



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση καινοτόμων διατομών τύπου sandwich πυλώνων ανεμογεννητριών



Διπλωματική Εργασία

Νικόλαος Παπαγεωργίου

ΕΜΚ ΔΕ 2017 37

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

Συνεπιβλέπων: Στυλιανός Μ. Βερνάρδος, Υπ. Διδάκτωρ

Αθήνα, Νοέμβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση καινοτόμων διατομών τύπου sandwich πυλώνων ανεμογεννητριών



Διπλωματική Εργασία
Νικόλαος Παπαγεωργίου
ΕΜΚ ΔΕ 2017 37

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπων: Στυλιανός Μ. Βερνάρδος, Υπ. Διδάκτωρ
Αθήνα, Νοέμβριος 2017

Copyright © Νικόλαος Παπαγεωργίου, 2017
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Nikolaos Papageorgiou, 2017
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).

Νικόλαος Παπαγεωργίου (2017)

Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση καινοτόμων διατομών τύπου sandwich πυλώνων
ανεμογεννητριών

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2017 37

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Nikolaos Papageorgiou (2017)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2017 37

Experimental and numerical investigation of innovative sandwich-type cross sections for wind turbine
towers

Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση και η δημοσίευση της διπλωματικής μου εργασίας σηματοδοτεί τη λήξη μια πενταετούς φοίτησης στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σε αυτήν την προσπάθεια, αλλά και στη φοιτητική μου πορεία όλο αυτό το διάστημα, υπήρξαν άνθρωποι που με βοήθησαν είτε με τη στήριξη είτε με την καθοδήγησή τους, τους οποίους θα ήθελα και να ευχαριστήσω.

Πρωτίστως και σημαντικότερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χ. Γαντέ, καθηγητή του τομέα Δομοστατικής, ο οποίος πέρα από την επιτυχημένη παράδοση των μαθημάτων του στην προπτυχιακή διδασκαλία, συντέλεσε με μέγιστη συνεισφορά στη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας. Το κλίμα συνεργασίας που δημιούργησε, το ενδιαφέρον και η συχνή επίβλεψη του, συντέλεσαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση αυτού του ερευνητικού θέματος που μου ανατέθηκε.

Εξίσου σημαντικό ρόλο στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας είχε και ο συνεπιβλέπων υποψήφιος Διδάκτορας Σ. Βερνάρδος και τον ευχαριστώ για αυτό. Η συμμετοχή του στην εύρεση ικανοποιητικών πηγών σχετικά με το καινοτόμο αυτό θέμα ήταν σημαντική, όπως σημαντικές ήταν και οι οδηγίες του στη χρήση του λογισμικού Adina. Τα πειραματικά αποτελέσματα και συμπεράσματα που παρουσιάζονται στην εργασία μου, αποτελούν σημαντικό κομμάτι της διδακτορικής του διατριβής και για το λόγο αυτό η κρίση του και οι συμβουλές του σε αυτό το κομμάτι ήταν καθοριστικές.

Επίσης, με αφορμή το πειραματικό σκέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κ. Ξενοφώντα Λιγνό, μέλος Ε.Ε.Δ.Ι.Π. του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών, καθώς και το συνεργάτη του Στέλιο Κατσατσίδα, για την εξαιρετική προετοιμασία και εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών.

Για τη συμμετοχής τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Π. Θανόπουλο, Λέκτορα του τομέα Δομοστατικής και τον κ. Ε. Μπαδογιάννη, Επίκουρο Καθηγητή του τομέα Δομοστατικής.

Για τις σημαντικές οδηγίες της στη μορφοποίηση του κειμένου θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Ισαβέλλα Βασιλοπούλου, Δρ. Πολιτικό Μηχανικό Ε.Μ.Π.

Απαραίτητο είναι να ευχαριστήσω και γενικώς όλους τους καθηγητές που γνώρισα και από τους οποίους διδάχτηκα ένα κομμάτι, κάθε φορά, από το αντικείμενο και την ουσία του Πολιτικού Μηχανικού, στο διάστημα της πενταετούς προπτυχιακής μου φοίτησης.

Κλείνοντας, θέλω να ευχαριστήσω, ίσως λίγο περισσότερο, τους γονείς μου και την αδερφή μου για τη στήριξη και τη συμπαράστασή τους όλο αυτό το διάστημα, καθώς και τους συμφοιτητές και προπαντός φίλους μου που ήταν δίπλα μου στις εύκολες, αλλά κυρίως στις δυσχερείς καταστάσεις που αναπόφευκτα προέκυψαν στην περίοδο της φοίτησής μου.

Νικόλαος Παπαγεωργίου

Νοέμβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2017 37

Πειραματική και αριθμητική διερεύνηση καινοτόμων διατομών τύπου sandwich πυλώνων ανεμογεννητριών

Νικόλαος Παπαγεωργίου

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές
Συνεπιβλέπων: Στυλιανός Μ. Βερνάρδος, Υπ. Διδάκτωρ
Νοέμβριος 2017

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την πειραματική και αριθμητική διερεύνηση διατομών τύπου sandwich για πυλώνες ανεμογεννητριών. Ο νέος αυτός τύπος διατομής για πυλώνες ανεμογεννητριών εξετάζεται προς πιθανή αντικατάσταση των κλασικού τύπου αμιγώς χαλύβδινων διατομών σε περιπτώσεις κατά τις οποίες η μεταφορά και ανέγερσή τους είναι οικονομικά ασύμφορη έως και απρόσιτη, ιδίως όταν πρόκειται για κατασκευή πυλώνων ύψους άνω των 100m, που απαιτούν διάμετρο διατομής βάσης τουλάχιστον 4m για αποφυγή φαινομένων λυγισμού. Το πρόβλημα συνίσταται κυρίως στις δυσπρόσιτες τοποθεσίες εγκατάστασης των ανεμογεννητριών, είτε για επίγειες ανεμογεννήτριες για τις οποίες η μέγιστη διάμετρος μεταφοράς έχει όριο περί τα 4m λόγω οδικών περιορισμών, είτε για υπεράκτιες για τις οποίες τίθεται σημαντικό ζήτημα αυξημένου κόστους μεταφοράς.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στις ανεμογεννήτριες. Τονίζονται οι λόγοι που επιβάλλουν την ενασχόληση με την αιολική ενέργεια, ως μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, και τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την εκμετάλλευσή της. Γίνεται μια ιστορική αναδρομή από την εμφάνιση της πρώτης μορφής εκμετάλλευσής της μέσω των ανεμόμυλων για τοπικές χρήσεις, έως τις σημερινές ογκώδεις ανεμογεννήτριες ισχύος έως και μερικών MW, που συνδέονται στα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα. Περιγράφονται, επίσης, τα βασικά μέρη τα οποία συνθέτουν μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου ή κατακόρυφου άξονα περιστροφής, δίνοντας έμφαση στους πυλώνες ανεμογεννητριών του τύπου οριζοντίου άξονα. Δίνονται οι χαρακτηριστικοί τύποι πυλώνων και τα υλικά από τα οποία αποτελούνται, αναλύοντας τις αμιγώς χαλύβδινες διατομές σε επίπεδο διαμόρφωσης, μεταφοράς και ανέγερσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εισάγεται η έννοια των διατομών τύπου sandwich για πυλώνες ανεμογεννητριών. Παρατίθενται οι λόγοι που οδήγησαν στην αναγκαιότητα της διερεύνησης αυτής της νέας διατομής και η διαφοροποίηση που μπορεί να προσφέρει έναντι του κλασικού τύπου της αμιγώς χαλύβδινης διατομής. Ακολούθως, παρουσιάζεται μια αναλυτική, αριθμητική και πειραματική σύγκριση από τη βιβλιογραφία, μεταξύ κυλινδρικών δοκιμών διατομής τύπου sandwich και αμιγώς χαλύβδινων διατομών, υπό αξονική καταπόνηση. Επιπροσθέτως, γίνεται αναφορά σε μια προκαταρκτική μεθοδολογία σχεδιασμού πυλώνων ανεμογεννητριών διατομής τύπου sandwich, η οποία προτάθηκε από ερευνητική ομάδα της Σχολής

Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, καθώς και προτάσεων για κατασκευή και ανέγερση πυλώνων τέτοιου τύπου, οι οποίες συντάχθηκαν από την ίδια ερευνητική ομάδα.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση της καμπτικής συμπεριφοράς αυτών των διατομών τύπου sandwich, οι οποίες είχαν τσιμεντοειδές κονίαμα ως υλικό πλήρωσης του πυρήνα μεταξύ των χαλύβδινων ελασμάτων, σε πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ. Επισημαίνονται οι γεωμετρικές διαστάσεις των δύο δοκιμίων διατομών τύπου sandwich που ελέγχθηκαν, οι οποίες προέκυψαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία του 2ου κεφαλαίου, και οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που επιλέχθηκαν για τα επιμέρους τμήματα της συνολικής πειραματικής διάταξης. Γίνεται αναφορά στον τρόπο κατασκευής των πειραματικών δοκιμίων και στον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών. Παρουσιάζεται η συνολική πειραματική διάταξη και διαδικασία με το πλαίσιο διάταξης, το πειραματικό δοκίμιο και το έμβολο άσκησης φορτίου. Αναλύεται η συμπεριφορά την οποία επέδειξαν τα πειραματικά δοκίμια και η εμφάνιση του φαινομένου του τοπικού λυγισμού κοντά στη βάση τους. Τέλος, παρατίθενται και σχολιάζονται οι μετρήσεις που προέκυψαν στις θέσεις τοποθέτησης γραμμικών μεταβλητών διαφορικών μετασχηματιστών (LVDT) για έλεγχο των μετακινήσεων και στις θέσεις τοποθέτησης παραμορφωσίμετρων (strain gauges) για έλεγχο των παραμορφώσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αριθμητική ανάλυση του πειράματος σε προσομοίωμα που αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Adina. Περιγράφεται το αριθμητικό προσομοίωμα στο σύνολό του, με αναφορές στη μοντελοποίηση των επιμέρους μελών του πειραματικού δοκιμίου, στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών των μελών, στις συνθήκες στήριξης, στον τρόπο επιβολής φόρτισης, στα στοιχεία επαφής (contact elements) που προσομοίωσαν τη σχέση συνεργασίας μεταξύ του χάλυβα και του κονιάματος στη διατομή τύπου sandwich και στον αλγόριθμο της αριθμητικής επίλυσης. Παρατίθενται τα αποτελέσματα σε όρους δρόμων ισορροπίας και εξέλιξης παραμόρφωσης στις ίδιες θέσεις με αυτές που τοποθετήθηκαν οι αντίστοιχοι καταγραφείς μετακινήσεων και παραμορφώσεων στα πειραματικά δοκίμια, σχολιάζονται και αξιολογούνται ως προς τη σύγκλισή τους με τα αντίστοιχα πειραματικά. Τέλος, δίνονται σχηματικά πληροφορίες για τη συμπεριφορά του δοκιμίου του προσομοιώματος σε τρεις χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές στη διάρκεια επιβολής της φόρτισης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνονται ορισμένες αριθμητικές παραμετρικές αναλύσεις με βάση το προσομοίωμα που δημιουργήθηκε στο 4ο κεφάλαιο. Καταδεικνύεται η ανάγκη αυτών των αναλύσεων, ώστε να διερευνηθεί ο τρόπος λειτουργίας και συμπεριφοράς των καινοτόμων διατομών τύπου sandwich, διαφορετικών ιδιοτήτων και υπό διαφορετικές συνθήκες. Παρατίθενται οι διαφοροποιήσεις σε σχέση με τα γεωμετρικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πειραματικών δοκιμίων στο προσομοίωμα αριθμητικής ανάλυσης, που αφορούν το πάχος των χαλύβδινων ελασμάτων, το πάχος του πυρήνα από κονίαμα, την ποιότητα του χάλυβα των ελασμάτων, την ποιότητα του κονιάματος του πυρήνα, καθώς και η αλλαγή στον τρόπο φόρτισης, ώστε να προσεγγίζει στατικά πιο ρεαλιστικές συνθήκες (αξονική καταπόνηση λόγω ιδίου βάρους, ατράκτου και πτερυγίων, τέμνουσα στο άκρο λόγω ανέμου). Πραγματοποιούνται επιπλέον ορισμένες αναλύσεις δίχως πλήρωση στο εσωτερικό του πυρήνα, ώστε να αξιολογηθεί η συνεισφορά του κονιάματος στο οριακό φορτίο και στη δυσκαμψία. Τέλος, παρουσιάζονται σε όρους δρόμων ισορροπίας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από κάθε διαφορετική αριθμητική παραμετρική ανάλυση και εξάγονται συμπεράσματα για τις παραμέτρους που διαδραματίζουν το σημαντικότερο ρόλο στη φέρουσα ικανότητα του φορέα διατομής τύπου sandwich.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2017 37

Experimental and numerical investigation of innovative sandwich-type cross sections for wind turbine towers

Nikolaos Papageorgiou

Supervisor: Professor Charis Gantes
Co-supervisor: Stylianos M. Vernardos, PhD Candidate
November 2017

ABSTRACT

The present diploma thesis deals with the experimental and numerical investigation of innovative sandwich-type cross sections for wind turbine towers. This new type of cross section is examined as an alternative of the conventional tubular steel tower sections in cases that their transportation and construction are economically inefficient or even prohibitive —namely towers with height of over 100m, which demand tower-base diameters of over 4m, in order to avoid buckling issues. The problem is mainly caused by the usually inaccessible installation locations, either for terrestrial wind turbines for which the maximum transportable diameter is about 4m, because of road limitations, or for offshore wind turbines due to high transportation costs.

The first chapter is an introduction to wind turbines. The reasons wind energy is essential, as a renewable energy source, are noted and especially the advantages as a result of its exploitation. A chronology of wind turbines' evolution is presented, starting from wind mills which were made for local use, till today's large wind turbines that are capable of producing power in the order of some MW and are connected to the main electrical grids. The basic parts of a horizontal or vertical axis wind turbine are described, especially the tower of the horizontal axis wind turbine. The most common types of towers and the materials they are made of are given, analyzing the steps of manufacturing, transporting and erasing of steel tubular towers.

The second chapter is about the concept of the sandwich-type cross section. The reasons which led to the investigation of this innovative cross section are given, along with its difference from the classic type of tubular steel towers. Furthermore, an analytical, numerical and experimental comparison between the sandwich-type and the conventional steel cross section under axial loading is presented, found in literature. Additionally, a reference is made about a preliminary methodology for designing wind turbine towers made of such sandwich-type cross sections and suggestions for the construction of these towers, which were all developed by a research team from School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens.

In the third chapter the experimental investigation of the flexural behavior of the sandwich-type cross sections, with a cement-mortar core, is presented. The experiment took place in the Laboratory of Steel

Structures of the School of Civil Engineering, NTUA. The geometry, which was a result of the methodology described in the 2nd chapter, and the mechanical properties of the two identical, downscaled, sandwich-tower specimens, which were constructed for the bending tests, are given. A reference is made about the manufacturing process of these two specimens and the procedures for checking the mechanical properties of their materials. The implementation of the tests and the whole experimental procedure are presented, including the frame on which the specimens were placed, the cantilever set-up with the pertinent boundary conditions and the lateral quasi-static loading at the free end of the specimens. The flexural behavior and the local-buckling failure mechanism which occurred near the base of the specimen, are analyzed. Lastly, the measures obtained by extensive use of LVDT, strain gauges and optical means are presented and discussed.

In the fourth chapter the numerical investigation, comprising a simulation of the experiment and implemented with ADINA finite element software, is presented. The modelling procedure is described, involving the mechanical properties of the materials used for every part of the specimen, the boundary conditions, the type of loading applied, the contact elements simulating the interfaces between the two materials and the algorithm of the numerical solver. The numerical equilibrium paths at every LVDT and strain gauge position are presented, discussed and compared with the experimental ones, in order to evaluate the convergence between them. Lastly, information is given by contour depictions, referring to three characteristic phases of the tests.

In the fifth chapter some parametric numerical analyses, based on the model made in the fourth chapter, are carried out. The purpose of these analyses is the understanding of the way that these sandwich-type cross section towers would behave with different properties and under different conditions, beyond the ones selected in the experiment. The different geometrical and mechanical properties simulated are presented, including the variation of thickness of the inner and outer faces, the thickness of the core, the quality of steel used for the inner and outer faces, the quality of the mortar used for the core, as well as different types of loading applied, in order to statically simulate more realistic loading conditions (axial loads due to self-weight, the rotor and the nacelle, lateral quasi-static load at the free end simulating wind pressure). Some analyses are carried out without having a material inside the core of the sandwich-type cross section, in order to check the contribution of the core to the stiffness and the load capacity of the section. Lastly, the results of these parametric numerical analyses are presented in terms of equilibrium paths and comments are made on them, so as to clarify which of the parameters that were changed on these analyses, play a decisive role in the load-capacity of the structure.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Γενικά περί αιολικής ενέργειας	1
1.2	Ιστορική εξέλιξη ανεμογεννητριών	2
1.3	Τύποι ανεμογεννητριών	11
1.3.1	Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα	12
1.3.2	Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα	13
1.4	Πυλώνες ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα	13
1.4.1	Χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες	14
1.4.2	Δικτυωτοί πυλώνες	18
1.4.3	Πυλώνες από σκυρόδεμα	18
1.5	Βιβλιογραφία	19
2	ΠΥΛΩΝΕΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΥΠΟΥ SANDWICH	21
2.1	Αναγκαιότητα πυλώνων διατομής τύπου sandwich	21
2.2	Σύγκριση διατομών sandwich με τις αμιγώς χαλύβδινες	23
2.2.1	Αναλυτική και αριθμητική σύγκριση	23
2.2.2	Πειραματική σύγκριση	27
2.3	Προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού πυλώνων διατομής τύπου sandwich	31
2.3.1	Αναλυτική περιγραφή βημάτων	32
2.3.2	Διάγραμμα ροής	38
2.3.3	Βελτιστοποίηση γεωμετρίας διατομής τύπου sandwich σε επίπεδο κατασκευής υποστυλώματος	38
2.4	Προτάσεις τρόπου κατασκευής και ανέγερσης πυλώνων διατομών τύπου sandwich	40
2.4.1	Προτεινόμενες μέθοδοι	40
2.4.2	Διαδικασία έγχυσης σκυροδέματος	41
2.4.3	Σύνδεση διαδοχικών τμημάτων	42
2.4.4	Ειδικά ζητήματα σχεδιασμού και κατασκευής	43
2.5	Βιβλιογραφία	44
3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΥΛΩΝΩΝ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΥΠΟΥ SANDWICH	47
3.1	Γενικά	47
3.2	Σχεδιασμός πειραμάτων	47
3.3	Υλοποίηση πειραμάτων	48
3.3.1	Κατασκευή δοκιμίων	48
3.3.2	Πειραματική διάταξη και διαδικασία	50
3.4	Αποτελέσματα	54

3.4.1	Ιδιότητες υλικών	54
3.4.2	Συμπεριφορά δοκιμίων.....	55
3.5	Συμπεράσματα.....	62
3.6	Βιβλιογραφία	63
4	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	65
4.1	Γενικά	65
4.2	Περιγραφή του αριθμητικού προσομοιώματος.....	65
4.2.1	Μοντελοποίηση επιμέρους στοιχείων.....	66
4.2.2	Υλικά επιμέρους μελών	71
4.2.3	Συνθήκες στήριξης.....	73
4.2.4	Επιβολή φόρτισης.....	74
4.2.5	Στοιχεία επαφής (Contact elements)	74
4.2.6	Μέθοδος και παράμετροι αριθμητικής ανάλυσης Full Newton Method και τελικό προσομοίωμα	77
4.3	Αριθμητικά αποτελέσματα και σύγκριση με τα πειραματικά	79
4.4	Συμπεράσματα.....	108
4.5	Βιβλιογραφία	108
5	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	111
5.1	Στόχος παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων	111
5.2	Καθορισμός νέων παραμέτρων.....	111
5.3	Αποτελέσματα παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων	115
5.4	Συμπεράσματα.....	121
6	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	123
6.1	Συμπεράσματα.....	123
6.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	125

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά περί αιολικής ενέργειας

Η ανθρωπότητα, ανά τους αιώνες, έχει εκμεταλλευτεί διαφορετικές Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) με στόχο την απομάκρυνση από τη χρήση των συμβατικών μορφών ενέργειας, οι οποίες τείνουν να εξαντληθούν, ενώ παράλληλα αποδεδειγμένα υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα και βλάπτουν και αλλοιώνουν το περιβάλλον (φαινόμενο του θερμοκηπίου, τρύπα του όζοντος, κλιματική αλλαγή). Τέτοιες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας προέρχονται από την κατάλληλη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας, του αέρα, της βροχής, των παλιρροιών, των κυμάτων και της γεωθερμίας. Η χρήση της ενέργειας που προσφέρουν αυτές οι πηγές υπάγονται σε τέσσερις κατηγορίες την ηλεκτρική, την αιολική ή υδάτινη θέρμανση/ψύξη, τη μεταφορική και την επαρχιακή αυτόνομη χρήση.

Ειδικότερα, η αιολική ενέργεια είναι μια ήπια μορφή ενέργειας, της οποίας η αρχαιότερη μορφή εκμετάλλευσης φαίνεται να ήταν από τα πανιά των πρώτων ιστιοφόρων με στόχο τη μεταφορά και αρκετά αργότερα οι ανεμόμυλοι της ξηράς για άλεση σιτηρών ή άντληση υδάτων. Σήμερα, η αιολική ενέργεια αποτελεί λύση κυρίως στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των αιολικών πάρκων που αποτελούνται από αρκετές αυτόνομες ανεμογεννήτριες, οι οποίες είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της περιοχής.

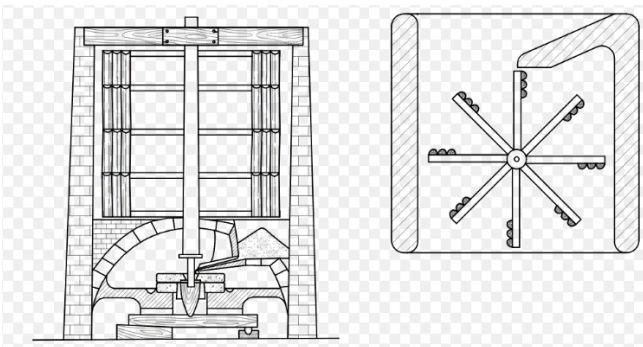
Από άποψη κόστους, τα αιολικά πάρκα κοντά στην ακτή είναι σε πολλές περιπτώσεις περισσότερο οικονομικά από κάθε άλλη πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση με αυτά που βρίσκονται μακριά από την ακτή και ενώ έχουν το πλεονέκτημα ότι ο άνεμος σε τέτοια σημεία είναι πιο δυνατός και σταθερός, παρόλα αυτά, τα έξοδα κατασκευής και συντήρησής τους μπορεί να είναι δραματικά μεγάλα.

Σαφές μειονέκτημα της χρήσης της αιολικής ενέργειας καθίσταται το γεγονός ότι υπάρχουν περίοδοι μες στο ημερολογιακό έτος που προσφέρουν σχεδόν μηδενική ηλεκτρική ενέργεια, λόγω της έλλειψης ισχυρών ανέμων. Για το λόγο αυτό είναι δύσκολο να ανεξαρτητοποιηθεί πλήρως και να γίνει αυτόνομη χρήση της πέρα από συνδυασμό της με άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν, βεβαίως, και άλλες λύσεις στο συγκεκριμένο πρόβλημα όπως πρόβλεψη επαρκούς υδροηλεκτρικής ενέργειας για τους οικισμούς, εξαγωγή ή προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ γειτονικών περιοχών αναλόγως τη ζήτηση, αποθήκευση και φύλαξη κάποιου πλεονάσματος ηλεκτρικής ενέργειας κ.ά.

Στις μέρες μας η ετήσια εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας έχει αυξηθεί ραγδαία στο 4% της παγκόσμιας χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας και 11.4% στην Ευρώπη. [1-2]

1.2 Ιστορική εξέλιξη ανεμογεννητριών

Οι πρώτες ενδείξεις ύπαρξης ανεμόμυλων κάνουν την εμφάνισή τους στη μακρινή Περσία (τωρινό Ιράν) και πιο συγκεκριμένα στην επαρχία Σιστάν γύρω στα 500-900 μ.Χ. Οι αναφορές κάνουν λόγο για ανεμόμυλο τύπου κατακόρυφου άξονα που είχε ως αρχική χρήση την άντληση υδάτων για μεταφορά και αργότερα την άλεση σιτηρών μετά από κάποιες μετατροπές. Αυτός ο τύπος ανεμόμυλου αποτελούνταν από κατακόρυφα πανιά, τα οποία ήταν φτιαγμένα από δέσμες καλάμιών ή ξύλου και ήταν συνδεδεμένα με έναν κεντρικό κατακόρυφο άξονα μέσω οριζόντιων αντηρίδων (Εικόνα 1-1). Τέτοιας τεχνολογίας ανεμόμυλοι έχουν επιβιώσει στο Αφγανιστάν μέχρι και σήμερα (Εικόνα 1-2).



Εικόνα 1-1: Διάταξη ανεμόμυλου κατακόρυφου άξονα Σιστάν [1-3]



Εικόνα 1-2: Ανεμόμυλος στο Αφγανιστάν για άλεση σιτηρών [1-4]

Υποστηρίζεται ότι τόπος γέννησης των ανεμόμυλων κατακόρυφου άξονα ήταν η Κίνα περίπου 2000 χρόνια πριν, αλλά η πιο πρόσφατη γραπτή πηγή αναφέρει τον κινεζικό ανεμόμυλο γύρω στο 1219 μ.Χ. Κύρια χρήση του αποτελούσε η άντληση θαλασσινού νερού έχοντας ως απώτερο στόχο τη δημιουργία αλατιού.

Στην Ευρώπη, η παρουσία των ανεμόμυλων κάνει την εμφάνισή της την περίοδο του Μεσαίωνα (500-1500 μ.Χ.) με τη μορφή ωστόσο του οριζόντιου άξονα, ο οποίος ήταν ήδη διαδεδομένος από τις ρόδες υδάτινης ενέργειας. Η πρώτη βέβαιη αναφορά σε ανεμόμυλο χρονολογείται στο 1185 στο Ηνωμένο Βασίλειο στο Yorkshire με τον τύπο του ανεμόμυλου σε στύλο (post mill) (Εικόνα 1-4). Αργότερα, γύρω στο 1390 οι Ολλανδοί δημιούργησαν τον ανεμόμυλο σε πύργο (tower mill) (Εικόνα 1-4) ως εξέλιξη αυτού σε στύλο, του οποίου η χρήση πέρα από την άλεση σιτηρών ήταν η αποθήκευσή τους και η εστίαση της οικογένειας του υπεύθυνου του κάθε ανεμόμυλου. Για τα επόμενα 500 χρόνια, οι Ολλανδοί τελειοποίησαν τους ανεμόμυλους αυτού του τύπου, βελτιώνοντας την αεροδυναμική των περιστρεφόμενων πτερυγίων και τοποθετώντας τα στην κατάλληλη θέση του πύργου παρουσιάζοντας τα καλύτερα μέχρι τότε αποτελέσματα στη λειτουργία τους.

Στο δυτικό κόσμο, πραγματοποιήθηκε η τελειοποίηση των μικρότερων συστημάτων ανεμόμυλων με σκοπό την άντληση νερού κατά τη διάρκεια του 19^{ου} αιώνα στις Η.Π.Α.. Η αρχή έγινε με τον ανεμόμυλο του Halladay το 1854 (Εικόνα 1-6) και συνεχίστηκε με τα Aermotor και Dempster σχέδια, που υπάρχουν μέχρι και σήμερα (Εικόνα 1-6). Η μεγαλύτερη εξέλιξη παρουσιάστηκε στα πτερύγια των ανεμόμυλων, τα οποία μετατράπηκαν από ξύλινες σανίδες σε μεταλλικές, οι οποίες ήταν ελαφρύτερες και μπορούσαν να αποκτήσουν αποδοτικότερο σχήμα, ώστε να δουλεύουν σε μεγαλύτερες μέγιστες ταχύτητες. Ήταν τόσο μεγαλύτερες, που η χρησιμοποίηση εξοπλισμού ελάττωσης της ταχύτητας για τη σωστή λειτουργία

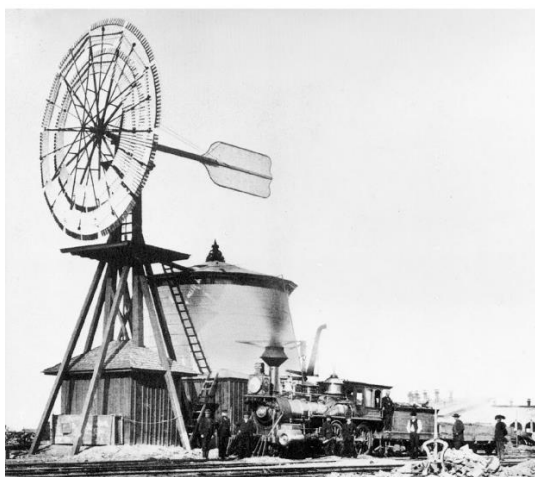
των γειτονικών αντλιών ήταν απαραίτητος. Από το 1850 έως το 1970, πάνω από 6 εκατομμύρια ανεμόμυλοι είχαν εγκατασταθεί στις Η.Π.Α. με κύριο στόχο την άντληση νερού για αποθήκευση ή άμεση ιδιωτική χρήση στους αγρούς, ενώ οι μεγαλύτεροι ανεμόμυλοι, τροφοδοτούσαν τα τραίνα με ατμό, τα οποία ήταν το κύριο μέσο μεταφοράς εκείνη την εποχή. [1-5]



Εικόνα 1-3: Ανεμόμυλος σε στύλο [1-4]



Εικόνα 1-4: Ανεμόμυλος σε πύργο [1-5]



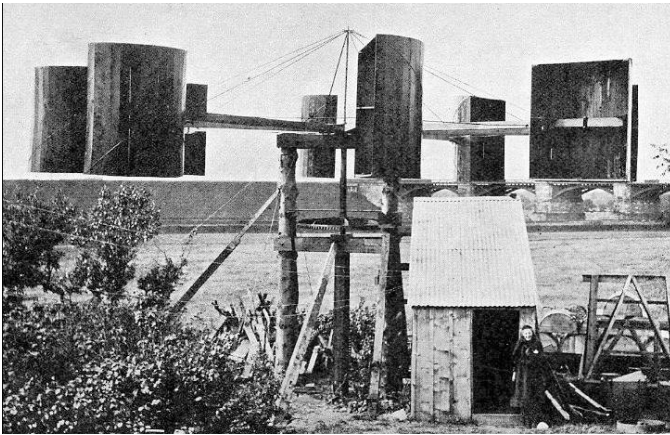
Εικόνα 1-5: Ανεμόμυλος Halladay για την άντληση νερού [1-4]



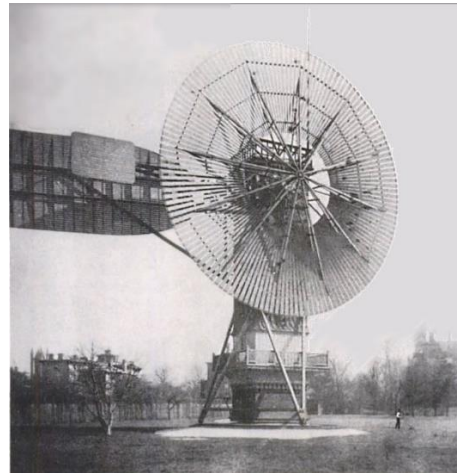
Εικόνα 1-6: Εξέλιξη του ανεμόμυλου τύπου Halladay από την εταιρεία Aermotor

Μέχρι το 19^ο αιώνα η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας βρισκόταν στα ύψη, ώσπου ο ηλεκτρισμός έκανε τη ραγδαία εξέλιξή του και ο περισσότερος αστικός κόσμος στράφηκε σε άλλες λύσεις όπως για παράδειγμα τις ατμομηχανές. Η ανάγκη για μετατροπή των ανεμόμυλων άντλησης νερού ώστε να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, φαίνεται να δημιουργήθηκε στον επαρχιακό απομονωμένο κόσμο με ιδιωτικές πρωτοβουλίες.

Η πρώτη ανεμογεννήτρια που φτιάχτηκε ποτέ για παροχή ηλεκτρισμού ήταν από τον Σκωτσέζο James Blyth και είχε σκοπό να φωτίσει το εξοχικό του σπίτι (Εικόνα 1-7). Ωστόσο, η πρώτη μεγάλης κλίμακας ανεμογεννήτρια (ρότορας διαμέτρου 17m σε ύψος πύργου 18m) δημιουργήθηκε το 1888 από τον Αμερικανό Charles Brush (Εικόνα 1-8) και μπορούσε να παράγει μόλις 12kW, λόγω της αργής στροφής των 144 πτερυγίων. Χρήση της ήταν ο φωτισμός και η λειτουργία αρκετών κινητήρων στο εργαστήριό του.

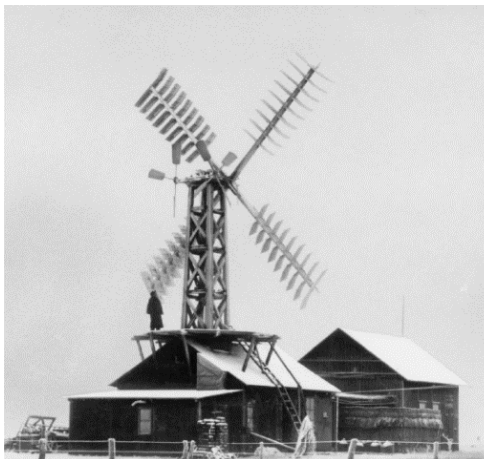


Εικόνα 1-7: Πρώτη ανεμογεννήτρια παροχής ηλεκτρισμού από τον Blyth (1887)



Εικόνα 1-8: Πρώτη μεγάλη ανεμογεννήτρια από τον Brush (1888) [1-5]

Πρωτοπόρος στη δημιουργία ανεμογεννητριών όπως τις ξέρουμε σήμερα, υπήρξε ο Δανός επιστήμονας Poul la Cour 1891 (Εικόνα 1-9). Η αρχική ιδέα του αφορούσε στην παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης για το σχολείο της περιοχής Askov. Έπειτα, όμως, βρήκε τρόπο παραγωγής σταθερού ρεύματος και μέχρι το 1895 η ανεμογεννήτρια του άρχισε να χρησιμοποιείται για το φωτισμό του χωριού Askov. Γύρω στο 1927, άνοιξαν εταιρείες παραγωγής ανεμογεννητριών στις Η.Π.Α. με πιο αξιοσημείωτη αυτή των αδερφών Jacobs (Εικόνα 1-10). Η μέθοδός τους στηριζόταν στη λειτουργία προπελών των αεροπλάνων και η ισχύς τους έφτανε από 1kW έως 3kW, βρίσκοντας μεγάλο αντίκτυπο στις επαρχιακές περιοχές. Αρχικά, κύριος στόχος τους ήταν ο φωτισμός των αγρών και η φόρτιση μπαταριών, αλλά πολύ σύντομα βρέθηκαν να καλύπτουν ανάγκες διαφόρων ειδών ηλεκτρικών συσκευών, όπως ψυγεία, μηχανές πλυσίματος κ.ά. Ωστόσο, αυτή η αύξηση αναγκών σε συνδυασμό με τη μη σταθερότητα ηλεκτρικού ρεύματος από αυτές τις ανεμογεννήτριες, οδήγησε στην σταδιακή εξάλειψή τους και στην επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου στις επαρχιακές περιοχές. [1-5]



Εικόνα 1-9: Ανεμογεννήτρια του Δανού Poul la Cour πλησίαζε τα σημερινά δεδομένα (1891) [1-4]



Εικόνα 1-10: Ο Jacob προσαρμόζει ελατήρια στα πτερύγια (1977) [1-5]

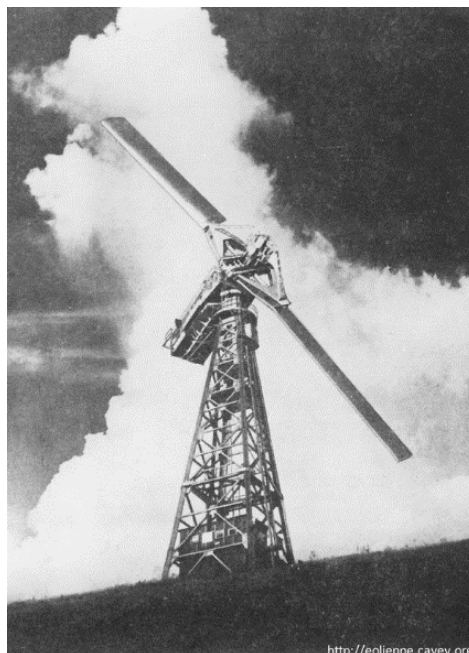
Παρά τη στροφή σε πιο βιομηχανικές λύσεις που προσέφεραν μεγαλύτερη ηλεκτρική ισχύ, συνεχίστηκε η εξέλιξη των ανεμογεννητριών στην Ευρώπη. Συγκεκριμένα, το 1931 στην Ε.Σ.Σ.Δ. στην περιοχή Balaclava δημιουργήθηκε ανεμογεννήτρια ισχύος 100kW σε ύψος δικτυωτού πύργου 30m και ρότορα διαμέτρου 30m με 3 πτερύγια. Η απόδοσή της εκτιμάται ότι ήταν αρκετά παρόμοια με τα σημερινά δεδομένα.

Επίσης αξιοσημείωτη ήταν και η ανεμογεννήτρια του Γάλλου Darrieus το ίδιο έτος (1931). Ήταν από τις πρώτες που παρέκκλιναν από τις συνηθισμένες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, αφού ήταν κατακόρυφου άρα μπορούσε να δεχτεί από κάθε κατεύθυνση τον άνεμο χωρίς προσαρμογές και το μεγάλο βάρος του ρότορα παρέμενε στο έδαφος αντί για την κορυφή του πύργου (Εικόνα 1-11).

Παρόμοιες πειραματικές ανεμογεννήτριες μεγάλου μεγέθους δημιουργήθηκαν από το 1935-1970 στις Η.Π.Α., τη Δανία, τη Γαλλία, τη Γερμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο. Σημαντικότερη από αυτές υπήρξε αυτή της Αμερικάνικης εταιρείας S. Morgan Smith σε συνεργασία με τον Putnam. Πρόκειται για μια ανεμογεννήτρια με 53m διάμετρο ρότορα που αποτελούταν από 2 πτερύγια και μπορούσε να παράγει ηλεκτρική ισχύ μέχρι 1.25MW (Εικόνα 1-12). Εντάχθηκε στο ηλεκτρικό δίκτυο του Vermont το 1941, αλλά μετά από 1100 ώρες λειτουργίας το ένα πτερύγιο αστόχησε από κόπωση. Πέρασαν 40 χρόνια για να πραγματοποιηθεί παρόμοιου μεγέθους πείραμα.



Εικόνα 1-11: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα Darrieus (1931)



Εικόνα 1-12: Ανεμογεννήτρια της εταιρείας Smith που εντάχθηκε στο δίκτυο του Vermont (1941) πρωτοπόρας ισχύος 1.25MW, ρότορα διαμ. 53m [1-4]

Κατά τη διάρκεια του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου ανεμογεννήτριες χρησιμοποιήθηκαν σε σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο χωρών, λόγω της έλλειψης σε ορυκτά καύσιμα που επικρατούσε λόγω του πολέμου. Το 1946 μέρος του νησιού Neuwerk που ανήκει στη Γερμανία ηλεκτροδοτούταν από μία ανεμογεννήτρια ισχύος 18kW ρότορα διαμέτρου 15m για εξοικονόμηση πετρελαίου. Στο Ηνωμένο Βασίλειο το 1951 συνδέθηκε ανεμογεννήτρια με το δίκτυο παραγωγής πετρελαίου στα Νησιά Orkney από την εταιρεία John Brown Company, ρότορα διαμέτρου 15m και παραγόμενης ισχύος 100kW (Εικόνα 1-13), αλλά κράτησε μονάχα μερικούς μήνες. Η αστοχία της ίσως προήλθε από τον περίπλοκο σχεδιασμό των πτερυγίων και την ένωσή τους με τον άξονα. Στη Δανία το 1957 ο Johannes Juul εγκατέστησε μια ανεμογεννήτρια που λειτούργησε για 10 χρόνια στην περιοχή Gedser ώσπου έκαναν την εμφάνισή τους πάλι τα ορυκτά καύσιμα. Πρόκειται για μια ανεμογεννήτρια ισχύος 200kW ρότορα διαμέτρου 24m και 3 πτερυγίων (Εικόνα 1-14). Είχε, επίσης, μια δομή υποστήριξης μορφής αεροσκάφους, αλλά ήταν πολύ πιο απλή μηχανικά από την πρώτη Δανική ανεμογεννήτρια του Poul la Cour. Στη Γαλλία το 1958 και συγκεκριμένα στο Nogent le Roi κατασκευάστηκε μια ακόμη πειραματική ανεμογεννήτρια από το μηχανικό L. Romani με την υποστήριξη της εταιρείας Electricite de France. Είχε ρότορα διαμέτρου 30.1m και σύγχρονο κινητήρα ισχύος 800kW, αλλά ένα από τα πτερύγιά της αστόχησε το 1963 (Εικόνα 1-16).



Εικόνα 1-13: Ανεμογεννήτρια των John Brown Company (1956) στα νησιά Orkney (ρότορας διαμ. 15m, ισχύς 100kW) [1-4]



Εικόνα 1-14: Πειραματική ανεμογεννήτρια στο Gedser της Δανίας (ρότορας διαμ. 24m, ισχύς 200kW) (1957) [1-4]

Ένα νέο και διαφορετικό πείραμα ανεμογεννήτριας έλαβε χώρα στη Γερμανία γύρω στα μέσα της δεκαετίας του 1970. Ο καθηγητής Ulrich Hutter κατασκεύασε μια σειρά από ανεμογεννήτριες ενδιάμεσου μεγέθους που χρησιμοποιούσαν πτερύγια από υαλοβάμβακα και πλαστικό προσφέροντας μικρό βάρος και μεγάλη αποδοτικότητα (Εικόνα 1-16). Το σκεπτικό ήταν ουσιαστικά να «απορρίπτει» τα αεροδυναμικά φορτία παρά να τα «αντέχει», όπως η Δανική κατεύθυνση. Μεγάλη καινοτομία αποτέλεσε η εισαγωγή ενός ρουλεμάν στο ρότορα ώστε να μετακινείται στους πολύ δυνατούς ανέμους. Αυτά τα πειράματα λειτούργησαν για 4000 ώρες ώσπου σταμάτησαν το 1968.



Εικόνα 1-15: Πειραματική ανεμογεννήτρια του Γάλλου μηχανικού Romani (1963) (ρότορας διαμ. 30,1m, ισχύς 800kW) [1-4]



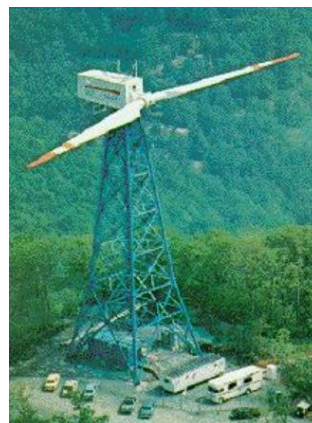
Εικόνα 1-16: Ανεμογεννήτρια του Γερμανού Hutter με πτερύγια υλικού υαλοβάμβακα και πλαστικού [1-5]

Στις Η.Π.Α. από το 1973 έως τα μέσα της δεκαετίας του 1980, παρατηρήθηκε στροφή της κυβέρνησης να αφήσει τα ορυκτά καύσιμα και να συνεργαστεί με βιομηχανίες για τη βελτίωση και εκμετάλλευση των ανεμογεννητριών. Όλη αυτήν την περίοδο δοκιμάστηκαν 13 διαφορετικές μικρές ανεμογεννήτριες (1kW-40kW) και 5 μεγάλες (100kW-3.2MW) οριζόντιου άξονα και κάποιες κατακόρυφου (5kW-500kW). Οι μηχανικοί της Nasa, επηρεασμένοι από τα σχέδια του Γερμανού Ulrich Hutter, αγνοώντας ωστόσο τη σημαντικότητα του ρουλεμάν στο ρότορα, χρηματοδοτήθηκαν αρχικά από τον κυβερνητικό οργανισμό

Energy Research and Development Administration (ERDA) και ύστερα από το U.S. Department of Energy (DOE). Σκοπός τους ήταν η παραγωγή όσο το δυνατόν μεγάλων ανεμογεννητριών και η διάθεσή τους στο εμπόριο, αν και πολιτικοί και οικονομικοί λόγοι δεν άφησαν να επιτευχθεί αυτός ο στόχος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτέλεσαν τα μοντέλα MOD-0 έως MOD-5 που παρουσιάζονται παρακάτω (από Εικόνα 1-17 έως Εικόνα 1-20) [1-6].



Εικόνα 1-17: MOD-0 (ρότορας διαμ. 38.1m, ισχύς 200kW) (1977) [[1-6]



Εικόνα 1-18: MOD-1 (ρότορας διαμ. 61m, ισχύς 2MW) (1979) [1-6]



Εικόνα 1-19: MOD-2 (ρότορας διαμ. 91.4, ισχύς 2.5MW) (1977) [[1-6]



Εικόνα 1-20: MOD-5 (ρότορας διαμ. 97.5m, ισχύς 3.2MW) (1977) [1-6]

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, έγιναν κάποιες αξιολογικές έρευνες και κατασκευές μεγάλων ανεμογεννητριών. Συγκεκριμένα στη Δανία και στη Γερμανία έγιναν οι πιο αξιοσημείωτες προσπάθειες μετά το τέλος του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου. Στη Δανία, το 1978, κατασκευάστηκε η πρώτη μεγάλη ανεμογεννήτρια από καθηγητές και μαθητές του σχολείου Tvinnd και έδωσαν την ευκαιρία σε μεγάλες εταιρείες παραγωγής ανεμογεννητριών, όπως η Vestas, να πάρουν τα κομμάτια που χρειαζόνταν. Ο πύργος της ήταν κυλινδρικός, ο ρότορας της είχε 3 πτερύγια με διάμετρο ρότορα 54m και μπορούσε να παράγει ισχύ έως 2MW (Εικόνα 1-21). Στη Γερμανία έλαβε χώρα ένα μεγάλο πείραμα από τον Growian, που όμως απέτυχε. Η ανεμογεννήτρια του που κατασκευάστηκε το 1983 και είχε διάμετρο ρότορα 100m, κυλινδρικό πύργο ύψους 100m και μέγιστη ισχύ 3MW, γρήγορα παρουσίασε τεχνικά προβλήματα (Εικόνα 1-22). Αντιθέτως, 3 ανεμογεννήτριες του προγράμματος Monopteros είναι ακόμη σε λειτουργία. Με τη βοήθεια της Γερμανικής εταιρείας Mbb, κατασκευάστηκαν ανεμογεννήτριες διαμέτρου ρότορα από 12.5m έως 51m, αποτελούμενες από ένα πτερύγιο και με μέγιστη ισχύ που μπορούσε να φθάσει τα 1000kW (Εικόνα 1-23).



Εικόνα 1-21: Ανεμογεννήτρια από το σχολείο Tvind (1978) (ρότορας διαμ. 54m, ισχύς 2MW)



Εικόνα 1-22: Ανεμογεννήτρια του Γερμανού Growian (1983) (ρότορας διαμ. 100m, ισχύς 3MW) [1-5]



Εικόνα 1-23: Ανεμογεννήτρια από το πρόγραμμα Μοπορτερος και τη Γερμανική εταιρεία Mbb (1980) (ρότορες 12.5m-51m, ισχύς 25kW-1000kW) [1-6]

Μερίδιο ευθύνης στην εξέλιξη των ανεμογεννητριών έχουν και χώρες όπως η Σουηδία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ολλανδία και το νησί της Σαρδηνίας στην Ιταλία με τα μοντέλα τους να αποτελούνται από 2 πτερύγια. Στη Σουηδία η πρώτη ανεμογεννήτρια κατασκευάστηκε το 1982 από τον Kvaerner και ονομάστηκε WTS-75 (αργότερα Aeolus I). Είχε διάμετρο ρότορα 75m και έφτανε σε μέγιστη ισχύ τα 2MW και εγκαταστάθηκε στο νησί Gotland (Εικόνα 1-24). Στο Ηνωμένο Βασίλειο, αξιοσημείωτη είναι η κατασκευή της ανεμογεννήτριας LS-1 από την εταιρεία Wind Energy Group (WEG) το 1985. Ο ρότορας της είχε διάμετρο 60m και η μέγιστη ισχύ της έφτανε τα 3MW (Εικόνα 1-25). Το ίδιο έτος στην Ολλανδία και συγκεκριμένα στο Medemblik εγκαταστάθηκε η ανεμογεννήτρια Newecs-45, που είχε διάμετρο ρότορα 45m και μέγιστη ισχύ 1MW, από την εταιρεία Stork-Fdo (Εικόνα 1-26). Τέλος στο νησί της Σαρδηνίας κατασκευάστηκε το μοντέλο Gamma 60 από την εταιρεία Aeritalia το 1992. Η ισχύ της έφτανε τα 1.5MW και ο ρότοράς της είχε διάμετρο 60m (Εικόνα 1-27). Αυτή η ανεμογεννήτρια, ωστόσο, έχει εξελιχθεί στις μέρες μας και λειτουργεί ακόμη, αλλά σε υψηλότερη ισχύ (περίπου 3.5MW). [1-7]



Εικόνα 1-24: Ανεμογεννήτρια WTS-75 στη Σουηδία (1982) (ρότορας διαμ. 75m, ισχύς 2MW) [1-6]



Εικόνα 1-25: Ανεμογεννήτρια LS-1 από τη Βρετανική εταιρεία WEG (1985) (ρότορας διαμ. 60m, ισχύς 3MW) [1-6]



Εικόνα 1-26: Ανεμογεννήτρια Newecs-45 στην Ολλανδία (1985) (ρότορας διαμ. 45m, ισχύς 1MW) [1-6]

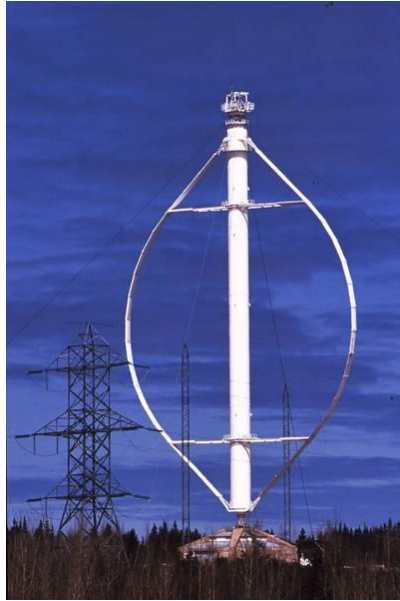


Εικόνα 1-27: Ανεμογεννήτρια Gamma 60 στο νησί της Σαρδηνίας (1992) (ρότορας διαμ. 60m, ισχύς 1.5MW) [1-6]

Πέρα από τις προηγούμενες πειραματικές ανεμογεννήτριες που ήταν όλες τύπου οριζόντιου άξονα, υπήρξε προσπάθεια να μελετηθεί και ο αντίστοιχος τύπος κατακόρυφου άξονα, με βάση το μοντέλο του Darrieus. Ιδίως στον Καναδά, κατασκευάστηκε ίσως η μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα με ύψος 100m και διάμετρο στο μέσο ίση με 64m (Εικόνα 1-28). Μπορούσε να παράγει ισχύ μέχρι 4MW και εγκαταστάθηκε στην πόλη Quebec το 1987 από το πρόγραμμα Eole και την εταιρεία Hydro-Quebec. Λειτούργησε μέχρι το 1993, καθώς τα τεχνικά προβλήματα που αντιμετώπιζε (όπως και κάθε ανεμογεννήτρια τέτοιου τύπου) ήταν πολλά και οικονομικά υστερούσε από του οριζόντιου άξονα. Έτσι το σχετικό πρόγραμμα εγκαταλείφθηκε εντελώς. [1-8]

Στον 21^ο αιώνα, η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας έχει αυξηθεί σε σχέση με τα προηγούμενα «πειραματικά» χρόνια. Αν και τα ορυκτά καύσιμα παραμένουν ακόμη σε χαμηλές τιμές, οι ανυσηχίες για τα περιβαλλοντικά αποτελέσματα από τη χρησιμοποίησή τους, καθώς και το γεγονός ότι δεν βρίσκονται σε αφθονία, οδήγησαν στη λύση των ανεμογεννητριών. Σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις του Ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και συμβουλίου, σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/EK, για μέριδιο 20% στην

παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είναι λογικό να έχει εξελιχθεί και να προσπαθεί να εξελιχθεί περισσότερο η τεχνολογία των ανεμογεννητριών. [1-9]



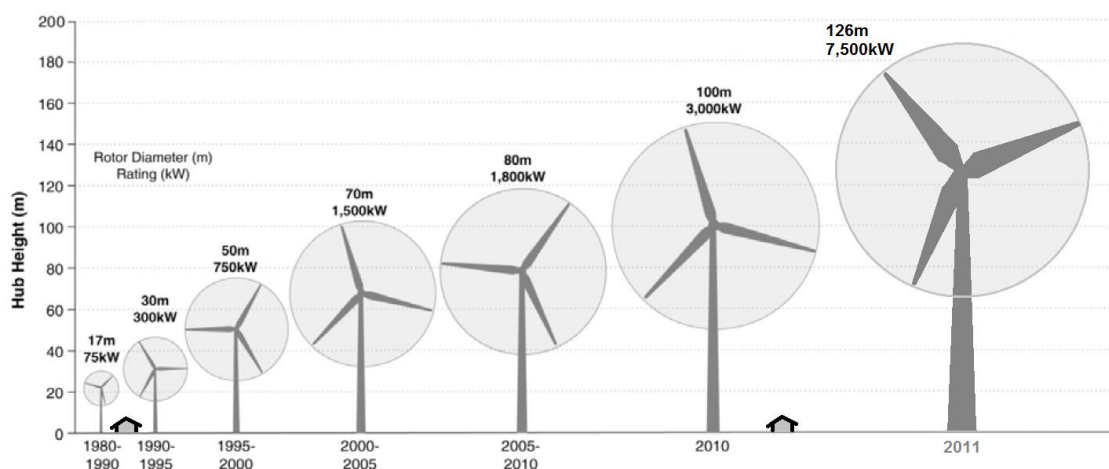
Εικόνα 1-28: Η μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα στο Quebec του Καναδά (1987) (διαμ. στο μέσο 64m, ισχύς 4MW). Η ιδέα του κατακ. άξονα εγκαταλείφθηκε τελείως το 1993. [1-8]

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της ραγδαίας εξέλιξης των ανεμογεννητριών αποτελεί το Δανικό μοντέλο Vestas V164, που αποτελεί και τη μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια παγκοσμίως (Εικόνα 1-29). Το πρωτότυπο εγκαταστάθηκε στην περιοχή Osterild το 2014, ενώ βιομηχανικά έγινε εκμετάλλευσή του στο αιολικό πάρκο Burbo του Ηνωμένου Βασιλείου το 2016. Η μέγιστη ισχύ της μπορεί να φτάσει τα 8MW, ενώ ο ρότορας της έχει διάμετρο 160m αποτελούμενος από 3 πτερύγια και το ύψος του πυλώνα της φτάνει τα 105m (πρωτότυπο 140m).



Εικόνα 1-29: Δανική ανεμογεννήτρια Vestas V164. Η μεγαλύτερη παγκοσμίως. (2014) (ρότορας διαμ. 160m, ισχύς 8MW)

Παρακάτω παρουσιάζεται και ένα γράφημα της εξέλιξης μεγέθους και τεχνολογίας των ανεμογεννητριών από το 1980 έως το 2011 (Εικόνα 1-30).



Εικόνα 1-30: Εξέλιξη μεγέθους και τεχνολογίας ανεμογεννητριών από το 1980 έως το 2011

1.3 Τύποι ανεμογεννητριών

Οι τύποι των ανεμογεννητριών διακρίνονται ανάλογα με τη διεύθυνση περιστροφής του άξονα περιστροφής του ρότορα και την κατεύθυνση της ροής του ανέμου που προσκρούει πάνω τους. Έτσι, οι βασικοί τύποι ανεμογεννητριών είναι:

1. Οριζόντιου άξονα περιστροφής με κατεύθυνση ροής ανέμου παράλληλη στα πτερύγια του ρότορα (Εικόνα 1-29).
2. Οριζόντιου άξονα περιστροφής με κατεύθυνση ροής ανέμου κάθετη στα πτερύγια του ρότορα.
3. Κατακόρυφου άξονα περιστροφής με κατεύθυνση ροής ανέμου κάθετη στα πτερύγια του ρότορα (Εικόνα 1-28).

Πέρα από αυτές τις βασικές κατηγορίες ανεμογεννητριών, υπάρχει και μια ακόμη που βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο από το 2010 στην Ισπανία από την εταιρεία Vortex Bladeless. Πρόκειται για ανεμογεννήτρια χωρίς πτερύγια που εκμεταλλεύεται τους στροβιλισμούς και την ταλάντωση που προκαλεί ο άνεμος στο πέρασμά του από την κατασκευή (Εικόνα 1-31). [1-10]



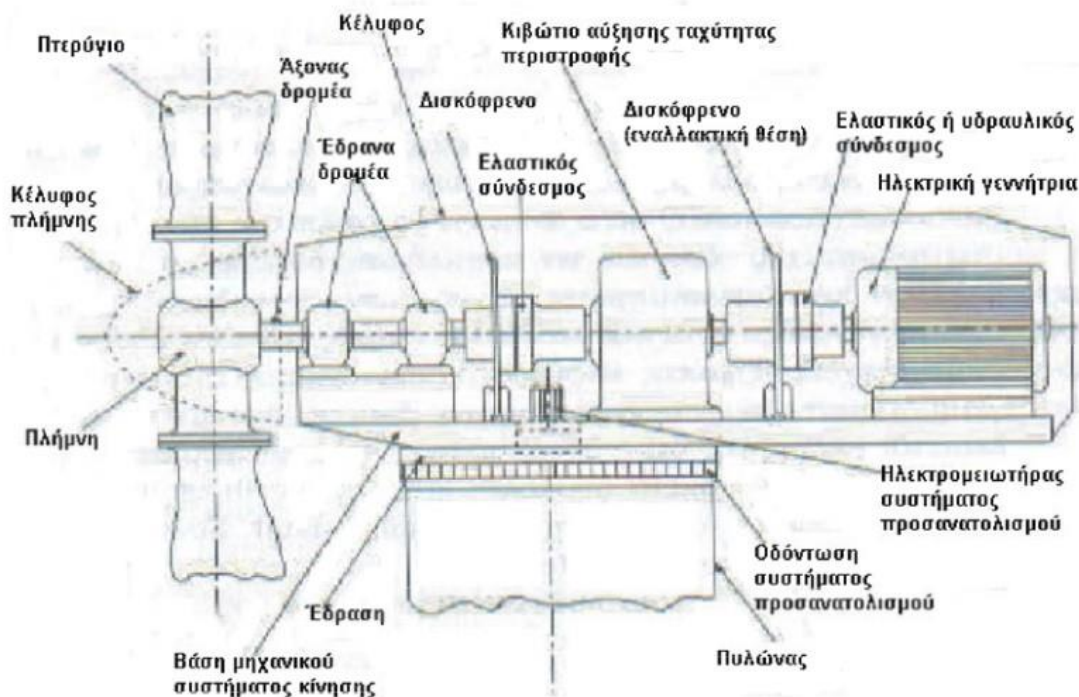
Εικόνα 1-31: Πειραματική ανεμογεννήτρια χωρίς πτερύγια από την Ισπανική εταιρεία Vortex (2010) [1-10]

1.3.1 Ανεμογεννήτρια οριζώντιου άξονα

Μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζώντιου άξονα περιστροφής έχει το κέλυφος, μέσα στο οποίο βρίσκονται τα ηλεκτρομηχανικά συστήματα και το δρομέα (ρότορα) στην κορυφή ενός πυλώνα στήριξης πάνω από το έδαφος.

Δρομέας ονομάζεται ο περιστρεφόμενος μηχανισμός αυτής της κατηγορίας ανεμογεννητριών και αποτελείται από ένα ή περισσότερα πτερύγια που ενώνονται στην πλήμνη του. Τα πτερύγια είναι είτε σταθερά είτε έχουν τη δυνατότητα στροφής γύρω από το διαμήκη άξονά τους, με σκοπό τη μείωση στροφών του άξονα του δρομέα σε υψηλής έντασης ανέμους, ώστε να αποφεύγονται οι μηχανικές καταπονήσεις σε αυτά. Η θέση του δρομέα περί τον πυλώνα μπορεί να είναι είτε ανάντη είτε κατάντη αυτού.

Εσωτερικά του κελύφους της ατράκτου βρίσκεται το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών που ενώνεται με το δρομέα μέσω του άξονά του. Το κιβώτιο αυτό, συνδέεται με μια ηλεκτρική γεννήτρια μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική σε ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, υπάρχει και ένα δισκόφρενο για την πέδηση του δρομέα σε περίπτωση που αυξηθεί αρκετά η στροφική ταχύτητα του δρομέα πέρα από τα όρια ή σε περίπτωση μηδενικής ενεργειακής ζήτησης. Το δισκόφρενο αυτό τοποθετείται είτε στο χαμηλόστροφο άξονα του δρομέα (πριν το κιβώτιο ταχυτήτων) είτε στον υψηλόστροφο άξονα (μετά το κιβώτιο ταχυτήτων) (Εικόνα 1-32). [1-7], [1-11]



Εικόνα 1-32: Μέρη στο εσωτερικού του κελύφους της ατράκτου [1-11]

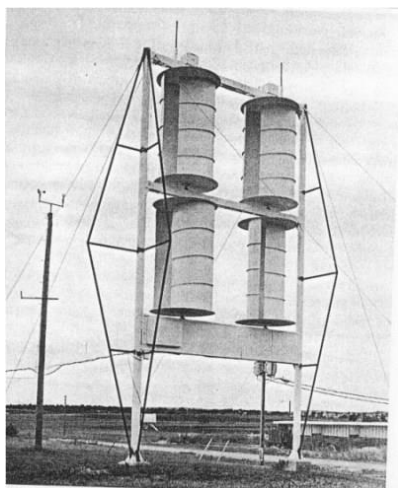
Για τη μεγιστοποίηση δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου, το επίπεδο του δρομέα θα πρέπει να είναι κάθετο στη διεύθυνση ροής του ανέμου. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί συστήματα ευθυγράμμισης του άξονα του δρομέα. Στις ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος με το δρομέα ανάντη του πυλώνα, τοποθετείται στο πίσω μέρος του κελύφους ένα πτερύγιο, αλλά στις αντίστοιχες με το δρομέα κατάντη του πυλώνα δεν τοποθετείται κάτι περισσότερο, γιατί το κέλυφος έχει τέτοιο σχήμα ώστε να λειτουργεί εκείνο σαν πτερύγιο προσανατολισμού. Αντιθέτως, στις ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος υπάρχει ένας σερβομηχανισμός, δηλαδή ένα σύστημα αυτόματης ρύθμισης της θέσης του δρομέα.

Τέλος, στη βάση του πύργου είναι τοποθετημένοι ο ηλεκτρονικός πίνακας και ο πίνακας ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Στην περίπτωση μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτρια εκεί μπορούν να γίνουν και οι οποιεσδήποτε συνδέσεις με το ηλεκτρικό δίκτυο της περιοχής.

1.3.2 Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα

Ο τρόπος λειτουργίας των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα περιστροφής είναι παρόμοιος με αυτόν του αντίστοιχου τύπου οριζόντιου άξονα με κάποιες διαφορές. Κατ' αρχάς, το σύστημα μετατροπής της ενέργειας από κινητική σε ηλεκτρική, παρατηρείται στη βάση της κατασκευής και βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα πιο εύκολης και χαμηλότερου κόστους συντήρησης του ηλεκτρομηχανικού συστήματος από ότι στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Επίσης, μπορούν να δεχτούν τον άνεμο από οποιαδήποτε διεύθυνση, έτσι δε χρειάζονται πτερύγιο ή αυτόματο σύστημα προσανατολισμού. Είναι ικανές να λειτουργούν και στους πολύ δυνατούς ανέμους χωρίς να δημιουργούνται τεχνικά προβλήματα στην κατασκευή. Επομένως δε χρειάζονται δισκόφρενο για μείωση των στροφών και τα πτερύγια τους δεν κινδυνεύουν από μηχανικές καταπονήσεις με αποτέλεσμα ο σχεδιασμός τους να είναι απλούστερος, άρα και πιο οικονομικός από αυτόν των αντίστοιχων οριζόντιου άξονα.

Πέρα από τις προηγούμενες διαφορές, που τις έκαναν να πλεονεκτούν έναντι των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα, υπάρχουν και αυτές που τις κάνουν να μειονεκτούν εμφαντικά. Βασικό και ανυπέρβλητο πρόβλημα των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι ότι έχουν πολύ μικρότερη απόδοση (περίπου 15%) σε σχέση με αυτές του οριζόντιου άξονα (περίπου 30%-40%). Αυτό σημαίνει ότι για να έχει μια ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα περίπου ίδια απόδοση με αυτή της οριζόντιου άξονα, θα πρέπει να έχει μέχρι και τριπλάσια επιφάνεια επαφής με τον αέρα, που συνεπάγεται μεγαλύτερο όγκο και βάρος της κατασκευής, άρα και περισσότερα έξοδα. Τέλος, επειδή υποστηρίζουν μικρότερο αριθμό στροφών το λεπτό, χρειάζονται ισχυρούς ανέμους για να ξεκινήσουν να λειτουργούν και αν αυτό δεν είναι εφικτό, συνήθως υπάρχει και μικρότερη ανεμογεννήτρια που βοηθά τη μεγαλύτερη να ξεκινήσει τη φόρτιση των συσσωρευτών. Βασικοί τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα αποτελούν ο τύπος Savonius (Εικόνα 1-33) και ο τύπος Darrieus (Εικόνα 1-34). [1-7], [1-12]



Εικόνα 1-33: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα τύπου Savonius [1-13]



Εικόνα 1-34: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα τύπου Darrieus

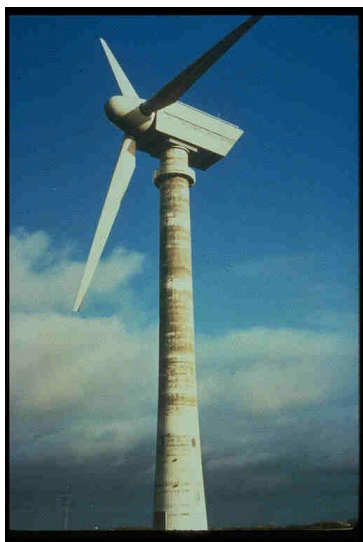
1.4 Πυλώνες ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα

Ο πυλώνας των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα αποτελεί ένα βασικό και αναπόσπαστο κομμάτι της κατασκευής. Χρήση του είναι να στηρίζει το κέλυφος, το οποίο περιέχει εσωτερικό τον ηλεκτρομηχανικό

εξοπλισμό και το δρομέα σε ένα ύψος, ώστε να δέχεται ισχυρότερους ανέμους από ότι στη στάθμη του εδάφους, αφού όσο αυξάνεται το ύψος αυξάνεται και η ένταση του ανέμου. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα (EN1991-1.4), το κατά πόσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου σε σχέση με το ύψος εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους, η οποία είναι σαφώς μεγαλύτερη σε συστήματα ξηράς. Για μεγαλύτερη, λοιπόν, απόδοση σε τέτοια συστήματα, θα πρέπει οι πυλώνες να έχουν ένα αρκετά μεγάλο ύψος. Έχει υπολογιστεί ότι το βέλτιστο ύψος ενός πυλώνα, για ισορροπία μεταξύ κόστους υλικού και απόδοσης της κατασκευής, θα πρέπει να είναι περίπου δύο με τρεις φορές μεγαλύτερο από το μήκος ενός πτερυγίου.

Τα δύο βασικά υλικά που παρατηρούνται στην κατασκευή πυλώνων είναι ο χάλυβας και το σκυρόδεμα. Οι χαρακτηριστικοί τύποι πυλώνων ανεμογεννητριών συνοψίζονται στους χαλύβδινους σωληνωτούς (Εικόνα 1-29), στους χαλύβδινους δικτυωτούς (Εικόνα 1-17), στους χαλύβδινους μικρής διατομής στηριζόμενους από καλώδια (Εικόνα 1-22), στους πυλώνες από σκυρόδεμα (Εικόνα 1-35), πιο σπάνια στο συνδυασμό σκυρόδεμα στη βάση του πυλώνα και χάλυβα προς την κορυφή (Εικόνα 1-36). [1-7]

Σε αυτή τη διπλωματική θα μελετηθεί μια νέα μορφή πυλώνα διατομής τύπου sandwich, δηλαδή δύο μεταλλικών ελασμάτων που περικλείουν (εξωτερικά και εσωτερικά) έναν πυρήνα σκυροδέματος, η οποία θα συνδυάζεται με αμιγώς χαλύβδινη διατομή, σε μορφή υβριδικού πυλώνα. Λεπτομερειακά θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 2.



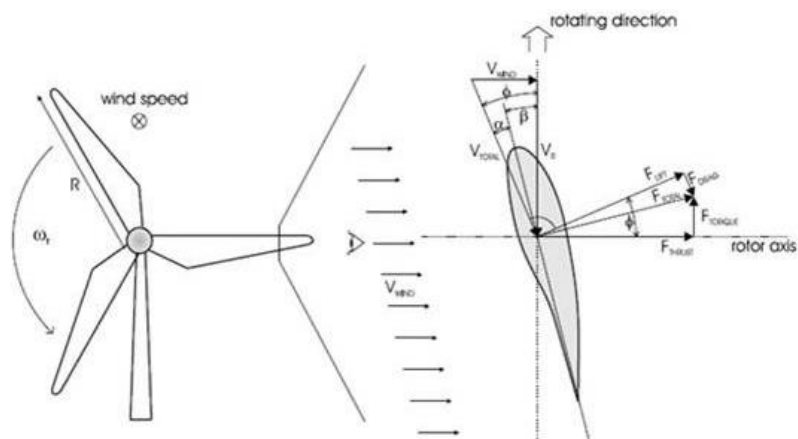
Εικόνα 1-35: Πειραματική ανεμογεννήτρια Tjaereborg με πυλώνα σκυροδέματος (1986) [1-4]



Εικόνα 1-36: Ανεμογεννήτρια με υβριδικό πυλώνα, από σκυρόδεμα στη βάση και χάλυβα στην κορυφή

1.4.1 Χαλύβδινι σωληνωτοί πυλώνες

Στις μέρες μας, ο σωληνωτός πυλώνας από χάλυβα, αποτελεί την πιο συχνή επιλογή, λόγω κυρίως της αυτοματοποιημένης διαδικασίας ανέγερσης του. Το σχήμα τους μπορεί να είναι είτε κυλινδρικό είτε κολουροκωνικό. Στη συνήθη περίπτωση της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα με τοποθέτηση των πτερυγίων έτσι ώστε ο άνεμος να έχει παράλληλη ροή προς αυτά, η ανεμοπίεση μπορεί να αναλυθεί στα πτερύγια μέσω δύο δυνάμεων. Η κατακόρυφη συνιστώσα ονομάζεται άνωση (lift) και δημιουργεί καμπτικές ροπές στον πυλώνα και η οριζόντια ονομάζεται οπισθέλκουσα (drag) και δημιουργεί στρεπτική ροπή στον πυλώνα (Εικόνα 1-37) [1-14]. Οι καμπτικές ροπές είναι μεγαλύτερες στη βάση του πυλώνα λόγω του μοχλοβραχίονα από την κορυφή, ενώ η στρεπτική ροπή δημιουργείται λόγω της απόστασης του διαμήκους άξονα του πυλώνα με το άκρο του άξονα του ρότορα. Για να μειωθεί αυτή η απόσταση, αλλά κυρίως για τη σταδιακή αύξηση της αντοχής του πυλώνα από την κορυφή προς τη βάση (όπου ασκούνται τα μεγαλύτερα φορτία), δημιουργήθηκε η λύση του κολουροκωνικού σχήματος πυλώνα.



Εικόνα 1-37: Ροή ανέμου και ισοδύναμες δυνάμεις στο πτερύγιο του ρότορα [1-14]

Οι μικρού ύψους πυλώνες μπορούν να κατασκευαστούν στο εργοστάσιο και απλώς να μεταφερθούν στο εργοτάξιο συνδέοντάς τους κοχλιωτά με τη θεμελίωση. Οι πυλώνες μεγάλου ύψους, αφού δεν μπορούν να μεταφερθούν ολόκληροι, μεταφέρονται σε προκατασκευασμένα κυλινδρικά τμήματα, τα οποία ύστερα συνδέονται στο εργοτάξιο. Συνήθως, η σύνδεση των επιμέρους τμημάτων γίνεται με κοχλίωση από προεντεταμένους κοχλίες και πιο σπάνια με συγκόλληση, η οποία δεν είναι ακριβής όταν πραγματοποιείται στο φυσικό περιβάλλον και όχι στο εργοστάσιο. Η προεντεταμένη κοχλίωση είναι απαραίτητη για να αυξηθεί η αντοχή τους έναντι του φαινομένου της κόπωσης, η οποία δημιουργείται από τη δυναμική φόρτιση του ανέμου και την επακόλουθη κυκλική φόρτιση των κοχλιών.

Τα προκατασκευασμένα κυλινδρικά τμήματα που μεταφέρονται στο εργοτάξιο, περνούν από μια διαδικασία παραγωγής στο εργοστάσιο. Ελάσματα συνήθως πάχους από 10mm έως 50mm και πλάτους 2m, καμπυλώνονται (Εικόνα 1-38) και ενώνονται μεταξύ τους με διαμήκη συγκόλληση δημιουργώντας κυκλική διατομή (Εικόνα 1-39). Ένας αριθμός ελασμάτων τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο και συγκολλούνται εγκάρσια δημιουργώντας κυλινδρικό τμήμα μήκους έως και 30m (Εικόνα 1-40), αναλόγως με τις συνθήκες μεταφοράς (Εικόνα 1-41). Στο άνω και στο κάτω άκρο του κυλινδρικού τμήματος συγκολλούνται εσωτερικοί δακτύλιοι (φλαντζες) (Εικόνα 1-43). Στο εργοτάξιο τοποθετείται το ένα τμήμα πάνω από το άλλο (Εικόνα 1-42) και ενώνονται με κοχλίωση μέσω των φλαντζών (Εικόνα 1-44). Το πάνω άκρο του ανώτερου τμήματος ενώνεται κοχλιωτά με την άτρακτο, ενώ το κάτω άκρο του κατώτερου τμήματος συνδέεται κοχλιωτά με μια ειδική κατασκευή, η οποία ενσωματώνεται στη βάση όταν διαστρώνεται το σκυρόδεμα (Εικόνα 1-45). Τέλος, τα προκατασκευασμένα κυλινδρικά τμήματα προστατεύονται επιφανειακά στην εξωτερική τους επιφάνεια από διάβρωση μέσω αμμοβολής, γαλβανισμού (εμβάπτιση σε τηγμένο μέταλλο) και επιστρώσης με δύο ή τρεις στρώσεις βαφής. [1-7], [1-15]



Εικόνα 1-38: Καμπύλωση ελασμάτων [1-15]



Εικόνα 1-39: Συγκόλληση επιμέρους ελασμάτων [1-15]



Εικόνα 1-40: Συγκόλληση επιμέρους καμπυλωμένων ελασμάτων χάλυβα και δημιουργία επιμέρους τμημάτων για μεταφορά στο εργοτάξιο [1-15]



Εικόνα 1-41: Μεταφορά τμημάτων στο εργοτάξιο [1-15]



Εικόνα 1-42: Ανέγερση επιμέρους τμημάτων στο εργοτάξιο για σχηματισμό του πυλώνα [1-15]



Εικόνα 1-43: Δακτύλιοι (φλάντζες) σε κάθε άκρο των επιμέρους τμημάτων [1-15]

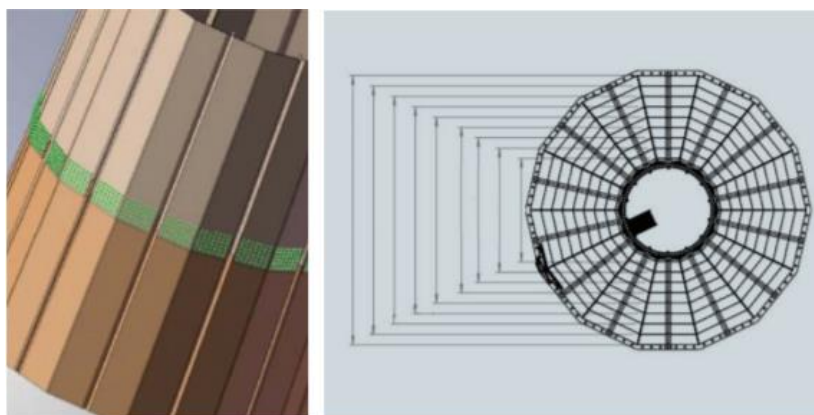


Εικόνα 1-44: Κοχλίωση με προένταση διαδοχικών τμημάτων μέσω των φλαντζών [1-15]



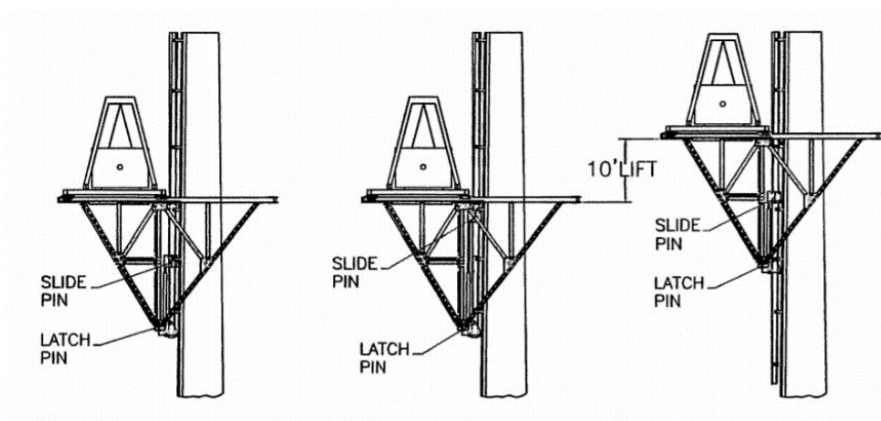
Εικόνα 1-45: Ενσωμάτωση της διατομής θεμελίωσης του πυλώνα στη θεμελίωση [1-4]

Ωστόσο, η μεταφορά των επιμέρους τμημάτων στο εργοτάξιο περιορίζεται από οδικούς λόγους, οι οποίοι επιτρέπουν τη μεταφορά κυλινδρικών τμημάτων ακτίνας μέχρι 4.3m, η οποία για αποφυγή λυγισμού μπορεί να ερμηνευθεί με ύψος πυλώνα έως περίπου 90m. Για μεγαλύτερα ύψη απαιτούνται και μεγαλύτερες διαμέτροι βάσης. Ένας τρόπος για να λυθεί το πρόβλημα της μεταφοράς τμημάτων μεγάλων διαμέτρων είναι η αλλαγή στη σύνθεσή της. Ο Δανός Andersen σε συνεργασία με τη Siemens πρότεινε τη μεταφορά μεταλλικών κελυφών (πανέλων) στο εργοτάξιο και σύνδεση τους με προεντεταμένους κοχλίες, σχηματίζοντας κυλινδρικά τμήματα βάσης μεγαλύτερα από τα 4.3m (Εικόνα 1-46). [1-16]



Εικόνα 1-46: Ένωση πανέλων και δημιουργία διατομής βάσης [1-16]

Για τη δημιουργία του πυλώνα, απαιτείται η ανέγερση αυτών των κυλινδρικών τμημάτων. Ο πιο συνηθής τρόπος ανέγερσης είναι με τη βοήθεια γερανών στο σημείο του εργοταξίου, τοποθετώντας το ένα κομμάτι πάνω από το άλλο και συνδέοντας τα με προεντεταμένη κοχλίωση μέσω των εσωτερικών δακτυλίων. Στην περίπτωση μη διαθεσιμότητας γερανών, υπάρχει και η λύση των «αυτο-ανεγέρσιμων ανεμογεννητριών». Κατά αυτόν τον τρόπο, κατασκευάζεται μια πλατφόρμα στο εργοτάξιο, η οποία κινείται παράλληλα καθ' ύψος της ανέγερσης του πυλώνα και βοηθά στη σταδιακή ανέγερσή του (Εικόνα 1-47). [1-17]



Εικόνα 1-47: Σταδιακή ανέγερση πυλώνων με πλατφόρμα [1-17]

Τέλος, για τη συχνή παρακολούθηση και συντήρηση του ηλεκτρικού και μηχανολογικού εξοπλισμού της ανεμογεννήτριας, δημιουργείται ένα άνοιγμα ανθρωποθυρίδας στη βάση του πυλώνα. Η οπή αυτή όμως, παρουσιάζει θέματα συγκέντρωσης τάσεων και τοπικού λυγισμού. Για το λόγο αυτό ενισχύεται συνήθως με ένα πλαίσιο περιμετρικά συγκολλημένο στην παρειά του ανοίγματος (Εικόνα 1-48).



Εικόνα 1-48: Ανεμογεννήτρια στο Celle της Γερμανίας, ισχύος 2.5MW [1-18]

1.4.2 Δικτυωτοί πυλώνες

Όταν πρωτοεμφανίστηκαν οι δικτυωτοί πυλώνες στο εμπόριο αποτελούσαν αξιόπιστη λύση για τις μικρές ανεμογεννήτριες. Ωστόσο, η άνθηση των σωληνωτών πυλώνων, τους έκανε να περάσουν σε δεύτερη μοίρα. Όσπου, κρίθηκε αναγκαία η δημιουργία πυλώνων άνω των 100m σε ύψος.

Το μειονέκτημα στη μεταφορά μεγάλων διαμέτρων για τους σωληνωτούς, κατέστησε τους δικτυωτούς ως την καλύτερη λύση για τέτοια ύψη πυλώνων. Τα μικρά κομμάτια από τα οποία αποτελούνται, δεν παρουσιάζουν απολύτως κανένα πρόβλημα στη μεταφορά προς το εργοτάξιο. Επιπλέον, τα δικτυώματα έχουν το πλεονέκτημα εξοικονόμησης βάρους στην κατασκευή, άρα και τη μείωση τους κόστους κατασκευής. Τεχνικά, το φαινόμενο του λυγισμού εκδηλώνεται με άλλον τρόπο (σε μεμονωμένα μέλη) από ότι στους σωληνωτούς και είναι πιο εύκολο να ελεγχθεί, δημιουργώντας επιπλέον δεσμεύσεις με δευτερεύουσες ράβδους, μειώνοντας έτσι το κρίσιμο μήκος λυγισμού τους.

Πέρα όμως από τα οφέλη που προσφέρει η κατασκευή των δικτυωτών πυλώνων ανεμογεννητριών, υπάρχουν και μειονεκτήματα που απορρέουν από την κατασκευή τους. Κατ' αρχάς, ο χρόνος ανέγερσης των δικτυωτών πυλώνων είναι αρκετά μεγαλύτερος από ότι των σωληνωτών, λόγω της πολυπλοκότητάς τους και απαιτούν περισσότερο προσωπικό. Η σύνδεση των επιμέρους μελών απαιτεί τη χρήση αρκετών κοχλιών, οι οποίοι είναι εκτεθειμένοι στη δυναμική φόρτιση του ανέμου που προκαλεί φαινόμενα κόπωσης. Για το λόγο αυτό, απαιτούνται πολύ συχνοί έλεγχοι των κοχλιώσεων, κατάσταση η οποία δε συμβαίνει σε τέτοιο βαθμό με τους σωληνωτούς πυλώνες. Λιγότερο σημαντικό αλλά αξιοσημείωτο αποτελεί και το αισθητικό κομμάτι της κατασκευής. Υποστηρίζεται αρκετά ότι από κοντινές αποστάσεις οι σωληνωτοί πυλώνες επικρατούν αισθητικά έναντι των δικτυωτών, ενώ σε μακρινές αποστάσεις τα κενά μεταξύ των ράβδων του δικτυώματος, το κάνει να προσαρμόζεται καλύτερα με το υπόλοιπο περιβάλλον.

1.4.3 Πυλώνες από σκυρόδεμα

Στις μέρες μας, οι πυλώνες από σκυρόδεμα, όπως και οι δικτυωτοί, έχουν περιοριστεί λόγω της ανάπτυξης των χαλύβδινων σωληνωτών. Βεβαίως αυτοί οι πυλώνες οπλίζονται με χαλαρό χάλυβα οπλισμού και σε αρκετές περιπτώσεις υφίστανται και προένταση, η οποία ωστόσο αυξάνει αρκετά το κόστος κατασκευής. Από τη μία πλευρά, δεν παρουσιάζουν ανυπέβλητα εμπόδια στον τρόπο μεταφοράς τους και είναι εφικτή η αύξηση της φέρουσας ικανότητάς τους μόνο με αύξηση του πάχους τους χωρίς περαιτέρω αλλαγές στη διάμετρο της βάσης τους. Από την άλλη, το βάρος τους είναι αρκετά μεγαλύτερο από τους χαλύβδινους πυλώνες, όπως και ο χρόνος ανέγερσής τους. Αυτός ο τύπος πυλώνα ανεμογεννήτριας μπορεί να διακριθεί αναλόγως με τον τρόπο κατασκευής σε επί τόπου έγχυσης σκυροδέματος και σε κατασκευή με προκατασκευασμένα τμήματα.

Κατά τον πρώτο τρόπο κατασκευής, ο πυλώνας ανεμογεννήτριας ανεγείρεται με έγχυση σκυροδέματος απευθείας στο εργοτάξιο. Το σκυρόδεμα αυτό μπορεί είτε να δημιουργηθεί στο χώρο της κατασκευής είτε να συνδεθεί στο εργοστάσιο και να μεταφερθεί εκεί οδικώς. Στήνονται ειδικά καλούπια (αναρριχόμενος ξυλότυπος) μέσα στα οποία χύνεται συνεχώς το σκυρόδεμα μέχρι να φτάσει στην κορυφή του πυλώνα και να στερεοποιηθεί, αφού πρώτα έχει τοποθετηθεί και η κατάλληλη ποσότητα χάλυβα οπλισμού. Στην περίπτωση προέντασης, τοποθετούνται εσωτερικά στα τοιχώματα σωλήνες περιβολής μέσα από τους οποίους περνούν τα συρματόσχοινα προέντασης και προεντίνονται αφότου έχει σκληρυνθεί το σκυρόδεμα. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά χρονοβόρα και είναι εφικτή μόνο σε ήπιο κλίμα περιβάλλοντος. Αν το κλίμα είναι ψυχρό, τότε απαιτούνται μέθοδοι θέρμανσης του σκυροδέματος για ανέγερση.

Ο δεύτερος τρόπος ανέγερσης αφορά προκατασκευασμένα τμήματα, τα οποία δημιουργούνται στο εργοστάσιο και μεταφέρονται για σύνδεση στο εργοτάξιο. Η μέθοδος αυτή εξαλείφει τα περιβαλλοντικά προβλήματα που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη μέθοδο και μειώνει τα επιπλέον έξοδα από τη σύνθεση σκυροδέματος στο χώρο ανέγερσης. Μέσα στα τμήματα αυτά υπάρχει ήδη ο χάλυβας οπλισμού και σύνδεση των κομματιών γίνεται στο εργοτάξιο με τη χρήση ενός μείγματος σκυροδέματος/ρητινής. Στην περίπτωση προέντασης, τα προκατασκευασμένα τμήματα προεντίνονται στο εργοστάσιο μέσω προεντεταμένης κλίνης, πριν τη σκλήρυνση του σκυροδέματος σε ειδικά διαμορφωμένους στεγασμένους χώρους. [1-7], [1-18]

1.5 Βιβλιογραφία

[1-1] Fthenakis V., Kim H. C., "Land use and electricity generation: A life-cycle analysis", 2009.

[1-2] <http://www.wwindea.org>

[1-3] <http://historicaliran.blogspot.gr/2012/03>

[1-4] Hau E, "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics", Springer, 2nd English Edition, 2006.

[1-5] <http://ww.telosnet.com/wind>

[1-6] <http://www.windsofchange.dk>

[1-7] Dimopoulos C.A., "Stiffening of manhole opening of steel wind turbine tower shells - Experimental and numerical investigation", Ph.D. Thesis, National Technical University of Athens, Greece, 2012, [In Greek].

[1-8] <http://www.hydroquebec.com/learning/eolienne/historique-eolien-hydro-quebec.html>

[1-9] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=celex%3A32009L0028>

[1-10] <https://www.wired.com/2015/05/future-wind-turbines-no-blades>

[1-11] <http://ape1epalsyrou.weebly.com/alphanuepsilonmuomicrongammaepsilonnunu942taurhoiotaepsilonsigmaf.html>

[1-12] <http://www.anemogennitria.gr/articles.htm>

[1-13] <http://www.turbinesinfo.com/innovative-wind-turbines/>

[1-14] <https://nucleus2012.wordpress.com/2016/01/10/>

[1-15] Gantes et al., "Technical report of design and construction methodology of sandwich-type wind turbine towers", *Project "Aristeia II – Novel design concepts for ENergy related Steel STRuctures using Advanced Materials (ENSSTRAM)"*, Workpackage 6, Deliverable 6.1, 2015.

[1-16]https://www.energy.siemens.com/us/pool/hq/powergeneration/renewables/windpower/Bolted_Steel_Shell_Tower_brochure_EN.pdf

[1-17]https://www.xcelenergy.com/staticfiles/xcel/Corporate/Renewable%20Energy%20Grants/Blattner_SelfErectingWindTurbine2005Report.pdf

[1-18] Staffan Engström, Tomas Lyrner, Manouchehr Hassanzadeh, Thomas Stalin and John Johansson, "Tall towers for large wind turbines", *Report from Vindforsk project V-342 Höga torn för vindkraftverk*, July 2010.

2 ΠΥΛΩΝΕΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΥΠΟΥ SANDWICH

2.1 Αναγκαιότητα πυλώνων διατομής τύπου sandwich

Στις μέρες μας, οι απαιτήσεις στην αιολική ενέργεια αυξάνονται, αφού όλο και περισσότερος κόσμος στρέφεται στη λύση των ανεμογεννητριών. Η σημερινή συνολική ισχύς των διεθνώς εγκατεστημένων ανεμογεννητριών υπερβαίνει τα 500 GW [2-1], ενώ η ισχύς των αιολικών πάρκων που εγκαταστάθηκαν το 2016 ανήλθε στο 34% επί του συνόλου της εγκατεστημένης ισχύος από ανανεώσιμες πηγές κατά τη χρονιά αυτή [2-2]. Για την κάλυψη αυτών των αναγκών, κάθε ανεμογεννήτρια που δημιουργείται (παράκτια ή χερσαία) πρέπει να είναι σε θέση να παράγει μια ισχύ της τάξης των μερικών MW (γύρω στα 10MW). Αυτή η ισχύς επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση της μεγαλύτερης ταχύτητας ανέμου, η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση του δρομέα από το έδαφος, γεγονός που οδηγεί στην ανάγκη δημιουργίας πυλώνων με μεγάλα ύψη, άνω των 100m. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται σε τέτοια υψόμετρα στην περίπτωση των χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων είναι η ανάγκη για διαμέτρους βάσης μεγαλύτερης των 4.3m. Το μέγεθος αυτό της διατομής αποτελεί και άνω όριο για μεταφορά λόγω οδικών περιορισμών (ύψος γεφυρών, σηράγγων, καμπυλότητα στροφών, εύρος δρόμου κλπ.) σε απρόσιτα συνήθως σημεία αναφορικά με τις επίγειες ανεμογεννήτριες, ενώ για τις υπεράκτιες δημιουργείται θέμα με το σημαντικό επιπλέον κόστος που απαιτείται για μεταφορά (μέγεθος και ικανότητα γερανών και πλοίων). Επίσης, ο χωρισμός της διατομής βάσης σε τμήματα, που ξεπερνούν σε πάχος τα 30mm, για συναρμολόγηση στο εργοτάξιο, μπορεί να αυξάνει αρκετά τα κατασκευαστικά έξοδα και τα ίδια βάρη του χάλυβα. [2-3]

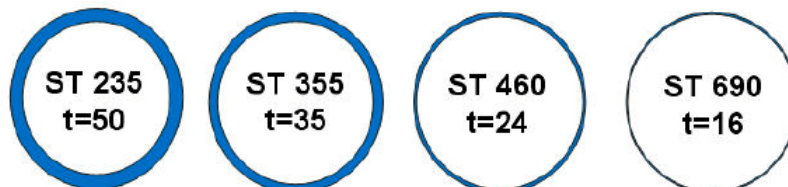
Σκοπός κάθε μηχανικού είναι να καταφέρει όσο το δυνατόν να αυξήσει τη φέρουσα ικανότητα ενός φορέα σε συνδυασμό με τη μείωση του ίδιου βάρους, άρα και του κόστους κατασκευής. Για το λόγο αυτό ο Γερμανός ερευνητής Schaumann [2-3], εξέτασε τον καμπτικό λυγισμό σε μέλη κυκλικής διατομής διαμέτρου 5.5m και ύψους 30m, αυξάνοντας την ποιότητα του χάλυβα σε αναλογική μείωση με το πάχος του, για να έχει νόημα το αρχικό σκεπτικό περί μείωσης ίδιου βάρους και ταυτόχρονα αύξησης της φέρουσας ικανότητας. Ωστόσο, παρατήρησε ότι η οριακή τάση λυγισμού μειωνόταν σε σχέση με το όριο διαρροής της διατομής (Εικόνα 2-1). Έτσι σκέφτηκε να συνδυάσει τα ελάσματα χάλυβα μεγάλης αντοχής, με την αντίστοιχη μείωση στο βάρος (μικρά πάχη), με ένα υλικό που να τους προσφέρει αντοχή στο λυγισμό χωρίς να επιβαρύνει την κατασκευή με πολύ περισσότερο ίδιο βάρος. Αποτέλεσμα αυτής της λογικής ήταν η δημιουργία των πυλώνων sandwich, οι οποίοι αποτελούνται από ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό έλασμα χάλυβα και ενδιάμεσα στον πυρήνα ένα υλικό που να συνεργάζεται αρκετά καλά

με το χάλυβα. Τρεις τύποι διατομών sandwich δημιουργήθηκαν ανάλογα με το αν το υλικό του πυρήνα είναι ελαστομερές (SES), κονίαμα (SGS) ή σκυρόδεμα (SCS) (Εικόνα 2-2).

Η καινοτόμα αυτή διατομή δύναται να αυξήσει τη δυσκαμψία της κατασκευής, λόγω της απομάκρυνσης των ελασμάτων χάλυβα και της χρήσης του υλικού του πυρήνα, με μικρή αναλογικά αύξηση του ίδιου βάρους και του κόστους. Επίσης, η χρήση του υλικού του πυρήνα αναμένεται να συμβάλει και στην αύξηση του οριακού φορτίου αντοχής μέσω της προστασίας των ελασμάτων στον κίνδυνο του τοπικού λογισμού, ενώ από την άλλη μεριά τα ελάσματα μπορούν να παίζουν το ρόλο της περίσφιξης για το υλικό του πυρήνα, βελτιώνοντας την αντοχή του. Αναλογικά με αυτά τα αποτελέσματα αναμένεται και μικρή αύξηση του ίδιου βάρους και του κόστους της κατασκευής.

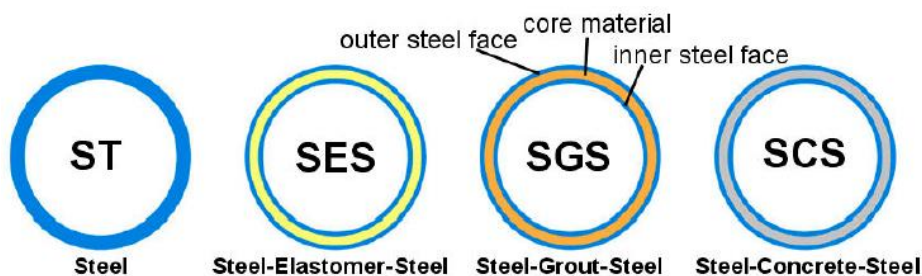
Βεβαίως, η χρήση της διατομής sandwich στους πυλώνες ανεμογεννητριών, μπορεί να μην απαιτείται σε ολόκληρο το ύψος της. Τα χαμηλότερα τμήματα του πυλώνα δέχονται τη μεγαλύτερη καμπτική ροπή από τη δύναμη των πτερυγίων και τον άνεμο σε συνδυασμό με το ίδιο βάρος του φορέα και του κελύφους με τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό. Έτσι, προκείμενου να επιτευχθεί λύση στο πρόβλημα των μεγάλων και αμετακίνητων οδικά χαλύβδινων διατομών που απαιτούνται στα χαμηλά τμήματα του πυλώνα, μπορεί να γίνει χρήση της διατομής sandwich έως ένα υψόμετρο (συνήθως μέχρι τη μέση), η οποία έχει τη δυνατότητα να αντέξει την εξωτερική προαναφερθείσα φόρτιση, χωρίς να παρουσιάζει προβλήματα στη μεταφορά. Το υπόλοιπο κομμάτι του πυλώνα, το οποίο βρίσκεται ψηλότερα και δεν αναπτύσσει τόσο μεγάλα εντακτικά μεγέθη, μπορεί να είναι από αμιγώς χαλύβδινη διατομή, που είναι κατασκευαστικά απλούστερη. Δημιουργείται, επομένως, η λύση ενός υβριδικού πυλώνα ανεμογεννήτριας, με διατομή τύπου sandwich στα χαμηλότερα τμήματα του πυλώνα και μια αμιγώς χαλύβδινη στα υψηλότερα (Εικόνα 2-3).

Section:
H = 30 m
D = 5.5 m
t = const.

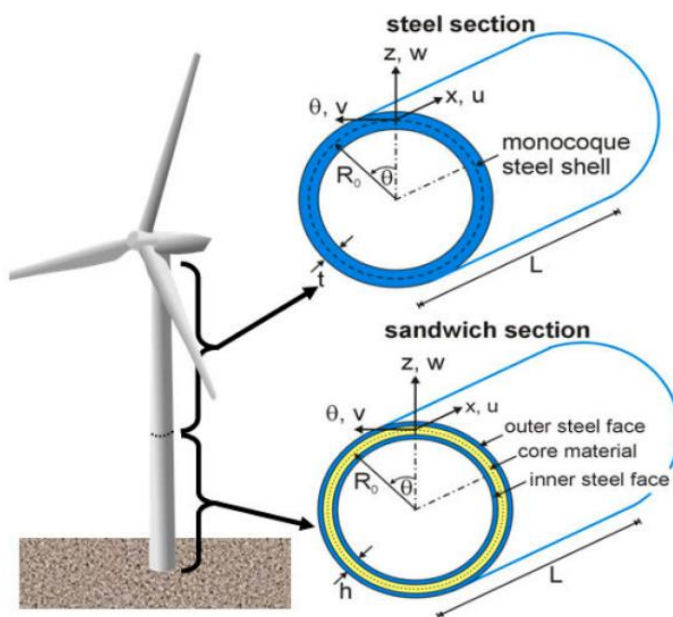


Steel grade	S 235	S 355	S 460	S 690
$f_{y,k,red}$ [MPa]	215 for t=50	345 for t=35	460 for t=24	690 for t=16
$\sigma_{x,cr}$ [MPa]	2011	1459	1032	706
λ_s [-]	0.33	0.49	0.67	0.99
κ_2 [-]	0.93	0.78	0.61	0.31
$\sigma_{x,cr,k}$ [MPa]	199	269	280	215
$\sigma_{x,cr,k} / f_{y,k}$ [%]	85 %	76 %	61 %	31 %

Εικόνα 2-1: Οριακή τάση λυγισμού σε σχέση με το όριο διαρροής 4 διαφορετικών σε πάχος και ποιότητα χάλυβα διατομών [2-3]



Εικόνα 2-2: Τύποι διατομών sandwich με υλικά πυρήνα το ελαστομερές, το κονίαμα και το σκυρόδεμα [2-3]



Εικόνα 2-3: Πυλώνας ανεμογεννήτριας με διατομή τύπου sandwich κοντά στη βάση και αμιγώς χαλύβδινη κοντά στην κορυφή [2-3]

2.2 Σύγκριση διατομών sandwich με τις αμιγώς χαλύβδινες

Η εφαρμογή των πυλώνων sandwich βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο και για αυτό το λόγο, κρίνεται σκόπιμη η σύγκριση αυτού του τύπου διατομών με τις πιο συνηθισμένες που κυκλοφορούν και κατασκευάζονται στο εμπόριο, δηλαδή τις χαλύβδινες. Η σύγκριση αφορά στη φέρουσα ικανότητα των επιμέρους διατομών και στο συνολικό ίδιο βάρος τους μέσα από την αλλαγή κάποιων παραμέτρων τους, όπως είναι το πάχος των χαλύβδινων ελασμάτων, η ποιότητα του χάλυβα, το πάχος του πυρήνα της διατομής sandwich και το υλικό του πυρήνα. Λόγω της γεωμετρίας τους, οι πυλώνες είναι αρκετά ευπαθείς στο λυγισμό και για αυτό εξετάστηκαν πρώτα αριθμητικά και έπειτα πειραματικά οι διαφορετικές διατομές με γνώμονα την αντοχή στον καμπτικό λυγισμό από το Γερμανό Schaumann.

2.2.1 Αναλυτική και αριθμητική σύγκριση

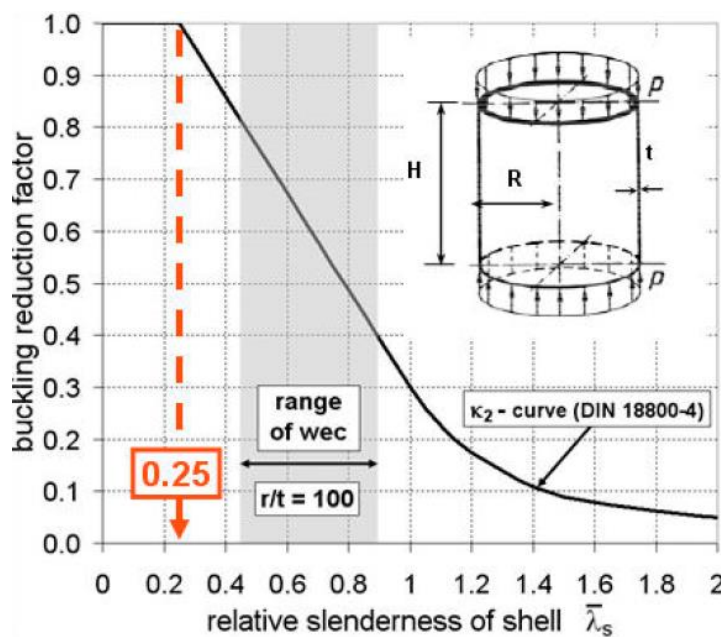
Σύμφωνα με τον Schaumann, η σύγκριση αυτή έγινε για μεταλλικές διατομές (Εικόνα 2-1) και δύο παραλλαγών διατομών sandwich, μία με υλικό πυρήνα το κονίαμα (SGS) και μία με υλικό πυρήνα το ελαστομερές (SES). Τα χαρακτηριστικά των διατομών αυτών συνοψίζονται (Πίνακας 2-1).

Πίνακας 2-1: Χαρακτηριστικά διατομών που χρησιμοποιήθηκαν στην αναλυτική και αριθμητική σύγκριση [2-3]

Τύπος	Πάχη υλικών $t_{-1} / t_0 / t_{+1}$ (mm)	E_0 (MPa)	Λόγος Poisson ν_0
ST S235	50	-	-
ST S460	24		
SGS S235	25 / t_0 / 25	33800	0.20
SGS S460	12 / t_0 / 12		
SES S235	25 / t_0 / 25	870	0.36
SES S235	12 / t_0 / 12		

Η πραγματική τάση λυγισμού εξαρτάται από την ανηγμένη λυγηρότητα και την κλάση των ατελειών (καμπύλη λυγισμού). Ο μειωτικός συντελεστής λυγισμού (κ_2) υπολογίζεται, σύμφωνα με το DIN 18800-4, από το Σχήμα 2-1 και ισχύει η εξ. (2-1).

$$\sigma_{x,Rk} = \kappa_2 * f_{y,k} \quad (2-1)$$



Σχήμα 2-1: Διάγραμμα ανηγμένης λυγηρότητας σε σχέση με το μειωτικό συντελεστή λυγισμού [2-3]

Για να μην υπάρξει μείωση του ορίου διαρροής του χάλυβα (κ_2) θα πρέπει να ισχύει η εξ. (2-2).

$$\bar{\lambda}_{sx} = \sqrt{(f_{y,k} / \sigma_{x,cr})} = 0.25 \quad (2-2)$$

Έτσι η βέλτιστη ελαστική κρίσιμη τάση για αποφυγή καμπτικού λυγισμού προκύπτει από την εξ. (2-3)

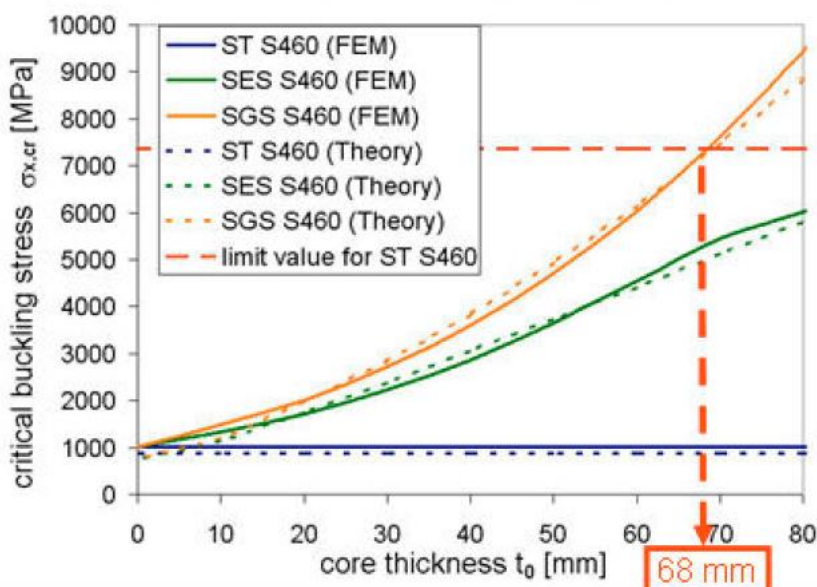
$$\sigma_{x,cr,opt} = f_{y,k} / \bar{\lambda}^2 = f_{y,k} / 0.25^2 = 16 * f_{y,k} \quad (2-3)$$

Με αυτό το σκεπτικό οι βέλτιστες ελαστικές κρίσιμες τάσεις αποφυγής καμπτικού λυγισμού προκύπτουν για τις χαλύβδινες διατομές (Πίνακας 2-2).

Πίνακας 2-2: Βέλτιστες τάσεις για μοναδιαίο συντελεστή απομείωσης της τάσης διαρροής λόγω λυγισμού [2-3]

Ποιότητα χάλυβα	Τάσεις (MPa)
S235	3760
S355	5680
S460	7360

Για τις διατομές τύπου sandwich, χρειάζεται ανάλυση γραμμικού λυγισμού (LBA) για τον προσδιορισμό του βέλτιστου πάχους του υλικού του πυρήνα ώστε να επιτευχθούν οι αντίστοιχες με της χαλύβδινης διατομής βέλτιστες ελαστικές κρίσιμες τάσεις αποφυγής καμπτικού λυγισμού. Με αντίστοιχα προσομοιώματα αριθμητικών αναλύσεων και αντίστοιχων αναλυτικών λύσεων που συντάχθηκαν από το Schaumann προέκυψε το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 2-2). Στον κατακόρυφο άξονα παρουσιάζονται οι τιμές των ελαστικών κρίσιμων τάσεων καμπτικού λυγισμού και στον οριζόντιο άξονα τα πάχη του υλικού του πυρήνα που απαιτούνται για αυτές τις τάσεις. Στην αντίστοιχη βέλτιστη τάση, έχουμε και το βέλτιστο πάχος του πυρήνα, για αντοχή χάλυβα ελασμάτων S460. Έτσι, στην περίπτωση του τύπου SGS 460, το βέλτιστο πάχος πυρήνα προκύπτει $t_0 = 68\text{mm}$, ενώ για τον τύπο SGS S235 προκύπτει πάχος πυρήνα $t_0 = 30\text{mm}$ (δεν παρουσιάζεται στο διάγραμμα). Για το πιο αδύναμο ελαστομερές, στην περίπτωση του SES S235, το πάχος του πυρήνα προκύπτει $t_0 = 35\text{mm}$, ενώ για το SES S460, πάνω από 100mm . Για την τελευταία περίπτωση συνιστάται να μην χρησιμοποιείται η βέλτιστη κρίσιμη τάση αποφυγής καμπτικού λυγισμού, αλλά μικρότερη, αφού οι πυλώνες ανεμογεννητριών σχεδιάζονται συνήθως στο σκιαγραμμένο εύρος (range of wec) (Σχήμα 2-1)



Σχήμα 2-2: Αριθμητικές και αναλυτικές καμπύλες σχέσης πάχους πυρήνα διατομής τύπου sandwich και κρίσιμη τάση καμπτικού λυγισμού και επιλογή βέλτιστου πάχους [2-3]

Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των αμιγώς χαλύβδινων διατομών και αυτών τύπου sandwich, παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 2-3). Ο κατακόρυφος άξονας δείχνει το μέγεθος του επιβαλλόμενου φορτίου λυγισμού, ενώ θεωρώντας ως διατομή αναφοράς την ST S235, φαίνεται η αύξηση στη φέρουσα ικανότητα σε σχέση με αυτή. Επίσης, στο παρακάτω σχήμα,

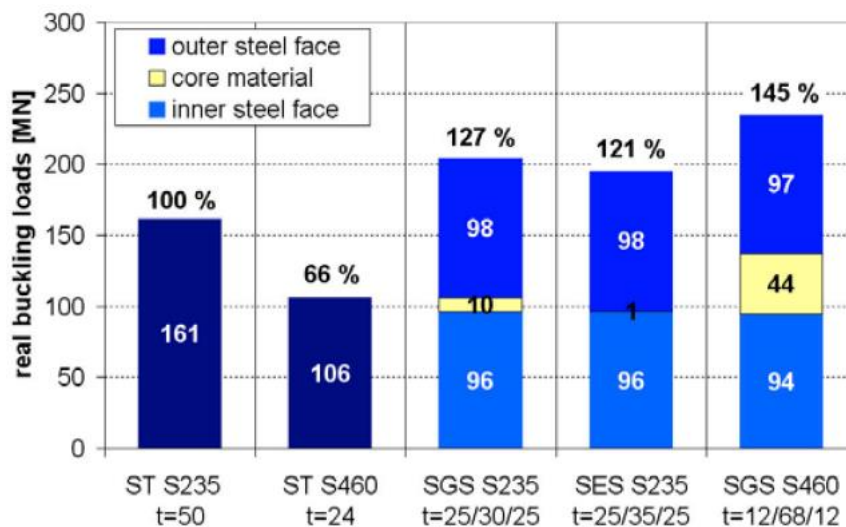
παρουσιάζεται και διαφοροποίηση στο βάρος των κατασκευών συγκριτικά με την αρχική χαλύβδινη διατομή (Σχήμα 2-4), θεωρώντας ειδικά βάρη των υλικών (Πίνακας 2-3).

Πίνακας 2-3: Πυκνότητες υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλυτικές και αριθμητικές συγκρίσεις

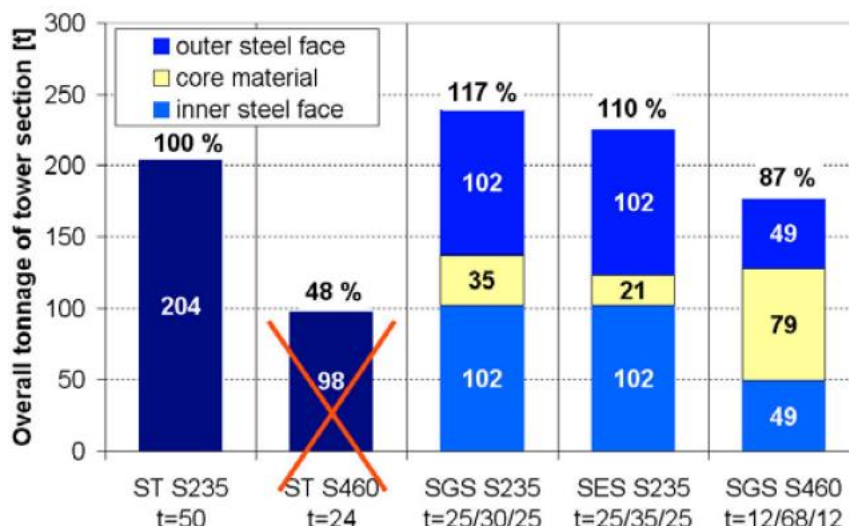
Υλικό	Πυκνότητα (kg/m ³)
Χάλυβας	7850
Κονίαμα	2280
Ελαστομερές	1150

Από τα θεωρητικά αυτά αποτελέσματα, γίνεται σαφής η εκπόνηση της αρχικής ιδέας των πυλώνων τύπου sandwich, δηλαδή της αύξησης της φέρουσας ικανότητας σε συνδυασμό με τη μείωση του ίδιου βάρους της κατασκευής. Η διατομή τύπου SGS S460, προσφέρει αύξηση στο κρίσιμο οριακό φορτίο καμπτικού λυγισμού κατά 45% και ταυτόχρονη μείωση του ίδιου βάρους κατά 13% σε σχέση με τη διατομή ST S235 που χρησιμοποιείται συνήθως στην κατασκευή των ανεμογεννητριών.

Βέβαια, πέρα από το κριτήριο της φέρουσας ικανότητας, πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι οικονομικές συνέπειες στη δημιουργία των πυλώνων τύπου sandwich σε σχέση με τις αμιγώς χαλύβδινες διατομές πυλώνων. Κατά το στάδιο της παραγωγής, οι διατομές τύπου sandwich φαίνεται να υστερούν, διότι απαιτούν τη δημιουργία 2 ελασμάτων αντί ενός και πέρα από αυτό, χρειάζεται να αναλογιστούμε τα περαιτέρω έξοδα λόγω της κατασκευής και σωστής διαδικασίας έγχυσης σκυροδέματος. Αντιθέτως, αναμένεται μια εξοικονόμηση λόγω του μικρότερου όγκου συγκολλήσεων που θα απαιτούνται με την επιλογή των τύπων sandwich, αφού ο όγκος των ραφών συγκολλήσεων μειώνεται στο τετράγωνο με τη μείωση του πάχους του χάλυβα.



Σχήμα 2-3: Σύγκριση της φέρουσας ικανότητας των διατομών τύπου sandwich σε σχέση με την αμιγώς χαλύβδινη διατομή ST S235 [2-3]



Σχήμα 2-4: Σύγκριση των ιδίων βαρών των διατομών τύπου sandwich σε σχέση με την αμιγώς χαλύβδινη ST S235 [2-3]

2.2.2 Πειραματική σύγκριση

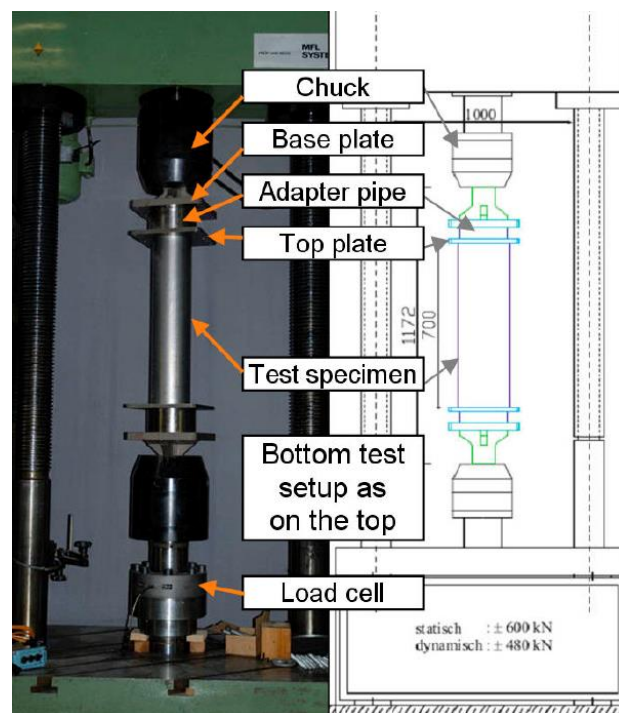
Το παρακάτω πείραμα συντάχθηκε στο πανεπιστήμιο Ανόβερου Leibniz στον τομέα των μεταλλικών κατασκευών και είχε ως στόχο να αναλύσει τη συμπεριφορά σε καμπτικό λυγισμό των διαφορετικών υλικών πυρήνων, καθώς και το κατά πόσο υπάρχει καλή συνεργασία και προσκόλληση των υλικών αυτών με τον περιμετρικό χάλυβα. Στα πειραματικά δοκίμια ασκείται μονοαξονική θλιπτική δύναμη μέσω μιας μηχανής που λειτουργεί με υδραυλική πίεση και μπορεί να φτάσει έως 600kN δύναμη άσκησης (Εικόνα 2-4). Οι μετατοπίσεις και οι παραμορφώσεις μετρούνται από οπτικούς τρισδιάστατους σένσορες, για να βρεθούν οι ζώνες αστοχίας του δοκιμίου. Τα διαφορετικά υλικά πυρήνα που εξετάστηκαν παρουσιάζονται με τα χαρακτηριστικά τους (Πίνακας 2-4). Ως υλικό χάλυβα χρησιμοποιήθηκε το X2CrTi12 ποιότητας S235 (Πίνακας 2-5). Τα πάχη των ελασμάτων από χάλυβα επιλέχθηκαν ώστε να έχουν μεγάλη ανηγμένη λυγηρότητα για ελαστικό λυγισμό, ενώ του πυρήνα προέκυψε αυτόματα από το μέγεθος της μηχανής άσκησης φορτίου.

Πίνακας 2-4: Μηχανικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών υλικών πυρήνα που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα [2-3]

Εταιρεία	Υλικό Πυρήνα	E ₀ (MPa)	f _{ck} 1 ^η ημέρα (MPa)	f _{ck} 28 ^η ημέρα (MPa)
Sika	Κονίαμα Grout 311	37000	28	78
Pagel	Κονίαμα V1/10	35300	39	91
Elastogran	Ελαστομερές	870	18	18

Πίνακας 2-5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών των πειραμάτων [2-3]

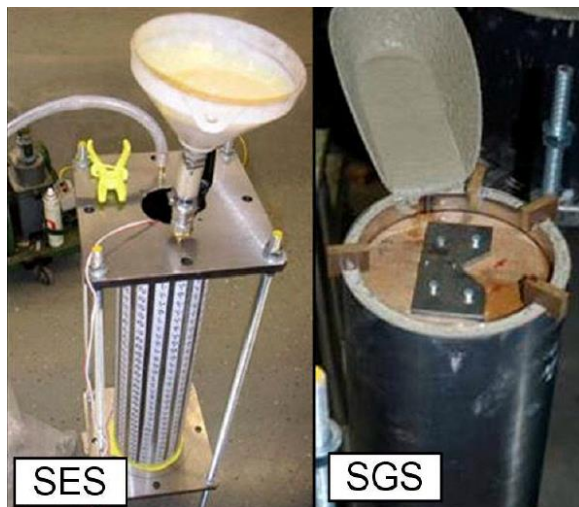
Τύπος	Μήκος (mm)	Ακτίνα έως πυρήνα (mm)	Στρώσεις $t_{-1}/t_0/t_{+1}$ (mm)
ST_1	700	72.55	0.7
ST_2		84.20	0.8
SGS_s		78.40	0.7/10.9/0.8
SGS_p			
SES			



Εικόνα 2-4: Διάταξη επιβολής μονοαξονικής δύναμης μέσω υδραυλικής πίεσης [2-3]

Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 2-5) φαίνεται ο τρόπος έγχυσης του ελαστομερούς και του κονιάματος. Η έγχυση του ελαστομερούς έγινε με αντλία μέσω βαλβίδας και κατά τη διάρκεια της είχαν τοποθετηθεί δύο μεταλλικές πλάκες στην κορυφή και στη βάση, ώστε να εξασφαλίσουν κλειστή κοιλότητα. Επίσης, επειδή το ελαστομερές διαστέλλεται (6% του όγκου του πυρήνα) λόγω εξώθερμης αντίδρασης, είναι βέβαιο ότι προσκολλάται πλήρως στα ελάσματα χάλυβα. Στην έγχυση του κονιάματος, το μόνο πρόβλημα είναι η συρρίκνωση που υφίσταται το υλικό, η οποία, ωστόσο, καταπολεμάται με επιπλέον έγχυση. Η σωστή προσκόλληση του κονιάματος στα ελάσματα επιβεβαιώθηκε έπειτα από κόψιμο της διατομής μετά από το πείραμα του καμπτικού λυγισμού. Τα πειράματα διεξήχθησαν αφού πρώτα έγινε οπτική καταγραφή των γεωμετρικών ατελειών των δοκιμίου και της έγχυσης. Οι παραμορφώσεις μετρήθηκαν μέσω μετρητών που τοποθετήθηκαν εξωτερικά των επιφανειών του χάλυβα, οι αξονικές

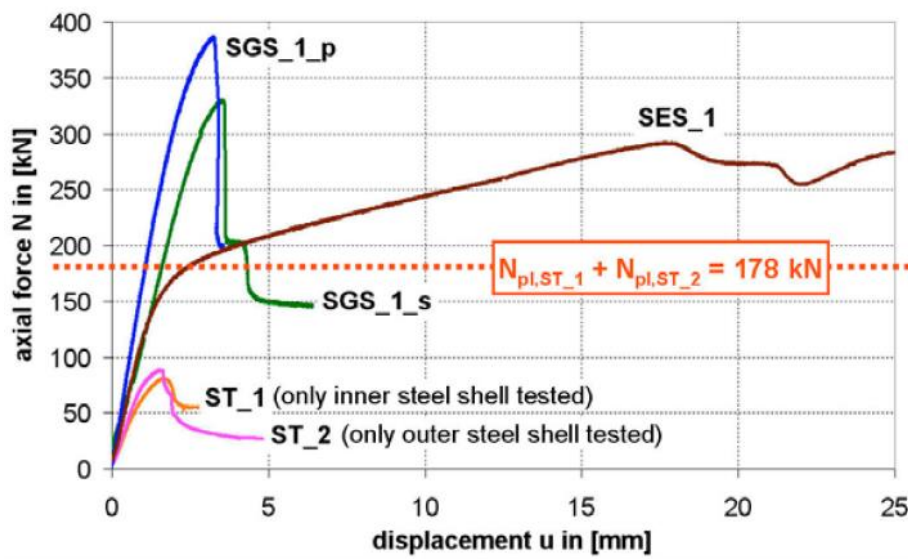
μετατοπίσεις μέσα από επαγωγικούς σένσορες και η αξονική δύναμη από ένα μηχανισμό (load cell) τοποθετημένο στην υδραυλική μηχανή.



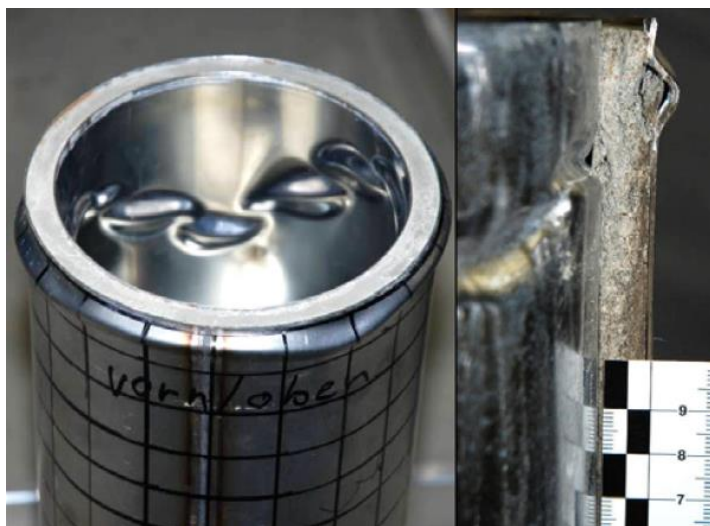
Εικόνα 2-5: Διάταξη έγχυσης ελαστομερούς και κονιάματος [2-3]

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρουσιάζονται γραφικά στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 2-5). Τα κρίσιμα φορτία λυγισμού όλων των δοκιμών sandwich, ξεπερνούν την αθροιστική πλαστική αξονική αντοχή των επιμέρους ελασμάτων που τα απαρτίζουν. Τα δοκίμια με τα κονιάματα αντέχουν όπως είναι λογικό υψηλότερο αξονικό θλιπτικό φορτίο από ότι το πιο αδύναμο ελαστομερές, ενώ η διαφορά μεταξύ των SGS_s και SGS_p οφείλεται στην υψηλότερη τάση αντοχής του υλικού της δεύτερης εταιρείας (Πίνακας 2-4). Παρατηρείται επίσης ότι οι τύποι δοκιμών με κονίαμα για υλικό πυρήνα, έχουν την ίδια απότομη πτώση μετά το οριακό φορτίο όπως και τα δοκίμια μόνο με το χάλυβα, ενώ το ελαστομερές προσδίδει καλύτερη μεταλυγισμική συμπεριφορά στο δοκίμιο. Αυτό οφείλεται στο εξαιρετικό «δέσιμο» που έχει ο χάλυβας με το ελαστομερές, το οποίο μπορεί να μεταβιβάσει τις δυνάμεις ακόμη και μετά την πλαστικοποίηση των ελασμάτων χάλυβα. Επιπλέον, η μη γραμμικότητα του SES εντοπίζεται γύρω στα 180kN, που είναι το άθροισμα των αντοχών των ελασμάτων στο τέλος της ελαστικότητάς τους. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί από τη μικρότερη δυσκαμψία και θλιπτική αντοχή του ελαστομερούς.

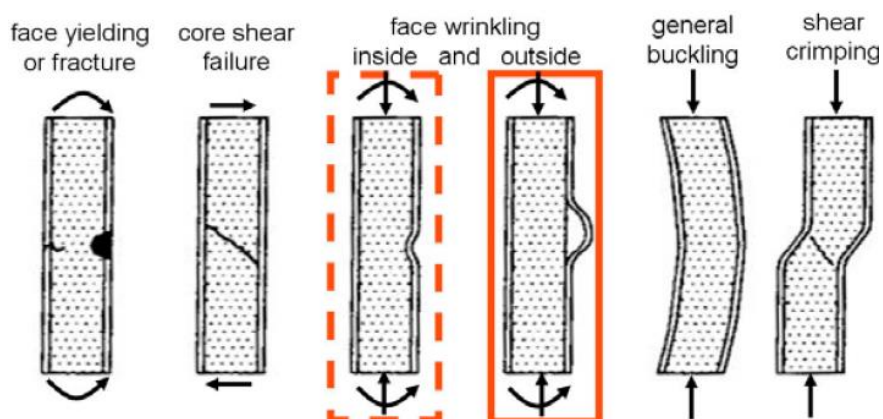
Από τη στιγμή που αποφεύχθηκε ο καθολικός λυγισμός, αιτία της αστοχίας υπήρξε ο τοπικός λυγισμός όπως φαίνεται και στην εικόνα (Εικόνα 2-6). Ο τοπικός λυγισμός σε μια κατασκευή με διατομή τύπου sandwich μπορεί να συμβεί είτε όταν αυτή υπόκειται σε αξονικό θλιπτικό φορτίο είτε στο θλιβόμενο μέρος της διατομής όταν υπόκειται σε καμπτικό φορτίο. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται μέσα σε πλαίσιο και οι 2 μορφές τοπικού λυγισμού που μπορεί να συμβούν (Εικόνα 2-7). Στα δοκίμια που εξετάστηκαν παρατηρήθηκε η 2^η μορφή τοπικού λυγισμού, δηλαδή η δημιουργία κενού μεταξύ υλικού πυρήνα και περιμετρικών ελασμάτων. Αυτό συνέβη διότι το υλικό του πυρήνα σε όλες τις περιπτώσεις έχει μεγαλύτερη αντοχή στη θλίψη από ότι στον εφελκυσμό, άρα ευνοείται η διόγκωση.



Σχήμα 2-5: Πειραματική σχέση αξονικής μετατόπισης και δύναμης των επιλεγμένων διατομών τύπου sandwich και των αμιγώς χαλύβδινων [2-3]



Εικόνα 2-6: Εμφάνιση αστοχίας μέσω τοπικού λυγισμού στη βάση του δοκιμίου [2-3]



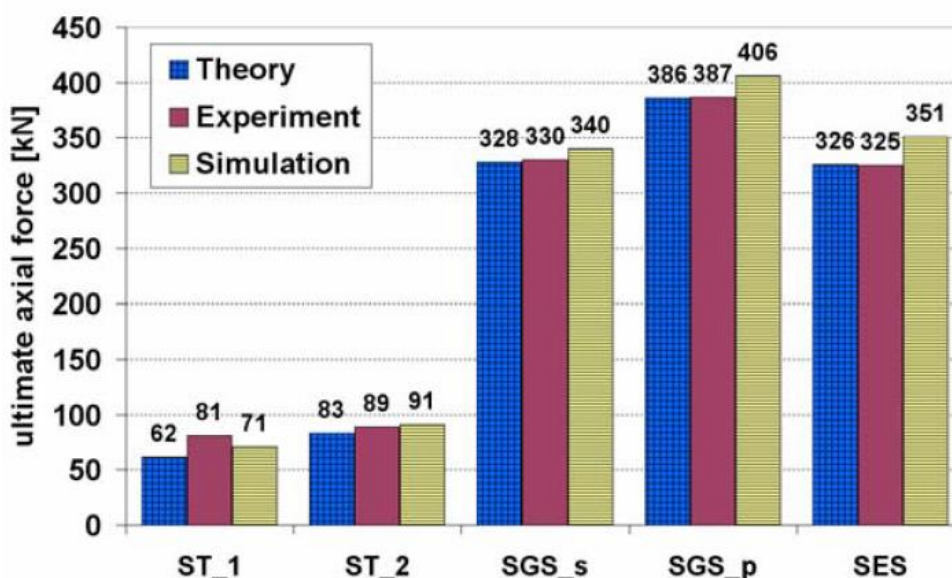
Εικόνα 2-7: Πιθανές μορφές αστοχίας του δοκιμίου. Σε πλαίσιο οι μορφές του τοπικού λυγισμού [2-3]

Ως αποτέλεσμα του πειράματος αυτού προκύπτει η βοήθεια του πυρήνα στη σταθερότητα της συνολικής διατομής. Η προσκόλληση του πυρήνα με τα ελάσματα ήταν επαρκής και στην περίπτωση του κονιάματος και του ελαστομερούς και εξασφάλισε πολύ μεγαλύτερα αξονικά φορτία λυγισμού σε σχέση με τις αμιγώς χαλύβδινες διατομές. Η χρήση των διατομών τύπου sandwich έδωσε τη δυνατότητα στο δοκίμιο ακόμη και να ξεπεράσει τα όρια διαρροής των δύο ελασμάτων από χάλυβα αν αυτά λειτουργούσαν μόνα τους.

Τέλος, για να επιβεβαιωθεί η αύξηση της φέρουσας ικανότητας λόγω της εισαγωγής υλικού πυρήνα, έγιναν και αριθμητικές προσομοιώσεις μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας και υλικού με μετρημένες τις ατέλειες από τα δοκίμια (GMNIA). Επίσης, η μέγιστη αξονική δύναμη που άντεξαν τα δοκίμια υπολογίστηκε και θεωρητικά. Έχοντας μετρήσει τις μετατοπίσεις και τις παραμορφώσεις των ελασμάτων και του πυρήνα, από τις σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων των υλικών προέκυψε το οριακό θλιπτικό φορτίο σύμφωνα με την παρακάτω εξ. (2-4).

$$N_{theory} = A_{-1} * \sigma_{-1}(\varepsilon) + A_0 * \sigma_0(\varepsilon) + A_{+1} * \sigma_{+1}(\varepsilon) \quad (2-4)$$

Τα αποτελέσματα της θεωρίας, του πειράματος και του προσομοιώματος παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο Σχήμα 2-6. Η σχεδόν ταύτιση των αποτελεσμάτων και στις 3 περιπτώσεις, αποδεικνύει ότι οι διατομές τύπου sandwich αυξάνουν τη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής.



Σχήμα 2-6: Σύγκριση των μέγιστων αξονικών φορτίων για του διαφορετικού τύπου διατομές μέσω αναλυτικών, πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων [2-3]

2.3 Προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού πυλώνων διατομής τύπου sandwich

Ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ του τομέα των μεταλλικών κατασκευών σύνταξε μια προτεινόμενη μεθοδολογία σχετικά με το σχεδιασμό των πυλώνων ανεμογεννητριών με διατομές τύπου sandwich. Σκοπός, η βέλτιστη επιλογή των υλικών και της γεωμετρίας του πυλώνα, μέσω συγκεκριμένων βημάτων που συνθέτουν έναν αλγόριθμο. Από τον αλγόριθμο αυτό μπορούν να προκύψουν 3 λύσεις πυλώνων ανεμογεννητριών, αναλόγως τις απαιτήσεις σε αντοχή και δυσκαμψία, ο αμιγώς χαλύβδινος, ο τύπος sandwich και ένας υβριδικός με συνδυασμό των 2 προηγούμενων λύσεων. [2-4]

2.3.1 Αναλυτική περιγραφή βημάτων

1. Καθορισμός ύψους πυλώνα, αριθμού τμημάτων και τύπου ανεμογεννήτριας

Πρώτη επιλογή είναι το ύψος που θα έχει ο υπό εξέταση πυλώνας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η αναγκαιότητα των πυλώνων τύπου sandwich προέκυψε από τη σκέψη για υψηλότερους πυλώνες από αυτούς του κλασικού τύπου αμιγώς χαλύβδινης διατομής. Επιλέγεται, λοιπόν, ύψος 150m και αριθμός τμημάτων 4 ή 5 διαφορετικής διαμέτρου και πάχους και όχι 3 όπως είναι για τους συμβατικούς πυλώνες συνήθως. Τέλος, για τον συγκεκριμένο τύπο ανεμογεννήτριας, γίνεται καθορισμός όλων των χαρακτηριστικών της που επηρεάζουν τον πυλώνα από στατικής άποψης (αναλυτικότερα στο βήμα 5).

2. Προσεγγιστική εκτίμηση της ροπής καθ' ύψος του πυλώνα

Η εκτίμηση αυτής της ροπής έγινε θεωρώντας ανεμοπίεση που δρα στο θεωρητικό δίσκο που σχηματίζουν τα πτερύγια και λόγω αυτής της παραδοχής του συμπαγούς δίσκου, με μειωτικό συντελεστή 30%. Αν λοιπόν, το εμβαδόν αυτού του θεωρητικού συμπαγούς δίσκου που δημιουργείται από την περιστροφή του ρότορα είναι A_{rotor} , τότε η οριζόντια κάθετη σε αυτόν δύναμη μπορεί να υπολογιστεί από την εξ. (2-5), όπου u είναι η ταχύτητα του ανέμου και ρ η πυκνότητα του.

$$F_{solid} = 1/2 * \rho * u^2 * A_{rotor} \quad (2-5)$$

Αν και αυτή η δύναμη χρησιμοποιείται συνήθως για των καθορισμό των στατικών μεγεθών ανεμογεννητριών, παρ' όλα αυτά, είναι περίπου μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την ακριβή που προκύπτει από τη χρήση του λογισμικού FAST, μέσω αριθμητικής ανάλυσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται μειωτικός συντελεστής 30%, μόνο για την αρχική εκτίμηση των μεγεθών που ασκούνται στην ανεμογεννήτρια (ύστερα θα γίνει αναλυτικά).

ο Επαναληπτική διαδικασία 1

Για καθένα από τα $i = 1, 2, 3, \dots, n$ τμήματα του πυλώνα της ανεμογεννήτριας και ξεκινώντας από τα υψηλότερα που χρήζουν μικρότερων στατικών απαιτήσεων, ακολουθούνται τα βήματα 3 και 4.

3. Αδρή εκτίμηση καμπτικής ροπής και υπολογισμός αξονικής δύναμης στη χαμηλότερη διατομή

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, η δρώσα ροπή κάμψης στη χαμηλότερη διατομή υπολογίζεται χονδροειδώς από την εξ. (2-6), η οποία βρίσκεται σε ύψος h από τη βάση του πυλώνα συνολικού ύψους H .

$$M_{solid,i} = 0.3 * F_{solid} * (H - h) \quad (2-6)$$

Η αξονική δύναμη σε αυτό το i τμήμα είναι το άθροισμα του ίδιου βάρους της ατράκτου $N_{nacelle}$ και των ανώτερων από αυτό τμήματα $N_{dead,i-1}$.

4. Αναζήτηση γεωμετρίας και ποιότητας υλικού ομογενούς χαλύβδινης διατομής

Υπολογίζεται η ροπή αντοχής της διατομής του χάλυβα από την εξ. (2-7), όπου η ροπή αντίστασης για κυκλική σωληνωτή διατομή δίνεται από την εξ. (2-8) και f_{sy} είναι το όριο διαρροής του χρησιμοποιούμενου χάλυβα. Επιλέγεται συνδυασμός ποιότητας χάλυβα (f_{sy}), εξωτερική ακτίνας (R_i) και πάχους χαλύβδινου κελύφους (t_i), για να ικανοποιείται η απαίτηση σε καμπτική αντοχή με βάση τη δράση που υπολογίστηκε αδρά παραπάνω.

$$M_{solid,i} = \dot{M}_{R,i} = W_{el,i} * f_{sy} \quad (2-7)$$

$$W_{el,i} = [\pi * R_i^4 - (R_i - t_i)^4] / (4 * R_i) \quad (2-8)$$

Αφού βρεθούν οι παράμετροι πάχους, εξωτερικής ακτίνας και ποιότητας χάλυβα, υπολογίζεται η θλιπτική αντοχή της διατομής από την εξ. (2-9). Ύστερα, υπολογίζεται το ίδιο βάρος του εξεταζόμενου τμήματος από την εξ. (2-10) και προκύπτει από την εξ. (2-11) το συνολικό θλιπτικό φορτίο που καταπονεί τη διατομή.

$$N_{R,i} = \pi * [R_i^2 - (R_i - t_i)^2] * f_{sy} \quad (2-9)$$

$$N_{dead,i} = \pi * [R_i^2 - (R_i - t_i)^2] * h * \gamma_s \quad (2-10)$$

$$N_{tot,i} = N_{nacelle} + N_{dead,i-1} + N_{dead,i} \quad (2-11)$$

Τέλος, με βάση τον Ευρωκώδικα 3, υπολογίζεται η απομειωμένη ροπή αντοχής λόγω ταυτόχρονης επιβολής θλιπτικού αξονικού φορτίου σύμφωνα με την εξ. (2-12).

$$M_{R,i} = \dot{M}_{R,i} * [1 - (N_{tot,i}/N_{R,i})^{1.7}] \quad (2-12)$$

ο Εσωτερική επαναληπτική διαδικασία βήματος 4

Μεσ στο βήμα 4, επιλέγονται εκ νέου γεωμετρία διατομής και ποιότητα χάλυβα, μέχρις ότου να επιτευχθεί η σύγκλιση, με απαίτηση τη ροπή αντοχής $M_{R,i}$.

5. Ακριβέστερος υπολογισμός καμπτικών ρομών για βασικούς συνδυασμούς φόρτισης

Για το λόγο αυτό, επιστρατεύεται το πρόγραμμα αριθμητικής ανάλυσης FAST ή ανάλογο λογισμικό αεροελαστικής ανάλυσης ανεμογεννητριών. Στο λογισμικό αυτό, εισάγονται τα στοιχεία της εξεταζόμενης ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένων και των διαμέτρων των διατομών του υψηλότερου και του χαμηλότερου τμήματος, όπως αυτές προέκυψαν από το βήμα 4. Ενδεικτικά, τα βασικότερα δεδομένα εισαγωγής στο λογισμικό είναι:

- Ύψος δρομέα (m)
- Ύψος πυλώνα (m)
- Διάμετρος θεωρητικού δίσκου (m)
- Μέγιστη εξωτερική διάμετρος πυλώνα σε βάση (m)
- Ελάχιστη εξωτερική διάμετρος πυλώνα σε κορυφή (m)
- Δυσκαμψία πυλώνα (kNm^2)
- Μάζα πυλώνα (kg)
- Μάζα κάθε πτερυγίου (kg)
- Μάζα θαλάμου μηχανολογικών μερών (kg)
- Συνολική μάζα θεωρητικού δίσκου (kg)
- Συνολική μάζα στην κορυφή του πυλώνα (kg)
- Συνολική μάζα (kg)

Με βάση αυτά τα δεδομένα, καθώς και κατάλληλου πεδίου ανέμου που παράγεται από το πρόγραμμα TurbSim, το FAST υπολογίζει μεταξύ άλλων και τα εντατικά μεγέθη που καταπονούν καθ' ύψος τον πυλώνα, βάσει καθορισμένων συνδυασμών φορτίσεων που προσομοιάζουν διαφορετικές καταστάσεις. Λόγω του μεγάλου όγκου αυτών των συνδυασμών και του πολύ χρόνου που απαιτείται για να διερευνηθούν όλοι αυτοί που προκύπτουν από τις κανονιστικές διατάξεις, κρίνεται σκόπιμο να εξετάζονται σε αυτό το προκαταρκτικό στάδιο διαστασιολόγησης, μόνο οι βασικότεροι συνδυασμοί

φορτίσεων. Έτσι, λαμβάνονται οι ακριβέστερες τιμές των καμπτικών ροών στη χαμηλότερη διατομή κάθε τμήματος του πυλώνα ($M_{FAST,i}$).

- **Επαναληπτική διαδικασία 2**

Για κάθε τμήμα του πυλώνα ακολουθείται το βήμα 4, με αντικατάσταση της τιμής $M_{Solid,i}$ από την $M_{FAST,i}$.

- **Επαναληπτική διαδικασία 3**

Επαναλαμβάνονται τα βήματα 4 και 5 έως ότου επιτευχθεί η σύγκλιση.

Εάν είναι αδύνατο να προκύψει ή δε συμφέρει για κατασκευαστικούς και οικονομικούς λόγους η δημιουργία αμιγώς χαλύβδινης διατομής καθ' ύψος του πυλώνα, προτείνεται για το τμήμα εκείνο και τα χαμηλότερα του να γίνει αναζήτηση κατάλληλης διατομής sandwich, με μετάβαση στην Επαναληπτική διαδικασία 4.

- **Επαναληπτική διαδικασία 4**

Για τα τμήματα κάτω από εκείνο που δε βρέθηκε ικανή συμβατική λύση, επαναλαμβάνεται το βήμα 4, όπου αντί για δρώσα καμπτική ροπή $M_{Solid,i}$, χρησιμοποιείται η ακριβέστερη $M_{FAST,i}$.

6. Προσδιορισμός βέλτιστων διατομών sandwich από διαγράμματα προσεγγιστικής αναλυτικής λύσης

Σύμφωνα με την έρευνα του προσωπικού του τομέα μεταλλικών κατασκευών ΕΜΠ, έγινε παραγωγή ποιοτικών διαγραμμάτων βελτιστοποίησης της διατομής sandwich σε όρους καμπτικής αντοχής, δυσκαμψίας και κόστους. Το σύνολο τους μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία [2-6]. Εδώ ενδεικτικά παρουσιάζονται κάποια από αυτά (Σχήμα 2-7-Σχήμα 2-10). Η προσεγγιστική αναλυτική λύση έγινε με θεώρηση της διατομής ως λεπτότοιχης, με ενιαία ακτίνα R ίση με την πραγματική μέση ακτίνα της διατομής. Τα αποτελέσματα προσέγγισαν ικανοποιητικά την καμπτική ροπή αντοχής, αλλά πολύ λιγότερο τη δυσκαμψία, οι οποίες είχαν βρεθεί από περισσότερο σύνθετες λύσεις. Επειδή στο σημείο αυτό γίνεται εκμετάλλευση της ροπής αντοχής ως κριτήριο επιλογής διατομής, χρησιμοποιείται η ταχύτερη προσεγγιστική λύση λεπτότοιχης διατομής. Λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο υπολογισμού της σύνθετης και της προσεγγιστικής αναλυτικής λύσης μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία [2-5], [2-6].

Τα πιο σημαντικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της προσεγγιστικής αναλυτικής λύσης είναι ότι:

- Για δεδομένη ροπή αντοχής, το κόστος μειώνεται περίπου γραμμικά με την αύξηση της παραγωγής του σκυροδέματος. Αυτή η μείωση είναι εντονότερη όσο αυξάνεται η αξονική δύναμη.
- Για δεδομένη ροπή αντοχής, η χρήση υλικού πυρήνα σκυροδέματος οδηγεί στη μείωση του πάχους των ελασμάτων. Αυτή η μείωση είναι περίπου γραμμική με την αύξηση του πάχους του σκυροδέματος και είναι εντονότερη όσο αυξάνεται η αξονική δύναμη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας της διατομής τύπου sandwich πέρα από την απαίτηση της καμπτικής αντοχής έχει άμεση σχέση με το κόστος, αλλά και με την ελαχιστοποίηση του πάχους των ελασμάτων από χάλυβα με ταυτόχρονη χρήση περισσότερου υλικού πυρήνα.

Για τη χρησιμοποίηση των παρακάτω ποιοτικών διαγραμμάτων και επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας, είναι απαραίτητη η αδιαστατοποίηση της ροπής αντοχής σύμφωνα με την εξ. (2-13).

$$\mu_{R,i} = M_{R,i} / (R_i^3 * f_{sy}) \quad (2-13)$$

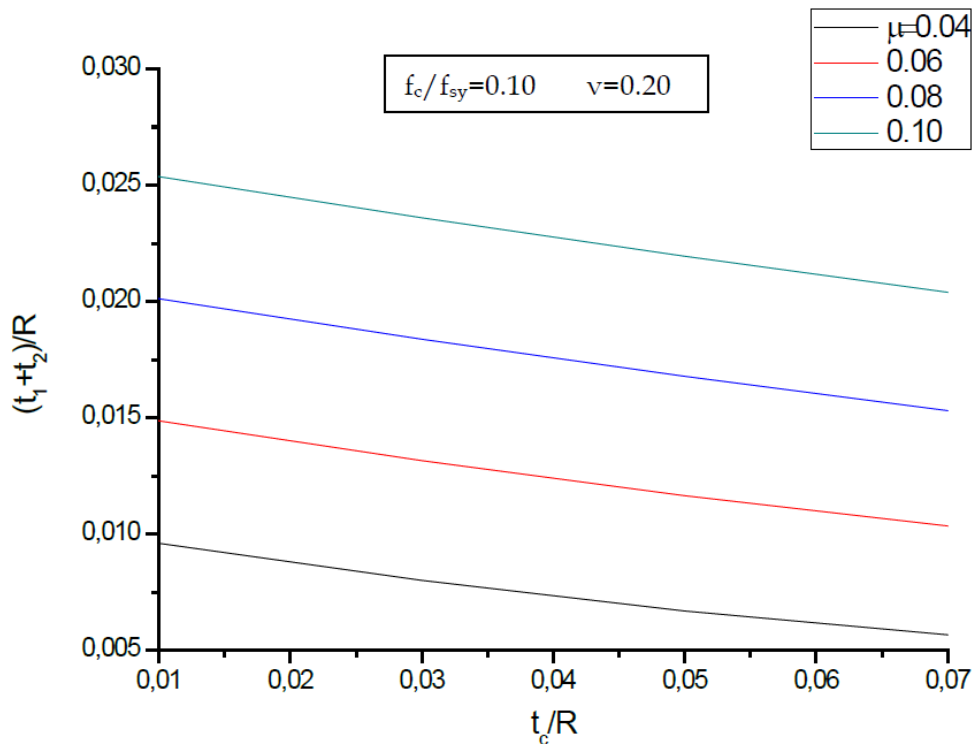
Πρέπει, όμως, να ληφθεί υπόψη και η επιρροή του θλιπτικού φορτίου που δέχεται η διατομή. Έτσι, γίνεται υπολογισμός της θλιπτικής αντοχής της διατομής εξ. (2-14) και της δρώσας θλιπτικής αξονικής δύναμης, η οποία αποτελείται από το ίδιο βάρος της ατράκτου ($N_{nacelle}$) και του ίδιου βάρους των αντίστοιχων τμημάτων του πυλώνα που χρήζουν διατομής τύπου sandwich εξ. (2-15). Η συνολική δρώσα αξονική δύναμη εξ. (2-11), αδιαστατοποιείται εξ. (2-16), ώστε να μπορεί να ληφθεί υπόψη στα διαγράμματα.

$$N_{R,i} = 4 * \pi * R_i * t_{s,i} * f_{sy} + 2 * \pi * R_i * t_{c,i} * f_c \quad (2-14)$$

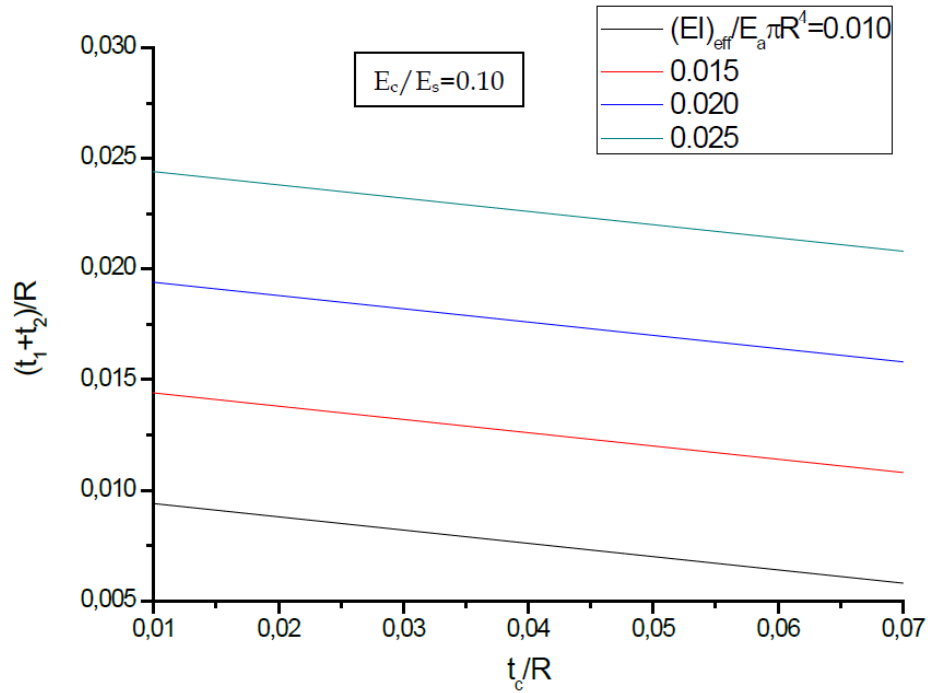
$$N_{dead,i} = 4 * \pi * R_i * t_{s,i} * h * \gamma_s + 2 * \pi * R_i * t_{c,i} * h * \gamma_c \quad (2-15)$$

$$v_i = N_{tot,i} / N_{R,i} \quad (2-16)$$

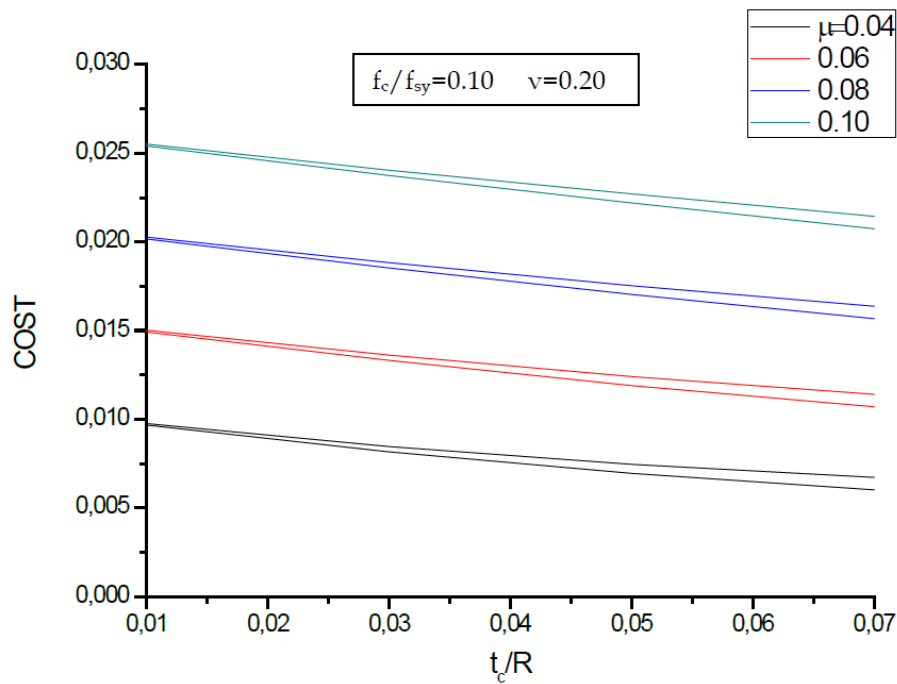
Με γνωστό το λόγο f_c/f_{sy} , επιλέγεται το κατάλληλο διάγραμμα εντοπισμού της βέλτιστης γεωμετρίας διατομής τύπου sandwich, σύμφωνα με τα παραπάνω.



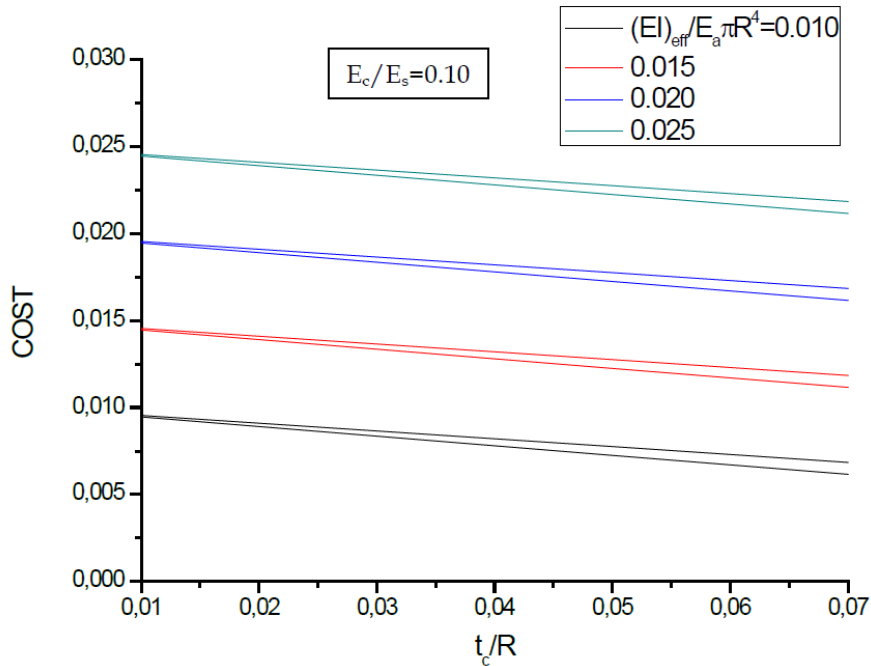
Σχήμα 2-7: Μεταβολή των γεωμετρικών παραμέτρων για διαφορετικές τιμές της ανηγμένης πλαστικής ροπής αντοχής, $f_c/f_{sy}=0.10$ και $\nu=0.20$ [2-6]



Σχήμα 2-8: Μεταβολή των γεωμετρικών παραμέτρων για διαφορετικές τιμές της ανηγμένης δυσκαμψίας, $E_c/E_s=0.10$ [2-6]



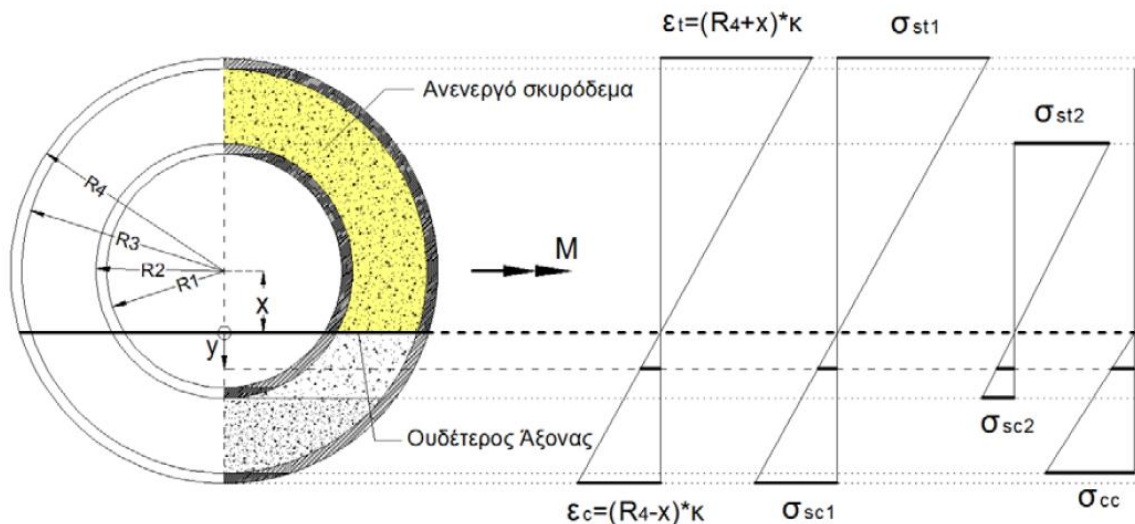
Σχήμα 2-9: Μεταβολή κόστους με το t_c/R για διαφορετικές τιμές της ανηγμένης πλαστικής ροής, $f_c/f_{sy}=0.10$ και $\nu=0.20$ [2-6]



Σχήμα 2-10: Μεταβολή κόστους με το t_c/R για διαφορετικές τιμές της ανηγμένης δυσκαμψίας, $E_c/E_s=0.10$ [2-6]

7. Υπολογισμός δυσκαμψίας από την ακριβή αναλυτική λύση

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υπάρχει σημαντικό σφάλμα στον υπολογισμό της ισοδύναμης δυσκαμψίας της διατομής. Για το λόγο αυτό θα πρέπει σε αυτό το σημείο να γίνει χρήση των περίπλοκων ακριβών αναλυτικών λύσεων της ερευνητικής ομάδας του ΕΜΠ που βασίστηκε στην ισοδυναμία τάσεων στη διατομή υπό καθαρή κάμψη (Σχήμα 2-11). Περισσότερες λεπτομέρειες υπάρχουν στη βιβλιογραφία [2-5]. Σε αυτές τις σχέσεις λαμβάνεται υπόψη η πραγματική γεωμετρία της διατομής τύπου sandwich και η εκτίμηση της συμπεριφοράς της διατομής γίνεται με μεγάλη ακρίβεια, χωρίς ωστόσο να μπορούν αυτές οι σχέσεις να βοηθήσουν σε περαιτέρω βήματα στο βαθμό επιτυχίας των προσεγγιστικών αναλυτικών λύσεων. Η ισοδύναμη αυτή δυσκαμψία πρέπει πλέον να αντικαταστήσει τη δυσκαμψία της αμιγώς χαλύβδινης διατομής στο πρόγραμμα FAST.



Σχήμα 2-11: Διατομή τύπου sandwich υπό καθαρή κάμψη [2-5]

- **Επαναληπτική διαδικασία 5**

Επανάληψη των βημάτων 5,6 και 7 με επιλογή γεωμετρίας και ποιότητας υλικών στο βήμα 6, τέτοια ώστε να ικανοποιείται ότι $M_{R,i} \geq M_{FAST,i}$, έως ότου επιτευχθεί η σύγκλιση και άρα η εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας διατομής για το υπό εξέταση τμήμα του πυλώνα της ανεμογεννήτριας τύπου sandwich.

8. Οριστικοποίηση διατομών sandwich με την ακριβέστερη διαδικασία βελτιστοποίησης

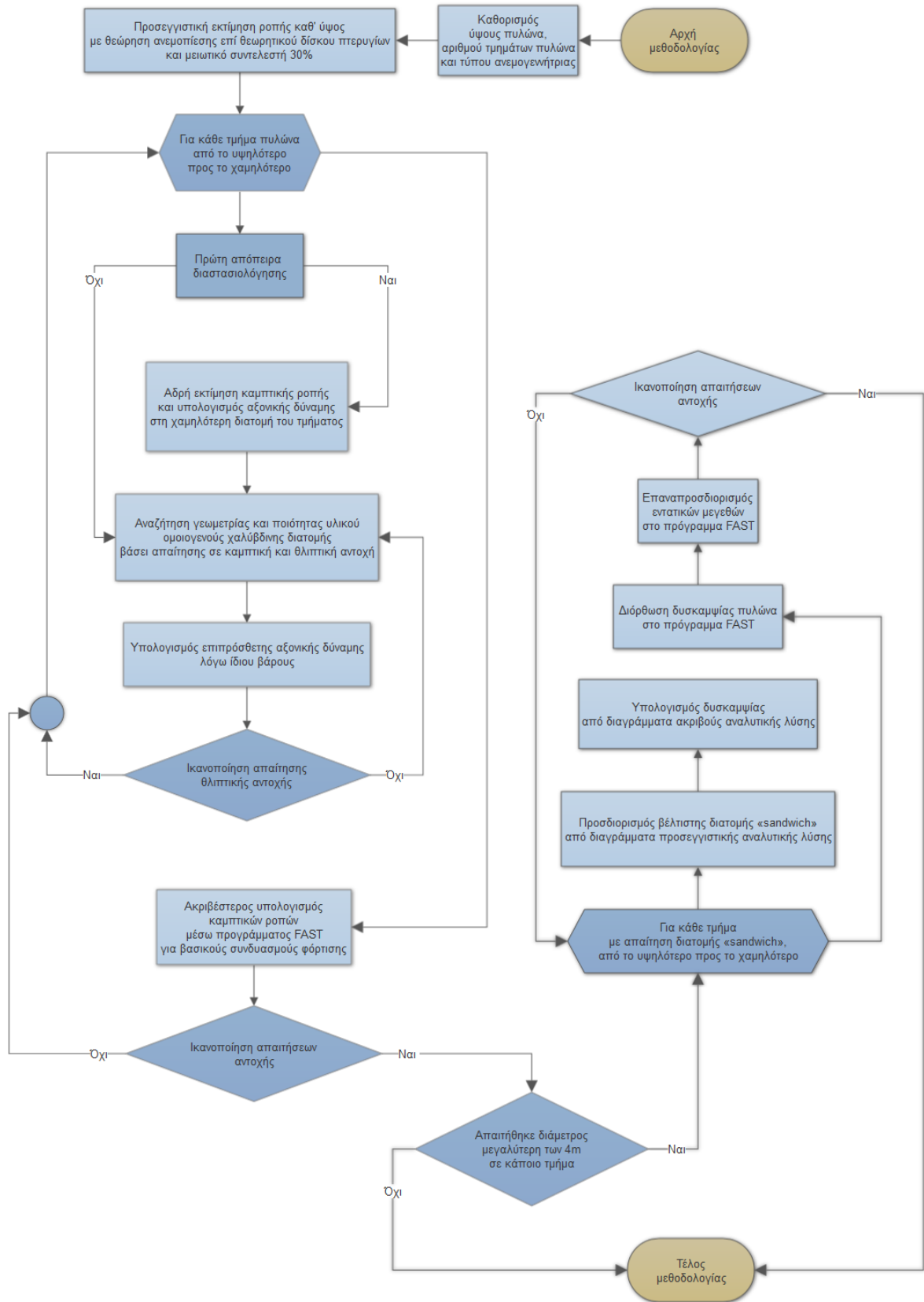
Η τελική επιλεγθείσα γεωμετρία επιλύεται με εφαρμογή της ακριβούς αναλυτικής μεθόδου και επιβεβαιώνονται οι τιμές ροπής αντοχής που υπολογίστηκαν για τη διατομή από την προσεγγιστική μέθοδο [2-5].

2.3.2 Διάγραμμα ροής

Η παραπάνω διαδικασία μου αναλύθηκε μέσω των επιμέρους βημάτων, μπορεί να παρουσιαστεί και με τη μορφή διαγράμματος ροής πιο συνοπτικά και γραφικά. Το διάγραμμα ροής της συγκεκριμένης προτεινόμενης μεθοδολογίας σχεδιασμού πυλώνων ανεμογεννητριών με διατομές τύπου sandwich είναι το παρακάτω (Σχήμα 2-12).

2.3.3 Βελτιστοποίηση γεωμετρίας διατομής τύπου sandwich σε επίπεδο κατασκευής υποστυλώματος

Όλα τα παραπάνω αναφέρθηκαν στην εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας διατομής τύπου sandwich για πυλώνες ανεμογεννητριών και αφορούν μια προτεινόμενη μέθοδο, η οποία ακόμη χρήζει διερεύνησης. Πέρα, όμως, από αυτές τις προτάσεις, έχουν γίνει διάφορες έρευνες και έχουν καταστεί σημαντικές υλοποιήσιμες προτάσεις για διατομές τύπου sandwich για κατασκευή υποστυλωμάτων. Οι έρευνες αυτές αναφέρονται τόσο σε πειραματικό όσο και σε αναλυτικό και αριθμητικό στάδιο. Πάνω σε αυτές έγινε και η στήριξη για τη μέθοδο που προτάθηκε. Αυτές οι έρευνες μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία που παρατίθεται παρακάτω [2-7-[2-11].



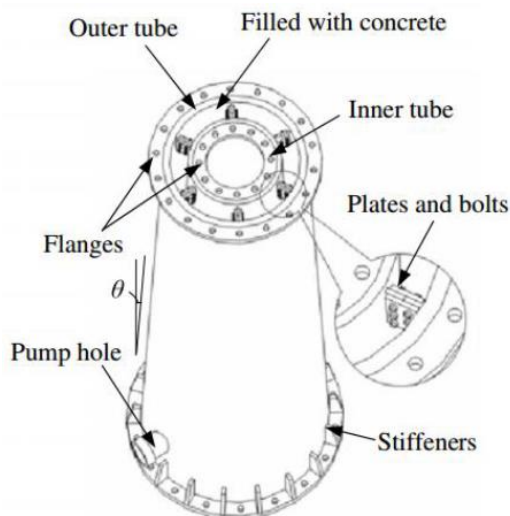
Σχήμα 2-12: Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθοδολογίας υπολογισμού της βέλτιστης διατομής τύπου sandwich [2-4]

2.4 Προτάσεις τρόπου κατασκευής και ανέγερσης πυλώνων διατομών τύπου sandwich

2.4.1 Προτεινόμενες μέθοδοι

Η ίδια ομάδα έρευνας του ΕΜΠ του τομέα μεταλλικών κατασκευών, έχει συντάξει και 2 μεθόδους για την κατασκευή και την ανέγερση πυλώνων ανεμογεννητριών διατομών τύπου sandwich. Η διαφοροποίηση αυτών των 2 μεθόδων έγκειται στο αν η σκυροδέτηση λαμβάνει χώρα στο εργοτάξιο ή στο εργοστάσιο, με κάθε μία από αυτές να παρουσιάζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. [2-4]

Η πρώτη περίπτωση είναι ουσιαστικά ένα βήμα μετά τη συμβατική μέθοδο κατασκευής, μεταφοράς και ανέγερσης αμιγώς χαλύβδινων πυλώνων, όπως αυτές περιγράφηκαν διεξοδικά στο 1^ο κεφάλαιο. Πριν από τη μεταφορά στο εργοτάξιο των δύο χαλύβδινων ελασμάτων, του εσωτερικού και του εξωτερικού, προηγείται η σύνδεση αυτών με μεταλλικές πλάκες που συγκολλούνται ανάμεσα στα δύο ελάσματα, περιμετρικά και κάθετα σε αυτά, παίζοντας το ρόλο των αποστατών (Εικόνα 2-8). Επίσης, σε κάθε διαφορετικό τμήμα συγκολλούνται φλάντζες στα άκρα του, ώστε να ευνοηθεί η σύνδεση με τα εκατέρωθέν του στο εργοτάξιο. Αυτή η διαδικασία έχει γίνει για πυλώνα τηλεπικοινωνιών, με τη μόνη διαφορά ότι λόγω μικρού μεγέθους, οι μεταλλικές πλάκες σύνδεσαν τα δύο ελάσματα μέσω κοχλίωσης στο εργοτάξιο (Εικόνα 2-9). Ακολούθως, γίνεται η σκυροδέτηση στο διάκενο μεταξύ των δύο ελασμάτων όπως θα περιγραφεί και στη συνέχεια. Τέλος, για λόγους αποφυγής παραμενουσών τάσεων που θα αναφερθούν στη συνέχεια, είναι συνετό να γίνεται ανέγερση των χαλύβδινων τμημάτων σταδιακά με σκυροδέτηση του κάθε τμήματος πριν την ανέγερση του επόμενου.



Εικόνα 2-8: Αποστάτες μεταξύ ελασμάτων για διατήρηση της απόστασής τους [2-4]



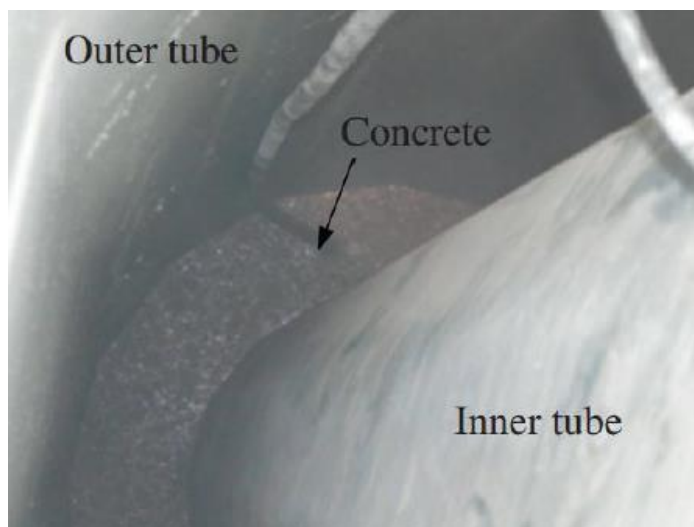
Εικόνα 2-9: Τοποθέτηση μετωπικών πλακών με κοχλίωση στο εργοτάξιο σε πυλώνα τηλεπικοινωνιών [2-4]

Η δεύτερη περίπτωση βασίζεται στη διαδεδομένη μέθοδο προκατασκευασμένων τμημάτων. Η διαδικασία παραγωγής των χαλύβδινων ελασμάτων είναι σαφώς η ίδια. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η σκυροδέτηση γίνεται στο εργοστάσιο, σε κάθε επιμέρους τμήμα του πυλώνα ξεχωριστά και μεταφέρονται στο εργοτάξιο, όπου και συνδέονται μεταξύ τους. Έτσι, οι εργασίες εργοταξίου περιορίζονται μονάχα σε αυτές της ανέγερσης, περιορίζοντας τις ατέλειες λόγω κατασκευής, αφού αυτές γίνονται αποκλειστικά στο εργοστάσιο.

2.4.2 Διαδικασία έγχυσης σκυροδέματος

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η σκυροδέτηση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε στο εργοτάξιο είτε στο εργοστάσιο. Η διαδικασία της επί τόπου έγχυσης σκυροδέματος έχει ως αποτέλεσμα το μικρότερο κόστος μεταφοράς και ανέγερσης από ότι τα προκατασκευασμένα τμήματα σαφώς μεγαλύτερου ίδιου βάρους. Ωστόσο, ο ποιοτικός έλεγχος αυτής της διαδικασίας είναι δύσκολος έως ακατόρθωτος και για το λόγο αυτό η σκυροδέτηση απαιτεί πολύ μεγάλη προσοχή, ιδιαίτερα σε περιοχές μεγάλου υψομέτρου (όπως συνήθως) όπου εκτός των άλλων επικρατούν χαμηλές θερμοκρασίες ειδικά κατά τη χειμερινή περίοδο. Βεβαίως, υπάρχουν και διάφορα πρόσμικτα τα οποία καταπολεμούν τέτοιες συνθήκες, αλλά αυξάνουν σαφώς το κόστος παραγωγής. Αντιθέτως, η διαδικασία σκυροδέτησης προκατασκευασμένων τμημάτων στο εργοστάσιο ενέχει το πλεονέκτημα ελέγχου πλήρως των συνθηκών που επικρατούν, άρα και της ποιότητας του αποτελέσματος, ενώ το πρόβλημα του κόστους για παραγωγή μειώνεται εξαιρετικά όταν γίνεται μαζική παραγωγή μεγάλου αριθμού προκατασκευασμένων τμημάτων για πολλές ανεμογεννήτριες. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το μεγάλο ίδιο βάρος των τμημάτων. Λόγω αυτού του μεγάλου βάρους, τα τμήματα δεν μπορούν να έχουν μεγάλο μήκος, άρα αυτομάτως αυξάνεται ο αριθμός των τμημάτων που πρέπει να παραχθούν, με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά το κόστος παραγωγής της μίας ανεμογεννήτριας όσο και το κόστος μεταφοράς, ακόμη και ανέγερσης εξαιτίας του μεγαλύτερου αριθμού συνδέσεων που πρέπει να πραγματοποιηθούν.

Πολύ σημαντικό επίσης ζήτημα είναι και η συμπύκνωση του σκυροδέματος, τόσο στην επί τόπου έγχυση στο χώρο ανέγερσης όσο και στην παραγωγή στο εργοστάσιο. Η πιο ικανοποιητική λύση και στις δύο περιπτώσεις είναι η χρήση αυτοσυμπυκνόμενου σκυροδέματος, το οποίο σχεδόν εξαλείφει την ανάγκη δόνησης, άρα μείωση της απαίτησης σε ειδικές τεχνικές λόγω ευκολότερης εφαρμογής, ασφαλέστερη και γρηγορότερη ολοκλήρωση της κατασκευής, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και τελικά μείωση του κόστους. Παρ' όλο που το αυτοσυμπυκνόμενο σκυροδέμα χρήζει επιπλέον έρευνας, οι έως τώρα εφαρμογές του σε πυλώνες τύπου sandwich, δείχνει ότι παρέχει υψηλά επίπεδα απορρόφησης ενέργειας και πλαστιμότητας, χωρίς να υστερεί σε αντοχή από το συμβατικό σκυροδέμα. Βεβαίως, ανεξάρτητα από το τι είδους σκυροδέμα χρησιμοποιείται, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην αναλογία νερού και τσιμέντου στο μείγμα, διότι ο εγκλεισμός του σκυροδέματος μεταξύ των χαλύβδινων ελασμάτων, δεν επιτρέπει την απομάκρυνση περίσσειας νερού, η οποία επηρεάζει αρνητικά την αντοχή. Σε κάθε περίπτωση, η έγχυση του σκυροδέματος έπεται χρονικά της τοποθέτησης των χαλύβδινων ελασμάτων, τα οποία λειτουργούν και ως καλούπι για το σκυροδέμα. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει οι επιφάνειες των ελασμάτων να είναι πολύ καθαρές, χωρίς υπολείμματα σκόνης, νερού ή λαδιού (Εικόνα 2-10).



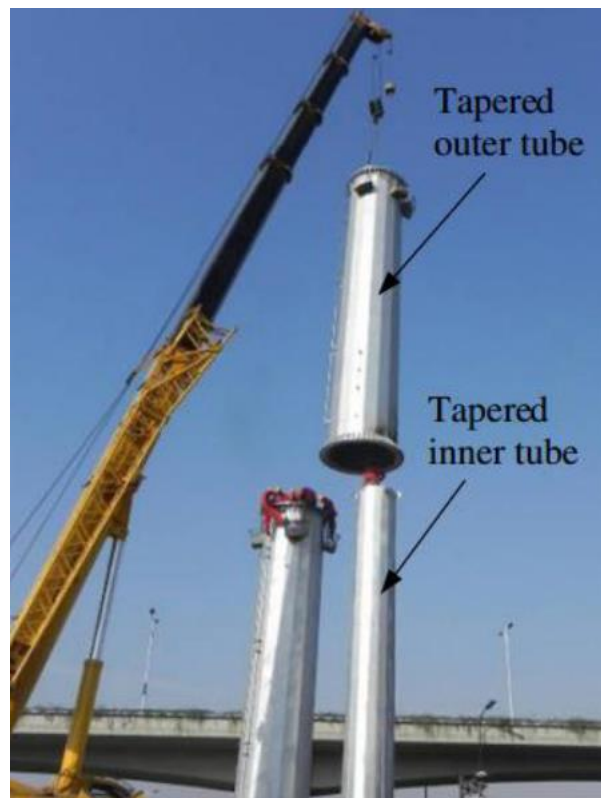
Εικόνα 2-10: Εσωτερικό του πυρήνα πριν την έγχυση. Οι επιφάνειες θα πρέπει να είναι καθαρές. [2-4]

Η επί τόπου έγχυση του σκυροδέματος, εντός του όγκου που ορίζουν οι επιφάνειες των χαλύβδινων ελασμάτων, στο εργοτάξιο, μπορεί να γίνει με 2 τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι η διάνοιξη οπής στη βάση του πυλώνα και η εισαγωγή του σκυροδέματος μέσω αντλίας. Το σκυρόδεμα φτάνει μέχρι ένα ύψος και ύστερα διανοίγεται νέα τρύπα και εισάγεται το επιπλέον σκυρόδεμα κ.ο.κ. μέχρι να επέλθει η πλήρης πλήρωση. Το ύψος μέχρι το οποίο μπορεί να φτάσει το σκυρόδεμα από τη μία οπή εξαρτάται από το μήκος και τον αριθμό των επιμέρους τμημάτων, την ισχύ της αντλίας κ.ά. Στις περιοχές διάνοιξης των οπών, ο χάλυβας θα πρέπει να επανελέγχεται και το κλείσιμό τους να γίνεται σαφώς μετά την πήξη του σκυροδέματος. Ο δεύτερος τρόπος αφορά την πιο συνηθισμένη διαδικασία, με έγχυση από την κορυφή. Αυτός ο τρόπος μπορεί να διεκπαιρωθεί είτε με τη χρήση χοάνης είτε με τη χρήση σωλήνα σκυροδέτησης. Στην πρώτη περίπτωση, θα πρέπει να σκυροδετείται απόσταση 300mm έως 500mm και εν συνεχεία να πραγματοποιείται δόνηση, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η άκρη του σωλήνα θα πρέπει να παραμένει εντός του υγρού σκυροδέματος, ώστε να επιτυγχάνεται και η απαιτούμενη δόνηση. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο, θα πρέπει να γίνεται επί τόπου καταγραφή του όγκου που εγχύεται ώστε να μην παρουσιαστεί εν τέλει έλλειμμα από τη φαινομενική πλήρωση του όγκου του πυρήνα.

Στην εναλλακτική λύση χρήσης προκατασκευασμένων τμημάτων, τα οποία σκυροδοτούνται στο εργοστάσιο, η ανέγερση αυτών δεν πρέπει να πραγματοποιείται πριν η αντοχή του σκυροδέματος φτάσει περίπου στο 50% της μεγιστοποίησης της.

2.4.3 Σύνδεση διαδοχικών τμημάτων

Η συμβατική μέθοδος σύνδεσης δύο κατακόρυφων τμημάτων που αναλύθηκε στο 1^ο κεφάλαιο για τους σωληνωτούς χαλύβδινους πυλώνες ανεμογεννητριών, είναι δυνατόν να λειτουργήσει και στους αμιγώς πυλώνες sandwich. Σε κάθε επιμέρους τμήμα συγκολλάται μια φλάντζα, και τα επιμέρους τμήματα κοχλιώνονται μεταξύ τους μέσω των φλαντζών με χρήση προεντεταμένων κοχλίων (Εικόνα 2-11).



Εικόνα 2-11: Ανέγερση των επιμέρους χαλύβδινων ελασμάτων στο εργοτάξιο [2-4]

Στην περίπτωση που υλοποιείται υβριδικός πυλώνας, με διατομή κοντά στη βάση τύπου sandwich και από ένα ύψος και μετά (συνήθως τη μέση) αμιγώς χαλύβδινη διατομή, τότε στην ενδιάμεση σύνδεση των δύο διαφορετικών διατομών υπάρχουν 2 εναλλακτικές. Η πρώτη είναι η κλασική των επιμέρους τμημάτων, δηλαδή με προεντεταμένη κοχλίωση μέσω της συγκόλλησης φλαντζών στη βάση και στην κορυφή των τμημάτων με διαφορετική διατομή. Η δεύτερη είναι ακόμη σε ερευνητικό στάδιο και χρειάζεται επιφύλαξη. Αφορά στη μερική διείσδυση του αμιγώς χαλύβδινου κελύφους εντός του πυρήνα σκυροδέματος του τμήματος με διατομή sandwich (Εικόνα 2-12), χωρίς τη χρήση επιπλέον φλαντζών και κοχλιών. Η λύση αυτή προέκυψε ως παραλλαγή της μεθόδου σύνδεσης με κονίαμα, που εφαρμόζεται κυρίως για τη σύνδεση θεμελίωσης και πυλώνα υπεράκτιων ανεμογεννητριών, έχοντας ως πλεονέκτημα τη μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε κόπωση συγκριτικά με την κοχλιωτή σύνδεση. Κατά την πραγματοποίηση της λύσης αυτής για μετάβαση από αμιγώς χαλύβδινη σε διατομή sandwich, το χαλύβδινο κέλυφος της πρώτης, εισέρχεται στο εσωτερικό του πυρήνα της δεύτερης πριν γίνει η σκυροδέτηση, με μήκος επικάλυψης που εξαρτάται από την εκάστοτε περίπτωση. Τελειώνοντας, και αφού έχει γίνει ακριβής τοποθέτηση του ενός τμήματος εντός του άλλου, επιτυγχάνεται η σύνδεσή τους μέσω της σκυροδέτησης του πυρήνα.



Εικόνα 2-12: Μερική διείσδυση του μέλους της αμιγώς χαλύβδινης διατομής εντός του πυρήνα της διατομής τύπου sandwich για σύνδεση (σε ερευνητικό στάδιο) [2-4]

2.4.4 Ειδικά ζητήματα σχεδιασμού και κατασκευής

Κατά τη διαδικασία της επί τόπου έγχυσης σκυροδέματος εντός των αρχικά τοποθετημένων χαλύβδινων ελασμάτων, τα τελευταία υποβάλλονται σε σημαντική καταπόνηση λόγω υπερκειμένων τμημάτων, ίδιου βάρους και πίεσης υγρού σκυροδέματος, εφόσον γίνει η πλήρωση. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο χάλυβα να αναπτύξει κάποιες αρχικές παραμορφώσεις και κατ' επέκταση παραμένουσες τάσεις στη φάση κατασκευής, οι οποίες είναι ικανές να μειώσουν την τελικά αναπτυσσόμενη αντοχή του. Το θέμα αυτό θα πρέπει να προβλέπεται δίνοντας στα χαλύβδινα ελάσματα επαρκή αντοχή και δυσκαμψία ή ακόμη να υποστηρίζονται προσωρινά κατά τη διάρκεια της φάσης κατασκευής, έως ότου να πήξει το σκυρόδεμα.

Σχετικά με την επιλογή των υλικών κατασκευής, συνίσταται η ποιότητα του χάλυβα και του σκυροδέματος να βρίσκονται σε καλή αναλογία μεταξύ τους, δηλαδή υψηλή ποιότητα χάλυβα να οδηγεί στη χρήση υψηλής ποιότητας σκυροδέματος κ.ο.κ. ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη συμπεριφορά της σύνθετης διατομής, με την ανάλογη καλή συνεργασία των δύο υλικών. Για παράδειγμα, για τάση διαρροής χάλυβα από 235MPa έως 345MPa, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ενδείκνυται να κυμαίνεται από 40MPa έως 60MPa. Αντιστοίχως, για χάλυβα με όριο διαρροής άνω των 345MPa, σκυρόδεμα θλιπτικής αντοχής άνω των 60MPa.

Έχει παρατηρηθεί ότι λόγω του μικρού πάχους του χαλύβδινου ελάσματος σε ένα πυλώνα με διατομή τύπου sandwich, η οξειδωση της εξωτερικής επιφάνειας σε συνδυασμό με τη συνεχή μακροχρόνια φόρτιση της κατασκευής, μειώνει δραστικά την αντοχή και τη δυσκαμψία. Επομένως, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη χρήση, με αυστηρό έλεγχο, αντιοξειδωτικής προστασίας, ιδίως όταν επικρατούν συνθήκες που ευνοούν την οξειδωση, όπως στην περίπτωση παράκτιων ή υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

Τέλος, η πυρκαγιά μπορεί να παίξει καθοριστικό ρόλο όχι μόνο στη λειτουργία και τη στήριξη της ανεμογεννήτριας, αλλά και στην ασφάλεια του περιβάλλοντα χώρου. Σε εκδήλωση πυρκαγιάς αναμένεται να εγκλωβιστεί ατμός εντός του πυλώνα που παράγεται από το σκυρόδεμα και ο οποίος λόγω μη δυνατότητας διαφυγής μπορεί να ασκήσει υψηλή πίεση στο χαλύβδινο μέρος, ικανή να προκαλέσει ακόμη και έκρηξη. Για να μη συμβεί αυτό, συνίσταται η διάνοιξη μικρών οπών στο χάλυβα διαμέτρου όχι μικρότερης των 20mm, των οποίων η πυκνότητα εξαρτάται από τη γεωμετρία της εκάστοτε διατομής.

2.5 Βιβλιογραφία

[2-1] GWEC, "Global wind 2016 report", *Global Wind Energy Council*, 2017.

[2-2] REN21, "Renewables 2017 global status report", *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*, 2017.

[2-3] Schaumann P. & Keindorf C., "Sandwich-towers for wind energy converters", *DEWI Magazin*, Issue 33, pp. 65-76, 2008.

[2-4] Gantes et al., "Technical report of design and construction methodology of sandwich-type wind turbine towers", *Project "Aristeia II – Novel design concepts for ENergy related Steel STRuctures using Advanced Materials (ENSSTRAM)"*, Workpackage 6, Deliverable 6.1, 2015.

[2-5] Gantes et al., "Technical report of the preliminary analytical and numerical investigation of sandwich-type shells for wind turbine towers", *Project "Aristeia II – Novel design concepts for ENergy related Steel STRuctures using Advanced Materials (ENSSTRAM)"*, Workpackage 2, Deliverable 2.1, 2015.

[2-6] Gantes et al., "Technical report of parametric finite element analyses of sandwich-type wind turbine tower shells", *Project "Aristeia II – Novel design concepts for ENergy related Steel STRuctures using Advanced Materials (ENSSTRAM)"*, Workpackage 5, Deliverable 5.1, 2015.

[2-7] Wei S. et al., "Performance of new sandwich tube under axial loading: Experiment", *Journal of Structural Engineering ASCE*, Vol. 121, Issue 12, 1995

[2-8] Zhao X-L. et al., "Tests of concrete-filled double skin CHS composite stub columns", *Steel and Composite Structures—An International Journal*, Vol. 2, Issue 2, 2002

[2-9] Tao Z. et al., "Behaviour of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and beam–columns", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 60, Issue 8, 2004

- [2-10] Han L-H. et al., "Concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) beam-columns subjected to cyclic bending", *Engineering Structures*, Vol. 28, Issue 12, 2006
- [2-11] Hassanein M.F. & Kharoob O.F., "Compressive strength of circular concrete-filled double skin tubular short columns", *Thin-Walled Structures*, Vol. 77, 2014

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΥΛΩΝΩΝ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΥΠΟΥ SANDWICH

3.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση δύο όμοιων δοκιμών πυλώνων διατομής sandwich υπό κλίμακα, κατασκευασμένα για μελέτη σε επίπεδο σχεδιασμού και υλοποίησης. Τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε κάμψη, στηριζόμενα ως πρόβολοι και ασκώντας επιβαλλόμενη μετατόπιση στο άκρο επέκτασης που τοποθετήθηκε πέρα από αυτά. Η καταγραφή των αποτελεσμάτων έγινε μέσω χρήσης LVDTs, strain gauges και οπτικών μέσων και παρουσίασαν ικανοποιητική επαναληψιμότητα και προβλεψιμότητα. Επίσης, τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν για τα επιμέρους στρώματα της διατομής, δείχνουν ότι η συνεργασία τους ήταν καλή μέχρι την αστοχία από την εμφάνιση του φαινομένου του τοπικού λυγισμού και στα δύο δοκίμια, σε περίπου ίδια τιμή φορτίου. Από προκαταρκτική σύγκριση με πειράματα που έγιναν σε αμιγώς χαλύβδινες διατομές πυλώνων ανεμογεννητριών από το Χ. Δημόπουλο [3-1], διαφαίνονται θετικά στοιχεία για την αποτελεσματικότητα της νέας λύσης των πυλώνων ανεμογεννητριών με διατομές τύπου sandwich.

3.2 Σχεδιασμός πειραμάτων

Η τεχνική δημιουργίας πυλώνων ανεμογεννητριών με διατομές τύπου sandwich είναι πρωτοπόρα και ακόμη σε φάση έρευνας και για αυτό κρίνεται σκόπιμη πολλές φορές η σύγκρισή της με συμβατικούς πυλώνες ανεμογεννητριών από χαλύβδινες διατομές. Για το λόγο αυτό, στο εν λόγω πείραμα έγινε διατήρηση όσο το δυνατόν περισσότερων παραμέτρων με το πείραμα από το Χ. Δημόπουλο [3-1], που αφορούσε την πειραματική αποτίμηση της επιρροής της ανθρωποθυρίδας στους πυλώνες ανεμογεννητριών, κατά το οποίο πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές και σε αμιγώς χαλύβδινες διατομές χωρίς οπή. Τα δοκίμια του εν λόγω πειράματος είχαν κλίμακα 1:10 ως προς τη λυγηρότητα του κελύφους. Διατηρήθηκαν όσο το δυνατόν και οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα αυτά, ώστε η μόνη διαφοροποίηση να έγκειται στη διατομή του εξεταζόμενου δοκιμίου.

Για τη δημιουργία της πειραματικής διατομής τύπου sandwich, η συμπαγής χαλύβδινη διατομή του προηγούμενου πειράματος αντικαταστάθηκε από δύο ισοπαχή χαλύβδινα ελάσματα, τα οποία

απομακρύνθηκαν μεταξύ τους, ώστε να προκύψει η διατομή τύπου sandwich, της οποίας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά θα παρουσιαστούν πιο αναλυτικά στη συνέχεια, όπως και η πειραματική διάταξη. Για την επιλογή του κατάλληλου πάχους του πυρήνα επιστρατεύθηκε η προτεινόμενη μεθοδολογία προσδιορισμού της βέλτιστης διατομής τύπου sandwich σε όρους ροπής αντοχής και δυσκαμψίας, που παρουσιάστηκε στο 2ο κεφάλαιο. Σύμφωνα με αυτό και διατηρώντας σταθερά τα πάχη των ελασμάτων από χάλυβα, έγινε επιλογή πυρήνα που να μεγιστοποιεί όσο το δυνατόν ταυτόχρονα την καμπτική αντοχή και τη δυσκαμψία της διατομής.

Η επιλογή του κονιάματος πλήρωσης του πυρήνα του πειραματικού δοκιμίου, έγινε λόγω αρκετών περιορισμών. Αρχικά, λόγω του μικρού πάχους πυρήνα που προέκυψε, η σύσταση του κονιάματος έπρεπε να αποτελείται από επαρκώς μικρά αδρανή, ώστε να είναι εφικτή η διείδυση και να είναι όσο το δυνατόν αυτοσυμπυκνούμενο, αφού δονητής δεν μπορούσε να περάσει από το διάκενο. Επίσης, για να μπορέσει να καλύψει όλο το εύρος της διατομής έπρεπε να είναι αρκετά ρευστό, καθώς και να μην συρρικνώνεται κατά την πήξη. Η ανάπτυξη ικανοποιητικής συνάφειας με το χάλυβα, αλλά και επαρκούς αντοχής ήταν άλλα δύο κριτήρια για την επιλογή του εν λόγω κονιάματος. Εν τέλει, το κονίαμα που επιλέχθηκε είναι το LINEA 810 SL της εταιρείας KEMA [3-2].

Όπως αναφέρθηκε, στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε μια επέκταση για την άσκηση του φορτίου από το έμβολο. Το κέλυφος προέκτασης είναι το ίδιο με αυτό του πειράματος από το Χ. Δημόπουλο, το οποίο είναι αμιγώς χαλύβδινο και σχεδιασμένο ώστε να διαθέτει υπεραντοχή, η οποία να το διατηρεί στην ελαστική περιοχή καθ' όλη τη διάρκεια επιβολής φορτίου. Το συγκεκριμένο κέλυφος, πέρα από την ανάγκη συγκρισιμότητας με τα προγενέστερα πειραματικά αποτελέσματα, εξυπηρετεί σε έναν ακόμη σκοπό. Η κατανομή των φορτίων σε έναν πυλώνα ανεμογεννήτριας είναι λογικό να είναι μεγαλύτερη στα κατώτερα στρώματα του, τόσο αξονικά, λόγω του ίδιου βάρους των ανώτερων τμημάτων, όσο και καμπτικά, λόγω του μεγαλύτερου μοχλοβραχίονα που έχει η τέμνουσα δύναμη του ανέμου. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την επιδίωξη ελαχιστοποίησης κόστους και βάρους, οδηγεί στην πιθανή λύση μίας υβριδικής κατασκευής, η οποία αποτελείται από διατομές τύπου sandwich στα κατώτερα τμήματα και αμιγώς χαλύβδινες στα ανώτερα, όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο κεφάλαιο. Επομένως, η χρήση του αμιγώς χαλύβδινου κελύφους επέκτασης, αποτελεί μία πρώτη αποτίμηση αυτής της λογικής.

3.3 Υλοποίηση πειραμάτων

3.3.1 Κατασκευή δοκιμίων

Κατασκευάστηκαν δύο όμοια δοκίμια διατομής τύπου sandwich. Τα χαλύβδινα ελάσματα και οι φλάντζες κατασκευάστηκαν από την εταιρεία Αφοί Βαλάσης Α.Ε., την πλέον αξιόπιστη εταιρεία στο τμήμα των μεταλλικών κατασκευών, ενώ οι επιπλέον συγκολλήσεις των φλαντζών στα δοκίμια μετά την πήξη του κονιάματος, πραγματοποιήθηκαν από πιστοποιημένο συγκολλητή. Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε για τα ελάσματα είχε πάχος 2mm και ήταν ποιότητας S235, όπως και ο αντίστοιχος χάλυβας των φλαντζών και των κοχλιών. Κάθε χαλύβδινο έλασμα, εσωτερικό και εξωτερικό, κόπηκε σε κατάλληλες διαστάσεις, καμπυλώθηκε και συγκολλήθηκε διαμήκως, αποκτώντας έτσι το κατάλληλο κυλινδρικό σχήμα. Σε κάθε φλάντζα ανοίχθηκαν 28 οπές διαμέτρου 22mm για τους κοχλίες. Τέλος, τα δύο ελάσματα τοποθετήθηκαν σε μία φλάντζα, όπου συγκολλήθηκαν με εξωραφή.

Το κονίαμα παρασκευάστηκε στο χώρο του εργαστηρίου που πραγματοποιήθηκε το πείραμα, σύμφωνα πάντα με τις οδηγίες και τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Για την πλήρωση του κενού μεταξύ των ελασμάτων χρησιμοποιήθηκε υδραυλική αντλία (Εικόνα 3-1) αντί για απλή έγχυση, καθώς η εισχώρηση συσκευής δόνησης μέσω του πολύ μικρού πάχους κενού ήταν αδύνατη, ενώ η υδραυλική πλήρωση (Εικόνα 3-2) εξασφαλίζει σημαντικά καλύτερη συμπύκνωση και αντισταθμίζει ανεπαρκή δόνηση. Η απαραίτητη συμπύκνωση του κονιάματος εξασφαλίστηκε επίσης από την ιδιότητα αυτοσυμπύκνωσης

του και από τις συνεχείς κρούσεις με χρήση σφυριού κατά τη διάρκεια της πλήρωσης. Μετά την πλήρωση, τοποθετήθηκαν στην ανοικτή επιφάνεια των δοκιμίων υγρά πανιά, τα οποία διατηρήθηκαν εκεί για 28 μέρες, έως ότου το κονίαμα αναπτύξει την πλήρη αντοχή του. Μετά το πέρας των 28 αυτών ημερών, συγκολλήθηκαν στο ανοικτό τμήμα των δοκιμίων οι επιπλέον φλάντζες για τη σύνδεση με την επέκταση.



Εικόνα 3-1: Αντλία κενού για υδραυλική χρήση [3-3]



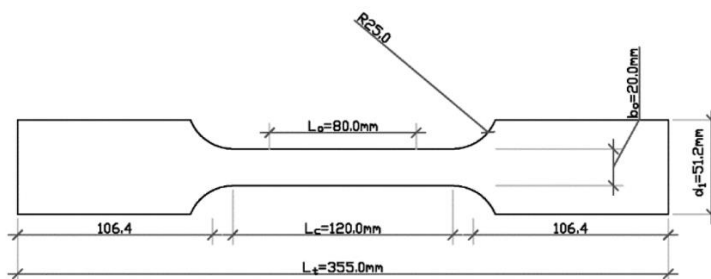
Εικόνα 3-2: Τελική φάση έγχυσης με την αντλία [3-3]

Για τη συνολική υδραυλική πλήρωση των δοκιμίων με κονίαμα χρειάστηκε να παρασκευαστούν 3 παρτίδες κονιάματος. Έτσι, ταυτόχρονα με την υδραυλική πλήρωση των δοκιμίων, λήφθηκαν 4 μήτρες (Εικόνα 3-3) για κάθε παρτίδα για τον μετέπειτα έλεγχο της αντοχής τους. Για τις συνολικά 12 μήτρες που δημιουργήθηκαν πραγματοποιήθηκε εξέλιξη της αντοχής τους. Αυτό έγινε μέσω της σταδιακής θραύσης τους, κατά την 8^η, τη 15^η και την 28^η ημέρα μετά την παρασκευή τους, καθώς και κατά τις ημερομηνίες εκτέλεσης των πειραμάτων.

Για καθένα από τα δύο φύλλα χάλυβα, από τα οποία προέκυψαν τα ελάσματα για τα δύο δοκίμια, λήφθηκαν 3 δοκίμια για έλεγχο σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Τα συνολικά 6 δοκίμια κόπηκαν από κάθε φύλλο με πριονοκορδέλα και διαμορφώθηκαν με χρήση φρέζας και σύμφωνα με τις προδιαγραφές EN ISO 6892-1 [3-4], στην παρακάτω γεωμετρία (Εικόνα 3-4).



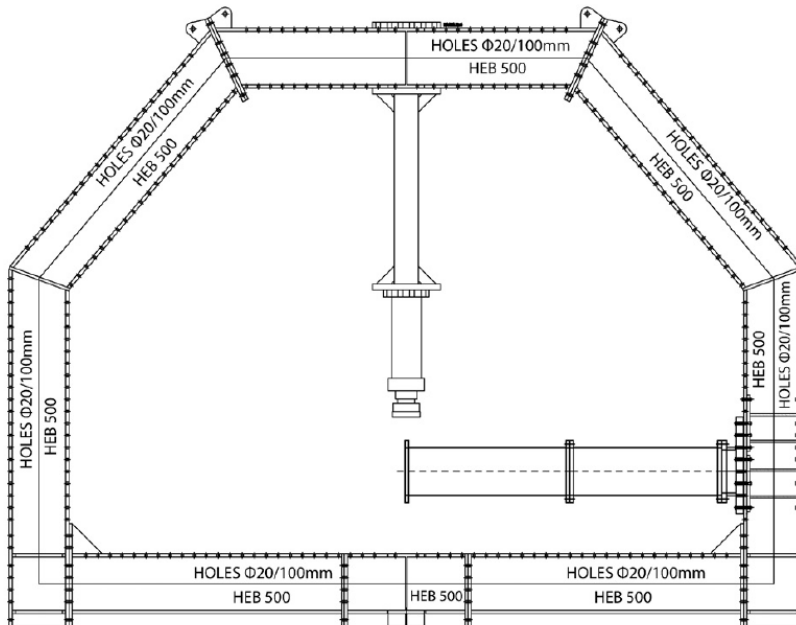
Εικόνα 3-3: Πρισματικά δοκίμια κονιάματος για προσδιορισμό μηχανικών χαρακτηριστικών [3-3]



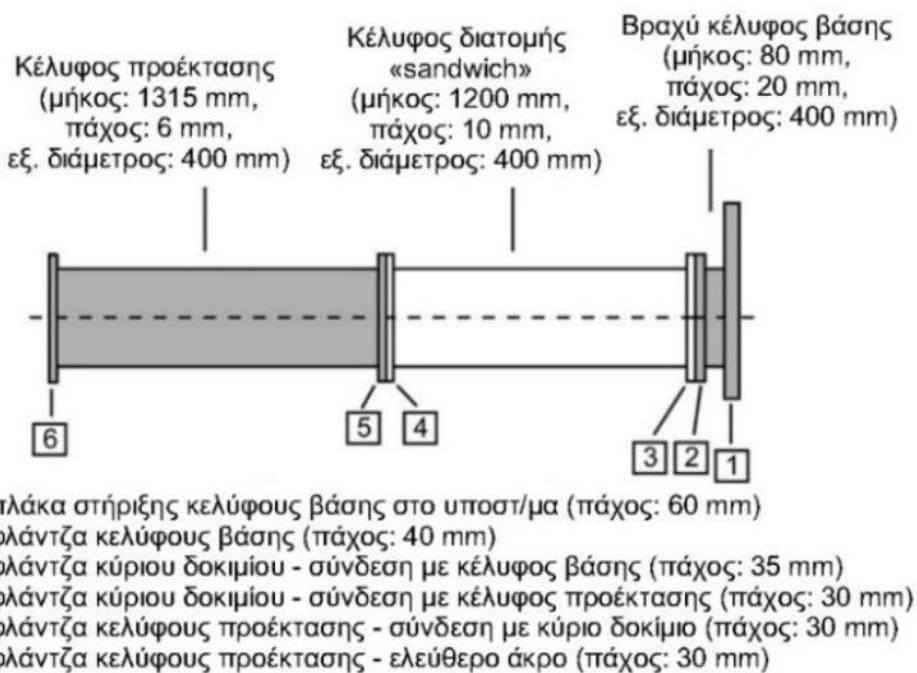
Εικόνα 3-4: Γεωμετρικές διαστάσεις δοκιμίων χάλυβα για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων [3-3]

3.3.2 Πειραματική διάταξη και διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία έλαβε χώρα στο χώρο δοκιμών του εργαστηρίου μεταλλικών κατασκευών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την κάμψη των δοκιμών περιλαμβάνει το πλαίσιο φόρτισης, το υδραυλικό έμβολο και σαφώς το δοκίμιο με τα πρόσθετα στοιχεία (Εικόνα 3-5, Εικόνα 3-6). Το πλαίσιο φόρτισης αποτελείται από δύο επιμέρους επίπεδα πλαίσια, τα οποία τέμνονται κάθετα μεταξύ τους και αποτελούνται από πρότυπη διατομή HEB500. Το έμβολο άσκησης φορτίου είναι κατασκευασμένο από την εταιρεία Malvasia, με δυναμικότητα σε όρους πίεσης 250bar και μέγιστου επιβαλλόμενου φορτίου 500kN.



Εικόνα 3-5: Σκαρίφημα πειραματικής διάταξης εργαστηρίου [3-3]

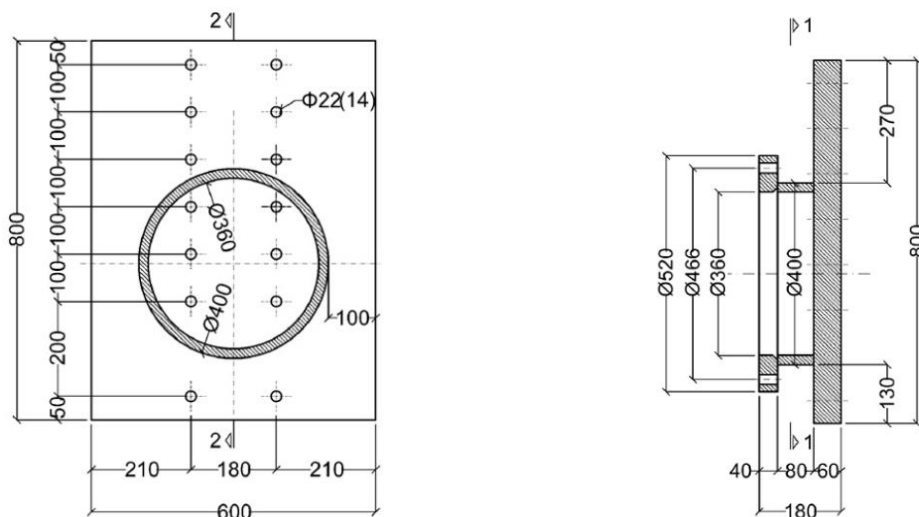


Εικόνα 3-6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πειραματικού δοκιμίου [3-3]

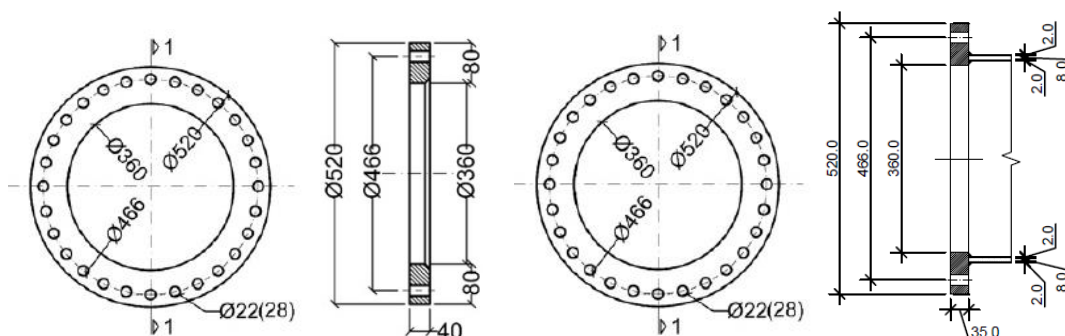
Οι δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού για τα χαλύβδινα δοκίμια έγιναν στον ίδιο χώρο δοκιμών του ΕΜΠ που αναφέρεται παραπάνω, σε σερβουϋδραυλικό πλαίσιο φόρτισης Instron 300kN. Η βαθμονόμηση του επιβαλλόμενου φορτίου έγινε με δακτύλιο Wykeham Farrance ευαισθησίας 10.62N με γραμμική απόκριση μεγίστου σφάλματος 0.2%. Η βαθμονόμηση της μετατόπισης έγινε με διακριβωμένο μικρομετρικό κοχλία High Mag ευαισθησίας 1μm.

Οι δοκιμές πάνω στα πρισματικά δοκίμια πραγματοποιήθηκαν στο Τμήμα Τεχνικών Υλικών & Στοιχείων του Κεντρικού Εργαστηρίου Δημοσίων Έργων (ΚΕΔΕ). Για κάθε δοκίμιο έγινε αρχικά δοκιμή κάμψης τριών σημείων για έλεγχο καμπτικής αντοχής και καθένα από τα δύο επιμέρους τμήματα που προέκυψαν από τη θραύση, υποβλήθηκε σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του.

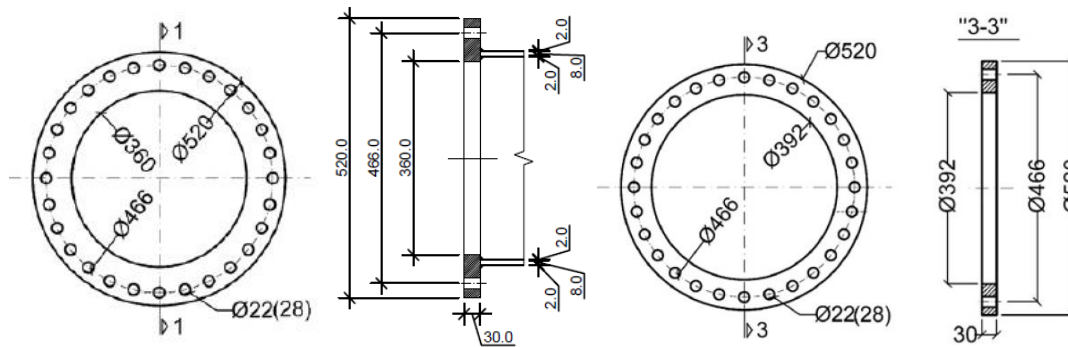
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη διάταξη παίρνει μέρος και ένα κέλυφος με υπεραντοχή, που έχει το ρόλο της προέκτασης, στο άκρο της οποίας γίνεται η επιβολή του φορτίου από το έμβολο. Επίσης, χρησιμοποιείται ένα ακόμη κέλυφος, το οποίο είναι βραχύ και συνδέεται με μία μετωπική πλάκα, η οποία με τη σειρά της συνδέεται στο υποστύλωμα του πλαισίου φόρτισης με σύνδεση ροπής (Εικόνα 3-7). Κάθε επιπρόσθετο στοιχείο συνδέεται με το δοκίμιο με κοχλίωση μέσω των φλαντζών σε κάθε άκρο του (Εικόνα 3-8 - Εικόνα 3-10).



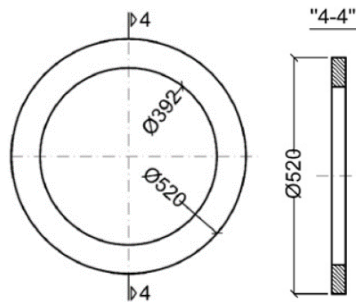
Εικόνα 3-7: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πλάκας μετωπικής σύνδεσης και κελύφους βάσης [3-1]



Εικόνα 3-8: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φλαντζών 2 και 3 (Εικόνα 3-6)



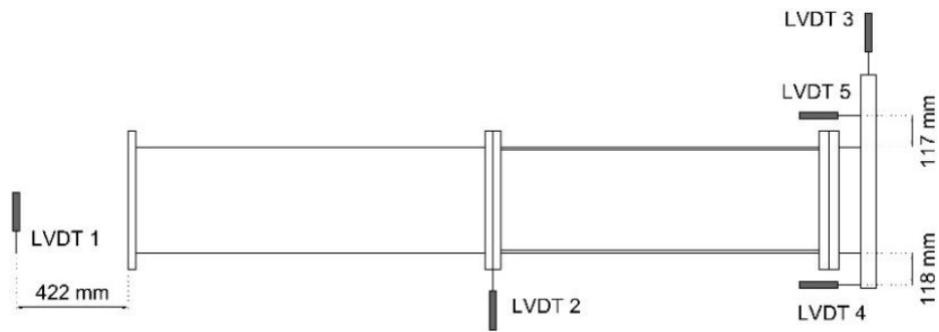
Εικόνα 3-9: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φλαντζών 4 και 5 (Εικόνα 3-6)



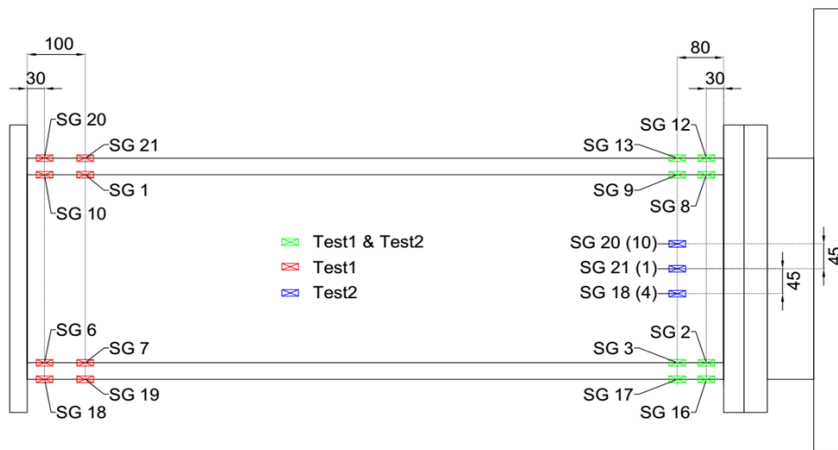
Εικόνα 3-10: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φλάντζας 6 (Εικόνα 3-6)

Όπως φαίνεται και από την προηγούμενη εικόνα, το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε οριζόντια θέση. Αρχικά, έγινε η σύνδεση της μετωπικής πλάκας του βραχέως κελύφους βάσης στο υποστύλωμα του πλαισίου μέσω 14 κοχλιών M20 ποιότητας 10.9. Έπειτα, η κάτω φλάντζα του δοκιμίου συνδέθηκε με τη φλάντζα του κελύφους βάσης μέσω 28 κοχλιών M20 ποιότητας 10.9, ενώ με τον ίδιο τρόπο συνδέθηκε η κάτω φλάντζα της επέκτασης με την άνω φλάντζα του δοκιμίου. Η άνω φλάντζα του κελύφους επέκτασης χρησιμοποιήθηκε ως θέση επιβολής του φορτίου. Εφόσον έγιναν όλες οι παραπάνω ενέργειες, οι κοχλίες των συνδέσεων φλαντζών και μετωπικής πλάκας προεντάθηκαν κατά 600kNm με χρήση «ροπόκλειδου», σε δύο κύκλους επαναλήψεων. Τέλος, έγινε ενίσχυση στο υποστύλωμα του πλαισίου, στην περιοχή της σύνδεσης με την μετωπική πλάκα, με δύο ζεύγη νευρώσεων σε κάθε πλευρά του κορμού.

Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων από την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν 3 διαφορετικές μέθοδοι καταγραφής της συμπεριφοράς του δοκιμίου: μετρήσεις μετακίνησης, μετρήσεις παραμορφώσεων και οπτικός έλεγχος. Για τις μετρήσεις μετακίνησης, πέρα από την καταγραφή της επιβαλλόμενης μετακίνησης από το έμβολο, τοποθετήθηκαν Γραμμικές Μεταβλητές Διαφορικών Μετασχηματισμών (LVDT) στις θέσεις που παρουσιάζονται παρακάτω (Εικόνα 3-11). Στόχος, ήταν η δημιουργία των δρόμων ισορροπίας έχοντας ως αποτελέσματα τις καταγεγραμμένες μετακινήσεις σε αυτές τις θέσεις και την υπολογισμένη δύναμη αντίστασης του εμβόλου. Για τις μετρήσεις παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν παραμορφωσίμετρα (Strain Gauges), τα οποία τοποθετήθηκαν αξονικά στις παρακάτω θέσεις (Εικόνα 3-12), για την παρακολούθηση τοπικών φαινομένων στο εξωτερικό και στο εσωτερικό έλασμα, αλλά και για τον έλεγχο της μετατόπισης του ουδέτερου άξονα σε επιλεγμένη διατομή του δοκιμίου. Για τον οπτικό έλεγχο έγινε χρήση δύο συσκευών βιντεοσκόπησης, εντός και εκτός του δοκιμίου για την αποτύπωση της συμπεριφοράς των δύο ελασμάτων.



Εικόνα 3-11: Θέσεις τοποθέτησης των LVDTs στα πειραματικά δοκίμια



Εικόνα 3-12: Θέσεις τοποθέτησης των strain gauges στα πειραματικά δοκίμια

Η μετακίνηση του υδραυλικού εμβόλου ασκήθηκε κατακόρυφα και εγκάρσια στο δοκίμιο, στη θέση της άνω φλάντζας του κελύφους της επέκτασης, ώστε κυρίαρχη μορφή φόρτισης να είναι η καμπτική ροπή. Ο ρυθμός επιβολής της μετακίνησης ήταν σταθερός και ίσος με 0,01mm/sec. Η τελική διάταξη του πειράματος φαίνεται παρακάτω (Εικόνα 3-13).



Εικόνα 3-13: Πειραματική διάταξη [3-3]

3.4 Αποτελέσματα

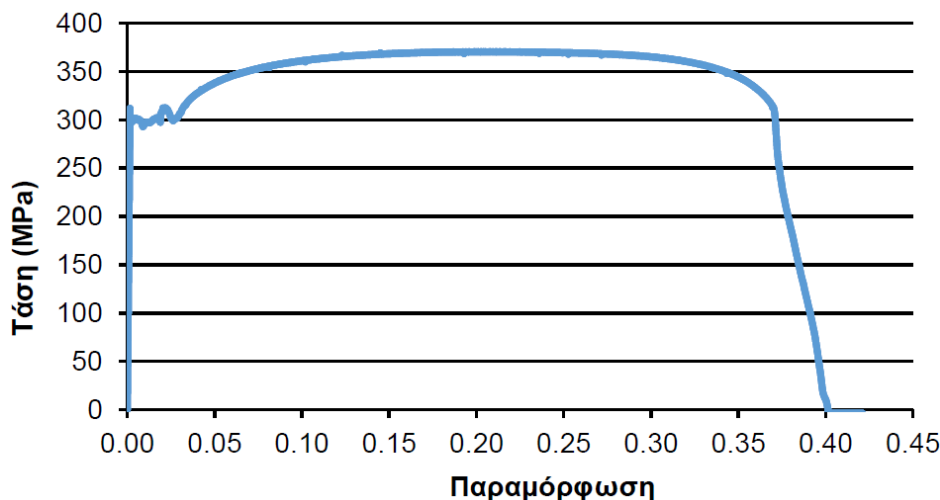
3.4.1 Ιδιότητες υλικών

Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού του χάλυβα των ελασμάτων, παρουσιάζονται παρακάτω (

Πίνακας 3-1). Επίσης ενδεικτικά παρατίθεται ένα διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (Σχήμα 3-1) μίας από τις δοκιμές και η μορφή του δοκιμίου αυτού πριν και μετά από τον μονοαξονικό εφελκυσμό (Εικόνα 3-14).

Πίνακας 3-1: Ιδιότητες χάλυβα από 6 δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού

	Δοκίμια πυλώνα Α			Δοκίμια πυλώνα Β		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	207	207	207	208	207	207
Τάση διαρροής (MPa)	300	305	305	300	300	300



Σχήμα 3-1: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα υπό μονοαξονικό εφελκυσμό [3-3]



Εικόνα 3-14: Μορφή δοκιμίου χάλυβα πριν και μετά τη δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού [3-3]

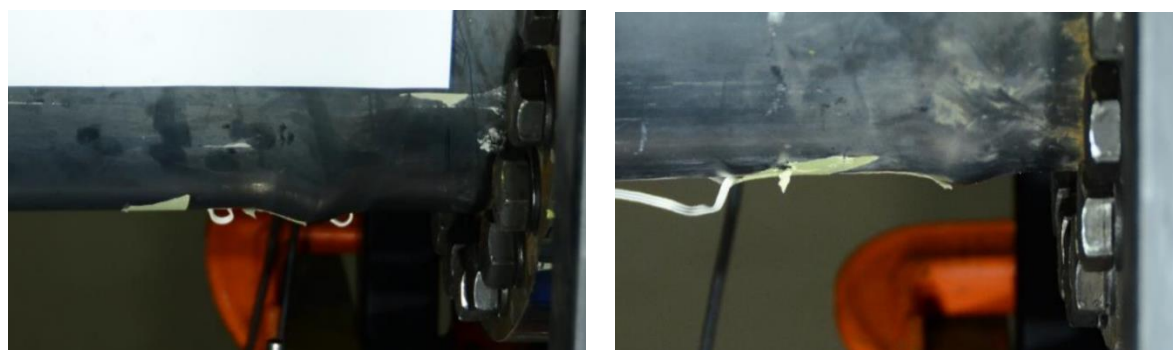
Παρακάτω παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα από τις δοκιμές κάμψης τριών σημείων των πρισματικών δοκιμίων κονιαμάτων, καθώς και της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των δύο επιμέρους δοκιμίων που προέκυψαν από την προαναφερθείσα κάμψη. Η παρουσίαση (Πίνακας 3-2) αφορά την εξέλιξη της αντοχής από την 8^η μέρα έως την ημέρα που πραγματοποιήθηκε το κυρίως πείραμα.

Πίνακας 3-2: Εξέλιξη αντοχής κονιάματος από δοκιμές κάμψης τριών σημείων και μονοαξονικής θλίψης 8, 15, 28, 77, 101 ημέρες μετά την έγχυση

Χρόνος μετά την έγχυση (μέρες)	Δοκίμιο	Καμπτική αντοχή (MPa)	Θλιπτική αντοχή (MPa)	
8	A	2.14	14.60	13.80
	B	2.78	16.10	15.80
15	A	3.25	18.00	18.10
	B	3.43	17.00	16.70
28	A	3.26	18.20	16.60
	B	3.90	20.20	19.40
	Γ	4.10	18.60	18.80
	Δ	3.40	18.70	19.20
77 (1 ^ο πείραμα)	A	4.34	24.30	26.00
	B	4.65	24.00	23.20
101 (2 ^ο πείραμα)	A	4.60	32.80	31.30
	B	5.40	30.50	29.60

3.4.2 Συμπεριφορά δοκιμών

Όπως ήταν αναμενόμενο, και στις δύο περιπτώσεις των δοκιμών, εκδηλώθηκε το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού στη θλιβόμενη πλευρά του δοκιμίου κοντά στη βάση. Στην πρώτη πειραματική δοκιμή (Εικόνα 3-15), ο τοπικός λυγισμός εντοπίστηκε σε απόσταση 90mm από το άκρο του ελάσματος, ενώ στη δεύτερη, 60mm από το άκρο.



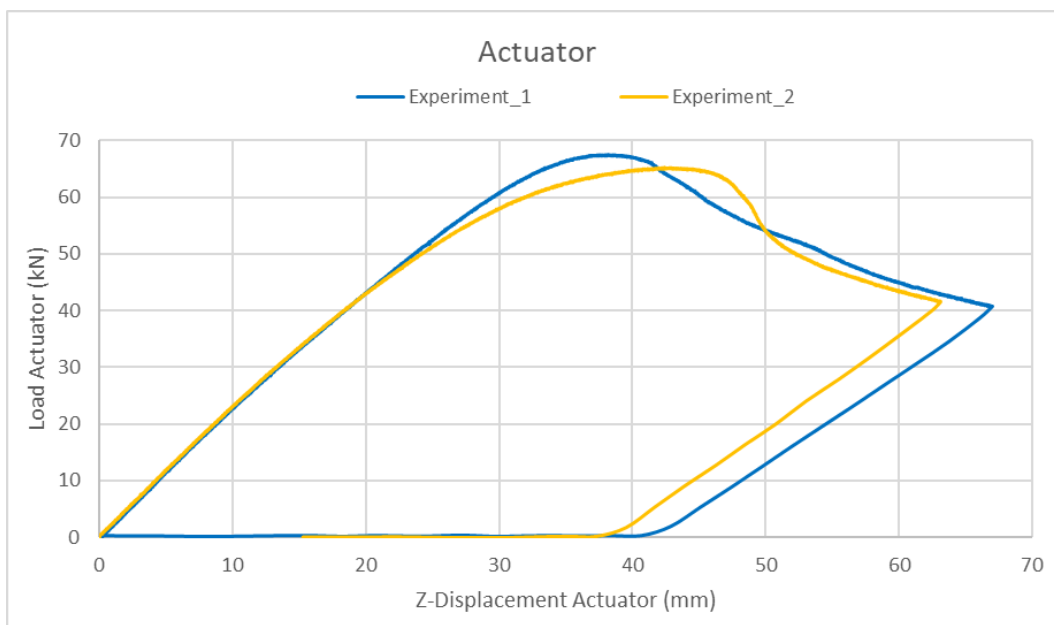
Εικόνα 3-15: Εκδήλωση τοπικού λυγισμού σε απόσταση 90mm και 60mm από το άκρο του ελάσματος για το πρώτο και το δεύτερο πείραμα αντίστοιχα [3-3]

Επίσης, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, έγινε η καταγραφή των αποτελεσμάτων σε όρους μετακινήσεων στα LVDTs και στο έμβολο και σε όρους φορτίου αντίστασης στο έμβολο. Οι τιμές που προέκυψαν στις παραπάνω θέσεις, για κάθε ένα από τα πειράματα, κατά την εκδήλωση της αστοχίας (Πίνακας 3-3).

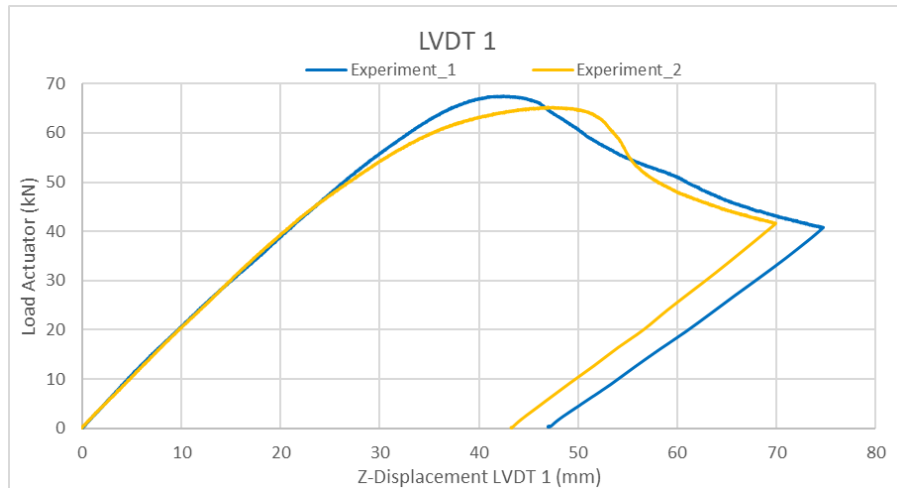
Πίνακας 3-3: Φορτία αστοχίας και αντίστοιχες μετακινήσεις στο έμβολο και στα LVDTs και στα δύο πειραματικά δοκίμια

		Πείραμα 1	Πείραμα 2
Φορτίο αστοχίας (kN)		67.62	65.28
Μετακίνηση κατά την αστοχία (mm)	Έμβολο	38.20	42.44
	LVDT 1	42.41	46.96
	LVDT 2	14.19	15.77
	LVDT 4	0.17	0.15
	LVDT 5	-1.61	-1.53

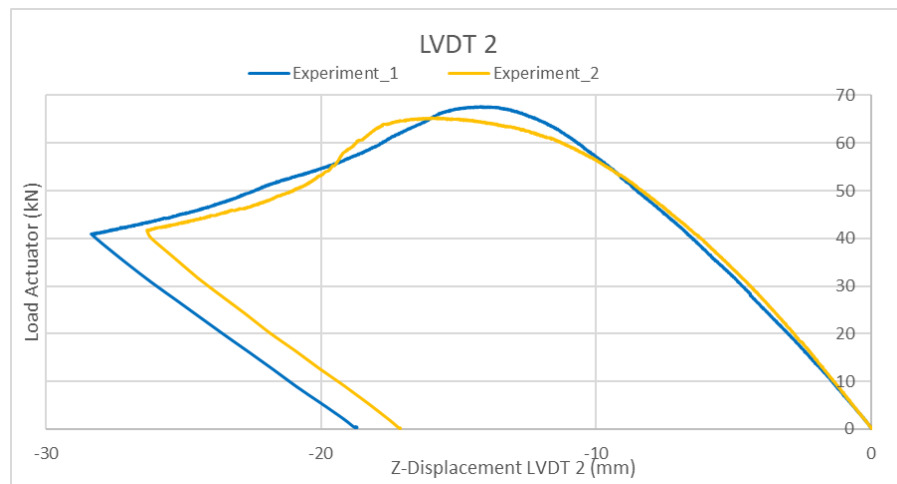
Από τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν καθ' όλη την πορεία της πειραματικής διαδικασίας, στις θέσεις που απεικονίζονται σε προηγούμενη εικόνα (Εικόνα 3-11), προέκυψαν οι δρόμοι ισορροπίας που φαίνονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 3-2 - Σχήμα 3-6). Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι μετατοπίσεις είτε στη θέση άσκησης του φορτίου (έμβολο) είτε στα τοποθετημένα LVDTs, ενώ στον κατακόρυφο άξονα η αντίδραση που αναπτύσσεται στο έμβολο από την επιβολή της μετατόπισης στο άκρο του κελύφους της επέκτασης. Στα σχήματα αυτά παρουσιάζεται η αντίδραση του εμβόλου σε σχέση με την μετακίνησή του και των LVDTs 1, σε απόσταση 422mm από το έμβολο, και LVDT 2, στη θέση σύνδεσης του δοκιμίου με το κέλυφος επέκτασης. Επίσης, απεικονίζεται η αντίδραση του εμβόλου σε σχέση με τις μετατοπίσεις των LVDTs 3, 4, 5. Τα δύο τελευταία αναφέρονται στην οριζόντια μετακίνηση του κάτω και του άνω μέρους αντίστοιχα της μετωπικής πλάκας σύνδεσης με το υποστύλωμα του πλαισίου. Αντιθέτως, το πρώτο από αυτά, αναφέρεται στην κατακόρυφη μετακίνηση της μετωπικής πλάκας σύνδεσης με το υποστύλωμα.



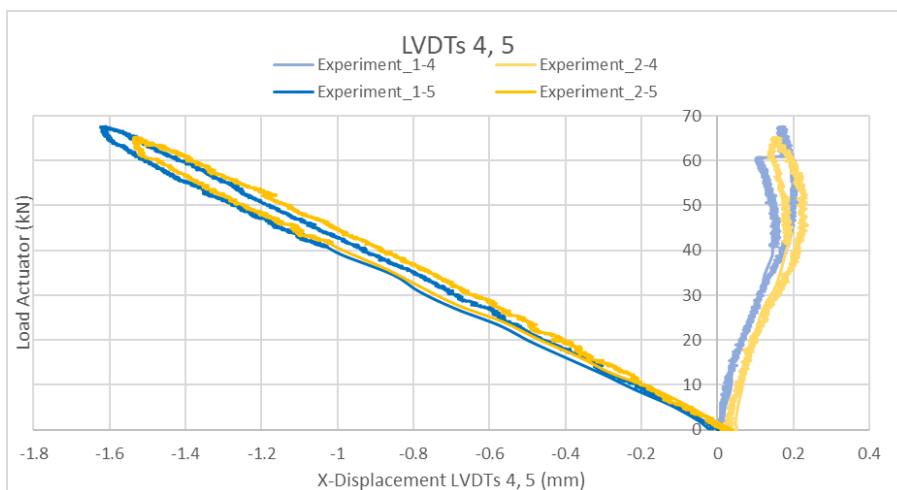
Σχήμα 3-2: Πειραματικοί δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στο έμβολο



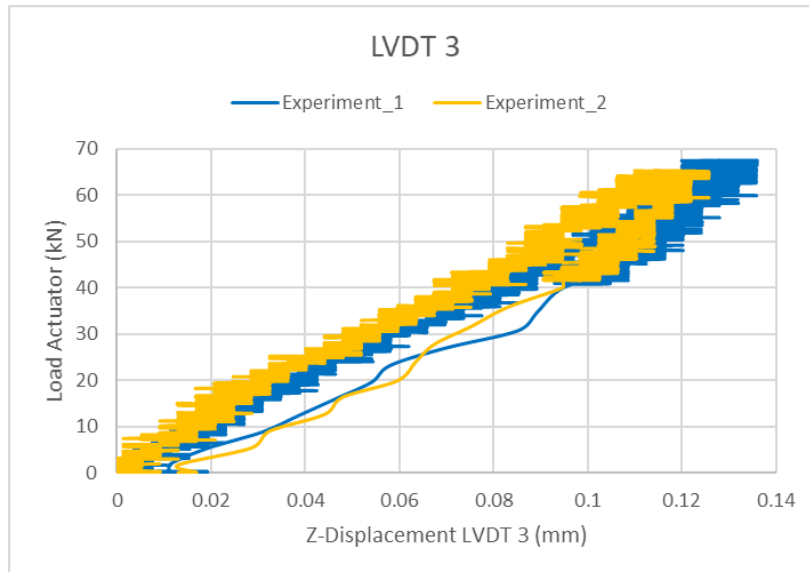
Σχήμα 3-3: Πειραματικοί δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στο LVDT 1



Σχήμα 3-4: Πειραματικοί δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στο LVDT 2



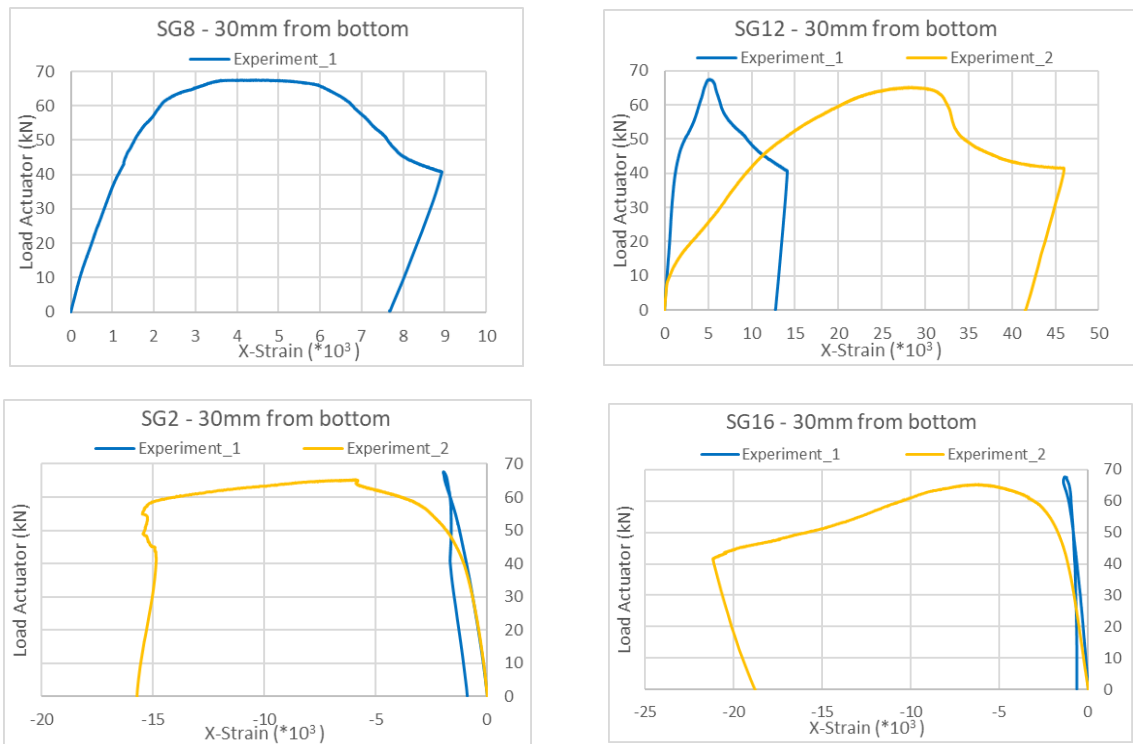
Σχήμα 3-5: Πειραματικοί δρόμοι ισορροπίας για οριζόντια μετακίνηση στα LVDTs 4, 5



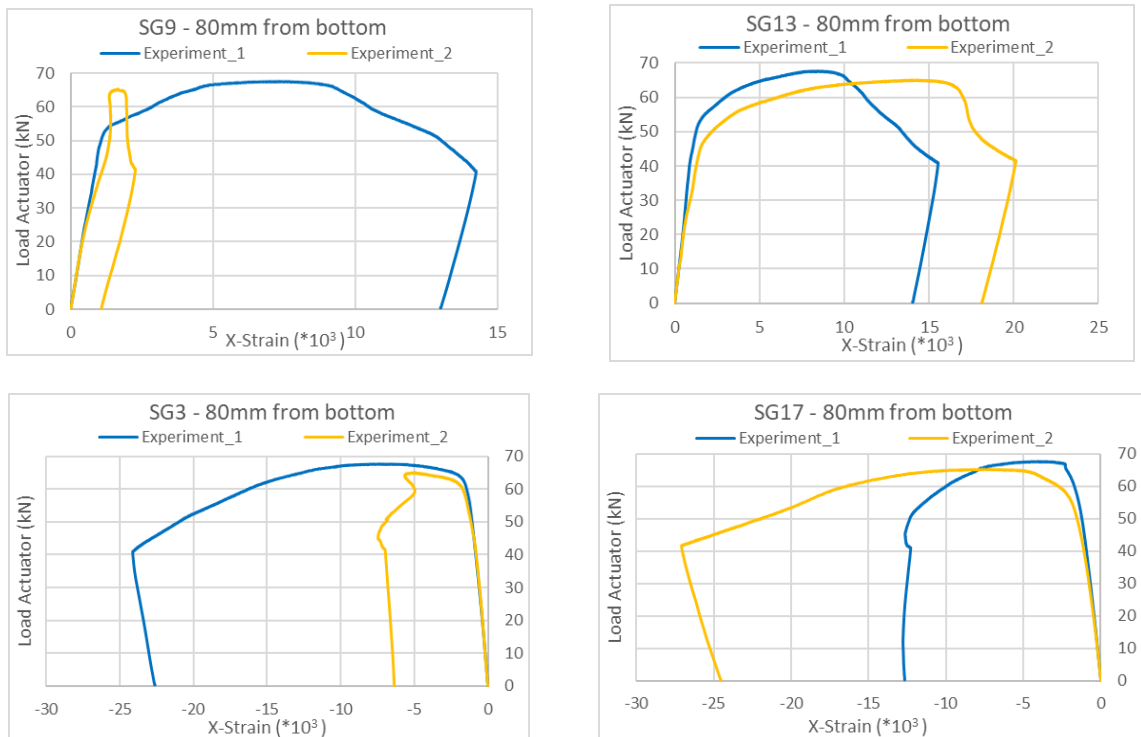
Σχήμα 3-6: Πειραματικοί δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στο LVDT 3

Η κατακόρυφη μετακίνηση της μετωπικής πλάκας σύνδεσης με το υποστύλωμα πλαισίου, η οποία καταγράφεται από το LVDT 3, στην ουσία εκφράζει τη σχετική ολίσθηση μεταξύ των επιφανειών επαφής αυτών των δύο. Οι αμελητέες μετακινήσεις που προέκυψαν από τις μετρήσεις (Σχήμα 3-6) υποδηλώνουν ότι δεν υπήρχε πρακτικά ολίσθηση μεταξύ τους. Αντιθέτως, από τα αποτελέσματα των LVDT 4, 5 φαίνεται ότι υπάρχει οριζόντια μετακίνηση στη μετωπική πλάκα βάσης, κάτι το οποίο υποδηλώνει τη σχετική στροφή του δοκιμίου ως προς τη βάση. Η στροφή αυτή, στο σημείο που το δοκίμιο δέχεται το οριακό φορτίο, υπολογίζεται σε 0.16° και ισοδυναμεί με περίπου κατακόρυφη μετακίνηση του ελεύθερου άκρου του δοκιμίου ίση με 7.50mm και για τις δύο περιπτώσεις δοκιμών. Πέρα από αυτό το γεγονός, τα αποτελέσματα και των 5 LVDTs, καταδεικνύουν μια ικανοποιητική επαναληψιμότητα μεταξύ των δύο πειραματικών δοκιμών, όσον αφορά τη μακροσκοπική συμπεριφορά του φορέα. Η μόνη διαφορά έγκειται στην τιμή μετατόπισης που αντιστοιχεί στο οριακό φορτίο του φορέα. Στη δεύτερη πειραματική δοκιμή, παρατηρείται σε ελαφρώς μεγαλύτερη μετατόπιση από ότι στην πρώτη, κάτι που εξηγείται από το γεγονός ότι στη δεύτερη περίπτωση παρουσιάστηκε επιπρόσθετη στροφή στο φορέα, η οποία εντοπίστηκε βάσει υπολογισμών στη θέση σύνδεσης του πειραματικού δοκιμίου με το κέλυφος της επέκτασης.

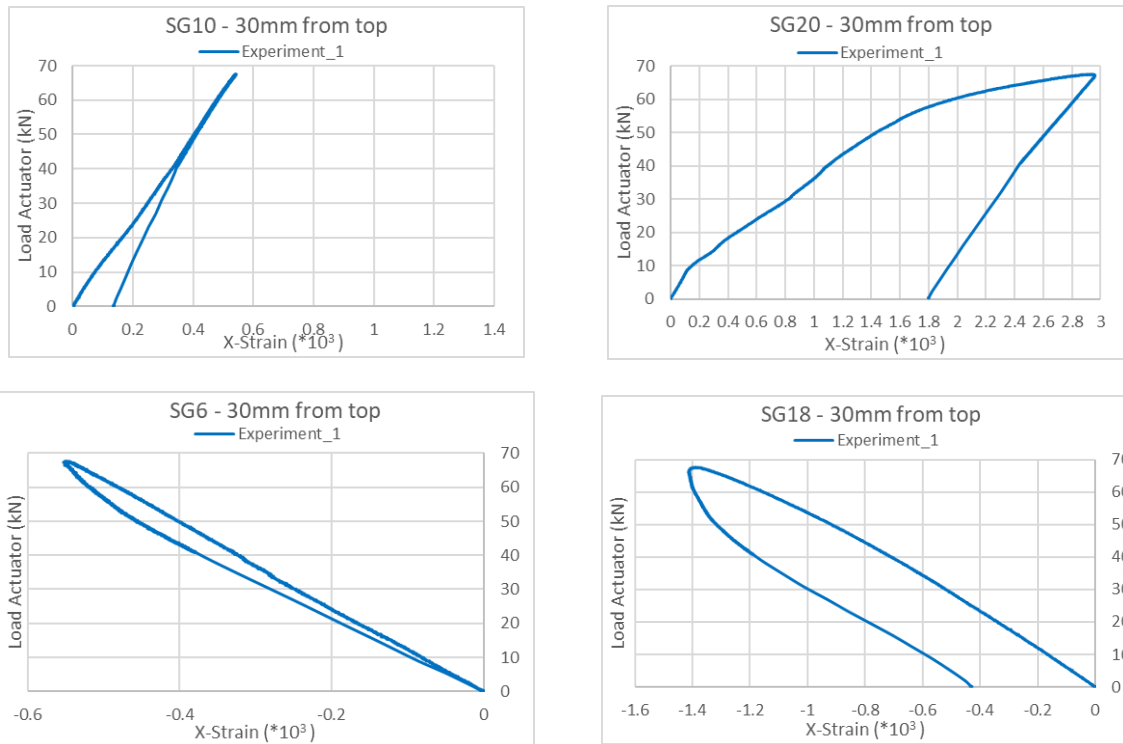
Πέρα από τα διαγράμματα δρόμων ισορροπίας που απεικονίζουν τις μετρημένες μετατοπίσεις, έγινε και η μέτρηση των αξονικών παραμορφώσεων, μέσω των Strain Gauges στις θέσεις που φαίνονται σε παραπάνω εικόνα (Εικόνα 3-12), και η καταγραφή τους σε διαγράμματα φορτίου-παραμόρφωσης (Σχήμα 3-7 - Σχήμα 3-11). Ωστόσο, η ευαισθησία αυτών των παραμορφωσίμετρων είναι αρκετά μεγάλη και η μέτρηση των παραμορφώσεων ευάλωτη σε τοπικό επίπεδο σε θόρυβο από ποικίλες αιτίες. Έτσι, τα διαγράμματα που εξάγονται από αυτές τις μετρήσεις είναι χρήσιμα ως αδρές απεικονίσεις σε ποιοτικό επίπεδο και όχι τόσο ακριβή σε ποσοτικό επίπεδο.



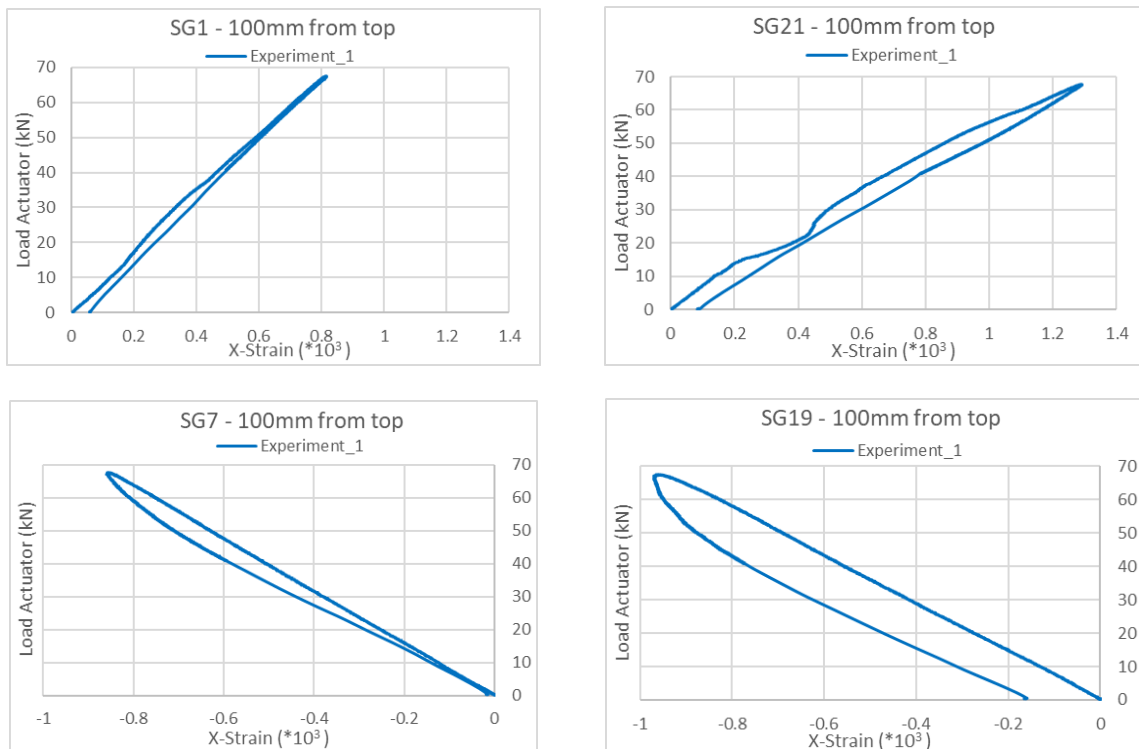
Σχήμα 3-7: Εξέλιξη παραμόρφωσης σε απόσταση 30mm από το άκρο κάτω μέρους. Κατά σειρά εφελκόμενη παρειά εσωτ. και εξωτ. ελάσματος και αντίστοιχα θλιβόμενης παρειάς, πειραματικά (βλ. (Εικόνα 3-12) για θέσεις)



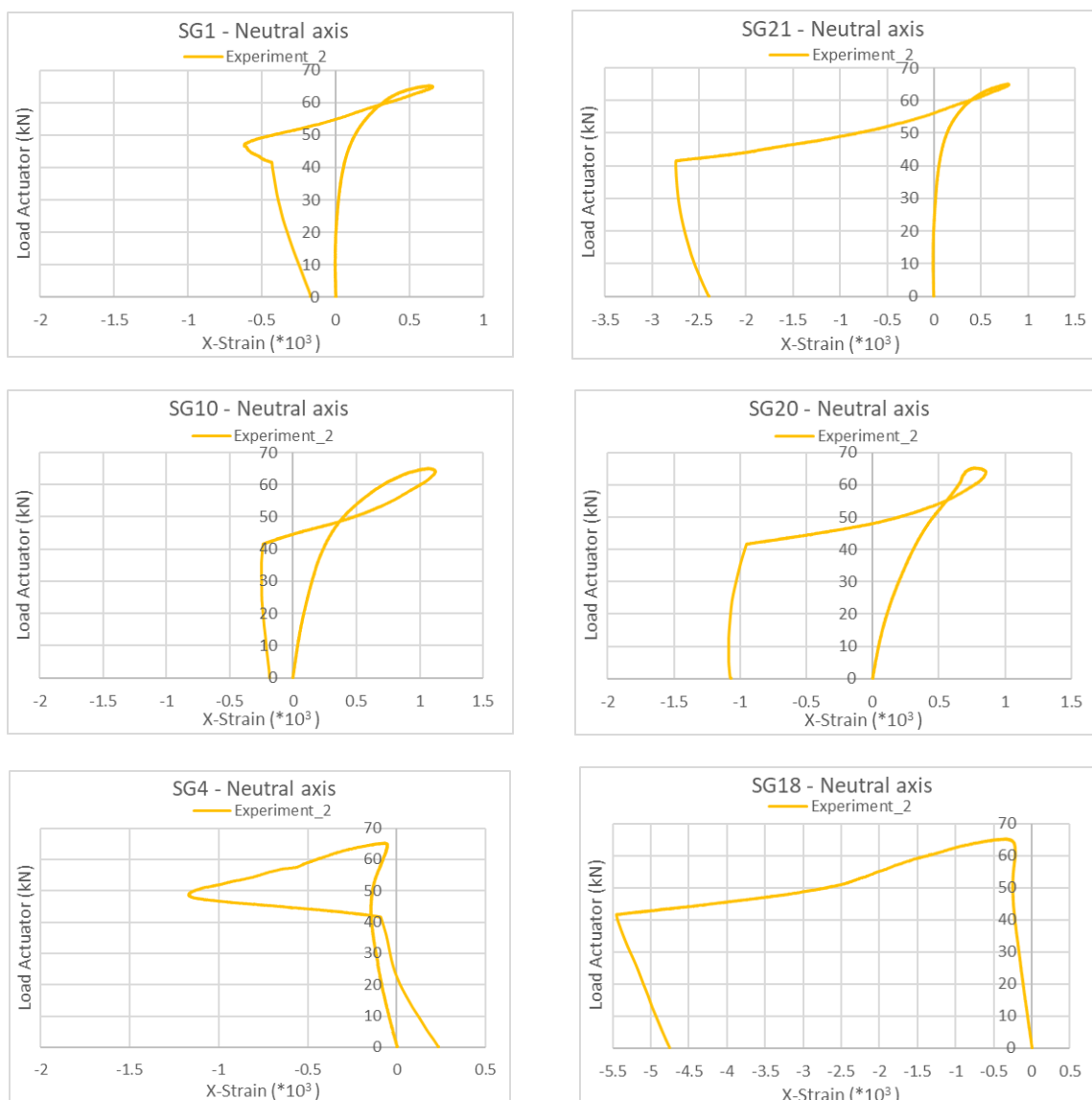
Σχήμα 3-8: Εξέλιξη παραμόρφωσης σε απόσταση 80mm από το άκρο κάτω μέρους. Κατά σειρά εφελκόμενη παρειά εσωτ. και εξωτ. ελάσματος και αντίστοιχα θλιβόμενης παρειάς, πειραματικά (βλ. (Εικόνα 3-12) για θέσεις)



Σχήμα 3-9: Εξέλιξη παραμόρφωσης σε απόσταση 30mm από το άκρο άνω μέρους. Κατά σειρά εφελκυσόμενη παρειά εσωτ. και εξωτ. ελάσματος και αντίστοιχα θλιβόμενης παρειάς, πειραματικά (βλ. (Εικόνα 3-12) για θέσεις)



Σχήμα 3-10: Εξέλιξη παραμόρφωσης σε απόσταση 100mm από το άκρο άνω μέρους. Κατά σειρά εφελκυσόμενη παρειά εσωτ. και εξωτ. ελάσματος και αντίστοιχα θλιβόμενης παρειάς, πειραματικά (βλ. (Εικόνα 3-12) για θέσεις)



Σχήμα 3-11: Εξέλιξη παραμόρφωσης σε αποστάσεις γύρω από τον ουδέτερο άξονα. Κατά σειρά στην αρχική θέση του ουδέτερου άξονα του εσωτ. και του εξωτ. ελάσματος και αντίστοιχα σε απόσταση 45mm πάνω από τον ουδέτερο άξονα και 45mm κάτω από αυτόν, πειραματικά (βλ. (Εικόνα 3-12) για θέσεις)

Βλέποντας τα δύο πρώτα διαγράμματα από το Σχήμα 3-7 και το Σχήμα 3-8 (SG8, SG12, SG9, SG13), παρατηρείται ότι στην εφελκόμενη πλευρά, τα δύο χαλύβδινα ελάσματα, εσωτερικό και εξωτερικό, λειτούργησαν κατά τον ίδιο περίπου τρόπο στο πρώτο πείραμα. Αυτό αποδεικνύει την ικανοποιητική συνεργασία τους στο πλαίσιο της σύνθετης διατομής τύπου sandwich, με παρόμοιου βαθμού διαρροή σε απόσταση 30mm και 80mm από τη βάση, για εξωτερικό και εσωτερικό έλασμα αντίστοιχα. Στη δεύτερη δοκιμή, η διαρροή στην εφελκόμενη πλευρά υπήρξε σημαντικά εντονότερη και στις δύο αυτές θέσεις. Από το Σχήμα 3-8 φαίνεται ότι, από τη σύγκριση των παραμορφώσεων μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού ελάσματος, η συνεργασία τους ήταν καλή μέχρι φορτίο αντίδρασης περίπου 45kN, σημείο περίπου της διαρροής, το οποίο επιβεβαιώνεται και από τη βλάβη του strain gauge 6 του εσωτερικού κελύφους σε εκείνο το σημείο.

Τα δύο τελευταία διαγράμματα από το Σχήμα 3-7 και το Σχήμα 3-8 (SG2, SG16, SG3, SG17) αφορούν τη θλιπτική συμπεριφορά των δύο ελασμάτων για τις δύο πειραματικές δοκιμές. Για την πρώτη δοκιμή, η σύγκριση των δύο διαγραμμάτων, επιβεβαιώνει την εκδήλωση του λυγισμού σε θέση περίπου 90mm

από τη βάση, αφού το σχήμα που αναφέρεται σε θέση 80mm από τη βάση (Σχήμα 3-8) έχει μεγαλύτερες παραμορφώσεις από το πρώτο που αναφέρεται σε θέση 30mm από τη βάση. Κατά τη δεύτερη πειραματική δοκιμή, ο λυγισμός παρουσιάστηκε σε απόσταση περίπου 60mm από τη βάση, δηλαδή σχεδόν ανάμεσα από του δύο παραμορφωσιμετρητές θέσεων 80mm και 30mm από τη βάση. Για το λόγο αυτό παρατηρούνται σημαντικές παραμορφώσεις και στα δύο σχήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, αυτή τη φορά για τη δεύτερη δοκιμή κοιτάζοντας το εξωτερικό έλασμα. Για το εσωτερικό έλασμα των προαναφερθεισών σχημάτων της δεύτερης δοκιμής, η κατανομή των παραμορφώσεων παρουσιάζεται αντίστροφη (πιο μεγάλη στη θέση 30mm από τη βάση και μικρότερη στη θέση 80mm από τη βάση), πιθανώς λόγω εκδήλωσης του τοπικού λυγισμού πιο κοντά στη βάση στο εσωτερικό έλασμα από ότι στο εξωτερικό. Σε κάθε περίπτωση, η συνεργασία των δύο ελασμάτων παρουσιάζεται ικανοποιητική μέχρι το όριο διαρροής των 45kN και για τις δύο δοκιμές.

Βεβαίως αποτυπώθηκαν σε διαγράμματα και τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των strain gauges στον ουδέτερο άξονα και 45mm εκατέρωθεν αυτού. Στα διαγράμματα (Σχήμα 3-11) φαίνεται η μετακίνηση του ουδέτερου άξονα κατά την εξέλιξη της φόρτισης. Από τα strain gauges που τοποθετήθηκαν στη μέση γραμμή του ουδέτερου άξονα (SG1_N, SG21_N) φαίνεται η σταδιακή ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων σε αυτήν την περιοχή μετά από φορτίο 25kN. Αυτό είναι λογικό, καθώς λόγω της μικρής εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος, ο ουδέτερος άξονας μετατίθεται πιο χαμηλά, προς τη θλιβόμενη ζώνη, ώστε να υπάρξει ισοδυναμία δυνάμεων στη διατομή. Από τη θέση 45mm πάνω από τον αρχικό ουδέτερο άξονα (SG10_N, SG20_N) βλέπουμε αυτή την αύξηση των εφελκυστικών παραμορφώσεων, ενώ από τη θέση 45mm κάτω από τον αρχικό ουδέτερο άξονα (SG4_N, SG18_N), παρατηρείται η αύξηση των θλιβόμενων παραμορφώσεων με μικρό ρυθμό μέχρι περίπου φορτίο 50kN και έπειτα μειώνονται υποδηλώνοντας τη μετατόπιση του ουδέτερου άξονα προς αυτή τη θέση.

3.5 Συμπεράσματα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η πειραματική διερεύνηση της καινοτόμας διατομής sandwich για πυλώνες ανεμογεννητριών. Συγκεκριμένα, έγινε αναφορά στον τρόπο σχεδιασμού και κατασκευής των επιμέρους στοιχείων και των συνολικών δοκιμών που εξετάστηκαν, καθώς και της συνολικής πειραματικής διάταξης. Η τελευταία έλαβε χώρα στο εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών (EMK) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), ενώ τα δοκίμια που εξετάστηκαν αποτελούνταν από ένα πυρήνα κονιάματος, ο οποίος περικλειόταν εσωτερικά και εξωτερικά από χαλύβδινα ελάσματα. Ο λόγος που έγινε το παρών πείραμα, ήταν στα πλαίσια αναζήτησης μιας καλύτερης λύσης από άποψη αντοχής και δυσκαμψίας από ότι η συμβατική αμιγώς χαλύβδινη διατομή, η οποία παρουσιάζει δυσχέρειες όσον αφορά στη δημιουργία πυλώνων ανεμογεννητριών με μεγάλα ύψη (άνω των 150m). Ο προσδιορισμός της διατομής sandwich για το πείραμα έγινε μέσω της χρησιμοποίησης μιας προτεινόμενης μεθοδολογίας προσδιορισμού της βέλτιστης διατομής, σε όρους δυσκαμψίας και ελαστικής καμπτικής ροπής αντοχής. Η κατασκευή των ελασμάτων από χάλυβα πραγματοποιήθηκε από εξειδικευμένη εταιρεία στις μεταλλικές κατασκευές, ενώ, αφού επιλέχθηκε το κατάλληλο κονίαμα, η δημιουργία και η πλήρωση του έγινε στο ΕΜΚ-ΕΜΠ, μέσω υδραυλικής αντλίας για καλύτερη συμπίκνωση. Το δοκίμιο συνδέθηκε το υποστύλωμα του πλαισίου διάταξης του ΕΜΚ και αφού προστέθηκε σε αυτό επιπλέον ένα κέλυφος επέκτασης με υπεραντοχή, ασκήθηκε στο άκρο του δημιουργημένου προβόλου επιβαλλόμενη μετακίνηση. Η καταγραφή των αποτελεσμάτων από τα LVDTs, τα strain gauges και τα οπτικά μέσα παρουσίασαν αρκετά καλή επαναληψιμότητα, με μικρές διαφορές μεταξύ των δύο δοκιμών. Επίσης, κατέδειξαν μια ικανοποιητική συνεργασία μεταξύ των υλικών μέχρις ότου εμφανίστηκε η αστοχία, η οποία προήλθε από το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού κοντά στη βάση στο θλιβόμενο μέρος της διατομής. Η διαφοροποίηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των δύο υλικών, κονιάματος και χάλυβα, είχε ως αναμενόμενο αποτέλεσμα τη μετατόπιση του ουδέτερου άξονα προς το μέρος της θλιβόμενης πλευράς, αφού η εφελκυστική αντοχή του κονιάματος είναι σχεδόν αμελητέα. Τα

αποτελέσματα του πειράματος για τη συμπεριφορά του δοκιμίου με διατομή τύπου sandwich, θα συνδεθούν και με τα αντίστοιχα που θα προκύψουν από την αριθμητική προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να προκύψει μια συνολική αξιολόγηση της νέας αυτής λύσης για πυλώνες ανεμογεννητριών.

3.6 Βιβλιογραφία

[3-1] Dimopoulos C.A. & Gantes C.J., "Experimental investigation of buckling of wind turbine tower cylindrical shells with opening and stiffening under bending", *Thin-Walled Structures*, Vol. 54, pp. 140–155, 2012.

[3-2] KEMA, "LINEA 810 SL", *Technical Data Sheet*, Issue March 2014 (Revision: April 2016), 2016.

[3-3] Vernardos S. M. et al., "EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON BENDING BEHAVIOR OF "SANDWICH"-SECTION SHELLS FOR WIND TURBINE TOWERS", *Proceedings of the 9th Hellenic National Conference of Steel Structures*, Larissa (Greece), 2017.

[3-4] CEN, "Metallic materials - Tensile testing - part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2009)", *European Committee for Standardization*, 2009.

4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

4.1 Γενικά

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η πειραματική διερεύνηση δύο όμοιων δοκιμίων, τα οποία αφορούσαν τις καινοτόμες διατομές τύπου sandwich για πυλώνες ανεμογεννητριών. Στο πλαίσιο αυτό έγινε προσδιορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των υλικών, καθώς και των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Δόθηκαν δεδομένα σχετικά με τις συνδέσεις μεταξύ των διάφορων μερών που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά και για τη στήριξη του δοκιμίου και τις μετατοπίσεις που καταγράφηκαν στη μετωπική πλάκα σύνδεσης με το υποσύλωμα του πλαισίου διάταξης. Επίσης, κατασκευάστηκαν οι δρόμοι ισορροπίας του φορτίου αντίστασης του εμβόλου με τις μετατοπίσεις των διαφόρων LVDTs και τα διαγράμματα του ίδιου φορτίου με τις μετρούμενες αξονικές παραμορφώσεις των strain gauges.

Όλα τα παραπάνω θα προσομοιωθούν αριθμητικά στο παρόν κεφάλαιο, ώστε να προκύψει ένα μοντέλο, το οποίο να είναι βάσιμο, αποδεκτό και εύκολα διαχειρίσιμο για πιθανές αλλαγές σε σχέση με τις αρχικές παραμέτρους του πειράματος. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει αναφορά σε όλα τα δεδομένα που πάρθηκαν από το πείραμα και πως έγινε η προσομοίωσή τους, στα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν και στον αλγόριθμο επίλυσης. Έπειτα, θα παρουσιαστούν τα αριθμητικά αποτελέσματα από την ανάλυση του προσομοιώματος και θα συγκριθούν με αυτά που προέκυψαν μέσω της πειραματικής διαδικασίας. Τέλος, θα εκφραστούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την αριθμητική ανάλυση σχετικά με την αξιοπιστία της και της προσαρμοστικότητάς της στις πραγματικές συνθήκες.

4.2 Περιγραφή του αριθμητικού προσομοιώματος

Το προσομοίωμα του πειράματος πραγματοποιήθηκε στο εμπορικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Adina. Έγινε προσπάθεια να είναι όσο το δυνατόν πιο απλό και απλοϊκό σε θέματα στηρίξεως, συνδέσεως, υλικών, κατανομής πεπερασμένων στοιχείων και επιβολής φορτίου, ώστε να είναι αριθμητικά αποδοτικό σε όρους επάρκειας διαθέσιμων πόρων και χρόνου επίλυσης. Για το λόγο αυτό, αγνοήθηκε το πλαίσιο πειραματικής διάταξης του εργαστηρίου μεταλλικών κατασκευών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, αλλά λήφθηκε υπόψη στο προσομοίωμα η σχετική μετακίνηση της μετωπικής πλάκας σύνδεσης ως προς το υποσύλωμα του πλαισίου, μέσω της παρουσίας ελαστικής στήριξης

(αναλυτικότερα παρακάτω). Αυτή η παρατήρηση αποδείχθηκε ότι είχε σημαντικό ρόλο στη δυσκαμψία του ολικού φορέα (προβόλου) και προσέγγισε καλύτερα την πειραματική.

4.2.1 Μοντελοποίηση επιμέρους στοιχείων

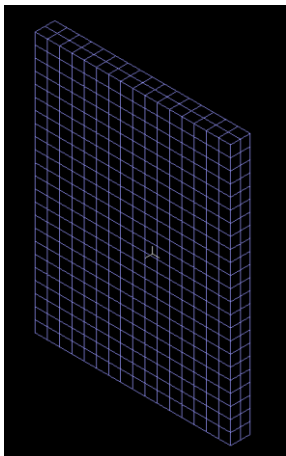
Στο παρόν υποκεφάλαιο θα γίνει αναφορά στη μοντελοποίηση όλων των μεμονωμένων τμημάτων που συνθέτουν το ολικό προσομοίωμα της πειραματικής διάταξης. Με τον όρο μοντελοποίηση εννοείται αρχικά ο καθορισμός της κατάλληλης γεωμετρίας, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα του 3^{ου} κεφαλαίου, αλλά και με βάση τον τρόπο σύνδεσης των επιμέρους στοιχείων μεταξύ τους. Έπειτα, καθένα από τα στοιχεία μπαίνει σε μία κατηγορία (element group), αναλόγως με τον τύπο και την πυκνότητα του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων που κρίνεται αναγκαίο να εφαρμοσθεί σε αυτά. Σχετικά με την πυκνότητα του δικτύου πεπερασμένων στοιχείων σε κάθε μέλος, στόχος ήταν να προκύψουν στοιχεία με λόγο πλευρών που να προσεγγίζουν, όσο δυνατόν, το λιγότερο το 1/2. Η επιλογή της κατάλληλης κατηγορίας για κάθε τμήμα του προσομοιώματος έγινε με βάση τη γεωμετρία του και του ποσοστού συμμετοχής του στα τελικά αποτελέσματα, τα οποία απαιτούνται για τη συσχέτιση με το πειραματικό μέρος. Με το ίδιο σκεπτικό, δηλαδή της ακρίβειας και του υπολογιστικού όγκου, επιλέχθηκε και ο αριθμός των κόμβων για αριθμητική ολοκλήρωση σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο μέλους. Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα επιμέρους μέλη κατά σειρά μοντελοποίησης.

Πρώτα μοντελοποιήθηκε η πλάκα σύνδεσης του δοκιμίου με το υποσύλωμα του πλαισίου διάταξης. Η γεωμετρία που υιοθετήθηκε ήταν η ίδια με του πειράματος, δηλαδή με πλάτος 600mm, ύψος 800mm και μήκος 60mm και υλοποιήθηκε με τη δημιουργία ενός όγκου. Ο όγκος χωρίστηκε σε 16 τμήματα κατά πλάτος, 23 καθ' ύψος και 2 κατά μήκος και ενσωματώθηκαν τα τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (3D solid) με 20 κόμβους το καθένα (Εικόνα 4-1). Η σύνδεση με το κέλυφος βάσης έγινε με τη χρήση άκαμπτων στοιχείων σύνδεσης (rigid links), για αυτό και τα πεπερασμένα στοιχεία της πλάκας είχαν τόσους κόμβους, ώστε να προκύψουν όσο το δυνατόν περισσότεροι γύρω από τον κύκλο επαφής του κελύφους βάσης και να είναι πιο αποτελεσματική η σύνδεσή τους.

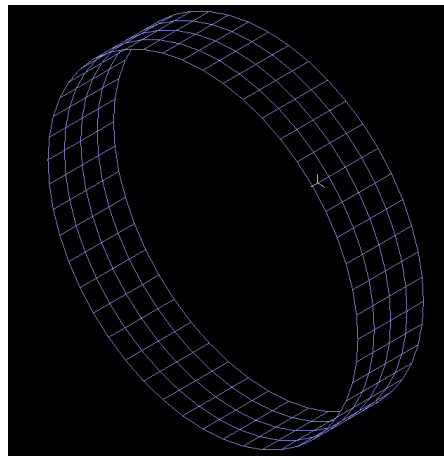
Το κέλυφος βάσης ήταν το επόμενο μέρος που μοντελοποιήθηκε. Η γεωμετρία παραποιήθηκε ελάχιστα, ώστε να έχει μια κοινή γραμμή (κύκλος τέλους) με το δακτύλιο, ώστε να είναι πιο απλή και άμεση η σύνδεσή τους. Αντί για μέση ακτίνα 190mm επιλέχθηκε ακτίνα 189mm με μήκος ίσο με 80mm και πάχος 20mm και η υλοποίησή της έγινε μέσω δύο κυλινδρικών επιφανειών με αναφορά ένα ημικύκλιο η κάθε μία. Ο λόγος που χωρίστηκε η επιφάνεια σε δύο μέρη ήταν ο καλύτερος χειρισμός που επιτρέπει το λογισμικό, χωρίς κάποιο φυσικό νόημα. Η ολική περίμετρος της κυλινδρικής επιφάνειας χωρίστηκε σε 48 τμήματα και το μήκος σε 4. Προσομοιώθηκε με πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell) λόγω του μικρού του πάχους, τα οποία ήταν 4κομβικά (Εικόνα 4-2). Η σύνδεση του με την πλάκα βάσης έγινε, όπως προαναφέρθηκε με άκαμπτα στοιχεία (rigid links), ενώ η σύνδεση με το δακτύλιο έγινε μέσω κοινών κόμβων.

Ο δακτύλιος 1 διατηρεί τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με αυτά του πειράματος, δηλαδή εσωτερική ακτίνα 180mm, εξωτερική ακτίνα 260mm και μήκος 40mm. Στο λογισμικό, ο δακτύλιος αυτός, σχεδιάζεται σε τρία κομμάτια, ώστε να δημιουργηθούν κοινοί κύκλοι με τον επόμενο δακτύλιο, ο οποίος με τη σειρά του έχει κοινούς κύκλους με τα ελάσματα από χάλυβα, για πιο άμεση και εύκολη σύνδεση προγραμματιστικά με κοινούς κόμβους. Τα τρία αυτά κομμάτια χωρίστηκαν στις ακτίνες 189mm και 199mm (ακτίνες ελασμάτων) και έτσι δημιουργήθηκαν έξι όγκοι αφού κάθε κομμάτι είχε ως αναφορά μια ημικυκλική επιφάνεια (όχι κυκλική για προγραμματιστικούς λόγους και όχι με φυσικό νόημα) οριζόμενη από την εσωτερική και εξωτερική ακτίνα του κάθε κομματιού. Όλοι οι κύκλοι που δημιουργήθηκαν (από τον εσωτερικό ακτίνας 180mm έως τον εξωτερικό ακτίνας 260mm) διακριτοποιήθηκαν σε 48 τμήματα. Για τους δύο πρώτους όγκους (πρώτο τμήμα του ολικού δακτυλίου), δεν έγινε χωρισμός στη διεύθυνση του πάχους, λόγω της ήδη μικρής διαφοράς μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής ακτίνας (από 180mm σε 189mm και από 189mm σε 199mm). Αν και οι δύο επόμενοι όγκοι

(δεύτερο τμήμα του συνολικού δακτυλίου) είχαν και αυτοί μικρό πάχος, παρ' όλα αυτά, έγινε χωρισμός τους σε δύο τμήματα στη διεύθυνση του πάχους. Αυτό έγινε ώστε ο επόμενος δακτύλιος (δακτύλιος 2) που ενώνεται με τον παρών, να μπορεί να συσχετιστεί με το κονίαμα μέσω στοιχείων επαφής στους μέσους κόμβους αυτού του τμήματος, όπως θα δούμε και στη συνέχεια. Για τους τελευταίους δύο όγκους (τελευταίο τμήμα δακτυλίου) έγινε χωρισμός κατά πάχος (από 199mm σε 260mm) σε 2 τμήματα. Τέλος, όλοι οι όγκοι χωρίστηκαν κατά μήκος σε 2 τμήματα. Οι όγκοι αυτοί, προσομοιώθηκαν με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (3D solid) καθένα με 8 κόμβους (Εικόνα 4-3).

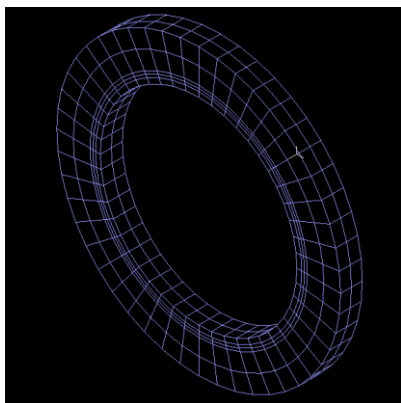


Εικόνα 4-1: Προσομοίωση μετωπικής πλάκας σύνδεσης με τρισδιάστατα πεπερ. στοιχεία 20 κόμβων

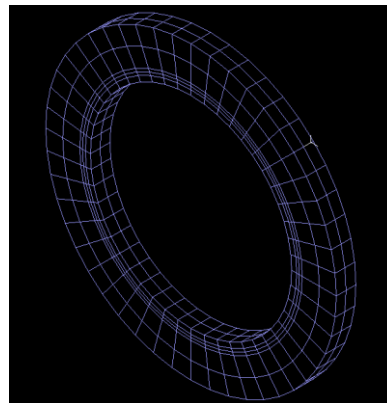


Εικόνα 4-2: Προσομοίωση κελύφους βάσης με πεπερ. στοιχεία κελύφους 4 κόμβων

Ο δακτύλιος 2 προσομοιώνεται ακριβώς όπως ο δακτύλιος 1, με τη μόνη διαφορά να έγκειται στο μήκος του, που από τα πειραματικά δεδομένα είναι ίσο με 35mm (Εικόνα 4-4). Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, η σύνδεση του με το δακτύλιο 1 γίνεται μέσω κοινών κόμβων, ενώ με το κονίαμα μέσω στοιχείων επαφής με το δεύτερο τμήμα (δύο όγκοι) κατά σειρά από το εσωτερικό του. Η φυσική σημασία του τρόπου σύνδεσης των δακτυλίων είναι ουσιαστικά συγκόλληση και όχι κοχλίωση όπως συνέβη στο πείραμα. Ωστόσο, επιλέχθηκε η σύνδεση στο λογισμικό να γίνει κατά αυτόν τον τρόπο για δύο λόγους. Κατ' αρχάς δεν παρατηρήθηκε κάποια σημαντική διαφορική μετακίνηση του ενός δακτυλίου σε σχέση με τον άλλον κατά την πειραματική διαδικασία, ενώ παράλληλα στο λογισμικό Adina η προσομοίωση κοχλίωσης απαιτεί πολύ περισσότερο χρόνο από την σύνδεση με κοινούς κόμβους λόγω του μέτριου γραφικού του περιβάλλοντος. Οπότε, προτιμήθηκε η πιο απλή και εύχρηστη λύση, η οποία δε θα έδινε ιδιαίτερη διαφορά στα αποτελέσματα της ανάλυσης.



Εικόνα 4-3: Προσομοίωση δακτυλίου 1 με τρισδιάστατα πεπερ. στοιχεία 8 κόμβων

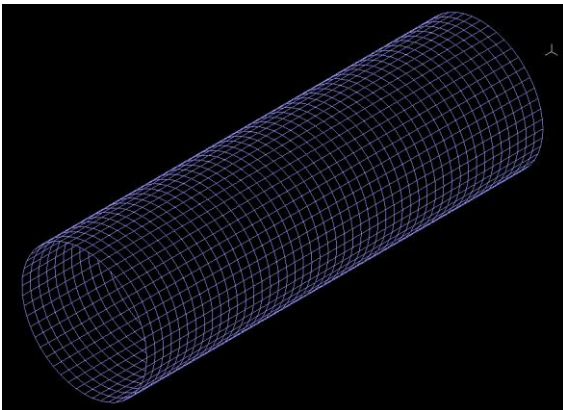


Εικόνα 4-4: Προσομοίωση δακτυλίου 2 με τρισδιάστατα πεπερ. στοιχεία 8 κόμβων

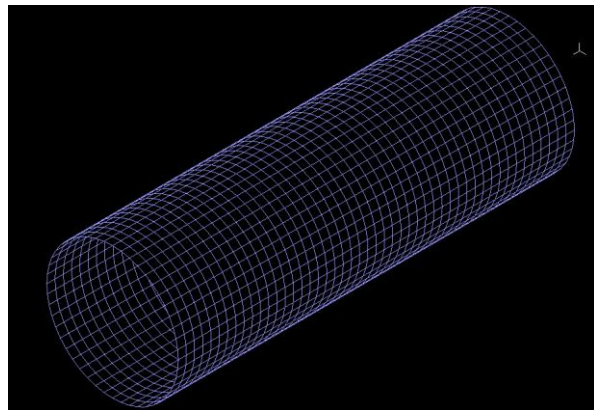
Η γεωμετρία του εσωτερικού κελύφους χάλυβα ήταν λογικό ότι έπρεπε να παραμείνει ακριβώς η ίδια με του πειράματος, αφού είναι ένα από τα τρία στοιχεία τα οποία παίζουν το σημαντικότερο ρόλο στην απόδοση των αποτελεσμάτων (μαζί με το εξωτερικό κέλυφος και τον πυρήνα από κονίαμα). Έτσι, η μέση ακτίνα του ήταν ίση με 189mm, με μήκος ίσο με 1.2m και πάχος ίσο με 2mm. Δημιουργήθηκαν δύο κυλινδρικές επιφάνειες από δύο ημικύκλια, ομοίως όπως οι προηγούμενες κυκλικές γεωμετρικές κατασκευές. Η ολική περίμετρος του εσωτερικού ελάσματος διακριτοποιήθηκε σε 48 τμήματα και το μήκος του επίσης σε 48 τμήματα. Έγινε χρήση των πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (shell) λόγω του μικρού πάχους του ελάσματος και κάθε στοιχείο είχε 4 κόμβους (Εικόνα 4-5). Όπως αναφέρθηκε, η σύνδεση με το δακτύλιο 2 έγινε μέσω κοινών κόμβων, όπως και με το δακτύλιο 3.

Εξίσου και το κονίαμα ορίστηκε γεωμετρικά ακριβώς όπως στο πείραμα, δηλαδή με εσωτερική ακτίνα ίση με 190mm, εξωτερική ίση με 198mm και μήκος ίσο με 1.198m αντί για 1.2m. Ο λόγος που έγινε μείωση του μήκους του κονιάματος ήταν γιατί αφείθηκε 0.001m απόσταση μεταξύ των διατομών αρχής και τέλους του με τους αντίστοιχους δακτυλίους, ώστε να λειτουργήσουν πιο αποτελεσματικά τα στοιχεία επαφής. Για να υλοποιηθεί αυτή η γεωμετρία δημιουργήθηκαν αρχικά δύο ημικυκλικές επιφάνειες ορισμένες από τις δύο προαναφερθείσες ακτίνες και έπειτα έγινε η εξαγωγή δύο όγκων που συνέθεσαν την πλήρη διατομή του κονιάματος. Περιμετρικά το κονίαμα χωρίστηκε ολικά σε 48 τμήματα και σε 48 επίσης κατά μήκος, ώστε να συμβαδίσει με τους κόμβους του εσωτερικού (και εξωτερικού στη συνέχεια) κελύφους χάλυβα και κατ' επέκταση να είναι εφικτή και πιο άμεση η ανάπτυξη σχέσεων επαφής μεταξύ όλων των κόμβων των κελυφών χάλυβα και των επιφανειών του αναπτυσσόμενου όγκου του κονιάματος. Κατά την έννοια του πάχους έγινε χωρισμός του όγκου του κονιάματος σε δύο τμήματα, ώστε να δημιουργηθούν ενδιάμεσοι κόμβοι που θα συσχετίζονται με τους δακτυλίους 2 και 3 μέσω στοιχείων επαφής, που θα αναφερθούν στη συνέχεια. Όπως είναι κατανοητό, χρησιμοποιήθηκαν τα τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (3D solid), καθένα από τα οποία είχε 8 κόμβους, 4 σε κάθε επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με έλασμα (Εικόνα 4-7). Η σύνδεση του κονιάματος με τα ελάσματα έγινε μέσω των στοιχείων επαφής (contact elements), τα οποία θα αναλυθούν περισσότερο στη συνέχεια.

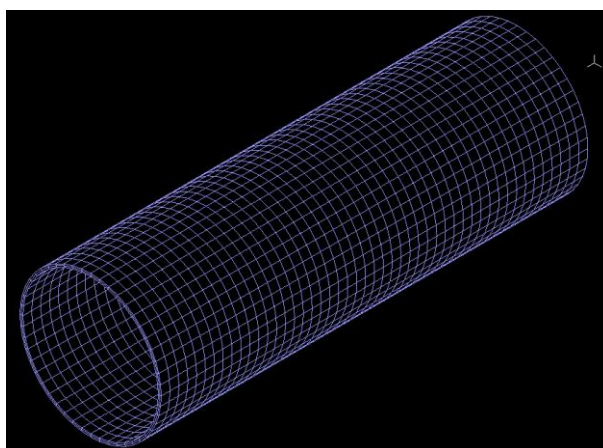
Έπειτα έγινε γεωμετρικός ορισμός του εξωτερικού κελύφους από χάλυβα. Η μέση ακτίνα τέθηκε ίση με 199m, το μήκος του ίσο με 1.2m και το πάχος του ίσο με 2mm, όσο ακριβώς ήταν και στο πείραμα. Η υλοποίησή του έγινε, ομοίως με το εσωτερικό κέλυφος, με τον ορισμό δύο κυλινδρικών επιφανειών από δύο ημικύκλια. Η ολική περίμετρος του χωρίστηκε, ομοίως με το εσωτερικό κέλυφος και τον πυρήνα, σε 48 τμήματα και το μήκος επίσης σε 48 τμήματα. Έγινε χρήση των πεπερασμένων στοιχείων κελύφους (shell) λόγω του μικρού του πάχους και επιλέχθηκαν στοιχεία με 4 κόμβους (Εικόνα 4-6). Η σύνδεσή με τους εκατέρωθεν δακτυλίους 2 και 3 έγινε μέσω κοινών κόμβων, που προσομοιάζουν τη συγκόλληση μεταξύ των μελών.



Εικόνα 4-5: Προσομοίωση του εσωτερικού κελύφους χάλυβα με πεπερ. στοιχεία κελύφους 4 κόμβων



Εικόνα 4-6: Προσομοίωση του εξωτερικού κελύφους χάλυβα με πεπερ. στοιχεία κελύφους 4 κόμβων



Εικόνα 4-7: Προσομοίωση όγκου κονιάματος με τρισδιάστατα πεπερ. στοιχεία 8 κόμβων

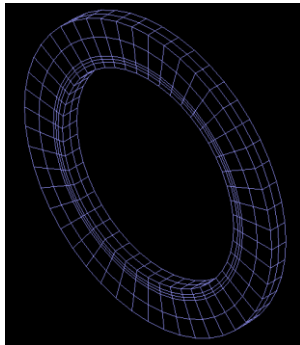
Στο δοκίμιο διατομής τύπου sandwich συγκολλήθηκε στο άκρο τέλους του ένας ακόμη δακτύλιος, ώστε να ενωθεί με την επέκταση στην οποία ασκήθηκε το φορτίο. Ο δακτύλιος αυτός νούμερο 3 είχε ακριβώς τα ίδια γεωμετρικά στοιχεία (εσωτ. ακτίνα ίση με 180mm, εξωτ. ακτίνα ίση με 260mm) και ίδια διαδικασία εισαγωγής στο λογισμικό, όπως ο δακτύλιος 1, με τη μόνη διαφορά ότι το μήκος του ήταν 30mm. Η διακριτοποίησή του ήταν η ίδια με του δακτυλίου 1, καθώς και τα πεπερασμένα στοιχεία που τον προσομοίωσαν (Εικόνα 4-8).

Ο δακτύλιος 3 ενώθηκε, με την απλοϊκή παραδοχή κοινών κόμβων αντί της δυσχερούς για το Adina κοχλίωσης, με το δακτύλιο 4. Ο δακτύλιος 4, ο οποίος είναι συγκολλημένος με το κέλυφος της επέκτασης στο άκρο αρχής του, σχεδιάστηκε γεωμετρικά με μία διαφορά σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα. Για να είναι εύκολη η σύνδεση των δύο δακτυλίων και του κελύφους επέκτασης, θεωρήθηκε εσωτερική ακτίνα ίση με 199mm αντί για την πραγματική πειρατική που ήταν ίση με 196mm. Η εξωτερική ακτίνα σχεδιάστηκε όπως η πραγματική και ίση με 260mm και το ίδιο και το μήκος, το οποίο ήταν ίσο με 30mm. Όπως και οι υπόλοιποι δακτύλιοι, έτσι και αυτός, υλοποιήθηκε μέσω ημικυκλικών επιφανειών ορισμένων από την εσωτερική και την εξωτερική ακτίνα, οι οποίοι εξάχθηκαν σε δύο όγκους. Τα τμήματα στα οποία χωρίστηκε η ολική περίμετρος ήταν ίσα με 24 αντί για το σύνθετες των 48 των υπολοίπων μερών. Αυτό για να αραιώσει το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων πέρα από το κύριο δοκίμιο, αφού δεν αναζητούνται αποτελέσματα στα υπόλοιπα μέρη και για να εξοικονομηθεί χρόνος στον όγκο των υπολογισμών από το πρόγραμμα. Το μήκος του των δύο όγκων διακριτοποιήθηκε σε 2 τμήματα, όπως και το πάχος τους. Η προσομοίωσή του έγινε με χρήση των τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων (3D solid) με 8 κόμβους το καθένα (Εικόνα 4-9).

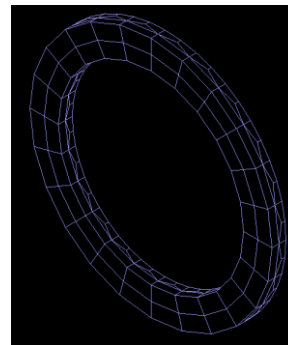
Για το κέλυφος επέκτασης που ακολούθησε, διαφοροποιήθηκε ελάχιστα η γεωμετρία του, ώστε να συνδέεται άμεσα με κοινούς κόμβους με τους δακτυλίους στα άκρα του. Έτσι, αντί για μέση ακτίνα ίση με 197mm, επιλέχθηκε μέση ακτίνα ίση με 199mm. Το μήκος και το πάχος του είχαν τιμές ίσες με τις πειραματικές, δηλαδή 1.315m και 6mm αντίστοιχα. Δύο ημικυλινδρικές επιφάνειες ορίστηκαν για το σχεδιασμό του, συνθέτοντας το ολικό κυλινδρικό κέλυφος επέκτασης. Η ολική του περίμετρος διακριτοποιήθηκε σε 24 τμήματα, για τον ίδιο λόγο όπως ο δακτύλιος 4, ενώ το μήκος του σε 24 τμήματα. Στη διακριτοποίηση αυτή ενσωματώθηκαν πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell), λόγω του μικρού πάχους του μέλους με 4 κόμβους το καθένα (Εικόνα 4-10).

Τελευταίο βασικό μέλος μοντελοποίησης ήταν ο δακτύλιος 5, που συνδέεται στο άκρο του κελύφους της επέκτασης και στον οποίο ασκείται το φορτίο από το έμβολο. Ο γεωμετρικός σχηματισμός του είναι ακριβώς ο ίδιος με αυτόν του δακτυλίου 4, με την ίδια διαφοροποίηση στην εσωτερική ακτίνα (199mm αντί 196mm). Οι δύο όγκοι που προκύπτουν χωρίζονται στα ίδια τμήματα με το δακτύλιο 4, όπως ίδια είναι και τα πεπερασμένα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται για την προσομοίωσή του (Εικόνα 4-11).

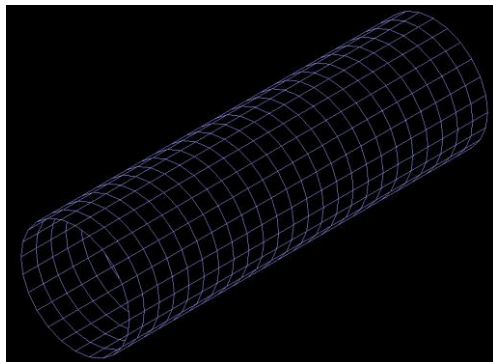
Τέλος, ορίστηκε και μοντελοποιήθηκε ένα στοιχείο γραμμικό (beam element) για το μόνο λόγο καταγραφής αποτελεσμάτων στη θέση του LVDT1 που προεξέχει από το συνολικό δοκίμιο κατά 422mm. Γεωμετρικά χωρίστηκε σε τρία τμήματα ώστε να έχει τρεις κοινούς κόμβους με το δακτύλιο 5 στο κάτω μέρος του, ώστε να μην υπάρχει δυνατότητα στροφής. Για διατομή του μέλους επιλέχθηκε μια τυπική κυκλική με διαμέτρου 2cm και πάχους 1mm, περίπου ίση με το LVDT που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα, χωρίς ωστόσο να επηρεάζει η ακρίβεια της διατομής στα αποτελέσματα παρά μόνο η τάξη μεγέθους. Τυπικά το μέλος αυτό χωρίστηκε σε 10 τμήματα, αφού δεν ενδιέφερε να υπολογιστούν αποτελέσματα σε αυτό το μέλος, παρά μόνο στο άκρο του. Η προσομοίωση του έγινε με χρήση των γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων δοκού (beam elements) (Εικόνα 4-12).



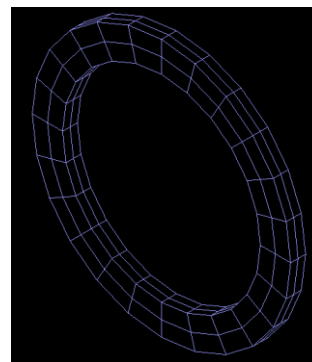
Εικόνα 4-8: Προσομοίωση δακτυλίου 3 με τρισδιάστατα πεπερ. στοιχεία 8 κόμβων



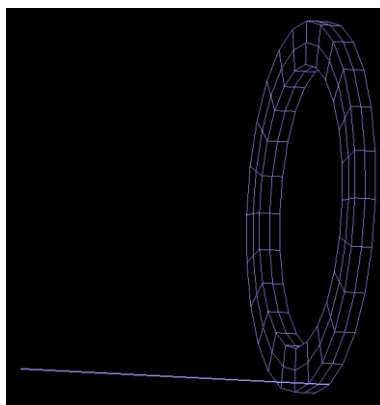
Εικόνα 4-9: Προσομοίωση δακτυλίου 4 με τρισδιάστατα πεπερ. στοιχεία 8 κόμβων



Εικόνα 4-10: Προσομοίωση χαλύβδινου κελύφους επέκτασης με πεπερ. στοιχεία κελύφους 4 κόμβων



Εικόνα 4-11: Προσομοίωση δακτυλίου 5 με τρισδιάστατα πεπερ. στοιχεία 8 κόμβων

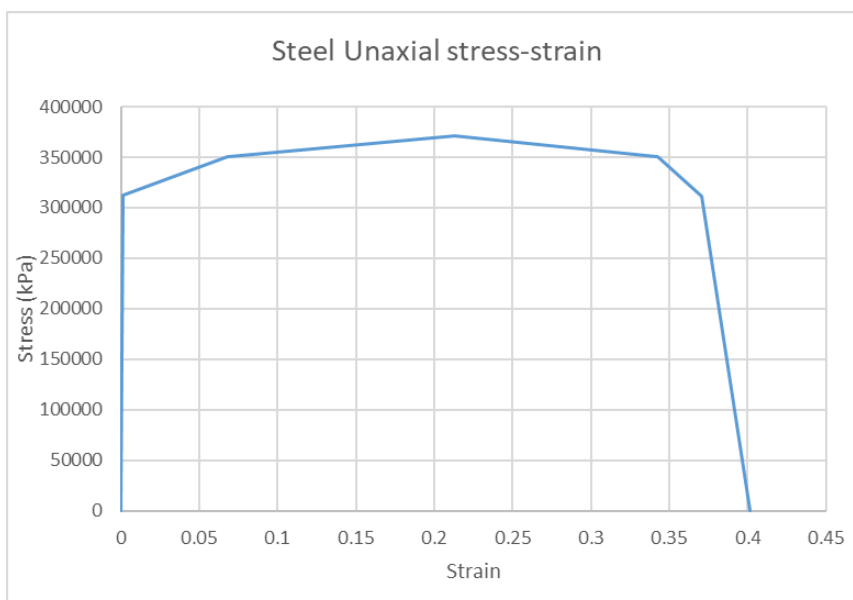


Εικόνα 4-12: Γραμμικό μέλος για καταγραφή κατακόρυφης μετακίνησης στη θέση του LVDT1 και ένωση του με το δακτύλιο 5, ώστε να μη στρίβει

4.2.2 Υλικά επιμέρους μελών

Κάθε μέλος που περιέχεται και μοντελοποιήθηκε στο προσομοίωμα, πήρε τις μηχανικές ιδιότητες από ένα υλικό που ορίστηκε στο λογισμικό Adina που χρησιμοποιήθηκε. Οι πειραματικές διερευνήσεις, που πραγματοποιήθηκαν στο Τμήμα Τεχνικών Υλικών & Στοιχείων του Κεντρικού Εργαστηρίου Δημοσίων Έργων (ΚΕΔΕ) για το κονίαμα και στο εργαστήριο μεταλλικών κατασκευών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για το χάλυβα των ελασμάτων, βοήθησαν στο να εισαχθούν ιδιότητες όσο το δυνατόν πιο κοντά στις πραγματικά μετρούμενες.

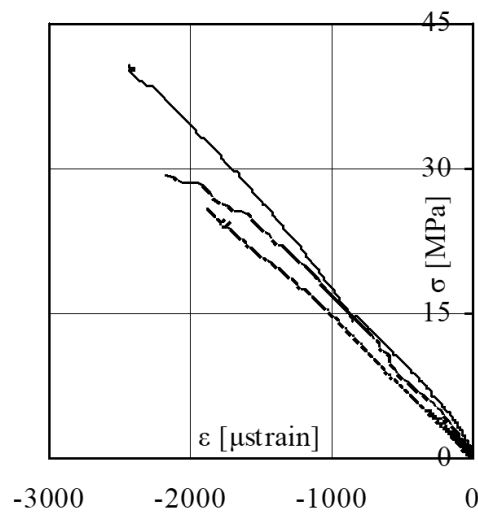
Αρχικά, ο χάλυβας των ελασμάτων απέκτησε μηχανικές ιδιότητες στο προσομοίωμα μέσω της χρήσης του ιστροπικού υλικού Plastic-Multilinear, που δίνει τη δυνατότητα να σχεδιαστεί η πειραματική καμπύλη του χάλυβα δίνοντας ζεύγη τιμών τάσης-παραμόρφωσης. Έτσι δημιουργήθηκε η παρακάτω καμπύλη υλικού (Σχήμα 4-1). Παρατηρείται ότι έγινε απλοποίηση στα πολλά ζεύγη τιμών τάσης-παραμόρφωσης κοντά στο σημείο διαρροής, με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των ακραίων τιμών της περιοχής, διότι επικρατούσε σύγχυση στο πρόγραμμα και πρακτικά τα αποτελέσματα παραμένουν τα ίδια. Το όριο αντοχής πάρθηκε αναλλοίωτο ως βασικός παράγοντας ακρίβειας και ίσο με 370680kPa με λόγο Poisson 0.3. Για την εισαγωγή του βάρους ως φόρτιση στο προσομοίωμα, εισάχθηκε πυκνότητα υλικού ίση με 7.85Mg/m³.



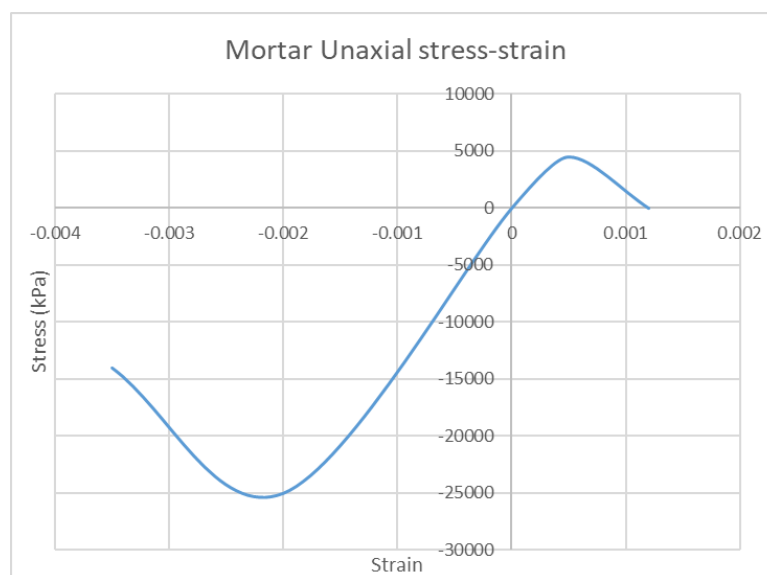
Σχήμα 4-1: Διάγραμμα μονοαξονικής τάσης-παραμόρφωσης του χάλυβα των ελασμάτων

Με την ίδια λογική έγινε προσπάθεια να εισαχθούν και οι μηχανικές ιδιότητες του κονιάματος. Το πρόβλημα ήταν ότι οι πειραματικές δοκιμές που έγιναν, έδωσαν πληροφορίες μονάχα για τη μέγιστη θλιπτική αντοχή και τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή λόγω κάμψης. Επομένως, δεν υπήρχαν στοιχεία για τις παραμορφώσεις στις οποίες παρατηρήθηκαν οι παραπάνω αντοχές. Για το λόγο αυτό, σε συνεργασία με τον κ. Μπαδογιάννη, ζητήθηκαν από τον καθηγητή της ΣΕΜΦΕ κ. Κουρκουλή κάποιες χαρακτηριστικές καμπύλες τυπικών κονιαμάτων (Σχήμα 4-2), ώστε να προσαρμοστούν στα δικά μας δεδομένα και να εισαχθεί στο πρόγραμμα μια χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης. Έτσι, χρησιμοποιώντας το υλικό Concrete, εισήχθησαν η μέγιστη θλιπτική αντοχή την ημερομηνία διεξαγωγής του πρώτου πειράματος (-25000kPa) με την αντίστοιχη επιλεγμένη παραμόρφωση (0.2%), η οριακή αντοχή σε θλίψη (-14000kPa) στην αντίστοιχη παραμόρφωση (0.35%) και η εφελκυστική αντοχή από κάμψη (4500kPa) σε πολύ μικρές παραμορφώσεις με λόγο Poisson 0.2 (Σχήμα 4-3). Η πυκνότητα του κονιάματος ορίστηκε από τα δεδομένα του κατασκευαστή ίση με 1.76Mg/m³ όταν έχει σκληρυνθεί το κονίαμα. Αξίζει να

σημειωθεί ότι το κονίαμα ως υλικό εμπεριέχει πολλές αβεβαιότητες και είναι δύσκολο να εξαχθούν ακριβή και αξιόπιστα ποσοτικά αποτελέσματα για το μέλος του πυρήνα.



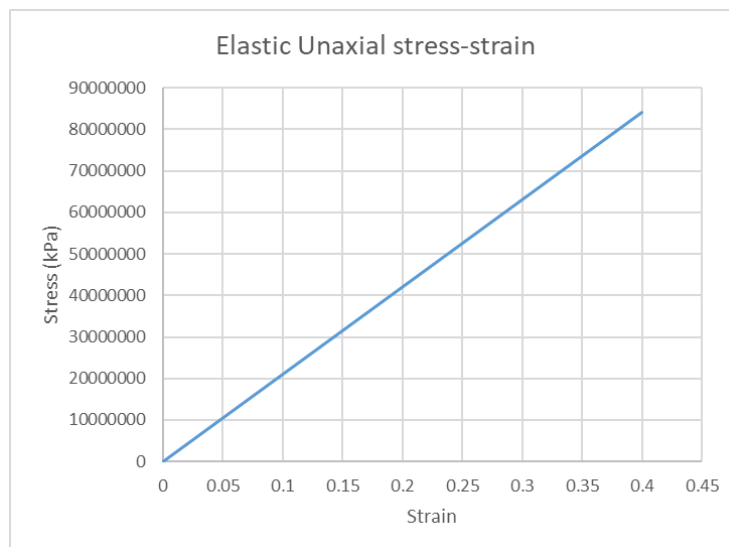
Σχήμα 4-2: Τυπικές καμπύλες μονοαξονικής τάσης-παραμόρφωσης κονιαμάτων



Σχήμα 4-3: Διάγραμμα μονοαξονικής τάσης-παραμόρφωσης κονιάματος

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο της πειραματικής διαδικασίας, τα επιπλέον μέλη (μετωπική πλάκα σύνδεσης, δακτύλιοι, κέλυφος βάσης και κέλυφος επέκτασης) διαστασιολογήθηκαν ώστε να έχουν υπεραντοχή σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα από το Χ. Δημόπουλο [4-1], χωρίς περαιτέρω αναφορές σε αυτά. Για το λόγο αυτό, τα συγκεκριμένα στοιχεία προσομοιώθηκαν με ελαστικό υλικό μέτρου ελαστικότητας 210000000kPa και λόγο Poisson 0.3 (Σχήμα 4-4). Επειδή τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για αυτά τα μέλη ήταν χαλύβδινα, τους δόθηκε πυκνότητα ίση με 7.85Mg/m³.

Τέλος, για το γραμμικό μέλος κυκλικής διατομής που χρησιμοποιήθηκε μονάχα για την καταγραφή αποτελεσμάτων στο άκρο του, που ισοδυναμούσε με τη θέση του LVDT1, έγινε ορισμός ενός τυπικού ελαστικού υλικού με μέτρο ελαστικότητας 210000000kPa. Το υλικό αυτό καθορίστηκε αβαρές, αφού το μέλος αυτό στην πραγματικότητα δεν προσφέρει τίποτα στην κατασκευή και αποτελεί εξωτερικό μέλος. (Σχήμα 4-4).



Σχήμα 4-4: Διάγραμμα μονοαξονικής τάσης-παραμόρφωσης ελαστικού υλικού

4.2.3 Συνθήκες στήριξης

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου αυτού, το πλαίσιο πειραματικής διάταξης, στο οποίο στηρίζεται το δοκίμιο, δεν σχεδιάστηκε στο τελικό προσομοίωμα. Ωστόσο, αυτό που λήφθηκε υπόψη στο προσομοίωμα ήταν η σχετική μετακίνηση της πλάκας σύνδεσης με το υποστύλωμα του πλαισίου πειραματικής διάταξης, το οποίο αποτελεί τη στήριξη του φορέα. Οι σχετικές μετακινήσεις μετρήθηκαν από τα LVDTs 3, 4 και 5, από τα οποία το πρώτο μετρούσε την κατακόρυφη μετατόπιση και τα άλλα δύο την οριζόντια κάτω και πάνω από τον άξονα του δοκιμίου αντίστοιχα. Το σκεπτικό ήταν μέσα από τις μετρούμενες αυτές μετατοπίσεις να βρεθούν οι αντίστοιχες δυσκαμψίες στον κατακόρυφο και στο στροφικό βαθμό ελευθερίας, ώστε αντί για δέσμευση να εισαχθούν γραμμικά ελατήρια με τις αντίστοιχες υπολογισμένες δυσκαμψίες. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν πάρθηκαν από τα αντίστοιχα πειραματικά διαγράμματα για μια τυχαία τιμή φορτίου αντίδρασης ίση με 60kN.

Οι θέσεις μεταξύ των LVDTs 4 και 5, τα οποία μέτρησαν τις οριζόντιες μετατοπίσεις της μετωπικής πλάκας σύνδεσης σε σχέση με το υποστύλωμα του πλαισίου διάταξης, απείχαν απόσταση 635mm μεταξύ τους. Στο LVDT 4 μετρήθηκε οριζόντια μετατόπιση 0.11mm για τιμή φορτίου 60kN, ενώ για το 5, μετρήθηκε οριζόντια μετατόπιση -1.4mm για την ίδια τιμή φορτίου (Σχήμα 3-5). Η διαφορά των δύο μετατοπίσεων προς τη μεταξύ τους απόσταση έδωσε τη σχετική στροφή της μετωπικής πλάκας σύνδεσης με διάνυσμα κάθετο στο διαμήκη άξονα του δοκιμίου, που ήταν ίση με 0.0024 rad. Πολλαπλασιάζοντας τη δύναμη των 60kN με το μοχλοβραχίονα έως τη βάση της μετωπικής πλάκας (δηλαδή με το συνολικό μήκος του πειραματικού φορέα ίσο με 2.82m) προέκυψε η ροπή με διάνυσμα κάθετο στο διαμήκη άξονα του φορέα, η οποία ήταν ίση με 169.2kNm. Διαιρώντας αυτήν την τιμή της ροπής με τη στροφή που βρέθηκε όταν ασκήθηκε αυτή, υπολογίστηκε η στροφική δυσκαμψία ίση με 71000kNm/rad. Για τον καθορισμό του σημείου της μετωπικής πλάκας που επικρατεί μονάχα στροφή, χωρίς την παρουσία μετατόπισης, έγινε γραμμική κατανομή των μετατοπίσεων, αφού ήταν γνωστό σε ποιες θέσεις σχετικά με το διαμήκη άξονα του δοκιμίου τοποθετήθηκαν τα αντίστοιχα LVDTs. Έτσι, βρέθηκε ότι σε απόσταση 271mm κάτω από το διαμήκη άξονα του δοκιμίου, η μετατόπιση μηδενιζόταν. Ύστερα, έγινε σύνδεση, με άκαμπτα στοιχεία σύνδεσης (rigid links), της επιφάνειας βάσης της μετωπικής πλάκας με το ένα σημείο που ορίστηκε στην παραπάνω απόσταση από το διαμήκη άξονα του δοκιμίου. Στο σημείο αυτό έγινε δέσμευση του οριζόντιου βαθμού ελευθερίας κίνησης και τοποθετήθηκε στροφικό ελατήριο με την ανωτέρω υπολογισμένη τιμή στροφικής δυσκαμψίας.

Στην κατακόρυφη διεύθυνση μέτρησης από το διάγραμμα (Σχήμα 3-6) για 60kN παίρνουμε μετατόπιση 0.12mm. Αυτό σημαίνει ότι πρακτικά η μετωπική πλάκα σύνδεσης δεν ολίσθησε κατά μήκος του υποστυλώματος του πλαισίου διάταξης. Έτσι, κρίθηκε σκόπιμο να μην υπολογιστεί μια κατακόρυφη δυσκαμψία για εισαγωγή ελατηρίου, η οποία θα ήταν πολύ μεγάλη στα όρια της δέσμευσης. Επομένως, δεσμεύτηκε ο κατακόρυφος βαθμός ελευθερίας κίνησης στο σημείο που ορίστηκε στα παραπάνω.

Όπως είναι λογικό, λόγω της συμμετρίας του φορέα και της φόρτισης, δεν υπήρξε σχετική μετακίνηση ή στροφή σε κάποιον άλλο βαθμό ελευθερίας. Επομένως, έγινε δέσμευση στο σημείο που ορίστηκε παραπάνω, και αντιπροσώπευε την επιφάνεια βάσης της μετωπικής πλάκας σύνδεσης, των τεσσάρων εναπομεινάντων στροφικών και μετακινησιακών βαθμών ελευθερίας (δύο σε κάθε είδος μετατόπισης).

4.2.4 Επιβολή φόρτισης

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, κατά την πειραματική διαδικασία έγινε φόρτιση του δοκιμίου, μέσω του εμβόλου, με ελεγχόμενες τις τιμές της μετατόπισης. Η επαφή της πλάκας του εμβόλου με το δοκίμιο έγινε στον τελικό δακτύλιο του κελύφους της επέκτασης, ουσιαστικά σε ένα σημείο στο μέσο του δακτυλίου αυτού. Με αυτό το αρχικό σκεπτικό, έγινε προσομοίωση της φόρτισης με επιβαλλόμενη μετατόπιση σε ένα σημείο στη θέση που επεξηγήθηκε προηγουμένως.

Πέρα από τη λογική της σύνδεσης του προσομοιώματος με την πειραματική διαδικασία, άλλος ένας ήταν ο λόγος που οδήγησε σε αυτή τη μορφή φόρτισης. Για την πραγματοποίηση της αριθμητικής ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Full Newton Method. Η μέθοδος αυτή για να δώσει αποτελέσματα στο δρόμο ισορροπίας μετά το οριακό σημείο χρειάζεται να γίνει ανάλυση με φορτίο επιβαλλόμενης μετατόπισης και όχι επιβαλλόμενης δύναμης. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε τη δεύτερη αιτία για επιλογή επιβαλλόμενης μετατόπισης ως τρόπου φόρτισης του προσομοιώματος.

Η τιμή της επιβαλλόμενης μετακίνησης που εφαρμόστηκε, επιλέχθηκε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα. Το εύρος των πειραματικών τιμών των μετακινήσεων έφτασε γύρω στα 65mm μέχρι να γίνει η αποφόρτιση. Σε τέτοιες περιπτώσεις σύνθεσης και ελέγχου καινοτόμων διατομών, τα αποτελέσματα που ενδιαφέρουν περισσότερο είναι η δυσκαμψία και ένα εύρος τιμών γύρω από το οριακό σημείο. Επιλέχθηκε, επομένως, μία ελάχιστη μικρότερη τιμή μετατόπισης από αυτήν της αποφόρτισης ίση με 60mm. Ο λόγος που αυτή η τιμή δεν είναι τόσο κοντά στην αναμενόμενη τιμή μετατόπισης στο οριακό φορτίο, ήταν να γίνει η εμφάνιση και της μεταλυγισμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου.

Πέρα από τη φόρτιση του εμβόλου υπήρξε και η φόρτιση από το ίδιο βάρος του δοκιμίου. Αν και οι μετρήσεις αντίστασης φορτίου και μετακίνησης μηδενίστηκαν αφότου το δοκίμιο ισορρόπησε υπό το ίδιο βάρος του, παρ' όλα αυτά, έπρεπε να συμπεριληφθεί η συνεισφορά του στην αύξηση τάσεων και παραμορφώσεων των υλικών. Η φόρτιση αυτή έγινε θέτοντας συντελεστή 9.81 στον τύπο φορτίου mass proportional και όπως είναι λογικό δεν επηρέασε σημαντικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

4.2.5 Στοιχεία επαφής (Contact elements)

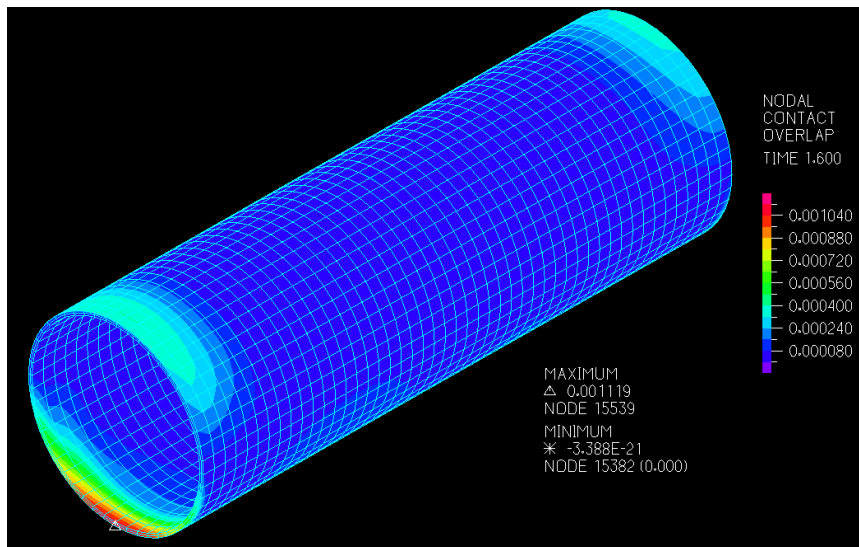
Η βασική ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου προσομοιώματος ήταν ότι έπρεπε να γίνει χρήση των στοιχείων επαφής του λογισμικού Adina. Αυτό το γεγονός κρίθηκε απαραίτητο για την κατάλληλη προσομοίωση της σχέσης επαφής μεταξύ των χαλύβδινων ελασμάτων και του πυρήνα από κόνιαμα, αλλά και των δακτυλίων με τον ίδιο πυρήνα, για τη διατομή τύπου sandwich, γιατί δεν μπορούσε να θεωρηθεί ότι έχουν κοινούς κόμβους καθώς κάτι τέτοιο θα σήμαινε ότι τα δύο υλικά ήταν ένα συσσωμάτωμα, χωρίς τη δυνατότητα ολίσθησης και αποκόλλησης του ενός σε σχέση με το άλλο. Έγινε χρήση, λοιπόν, αυτών των στοιχείων, ώστε να καθιστεί δυνατή η προσομοίωση των παραπάνω συνθηκών.

Η λογική της χρησιμοποίησης τους είναι παρόμοια με αυτή των element groups. Δημιουργούνται κατηγορίες επαφής (contact groups) αναλόγως με το πόσες επιφάνειες έρχονται σε επαφή. Στο συγκεκριμένο πείραμα υπήρξε επαφή μεταξύ εσωτερικού ελάσματος και κονιάματος, εξωτερικού ελάσματος και κονιάματος, δακτυλίου 2 και κονιάματος και δακτυλίου 3 και κονιάματος. Επομένως, δημιουργήθηκαν τέσσερις κατηγορίες επαφής. Η πρώτη κατηγορία περιελάμβανε την εξωτερική επιφάνεια του εσωτερικού χαλύβδινου ελάσματος και την εσωτερική επιφάνεια του τρισδιάστατου πυρήνα κονιάματος, ενώ η δεύτερη την εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού χαλύβδινου ελάσματος και την εξωτερική επιφάνεια του κονιάματος. Η τρίτη κατηγορία περιελάμβανε τις επιφάνειες της διατομής τέλους του δακτυλίου 2 και τις επιφάνειες της διατομής αρχής του κονιάματος, ενώ η τέταρτη κατηγορία περιελάμβανε τις επιφάνειες της διατομής αρχής του δακτυλίου 3 και τις επιφάνειες της διατομής τέλους του κονιάματος.

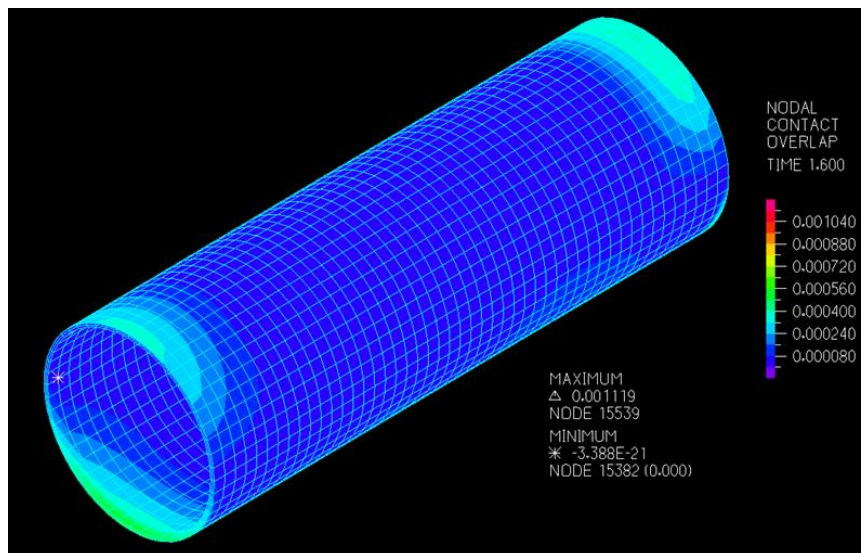
Στον έλεγχο και των δύο αυτών κατηγοριών που δημιουργήθηκαν (contact control), επιλέχθηκαν μικρές μετακινήσεις για τους κόμβους των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, αφού στο πείραμα οι επιφάνειες είναι κοντά η μία με την άλλη και δεν υπήρξε χαρακτηριστική ολίσθηση του ενός υλικού σε σχέση με το άλλο σε σημείο που να δικαιολογούν τη χρήση των μεγάλων μετακινήσεων. Για τις σχέσεις επαφής μικρών μετακινήσεων, ο αλγόριθμος που μπορεί να είναι σε ισχύ είναι ο προεπιλεγμένος (constrain function) σε συνδυασμό με το νέο τύπο τμηματοποίησης. Επίσης, για διευκόλυνση της σύγκλισης, τέθηκε ότι κατά τις 10 πρώτες επαναλήψεις μέσα σε κάθε βήμα άσκησης του φορτίου, κάθε κόμβος της μίας επιφάνειας αντιστοιχίζεται με έναν κόμβο της άλλης επιφάνειας που έρχονται σε επαφή, δημιουργώντας ζεύγος καθ' όλη τη διάρκεια του βήματος.

Λόγω της φύσης της επαφής των υλικών, ο τύπος των στοιχείων επαφής που χρησιμοποιήθηκε ήταν προφανώς ο τρισδιάστατος (3D contact) και για κάθε επιφάνεια, σε καθεμία από τις τέσσερις κατηγορίες, επιλέχθηκε η ανάπτυξη στοιχείων επαφής μονοσήμαντα (single side) και όχι και στις δύο πλευρές της. Όπως αναφέρθηκε στη μοντελοποίηση των μελών και είναι γενικώς γνωστό, τα κελύφη σχεδιάζονται με τη μέση ακτίνα τους και το πάχος κατανέμεται και ισόποσα και στις δύο πλευρές της σχηματιζόμενης επιφάνειας. Έτσι, ο πυρήνας κονιάματος και τα κελύφη από χάλυβα απείχαν μεταξύ τους μισό πάχος κελύφους στο προσομοίωμα. Για το λόγο αυτό, ορίστηκε έναρξη ανάλυσης με μετατοπισμένη τη μέση γραμμή κατά αυτό το πάχος, ώστε να βρίσκονται εξ' αρχής σε επαφή τα δύο υλικά (contact surface offset – shell thickness). Για τις κατηγορίες που αφορούσαν την επαφή κονιάματος και δακτυλίου, επιλέχθηκε σταθερή παράλληλη μετατόπιση των επιφανειών αυτών κατά την απόσταση μεταξύ τους, δηλαδή 0.001m (contact surface offset – constant), για τον ίδιο λόγο με τις προηγούμενες κατηγορίες. Ο λόγος για τον οποίο έγινε εξ' αρχής μείωση του μήκους του κονιάματος για να δημιουργηθεί απόσταση 0.001m με τους δακτυλίους ήταν καθαρά για λόγους καλύτερης σύγκλισης των στοιχείων επαφής.

Επίσης, για τη βελτίωση της σύγκλισης, ορίστηκε συντελεστής ενδοτικότητας (compliance factor) με μία μικρή τιμή της τάξης 10^{-6} , η οποία τιμή ελέγχθηκε για την αλλοίωση που προσδίδει στα αποτελέσματα, όπως θα αναφερθεί παρακάτω. Κατ' αρχήν, αυτός ο συντελεστής, εκτός του βελτιώνει τη σύγκλιση τα στοιχεία επαφής, θεωρεί ότι οι δύο επιφάνειες που έρχονται σε επαφή δεν είναι απολύτως άκαμπτες, αλλά επιτρέπεται μια μικρή εισχώρηση, της μίας σε σχέση με την άλλη, της οποίας το μέγεθος εξαρτάται από την τιμή του συντελεστή αυτού. Η επιλογή της κατάλληλης τιμής έγινε με δοκιμές και εξέταση του αποτελέσματος μέσω του γραφήματος nodal contact overlap, το οποίο δείχνει πόσο έχει εισχωρήσει το κονίαμα μες στα ελάσματα (Σχήμα 4-5 και Σχήμα 4-6). Έτσι επιλέχθηκε τιμή για τα τις πρώτες δύο κατηγορίες ίση με $2 \cdot 10^{-6}$ και για τις δύο επόμενες ίση με $1 \cdot 10^{-6}$. Αφού η εισχώρηση της μίας επιφάνειας μέσα στην άλλη ήταν σε κάθε περίπτωση περίπου κάτω από 1mm στην ακραία περίπτωση μετά το λυγισμό, τότε έγινε δεκτές οι τιμές του συντελεστή. Πέρα, από αυτό το γράφημα, βεβαίως, ελεγχόταν και το πόσο κοντά στις πειραματικές μετρήσεις εμφανιζόταν το οριακό σημείο, αφού ο συντελεστής αυτός, μέσω της μαλάκωσης των επιφανειών, επηρεάζει το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού.



Σχήμα 4-5: Μέγεθος εισχώρησης των επιφανειών των ελασμάτων και των δακτυλίων εντός του κονιάματος κατά την εμφάνιση του οριακού φορτίου. Όψη από την αρχή (κοντά στη βάση) του κονιάματος.



Σχήμα 4-6: Μέγεθος εισχώρησης των επιφανειών των ελασμάτων και των δακτυλίων εντός του κονιάματος κατά την εμφάνιση του οριακού φορτίου. Όψη από το τέλος του κονιάματος.

Ο συντελεστής τριβής Coulomb ήταν ακόμη ένα θέμα προς διερεύνηση, αφού τα πειράματα που συντάχθηκαν, κανένα δεν αφορούσε την εύρεση της ακριβούς σχέσης ολίσθησης μεταξύ επιφάνειας κονιάματος και χάλυβα. Εφόσον τα υλικά είναι δεδομένα και ο συντελεστής τριβής επηρεάζεται από τη φύση των υλικών που αλληλοεπιδρούν, αναζητήθηκε κάποια χαρακτηριστική τιμή για τη συνεργασία αυτών των υλικών στη βιβλιογραφία. Σύμφωνα με το Γερμανικό κανονισμό κατά DIN4421 [4-2], η τιμή του συντελεστή τριβής για επιφάνειες από χάλυβα και κονίαμα, ποικίλει ανάμεσα σε ένα φάσμα τιμών από 0.5 έως 1.0. Δύο πειράματα που συντάχθηκαν από ερευνητική Κινητική ομάδα [4-3], [4-4] το ένα για υποστυλώματα τύπου sandwich σε κτήρια και το άλλο για θεμελιώσεις κτιριακών έργων, αφορούσαν στη συνεργασία μεταξύ κονιάματος και χάλυβα και έγιναν δοκιμές για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής που αναπτυσσόταν μεταξύ τους. Βρέθηκε ότι πριν από την πρώτη ολίσθηση η τιμή αυτή ήταν κοντά στο 0.8, ενώ μετά την πρώτη ολίσθηση έπεφτε κοντά στο 0.5, τιμές που συμφωνούν και με το Γερμανικό κανονισμό. Για να γίνει προσομοίωση της τριβής όσο το δυνατόν πριν και μετά την πρώτη ολίσθηση, υιοθετήθηκε μία μέση τιμή 0.65.

Τέλος, έπρεπε να γίνει ορισμός των ζευγών επιφανειών που έρχονται σε επαφή και να ορισθούν κατάλληλα ως στόχος (target) και ως «επαφέας» (contactor) οι δύο επιφάνειες. Η επιφάνεια που έμεινε περισσότερη σταθερή κατά την πειραματική διαδικασία, όπως είναι λογικό, ήταν των χαλύβδινων ελασμάτων, τα οποία ήταν συγκολλημένα στους δακτυλίους. Επομένως, ορίστηκαν ως target στο λογισμικό, ενώ το κονίαμα ως contactor που κατά την άσκηση του φορτίου κινήθηκε σχετικά με τα ελάσματα.

4.2.6 Μέθοδος και παράμετροι αριθμητικής ανάλυσης Full Newton Method και τελικό προσομοίωμα

Αρχικά, η πρώτη σκέψη ήταν να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Full Newton Method του Adina, λόγω της μεγαλύτερης εξοικείωσης με αυτόν τον τύπο ανάλυσης και λόγω του ότι τα στοιχεία επαφής επιλύονται γρηγορότερα και ακριβέστερα με αυτή τη μέθοδο. Αυτός ο τρόπος επίλυσης επιλέγεται θέτοντας στην μπάρα επίλυσης την επιλογή statics και την επαναληπτική μέθοδο Full Newton Method στην επιλογή iteration method στο solution process του μενού control. Επίσης, επιλέχθηκε η μέθοδος αυτόματου χωρισμού βημάτων (automatic time stepping).

Για να οριστούν και οι δύο φορτίσεις του προσομοιώματος (ίδιο βάρος, επιβαλλόμενη μετατόπιση), χρειάστηκε να δημιουργηθούν δύο time function. Η πρώτη ορίστηκε ως σταθερή και ίση με 1 για χρόνο από 0 έως 2 και αντιπροσώπευε την ακαριαία εφαρμογή του ίδιου βάρους του δοκιμίου. Η δεύτερη ορίστηκε ως 0 από χρόνο 0 έως 1 και 1 από χρόνο 1 έως 2 και αφορούσε τη σταδιακή εφαρμογή της επιβαλλόμενης μετατόπισης, αφού πρώτα ο φορέας είχε δεχτεί τα αποτελέσματα του ίδιου βάρους του.

Το πρώτο φορτίο επιβλήθηκε σε 5 βήματα, ενώ το δεύτερο σε 50, μετά από δοκιμές διαφορετικών βημάτων για κάθε μία φόρτιση. Βέβαια, η μέθοδος αυτόματου χωρισμού βημάτων καθιστά τον καθορισμό εξ' αρχής των βημάτων λιγότερο απαιτητικό. Για την επίλυση του κάθε βήματος επιλέχθηκε αριθμός επαναλήψεων ίσος με 50, πάλι μέσα από δοκιμές για την καλύτερη, αποδοτικότερη και πιο γρήγορη σύγκλιση. Στο μήκος κύματος του ίδιου στόχου, επιλέχθηκε και μία ακόμη παράμετρος. Στο ίδιο μενού με τον ορισμό των επαναλήψεων (iteration method) επιλέχθηκε να γίνει χρήση της γραμμικής εύρεσης της λύσης (use of line searches), η οποία βοηθά στην εύρεση αποτελέσματος σε κάθε βήμα.

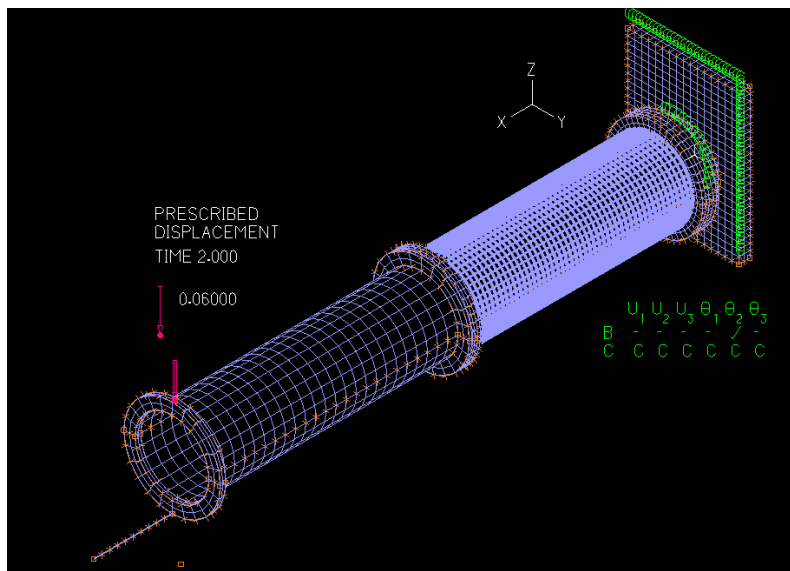
Η μη γραμμικότητα γεωμετρίας κυριάρχησε στο πείραμα. Αυτό κατανοείται από τη γεωμετρία του (λεπτά τοιχώματα σε σχέση με το μήκος του δοκιμίου) και προφανώς από την αστοχία του δοκιμίου μέσω του τοπικού λυγισμού στη βάση του. Έτσι, πέρα από τη μη γραμμικότητα υλικού, η οποία ορίστηκε μέσω της χρήσης ανελαστικών υλικών, θεωρήθηκε και μη γραμμικότητα γεωμετρίας, ορίζοντας φαινόμενα μεγάλων μετατοπίσεων στο μενού kinematics του analysis assumptions. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα 2ας τάξης μέσω του υπολογισμού του μητρώου δυσκαμψίας στην παραμορφωμένη κατάσταση.

Ατέλειες δεν προσομοιώθηκαν στο προσομοίωμα. Αυτό συνέβη διότι η μορφή αστοχίας παρουσιάστηκε χωρίς τη χρήση τους, γεγονός που σημαίνει και τη μη ευαισθησία σε ατέλειες. Έτσι, δεν πραγματοποιήθηκε γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού (LBA), αλλά έγινε απευθείας ανάλυση του προσομοιώματος με τις μη γραμμικότητες υλικού και γεωμετρίας (GMNA).

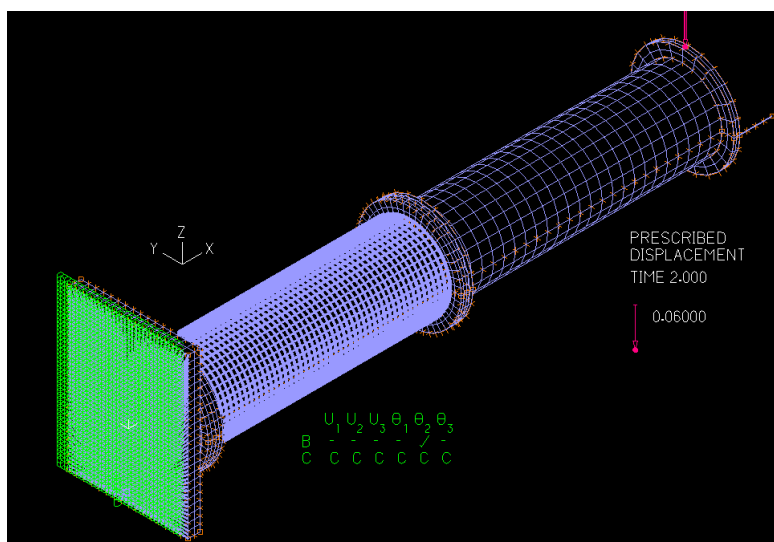
Η χρήση αυτής της μεθόδου, ωστόσο, παρουσίασε ένα πρόβλημα στα αποτελέσματα από τη φόρτιση του ίδιου βάρους. Η αντίδραση από την άσκηση του ίδιου βάρους υπολογίστηκε μειωμένη κατά 1kN και η ήδη μικρή αναμενόμενη μετατόπιση στη θέση επιβολής της μετατόπισης από το έμβολο (περίπου 0.5mm) μια τάξη μεγέθους μικρότερη. Λύση σε αυτό το πρόβλημα δεν βρέθηκε, αλλά έχοντας υπόψη ότι το ίδιο βάρος δεν παίζει σημαντικό ρόλο στα τελικά αποτελέσματα (δρόμοι ισορροπίας, εμφάνιση τοπικού λυγισμού, τιμή μετακίνησης στο οριακό φορτίο, τιμή οριακού φορτίου) και ότι η παραποίηση που παρατηρήθηκε στην αντίδραση και στη μετακίνηση στο άκρο από το ίδιο βάρος, που αναφέρθηκαν,

ήταν σχετικά μικρή για να επηρεάσει το συνολικό μοντέλο, υιοθετήθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν συνολικά από αυτή τη μέθοδο.

Τελικά, το συνολικό μοντέλο της προσομοίωσης της πειραματικής διαδικασίας που καταγράφηκε στο 3^ο κεφάλαιο προέκυψε στη μορφή που παρουσιάζεται στις παρακάτω όψεις (Σχήμα 4-7 και Σχήμα 4-8). Στην μπροστινή επιφάνεια της μετωπικής πλάκας σύνδεσης και γύρω από το κέλυφος βάσης παρατηρούνται τα σημεία που φέρουν το γράμμα C και δηλώνουν τη σύνδεση αυτών των μελών μέσω άκαμπτων στοιχείων (rigid links). Στην πίσω επιφάνεια παρατηρούνται επίσης οι θέσεις των άκαμπτων στοιχείων με το σημείο στήριξης, στο οποίο διακρίνεται το γράμμα B των συνθηκών στήριξης, με ελεύθερη μονάχα τη στροφή γύρω από τον κάθετο στο διαμήκη άξονα του δοκιμίου (έχει τοποθετηθεί στροφικό ελατήριο που δεν διακρίνεται). Επίσης το έντονο χρώμα γύρω από το μέλος με διατομή τύπου sandwich δηλώνει την ενεργοποίηση των στοιχείων επαφής μεταξύ των επιφανειών χάλυβα και κονιάματος. Το βέλος στο άκρο του δοκιμίου συμβολίζει την επιβολή μετατόπισης, ενώ το μέλος που προεξέχει χρησιμοποιήθηκε μονάχα για την καταγραφή αποτελεσμάτων στη θέση που βρίσκεται το LVDT 1 του πειράματος.



Σχήμα 4-7: Προσομοίωμα της πειραματικής διάταξης. 1^η όψη.



Σχήμα 4-8: Προσομοίωμα της πειραματικής διάταξης. 2^η όψη.

4.3 Αριθμητικά αποτελέσματα και σύγκριση με τα πειραματικά

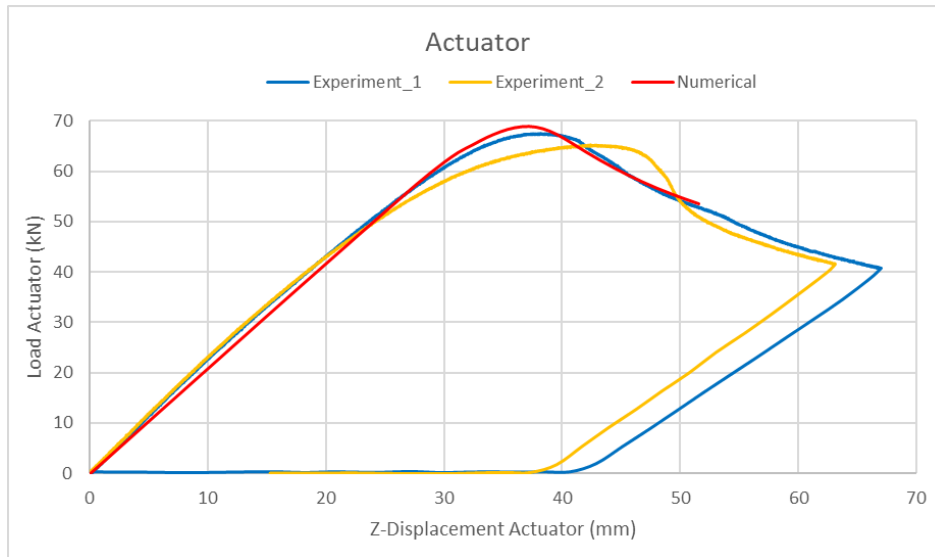
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μέθοδο αριθμητικής ανάλυσης του προσομοιώματος Full Newton Method και θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα των πειραμάτων, για να διαπιστωθεί η αξιοπιστία του προσομοιώματος. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν τη δημιουργία δρόμων ισορροπίας της δύναμης αντίστασης του εμβόλου σε σχέση με τη μετακίνηση του εμβόλου, τη μετακίνηση των διάφορων LVDTs και των παραμορφώσεων, στις θέσεις που τοποθετήθηκαν strain gauges, όπως ακριβώς παρουσιάστηκαν και στο πειραματικό κεφάλαιο 3. Επίσης, θα παρουσιαστούν και διαγράμματα τάσεων Mises σε χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές φόρτισης και η παραμορφωμένη κατάσταση του δοκιμίου στις στιγμές αυτές.

Αρχικά, παρουσιάζονται (Πίνακας 4-1) οι αντιδράσεις του εμβόλου επιβολής μετακινήσεων και οι αντίστοιχες μετατοπίσεις στα LVDTs και στο έμβολο κατά την εμφάνιση της αστοχίας, στα δύο πειράματα και στο αριθμητικό προσομοίωμα με τους δύο διαφορετικούς τρόπους ανάλυσης.

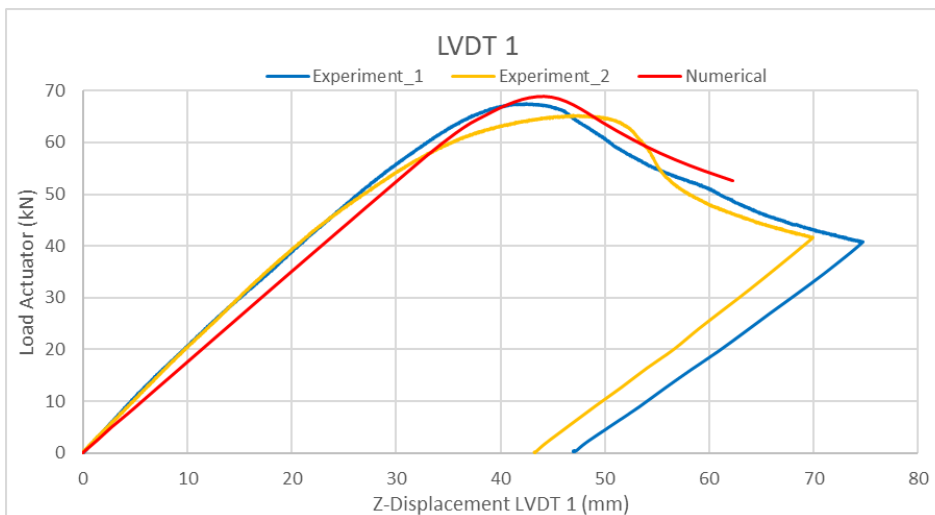
Πίνακας 4-1: Φορτία αστοχίας και αντίστοιχες μετακινήσεις στο έμβολο και στα LVDTs στα δύο πειραματικά δοκίμια και στα αντίστοιχα προσομοιώματα

		Πείραμα 1	Πείραμα 2	Αριθμητική ανάλυση
Φορτίο αστοχίας (kN)		67.62	65.28	68.95
Μετακίνηση κατά την αστοχία (mm)	Έμβολο	38.20	42.44	37.20
	LVDT 1	42.41	46.96	44.20
	LVDT 2	14.19	15.77	14.57
	LVDT 4	0.17	0.15	0.11
	LVDT 5	-1.61	-1.53	-1.60

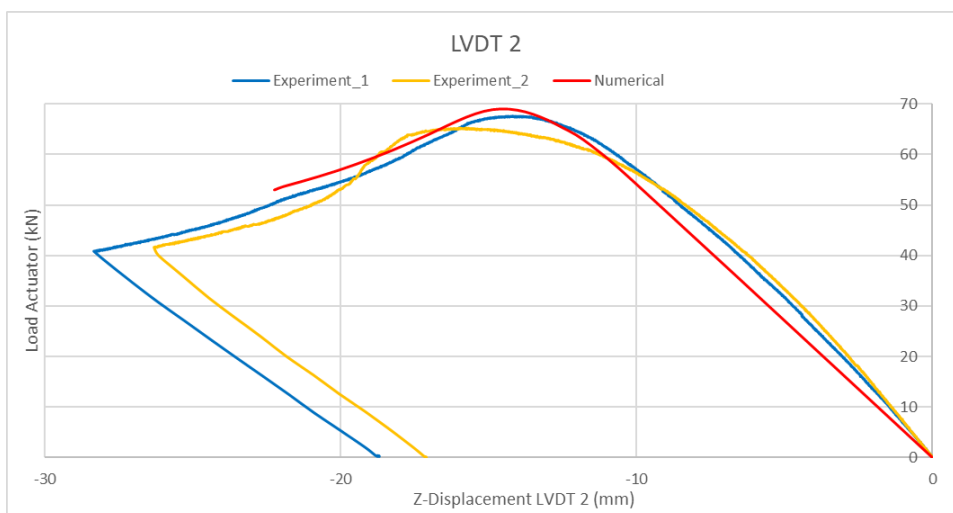
Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4-9 - Σχήμα 4-12) δίνονται οι χαρακτηριστικοί δρόμοι ισορροπίας, τόσο οι πειραματικοί όσο και ο αριθμητικός, της δύναμης αντίδρασης του εμβόλου και των αντίστοιχων μετακινήσεων του εμβόλου και των LVDTs. Οι θέσεις των διάφορων LVDTs που παρουσιάζονται στα διαγράμματα έχουν οριστεί στο κεφάλαιο 3 (Εικόνα 3-11). Στα διαγράμματα αυτά, ο κατακόρυφος άξονας αποτελεί τον άξονα καταγραφής του φορτίου αντίδρασης του εμβόλου, ενώ ο οριζόντιος τον άξονα καταγραφής των κατακόρυφων ή οριζόντιων μετακινήσεων των αντίστοιχων θέσεων.



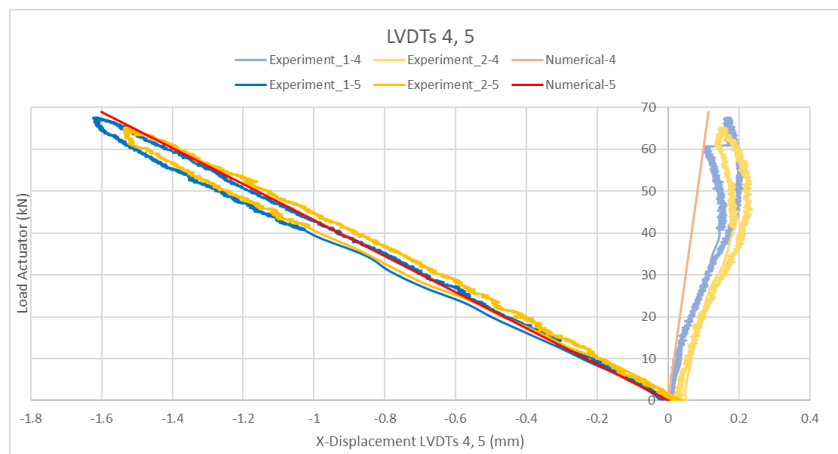
Σχήμα 4-9: Πειραματικοί και αριθμητικός δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στο έμβολο



Σχήμα 4-10: Πειραματικοί και αριθμητικός δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στη θέση του LVDT 1



Σχήμα 4-11: Πειραματικοί και αριθμητικός δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στη θέση του LVDT 2



Σχήμα 4-12: Πειραματικοί και αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας για οριζόντια μετακίνηση στη θέση των LVDT 4 (θετικές μετακινήσεις) και LVDT 5 (αρνητικές μετακινήσεις)

Η αριθμητική ανάλυση, της οποίας οι δρόμοι ισορροπίας παρουσιάζονται στα παραπάνω διαγράμματα, έλαβε υπόψη της τις μη γραμμικότητες γεωμετρίας και υλικού, χωρίς όμως να ληφθούν υπόψη γεωμετρικές ατέλειες στο δοκίμιο (τύπος GMNA).

Πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι η τιμή του οριακού φορτίου της αριθμητικής ανάλυσης απέχει μόλις 1kN από το πρώτο πείραμα και 3kN από το δεύτερο. Επίσης, οι μετακινήσεις των LVDTs και του εμβόλου, οι οποίες προέκυψαν από το αριθμητικό προσομοίωμα προσεγγίζουν αρκετά τις αντίστοιχες πειραματικές. Τη στιγμή που πραγματοποιήθηκε ο τοπικός λυγισμός, οι μετακινήσεις αυτές που προέκυψαν από την αριθμητική ανάλυση, απείχαν το πολύ 1mm από τις καταγεγραμμένες αντίστοιχες μετακινήσεις του πρώτου πειράματος, που όπως αναφέρθηκε και στο 3^ο κεφάλαιο ήταν περισσότερο αξιόπιστο από το 2^ο στο οποίο παρατηρήθηκε αρχικό σφάλμα (αρχική σχετική μετακίνηση) στη σύνδεση μεταξύ του τμήματος με διατομή τύπου sandwich και του τμήματος με ενιαία χαλύβδινη διατομή. Επομένως στο προσομοίωμα εκδηλώνεται το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού σχεδόν ταυτόχρονα με το πρώτο πείραμα. Ακόμη, ο πειραματικός μεταλυγισμός κλάδος προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τον αριθμητικό, ο οποίος βέβαια σκοπίμως δεν συνεχίζεται σε μεγαλύτερες μετακινήσεις διότι ερευνητικά και μελετητικά δεν ενδιαφέρει η συμπεριφορά της κατασκευής πολύ μετά από την εμφάνιση της αστοχίας του, η οποία είναι ουσιαστικά το ζητούμενο να προληφθεί.

Η μικρή διαφορά στη δυσκαμψία, η οποία καταδεικνύεται περισσότερο στο δρόμο ισορροπίας με το LVDT 2, δηλαδή στο σημείο σύνδεσης του κελύφους επέκτασης και του κύριου δοκιμίου τύπου sandwich, είναι πιθανό να οφείλεται στην αβεβαιότητα που επικρατεί μεταξύ της συνεργασίας του πυρήνα κονιάματος με τα ελάσματα χάλυβα και τους χαλύβδινους δακτυλίους και το κατά πόσο κατά τη διαδικασία προσομοίωσης η συγκράτηση του ενός υλικού από το άλλο προσέδωσε στιβαρότητα στο φορέα. Πιθανός λόγος ακόμη είναι το γεγονός ότι έγινε «γραμμικοποίηση» της συμπεριφοράς της μετωπικής πλάκας σύνδεσης σε σχέση με το υποστύλωμα του πλαισίου διάταξης με τη χρήση του γραμμικού ελατηρίου, του οποίου η δυσκαμψία, όπως αναφέρθηκε, προέκυψε από ένα ζεύγος τιμών μετακίνησης και φορτίου και όχι λαμβάνοντας υπόψη την ολική συνεισφορά της συμπεριφοράς του υποστυλώματος του πλαισίου στήριξης κατά τη φόρτιση. Ωστόσο, με την παρουσία του γραμμικού στροφικού ελατηρίου στη στήριξη, και η προσέγγιση της δυσκαμψίας κρίνεται επαρκής και ικανή για να προσομοιάσει τη συμπεριφορά του φορέα.

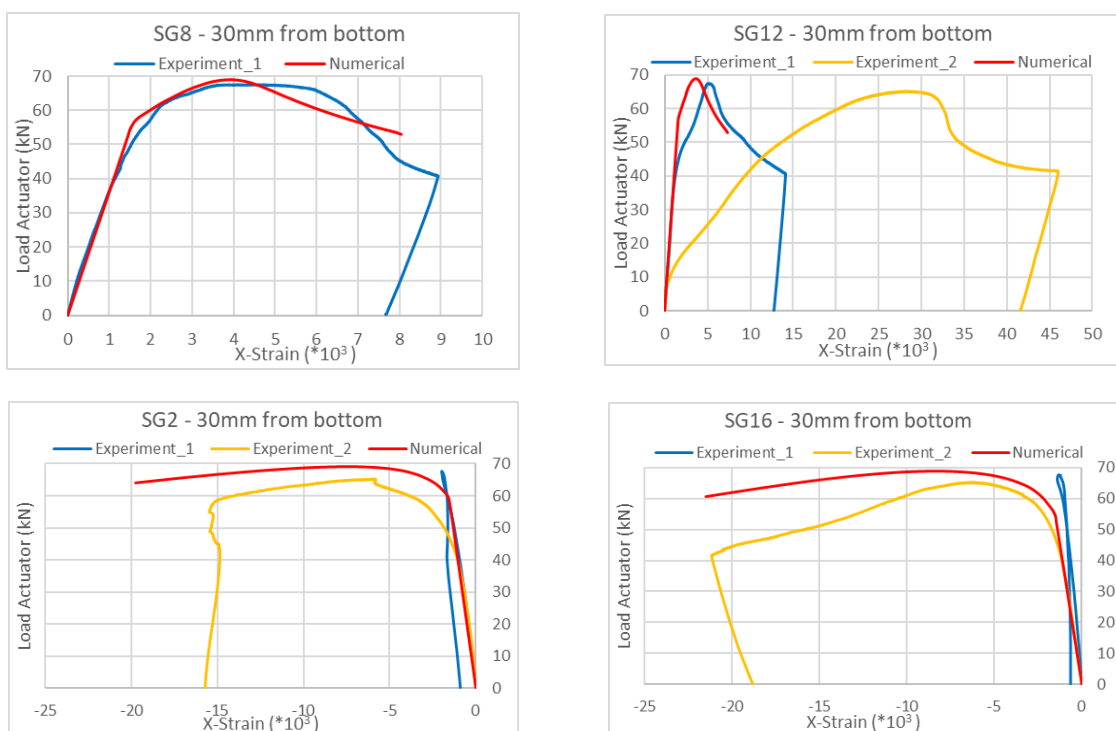
Στα διαγράμματα των LVDTs 4 και 5 παρατηρείται μείωση των απόλυτων τιμών των οριζόντιων μετακινήσεων και στην καμπύλη της αριθμητικής ανάλυσης μετά την εμφάνιση του οριακού φορτίου. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι στην αριθμητική καμπύλη η μείωση των απόλυτων τιμών των οριζόντιων μετακινήσεων γίνεται γραμμικά, διότι οι θέσεις των LVDTs αυτών αναφέρονται στη σχετική

μετακίνηση μεταξύ της μετωπικής πλάκας σύνδεσης και του υποστυλώματος του πλαισίου διάταξης, η οποία σχετική μετακίνηση έχει προσομοιωθεί με γραμμικό στροφικό ελατήριο.

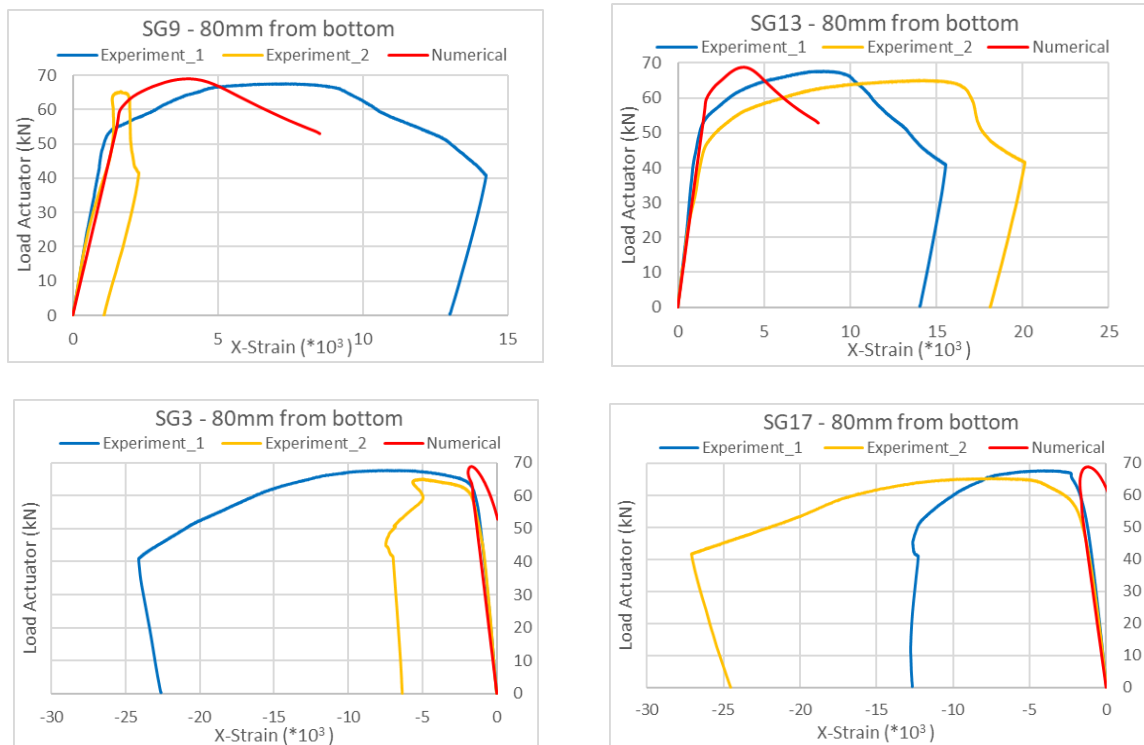
Ο δρόμος ισορροπίας με μετακινησιακό όρο το LVDT 3 δεν παρουσιάζεται, διότι δεν καταγράφηκαν κατακόρυφες μετατοπίσεις στο σημείο στήριξης, αφού ο κατακόρυφος βαθμός ελευθερίας στη στήριξη δεσμεύτηκε ολικώς, λόγω των ελάχιστων σχετικών μετακινήσεων που παρουσιάστηκαν πειραματικά στη μετωπική πλάκα σύνδεσης με το υποσύλωμα του πλαισίου διάταξης.

Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 4-13 - Σχήμα 4-17) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στις βασικότερες από τις θέσεις που τοποθετήθηκαν strain gauges (Εικόνα 3-12), σε μορφή διαγραμμάτων φορτίου-παραμόρφωσης. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, η ευαισθησία των strain gauges είναι υψηλή σε θόρυβο από ποικίλες αιτίες και αυτό μπορεί να οδηγήσει στη βλάβη τους ή στην καταγραφή λάθος αριθμητικά αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα θα εξεταστούν σε ποιοτική οπτική γωνία και όχι τόσο σε ποσοτική ακρίβεια.

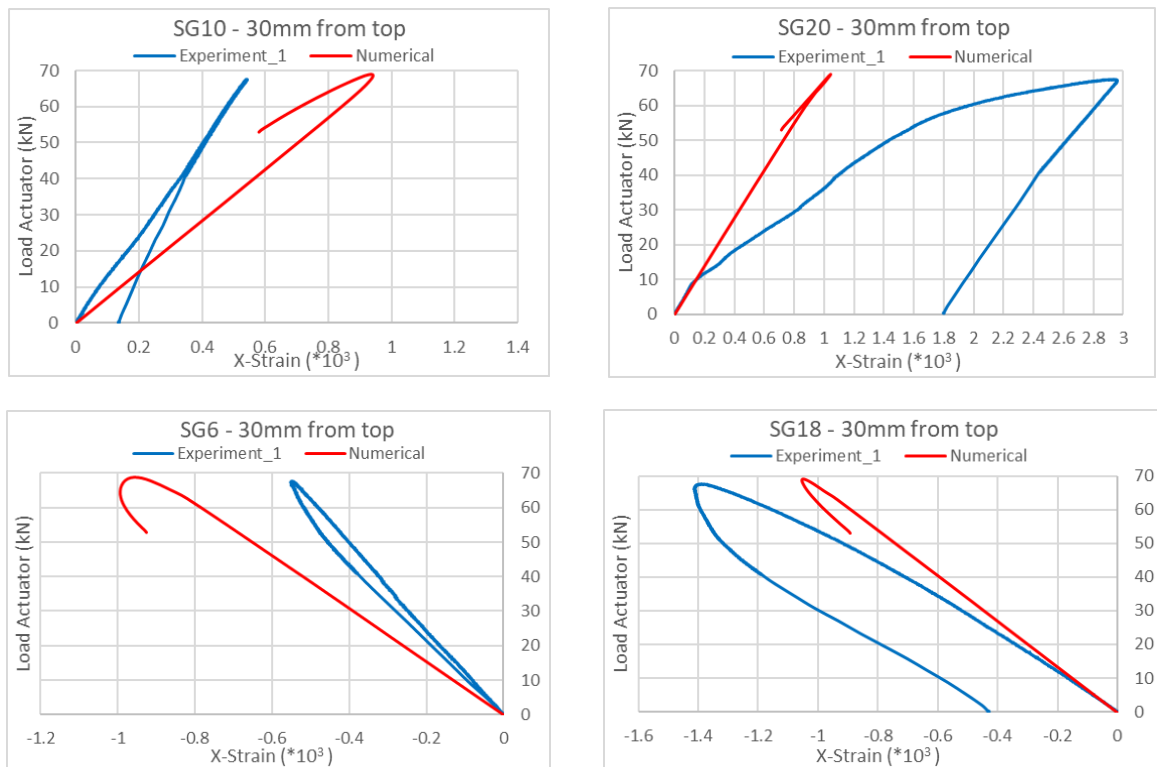
Επίσης, το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού έκανε την εμφάνιση του στο προσομοίωμα σε απόσταση 25mm από το άκρο του ελάσματος σε αντίθεση με τα πειράματα, στα οποία εμφανίστηκε κατά σειρά σε αποστάσεις 90mm και 60mm. Επομένως, δεν είναι δυνατό να είναι ακριβής η συμπεριφορά της παραμόρφωσης στις θέσεις που τοποθετήθηκαν strain gauges, αφού η εμφάνιση του τοπικού λυγισμού σε διαφορετική θέση έχει ως αποτέλεσμα να αλλάξει η κατανομή των παραμορφώσεων σε όλο το μήκος του δοκιμίου. Αυτό παρατηρείται και από το γεγονός ότι στα δύο όμοια πειραματικά δοκίμια, στα οποία υπήρξε εκδήλωση τοπικού λυγισμού σε διαφορετική θέση, τα αποτελέσματα που έδωσαν τα strain gauges στις ίδιες θέσεις, είχαν σε αρκετές περιπτώσεις μεγάλες αποκλίσεις. Ωστόσο, τα αποτελέσματα που θα παρθούν από την αριθμητική ανάλυση μπορούν να καταδείξουν και αυτόνομα τη συμπεριφορά του δοκιμίου και κυρίως τη σχετική συμπεριφορά των δύο ελασμάτων που περικλείουν τον πυρήνα από κόνιαμα, αφού από τους δρόμους ισορροπίας φαίνεται να υπάρχει καλή συσχέτιση του προσομοιώματος με την πραγματικότητα.



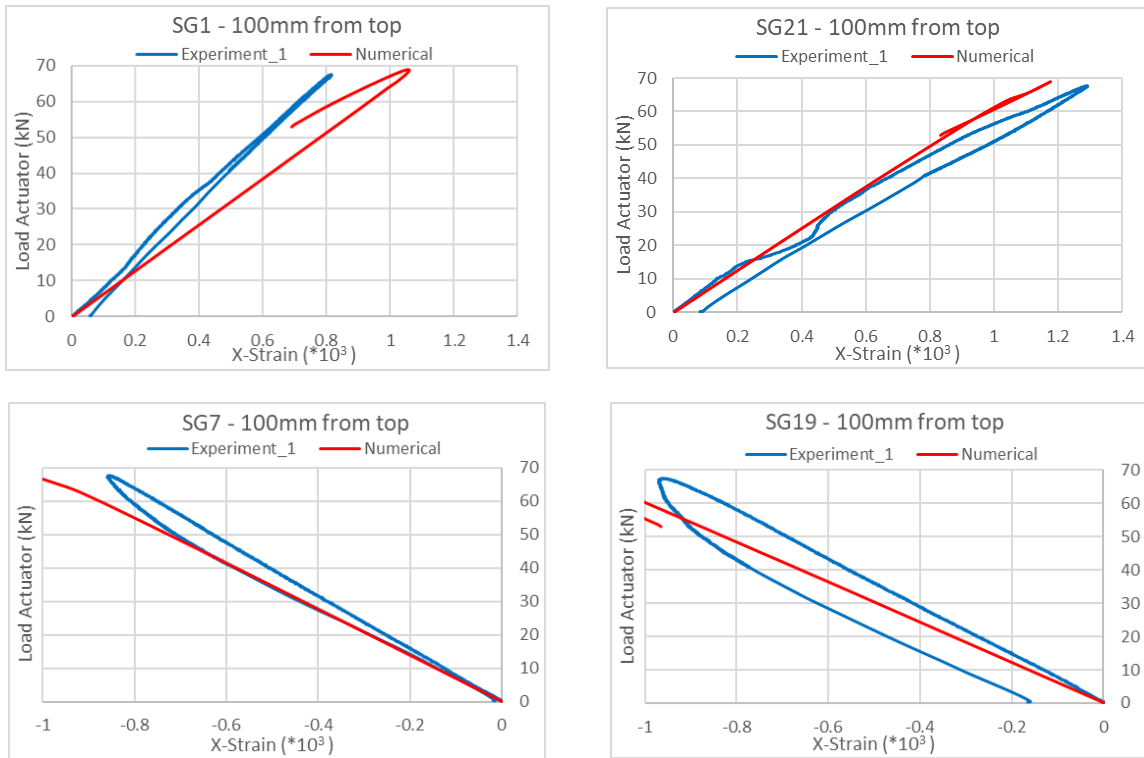
Σχήμα 4-13: Εξέλιξη παραμόρφωσης σε απόσταση 30mm από το άκρο κάτω μέρους. Κατά σειρά εφελκυστική και εφελκυστική παραμόρφωση ελάσματος και αντίστοιχα θλιβόμενη παραμόρφωση, πειραματικά και αριθμητικά (βλ. (Εικόνα 3-12) για θέσεις)



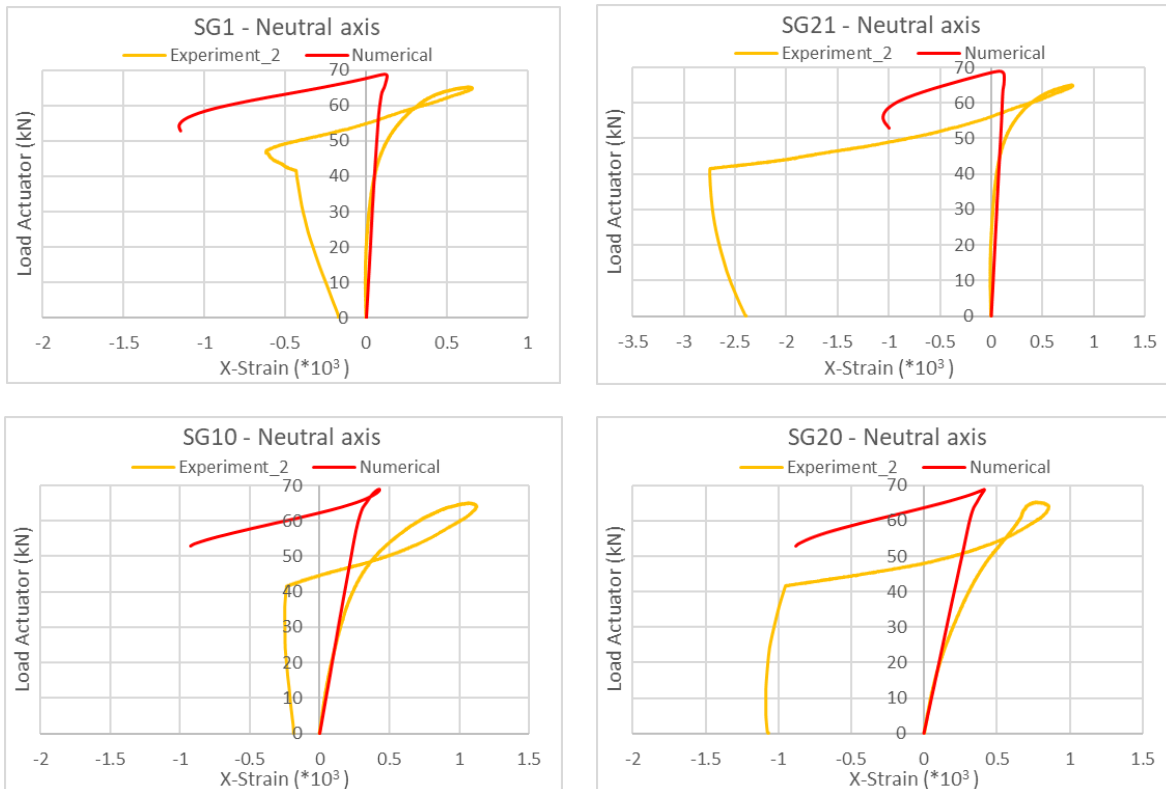
Σχήμα 4-14: Εξέλιξη παραμόρφωσης σε απόσταση 80mm από το άκρο κάτω μέρους. Κατά σειρά εφελκούμενη παρειά εσωτ. και εξωτ. ελάσματος και αντίστοιχα θλιβόμενης παρειάς, πειραματικά και αριθμητικά (βλ. (Εικόνα 3-12) για θέσεις)

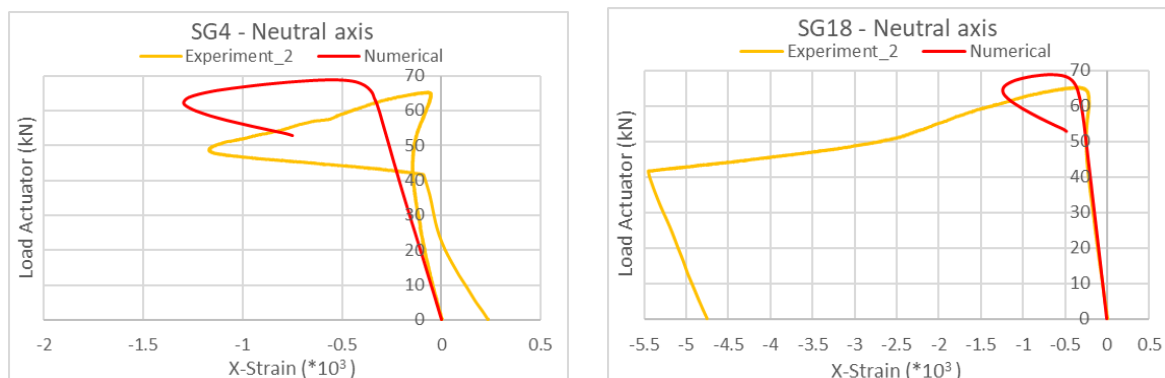


Σχήμα 4-15: Εξέλιξη παραμόρφωσης σε απόσταση 30mm από το άκρο άνω μέρους. Κατά σειρά εφελκούμενη παρειά εσωτ. και εξωτ. ελάσματος και αντίστοιχα θλιβόμενης παρειάς, πειραματικά και αριθμητικά (βλ. (Εικόνα 3-12) για θέσεις)



Σχήμα 4-16: Εξέλιξη παραμόρφωσης σε απόσταση 100mm από το άκρο άνω μέρους. Κατά σειρά εφελκυσμένη παρειά εσωτ. και εξωτ. ελάσματος και αντίστοιχα θλιβόμενης παρειάς, πειραματικά και αριθμητικά (βλ. (Εικόνα 3-12) για θέσεις)





Σχήμα 4-17: Εξέλιξη παραμόρφωσης σε αποστάσεις γύρω από τον ουδέτερο άξονα. Κατά σειρά στην αρχική θέση του ουδέτερου άξονα του εσωτ. και του εξωτ. ελάσματος και αντίστοιχα σε απόσταση 45mm πάνω από τον ουδέτερο άξονα και 45mm κάτω από αυτόν, πειραματικά και αριθμητικά (βλ. (Εικόνα 3-12) για θέσεις)

Από τα δύο πρώτα τα διαγράμματα (Σχήμα 4-13) (SG8, SG12), αλλά και (Σχήμα 4-14) (SG9, SG13), τα οποία αναφέρονται στην εφελκυστική παρειά σε αποστάσεις 30mm και 80mm αντίστοιχα από το άκρο του κάτω μέρους, παρατηρείται ικανοποιητική σχέση μεταξύ της αριθμητικής ανάλυσης και του πρώτου πειράματος, κυρίως μέχρι την πρώτη διαρροή σε φορτίο περίπου 45kN. Το δεύτερο πείραμα φαίνεται πως ανέπτυξε διαρροή πιο ακαριαία και για αυτό παρατηρούνται μεγαλύτερες παραμορφώσεις στα δεύτερα κατά σειρά διαγράμματα των σχημάτων: Σχήμα 4-13 (SG12) και Σχήμα 4-14 (SG13). Στο πρώτο διάγραμμα (Σχήμα 4-14) (SG9) οι παραμορφώσεις που καταγράφηκαν στο δεύτερο πείραμα και αφορούν το εσωτερικό έλασμα είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις παραμορφώσεις του εξωτερικού ελάσματος στην ίδια θέση (SG13). Το γεγονός αυτό δείχνει την ευαισθησία των strain gauges και τη λάθος καταγραφή του πρώτου, δεδομένου ότι στα υπόλοιπα διαγράμματα οι παραμορφώσεις εσωτερικών και εξωτερικών ελασμάτων στις αντίστοιχες θέσεις είναι παρόμοιες και καταδεικνύουν την καλή συνεργασία της διατομής.

Στα δύο τελευταία διαγράμματα (Σχήμα 4-13) (SG2, SG16), που παρουσιάζεται η θλιβόμενη παρειά του εσωτερικού και του εξωτερικού ελάσματος σε απόσταση 30mm από το άκρο του κάτω τμήματος, παρατηρούνται αυξημένες παραμορφώσεις στο δεύτερο πείραμα, αλλά πολύ περισσότερο στο αριθμητικό προσομοίωμα. Αυτό συμβαίνει διότι στο αριθμητικό προσομοίωμα το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού εκδηλώθηκε σε απόσταση 25mm από το άκρο του κάτω τμήματος, δηλαδή μόλις 5mm μακριά από τις μετρούμενες παραμορφώσεις. Σε αντίθεση το πρώτο πείραμα έδωσε μικρές παραμορφώσεις, αφού η εκδήλωση του τοπικού λυγισμού έγινε σε απόσταση 90mm από το άκρο του κάτω τμήματος.

Οι θέσεις στις οποίες μετρήθηκαν οι παραμορφώσεις σε απόσταση 80mm από το άκρο του κάτω τμήματος σε εσωτερικό και εξωτερικό έλασμα και παρουσιάζονται στα δύο τελευταία διαγράμματα (Σχήμα 4-14) (SG3, SG17), απείχαν πολύ από τη θέση του τοπικού λυγισμού στο μοντέλο της αριθμητικής ανάλυσης. Για το λόγο αυτό παρατηρείται συμφωνία με τα πειράματα μονάχα έως το οριακό σημείο και όχι μετά την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού κατά την οποία αυξήθηκαν αρκετά οι αντίστοιχες παραμορφώσεις στα πειράματα, λόγω της μικρότερης σχετικής τους απόστασης από τη δική τους θέση εκδήλωσης τοπικού λυγισμού.

Τα πειραματικά διαγράμματα (Σχήμα 4-15), που αφορούν εφελκυστικές και θλιβόμενες θέσεις σε απόσταση 30mm από το άνω άκρο του δοκιμίου με διατομή τύπου sandwich, δεν προσεγγίστηκαν ικανοποιητικά από την αριθμητική ανάλυση. Παρατηρείται ότι μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού ελάσματος, στην πρώτη περίπτωση στην εφελκυστική παρειά και έπειτα στη θλιβόμενη, υπάρχει αρκετή διαφορά στις παραμορφώσεις. Το γεγονός αυτό ίσως οφείλεται στην κακή τοποθέτηση των strain gauges ή στην ευαισθησία τους. Επομένως δεν κρίνονται τόσο αξιόπιστα τα συγκεκριμένα δεδομένα. Ωστόσο, η μορφή των καμπυλών που δημιουργήθηκαν από το προσομοίωμα προσεγγίζει αρκετά την

πειραματική, πέρα από το ποσοτικό κομμάτι. Περισσότερο σημαντικό είναι το γεγονός ότι υπάρχει αρκετά καλή συμφωνία στις παραμορφώσεις μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού ελάσματος στις αντίστοιχες παρειές στα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης και άρα υπήρξε καλή συνεργασία μεταξύ των υλικών στη διατομή τύπου sandwich.

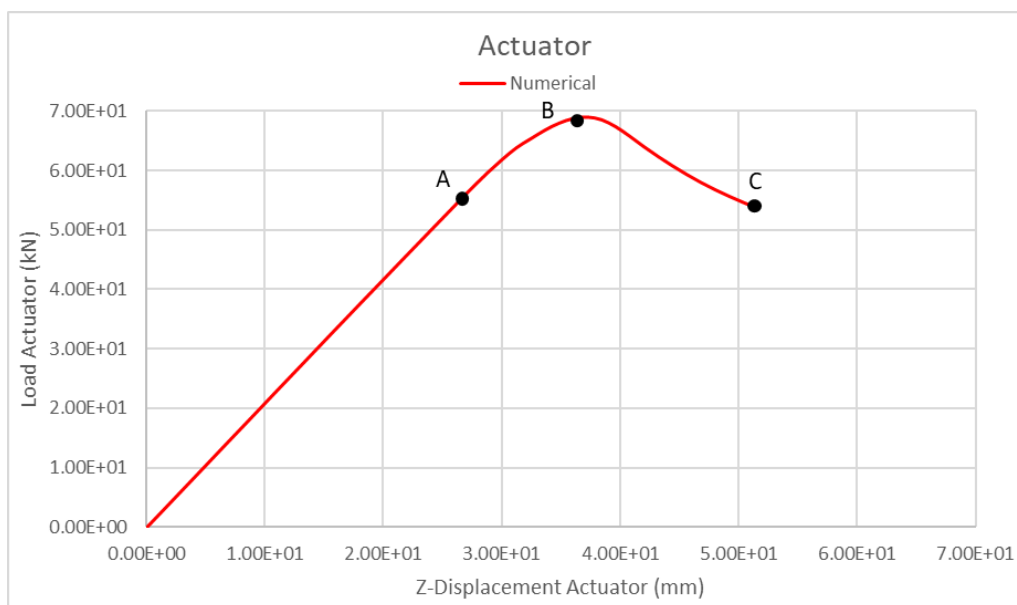
Πολύ καλύτερα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα διαγράμματα (Σχήμα 4-16), που αφορούν τις εφελκυστικές και θλιβόμενες θέσεις σε απόσταση 100mm από το άνω άκρο του δοκιμίου με διατομή τύπου sandwich. Η αριθμητική ανάλυση έδωσε παραμορφώσεις που ταιριάζουν ικανοποιητικά με τις καταγραφές του πρώτου πειράματος, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά.

Όσο αναφορά τα διαγράμματα (Σχήμα 4-17) που αφορούν τις παραμορφώσεις γύρω από τον αρχικό ουδέτερο άξονα, 45mm πάνω από αυτόν και 45mm κάτω από αυτόν, σε όλα παρατηρείται πολύ καλή προσέγγιση έως την πρώτη διαρροή περίπου σε φορτίο 45kN. Πιο συγκεκριμένα, για τα τέσσερα πρώτα διαγράμματα παρατηρείται μειωμένη αύξηση σε εφελκυσμό έως το οριακό φορτίο από το αριθμητικό μοντέλο, δηλαδή ο ουδέτερος άξονας δεν κατέβηκε τόσο προς τη μεριά της θλιβόμενης επιφάνειας όσο στο δεύτερο πείραμα. Άρα, φαίνεται ότι αριθμητικά χρησιμοποιήθηκε περισσότερο η εφελκυστική αντοχή του κονιάματος που διατήρησε πιο ψηλά τον ουδέτερο άξονα από ότι στο πείραμα. Τίθεται έτσι το θέμα της αβεβαιότητας του κονιάματος ως προς τα χαρακτηριστικά του, αφού τα στοιχεία γύρω από τα μηχανικά του χαρακτηριστικά δεν κρίθηκαν τόσο επαρκή (χρησιμοποιήθηκαν και τυπικές καμπύλες κονιαμάτων τάσης-παραμόρφωσης για να προσεγγιστεί) και είναι αρκετά δύσκολο σε ένα τέτοιο υλικό που οι αντοχές του αλλάζουν μέρα με τη μέρα να οριστεί μια απολύτως ακριβής καμπύλη μονοαξονικής τάσης-παραμόρφωσης που να το αντιπροσωπεύει. Πέρα από το γεγονός αυτό, παρατηρείται ποιοτική ταύτιση των διαγραμμάτων πειράματος και αριθμητικής ανάλυσης και μετά την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού, δηλαδή μετά το οριακό φορτίο, όταν και οι παραμορφώσεις βαίνουν αυξανόμενες θλιπτικές στο μεταλυγισμικό κλάδο. Χαρακτηριστικό είναι ότι στα τελευταία δύο διαγράμματα που αφορούν σε απόσταση 45mm κάτω από τον αρχικό ουδέτερο άξονα, οι παραμορφώσεις τείνουν να μηδενιστούν απόρροια της μεταφοράς του ουδέτερου άξονα προς αυτή τη θέση, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από το προτελευταίο πειραματικό διάγραμμα (SG4), που αντιπροσωπεύει το εσωτερικό έλασμα, αλλά όχι από το τελευταίο (SG18), που αντιπροσωπεύει το εξωτερικό έλασμα, το οποίο είναι πιθανό να παρουσίασε σφάλμα, αφού δε συμβαδίζει καθόλου με το αντίστοιχο διάγραμμα του εσωτερικού ελάσματος.

Τελικά και συνολικά προκύπτει ως συμπέρασμα πως το μοντέλο αριθμητικής ανάλυσης, το οποίο πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό του εμπορίου Adina, προσέγγισε ικανοποιητικά το περισσότερο ακριβές πρώτο πείραμα. Επομένως, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτήν την ανάλυση μπορούν να κριθούν αξιόπιστα και να γίνει εμπάθυνση και σε διαγράμματα τάσεων των υλικών, αλλά και των αναμενόμενων μετακινήσεών τους σε χαρακτηριστικές θέσεις των δρόμων ισορροπίας. Ακόμη, το προσομοίωμα αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε αριθμητικές αναλύσεις με διαφορετικές παραμέτρους, ώστε να προκύψει μια πιο ξεκάθαρη εικόνα για τον τρόπο λειτουργίας και συμπεριφοράς των καινοτόμων αυτών διατομών τύπου sandwich και να είναι χρήσιμο για τη δημιουργία μιας όσο το δυνατόν πιο βέλτιστης διατομής τέτοιου τύπου, αρχικά από στατικής άποψης, για πυλώνες ανεμογεννητριών.

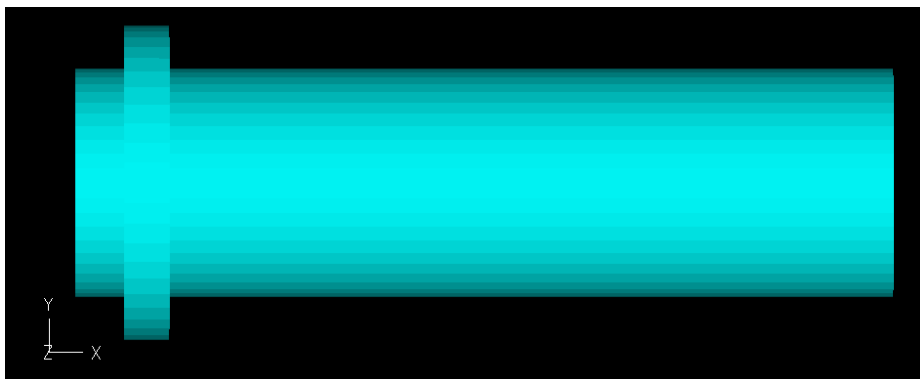
Παρακάτω θα δοθούν σχηματικά (Σχήμα 4-19 - Σχήμα 4-45) από το πρόγραμμα η παραμόρφωση, η τάση Mises, η εξέλιξη της διαρροής, η ανάπτυξη ρωγμών και η κατάσταση των στοιχείων επαφής στις χαρακτηριστικές θέσεις που φαίνονται στο παρακάτω (Σχήμα 4-18). Πρόκειται για θέσεις που συνοψίζουν τη συμπεριφορά του δοκιμίου A: αρχικά που παρατηρείται η διαρροή των χαλύβδινων ελασμάτων, B: κοντά στην εμφάνιση του οριακού φορτίου και τέλος C: λίγο μετά την εμφάνιση του φαινομένου του τοπικού λυγισμού. Η ανάπτυξη των ρωγμών εξετάζεται με ποιοτική ματιά και όχι τόσο με ποσοτική, δηλαδή ποια σημεία του κονιάματος αστοχούν πρώτα και πως το φαινόμενο αυτό εξαπλώνεται. Ποιοτική, επίσης, είναι η παρουσία της κατάστασης των στοιχείων επαφής, για την εύρεση περιοχών ανάμεσα στο κονίαμα με τα ελάσματα και τους δακτυλίους, που υπό αυτήν τη φόρτιση,

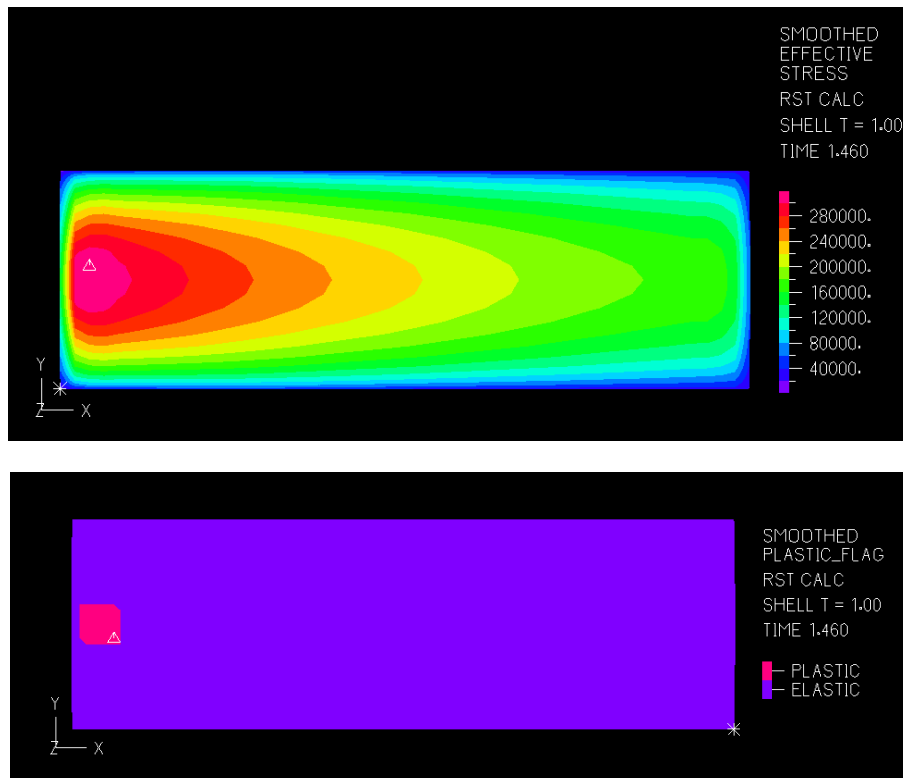
παρατηρείται καλύτερη σύνδεση των υλικών μεταξύ τους. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα μετά την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού μπορεί να μην είναι και τόσο αξιόπιστα, διότι η παρουσία δύο υλικών που έρχονται σε επαφή με το ένα να μη λυγίζει (κονίαμα) και το άλλο να λυγίζει (χάλυβας) και η εισχώρηση του ενός εντός του άλλου μπορούν να προκαλέσουν αριθμητικές ανακρίβειες στο προσομοίωμα.



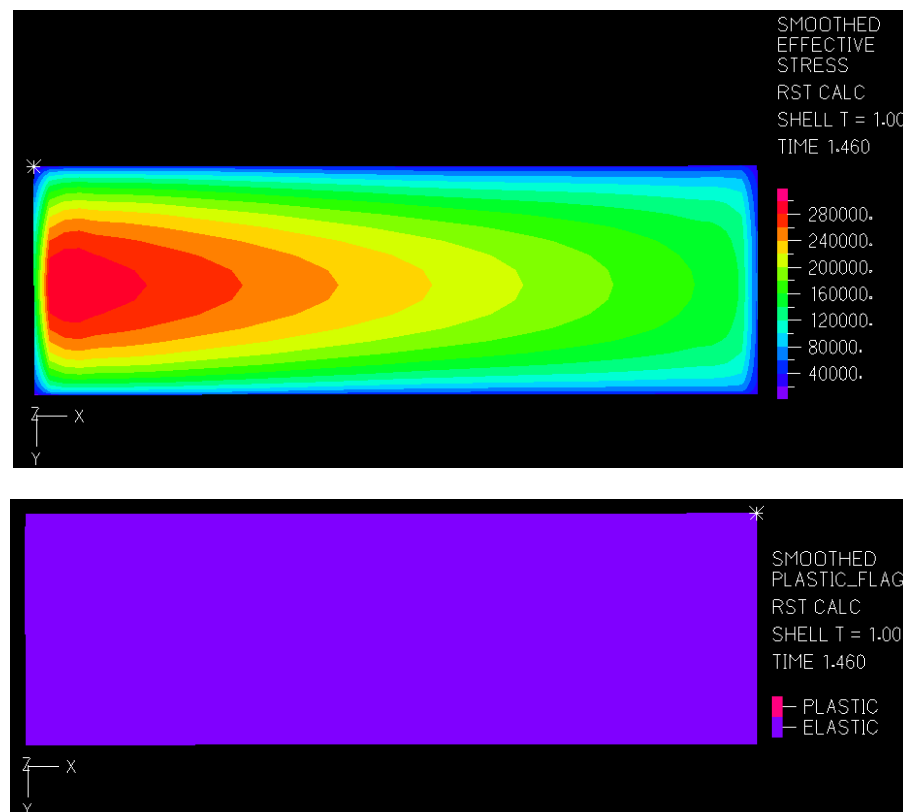
Σχήμα 4-18: Χαρακτηριστικές θέσεις A, B, C στον αριθμητικό δρόμο ισορροπίας για προσδιορισμό της συμπεριφοράς του φορέα

Σαφώς φαίνεται ότι η αστοχία του δοκιμίου και η εμφάνιση οριακού σημείου στο δρόμο ισορροπίας προέρχεται από την εκδήλωση του φαινομένου του τοπικού λυγισμού κοντά στη βάση στη θλιβόμενη παρειά. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε εκείνη τη θέση διότι αφενός θλιβεται και αφετέρου είναι κοντά στη βάση, δηλαδή δέχεται τα μεγαλύτερα εντατικά μεγέθη που ασκούνται στο δοκίμιο. Επίσης, η μη γραμμικότητα υλικού εμφανίζεται πιο πριν από τη μη γραμμικότητα γεωμετρίας, μέσω της ανάπτυξης διαρροής στο σημείο A στο παραπάνω σχήμα. Συνεπώς, υπάρχει ένας συνδυασμός των δύο μη γραμμικοτήτων για την εμφάνιση της αστοχίας του φορέα και επομένως είναι και οι δύο εξίσου κρίσιμες. Η απώλεια των αρχικών ατελειών δεν εμπόδισε την εμφάνιση της αστοχίας, η οποία ήταν εξ' αρχής προσανατολισμένη, διότι η κάμψη ως φόρτιση ουσιαστικά οδηγεί το φορέα από μόνη της στον προσανατολισμό της αστοχίας. Για το λόγο αυτό δε χρησιμοποιήθηκαν αρχικές ατέλειες.

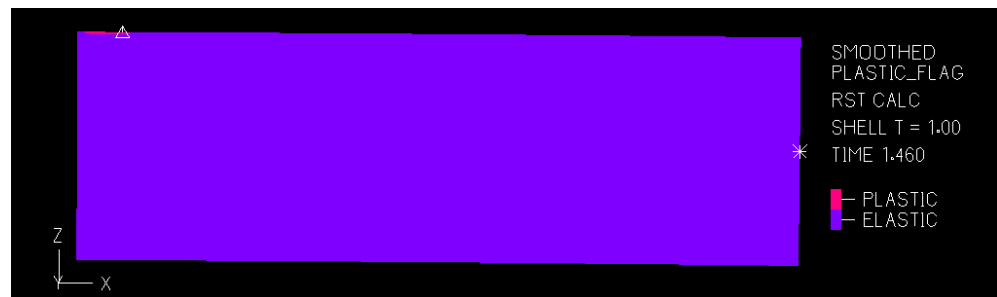
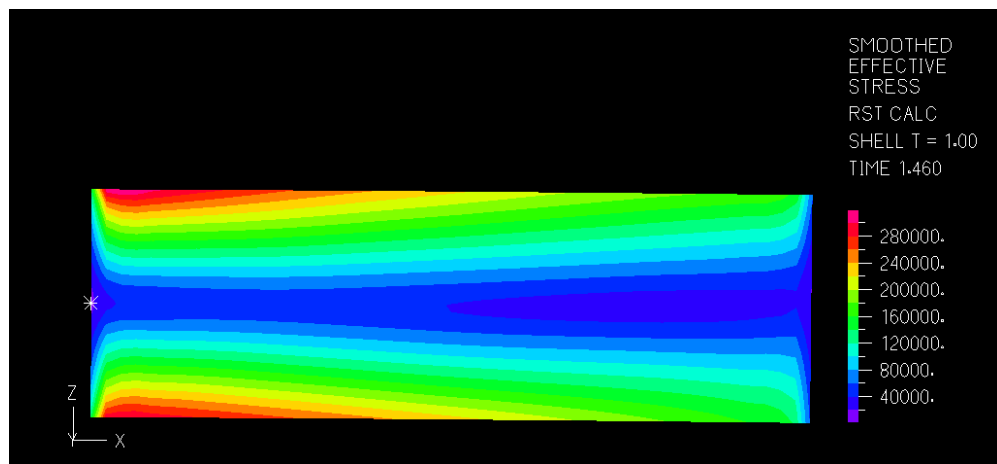
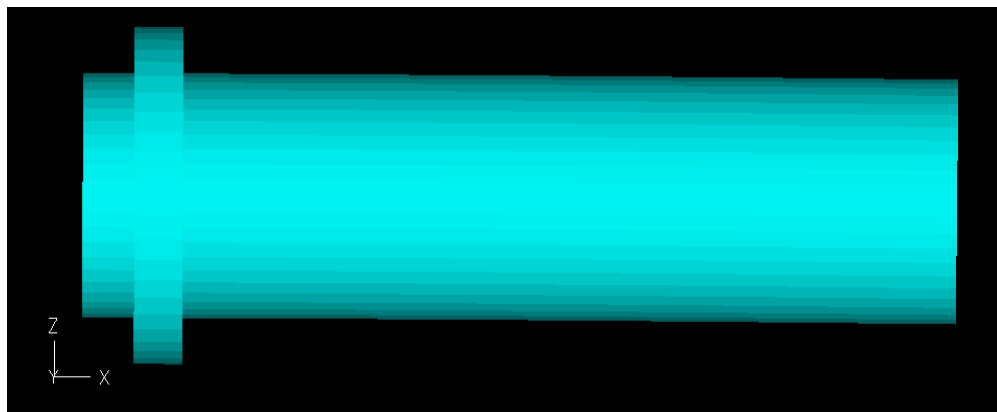




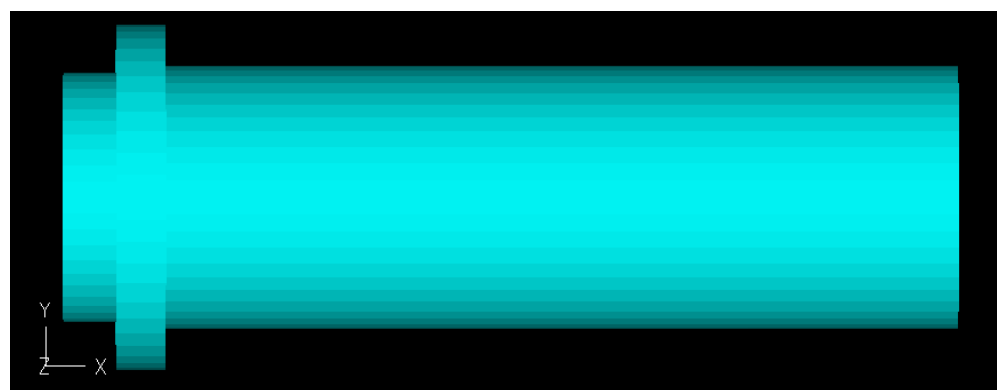
Σχήμα 4-19: Εσωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο A: Παραμόρφωση, τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XY, άνω τμήμα.

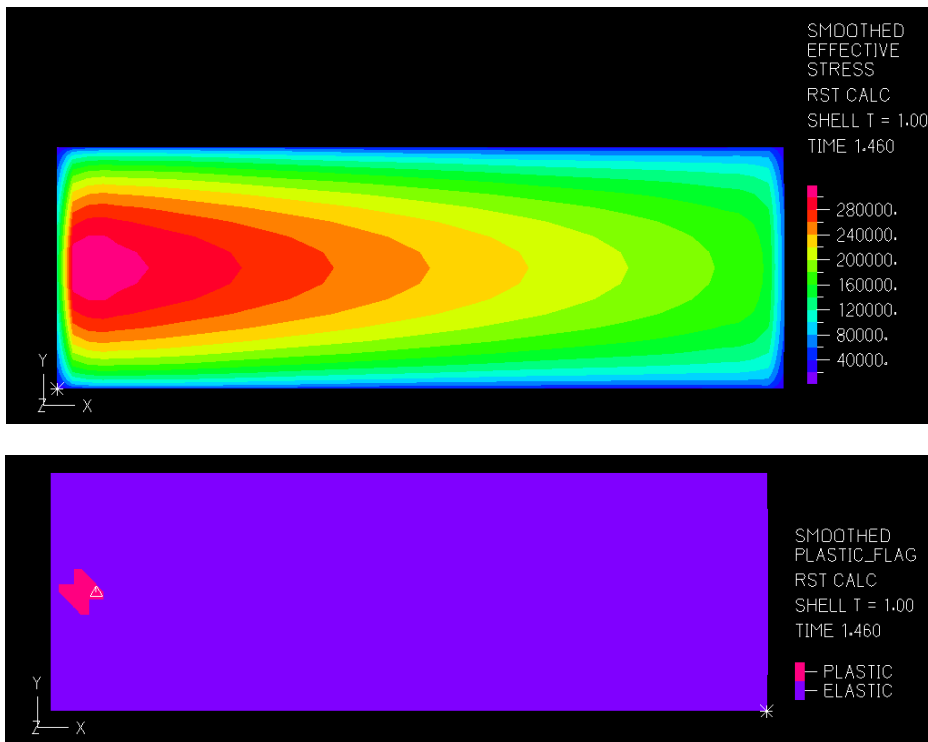


Σχήμα 4-20: Εσωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο A: Τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XY, κάτω τμήμα.

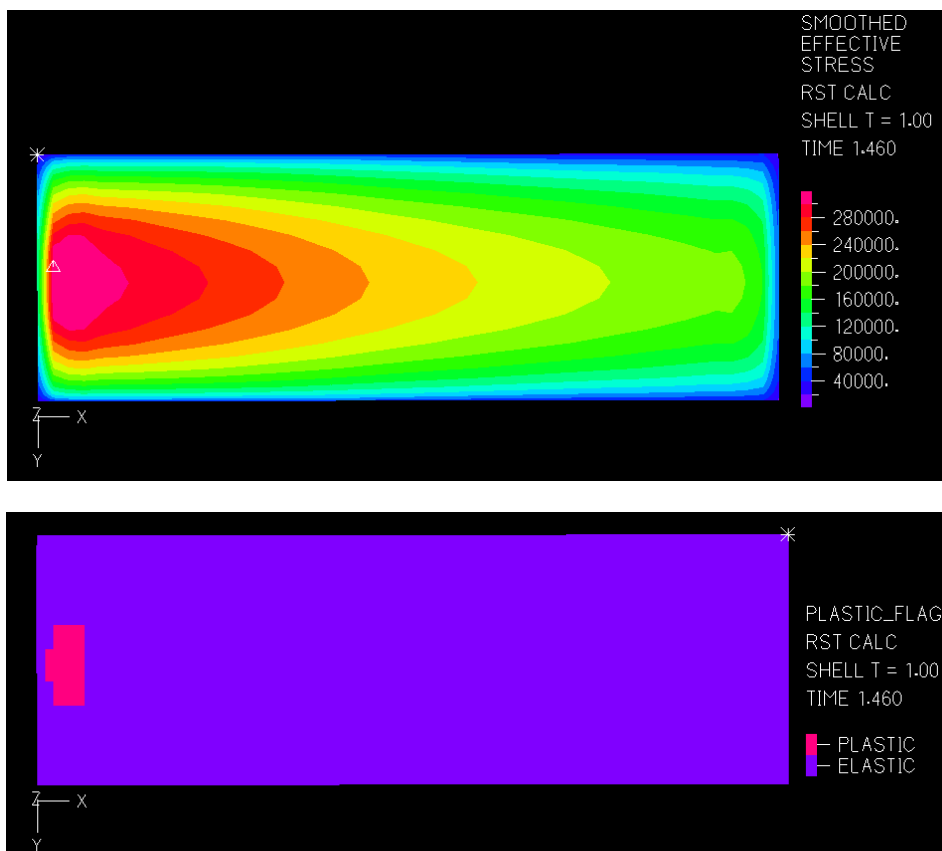


Σχήμα 4-21: Εσωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο A: Παραμόρφωση, τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XZ.

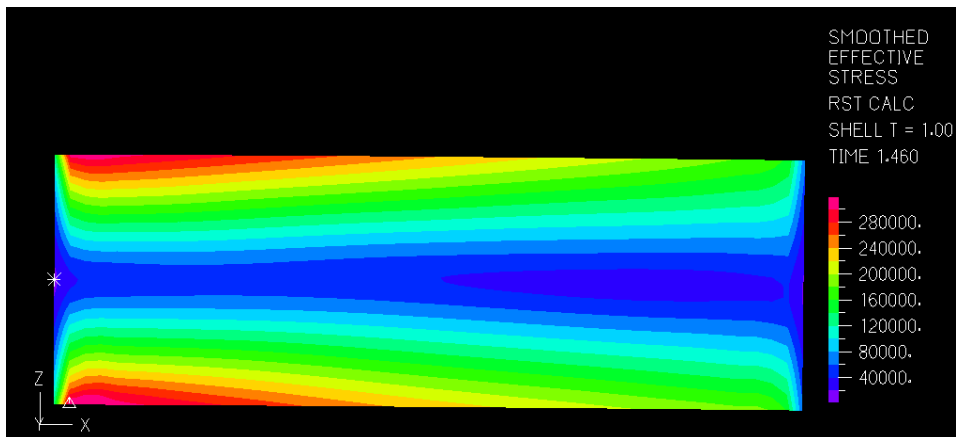
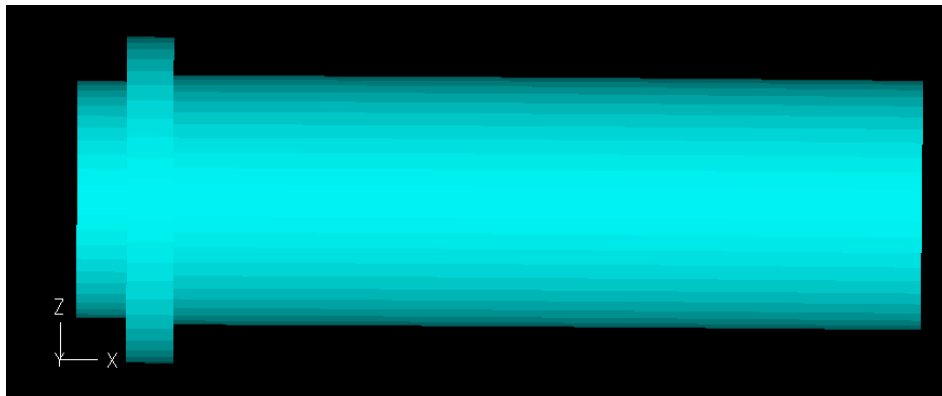




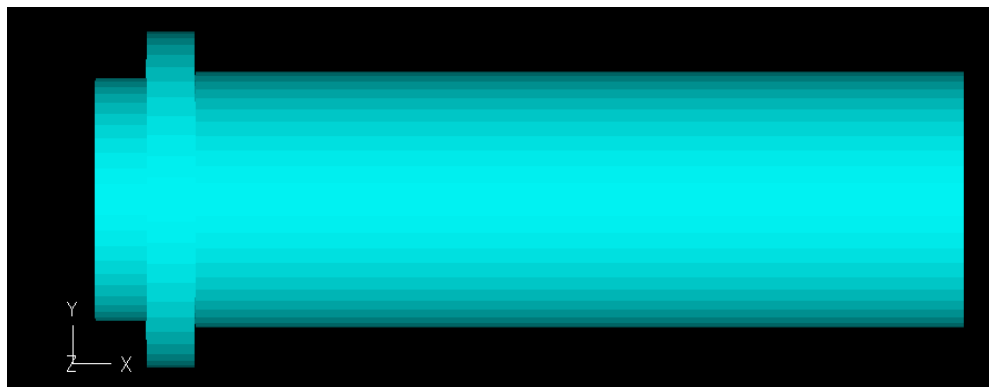
Σχήμα 4-22: Εξωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο A: Παραμόρφωση, τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XY, άνω τμήμα.

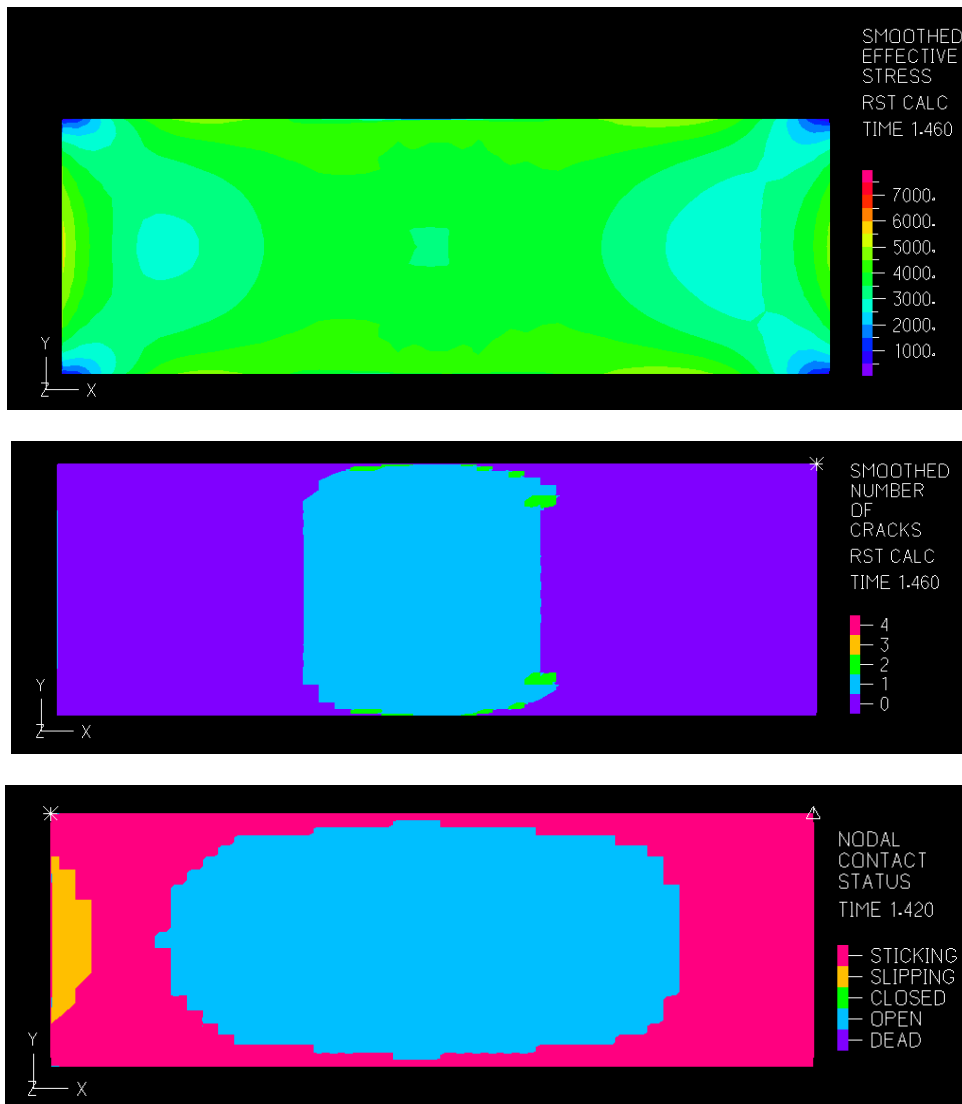


Σχήμα 4-23: Εξωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο A: Τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XY, κάτω τμήμα.

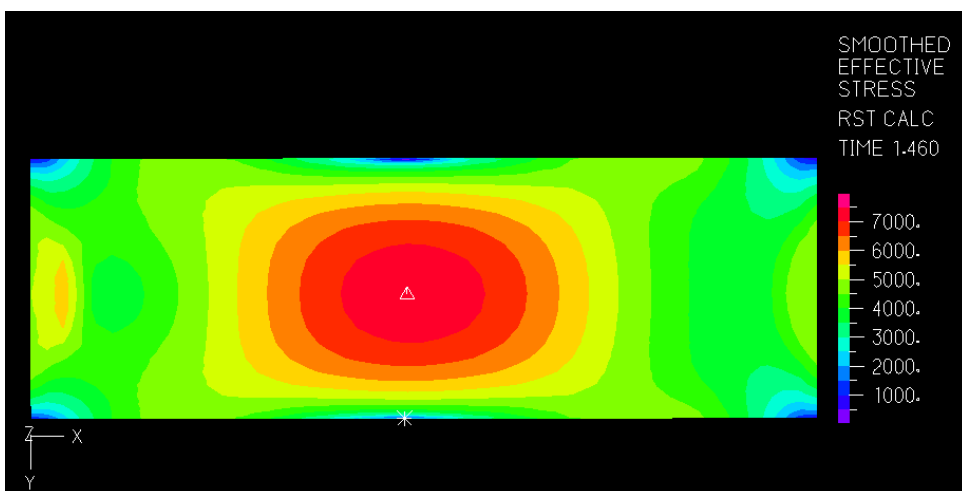


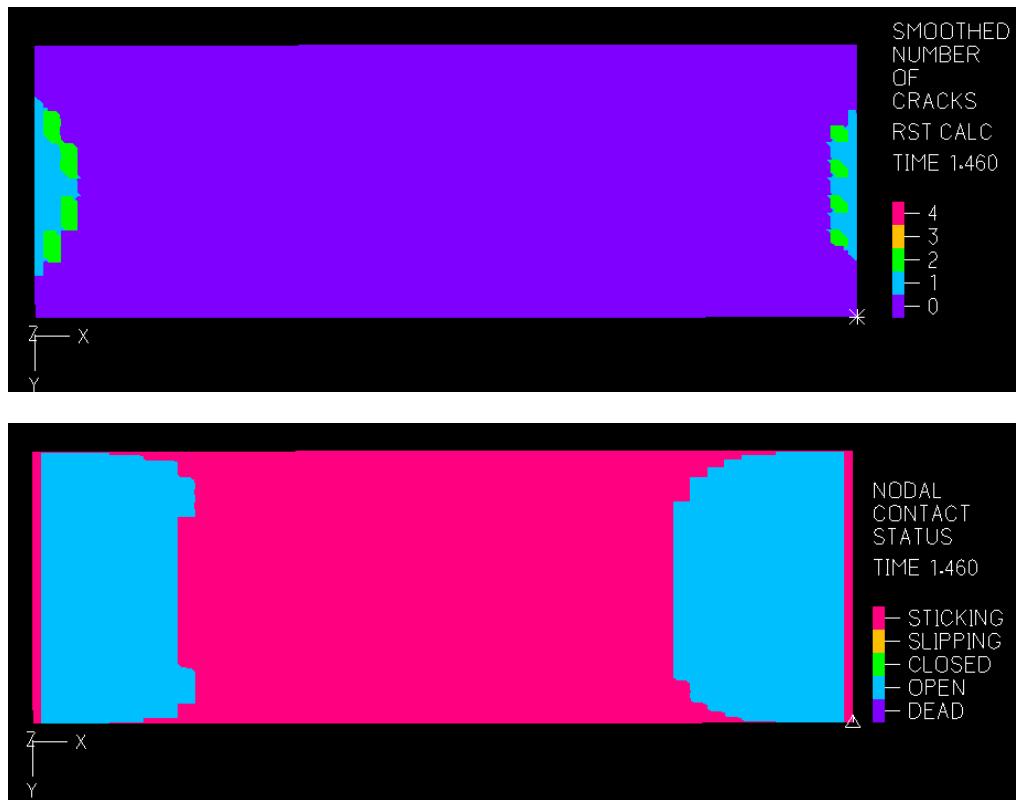
Σχήμα 4-24: Εξωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο A: Παραμόρφωση, τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XZ.



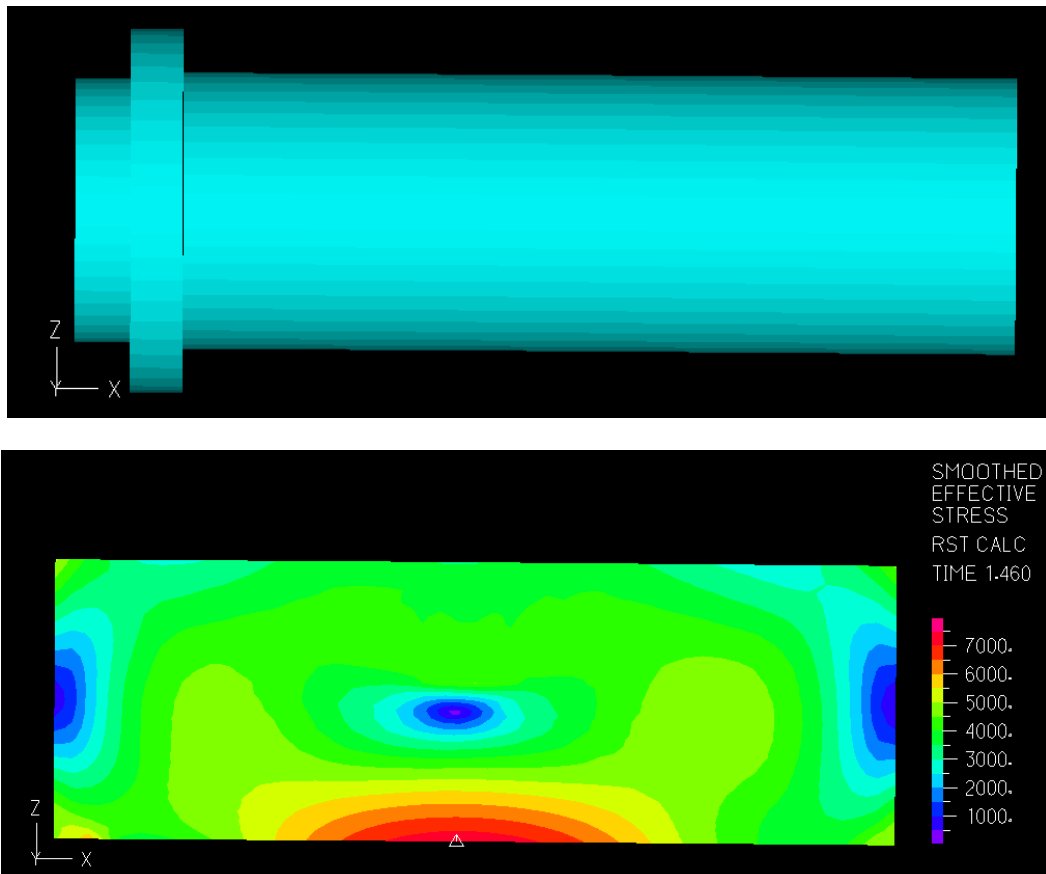


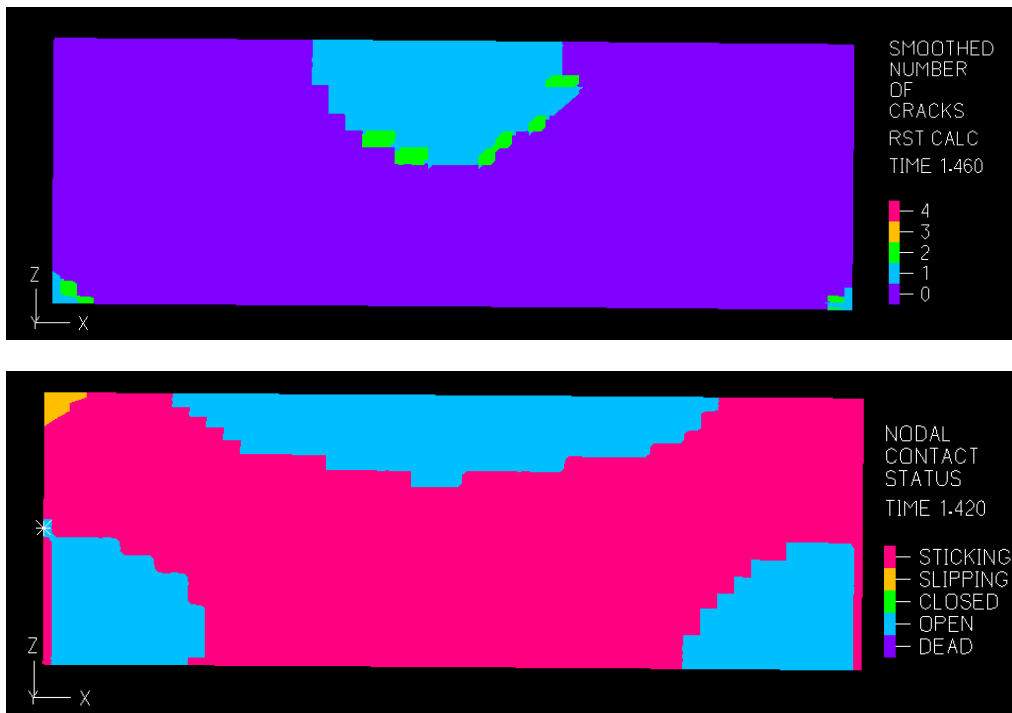
Σχήμα 4-25: Πυρήνας από κονίαμα. Σημείο A: Παραμόρφωση, τάση Mises, αριθμός ρωγμών, κατάσταση στοιχείων επαφής. Όψη XY, άνω τμήμα.



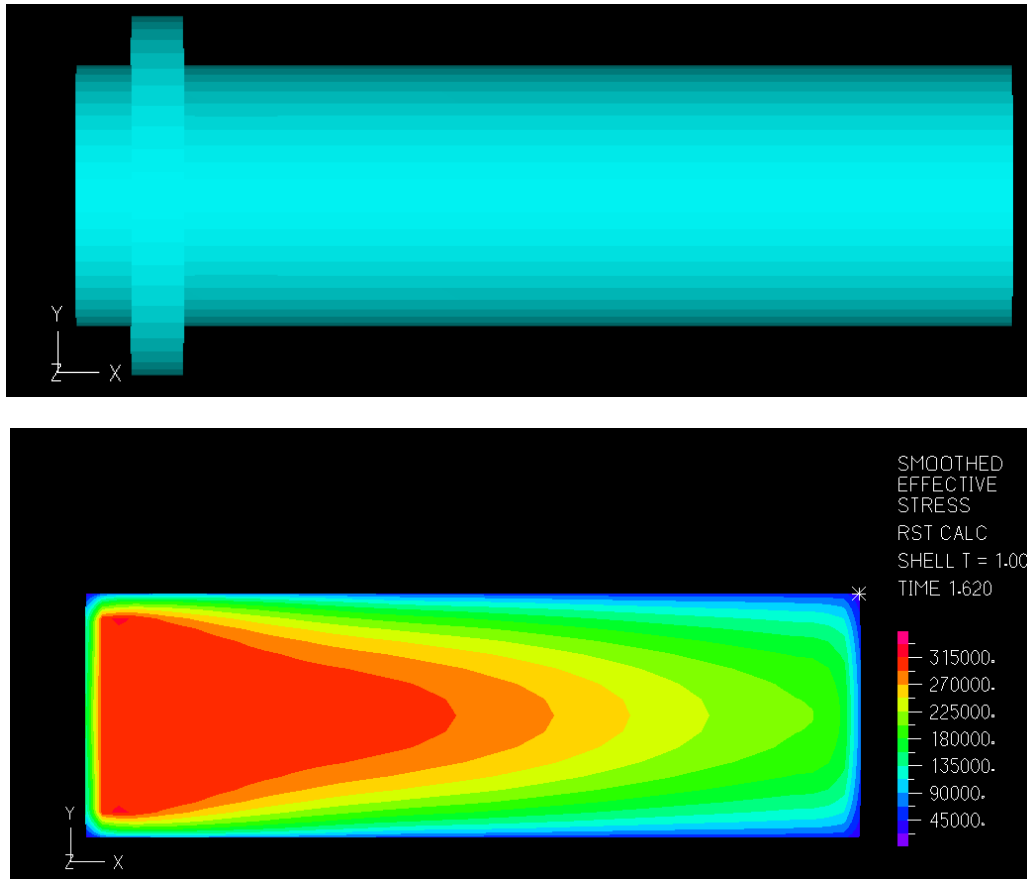


Σχήμα 4-26: Πυρήνας από κονίαμα. Σημείο A: Τάση Mises, αριθμός ρωγμών, κατάσταση στοιχείων επαφής. Όψη XY, κάτω τμήμα.



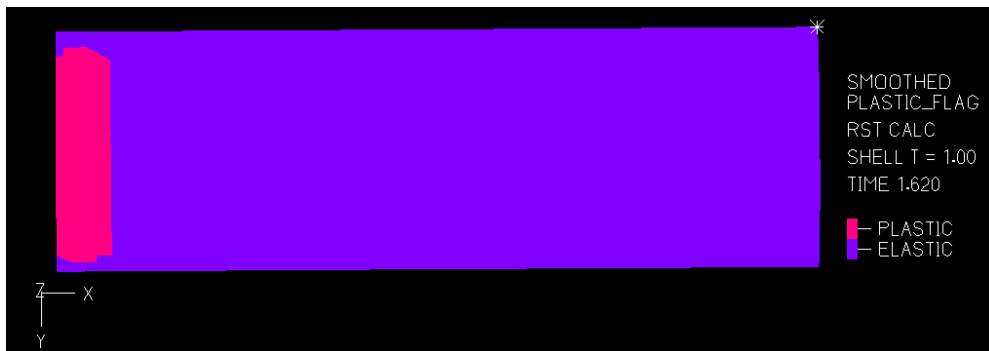
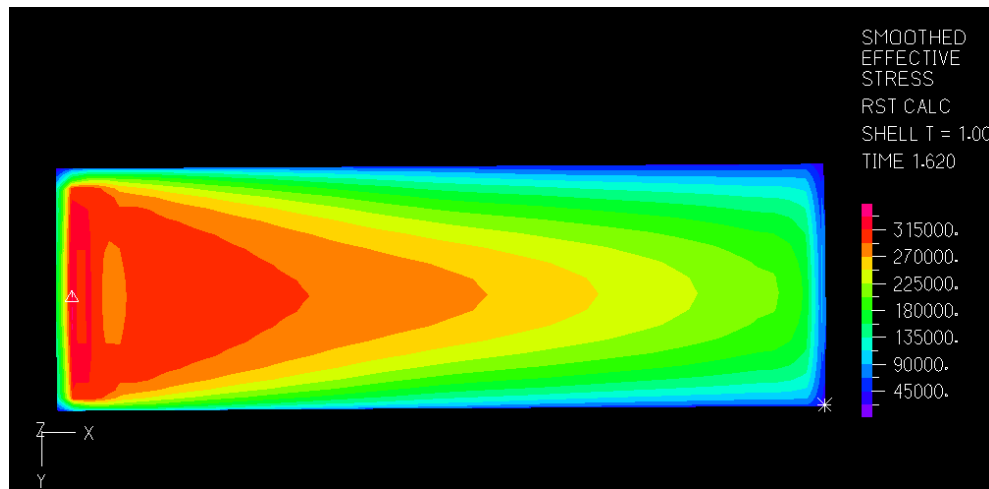


Σχήμα 4-27: Πυρήνας από κονίαμα. Σημείο A: Παραμόρφωση, τάση Mises, αριθμός ρωγμών, κατάσταση στοιχείων επαφής. Όψη XZ.

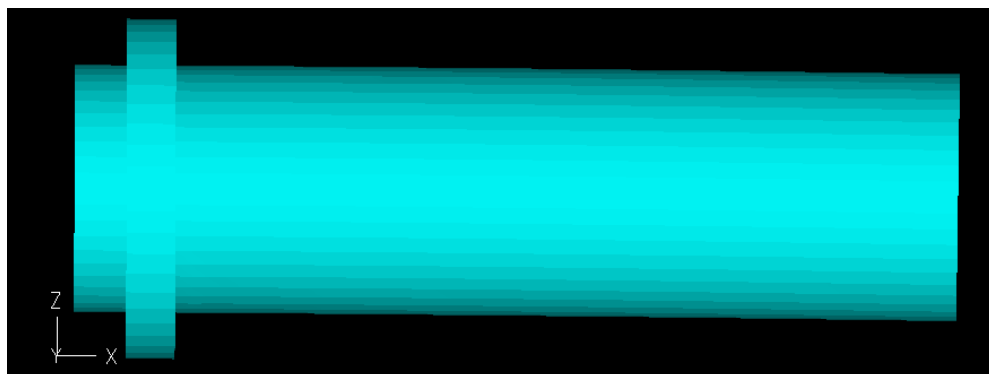


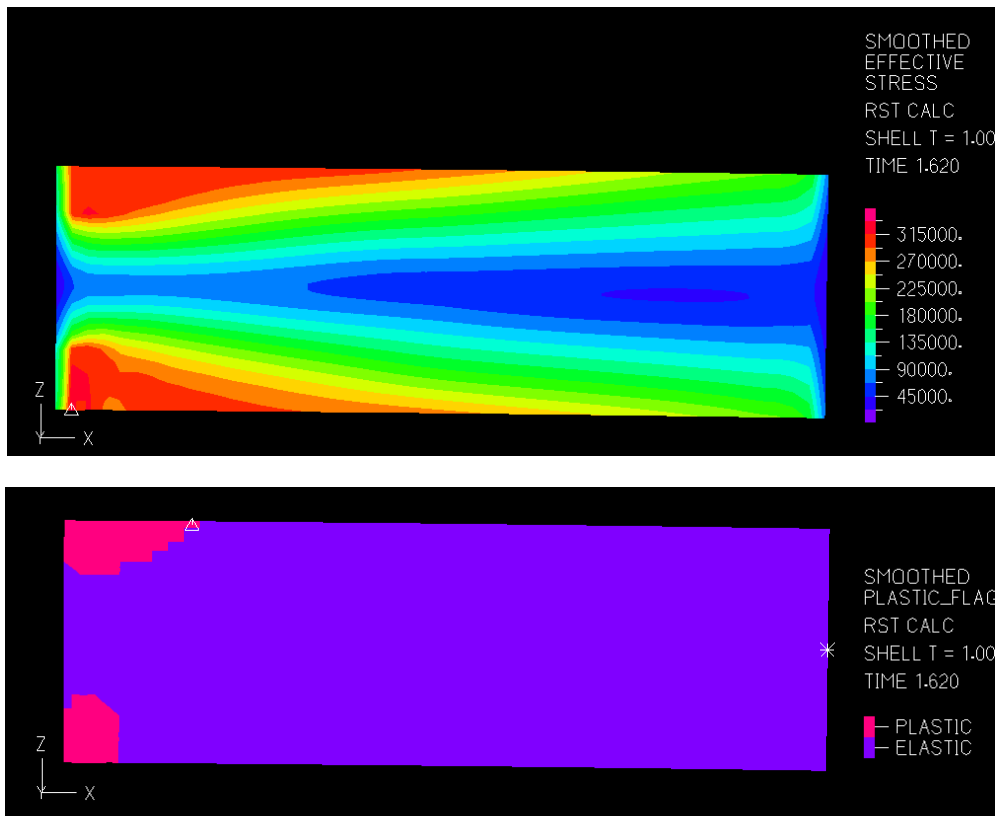


Σχήμα 4-28: Εσωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο Β: Παραμόρφωση, τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XY, άνω τμήμα.

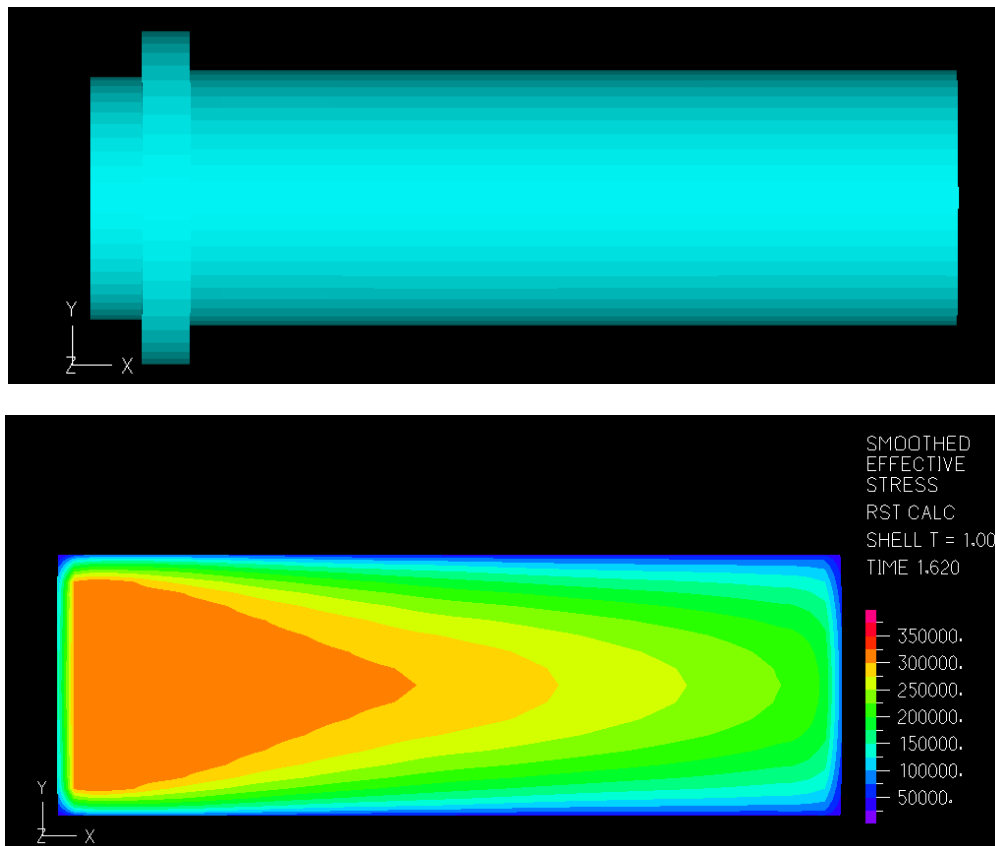


Σχήμα 4-29: Εσωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο Β: Τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XY, κάτω τμήμα.



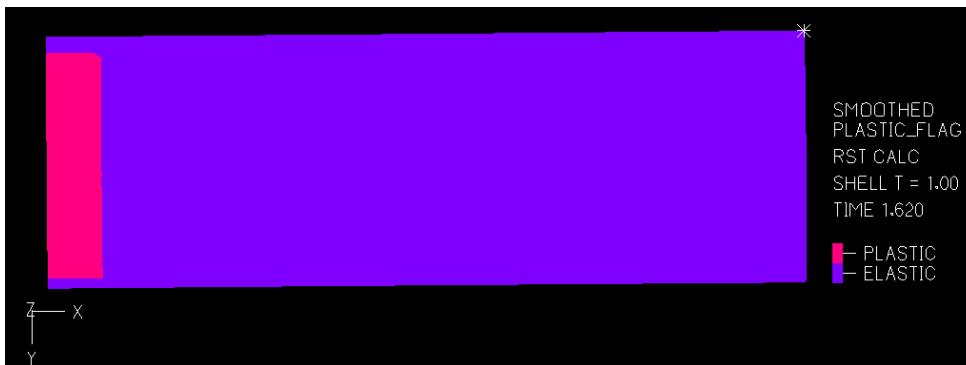
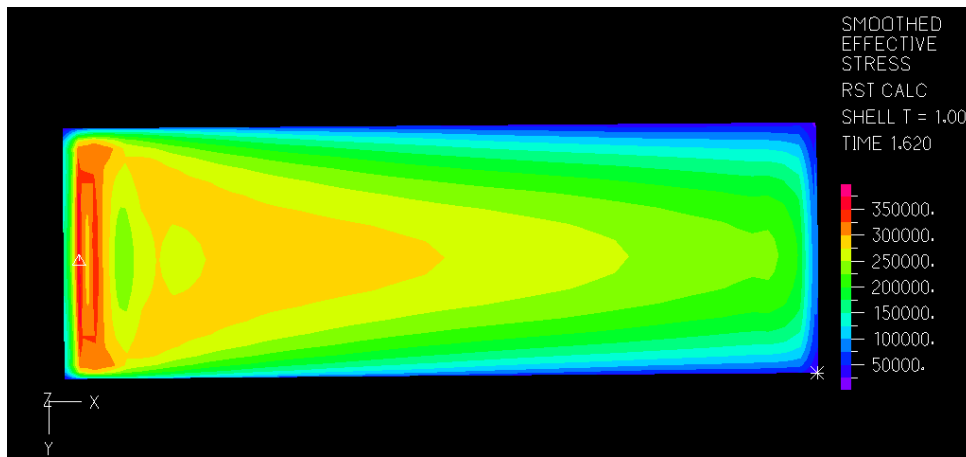


Σχήμα 4-30: Εσωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο Β: Παραμόρφωση, τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης, Όψη ΧΖ.

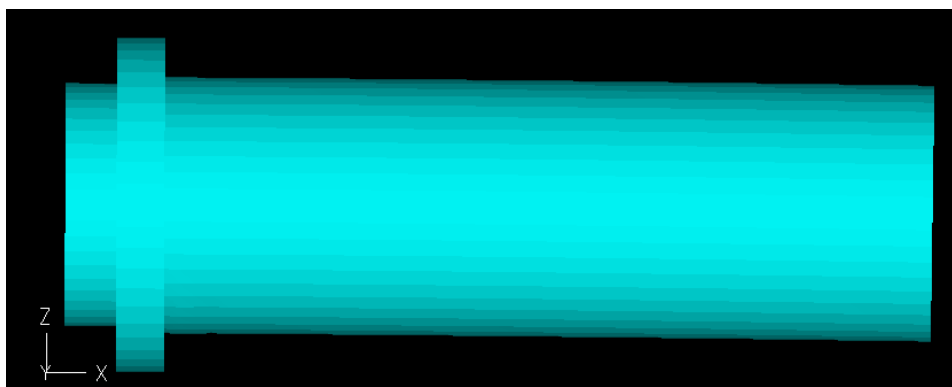


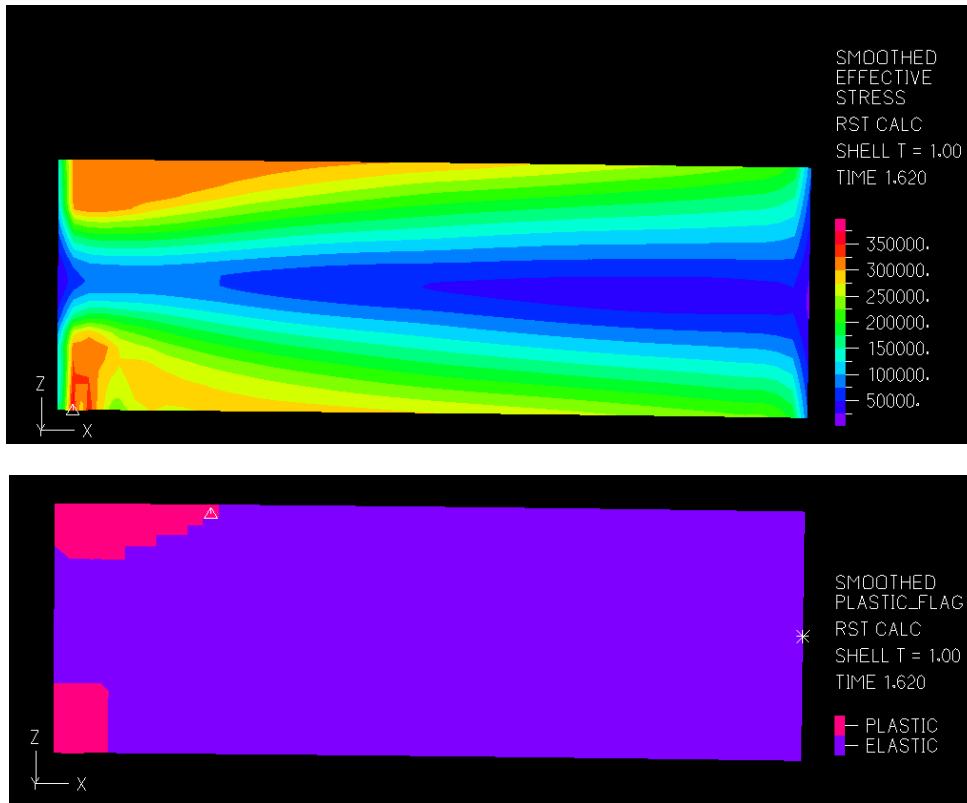


Σχήμα 4-31: Εξωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο Β: Παραμόρφωση, τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XY, άνω τμήμα.

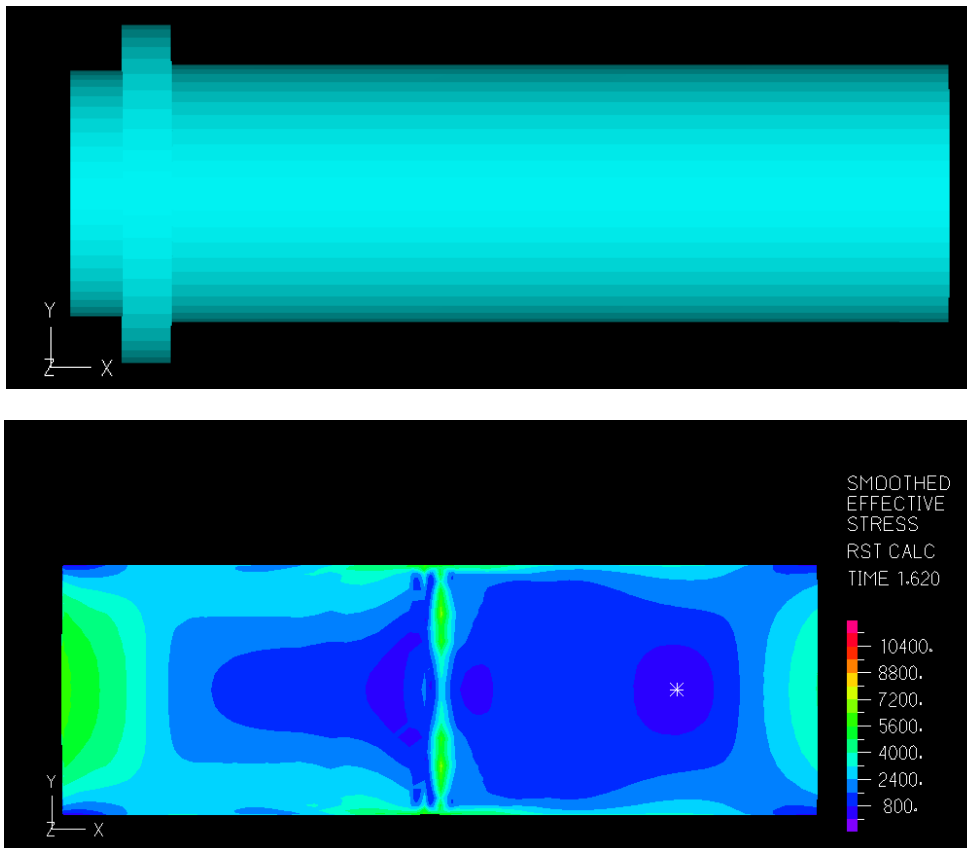


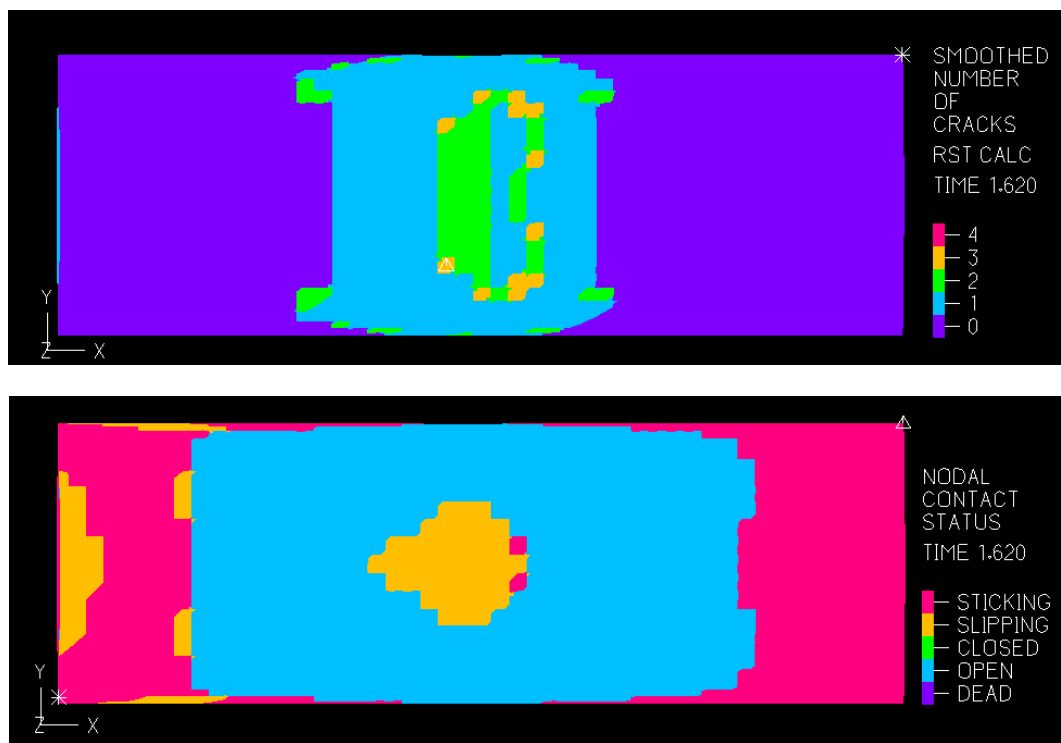
Σχήμα 4-32: Εσωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο Β: Τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XY, κάτω τμήμα.



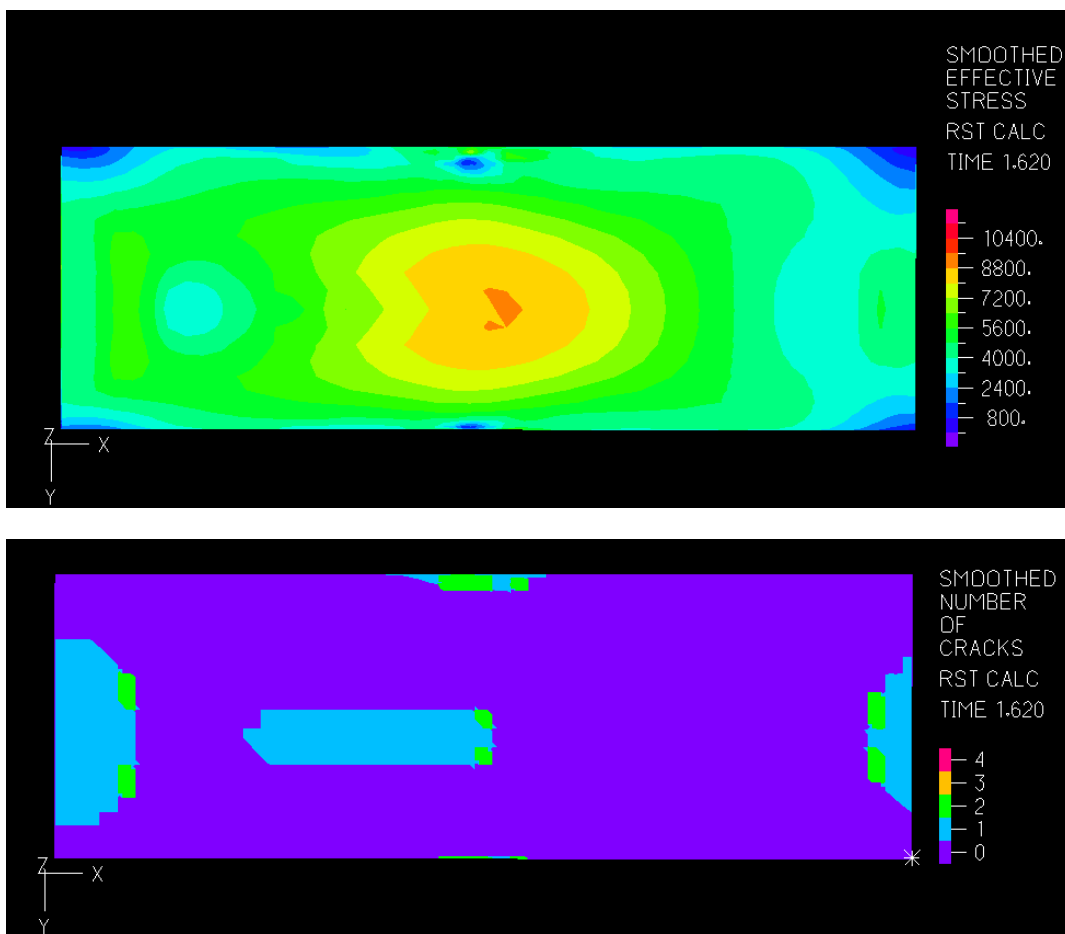


Σχήμα 4-33: Εξωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο Β: Παραμόρφωση, τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη ΧΖ.



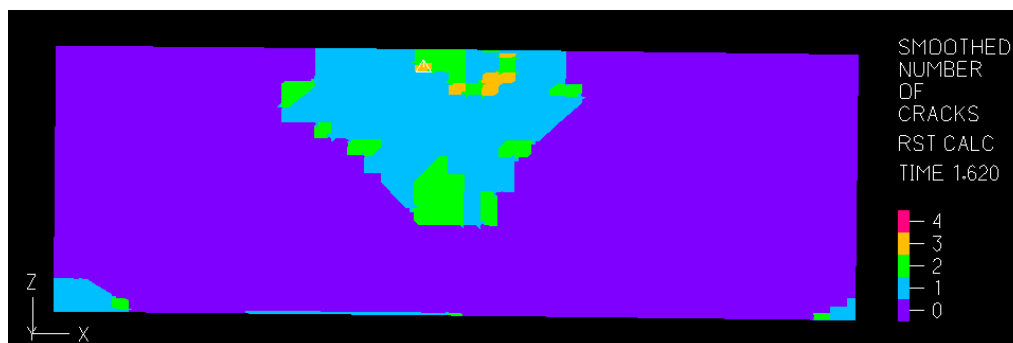
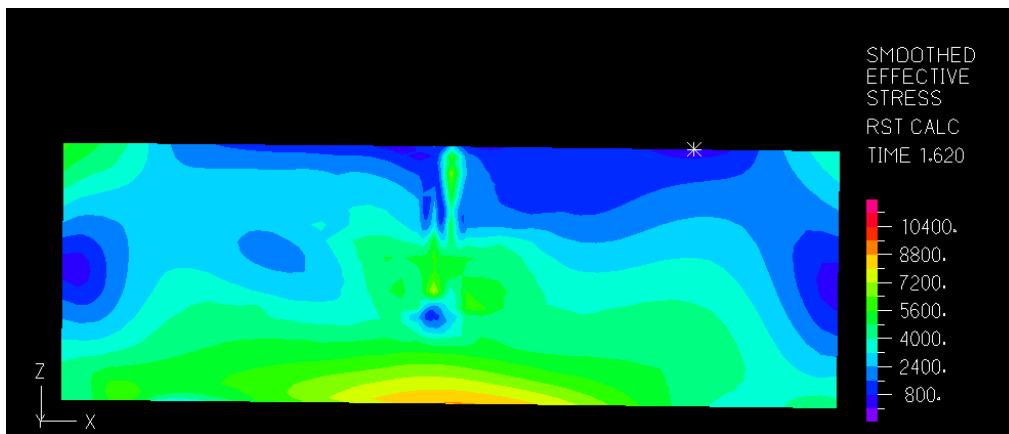
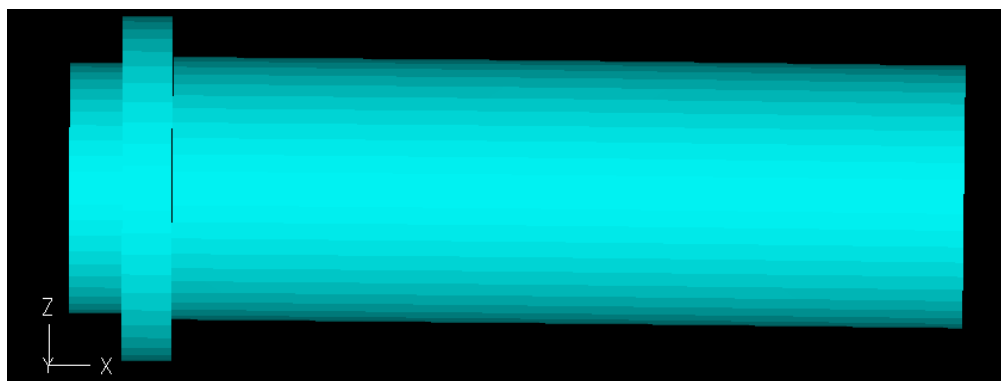


Σχήμα 4-34: Πυρήνας από κονίαμα. Σημείο Β: Παραμόρφωση, τάση Mises, αριθμός ρωγμών, κατάσταση στοιχείων επαφής. Όψη XY, άνω τμήμα.



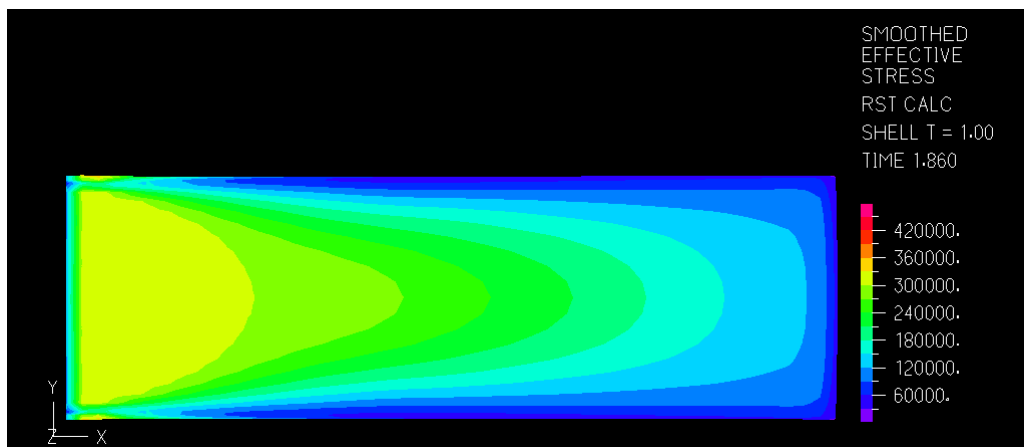
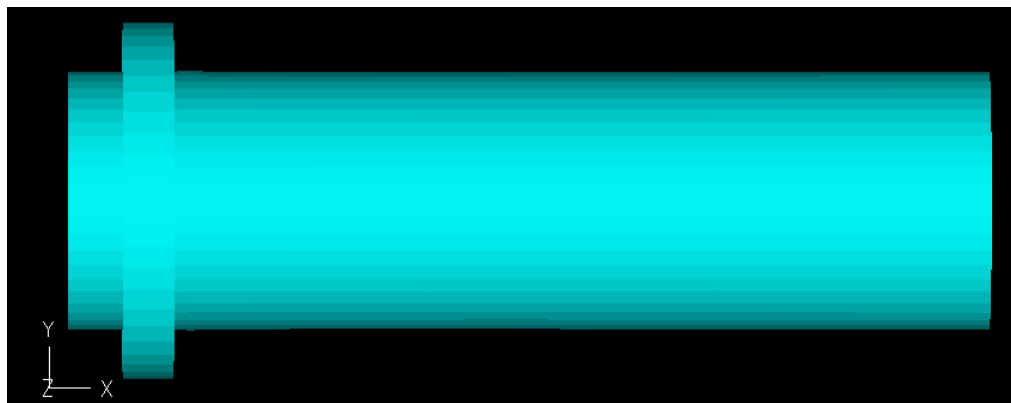


Σχήμα 4-35: Πυρήνας από κονίαμα. Σημείο Β: Τάση Mises, αριθμός ρωγμών, κατάσταση στοιχείων επαφής. Όψη XY, κάτω μέρος.

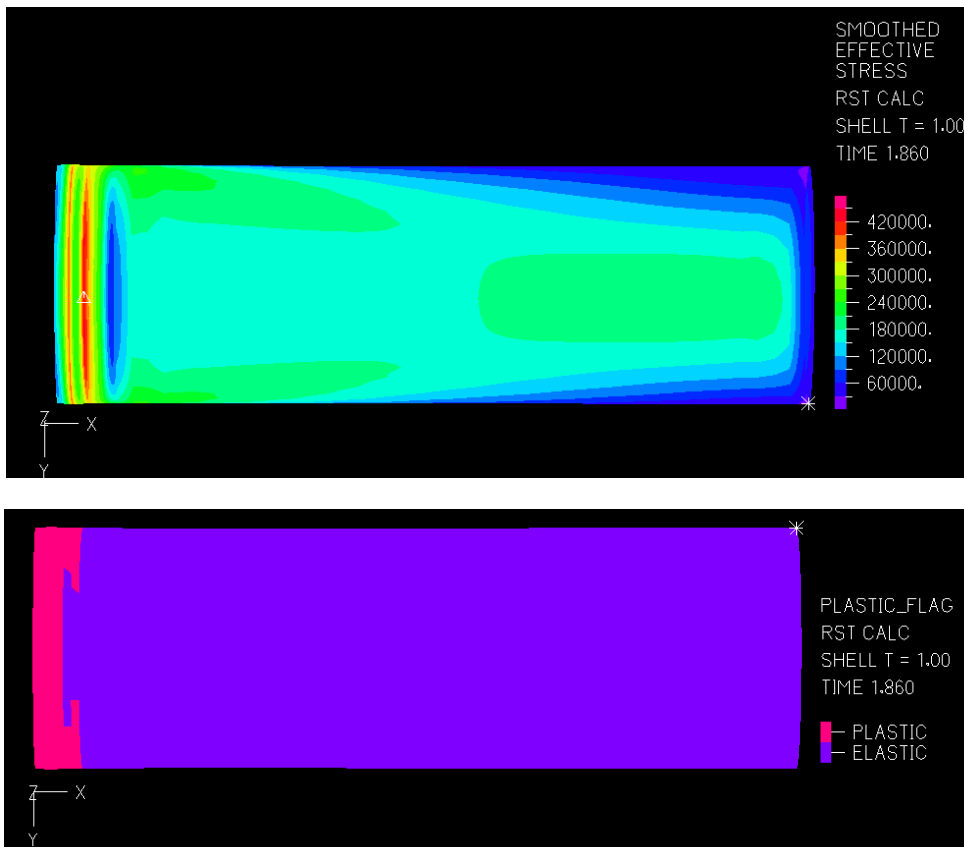




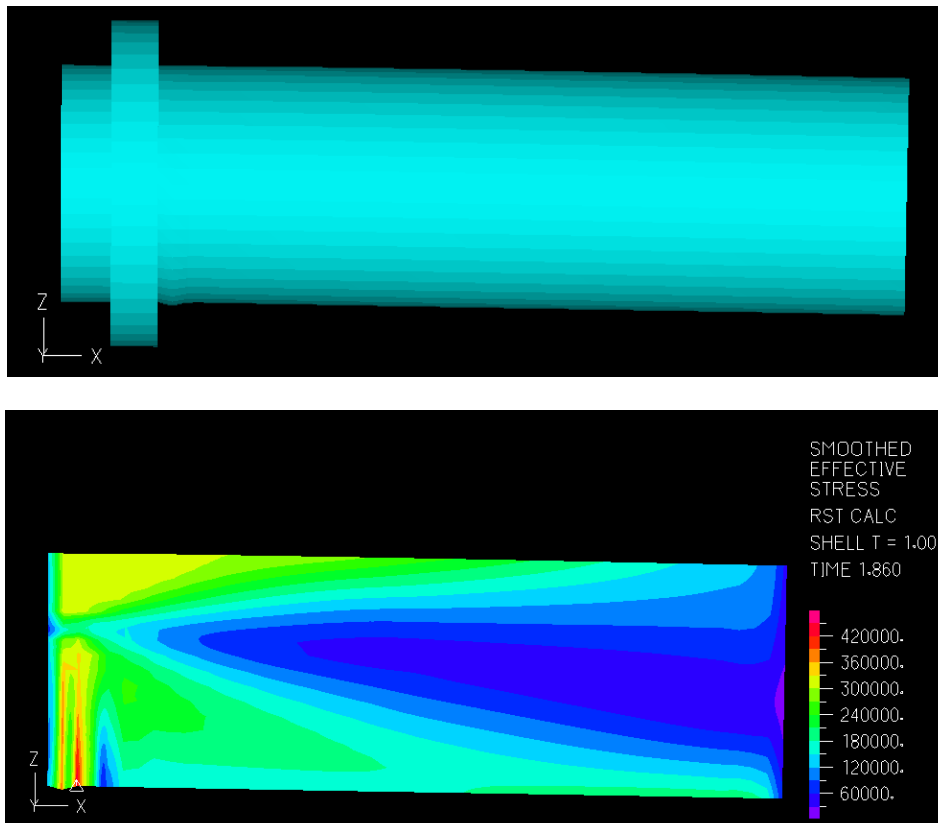
Σχήμα 4-36: Πυρήνας από κονίαμα. Σημείο Β: Παραμόρφωση, τάση Mises, αριθμός ρωγμών, κατάσταση στοιχείων επαφής. Όψη XZ.

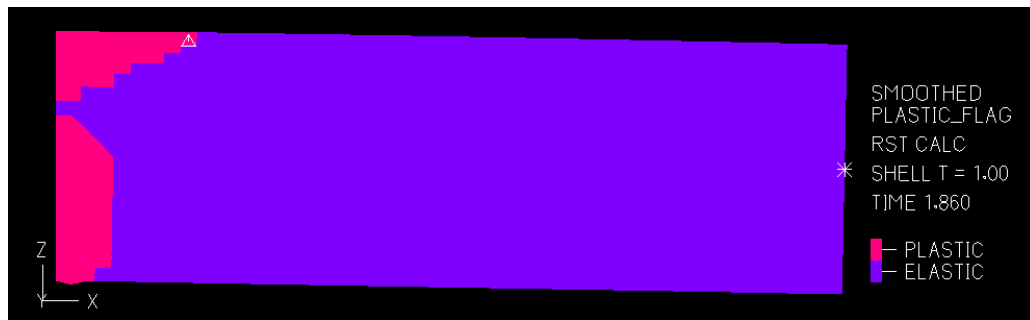


Σχήμα 4-37: Εσωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο C: Παραμόρφωση, τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XY, άνω τμήμα.

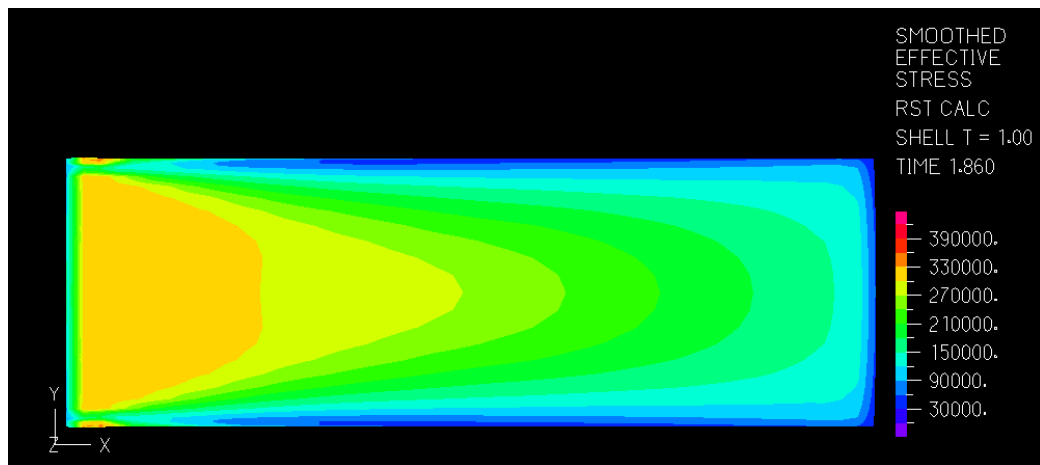
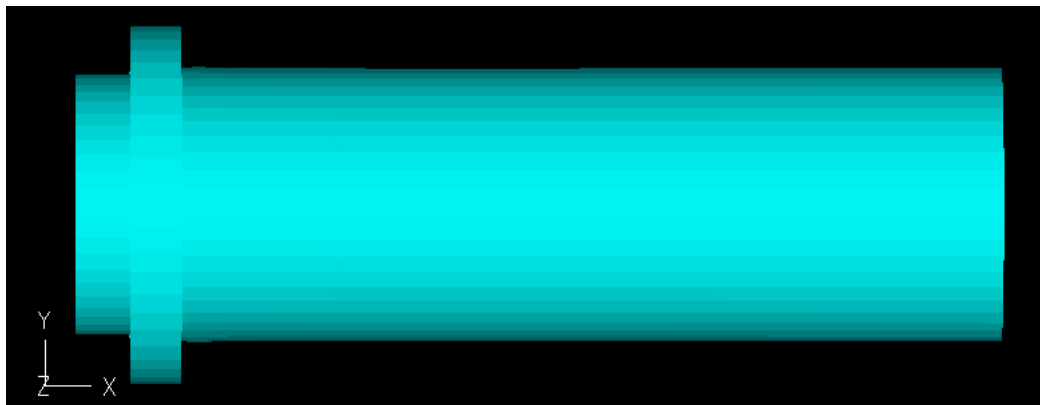


Σχήμα 4-38: Εσωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο C: Τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη ΧΥ, κάτω τμήμα.

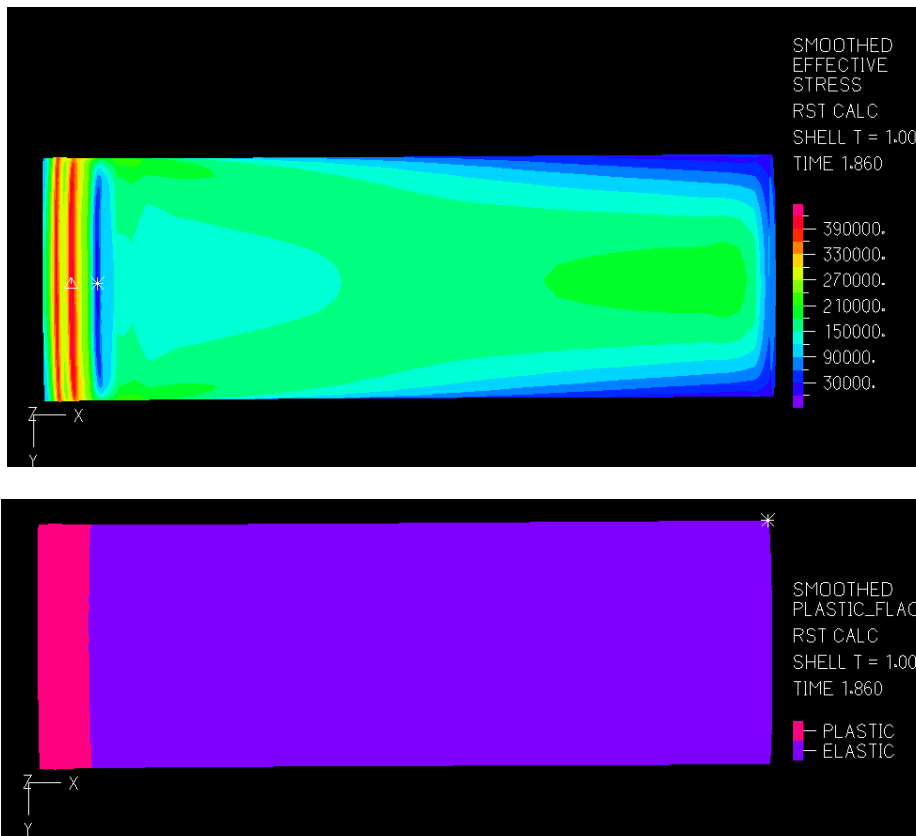




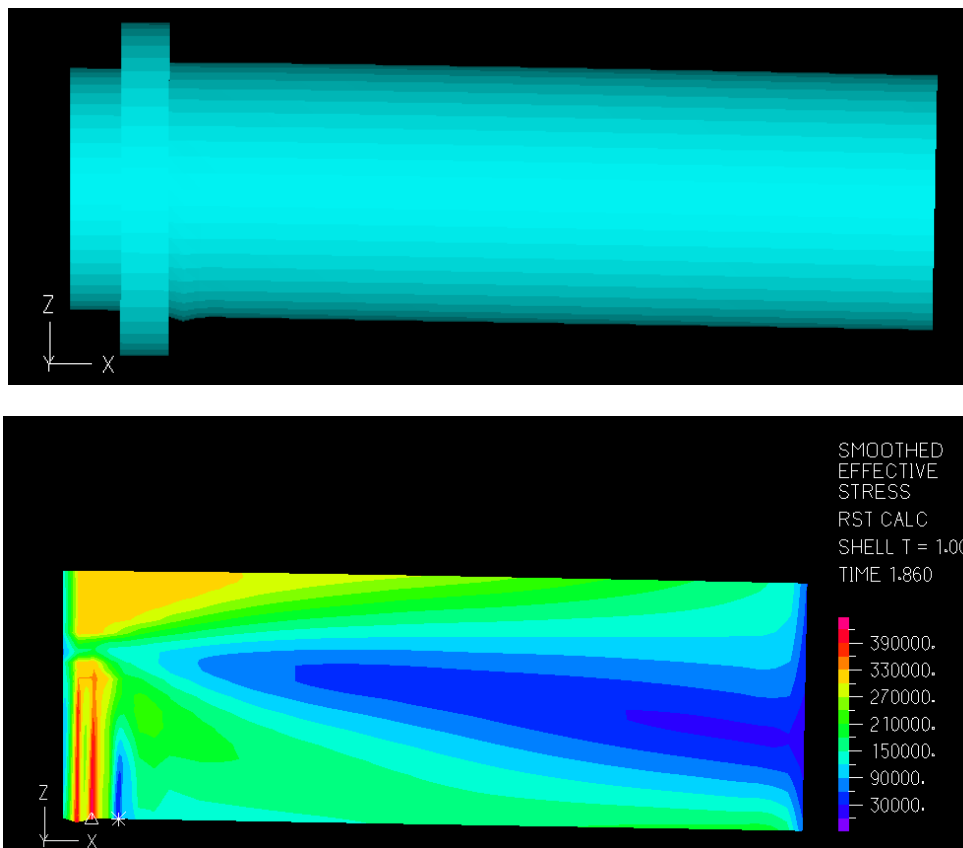
Σχήμα 4-39: Εσωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο C: Παραμόρφωση, τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XZ.

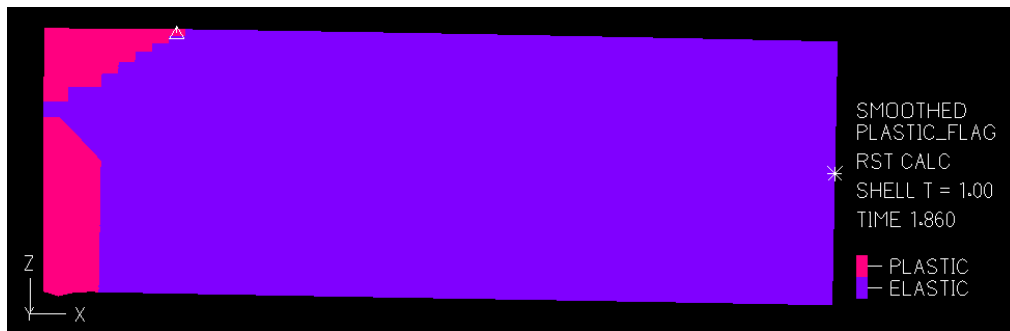


Σχήμα 4-40: Εξωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο C: Παραμόρφωση, τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XY, άνω τμήμα.

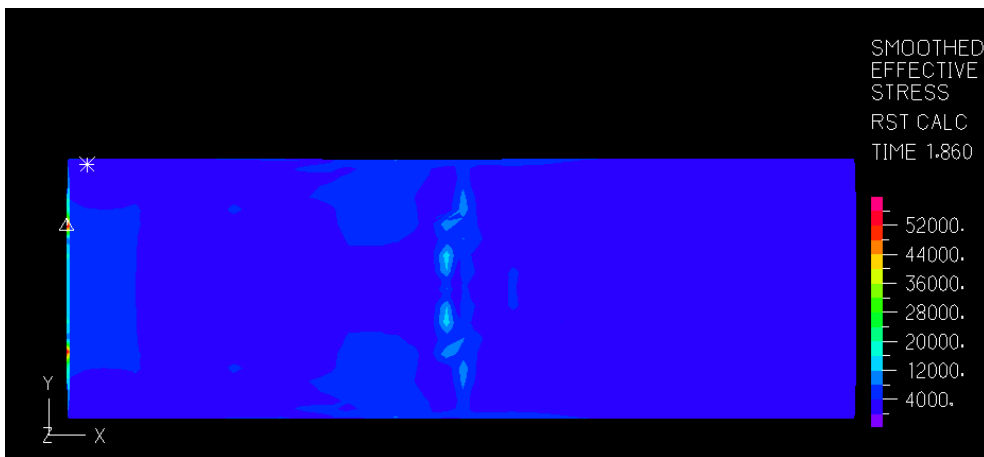
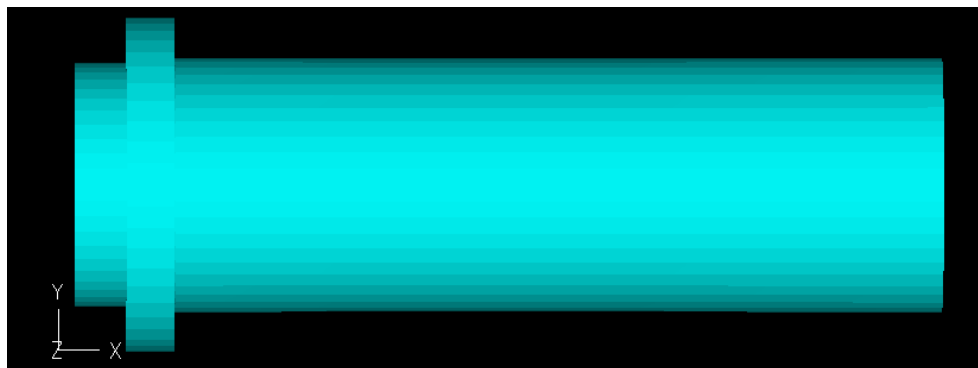


Σχήμα 4-41: Εξωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο C: Τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XY, κάτω τμήμα.



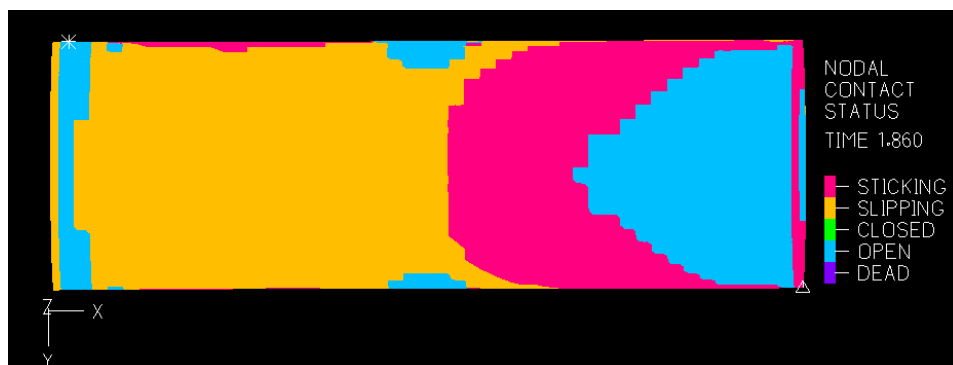
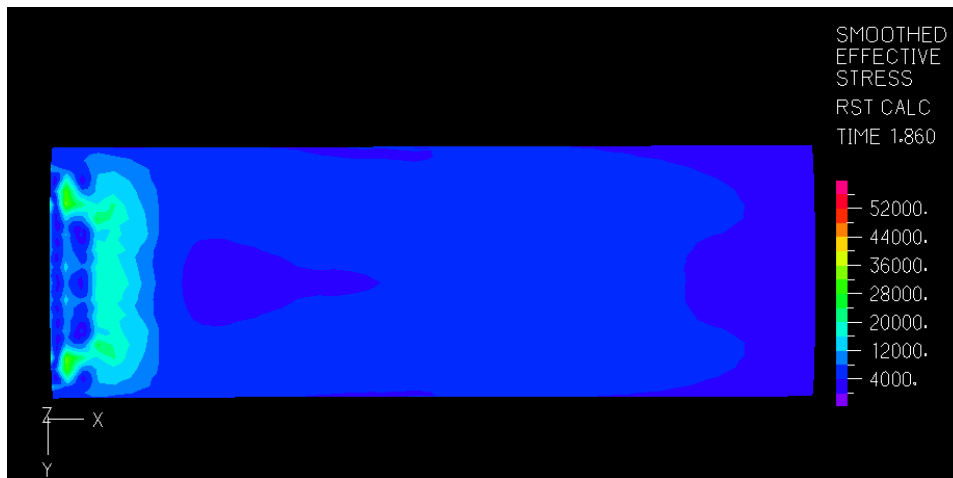


Σχήμα 4-42: Εξωτερικό χαλύβδινο έλασμα. Σημείο C: Παραμόρφωση, τάση Mises, μέγεθος πλαστικής παραμόρφωσης. Όψη XZ.

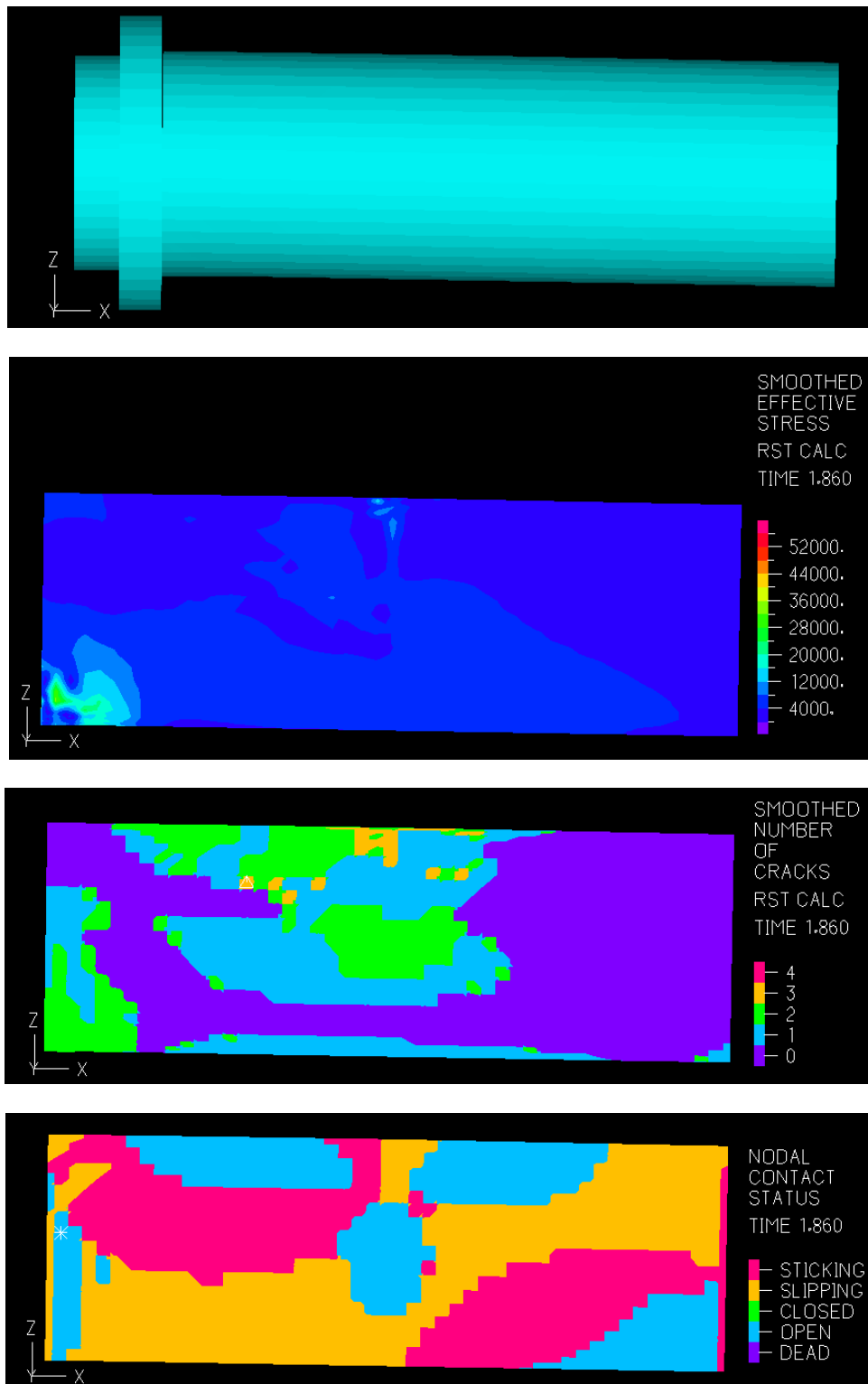




Σχήμα 4-43: Πυρήνας από κονίαμα. Σημείο C: Παραμόρφωση, τάση Mises, αριθμός ρωγμών, κατάσταση στοιχείων επαφής. Όψη XY, άνω τμήμα.



Σχήμα 4-44: Πυρήνας από κονίαμα. Σημείο C: Τάση Mises, αριθμός ρωγμών, κατάσταση στοιχείων επαφής. Όψη XY, κάτω τμήμα.



Σχήμα 4-45: Πυρήνας από κονίαμα. Σημείο C: Παραμόρφωση, τάση Mises, αριθμός ρωγμών, κατάσταση στοιχείων επαφής. Όψη XZ.

4.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε η προσπάθεια να προσομοιωθεί όσο το δυνατόν καλύτερα και με μεγαλύτερη προσέγγιση η πειραματική διάταξη και τα αποτελέσματα που αυτή έδωσε. Τα αποτελέσματα από τις δύο πειραματικές δοκιμές που αναφέρθηκαν στο 3^ο κεφάλαιο, πάρθηκαν ως δεδομένα και στόχοι για επίτευξη από το μοντέλο αριθμητικής ανάλυσης, το οποίο πραγματοποιήθηκε στο εμπορικό λογισμικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Adina. Προσομοιώθηκε κάθε μέλος που έπαιρνε μέρος στο συνολικό δοκίμιο μαζί με το υλικό από το οποίο ήταν φτιαγμένο και λαμβάνοντας υπόψη τις συνδέσεις μεταξύ των μελών αυτών (κοινοί κόμβοι, στοιχεία επαφής), την ανοχή της στήριξης στη μετωπική πλάκα σύνδεσης (στροφικό ελατήριο προσομοίωσης σχετικής στροφής ως προς το υποστύλωμα του πλαισίου διάταξης), καθώς και τον τρόπο φόρτισης από το έμβολο (επιβαλλόμενη κατακόρυφη μετατόπιση), στήθηκε ένα μοντέλο που να είναι αξιόπιστο και ικανό να καταδείξει τη συμπεριφορά των διατομών τύπου sandwich μέσα από τη διερεύνηση των αποτελεσμάτων που προσφέρει και της αλλαγής των παραμέτρων που επιδέχεται. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το προσομοίωμα αυτό ήταν αρκετά ικανοποιητικά. Οι αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας που συντάχθηκαν για κάθε διαφορετική θέση που υπήρχε μετρητής μετακινήσεων LVDT, σχεδόν ταυτίστηκαν με τους αντίστοιχους δρόμους ισορροπίας που προέκυψαν από το πρώτο και περισσότερο αξιόπιστο από το δεύτερο πείραμα. Η αναξιοπιστία του δεύτερου πειράματος όπως έχει ήδη τονιστεί προέρχεται από μια αρχική σχετική μετακίνηση μεταξύ των δακτυλίων που συνδέων το δοκίμιο διατομής τύπου sandwich και το αμιγώς χαλύβδινο της επέκτασης. Επίσης, οι εξελίξεις των παραμορφώσεων μέσα από τις θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν τα strain gauges στα πειράματα, απέδωσαν πολύ καλή σύγκλιση της αριθμητικής ανάλυσης με τα αντίστοιχα διαγράμματα των πειραμάτων, περισσότερο ποιοτικά, αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις και ποσοτικά, το οποίο είναι εξαιρετικά δύσκολο να συμβεί, λαμβάνοντας υπόψη ότι το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού εμφανίστηκε σε διαφορετική θέση από ότι στα πειράματα, αφού η ακριβής θέση εμφάνισής του είναι σχεδόν πάντα αβέβαιη. Οι σχηματικές απεικονίσεις της παραμόρφωσης, της τάσης Mises, της εξέλιξης της διαρροής, της ανάπτυξης ρωγμών και της κατάστασης των στοιχείων επαφής σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές στην εξέλιξη της επιβολής της φόρτισης (κατά την εμφάνιση της πρώτης διαρροής, κοντά στο οριακό φορτίο και λίγο μετά την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού), έδωσαν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά των μελών που απαρτίζουν τη διατομή τύπου sandwich καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Η αστοχία προήλθε όπως ήταν αναμενόμενο από την εμφάνιση του φαινομένου του τοπικού λυγισμού στη θλιβόμενη παρειά της βάσης, ενώ πρώτα είχε εκδηλωθεί η μη γραμμικότητα του υλικού από τη διαρροή των χαλύβδινων ελασμάτων και άρα η κρίσιμότητα των δύο μη γραμμικότητων ήταν ισοδύναμη. Η μη χρήση γραμμικών ατελειών δε στοίχισε στη συνολική συμπεριφορά του φορέα, αφού η εκδήλωση της αστοχίας πραγματοποιήθηκε, αφού η κάμψη ως φόρτιση προσανατολίζει εξ' αρχής τον προσανατολισμό της αστοχίας ενός φορέα. Μάλιστα το οριακό φορτίο είχε πολύ κοντινή τιμή με αυτές των πειραμάτων. Τελικά το προσομοίωμα αριθμητικής ανάλυσης κρίνεται ικανό να βοηθήσει στην αξιολόγηση αυτής της εναλλακτικής λύσης για κατασκευή πυλώνων ανεμογεννητριών.

4.5 Βιβλιογραφία

[4-1] Dimopoulos C.A. & Gantes C.J., "Experimental investigation of buckling of wind turbine tower cylindrical shells with opening and stiffening under bending", *Thin-Walled Structures*, Vol. 54, pp. 140–155, 2012.

[4-2] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, "Falsework - Calculation, design and construction DIN 4421 1982", *Beuth Veriag GmbH, Berlin 30*, pp. 20, August 1982.

[4-3] M. Ikenaga, et. al, "FRICTION COEFFICIENT FOR EXPOSED COLUMN BASE DESIGN", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, 2008, Beijing, China.

[4-4] Jason McCormick, et al., "Investigation of the sliding behavior between steel and mortar for seismic applications in structures", *Published online 5 March 2009 in Wiley InterScience*.

5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

5.1 Στόχος παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σειρά από παραμετρικές αναλύσεις του αριθμητικού προσομοιώματος, δηλαδή έχοντας ως δεδομένο το μοντέλο αριθμητικής ανάλυσης που προέκυψε στο 4^ο κεφάλαιο, θα γίνει αλλαγή κάποιων από τις βασικές παραμέτρους του που επηρεάζουν άμεσα τη γεωμετρία της διατομής τύπου sandwich και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από αυτές τις αναλύσεις. Ύστερα τα αποτελέσματα αυτά θα παρατηρηθούν και θα σχολιαστούν με στόχο να αναπτυχθούν κάποια βασικά συμπεράσματα για τη λειτουργία της διατομής τύπου sandwich.

Στόχος των παραμετρικών αναλύσεων είναι να αποκρυπτογραφηθεί η συμπεριφορά της διατομής τύπου sandwich και να ερμηνευθεί το κατά πόσο η εισαγωγή του πυρήνα κονιάματος (ή σκυροδέματος) εντός του όγκου που ορίζουν τα δύο περιμετρικά ελάσματα χάλυβα, βοηθά στη βελτίωση της στατικής συμπεριφοράς του φορέα. Βεβαίως, αυτή η βελτίωση της στατικής συμπεριφοράς θα πρέπει να κριθεί αν είναι σε τέτοιο βαθμό ώστε να έχει νόημα να γίνει η κατασκευή του, που σαφώς είναι δυσχερέστερη και λιγότερο διαδεδομένη από αυτή των αμιγώς χαλύβδινων διατομών πυλώνων ανεμογεννητριών. Αν προκύψει ότι η κατασκευή πυλώνων ανεμογεννητριών έχει νόημα με διατομές τύπου sandwich, τότε θα δοκιμασθεί να οριστεί και μια όσο το δυνατόν βέλτιστη διατομή με κατάλληλα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Βέβαια κάτι τέτοιο προκύπτει κυρίως από οικονομικούς λόγους, οι οποίοι δεν μελετούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία, λόγω περιορισμένου χρόνου εκπόνησής της και διαφορετικού αντικειμένου και σκοπιάς αντιμετώπισης. Ωστόσο, μια στατική ματιά θα βοηθήσει στην περαιτέρω ενασχόληση με τον καθορισμό της βέλτιστης διατομής από επόμενες έρευνες σχετικά με το αντικείμενο αυτό.

5.2 Καθορισμός νέων παραμέτρων

Οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στο αρχικό προσομοίωμα του πειράματος του 4^{ου} κεφαλαίου αφορούσαν στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στις μηχανικές ιδιότητες των μελών που απαρτίζουν τη διατομή τύπου sandwich (χαλύβδινα ελάσματα και πυρήνας κονιάματος), καθώς και στις συνθήκες φόρτισης. Πέρα από τις μεμονωμένες αλλαγές αυτών των χαρακτηριστικών του μοντέλου έγινε και συνδυασμός κάποιων από τις αλλαγές, που κρίθηκε πιο ενδιαφέρον και σκόπιμο να μελετηθούν, σύμφωνα με την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το κατά πόσο παίζει σημαντικό ρόλο ο πυρήνας

κονιάματος στην αύξηση της οριακής αντοχής και το κατά πόσο οι συγκεκριμένες συνθήκες αντιπροσωπεύουν ένα κομμάτι της πραγματικότητας.

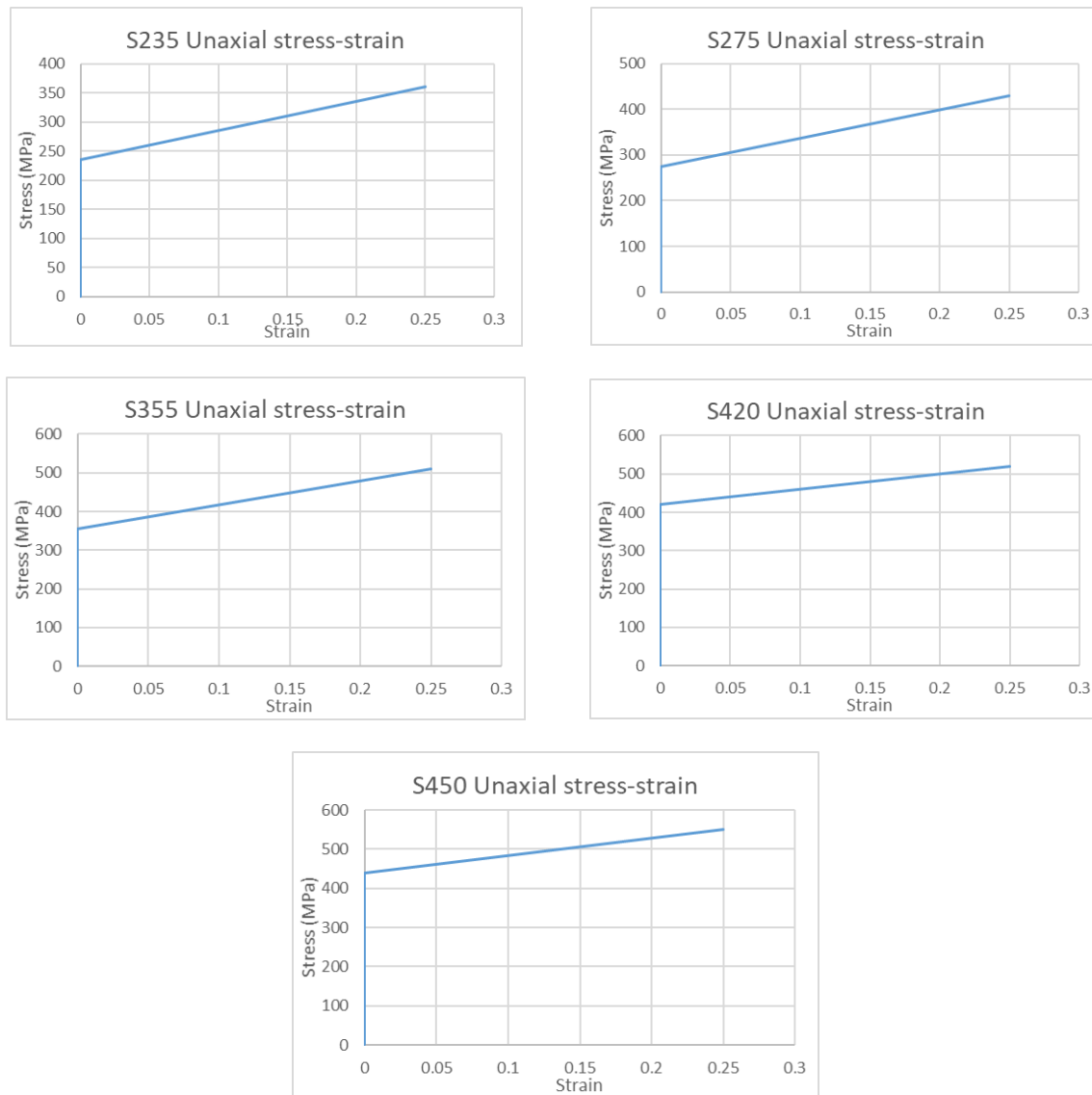
Σαφώς η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του εκάστοτε προσομοιώματος ήταν ίδια με αυτή που παρουσιάζεται στο 4^ο κεφάλαιο. Για αυτό το λόγο δε θα αναλυθεί περαιτέρω ο τρόπος με τον οποίο συντάχθηκαν τα νέα μοντέλα, αλλά θα γίνεται αναφορά μονάχα στον τρόπο με τον οποίο άλλαξαν οι βασικές τους παράμετροι. Σημειώνεται ότι για να είναι συγκρίσιμα τα μεγέθη που προέκυψαν από κάθε ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα προσομοιώματα συνθήκες στήριξης πάκτωσης, δηλαδή δέσμευσης όλων των βαθμών ελευθερίας, στη μετωπική πλάκα σύνδεσης. Άλλωστε, το γραμμικό στροφικό ελατήριο που χρησιμοποιήθηκε στο 4^ο κεφάλαιο αφορούσε μονάχα το συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων, αφού η στροφική δυσκαμψία του υπολογίστηκε από τις πειραματικές μετρήσεις.

Ο πρώτος γεωμετρικός παράγοντας που διαφοροποιήθηκε ήταν το πάχος των χαλύβδινων ελασμάτων (t_s). Επειδή αλλάζοντας το πάχος του κάθε ελάσματος αλλάζει και η μέση γραμμή του στη γεωμετρία του μοντέλου, έπρεπε να δημιουργηθούν διαφορετικές γεωμετρίες για κάθε πάχος που επιλέχθηκε να προσομοιωθεί. Στην ίδια λογική με τη γεωμετρική απεικόνιση του 4^{ου} κεφαλαίου, έπρεπε να παραποιηθούν λίγο και οι γεωμετρίες των υπόλοιπων μελών ώστε να δημιουργούνται στοιχεία με κοινούς κόμβους για άμεση σύνδεση. Πιο συγκεκριμένα, ο χωρισμός των δακτυλίων έγινε επίσης σε 3 τμήματα, μονάχα πως άλλαξε κάθε φορά το ενδιάμεσο τμήμα ώστε να έχει εσωτερική και εξωτερική ακτίνα ίσες με τις νέες των χαλύβδινων ελασμάτων. Το γεγονός αυτό παρέσυρε και στην ελάχιστη αυξομείωση της ακτίνας του κελύφους βάσης και του κελύφους επέκτασης, χωρίς να επηρεάζει τις δυσκαμψίες και τα συνολικά αποτελέσματα, με στόχο και πάλι τη δημιουργία γεωμετρίας με κοινές γραμμές που θα οδηγούσαν σε άμεσες συνδέσεις με κοινούς κόμβους. Έπειτα, άλλαξε το πάχος του στοιχείου στην κατηγοριοποίησή του (element group), προτού γίνει η δημιουργία των πεπερασμένων στοιχείων επί του συνολικού μοντέλου (meshing). Επιλέχθηκαν 5 διαφορετικά πάχη ελασμάτων για να προσομοιασθούν. Το κάθε χαλύβδινο έλασμα άλλαξε τα εξής πάχη: 1mm, 2mm, 4mm, 6mm και 8mm.

Στη συνέχεια επιλέχθηκε να διαφοροποιηθεί το γεωμετρικό χαρακτηριστικό του πάχους του πυρήνα κονιάματος (t_m). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στην αλλαγή του πάχους των χαλύβδινων ελασμάτων, έτσι και σε αυτήν την περίπτωση η γεωμετρία για κάθε παραμετρική ανάλυση έπρεπε να δημιουργηθεί από την αρχή. Το πάχος του πυρήνα αυξήθηκε ισόποσα τόσο εξωτερικά όσο και εσωτερικά, διατηρώντας σταθερή τη μέση γραμμή του. Έτσι, χρειάστηκε να μετακινηθούν και οι μέσες γραμμές των ελασμάτων εξωτερικά και εσωτερικά ώστε να απέχουν από το κονίαμα απόσταση ίση με το μισό πάχος τους, όπως αναφέρθηκε και στο 4^ο κεφάλαιο. Βέβαια, αλλάζοντας τη θέση των μέσων γεωμετρικών γραμμών των ελασμάτων χρειάστηκε να γίνουν οι αντίστοιχες διαφοροποιήσεις στους δακτυλίους, στο κέλυφος βάσης και στο κέλυφος επέκτασης, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο. Η υπόλοιπη διαδικασία ήταν ίδια με αυτή του 4^{ου} κεφαλαίου. Επιλέχθηκαν 10 διαφορετικά πάχη πυρήνα από κονίαμα. Η αύξηση του οριακού φορτίου από την αύξηση αυτής της παραμέτρου αποδείχτηκε, όπως αναπτύσσεται στη συνέχεια, ότι ήταν ελάχιστη, αλλά με λίγο μεγαλύτερο ρυθμό μεταξύ των παχών 14mm και 16mm. Για αυτό και έγιναν τόσες διαφορετικές παραμετρικές αναλύσεις για να φανεί κατά πόσο αυτός ο ρυθμός αύξησης αλλάζει ή παραμένει ο ίδιος. Τα πάχη που χρησιμοποιήθηκαν για την παραμετροποίηση του πάχους του πυρήνα κονιάματος ήταν: 4mm, 6mm, 8mm, 10mm, 12mm, 14mm, 16mm, 18mm, 20mm και 22mm.

Πέρα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, έγινε παραμετροποίηση και για της μηχανικές ιδιότητες των υλικών που συνθέτουν τη διατομή τύπου sandwich. Αρχικά, επιλέχθηκε να αλλάξει η ποιότητα του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε για τα ελάσματα. Οι διάφορες ποιότητες που χρησιμοποιήθηκαν εκλέχθηκαν από τον Ευρωκώδικα 1993-1-1. Δημιουργήθηκαν έτσι 5 διγραμμικά υλικά με κράτυνση και όλα με ίδιο μέτρο ελαστικότητας και ίσο με 210GPa, με μία λογική τιμή παραμόρφωσης στο οριακό φορτίο γύρω στο 25%. Σε αυτήν την περίπτωση δεν άλλαξε, προφανώς, καθόλου το προσομοίωμα

γεωμετρικά, παρά μόνο ορίστηκε σε κάθε διαφορετική παραμετρική ανάλυση, νέο υλικό για τις κατηγορίες των χαλύβδινων ελασμάτων. Οι ποιότητες χάλυβα που ορίστηκαν ήταν οι εξής: S235, S275, S355, S420 και S450, τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης των οποίων παρουσιάζονται συνοπτικά κατά σειρά ποιότητας παρακάτω (Σχήμα 5-1).



Σχήμα 5-1: Καμπύλες μονοαξονικής τάσης-παραμόρφωσης των διαφόρων ποιτήτων χάλυβα των παραμετρικών αναλύσεων

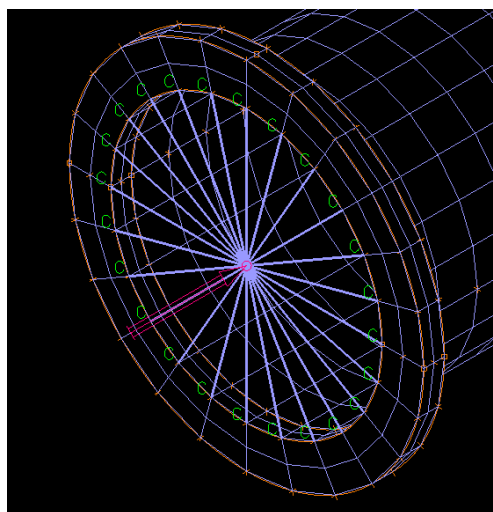
Με την ίδια λογική έγινε διαφοροποίηση και στην ποιότητα του κονιάματος ως υλικού του πυρήνα. Όπως και στην παραμετροποίηση με την ποιότητα του χάλυβα, έτσι και με το κονίαμα, απλώς άλλαξε το υλικό της κατηγορίας του κονιάματος, χωρίς περαιτέρω αλλαγές στο προσομοίωμα. Λόγω της αβεβαιότητας που υπάρχει σε αυτό το υλικό, ιδίως στον προσδιορισμό με ακρίβεια των παραμορφώσεων σε χαρακτηριστικές τιμές τάσεων, η αλλαγή περιορίστηκε στην αυξομείωση της αντοχής του σε θλίψη και αφήνοντας ίδια την εφελκυστική του αντοχή, η οποία στην πραγματικότητα λόγω της μικρής τιμής της, δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο στη συνεργασία των δύο υλικών υπό τη διατομή τύπου sandwich. Επιλέχθηκαν 5 διαφορετικές ποιότητες κονιάματος, οι οποίες ήταν οι εξής: M15, M25, M35, M45 και M55, όπου το M συμβολίζει το κονίαμα (mortar) και ο αριθμός την οριακή αντοχή σε θλίψη σε MPa. Δεν παρατίθενται

σχετικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης, αφού όλων η μορφή ήταν ίδια με Σχήμα 4-3 με τη μόνη διαφορά να έγκειται στην οριακή θλιπτική αντοχή.

Πέρα από τις αλλαγές στα γεωμετρικά και στα μηχανικά χαρακτηριστικά, έγινε και αλλαγή στον τρόπο φόρτισης του δοκιμίου, ώστε να ανταποκρίνεται καλύτερα σε πραγματικές συνθήκες. Κατ' αρχήν το ίδιο βάρος ασκήθηκε αξονικά στο δοκίμιο, αλλάζοντας μονάχα τον προσανατολισμό της ήδη ορισμένης φόρτισης του ίδιου βάρους στο 4^ο κεφάλαιο. Προσθέτως, ασκήθηκε αξονική δύναμη στο άκρο του δοκιμίου με στόχο να προσομοιάσει το αξονικό φορτίο που δέχεται στην κορυφή του ο πυλώνας ανεμογεννήτριας από την άτρακτο και το ρότορα.

Από χρονοϊστορίες οι οποίες περιλάμβαναν ανεμοπιέσεις και αξονικά φορτία που ασκούνται στην κορυφή μιας τυπικής ανεμογεννήτριας, και οι οποίες συντάχθηκαν από ερευνητική ομάδα του Ε.Μ.Π. της σχολής Πολιτικών Μηχανικών, προέκυψε ότι για ένα αξονικό φορτίο περίπου 800kN, η κύρια τέμνουσα δύναμη (λόγω του ανέμου κυρίως) που ασκούταν στην κορυφή ήταν της ίδιας τάξης μεγέθους και έφτανε μέχρι και 550kN για πολύ δυνατούς ανέμους σχεδιασμού. Δεδομένου ότι πειραματικό δοκίμιο έφτασε σε οριακό φορτίο κοντά στα 70kN, και ότι σε πραγματικές συνθήκες θα ήταν επιθυμητό να δέχεται τέμνουσα δύναμη το πολύ γύρω στα 50kN, μια προσεγγιστική κλίμακα 1:10 για το αξονικό φορτίο κρίθηκε επαρκής, αφού και η τέμνουσα δύναμη ήταν στην ίδια κλίμακα. Έτσι, ασκήθηκε μια αξονική δύναμη μεγέθους 80kN στο άκρο του δοκιμίου.

Η δύναμη αυτή ασκήθηκε στο κέντρο του δακτυλίου, στο οποίο είχαν ενωθεί με άκαμπτα στοιχεία (rigid links) τα σημεία του κύκλου της εσωτερικής διαμέτρου του (Εικόνα 5-1). Για να γίνει η ανάλυση και με τις τρεις φορτίσεις (αξονικό ίδιο βάρος, αξονική δύναμη, επιβαλλόμενη τέμνουσα μετατόπιση) δημιουργήθηκαν 3 time functions. Το πρώτο αφορούσε το αξονικό ίδιο βάρος και είχε τιμές 1, 1, 1 και 1 για χρονικές στιγμές 0, 1, 2 και 3 αντίστοιχα, το δεύτερο αφορούσε την αξονική δύναμη και είχε τιμές 0, 0, 1 και 1 για χρονικές στιγμές 0, 1, 2 και 3 και το τρίτο αφορούσε την τέμνουσα επιβαλλόμενη μετατόπιση και είχε τιμές 0, 0, 0 και 1 για χρονικές στιγμές 0, 1, 2 και 3 αντίστοιχα. Έτσι, το αξονικό ίδιο βάρος ασκούταν ακαριαία και παρέμενε σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης, η αξονική δύναμη ασκούταν τμηματικά μετά τη σταθεροποίηση του ίδιου βάρους τη χρονική στιγμή 1 και έως τη 2 είχε ολοκληρωθεί, ενώ παρέμενε σταθερό για το υπόλοιπο της ανάλυσης και τέλος η τέμνουσα επιβαλλόμενη μετατόπιση ασκούταν τμηματικά αφού πρώτα είχαν σταθεροποιηθεί τα δύο πρώτα φορτία τη χρονική στιγμή 2 έως την 3. Προφανώς, όπως και στο 4^ο κεφάλαιο, δημιουργήθηκαν και 3 time steps, δηλαδή σύνολο βημάτων για την ολοκλήρωση κάθε φόρτισης. Το ίδιο βάρος και η επιβαλλόμενη μετατόπιση παρέμειναν σε 5 και 50 βήματα αντίστοιχα, ενώ η αξονική δύναμη ασκήθηκε σε 50 βήματα.



Εικόνα 5-1: Δέσμευση σημείων κύκλου εσωτερικής διαμέτρου δακτυλίου με το κέντρο του για άσκηση αξονικής δύναμης

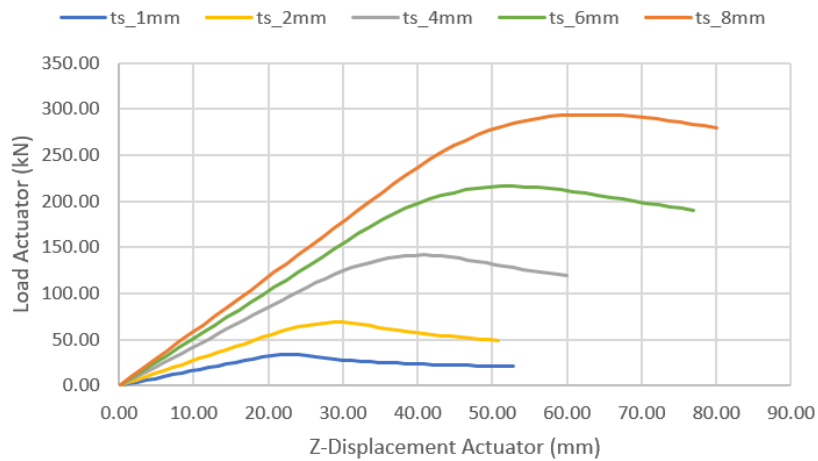
Ο συγκεκριμένος τύπος φόρτισης πραγματοποιήθηκε σε κάθε διαφορετική παραμετρική ανάλυση, από αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω, ώστε να φανεί η συμμετοχή της αξονικής υπό διαφορετικές συνθήκες. Επίσης, επειδή ο τρόπος φόρτισης αυτός προσεγγίζει περισσότερο τα πραγματικά γεγονότα, ήταν απαραίτητος σε όλες τις παραμετρικές αναλύσεις, ώστε να καταδειχτεί η σχετικά πραγματική συμπεριφορά των διατομών τύπου sandwich. Επίσης, πραγματοποιήθηκε και 1 ανάλυση σε με ένα σχετικά μεγάλο πάχος πυρήνα 16mm, χωρίς όμως να υπάρχει το κονίαμα ως υλικό, αλλά μόνο τα περιμετρικά ελάσματα, ώστε να αξιολογηθεί το κατά πόσο προσφέρει το κονίαμα στην αντοχή και τη δυσκαμψία ή μόνο τα ελάσματα.

Βεβαίως, η δυναμική φόρτιση του ανέμου και η αντίστοιχη δυναμική ανάλυση θα ήταν η σωστότερη φόρτιση, μαζί με το σεισμικό φορτίο, αλλά ο περιορισμένος χρόνος δεν επέτρεψε να συμβούν τέτοιου είδους φορτίσεις που απαιτούν μεγάλο όγκο χρονικών πόρων για να υπολογιστούν και να προσομοιωθούν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

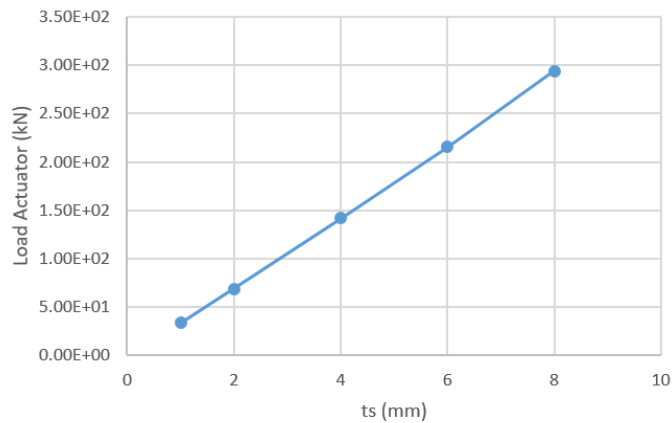
5.3 Αποτελέσματα παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από κάθε είδους παραμετρικής ανάλυσης που αναφέρθηκε προηγουμένως. Όλοι οι αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας των παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων αφορούν στην κατακόρυφη μετατόπιση στη θέση του εμβόλου άσκησης της επιβαλλόμενης μετατόπισης. Κάθε μία από τις παραμετρικές αναλύσεις έγινε, όπως προαναφέρθηκε, με τον τρόπο φόρτισης του πειράματος (κατακόρυφο ίδιο βάρος, επιβαλλόμενη μετατόπιση στο άκρο), αλλά και με έναν νέο τρόπο φόρτισης που προσέγγιζε τον πραγματικό (αξονικό ίδιο βάρος, αξονική δύναμη προσομοίωσης ατράκτου και πτερυγίων, επιβαλλόμενη μετατόπιση στο άκρο προσομοίωσης ανέμου). Δίνονται, επίσης, οι διαφοροποιήσεις στο οριακό φορτίο σε σχέση με τις αλλαγές των εκάστοτε παραμέτρων σε συγκεντρωτικά διαγράμματα.

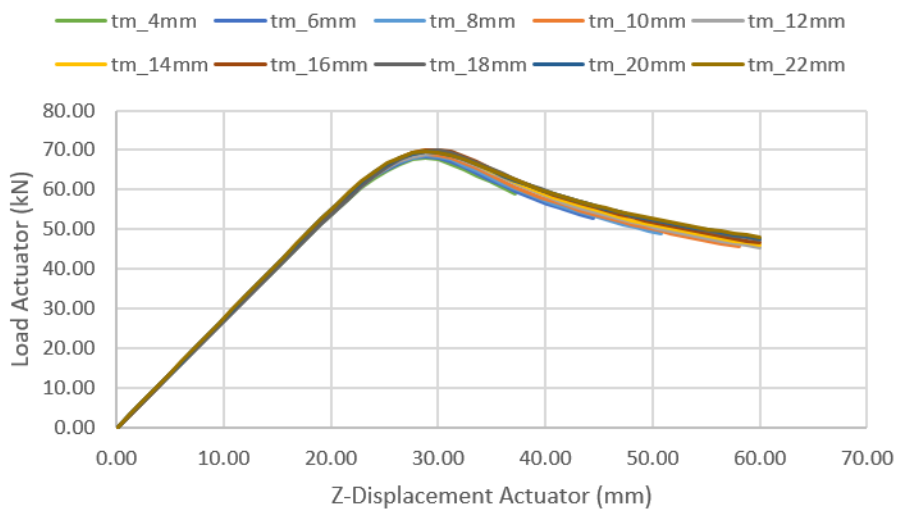
Αρχικά, παρουσιάζονται οι αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στη θέση άσκησης του πειραματικού φορτίου, που είχαν ως διαφοροποίηση το πάχος των ελασμάτων χάλυβα και πως μεταβάλλεται το οριακό φορτίο σε σχέση με αυτή (Σχήμα 5-2 και Σχήμα 5-3). Ακολούθως, παρατίθενται τα όμοιου τύπου αποτελέσματα (δρόμοι ισορροπίας, σχέση οριακού φορτίου-αλλαγής παραμέτρου) από τη γεωμετρική αλλαγή του πάχους του πυρήνα από κονίαμα (Σχήμα 5-4 και Σχήμα 5-5). Περαιτέρω, γίνεται και η παρουσίαση των παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων, μέσω των ίδιων διαγραμμάτων όπως τα προηγούμενα, που αφορούν τις αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα (Σχήμα 5-6 και Σχήμα 5-7) και του κονιάματος (Σχήμα 5-8 και Σχήμα 5-9). Η ίδια σειρά αποτελεσμάτων παρατίθεται και για τις ίδιες παραμετρικές αριθμητικές αναλύσεις, αλλά με το νέο τρόπο φόρτισης του προσομοιώματος πρώτα για την αλλαγή του πάχους των χαλύβδινων ελασμάτων (Σχήμα 5-10 και Σχήμα 5-11), του πάχους του πυρήνα από κονίαμα (Σχήμα 5-12 και Σχήμα 5-13), της ποιότητας του χάλυβα των ελασμάτων (Σχήμα 5-14 και Σχήμα 5-15) και της ποιότητας του κονιάματος (Σχήμα 5-16 και Σχήμα 5-17). Τέλος, δίνεται και η σημασία του κονιάματος στη συμπεριφορά των διατομών τύπου sandwich, μέσω της σύγκρισης δύο διατομών με πάχος χαλύβδινων ελασμάτων 2mm και πάχος πυρήνα 16mm, η μία με υλικό πλήρωσης το κονίαμα και η άλλη με άδειο πυρήνα (Σχήμα 5-18).



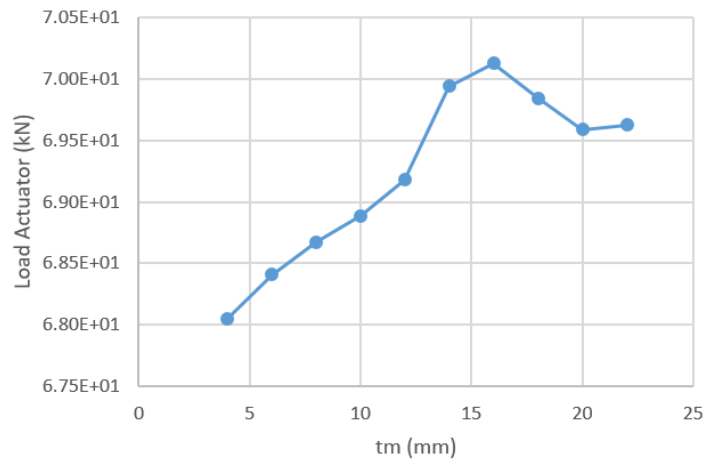
Σχήμα 5-2: Αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στο έμβολο, με διαφοροποίηση στο πάχος των χαλύβδινων ελασμάτων, υπό τη φόρτιση του πειράματος



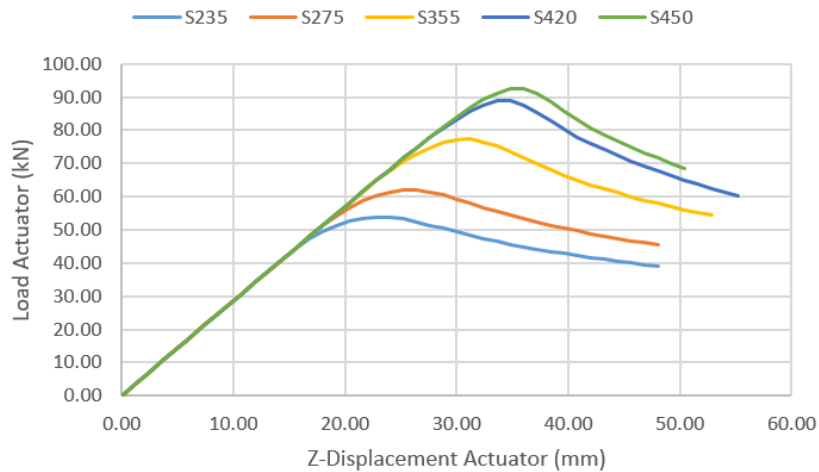
Σχήμα 5-3: Σχέση οριακού φορτίου-πάχους χαλύβδινων ελασμάτων προσομοιωμάτων αριθμητικής ανάλυσης, υπό τη φόρτιση του πειράματος



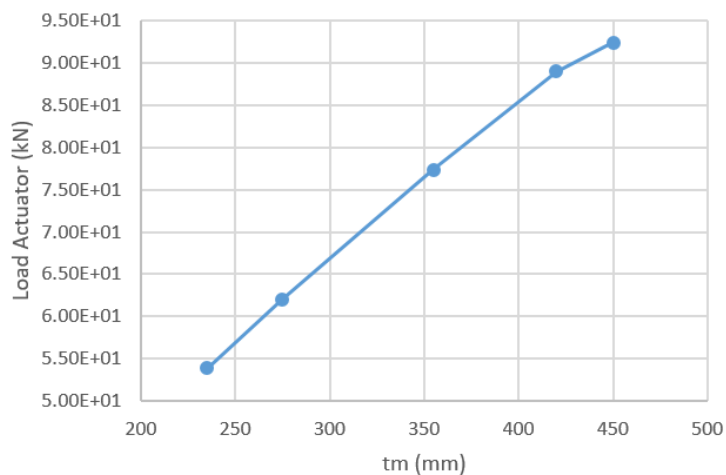
Σχήμα 5-4: Αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στο έμβολο, με διαφοροποίηση στο πάχος του πυρήνα από κόνιαμα, υπό τη φόρτιση του πειράματος



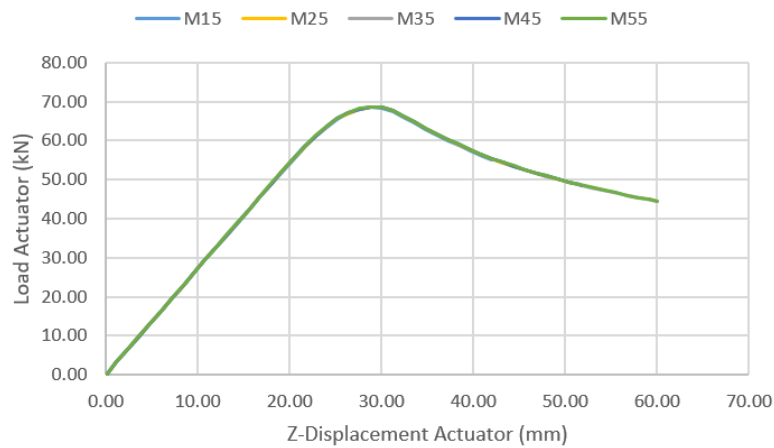
Σχήμα 5-5: Σχέση οριακού φορτίου-πάχους πυρήνα από κόνιαμα προσομοιωμάτων αριθμητικής ανάλυσης, υπό τη φόρτιση του πειράματος



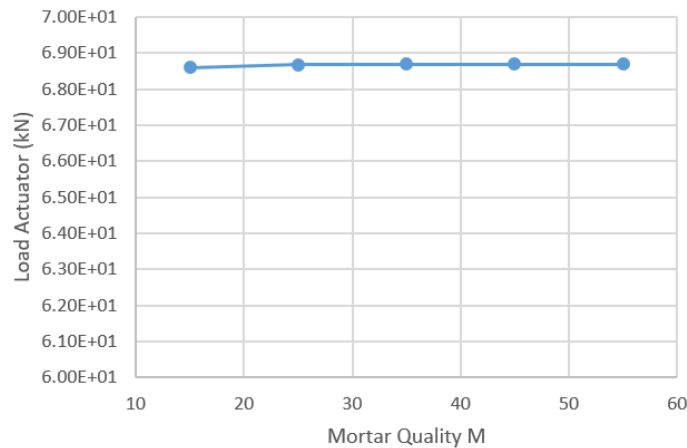
Σχήμα 5-6: Αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στο έμβολο, με διαφοροποίηση στην ποιότητα του χάλυβα των ελασμάτων, υπό τη φόρτιση του πειράματος



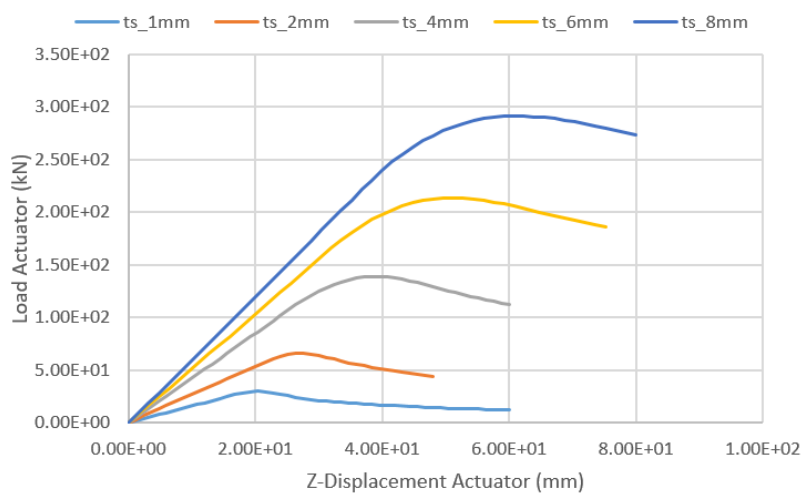
Σχήμα 5-7: Σχέση οριακού φορτίου-ποιότητας χάλυβα ελασμάτων προσομοιωμάτων αριθμητικής ανάλυσης, υπό τη φόρτιση του πειράματος



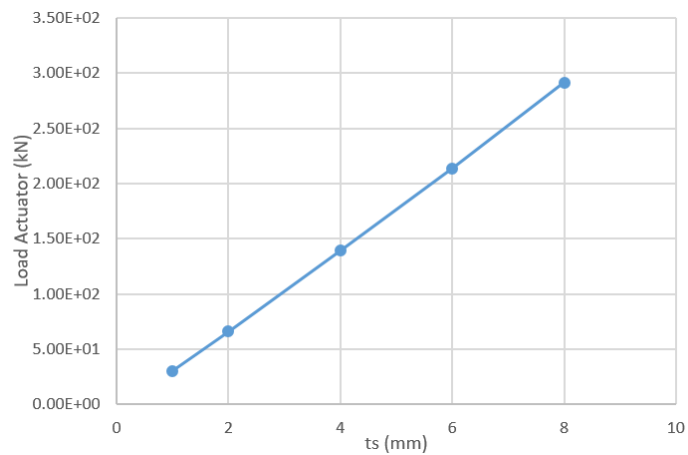
Σχήμα 5-8: Αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στο έμβολο, με διαφοροποίηση στην ποιότητα του κονιάματος στον πυρήνα, υπό τη φόρτιση του πειράματος



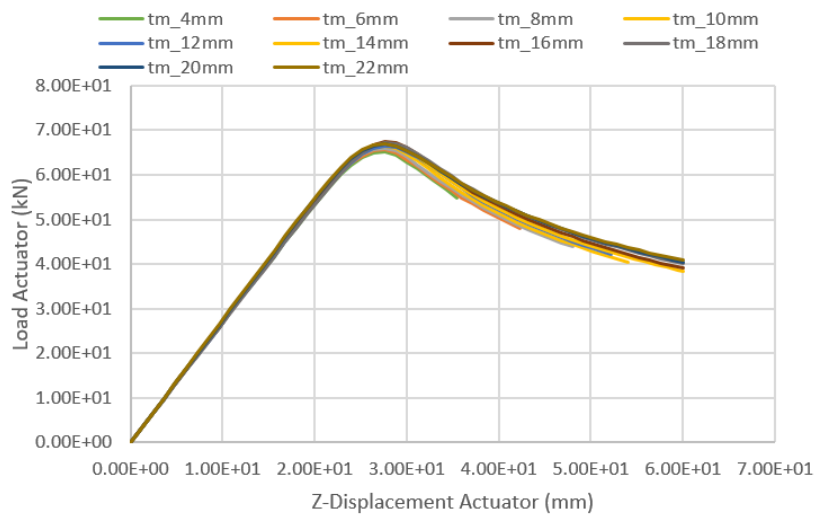
Σχήμα 5-9: Σχέση οριακού φορτίου-ποιότητας κονιάματος στον πυρήνα προσομοιωμάτων αριθμητικής ανάλυσης, υπό τη φόρτιση του πειράματος



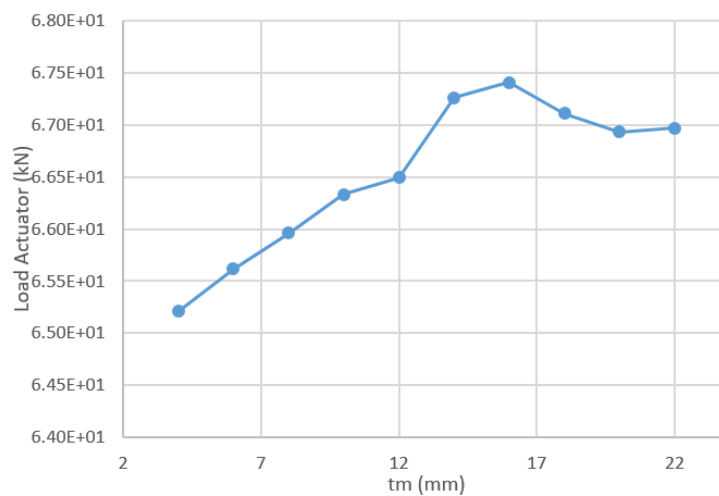
Σχήμα 5-10: Αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στο έμβολο, με διαφοροποίηση στο πάχος των χαλύβδινων ελασμάτων, υπό τη νέα φόρτιση



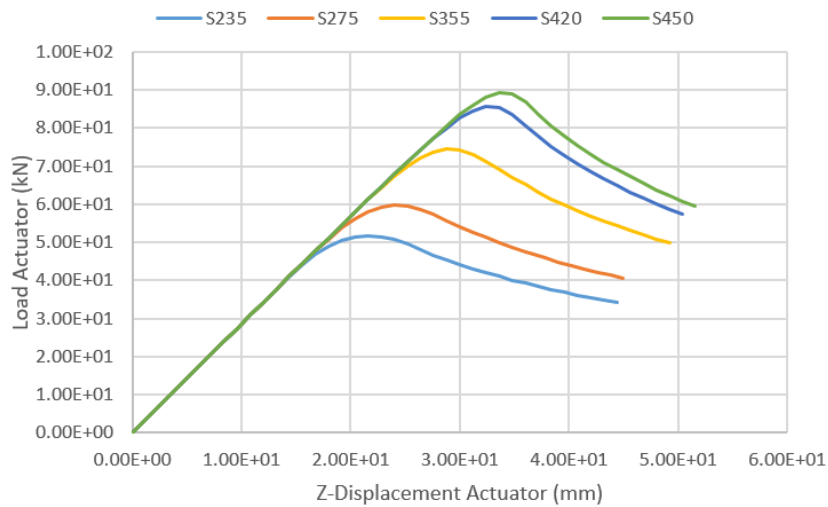
Σχήμα 5-11: Σχέση οριακού φορτίου-πάχους χαλύβδινων ελασμάτων προσομοιωμάτων αριθμητικής ανάλυσης, υπό τη νέα φόρτιση



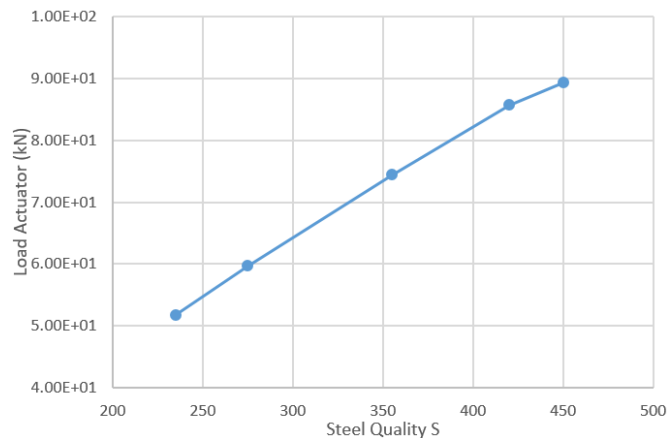
Σχήμα 5-12: Αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στο έμβολο, με διαφοροποίηση στο πάχος του πυρήνα από κονίαμα, υπό τη νέα φόρτιση



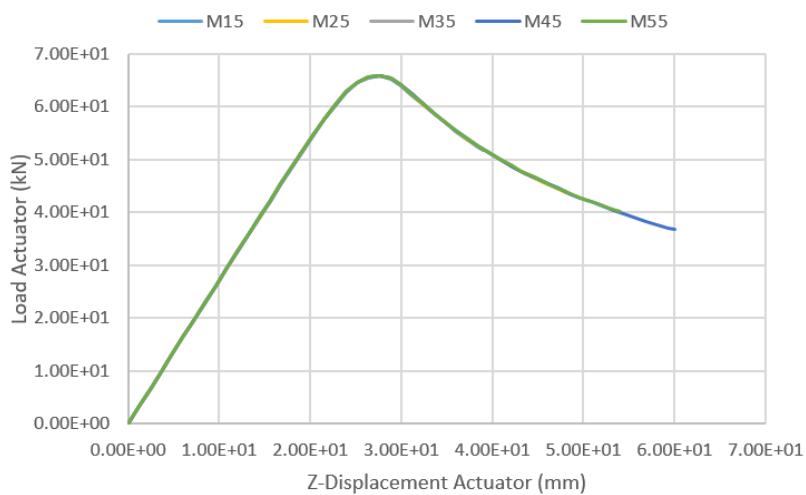
Σχήμα 5-13: Σχέση οριακού φορτίου-πάχους πυρήνα από κονίαμα προσομοιωμάτων αριθμητικής ανάλυσης, υπό τη νέα φόρτιση



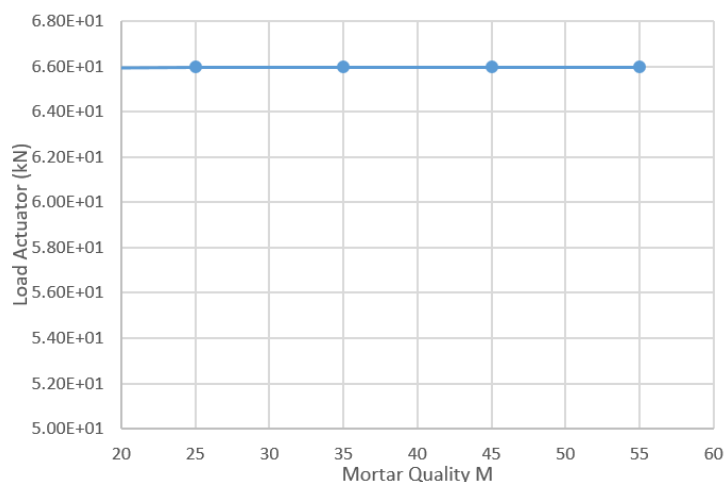
Σχήμα 5-14: Αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στο έμβολο, με διαφοροποίηση στην ποιότητα του χάλυβα των ελασμάτων, υπό τη νέα φόρτιση



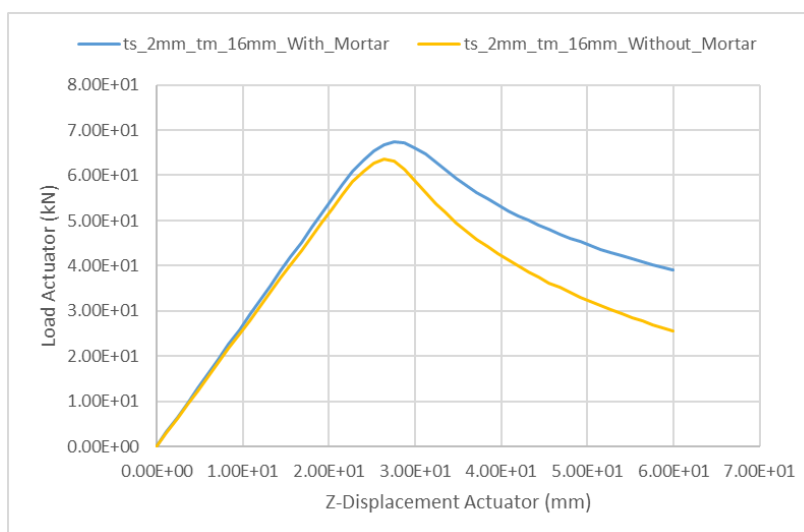
Σχήμα 5-15: Σχέση οριακού φορτίου-ποιότητας χάλυβα ελασμάτων προσομοιωμάτων αριθμητικής ανάλυσης, υπό τη νέα φόρτιση



Σχήμα 5-16: Αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας για κατακόρυφη μετακίνηση στο έμβολο, με διαφοροποίηση στην ποιότητα του κονιάματος στον πυρήνα, υπό τη νέα φόρτιση



Σχήμα 5-17: Σχέση οριακού φορτίου-ποιότητας κονιάματος στον πυρήνα προσομοιωμάτων αριθμητικής ανάλυσης, υπό τη νέα φόρτιση



Σχήμα 5-18: Σύγκριση διατομών sandwich με και χωρίς κονίαμα ως υλικό πλήρωσης του πυρήνα, υπό τη νέα φόρτιση

5.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές παραμετρικές αναλύσεις, με αλλαγές τόσο στα γεωμετρικά όσο και στα μηχανικά χαρακτηριστικά. Για τις αναλύσεις αυτές έγινε χρήση του αριθμητικού προσομοιώματος που αναπτύχθηκε στο 4^ο κεφάλαιο, αφού η σύγκλιση των αποτελεσμάτων του με τα αντίστοιχα πειραματικά το έχρισε ικανοποιητικά αξιόπιστο για περαιτέρω χρήση. Στόχος των αναλύσεων ήταν να κατανοηθεί η συμπεριφορά και η λειτουργία των διατομών τύπου sandwich και υπό διαφορετικές συνθήκες, ώστε να προκύψει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για τα προτερήματα της εναλλακτικής αυτής λύσης.

Από τις αναλύσεις που αφορούν στη διαφοροποίηση του πάχους των χαλύβδινων ελασμάτων (Σχήμα 5-2 και Σχήμα 5-3) παρουσιάζεται μια αναλογική αύξηση του οριακού φορτίου με την αύξηση του συγκεκριμένου πάχους, ενώ ο νέος τρόπος φόρτισης, που αναφέρθηκε προηγουμένως, οδηγεί σε όλο και μικρότερη μείωση του οριακού φορτίου όσο αυξάνεται το πάχος, συγκριτικά με τη φόρτιση του πειράματος (Σχήμα 5-10 και Σχήμα 5-11). Φαίνεται δηλαδή, ότι όσο αυξάνεται το πάχος, η συνεπαγόμενη

μείωση της λυγηρότητας κάνει τη μη γραμμικότητα υλικού περισσότερο κρίσιμη. Η παραμετροποίηση του πάχους του πυρήνα (Σχήμα 5-4 και Σχήμα 5-5) έδειξε ότι όσο αυξάνεται το μέγεθος του, η αύξηση που παρατηρείται στο οριακό φορτίο είναι μικρή και παρουσιάζει ένα σχετικό τοπικό μέγιστο στα 16mm και στις δύο περιπτώσεις φόρτισης (Σχήμα 5-12 και Σχήμα 5-13) και σχεδόν ισόποση μείωση του οριακού φορτίου για όλα τα πάχη με το νέο τρόπο φόρτισης συγκριτικά με τον πειραματικό.

Η βελτίωση της ποιότητας του χάλυβα ελασμάτων (Σχήμα 5-6 και Σχήμα 5-7) φάνηκε να είναι αρκετά σημαντική για τον καθορισμό του οριακού φορτίου, αφού όσο η ποιότητα βελτιώνεται τόσο αυξάνεται και το οριακό φορτίο και στις δύο περιπτώσεις φόρτισης (Σχήμα 5-14 και Σχήμα 5-15). Αυτό συνέβη, γιατί όπως αναφέρθηκε και στο 4^ο κεφάλαιο, η μη γραμμικότητα υλικού ήταν εξίσου κρίσιμη με αυτή της γεωμετρίας. Ακόμη, η βελτίωση στην ποιότητα του κονιάματος (Σχήμα 5-8 και Σχήμα 5-9) έδειξε να μην επηρεάζει τη φέρουσα ικανότητα και στις δύο περιπτώσεις φόρτισης (Σχήμα 5-16 και Σχήμα 5-17). Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι κατά την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού, το κονίαμα έχει αναπτύξει τάσεις πολύ μικρότερες από την οριακή θλιπτική αντοχή του (γύρω στα 10MPa) και άρα η αυξομείωση της οριακής αντοχής του δεν παίζει κανένα ρόλο τη χρονική στιγμή της εμφάνισης του οριακού φορτίου.

Τέλος, η ανάλυση με πάχος χάλυβα 2mm και πάχος πυρήνα 16mm με και χωρίς το κονίαμα ως υλικό πλήρωσης του πυρήνα (Σχήμα 5-18) κατέδειξε ότι στην πρώτη περίπτωση παρατηρείται ίδια σχεδόν δυσκαμψία και μια μικρή αύξηση του οριακού φορτίου σε σχέση με τη δεύτερη περίπτωση και ότι η διαρροή στη δεύτερη περίπτωση εμφανίστηκε νωρίτερα σε σχέση με την πρώτη, αφού απείχε το κονίαμα για να παραλάβει ένα μέρος των τάσεων μέχρι εκείνο το σημείο. Η ελάχιστη διαφοροποίηση που προσφέρει το κονίαμα στη διατομή τύπου sandwich επιβάλλει τη μελέτη και άλλων κατασκευαστικών, μεταφορικών και κυρίως οικονομικών παραγόντων για την εξαγωγή συμπεράσματος σχετικά με το αν αυτός ο τύπος διατομής πλεονεκτεί έναντι της αμιγώς χαλύβδινης διατομής.

6 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την πειραματική και αριθμητική διερεύνηση των καινοτόμων διατομών τύπου sandwich για πυλώνες ανεμογεννητριών. Πρόκειται για μια εναλλακτική και πρωτοποριακή ιδέα, η οποία συντάχθηκε πρώτα από το Γερμανό ερευνητή Schaumann, ο οποίος είχε ως στόχο να βρει μια διατομή που να συνδυάζει όσο το δυνατόν μείωση του ίδιου βάρους και αύξηση της φέρουσας ικανότητας. Επιπλέον ενδιαφέρον για τη μελέτη της συμπεριφοράς αυτής της νέας διατομής αποτέλεσε και η αναζήτηση λύσης στο πρόβλημα που δημιουργείται σε περιπτώσεις ανάγκης διατομών άνω των 4.3m για αμιγώς χαλύβδινους πυλώνες ύψους άνω των 100m. Τέτοιου μεγέθους διατομές είναι δύσκολο να μεταφερθούν σε δυσπρόσιτες περιοχές λόγω οδικών περιορισμών (καμπύλωση στροφών, εύρος δρόμων, ύψος σηράγγων, γεφυρών κλπ.) αναφορικά με τις επίγειες ανεμογεννήτριες και αυξάνουν αρκετά το κόστος μεταφοράς (μέγεθος και ικανότητα γερανών, πλοίων κλπ.) όσο αναφορά τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες.

Αφού έγινε μια εισαγωγή στις ανεμογεννήτριες με ιστορική αναδρομή στην εξέλιξή τους, δόθηκαν οι βασικοί τύποι πυλώνων ανεμογεννητριών με έμφαση στις αμιγώς χαλύβδινες για λόγους σύγκρισης με τη νέα μορφή διατομής τύπου sandwich. Ακολουθώντας, έγινε αναφορά στην αναγκαιότητα της εναλλακτικής αυτής λύσης και παρουσιάστηκε μια προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού πυλώνων ανεμογεννητριών με αυτού του τύπου διατομές και προτάσεις για τον τρόπο κατασκευής και ανέγερσής τους, από μια ερευνητική ομάδα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου της σχολής Πολιτικών Μηχανικών. Η μεθοδολογία αυτή σχεδιασμού καθόρισε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πειραματικών δοκιμίων που ελέγχθηκαν σε κάμψη στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών. Ύστερα, η πειραματική διάταξη και διαδικασία προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων του εμπορίου Adina, με στόχο και την αριθμητική διερεύνηση της καινοτόμου διατομής και τη δημιουργία ενός προσομοιώματος ικανού να εξηγήσει τη συμπεριφορά και τη λειτουργία της διατομής τύπου sandwich. Εξήχθησαν αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας και εξελίξεις παραμορφώσεων στις θέσεις στις οποίες είχαν τοποθετηθεί μετρητές μετακινήσεων (LVDT) και παραμορφώσεων (strain gauges) αντίστοιχα στο πείραμα, ώστε να καταδειχθεί η αξιοπιστία του προσομοιώματος και το μέτρο ταύτισης της αριθμητικής ανάλυσης με την πειραματική. Τέλος, έγιναν αριθμητικές παραμετρικές αναλύσεις μέσω του προσομοιώματος αυτού, για να κατανοηθεί η συμπεριφορά των διατομών τύπου sandwich και υπό διαφορετικές, πέρα από τις πειραματικές, συνθήκες και να φανεί το κατά πόσο τελικά πλεονεκτεί και κρίνεται σκόπιμο να δημιουργηθεί, από στατικής άποψης, η πρωτοποριακή αυτή διατομή έναντι της

συνήθους αμιγώς χαλύβδινης. Οι παράμετροι που διαφοροποιήθηκαν σε σχέση με τα δοκίμια του πειράματος ήταν το πάχος των χαλύβδινων ελασμάτων, το πάχος του πυρήνα από κονίαμα, η ποιότητα του χάλυβα των ελασμάτων, η ποιότητα του κονιάματος του πυρήνα και ο τρόπος φόρτισης του δοκιμίου, ώστε να προσεγγίζει πραγματικές συνθήκες (αξονική άσκηση ιδίου βάρους, αξονική καταπόνηση προσομοίωσης ατράκτου και πτερυγίων, τέμνουσα επιβαλλόμενη μετατόπιση στο άκρο προσομοίωσης ανέμου), ενώ υπήρξαν και αναλύσεις χωρίς κονίαμα στο εσωτερικό του πυρήνα με σκοπό να καταδειχθεί η συνεισφορά του στη φέρουσα ικανότητα και στη δυσκαμψία.

Από την πειραματική διερεύνηση προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά της καινοτόμου αυτής διατομής τύπου sandwich. Τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν στις τοποθετούμενες θέσεις των LVDTs και των strain gauges, αλλά και από τα οπτικά μέσα, παρουσίασαν μια αρκετά καλή επαναληψιμότητα, στο όριο της ταύτισης, με μικρές διαφορές μεταξύ των δύο δοκιμίων, κυρίως διότι στο δεύτερο πείραμα παρατηρήθηκε αρχική σχετική μετατόπιση μεταξύ των δακτυλίων στη σύνδεση του κυρίως δοκιμίου με το κέλυφος επέκτασης. Καταδείχθηκε, επίσης, μια ικανοποιητική συνεργασία μεταξύ των δύο υλικών, χάλυβα ελασμάτων και κονιάματος του πυρήνα, έως την εμφάνιση της αστοχίας λόγω εκδήλωσης του φαινομένου τοπικού λυγισμού κοντά στη βάση στο θλιβόμενο μέρος της διατομής. Η εκδήλωση του φαινομένου του τοπικού λυγισμού απείχε μια απόσταση περίπου 30mm μεταξύ των δύο πειραμάτων, λόγω της αβεβαιότητας και της διαφοροποίησης των αρχικών ατελειών που οδηγούν προς κάποια θέση το φαινόμενο αυτό. Εξαιτίας της σχεδόν αμελητέας εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος παρατηρήθηκε μετακίνηση του ουδέτερου άξονα, από την αρχική του ταύτιση με τον κεντροβαρικό, προς το μέρος της θλιβόμενης παρειάς, όπως ήταν αναμενόμενο για να ισχύει η ισοδυναμία δυνάμεων μεταξύ εφελκυσόμενης και θλιβόμενης μεριάς.

Η αριθμητική διερεύνηση μέσω του προσομοιώματος της πειραματικής διάταξης και διαδικασίας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Adina, έδωσε αρκετά συμπεράσματα για το μέγεθος αξιοπιστίας του και την ικανότητα χρήσης του για περαιτέρω έρευνα. Οι αριθμητικοί δρόμοι ισορροπίας που δημιουργήθηκαν για κάθε διαφορετική θέση όπου τοποθετήθηκε μετρητής μετακινήσεων (LVDT) σχεδόν ταυτίστηκαν σε όρους δυσκαμψίας, οριακού φορτίου και μεταλυγισμικής συμπεριφοράς με τους αντίστοιχους δρόμους ισορροπίας του περισσότερου αξιόπιστου πρώτου πειράματος συγκριτικά με το δεύτερο, που όπως προαναφέρθηκε παρατηρήθηκε αρχική σχετική μετατόπιση μεταξύ των δακτυλίων στη σύνδεση κελύφους επέκτασης και κυρίως δοκιμίου. Επιπροσθέτως, οι εξελίξεις των παραμορφώσεων, στις θέσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν τα strain gauges στο πείραμα, κατέδειξαν πολύ καλή σύγκλιση με τις αντίστοιχες πειραματικές, κυρίως από ποιοτική ματιά, αλλά και ποσοτικά σε κάποιες περιπτώσεις. Η ποσοτική ταύτιση των παραμορφώσεων ήταν άκρως δύσκολο να πραγματοποιηθεί, αφού η θέση εμφάνισης του φαινομένου του τοπικού λυγισμού, που επηρεάζει την εξέλιξη των παραμορφώσεων σε όλες τις γειτονικές θέσεις, είναι σχεδόν απίθανο να ταυτιστεί με αυτή του πειράματος, στο οποίο ήδη εκδηλώθηκε σε διαφορετικές θέσεις μεταξύ των δύο δοκιμίων, όπως προαναφέρθηκε. Οι σχηματικές απεικονίσεις της παραμόρφωσης, της τάσης Mises, της εξέλιξης της διαρροής, της ανάπτυξης ρωγμών και της κατάστασης των στοιχείων επαφής σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές στην εξέλιξη της επιβολής της φόρτισης (κατά την εμφάνιση της πρώτης διαρροής, κοντά στο οριακό φορτίο και λίγο μετά την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού), έδωσαν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά των μελών που απαρτίζουν τη διατομή τύπου sandwich καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης. Η αναμενόμενη αστοχία λόγω της εκδήλωσης του τοπικού λυγισμού στο θλιβόμενο μέρος κοντά στη βάση του κυρίως δοκιμίου διατομής τύπου sandwich και η διαρροή που προήγαγε της εμφάνισης αυτού του φαινομένου δείχνει ότι η μη γραμμικότητα γεωμετρίας ήταν ισοδύναμα κρίσιμη με τη μη γραμμικότητα υλικού για την αστοχία του φορέα. Η εκδήλωση της αστοχίας και η σχεδόν ταυτόσημη τιμή οριακού φορτίου του προσομοιώματος συγκριτικά με το πείραμα, αποδεικνύει ότι ο μη ορισμός αρχικών ατελειών δεν επηρέασε ουσιαστικά τη συνολική συμπεριφορά του φορέα. Αυτό εξηγείται με το ότι η κάμψη ως φόρτιση εξ' αρχής προσδιορίζει τον προσανατολισμό της αστοχίας σε ένα φορέα. Τελικά το προσομοίωμα αριθμητικής ανάλυσης κρίνεται ικανό να βοηθήσει στην

αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας της καινοτόμου διατομής τύπου sandwich για πυλώνες ανεμογεννητριών.

Οι αριθμητικές παραμετρικές αναλύσεις βοήθησαν στο να κατανοηθούν οι παράμετροι που παίζουν σημαντικό ρόλο στη φέρουσα ικανότητα του φορέα με διατομή τύπου sandwich, κυρίως μέσω της αυξομείωσης του οριακού φορτίου. Από τις αναλύσεις που αφορούσαν στη διαφοροποίηση του πάχους των χαλύβδινων ελασμάτων φαίνεται ότι όσο αυξάνεται το πάχος κάθε ελάσματος τόσο αυξάνεται και το οριακό φορτίο του φορέα, ενώ ο νέος τρόπος φόρτισης, που αναφέρθηκε προηγουμένως, οδηγεί σε όλο και μικρότερη μείωση του οριακού φορτίου όσο αυξάνεται το πάχος, συγκριτικά με τη φόρτιση του πειράματος. Φαίνεται δηλαδή, ότι όσο αυξάνεται το πάχος, η συνεπαγόμενη μείωση της λυγηρότητας κάνει τη μη γραμμικότητα υλικού περισσότερο κρίσιμη. Βεβαίως, η πολύ μεγάλη αύξηση του πάχους των ελασμάτων δεν έχει νόημα, αφού χάνεται έτσι το αρχικό σκεπτικό περί μείωσης ίδιου βάρους κατασκευής στο οποίο στηρίχτηκε και η ιδέα των διατομών τύπου sandwich. Η αύξηση του πάχους του πυρήνα έδειξε μια μικρή αύξηση στην τιμή του οριακού φορτίου, η οποία παρουσιάζει ένα σχετικό τοπικό μέγιστο στα 16mm και στις δύο περιπτώσεις φόρτισης και σχεδόν ισόποση μείωση του οριακού φορτίου για όλα τα πάχη με το νέο τρόπο φόρτισης συγκριτικά με τον πειραματικό. Η αλλαγή στην ποιότητα του χάλυβα των ελασμάτων δείχνει να παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του οριακού φορτίου, αφού όσο η ποιότητα βελτιώνεται τόσο αυξάνεται και το οριακό φορτίο και στις δύο περιπτώσεις φόρτισης. Αυτό συμβαίνει διότι η μη γραμμικότητα υλικού ήταν εξίσου κρίσιμη με αυτή της γεωμετρίας. Ακόμη, η αλλαγή στην ποιότητα του κονιάματος φαίνεται να μην επηρεάζει καθόλου τη συμπεριφορά του φορέα και στις δύο περιπτώσεις φόρτισης. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι κατά την εμφάνιση του τοπικού λυγισμού, το κονίαμα έχει αναπτύξει τάσεις πολύ μικρότερες από την οριακή θλιπτική αντοχή του (γύρω στα 10MPa) και άρα η αυξομείωση της οριακής αντοχής του δεν παίζει κανένα ρόλο τη χρονική στιγμή της εμφάνισης του οριακού φορτίου. Τέλος, η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για το πάχος των 16mm χωρίς υλικό πλήρωσης στον πυρήνα έδειξε ότι ο φορέας με διατομή τύπου sandwich με κονίαμα στο εσωτερικό του πυρήνα παρουσίασε σχεδόν ίδια δυσκαμψία και μια μικρή αύξηση του οριακού φορτίου σε σχέση με την αντίστοιχη διατομή χωρίς υλικό πλήρωσης.

Επιπλέον, συγκριτικά με αναλύσεις που έγιναν σε παλαιότερο διδακτορικό της σχολής Πολιτικών Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο [4-1] σε αμιγώς χαλύβδινες διατομές με πάχος χάλυβα 4mm και ίδιας ποιότητας με το χάλυβα του πειράματος της παρούσας εργασίας, παρατηρείται αύξηση της δυσκαμψίας σε ποσοστό περίπου 25%, κυρίως λόγω απομάκρυνσης των ελασμάτων χάλυβα από το κέντρο βάρους της διατομής και περίπου ίδια τιμή οριακού φορτίου με το δοκίμιο διατομής τύπου sandwich. Απορρέει, λοιπόν, σαν γενικό συμπέρασμα, ότι οι διατομές τύπου sandwich για πυλώνες ανεμογεννητριών έχουν παρόμοια φέρουσα ικανότητα με αυτή των αμιγώς χαλύβδινων διατομών. Ωστόσο, η εναλλακτική αυτή λύση μπορεί να κριθεί ως καλύτερη από τη συνηθισμένη, όταν γίνει ανάλυση και άλλων παραγόντων, κυρίως οικονομικών, διαφορά στο συνολικό ίδιο βάρος, συνθηκών διαμόρφωσης, μεταφοράς και υλοποίησης.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η πειραματική και η αριθμητική διερεύνηση των καινοτόμων διατομών τύπου sandwich, που μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, έδωσε σημαντικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά και τον τρόπο λειτουργίας των διατομών αυτών. Ωστόσο, περαιτέρω στοιχεία μπορούν να εξεταστούν ώστε να συμπληρώσουν την παρούσα έρευνα, ολοκληρώνοντάς τη.

Αρχικά, όσο αναφορά τη διατομή τύπου sandwich με υλικό πυρήνα το κονίαμα, κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιηθούν επιπλέον πειράματα που να προσομοιάζουν περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης, δηλαδή τοποθέτηση των δοκιμίων κατακόρυφα και πέρα από την άσκηση της τέμνουσας επιβαλλόμενης μετατόπισης να πραγματοποιηθεί και αξονική φόρτιση προσομοίωσης του εξοπλισμού

που συναντάται στην κορυφή ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας. Ακόμη, καλό θα ήταν να εξεταστούν πειραματικά και δοκίμια με τέτοιου τύπου διατομές, αλλά χωρίς υλικό πλήρωσης πυρήνα, ώστε να εξεταστεί και πειραματικά η συνεισφορά του κονιάματος στη συνολική συμπεριφορά του φορέα. Επίσης, για να διαπιστωθεί κατά πόσο συμφέρει η εναλλακτική αυτή λύση έναντι της κλασικής αμιγώς χαλύβδινης διατομής, θα ήταν συνετό να αναλυθούν και να συγκριθούν και οι οικονομικοί παράγοντες σχεδιασμού και κατασκευής, οι οποίοι εν τέλει κρίνουν τον προτιμητέο τύπο διατομής, μέσω της σύγκρισης των διαφορετικών τρόπων στη διαμόρφωση, τη μεταφορά και την υλοποίηση, ανάμεσα στις δύο αυτές λύσεις. Πέρα από την πειραματική και αριθμητική διερεύνηση σε διατομές τύπου sandwich με υλικό πυρήνα το κονίαμα, μια εξίσου λεπτομερής διερεύνηση θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί και σε διατομές τύπου sandwich με άλλο υλικό πυρήνα, όπως είναι το ελαστομερές και το σκυρόδεμα. Έτσι, έχοντας τα αποτελέσματα από όλους τους συνδυασμούς του συγκεκριμένου τύπου διατομής, θα μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ τους και να καθορισθεί ποιος από αυτούς προσφέρει περισσότερο από άποψη φέρουσας ικανότητας στην κατασκευή, αλλά και ποιος είναι περισσότερο οικονομικός.