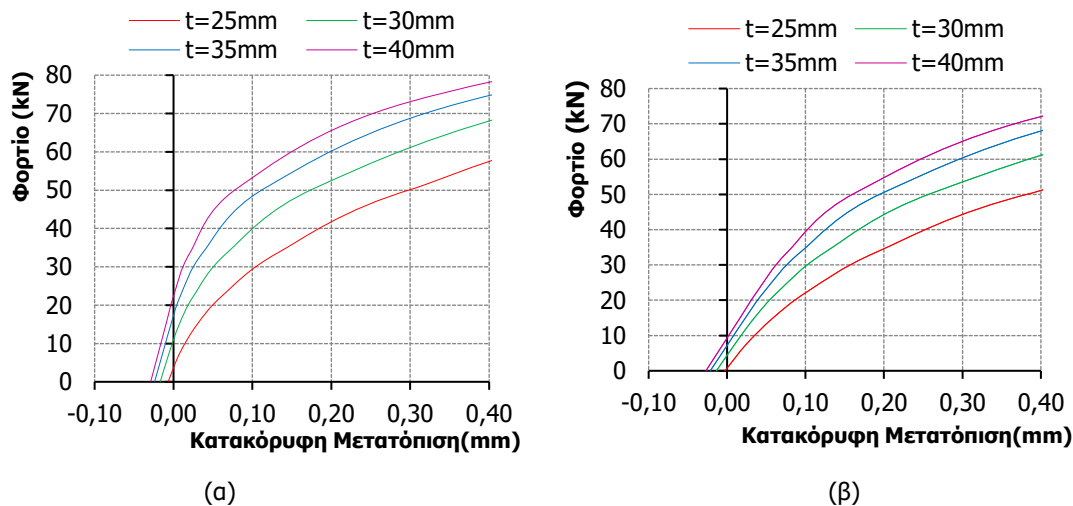


Σχήμα 4-3: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 2

Μέσω των δύο παραπάνω διαγραμμάτων και των τεσσάρων χαρακτηριστικών σημείων κάθε δρόμου ισορροπίας μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα τα οποία αφορούν το συγκεκριμένο προσομοίωμα και τη συμπεριφορά του, καθώς μεταβάλλεται το πάχος των ελασμάτων του.

Σε όλα τα προσομοιώματα έχει χρησιμοποιηθεί ο ίδιος κοχλίας (M20) και συνεπώς όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3.5, ο κοχλίας θα αστοχούσε ονομαστικά σε εφελκυσμό σε αρκετά μικρότερο φορτίο από αυτό που σταματάει η ανάλυση. Ειδικότερα, ο κοχλίας θα αστοχούσε σε φορτίο 245kN, που αντιστοιχεί σε ασκούμενο φορτίο του προσομοιώματος πάχους 40mm περίπου 120kN. Όπως όμως προαναφέρθηκε, οι συγκεκριμένες αριθμητικές αναλύσεις δεν μπορούν να λάβουν υπόψη αυτή την αστοχία μιας και ο κοχλίας έχει προσομοιωθεί με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία και ελαστικό υλικό λόγω των δυνατοτήτων του λογισμικού. Συνεπώς, η ανάλυση θα έπρεπε να σταματάει σε φορτίο 120kN για το πάχος 40mm και γενικότερα σε σχετικά μικρά φορτία για όλα τα πάχη δακτυλιοειδούς ελάσματος. Παρόλα αυτά, το διάγραμμα στο Σχήμα 4-8 μπορεί να μην είναι επαρκώς ακριβές αφού λόγω της προσομοίωσης του κορμού του κοχλίας με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία είναι επίσης αδύνατη η προσομοίωση της επαφής της άντυγας με τον κορμό. Επιπλέον, αν ο κοχλίας ήταν καλύτερης ποιότητας μπορεί να υπήρχαν μεγαλύτερα περιθώρια.

Όσον αφορά την αρχική δυσκαμψία των προσομοιωμάτων και στις δύο παραπάνω ομάδες δρόμων ισορροπίας μπορεί να φαίνεται ότι είναι σχεδόν ταυτόσημη μιας και η αρχική κλίση και των τεσσάρων προσομοιωμάτων περίπου ταυτίζεται, παρόλα αυτά κάνοντας μια μεγέθυνση σε αυτό το σημείο φαίνεται ότι οι αρχικές δυσκαμψίες των προσομοιωμάτων, κυρίως στη Θέση 1, διαφέρουν (Σχήματα 4-4α,β). Το γεγονός ότι τα δύο αυτά διαγράμματα ξεκινούν από αρνητικές τιμές, οφείλεται στο ότι στο πρώτο βήμα της ανάλυσης κλείνει το κενό-ανοχή που υπάρχει μεταξύ των δύο δακτυλιοειδών ελασμάτων.

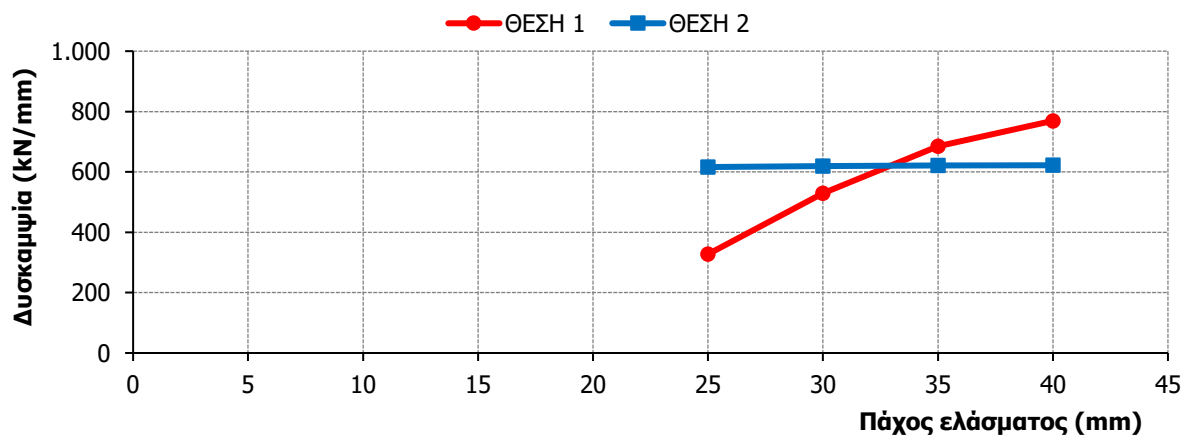


Σχήμα 4-4: Μεγέθυνση σχημάτων 4-3 και 4-4 (α)Θέση1 και (β)Θέση 2

Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4-5 απεικονίζεται ο πίνακας με τις αρχικές δυσκαμψίες των τεσσάρων διαφορετικών προσομοιωμάτων για τις δύο θέσεις μέτρησης. Όπως γίνεται αντιληπτό και από τον πίνακα, τα προσομοιώματα με το μικρότερο πάχος ελάσματος έχουν μικρότερη αρχική δυσκαμψία K1, ενώ όσο το πάχος των ελασμάτων αυξάνεται τόσο πιο δύσκαμπτο γίνεται το προσομοίωμα. Αντίθετα, η αρχική δυσκαμψία K2 είναι περίπου ίδια και στα τέσσερα προσομοιώματα. Η αρχική δυσκαμψία K1 του πίνακα αντιστοιχεί στη Θέση 1 πίσω από το άνω έλασμα και είναι καμπτική δυσκαμψία αφού το άνω έλασμα δέχεται φορτίο κάθετα στο επίπεδό του, επομένως κάμπτεται. Αντίθετα, η K2 αντιστοιχεί στη Θέση 2, 100mm πιο ψηλά από την πρώτη και αφορά τη δυσκαμψία του πυλώνα σε εφελκυστικό φορτίο, γιατί έχει αφαιρεθεί για τον υπολογισμό της η παραμόρφωση που οφείλεται στην κάμψη του δακτύλιου, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 για το προσομοίωμα των 40mm. Στο Σχήμα 4-6 παρουσιάζονται τα δεδομένα του Πίνακα 4-5, δηλαδή φαίνεται το διάγραμμα "πάχους ελάσματος (mm)–αρχικής δυσκαμψίας (kN/mm)" για τις δύο χαρακτηριστικές θέσεις ελέγχου.

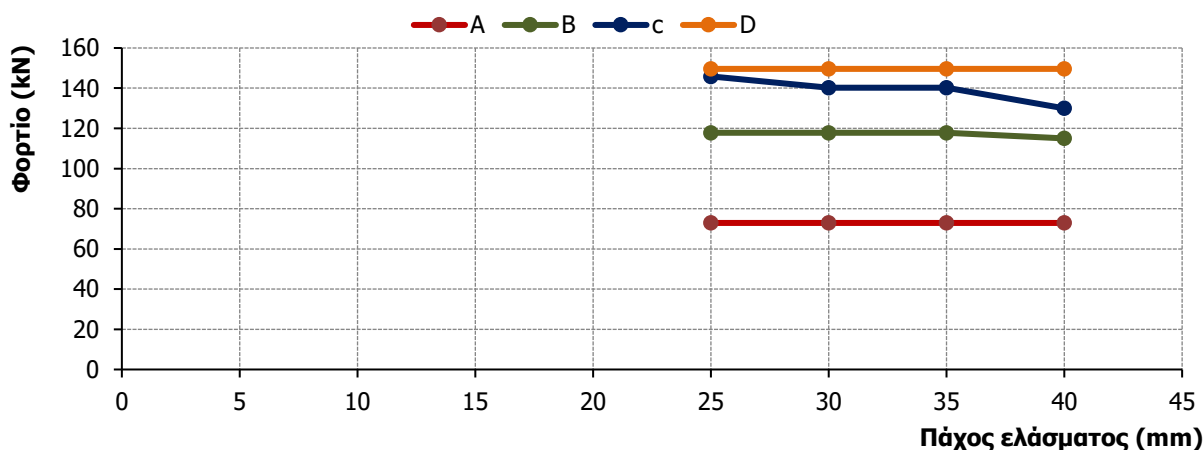
	Πάχος ελασμάτων t (mm)			
	20	30	35	40
Δυσκαμψία K1 (KN/m)	327390,51	528646,81	685023,51	769283,51
Δυσκαμψία K2 (KN/m)	616043,49	619547,21	621400,09	621985,70

Σχήμα 4-5: Πίνακας αρχικών δυσκαμψιών προσομοιωμάτων



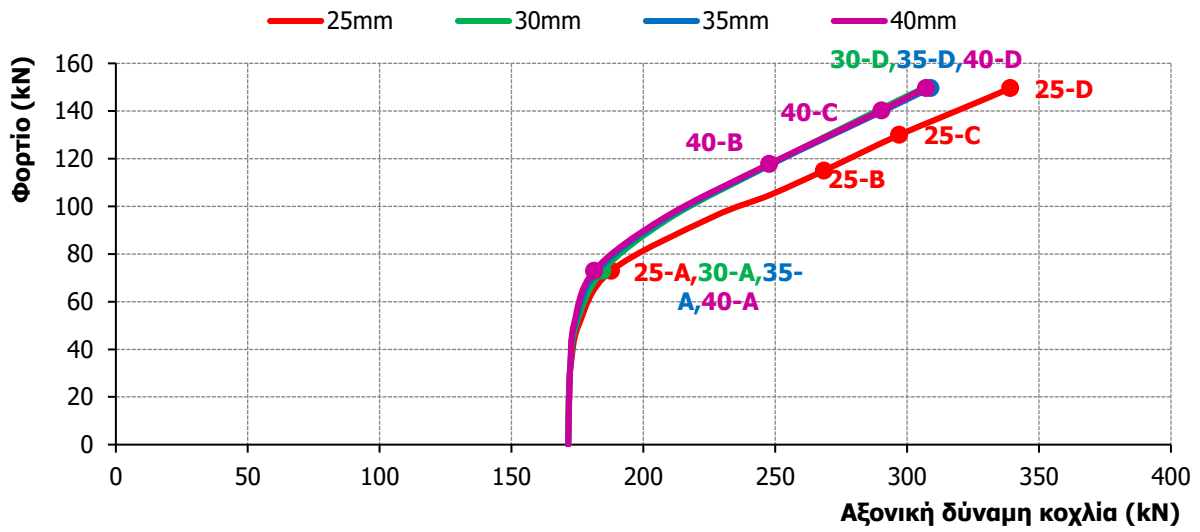
Σχήμα 4-6: Διάγραμμα πάχους ελάσματος - Αρχικής δυσκαμψίας

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4-7 απεικονίζεται το διάγραμμα στο οποίο φαίνεται το φορτίο στο οποίο αντιστοιχούν τα τέσσερα σημεία A,B,C,D των δρόμων ισορροπίας των Σχημάτων 4-2 και 4-3 για κάθε ένα από τα τέσσερα προσομοιώματα. Το σημείο A αφορά το φορτίο στο οποίο ο ρυθμός αύξησης της δύναμης του κοχλία γίνεται πιο έντονος. Το σημείο B τοποθετείται αμέσως μετά την έναρξη διαρροής του προσομοιωμένου τμήματος του πυλώνα ενώ στο σημείο C παρατηρείται πλήρης διαρροή του κελύφους του πυλώνα και πλήρης ή μερική διαρροή του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος. Τέλος, το σημείο D αφορά το τέλος των αριθμητικών αναλύσεων. Τα παραπάνω σημεία θα αναλυθούν στη συνέχεια.

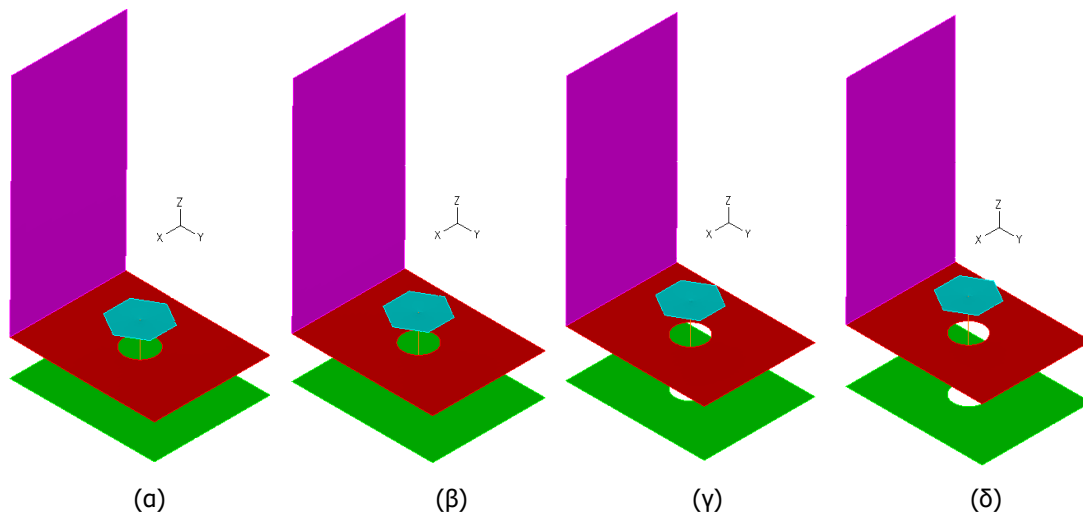


Σχήμα 4-7: Διάγραμμα πάχους ελάσματος – φορτίου χαρακτηριστικών σημείων A,B,C,D

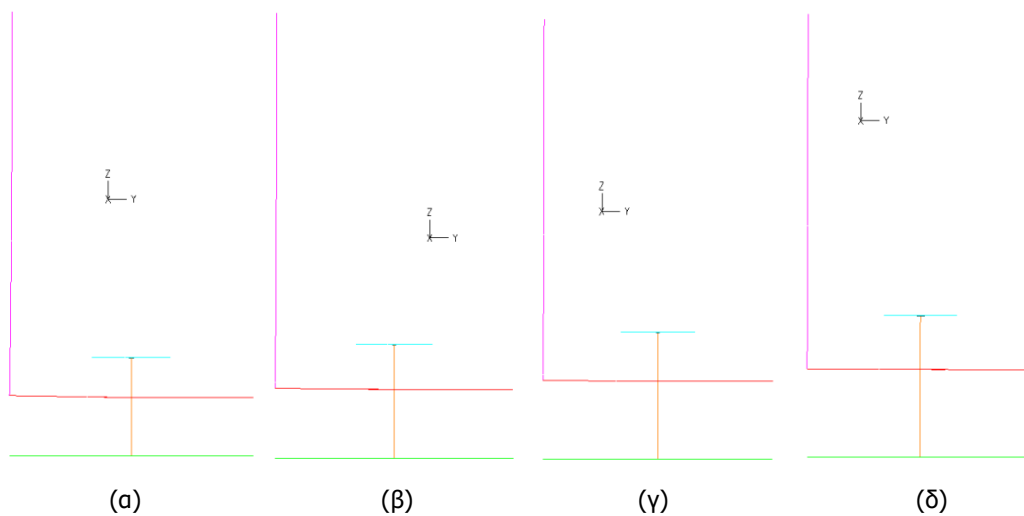
Το πρώτο κοινό σημείο αλλαγής κλίσης (Σημείο A), των δρόμων ισορροπίας των Σχημάτων 4-2 και 4-3 παρουσιάζεται σε φορτίο περίπου 70kN για όλα τα προσομοιώματα. Μέσω των διαγραμμάτων του Σχήματος 4-8, που απεικονίζουν τη μεταβολή της αξονικής δύναμης του κοχλία κατά τη διάρκεια της αριθμητικής ανάλυσης, γίνεται αντιληπτό ότι στο φορτίο των 60kN ως 70kN αυξάνεται ο ρυθμός αύξησης της δύναμης του κοχλία. Είναι λογικό το σημείο A να εμφανίζεται στο ίδιο φορτίο προσομοιώματος, ανεξαρτήτως του πάχους των ελασμάτων αφού ο κοχλίας είναι ίδιος και στα τέσσερα προσομοιώματα. Επιπλέον, στα Σχήματα 4-11α,β,γ,δ απεικονίζονται οι επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή, με ροζ χρώμα (sticking), ενώ με γαλάζιο χρώμα απεικονίζονται οι επιφάνειες του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος που έχουν αποκολληθεί (open). Μόνο για το προσομοίωμα των 25mm, παρατηρείται ότι το σημείο A αντιστοιχεί και στο φορτίο που παύει πλέον το άνω έλασμα να αποκολλάται, αφού η γαλάζια επιφάνεια όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4-15, 4-19 και 4-23 δεν μεταβάλλεται αλλά αρχίζει να κάμπτεται όλο και πιο έντονα. Αντίθετα, στα υπόλοιπα προσομοιώματα αυτή η κατακόρυφη απομάκρυνση του άνω ελάσματος θα συνεχιστεί. Επιπλέον, στο σημείο αυτό αρχίζει να διαρρέει το άνω δακτυλιοειδές έλασμα για όλα τα προσομοιώματα στην περιοχή γύρω από το κοχλία, ενώ στο προσομοίωμα των 25mm αυτή η διαρροή του άνω ελάσματος έχει ήδη φτάσει μέχρι και την άκρη του ελάσματος. Ειδικότερα, στην κλίμακα των τάσεων δίπλα από το προσομοίωμα στα Σχήματα 4-12α,β,γ,δ, τα χρώματα πάνω από το πορτοκαλί απεικονίζουν τα σημεία στα οποία έχει διαρρεύσει το προσομοίωμα. Τέλος, στα Σχήματα 4-9α,β,γ,δ και 4-10α,β,γ,δ παρουσιάζονται οι παραμορφωμένες εικόνες των προσομοιωμάτων στο Σημείο A.



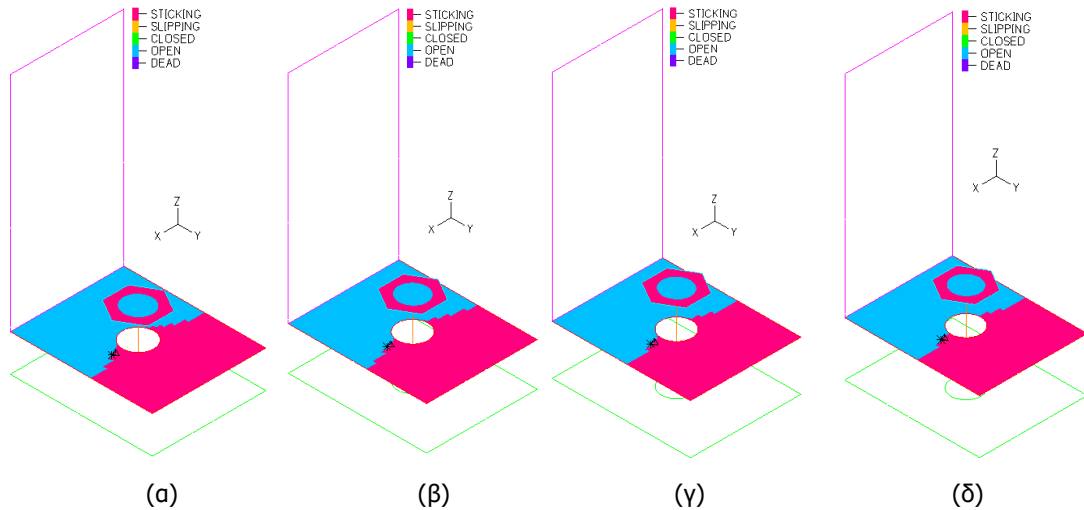
Σχήμα 4-8: Διάγραμμα αξονικής δύναμης κοχλία – αξονικής δύναμης προσομοιώματος



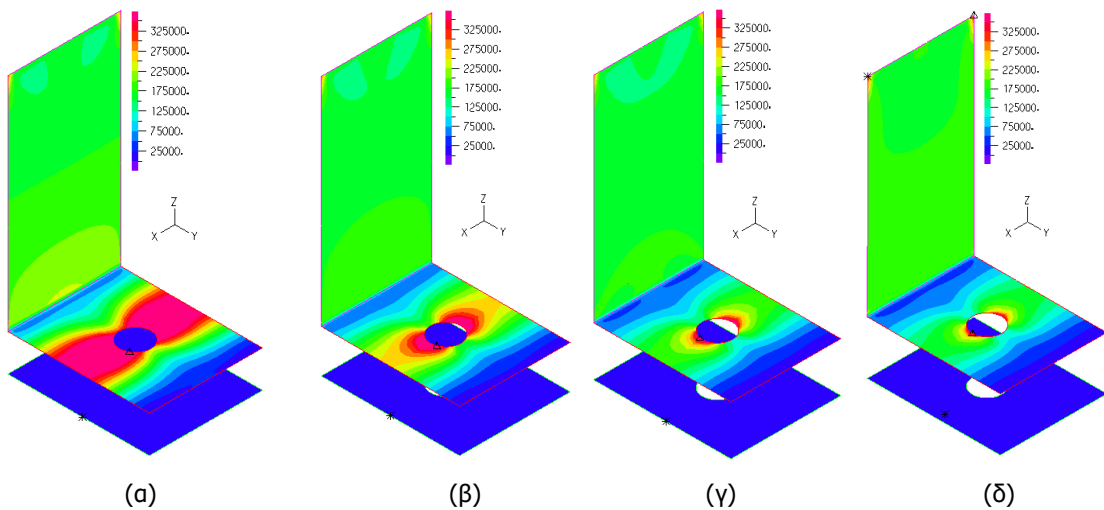
Σχήματα 4-9: Παραμορφωμένη εικόνα 3D στο Σημείο A: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm



Σχήματα 4-10: Παραμορφωμένη εικόνα 2D στο Σημείο A: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm

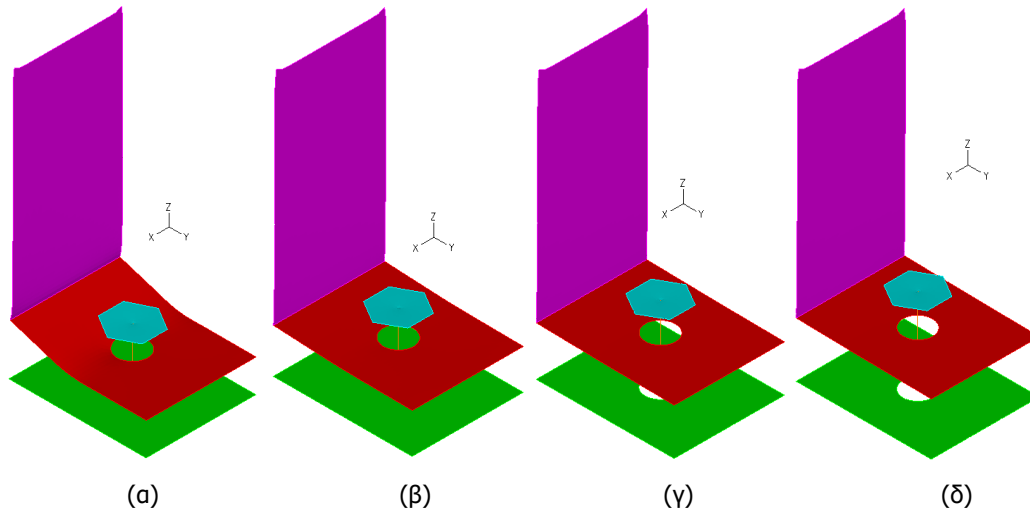


Σχήματα 4-11: Επιφάνειες σε επαφή στο Σημείο A: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm

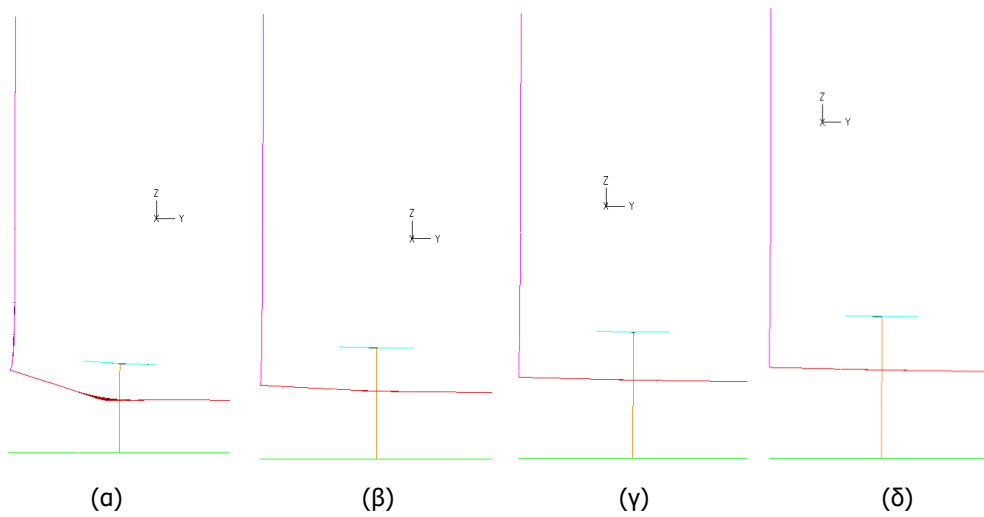


Σχήματα 4-12: Τάσεις von Mises στο Σημείο A: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm

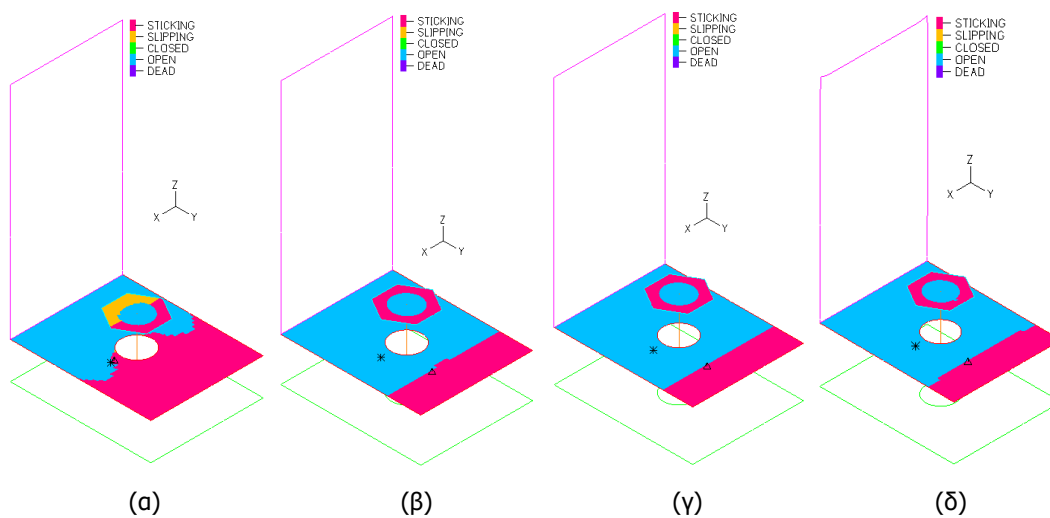
Έπειτα, στους δρόμους ισορροπίας στη Θέση 2 (Σχήμα 4-3), στα τρία προσομοιώματα, των 30mm, των 35mm και των 40mm, παρατηρείται ένα δεύτερο σημείο αλλαγής της κλίσης της καμπύλης (σημείο B) περί τα 120kN. Για το προσομοίωμα των 25mm, στο σημείο B η αλλαγή κλίσης είναι πολύ πιο μικρή. Είναι λογικό αυτό το σημείο να συμπίπτει για τα προσομοιώματα μιας και αφορά τη διαρροή του πυλώνα που είναι κοινός σε όλα τα προσομοιώματα. Επίσης, η διαρροή του πυλώνα αφορά όλο και μεγαλύτερο τμήμα του καθώς μετακινούμαστε από τα λεπτότερα ελάσματα στα παχύτερα και αυτό φαίνεται από τις τάσεις von Mises των Σχημάτων 4-16α,β,γ,δ. Επιπλέον, στο προσομοίωμα των 35mm το άνω δακτυλιοειδές έλασμα σταματάει πλέον να αποκολλάται και αρχίζει και αυτό να κάμπτεται στην ήδη αποκολλημένη περιοχή όπως κάνει το έλασμα των 25mm. Τέλος, όλο και μεγαλύτερο τμήμα του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος διαρρέει σε όλα τα προσομοιώματα. Στα Σχήματα 4-13α,β,γ,δ και 4-14α,β,γ,δ παρουσιάζονται όλες οι παραμορφωμένες εικόνες των προσομοιωμάτων στο Σημείο B ενώ στο Σχήμα 4-15α,β,γ,δ οι επιφάνειες των άνω δακτυλιοειδών ελασμάτων που έχουν αποκολληθεί.



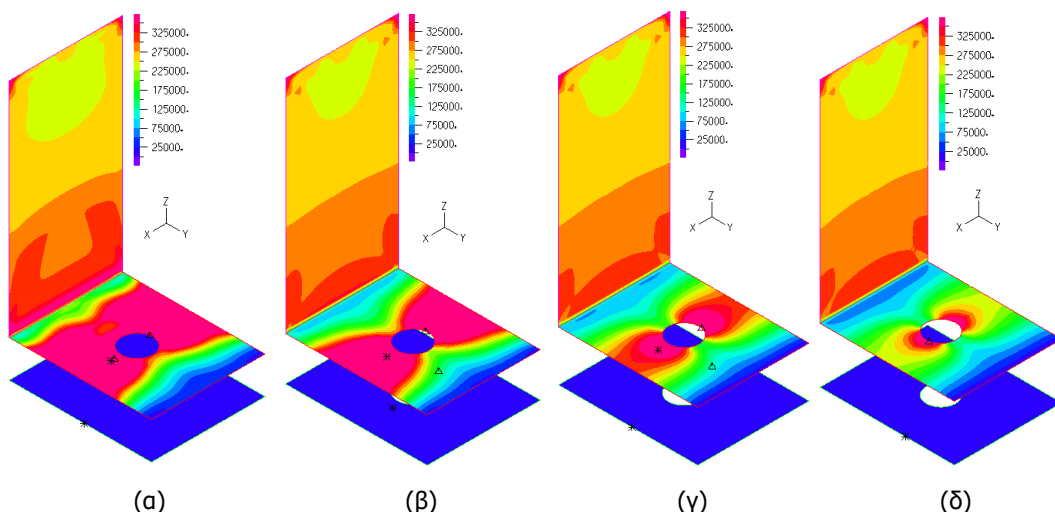
Σχήματα 4-13: Παραμορφωμένη εικόνα 3D στο Σημείο B: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm



Σχήματα 4-14: Παραμορφωμένη εικόνα 2D στο Σημείο B: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm

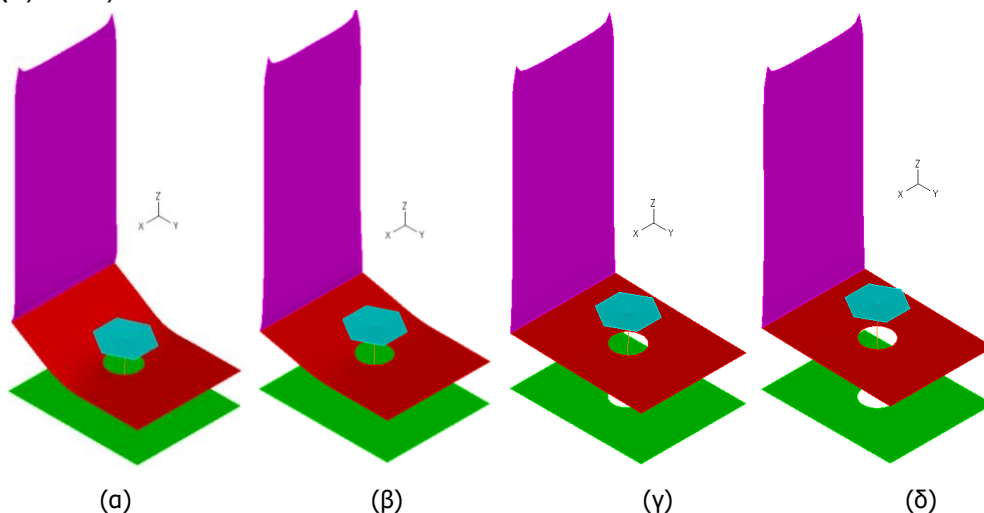


Σχήματα 4-15: Επιφάνειες σε επαφή στο Σημείο B: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm

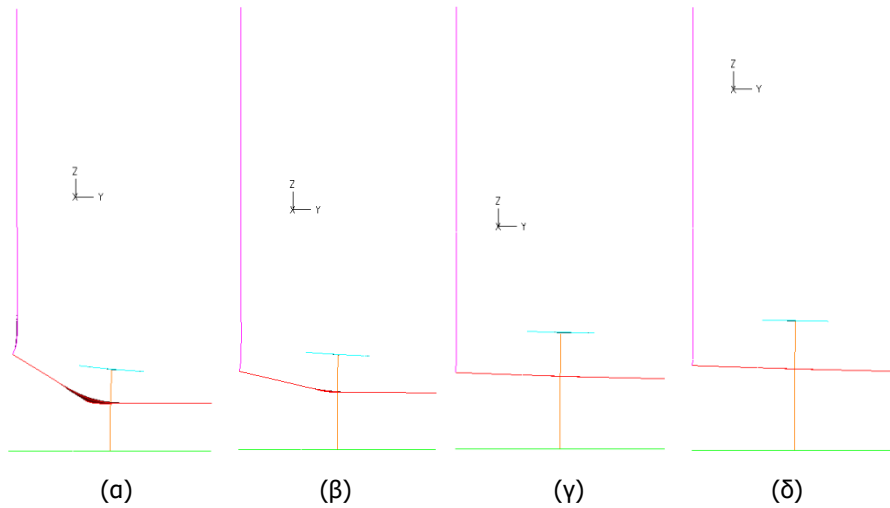


Σχήματα 4-16: Τάσεις von Mises στο Σημείο B: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm

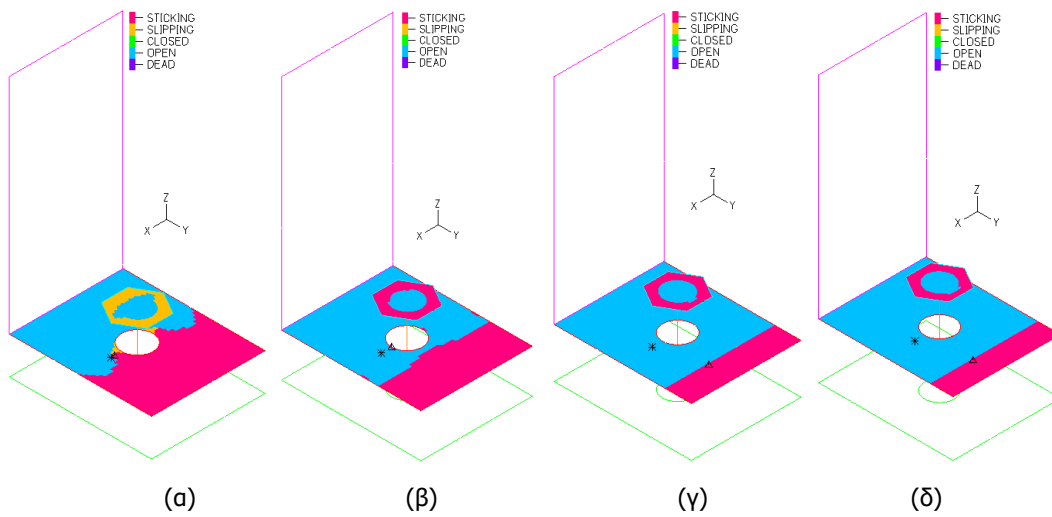
Το επόμενο σημείο (Σημείο C) των δρόμων ισορροπίας των Σχημάτων 4-2 και 4-3 παρουσιάζεται στα τρία από τα τέσσερα στο ίδιο περίπου φορτίο και αφορά την πλήρη διαρροή του πυλώνα. Στο προσομοίωμα των 25mm το σημείο αυτό παρατηρείται λίγο νωρίτερα. Επίσης, στο φορτίο αυτό σε όλα τα προσομοιώματα έχει διαρρεύσει σχεδόν όλο το άνω δακτυλιοειδές έλασμα. Τα προσομοιώματα των 25mm και 30mm παρουσιάζουν όλο και μεγαλύτερη κάμψη της επιφάνειας του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος που έχει αποκολληθεί, ενώ τα προσομοιώματα των 35mm και 40mm παρουσιάζουν μια αύξηση του τμήματος του άνω ελάσματος που αποκολλάται. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του άνω ελάσματος, τόσο μεγαλύτερο είναι το τμήμα που ανασηκώνεται και τόσο μικρότερη είναι η καμπτική παραμόρφωση που παρουσιάζει. Στα Σχήματα 4-17α,β,γ,δ και 4-18α,β,γ,δ παρουσιάζονται οι παραμορφωμένες εικόνες των προσομοιωμάτων στο Σημείο C, στα Σχήματα 4-19α,β,γ,δ οι επιφάνειες των ελασμάτων που βρίσκονται σε επαφή ή έχουν αποκολληθεί και στα Σχήματα 4-20α,β,γ,δ οι αντίστοιχες τάσεις von Mises.



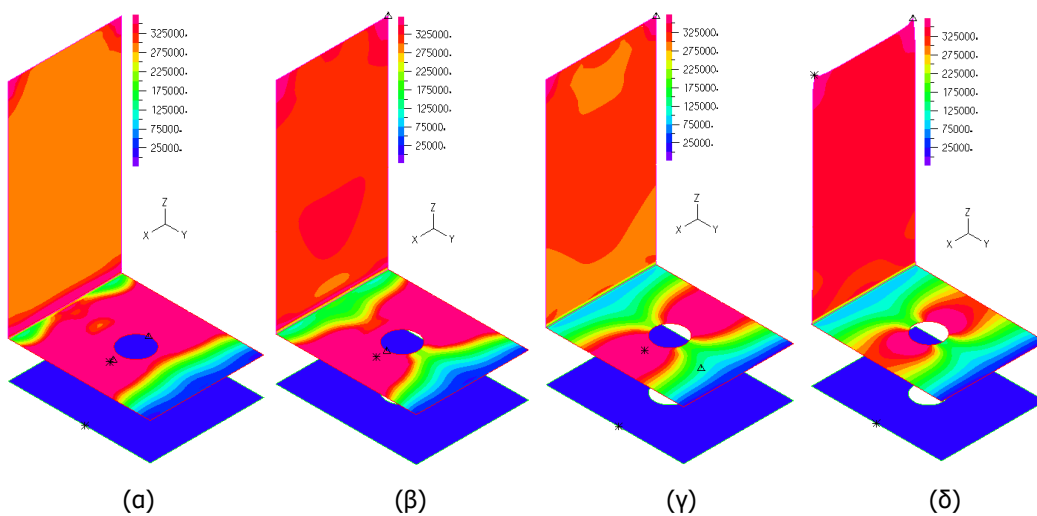
Σχήματα 4-17: Παραμορφωμένη εικόνα 3D στο Σημείο C: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm



Σχήματα 4-18: Παραμορφωμένη εικόνα 2D στο Σημείο C: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm

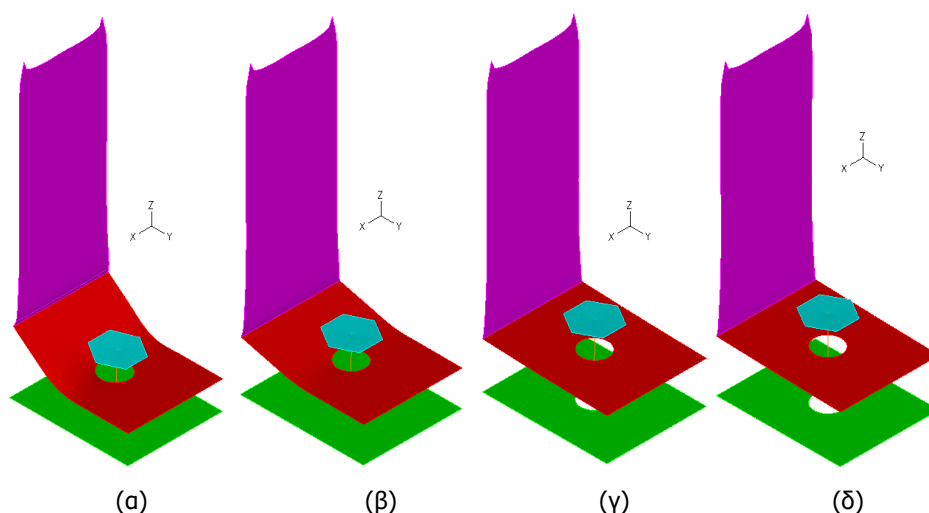


Σχήματα 4-19: Επιφάνειες σε επαφή στο Σημείο C: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm

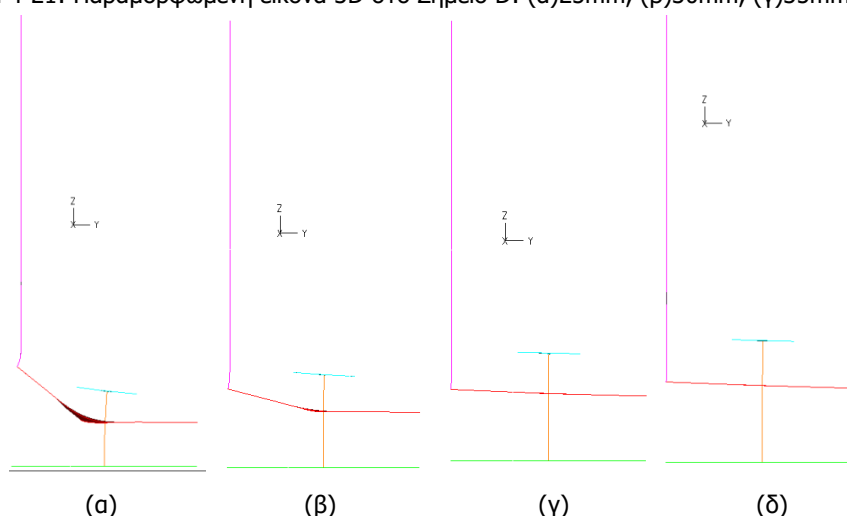


Σχήματα 4-20: Τάσεις von Mises στο Σημείο C: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm

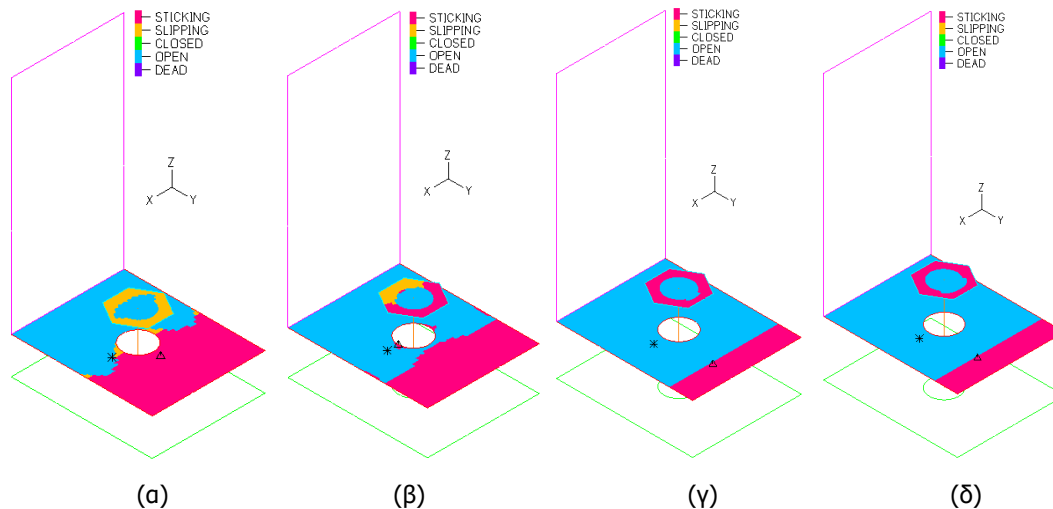
Τέλος, από τους δρόμους ισορροπίας των Σχημάτων 4-2 και 4-3 παρατηρείται ότι όσο πιο λεπτά είναι τα ελάσματα τόσο μεγαλύτερες είναι και οι τελικές μετατοπίσεις που παρουσιάζονται, μιας και όπως φαίνεται από τις παραμορφωμένες εικόνες τα ελάσματα των 30mm και των 25mm παρουσιάζουν έντονη κάμψη του άνω ελάσματος, που οδηγεί σε μεγάλες κατακόρυφες μετατοπίσεις. Όπως έχει προαναφερθεί, οι δρόμοι ισορροπίας που αφορούν τη Θέση 1 φτάνουν σε μικρότερες μετατοπίσεις για όλα τα προσομιώματα σε σύγκριση με τους δρόμους που αφορούν τη Θέση 2 που βρίσκεται πάνω στον πυλώνα. Επιπλέον, στα προσομιώματα των 40mm και 35mm οι δρόμοι ισορροπίας είναι σχεδόν ίδιοι και συνεχίζει να αυξάνεται το κομμάτι του άνω ελάσματος που αποκολλάται. Αντίστοιχα, η κάμψη αυτού στα άλλα δύο προσομιώματα είναι όλο και μεγαλύτερη. Παρόλα αυτά, επισημαίνεται πάλι ότι οι συγκεκριμένες αριθμητικές αναλύσεις δεν προβλέπουν με ακρίβεια ούτε την τελική μετατόπιση του προσομιώματος, ούτε το οριακό φορτίο και συνεπώς τον δρόμο ισορροπίας μέχρι την αστοχία. Αυτό οφείλεται σε προβλήματα σύγκλισης των αναλύσεων και στο γεγονός ότι με το συγκεκριμένο προσομιώμα δεν προβλέπεται αστοχία της συγκόλλησης ή του κοχλία όπως αναφέρθηκε παραπάνω αφού λειτουργούν ελαστικά και θα ήταν αυτά που λογικά θα επέφεραν την τελική αστοχία. Τέλος, στα Σχήματα 4-21α,β,γ,δ και 4-22α,β,γ,δ παρουσιάζονται οι παραμορφωμένες εικόνες των προσομιωμάτων στο Σημείο D (τέλος αναλύσεων), στα Σχήματα 4-23α,β,γ,δ οι επιφάνειες των ελασμάτων που βρίσκονται σε επαφή ή έχουν αποκολληθεί και στα Σχήματα 4-24α,β,γ,δ οι αντίστοιχες τάσεις von Mises.



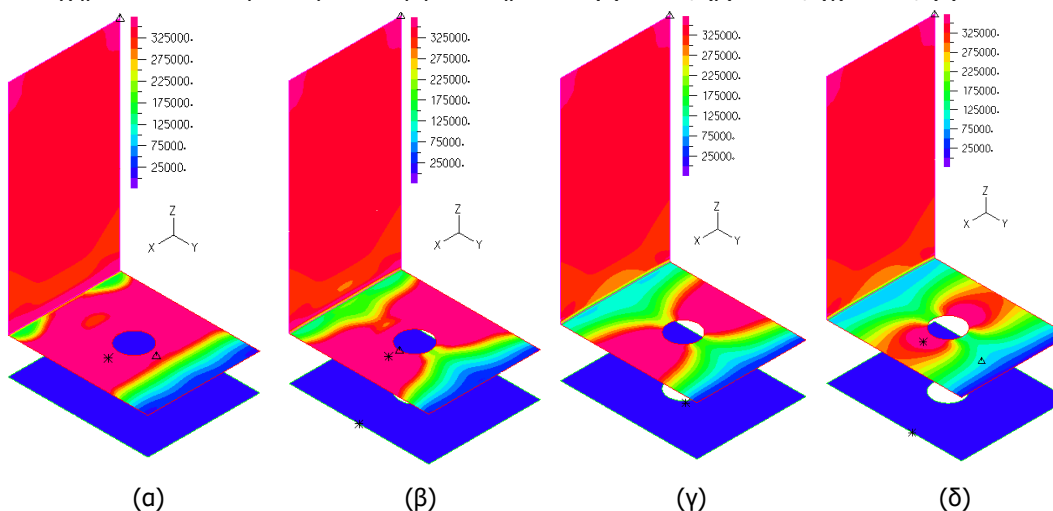
Σχήματα 4-21: Παραμορφωμένη εικόνα 3D στο Σημείο D: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm



Σχήματα 4-22: Παραμορφωμένη εικόνα 2D στο Σημείο D: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm



Σχήματα 4-23: Επιφάνειες σε επαφή στο Σημείο D: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm



Σχήματα 4-24: Τάσεις von Mises στο Σημείο D: (α)25mm, (β)30mm, (γ)35mm, (δ)40mm

4.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ

Το δεύτερο σύνολο παραμετρικών αναλύσεων για τη σύνδεση των δακτυλιοειδών ελασμάτων αφορά την επίδραση της διαμέτρου του κοχλία στη συγκεκριμένη σύνδεση που μελετάται. Για τις αναλύσεις αυτές δημιουργούνται αντίστοιχα προσομοιώματα με αυτό των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.3. Η μόνη διαφορά των προσομοιωμάτων αυτών είναι η διάμετρος του κοχλία. Υπενθυμίζεται εδώ ότι το αρχικό προσομοίωμα είχε πάχη ελασμάτων 40mm, πάχος πυλώνα 6mm και τα υλικά των δύο αυτών τμημάτων είναι χάλυβας S275. Ο κοχλίας του προσομοιώματος είχε διάμετρο 20mm, δύναμη προέντασης 171.5kN και ήταν από ελαστικό υλικό.

Τα δύο άλλα προσομοιώματα που θα χρησιμοποιηθούν σε αυτές τις παραμετρικές αναλύσεις έχουν τα ίδια πάχη ελασμάτων και πυλώνα αλλά διαφέρουν στη διάμετρο του κοχλία και συνεπώς στη δύναμη προέντασης του. Το ένα προσομοίωμα έχει κοχλία διαμέτρου 16mm και η κεφαλή του έχει την γεωμετρία που αναλύεται παρακάτω. Επίσης, η οπή των δακτυλιοειδών ελασμάτων έχει διάμετρο 18mm, 2mm δηλαδή μεγαλύτερη από τη διάμετρο του κοχλία (M16), όπως ορίζει και ο EN1993-1-8. Οι ακριβείς διαστάσεις του κοχλία M16 ελήφθησαν σύμφωνα με το DIN6914 και σύμφωνα με το συμβολισμό του Σχήματος 4-25α, αυτές είναι:

- διάμετρος κοχλία d=16mm

- διάμετρος οπής $d_0=16\text{mm}+2\text{mm}=18\text{mm}$
- διάμετρος εγγεγραμμένου κύκλου κεφαλής κοχλία $s=27\text{mm}$
- διάμετρος περιγεγραμμένου κύκλου κεφαλής κοχλία $e=30\text{mm}$
- πάχος κεφαλής κοχλία $k=10\text{mm}$

Επιπλέον, μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και του άνω ελάσματος θεωρείται μία ανοχή 2mm, ενώ μεταξύ των δύο ελασμάτων αφήνεται μία ανοχή 1mm. Άρα, οι δύο πρώτες επιφάνειες, από πάνω, απέχουν 27mm ενώ τα δύο ελάσματα απέχουν 41mm. Οι επιφάνειες αυτές, επιλέγεται να χωριστούν σε επιμέρους περιοχές, ώστε να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερη διακριτοποίηση. Το ύψος του τμήματος του πυλώνα που προσομοιώνεται είναι 157mm και εκτείνεται μέχρι τη μέση επιφάνεια του άνω ελάσματος. Τέλος, ο κορμός του κοχλία επιλέγεται να προσομοιωθεί ως ένα ευθύγραμμο ραβδωτό στοιχείο που ξεκινά από το έλασμα της κεφαλής του κοχλία και καταλήγει στο κάτω δακτυλιοειδές έλασμα. Η παραπάνω γεωμετρία παρουσιάζεται στα Σχήματα 4-25.

Η μέγιστη δύναμη προέντασης του κοχλία, σύμφωνα με τον EC3, είναι ίση με το 70% της εφελκυστικής του αντοχής και δίνεται από τη σχέση της παρακάτω εξίσωσης:

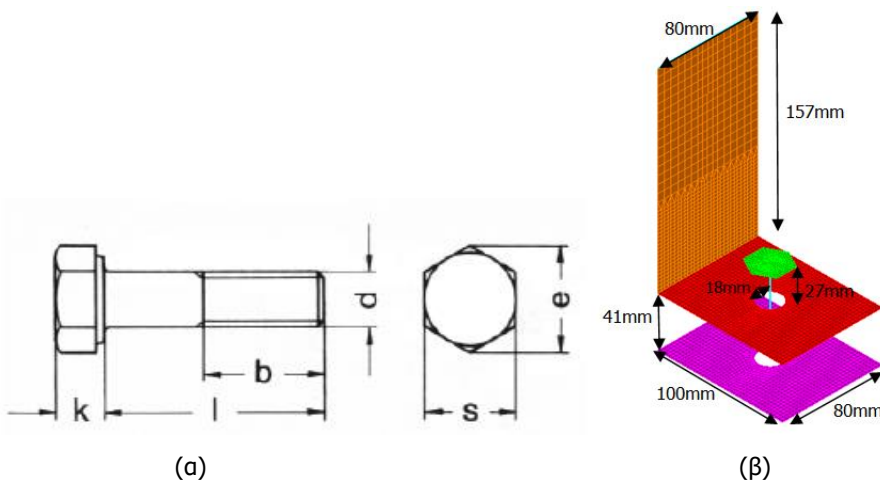
$$F_{p,c} = 0.7 \times f_{ub} \times A_s$$

όπου: f_{ub} είναι η εφελκυστική αντοχή του κοχλία και A_s το εμβαδόν σπειρώματος

Για κοχλία M16: $A_s=1.57\text{cm}^2$

Για ποιότητα κοχλία 10.9: $f_{ub}=1000\text{MPa}$ από την ανωτέρω σχέση προκύπτει:

$$F_{p,c} = 0.7 \times 100 \frac{\text{KN}}{\text{cm}^2} \times 1.57 \text{cm}^2 = 109.9 \text{kN}$$



Σχήμα 4-25: (α)Γεωμετρία κεφαλής κοχλία M16, (β)Αριθμητικό προσομοίωμα με κοχλία διαμέτρου 16mm
Αντίστοιχα, το άλλο προσομοίωμα έχει κοχλία διαμέτρου 22mm οι ακριβείς διαστάσεις του οποίου ελήφθησαν σύμφωνα με το DIN6914 και σύμφωνα με το συμβολισμό του Σχήματος 4-26α, αυτές είναι:

- διάμετρος κοχλία $d=22\text{mm}$
- διάμετρος οπής $d_0=22\text{mm}+2\text{mm}=24\text{mm}$
- διάμετρος εγγεγραμμένου κύκλου κεφαλής κοχλία $s=36\text{mm}$
- διάμετρος περιγεγραμμένου κύκλου κεφαλής κοχλία $e=39\text{mm}$

– πάχος κεφαλής κοχλία

$$k=14\text{mm}$$

Η μέγιστη δύναμη προέντασης του κοχλία, σύμφωνα με τον EC3, είναι ίση με το 70% της εφελκυστικής του αντοχής και δίνεται από τη σχέση της παρακάτω εξίσωσης:

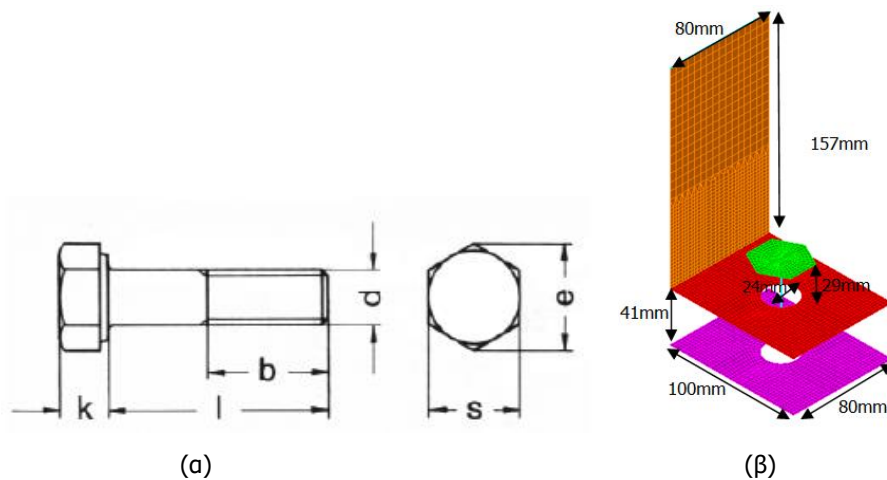
$$F_{p,C} = 0.7 \times f_{ub} \times A_s$$

όπου: f_{ub} είναι η εφελκυστική αντοχή του κοχλία και A_s το εμβαδόν σπειρώματος

Για κοχλία M16: $A_s=3.03\text{cm}^2$

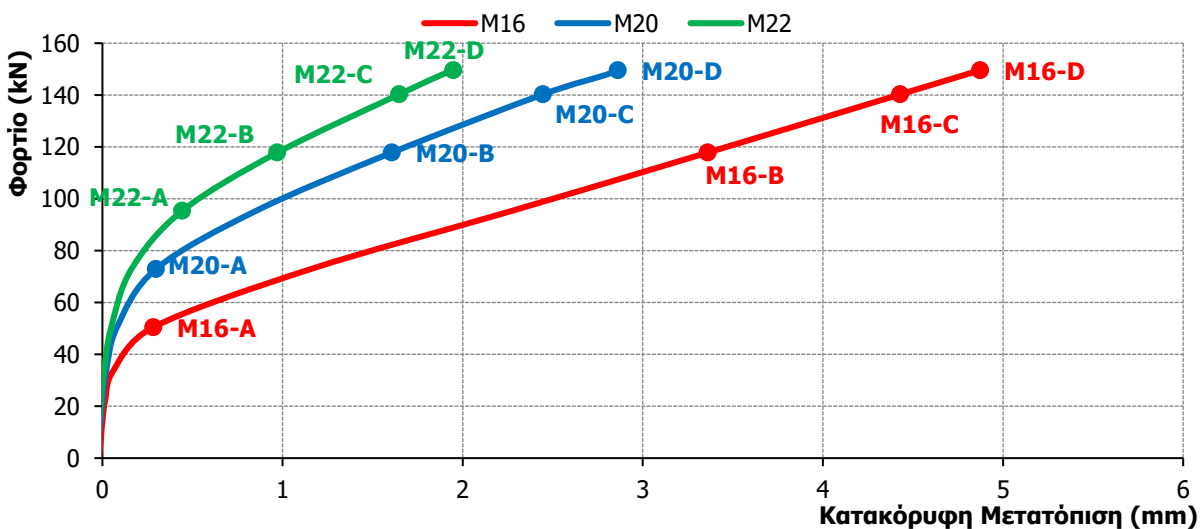
Για ποιότητα κοχλία 10.9: $f_{ub}=1000\text{MPa}$ από την ανωτέρω σχέση προκύπτει:

$$F_{p,C} = 0.7 \times 100 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 3.03\text{cm}^2 = 212.1\text{kN}$$

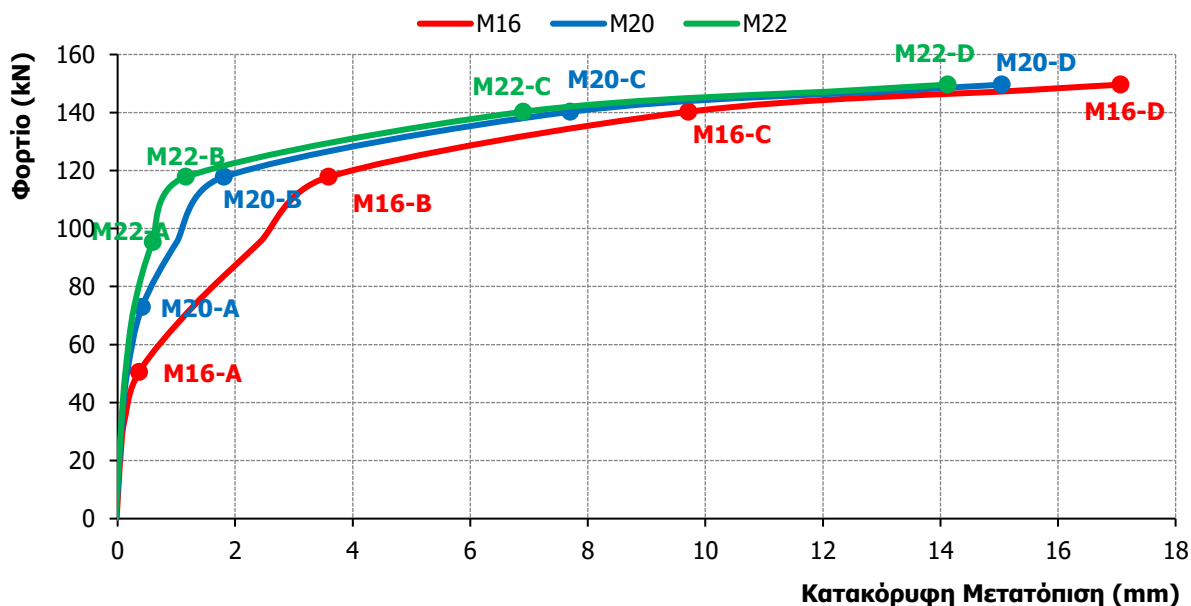


Σχήμα 4-26: (α)Γεωμετρία κεφαλής κοχλία M22, (β)Αριθμητικό προσομοίωμα με κοχλία διαμέτρου 22mm

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 4-27, παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 1 (Σχήμα 3-21), πίσω από το άνω έλασμα για τα προσομοιώματα που περιγράφηκαν παραπάνω σε σύγκριση με το αρχικό προσομοίωμα με κοχλία M20. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 4-28 απεικονίζονται οι δρόμοι ισορροπίας για τα ίδια προσομοιώματα, στη Θέση 2(Σχήμα 3-21), που βρίσκεται σε απόσταση 100mm πάνω από το άνω έλασμα και αφορά τον πυλώνα. Πάνω στους δρόμους αυτούς έχουν επισημανθεί τα τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία, που θα αναλυθούν στη συνέχεια και είναι αντίστοιχα με τα τέσσερα σημεία που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3.5 του κοχλία M20.



Σχήμα 4-27: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 1



Σχήμα 4-28: Δρόμοι ισορροπίας στη Θέση 2

Μέσω των δύο παραπάνω διαγραμμάτων και των τεσσάρων χαρακτηριστικών σημείων A,B,C,D μπορούν να εξαχθούν ορισμένα συμπεράσματα, τα οποία αφορούν το συγκεκριμένο προσομοίωμα και τη συμπεριφορά του καθώς μεταβάλλεται η διάμετρος του κοχλίου. Τα σημεία αυτά εκτός από το πρώτο αντιστοιχούν σε ίδιο περίπου ασκούμενο φορτίο προσομοιώματος.

Σε όλα τα προσομοιώματα ο κοχλίας θα αστοχούσε σε εφελκυσμό σε αρκετά μικρότερο φορτίο από αυτό που σταματάει η ανάλυση. Ειδικότερα, ο κοχλίας M20, όπως έχει προαναφερθεί θα αστοχούσε σε ονομαστικό φορτίο 245kN, που αντιστοιχεί σε ασκούμενο φορτίο προσομοιώματος περίπου 120kN. Αντίστοιχα, ο κοχλίας M16 θα αστοχούσε σε ονομαστικό φορτίο 157kN, που αντιστοιχεί σε ασκούμενο φορτίο προσομοιώματος περίπου 120kN, ενώ ο κοχλίας M22 θα αστοχούσε σε ονομαστικό φορτίο 303kN, που αντιστοιχεί σε ασκούμενο φορτίο προσομοιώματος περίπου 140kN (Σχήμα 4-31). Αναλυτικότερα, η ονομαστική εφελκυστική αντοχή των κοχλίων δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$F_{max} = f_{ub} \times A_s = 100 \frac{kN}{cm^2} \times 1.57cm^2 = 157kN$$

$$F_{max} = f_{ub} \times A_s = 100 \frac{kN}{cm^2} \times 3.03cm^2 = 303kN$$

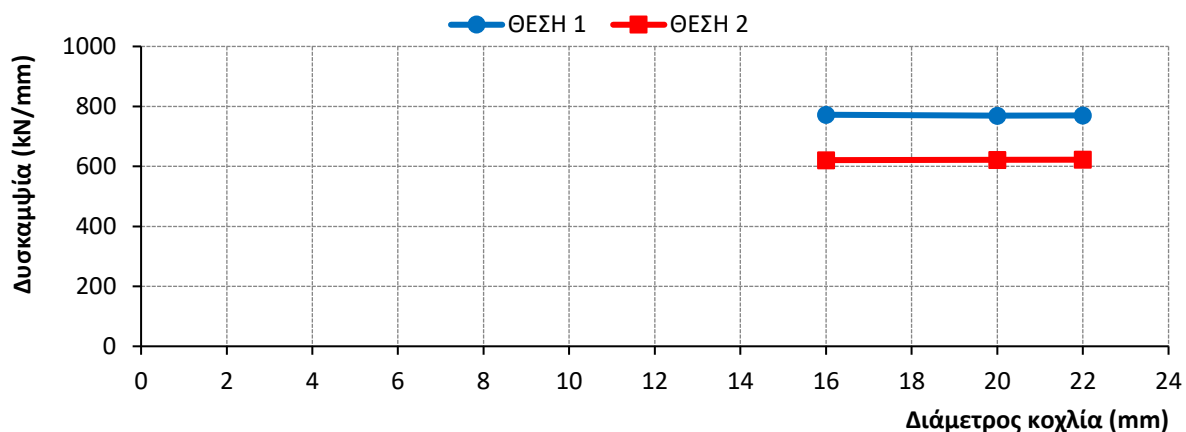
Όπως όμως προαναφέρθηκε, οι συγκεκριμένες αριθμητικές αναλύσεις δεν μπορούν να λάβουν υπόψη αυτή την αστοχία μιας και ο κοχλίας έχει προσομοιωθεί με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία και ελαστικό υλικό, διότι είναι υποχρεωτικό από το λογισμικό. Παρόλα αυτά, το διάγραμμα στο Σχήμα 4-31 μπορεί να μην είναι επαρκώς ακριβές, αφού λόγω της προσομοίωσης του κορμού του κοχλίου με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία είναι επίσης αδύνατη η προσομοίωση της επαφής της άντυγας με τον κορμό. Ανεξάρτητα από αυτό, είναι σαφές ότι όσο πιο μεγάλη είναι η διάμετρος του κοχλίου τόσο μεγαλύτερο είναι το ασκούμενο φορτίο στο οποίο αστοχεί ο κοχλίας, γιατί έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή.

Αρχικά, όσον αφορά τις αρχικές δυσκαμψίες των προσομοιωμάτων και στις δύο θέσεις περίπου ταυτίζονται. Πιο συγκεκριμένα, μέσω των παραπάνω διαγραμμάτων γίνεται αντιληπτό ότι η αρχική κλίση και των τριών δρόμων ισορροπίας που αποτυπώνει την αρχική δυσκαμψία της σύνδεσης είναι σχεδόν ίδια. Συνεπώς, η δυσκαμψία των συγκεκριμένων προσομοιωμάτων επηρεάζεται ελάχιστα από το μέγεθος του κοχλίου, μιας και η Δυσκαμψία K1 αφορά τα δακτυλιοειδή ελάσματα, ενώ η δυσκαμψία K2 τον πυλώνα, στοιχεία που είναι κοινά και στα τρία προσομοιώματα που εξετάζονται. Το παραπάνω

μπορεί να γίνει αντιληπτό και μέσα από τον Πίνακα του Σχήματος 4-29 στον οποίο παρουσιάζεται η αρχική δυσκαμψία σε kN/m των προσομοιωμάτων σε αντιστοιχία με τη διάμετρο του κοχλία. Τα παραπάνω δεδομένα του Πίνακα παρουσιάζονται και στο διάγραμμα του Σχήματος 4-30.

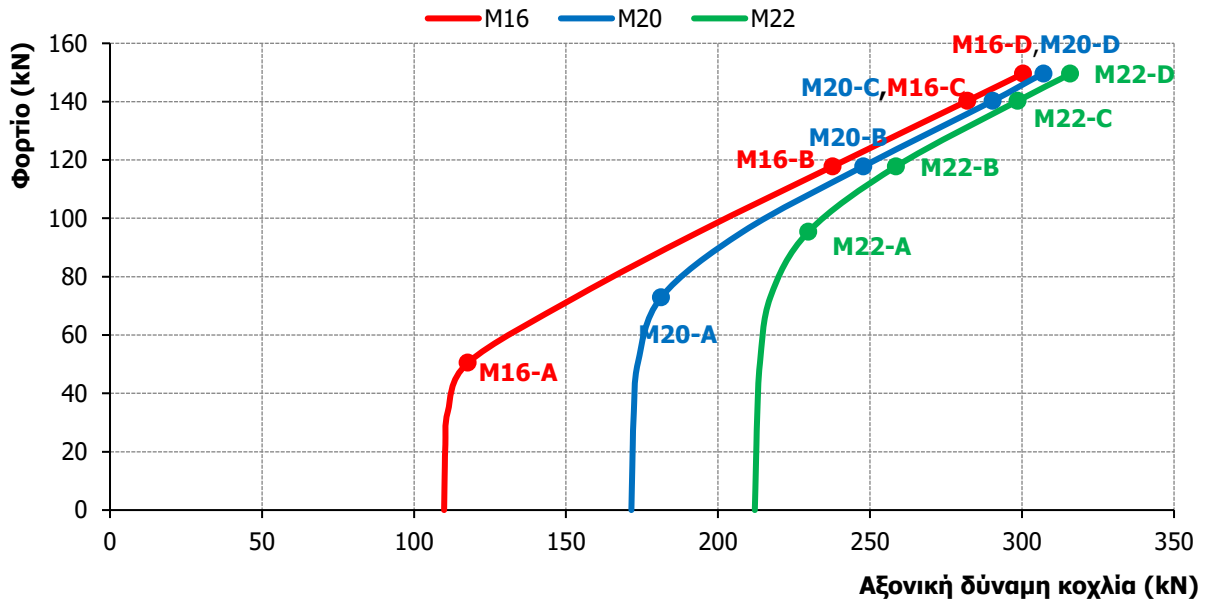
	Διάμετρος κοχλία(mm)		
	16	20	22
Δυσκαμψία K1 (KN/m)	772248,61	769283,51	769547,33
Δυσκαμψία K2 (KN/m)	620918,65	621985,70	622365,21

Σχήμα 4-29: Πίνακας αρχικών δυσκαμψιών προσομοιωμάτων

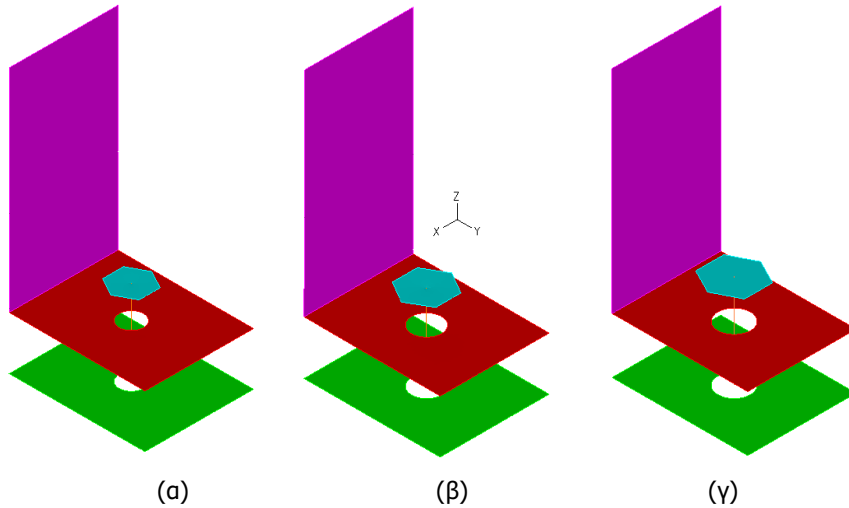


Σχήμα 4-30: Διάγραμμα διαμέτρου κοχλία - Αρχικής δυσκαμψίας

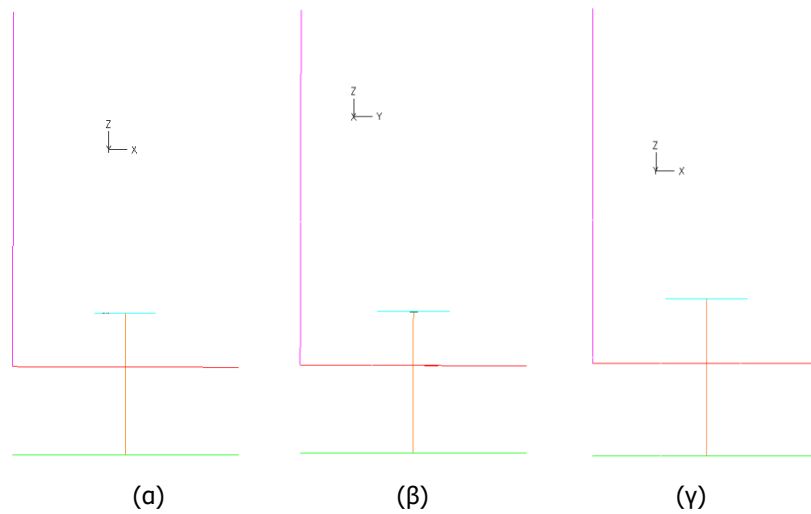
Το πρώτο κοινό σημείο αλλαγής κλίσης (Σημείο Α), των δρόμων ισορροπίας των Σχημάτων 4-27 και 4-28 παρουσιάζεται σε διαφορετικό ασκούμενο φορτίο για όλα τα προσομοιώματα. Ειδικότερα, στο προσομοίωμα με κοχλία M16 το Σημείο Α αντιστοιχεί σε ασκούμενο φορτίο περίπου ίσο με περίπου 50 kN, στο προσομοίωμα με κοχλία M20 σε ασκούμενο φορτίο περίπου ίσο με περίπου 70 kN και στο τρίτο προσομοίωμα το Σημείο Α συναντάται σε ασκούμενο φορτίο περίπου ίσο με 90 kN. Μέσω των διαγραμμάτων του Σχήματος 4-31, που απεικονίζουν τη μεταβολή της αξονικής δύναμης του κοχλία κατά τη διάρκεια της αριθμητικής ανάλυσης, γίνεται αντιληπτό ότι σε αυτά τα φορτία ο ρυθμός αύξησης της δύναμης του κοχλία αυξάνεται. Είναι λογικό όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του κοχλία τόσο μεγαλύτερο να είναι και το φορτίο αυτό. Επιπλέον οι τρεις καμπύλες ξεκινάνε από διαφορετικό σημείο, γιατί η δύναμη προέντασης των κοχλιών αυτών είναι διαφορετική. Στα Σχήματα 4-34α,β,γ απεικονίζονται οι επιφάνειες που βρίσκονται σε επαφή, με ροζ χρώμα (sticking), ενώ με γαλάζιο χρώμα απεικονίζεται η επιφάνεια του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος που έχει αποκολληθεί (open). Αυτό που παρατηρείται είναι ότι η επιφάνεια του άνω ελάσματος που έχει αποκολληθεί στο Σημείο Α των δρόμων ισορροπίας είναι περίπου ίδια στα τρία προσομοιώματα. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι το Σημείο Α αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο φορτίο, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, με αποτέλεσμα να έχει προλάβει να αποκολληθεί μεγαλύτερη επιφάνεια στα προσομοιώματα με μεγαλύτερη διάμετρο κοχλία. Επιπλέον, στο φορτίο που αντιστοιχεί στο Σημείο Α έχει αρχίσει να διαρρέει το άνω δακτυλιοειδές έλασμα για τα προσομοιώματα με κοχλία M20 και M22 στην περιοχή γύρω από το κοχλία. Ειδικότερα, στην κλίμακα των τάσεων δίπλα από το προσομοίωμα στο Σχήμα 4-35α,β,γ, τα χρώματα πάνω από το πορτοκαλί απεικονίζουν τα σημεία στα οποία έχει διαρρεύσει το προσομοίωμα. Τέλος, στα Σχήματα 4-32α,β,γ και 4-33α,β,γ παρουσιάζονται οι παραμορφωμένες εικόνες των προσομοιωμάτων στο Σημείο Α.



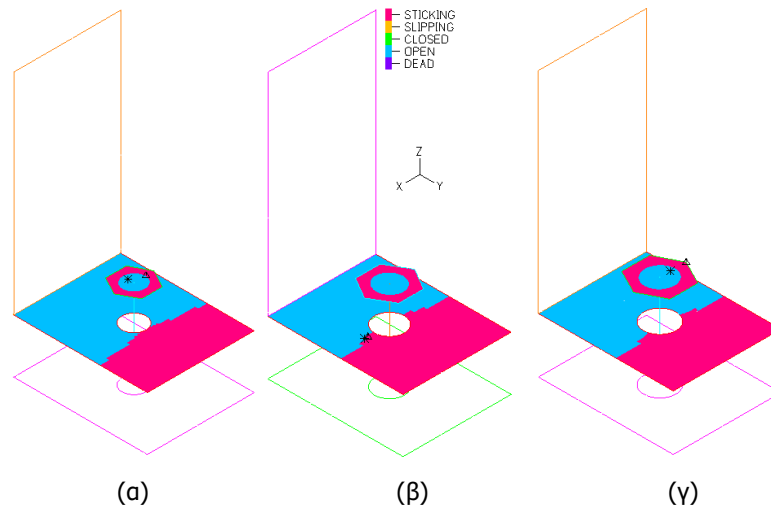
Σχήμα 4-31: Διάγραμμα αξονικής δύναμης κοχλία – Αξονικής δύναμης προσομοιώματος



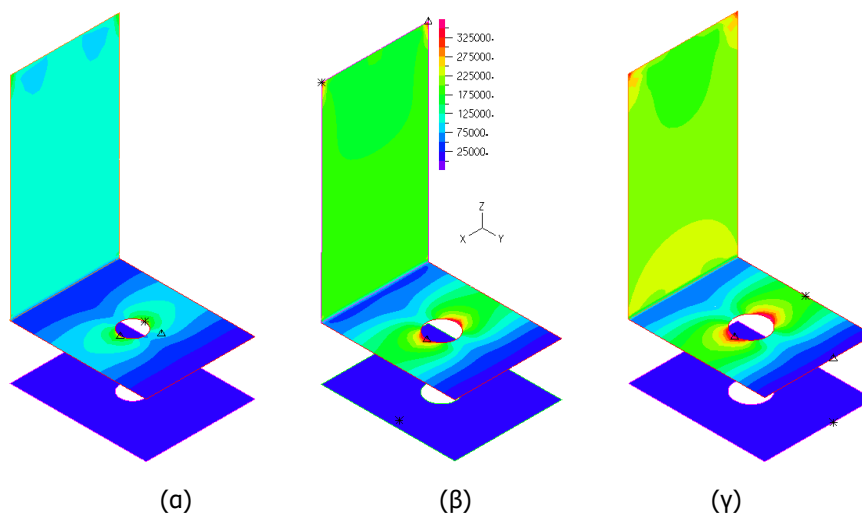
Σχήματα 4-32: Παραμορφωμένη εικόνα 3D στο Σημείο A: (α)M16, (β)M20, (γ)M22



Σχήματα 4-33: Παραμορφωμένη εικόνα 2D στο Σημείο A: (α)M16, (β)M20, (γ)M22

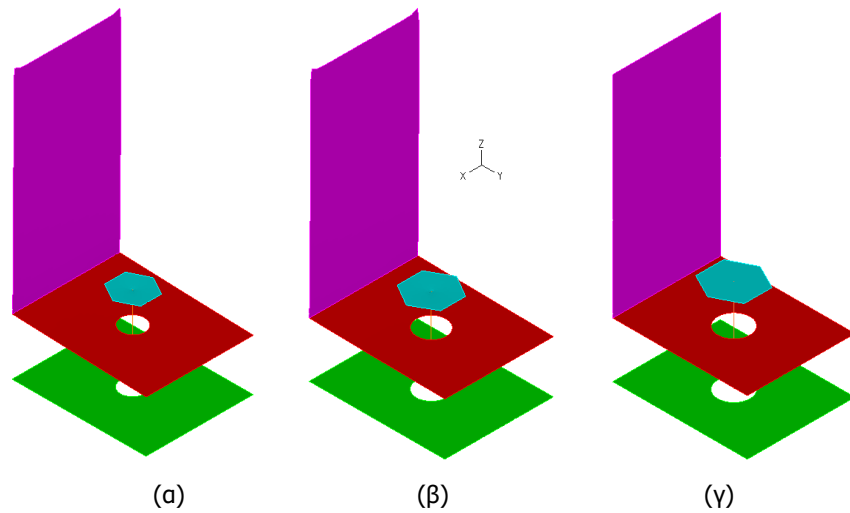


Σχήματα 4-34: Επιφάνειες σε επαφή στο Σημείο A: (α)M16, (β)M20, (γ)M22

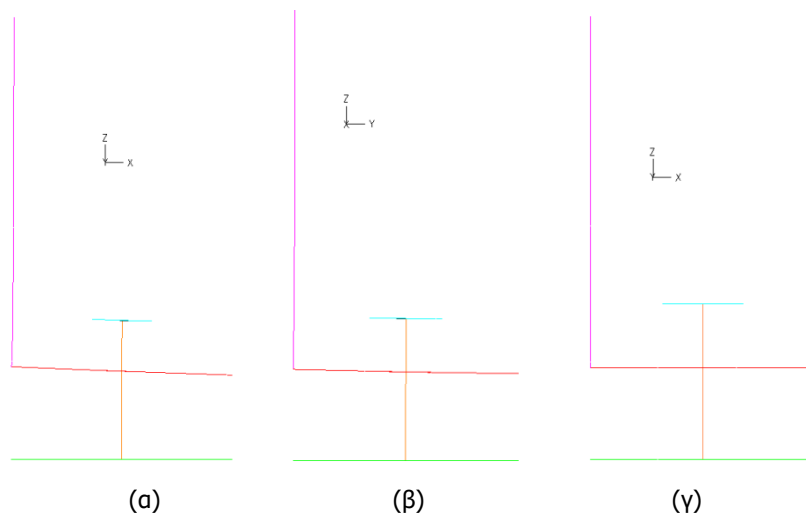


Σχήματα 4-35: Τάσεις von Mises στο Σημείο A: (α)M16, (β)M20, (γ)M22

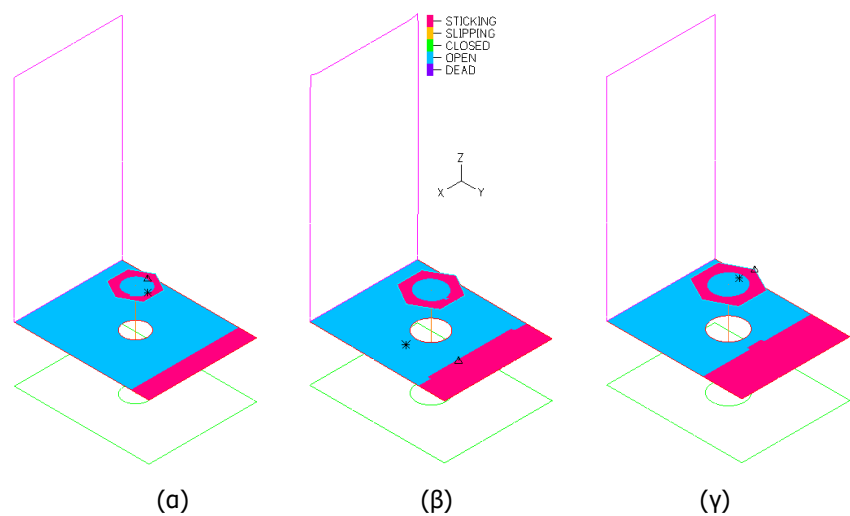
Έπειτα, στους δρόμους ισορροπίας στη Θέση 2 (Σχήμα 4-28), και στα τρία προσομοιώματα παρατηρείται ένα δεύτερο σημείο αλλαγής της κλίσης της καμπύλης (σημείο B) περί τα 120kN. Είναι αναμενόμενο αυτό το σημείο να συμπίπτει για τα προσομοιώματα μιας και αφορά τη διαρροή του πυλώνα που είναι κοινός σε όλα τα προσομοιώματα. Η διαρροή του πυλώνα φαίνεται ξεκάθαρα από τις τάσεις von Mises των Σχημάτων 4-39α,β,γ, αφού τα μέρη του πυλώνα με πορτοκαλί χρώμα δείχνουν τη διαρροή του. Επιπλέον, στο προσομοίωμα με κοχλία M16 το άνω δακτυλιοειδές έλασμα έχει πλέον αποκολληθεί στο μεγαλύτερο πλέον τμήμα του, ενώ όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του κοχλία τόσο μεγαλύτερη καθυστέρηση παρατηρείται στην αποκόλληση αυτή (Σχήματα 4-38α,β,γ). Τέλος, δεν παρατηρείται ακόμα διαρροή του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος σε μεγάλο τμήμα του σε κανένα από τα τρία προσομοιώματα. Στα Σχήματα 4-36α,β,γ και 4-37α,β,γ παρουσιάζονται όλες οι παραμορφωμένες εικόνες των προσομοιωμάτων στο Σημείο B.



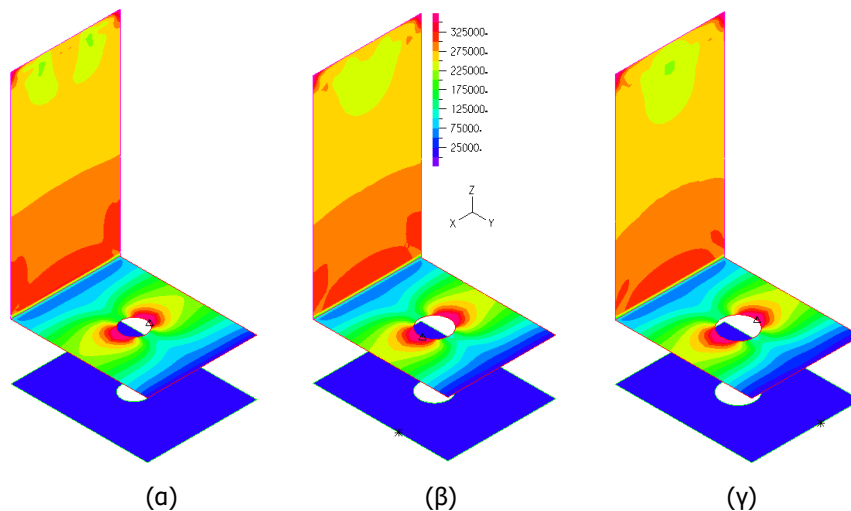
Σχήματα 4-36: Παραμορφωμένη εικόνα 3D στο Σημείο B: (α)M16, (β)M20, (γ)M22



Σχήματα 4-37: Παραμορφωμένη εικόνα 2D στο Σημείο B: (α)M16, (β)M20, (γ)M22

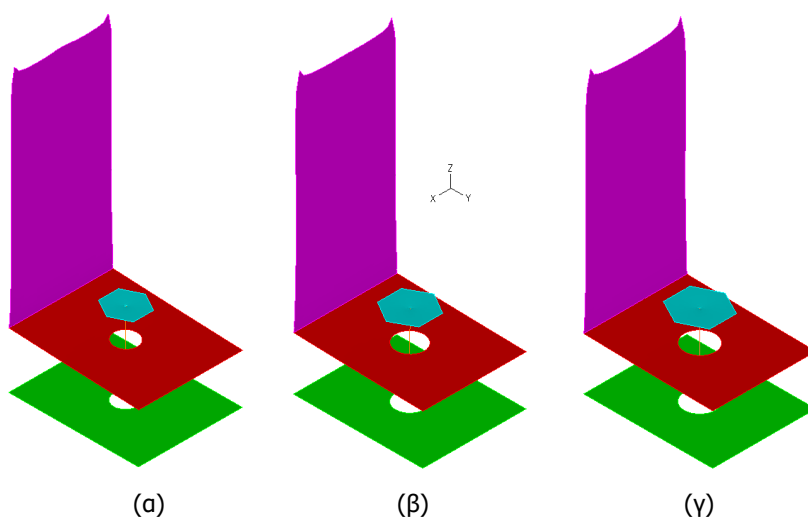


Σχήματα 4-38: Επιφάνειες σε επαφή στο Σημείο B: (α)M16, (β)M20, (γ)M22

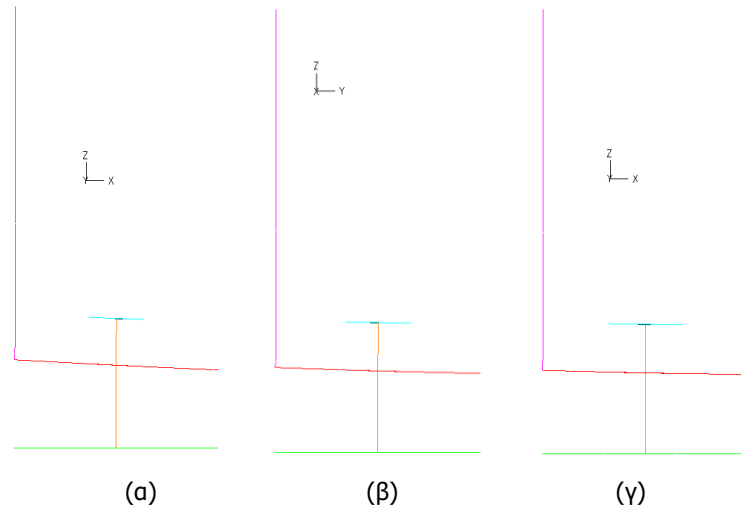


Σχήματα 4-39: Τάσεις von Mises στο Σημείο B: (α)M16, (β)M20, (γ)M22

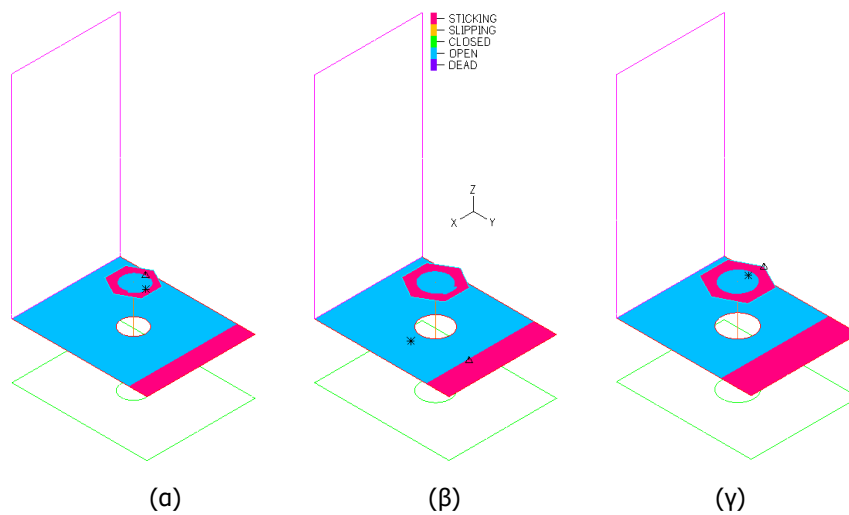
Το επόμενο σημείο (Σημείο C) των δρόμων ισορροπίας των Σχημάτων 4-27 και 4-28 παρουσιάζεται στο ίδιο περίπου φορτίο για όλα τα προσομοιώματα και αφορά την πλήρη διαρροή του πυλώνα. Στο Σημείο αυτό το προσομοίωμα με κοχλία διαμέτρου M16 το άνω δακτυλιοειδές έλασμα έχει διαρρεύσει σε μικρότερη επιφάνεια σε αντίθεση με τα άλλα δύο προσομοιώματα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι όσο μικρότερος είναι ο κοχλίας τόσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη που δέχεται με αποτέλεσμα οι τάσεις στο άνω δακτυλιοειδές έλασμα να είναι μικρότερες. Τέλος, στα προσομοιώματα με κοχλίες M20 και M22 συνεχίζει το άνω δακτυλιοειδές έλασμα να αποκολλάται σε όλο και μεγαλύτερη επιφάνεια σε αντίθεση με το προσομοίωμα με κοχλία M16 όπου σχεδόν όλο το άνω έλασμα έχει αποκολληθεί. Στα Σχήματα 4-40α,β,γ και 4-41α,β,γ παρουσιάζονται οι παραμορφωμένες εικόνες των προσομοιωμάτων στο Σημείο C, στα Σχήματα 4-42α,β,γ οι επιφάνειες των ελασμάτων που βρίσκονται σε επαφή ή έχουν αποκολληθεί και στα Σχήματα 4-43α,β,γ οι αντίστοιχες τάσεις von Mises.



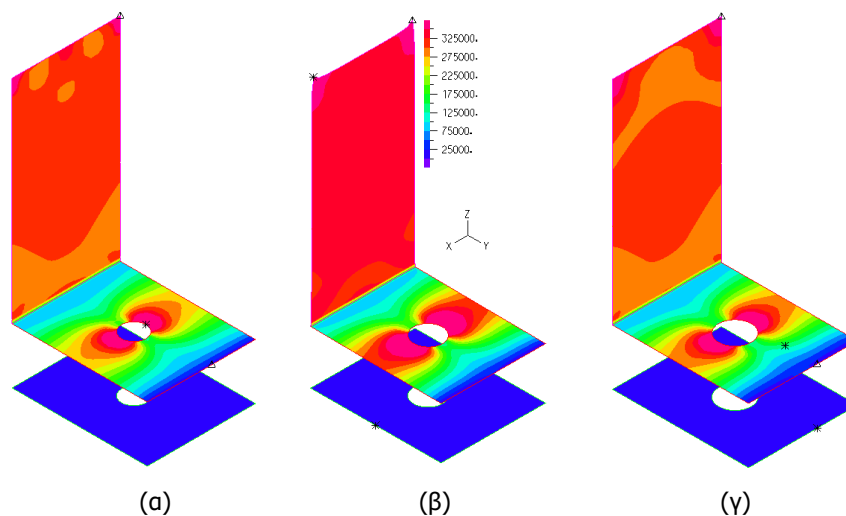
Σχήματα 4-40: Παραμορφωμένη εικόνα 3D στο Σημείο C: (α)M16, (β)M20, (γ)M22



Σχήματα 4-41: Παραμορφωμένη εικόνα 2D στο Σημείο C: (α)M16, (β)M20, (γ)M22

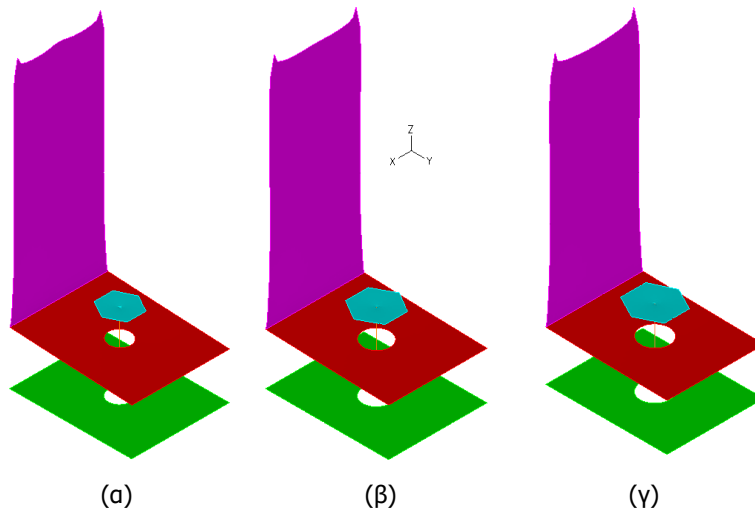


Σχήματα 4-42: Επιφάνειες σε επαφή στο Σημείο C: (α)M16, (β)M20, (γ)M22

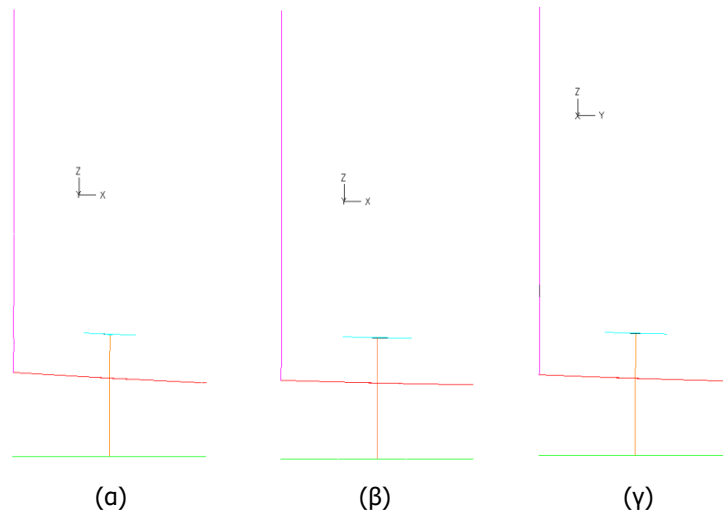


Σχήματα 4-43: Τάσεις von Mises στο Σημείο C: (α)M16, (β)M20, (γ)M22

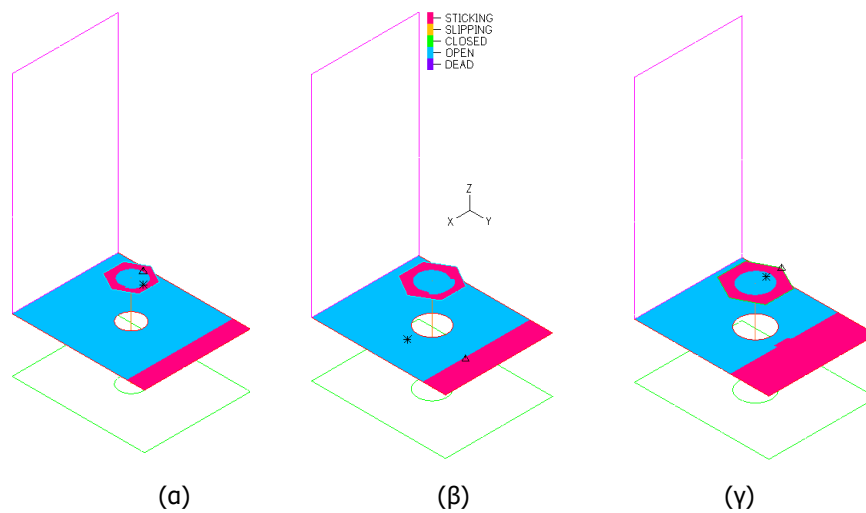
Τέλος, οι δρόμοι ισορροπίας του Σχήματος 4-28 που αφορούν κυρίως τον πυλώνα και αντιπροσωπεύουν τη Θέση 2, είναι σχεδόν ίδιοι για τα προσομοιώματα με κοχλίες M20 και M22 ενώ ο δρόμος ισορροπίας για κοχλία M16 διαφέρει ελαφρώς. Ειδικότερα, μετά και τη διαρροή του πυλώνα όλοι οι δρόμοι ισορροπίας ακολουθούν την ίδια πορεία φτάνοντας στην ίδια περίπου τελική κατακόρυφη μετατόπιση. Αντίθετα, από τους δρόμους ισορροπίας στη Θέση 1 παρατηρείται ότι όσο πιο μικρή είναι η διάμετρος του κοχλίου τόσο μεγαλύτερες είναι και οι τελικές μετατοπίσεις που παρουσιάζονται, αφού η κάμψη του άνω ελάσματος είναι μεγαλύτερη. Επιπλέον, μετά το Σημείο A, οι δυσκαμψίες των προσομοιωμάτων αρχίζουν να διαφέρουν αρκετά. Πιο συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του κοχλίου τόσο μεγαλύτερη είναι και η τελική δυσκαμψία του προσομοιώματος. Ταυτόχρονα, οι δρόμοι ισορροπίας που αφορούν τη Θέση 1 φτάνουν σε αισθητά μικρότερες μετατοπίσεις για όλα τα προσομοιώματα σε σύγκριση με τους δρόμους που αφορούν τη δεύτερη χαρακτηριστική θέση που βρίσκεται πάνω στον πυλώνα. Αυτό είναι πιθανό να συμβαίνει, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, διότι ο κοχλίας παρεμποδίζει από ένα σημείο και μετά το έλασμα να καμφθεί περισσότερο και να μετατοπιστεί παραπάνω και του δημιουργεί την κάμψη που φαίνεται στις παραμορφωμένες εικόνες. Αντίθετα, η θέση πάνω στον πυλώνα εμφανίζει μεγαλύτερη μετατόπιση αφού όσο εφελκείται ο πυλώνας είναι ελεύθερος να μετατοπιστεί και κυρίως μετά τη διαρροή του που περνάει στην πλαστική περιοχή οι μετατοπίσεις είναι αρκετά μεγάλες. Παρόλα αυτά, επισημαίνεται ξανά ότι οι συγκεκριμένες αριθμητικές αναλύσεις δεν προβλέπουν με ακρίβεια ούτε την τελική μετατόπιση του προσομοιώματος, ούτε το οριακό φορτίο και συνεπώς τον δρόμο ισορροπίας μέχρι την αστοχία. Αυτό οφείλεται σε προβλήματα σύγκλισης των αναλύσεων και στο γεγονός ότι με το συγκεκριμένο προσομοίωμα δεν προβλέπεται αστοχία της συγκόλλησης ή του κοχλίου όπως αναφέρθηκε παραπάνω αφού λειτουργούν ελαστικά και θα ήταν αυτά που λογικά θα επέφεραν την τελική αστοχία. Τέλος, στα Σχήματα 4-44α,β,γ και 4-45α,β,γ παρουσιάζονται οι παραμορφωμένες εικόνες των προσομοιωμάτων στο Σημείο D (τέλος αναλύσεων), στα Σχήματα 4-46α,β,γ οι επιφάνειες των ελασμάτων που βρίσκονται σε επαφή ή έχουν αποκολληθεί και στα Σχήματα 4-47α,β,γ οι αντίστοιχες τάσεις von Mises.



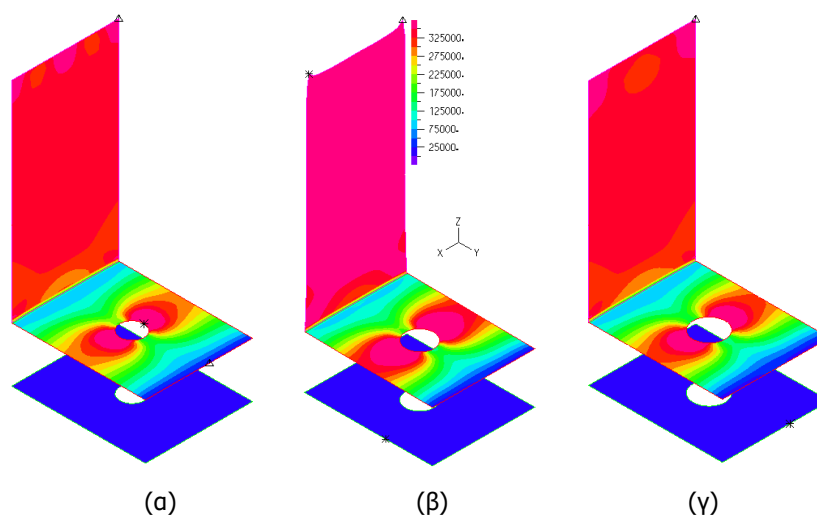
Σχήματα 4-44: Παραμορφωμένη εικόνα 3D στο Σημείο D: (α)M16, (β)M20, (γ)M22



Σχήματα 4-45: Παραμορφωμένη εικόνα 2D στο Σημείο D: (α)M16, (β)M20, (γ)M22



Σχήματα 4-46: Επιφάνειες σε επαφή στο Σημείο D: (α)M16, (β)M20, (γ)M22



Σχήματα 4-47: Τάσεις von Mises στο Σημείο D: (α)M16, (β)M20, (γ)M22

5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΠΥΛΩΝΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η συμπεριφορά μιας σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας ρεαλιστικών διαστάσεων. Περιγράφεται η διαδικασία με την οποία δημιουργήθηκε το αριθμητικό προσομοίωμα καθώς επίσης και τα αποτελέσματα των στατικών αναλύσεων. Η υπό μελέτη σύνδεση βρίσκεται σε ύψος 20,36m και πραγματοποιείται μέσω δακτυλιοειδών ελασμάτων που συγκολλούνται στα άκρα των δύο τμημάτων που γίνεται η σύνδεση με εσωραφή επέκτασης πέλματος. Τέλος, τα ελάσματα αυτά κοχλιώνονται μεταξύ τους μέσω προεντεταμένων κοχλιών.

Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης δημιουργήθηκε το κατάλληλο αριθμητικό προσομοίωμα που θα παρουσιαστεί αναλυτικά στη συνέχεια και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων που έγιναν. Αρχικά, ασκήθηκαν τα φορτία σχεδιασμού του συγκεκριμένου τμήματος που προσομοιώθηκε τα οποία αυξάνονταν ταυτόχρονα μέχρι και τη στιγμή που παρατηρήθηκε η εφελκυστική αστοχία του πρώτου κοχλία. Στη συνέχεια, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της αριθμητικής μεθόδου που αφορούσαν τον πυλώνα με τα αποτελέσματα της αναλυτικής μεθόδου. Τέλος, έγινε μια επιπλέον σύγκριση του ανωτέρου προσομοιώματος με έναν όμοιο προσομοίωμα σε γεωμετρία στο οποίο όμως αυξάνονταν μόνο η ροπή και η τέμνουσα, με την αξονική δύναμη, η οποία αντιστοιχεί στα βάρη, να παραμένει σταθερή.

5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΟΛΟΚΛΗΡΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Το αριθμητικό προσομοίωμα που θα περιγραφεί στη συνέχεια περιλαμβάνει τη σύνδεση αποκατάστασης ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας. Ειδικότερα, αποτελείται από τη μέση επιφάνεια του άνω και κάτω δακτυλιοειδούς ελάσματος της σύνδεσης, τους κοχλίες και ένα μεγάλο τμήμα του πυλώνα ώστε να ληφθεί υπόψη η επίδραση του πυλώνα στη μεταφορά των δυνάμεων στην υπό μελέτη σύνδεση. Η προσομοίωση των δακτυλιοειδών ελασμάτων, των κεφαλών των κοχλιών και ενός μέρους του πυλώνα έγινε με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, ενώ το υπόλοιπο μέρος του πυλώνα και οι κορμοί των κοχλιών προσομοιώθηκαν με στοιχεία δοκού. Η διακριτοποίηση του προσομοιώματος έγινε σε κατάλληλο πρόγραμμα ενώ οι αναλύσεις έγιναν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

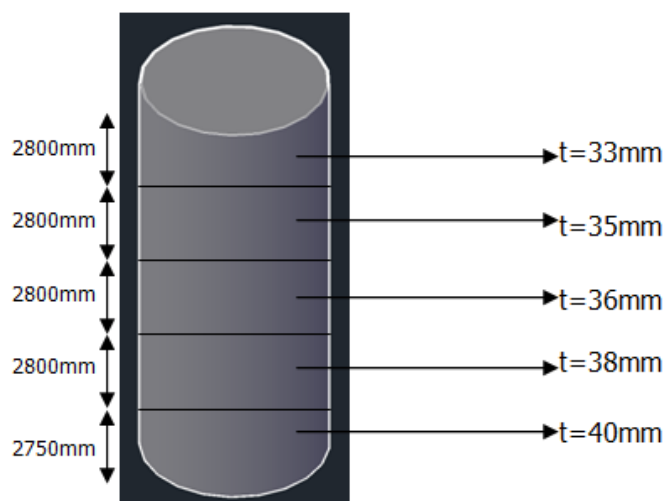
5.2.1 Γεωμετρία της υπό μελέτη σύνδεσης

Η σύνδεση που μελετάται στη συγκεκριμένη διπλωματική ανήκει σε μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα τριών πτερυγίων με τα χαρακτηριστικά που περιγράφονται στον ακόλουθο πίνακα (Σχήμα 5-1). Η γεωμετρία που προσομοιώνεται περιλαμβάνει την κοχλιωτή σύνδεση των ελασμάτων που βρίσκεται σε ύψος 20.36m από το έδαφος, άρα στο 17% του ύψους του συγκεκριμένου πυλώνα καθώς επίσης και ένα μέρος από το κέλυφος του πυλώνα που βρίσκεται πάνω από αυτή τη σύνδεση ύψους περίπου τριών διαμέτρων, ώστε να ληφθεί υπόψη η επιρροή του στη σύνδεση.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΙΜΗ
Ύψος πυλώνα (m)	120
Μέγιστη εξωτερική διάμετρος (mm)	4300
Ελάχιστη εξωτερική διάμετρος (mm)	3685
Μέγιστο πάχος πυλώνα (mm)	60
Ελάχιστο πάχος πυλώνα (mm)	16
Συχνότητα δρομέα (rad/sec)	0.95

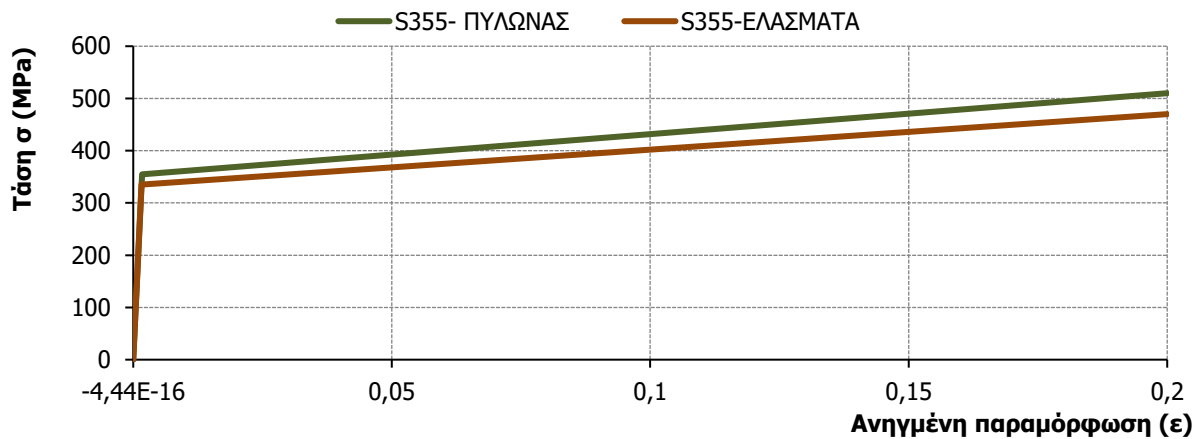
Σχήμα 5-1: Χαρακτηριστικά υπό μελέτη ανεμογεννήτριας

Η γεωμετρία του πυλώνα που προσομοιώνεται είναι κυλινδρική με διάμετρο 4300mm. Το ύψος του πυλώνα που προσομοιώνεται είναι 13950mm ενώ το πάχος του μεταβάλλεται. Πιο συγκεκριμένα, στα πρώτα 2750mm είναι 40mm, στα επόμενα 2800mm γίνεται 38mm και στη συνέχεια κάθε 2800mm μεταβάλλεται σε 36mm, 35mm και τέλος 33mm.

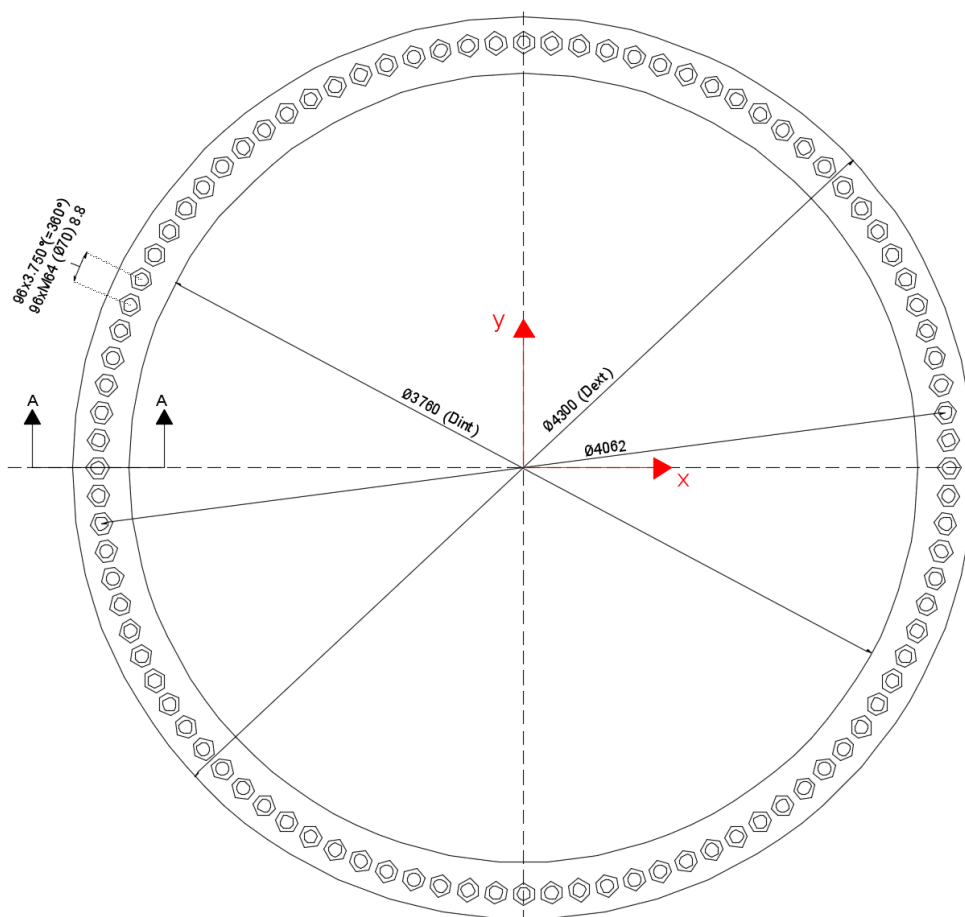


Σχήμα 5-2: Μεταβολή πάχους πυλώνα καθ' ύψος στο προσομοιωμένο τμήμα

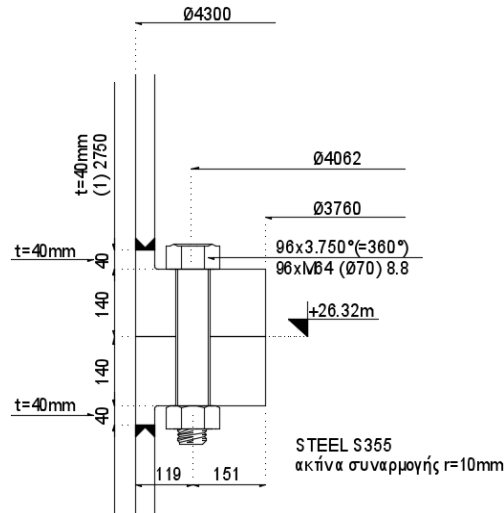
Η εξωτερική διάμετρος των δακτυλιοειδών ελασμάτων είναι 4300mm και η εσωτερική 3160mm ενώ το πάχος τους είναι 140mm. Ο χάλυβας των ελασμάτων και του πυλώνα είναι S355 με μέτρο ελαστικότητας $E=210\text{GPa}$ και $\nu=0.3$. Ειδικότερα, για τα δακτυλιοειδή ελάσματα ο νόμος του χάλυβα έχει τροποποιηθεί μειώνοντας τη δύναμη διαρροής και αστοχίας, αφού το πάχος αυτών των ελασμάτων είναι μεγαλύτερο από 40mm (Σχήμα 5-3). Επιπλέον, το προσομοίωμα αποτελείται από 96 προεντεταμένους κοχλίες M64 με πάχος κεφαλής 41.32mm, ποιότητας 8.8 ανά 3.75°. Οι επιφάνειες των ελασμάτων λήφθηκαν ως αμμοβολισμένες και οι οπές τους κανονικές. Στο Σχήμα 5-4 απεικονίζεται η κάτοψη της συγκεκριμένης σύνδεσης, ενώ στο Σχήμα 5-5 η τομή AA.



Σχήμα 5-3: Καταστατικός νόμος υλικού κελύφους πυλώνα και δακτυλιοειδών πελμάτων S235 και S275



Σχήμα 5-4: Κάτοψη της υπό μελέτη σύνδεσης αποκατάστασης

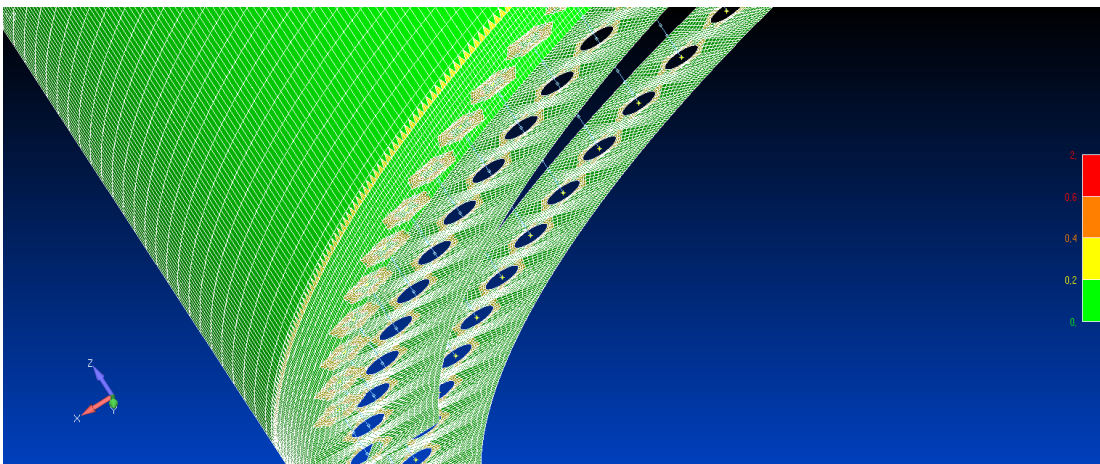


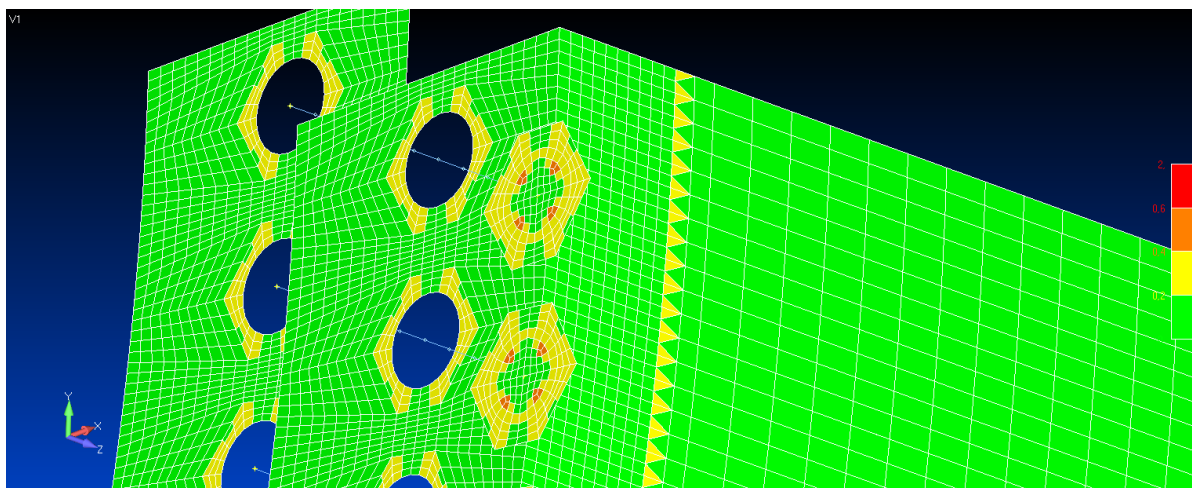
Σχήμα 5-5: Τομή της υπό μελέτη σύνδεσης αποκατάστασης

5.2.2 Διακριτοποίηση αριθμητικού προσομοιώματος

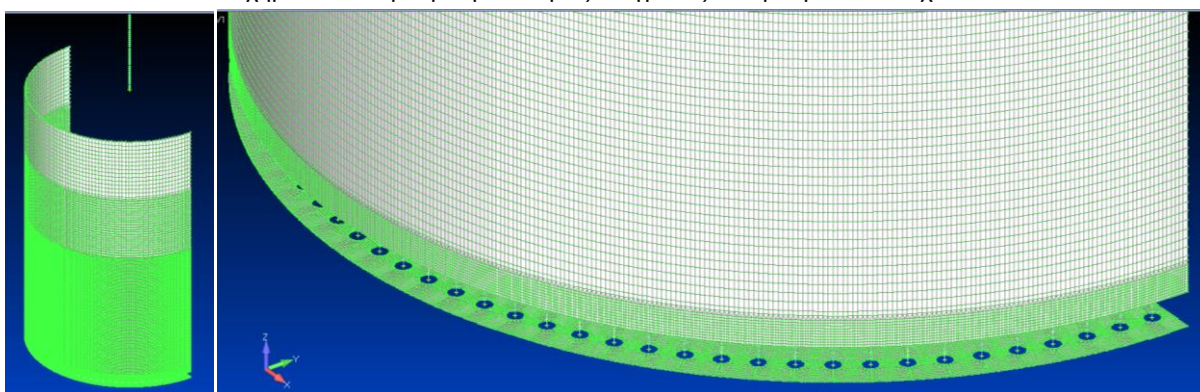
Για τη διακριτοποίηση του προσομοιώματος επιλέγεται κατάλληλο πρόγραμμα. Λόγω συμμετρίας το τελικό προσομοίωμα περιλαμβάνει τη μισή σύνδεση και συνεπώς συμπεριλαμβάνονται μόνο οι μισοί κοχλίες, δηλαδή 48 κοχλίες, προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος του προσομοιώματος. Εισάγεται η γεωμετρία του προσομοιώματος από το AutoCAD και κάθε μέρος του διακριτοποιείται ως εξής:

Αρχικά, για τα δύο δακτυλιοειδή ελάσματα και την κεφαλή του κοχλία επιλέγεται να προσομοιωθεί η μέση επιφάνεια τους. Συνεπώς, τα δύο δακτυλιοειδή ελάσματα απέχουν 141mm, αφού αφήνεται 1mm ανοχή μεταξύ αυτών, ενώ το άνω δακτυλιοειδές έλασμα απέχει από την κεφαλή του κοχλία 92.66mm αφού η ανοχή εδώ είναι 2mm. Η μέση επιφάνεια της κεφαλής του κοχλία, οι μέσες επιφάνειες των δύο ελασμάτων και το μισό περίπου κέλυφος του πυλώνα προσομοιώνονται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements). Το υπόλοιπο κομμάτι του πυλώνα προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού (beam elements), στα οποία ορίζεται η διατομή του πυλώνα που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο σημείο, για να μειωθεί το μέγεθος του προσομοιώματος και να περιοριστεί το υπολογιστικό κόστος. Οι κορμοί των κοχλιών προσομοιώνονται με ειδικά πεπερασμένα στοιχεία δοκού που αφορούν κοχλίες για να μπορέσουν να ληφθούν υπόψη οι ιδιότητες τους και η ανοχή των οπών των κοχλιών είναι 6mm για κοχλία M64, σύμφωνα με τον κανονισμό. Στο Σχήμα 5-6 παρουσιάζεται η ποιότητα του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Στην κλίμακα ποιότητας που φαίνεται δεξιά του σχήματος παρουσιάζεται με πράσινο χρώμα η καλύτερη ποιότητα πλέγματος ενώ με κόκκινο η χειρότερη. Θεωρητικά, θα μπορούσε να γίνει μια ακόμη μεγαλύτερη πύκνωση του πλέγματος, ώστε να αυξηθεί η ποιότητα όμως και αυτό θα σήμαινε ακόμα μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος.





Σχήμα 5-6: Διαβάθμιση ποιότητας πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων



Σχήμα 5-7: Διακριτοποίηση προσομοιώματος

5.2.3 Παραδοχές αριθμητικής προσομοίωσης

Μετά τη διακριτοποίηση του προσομοιώματος, γίνεται η ανάλυσή του στο λογισμικό ADINA. Αρχικά, χωρίζονται ομάδες πεπερασμένων στοιχείων ανάλογα με τις ιδιότητές τους (element groups) και δίνονται τα πάχη τους.

Όσον αφορά τους κοχλίες, όπως προαναφέρθηκε, πρέπει να είναι απαραίτητα προεντεταμένοι μιας και σε τέτοιες κατασκευές η κόπωση αποτελεί μια από τις κυριότερες μορφές αστοχίας. Η ύπαρξη της δύναμης προέντασης, ακόμα και σε χαμηλή τιμή, είναι ευεργετική έναντι της κόπωσης και μπορεί να αυξήσει κατακόρυφα την αντοχή του κοχλία σε κόπωση, σε σχέση με έναν μη προεντεταμένο κοχλία. Η μέγιστη δύναμη προέντασης ενός κοχλία, σύμφωνα με τον EC3, είναι ίση με το 70% της εφελκυστικής του αντοχής και δίνεται από τη σχέση της εξίσωσης 3-1:

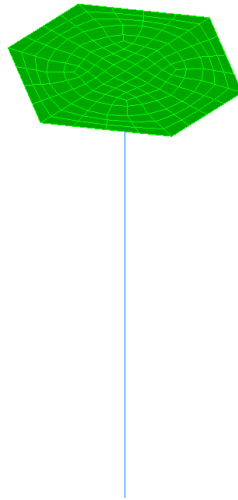
$$F_{p,C} = 0.7 \times f_{ub} \times A_s$$

όπου: f_{ub} είναι η εφελκυστική αντοχή του κοχλία και A_s το εμβαδόν σπειρώματος

Για κοχλία M64: $A_s=2676 \text{ cm}^2$

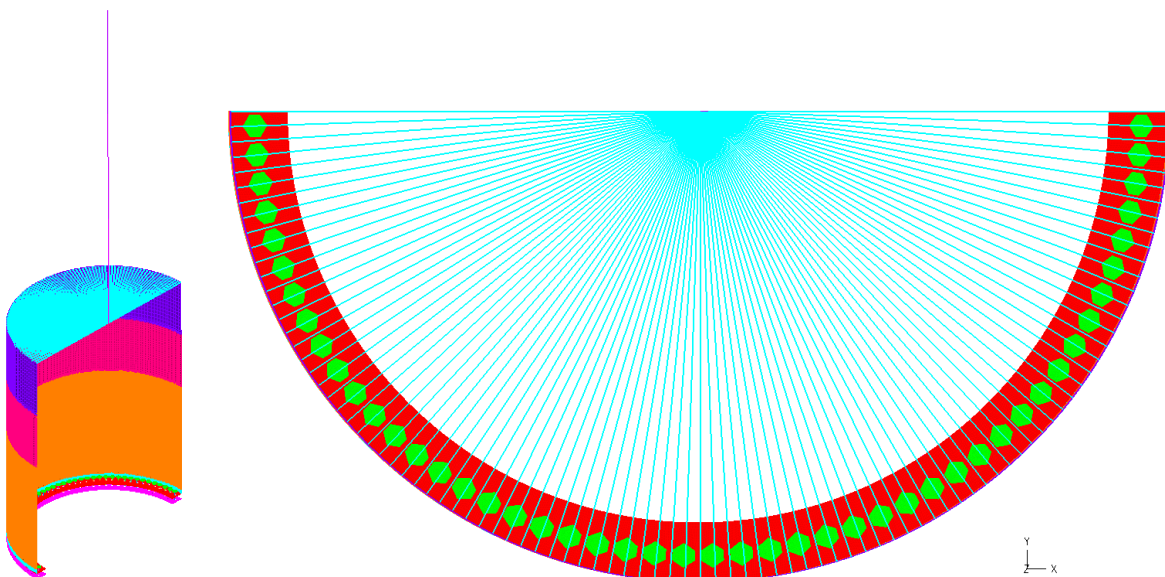
Για ποιότητα κοχλία 8.8: $f_{ub}=800\text{MPa}$ από την ανωτέρω σχέση προκύπτει:

$$F_{p,C} = 0.7 \times 80 \frac{\text{KN}}{\text{cm}^2} \times 2676 \text{ cm}^2 = 1498.56 \text{ kN}$$

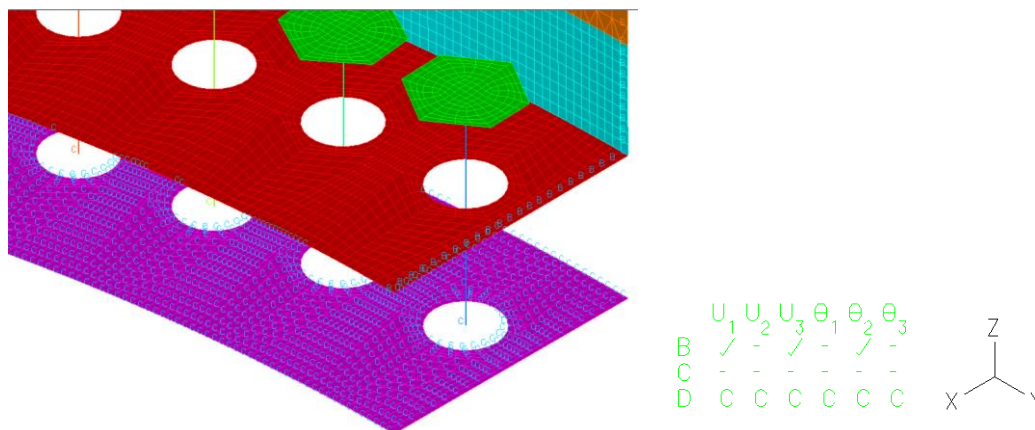


Σχήμα 5-8: Τρόπος προσομοίωσης του κοχλίου

Η επαφή μεταξύ του άνω ελάσματος της σύνδεσης και της κεφαλής του κοχλίου, καθώς και η επαφή στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων πραγματοποιείται με κατάλληλα στοιχεία επαφής. Η ύπαρξη αυτών των στοιχείων επαφής είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού αποτελεί την κυρίαρχη μορφή μη γραμμικότητας του προβλήματος. Λόγω της προσομοίωσης του κορμού του κοχλίου με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία δοκού, η επαφή του κορμού του κοχλίου με την άντυγα των ελασμάτων δεν είναι δυνατόν να ληφθεί υπόψη. Επιπλέον, όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται στην κορυφή του πυλώνα που προσομοιώνεται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία ενώνονται μέσω άκαμπτων συνδέσμων (rigid links) με τον πρώτο κόμβο του πυλώνα που προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού ώστε να λειτουργεί ο πυλώνας ενιαία (Σχήμα 5-9). Επίσης, επειδή η προσομοίωση αφορά στη μισή σύνδεση απαιτούνται κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, σταθεροποιείται η βάση του μοντέλου, δηλαδή το κάτω δακτυλιοειδές έλασμα και οι κάτω κόμβοι των κοχλίων πακτώνονται, χωρίς να αφήνεται καμία δυνατότητα μετακίνησης και στροφής αφού αποτελούν τη βάση του πυλώνα στο προσομοίωμα. Επίσης, στις άκρες του προσομοιώματος, επί του άξονα συμμετρίας, επιβάλλονται οι κατάλληλες συνοριακές συμμετρίας, δηλαδή δεσμεύεται η μετακίνηση κατά y καθώς και η στρεπτική ροπή z και η στροφή κατά x (Σχήμα 5-10).



Σχήμα 5-9: Αριθμητική προσομοίωση σύνδεσης και απεικόνιση των rigid links

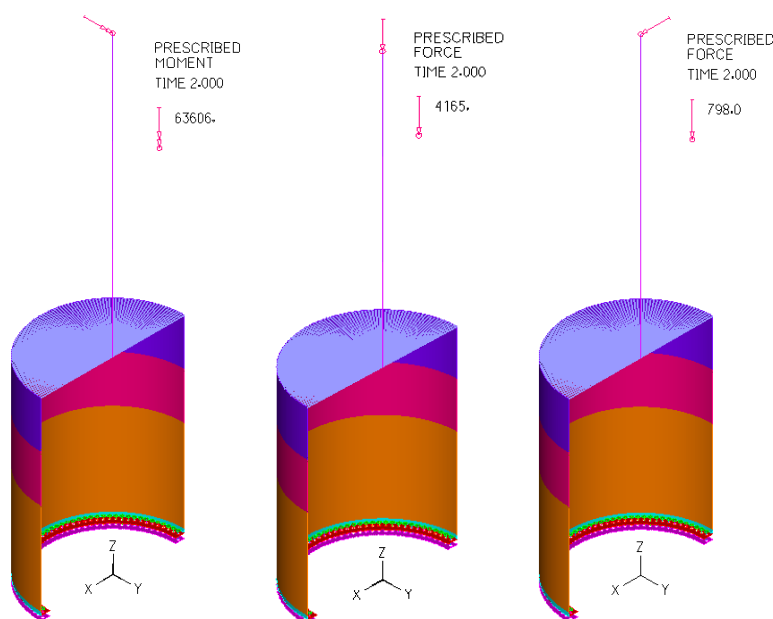


Σχήμα 5-10: Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος

Τέλος, η ανάλυση πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Στην 1^η φάση επιβάλλεται η δύναμη προεντάσεως στους κοχλίες και στη 2^η φάση το ποσοστό των φορτίων σχεδιασμού που οδηγούν στην αστοχία των πρώτων δύο κοχλιών. Ειδικότερα, οι κοχλίες αστοχούν όταν αναπτύσσουν εφελκυστική δύναμη 2140.80kN. Η εφελκυστική αντοχή του κοχλία δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_{max} = f_{ub} \times A_s = 80 \frac{kN}{cm^2} \times 26.76cm^2 = 2140.80kN$$

Συνεπώς, επιβάλλεται στην κορυφή του πυλώνα το 127% των φορτίων σχεδιασμού. Επίσης, αφού η προσομοίωση αφορά τη μισή σύνδεση λόγω συνθηκών συμμετρίας, επιβάλλεται τελικά στην κορυφή του πυλώνα το 63.5% των φορτίων σχεδιασμού δηλαδή, ροπή M_y=63605.85kN, θλιπτική αξονική ίση με F_z=-4164.90kN και τέμνουσα F_x=798.0426kN (Σχήμα 5-11).



Σχήμα 5-11: Επιβαλλόμενες φορτίσεις στην κορυφή του πυλώνα

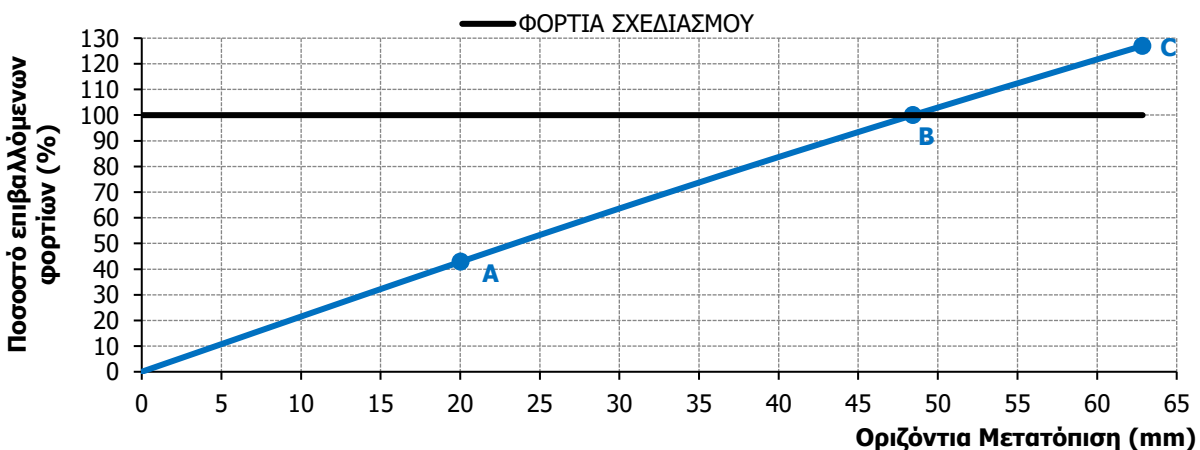
5.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΥΠΟ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΑ ΣΤΑΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόκριση της σύνδεσης σε στατικές καταπονήσεις, χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα που περιγράφεται στην Ενότητα 5.2 και τα αποτελέσματα περιγράφονται στη συνέχεια.

Αρχικά, στο Σχήμα 5-12 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας ποσοστού φόρτισης-στροφής του προσομοιώματος και στο Σχήμα 5-13 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας ποσοστού φόρτισης-εγκάρσιας μετατόπισης του προσομοιώματος. Η στροφή που καταγράφεται στον οριζόντιο άξονα είναι η στροφή περί γ ενώ η εγκάρσια μετατόπιση είναι στον άξονα x και αφορά τον τελευταίο κόμβο του πυλώνα που προσομοιώνεται με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία και στον οποίο έχουν ασκηθεί και τα φορτία (Θέση 1, Σχήμα 5-14).

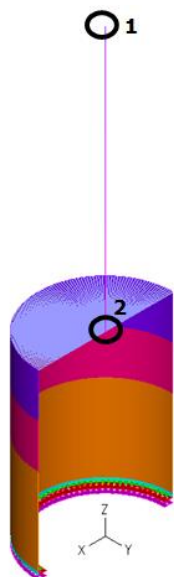


Σχήμα 5-12: Δρόμος ισορροπίας ποσοστού φόρτισης – στροφής προσομοιώματος στη θέση 1

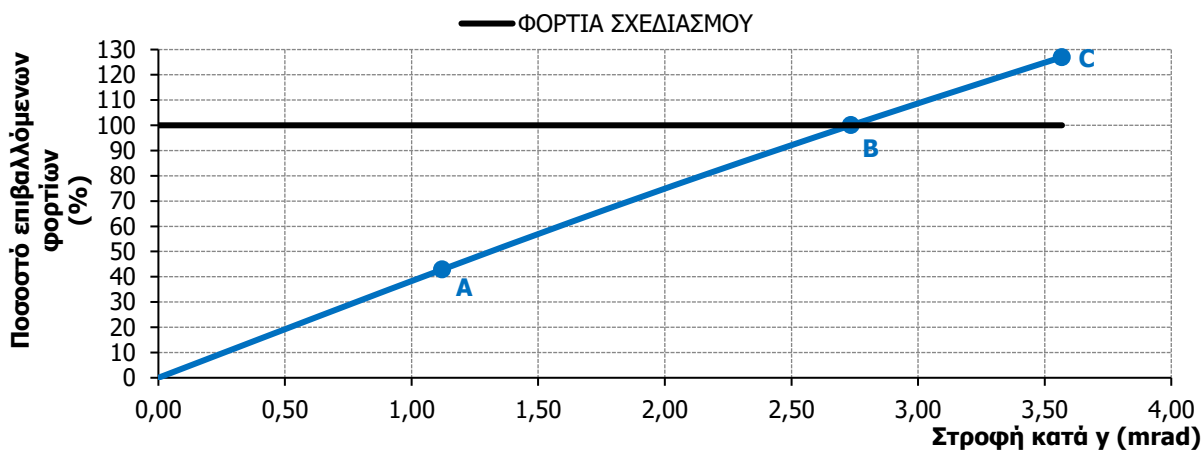


Σχήμα 5-13: Δρόμος ισορροπίας ποσοστού φόρτισης – μετατόπισης προσομοιώματος στη θέση 1

Μέσω και των δύο διαγραμμάτων γίνεται αντιληπτό ότι η συμπεριφορά της σύνδεσης είναι γραμμική και παρουσιάζει μεγάλη δυσκαμψία. Επιπλέον, η γραμμικότητα αυτή οφείλεται και στο γεγονός ότι ο πυλώνας δεν έχει προλάβει να διαρρεύσει μέχρι το τέλος της ανάλυσης με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται πλαστική περιοχή στο δρόμο ισορροπίας του προσομοιώματος. Ως τέλος των αναλύσεων ορίζεται η αστοχία του πρώτου κοχλία που βρίσκεται στην εφελκυσόμενη περιοχή σε εφελκυστική δύναμη 2140.80kN, η οποία δεν γίνεται αντιληπτή από το πρόγραμμα αλλά παρακολουθείται από το χρήστη. Συγκρίνοντας τους δρόμους ισορροπίας των δύο παραπάνω σχημάτων με τους δρόμους ισορροπίας των Σχημάτων 5-15 και 5-16, τα οποία αφορούν το σημείο στο οποίο γίνεται η ένωση του τμήματος του πυλώνα που προσομοιώνεται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία με το τμήμα του πυλώνα που προσομοιώνεται με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία (Θέση 2), παρατηρείται μείωση των μετακινήσεων. Αυτό είναι φυσιολογικό να συμβαίνει μιας και ο φορέας είναι πρόβολος και συνεπώς όσο ψηλότερα βρίσκεται ένα σημείο τόσο μεγαλύτερες μετακινήσεις θα δέχεται.



Σχήμα 5-14: Θέσεις απεικόνισης δρόμων ισορροπίας



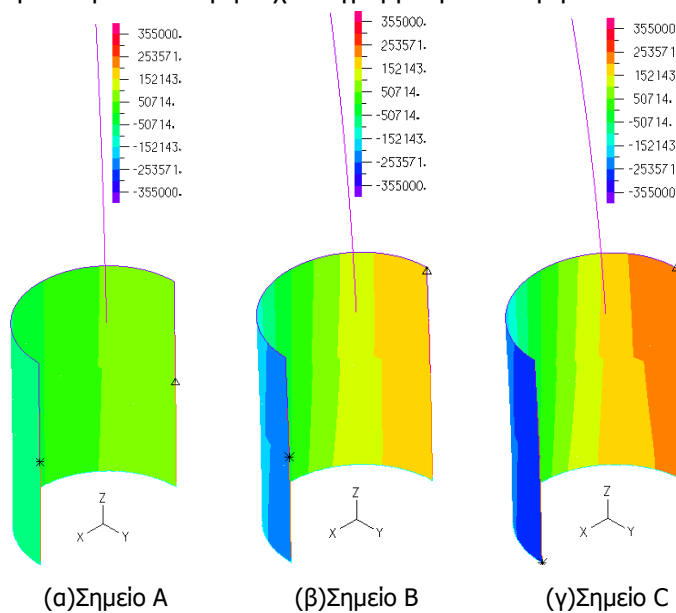
Σχήμα 5-15: Δρόμος ισορροπίας ποσοστό φόρτισης – στροφής προσομοιώματος στο θέση 2



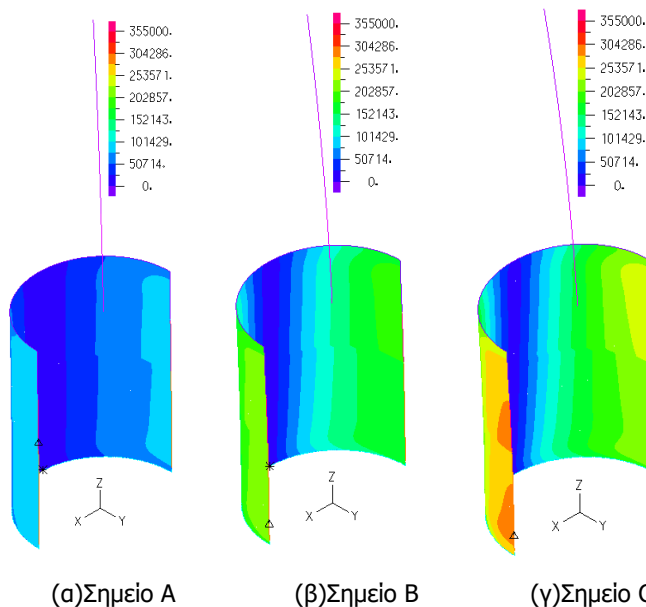
Σχήμα 5-16: Δρόμος ισορροπίας ποσοστό φόρτισης – μετατόπισης προσομοιώματος στο θέση 2

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του πυλώνα στα Σχήματα 5-17 και 5-18 παρουσιάζονται η παραμορφωμένη εικόνα, οι ορθές τάσεις σ_{zz} και οι τάσεις von Mises αντίστοιχα, που δέχεται ο πυλώνας της σύνδεσης σε τρεις διαφορετικές στιγμές της ανάλυσης (Σημεία A,B,C που

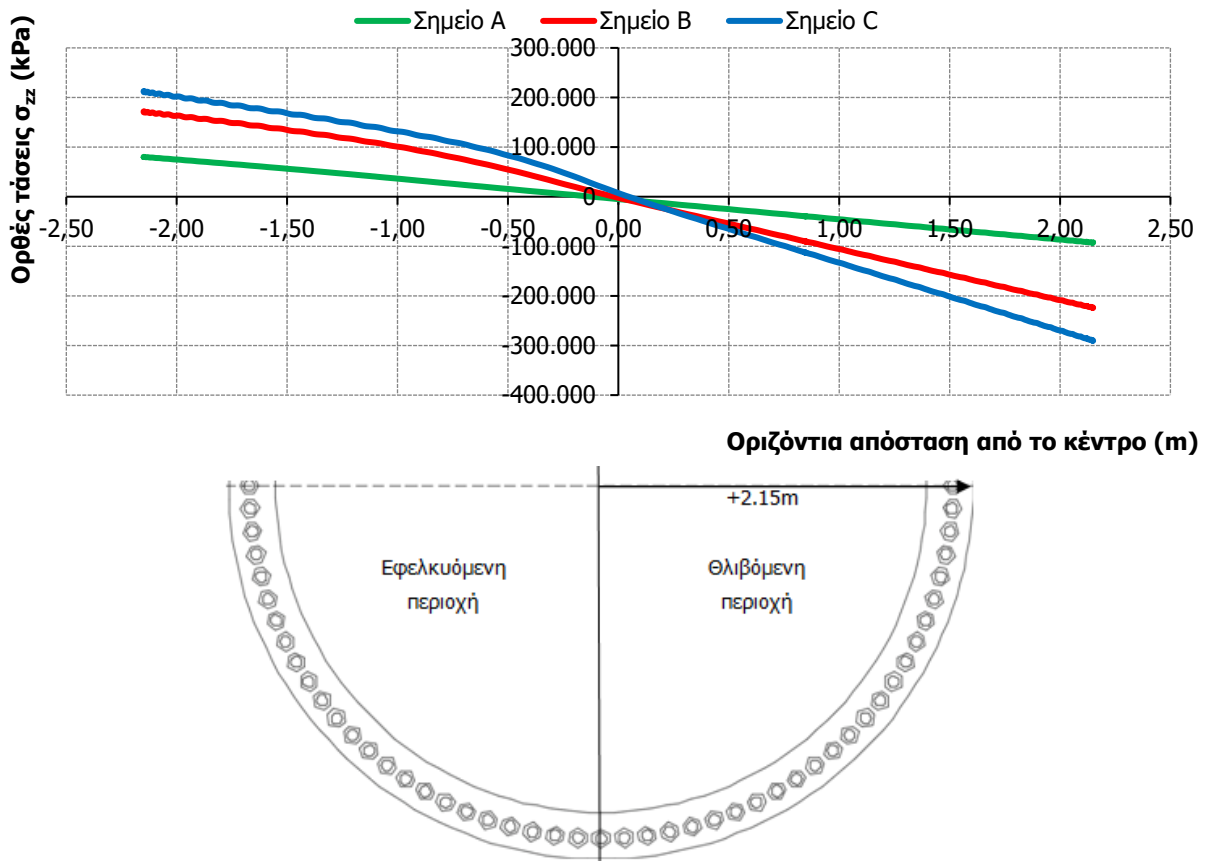
φαίνονται στους παραπάνω δρόμους ισορροπίας). Το σημείο A αντιστοιχεί σε ένα αρχικό βήμα της ανάλυσης που έχει υποβληθεί το 40% των φορτίων, το σημείο B αντιστοιχεί στην επιβολή των φορτίων σχεδιασμού (100%), ενώ το σημείο C στο τέλος της ανάλυσης (127%). Αυτό που γίνεται αντιληπτό, είναι ότι η εικόνα των ορθών τάσεων δεν διαφέρει ιδιαίτερα από αυτή των τάσεων von Mises, γεγονός που οφείλεται στο ότι ο πυλώνας επηρεάζεται κυρίως από την καμπτική ροπή και την αξονική δύναμη και λιγότερο από την τέμνουσα δύναμη. Επιπλέον, στο Σχήμα 5-19 απεικονίζεται το διάγραμμα των ορθών τάσεων z_z κατά μήκος της ημιπεριφέρειας στη διεπιφάνεια πυλώνα και άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος στο τέλος της ανάλυσης. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι δεν υπάρχει διαρροή του πυλώνα μέχρι και το τέλος της ανάλυσης. Επιπλέον, οι τάσεις στη θλιβόμενη πλευρά του πυλώνα είναι λίγο μεγαλύτερες από ότι αυτές στην εφελκόμενη μεριά, γεγονός που οφείλεται στην επιβαλλόμενη θλιπτική δύναμη στην κορυφή του πυλώνα. Τέλος, η κατανομή των τάσεων στη θλιβόμενη πλευρά είναι περίπου γραμμική ενώ στην εφελκόμενη όχι. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στο ότι στην εφελκόμενη πλευρά η δύναμη μοιράζεται και στους κοχλίες με αποτέλεσμα οι εφελκυστικές τάσεις στη διεπιφάνεια να μην έχουν γραμμική κατανομή.



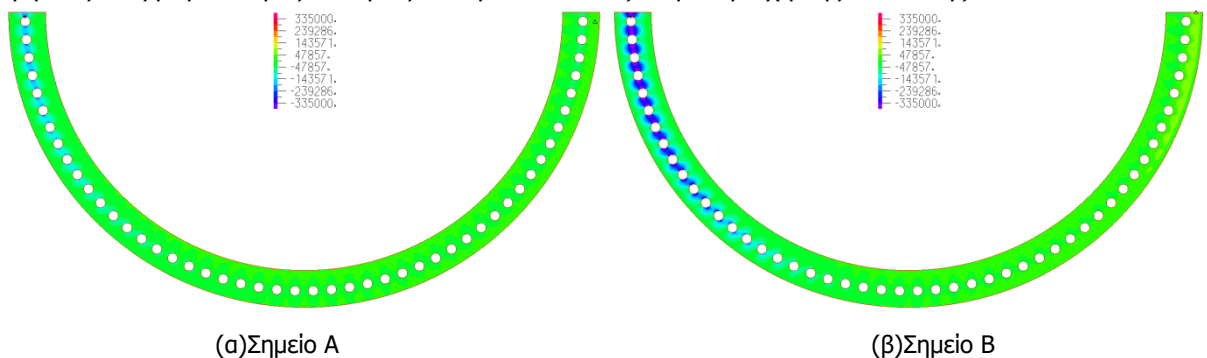
Σχήματα 5-17: Παραμορφωμένη εικόνα και ορθές τάσεις σ_{zz} στα τρία σημεία του δρόμου ισορροπίας 5-12

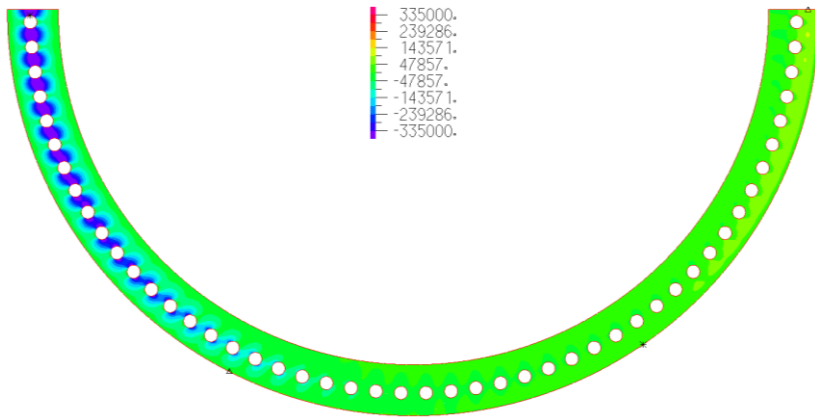


Σχήματα 5-18: Παραμορφωμένη εικόνα και τάσεις Von Mises στα τρία σημεία του δρόμου ισορροπίας 5-12



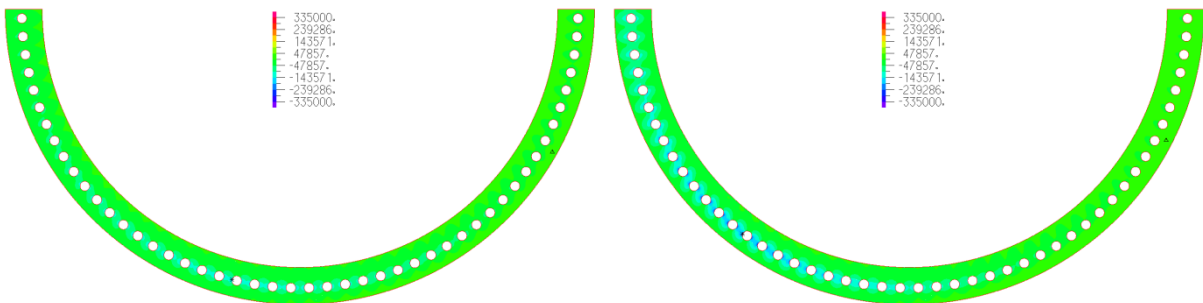
Σχήμα 5-19: Κατακόρυφες τάσεις σ_{zz} ημιπεριμέτρου διεπιφάνειας άνω ελάσματος και πυλώνα στα σημεία Α,Β,С. Επίσης, εξετάστηκε η κατανομή των τάσεων, κύριων σ_{11} , σ_{22} και von Mises στο άνω δακτυλιοειδές έλασμα. Στα Σχήματα 5-20, 5-21, 5-22 απεικονίζονται αυτές οι τάσεις στα τρία διαφορετικά σημεία του διαγράμματος στο Σχήμα 5-8. Από αυτές τις εικόνες γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι μεγάλες τάσεις von Mises που εμφανίζονται μεταξύ των κοχλιών στην εφελκούμενη πλευρά προέρχονται κυρίως από τις κύριες τάσεις σ_{11} , και όχι από τις σ_{22} . Επιπλέον, υπάρχει διαρροή του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος μεταξύ των κοχλιών στην εφελκούμενη πλευρά του, ήδη με την επιβολή των φορτίων σχεδιασμού (Σημείο Β). Συνεπώς, στο τέλος της ανάλυσης (Σημείο С) οι τάσεις μεταξύ των κοχλιών αυξάνονται όλο και περισσότερο αλλά η διαρροή δεν εξαπλώνεται στο υπόλοιπο έλασμα αλλά συνεχίζει να αφορά αυτές τις περιοχές ανάμεσα στους κοχλίες. Είναι λογικό οι μεγαλύτερες τάσεις να εμφανίζονται στην περιοχή των κοχλιών, αφού χωρίζοντας το έλασμα σε μικρότερα ελάσματα που αποτελούνται από έναν κοχλία και την επιφάνεια επιρροής του (προσομοίωμα Κεφαλαίου 3), ο κοχλίας λειτουργεί σαν πάκτωση με αποτέλεσμα το κομμάτι εξωτερικά αυτού να κάμπτεται ως πρόβολος και να εμφανίζει τις μεγαλύτερες δυνάμεις και άρα και τάσεις στην περιοχή της πάκτωσης.





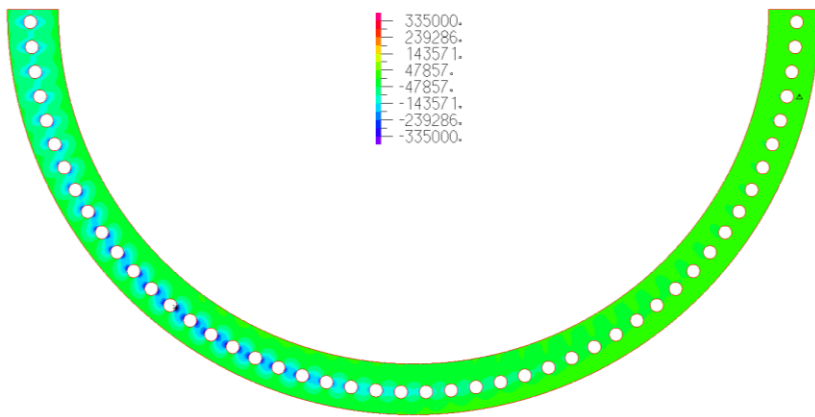
(γ)Σημείο C

Σχήματα 5-20: Κύριες τάσεις σ_{11} στα τρία σημεία του δρόμου ισορροπίας 5-12



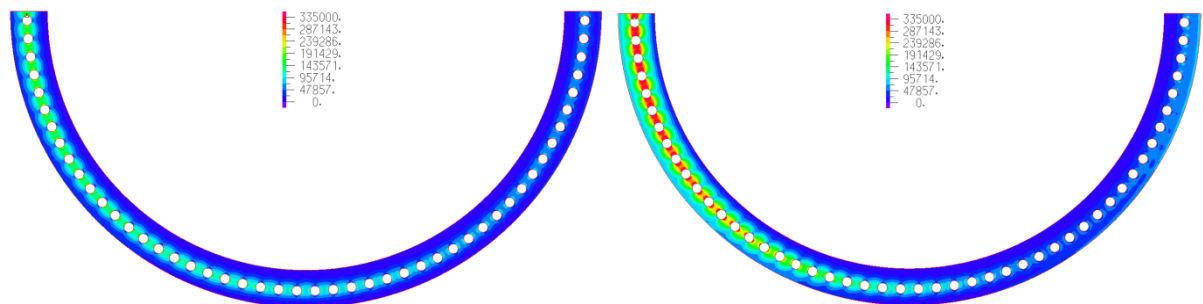
(α)Σημείο A

(β)Σημείο B



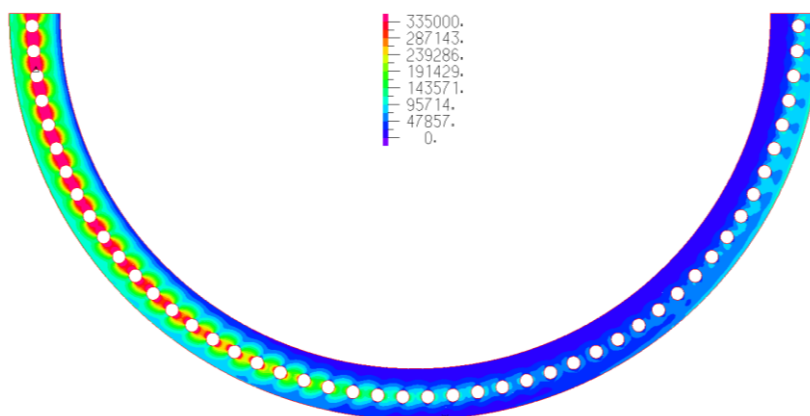
(γ)Σημείο C

Σχήματα 5-21: Κύριες τάσεις σ_{22} στα τρία σημεία του δρόμου ισορροπίας 5-12



(α)Σημείο A

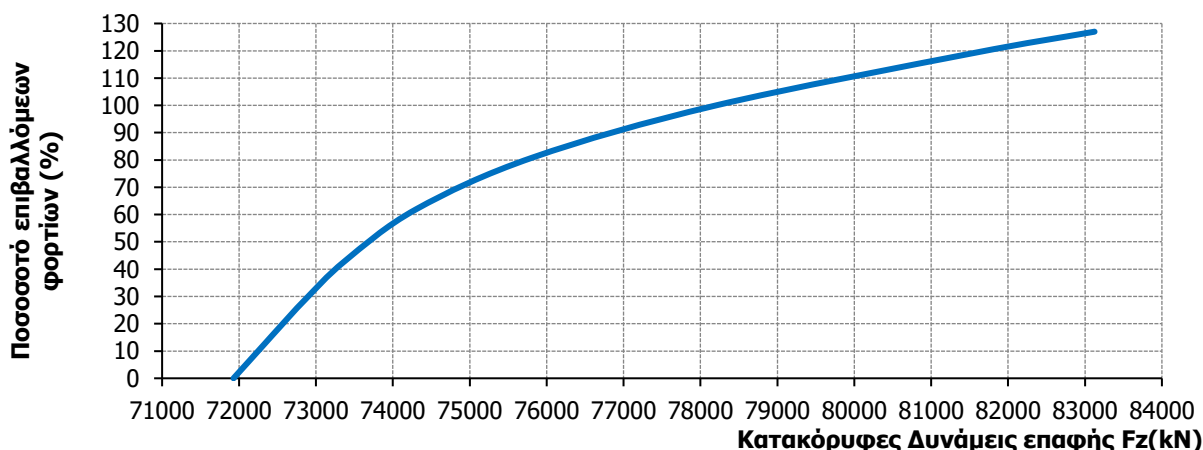
(β)Σημείο B



(γ)Σημείο C

Σχήματα 5-22: Τάσεις Von Mises στα τρία σημεία του δρόμου ισορροπίας 5-12

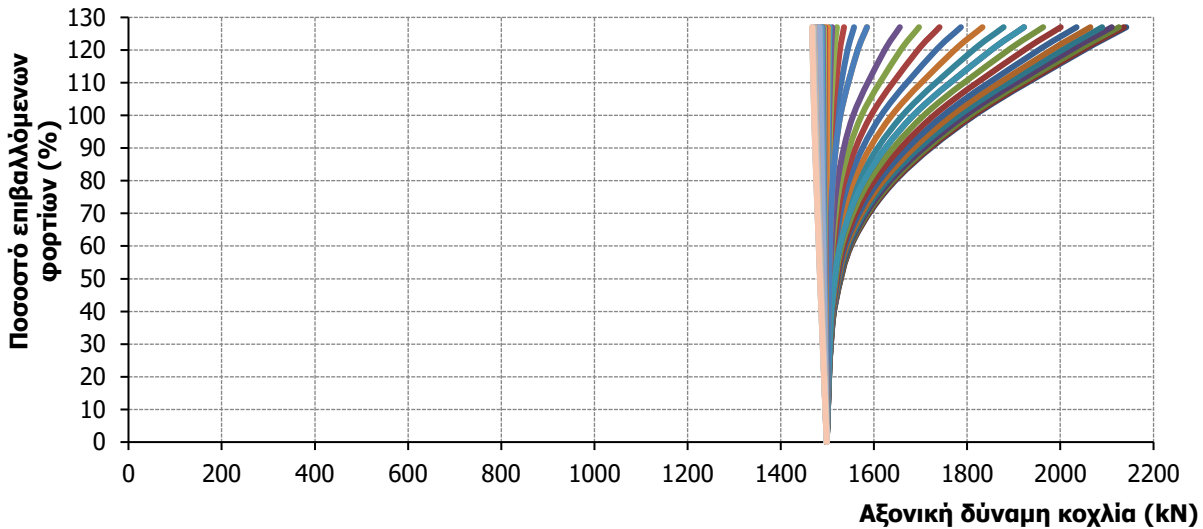
Στο Σχήμα 5-23 παρουσιάζεται η εξέλιξη των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής μεταξύ των δύο δακτυλιοειδών ελασμάτων, η οποία ταυτίζεται με την συνολική αντίδραση του κάτω ελάσματος. Η αρχική τιμή του διαγράμματος αυτού αντιστοιχεί στην συνολική δύναμη από την προένταση των 48 κοχλιών ($48 \times 1498.56 \text{ kN} = 71930.88 \text{ kN}$). Η συνολική αντίδραση αυξάνεται συνεχώς μέχρι το τέλος της ανάλυσης. Ειδικότερα, μέχρι περίπου το 80% των φορτίων σχεδιασμού η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα φορτία στον πυλώνα παραλαμβάνονται μέσω ανακατανομής της έντασης λόγω της επαφής και στην συνέχεια παραλαμβάνονται και από τους εφελκόμενους κοχλίες. Γι' αυτό και η απόκριση μετά την ανακατανομή είναι περίπου γραμμική, αφού οι επιφάνειες επαφής δεν μεταβάλλονται πια και η επιπλέον δύναμη παραλαμβάνεται μέσω των εφελκόμενων κοχλιών των οποίων οι δυνάμεις αυξάνονται από εκείνη τη στιγμή και μετά όπως φαίνεται και από το Σχήμα 5-24.



Σχήμα 5-23: Δρόμος ισορροπίας δυνάμεων επαφής μεταξύ των δακτυλιοειδών ελασμάτων

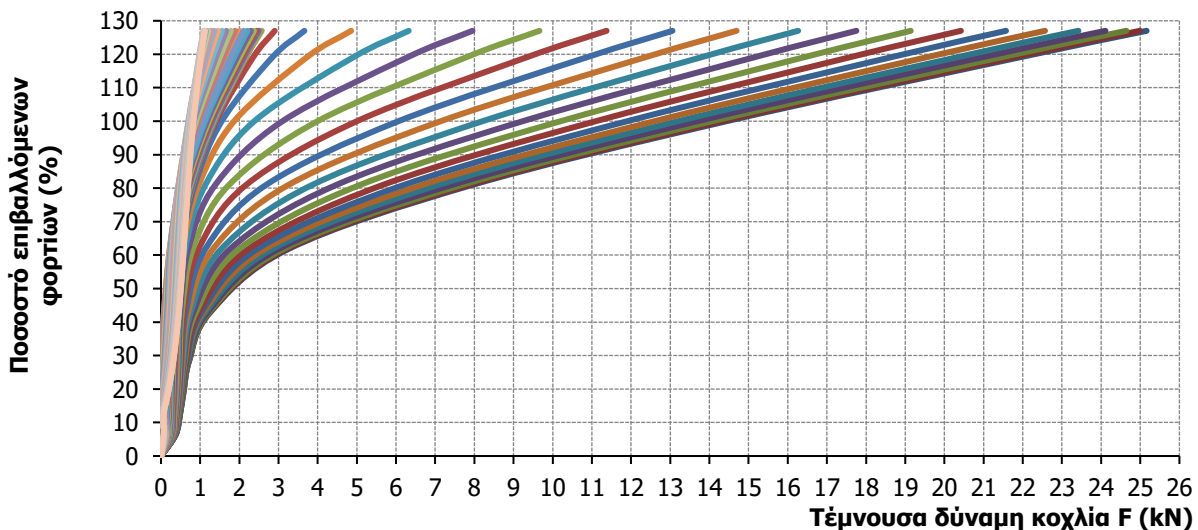
Στη συνέχεια εξετάστηκε η επιρροή των κοχλιών στη συγκεκριμένη σύνδεση και οι δυνάμεις που αναλαμβάνουν. Ειδικότερα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η σύνδεση αποτελείται συνολικά από 96 κοχλίες και εξετάζονται οι 48 λόγω συνθηκών συμμετρίας. Στο Σχήμα 5-19 απεικονίζονται λοιπόν οι 48 σε πλήθος καμπύλες, όσοι οι κοχλίες της σύνδεσης, που δείχνουν τη μεταβολή της αξονικής τους δύναμης κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Αρχικά, για μηδενική ροπή, η αξονική δύναμη του κάθε κοχλία είναι ίση με την δύναμη προέντασης του και μετά, με την αύξηση των φορτίων, αυξάνεται η αξονική δύναμη των 24 κοχλιών, δηλαδή των μισών. Αντίθετα, η αξονική δύναμη παραμένει περίπου σταθερή για τους κοχλίες που βρίσκονται στην έναρξη της θλιβόμενης ζώνης και μειώνεται λίγο σε αυτούς που συναντάμε καθώς απομακρυνόμαστε από εκεί και φτάνουμε στην άλλη άκρη της

διαμέτρου. Οι κοχλίες αυτοί δεν αναλαμβάνουν επιπλέον δύναμη πέραν της δύναμης προέντασης με αποτέλεσμα να χαλαρώνουν και να υπάρχει μερική απώλεια προέντασης. Μέσω των Διαγραμμάτων 5-24 και 5-25 φαίνεται επίσης ότι οι κοχλίες που βρίσκονται στη θλιβόμενη πλευρά αναλαμβάνουν μικρότερο ποσοστό από την επιβαλλόμενη τέμνουσα αφού αυτή αναλαμβάνεται κυρίως μέσω της τριβής στην περιοχή αυτή. Το αντίθετο συμβαίνει στους κοχλίες που βρίσκονται στην εφελκυστική πλευρά.

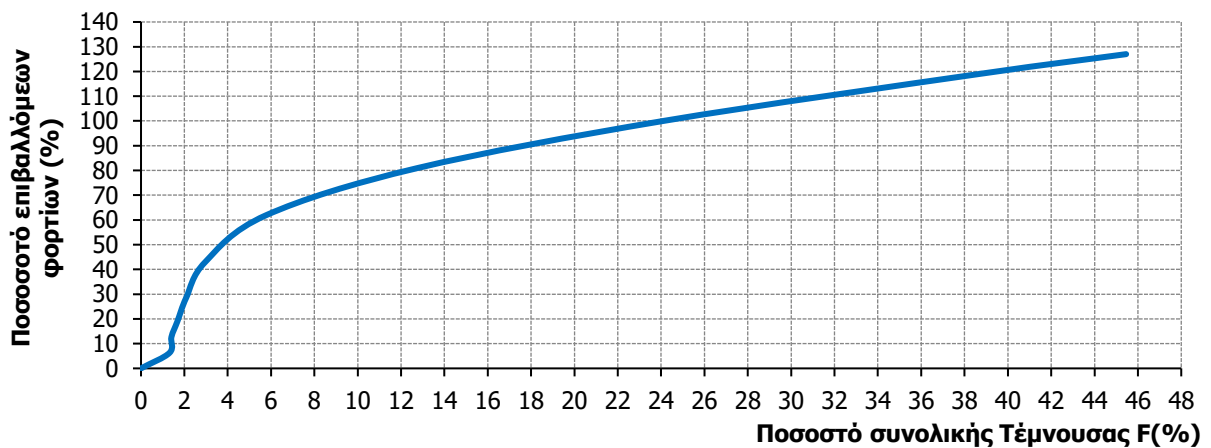


Σχήμα 5-24: Δρόμος ισορροπίας αξονικής δύναμης κοχλιών

Επιπλέον, μέσω των τεμνουσών δυνάμεων των κοχλιών (Σχήμα 5-25) γίνεται αντιληπτό ότι η μεταφορά της τέμνουσας γίνεται κυρίως μέσω τριβής της θλιβόμενης ζώνης αλλά και μέσω διάτμησης των κοχλιών. Πιο συγκεκριμένα, οι κοχλίες στο τέλος της ανάλυσης παραλαμβάνουν περίπου το 46% της τέμνουσας που δέχεται η σύνδεση. Αυτό γίνεται ακόμα πιο κατανοητό από το διάγραμμα του Σχήματος 5-26, στο οποίο απεικονίζεται η μεταβολή του ποσοστού της αθροιστικής τέμνουσας που παραλαμβάνουν όλοι οι κοχλίες καθώς εξελίσσεται η επιβαλλόμενη φόρτιση.

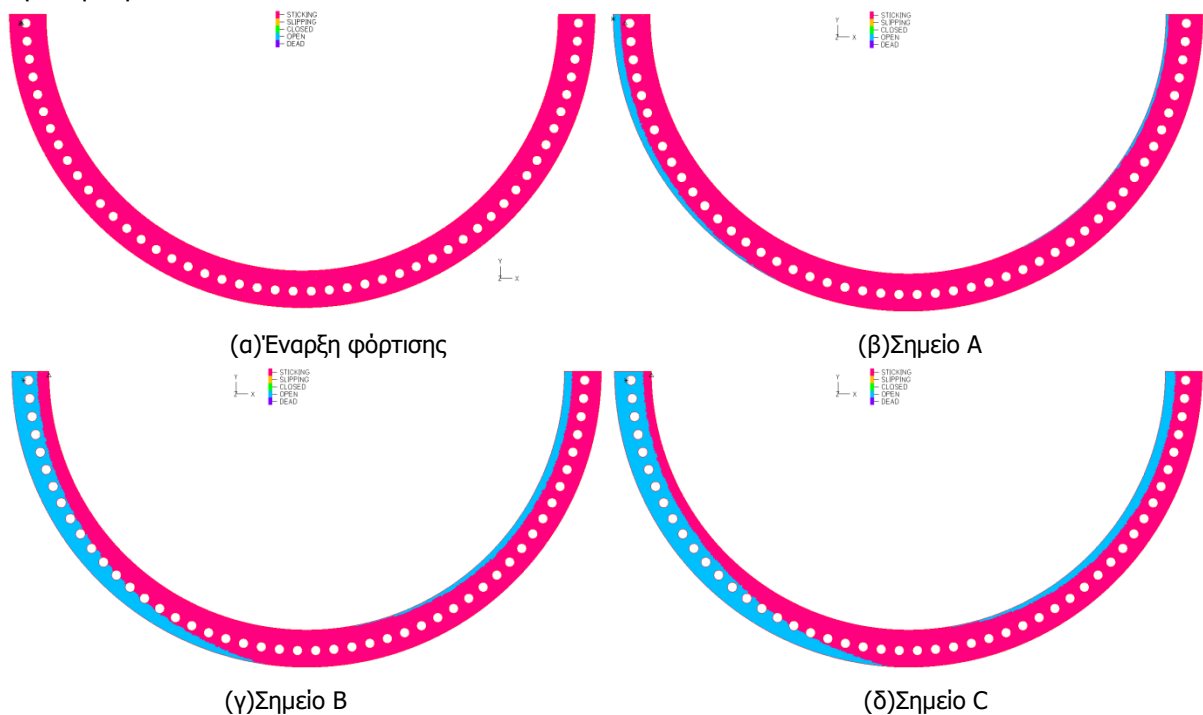


Σχήμα 5-25: Δρόμος ισορροπίας τέμνουσας δύναμης κοχλιών

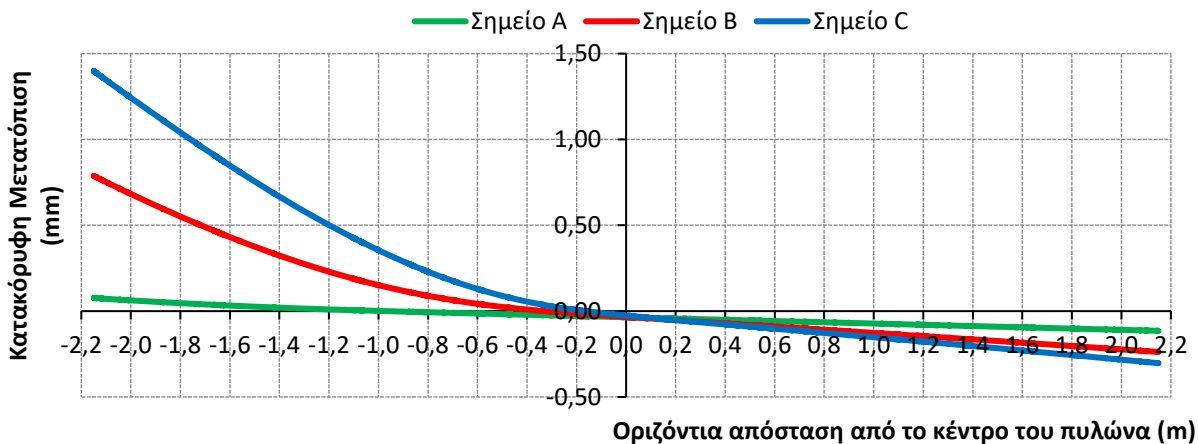


Σχήμα 5-26: Δρόμος ισορροπίας αθροιστικής τέμνουσας δύναμης κοχλιών

Τέλος, στο Σχήμα 5-27 παρουσιάζεται η θέση του ουδέτερου άξονα μέσω των επιφανειών που έρχονται σε επαφή και στο Σχήμα 5-28 οι κατακόρυφες μετακινήσεις του άνω πέλματος κατά μήκος της ημιπεριμέτρου στη διεπιφάνεια μεταξύ άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος και πυλώνα. Η θέση του ουδέτερου άξονα είναι εκεί που αποκολλώνται οι επιφάνειες των δύο ελασμάτων. Με ροζ χρώμα εμφανίζονται οι επιφάνειες που είναι σε επαφή, ενώ με μπλε οι περιοχές στις οποίες τα πέλματα έχουν αποκολληθεί και δεν υπάρχει επαφή. Αμέσως μετά την προένταση του κοχλία κλείνουν τα κενά και τα δύο πέλματα βρίσκονται πλήρως σε επαφή. Η θέση του ουδέτερου άξονα είναι προς την εφελκυσμένη παρειά, αλλά όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη προέντασης ο ουδέτερος άξονας μετατοπίζεται προς τον άξονα συμμετρίας της διατομής. Επίσης, μέσω του Σχήματος 5-27 γίνεται περισσότερο αντιληπτό ότι η εξωτερική παρειά της σύνδεσης που έχει αποκολληθεί φθάνει περίπου μέχρι το μέσον της περιοχής. Αυτό, μπορεί να εξηγήσει και το γεγονός ότι παρόλο που μόνο οι 19 κοχλίες της σύνδεσης βρίσκονται ξεκάθαρα στην εφελκυσμένη περιοχή, οι κοχλίες που συνολικά αυξάνεται η δύναμή τους είναι 24, δηλαδή οι μισοί.



Σχήματα 5-27: Θέση ουδέτερου άξονα στη αρχή και στα τρία σημεία του δρόμου ισορροπίας 5-12



Σχήμα 5-28: Κατακόρυφη μετατόπιση ημιπεριμέτρου διεπιφάνειας άνω ελάσματος και πυλώνα στα τρία σημεία Α,Β,С

5.4 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΑ

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που αφορούν τις ορθές τάσεις του πυλώνα στη διεπιφάνεια του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος και του κελύφους του πυλώνα ελέγχονται προσεγγιστικά με τη βοήθεια της θεωρίας δοκού. Επιλέγονται να ελεγχθούν οι ορθές τάσεις στα τρία παραπάνω σημεία της ανάλυσης Α,Β,С στα οποία το ποσοστό επιβαλλόμενων φορτίων είναι το 42.86%, το 100.01% και το 127.00% των φορτίων σχεδιασμού, ώστε να εξεταστεί αν οι αποκλίσεις μεταξύ αναλυτικής και αριθμητικής λύσης εξαρτώνται από το μέγεθος των επιβαλλόμενων φορτίων.

Στο Σχήμα 5-29 παρουσιάζεται ο Πίνακας που περιλαμβάνει τα ασκούμενα φορτία στα τρία αυτά βήματα της ανάλυσης. Ειδικότερα, η ροπή που δρα στην εξεταζόμενη διατομή είναι το άθροισμα της ασκούμενης ροπής στην κορυφή του τμήματος του πυλώνα που έχει προσομοιωθεί και της ροπής εξαιτίας της τέμνουσας που ασκείται εκεί. Η ροπή της τέμνουσας υπολογίζεται ως το γινόμενο της τέμνουσας δύναμης επί το ύψος του προσομοιωμένου τμήματος πυλώνα, το οποίο είναι ίσο με 13.95m. Στο σημείο αυτό δρα και μια αξονική θλιπτική δύναμη, η οποία λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς.

ΠΟΣΟΣΤΟ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ %	127,00	100,01	42,86
ΡΟΠΗ M	127211,71	100179,22	42933,95
ΤΕΜΝΟΥΣΑ V	1596,09	1256,92	538,68
ΑΞΟΝΙΚΗ N	-8329,80	-6559,72	-2811,31
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΡΟΠΗ M	149652,67	117851,48	50507,78

Σχήμα 5-29: Πίνακας φορτίων

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα, η διατομή αυτή όπως προαναφέρθηκε είναι στη διεπιφάνεια πυλώνα και άνω ελάσματος. Είναι κοίλη κυκλική διατομή με εξωτερική διάμετρο 4300mm και πάχος 40mm. Στον Πίνακα του Σχήματος 5-30 παρουσιάζονται η γεωμετρία της διατομής, η ροπή αδράνειας και το εμβαδόν της.

ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ D (m)	4,3
ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ D (m)	4,22
ΕΜΒΑΔΟΝ A (m ²)	0,535327
ΡΟΠΗ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ I (m ⁴)	1,21447

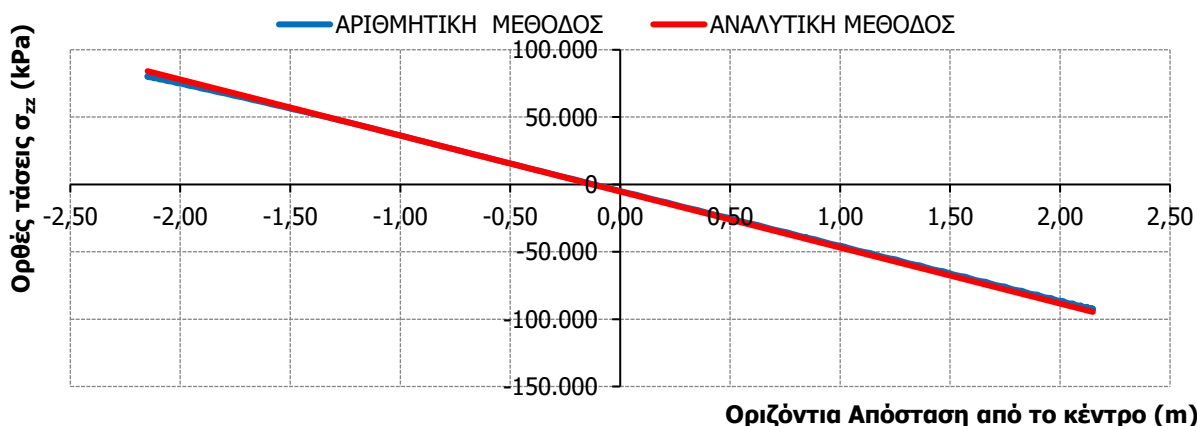
Σχήμα 5-30: Χαρακτηριστικά διατομής

Οι ορθές τάσεις που υπολογίζονται αναλυτικά προκύπτουν από την παρακάτω σχέση:

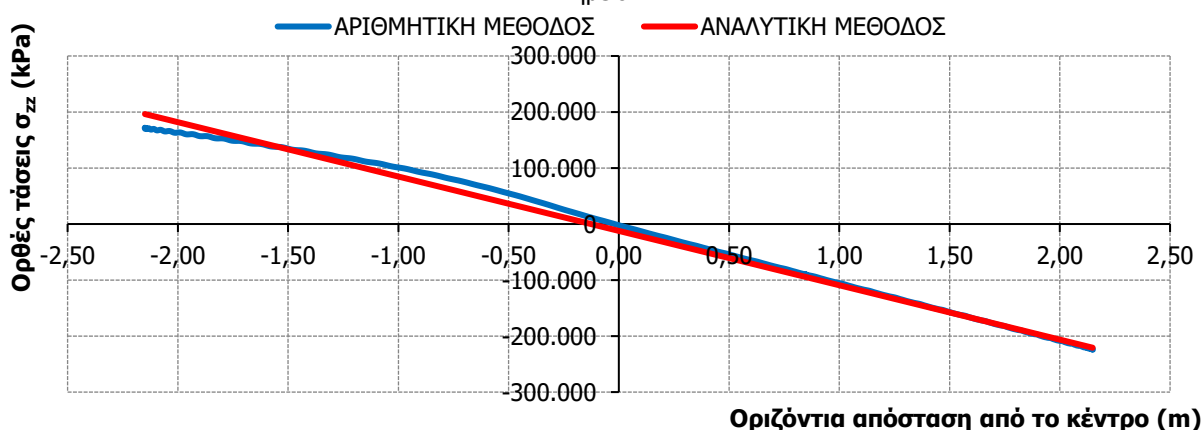
$$\sigma_{zz} = \frac{N}{A} + \frac{M}{I} \times y$$

όπου: N και M είναι η αξονική δύναμη και η ροπή στη διατομή που μελετάται αντίστοιχα,
I η ροπή αδράνειας της διατομής,
A το εμβαδόν της διατομής και
y η απόσταση των σημείων από το κέντρο βάρους της διατομής

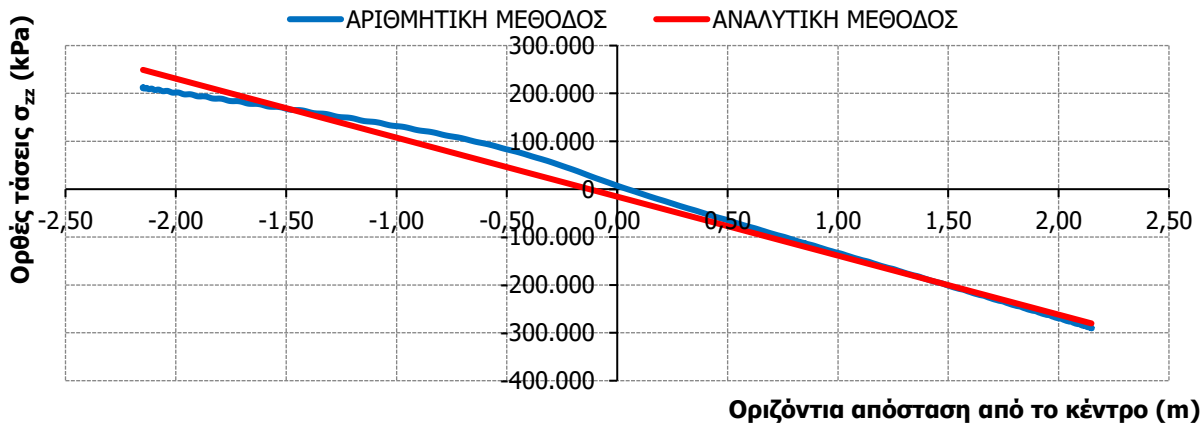
Στα παρακάτω Σχήματα 5-31 έως 5-33 απεικονίζονται οι ορθές τάσεις της διατομής στην ημιπεριφέρεια που προέκυψαν με την αριθμητική και την αναλυτική μέθοδο. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι αποστάσεις των σημείων της ημιπεριφέρειας από το κέντρο της διατομής, ενώ στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται η ορθή τάση σ_{zz} στα σημεία αυτά. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα τρία παρακάτω Σχήματα απεικονίζουν τη σύγκριση των ορθών αυτών τάσεων στις τρεις προαναφερθείσες επιβαλλόμενες φορτίσεις. Αυτό που παρατηρείται είναι, ότι σε μικρότερα φορτία υπάρχει ταύτιση των αριθμητικών και των αναλυτικών αποτελεσμάτων. Καθώς αυξάνονται τα φορτία παρατηρείται ότι υπάρχει μία μικρή απόκλιση των αποτελεσμάτων η οποία όμως είναι αποδεκτή αφού με την αναλυτική μέθοδο δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη για παράδειγμα οι επαφές των ελασμάτων που επιδρούν στα αριθμητικά αποτελέσματα. Σε όλα τα βήματα η απόκλιση του μέσου όρου των τιμών των επιβαλλόμενων φορτίων είναι περίπου στο 0.60-1.00%. Δηλαδή, το ολοκλήρωμα των ορθών κατακόρυφων τάσεων σ_{zz} των αριθμητικών αναλύσεων είναι ίσο με το 99-99.4% της αξονικής δύναμης που ασκείται στο προσομοίωμα σε εκείνο το βήμα της ανάλυσης.



Σχήμα 5-31: Διάγραμμα ορθών τάσεων στην ημιπεριφέρεια της διεπιφάνειας άνω ελάσματος και πυλώνα στο Σημείο A

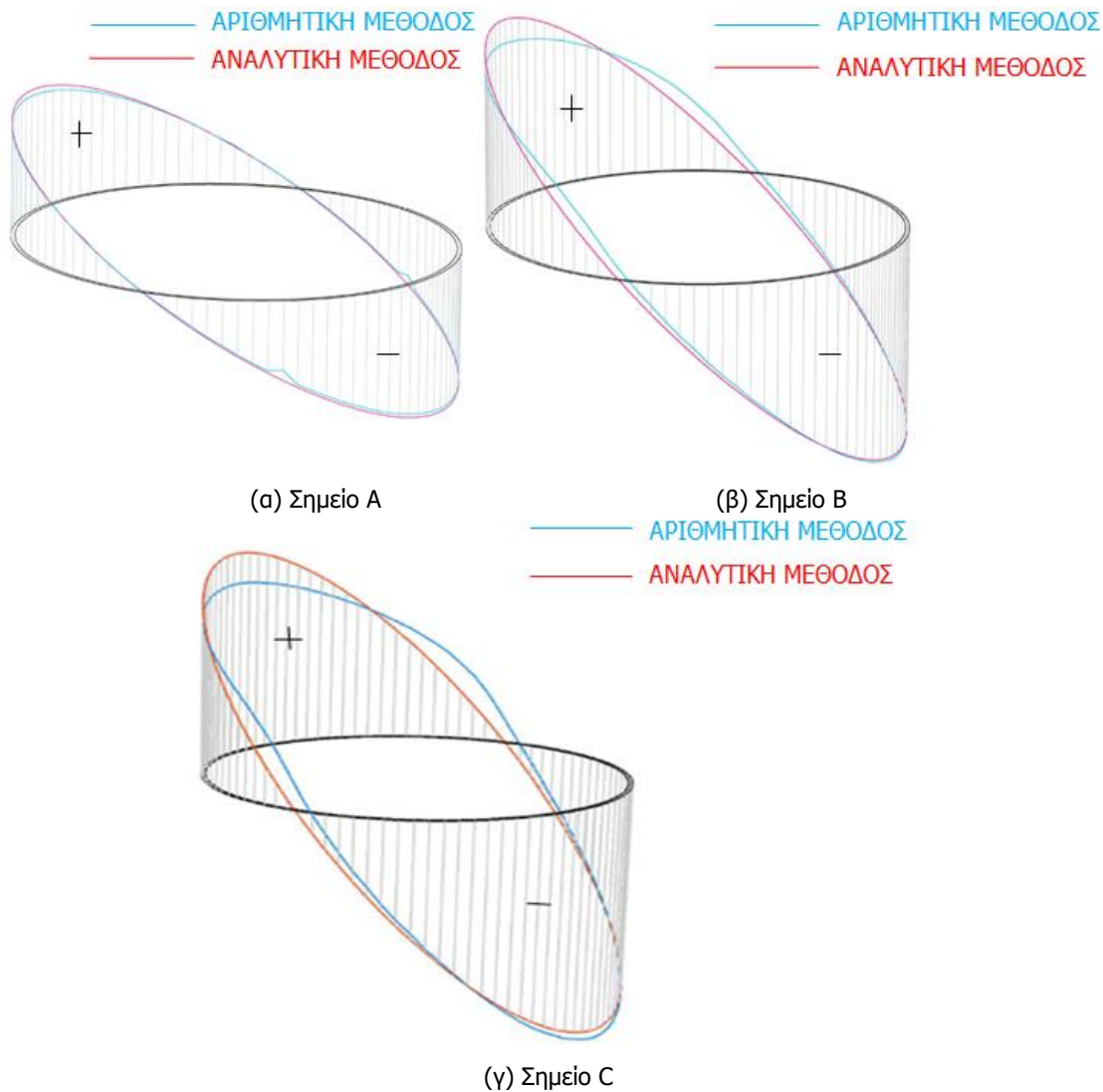


Σχήμα 5-32: Διάγραμμα ορθών τάσεων στην ημιπεριφέρεια της διεπιφάνειας άνω ελάσματος και πυλώνα στο Σημείο B



Σχήμα 5-33: Διάγραμμα ορθών τάσεων στην ημιπεριφέρεια της διεπιφάνειας άνω ελάσματος και πυλώνα στο Σημείο C

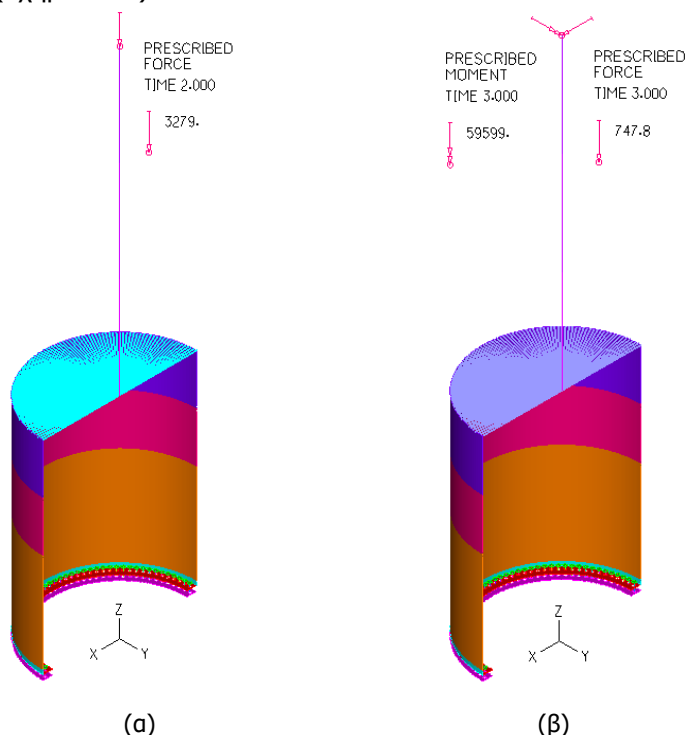
Στα Σχήματα 5-34α,β παρουσιάζονται οι παραπάνω ορθές τάσεις στα τρία Σημεία A,B,C των δρόμων ισορροπίας του Σχήματος 5-12 πάνω στην κυκλική διατομή. Ειδικότερα, η κόκκινη καμπύλη αντιπροσωπεύει την κατανομή των τάσεων που προέκυψαν από την αναλυτική μέθοδο, ενώ με την μπλε καμπύλη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής μεθόδου.



Σχήματα 5-34: 3D απεικόνιση ορθών τάσεων σ_{zz} στα τρία σημεία των δρόμων ισορροπίας 5-12

5.5 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΥΠΟ ΣΤΑΘΕΡΗ ΑΞΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΑΥΞΑΝΟΜΕΝΗ ΡΟΠΗ ΚΑΙ ΤΕΜΝΟΥΣΑ

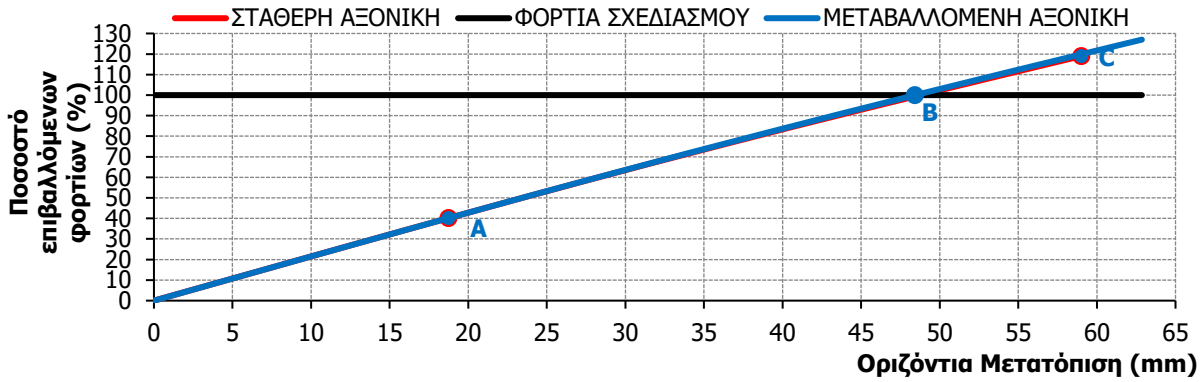
Στο Κεφάλαιο αυτό χρησιμοποιείται ξανά το προσομοίωμα που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5.2 με τη μόνη διαφορά ότι τώρα η ανάλυση πραγματοποιείται σε τρία βήματα. Στο πρώτο βήμα επιβάλλεται η προένταση σε όλους τους κοχλίες. Στο δεύτερο βήμα επιβάλλεται το αξονικό φορτίο, το οποίο οφείλεται στα ίδια βάρη και είναι ίσο με $F_z = -3279,45 \text{ kN}$. Τέλος, στο τελευταίο βήμα επιβάλλονται η ροπή και η τέμνουσα, οι οποίες οφείλονται στον άνεμο και αυξάνονται σταδιακά μέχρι την αστοχία του πρώτου κοχλία στην εφελκυσμένη πλευρά. Οι τιμές της ροπής και τέμνουσας που οδήγησαν τελικά στην αστοχία είναι $M_y = 59599,19 \text{ kNm}$ και $F_x = 747,77 \text{ kN}$ αντίστοιχα και αντιστοιχούν στο 119% των φορτίων σχεδιασμού (Σχήμα 5-35).



Σχήματα 5-35: Επιβαλλόμενη φόρτιση (α)1^ο βήμα: αξονική N, (β)2^ο βήμα: τέμνουσα F_x και ροπή M_y

Στη συνέχεια συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων με τα αποτελέσματα των αναλύσεων του Κεφαλαίου 5.3 στο οποίο υπάρχει ταυτόχρονη αύξηση όλων των ασκούμενων φορτίων (αξονικής, ροπής και τέμνουσας).

Αρχικά, στα Σχήματα 5-36 και 5-37 συγκρίνονται οι δρόμοι ισορροπίας «ποσοστό επιβαλλομένης φόρτισης-μετακίνησης x» και «ποσοστό επιβαλλομένης φόρτισης-στροφής y» στο σημείο επιβολής των φορτίων (Θέση 1-Σχήμα 5-15), για τις δύο περιπτώσεις φόρτισης. Το κόκκινο διάγραμμα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της φόρτισης που μελετάται σε αυτό το Κεφάλαιο, δηλαδή τη σταθερή αξονική και την αυξανόμενη ροπή και τέμνουσα, ενώ το μπλε διάγραμμα δείχνει τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5.3 και αφορούν την ταυτόχρονη αύξηση όλων των φορτίων. Αυτό που παρατηρείται είναι ότι η συμπεριφορά των προσομοιωμάτων είναι πανομοιότυπη με τη μόνη διαφορά ότι στο προσομοίωμα με τη σταθερή αξονική ο πρώτος κοχλίας αστοχεί σε εφελκυσμό σε μικρότερα φορτία αφού φτάνει μέχρι το 119% των φορτίων σχεδιασμού έναντι του 127%. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ύπαρξη αξονικής θλιπτικής δύναμης δρα ευεργετικά στο μοντέλο, οδηγώντας το σε μεγαλύτερα φορτία.

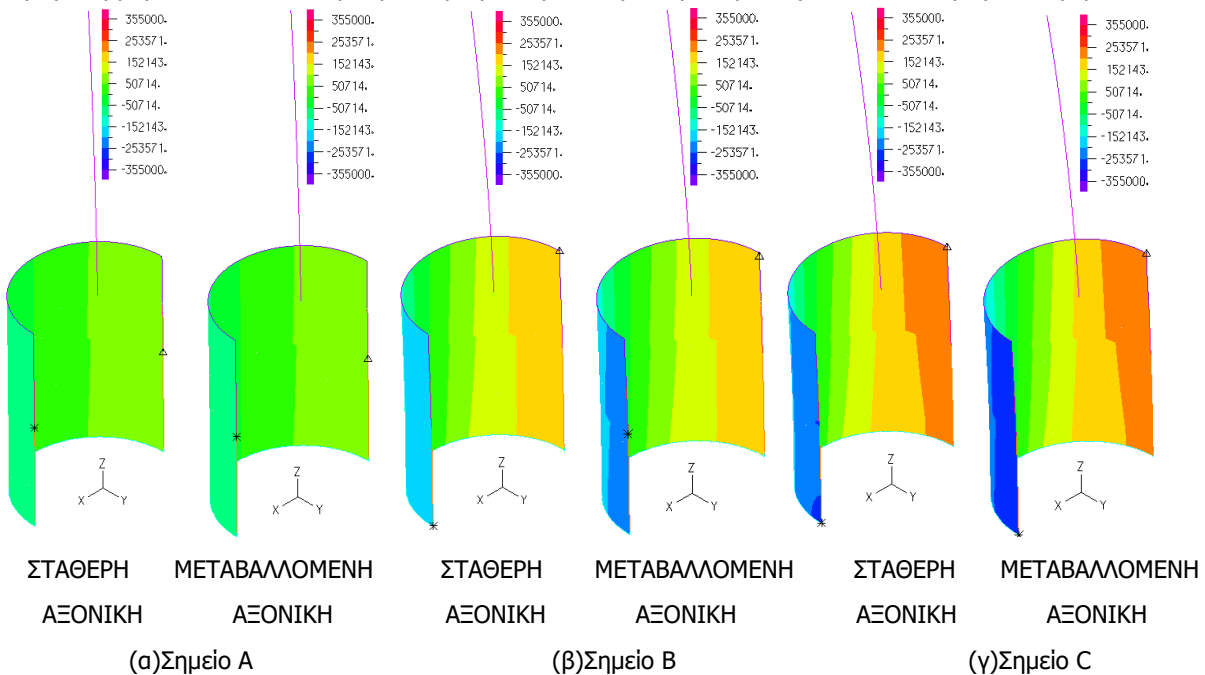


Σχήμα 5-36: Δρόμοι ισορροπίας ποσοστό φόρτισης – μετατόπισης προσομοιώματος στη θέση 1

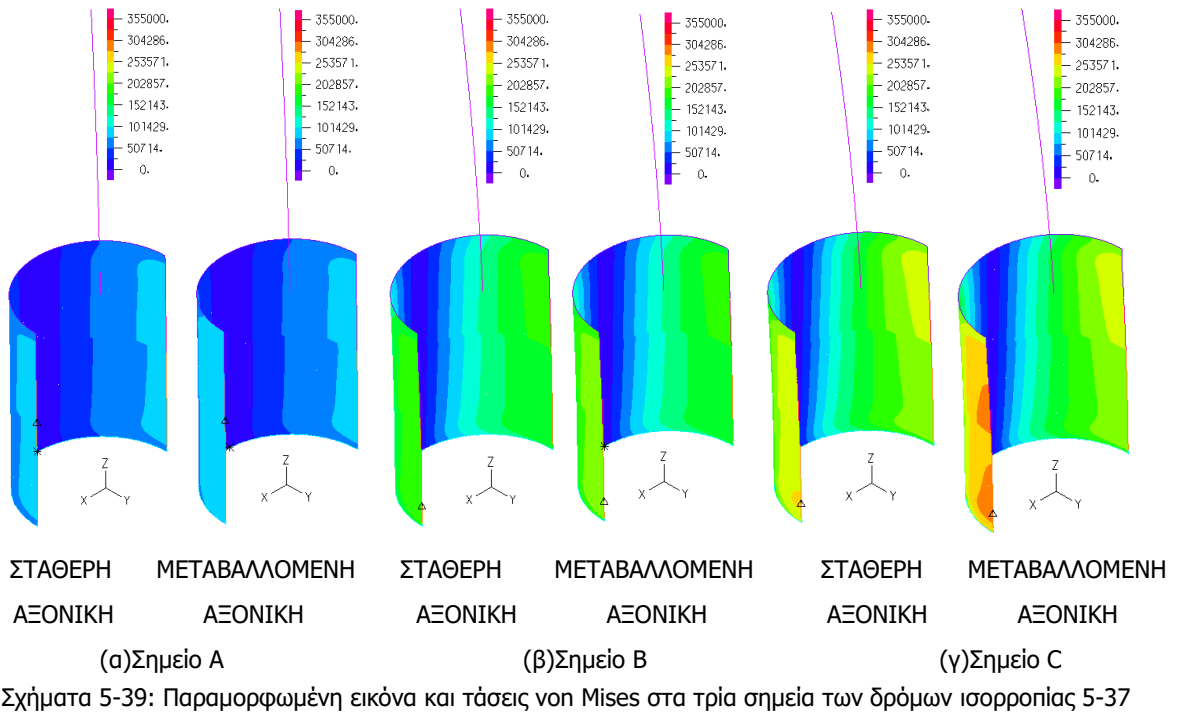


Σχήμα 5-37: Δρόμοι ισορροπίας ποσοστό φόρτισης – μετατόπισης προσομοιώματος στη θέση 1

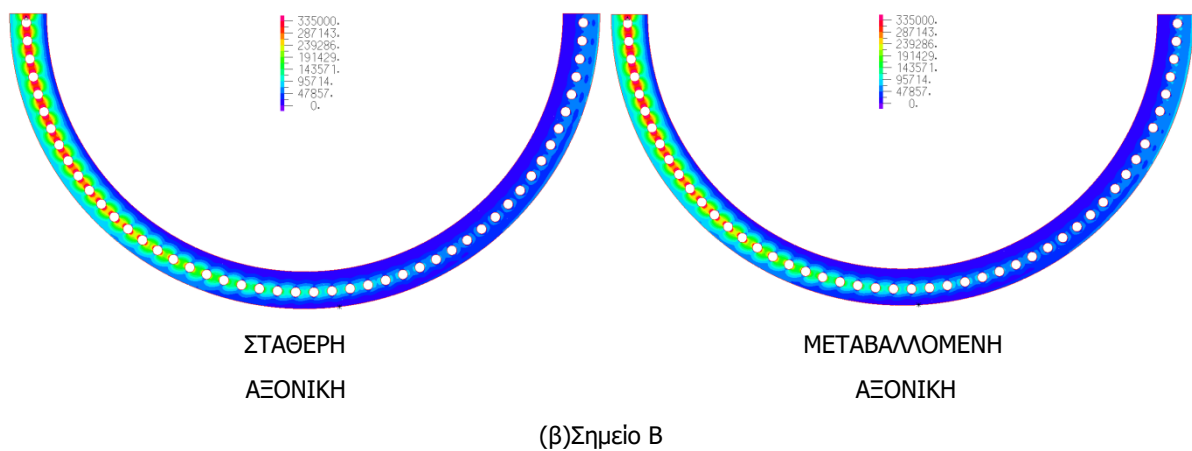
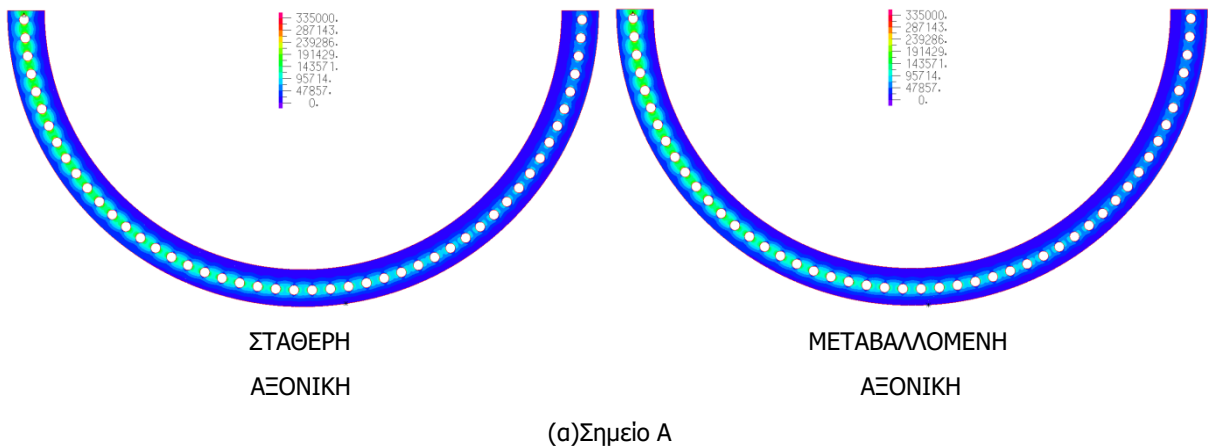
Επιπλέον, μέσω των παραμορφωμένων εικόνων στα τρία σημεία A,B,C και των τάσεων, ορθών σ_{zz} και von Mises, για τον πυλώνα (Σχήματα 5-38 και 5-39) αλλά και των τάσεων von Mises για το άνω δακτυλιοειδές έλασμα (Σχήματα 5-40), δεν παρατηρείται κάποια σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο προσομοιώματων. Ειδικότερα, οι κατανομές των τάσεων είναι παρόμοιες. Επίσης, είναι λογικό στο προσομοίωμα με τις μεγαλύτερες φορτίσεις να παρουσιάζονται λίγο μεγαλύτερες τάσεις κυρίως στη θλιβόμενη μεριά του πυλώνα μιας και η αξονική του προσομοιώματος αυτού είναι μεγαλύτερη.

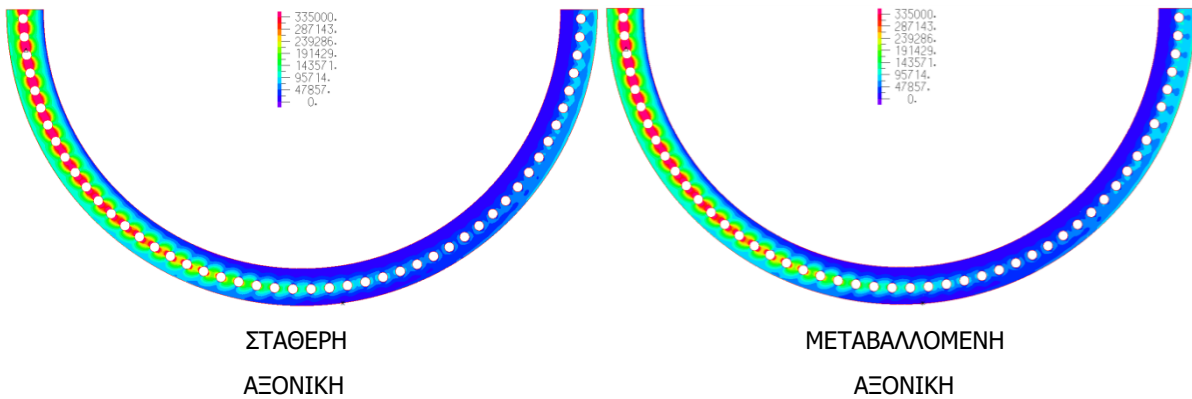


Σχήματα 5-38: Παραμορφωμένη εικόνα και ορθές τάσεις σ_{zz} στα τρία σημεία των δρόμων ισορροπίας 5-37



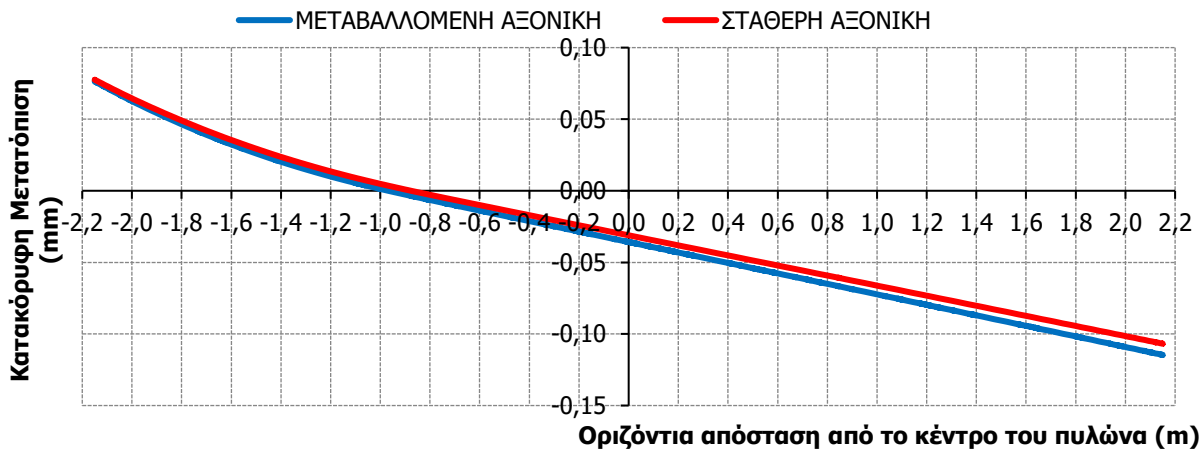
Σχήματα 5-39: Παραμορφωμένη εικόνα και τάσεις von Mises στα τρία σημεία των δρόμων ισορροπίας 5-37



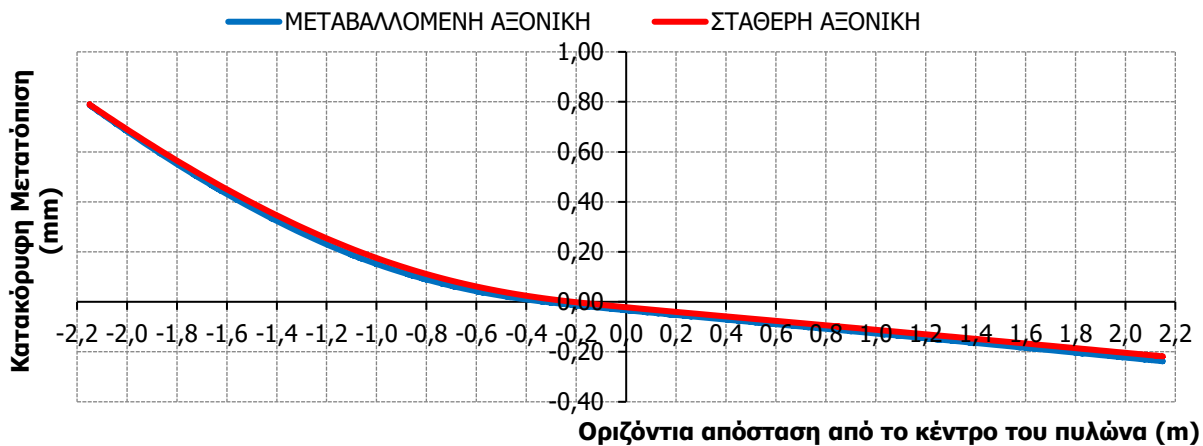


(γ) Σημείο C

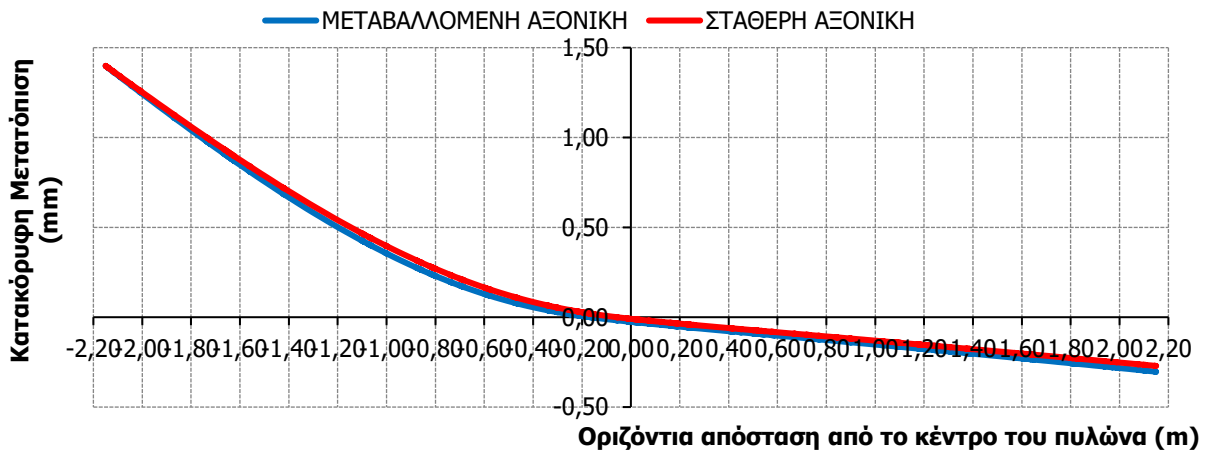
Σχήματα 5-40: Παραμορφωμένη εικόνα και τάσεις von Mises στα τρία σημεία των δρόμων ισορροπίας 5-37. Ακόμη, μέσω των διαγραμμάτων που απεικονίζουν την κατακόρυφη μετατόπιση των σημείων της διεπιφάνειας άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος και πυλώνα (Σχήμα 5-41) καθώς επίσης και μέσω των διαγραμμάτων που απεικονίζουν τις ορθές τάσεις σ_{zz} στα ίδια αυτά σημεία (Σχήμα 5-42), δεν παρατηρείται πάλι κάποια διαφορά στα δύο συγκρινόμενα προσομοιώματα. Οι θλιβόμενες τάσεις είναι λίγο μεγαλύτερες στο προσομοίωμα με τη μεταβαλλόμενη αξονική αφού η αξονική του προσομοιώματος είναι μεγαλύτερη. Το ίδιο συμπέρασμα εξάγεται και από τις εικόνες που παρουσιάζουν την επαφή των δύο δακτυλιοειδών ελασμάτων στα τρία χαρακτηριστικά σημεία A, B, C των δρόμων ισορροπίας (Σχήματα 5-43).



(α) Σημείο A

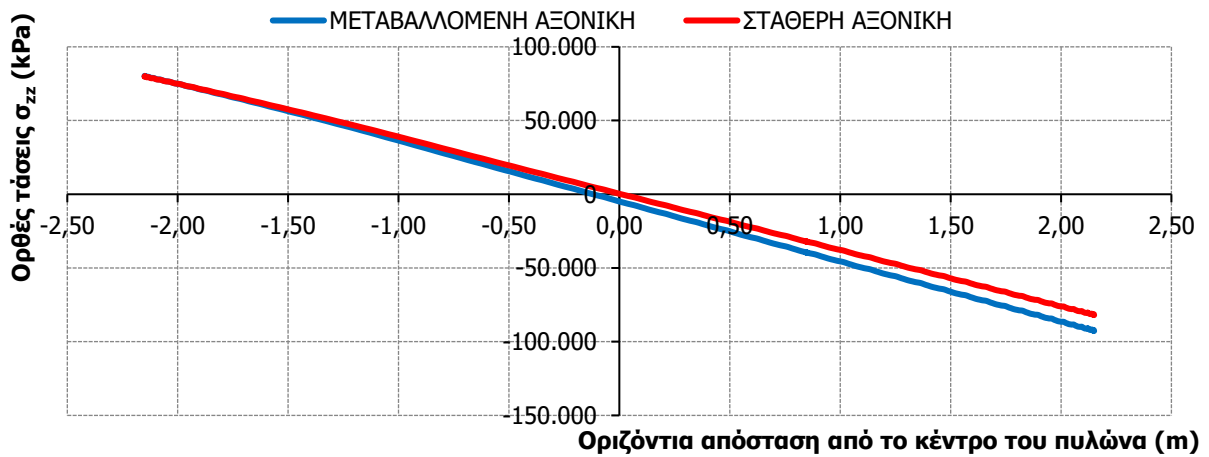


(β) Σημείο B

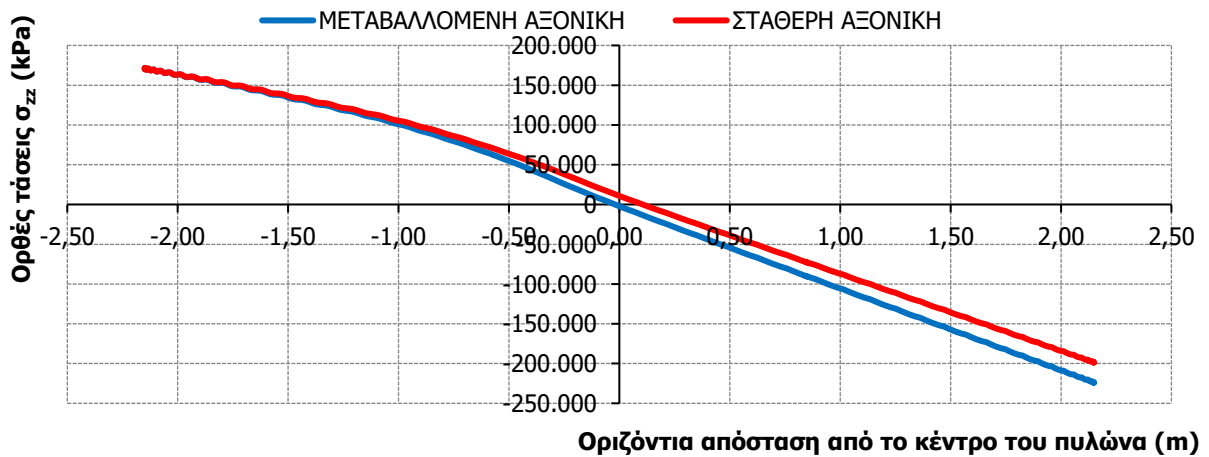


(γ) Σημείο C

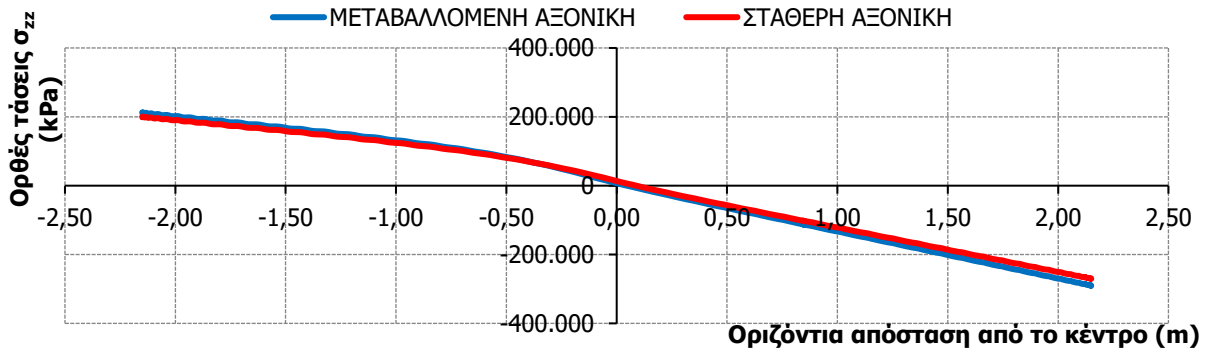
Σχήμα 5-41: Κατακόρυφη μετατόπιση ημιπεριμέτρου διεπιφάνειας άνω ελάσματος και πυλώνα στα σημεία A,B,C



(α) Σημείο A

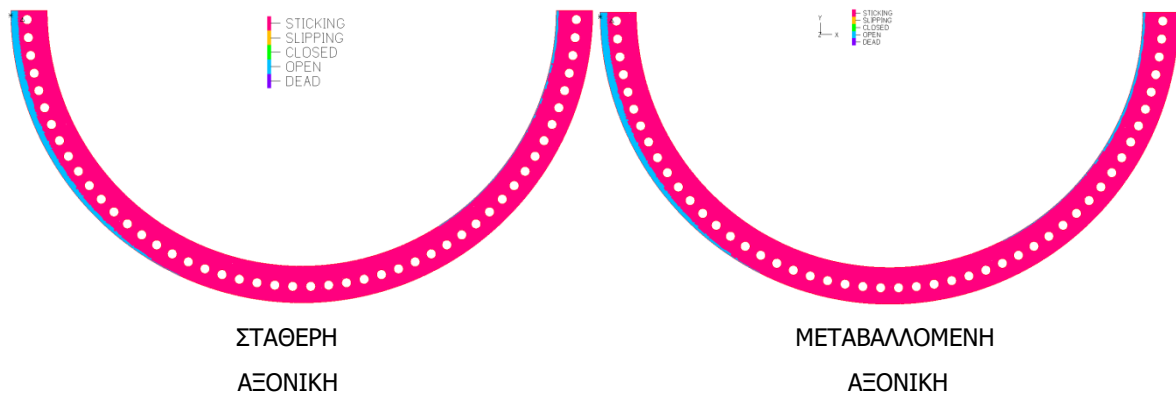


(β) Σημείο B

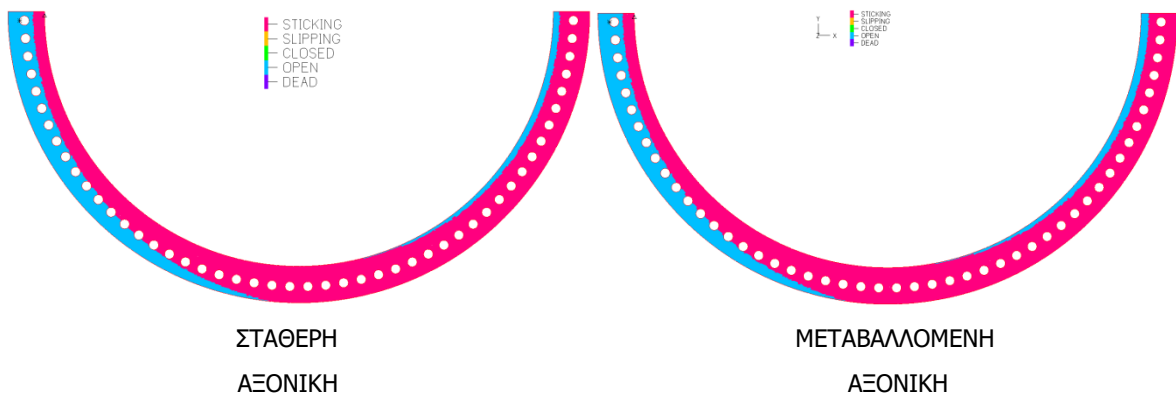


(γ) Σημείο C

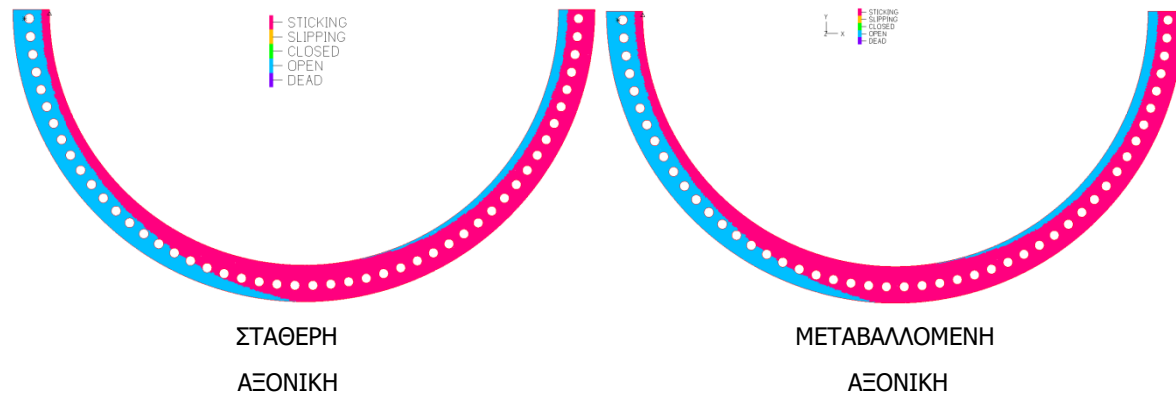
Σχήμα 5-42: Κατακόρυφες τάσεις σ_{zz} ημιπεριμέτρου διεπιφάνειας άνω ελάσματος και πυλώνα στα σημεία A,B,C



(α) Σημείο A



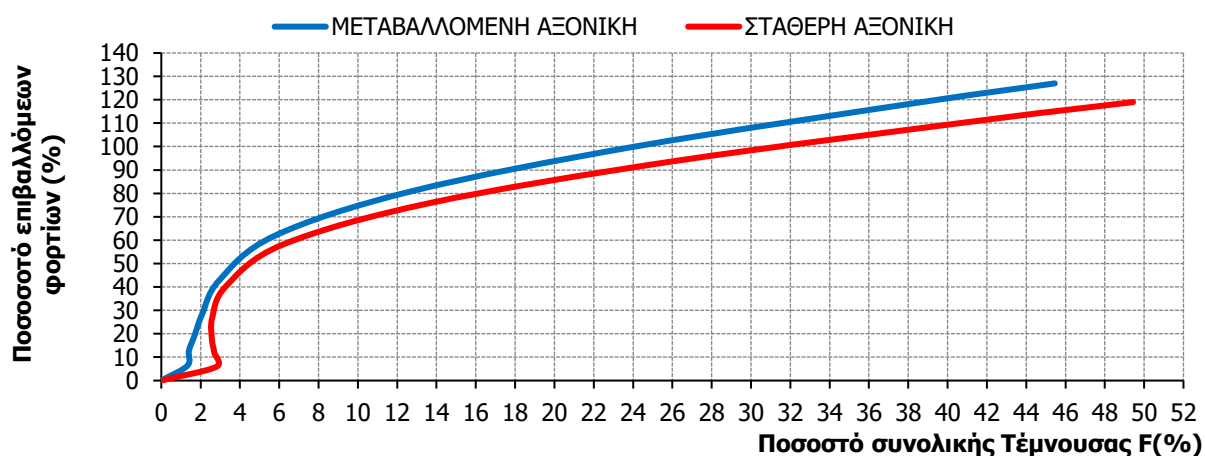
(β) Σημείο B



(γ) Σημείο C

Σχήματα 5-43: Θέση ουδέτερου άξονα στη αρχή και στα τρία σημεία των δρόμων ισορροπίας 5-37

Τέλος, η μόνη μικρή διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των δύο συγκρινόμενων προσομοιωμάτων είναι ότι στο προσομοίωμα με τη σταθερή αξονική δύναμη, η μεταφορά της τέμνουσας μέσω τριβής των ελασμάτων είναι λίγο μικρότερη από ότι αυτή στο προσομοίωμα με την αξονική που μεταβάλλεται. Αυτό φαίνεται μέσω του διαγράμματος του Σχήματος 5-44, στο οποίο απεικονίζεται η μεταβολή του ποσοστού της αθροιστικής τέμνουσας που παραλαμβάνουν όλοι οι κοχλίες καθώς εξελίσσεται η επιβαλλόμενη φόρτιση στα δύο συγκρινόμενα προσομοιώματα. Πιο συγκεκριμένα, οι κοχλίες στο τέλος της ανάλυσης παραλαμβάνουν περίπου το 50% της τέμνουσας που δέχεται η σύνδεση στο προσομοίωμα με τη σταθερή αξονική ενώ στο προσομοίωμα με τη μεταβαλλόμενη αξονική περίπου το 46%.



Σχήμα 5-44: Δρόμοι ισορροπίας αθροιστικής τέμνουσας δύναμης κοχλιών

6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΠΥΛΩΝΑ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο Κεφάλαιο αυτό πραγματοποιούνται ορισμένες παραμετρικές αναλύσεις που αφορούν ολόκληρη τη σύνδεση για να διερευνηθεί η επιρροή δύο σημαντικών παραμέτρων απόκρισης της, χρησιμοποιώντας το προσομοίωμα των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων με χάλυβα S355 που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5).

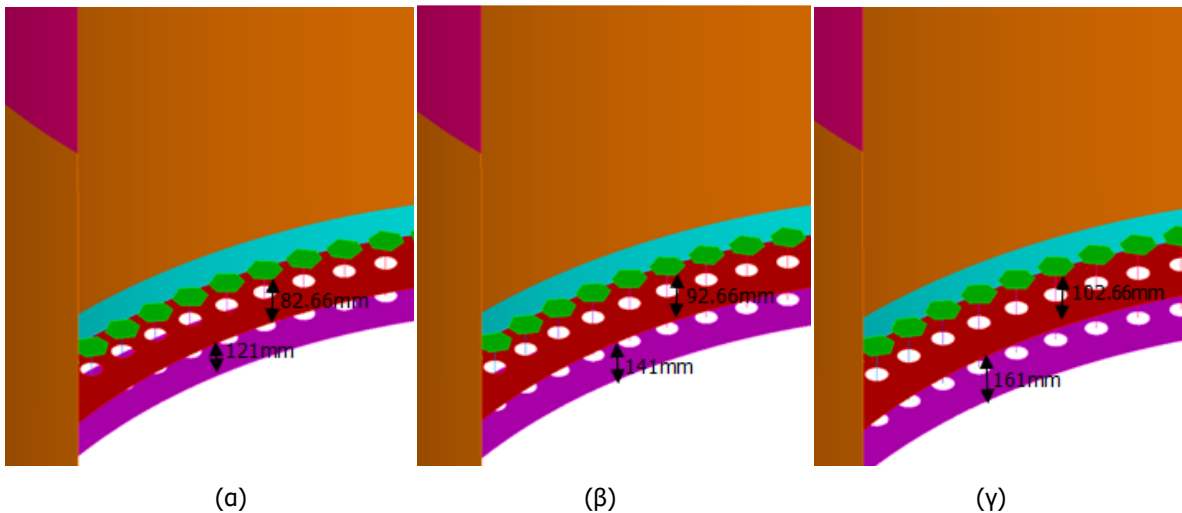
Αρχικά, εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής του πάχους των δακτυλιοειδών ελασμάτων. Συγκρίνονται τρία διαφορετικά προσομοιώματα στα οποία μεταβάλλονται τα πάχη των δακτυλιοειδών ελασμάτων με βήμα 20mm. Ειδικότερα, εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα για προσομοιώματα με πάχη ελασμάτων 120mm και 160mm και συγκρίνονται με το ήδη υπάρχον προσομοίωμα με πάχος ελάσματος 140mm.

Στη δεύτερη παραμετρική ανάλυση, εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής της προέντασης των κοχλιών. Συγκρίνονται τρία διαφορετικά προσομοιώματα στα οποία μεταβάλλεται η δύναμη προέντασης που επιβάλλεται στους κοχλίες στο πρώτο βήμα των αναλύσεων. Ειδικότερα, επιβάλλεται το 80% και το 50% της ονομαστικής δύναμης προεντάσεως (η οποία είναι ίση με το 70% της εφελκυστικής αντοχής) και εξάγονται αριθμητικά αποτελέσματα, τα οποία συγκρίνονται με το ήδη υπάρχον προσομοίωμα στο οποίο έχει επιβληθεί το 100% της ονομαστικής δύναμης προεντάσεως.

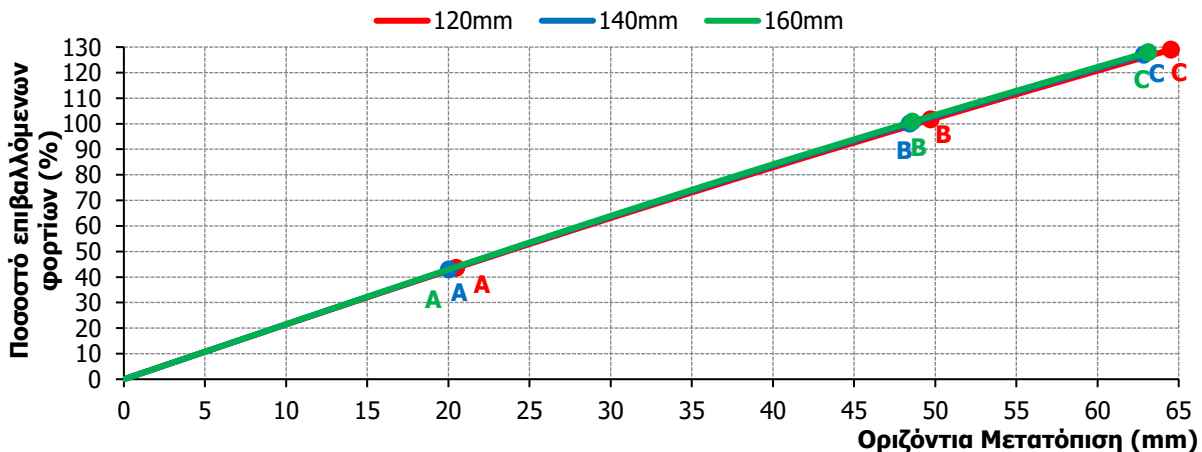
6.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΩΝ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ

Το πρώτο σύνολο παραμετρικών αναλύσεων για τη σύνδεση των δακτυλιοειδών ελασμάτων αφορά την επίδραση του πάχους των ελασμάτων στην απόκριση της συγκεκριμένης σύνδεσης που μελετάται. Για τις αναλύσεις αυτές δημιουργούνται αντίστοιχα προσομοιώματα με αυτό των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μόνη διαφορά των προσομοιωμάτων αυτών είναι τα πάχη των ελασμάτων τους. Ειδικότερα, δημιουργούνται δύο νέα προσομοιώματα με πάχη ελασμάτων 120mm και 160mm στα οποία ασκούνται στην κορυφή του πυλώνα φορτία, ροπή M_y , αξονική F_z και τέμνουσα F_x , ίσα με αυτά που οδηγούν στην αστοχία του πρώτου κοχλία της εφελκυσόμενης πλευράς. Στο προσομοίωμα με πάχος ελασμάτων 120mm τα φορτία αστοχίας αντιστοιχούν στο 129% των φορτίων σχεδιασμού ενώ σε αυτό με πάχος 160mm αντιστοιχούν στο 128% των φορτίων σχεδιασμού. Συνεπώς, και τα τρία προσομοιώματα αστοχούν περίπου σε ίδιο μέγεθος φορτίων ανεξαρτήτως του πάχους των ελασμάτων τους μιας και όπως

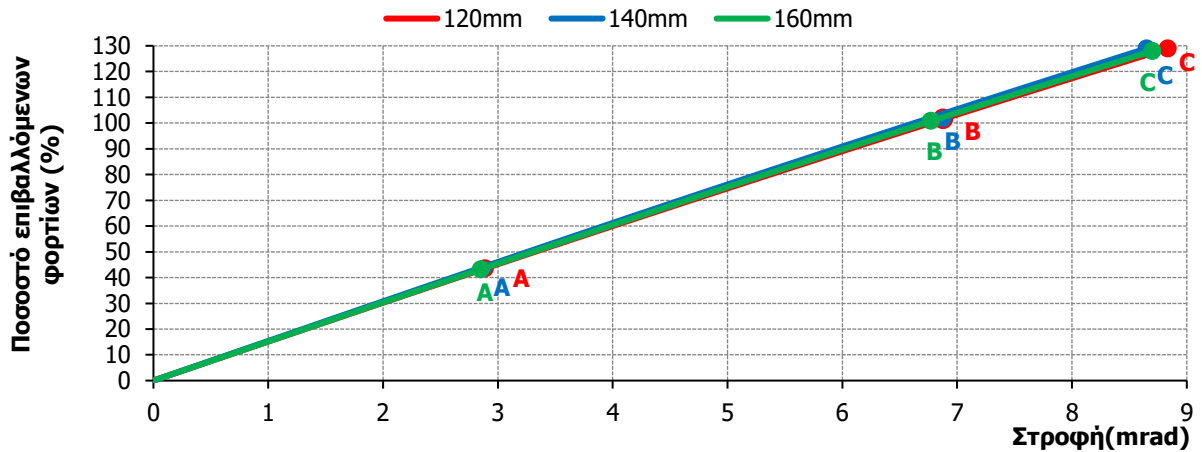
αναφέρθηκε και παραπάνω το προσομοίωμα των 140mm αστοχεί στο 127% των φορτίων σχεδιασμού. Σε όλα αυτά τα μοντέλα το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων διατηρείται σταθερό, η γεωμετρία το ίδιο και το μόνο που αλλάζει είναι η απόσταση των μέσων επιφανειών που προσομοιώνονται. Είναι λογικό ότι στο προσομοίωμα με πάχος ελάσματος 120mm, η απόσταση των δύο δακτυλιοειδών ελασμάτων είναι 121mm ενώ η απόσταση κεφαλής κοχλία και άνω ελάσματος 82.66mm, λαμβάνοντας υπόψη και τις απαιτούμενες ανοχές. Αντίστοιχα, αυτές οι αποστάσεις στο προσομοίωμα των 160mm είναι 161mm και 102.66mm. Στα Σχήματα 6-1α,β,γ απεικονίζονται τα τέσσερα προσομοιώματα που αφορούν οι παρακάτω παραμετρικές αναλύσεις.



Σχήματα 6-1: Αριθμητικά προσομοιώματα με πάχη δακτυλιοειδών ελασμάτων, (α)120mm, (β)140mm, (γ)160mm
 Στο Σχήμα 6-2, παρουσιάζονται τα διαγράμματα «Οριζόντια Μετατόπιση-Ποσοστό επιβαλλόμενων φορτίων» στη θέση 1 (Σχήμα 5-14), στην κορυφή του προσομοιωμένου τμήματος του πυλώνα για τα τρία αυτά προσομοιώματα. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 6-3 απεικονίζονται τα διαγράμματα «Στροφή - Ποσοστό επιβαλλόμενων φορτίων» στην ίδια θέση. Το κόκκινο διάγραμμα αφορά το προσομοίωμα με πάχος ελασμάτων 120mm, το μπλε αφορά το προσομοίωμα με πάχος 140mm και το πράσινο αντιστοιχεί σε αυτό των 160mm. Πάνω στα διαγράμματα αυτά έχουν επισημανθεί τα τρία χαρακτηριστικά σημεία A,B,C που έχουν αναφερθεί και στο προηγούμενο Κεφάλαιο, τα οποία και στα τρία προσομοιώματα αντιστοιχούν σε περίπου ίδια φορτία. Μέσω των διαγραμμάτων αυτών είναι εμφανές ότι η συμπεριφορά των τριών αυτών προσομοιωμάτων είναι περίπου ίδια αφού η μέγιστη οριζόντια μετατόπιση και η στροφή της κορυφής περίπου ταυτίζεται. Επίσης, ο πυλώνας συμπεριφέρεται γραμμικά μέχρι και την αστοχία σε εφελκυσμό του πρώτου κοχλία και στα τρία προσομοιώματα.

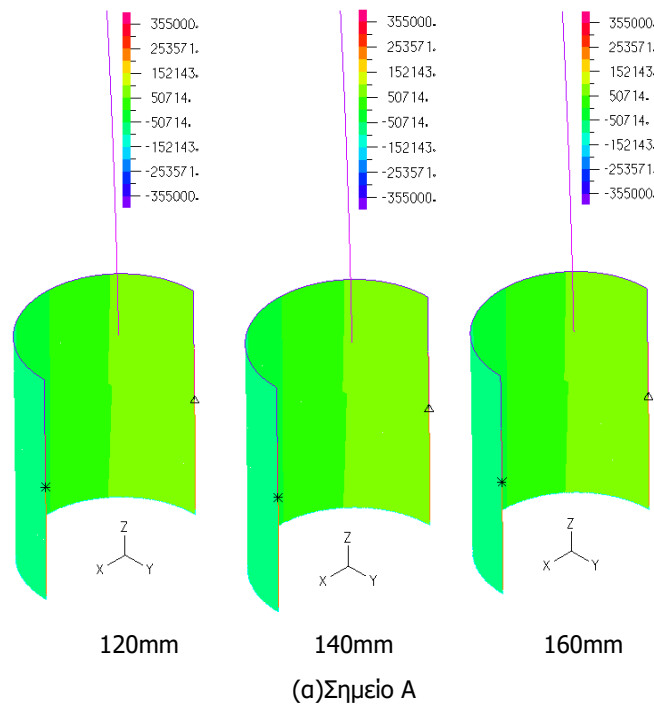


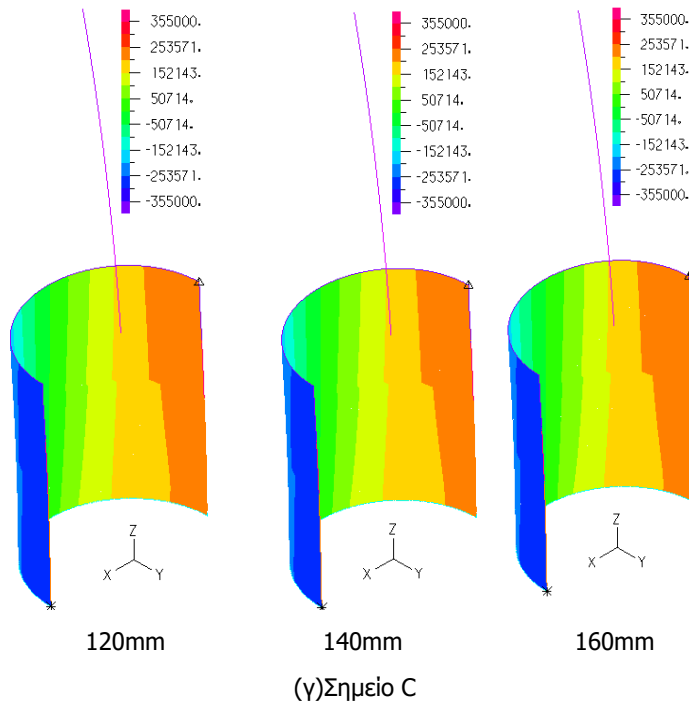
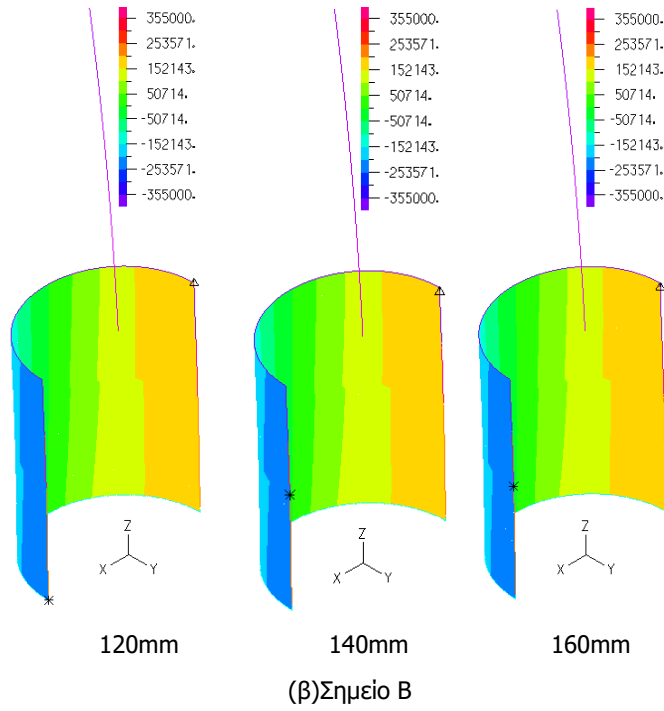
Σχήμα 6-2: Δρόμοι ισορροπίας ποσοστό φόρτισης – μετατόπισης προσομοιωμάτων στη θέση 1



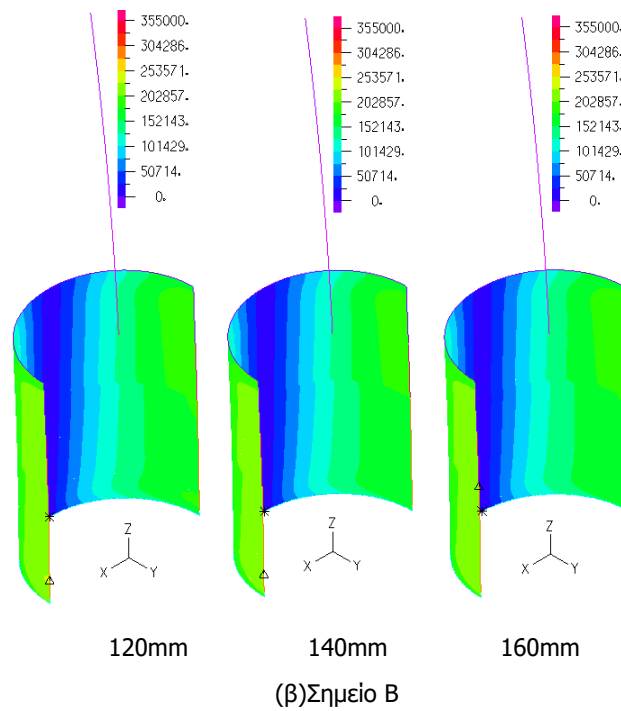
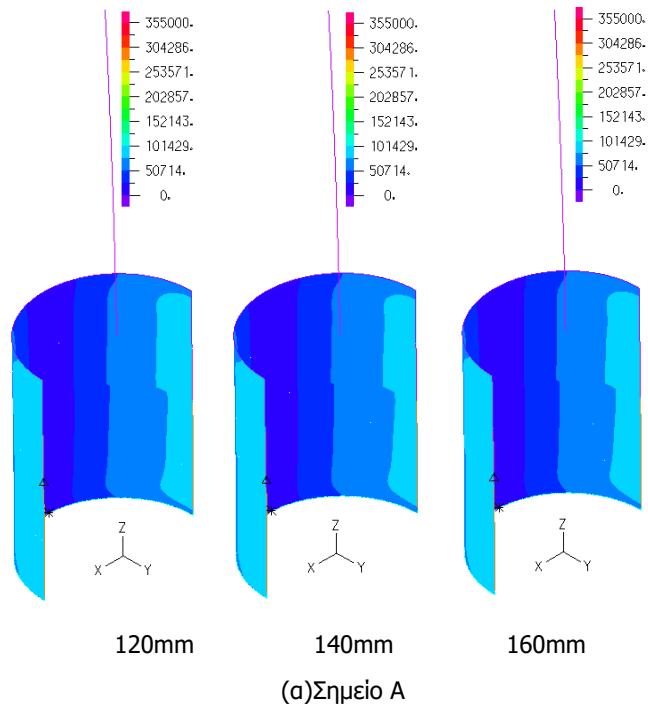
Σχήμα 6-3: Δρόμοι ισορροπίας ποσοστό φόρτισης – στροφής προσομοιωμάτων στη θέση 1

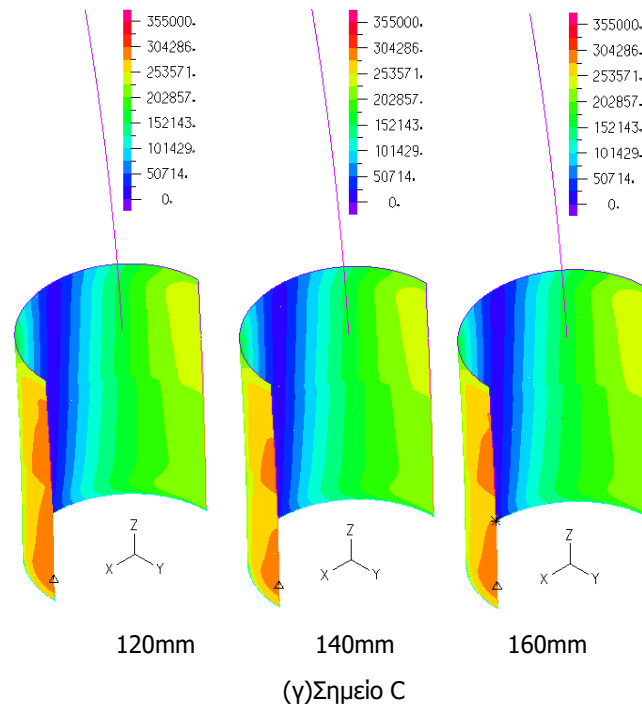
Επιπλέον, μέσω των παραμορφωμένων εικόνων στα τρία σημεία A,B,C και των τάσεων, ορθών σ_{zz} και von Mises, για τον πυλώνα (Σχήματα 6-4 και 6-5) δεν παρατηρείται κάποια σημαντική διαφορά μεταξύ των τριών προσομοιωμάτων, αφού οι κατανομές των τάσεων είναι παρόμοιες. Αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα των κατακόρυφων τάσεων σ_{zz} της ημιπεριμέτρου της διεπιφάνειας άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος και πυλώνα του Σχήματος 6-6, στο Σημείο C, για τα τρία διαφορετικά πάχη, τα οποία περίπου ταυτίζονται και στα τρία Σημεία A,B,C.



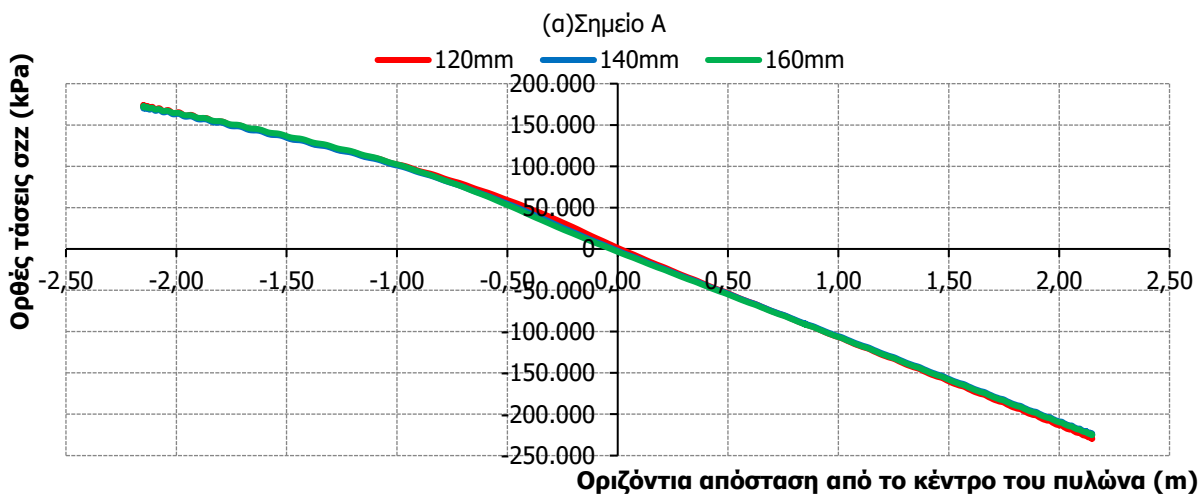
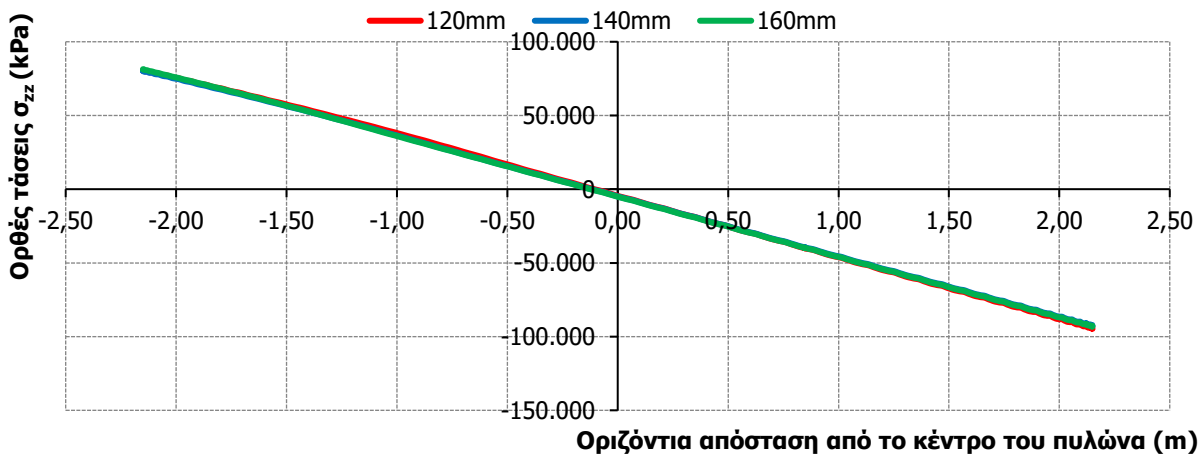


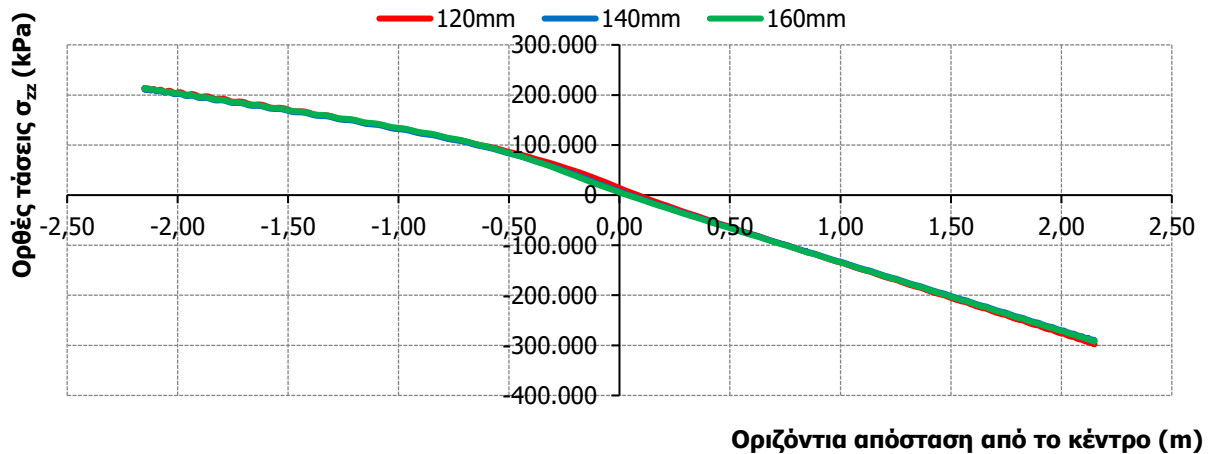
Σχήματα 6-4: Παραμορφωμένη εικόνα και ορθές τάσεις σ_{zz} στα τρία σημεία των δρόμων ισορροπίας 6-2





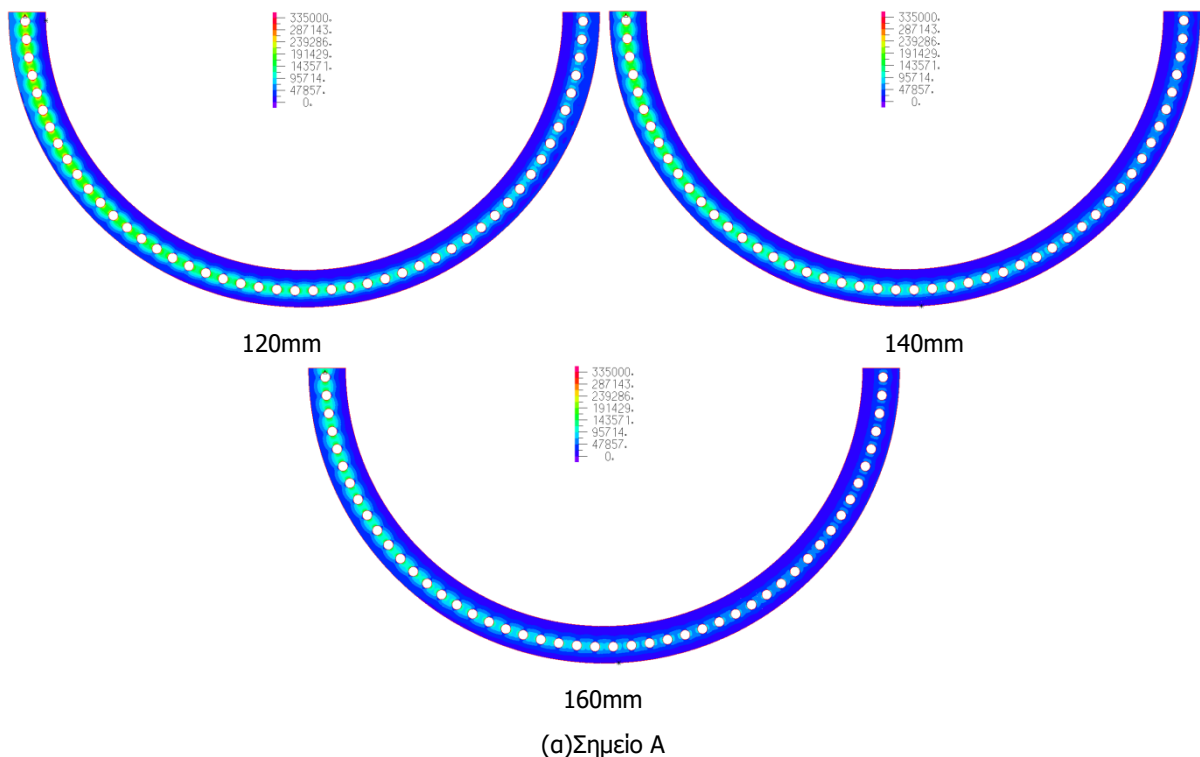
Σχήματα 6-5: Παραμορφωμένη εικόνα και τάσεις Von Mises στα τρία σημεία των δρόμων ισορροπίας 6-2

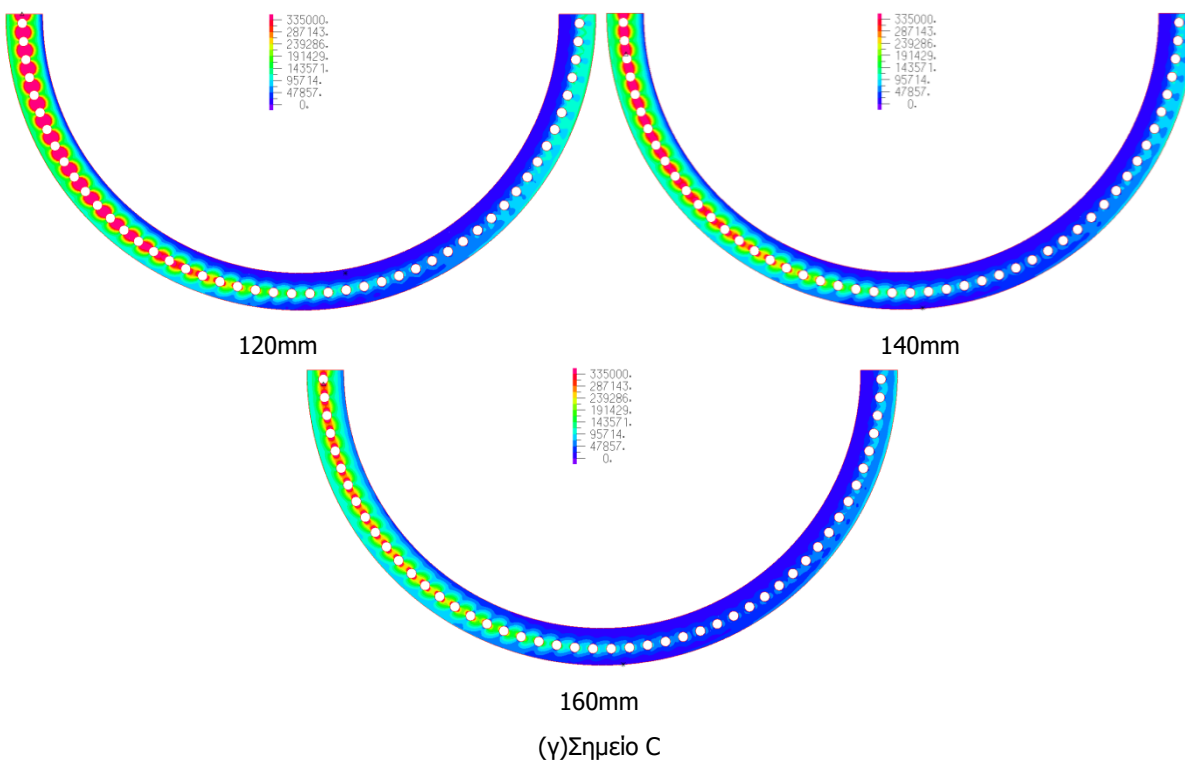
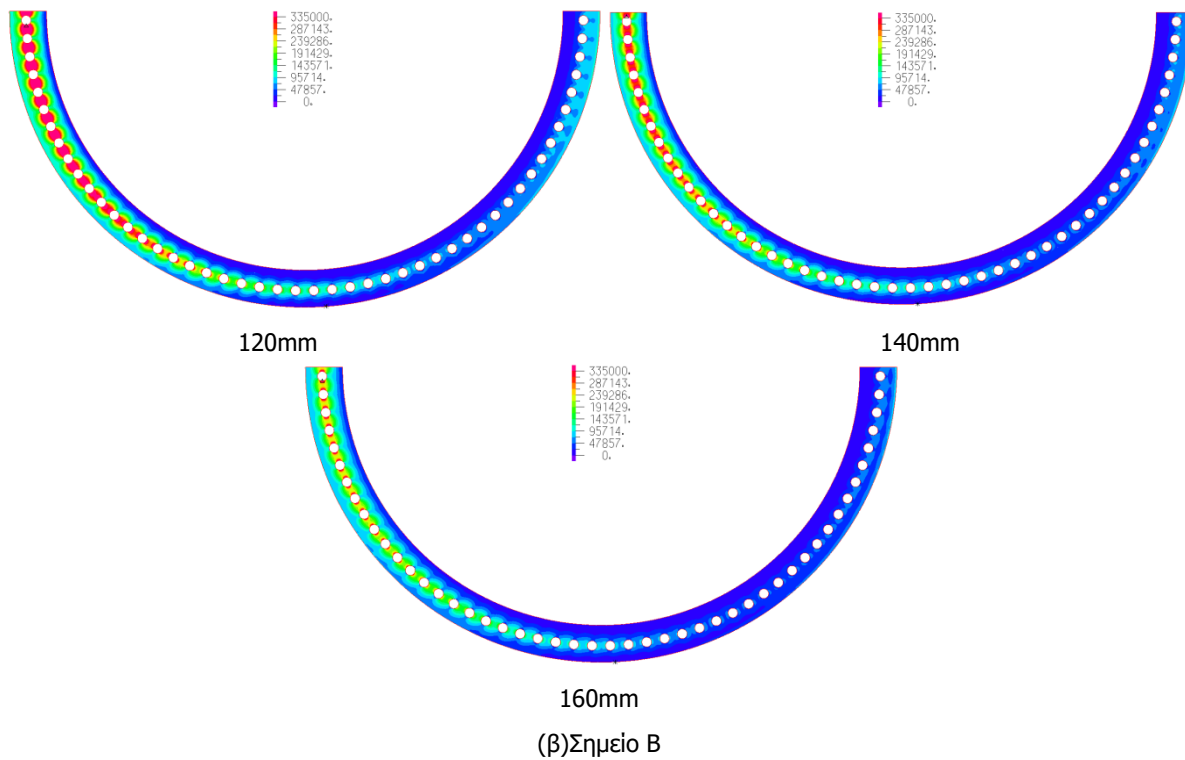




(γ)Σημείο C

Σχήμα 6-6: Κατακόρυφες τάσεις σ_{zz} ημiperιμέτρου διεπιφάνειας άνω ελάσματος και πυλώνα στα σημεία A,B,C. Αντίθετα, οι τάσεις von Mises στο άνω δακτυλιοειδές έλασμα στα τρία σημεία A,B,C παρουσιάζουν ορισμένες διαφορές. Ειδικότερα, όσο λεπτότερο είναι το έλασμα τόσο μεγαλύτερες είναι οι τάσεις von Mises μεταξύ των οπών των κοχλιών αλλά και τόσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια στην οποία διαρρέει το άνω δακτυλιοειδές έλασμα. Επιπλέον, η διαρροή αυτή στο λεπτότερο έλασμα παρατηρείται ήδη από το Σημείο A σε μια μικρή επιφάνεια δίπλα από τις οπές της εφελκυσμένης πλευράς. Τα παραπάνω γίνονται καλύτερα κατανοητά μέσω των Σχημάτων 6-6.

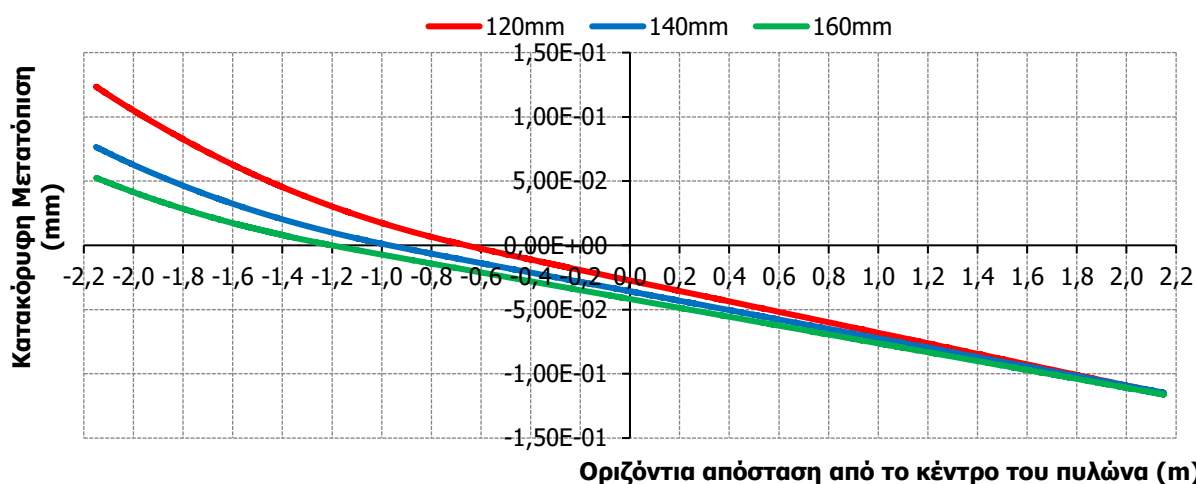




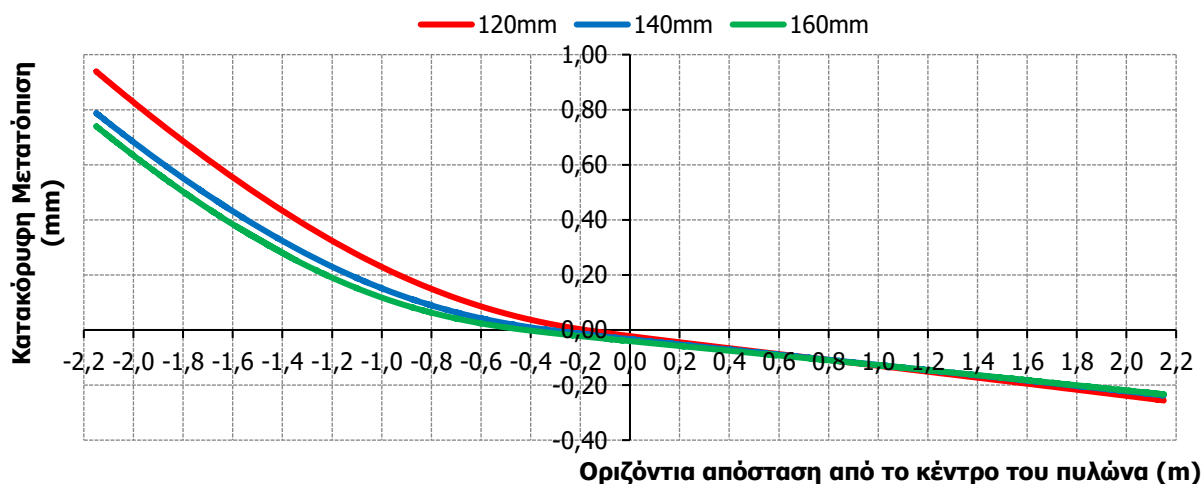
Σχήματα 6-7: Τάσεις Von Mises στα τρία σημεία των δρόμων ισορροπίας 6-2

Ακόμη, μέσω των διαγραμμάτων που απεικονίζουν την κατακόρυφη μετατόπιση των σημείων της διεπιφάνειας του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος και του πυλώνα (Σχήμα 6-8), η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των προσομοιωμάτων με πάχος ελασμάτων 140mm και 160mm είναι μικρή στα δυο πρώτα Σημεία Α,Β και ελαχιστοποιείται στο Σημείο C. Όσον αφορά όμως το προσομοίωμα με πάχος ελάσματος 120mm οι θετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις είναι λίγο μεγαλύτερες καθώς

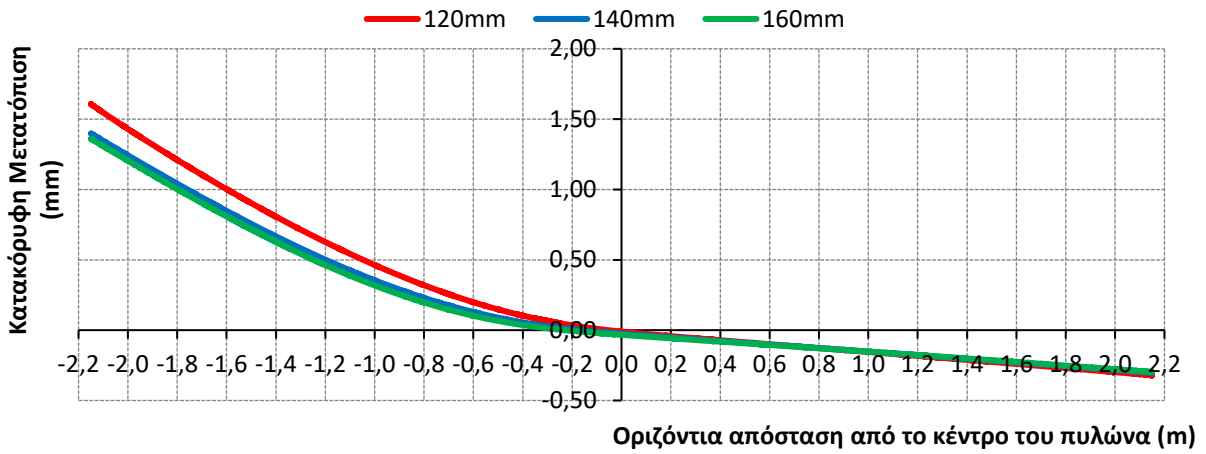
προχωράμε προς την εφελκυσμένη πλευρά της σύνδεσης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι όσο λεπτότερο είναι το έλασμα τόσο μικρότερη είναι η καμπτική δυσκαμψία του, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μεγαλύτερες κατακόρυφες μετατοπίσεις. Επιπλέον, από τις εικόνες (Σχήματα 6-9) που παρουσιάζουν την επαφή των δύο δακτυλιοειδών ελασμάτων στα τρία χαρακτηριστικά σημεία A,B,C των δρόμων ισορροπίας δεν φαίνεται κάποια μεγάλη διαφορά στο ποσοστό της επιφάνειας των δακτυλιοειδών ελασμάτων που βρίσκονται σε επαφή μεταξύ των δύο προσομοιωμάτων (140mm και 160mm). Αντίθετα, παρατηρείται ότι το κομμάτι του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος του προσομοιώματος των 120mm που έχει χάσει επαφή, είναι λίγο μεγαλύτερο στο τέλος της ανάλυσης σε σύγκριση με αυτό των άλλων δύο προσομοιωμάτων, με αποτέλεσμα να έχει ανασηκωθεί το ένα τεταρτοκύκλιο του κομματιού της σύνδεσης που προσομοιώνεται.



(α) Σημείο Α

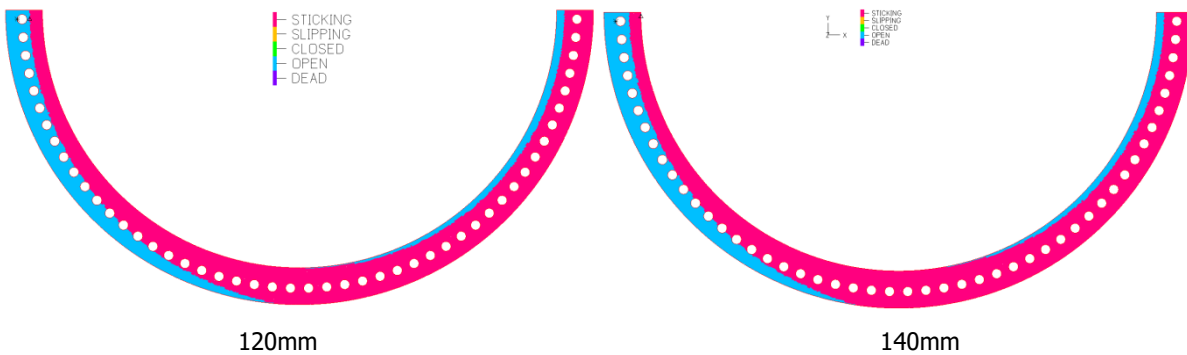
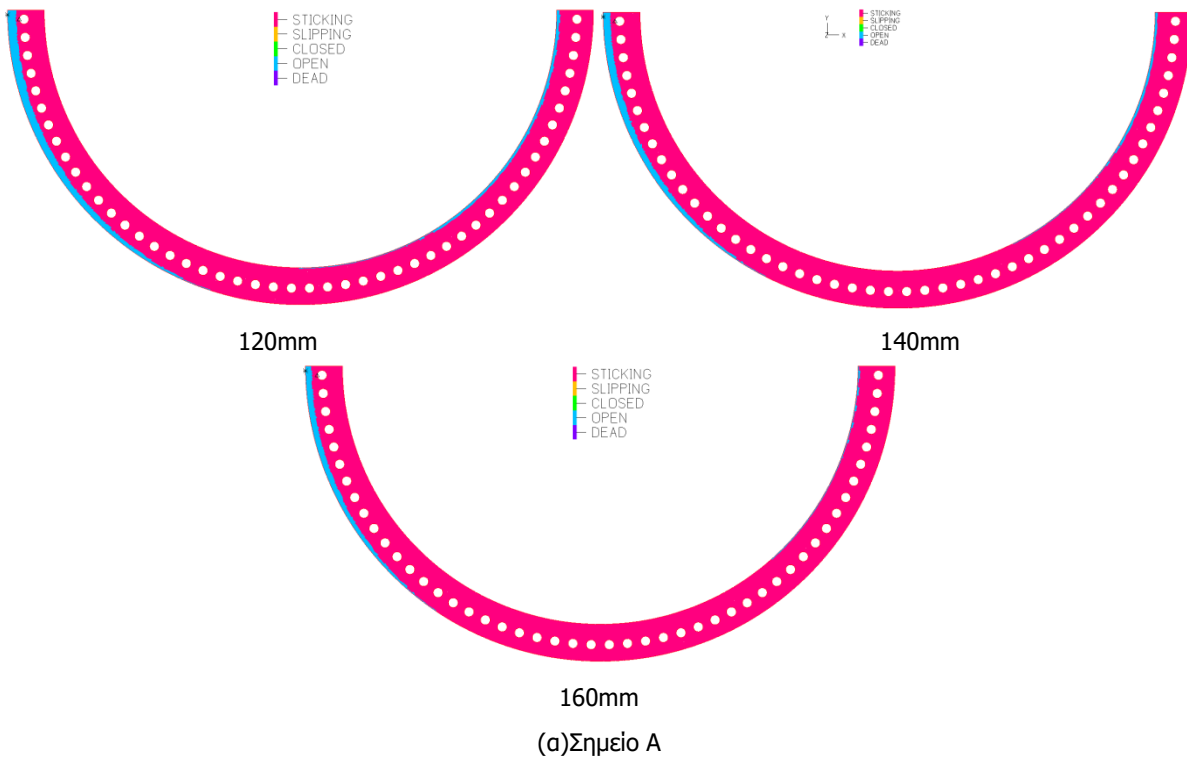


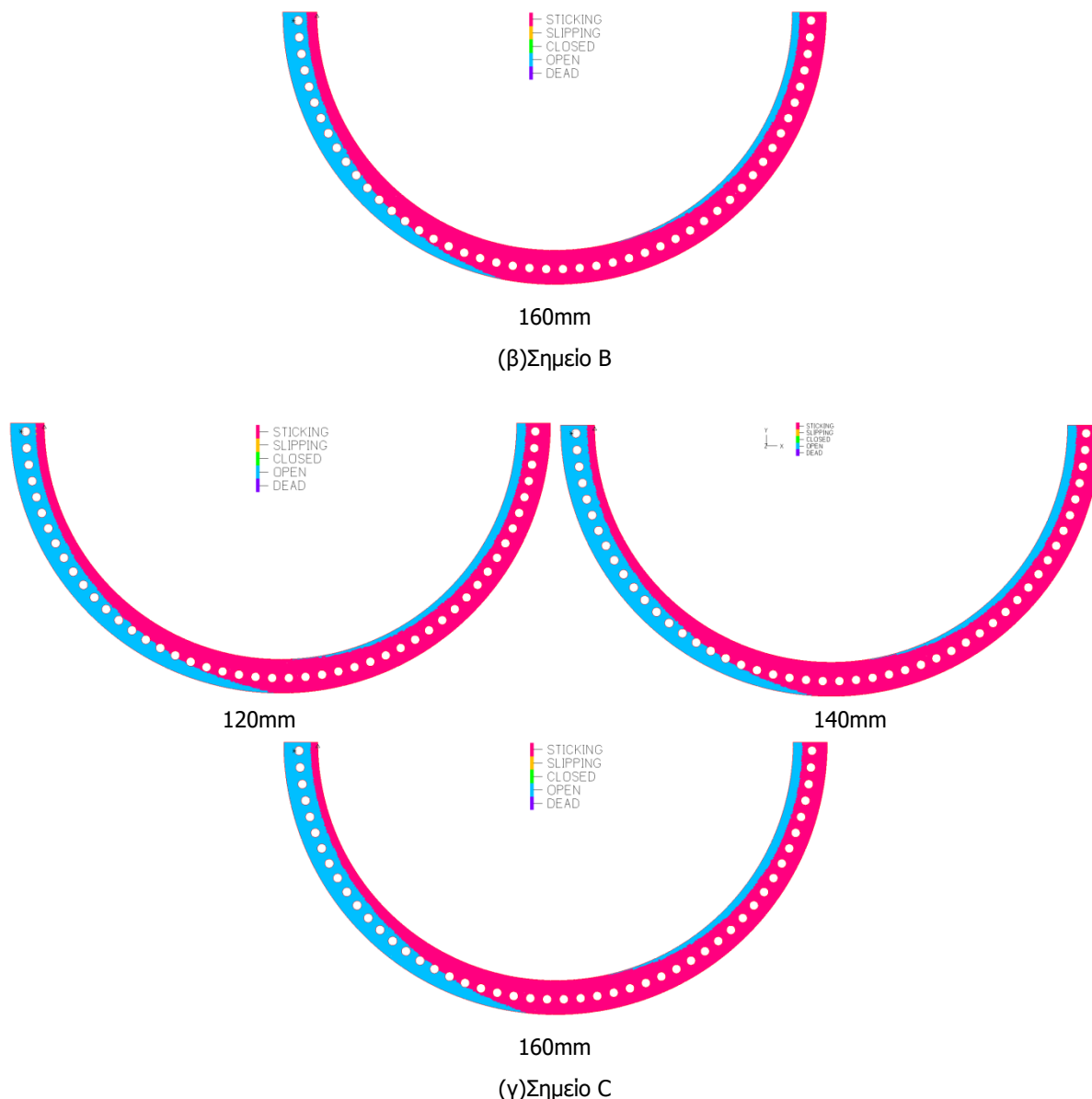
(β) Σημείο Β



(γ)Σημείο C

Σχήμα 6-8: Κατακόρυφη μετατόπιση ημιπεριμέτρου διεπιφάνειας άνω ελάσματος και πυλώνα στα σημεία Α,Β,С

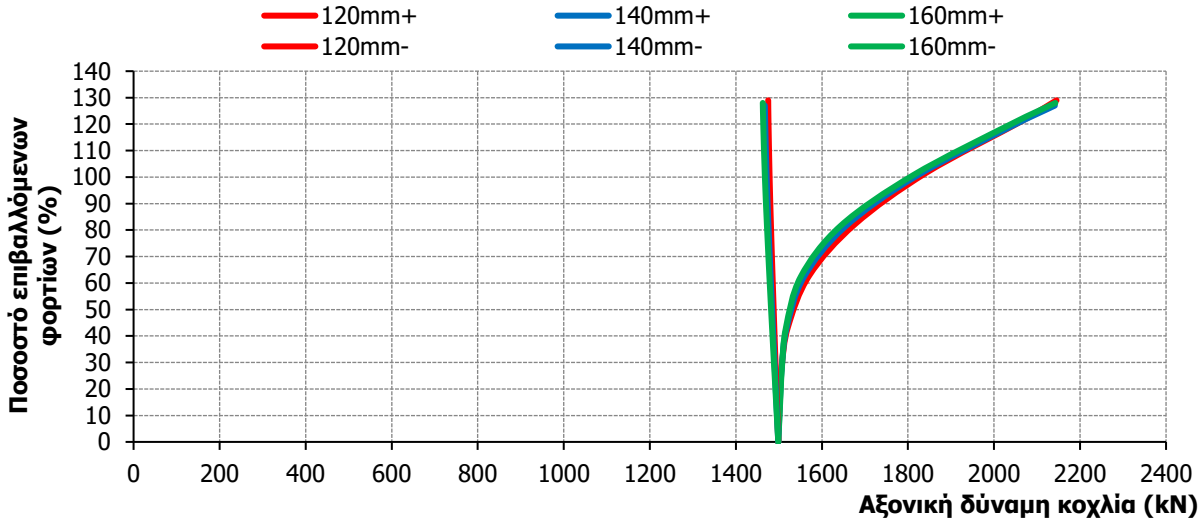




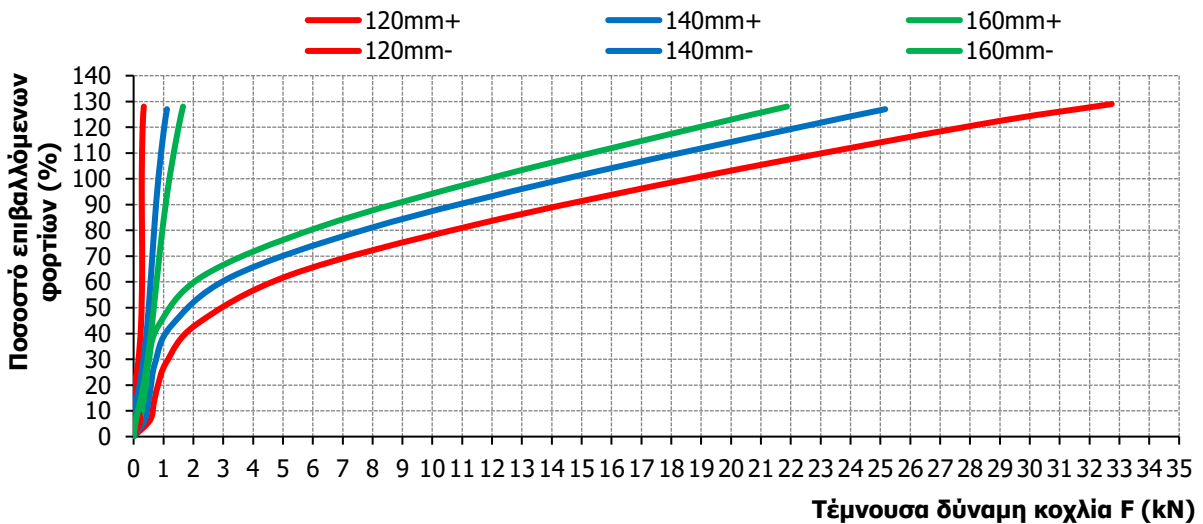
Σχήματα 6-9: Θέση ουδέτερου άξονα στα τρία σημεία των δρόμων ισορροπίας 6-2

Τέλος, από το Σχήμα 6-10 γίνεται αντιληπτό ότι η πορεία των αξονικών δυνάμεων των κοχλιών περίπου ταυτίζεται για τα τρία προσομοιώματα. Επίσης, στους μισούς κοχλίες και για τα τρία προσομοιώματα η αξονική τους δύναμη αυξάνεται. Στο διάγραμμα 6-10 παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις του κοχλία με τη μέγιστη εφελκυστική δύναμη για κάθε προσομοίωμα, που βρίσκεται στην εφελκυσόμενη πλευρά (+) και του κοχλία με την ελάχιστη εφελκυστική δύναμη που βρίσκεται στην θλιβόμενη πλευρά (-). Οι κοχλίες αυτοί βρίσκονται στα δύο άκρη της σύνδεσης που προσομοιώνεται. Επίσης στο Σχήμα 6-11 παρουσιάζονται οι τέμνουσες δυνάμεις αυτών των δύο κοχλιών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Είναι φανερό πως όσο πιο λεπτό είναι το άνω δακτυλιοειδές έλασμα τόσο μεγαλύτερη είναι η τέμνουσα που αναλαμβάνουν οι κοχλίες που βρίσκονται στην εφελκυσόμενη πλευρά της σύνδεσης και τόσο μικρότερη είναι η τέμνουσα που αναλαμβάνουν οι κοχλίες που βρίσκονται στη θλιβόμενη πλευρά της σύνδεσης. Ακόμη, αυτό που διαφέρει μεταξύ των τριών προσομοιωμάτων που συγκρίνονται είναι ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται η τέμνουσα. Όσο πιο λεπτά είναι τα δακτυλιοειδή ελάσματα τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της τέμνουσας που αναλαμβάνουν οι κοχλίες. Ειδικότερα, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα συνολικής τέμνουσας που αναλαμβάνουν

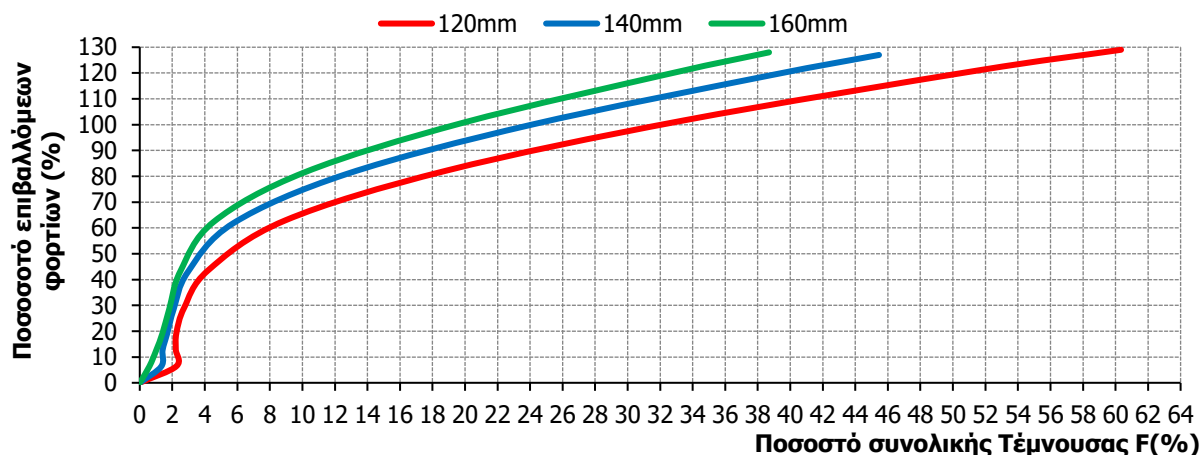
οι κοχλίες του κάθε προσομοιώματος (Σχήμα 6-12), το ποσοστό της τέμνουσας που αναλαμβάνουν οι κοχλίες του προσομοιώματος με πάχος ελασμάτων 120mm είναι περίπου 61%. Αντίστοιχα, το ποσοστό αυτό για πάχος ελασμάτων 140mm είναι 46%, ενώ για πάχος ελασμάτων 160mm είναι περίπου 39%. Συνεπώς, η μεταφορά της τέμνουσας στο προσομοίωμα των 160mm γίνεται κυρίως μέσω τριβής της θλιβόμενης ζώνης ενώ στο προσομοίωμα των 120mm η τέμνουσα μεταφέρεται κυρίως μέσω των κοχλιών. Στο προσομοίωμα των 140mm η μεταφορά της τέμνουσας γίνεται και με τους δύο τρόπους εξίσου.



Σχήμα 6-10: Δρόμος ισορροπίας αξονικής δύναμης των κοχλιών με τη μέγιστη και την ελάχιστη εφελκυστική δύναμη



Σχήμα 6-11: Δρόμος ισορροπίας τέμνουσας δύναμης των κοχλιών με τη μέγιστη και την ελάχιστη εφελκυστική δύναμη



Σχήμα 6-12: Δρόμοι ισορροπίας αθροιστικής τέμνουσας δύναμης κοχλιών

6.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΠΡΟΕΝΤΑΣΕΩΣ ΤΩΝ ΚΟΧΛΙΩΝ

Το δεύτερο σύνολο παραμετρικών αναλύσεων αφορά την επίδραση της δύναμης προέντασης των κοχλιών στη συγκεκριμένη σύνδεση που μελετάται. Για τις αναλύσεις αυτές δημιουργούνται αντίστοιχα προσομοιώματα με αυτό των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 5. Η μόνη διαφορά των προσομοιωμάτων αυτών είναι η δύναμη της προέντασης των κοχλιών. Υπενθυμίζεται εδώ ότι το αρχικό προσομοίωμα είχε πάχη ελασμάτων 140mm, μεταβλητό πάχος πυλώνα και τα υλικά των δύο αυτών τμημάτων είναι χάλυβας S355. Οι κοχλίες του προσομοιώματος είχαν διάμετρο 64mm, δύναμη προέντασης 1498.56kN και ήταν από ελαστικό υλικό.

Τα δύο άλλα προσομοιώματα που θα χρησιμοποιηθούν σε αυτές τις παραμετρικές αναλύσεις έχουν τα ίδια πάχη ελασμάτων και πυλώνα, ίδια διάμετρο κοχλιών, συνεπώς ίδια γεωμετρία συνολικά, αλλά διαφέρουν στη δύναμη προέντασης τους. Στο ένα προσομοίωμα οι κοχλίες προεντίνονται με το 80% της ονομαστικής δύναμης προέντασης (ίσης με 70% της εφελκυστικής αντοχής), ενώ στο άλλο με το 50%. Πιο συγκεκριμένα, οι αναλύσεις πραγματοποιούνται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο προεντίνονται οι κοχλίες και στο δεύτερο επιβάλλονται οι φορτίσεις σε κάθε προσομοίωμα. Οι κοχλίες του ενός προσομοιώματος προεντίνονται με δύναμη ίση με:

$$F_{p,c} = 0.8 \times 0.7 \times f_{ub} \times A_s = 0.8 \times 1498.56 = 1198.85kN$$

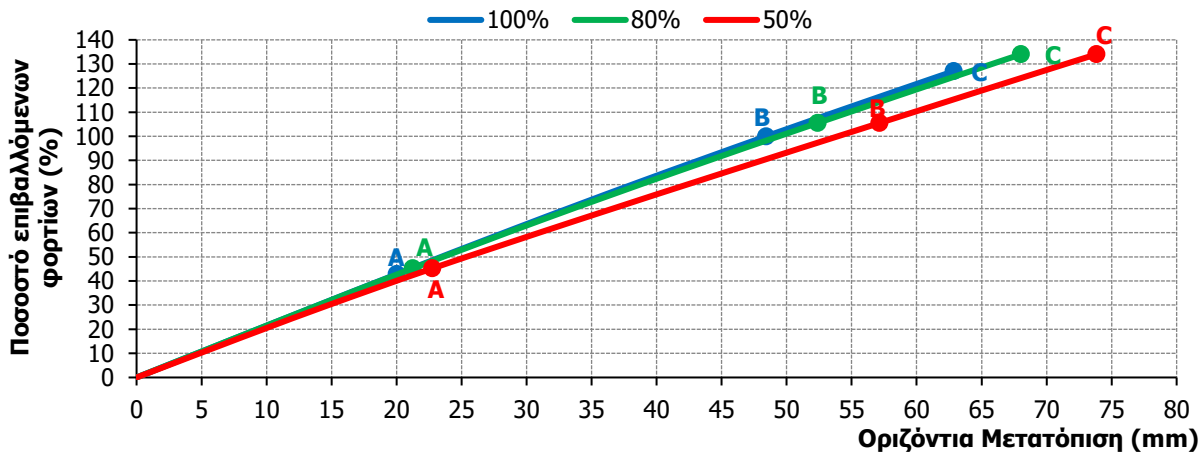
Ενώ στο άλλο προσομοίωμα οι κοχλίες προεντίνονται με δύναμη ίση με:

$$F_{p,c} = 0.5 \times 0.7 \times f_{ub} \times A_s = 0.5 \times 1498.56 = 749.28kN$$

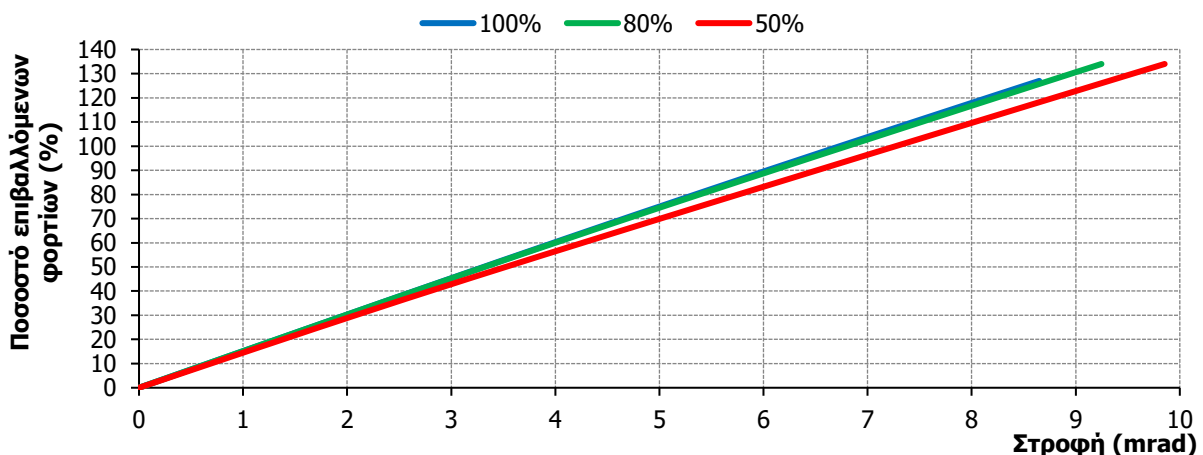
όπου: f_{ub} είναι η εφελκυστική αντοχή του κοχλία και A_s το εμβαδόν σπειρώματος

Στο Σχήμα 6-13, παρουσιάζονται τα διαγράμματα «Οριζόντια Μετατόπιση-Ποσοστό επιβαλλόμενων φορτίων» στη Θέση 1 (Σχήμα 5-14), στην κορυφή του προσομοιωμένου τμήματος του πυλώνα για τα προσομοιώματα που περιγράφηκαν παραπάνω σε σύγκριση με το αρχικό προσομοίωμα στο οποίο επιβλήθηκε το 100% της απαιτούμενης δύναμης προέντασης. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 6-14 απεικονίζονται τα διαγράμματα «Στροφή -Ποσοστό επιβαλλόμενων φορτίων» στην ίδια θέση. Το μπλε διάγραμμα αφορά το προσομοίωμα με το 100% της δύναμης προέντασης, το κόκκινο αφορά το προσομοίωμα με το 80% και το πράσινο αντιστοιχεί σε αυτό με το 50% της δύναμης προέντασης. Πάνω στα διαγράμματα αυτά έχουν επισημανθεί τα τρία χαρακτηριστικά σημεία A,B,C που έχουν αναφερθεί και στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Μέσω των διαγραμμάτων αυτών είναι εμφανές ότι η συμπεριφορά του πυλώνα είναι γραμμική και συνεπώς δεν διαρρέει σε κανένα από τα τρία προσομοιώματα μέχρι και την αστοχία σε εφελκυσμό του πρώτου εφελκυσμένου κοχλία. Αντίθετα, τα

τρία αυτά προσομοιώματα έχουν διαφορετικά φορτία αστοχίας και διαφορετικές μέγιστες μετατοπίσεις και στροφές στο τέλος των αναλύσεων. Ειδικότερα, όσο μικρότερη είναι η επιβαλλόμενη δύναμη προέντασης τόσο μεγαλύτερη είναι η στροφή και η μετατόπιση της κορυφής.

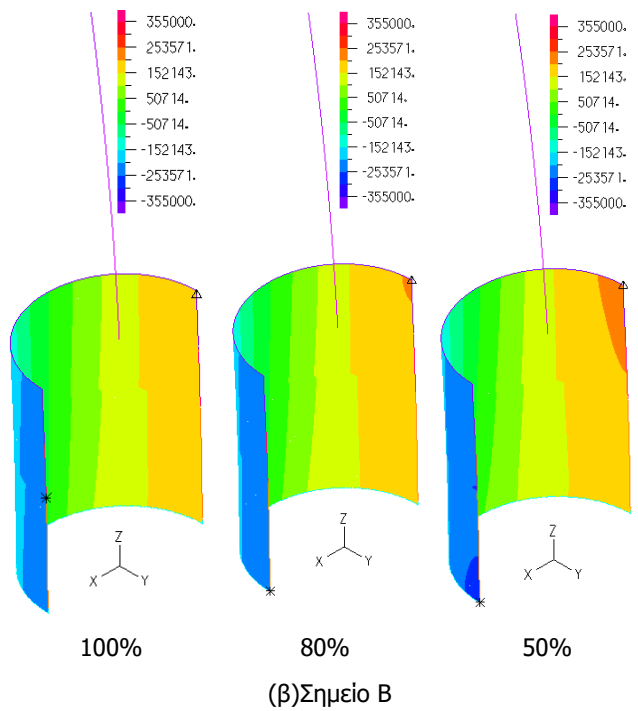
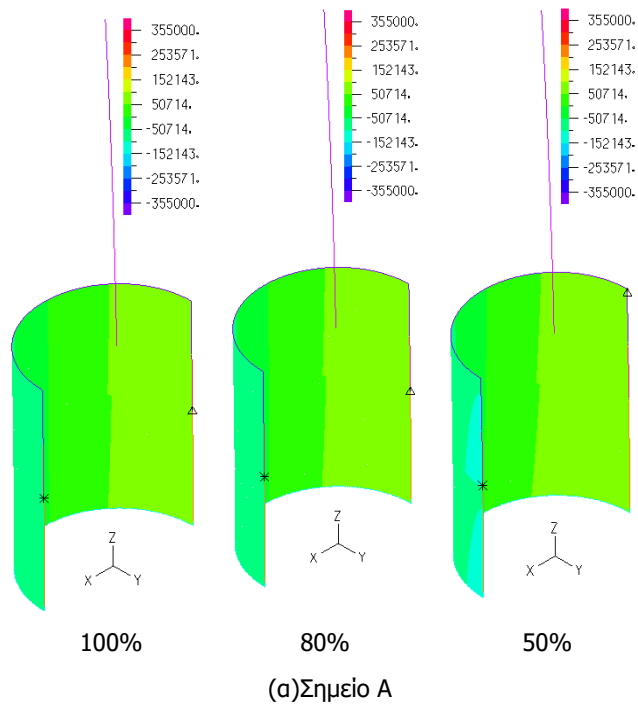


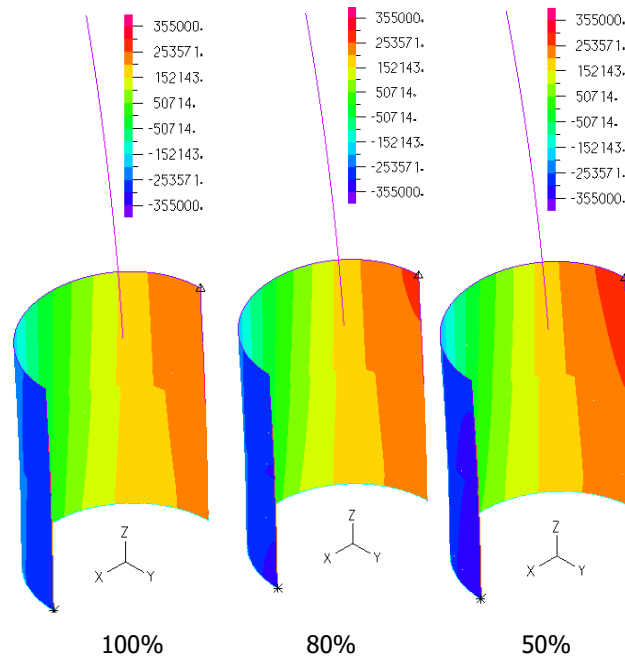
Σχήμα 6-13: Δρόμοι ισορροπίας ποσοστό φόρτισης – μετατόπισης προσομοιωμάτων στη θέση 1



Σχήμα 6-14: Δρόμοι ισορροπίας ποσοστό φόρτισης – στροφής προσομοιωμάτων στη θέση 1

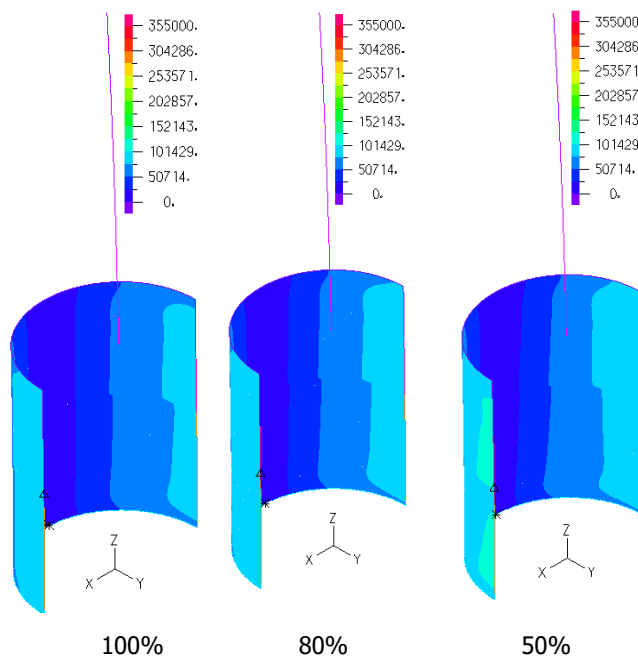
Επιπλέον, μέσω των παραμορφωμένων εικόνων στα τρία σημεία A,B,C και των τάσεων, ορθών σ_{zz} και von Mises, για τον πυλώνα (Σχήματα 6-15 και 6-16) παρατηρείται ότι όσο μικρότερη είναι η επιβαλλόμενη δύναμη προέντασης τόσο μεγαλύτερες είναι οι τάσεις του πυλώνα. Αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα των κατακόρυφων τάσεων σ_{zz} της ημιπεριμέτρου της διεπιφάνειας άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος και πυλώνα του Σχήματος 6-17, στα Σημεία A,B,C, για τις τρεις διαφορετικές προεντάσεις. Πιο συγκεκριμένα, όσο μικρότερη είναι η προένταση τόσο μεγαλύτερες είναι οι θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσει ο πυλώνας, ενώ το μέρος του πυλώνα που εφελκύεται είναι μεγαλύτερο. Τέλος, ο πυλώνας δεν έχει προλάβει να διαρρεύσει σε κανένα από τα τρία προσομοιώματα μέχρι και την αστοχία του πρώτου εφελκυόμενου κοχλία.



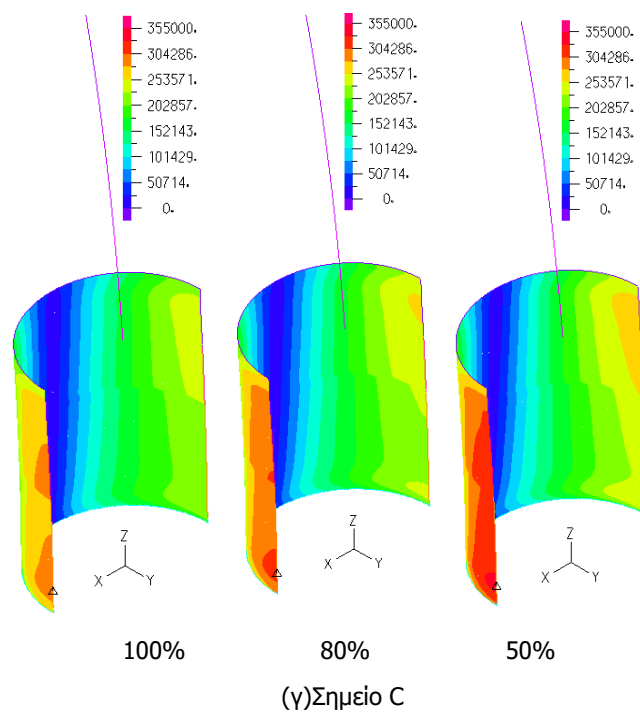
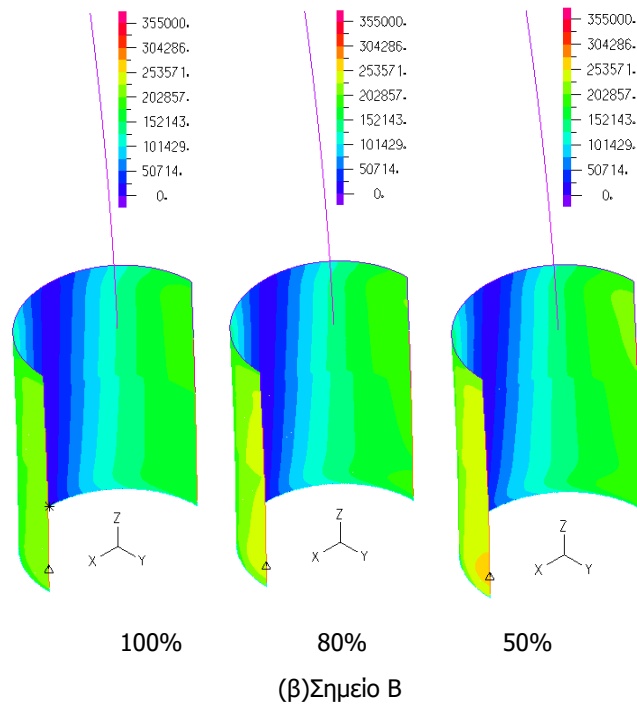


(γ)Σημείο C

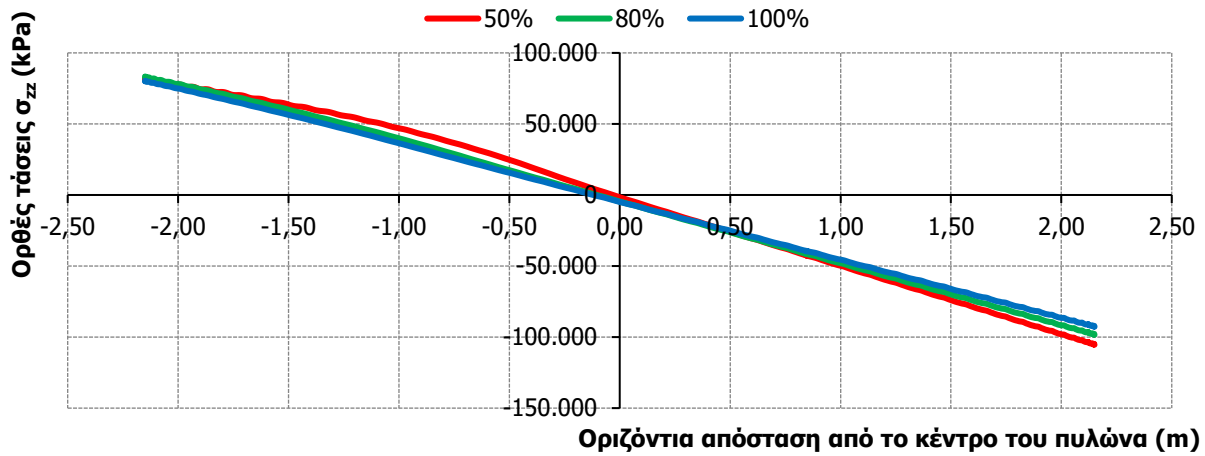
Σχήματα 6-15: Παραμορφωμένη εικόνα και ορθές τάσεις σ_{zz} στα τρία σημεία των δρόμων ισορροπίας 6-13



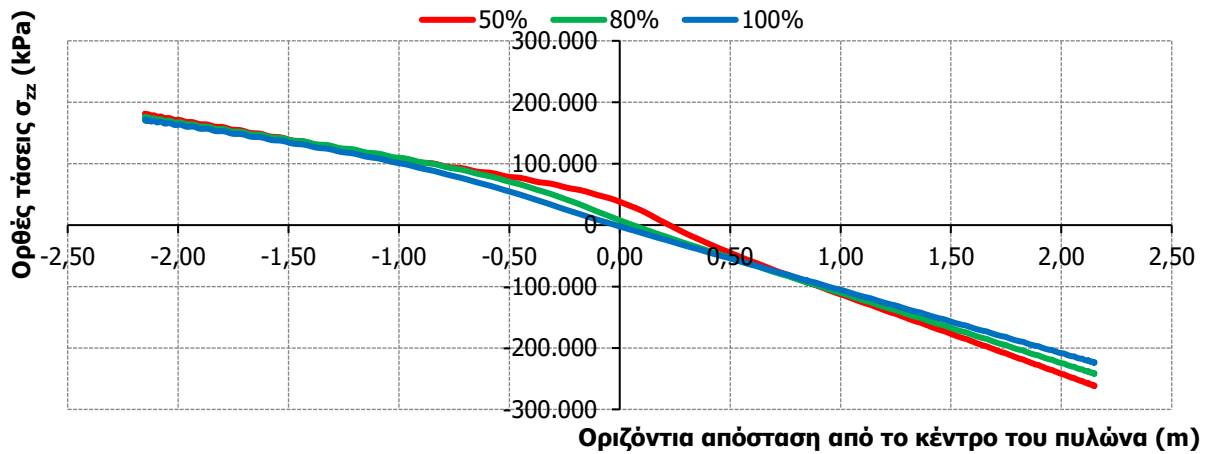
(α)Σημείο A



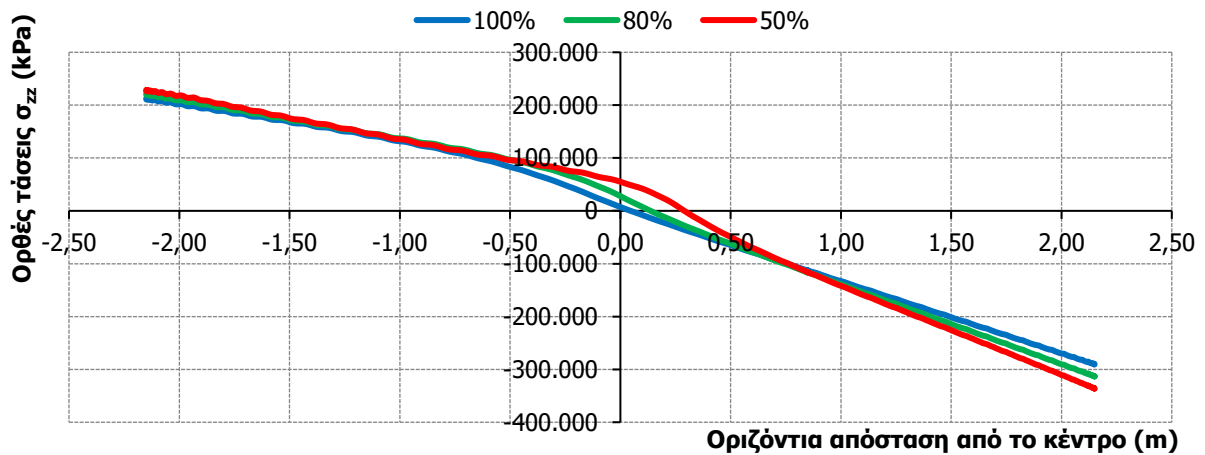
Σχήματα 6-16: Παραμορφωμένη εικόνα και τάσεις Von Mises στα τρία σημεία των δρόμων ισορροπίας 6-13



(α) Σημείο A



(β) Σημείο B

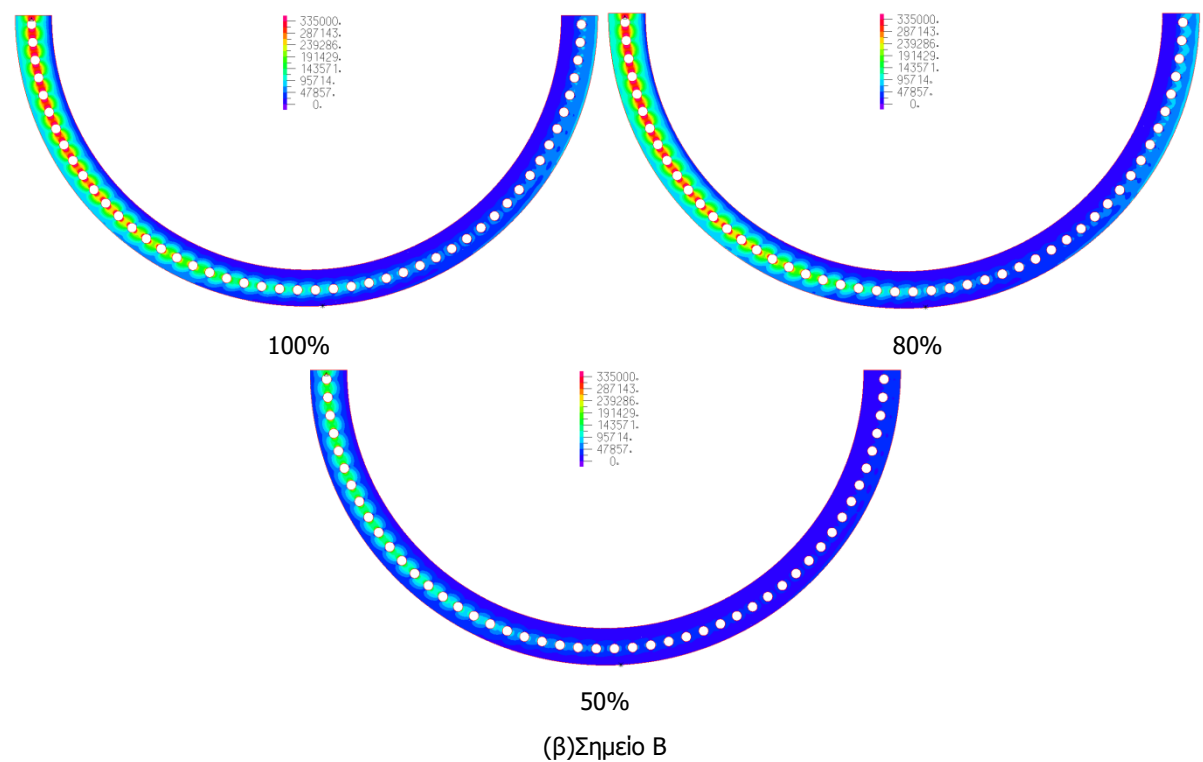
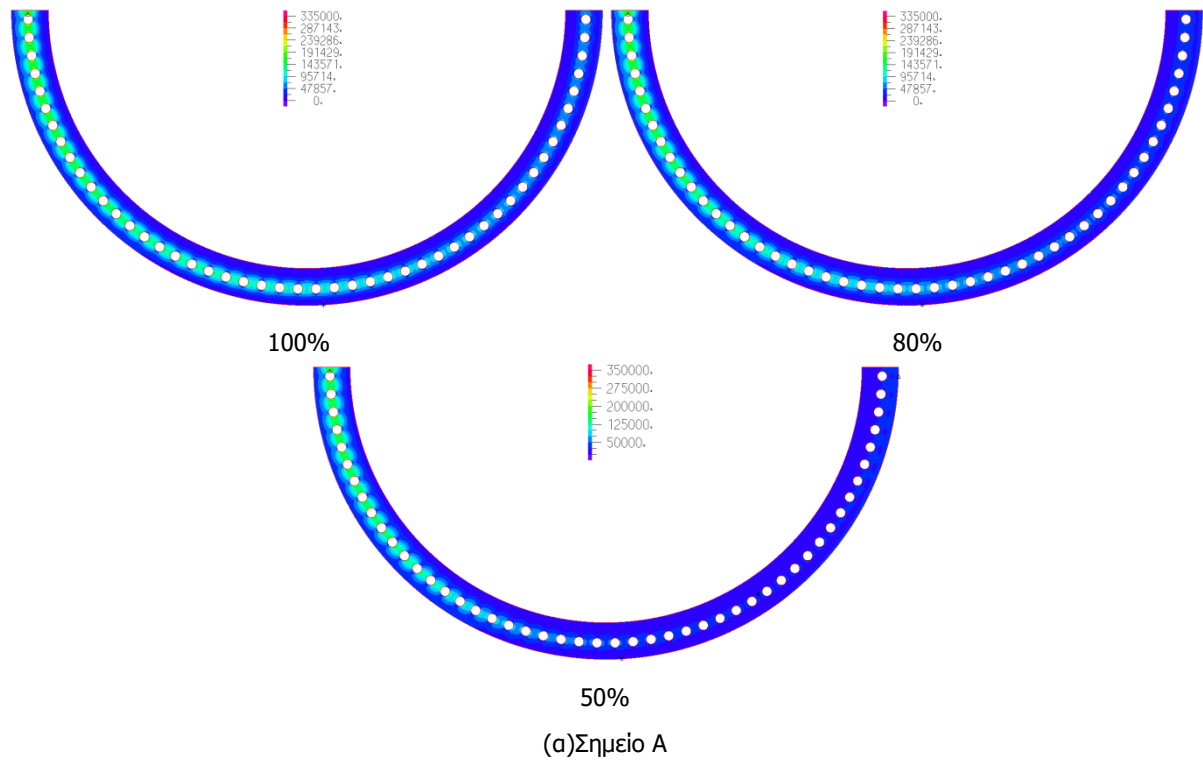


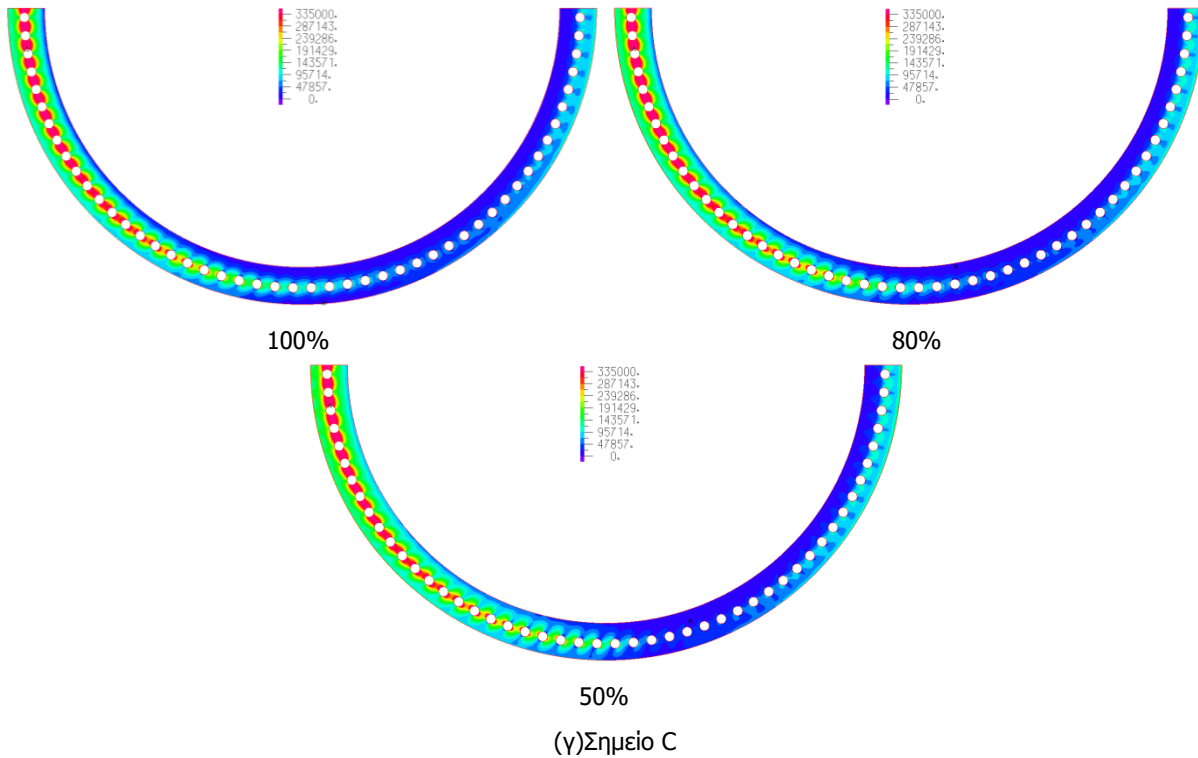
(γ) Σημείο C

Σχήμα 6-17: Κατακόρυφες τάσεις σ_{zz} ημιπεριμέτρου διεπιφάνειας άνω ελάσματος και πυλώνα στα σημεία A,B,C

Αντίθετα, οι τάσεις von Mises στο άνω δακτυλιοειδές έλασμα στα τρία σημεία A,B,C δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές. Η κύρια διαφορά είναι ότι όσο μικρότερη είναι η προένταση των κοχλιών, τόσο

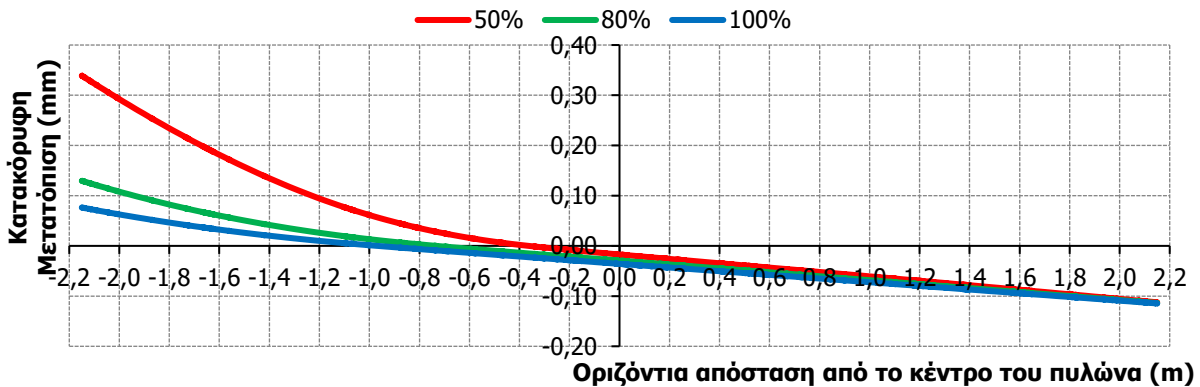
μεγαλύτερο είναι το μέρος του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος που εμφανίζει αυξημένες τάσεις von Mises. Ειδικότερα, όταν οι κοχλίες προεντείνονται με το 50% της δύναμής τους, περισσότερο από το μισό άνω έλασμα παρουσιάζει αυξημένες τάσεις. Το παραπάνω γίνεται καλύτερα κατανοητό μέσω των Σχημάτων 6-18.



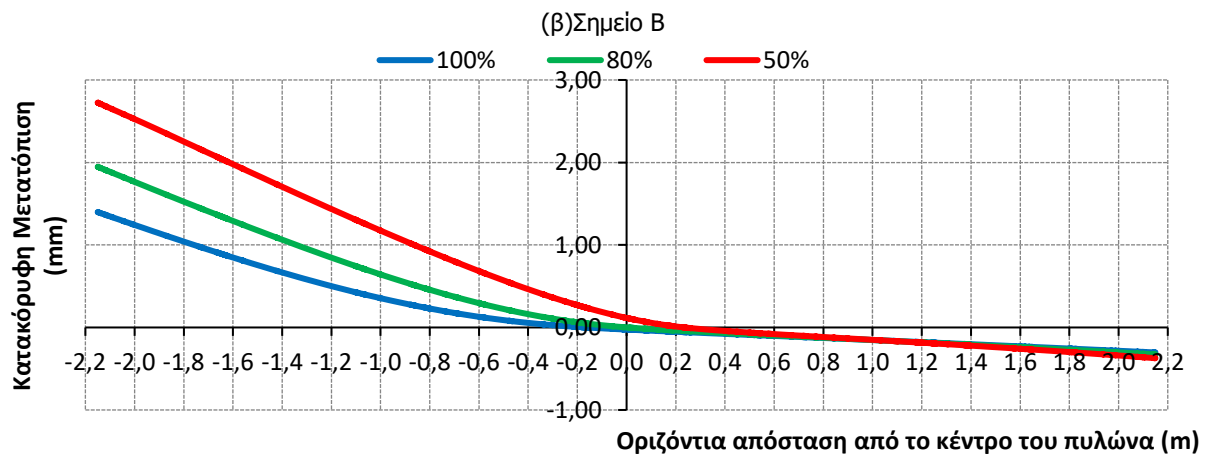
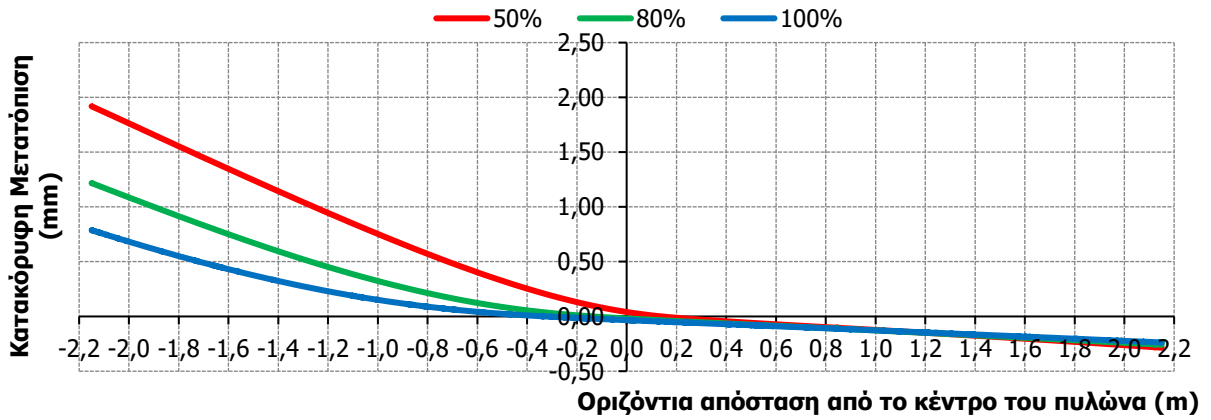


Σχήματα 6-18 Τάσεις Von Mises στα τρία σημεία των δρόμων ισορροπίας 6-13

Ακόμη, μέσω των διαγραμμάτων που απεικονίζουν την κατακόρυφη μετατόπιση των σημείων της διεπιφάνειας του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος και του πυλώνα (Σχήμα 6-19), παρατηρείται ότι όσο μικρότερη είναι η δύναμη προέντασης τόσο μεγαλύτερες είναι οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των σημείων της διεπιφάνειας και στα τρία σημεία A,B,C. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι όσο μικρότερη είναι η επιβαλλόμενη δύναμη προέντασης που έχει επιβληθεί, τόσο οι κοχλίες δυσκολεύονται να αντισταθούν στον εφελκυσμό που τους επιβάλλεται, με αποτέλεσμα την απομάκρυνση του άνω ελάσματος. Επιπλέον, από τις εικόνες (Σχήματα 6-20) που παρουσιάζουν την επαφή των δύο δακτυλιοειδών ελασμάτων στα τρία χαρακτηριστικά σημεία A,B,C των δρόμων ισορροπίας, φαίνεται πως όσο μικρότερη είναι η δύναμη προέντασης, τόσο περισσότερα είναι τα σημεία που βρίσκονται στην εφελκυσόμενη πλευρά της σύνδεσης, εξωτερικά του δακτυλίου του άνω ελάσματος και χάνουν την επαφή τους με το κάτω έλασμα. Επίσης, η μείωση της δύναμης προεντάσεως οδηγεί στο χάσιμο της επαφής όλο και μεγαλύτερου μέρους και εσωτερικά του δακτυλίου στην θλιβόμενη πλευρά της σύνδεσης. Συνεπώς, οι κοχλίες στους οποίους οι αξονική δύναμη αυξάνεται είναι πλέον πάνω από τους μισούς και βρίσκονται κυρίως στα άκρα της σύνδεσης αριστερά και δεξιά.

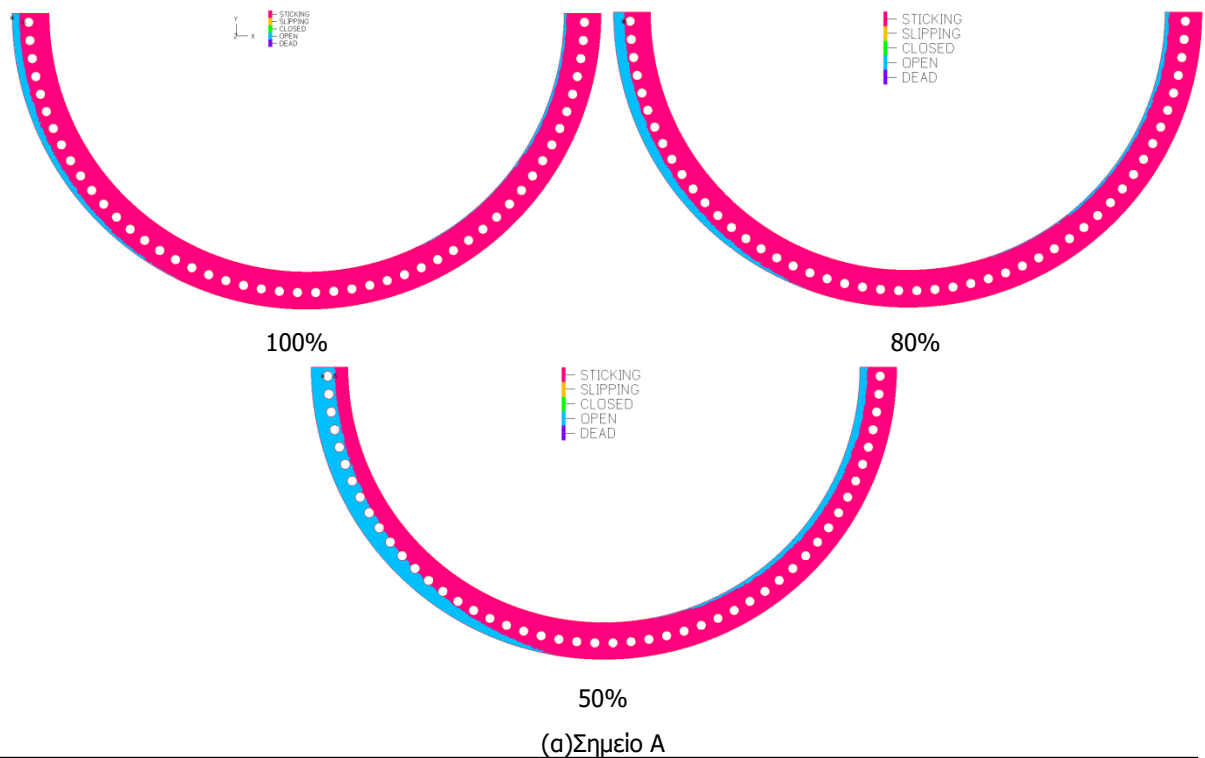


(α)Σημείο A

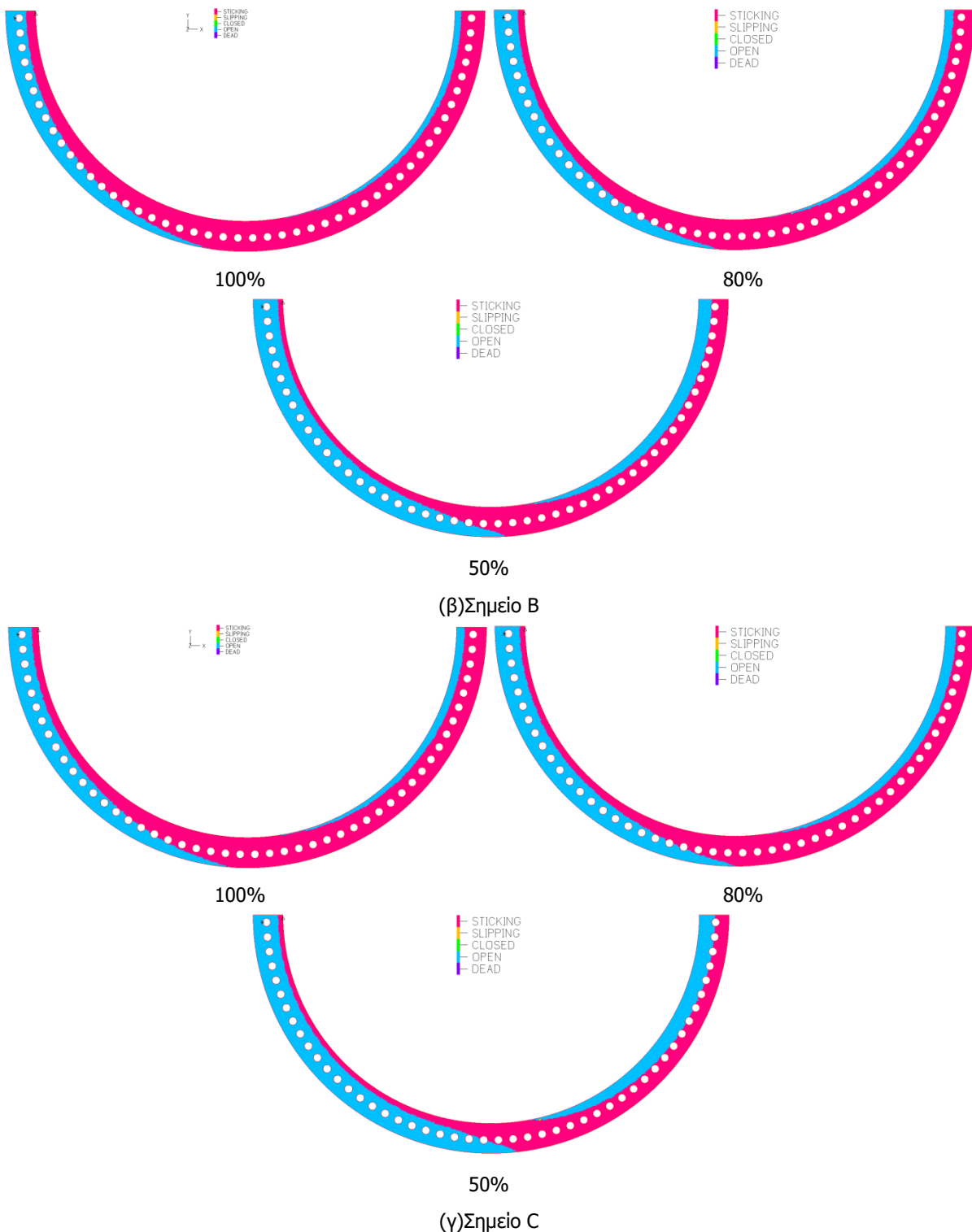


(γ)Σημείο C

Σχήμα 6-19: Κατακόρυφη μετατόπιση ημιπεριμέτρου διεπιφάνειας άνω ελάσματος και πυλώνα στα σημεία A,B,C



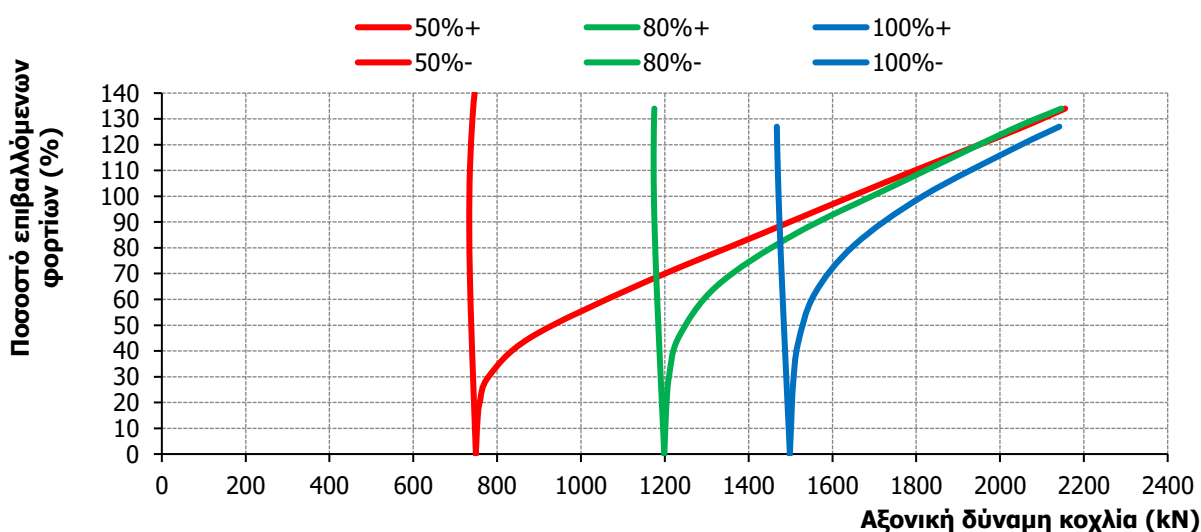
(α)Σημείο A



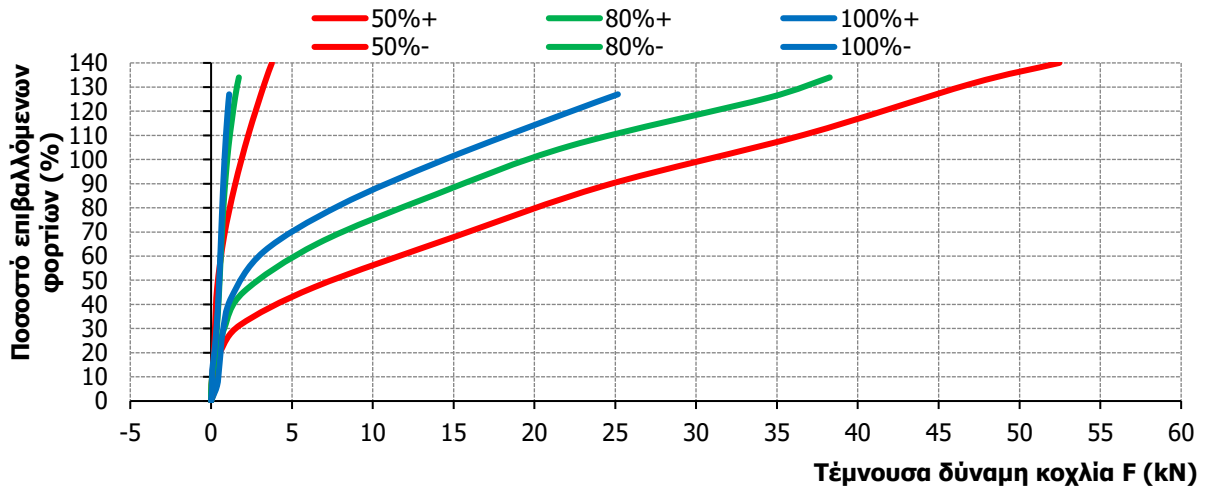
Σχήματα 6-20: Θέση ουδέτερου άξονα στη αρχή και στα τρία σημεία των δρόμων ισορροπίας 6-13

Τέλος, από το Σχήμα 6-21 γίνεται αντιληπτό ότι η πορεία των αξονικών δυνάμεων των κοχλιών διαφέρουν αρκετά για τα τρία προσομοιώματα. Στο προσομοίωμα στο οποίο οι κοχλίες έχουν προενταθεί με το 100% της απαιτούμενης δύναμης οι μισοί κοχλίες αυξάνουν τη δύναμη τους. Στο προσομοίωμα με το 80% της προέντασης οι κοχλίες αυτοί είναι 25 σε αριθμό. Αντίθετα, στο προσομοίωμα με το 50% της προέντασης οι κοχλίες αυτοί είναι 36. Όμως, δεν βρίσκονται από την ίδια πλευρά αφού όπως φαίνεται και στα Σχήματα 6-20 τα κομμάτια του άνω ελάσματος που έχουν αποκολληθεί βρίσκονται και στις δύο πλευρές της σύνδεσης. Ειδικότερα 26 κοχλίες αυξάνουν τη

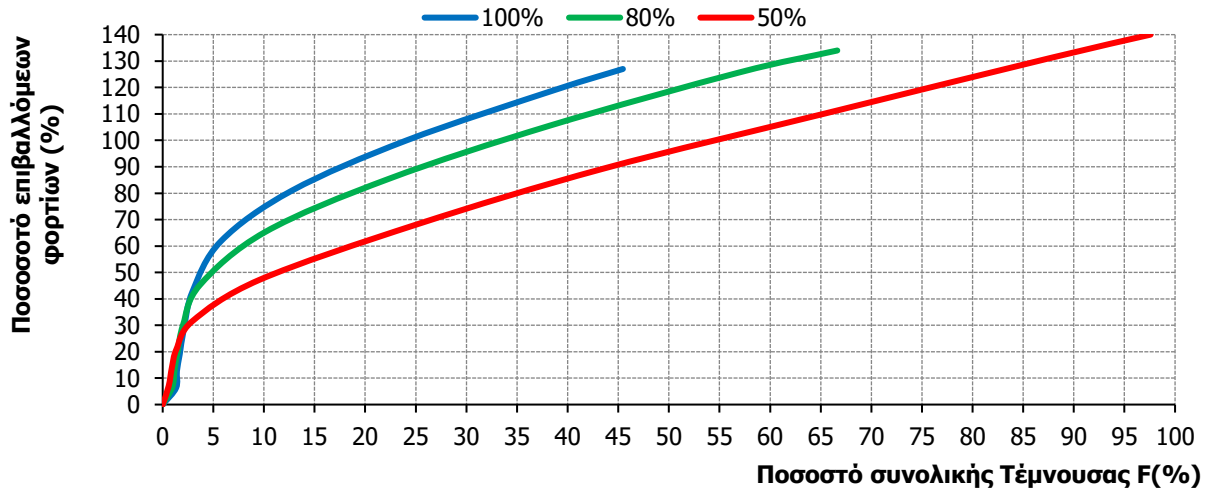
δύναμη τους στην αριστερή πλευρά που εφελκύεται ενώ 10 κοχλίες αυξάνουν τη δύναμη τους στο δεξί τμήμα της σύνδεσης στο οποίο η εξωτερική πλευρά θλιβεται ενώ η εσωτερική έχει ανασηκωθεί και εφελκύεται. Στο διάγραμμα 6-21, λοιπόν, παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις του κοχλία με τη μέγιστη εφελκυστική δύναμη για κάθε προσομοίωμα, που βρίσκεται στην εφελκυσόμενη πλευρά (+) και του κοχλία με την ελάχιστη εφελκυστική δύναμη που βρίσκεται στην θλιβόμενη πλευρά (-). Οι κοχλίες αυτοί βρίσκονται στα δύο άκρα της σύνδεσης που προσομοιώνεται για τα προσομοιώματα με προένταση 100% και 80%, ενώ για το προσομοίωμα με προένταση 50% ο κοχλίας με τη μικρότερη εφελκυστική δύναμη βρίσκεται περίπου στο μέσο της σύνδεσης. Τα διαγράμματα αυτά είναι λογικό να ξεκινάνε από διαφορετικά σημεία αφού οι παραμετρικές αναλύσεις αυτές αφορούν στο διαφορετικό φορτίο προέντασης των κοχλίων. Επίσης στο Σχήμα 6-22 παρουσιάζονται οι τέμνουσες δυνάμεις αυτών των δύο κοχλίων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Είναι φανερό πως όσο πιο μικρή είναι η δύναμη προέντασης τόσο μεγαλύτερη είναι η τέμνουσα που αναλαμβάνουν οι κοχλίες που βρίσκονται τόσο στην εφελκυσόμενη πλευρά της σύνδεσης όσο και στη θλιβόμενη πλευρά. Ακόμα μία ακόμα διαφορά μεταξύ των τριών προσομοιωμάτων που συγκρίνονται είναι ο τρόπος με τον οποίο μεταφέρεται η τέμνουσα. Όσο πιο μικρή είναι η δύναμη προέντασης των κοχλίων τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της τέμνουσας που αναλαμβάνουν οι κοχλίες. Ειδικότερα, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα συνολικής τέμνουσας που αναλαμβάνουν οι κοχλίες του κάθε προσομοιώματος (Σχήμα 6-23), το ποσοστό της τέμνουσας που αναλαμβάνουν οι κοχλίες του προσομοιώματος με ποσοστό προέντασης 50% είναι περίπου 97%. Αντίστοιχα, το ποσοστό αυτό για προένταση 80% είναι 66%, ενώ για πλήρη προένταση 46%. Συνεπώς, η μεταφορά της τέμνουσας στα προσομοιώματα με μη πλήρη προένταση γίνεται κυρίως μέσω των κοχλίων, ενώ στην πλήρη προένταση η μεταφορά της τέμνουσας γίνεται και με τους δύο τρόπους εξίσου.



Σχήμα 6-21: Δρόμος ισορροπίας αξονικής δύναμης των κοχλίων με τη μέγιστη και την ελάχιστη εφελκυστική δύναμη



Σχήμα 6-22: Δρόμος ισορροπίας τέμνουσας δύναμης των κοχλιών με τη μέγιστη και την ελάχιστη εφελκυστική δύναμη



Σχήμα 6-23: Δρόμοι ισορροπίας αθροιστικής τέμνουσας δύναμης κοχλιών

7 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΣΥΝΟΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η αριθμητική προσομοίωση, η μελέτη απόκρισης και η παραμετρική διερεύνηση συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας σωληνωτών πυλώνων ανεμογεννήτριας.

Αρχικά, μελετήθηκε η συμπεριφορά ενός προσομοιώματος βραχέος «L», οι διαστάσεις του οποίου προέκυψαν υπό κλίμακα από μια πραγματική σύνδεση πυλώνα ανεμογεννήτριας. Αποτελείται από ένα τμήμα μιας σύνδεσης και περιλαμβάνει έναν κοχλία και το τμήμα που του αντιστοιχεί από τα δακτυλοειδή πέλματα καθώς και ένα τμήμα του πυλώνα. Για την προσομοίωση αυτή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Το τμήμα του δακτυλοειδούς ελάσματος και του πυλώνα προσομοιώθηκε με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, ενώ ο κοχλίας προσομοιώθηκε με γραμμικά στοιχεία τύπου “κοχλία”. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία επαφής για τις διεπιφάνειες μεταξύ ελασμάτων και μεταξύ του κοχλία και των ελασμάτων. Προέκυψαν τα αριθμητικά αποτελέσματα του παραπάνω προσομοιώματος και έγιναν οι παρακάτω συγκρίσεις:

- Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων του προσομοιώματος επιφανειακών στοιχείων και του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων όγκου με τα πειραματικά αποτελέσματα.
- Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων του προσομοιώματος επιφανειακών στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των μεγάλων ή μικρών παραμορφώσεων.
- Σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων του προσομοιώματος επιφανειακών στοιχείων για εναλλακτικούς τρόπους προσομοίωσης της σύνδεσης μεταξύ του κελύφους του πυλώνα και του δακτυλοειδούς ελάσματος.

Στη συνέχεια, για το συγκεκριμένο προσομοίωμα βραχέος «L», εξετάστηκε η επίδραση της αλλαγής του πάχους των δακτυλοειδών ελασμάτων. Συγκρίθηκαν τέσσερα διαφορετικά προσομοιώματα με πάχη ελασμάτων 25mm, 30mm, 35mm και 40mm. Στη δεύτερη παραμετρική ανάλυση, του προσομοιώματος αυτού εξετάστηκε η επίδραση της αλλαγής της διαμέτρου του κοχλία. Συγκρίθηκαν τρία διαφορετικά προσομοιώματα στα οποία μεταβαλλόταν η διάμετρος του κοχλία σε 16mm, 20mm και 22mm.

Σε όλα τα αριθμητικά προσομοιώματα επιβλήθηκε το ίδιο φορτίο και πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές στατικές αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα υλικού του κελύφους και του ελάσματος, τη μη γραμμικότητα γεωμετρίας, καθώς και τη μη γραμμικότητα της επαφής των δακτυλοειδών ελασμάτων της σύνδεσης και των κοχλιών με τα ελάσματα.

Το δεύτερο μέρος της διπλωματικής εργασίας αφορούσε την αριθμητική προσομοίωση, τη μελέτη απόκρισης και τη παραμετρική διερεύνηση μιας πλήρους σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας. Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης δημιουργήθηκε κατάλληλο αριθμητικό προσομοίωμα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων που έγιναν. Αρχικά, ασκήθηκαν τα φορτία σχεδιασμού του συγκεκριμένου τμήματος που προσομοιώθηκε τα οποία αυξάνονταν ταυτόχρονα μέχρι και τη στιγμή που παρατηρήθηκε η εφελκυστική αστοχία του πρώτου κοχλία. Στη συνέχεια, συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα της αριθμητικής μεθόδου που αφορούσαν τις ορθές τάσεις του πυλώνα με τα αποτελέσματα της αναλυτικής μεθόδου. Τέλος, έγινε μια επιπλέον σύγκριση του ανωτέρου προσομοιώματος με ένα όμοιο προσομοίωμα σε γεωμετρία στο οποίο όμως αυξάνονταν μόνο η ροπή και η τέμνουσα, με την αξονική δύναμη, η οποία αντιστοιχεί στα βάρη, να παραμένει σταθερή.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν ορισμένες παραμετρικές αναλύσεις που αφορούσαν ολόκληρη τη σύνδεση αποκατάστασης για να διερευνηθεί η επιρροή δύο σημαντικών παραμέτρων απόκρισης της. Εξετάστηκε η επίδραση της αλλαγής του πάχους των δακτυλιοειδών ελασμάτων συγκρίνοντας τρία διαφορετικά προσομοιώματα με πάχη ελασμάτων 120mm, 140mm και 160mm. Ακόμη, εξετάστηκε η επίδραση της αλλαγής της προέντασης των κοχλιών. Συγκρίθηκαν τρία διαφορετικά προσομοιώματα στα οποία μεταβαλλόταν η δύναμη προέντασης που επιβαλλόταν στους κοχλίες στο πρώτο βήμα των αναλύσεων. Ειδικότερα, επιβλήθηκε το 80% και το 50% της ονομαστικής δύναμης προέντασης και εξάχθηκαν αριθμητικά αποτελέσματα, τα οποία συγκρίθηκαν με το προσομοίωμα στο οποίο είχε επιβληθεί το 100% της ονομαστικής δύναμης προεντάσεως.

7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις παραπάνω διαδικασίες προέκυψαν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα για το προσομοίωμα του βραχέος «L». Η ανάλυση με μεγάλες παραμορφώσεις οδηγεί σε 46,7% μεγαλύτερες μετατοπίσεις στη θέση μέτρησης πάνω στον πυλώνα σε αντίθεση με την ανάλυση σε μικρές και για αυτό το λόγο προτιμήθηκε η διεξαγωγή των επόμενων παραμετρικών αναλύσεων, που αφορούσαν το προσομοίωμα του βραχέος «L», με τη θεωρία των μεγάλων παραμορφώσεων (large strains).

Ακόμη, όσον αφορά την επίδραση προσομοίωσης σύνδεσης κελύφους και άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος, η χρήση του προσομοιώματος στο οποίο τα πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους του πυλώνα επεκτείνονται μέχρι τη μέση επιφάνεια του άνω ελάσματος μπορεί να γίνει με ασφάλεια για περισσότερες αναλύσεις και για την περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς των ελασμάτων δακτυλιοειδούς σύνδεσης. Αυτό προέκυψε διότι και οι τρεις τρόποι που αναλύθηκαν, i) τα πεπερασμένα στοιχεία του κελύφους του πυλώνα να εκτείνονται μέχρι τη μεσαία επιφάνεια του άνω ελάσματος, ii) τα στοιχεία του κελύφους του πυλώνα να εκτείνονται μέχρι τη μεσαία επιφάνεια του άνω ελάσματος αλλά όλοι οι κόμβοι του πυλώνα που βρίσκονται στο πάχος του άνω ελάσματος να συγκρατούνται με άκαμπτους συνδέσμους και iii) τα στοιχεία του κελύφους του πυλώνα να εκτείνονται μέχρι την ανώτερη επιφάνεια του ελάσματος και η κάλυψη του κενού που δημιουργείται και είναι ίσο με το μισό πάχος του άνω ελάσματος να γίνεται με την χρήση άκαμπτων συνδέσμων, έδιναν περίπου τα ίδια αποτελέσματα.

Όσον αφορά τις παραμετρικές αναλύσεις του προσομοιώματος του βραχέος «L» που αφορούν το πάχος των δακτυλιοειδών ελασμάτων, οι αρχικές δυσκαμψίες των προσομοιωμάτων, κυρίως όταν η θέση μέτρησης είναι πίσω από το άνω δακτυλιοειδές έλασμα, διαφέρουν ανάλογα με το πάχος των ελασμάτων. Ειδικότερα, τα προσομοιώματα με το μικρότερο πάχος ελάσματος έχουν μικρότερη αρχική δυσκαμψία, ενώ όσο το πάχος των ελασμάτων αυξάνεται τόσο πιο δύσκαμπτο γίνεται το προσομοίωμα. Αντίθετα, η αρχική δυσκαμψία που αφορά το προσομοιωμένο τμήμα του πυλώνα είναι περίπου ίδια και στα τέσσερα προσομοιώματα και ανεξάρτητη του πάχους των δακτυλιοειδών

ελασμάτων. Επίσης, από τους δρόμους ισορροπίας των προσομοιωμάτων παρατηρήθηκε ότι όσο πιο λεπτά είναι τα ελάσματα τόσο μεγαλύτερες είναι και οι τελικές μετατοπίσεις που παρουσιάζονται, μιας και υπάρχει έντονη κάμψη του άνω ελάσματος, που οδηγεί σε μεγάλες κατακόρυφες μετατοπίσεις. Επιπλέον, στα προσομοιώματα των 40mm και 35mm οι δρόμοι ισορροπίας είναι σχεδόν ίδιοι, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει στην προτίμηση των ελασμάτων με πάχος 35mm, κερδίζοντας σε υλικό. Παρόλα αυτά, επισημαίνεται πάλι ότι οι συγκεκριμένες αριθμητικές αναλύσεις δεν προβλέπουν με ακρίβεια ούτε την τελική μετατόπιση του προσομοιώματος, ούτε το οριακό φορτίο και συνεπώς τον δρόμο ισορροπίας μέχρι την αστοχία. Αυτό οφείλεται σε προβλήματα σύγκλισης των αναλύσεων και στο γεγονός ότι με το συγκεκριμένο προσομοίωμα δεν προβλέπεται αστοχία της συγκόλλησης ή του κοχλίου αφού λειτουργούν ελαστικά και θα ήταν αυτά που λογικά θα επέφεραν την τελική αστοχία.

Όσον αφορά τις παραμετρικές αναλύσεις του προσομοιώματος του βραχέος «L» που αφορούν τη διάμετρο του κοχλίου, οι αρχικές δυσκαμψίες των προσομοιωμάτων ταυτίζονται και επηρεάζονται ελάχιστα από το μέγεθος του κοχλίου. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του κοχλίου τόσο μεγαλύτερο να είναι και το φορτίο στο οποίο αυξάνεται ο ρυθμός αύξησης της δύναμης του κοχλίου. Ακόμη, όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του κοχλίου τόσο μεγαλύτερη είναι η κάμψη του δακτυλιοειδούς ελάσματος και συνεπώς τόσο μεγαλύτερη είναι και η κατακόρυφη μετατόπιση του. Τέλος, όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του κοχλίου τόσο μεγαλύτερη είναι και η τελική δυσκαμψία του προσομοιώματος.

Αντίστοιχα συμπεράσματα εξαγονται και από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για ολόκληρη τη σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας.

Αρχικά, παρατηρήθηκε ότι το μέγεθος και η κατανομή των τάσεων στον πυλώνα μπορεί να προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια μέσω της θεωρίας της δοκού. Ειδικότερα, σε μικρότερα φορτία υπάρχει ταύτιση των αριθμητικών και των αναλυτικών αποτελεσμάτων, ενώ καθώς αυξάνονται τα φορτία παρατηρείται ότι υπάρχει μία μικρή απόκλιση των αποτελεσμάτων, η οποία όμως είναι αποδεκτή αφού με την αναλυτική μέθοδο δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη για παράδειγμα οι επαφές των ελασμάτων που επιδρούν στα αριθμητικά αποτελέσματα. Επιπλέον, με την αύξηση της αξονικής δύναμης δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές στα αποτελέσματα του προσομοιώματος. Η μόνη μικρή διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των δύο συγκρινόμενων προσομοιωμάτων είναι ότι στο προσομοίωμα με τη σταθερή αξονική δύναμη, η αναλογία της τριβής στη μεταφορά της τέμνουσας είναι λίγο μικρότερη.

Τέλος από τις δύο ομάδες παραμετρικών αναλύσεων που διεξήχθησαν προέκυψαν ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα. Όσον αφορά τις παραμετρικές αναλύσεις που αφορούσαν τα πάχη των δακτυλιοειδών ελασμάτων αυτό που παρατηρήθηκε ήταν πως για πάχη ελασμάτων που διαφέρουν μεταξύ τους 20mm η συμπεριφορά του προσομοιώματος δεν διαφέρει αισθητά. Οι μόνες διαφορές που παρατηρήθηκαν ήταν η αύξηση των κατακόρυφων μετατοπίσεων του άνω ελάσματος στην εφελκυσμένη πλευρά και η αύξηση του ποσοστού της τέμνουσας που αναλάμβαναν οι κοχλίες, καθώς μειωνόταν το πάχος των ελασμάτων.

Όσον αφορά τις παραμετρικές αναλύσεις που αφορούσαν τη δύναμη προεντάσεως που επιβλήθηκε στους κοχλίες στη συγκεκριμένη σύνδεση, παρατηρήθηκε ότι όσο μικρότερη ήταν αυτή, τόσο μεγαλύτερες ήταν οι μετατοπίσεις και οι στροφές στην κορυφή του προσομοιώματος. Ακόμη, οι μικρές δυνάμεις προεντάσεως οδηγούσαν σε μεγαλύτερες κατακόρυφες μετατοπίσεις του άνω δακτυλιοειδούς ελάσματος αλλά και μεγαλύτερου τμήματος του άνω ελάσματος που αποκολλιόταν από το κάτω και συνεπώς εφελκυόταν. Τέλος, η μεταφορά της τέμνουσας στα προσομοιώματα με μικρότερη προένταση γινόταν κυρίως μέσω των κοχλίων και λιγότερο μέσω της τριβής των ελασμάτων.

7.3 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να απαντήθηκαν ορισμένα ερωτήματα, αλλά ταυτόχρονα γεννήθηκαν καινούργια τα οποία θα μπορούσαν να είναι αντικείμενα νέων μελετών. Αρχικά, θα ήταν πολύ χρήσιμο να προβλέπεται από το προσομοίωμα η αστοχία της συγκόλλησης και του κοχλία και να μην λειτουργούν ελαστικά, μιας και θα ήταν αυτά που λογικά θα επέφεραν την τελική αστοχία στα παραπάνω προσομοιώματα.

Επιπλέον, θα μπορούσαν να γίνουν κάποιες παραπάνω παραμετρικές αναλύσεις, οι οποίες θα αφορούσαν ακόμα μικρότερα πάχη δακτυλιοειδών ελασμάτων αλλά και διαφορετικές διαμέτρους κοχλιών.

Τέλος, είναι γνωστό πως το κυρίαρχο πρόβλημα των ανεμογεννητριών είναι η κόπωση. Συνεπώς, θα ήταν πολύ ωφέλιμο να εξεταστεί και η αντοχή σε κόπωση της συγκεκριμένης σύνδεσης ανεμογεννήτριας.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [10] <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0469%281957%29014%3C0160%3APSOHWS%3E2.0.CO%3B2>
- [11] <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/what-is-wind-energy>
- [12] https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Oct/IRENA_Future_of_wind_2019.pdf
- [13] http://www.wincercost.com/cost_files/HISTWIN_Plus_Report.pdf
- [14] https://ramboll.com/-/media/files/rgr/documents/markets/energy/ghi/guyed_wind_turbine_tower_concept_low_res.pdf
- [15] <https://blog.swantonweld.com/steel-wind-turbine-towers>
- [16] http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_windmill_eng.htm
- [17] https://openei.org/wiki/Wind_energy
- [9] <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/what-is-wind-energy>
- [10] National Renewable Energy Laboratory, NREL, <http://www.nrel.gov/>
- [11] ADINA System 9.4, Release Notes (for version 9.3.3), ADINA R&D Inc., 71 Elton Avenue, Watertown, USA, 2017.
- [12] Β. Μελισσιανός, Σ. Βερνάρδος, Η. Θανασούλας, "Οδηγίες Χρήσης Λογισμικού ADINA", Απρίλιος 2016.
- [13] DIN6914, "High Strength Hexagon Head Bolts", Deutsche Norm, 1989.
- [14] EN 1993-1-8: 2005, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, European Committee for Standardization, 2005.
- [15] Ikuo Tobinaga, Takeshi Ishihara, "A study of action point correction factor for L-type flanges of wind turbine towers", wileyonlinelibrary.com/journal/we, February 2018.
- [16] DNVGL-RP-C208 (2013), Determination of structural capacity by non-linear finite element

analysis methods.

- [17] "Guidelines for Design of Wind Turbines", 2nd Edition, Det Norske Veritas, Copenhagen (Wind.Turbine.Certification@dnv.com) and Wind Energy Department, Risø National Laboratory (Certification@risoe.dk), 2002.
- [18] Niels Leergaard Pedersen, "On analysis and redesign of bolted L-flanged connections", Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com), 23 January 2017.
- [19] K.J. Bathe, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, 1982.
- [20] Μ. Παπαδρακάκης, "Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, Ελλάδα, 2001.
- [21] Βάγιας Ι, Ερμόπουλος Ι, Ιωαννίδης Γ, Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα, με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων, Εκδόσεις Κλειδάριθμος 2005.
- [22] Κ. Κουλάτσου, Α. Σπινάσα, Χ. Γαντές, " Έλεγχος σε κόπωση μέσω αριθμητικής προσομοίωσης συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας πυλώνων ανεμογεννητριών", Eurodyn 2020
- [23] Χάρης Ι. Γαντές, Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Κατερίνα Νταϊφώτη, «ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΟΠΩΣΗΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ», Τελική Έκθεση του Προγράμματος με κωδικό ΕΛΚΕ 95/003800, Μάρτιος 2019