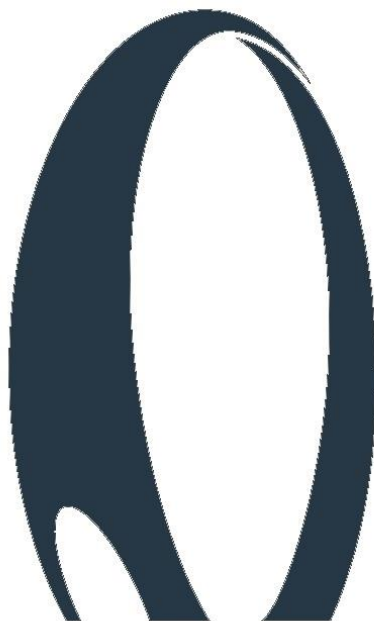




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ
ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ
ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΘΟΛΟΥ
ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΜΟΡΦΗΣ**



Διπλωματική Εργασία
Σπυρίδων Καλύβας

ΕΜΚ ΔΕ 2016 37

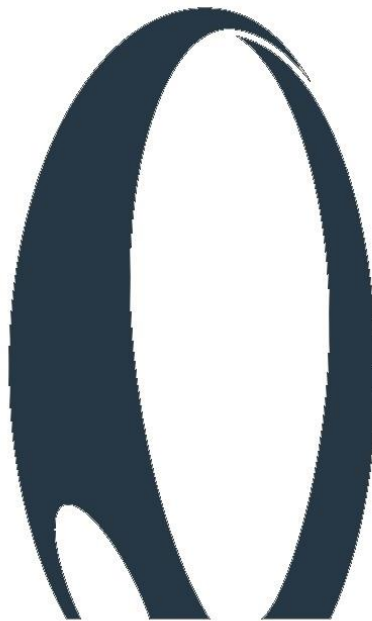
Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ
ΚΑΙ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ
ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΘΟΛΟΥ
ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΜΟΡΦΗΣ**



Διπλωματική Εργασία
Σπυρίδων Καλύβας

ΕΜΚ ΔΕ 2016 37

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2016

Copyright © Σπυρίδων Καλύβας, 2016
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Spyridon Kalyvas
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).

Σπυρίδων Καλύβας, 2016

Σύγκριση κανονιστικής προσέγγισης και μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων για το σχεδιασμό
χαλύβδινου θόλου ελεύθερης μορφής
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2016 37
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Spyridon Kalyvas, 2016

Comparison of code-based approach and nonlinear numerical analyses for the design of free form
steel dome
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2016 37
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με τη ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, ολοκληρώνεται και ο κύκλος σπουδών μου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Νιώθω, λοιπόν, την ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τους ανθρώπους των οποίων η καθοδήγηση, η στήριξη και η βοήθεια υπήρξε καθοριστική όλα αυτά τα χρόνια.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χάρη Γαντέ, καθηγητή του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π., για την δυνατότητα που μου έδωσε να διεκπεραιώσω την διπλωματική μου εργασία υπό την επίβλεψη του. Οι πολύτιμες καθοδηγήσεις και συμβουλές του συνέβαλαν καταλυτικά στη ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας και ο τρόπος διδασκαλίας του αποτέλεσε την αφορμή για το ενδιαφέρον μου στο αντικείμενο των μεταλλικών κατασκευών.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ηλία Θανάσουλα, υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π. για την εξαιρετική συνεργασία αλλά και την σημαντική βοήθεια που μου παρείχε, καθόλη την διάρκεια διεκπεραίωσης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Τάσο Αβραάμ και τον κ. Δημήτριο Βαμβάτσικο, Επίκουρους Καθηγητές του τομέα Δομοστατικής του Ε.Μ.Π., για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Για τη βοήθεια της πάνω στο αντικείμενο, αλλά και τις πολύτιμες πληροφορίες που μου παρείχε για το θέμα της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Κωνσταντίνα Κουλάτσου, υποψήφια Διδάκτορα του Ε.Μ.Π.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα πρόσωπα που στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια. Ευχαριστώ τους γονείς μου, Σωτήρη και Λένα, την αγαπημένη μου αδερφή Κωνσταντίνα και τους φίλους και συμφοιτητές μου, για την συμπαράσταση και την αγάπη τους.

Σπύρος Καλύβας

Νοέμβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2016 37

Σύγκριση κανονιστικής προσέγγισης και μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων για το σχεδιασμό χαλύβδινου θόλου ελεύθερης μορφής

Σπυρίδων Καλύβας

Επιβλέπων: Καθηγητής Χάρης Γαντές

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τον σχεδιασμό ενός χαλύβδινου θόλου ελεύθερης μορφής. Ο θόλος αυτός αποτελείται από δέκα τόξα διατομής διπλών ταυ, στην συμπεριφορά των οποίων δίνεται ιδιαίτερη έμφαση. Ο σχεδιασμός του πραγματοποιείται αρχικά σύμφωνα με μια κανονιστική προσέγγιση, όπως αυτή ορίζεται από τους Ευρωκώδικες, ενώ στη συνέχεια γίνονται μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις με χρήση γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων δοκού, αλλά και επιφανειακών στοιχείων. Σκοπός της εργασίας είναι η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των παραπάνω μεθόδων σχεδιασμού και η σύγκριση τους. Δίνεται, επίσης, βάση σε λεπτομερέστερους ελέγχους και αναλύσεις, όπως στη διερεύνηση συμπεριφοράς ενός μεμονωμένου, εκτός του θόλου, τόξου αλλά και στον ακριβέστερο έλεγχο της αντοχής των στηρίξεων των τόξων του θόλου. Η διπλωματική εργασία εκτείνεται σε οκτώ κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων περιγράφεται παρακάτω.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στο υπό μελέτη πρόβλημα. Αρχικά γίνονται συνοπτικές αναφορές για το συνολικό έργο του οποίου μέρος είναι ο θόλος, ο οποίος εξετάζεται στην εργασία. Εν συντομία, επίσης, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του κανονιστικού σχεδιασμού αλλά και των βασικών εννοιών της μη γραμμικής συμπεριφοράς των κατασκευών και οι πιθανές διαφορές που συναντούνται στις δύο περιπτώσεις σχεδιασμού. Στη συνέχεια, με συγκεκριμένη αναφορά στον υπό μελέτη θόλο, γίνεται περιγραφή της δομής της διπλωματικής εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται η αναλυτική περιγραφή της γεωμετρίας του θόλου, μαζί με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό, αλλά και τους κανονισμούς και κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένα για την κανονιστική προσέγγιση. Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι πιθανές φορτίσεις που μπορούν να ασκηθούν στο θόλο και εξηγείται ποιος συνδυασμός τους είναι ο πιο κρίσιμος, ώστε να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό με τις μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχεδιασμού με κανονιστική προσέγγιση. Για τον σχεδιασμό αυτόν του θόλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SAP2000, το οποίο δίνει την δυνατότητα στο χρήστη εισαγωγής όλων των πιθανών συνδυασμών φορτίσεων, οι οποίοι και παρουσιάζονται στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε, είναι με τη μορφή βαθμών αξιοποίησης του κάθε μέλους, οι οποίοι υπολογίζονται μέσω σχέσεων αλληλεπιδράσεων σύμφωνα με τους ελέγχους που ορίζει ο Ευρωκώδικας

3 για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας, και με τη μορφή μέγιστων μετακινήσεων που έχουν υπολογιστεί σε κρίσιμα σημεία του θόλου για την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας.

Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις για το θόλο, τα οποία προέκυψαν με βοήθεια του λογισμικού ADINA. Στο τέταρτο κεφάλαιο, η προσομοίωση των τόξων του θόλου γίνεται με τρία διαφορετικά είδη πεπερασμένων ραβδωτών στοιχείων δοκού, ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο η προσομοίωση γίνεται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Οι αναλύσεις για τις οποίες δίνονται τα αποτελέσματα είναι Γραμμικοποιημένες Αναλύσεις Λυγισμού (LBA), μη γραμμικές αναλύσεις με θεώρηση γεωμετρικής μη γραμμικότητας (GNA) και μη γραμμικές αναλύσεις με θεώρηση μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού (GMNA). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν σε αυτές τις αναλύσεις, για τα τρία είδη των γραμμικών στοιχείων με τα οποία έχουν προσομοιωθεί τα τόξα, συγκρίνονται μεταξύ τους, προς εξαγωγή ανάλογων συμπερασμάτων, ενώ σύγκριση γίνεται και με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το προσομοίωμα με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων. Γίνεται, επίσης, έλεγχος της επιρροής των αρχικών ατελειών και των θερμοκρασιακών φορτίων στη συμπεριφορά των τόξων. Τέλος, στα συμπεράσματα του πέμπτου κεφαλαίου γίνεται, εν συντομία, σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τον κανονιστικό σχεδιασμό και τον σχεδιασμό με μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις.

Στο έκτο κεφάλαιο, κρίθηκε ενδιαφέρον να γίνει μια διερεύνηση της συμπεριφοράς του κρίσιμου για την αστοχία τόξου του θόλου, όταν αυτό λειτουργεί μεμονωμένα. Περιγράφεται, η προσπάθεια, από το συγγραφέα, προσομοίωσης της γεωμετρίας του μεμονωμένου τόξου, αλλά και των συνθηκών στήριξης και των φορτίσεών του. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων που έγιναν για το μεμονωμένο τόξο και συγκρίνονται με αυτά για την περίπτωση που το τόξο λειτουργεί εντός του θόλου, με εξαγωγή ανάλογων συμπερασμάτων.

Στο έβδομο κεφάλαιο εξετάζεται το μοντέλο της στήριξης ενός τόξου του θόλου. Η προσομοίωση του μοντέλου έχει γίνει με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων. Εξετάζεται και εντοπίζεται η συνολική αντοχή του μοντέλου αυτού, καθώς και ο λόγος για τον οποίο αστοχεί, ενώ εξάγονται και τα ανάλογα συμπεράσματα. Τέλος, στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2016 37

Comparison of code-based approach and nonlinear numerical analyses for the design of free form steel dome

Spyridon Kalyvas

Supervisor: Professor Charis Gantes

ABSTRACT

The present diploma thesis is concerned with the design of a free form steel dome. This dome is comprised of ten I-section arches, on the behaviour of which particular attention is paid. Initially, its design is performed via a code-based approach, as the latter is defined by the relevant Eurocodes, while, subsequently, nonlinear numerical analyses with the utilisation of beam, as well as shell finite elements, is undertaken. The ultimate objective of this study is the presentation of the results arrived at through the aforementioned design methods, as well as a comprehensive comparison between them. In addition, particular attention to more detailed investigations and analyses is devoted, such as vis-à-vis the behaviour of an arch in isolation (that is, abstracted from the dome), as well as with regards to the more precise calculation of the resistance of the base connections of the arches of the dome. This study is organised in eight Chapters, the content of which will be referred to in detail below.

Chapter One introduces the reader to the investigation and its rationale. It starts by providing a brief reference to the building, the dome of which is the primary focus of this study. The key characteristics of the code-based design approach, the basic principles particular to the nonlinear behaviour of structures, and the potential divergences one could face via the utilisation of the two distinct design approaches are also presented. In turn, this Chapter proceeds by outlining the organisation of the present diploma thesis, referring, as deemed relevant, to the dome under examination. Chapter Two is concerned with carefully describing the dome's geometry, the materials used in the design, and the codes, regulations and standards summoned specifically for the code-based approach. Finally, the entirety of possible loads that can be applied to the dome is presented in detail, proceeded by the explanation of which of these combinations is the most critical, to motivate the reasons why the latter is used for the design that pertains the nonlinear numerical analyses.

Chapter Three presents the results of the code-based design approach. To carry out the design of the dome, the SAP2000 software was used, which allows the user to incorporate all possible load combinations, all of which are presented in this Chapter. The results that were subsequently drawn from the software are in the form of interaction ratios of each member, which were calculated according to the relevant guidelines, as outlined by Eurocode 3, pertaining to the Ultimate Limit State,

and in the form of maximum displacement calculated at critical points of the dome, vis-à-vis the Serviceability Limit State.

Chapters Four and Five present the results of the nonlinear numerical analyses of the dome, which were arrived at through the usage of the ADINA software. In the former Chapter, the simulation of the dome's arches is performed via three distinct types of finite beam elements, while in the latter, the simulation is undertaken through finite shell elements. The analyses for which results are presented are Linearised Buckling Analysis (LBA), Geometric Nonlinear Analysis (GNA), and Geometric and Material Nonlinear Analysis (GMNA). The results that are drawn from the three different types of analyses regarding the arches' simulation are compared and contrasted among one another, the relevant conclusions are noted, and the study proceeds by comparing them, in turn, to the results arrived at through the finite shell elements' simulation. In addition, the influence of initial imperfections and temperature loads to the behaviour of the arches is examined. Finally, Chapter Five concludes by briefly comparing the results of the code-based and nonlinear numerical analyses' design approaches.

In Chapter Six, it was deemed interesting to investigate the behaviour of one of the dome's arches in isolation, as it can prove critical to its potential failure. The attempt of simulating the geometry of the isolated arch is described, as well as those of the boundary conditions and loads. In turn, the results of the nonlinear analyses that were carried out with regards to the isolated arch are presented, and compared to those that were arrived at when the arch was not in isolation (i.e. was part of the dome), drawing the relevant conclusions.

Chapter Seven examines the base connection for one of the dome's arches. The model's simulation has been performed via finite shell elements. The resistance of the base connections model is investigated and pinpointed, as well as the reasons for which it can fail, drawing the relevant conclusions. Finally, Chapter Eight summarises the key conclusions of this diploma thesis.

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΕΡΓΟ “THE OVAL” ΣΤΗ ΛΕΜΕΣΟ ΚΥΠΡΟΥ	1
1.1.1	Γενικά στοιχεία	1
1.1.2	Στατικό σύστημα του κτιρίου	2
1.1.3	Τρέχουσα πρόοδος του έργου.....	5
1.2	ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ	6
1.3	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ.....	6
1.4	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΘΟΛΟΥ	8
2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ, ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΤΟΥ ΘΟΛΟΥ	11
2.1	ΓΕΝΙΚΑ	11
2.2	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΘΟΛΟΥ.....	12
2.3	ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ – ΚΩΔΙΚΕΣ, ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ	15
2.3.1	Κώδικες και κανονισμοί που χρησιμοποιήθηκαν	15
2.3.2	Υλικά και ιδιότητές τους.....	16
2.4	ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΣΤΟ ΘΟΛΟ	16
2.4.1	Μόνιμα Φορτία.....	17
2.4.2	Φορτία Ανέμου	17
2.4.3	Σεισμικά Φορτία	20
2.4.4	Δράσεις λόγω διαδικασίας καθαρισμού του θόλου	21
2.4.5	Συνδυασμοί φορτίσεων – Οριακές Καταστάσεις.....	22
3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΘΟΛΟΥ ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	25
3.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	25

3.2	ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΣΤΗ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	26
3.2.1	Συνδυασμοί φορτίσεων για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας.....	28
3.2.2	Συνδυασμοί φορτίσεων για την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας	29
3.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	30
3.3.1	Έλεγχος αντοχής των μελών του θόλου στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας	30
3.3.2	Υπολογισμός μετακινήσεων στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας.....	35
3.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	35
4	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΡΑΒΔΩΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΔΟΚΟΥ	37
4.1	ΓΕΝΙΚΑ	37
4.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΞΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΡΑΒΔΩΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΔΟΚΟΥ.....	38
4.2.1	Προσομοίωση με χρήση Standard και Warping beam elements.....	38
4.2.2	Προσομοίωση με χρήση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων	39
4.3	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ STANDARD BEAM ELEMENTS	40
4.3.1	Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (Linearized Buckling Analysis - LBA)	40
4.3.2	Μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας (GNA)	44
4.3.3	Μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού (GMNA).....	47
4.3.3.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων των αναλύσεων GNA και GMNA	50
4.3.4	Επιρροή αρχικών ατελειών στην συμπεριφορά των τόξων	51
4.3.5	Επιρροή θερμοκρασιακών φορτίων στην συμπεριφορά των τόξων	52
4.4	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ WARPING BEAM ELEMENTS	54
4.4.1	Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (Linearized Buckling Analysis - LBA)	54
4.4.2	Μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας (GNA)	56
4.4.3	Μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού (GMNA).....	59
4.4.3.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων των αναλύσεων GNA και GMNA	63
4.4.4	Επιρροή αρχικών ατελειών στην συμπεριφορά των τόξων	64
4.4.5	Επιρροή θερμοκρασιακών φορτίων στην συμπεριφορά των τόξων	66
4.5	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΡΟΠΩΝ-ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΩΝ.....	67
4.5.1	Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (Linearized Buckling Analysis - LBA)	67
4.5.2	Μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού (GMNA).....	70
4.6	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	73
4.6.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις αναλύσεις LBA	73
4.6.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις αναλύσεις GNA	73
4.6.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις αναλύσεις GMNA.....	74
4.7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	75
5	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	77
5.1	ΓΕΝΙΚΑ	77
5.2	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΞΩΝ ΜΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	78

5.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	80
5.3.1	Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (Linearized Buckling Analysis –LBA)	80
5.3.2	Μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας (GNA).....	84
5.3.3	Μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού (GMNA)	88
5.3.3.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων των αναλύσεων GNA και GMNA.....	95
5.3.4	Επιρροή αρχικών ατελειών στην συμπεριφορά των τόξων.....	97
5.3.5	Επιρροή θερμοκρασιακών φορτίων στην συμπεριφορά των τόξων	98
5.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΔΟΚΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	99
5.4.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις αναλύσεις LBA.....	99
5.4.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις αναλύσεις GNA.....	100
5.4.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις αναλύσεις GMNA	101
5.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	101
6	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΤΟΞΟΥ	105
6.1	ΓΕΝΙΚΑ	105
6.2	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΞΟΥ ΣΤΟ ΘΟΛΟ	106
6.2.1	Εντατικά μεγέθη που ασκούνται στο 9 ^ο τόξο εντός θόλου.....	106
6.2.2	Αστοχία και παραμόρφωση του 9 ^{ου} τόξου εντός θόλου	108
6.3	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΤΟΞΟΥ	109
6.3.1	Εντατικά μεγέθη στο μεμονωμένο τόξο	111
6.3.2	Αστοχία και παραμόρφωση στο μεμονωμένο τόξο	113
6.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	114
7	ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΟΞΟΥ	117
7.1	ΓΕΝΙΚΑ	117
7.2	ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ	118
7.2.1	Γεωμετρία της στήριξης.....	118
7.2.2	Χαρακτηριστικά στοιχεία κοχλιών	118
7.2.3	Προσομοίωση μοντέλου με χρήση λογισμικών	119
7.3	ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ	121
7.3.1	Αποτελέσματα μη γραμμικής ανάλυσης.....	122
7.3.2	Σύγκριση με τα αποτελέσματα του θόλου και με τη πραγματική στήριξη του έργου.125	
7.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	127
8	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	129
8.1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	129
8.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	130
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	134

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΕΡΓΟ “THE OVAL” ΣΤΗ ΛΕΜΕΣΟ ΚΥΠΡΟΥ

1.1.1 Γενικά στοιχεία

Το κτίριο «The Oval» βρίσκεται αυτή τη στιγμή υπό κατασκευή στη Λεμεσό της Κύπρου, από την εταιρία Cybarco. Το έργο αυτό προορίζεται να φιλοξενήσει κυρίως γραφεία, και βρίσκεται κοντά στο κέντρο της Λεμεσού με εύκολη πρόσβαση στη λεωφόρο. Θα αποτελέσει το υψηλότερο εμπορικό κτίριο στη Κύπρο, αποτελούμενο από 16 ορόφους και δύο υπόγεια πάρκινγκ, προσφέροντας ανεμπόδιστη θέα προς τη θάλασσα. Το όνομα του απορρέει από τον ασυνήθιστο και άκρως ενδιαφέρων αρχιτεκτονικό σχεδιασμό του, ο οποίος φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Οι διαστάσεις του κτιρίου διαφέρουν, λόγω του αρχιτεκτονικού σχήματός του, καθ' ύψος. Οι μεγαλύτερες οριζόντιες διαστάσεις εμφανίζονται στη μέση του ύψους το κτιρίου, οι οποίες είναι 35m × 23m, ενώ το συνολικό ύψος του, είναι περίπου 80m. Το κτίριο έχει επίσης σχεδιαστεί ώστε να είναι ενεργειακά «έξυπνο», με πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης βαθμού «Α» και χαμηλές εκπομπές CO₂. Η κατασκευή του έργου αναμένεται να έχει ολοκληρωθεί το Μάρτιο του 2017.



Εικόνα 1-1: Το κτίριο “The Oval” και οι τριγύρω περιοχές



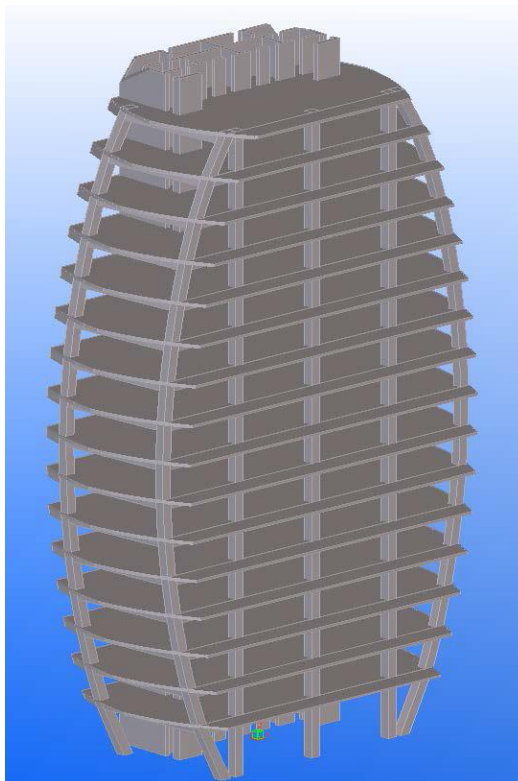
Εικόνα 1-2: Κοντινή μπροστινή όψη του κτιρίου



Εικόνα 1-3: Πλάγια όψη κτιρίου με άνοιγμα στη πλευρά του κτιρίου

1.1.2 Στατικό σύστημα του κτιρίου

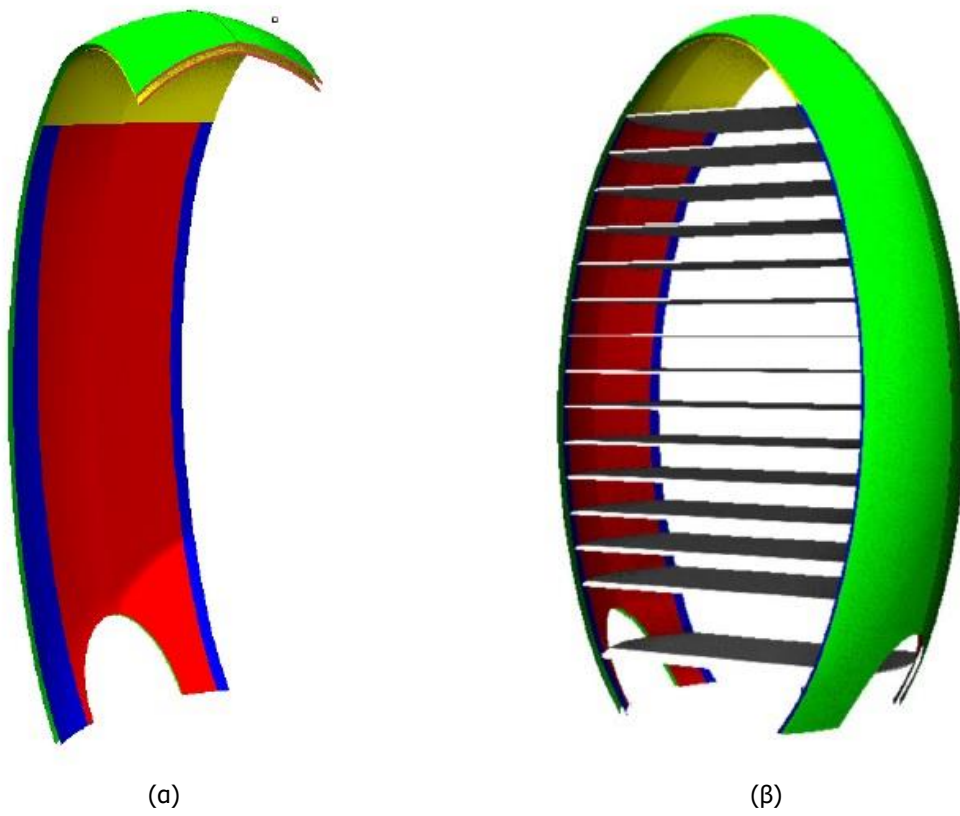
Η κύρια δομή του κτιρίου αποτελείται από έναν σκελετό οπλισμένου σκυροδέματος, με τους κάθετους τοίχους που είναι τοποθετημένοι γύρω από τα κλιμακοστάσια και τα φρεάτια των ανελκυστήρων να αποτελούν φέροντα στοιχεία της κατασκευής, που παραλαμβάνουν κυρίως τις οριζόντιες δυνάμεις οι οποίες πιθανώς να ασκηθούν στο κτίριο. Μια τρισδιάστατη όψη του σκελετού από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να φανεί στην Εικόνα 1-4. Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας αυτής, δεν δίνονται περαιτέρω λεπτομέρειες για το σχεδιασμό του σκελετού από οπλισμένο σκυρόδεμα.



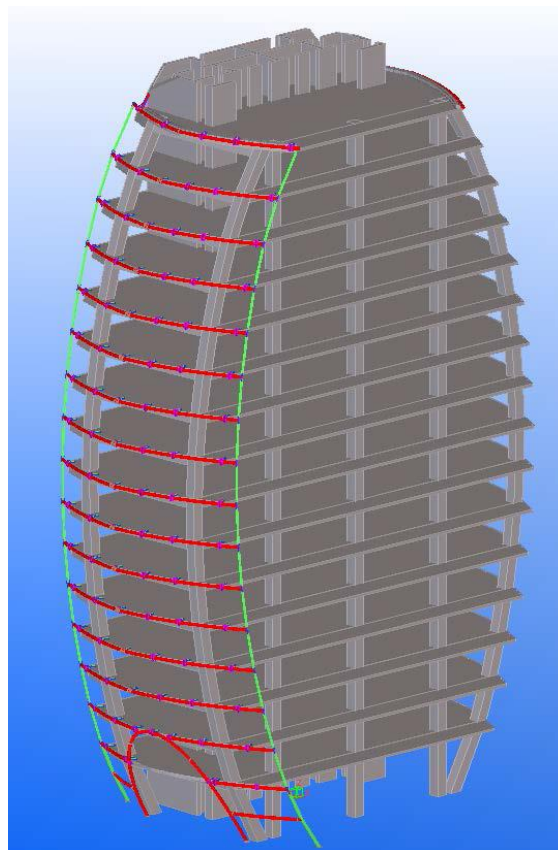
Εικόνα 1-4: Τρισδιάστατη όψη του σκελετού από οπλισμένο σκυρόδεμα

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη κατασκευή του κτιρίου αυτού παρουσιάζει η επένδυση, σχήματος οβάλ, η οποία καλύπτει τον κύριο σκελετό, και ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η στήριξη της. Η επένδυση αυτή αποτελείται, όπως φαίνεται από την Εικόνα 1-5, από τις εξωτερικές επιφάνειες που καλύπτουν την ανατολική και δυτική μεριά του κτιρίου, τις αντίστοιχες εσωτερικές επιφάνειες στη νότια και βόρεια όψη του κτιρίου, αλλά και τις επιφάνειες θόλου στη κορυφή του κτιρίου. Η στήριξη των επιφανειών της επένδυσης στη δυτική και ανατολική μεριά του θόλου γίνεται με τον τρόπο που φαίνεται στην Εικόνα 1-6. Τα σημαντικότερα μέλη που λειτουργούν για τη στήριξη των επιφανειών της επένδυσης στα πλάγια του κτιρίου είναι οι μηκίδες που έχουν τοποθετηθεί και φαίνονται με κόκκινο χρώμα στην Εικόνα 1-6. Οι μηκίδες αυτές είναι τοποθετημένες σε κάθε όροφο, και αποτελούνται από διατομές CHS219 με πάχη ίσα με 8mm, 10mm ή 12,5mm ανάλογα με τη θέση τους, και είναι καταλλήλως κοχλιωμένες στο σκυρόδεμα του κυρίου σκελετού του κτιρίου.

Όπως παρατηρείται στους τρεις κατώτερους ορόφους, έχει τοποθετηθεί επίσης τόξο, το οποίο είναι και αυτό διατομής CHS219, που εμφανίζει καμπυλότητα και κατά τα δύο επίπεδα με σκοπό να εξυπηρετηθεί η στήριξη της επένδυσης στο σημείο όπου υπάρχει το άνοιγμα. Στις δυτικές και ανατολικές άκρες τους, οι μηκίδες των γειτονικών ορόφων ενώνονται με τη βοήθεια ενός μέλους διατομής CHS139, το οποίο φαίνεται με πράσινο χρώμα στην Εικόνα 1-6, και έχει κυρίως γεωμετρικούς σκοπούς, χωρίς να παρουσιάζει ιδιαίτερη φέρουσα λειτουργία. Τέλος στη κορυφή του κτιρίου βρίσκεται ο προς εξέταση χαλύβδινος θόλος, στον οποίο στηρίζεται η επένδυση σε εκείνο το σημείο του κτιρίου. Ο θόλος αυτός αποτελείται από δέκα καμπύλα τόξα διπλού ταυ, τεγίδες και διαγώνιους συνδέσμους. Η γεωμετρία του παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο, μαζί με τις φορτίσεις τις οποίες δέχεται. Ο σχεδιασμός του χαλύβδινου θόλου αυτού αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



Εικόνα 1-5: Επένδυση κτιρίου



Εικόνα 1-6: Μέλη στήριξης επένδυσης κτιρίου

1.1.3 Τρέχουσα πρόοδος του έργου

Τη χρονική στιγμή που συντάχθηκε η παρούσα εργασία, η κατασκευή του κτιρίου, η οποία ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 2014, οδεύει προς την ολοκλήρωση της. Το Σεπτέμβριο του 2016, οι κατασκευαστικές δραστηριότητες φαίνονται να σημειώνουν ταχεία πρόοδο. Οι εργασίες πάνω στο κύριο σκελετό του κτιρίου, που αποτελείται από σκυρόδεμα, έχουν τελειώσει, όπως επίσης έχει τελειώσει και η εγκατάσταση των στηρίξεων, που παρουσιάστηκαν παραπάνω, για την οβάλ επένδυση του κτιρίου. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-7 έχει τοποθετηθεί στην κορυφή του κτιρίου εξ ολοκλήρου ο χαλύβδινος θόλος, που αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Επίσης σε προχωρημένο στάδιο είναι και η τοποθέτηση του εξωτερικού κελύφους που προσδίδει το οβάλ σχήμα της κατασκευής με δύο από τα 6 συνολικά στρώματα, από τα οποία αποτελείται, να έχουν ήδη τοποθετηθεί, ενώ τα επόμενα δύο αναμένονται να έχουν τοποθετηθεί μέχρι το τέλος Οκτωβρίου. Η τοποθέτηση ολόκληρου του κελύφους του κτιρίου αναμένεται να έχει ολοκληρωθεί μέχρι τον Ιανουάριο του 2017.

Οι εργασίες στο εσωτερικό του κτιρίου οδεύουν και αυτές προς την ολοκλήρωση τους, αφού έχει ήδη σημειωθεί το 75% του συνόλου τους και αναμένονται να έχουν τελειώσει με το τέλος του χρόνου. Οι ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις έχουν, επίσης, ολοκληρωθεί στο μεγαλύτερο βαθμό τους, με την πρόοδο τους να είναι στο 80%, ενώ έχει ολοκληρωθεί η τοποθέτηση συστημάτων πυρασφάλειας, αλλά και εξαερισμού. Έχουν τοποθετηθεί, επίσης, και τρεις από τους τέσσερις ανελκυστήρες που θα λειτουργήσουν στο κτίριο. Στο τέλος του Οκτωβρίου, θα γίνει η αποσύνθεση του γερανού και οι πρώτοι ενοικιαστές θα αρχίσουν να εισέρχονται στο κτίριο προς τα τέλη του Μαρτίου.



Εικόνα 1-7: Πρόοδος ολοκλήρωσης του έργου, Σεπτέμβριος 2016

1.2 ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

Το βασικότερο εργαλείο για τον κανονιστικό σχεδιασμό των κατασκευών στα χέρια του μελετητή είναι το πλέγμα των Ευρωκωδίκων, μέσω του οποίου καλύπτονται τα περισσότερα θέματα τα οποία αναφύονται κατά το σχεδιασμό μιας κατασκευής. Το πλέγμα αυτό περιλαμβάνει τα παρακάτω Ευρωπαϊκά Πρότυπα:

- EN 1990 Ευρωκώδικας 0: Βασικές αρχές σχεδιασμού
- EN 1991 Ευρωκώδικας 1: Δράσεις
- EN 1992 Ευρωκώδικας 2: Σχεδιασμός Κατασκευών από Σκυρόδεμα
- EN 1993 Ευρωκώδικας 3: Σχεδιασμός Κατασκευών από Χάλυβα
- EN 1994 Ευρωκώδικας 4: Σχεδιασμός Σύμμικτων Κατασκευών από Χάλυβα και Σκυρόδεμα
- EN 1995 Ευρωκώδικας 5: Σχεδιασμός Κατασκευών από Ξύλο
- EN 1996 Ευρωκώδικας 6: Σχεδιασμός Κατασκευών από Τοιχοποιία
- EN 1997 Ευρωκώδικας 7: Γεωτεχνικός Σχεδιασμός
- EN 1998 Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός
- EN 1999 Ευρωκώδικας 9: Σχεδιασμός Κατασκευών από Αλουμίνιο

Κάθε ένα από τα παραπάνω πρότυπα περιλαμβάνει διάφορα μέρη, με τα οποία καλύπτονται σχεδόν όλα τα σχετικά αντικείμενα για τον σχεδιασμό κάθε είδους κατασκευής. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει τη μόρφωση, την ανάλυση και τη διαστασιολόγηση της κατασκευής.

Μέσω του κανονιστικού σχεδιασμού, τίθεται το ζήτημα για τον μελετητή, εκπλήρωσης των βασικών απαιτήσεων του. Ο φορέας πρέπει να σχεδιάζεται και να κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε, με κατάλληλο βαθμό αξιοπιστίας και κατά οικονομικό τρόπο, να αντιμετωπίζει όλες τις δράσεις και τις επιδράσεις από το περιβάλλον, οι οποίες είναι πιθανό να εμφανιστούν κατά την εκτέλεση και τη διάρκεια ζωής του και να παραμένει κατάλληλος για τη χρήση για την οποία προορίζεται σε όλη τη διάρκεια αυτή. Ο φορέας πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να είναι επαρκής ως προς την αντοχή, τη λειτουργικότητα αλλά και την ανθεκτικότητά του, ενώ και σε περίπτωση πυρκαγιάς, η αντοχή του φορέα πρέπει να είναι επαρκής για δεδομένο χρονικό διάστημα.

Αφού προσδιοριστούν και υπολογιστούν οι δράσεις και οι συνδυασμοί με τους οποίους αυτές επενεργούν στην κατασκευή σε όλη τη διάρκεια της ζωής της σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, στόχος για το μελετητή είναι να διαπιστωθεί αν για τους συνδυασμούς αυτούς, για κάθε μέλος και σε κάθε διατομή του φέροντα οργανισμού, τα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη ικανοποιούν τη βασική επιταγή του ελέγχου επάρκειας.

1.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

Το βασικό μέλημα του μηχανικού είναι ο σχεδιασμός ασφαλών κατασκευών με τη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση υλικού και, κατ' επέκταση κόστους. Τα μέσα τα οποία διαθέτει ώστε να πετύχει τον σκοπό αυτό όμως εξελίσσονται συνεχώς. Σήμερα είναι δυνατή η οριακή εκμετάλλευση του υλικού των δομικών στοιχείων, καθώς γίνεται χρήση δομικών υλικών υψηλής αντοχής, αλλά και χάρη στην εξέλιξη των μεθόδων κατεργασίας που δίνουν τη δυνατότητα παραγωγής δομικών μελών με κάθε επιθυμητό σχήμα και πάχος διατομής. Η εφαρμογή ακριβέστερων και πιο αξιόπιστων μεθόδων ανάλυσης επίσης γίνεται δυνατή με τη συνεχόμενη τεχνολογική εξέλιξη, με τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τα αντίστοιχα λογισμικά να προσφέρουν σημαντική βοήθεια στο έργο του μηχανικού.

Δημιουργείται, λοιπόν, η τάση οι σημερινές κατασκευές να είναι περισσότερο εύκαμπτες, σε επίπεδο φορέα συνολικά, αλλά και τοπικά, σε επίπεδο μέλους και διατομής, να παρουσιάζουν, δηλαδή, εντονότερες παραμορφώσεις όταν φορτίζονται. Οι έντονες παραμορφώσεις αυτές που εμφανίζονται στο φορέα έχουν ως συνέπεια, στη στατική συμπεριφορά του φορέα, το γεγονός ότι η κατασκευή ενδέχεται να οδηγηθεί σε μορφές αστοχίας που είναι γνωστές με τον όρο «αστάθεια» ή «λυγισμός», οι οποίες συνδέονται με την απότομη και έντονη αύξηση των παραμορφώσεων στο φορέα για μικρή αύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων. Άλλη μία συνέπεια που οφείλεται στις έντονες παραμορφώσεις του φορέα είναι ότι πλέον η παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα διαφέρει σημαντικά από την απαραμόρφωτη. Έτσι είναι απαραίτητο να γίνεται η διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας στην παραμορφωμένη γεωμετρία και όχι στη απαραμόρφωτη, όπως γίνεται στις κλασικές μεθόδους στατικής ανάλυσης, ώστε να αποφευχθούν τα πιθανά σφάλματα. Γι' αυτούς τους λόγους καταργείται η αναλογία μεταξύ των επιβαλλόμενων φορτίων και της αναπτυσσόμενης έντασης και παραμόρφωσης, κάτι που χαρακτηρίζεται και ως γεωμετρικά μη γραμμική συμπεριφορά.

Οι έλεγχοι αντοχής των κατασκευών, παλαιότερα, γίνονταν με τη μέθοδο των επιτρεπόμενων τάσεων, δηλαδή οι αναπτυσσόμενες τάσεις σε οποιαδήποτε θέση του φορέα δεν θα έπρεπε να υπερβαίνουν τις μέγιστες τιμές τους, οι οποίες ήταν ίσες με το όριο διαρροής του υλικού διαιρεμένο με κάποιον κατάλληλο συντελεστή ασφαλείας. Επομένως δεν επιτρεπόταν η υπερφόρτιση των κατασκευών που θα οδηγούσε τα δομικά υλικά σε μετελαστική συμπεριφορά σε οποιαδήποτε θέση. Πλέον, οι έλεγχοι γίνονται με μεθόδους συνολικής αντοχής και για κάποιες ακραίες περιπτώσεις επιτρέπεται ακόμα και η είσοδος των υλικών στην μετελαστική περιοχή, σε προκαθορισμένες βεβαίως θέσεις και υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Η τοπική αυτή υπέρβαση του ορίου διαρροής του δομικού υλικού οδηγεί επίσης σε κατάργηση της αναλογίας μεταξύ επιβαλλόμενων φορτίων και αναπτυσσόμενης έντασης και παραμόρφωσης και χαρακτηρίζεται ως μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού.

Συμπερασματικά, μια κατασκευή μπορεί να αστοχήσει είτε λόγω μη γραμμικότητας γεωμετρίας είτε λόγω μη γραμμικότητας υλικού είτε λόγω συνδυασμού των δύο αυτών φαινομένων. Στο σχεδιασμό των κατασκευών είναι απαραίτητο, πλέον, να λαμβάνεται υπόψη και οι δύο αυτές μορφές της μη γραμμικότητας, ώστε να προσδιορίζεται η συνολική αντοχή τους. Συνήθως, η αστοχία λόγω μη γραμμικότητας υλικού εμφανίζεται σε δύσκαμπτους φορείς, οι οποίοι δεν είναι επιρρεπείς σε έντονες παραμορφώσεις, ενώ η αστοχία λόγω μη γραμμικότητας γεωμετρίας φαίνεται να είναι κρίσιμη σε εύκαμπτους φορείς. Σε φορείς μέσης δυσκαμψίας μπορεί να εμφανιστεί συνδυασμένη μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας εξετάζεται και ο κανονιστικός σχεδιασμός αλλά και οι μη γραμμικές αναλύσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εμφανίζεται στη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τους δύο τύπους αναλύσεων. Στα αποτελέσματα του κανονιστικού σχεδιασμού γίνεται έλεγχος των μελών του φορέα, με εξαγωγή των τελικών βαθμών αξιοποίησής του κάθε μέλους. Οι μη γραμμικές αναλύσεις, ωστόσο, προσφέρουν το πλεονέκτημα ότι μπορεί να φανεί αναλυτικά η συμπεριφορά του φορέα ακόμα και μετά την πρώτη αστοχία που θα εμφανιστεί σε οποιοδήποτε σημείο του φορέα και να γίνει κατανοητό το αν ο φορέας αυτός εμφανίζει ή όχι μεταλυγισμική αντοχή. Είναι δυνατόν για τον φορέα να εμφανίζει τη δυνατότητα να παραλάβει παραπάνω φορτία ακόμα και μετά την αστοχία σε κάποιο σημείο του, κάτι που μπορεί να βοηθήσει τον μελετητή στην καλύτερη αξιοποίηση και εξοικονόμηση υλικού. Ακόμα μέσω των μη γραμμικών αναλύσεων δίνεται η δυνατότητα να γίνει κατανοητός ο τρόπος και ο λόγος για τον οποίο αστοχεί ο φορέας. Γίνεται κατανοητό, επίσης, σε ποια από τις παραπάνω κατηγορίες αστοχίας που περιγράφηκαν ανήκει ο εν λόγω φορέας, αν δηλαδή η αστοχία που εμφανίζεται είναι λόγω μη γραμμικότητας υλικού, ή λόγω μη γραμμικότητας γεωμετρίας.

1.4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΘΟΛΟΥ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, εξετάζεται αποκλειστικά ο σχεδιασμός και η μελέτη της συμπεριφοράς του θόλου που βρίσκεται στη κορυφή του σκελετού από οπλισμένο σκυρόδεμα και αποτελεί τη στήριξη της οβάλ επένδυσης του κτιρίου στο σημείο αυτό. Ο σχεδιασμός αυτός στα πλαίσια της εργασίας γίνεται μέσω κανονιστικής προσέγγισης και στη συνέχεια μέσω μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων. Σκοπός είναι να φανεί η συμπεριφορά του φορέα, αλλά και να γίνει έλεγχος για την αντοχή του με του δύο τρόπους αυτούς και να γίνει τελικά μία σύγκριση των αποτελεσμάτων. Ο κανονιστικός σχεδιασμός έχει γίνει με τη βοήθεια του λογισμικού SAP2000 και ο σχεδιασμός μέσω μη γραμμικών αναλύσεων με χρήση του λογισμικού ADINA.



(α)



(β)

Εικόνα 1-8: Ταράτσα κτιρίου κάτω από τον χαλύβδινο θόλο

Αρχικά στην εργασία, στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται λεπτομερής περιγραφή της γεωμετρίας του χαλύβδινου θόλου. Εν συντομία, ο θόλος αποτελείται από δέκα τόξα διατομής διπλών ταυ, της τεγίδες διατομής διπλού RHS και διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας διατομής CHS. Γίνεται, επίσης, λόγος στο κεφάλαιο αυτό για τα κριτήρια σχεδιασμού τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον κανονιστικό σχεδιασμό, ποιοι, δηλαδή, από τους Ευρωκώδικες χρησιμοποιήθηκαν, αλλά και οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τη προσομοίωση του θόλου κατά το κανονιστικό σχεδιασμό, αλλά και των μη γραμμικών αναλύσεων. Στη συνέχεια, στο επόμενο κεφάλαιο, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τον κανονιστικό σχεδιασμό του θόλου μέσω του λογισμικού SAP2000 αλλά και μέσω αναλυτικών υπολογισμών. Έχουν προκύψει για κάθε μέλος του φορέα οι βαθμοί αξιοποίησης του, δηλαδή οι λόγοι δράσεων προς την αντοχή, για συνδυασμούς φόρτισης Οριακής Κατάστασης Αστοχίας, ενώ υπολογίστηκαν και οι μέγιστες μετακινήσεις που εμφανίζονται στον θόλο για συνδυασμούς φόρτισης Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας.

Στα επόμενα δύο κεφάλαια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις που έγιναν για το θόλο με χρήση του λογισμικού ADINA. Στο τρίτο κεφάλαιο, συγκεκριμένα, έχουν γίνει αναλύσεις με χρήση ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων δοκού (beam elements) με την προσομοίωση να γίνεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους, τους οποίους επιτρέπει το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε. Έγινε γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού (LBA), ανάλυση με τη θεώρηση μη γραμμικότητας γεωμετρίας (GNA) και ανάλυση με τη θεώρηση μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού (GMNA). Στη συνέχεια εξετάζεται η επιρροή των ατελειών αλλά και των θερμοκρασιακών φορτίων στην συμπεριφορά των τόξων του φορέα. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των διαφορετικών τρόπων προσομοίωσης του μοντέλου με χρήση πεπερασμένων στοιχείων δοκού. Στο τέταρτο κεφάλαιο, έχουν γίνει και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις αναλύσεις για την περίπτωση που η προσομοίωση των τόξων γίνεται με

επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Γίνεται και σε αυτό το κεφάλαιο σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των περιπτώσεων προσομοίωσης με επιφανειακά στοιχεία και με στοιχεία δοκού του προηγούμενου κεφαλαίου. Γίνεται επίσης σύγκριση, στα συμπεράσματα του κεφαλαίου, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον κανονιστικό σχεδιασμό του θόλου.

Στο έκτο κεφάλαιο εξετάζεται η συμπεριφορά του κρίσιμου, για το θόλο, τόξου, όταν αυτό λειτουργεί μεμονωμένα. Γίνεται, επίσης, σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, με τη συμπεριφορά του τόξου όταν αυτό βρίσκεται εντός του θόλου, ώστε να γίνει κατανοητό το πόσο επηρεάζει η συνολική συμπεριφορά του θόλου στο τόξο αυτό. Τέλος, στο έβδομο, και τελευταίο κεφάλαιο του κυρίου μέρους της εργασίας αυτής, εξετάζεται λεπτομερώς και με μεγαλύτερη ακρίβεια η στήριξη ενός από τα τόξα, με σκοπό τη διερεύνηση της αντοχής της αλλά και του τρόπου αστοχίας της για μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού.

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ, ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΤΟΥ ΘΟΛΟΥ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

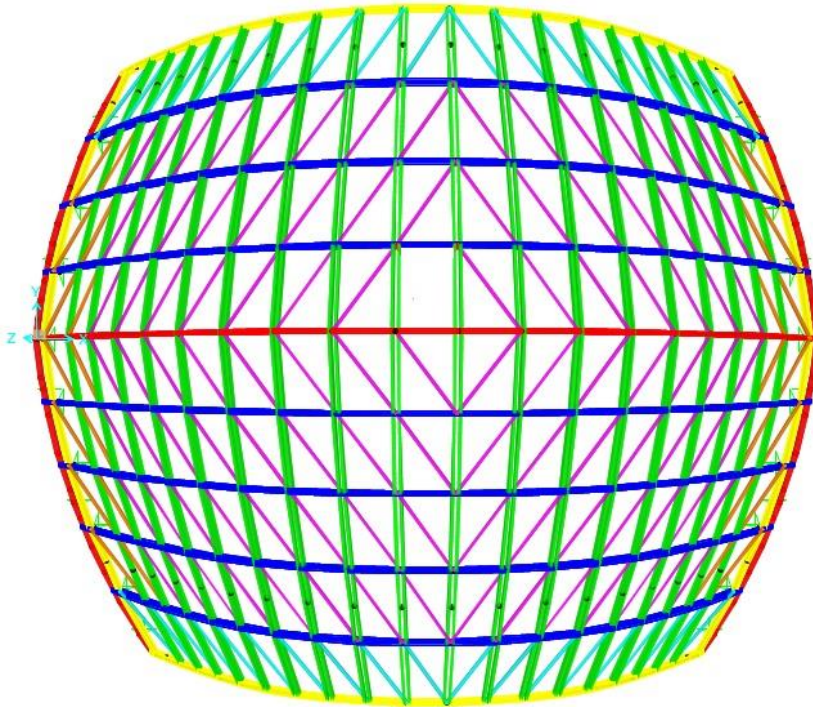
Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η γεωμετρία του θόλου, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό του, μαζί με τις αντίστοιχες ιδιότητες τους, ενώ, τέλος παρουσιάζονται οι φορτίσεις οι οποίες ασκούνται στον φορέα, οι πιθανοί συνδυασμοί τους και ποιος από αυτούς τελικά επιλέχθηκε για τον σχεδιασμό του θόλου με τις μη γραμμικές αναλύσεις. Αρχικά παρουσιάζεται η γεωμετρία του φορέα, μαζί με τις διατομές που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μέλος του. Παρουσιάζονται, επίσης, εικόνες από σχέδια των συνδέσεων ώστε να γίνει κατανοητό στον αναγνώστη με ποιον τρόπο γίνεται η στήριξη των τόξων, αλλά και οι ενώσεις μεταξύ των μελών, όπως είναι οι ενώσεις μεταξύ τεγιδών και διαγώνιων συνδέσεων δυσκαμψίας με τα τόξα. Στη συνέχεια πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή από τον αναγνώστη, καθώς γίνεται η αρίθμηση των τόξων, των οποίων η συμπεριφορά είναι το κύριο αντικείμενο της εργασίας, αλλά και η παρουσίαση τους στο χώρο σε σχέση με τα σημεία του ορίζοντα. Η τρισδιάστατη φύση του μοντέλου μπορεί να αποτελέσει παράγοντα σύγχυσης στην κατανόηση της συμπεριφοράς του και γι' αυτό το λόγο στο υπόλοιπο της εργασίας θα τηρηθεί αυστηρά η αρίθμηση-ονομασία που θα δοθεί παρακάτω στο κάθε τόξο.

Στο δεύτερο κυρίως μέρος του κεφαλαίου περιγράφονται οι κανονισμοί που χρησιμοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό μέσω κανονιστικής προσέγγισης, ο οποίος περιγράφεται στο 3^ο κεφάλαιο της εργασίας. Παρουσιάζεται, επίσης, ο τύπος και η ποιότητα των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση αλλά και την κατασκευή του θόλου, δηλαδή ο τύπος δομικού χάλυβα, ο τύπος χάλυβα των κοχλιών και αγκυριών αλλά και ο τύπος σκυροδέματος μαζί με τις ιδιότητες του κάθε υλικού.

Τέλος, γίνεται περιγραφή των φορτίων που επενεργούν στον θόλο. Οι φορτίσεις αυτές αποτελούνται από τα μόνιμα φορτία, τις φορτίσεις ανέμου, τις σεισμικές δράσεις και τα φορτία που προκαλούνται από την διαδικασία καθαρισμού και επίβλεψης της επικάλυψης του θόλου. Περιγράφεται ποια από αυτά τα φορτία μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους και πως επιλέχθηκε ο κρισιμότερος συνδυασμός φορτίσεων με βάση τον οποίο έγινε ο μη γραμμικός σχεδιασμός. Περιγράφονται επίσης οι Οριακές Καταστάσεις Αστοχίας και Λειτουργικότητας και οι συντελεστές ασφαλείας που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε περίπτωση.

2.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΘΟΛΟΥ

Ο θόλος ο οποίος εξετάζεται στη παρούσα εργασία αποτελείται από δέκα τόξα διατομής διπλών ταυ, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με την παρουσία τεγιδών και διαγώνιων συνδέσμων. Στη βάση του φορέα υπάρχουν επίσης οι μηκίδες του τελευταίου ορόφου του κτιρίου στις οποίες στηρίζονται και τα δύο ακριανά τόξα του θόλου. Στην παρακάτω Εικόνα 2-1 φαίνεται η τρισδιάστατη όψη του μοντέλου του θόλου όπου με διαφορετικά χρώματα παρουσιάζονται τα μέλη με διαφορετικές διατομές. Ο Πίνακας 2-1 παρουσιάζει τις διατομές του κάθε μέλους του φορέα, σε αντιστοίχιση με το χρώμα του καθενός.

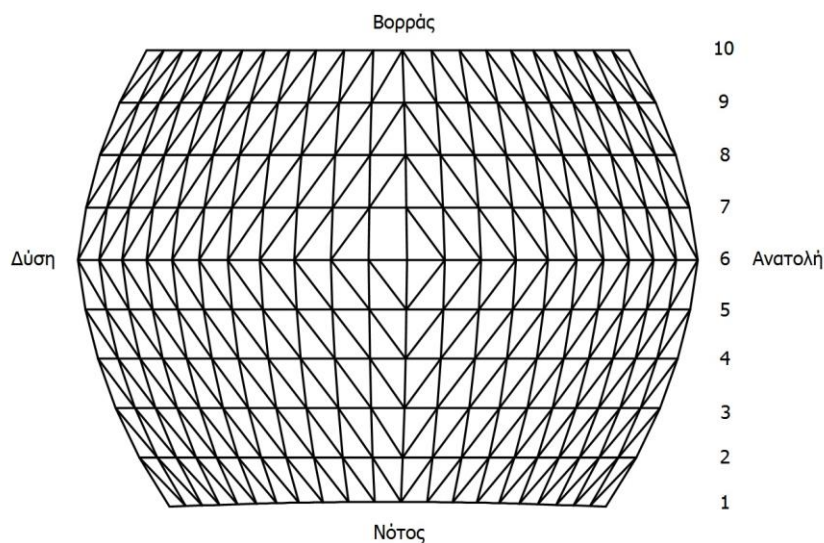


Εικόνα 2-1: Τρισδιάστατη όψη του μοντέλου του θόλου

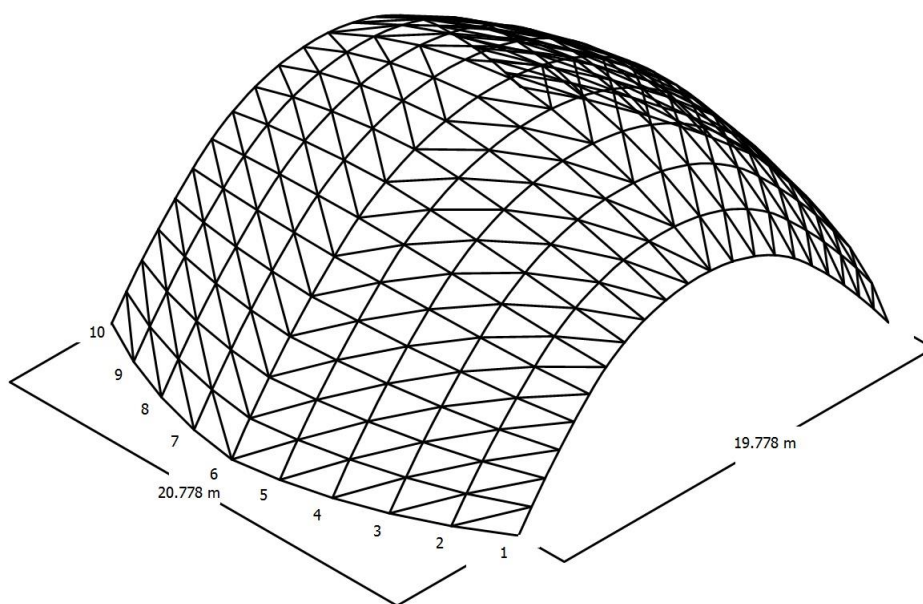
Πίνακας 2-1: Διατομές μελών του θόλου σε σχέση με τα χρώματα από την Εικόνα 2-1

Εξωτερικά τόξα – Κίτρινο	Συγκολλητές διατομές διπλού ταυ: Πέλματα: 135/30, Κορμός: 170/15
Εσωτερικά τόξα – Μπλε	Συγκολλητές διατομές διπλού ταυ: Πέλματα: 135/15, Κορμός: 240/8
Κεντρικό τόξο – Κόκκινο	Συγκολλητή διατομή διπλού ταυ: Πέλματα: 135/25, Κορμός: 220/12
Τεγίδες – Πράσινο	Διπλή διατομή RHS160/80/5.0
Διαγώνιοι Σύνδεσμοι – Μωβ	CHS88.9/4.0
Διαγώνιοι Σύνδεσμοι - Πορτοκαλί	CHS114.3/8.0
Διαγώνιοι Σύνδεσμοι – Γαλάζιο	CHS101.6/5.0
Μηκίδες τελευταίου ορόφου-Κόκκινο	CHS219/8.0

Στη συνέχεια και στην Εικόνα 2-2 όπου φαίνεται η άνοψη των μελών του θόλου γίνεται αρίθμηση των τόξων και υποδεικνύεται η θέση του σε σχέση με τα σημεία του ορίζοντα. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία από τον αναγνώστη στο σημείο αυτό καθώς η αρίθμηση του κάθε τόξου σε συνδυασμό με τα σημεία του ορίζοντα, θα χρησιμοποιηθούν σε ολόκληρη την έκταση της εργασίας με σκοπό να περιγράψουν και να προσδιορίσουν καλύτερα τα σημεία τα οποία, από τις αναλύσεις, θα χρίζουν προσοχής. Σημειώνεται ότι στο μοντέλο στο οποίο έχουν γίνει οι αναλύσεις, τα θετικά του άξονα Y δείχνουν από τον Νότο στον Βορρά, ενώ τα θετικά του άξονα X από τη Δύση προς την Ανατολή. Ακολουθεί η Εικόνα 2-3 όπου φαίνεται η Νοτιοδυτική όψη του θόλου, συμπεριλαμβανομένων των αριθμήσεων του κάθε τόξου αλλά και των διαστάσεων του θόλου, ώστε να γίνει ευκολότερα κατανοητή η γεωμετρία του θόλου. Ο Πίνακας 2-2 ο οποίος φαίνεται παρακάτω παρουσιάζει τα μήκη του κάθε τόξου ξεχωριστά.



Εικόνα 2-2: Άνοψη Θόλου, αρίθμηση τόξων και σημεία ορίζοντα

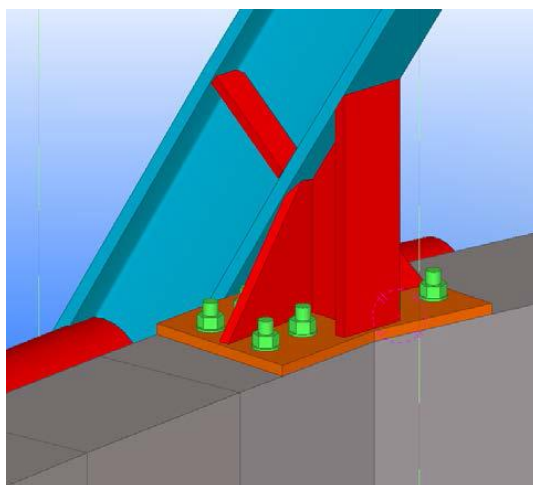


Εικόνα 2-3: Νοτιοδυτική όψη θόλου

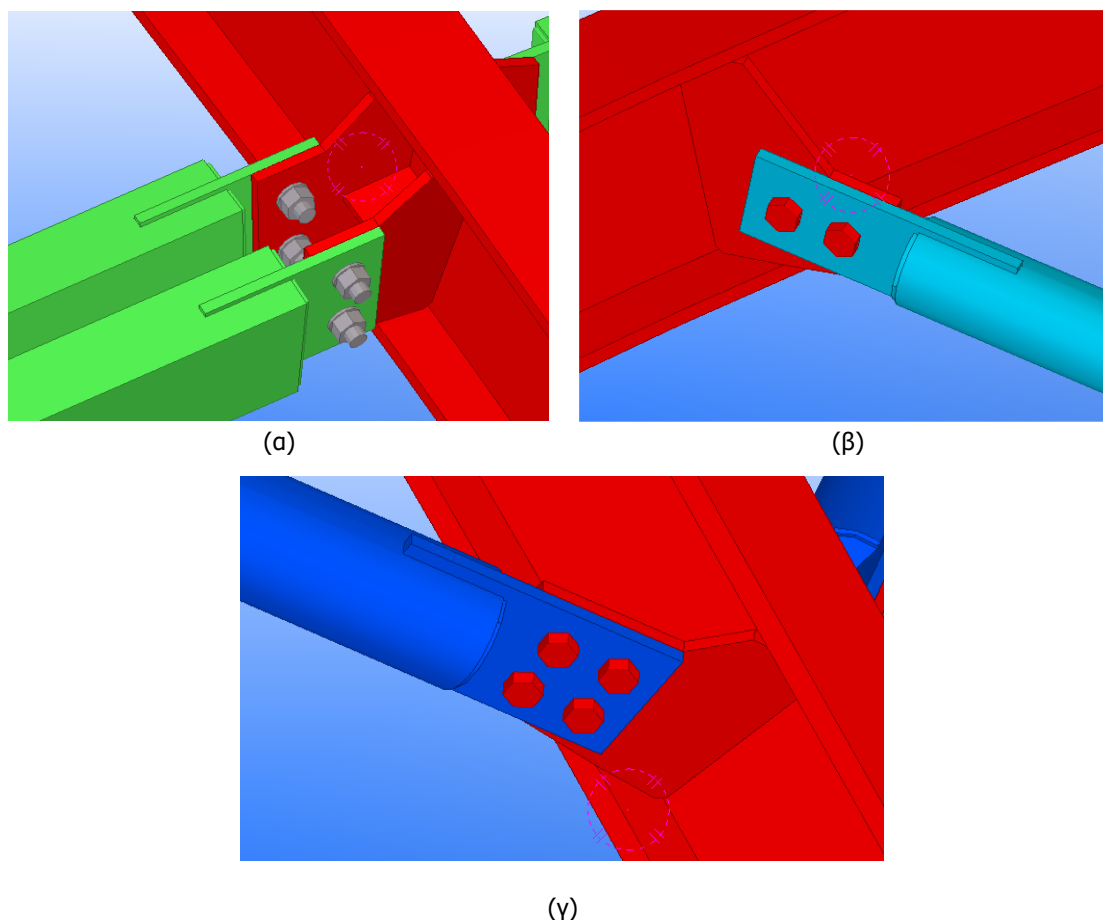
Πίνακας 2-2: Μήκη τόξων

Αριθμός Τόξου	Μήκος Τόξου (m)
1	25,19
2	28,72
3	31,64
4	33,85
5	35,43
6	36,37
7	35,34
8	33,61
9	31,14
10	27,86

Στο τελευταίο κεφάλαιο του κύριου μέρους της εργασίας εξετάζεται η σύνδεση ενός από τα τόξα στη στήριξη του με τη βάση από σκυρόδεμα. Αυτός ο έλεγχος είναι πολύ σημαντικός μιας και όπως θα φανεί στα παρακάτω κεφάλαια, μέσα στα σημεία του θόλου τα οποία καταπονούνται περισσότερο λόγω των φορτίσεων είναι και οι στηρίξεις των τόξων. Γι' αυτό το λόγο παρουσιάζονται παρακάτω εικόνες με σχέδια από τις βασικές συνδέσεις που συναντούνται στο θόλο. Στην Εικόνα 2-4 φαίνεται η σύνδεση στη βάση των τόξων με το σκυρόδεμα. Αυτή η σύνδεση αναφέρεται στα εσωτερικά τόξα του θόλου, καθώς τα δύο εξωτερικά τόξα στηρίζονται απευθείας στη μηκίδα του τελευταίου ορόφου και όχι στο σκυρόδεμα. Από την Εικόνα 2-4 φαίνεται ότι για η στήριξη των τόξων στο σκυρόδεμα γίνεται με τη συγκόλλησης με βοηθητικό μέλος το οποίο με τη σειρά του συνδέεται μέσω ελάσματος και 8 κοχλιών τύπου M27 και ποιότητας 8.8 με το σκυρόδεμα. Στην Εικόνα 2-5 φαίνονται οι συνδέσεις των υπόλοιπων μελών με τα τόξα. Οι συνδέσεις αυτές γίνονται μέσω συγκολλητών ελασμάτων και κοχλιών τύπου M20 και ποιότητας 8.8. Παρουσιάζονται, πιο συγκεκριμένα, οι συνδέσεις των τεγιδών με τα τόξα (α) και οι συνδέσεις των διαγώνιων συνδέσμων διατομής CHS88.9/4.0 (β) και διατομής CHS114.3/8.0 (γ) με τα τόξα.



Εικόνα 2-4: Σύνδεση στη στήριξη των εσωτερικών τόξων



Εικόνα 2-5: Σύνδεση τεγιδών με τόξα (α), σύνδεση διαγώνιων συνδέσμων διατομής CHS88.9/4.0 με τόξα (β), σύνδεση διαγώνιων συνδέσμων διατομής CHS114.3/8.0 με τόξα (γ)

2.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ – ΚΩΔΙΚΕΣ, ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

2.3.1 Κώδικες και κανονισμοί που χρησιμοποιήθηκαν

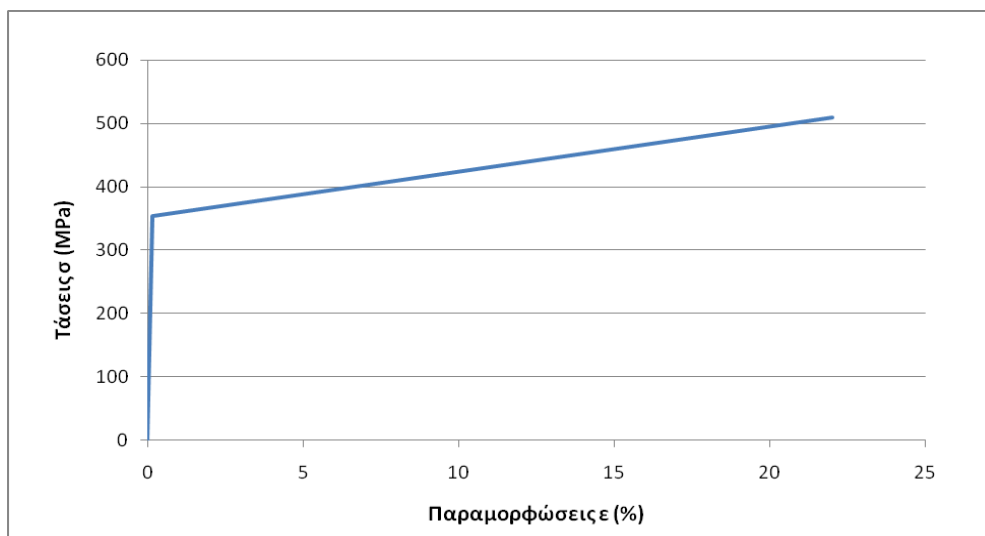
Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας αυτής παρουσιάζεται ο συμβατικός κανονιστικός σχεδιασμός του θόλου, τα αποτελέσματα του οποίου στη συνέχεια θα συγκριθούν με τον σχεδιασμό με αριθμητικές μη γραμμικές μεθόδους. Ο κανονιστικός σχεδιασμός έγινε με βάση τους ευρωκώδικες αλλά και τα Εθνικά Προσαρτήματα της Κύπρου. Από όλα τα κεφάλαια των Ευρωκωδίκων που αναφέρθηκαν στην Εισαγωγή, αυτά που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα παρακάτω:

- EN1990 (EC0): Basis of Structural Design – Βάσεις Σχεδιασμού
- EN1991 (EC1): Actions on Structures – Δράσεις στις Κατασκευές
- EN1993 (EC2): Design of Concrete Structures – Σχεδιασμός Κατασκευών από Σκυρόδεμα
- EN1993 (EC3): Design of Steel Structures – Σχεδιασμός Μεταλλικών Κατασκευών
- EN1998 (EC8): Design of Structures for Earthquake Resistance – Αντισεισμικός Σχεδιασμός των Κατασκευών

2.3.2 Υλικά και ιδιότητές τους

Παρακάτω παραθέτονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό του θόλου – δομικός χάλυβας S355 για τα μέλη του θόλου, κοχλίες ποιότητας 8.8 και σκυρόδεμα C35/45. Περιγράφονται επίσης τα χαρακτηριστικά στοιχεία τους και οι βασικές ιδιότητές τους. Ο δομικός χάλυβας θεωρείται απλοποιημένα υλικό γραμμικό-ελαστικό-πλαστικό με κράτυνση με αντίστοιχη τάση θραύσης $\epsilon_u = 0.22$. Ο νόμος του υλικού περιγράφεται στο παρακάτω εξιδανικευμένο διγραμμικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων που φαίνεται στο Σχήμα 2-1.

- Δομικός Χάλυβας S355: $f_y = 355 \text{MPa}$ (όριο διαρροής χάλυβα)
 $f_u = 510 \text{MPa}$ (όριο θραύσης χάλυβα)
 $E = 210000 \text{MPa}$ (μέτρο ελαστικότητας χάλυβα)



Σχήμα 2-1: Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων χάλυβα S355

- Χάλυβας ποιότητας 8.8 για κοχλίες και αγκύρια: $f_{yb} = 640 \text{MPa}$ (όριο διαρροής χάλυβα)
 $f_{ub} = 800 \text{MPa}$ (όριο θραύσης χάλυβα)
- Σκυρόδεμα ποιότητας C35/45: $f_{ck} = 35 \text{MPa}$ (χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος)
 $f_{ck, cube} = 45 \text{MPa}$ (χαρακτηριστική αντοχή κύβου σκυροδέματος)
 $E_{cm} = 34000 \text{MPa}$ (μέτρο ελαστικότητας)

2.4 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΣΤΟ ΘΟΛΟ

Σε αυτή τη παράγραφο περιγράφονται αναλυτικά όλες οι πιθανές φορτίσεις που δρουν στον θόλο. Γίνεται λόγος για κάθε πιθανή φόρτιση ξεχωριστά και για τις τιμές τους, αλλά και πως αυτές υπολογίστηκαν. Εξηγείται επίσης ποιος συνδυασμός φορτίσεων επιλέχθηκε ως ο πιο κρίσιμος και χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό του θόλου με μη γραμμικές αναλύσεις. Τέλος, παρουσιάζονται οι συντελεστές ασφαλείας που θα χρησιμοποιηθούν για τον συνδυασμό των φορτίσεων στη Οριακή Κατάσταση Αστοχίας και Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας.

2.4.1 Μόνιμα Φορτία

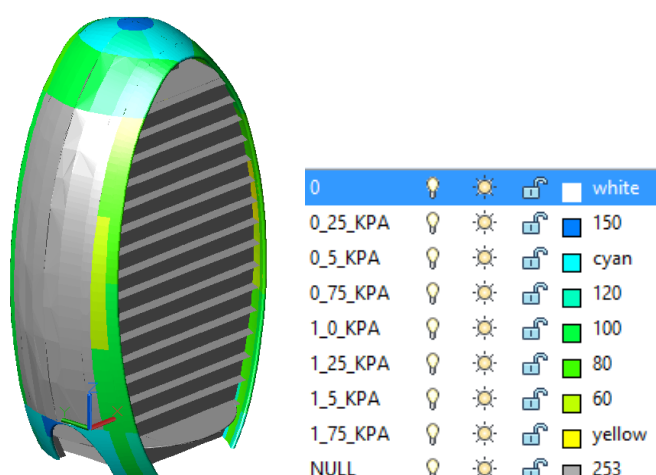
Με τον όρο μόνιμες δράσεις-φορτία νοούνται όλες οι δράσεις οι οποίες αναμένονται να επενεργήσουν στην κατασκευή για κατά τη διάρκεια μιας περιόδου στην οποία η διαφοροποίηση του μεγέθους τους στο χρόνο είναι αμελητέα. Σε αυτή τη κατηγορία φορτίων περιλαμβάνονται κυρίως όλα τα κατακόρυφα φορτία τα οποία δρουν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της κατασκευής, όπως τα ίδια βάρη του φορέα, σταθερός εξοπλισμός, επιστρώσεις ή έμμεσες δράσεις από συστολή ξήρανσης και διαφορικές καθιζήσεις. Στο μοντέλο του θόλου, ο οποίος εξετάζεται στην παρούσα εργασία, τα μόνιμα φορτία τα οποία θεωρήθηκαν για τον σχεδιασμό, είναι το ίδιο βάρος των μελών του θόλου, αλλά και το ίδιο βάρος της επένδυσης του θόλου το οποίο ασκείται με τη μορφή κατακόρυφου φορτίου πάνω στις τεγίδες του θόλου και έχουν τις παρακάτω τιμές.

- Μεταλλική Κατασκευή – Ίδιο Βάρος: 78.5KN/m³
- Επένδυση Θόλου – Ίδιο Βάρος: Επένδυση θόλου διπλής όψης 0.55KN/m³ (φορτίο βαρύτητας)
Επένδυση θόλου μονής όψης 0.65KN/m³ (φορτίο βαρύτητας)

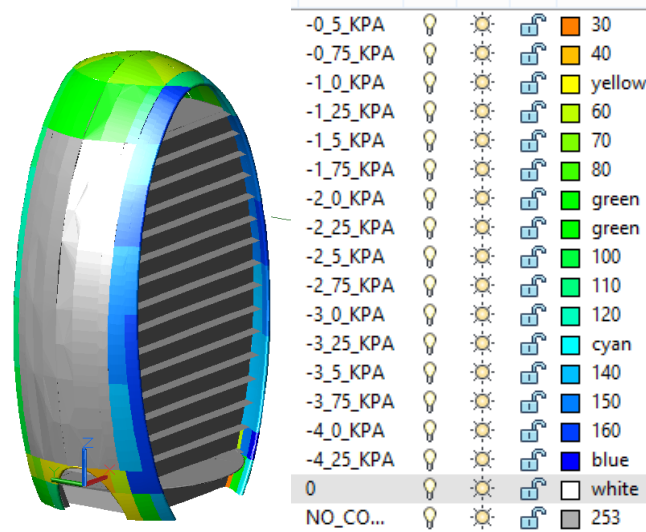
Υπέρ της ασφαλείας το φορτίο βαρύτητας από την επένδυση θόλου θεωρείται συντηρητικά και για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις 0,7KN/m³.

2.4.2 Φορτία Ανέμου

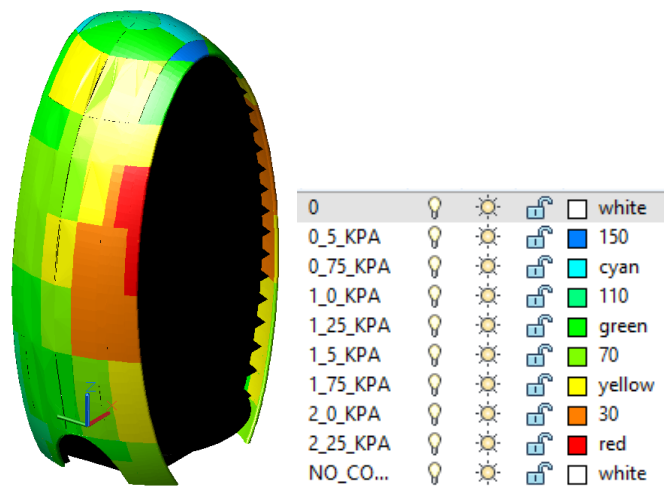
Οι δράσεις λόγω ανέμου στις κατασκευές από χάλυβα, παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά των μεταλλικών κατασκευών, και σε πολλές περιπτώσεις, όπως και για τον σχεδιασμό του θόλου που εξετάζεται, αποτελούν την βασική και πιο κρίσιμη φόρτιση. Στην περίπτωση του θόλου θεωρείται ότι οι φορτίσεις αυτές του ανέμου επενεργούν κάθετα στην επιφάνεια της επένδυσης. Για τον υπολογισμό του μεγέθους των φορτίων ανέμων στο θόλο έγιναν δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα, με προσομοιώματα όπου ο άνεμος έχει θεωρηθεί ότι μπορεί να έχει οποιαδήποτε διεύθυνση σε σχέση με το κτίριο. Επίσης έγιναν δοκιμές για και για ανοιχτή αλλά και κλειστή όψη του κτιρίου, ώστε να υπολογιστούν οι δυσμενέστερες περιπτώσεις αρνητικών πιέσεων ανέμου (αναρρόφηση), που εμφανίζονται όταν θεωρείται ανοιχτή όψη του κτιρίου και θετικών πιέσεων ανέμου που εμφανίζονται όταν η όψη θεωρείται κλειστή. Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 2-6, Εικόνα 2-7, Εικόνα 2-8, Εικόνα 2-9) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση σε αεροδυναμική σήραγγα για ανοιχτή και κλειστή όψη του κτιρίου.



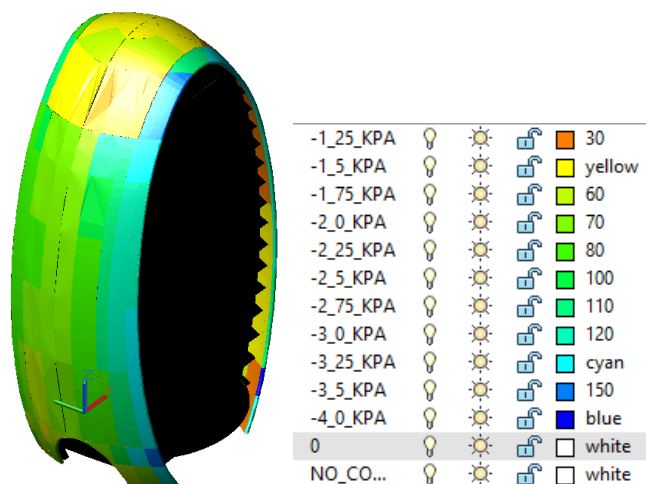
Εικόνα 2-6: Θετικές πιέσεις ανέμου στην επένδυση του κτιρίου για ανοιχτή όψη



Εικόνα 2-7: Αρνητικές πιέσεις ανέμου (αναρρόφηση) στην επένδυση του κτιρίου για ανοιχτή όψη



Εικόνα 2-8: Θετικές πιέσεις ανέμου στην επένδυση του κτιρίου για κλειστή όψη

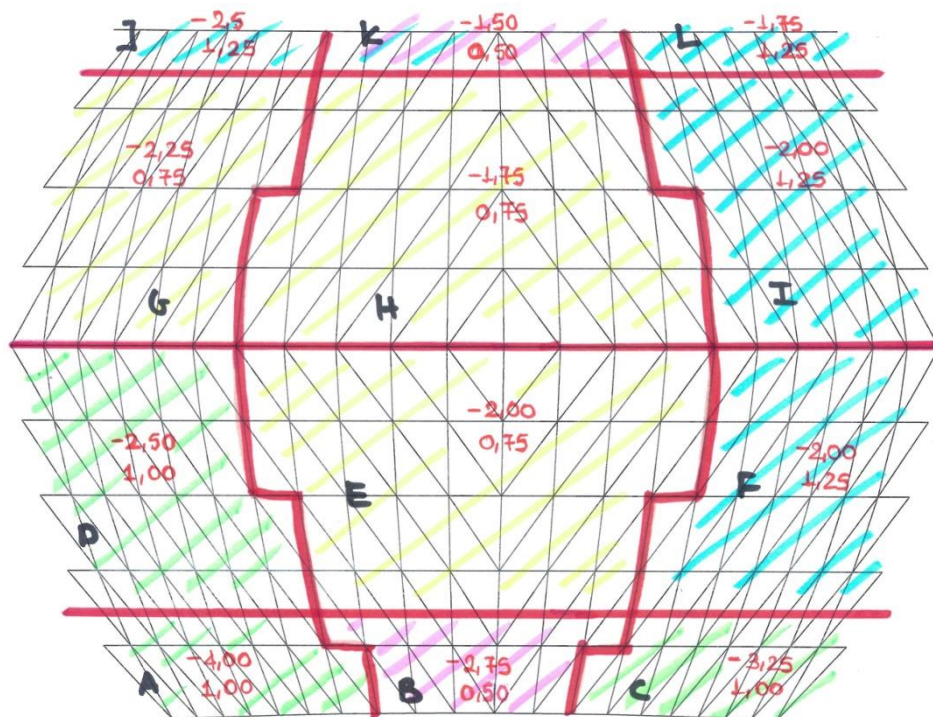


Εικόνα 2-9: Αρνητικές πιέσεις ανέμου (αναρρόφηση) στην επένδυση του κτιρίου για κλειστή όψη

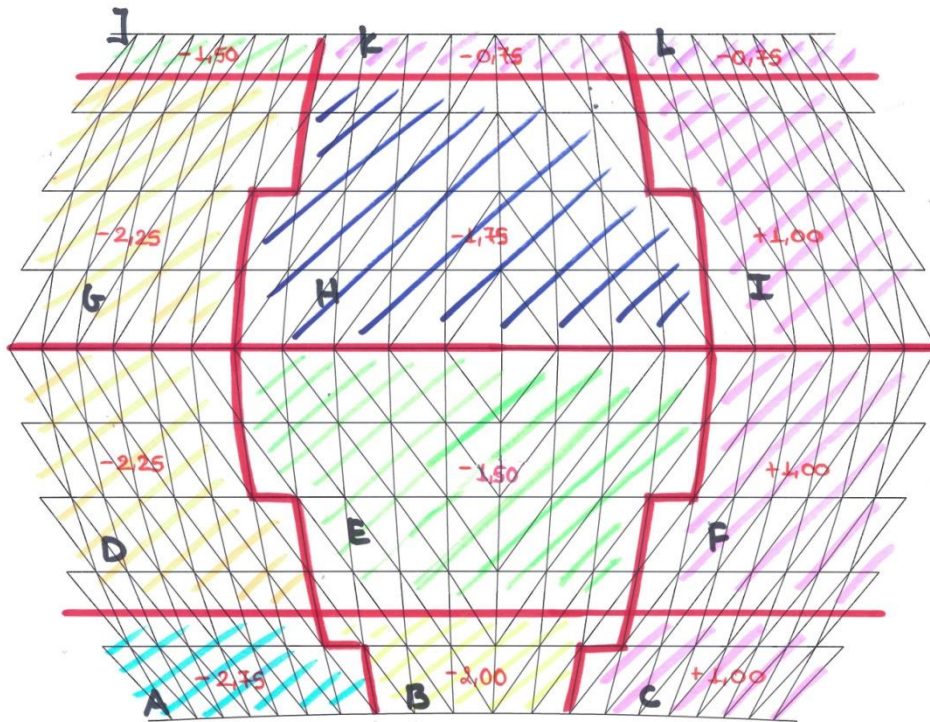
Πιο συγκεκριμένα για τις φορτίσεις ανέμου αποκλειστικά του θόλου παρουσιάζονται οι παρακάτω εικόνες όπου φαίνονται αναλυτικά τα μεγέθη τα οποία λαμβάνονται για τα εξής σενάρια:

- Μέγιστες θετικές πιέσεις σε ολόκληρο το θόλο, όπως αυτές φαίνονται στην Εικόνα 2-10 (θετικές τιμές).
- Μέγιστες αρνητικές πιέσεις (αναρρόφηση) σε ολόκληρο το θόλο, όπως φαίνονται στην Εικόνα 2-10 (αρνητικές τιμές).
- Μέγιστες τιμές αρνητικών πιέσεων στο ένα μισό του θόλου και οι αντίστοιχες τιμές των θετικών πιέσεων στο υπόλοιπο μισό του θόλου, Εικόνα 2-11.

Το τρίτο σενάριο είναι αυτό το οποίο αποδείχθηκε και πιο κρίσιμο για την συμπεριφορά και λειτουργία του θόλου και γι' αυτό το λόγο, είναι αυτό και το οποίο επιλέχθηκε για το σχεδιασμό του θόλου και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 2-10: Μέγιστες τιμές για θετικές πιέσεις σε ολόκληρο το θόλο (θετικές τιμές), μέγιστες τιμές για αρνητικές πιέσεις (αναρρόφηση) σε ολόκληρο το θόλο (αρνητικές τιμές) σε KN/m^2

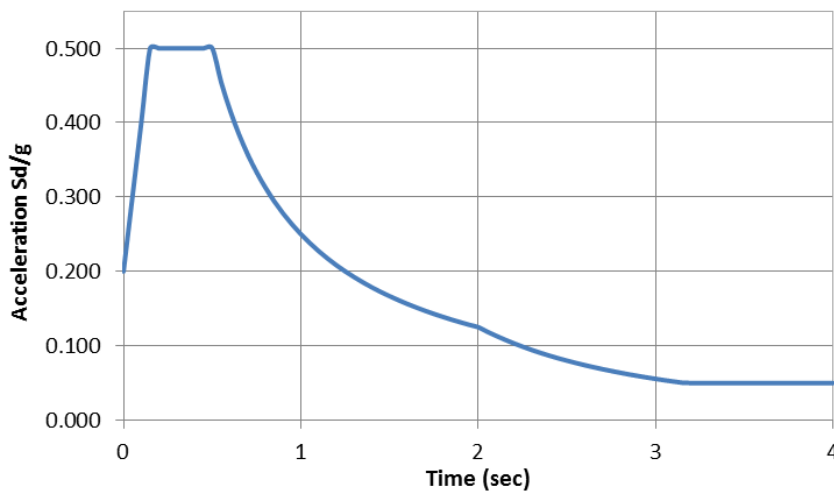


Εικόνα 2-11: Μέγιστες τιμές αρνητικών πιέσεων στο ένα μισό του θόλου και οι αντίστοιχες τιμές των θετικών πιέσεων στο υπόλοιπο μισό του θόλου σε KN/m²

2.4.3 Σεισμικά Φορτία

Για τον υπολογισμό των σεισμικών δράσεων έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

- Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας: II
- Επιτάχυνση εδάφους: $a_g=0,25g$
- Κατηγορία σπουδαιότητας: II
- Κατηγορία εδάφους: B, $S=1,20$
- Συντελεστής συμπεριφοράς: $\alpha=1,5$

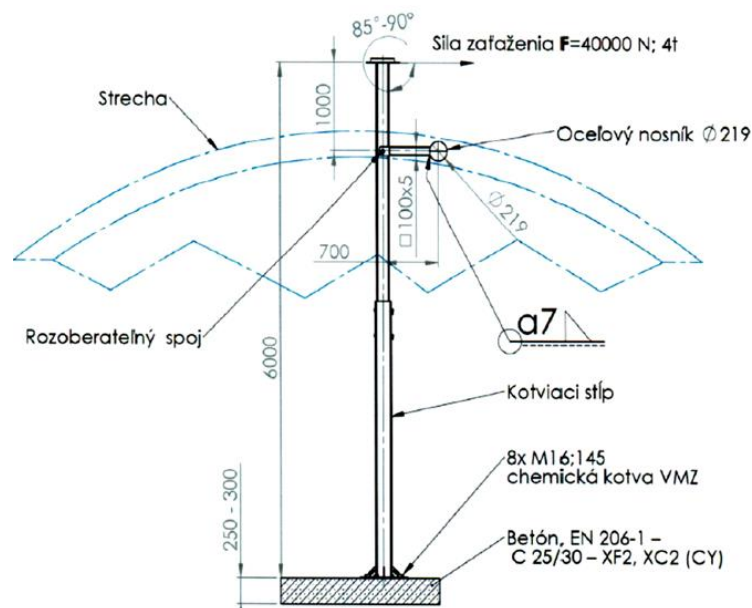


Σχήμα 2-2: Φάσμα σχεδιασμού για ανελαστική συμπεριφορά

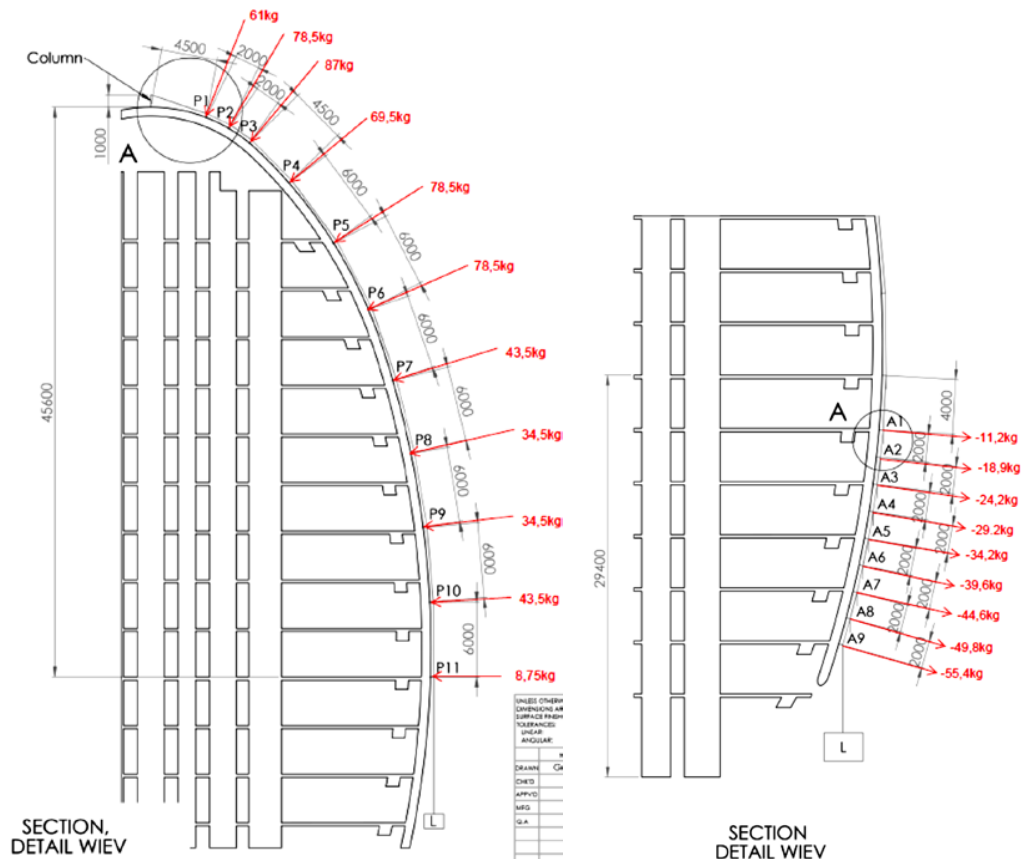
Οι σεισμικές δράσεις αυτές κατατάσσονται στις τυχηματικές και δεν συνδυάζονται με τις άλλες τυχηματικές δράσεις, όπως επίσης δεν συνδυάζονται με τις δράσεις ανέμου, οι οποίες αποτελούν τη βασική μορφή φορτίων στον θόλο. Γι' αυτό το λόγο έγινε σύγκριση των αντιδράσεων που αναπτύσσονται στην περίπτωση των σεισμικών φορτίων και στην περίπτωση φόρτισης λόγω ανέμου, και συγκεκριμένα των τεμνουσών στη βάση του θόλου. Διαπιστώθηκε, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι οι αντιδράσεις λόγω ανέμου ήταν μεγαλύτερες, άρα συνεπώς οι συνδυασμοί φόρτισης που περιέχουν της δράσεις ανέμου και όχι τις σεισμικές είναι κρισιμότερες και είναι αυτές οι οποίες χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό του θόλου σε αυτή την εργασία.

2.4.4 Δράσεις λόγω διαδικασίας καθαρισμού του θόλου

Τα φορτία τα οποία ασκούνται στον θόλο κατά την διάρκεια της διαδικασίας εξωτερικού καθαρισμού του παρέχονται από τους σχεδιαστές του συστήματος καθαρισμού και περιγράφονται στις παρακάτω Εικόνες (Εικόνα 2-12, Εικόνα 2-13). Τα φορτία αυτά δεν συνδυάζονται με τις φορτίσεις λόγω ανέμου και γι' αυτό δεν λαμβάνονται υπόψη στους συνδυασμούς δράσεων στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Αυτό συμβαίνει καθώς, σύμφωνα με τους σχεδιαστές του συστήματος καθαρισμού, προϋπόθεση για να γίνει οποιοδήποτε είδους εργασία εξωτερικά του θόλου (καθαρισμός, συντήρηση, επιθεώρηση και αλλαγή κάποιου μέρους της επένδυσης) σε τέτοιο ύψος, θα πρέπει η ταχύτητα του ανέμου να είναι κάτω από 6m/s.



Εικόνα 2-12: Φορτίσεις λόγω διαδικασίας καθαρισμού στην κορυφή του θόλου



Εικόνα 2-13: Φορτίσεις λόγω διαδικασίας καθαρισμού στο θόλο και στη πλευρική επένδυση του κτιρίου

2.4.5 Συνδυασμοί φορτίσεων – Οριακές Καταστάσεις

Σύμφωνα με την περιγραφή των παραπάνω φορτίσεων και τα σχόλια που έγιναν για την δυνατότητα συνδυασμού μεταξύ τους, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η κρισιμότερη μορφή συνδυασμού φορτίσεων που μπορεί να υπάρξει για τον θόλο είναι αυτή που περιλαμβάνει τα μόνιμα φορτία από το ίδιο βάρος του θόλου και τα φορτία βαρύτητας από το ίδιο βάρος της επικάλυψης (G) μαζί με το τρίτο σενάριο φόρτισης ανέμου για το θόλο, όπως αυτό παρουσιάστηκε στην Εικόνα 2-11 που αποτελείται από τις μέγιστες τιμές αρνητικών πιέσεων στο ένα μισό του θόλου και τις αντίστοιχες τιμές των θετικών πιέσεων στο υπόλοιπο μισό του θόλου (Wps: Wind-Pressure/Suction). Αυτός ο συνδυασμός είναι και αυτός που επιλέχθηκε για τον σχεδιασμό του θόλου με μη γραμμικές αναλύσεις και χρησιμοποιείται στα παρακάτω αντίστοιχα κεφάλαια. Για τον κανονιστικό σχεδιασμό που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3 δίνεται η δυνατότητα να τοποθετηθούν στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί φορτίσεων. Τα φορτία, για της μη γραμμικές αναλύσεις, πολλαπλασιάστηκαν με τους κατάλληλους συντελεστές ασφαλείας για κάθε μία από τις περιπτώσεις Οριακής Κατάστασης Αστοχίας και Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας. Η Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) σχετίζεται γενικά με την κατάρρευση ή με ισοδύναμες μορφές αστοχίας του φορέα ή τμημάτων του και γι' αυτό το λόγο θεωρούνται αυξημένοι συντελεστές ασφαλείας για τα φορτία. Έτσι ο συνδυασμός φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε για την περίπτωση της ΟΚΑ είναι:

$$1,35 \times G + 1,50 \times Wps \quad (2-1)$$

Για την περίπτωση της Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας, η οποία σχετίζεται με τις καθορισμένες λειτουργικές απαιτήσεις του φορέα (κυρίως μετατοπίσεις ή ταλαντώσεις) οι συντελεστές ασφαλείας είναι ίσοι με τη μονάδα και συνεπώς ο συνδυασμός φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε είναι:

$$1,00 \times G + 1,00 \times W_{ps} \quad (2-2)$$

3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΘΟΛΟΥ ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

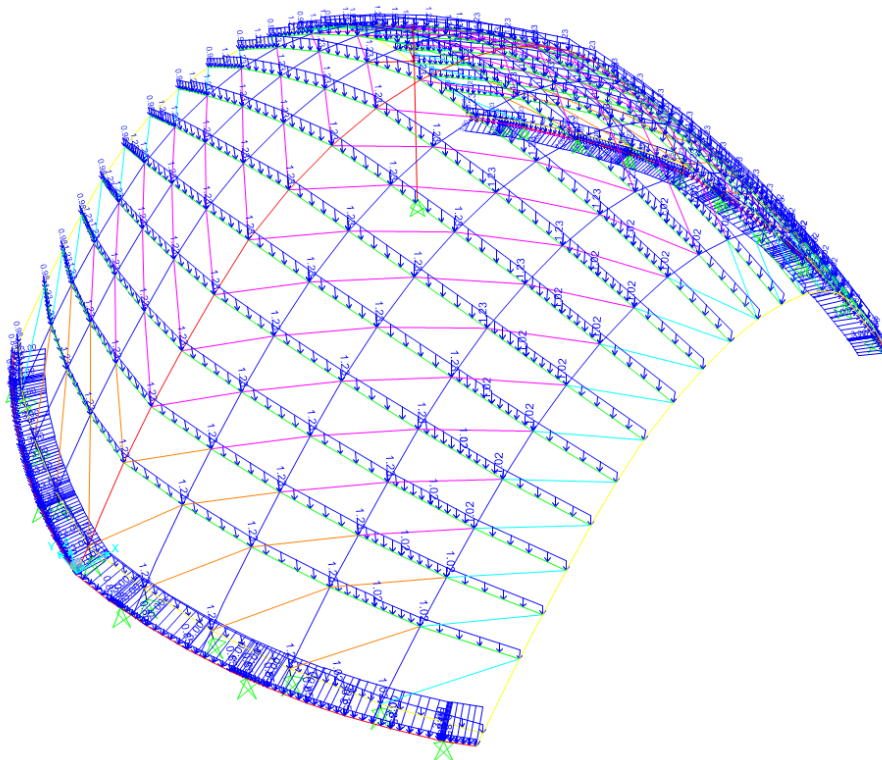
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον σχεδιασμό που έγινε για τον θόλο με κανονιστική προσέγγιση. Για τον σχεδιασμό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SAP2000 από το οποίο υπολογίστηκαν οι βαθμοί αξιοποίησης που εκφράζουν τον λόγο δράσεων προς την αντοχή για κάθε μέλος. Η κανονιστική προσέγγιση στο σχεδιασμό του θόλου βασίζεται στους κανόνες του Ευρωκώδικα, και συγκεκριμένα τα κεφάλαια του Ευρωκώδικα που παρουσιάζονται στο 2^ο κεφάλαιο. Η κανονιστική προσέγγιση έχει τη δυνατότητα να μας δείξει αν και σε ποιο βαθμό τα μέλη του φορέα, ο οποίος μελετάται, αντέχουν στην εκάστοτε φόρτιση, μέσω σχέσεων αλληλεπίδρασης για τις εντάσεις που δέχεται το κάθε μέλος, αντίθετα με τις μη γραμμικές αναλύσεις οι οποίες μας δείχνουν την συμπεριφορά του φορέα και μετά την πρώτη αστοχία. Αρχικά στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί φορτίσεων που μπορούν να δράσουν στο φορέα και οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για τον κανονιστικό σχεδιασμό. Αντίθετα με τις μη γραμμικές αναλύσεις, όπου χρησιμοποιήθηκε κατευθείαν ο δυσμενέστερος συνδυασμός φορτίσεων, στο πρόγραμμα SAP για τον κανονιστικό σχεδιασμό δίνεται η δυνατότητα να τοποθετηθούν ταυτόχρονα όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί για Οριακή Κατάσταση Αστοχίας αλλά και Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του κανονιστικού σχεδιασμού που έγινε για τον θόλο. Αρχικά παρουσιάζονται αναλυτικά οι σχέσεις αλληλεπίδρασης του Ευρωκώδικα που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να μελετηθεί η αντοχή του φορέα και να εξαχθούν οι βαθμοί αξιοποίησης του κάθε μέλους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βαθμοί αξιοποίησης κάθε μέλους για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας, με τη βοήθεια εικόνων οι οποίες έχουν εξαχθεί από το πρόγραμμα SAP. Από τα αποτελέσματα αυτά θα βγουν συμπεράσματα για το ποια μέλη του φορέα καταπονούνται σε μεγαλύτερο βαθμό. Για την ειδική περίπτωση των τεγίδων, που όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι διατομής διπλής RHS160/80/5.0, οι υπολογισμοί για την αντοχή τους έχουν γίνει αναλυτικά και όχι αριθμητικά μέσω του SAP όπως έχει γίνει για τα υπόλοιπα μέλη. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σχεδιασμού και για την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας, όπου υπολογίστηκαν οι μέγιστες μετακινήσεις του φορέα.

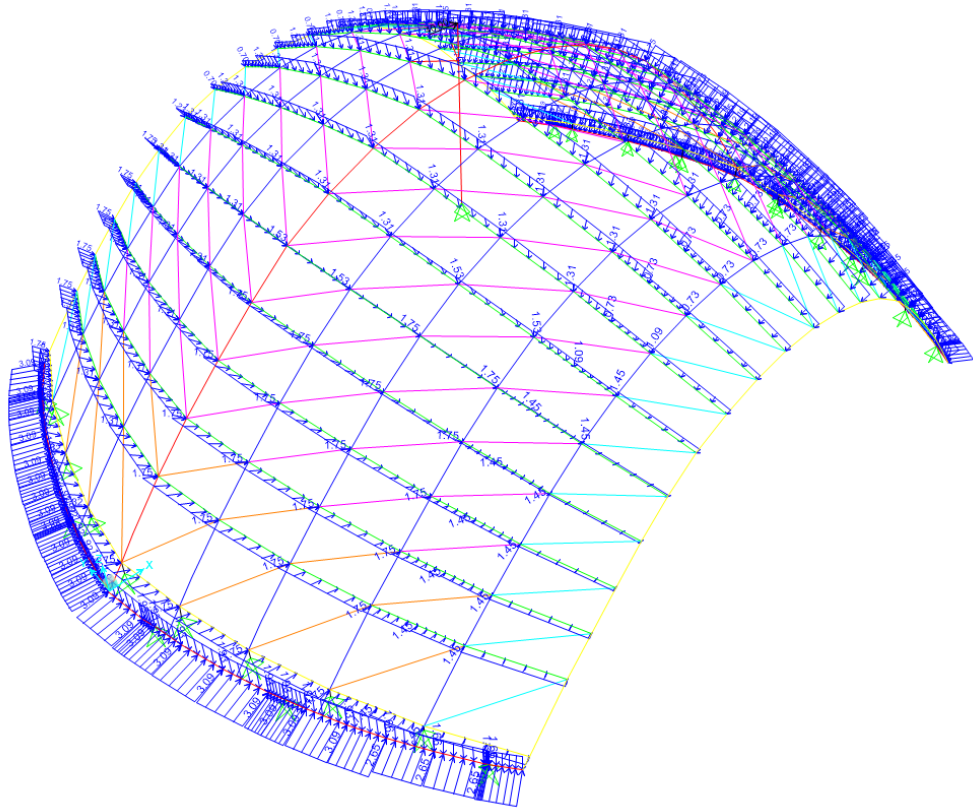
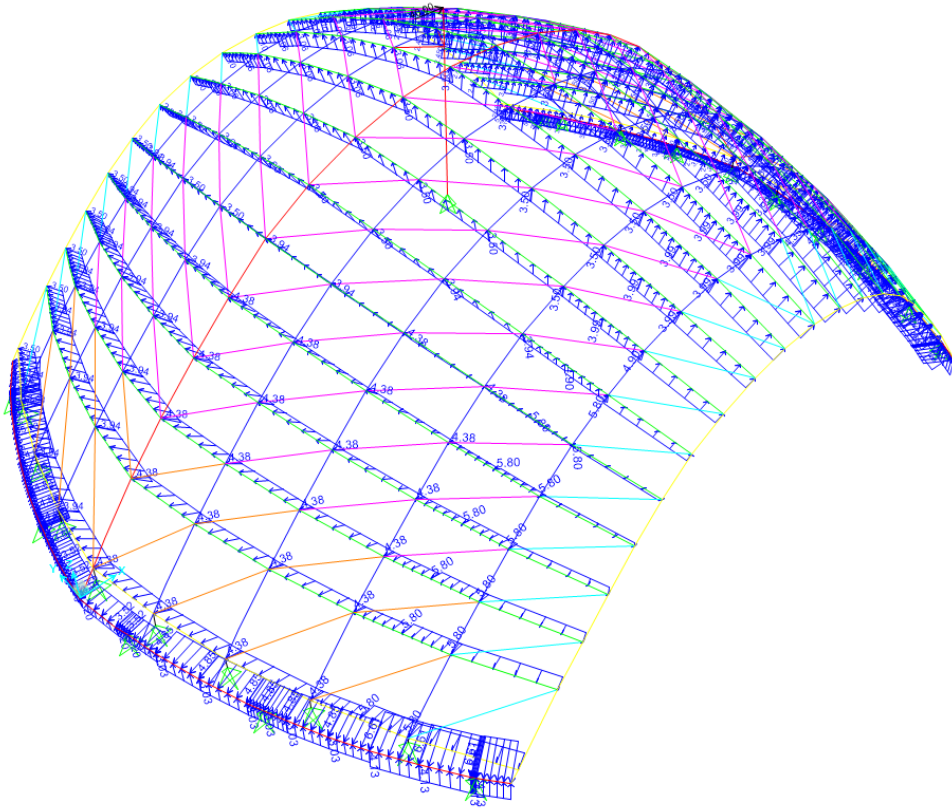
3.2 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΕΩΝ ΣΤΗ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

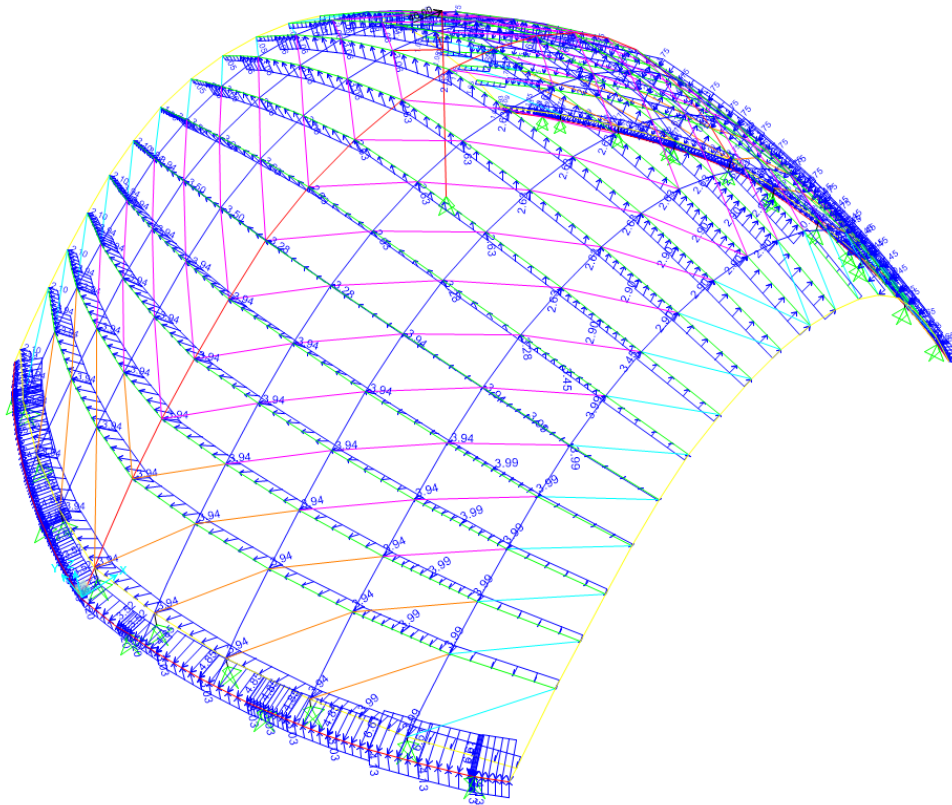
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για τον κανονιστικό έλεγχο του θόλου μέσω του λογισμικού SAP δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί φορτίσεων, και όχι μόνο ο κρισιμότερος όπως έχει γίνει με τις μη γραμμικές αναλύσεις. Οι πιθανές φορτίσεις οι οποίες μπορούν να ασκηθούν στον φορέα παρουσιάζονται αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπου εξηγείται επίσης και ποια από αυτά τα φορτία μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους. Τονίζεται σε αυτό το σημείο ότι παρότι έχει εξηγηθεί ότι τα φορτία από τη διαδικασία καθαρισμού της επένδυσης του κτιρίου δεν μπορούν να συνδυαστούν με τις φορτίσεις ανέμου, στην κανονιστική προσέγγιση του σχεδιασμού, αποφασίστηκε για λόγους υπέρ της ασφαλείας τα φορτία αυτά να λαμβάνονται υπόψη. Παρακάτω ορίζονται οι συμβολισμοί για την κάθε περίπτωση φόρτισης, ενώ παρουσιάζονται και εικόνες οι οποίες δείχνουν τον τρόπο με τον οποίο έχει ασκηθεί η κάθε περίπτωση φόρτισης στον φορέα για το λογισμικό SAP. Συγκεκριμένα στην Εικόνα 3-1 παρουσιάζονται τα φορτία βαρύτητας, στην Εικόνα 3-2 τα φορτία ανέμου που προκαλούν πιέσεις στο θόλο, στην Εικόνα 3-3 τα φορτία που προκαλούν αναρρόφηση και στην Εικόνα 3-4 τα φορτία που προκαλούν πιέσεις στο ένα μισό του φορέα και αναρρόφηση στο άλλο.

- **G:** Μόνιμα φορτία – φορτία βαρύτητας
- **WP:** Φορτίσεις ανέμου που προκαλούν πιέσεις στον φορέα
- **WS:** Φορτίσεις ανέμου που προκαλούν αναρρόφηση στον φορέα
- **WPS:** Φορτίσεις ανέμου που προκαλούν πίεση και αναρρόφηση στο φορέα
- **DT+:** Θερμοκρασιακά Φορτία – Αύξηση Θερμοκρασίας
- **DT-:** Θερμοκρασιακά Φορτία – Μείωση Θερμοκρασίας
- **C:** Φορτία από διαδικασία καθαρισμού



Εικόνα 3-1: Φορτία βαρύτητας (**G**)

Εικόνα 3-2: Φορτία πίεσης ανέμου (**WP**)Εικόνα 3-3: Φόρτια αναρρόφησης ανέμου (**WS**)



Εικόνα 3-4: Φορτία ανέμου που προκαλούν πίεση στον ένα μισό φορέα και αναρρόφηση στο άλλο (**WPS**)

3.2.1 Συνδυασμοί φορτίσεων για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας

Παρουσιάζονται όλοι οι συνδυασμοί φόρτισης που λήφθηκαν υπόψη για τον κανονιστικό σχεδιασμό του θόλου, με τη βοήθεια του λογισμικού SAP. Οι συνδυασμοί αυτοί προκύπτουν από τους αντίστοιχους κανονισμούς του Ευρωκώδικα EN1990.

- Συνδυασμός Φόρτισης 1: $1.35G + 1.50(WP + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 2: $1.35G + 1.50(WS + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 3: $1.35G + 1.50(WPS + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 4: $G + 1.50(WP + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 5: $G + 1.50(WS + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 6: $G + 1.50(WPS + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 7: $1.35G + 1.50(WP + C) + 0.90DT+$
- Συνδυασμός Φόρτισης 8: $1.35G + 1.50(WS + C) + 0.90DT+$
- Συνδυασμός Φόρτισης 9: $1.35G + 1.50(WPS + C) + 0.90DT+$
- Συνδυασμός Φόρτισης 10: $G + 1.50(WP + C) + 0.90DT+$
- Συνδυασμός Φόρτισης 11: $G + 1.50(WS + C) + 0.90DT+$
- Συνδυασμός Φόρτισης 12: $G + 1.50(WPS + C) + 0.90DT+$
- Συνδυασμός Φόρτισης 13: $1.35G + 1.50(WP + C) + 0.90DT$

- Συνδυασμός Φόρτισης 14: $1.35G + 1.50(WS + C) + 0.90DT$
- Συνδυασμός Φόρτισης 15: $1.35G + 1.50(WPS + C) + 0.90DT$
- Συνδυασμός Φόρτισης 16: $G + 1.50(WP + C) + 0.90DT$
- Συνδυασμός Φόρτισης 17: $G + 1.50(WS + C) + 0.90DT$
- Συνδυασμός Φόρτισης 18: $G + 1.50(WPS + C) + 0.90DT$
- Συνδυασμός Φόρτισης 19: $1.35G + 1.50DT+$
- Συνδυασμός Φόρτισης 20: $1.35G + 1.50DT+ + 0.90(WP + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 21: $1.35G + 1.50DT+ + 0.90(WS + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 22: $1.35G + 1.50DT+ + 0.90(WPS + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 23: $1.35G + 1.50DT$
- Συνδυασμός Φόρτισης 24: $1.35G + 1.50DT- + 0.90(WP + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 25: $1.35G + 1.50DT- + 0.90(WS + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 26: $1.35G + 1.50DT- + 0.90(WPS + C)$

3.2.2 Συνδυασμοί φορτίσεων για την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας

Και σε αυτή τη περίπτωση παρουσιάζονται οι συνδυασμοί φορτίσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας. Και εδώ οι συνδυασμοί προέκυψαν σύμφωνα με τους κανονισμούς του Ευρωκώδικα EN1990.

- Συνδυασμός Φόρτισης 1: $G + (WP + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 2: $G + (WS + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 3: $G + (WPS + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 4: $G + (WP + C) + 0.60DT+$
- Συνδυασμός Φόρτισης 5: $G + (WS + C) + 0.60DT+$
- Συνδυασμός Φόρτισης 6: $G + (WPS + C) + 0.60DT+$
- Συνδυασμός Φόρτισης 7: $G + (WP + C) + 0.60DT$
- Συνδυασμός Φόρτισης 8: $G + (WS + C) + 0.60DT$
- Συνδυασμός Φόρτισης 9: $G + (WPS + C) + 0.60DT$
- Συνδυασμός Φόρτισης 10: $G + DT+$
- Συνδυασμός Φόρτισης 11: $G+ DT+ + 0.60(WP + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 12: $G+ DT+ + 0.60(WS + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 13: $G+ DT+ + 0.60(WPS + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 14: $G+ DT$
- Συνδυασμός Φόρτισης 15: $G+ DT- + 0.60(WP + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 16: $G+ DT- + 0.60(WS + C)$
- Συνδυασμός Φόρτισης 17: $G+ DT- + 0.60(WPS + C)$

3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΜΕ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

3.3.1 Έλεγχος αντοχής των μελών του θόλου στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται έλεγχος των μελών σύμφωνα με τους κανόνες του Ευρωκώδικα 3 για το πιο δυσμενή συνδυασμό φόρτισης της Οριακής Κατάστασης Αστοχίας. Τα αποτελέσματα αυτά που παρουσιάζονται έχουν υπολογιστεί με αριθμητικές μεθόδους με χρήση του λογισμικού SAP200, εκτός από τον έλεγχο αντοχής των τεγιδών ο οποίος λόγω του ότι η διατομή του είναι διπλή RHS160/80/5.0 και εκεί οι υπολογισμοί έγιναν αναλυτικά. Τα αποτελέσματα του κανονιστικού σχεδιασμού που παρουσιάζονται είναι με τη μορφή τιμών των βαθμών αξιοποίησης για κάθε μέλος. Οι βαθμοί αξιοποίησης εκφράζουν την αντοχή της του κάθε μέλους σταθερής διατομής υπό αξονική δύναμη και διαξονική κάμψη. Οι τιμές αυτές των λόγων αλληλεπιδράσεις είναι και οι πιο κρίσιμες και γι' αυτό το λόγο είναι αυτές που παρουσιάζονται, ενώ έχουν γίνει και λιγότερο κρίσιμοι έλεγχοι για την αντοχή των διατομών σε αξονική δύναμη, τέμνουσα και διαξονική κάμψη οι οποίοι όμως δεν παρουσιάζονται εδώ. Οι σχέσεις αλληλεπίδρασης (3-1) και (3-2) του Ευρωκώδικα 3 χρησιμοποιήθηκαν ώστε να εξαχθούν τα αποτελέσματα, και αφορούν τα μέλη σταθερής διατομής τα οποία καταπονούνται από θλίψη και διαξονική κάμψη, σχέσεις οι οποίες απλοποιούνται σε μεγάλο βαθμό όταν οι αξονικές δυνάμεις είναι εφελκυστικές.

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1 \quad (3-1)$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}}}{\gamma_{M1}} \leq 1 \quad (3-2)$$

όπου

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ και $M_{z,Ed}$ οι τιμές σχεδιασμού της αξονικής (θλιπτικής) δύναμης και των μεγίστων ροπών ως προς τους άξονες y-y και z-z κατά μήκος του μέλους αντίστοιχα

$\Delta M_{y,Ed}$, $\Delta M_{z,Ed}$ οι ροπές λόγω της μετατόπισης του κεντροβαρικού άξονα για διατομές κατηγορίας 4

χ_y και χ_z οι μειωτικοί συντελεστές λόγω καμπτικού λυγισμού

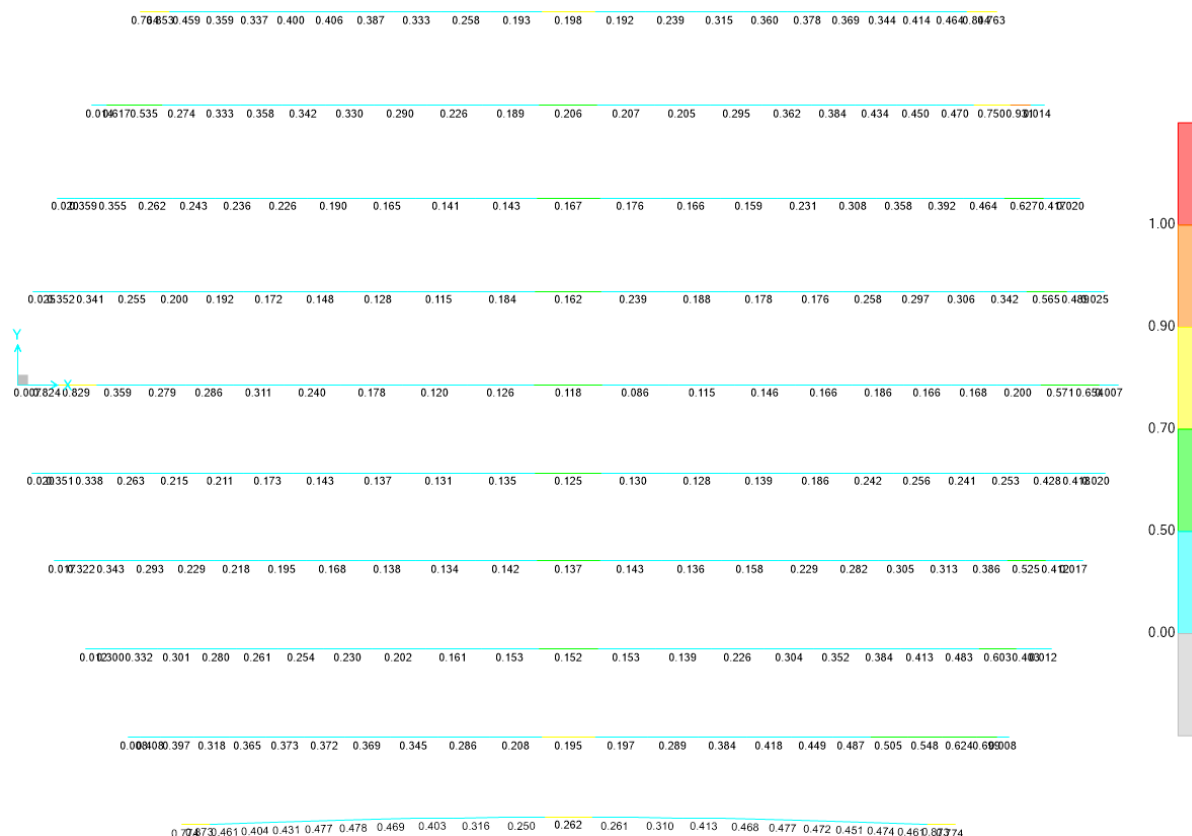
χ_{LT} ο μειωτικός συντελεστής λόγω πλευρικού λυγισμού. Για μέλη μη ευαίσθητα σε στρεπτική παραμόρφωση (κοίλες διατομές), λαμβάνεται $\chi_{LT}=1,0$

k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} συντελεστές αλληλεπίδρασης

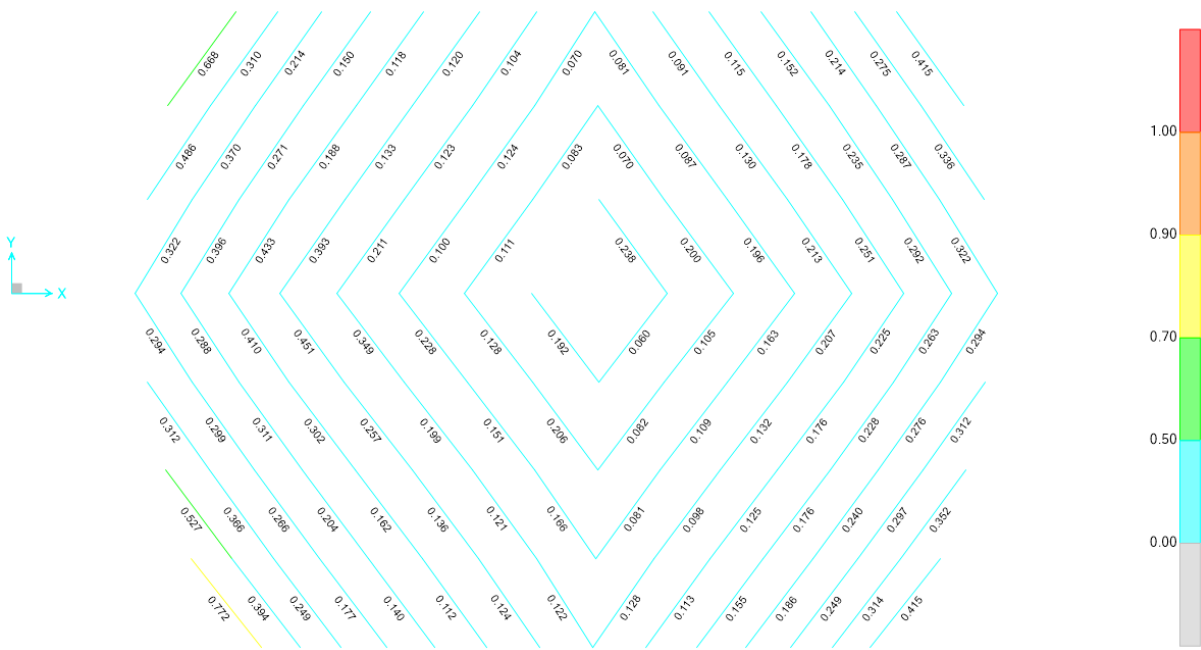
Οι παραπάνω συντελεστές χ υπολογίζονται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EN1993-1-1:2005 στα κεφάλαια 6.3.1 και 6.3.2, όπου εξηγείται αναλυτικά ο έλεγχος διατομών που υποβάλλονται σε καμπτικό και πλευρικό λυγισμό. Οι συντελεστές k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} υπολογίζονται ανάλογα με τη μέθοδο που θα χρησιμοποιηθεί από το Παράρτημα Α του EN1993-1-1:2005 για την πρώτη μέθοδο, και Παράρτημα Β του EN1993-1-1:2005 για τη δεύτερη μέθοδο.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω λόγων αλληλεπιδράσεων παρουσιάζονται μέσω εικόνων οι οποίες φέρουν το βαθμό αξιοποίησης για κάθε μέλος, έτσι όπως αυτό προέκυψε σύμφωνα με το λογισμικό SAP. Στην Εικόνα 3-5 φαίνονται τα αποτελέσματα για τα τόξα του θόλου. Παρατηρείται ότι ο μέγιστος βαθμός αξιοποίησης για τα τόξα έχει την τιμή 0,931 και παρουσιάζεται κοντά στην ανατολική βάση του 9ου τόξου. Επίσης αυξημένες τιμές, δηλαδή άνω του 0,5, φαίνονται να υπάρχουν σε όλες τις στηρίξεις των τόξων κυρίως στην ανατολική πλευρά του θόλου, στη μεριά αυτή όπου δηλαδή ασκούνται τα φορτία πίεσης ανέμου για το δυσμενέστερο σενάριο φόρτισης ανέμου, που είναι το **WPS**. Ιδιαίτερα

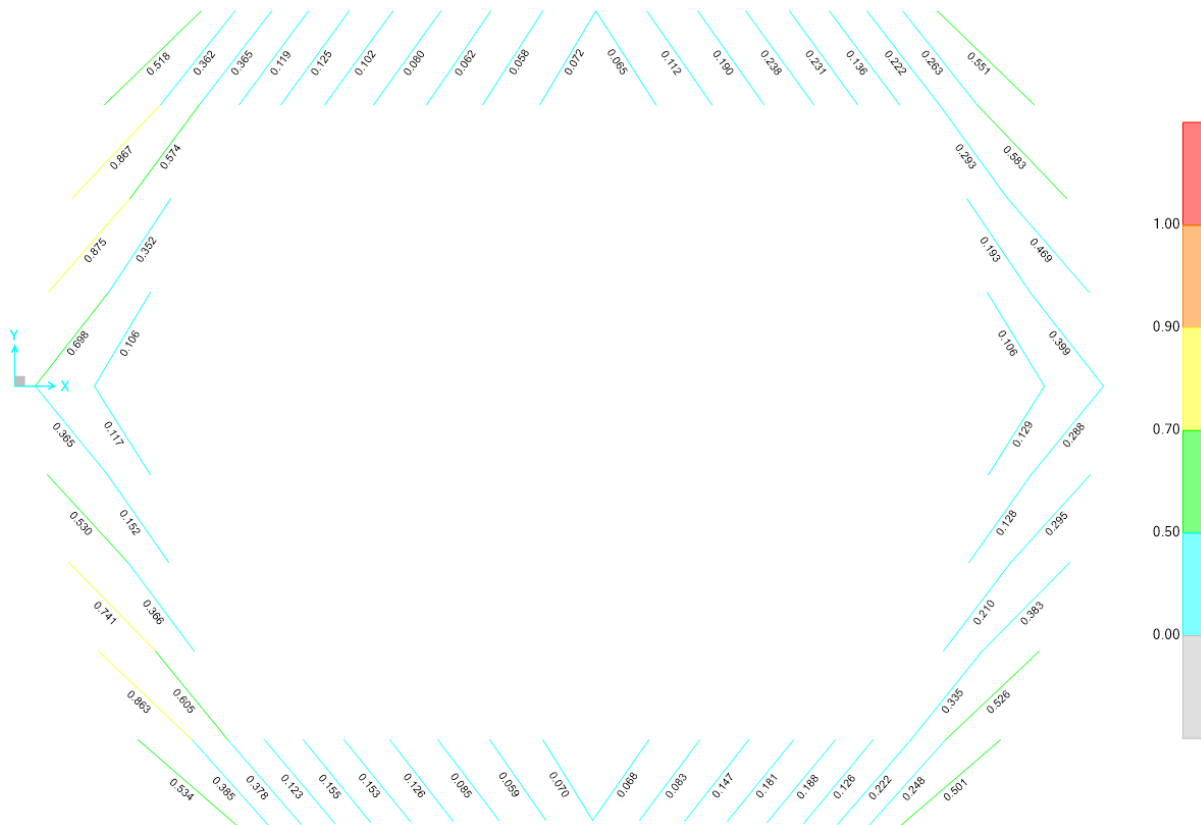
αυξημένες φαίνονται και οι τιμές των μελών που βρίσκονται στις βάσεις των ακριανών τόξων, τα οποία στηρίζονται πάνω στις μηκίδες του τελευταίου ορόφου και όχι μεμονωμένα όπως τα υπόλοιπα. Στην Εικόνα 3-6 και την Εικόνα 3-7 παρουσιάζονται οι τιμές που προέκυψαν για τους διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας. Παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές εμφανίζονται για τους συνδέσμους δυσκαμψίας που βρίσκονται στις βάσεις του θόλου (Εικόνα 3-7), κάτι που δικαιολογεί την απόφαση να τοποθετηθούν διατομές με μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με αυτούς που τοποθετήθηκαν προς το κέντρο του θόλου. Η μέγιστη τιμή για τους συνδέσμους δυσκαμψίας είναι 0,894. Οι μηκίδες του τελευταίου ορόφου όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-8 δεν καταπονούνται σε μεγάλο βαθμό, με όλες τις τιμές των λόγων αλληλεπίδρασης να είναι μικρότεροι του 0,5. Τέλος γίνεται αναλυτικά ο έλεγχος έναντι καμπτικού λυγισμού του μέλους των τεγίδων με την μεγαλύτερη αξονική καταπόνηση, ενώ στον Πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τις μεγαλύτερες τιμές των λόγων αλληλεπίδρασης για κάθε ομάδα μελών.



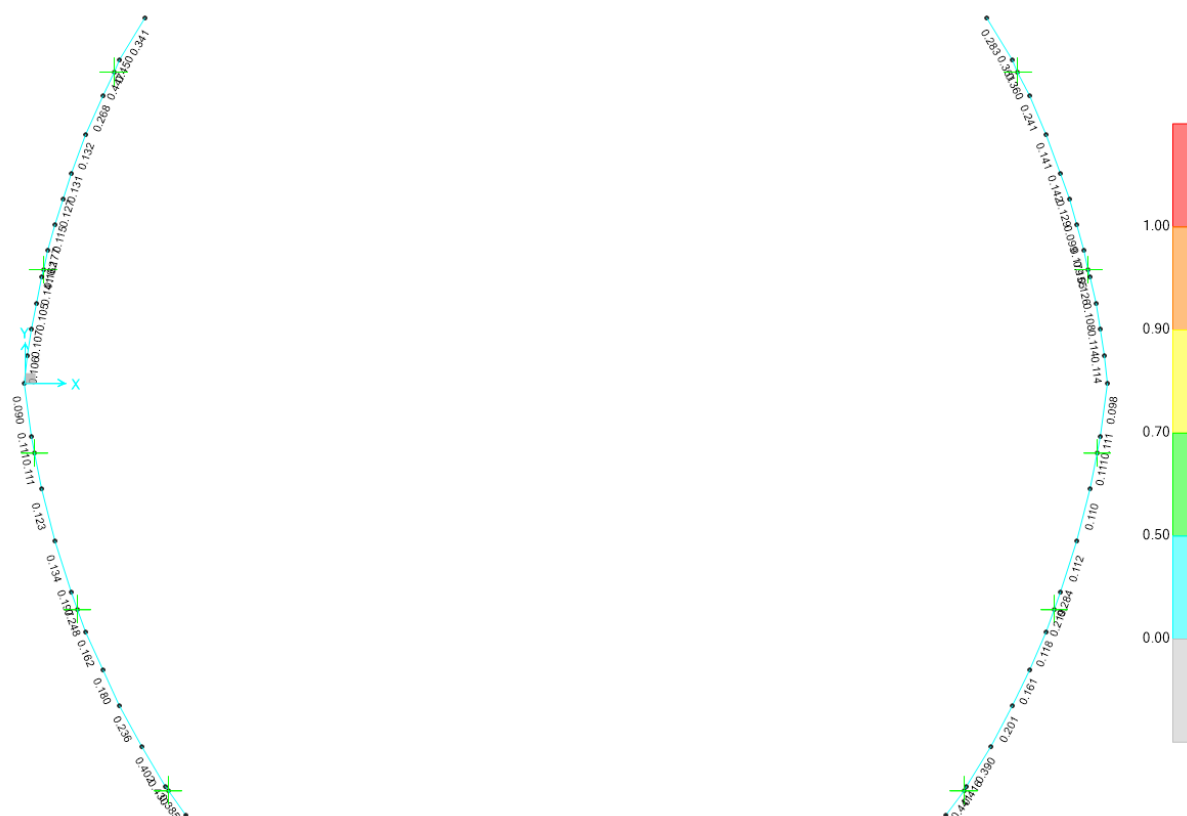
Εικόνα 3-5: Βαθμοί αξιοποίησης των τόξων



Εικόνα 3-6: Βαθμοί αξιοποίησης των διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας διατομής CHS88.9/4.0



Εικόνα 3-7: Βαθμοί αξιοποίησης των διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας στα άκρα του φορέα διατομών CHS101.6/5.0 και CHS114.3/8.0



Εικόνα 3-8: Βαθμοί αξιοποίησης για τις μηκίδες του ανώτατου ορόφου

Παρακάτω, όπως προαναφέρθηκε, γίνεται αναλυτικά ο έλεγχος έναντι καμπτικού λυγισμού λόγω αξονικής θλιπτικής δύναμης για τις διατομές το μέλος των τεγίδων που παρουσιάζει την μεγαλύτερη αξονική καταπόνηση, οποία είναι θλιπτική αξονική δύναμη τιμής $N_{Ed,c} = -259,6$ kN. Γίνεται επίσης έλεγχος για το μέλος το οποίο δέχεται την μεγαλύτερη εφελκυστική δύναμη τιμής $N_{Ed,t} = 255,9$ kN. Οι διατομές των τεγίδων είναι διπλή κοίλη διατομή RHS160/80/5.0, αλλά υπέρ της ασφαλείας εξετάζεται μόνο ένα μέλος της διπλής αυτής διατομής. Τα στοιχεία της διατομής αυτή παρουσιάζονται παρακάτω, μαζί με τις ιδιότητες του υλικού αλλά και τους συντελεστές ασφαλείας για το συγκεκριμένο έλεγχο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι υπολογισμοί για την αντοχή των τεγίδων έναντι καμπτικού λυγισμού, ενώ στον Πίνακα 3-1 φαίνονται οι λόγοι δράσεων προς αντοχής για τις περιπτώσεις καμπτικών λυγισμών προς τον άξονα y και z, αλλά και για την περίπτωση του μέλους που δέχεται την μεγαλύτερη εφελκυστική δύναμη.

$h =$	160 mm	$f_y =$	35,5 KN/cm ²
$b =$	80 mm	$E =$	21000 KN/cm ²
$t =$	5 mm	$\gamma_{M0} =$	1,1
$A =$	22,4 cm ²	$\gamma_{M1} =$	1,1
$I_y =$	722 cm ²		
$I_z =$	244 cm ²		

$L_{cr,y} = 260 \text{ cm}$	$L_{cr,z} = 260 \text{ cm}$
$N_{cr,y} = 2213,7 \text{ KN}$	$N_{cr,z} = 748.1 \text{ KN}$
$\bar{\lambda}_y = 0.599$	$\bar{\lambda}_z = 1.031$
Καμπύλη λυγισμού c	Καμπύλη λυγισμού c
$\alpha_y = 0,49$	$A_z = 0,49$
$\Phi_y = 0,777$	$\Phi_z = 1,235$
$\chi_y = 0,786$	$\chi_z = 0,522$
$N_{b,Rd,y} = 568,0 \text{ KN}$	$N_{b,Rd,z} = 377,5 \text{ KN}$
$N_{Rd} = 722,9 \text{ KN}$	

Πίνακας 3-1: Έλεγχος αντοχής τεγιδών

Αντοχή έναντι καμπτικού λυγισμού κατά y	$N_{Ed,c} / N_{b,Rd,y}$	0,457
Αντοχή έναντι καμπτικού λυγισμού κατά z	$N_{Ed,c} / N_{b,Rd,z}$	0,688
Αντοχή έναντι εφελκυσμού	$N_{Ed,t} / N_{Rd}$	0,354

Πίνακας 3-2: Μέγιστες τιμές βαθμών αξιοποίησης για κάθε ομάδα μελών

Εξωτερικά τόξα	Συγκολλητές διατομές διπλού ταυ: Κορμός: 135/30, Πέλματα: 170/15	0,873
Εσωτερικά τόξα	Συγκολλητές διατομές διπλού ταυ: Κορμός: 135/15, Πέλματα: 240/8	0,931
Κεντρικό τόξο	Συγκολλητή διατομή διπλού ταυ: Κορμός: 135/25, Πέλματα: 220/12	0,829
Τεγίδες	Διπλή διατομή RHS160/80/5.0	0,688
Διαγώνιοι Σύνδεσμοι	CHS88.9/4.0	0,722
Διαγώνιοι Σύνδεσμοι	CHS114.3/8.0	0,894
Διαγώνιοι Σύνδεσμοι	CHS101.6/5.0	0,551
Μηκίδες	CHS219.1/8.0	0.450

3.3.2 Υπολογισμός μετακινήσεων στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας

Πέραν των ελέγχων στην οριακή κατάσταση αστοχίας, βασική είναι και η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας, η οποία ασχολείται με την επιβεβαίωση, ότι οι μετακινήσεις της κατασκευής δεν είναι υπερβολικές κάτω από κανονικές συνθήκες χρήσεις. Οι υπερβολικές μετατοπίσεις μπορεί να προκαλέσουν πλήθος ανεπιθύμητων αποτελεσμάτων και γι' αυτό είναι σημαντικό να ελέγχουν ανάλογα. Επειδή οι οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας αναφέρονται στη συμπεριφορά του φορέα υπό συνθήκες φορτίσεων λειτουργίας, ο έλεγχος γίνεται με τους αντίστοιχους συνδυασμούς φορτίων (Κεφάλαιο 3.2.2) και με βάση την ελαστική ανάλυση, ανεξάρτητα από την ανάλυση που έχει χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό στη Οριακή Κατάσταση Αστοχίας. Γενικά τα όρια των επιτρεπτών μετατοπίσεων για τις στέγες, όπως προορίζεται να είναι και ο θόλος για τον οποίο γίνεται μελέτη, δεν είναι τόσο αυστηρά όσο για τα δάπεδα. Η εκτίμηση για το αν οι μετακινήσεις που προκαλούνται είναι υπερβολικές ή όχι γίνεται σύμφωνα με κάποια όρια που είναι πιθανό να ορίζονται από τα εκάστοτε Εθνικά Προσαρτήματα του Ευρωκώδικα EN1993-1-1, αλλά και από πιθανές απαιτήσεις του εργολάβου. Παρακάτω στον παρουσιάζονται οι οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις που υπολογίστηκαν για την κορυφή του θόλου αλλά και για τα ακριανά τόξα για συνδυασμό μόνιμων φορτίων και ανέμου αλλά και μόνο για φορτίσεις ανέμου, μέσω του λογισμικού SAP2000, σύμφωνα με τους κανονισμούς του Ευρωκώδικα.

Πίνακας 3-3: Μέγιστες μετακινήσεις θόλου στην ΟΚΛ

	Ακριαία Τόξα	
	Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση	Μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση
Μόνιμα Φορτία & Φορτία Ανέμου	58 mm	60 mm
Φορτία Ανέμου	57 mm	55 m
	Κορυφή Θόλου	
	Μέγιστη οριζόντια μετατόπιση	Μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση
Μόνιμα Φορτία & Φορτία Ανέμου	27 mm	13 mm
Φορτία Ανέμου	27 mm	6 mm

3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός και η μελέτη της αντοχής των μελών του θόλου με κανονιστική προσέγγιση. Τα μέλη του θόλου ελέγχθηκαν με αριθμητικές αναλύσεις με τη βοήθεια του λογισμικού SAP2000, εκτός από τα μέλη των τεγιδών που ελέγχθηκαν με αναλυτικές μεθόδους. Αρχικά παρουσιάστηκαν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί φορτίσεων για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας και την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας. Όπως αναφέρθηκε, το λογισμικό SAP2000, δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να τοποθετήσει όλους αυτούς τους συνδυασμούς φορτίσεων και να υπολογιστεί για το κάθε μέλος ξεχωριστά το ποιος είναι ο δυσμενέστερος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις για Οριακή Κατάσταση Αστοχίας. Τα αποτελέσματα αυτά είναι με τη μορφή βαθμών αξιοποίησης του κάθε

μέλους οι οποίοι υπολογίζονται μέσω σχέσεων αλληλεπιδράσεων σύμφωνα με τους ελέγχους που ορίζει ο Ευρωκώδικας 3. Παρουσιάζονται εικόνες από το SAP για κάθε ομάδα μελών όπου φαίνεται πάνω στο κάθε μέλος ο βαθμός αξιοποίησης του, μαζί με έναν συγκεντρωτικό πίνακα όπου παρουσιάζονται οι μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης για κάθε μέλος ξεχωριστά. Ο έλεγχος των τεγιδών με κανονιστική προσέγγιση γίνεται αναλυτικά, όπου γίνονται υπολογισμοί για καμπτικό λυγισμό αλλά και έναντι εφελκυσμού. Ο έλεγχος αυτός στις τεγίδες γίνεται, υπέρ της ασφαλείας, μόνο για τη μία διατομή RHS, παρότι συνολικά η διατομή είναι διπλή. Έχει ενδιαφέρον να δοθεί προσοχή στα σημεία στα οποία για το κάθε μέλος εμφανίζονται από τα αποτελέσματα των αναλύσεων του κανονιστικού σχεδιασμού. Ειδικά για τα τόξα οι μεγαλύτεροι βαθμοί αξιοποίησης, δηλαδή, τα σημεία τους που καταπονούνται στο μεγαλύτερο βαθμό, παρατηρούνται στις στηρίξεις, εντονότερα σε αυτές που είναι ανατολικά του θόλου.

Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις που έγιναν για συνδυασμούς φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας. Με μορφή πίνακα, δίνονται οι μέγιστες οριζόντιες και κατακόρυφες μετακινήσεις που προέκυψαν στα ακραία τόξα αλλά και στη κορυφή του θόλου. Στα επόμενα κεφάλαια, όπου γίνονται μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις για το θόλο, με έμφαση κυρίως στη συμπεριφορά των τόξων, τα παραπάνω αποτελέσματα θα είναι χρήσιμα για τη σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων προσέγγισης.

4 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΡΑΒΔΩΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΔΟΚΟΥ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μη γραμμικές αναλύσεις που έγιναν στο θόλο στις περιπτώσεις στις οποίες για την προσομοίωση των τόξων του θόλου χρησιμοποιήθηκαν ραβδωτά στοιχεία δοκού. Τονίζεται ότι σε αυτό, καθώς και στο επόμενο κεφάλαιο που ασχολείται επίσης με μη γραμμικές αναλύσεις του θόλου, δίνεται ιδιαίτερο βάρος σχεδόν αποκλειστικά στην συμπεριφορά των τόξων. Τα υπόλοιπα μέλη του θόλου, όπως οι τεγίδες και οι διαγώνιοι σύνδεσμοι, είναι ευθύγραμμα αμφιαρθρωτά στοιχεία και γι' αυτό το λόγο είναι απλώς ο υπολογισμός των φαινομένων λυγισμού κανονιστικά (Κεφάλαιο 3) και σε αυτή τη περίπτωση θεωρούμε ότι μας καλύπτει για τη συμπεριφορά τους. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου περιγράφονται οι διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους έχουν προσομοιωθεί τα τόξα του θόλου. Το λογισμικό ADINA, το οποίο χρησιμοποιήθηκε, δίνει την δυνατότητα στο χρήστη, στη περίπτωση που γίνεται προσομοίωση διπλών ταυ με ραβδωτά στοιχεία δοκών, να γίνει αυτή με τρεις διαφορετικούς τρόπους, οι οποίες είναι η προσομοίωση με Standard ραβδωτών στοιχείων δοκού, Warning ραβδωτών στοιχείων δοκού και προσομοίωση των διατομών και του υλικού με χρήση διαγραμμάτων ροπών – καμπυλοτήτων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων για την κάθε περίπτωση ξεχωριστά, μαζί με τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν για κάθε αποτέλεσμα. Οι αναλύσεις οι οποίες εκτελέστηκαν για κάθε περίπτωση και των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται είναι γραμμικοποιημένες αναλύσεις λυγισμού (LBA), και μη γραμμικές αναλύσεις με τη θεώρηση μη γραμμικότητας γεωμετρίας (GNA), αλλά και μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού (GMNA). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών περιγράφονται καλύτερα με την βοήθεια εικόνων των παραμορφωμένων φορέων, αλλά και δρόμων ισορροπίας οι οποίοι έχουν εξαχθεί από το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε. Εξετάζεται επίσης, με μη γραμμικές αναλύσεις, ο φορέας όταν λαμβάνονται υπόψη αρχικές ατέλειες και πως αυτές επηρεάζουν την συμπεριφορά του. Τέλος εξετάζεται και η επιρροή των θερμοκρασιακών φορτίων στα τόξα του φορέα. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται λόγος συγκεντρωτικά για τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν. Γίνεται επίσης σύγκριση των αποτελεσμάτων για κάθε περίπτωση, ώστε να γίνουν κατανοητά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφορετικών τρόπων προσομοίωσης των τόξων. Είναι

σημαντικό, για τον αναγνώστη, σε περίπτωση που αυτό θεωρηθεί απαραίτητο να επισκεφτεί ξανά το Κεφάλαιο 2.2 κατά τη διάρκεια μελέτης των αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις, ώστε να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο έχει γίνει η ονομασία του κάθε τόξου, και ο προσανατολισμός του θόλου σε σχέση με τα σημεία ορίζοντα, κάτι που θα βοηθήσει στη μελέτη των αποτελεσμάτων.

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΞΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΡΑΒΔΩΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΔΟΚΟΥ

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η προσομοίωση του φορέα όταν έγινε χρήση Ραβδωτών Πεπερασμένων Στοιχείων Δοκού (beam elements). Στο λογισμικό ADINA στο οποίο έγιναν οι αναλύσεις προσφέρονται τρεις διαφορετικές επιλογές σε ότι αφορά την προσομοίωση beam elements, όταν έχουμε να κάνουμε με διπλά ταυ, όπως και είναι οι διατομές των τόξων. Έτσι δημιουργήθηκαν τρεις διαφορετικές υποκατηγορίες προσομοίωσης των τόξων του θόλου με πεπερασμένα ραβδωτά στοιχεία δοκού, οι οποίες είναι η προσομοίωση με Standard beam elements, με Warping beam elements, και τέλος η προσομοίωση των στοιχείων με χρήση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων, τα οποία αντικαθιστούν τα στοιχεία της διατομής και του υλικού που χρησιμοποιείται. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε περίπτωσης παρουσιάζονται παρακάτω, καθώς και στο τέλος του κεφαλαίου όπου συγκρίνονται τα αποτελέσματα της κάθε περίπτωσης. Ο σκοπός για τον οποίο εξετάστηκε η προσομοίωση και με τις τρεις μεθόδους είναι ώστε να γίνει κατανοητό ποια από τις περιπτώσεις είναι η βέλτιστη όταν εξετάζονται στοιχεία με διατομή διπλών ταυ και καμπύλης μορφής. Η διακριτοποίηση του φορέα έγινε έτσι ώστε όλα τα στοιχεία των τόξων να είναι μήκους 0,1 μέτρων. Τα υπόλοιπα μέλη του φορέα, εκτός από τα τόξα, προσομοιάστηκαν και αυτά με πεπερασμένα ραβδωτά στοιχεία beam elements, με τις τεγίδες και τους διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας να διακριτοποιούνται με ένα στοιχείο ανά τεγίδα και διαγώνιο, ενώ οι μηκίδες του τελευταίου ορόφου διακριτοποιήθηκαν και αυτές όπως τα τόξα, δηλαδή με στοιχεία μήκους 0,1 μέτρων το καθένα. Οι στηρίξεις των τόξων προσομοιάζονται δεσμεύοντας όλους τους βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή με πακτώσεις. Ελευθερώνονται επίσης όλες οι καμπτικές στροφές στα σημεία στα οποία οι τεγίδες και οι διαγώνιοι σύνδεσμοι ενώνονται με τα τόξα με την τοποθέτηση εσωτερικών αρθρώσεων στα σημεία αυτά. Στη συνέχεια παρουσιάζονται εκτενέστερα οι τρεις περιπτώσεις προσομοίωσης με ραβδωτά στοιχεία για τα τόξα.

4.2.1 Προσομοίωση με χρήση Standard και Warping beam elements

Για να οριστούν τα ραβδωτά στοιχεία δοκού τύπου Standard και Warping είναι απαραίτητο πρώτα να οριστεί στο πρόγραμμα ADINA η εκάστοτε διατομή (Cross-section) και υλικό (Material). Στη συνέχεια δίνεται η δυνατότητα για τις διατομές, οι οποίες είναι διπλά ταυ, να γίνει επιλογή, αν αυτά θα προσομοιωθούν με την χρήση Standard ή Warping beam elements. Τα ραβδωτά στοιχεία δοκού προαιρετικά είναι δυνατόν να συμπεριλαμβάνουν και τον βαθμό ελευθερίας στρέβλωσης. Αυτή η επιλογή είναι ταιριαστή σε περιπτώσεις που το μοντέλο που εξετάζεται έχει ανοιχτές διατομές – κυρίως λεπτότοιχες – ή όταν η γωνία στροφής ανά μονάδα μήκους δεν είναι σταθερή κατά μήκος του στοιχείου. Στην εργασία αυτή το γραμμικό στοιχείο δοκού στο οποίο δεν εμπεριέχεται ο βαθμός ελευθερίας στρέβλωσης θα αναφέρεται από εδώ και πέρα ως Standard beam element, ενώ το στοιχείο στο οποίο εμπεριέχεται θα ονομάζεται Warping beam element. Αξίζει να αναφερθεί ότι το λογισμικό ADINA συνιστά την χρήση των Warping beam elements όταν ορίζονται διατομές τύπου διπλού ταυ για ακριβέστερα αποτελέσματα των αναλύσεων.

Η ανάγκη ορισμού των Warping beam elements στο συγκεκριμένο λογισμικό έγκειται στο γεγονός ότι σε κάποιες περιπτώσεις όταν γίνεται χρήση απλών Standard beam elements υπάρχει πιθανότητα εξαγωγής ανακριβών αποτελεσμάτων. Αυτό μπορεί να οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι παραμορφώσεις λόγω στρέβλωσης δεν είναι συμβατές μεταξύ γειτονικών στοιχείων. Παρόλα αυτά

μπορεί να γίνει χρήση των Standard beam elements χωρίς να υπάρχουν λάθη στα αποτελέσματα σε περιπτώσεις όπως όταν η στρέβλωση είναι μηδενική στον εξεταζόμενο φορέα, η γωνία στροφής ανά μονάδα μήκους είναι σταθερή κατά μήκος των στοιχείων, ή όταν η υπάρχουσα στρέβλωση δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά του φορέα και άρα και τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Έτσι στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η προσομοίωση και των δύο περιπτώσεων ώστε να ελεγχθεί η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων και κατά πόσο σε μία τέτοια περίπτωση είναι αναγκαία η χρήση μια εκ των δύο περιπτώσεων αυτών.

4.2.2 Προσομοίωση με χρήση διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων

Συχνά σε ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται, είναι πιθανό τα δεδομένα τα οποία είναι διαθέσιμα να είναι με τη μορφή της σχέσης μεταξύ καμπτικής ροπής και καμπυλότητας, και μεταξύ της στρεπτικής ροπής και γωνίας στροφής. Γι' αυτό το λόγο το λογισμικό ADINA δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν απευθείας τα δεδομένα αυτά για τον ορισμό του γραμμικού στοιχείου δοκού, χωρίς να χρειάζεται να οριστεί η διατομή και ο νόμος τάσεων-παραμορφώσεων του υλικού. Για την εξαγωγή των διαγραμμάτων ροπής-καμπυλότητας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό TechnologistikiWorks 2016 – Διαξονική Κάμψη. Εξήχθησαν διαγράμματα ροπής-καμπυλότητας ως προς τον ισχυρό και ασθενή άξονα της διατομής για τιμές αξονικών δυνάμεων $N=0$ έως $N=2000\text{KN}$ για τα εσωτερικά τόξα και έως $N=1600\text{KN}$ για τα δύο εξωτερικά τόξα, μιας και σε αυτά αναμένεται να ασκούνται μικρότερες αξονικές δυνάμεις, με τις τιμές των αξονικών δυνάμεων να αυξάνονται ανά 10KN . Για την εξαγωγή των διαγραμμάτων αυτών χρησιμοποιήθηκε πλαστικός χάλυβας ποιότητας S355 με κράτυνση, και γι' αυτό το λόγο οι αναλύσεις που γίνονται σε αυτή τη περίπτωση λαμβάνουν όλες υπόψη τη μη-γραμμικότητα υλικού (GMNA, GMNIA). Στη συνέχεια υπολογίστηκαν και οι τιμές των διαγραμμάτων αξονικής δύναμης σε σχέση με την παραμόρφωση ϵ για κάθε διατομή, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. Οι τιμές αυτές προέκυψαν από το νόμο του υλικού για το εμβαδόν της κάθε διατομής.

Πίνακας 4-1: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων-παραμορφώσεων για τα εσωτερικά τόξα

Αξονικές Δυνάμεις (KN)	Παραμόρφωση ϵ (%)
0	0
2119.35	0.169
3044.7	22

Πίνακας 4-2: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων-παραμορφώσεων για το μεσαίο τόξο

Αξονικές Δυνάμεις (KN)	Παραμόρφωση ϵ (%)
0	0
3333.45	0.169
4788.9	22

Πίνακας 4-3: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων-παραμορφώσεων για τα εξωτερικά τόξα

Αξονικές Δυνάμεις (KN)	Παραμόρφωση ϵ (%)
0	0
3780.75	0.169
5431.5	22

Πρέπει επίσης να οριστούν τα διαγράμματα στρεπτικής ροπής σε σχέση με τη γωνία στροφής ανά μονάδα μήκους. Η εξαγωγή των διαγραμμάτων αυτών, λόγω της ύπαρξης και επιρροής και της στρέβλωσης στη στροφή της διατομής, μπορεί να αποδειχθεί πολύ πολύπλοκη και μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω έρευνας που να επικεντρώνεται αποκλειστικά στη προσομοίωση στοιχείων με τον τρόπο αυτό. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποφασίστηκε στα διαγράμματα στρεπτικής ροπής – γωνία στροφής, να τοποθετηθούν αυθαίρετα πολύ μικρές τιμές στροφών, δεσμεύοντας ουσιαστικά τη στροφή των διατομών. Αυτή η πρακτική μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς κίνδυνο λάθους στα αποτελέσματα για μοντέλα των οποίων η συμπεριφορά εξετάζεται μόνο εντός επιπέδου. Έχουν γίνει τέτοιου είδους δοκιμές σε δύο διαστάσεις, από το συγγραφέα αλλά και σε άλλες περιπτώσεις διπλωματικών εργασιών, όπου και έγινε κατανοητό ότι το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου προσομοίωσης είναι ότι, σε αντίθεση με τα Standard και Warping beam elements, λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι η διατομή διαρρέει σταδιακά, ξεκινώντας από την ακραία ίνα, μέχρις ότου έχουμε πλήρη διαρροή της διατομής. Στην παρούσα εργασία, το μοντέλο του θόλου το οποίο εξετάζεται αναμένεται να εκφράζει παραμορφώσεις και εντός και εκτός επιπέδου και γι' αυτό το λόγο οι στροφές των διατομών μπορεί να αποδειχθούν ότι παίζουν μεγάλο ρόλο στη συμπεριφορά του. Με την επιλογή που έγινε να δεσμευτούν ουσιαστικά οι στροφές των διατομών, τοποθετώντας πολύ μικρές τιμές γωνιών στροφής ανά μονάδα μήκους στα διαγράμματα, αποφασίστηκε να γίνει σύγκριση με τις άλλες περιπτώσεις προσομοίωσης των τόξων και να βγουν ανάλογα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά τους με και χωρίς στροφή των διατομών, και πόσο αυτές οι στροφές επηρεάζουν την αστοχία του φορέα.

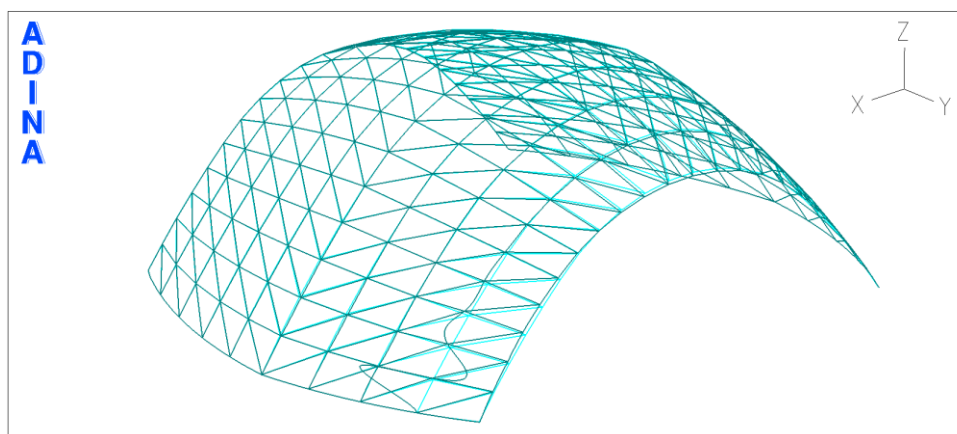
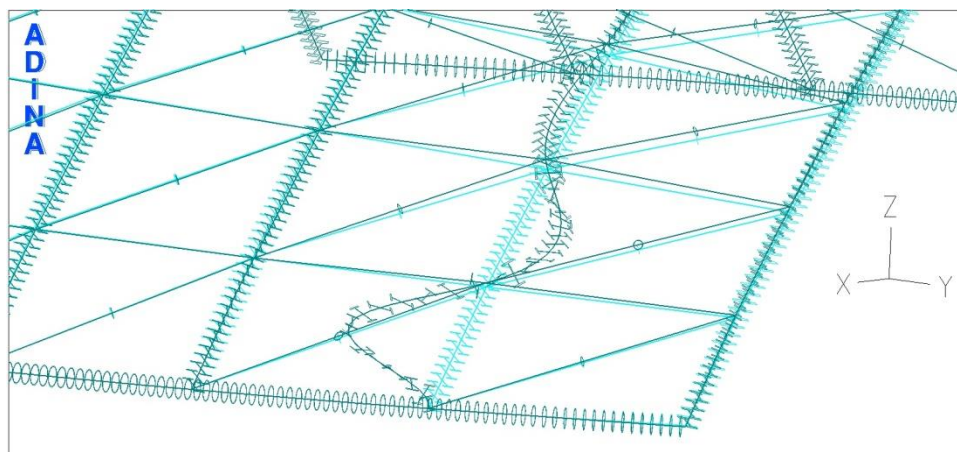
4.3 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ STANDARD BEAM ELEMENTS

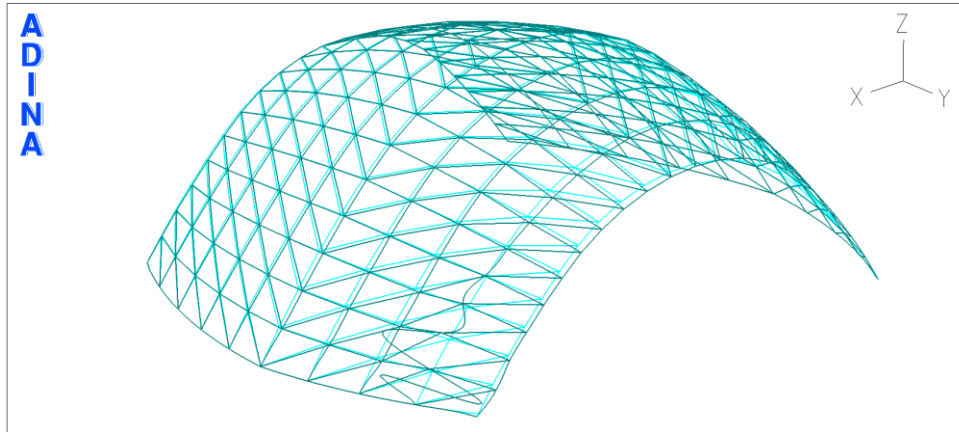
4.3.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (Linearized Buckling Analysis - LBA)

Από τις αναλύσεις LBA που έγιναν για το μοντέλο όπου η προσομοίωση των τόξων γίνεται με χρήση των Standard γραμμικών στοιχείων δοκού του λογισμικού ADINA (Standard beam elements) προέκυψαν οι ιδιομορφές και τα κρίσιμα φορτία του φορέα για φόρτιση σύμφωνα με τους συνδυασμούς για Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ) και Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ), οι οποίοι έχουν παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 2.4.5. Τα αποτελέσματα όπως αυτά τα παρουσιάζει ο παρακάτω Πίνακας 4-4 μαζί με εικόνες του μοντέλου από το λογισμικό ADINA (Εικόνα 4-1-Εικόνα 4-8) στις οποίες φαίνεται ο παραμορφωμένος φορέας για κάθε ιδιομορφή μαζί με λεπτομέρεια της παραμόρφωσης. Παρατηρείται ότι για τους δύο συνδυασμούς φορτίσεων οι ιδιομορφές που προκύπτουν είναι ίδιες, με μόνη διαφορά στα κρίσιμα φορτία λυγισμού. Όπως φαίνεται και από τις παρακάτω εικόνες ο λυγισμός εμφανίζεται στην ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου του θόλου. Ο λυγισμός αυτός είναι στρεπτοκαμπτικού χαρακτήρα αφού όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα η διατομή υπόκειται σε στροφή περί το κέντρο διάτμησης της ενώ παρατηρείται ταυτόχρονη μετατόπιση σε σχέση με τον αρχικό φορέα. Η μετατόπιση αυτή είναι κυρίως κατά τον ασθενή άξονα στην πρώτη ιδιομορφή ενώ στις μεγαλύτερης τάξης ιδιομορφές, όπου το κρίσιμο φορτίο είναι μεγαλύτερο, παρατηρείται μετατόπιση και κατά τον ισχυρό άξονα της διατομής του τόξου. Ταυτόχρονα με τον λυγισμό της βάσης του 9^{ου} τόξου παρατηρούνται και στρεπτικά φαινόμενα στις βάσεις των γειτονικών του τόξων. Σημειώνεται ότι για να είναι δυνατό να εκφραστούν οι ιδιομορφές μεγαλύτερες της πρώτης, χρειάζεται να θεωρηθούν οι κατάλληλες πλευρικές εξασφαλίσεις.

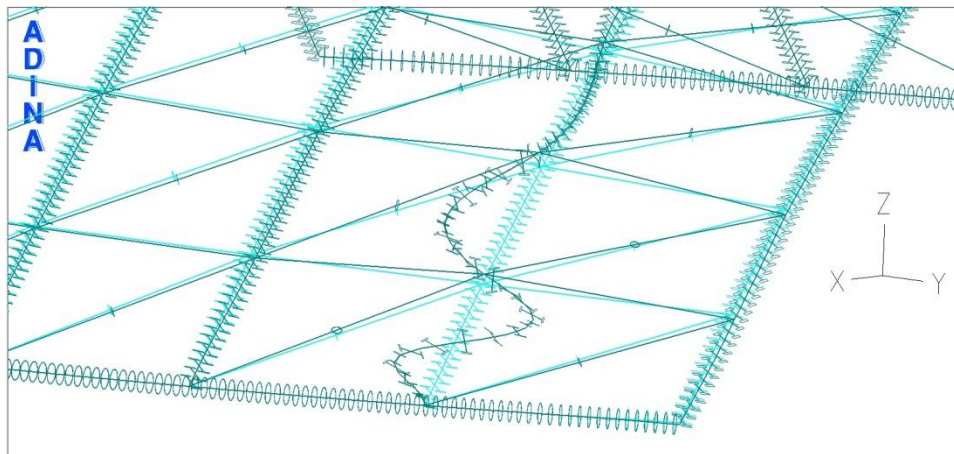
Πίνακας 4-4: Κρίσιμα φορτία – Φορτικοί Συντελεστές

	ΟΚΛ	ΟΚΑ
1 ^η Ιδιομορφή	6,369	4,314
2 ^η Ιδιομορφή	7,488	5,094
3 ^η Ιδιομορφή	8,278	5,650
4 ^η Ιδιομορφή	8,618	5,892

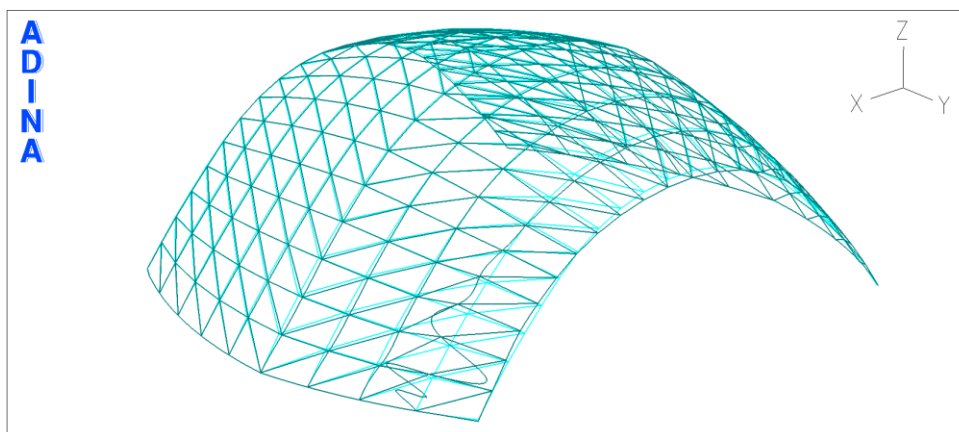
Εικόνα 4-1: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 1^η Ιδιομορφή, Βορειοανατολική όψηΕικόνα 4-2: Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα στο 9^ο τόξο σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή



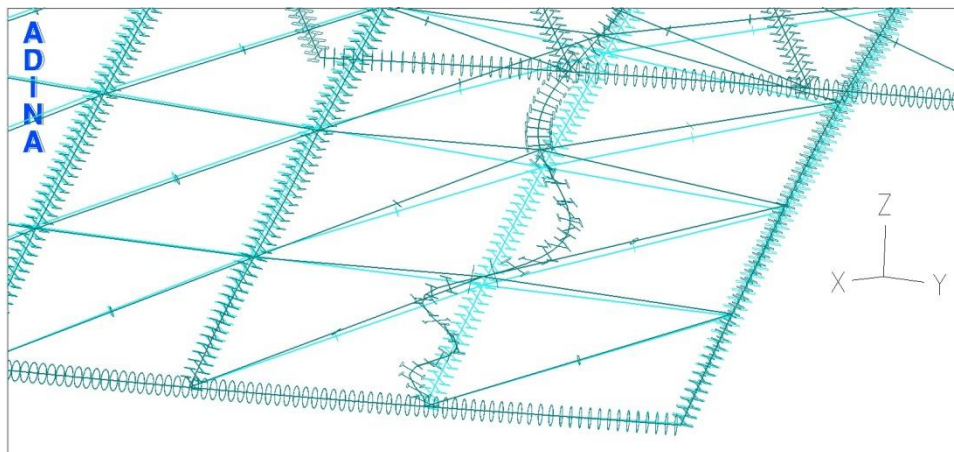
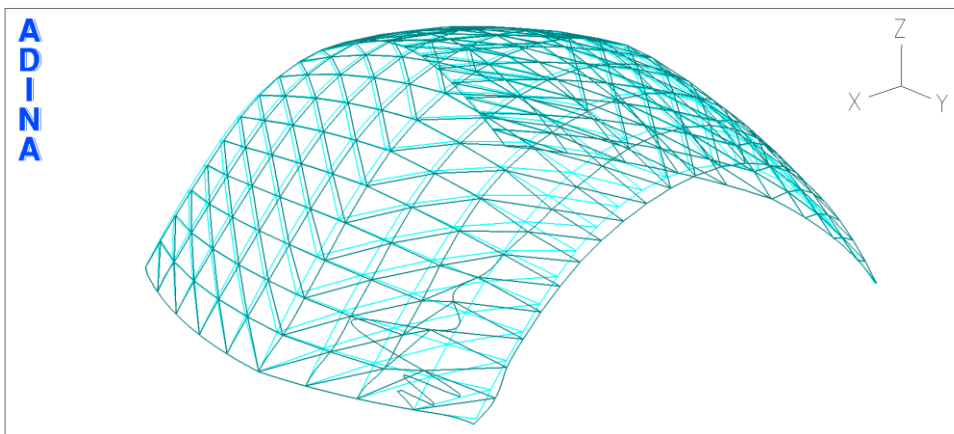
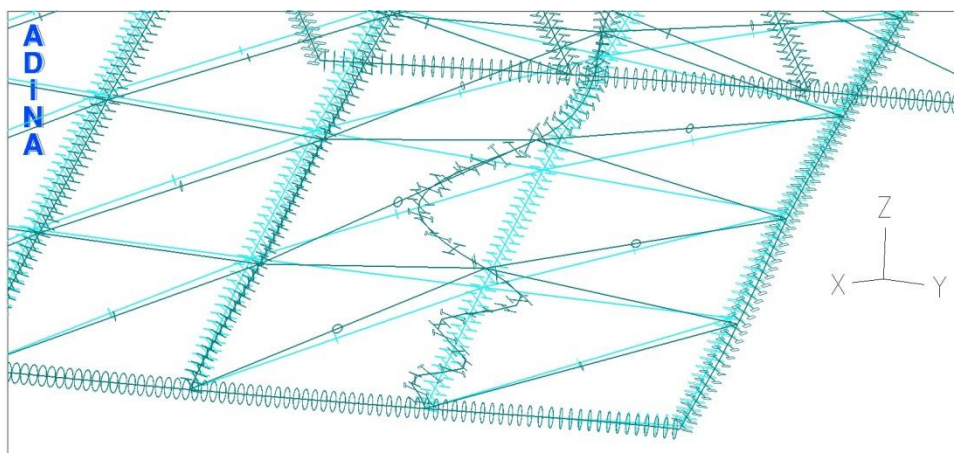
Εικόνα 4-3: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 2^η Ιδιομορφή, Βορειοανατολική όψη



Εικόνα 4-4: Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα στο 9^ο τόξο σύμφωνα με την 2^η ιδιομορφή

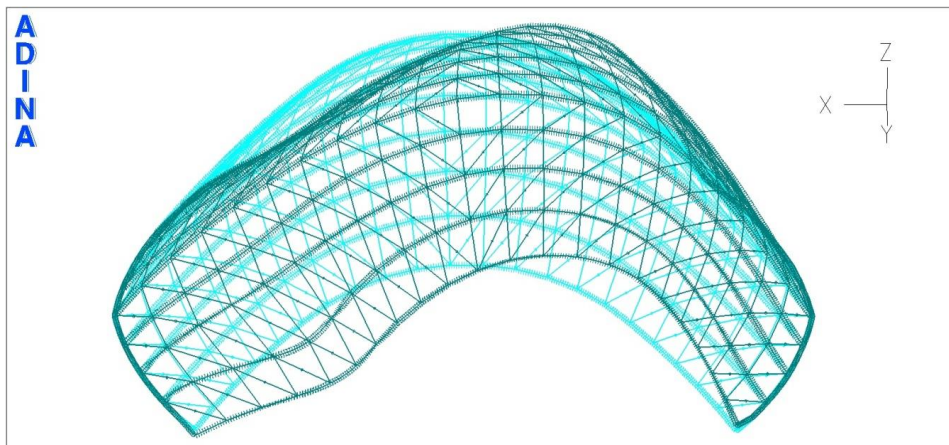


Εικόνα 4-5: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 3^η Ιδιομορφή, Βορειοανατολική όψη

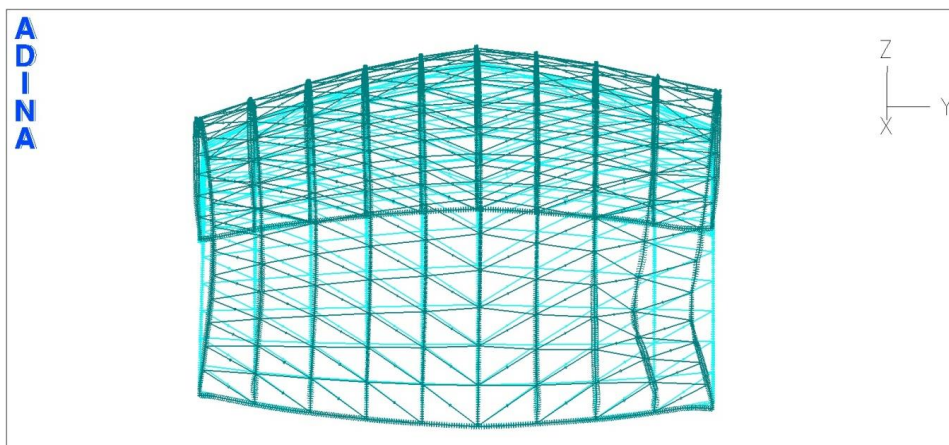
Εικόνα 4-6: Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα στο 9^ο τόξο σύμφωνα με την 3^η ιδιομορφήΕικόνα 4-7: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 4^η Ιδιομορφή, Βορειοανατολική όψηΕικόνα 4-8: Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα στο 9^ο τόξο σύμφωνα με την 4^η ιδιομορφή

4.3.2 Μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας (GNA)

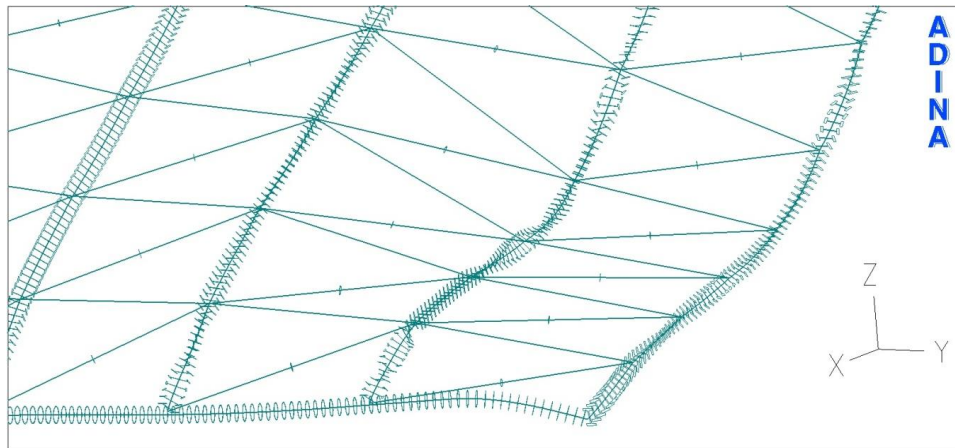
Σε αυτή την περίπτωση αναλύσεων, το υλικό του φορέα θεωρείται ελαστικό, ενώ θεωρούνται μεγάλες μετακινήσεις (kinematics-large displacements) ώστε να γίνει αντιληπτή η μη γραμμικότητα γεωμετρίας του φορέα. Η ανάλυση αυτή έγινε με τη μέθοδο arc-length του λογισμικού Adina, ενώ εξετάστηκαν και οι δύο συνδυασμοί φορτίσεων, για Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας και Οριακή Κατάσταση Αστοχίας. Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα και τις εικόνες οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω, ολόκληρος ο φορέας παρουσιάζει μετακινήσεις προς τα αρνητικά του άξονα X (προς τα δυτικά) καθώς και προς τα κάτω, δηλαδή προς τα αρνητικά του άξονα Z από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν πίεση και προς τα πάνω, δηλαδή προς τα θετικά του άξονα Z από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν αναρρόφηση. Όπως και στην ανάλυση LBA έτσι και στην GNA, παρατηρούνται στρεπτοκαμπτικά φαινόμενα κυρίως στα δύο ακριανά τόξα κάθε μεριάς του θόλου, με μεγαλύτερη ένταση στο 9^ο τόξο. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω, είναι με μορφή δρόμου ισορροπίας για το σημείο του 9^{ου} τόξου στο οποίο παρατηρείται η μεγαλύτερη μετατόπιση κατά τον άξονα Z στο Σχήμα 4-1, αλλά και εικόνων οι οποίες βοηθούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς του φορέα. Στην Εικόνα 4-9 και την Εικόνα 4-10 φαίνεται ο παραμορφωμένος φορέας σε σχέση με την αρχική του μορφή, από την βόρεια και την ανατολική όψη, ενώ στην Εικόνα 4-11 φαίνεται η λεπτομέρεια παραμόρφωσης του 9^{ου} τόξου του θόλου στο σημείο όπου και παρατηρείται η μεγαλύτερη μετατόπιση. Στην Εικόνα 4-12 φαίνονται οι μετατοπίσεις σε όλα τα μέρη του φορέα κατά τους τρεις άξονες.



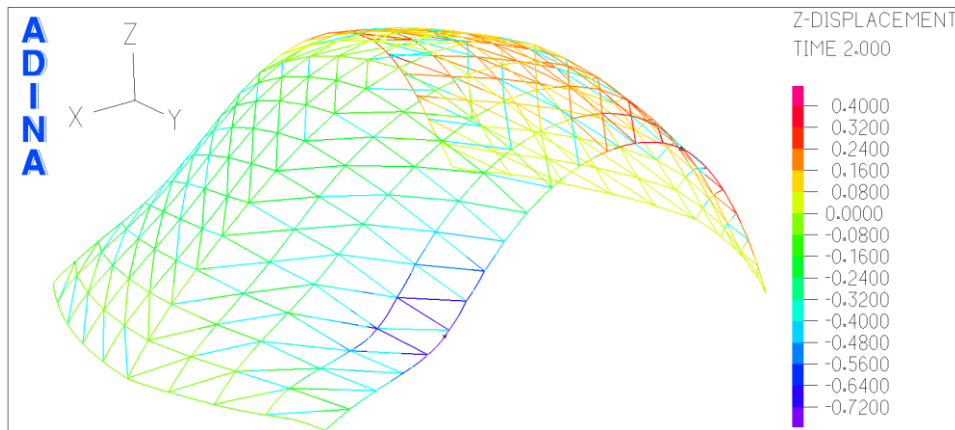
Εικόνα 4-9: Παραμορφωμένος Φορέας, Βόρεια όψη



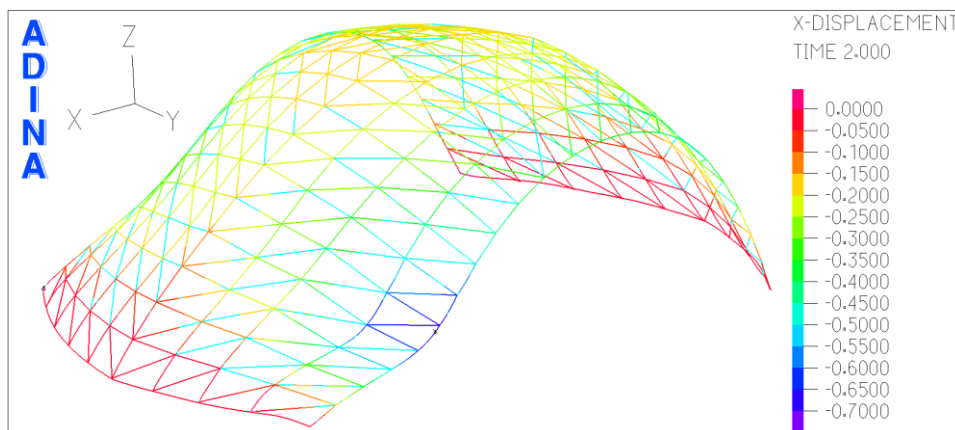
Εικόνα 4-10: Παραμορφωμένος Φορέας, Ανατολική όψη



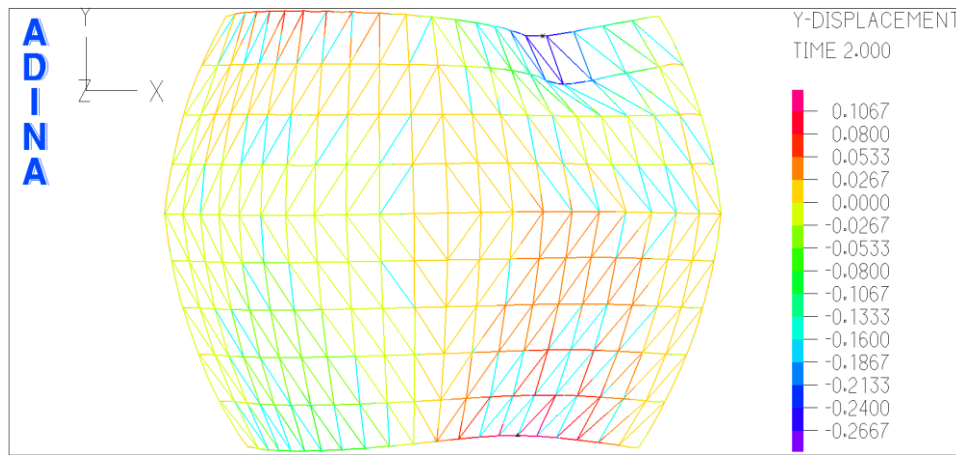
Εικόνα 4-11: Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα, ανατολική βάση 9^{ου} τόξου.



(α)



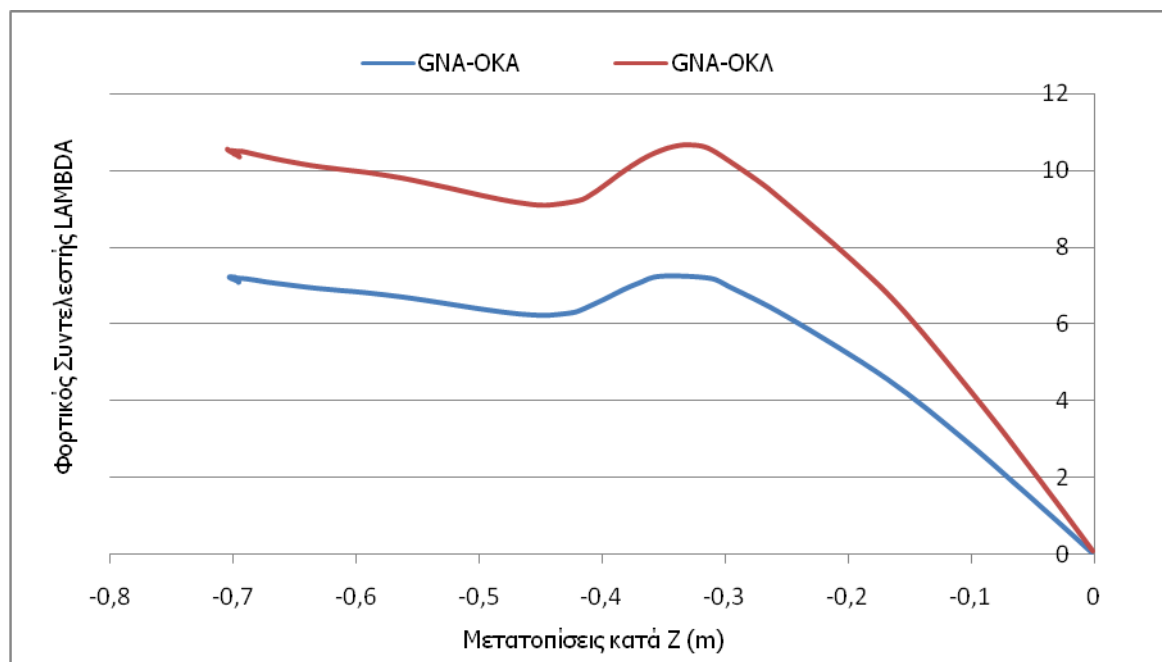
(β)



(γ)

Εικόνα 4-12: Μετατοπίσεις κατά τον άξονα Z (α), τον άξονα X (β) και τον άξονα Y (γ)

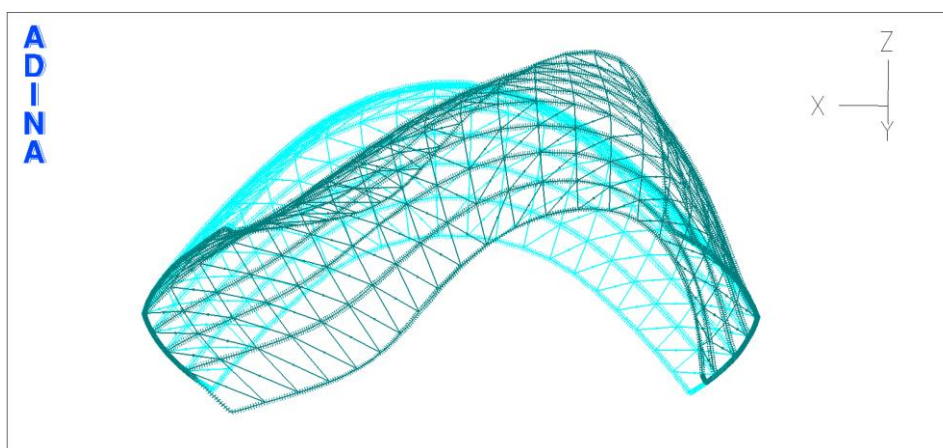
Για να γίνει κατανοητή, ακόμα περισσότερο, η συμπεριφορά του φορέα όταν υπάρχει μη γραμμικότητα γεωμετρίας, επιλέχθηκε να εξαχθεί δρόμος ισορροπίας για το σημείο του 9^{ου} τόξου με τη μεγαλύτερη μετατόπιση προς τα κάτω. Από τον δρόμο ισορροπίας παρατηρείται ότι το μέγιστο φορτίο για την ΟΚΛ είναι με φορτικό συντελεστή $\lambda=10.68$, ενώ για την ΟΚΑ είναι $\lambda=7.23$. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4-1 οι δύο δρόμοι ισορροπίας είναι της ίδιας μορφής. Αποτελούνται από έναν αρχικό ανοδικό κλάδο ο οποίος παρουσιάζει μικρή μη γραμμικότητα ενώ στη συνέχεια εμφανίζεται ο λυγισμός μέσω μη ευκρινούς ασταθούς σημείου διακλάδωσης που ακολουθείται από καθοδικό κλάδο. Η διαφορά στην κλίση του μεταξύ των δύο διαγραμμάτων οφείλεται στους διαφορετικούς συντελεστές ασφαλείας που έχουν εφαρμοστεί στις δύο περιπτώσεις συνδυασμού φορτίσεων.



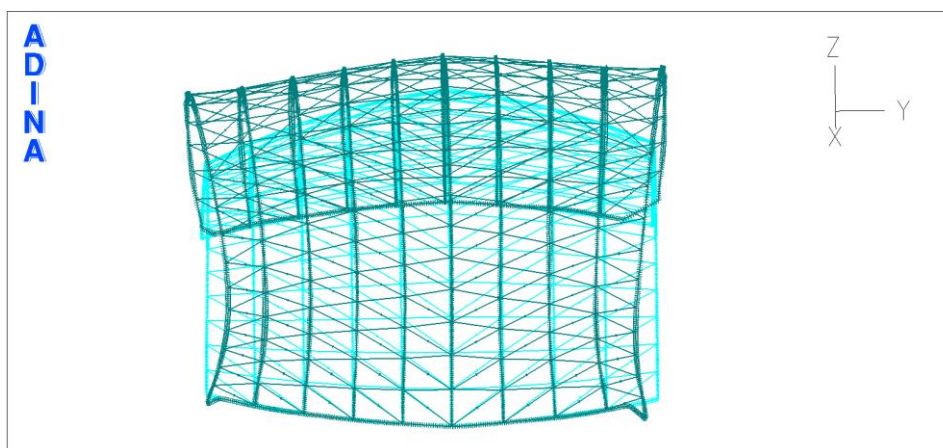
Σχήμα 4-1: Δρόμος Ισορροπίας, μετατοπίσεις κατά Z, σημείο 9^{ου} τόξου με μεγαλύτερη μετατόπιση

4.3.3 Μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού (GMNA)

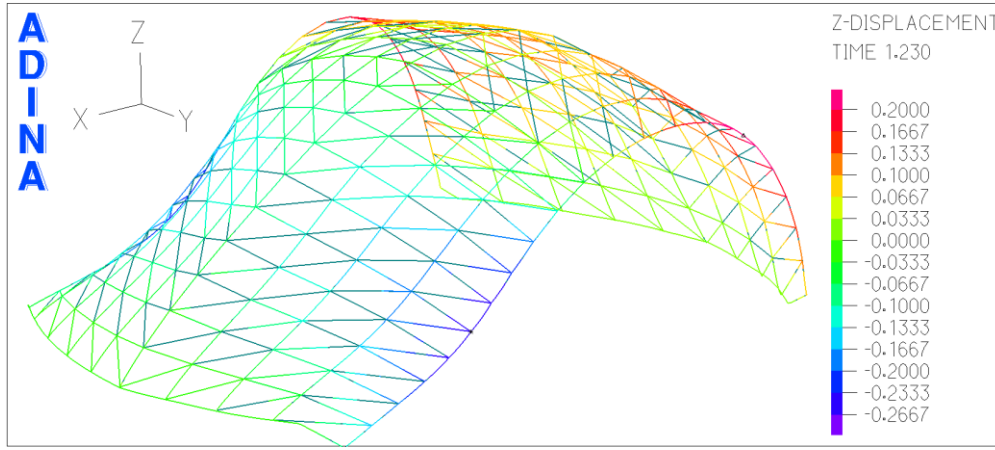
Για την ανάλυση αυτή, χρησιμοποιήθηκε πλαστικό διγραμμικό υλικό με κράτυνση, χάλυβας ποιότητας S355, ενώ θεωρούνται και μεγάλες μετακινήσεις (kinematics-large displacements). Έτσι μπορεί να εκφραστεί η πιθανή μη γραμμικότητα του φορέα, ως προς το υλικό αλλά και την γεωμετρία. Οι ανάλυση αυτή έγινε με τη μέθοδο arc-length του λογισμικού ADINA, ενώ εξετάστηκαν και οι δύο συνδυασμοί φορτίσεων, για Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας και Αστοχίας. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών, όπως και στην περίπτωση της GNA, δείχνουν τη μορφή του παραμορφωμένου φορέα στην Εικόνα 4-13 και την Εικόνα 4-14, τις μέγιστες μετακινήσεις ως προς τους τρεις κυρίους άξονες στην Εικόνα 4-15, αλλά και τον δρόμο ισορροπίας για το σημείο του 9^{ου} τόξου για το οποίο εξήχθησαν και τα αποτελέσματα για την GNA στο Σχήμα 4-2, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων. Από τις εικόνες του παραμορφωμένου φορέα φαίνεται ότι ολόκληρος ο φορέας παρουσιάζει μετακινήσεις προς τα αρνητικά του άξονα X (προς τα δυτικά) καθώς και προς τα αρνητικά του άξονα Z από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν πίεση και προς τα θετικά του άξονα Z από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν αναρρόφηση, όπως δηλαδή και στην ανάλυση GNA. Επίσης εξήχθησαν από τα αποτελέσματα της ανάλυσης δρόμοι ισορροπίας για την στήριξη του 9^{ου} τόξου οι οποίοι φαίνονται στο Σχήμα 4-3 σημείο το οποίο φαίνεται να είναι αυτό το οποίο αστοχεί πρώτο, δηλαδή η μη γραμμικότητα εμφανίζεται στο σημείο αυτό για το μικρότερο φορτικό συντελεστή.



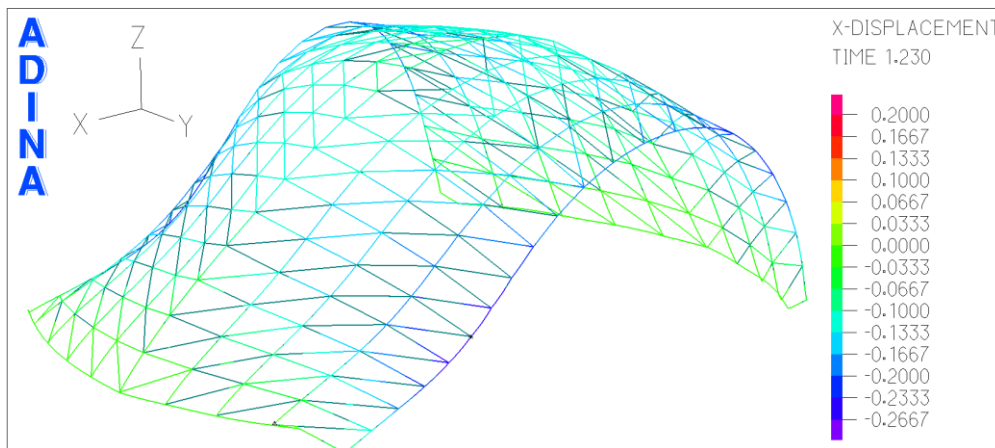
Εικόνα 4-13: Παραμορφωμένος Φορέας, Βόρεια όψη



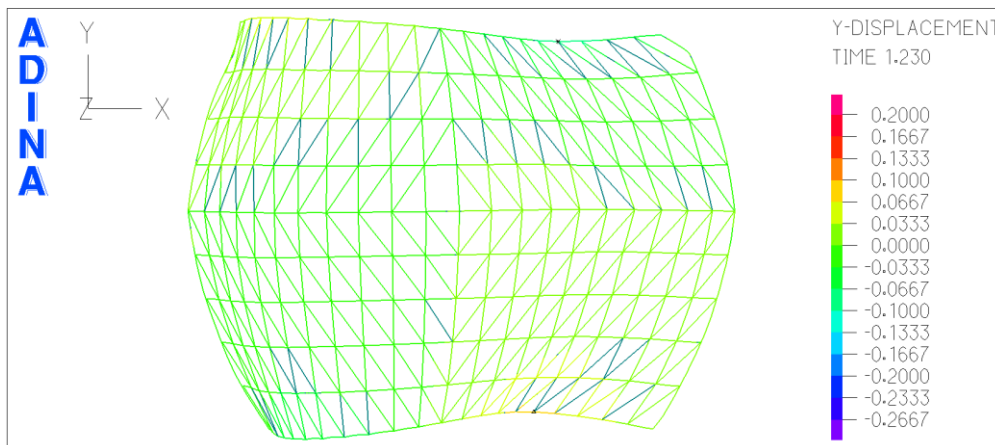
Εικόνα 4-14: Παραμορφωμένος Φορέας, Ανατολική όψη



(α)



(β)

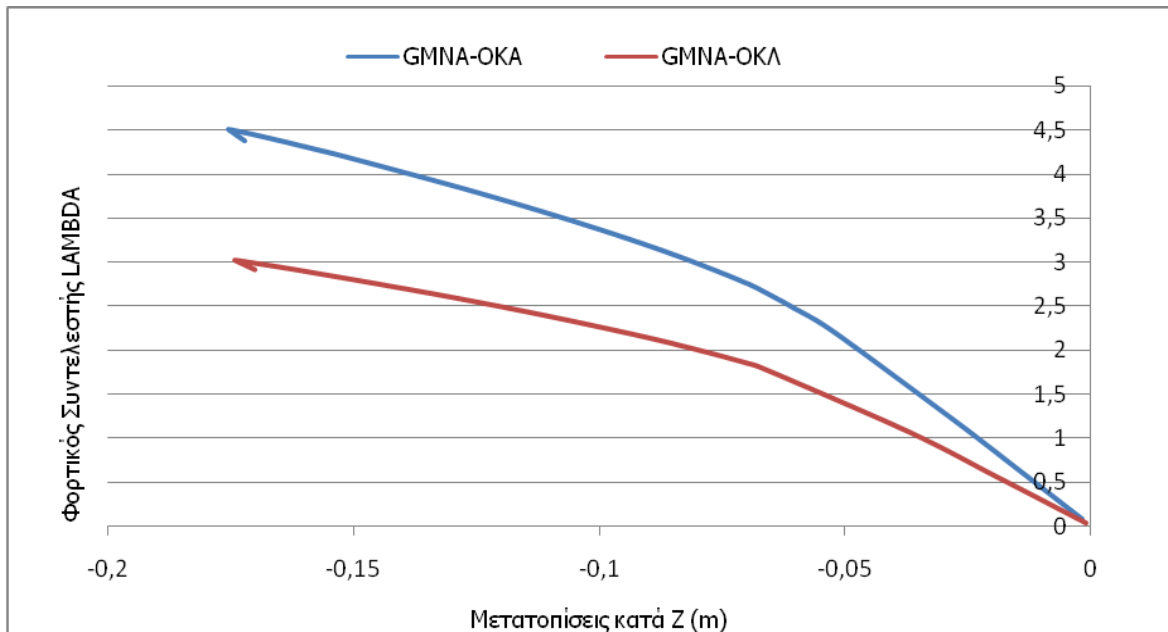


(γ)

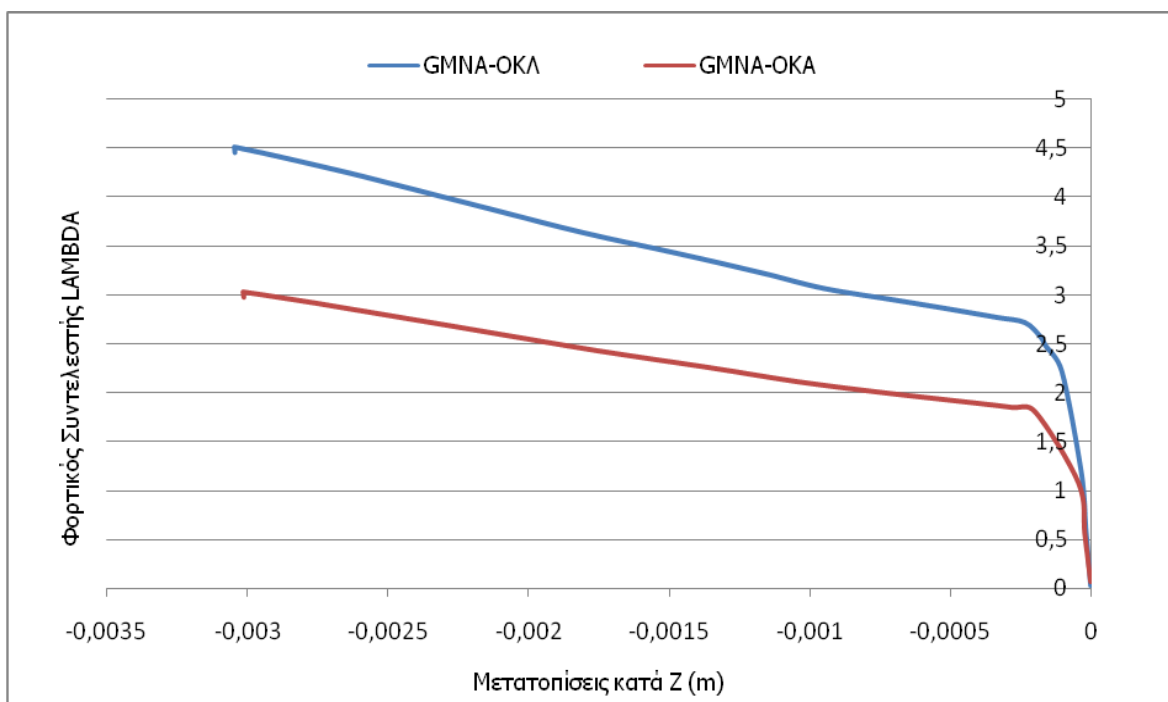
Εικόνα 4-15: Μετατοπίσεις κατά τον άξονα Z (α), τον άξονα X (β) και τον άξονα Y (γ)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι δρόμοι ισορροπίας που εξήχθησαν είναι για την ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου η οποία διαρρέει πρώτη, για το μικρότερο δηλαδή φορτικό συντελεστή, και δευτερευόντως για το σημείο του 9^{ου} τόξου με την μεγαλύτερη μετατόπιση. Στη περίπτωση του δρόμου ισορροπίας της στήριξης, τα διαγράμματα για ΟΚΛ και ΟΚΑ είναι γραμμικά με σταθερή

δυσκαμψία μέχρι ο φορτικός συντελεστής να φτάσει τις τιμές $\lambda=2,22$ και $\lambda=1,07$ αντίστοιχα. Ακολουθεί μικρή μείωση της δυσκαμψίας και για τις δύο περιπτώσεις μέχρι τις τιμές $\lambda=2,72$ και $\lambda=1,80$ όπου παρατηρείται ευσταθές σημείο διακλάδωσης, μιας και ακολουθεί ανοδικός μεταελαστικός κλάδος. Στους δρόμους ισορροπίας που αφορούν το σημείο του 9^{ου} τόξου όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη μετατόπιση, φαίνεται ότι υπάρχει λιγότερο εμφανής μη γραμμικότητα, καθώς η δυσκαμψία μειώνεται σε μικρό βαθμό για φορτικό συντελεστή $\lambda=2,85$ για την περίπτωση φόρτισης ΟΚΛ και $\lambda=1,81$ για την περίπτωση φόρτισης ΟΚΑ. Είναι εμφανές και από τα δύο διαγράμματα ότι ο φορέας παρουσιάζει μεγάλη αντοχή και μετά τη πρώτη διαρροή υλικού.



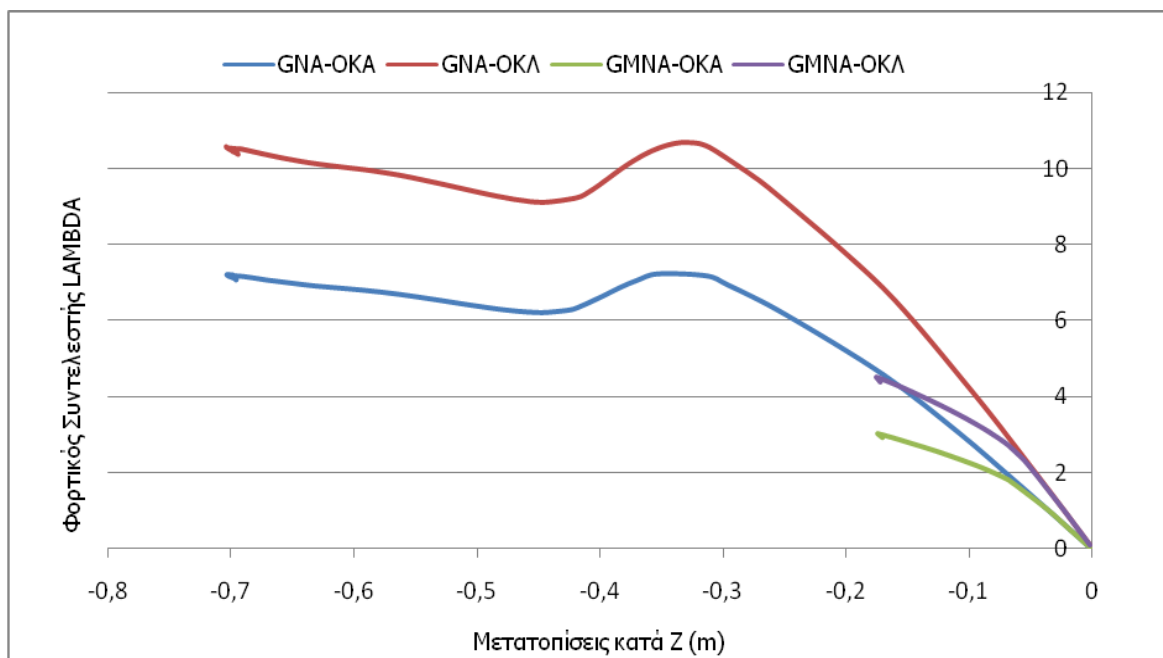
Σχήμα 4-2: Δρόμος Ισορροπίας, μετατοπίσεις κατά Z, σημείο 9^{ου} τόξου με μεγαλύτερη μετατόπιση



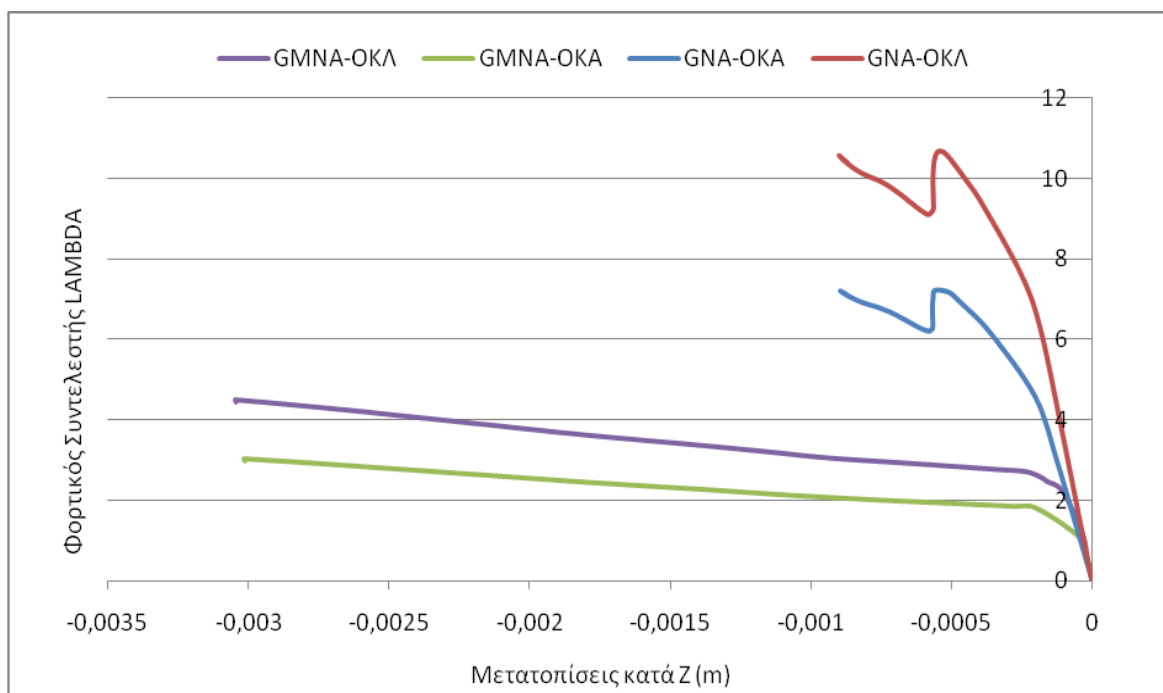
Σχήμα 4-3: Δρόμος Ισορροπίας, μετατοπίσεις κατά Z, ανατολικής στήριξης 9^{ου} τόξου

4.3.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων των αναλύσεων GNA και GMNA

Σε αυτό το κομμάτι, γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τις αναλύσεις GNA και GMNA, ώστε να γίνει αντιληπτό αν η μη γραμμικότητα γεωμετρίας ή υλικού συμβάλει περισσότερο στην αστοχία του φορέα. Γι' αυτό το λόγο συγκρίνονται οι δρόμοι ισορροπίας για τη ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου και το σημείο του τόξου που έχει την μεγαλύτερη μετατόπιση. Από τη σύγκριση αυτή μεταξύ των περιπτώσεων GNA και GMNA γίνεται κατανοητό ότι ο φορέας αστοχεί λόγω μη γραμμικότητας υλικού, σε πολύ μικρότερα φορτία σε σχέση με τις αναλύσεις GNA.



Σχήμα 4-4 :Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GNA και GMNA για σημείο 9^{ου} τόξου με τη μεγαλύτερη μετατόπιση

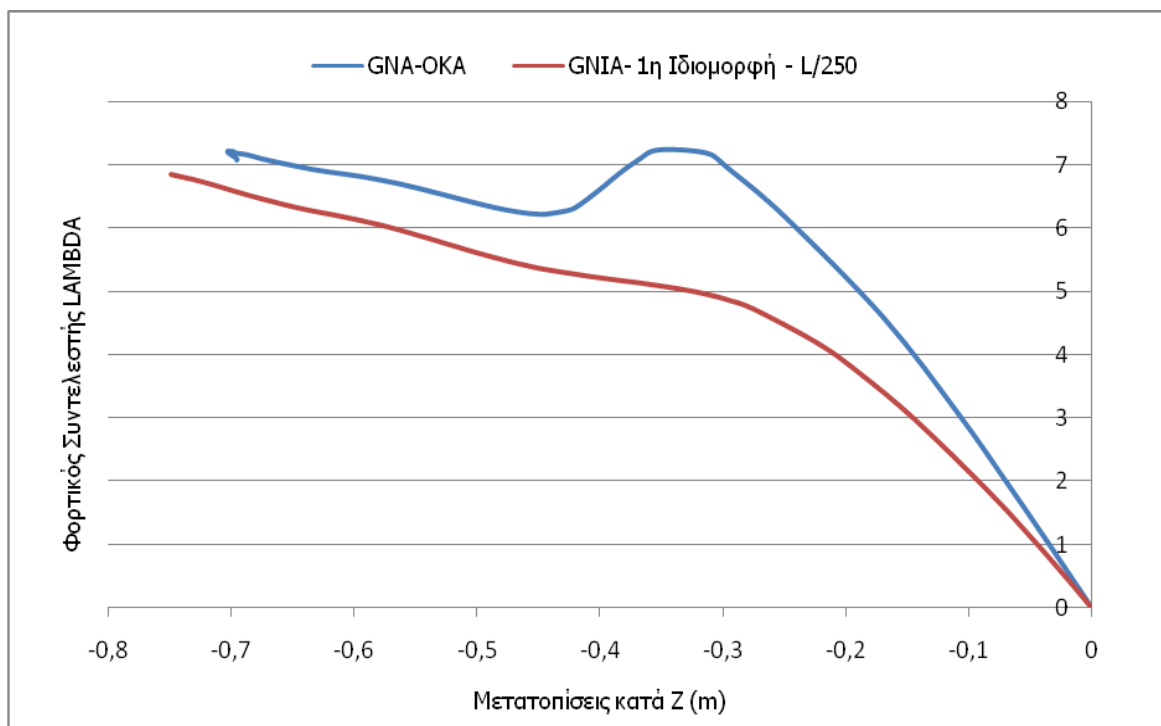


Σχήμα 4-5: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GNA και GMNA για ανατολική στήριξη 9^{ου} τόξου

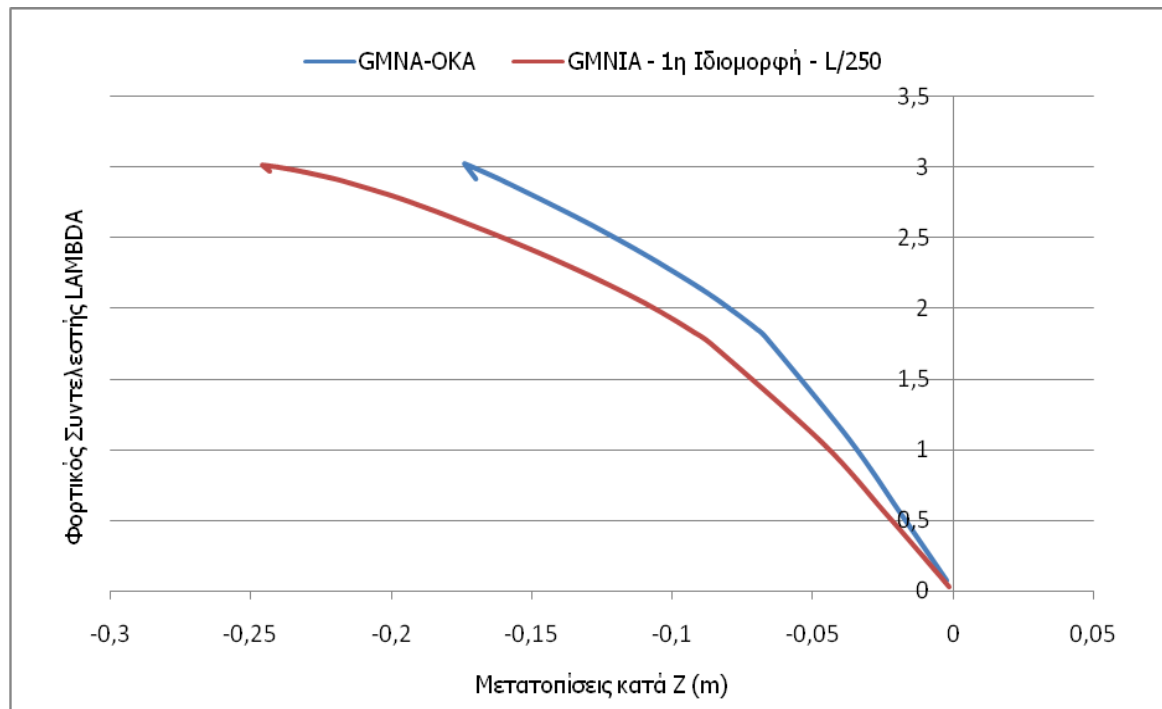
4.3.4 Επιρροή αρχικών ατελειών στην συμπεριφορά των τόξων

Όλοι οι πραγματικοί φορείς χαρακτηρίζονται από ατέλειες που μπορεί να οφείλονται είτε σε ανομοιογένεια του υλικού, είτε σε αποκλίσεις από την ιδεατή γεωμετρία λόγω κατασκευαστικής ανακρίβειας, είτε να είναι ατέλειες ως προς την εφαρμογή του φορτίου. Η επίδραση των ατελειών στη μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής εξαρτάται από το είδος του φορέα και τον κυρίαρχο μηχανισμό αστοχίας του. Η ατέλεια που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση αυτή, είναι με την μορφή απόκλισης από την ιδεατή γεωμετρία, μεγέθους $L/250$ και σχήμα σύμφωνα με την πρώτη ιδιομορφή του φορέα, όπως αυτή υπολογίστηκε κατά την ανάλυση LBA. Έγινε αρχικά ανάλυση μη γραμμικότητας γεωμετρίας με ατέλειες (GNIA) και στη συνέχεια ανάλυση μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού (GMNIA) για Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας και Αστοχίας.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων εξήχθησαν δρόμοι ισορροπίας για το σημείο του 9^{ου} τόξου με τη μεγαλύτερη μετατόπιση ίδιο με το σημείο από τις αναλύσεις GNA και GMNA και συγκρίνονται στο Σχήμα 4-6 και στο Σχήμα 4-7 έτσι ώστε να φανεί η πραγματική επιρροή της ατέλειας στη λειτουργία του φορέα. Όπως αποδείχθηκε παραπάνω, η μορφή των δρόμων ισορροπίας για τις περιπτώσεις φόρτισης για OKΛ και OKΑ είναι πανομοιότυπες για την κάθε ανάλυση και για αυτό το λόγο τα διαγράμματα που θα παρουσιαστούν παρακάτω θα είναι μόνο για τις αναλύσεις με φορτίσεις OKΑ. Για την περίπτωση του σημείου του 9^{ου} τόξου με την μεγαλύτερη μετατόπιση στο Σχήμα 4-6, παρατηρείται ότι για την ανάλυση GNA η αρχική ατέλεια έχει ως συνέπεια την κατάργηση του σημείου διακλάδωσης και την ενοποίηση του κυρίου και του δευτερεύοντα δρόμου ισορροπίας, σε έναν, ενιαίο, καμπύλο δρόμο ισορροπίας που «εγγράφεται» στην γωνία μεταξύ του κυρίου και δευτερεύοντα δρόμου. Παρότι ο λυγισμός στην περίπτωση χρήσης ατέλειας δεν εμφανίζεται πλέον απότομα, παρατηρείται ότι η μείωση της δυσκαμψίας γίνεται ταχύτερα. Στις αναλύσεις όπου χρησιμοποιείται και μη γραμμικότητα υλικού (GMNA, GMNIA), η ύπαρξη αρχικής ατέλειας δεν επηρεάζει την μορφή του διαγράμματος και τα φορτία αστοχίας, αλλά παρατηρείται μικρή μείωση της δυσκαμψίας και λίγο μεγαλύτερες τελικές μετατοπίσεις (Σχήμα 4-7).



Σχήμα 4-6: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GNA και GNIA για σημείο 9^{ου} τόξου με τη μεγαλύτερη μετατόπιση (OKA)



Σχήμα 4-7: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GMNA και GMNIA για σημείο 9^{ου} τόξου με τη μεγαλύτερη μετατόπιση

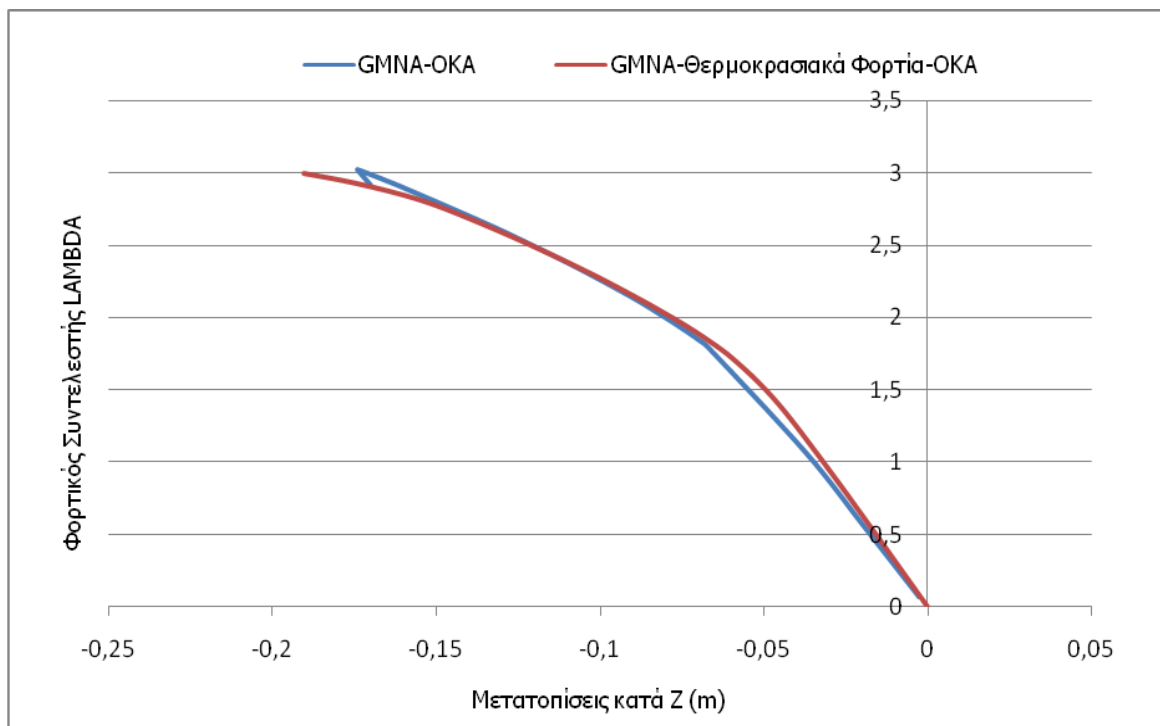
4.3.5 Επιρροή θερμοκρασιακών φορτίων στην συμπεριφορά των τόξων

Για να ελεγχθεί η επιρροή των θερμοκρασιακών φορτίων στα τόξα έγινε ανάλυση τύπου GMNA για συνδυασμό φόρτισης OKA, η οποία όπως φάνηκε στα παραπάνω είναι και η κρίσιμη για τον φορέα. Στο συνδυασμό φόρτισης για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας ο οποίος παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2.4.5 προστίθενται και θερμοκρασιακά φορτία μεγέθους $DT=+40^{\circ}C$ με αποτέλεσμα ο συνδυασμός φόρτισης να γίνεται:

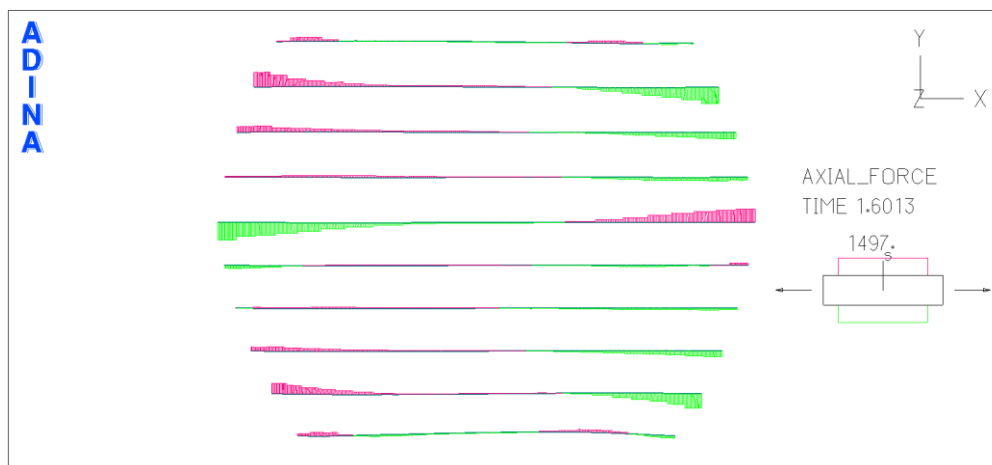
$$1,35 \times G + 1,50 \times W_{ps} + 0,90DT \quad (4-1)$$

Στο Σχήμα 4-8 γίνεται σύγκριση μεταξύ των δρόμων ισορροπίας για τις αναλύσεις GMNA με και χωρίς τα θερμοκρασιακά φορτία. Είναι σημαντικό να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι οι αναλύσεις GMNA με τα θερμοκρασιακά φορτία έγιναν με την μέθοδο Newton-Raphson, Statics του λογισμικού ADINA καθώς το λογισμικό αυτό συναντά κάποια προβλήματα για αναλύσεις τύπου arc-length όταν συμπεριλαμβάνονται θερμοκρασιακά φορτία στο μοντέλο. Η κύρια διαφορά στα αποτελέσματα της μεθόδου Newton-Raphson είναι ότι δεν είναι δυνατό να υπολογίσει καθοδικούς δρόμους ισορροπίας.

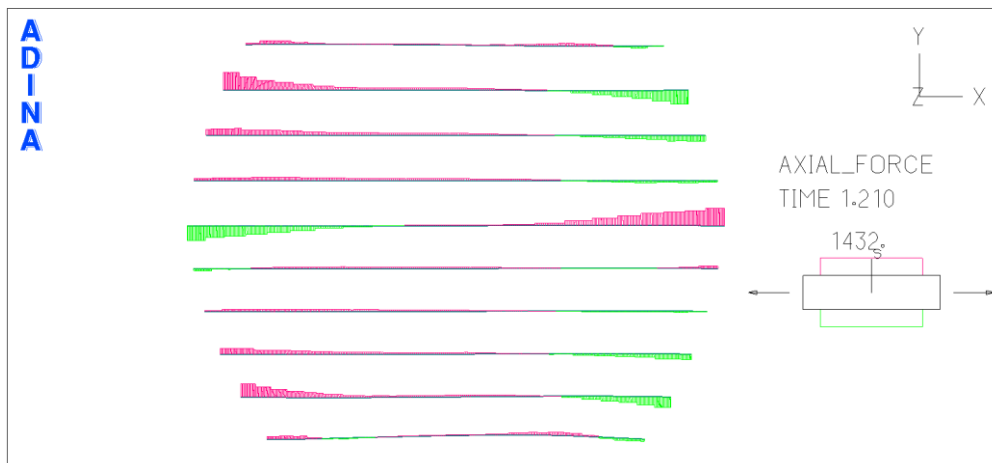
Από τα αποτελέσματα που φαίνονται παρακάτω φαίνεται ότι ο δρόμος ισορροπίας του σημείου που ελέγχουμε δεν αλλάζει σχεδόν καθόλου, κάτι που ισχύει για κάθε σημείο των τόξων. Με αυτό και σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα που μπορούμε να πάρουμε για τα εντατικά μεγέθη στην Εικόνα 4-16 και την Εικόνα 4-17 όπου φαίνονται αξονικές δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στα τόξα στις δύο περιπτώσεις (με και χωρίς θερμοκρασιακά φορτία) παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά των τόξων δεν επηρεάζεται λόγω θερμοκρασίας. Αυτό είναι κατά ένα βαθμό αναμενόμενο καθώς η γεωμετρία τους επιτρέπει την συστολή και διαστολή τους χωρίς αυτή να παρεμποδίζεται και να καταλήγει σε επιπλέον καταπόνηση τους. Για τα υπόλοιπα μέλη βέβαια η επιρροή της θερμοκρασίας είναι καθοριστική, μιας και παρατηρούμε μεγάλη αύξηση των αξονικών δυνάμεων.



Σχήμα 4-8: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GMNA για σημείο 9^{ου} τόξου με και χωρίς θερμοκρασιακά φορτία



Εικόνα 4-16: Αξονικές δυνάμεις στα τόξα με θερμοκρασιακά φορτία



Εικόνα 4-17: Αξονικές δυνάμεις στα τόξα χωρίς θερμοκρασιακά φορτία

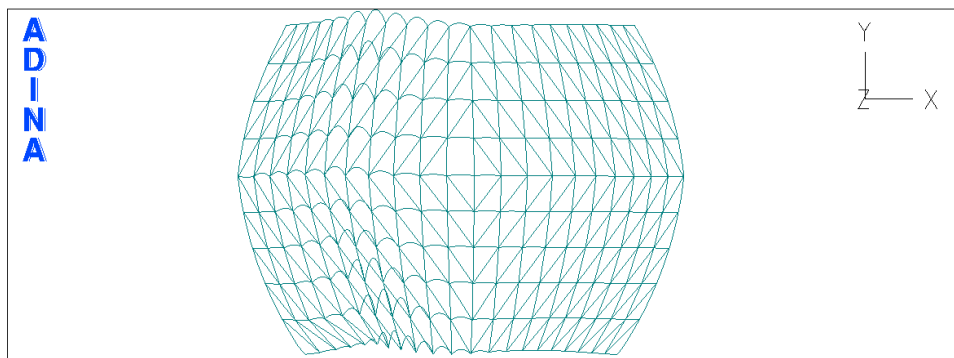
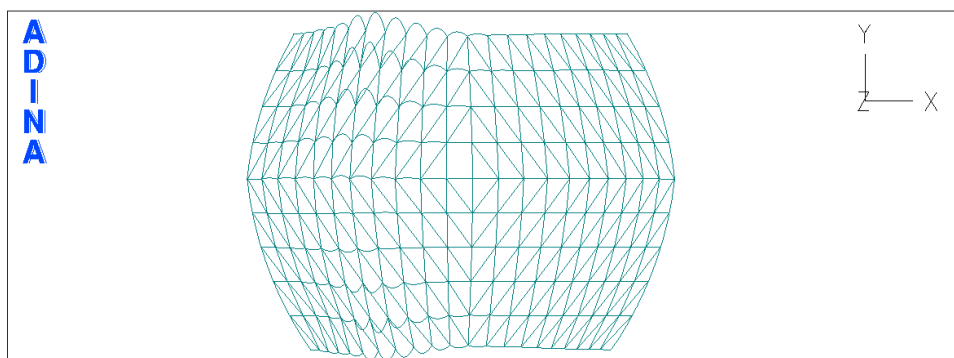
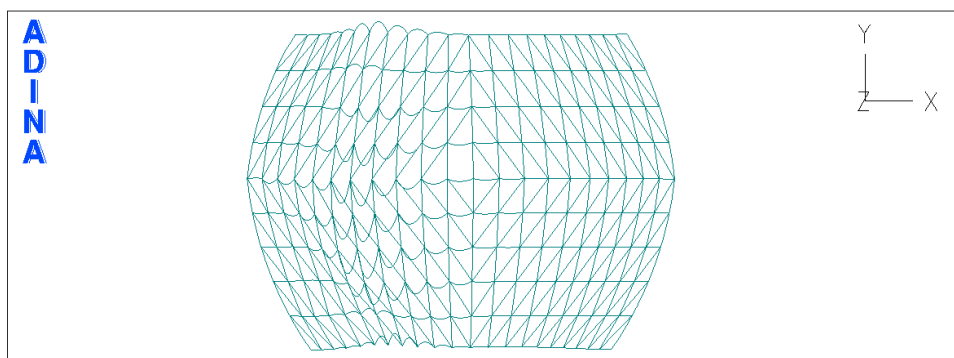
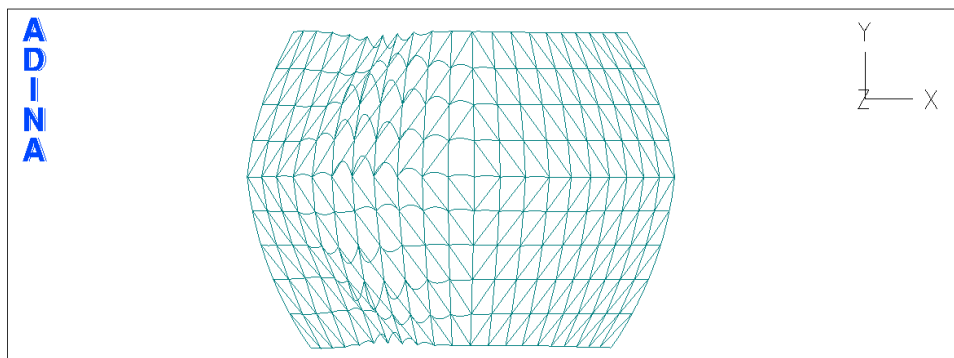
4.4 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ WARPING BEAM ELEMENTS

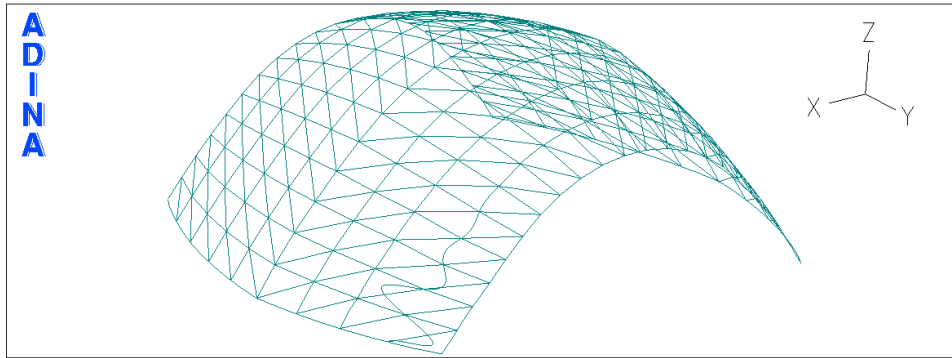
4.4.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (Linearized Buckling Analysis - LBA)

Στην περίπτωση που για την προσομοίωση των διπλών ταυ των τόξων χρησιμοποιούνται Warping ραβδωτά στοιχεία δοκού του λογισμικού Adina (Warping beam elements) παρατηρούνται διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με αυτά που προέκυψαν και παρουσιάστηκαν στην παραπάνω περίπτωση όπου έγινε χρήση Standard beam elements για την ανάλυση LBA. Προέκυψαν και σε αυτή τη περίπτωση οι ιδιομορφές και τα φορτία λυγισμού για τους συνδυασμούς φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας και Αστοχίας. Παρατηρείται από τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 4-5 ότι τα κρίσιμα φορτία λυγισμού είναι μεγαλύτερα σε σχέση με την περίπτωση των Standard beam elements, ενώ διαφέρουν και οι ιδιομορφές. Στις πρώτες τέσσερις ιδιομορφές όπως φαίνονται και στις Εικόνες Εικόνα 4-18-Εικόνα 4-21 παρατηρούνται έντονα στρεπτικά φαινόμενα σε όλα τα τόξα του φορέα ταυτοχρόνως, ενώ η 5^η ιδιομορφή όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-22 συμφωνεί με τη περίπτωση προσομοίωσης με τα Standard beam elements, και συγκεκριμένα με την 1^η ιδιομορφή της, αλλά για μεγαλύτερο φορτίο λυγισμού.

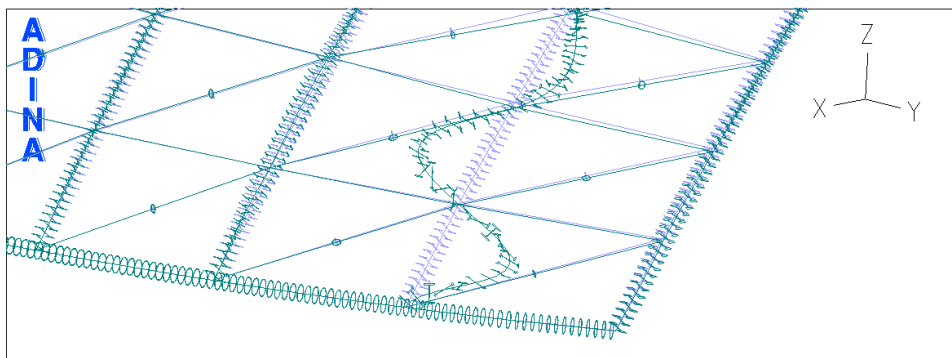
Πίνακας 4-5: Κρίσιμα φορτία – Φορτικοί Συντελεστές

	ΟΚΛ	ΟΚΑ
1 ^η Ιδιομορφή	10,16	6,873
2 ^η Ιδιομορφή	10,72	7,262
3 ^η Ιδιομορφή	15,46	10,41
4 ^η Ιδιομορφή	18,74	12,61
5 ^η Ιδιομορφή	21,41	14,46

Εικόνα 4-18: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 1^η ΙδιομορφήΕικόνα 4-19: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 2^η ΙδιομορφήΕικόνα 4-20: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 3^η ΙδιομορφήΕικόνα 4-21: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 4^η Ιδιομορφή



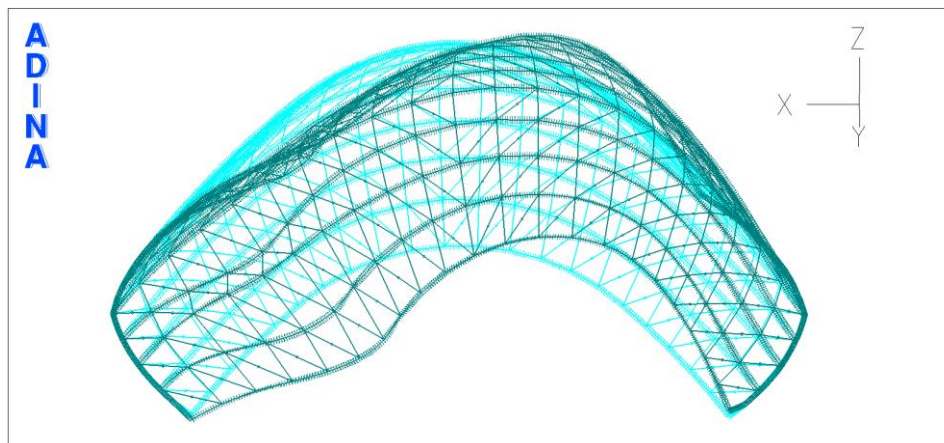
Εικόνα 4-22: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 5^η Ιδιομορφή, Βορειοανατολική όψη



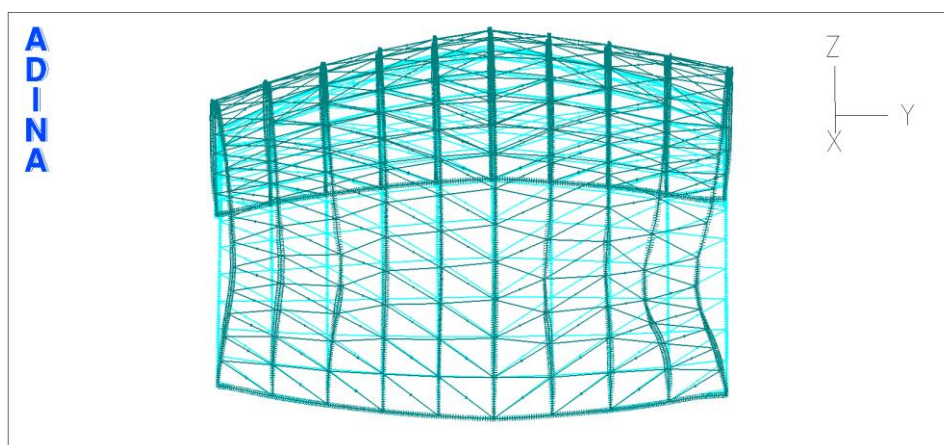
Εικόνα 4-23: Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα σύμφωνα με την 5^η ιδιομορφή

4.4.2 Μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας (GNA)

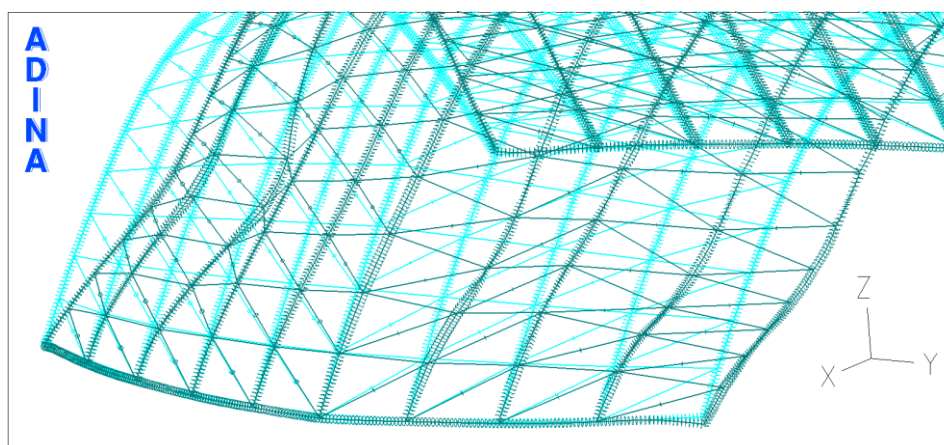
Οι αναλύσεις GNA για την περίπτωση χρήσης Warping beam elements γίνονται με τις ίδιες παραμέτρους όπως και στην περίπτωση των Standard beam elements. Το υλικό θεωρείται ελαστικό ενώ η ανάλυση γίνεται με την μέθοδο arc-length του λογισμικού ADINA με τη θεώρηση μεγάλων μετακινήσεων. Οι αναλύσεις γίνονται και εδώ για συνδυασμό φόρτισης ΟΚΛ και ΟΚΑ. Όπως και στην περίπτωση των Standard beam elements ο φορέας εμφανίζει μετακίνηση προς τα αρνητικά του άξονα X και προς τα αρνητικά του άξονα Z από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν πίεση και προς τα θετικά του άξονα Z από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν αναρρόφηση. Οι παραμορφώσεις αυτές του φορέα φαίνονται στην Εικόνα 4-24, Εικόνα 4-25, Εικόνα 4-26. Οι μεγαλύτερες μετακινήσεις για τα τόξα παρατηρούνται προς τα αρνητικά του άξονα Z για το 9^ο και 10^ο ακριανό τόξο. Οι δρόμοι ισορροπίας που παρουσιάζονται παρακάτω στο Σχήμα 4-9 λαμβάνονται για το ίδιο σημείο του 9^{ου} τόξου με την μεγαλύτερη Z-μετατόπιση όπως και στην περίπτωση των Standard beam elements ώστε να μπορεί παρακάτω να γίνει και σύγκριση των δρόμων ισορροπίας μεταξύ των διαφορετικών τρόπων προσομοίωσης. Η μεγάλη διαφορά σε αυτή την περίπτωση είναι ότι παρατηρούνται στρεπτικά φαινόμενα στις διατομές όλων των τόξων ταυτοχρόνως που φαίνεται στην Εικόνα 4-26, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και γίνεται χρήση Warping beam elements, σε αντίθεση με την χρήση Standard όπου τα στρεπτικά φαινόμενα περιορίζονταν μόνο στα γειτονικά τόξα του 9^{ου}.



Εικόνα 4-24: Παραμορφωμένος Φορέας, Βόρεια όψη

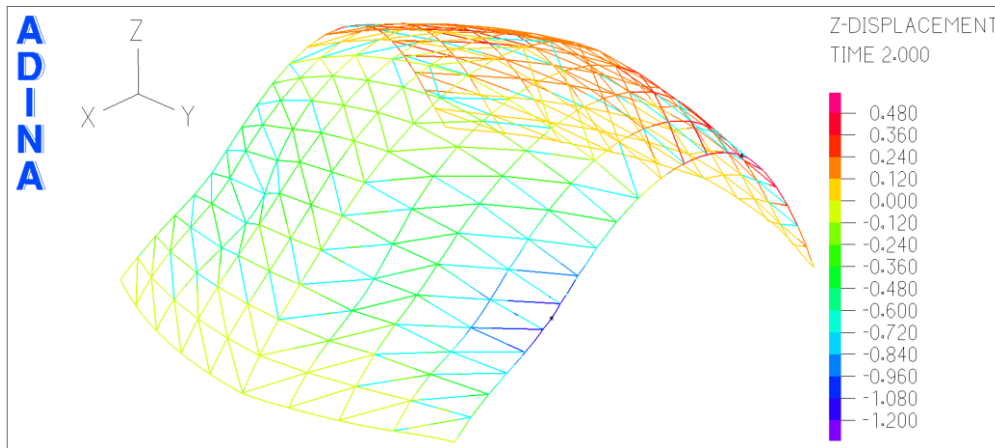


Εικόνα 4-25: Παραμορφωμένος Φορέας, Ανατολική όψη

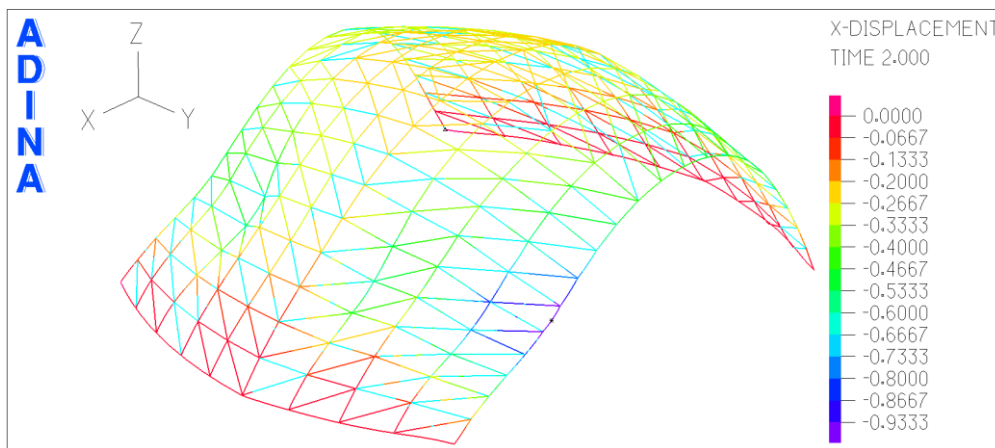


Εικόνα 4-26: Λεπτομέρεια Παραμορφωμένου Φορέα, Βορειοανατολική όψη

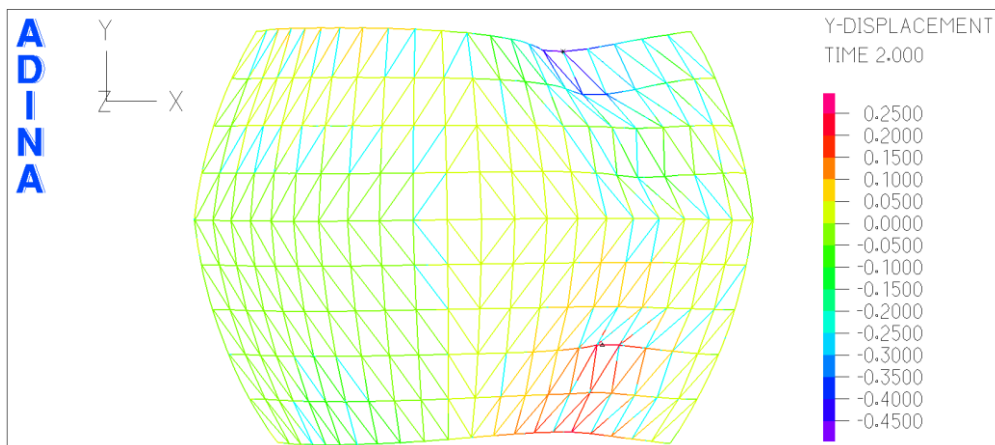
Οι μετακινήσεις που παρατηρούνται και παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-27 είναι μεγαλύτερες σε σχέση με την περίπτωση Standard beam elements με τη μεγαλύτερη διαφορά στις μετακινήσεις κατά τον άξονα Y, όπου οι μετακινήσεις που παρατηρούνται για τα τόξα 1, 2 και 3 κατά τα θετικά του άξονα Y και του 9^{ου} και 10^{ου} κατά τα αρνητικά του άξονα Y είναι διπλάσιες.



(α)



(β)

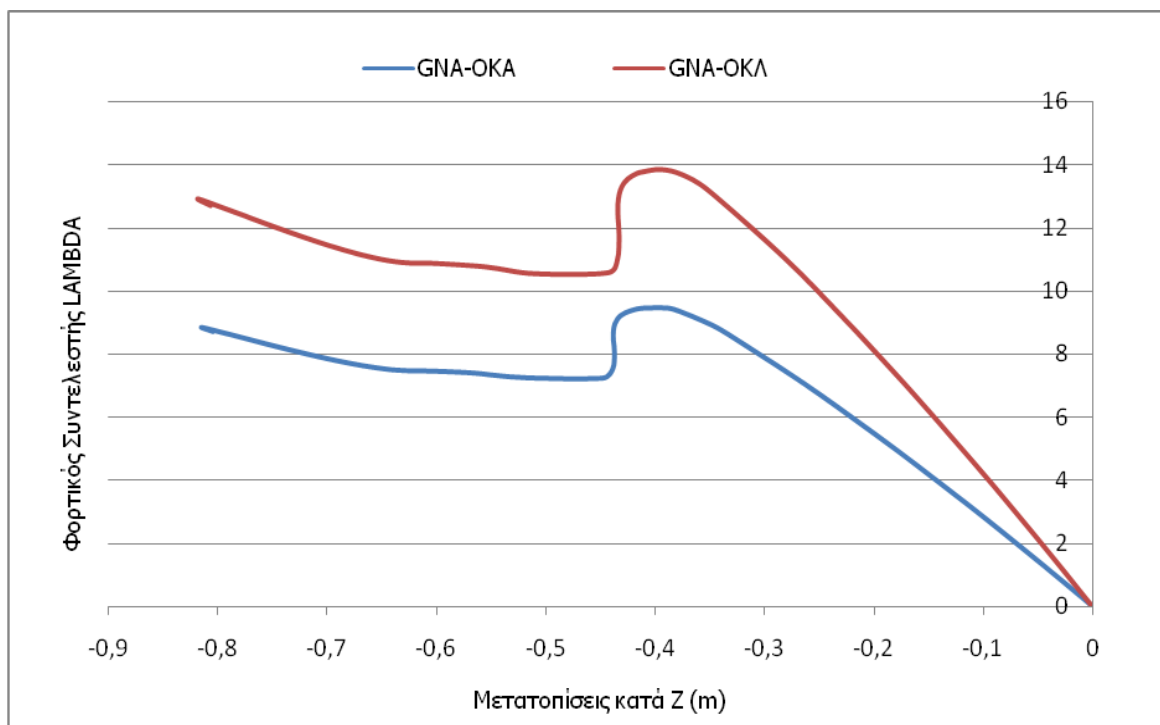


(γ)

Εικόνα 4-27: Μετατοπίσεις κατά τον άξονα Z (α), τον άξονα X (β) και τον άξονα Y (γ)

Όπως και στην περίπτωση για προσομοίωση με Standard beam elements, για να γίνει κατανοητή ακόμα περισσότερο η συμπεριφορά του φορέα όταν υπάρχει μη γραμμικότητα γεωμετρίας, επιλέχθηκε να εξαχθεί δρόμος ισορροπίας για το σημείο του 9^{ου} τόξου με τη μεγαλύτερη μετατόπιση προς τα κάτω. Από τον δρόμο ισορροπίας παρατηρείται ότι το μέγιστο φορτίο για την ΟΚΛ είναι με φορτικό

συντελεστή $\lambda=13,84$, ενώ για την ΟΚΑ είναι $\lambda=9,44$. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4-9 και εδώ οι δύο δρόμοι ισορροπίας είναι της ίδιας μορφής. Αποτελούνται από έναν αρχικό ανοδικό κλάδο ο οποίος παρουσιάζει μικρή μη γραμμικότητα ενώ στη συνέχεια εμφανίζεται ο λυγισμός μέσω μη ευκρινούς ασταθούς σημείου διακλάδωσης που ακολουθείται από καθοδικό κλάδο. Η μορφή των διαγραμμάτων αυτών είναι παρόμοια με την περίπτωση της GNA για Standard beam elements, αλλά παρατηρείται διαφορά στα οριακά φορτία, καθώς σε αυτή τη περίπτωση είναι εμφανώς μεγαλύτεροι οι φορτικοί συντελεστές για τους οποίους αστοχεί ο φορέας λόγω γεωμετρίας.

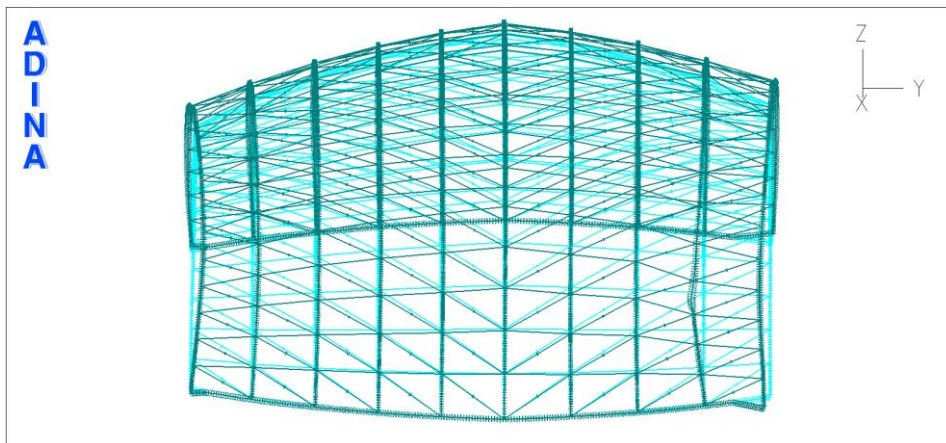


Σχήμα 4-9: Δρόμος Ισορροπίας, μετατοπίσεις κατά Z, σημείο 9^{ου} τόξου με μεγαλύτερη μετατόπιση

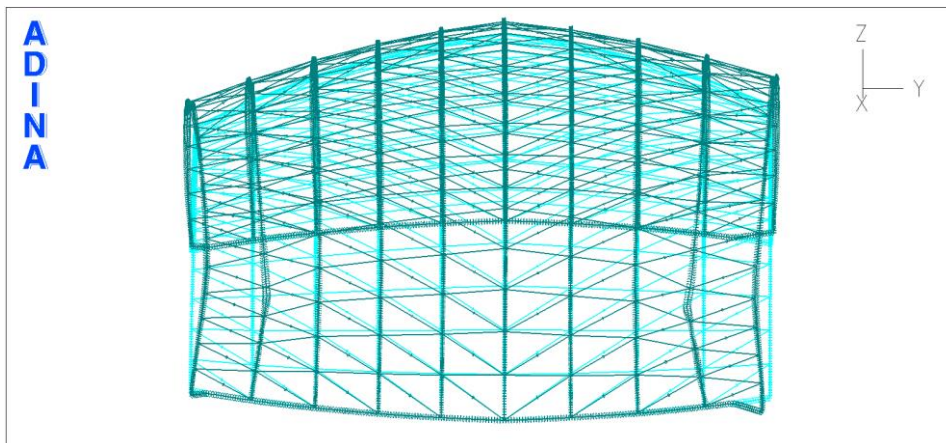
4.4.3 Μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού (GMNA)

Όπως και στην περίπτωση προσομοίωσης των διπλών ταυ με χρήση Standard beam elements, έτσι και εδώ για την ανάλυση GMNA, χρησιμοποιήθηκε πλαστικό διγραμμικό υλικό με κράτυνση, χάλυβας ποιότητας S355, ενώ θεωρούνται και μεγάλες μετακινήσεις (kinematics-large displacements). Έτσι μπορεί να εκφραστεί η πιθανή μη γραμμικότητα του φορέα, ως προς το υλικό αλλά και την γεωμετρία. Οι ανάλυση αυτή έγινε με τη μέθοδο arc-length του λογισμικού ADINA, ενώ εξετάστηκαν και οι δύο συνδυασμοί φορτίσεων, για Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας και Αστοχίας. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών δείχνουν τη μορφή του παραμορφωμένου φορέα σε τρία στάδια στην Εικόνα 4-28 ώστε να φανεί η σειρά με την οποία αστοχούν τα διάφορα μέλη του φορέα. Επίσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-29 οι μέγιστες μετακινήσεις ως προς τους τρεις κυρίους άξονες, αλλά οι δρόμοι ισορροπίας στο Σχήμα 4-11 για το σημείο του 9^{ου} τόξου για το οποίο εξήχθησαν και τα αποτελέσματα για την GNA, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων. Από τις εικόνες του παραμορφωμένου φορέα φαίνεται ότι ολόκληρος ο φορέας παρουσιάζει μετακινήσεις προς τα αρνητικά του άξονα X (προς τα δυτικά) καθώς και προς τα αρνητικά του άξονα Z από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν πίεση και προς τα θετικά του άξονα Z από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν αναρρόφηση, όπως δηλαδή και στην ανάλυση GNA. Επίσης εξήχθησαν από τα αποτελέσματα της ανάλυσης δρόμοι ισορροπίας για την στήριξη του 9^{ου} τόξου όπως αυτοί φαίνονται στο Σχήμα 4-10, σημείο το οποίο φαίνεται να είναι αυτό το οποίο αστοχεί πρώτο, δηλαδή η μη γραμμικότητα εμφανίζεται στο σημείο αυτό για το μικρότερο φορτικό συντελεστή.

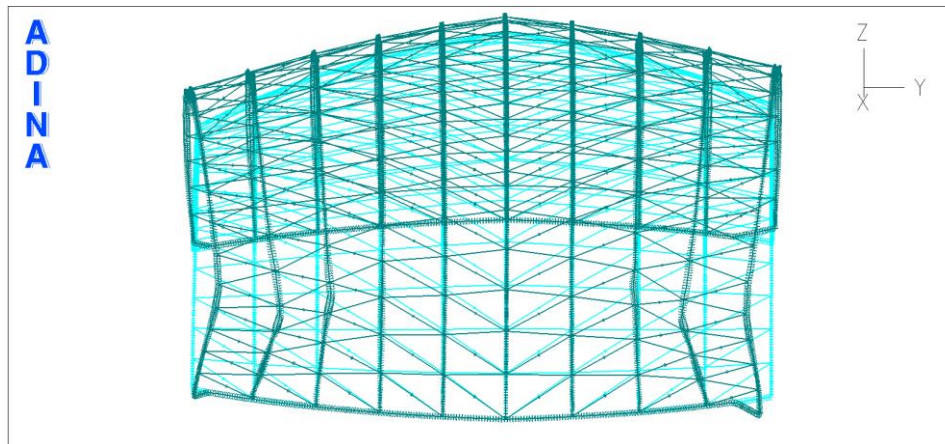
Όπως φαίνεται από την Εικόνα 4-28 της σταδιακής παραμόρφωσης του φορέα, ο πρώτος στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (α) εμφανίζεται στο 9^ο τόξο, στην ανατολική μεριά του θόλου, όπου τα φορτία ανέμου ασκούν πίεση στον θόλο, για φορτικό συντελεστή $\lambda=4,91$ για συνδυασμό φόρτισης ΟΚΛ και $\lambda=3,28$ για συνδυασμό φόρτισης ΟΚΑ. Στη συνέχεια και καθώς ο φορτικός συντελεστής αυξάνεται, εμφανίζεται στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (β) και στο 2^ο τόξο, όπως φαίνεται στη παρακάτω εικόνα, για $\lambda=5,10$ για ΟΚΛ και $\lambda=3,38$ για ΟΚΑ. Τέλος, για φόρτιση $\lambda=5,56$ και $\lambda=3,69$ για συνδυασμούς φορτίσεων ΟΚΛ και ΟΚΑ αντίστοιχα, εμφανίζονται στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (γ) και στο 3^ο τόξο ενώ σε μικρότερη κλίμακα και στο 1^ο, 8^ο και 10^ο τόξο.



(α)

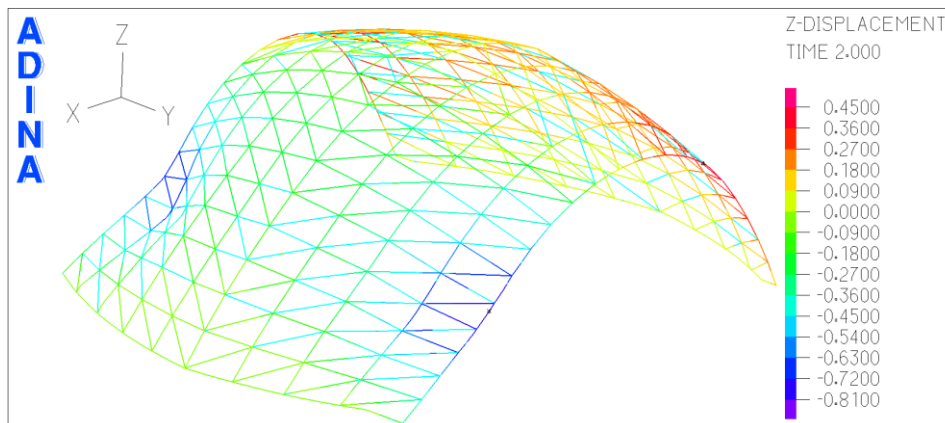


(β)

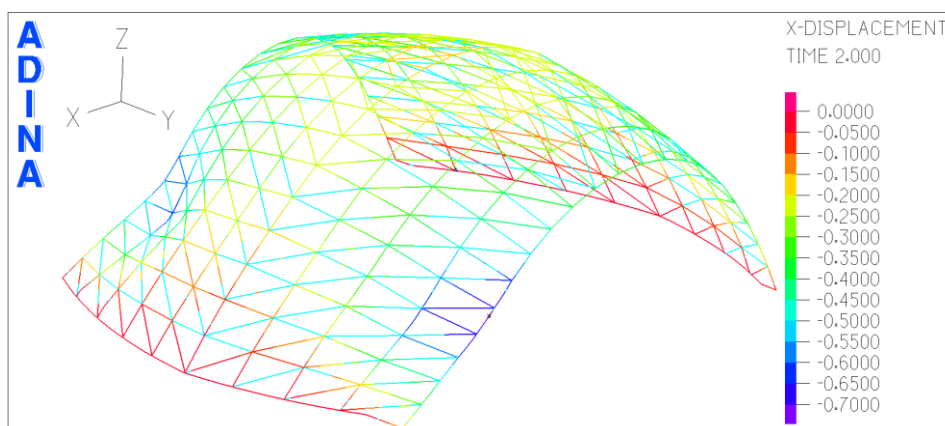


(γ)

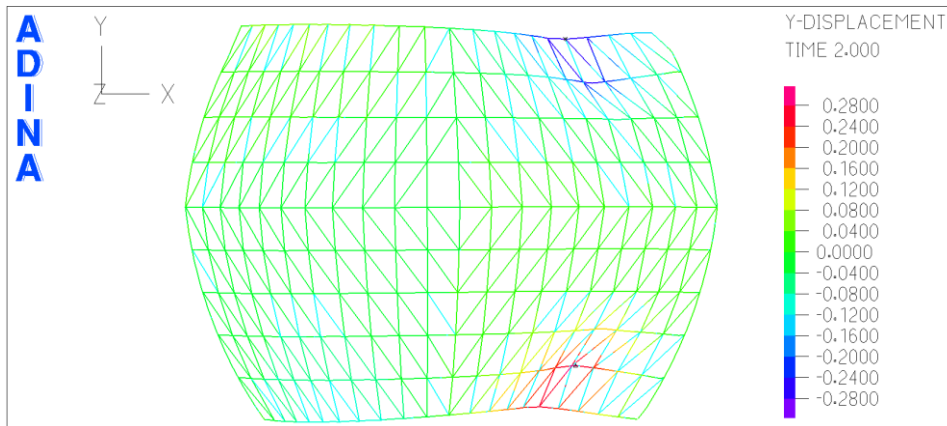
Εικόνα 4-28: Σταδιακή παραμόρφωση φορέα, Ανατολική όψη, (α): Παραμορφωμένος Φορέας, Ανατολική όψη, Λυγισμός 9^{ου} τόξου, (β): Παραμορφωμένος Φορέας, Ανατολική όψη, Λυγισμός 2^{ου} και 9^{ου} τόξου, (γ): τελικό στάδιο παραμόρφωσης του φορέα



(α)



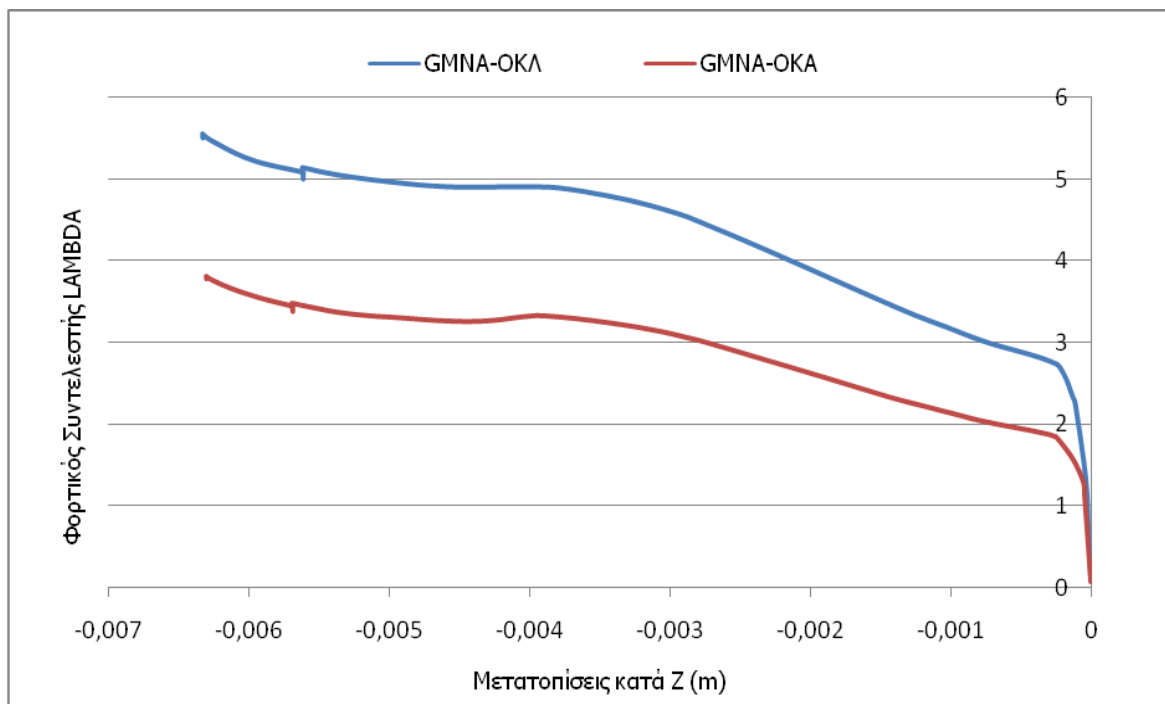
(β)

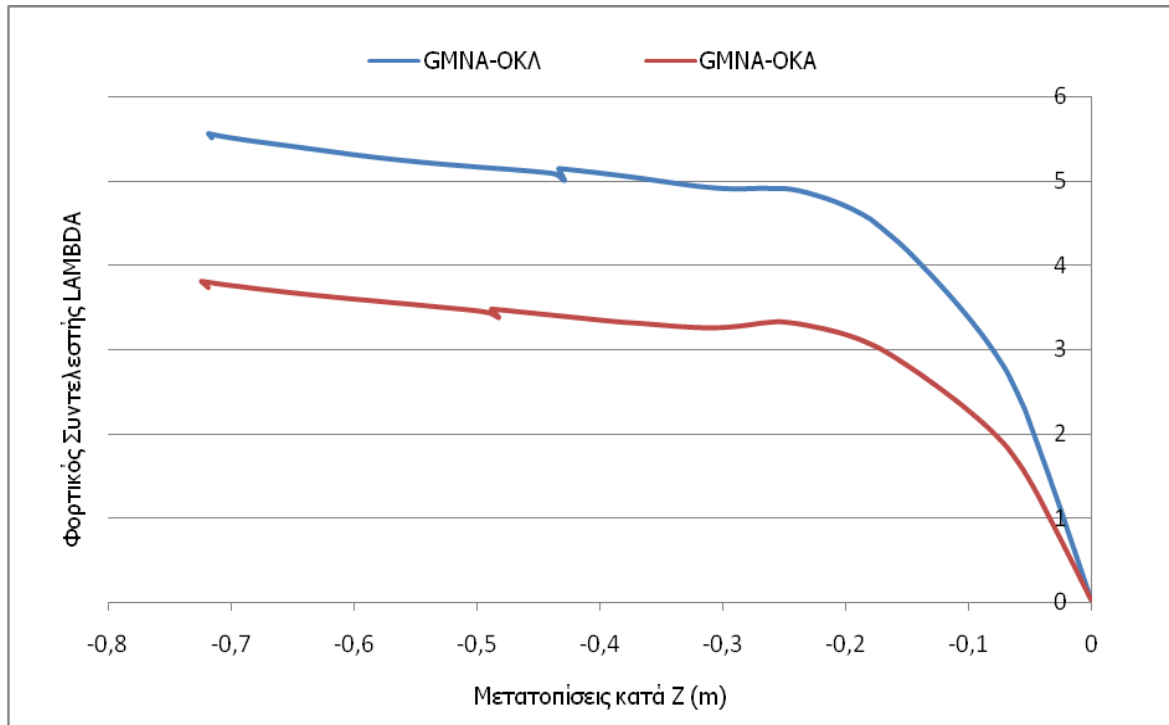


(γ)

Εικόνα 4-29: Μετατοπίσεις κατά τον άξονα Z (α), τον άξονα X (β) και τον άξονα Y (γ)

Οι δρόμοι ισορροπίας που εξήχθησαν είναι για την ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου η οποία διαρρέει πρώτη, για το μικρότερο δηλαδή φορτικό συντελεστή και φαίνονται στο Σχήμα 4-10, και δευτερευόντως για το σημείο του 9^{ου} τόξου με την μεγαλύτερη μετατόπιση οι οποίοι φαίνονται στο Σχήμα 4-11. Στη περίπτωση του δρόμου ισορροπίας της στήριξης, τα διαγράμματα για ΟΚΛ και ΟΚΑ είναι γραμμικά με δυσκαμψία η οποία μειώνεται με μικρό ρυθμό μέχρι ο φορτικός συντελεστής να φτάσει τις τιμές $\lambda=2,71$ και $\lambda=1,83$ αντίστοιχα. Το σημείο αυτό και στις δύο περιπτώσεις αποτελεί ευσταθές σημείο διακλάδωσης το οποίο ακολουθείται από ανοδικό μετελαστικό κλάδο. Στους δρόμους ισορροπίας που αφορούν το σημείο του 9^{ου} τόξου όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη μετατόπιση, φαίνεται επίσης έντονη μη γραμμικότητα υλικού, ενώ η δυσκαμψία φαίνεται να μειώνεται ταχύτερα στον πρωτεύοντα κλάδο. Το σημείο διακλάδωσης στη περίπτωση αυτή δεν είναι ευκρινές όπως στον δρόμο ισορροπίας της στήριξης, αλλά ο φορτικός συντελεστής για τον οποίο παρατηρείται μεγάλη μείωση της δυσκαμψίας άρα και λυγισμός, είναι $\lambda=4,88$ για φόρτιση ΟΚΛ και $\lambda=3,23$.

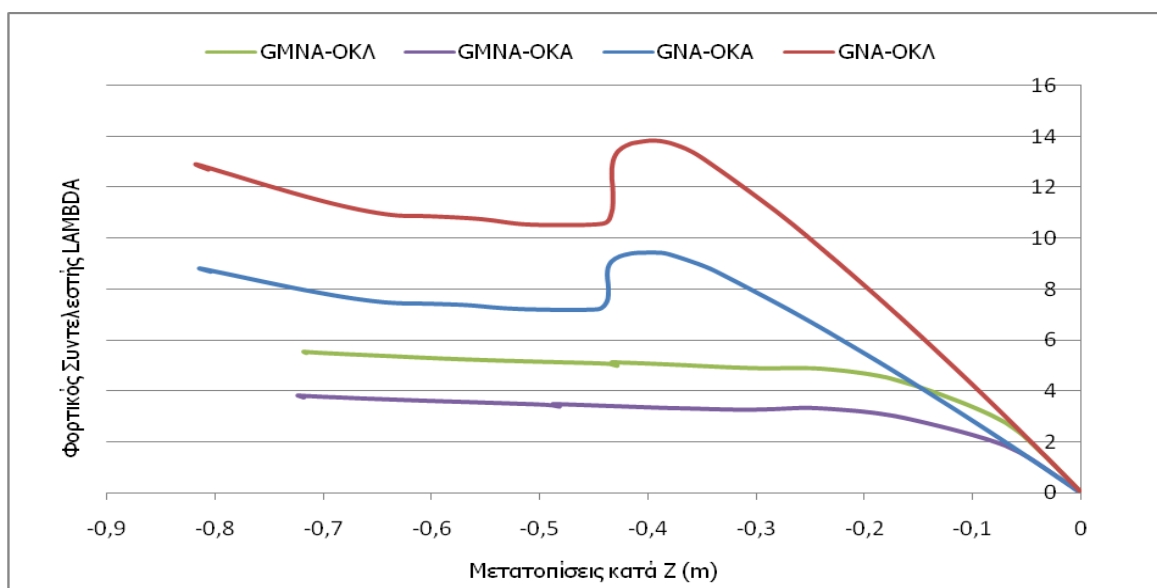
Σχήμα 4-10: Δρόμος Ισορροπίας, μετατοπίσεις κατά Z, ανατολικής στήριξης 9^{ου} τόξου



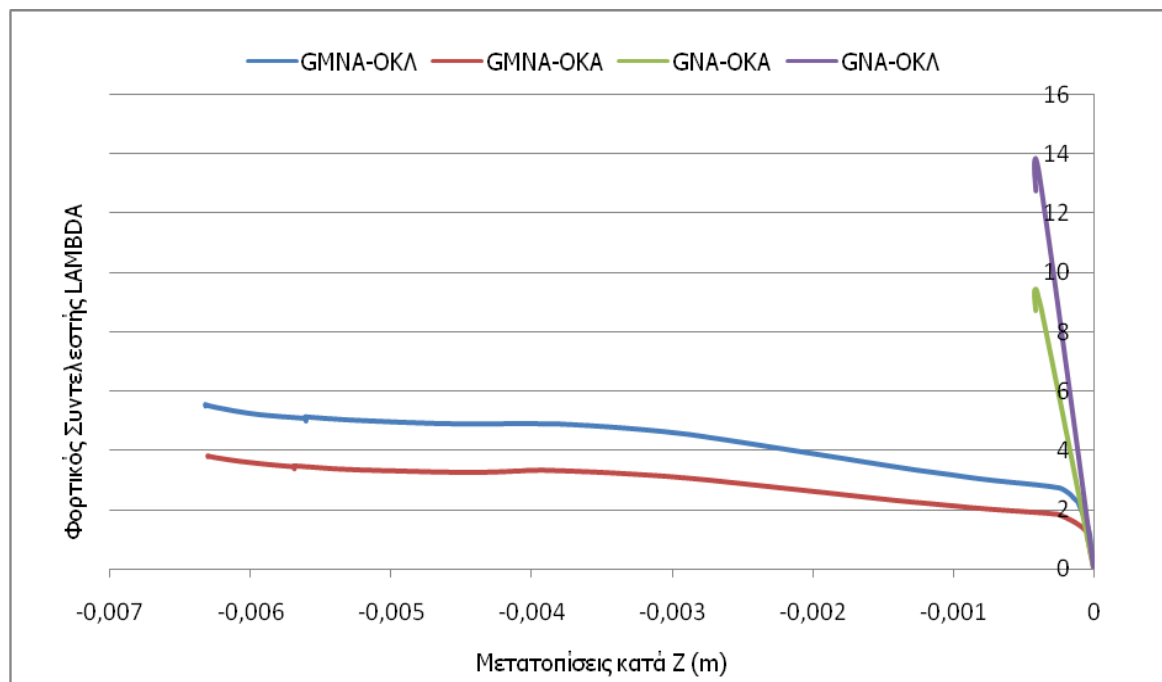
Σχήμα 4-11: Δρόμος Ισορροπίας, μετατοπίσεις κατά Z, σημείο 9^{ου} τόξου με μεγαλύτερη μετατόπιση

4.4.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων των αναλύσεων GNA και GMNA

Σε αυτό το κομμάτι, όπως έγινε και στην περίπτωση των Standard beam elements, γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τις αναλύσεις GNA και GMNA, ώστε να γίνει αντιληπτό αν η μη γραμμικότητα γεωμετρίας ή υλικού συμβάλει περισσότερο στην αστοχία του φορέα. Γι' αυτό το λόγο συγκρίνονται οι δρόμοι ισορροπίας για τη ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου και το σημείο του τόξου που έχει την μεγαλύτερη μετατόπιση. Από τη σύγκριση αυτή μεταξύ των περιπτώσεων GNA και GMNA γίνεται κατανοητό ότι ο φορέας αστοχεί λόγω μη γραμμικότητας υλικού, σε πολύ μικρότερα φορτία σε σχέση με τις αναλύσεις GNA.



Σχήμα 4-12: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GNA και GMNA για σημείο 9^{ου} τόξου με τη μεγαλύτερη μετατόπιση

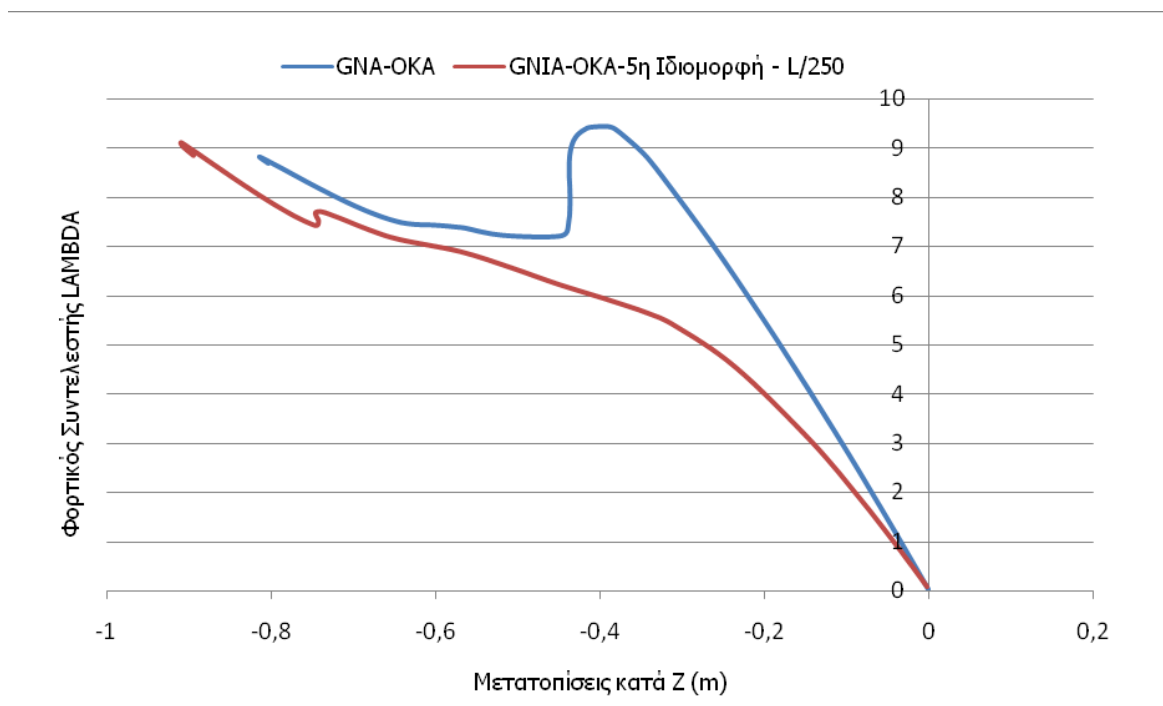


Σχήμα 4-13: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GNA και GMNA για ανατολική στήριξη 9^{ου} τόξου

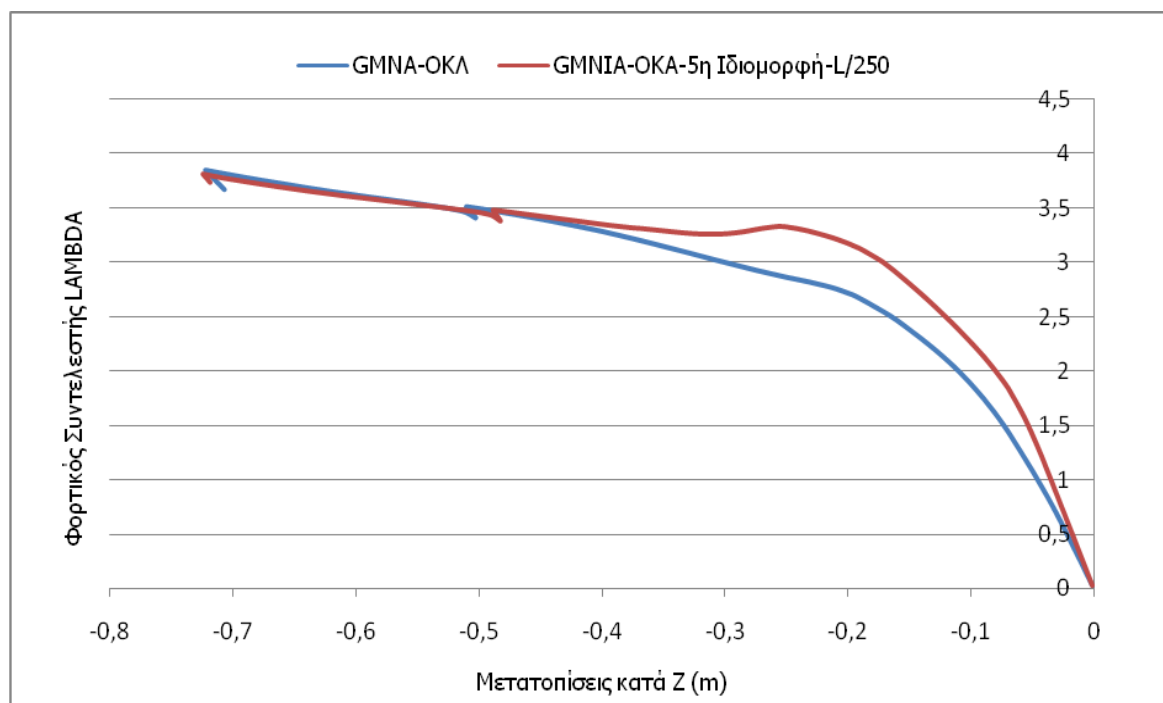
4.4.4 Επιρροή αρχικών ατελειών στην συμπεριφορά των τόξων

Μιας και από την ανάλυση LBA τα αποτελέσματα που είδαμε παραπάνω για τις πρώτες 4 ιδιομορφές είναι στρεπτικά φαινόμενα τα οποία όμως παρουσιάζονται σε όλα τα τόξα, δεν υπάρχει ιδιαίτερο νόημα στο να οριστεί ατέλεια σύμφωνα με αυτές τις ιδιομορφές. Γι' αυτό τον λόγο τοποθετείται ατέλεια σύμφωνα με την 5^η ιδιομορφή όπου εμφανίζεται λυγισμός του 9^{ου} τόξου, όπως δηλαδή και στην περίπτωση των Standard beam elements. Στην συνέχεια θα εξαχθούν δρόμοι ισορροπίας για τις αναλύσεις GNIA και GMNIA ώστε να κατανοηθεί η επιρροή των ατελειών σε σύγκριση με τους δρόμους ισορροπίας οι οποίοι έχουν εξαχθεί για τις αναλύσεις χωρίς τη χρήση ατελειών, δηλαδή GNA και GMNA. Η ατέλεια που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση αυτή με την μορφή απόκλισης από την ιδεατή γεωμετρία, μεγέθους $L/250$ και σχήμα σύμφωνα με την πρώτη ιδιομορφή του φορέα, όπως αυτή υπολογίστηκε κατά την ανάλυση LBA. Έγινε αρχικά λοιπόν ανάλυση μη γραμμικότητας γεωμετρίας με ατέλειες (GNIA) και στη συνέχεια ανάλυση μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού (GMNIA) για Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας και Αστοχίας.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων εξήχθησαν δρόμοι ισορροπίας για το σημείο του 9^{ου} τόξου με τη μεγαλύτερη μετατόπιση ίδιο με το σημείο από τις αναλύσεις GNA και GMNA και συγκρίνονται έτσι ώστε να φανεί η πραγματική επιρροή της ατέλειας στη λειτουργία του φορέα. Όπως αποδείχθηκε παραπάνω, η μορφή των δρόμων ισορροπίας για τις περιπτώσεις φόρτισης για OKL και OKA είναι πανομοιότυπες για την κάθε ανάλυση και για αυτό το λόγο τα διαγράμματα που θα παρουσιαστούν παρακάτω θα είναι μόνο για τις αναλύσεις με φορτίσεις OKA. Για την περίπτωση του σημείου του 9^{ου} τόξου με την μεγαλύτερη μετατόπιση, παρατηρείται στο Σχήμα 4-14 ότι για την ανάλυση GNA η αρχική ατέλεια έχει ως συνέπεια την κατάργηση του σημείου διακλάδωσης και την ενοποίηση του κυρίου και του δευτερεύοντα δρόμου ισορροπίας, σε έναν, ενιαίο, καμπύλο δρόμο ισορροπίας που «εγγράφεται» στην γωνία μεταξύ του κυρίου και δευτερεύοντα δρόμου. Παρότι ο λυγισμός στην περίπτωση χρήσης ατέλειας δεν εμφανίζεται πλέον απότομα, παρατηρείται ότι η μείωση της δυσκαμψίας γίνεται ταχύτερα. Στις αναλύσεις όπου χρησιμοποιείται και μη γραμμικότητα υλικού (GMNA, GMNIA), η ύπαρξη ατέλειας επηρεάζει με την εμφάνιση λίγο μικρότερης δυσκαμψίας στο φορέα, αλλά με το τελικό οριακό φορτίο να παραμένει ίδιο, κάτι που φαίνεται στο Σχήμα 4-15.



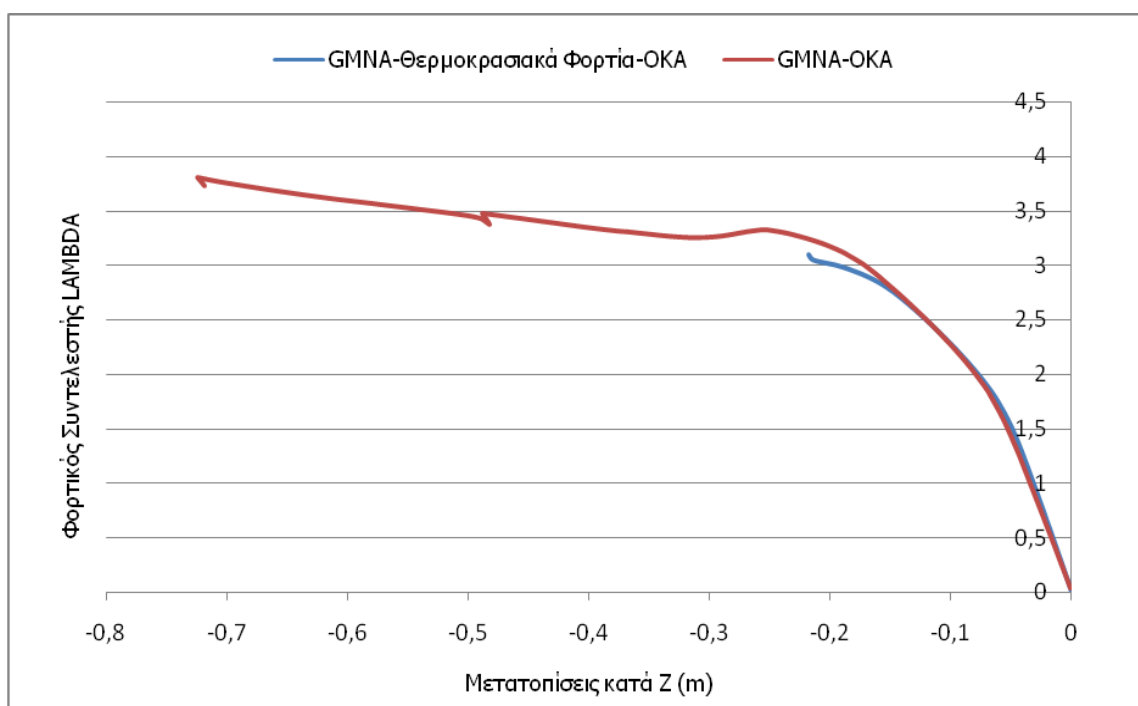
Σχήμα 4-14: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GNA και GNIA για σημείο 9ου τόξου με τη μεγαλύτερη μετατόπιση (OKA)



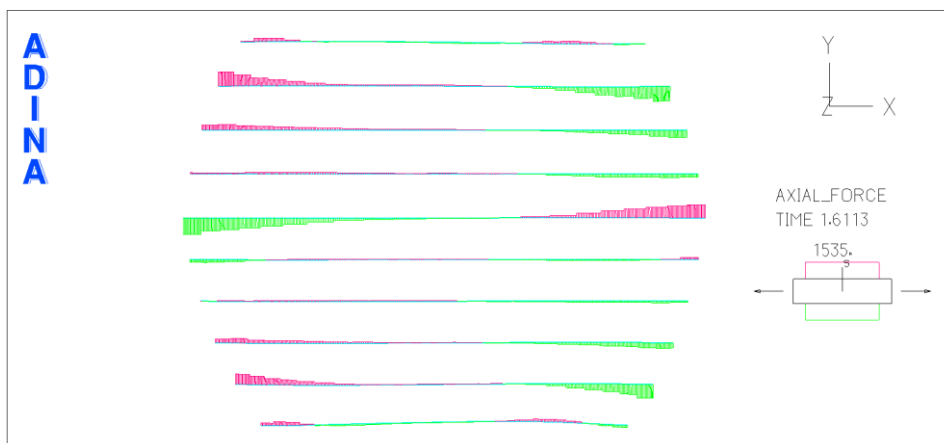
Σχήμα 4-15: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GMNA και GMNIA για σημείο 9^{ου} τόξου με τη μεγαλύτερη μετατόπιση (OKA)

4.4.5 Επιρροή θερμοκρασιακών φορτίων στην συμπεριφορά των τόξων

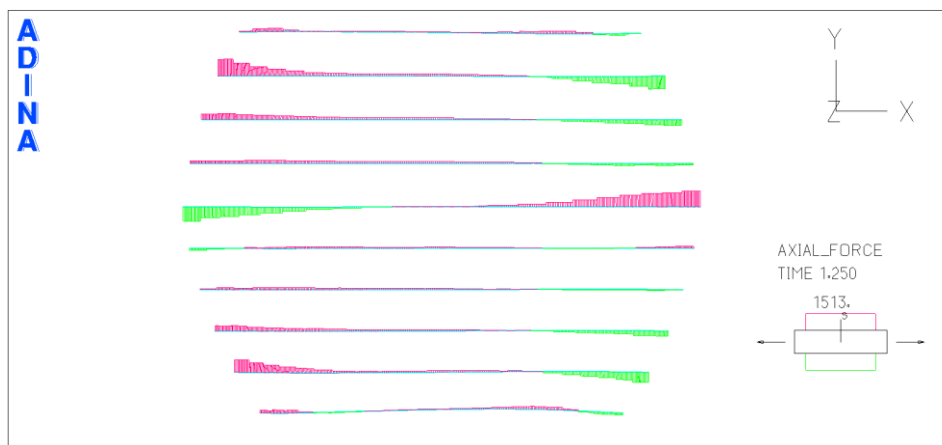
Για να γίνει κατανοητή η επιρροή των θερμοκρασιακών φορτίων ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία όπως και στην περίπτωση των Standard beam elements. Έγιναν δηλαδή αναλύσεις GMNA με και χωρίς την άσκηση θερμοκρασιακών φορτίων και εξήχθησαν οι δρόμοι ισορροπίας για το σημείο του 9^{ου} τόξου στο οποίο εμφανίζεται η μεγαλύτερη μετατόπιση, ώστε να συγκριθούν. Αυτό που παρατηρείται από το Σχήμα 4-16 είναι ότι οι δρόμοι ισορροπίας είναι σχεδόν ταυτόσημοι όσο ο κλάδος είναι ανοδικός. Στο σημείο αυτό ο δρόμος ισορροπίας ο οποίος έχει προκύψει από την ανάλυση με τα θερμοκρασιακά φορτία σταματάει. Αυτό οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, στο γεγονός ότι η ανάλυση αυτή έγινε με την μέθοδο Newton-Raphson και γι' αυτό το λόγο δεν υπάρχει η δυνατότητα να παρουσιαστούν καθοδικό κλάδοι στους δρόμους ισορροπίας. Παρατηρώντας στην Εικόνα 4-30 και την Εικόνα 4-31 τις αξονικές δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στα τόξα στο σημείο αυτό, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι για τους ίδιους λόγους με την περίπτωση των Standard beam elements, τα θερμοκρασιακά φορτία δεν επηρεάζουν την συμπεριφορά των τόξων.



Σχήμα 4-16: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GMNA για σημείο 9^{ου} τόξου με και χωρίς θερμοκρασιακά φορτία



Εικόνα 4-30: Αξονικές δυνάμεις στα τόξα με θερμοκρασιακά φορτία



Εικόνα 4-31: Αξονικές δυνάμεις στα τόξα χωρίς θερμοκρασιακά φορτία

4.5 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΡΟΠΩΝ-ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΩΝ

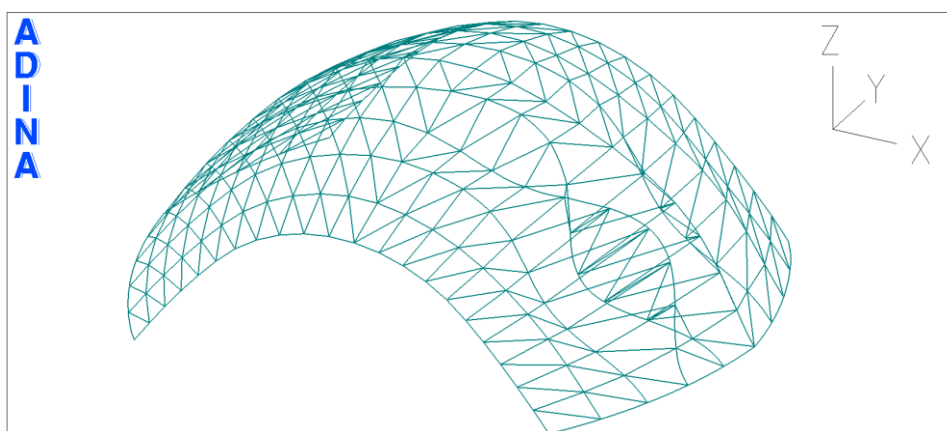
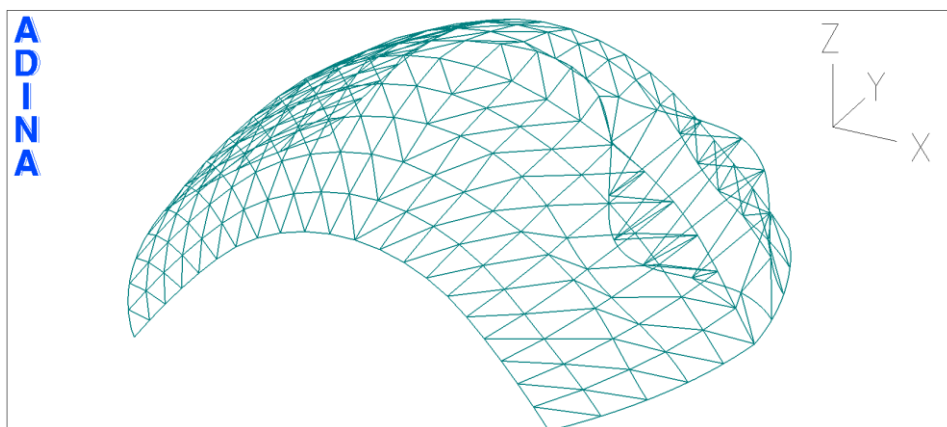
Όπως προαναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, σε αυτή τη μέθοδο, χρειάζεται να οριστούν τα διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων, διαγράμματα αξονικών δυνάμεων-παραμορφώσεων και διαγράμματα ροπών στρέψης-γωνιών στροφής ανά μονάδα μήκους. Έγινε λόγος επίσης για την δυσκολία εξαγωγής των διαγραμμάτων ροπών στρέψης – γωνιών στροφής λόγω της ύπαρξης στρέβλωσης της διατομής, και ότι αποφασίστηκε να τοποθετηθούν αυθαίρετα πολύ μικρές τιμές στροφών, δεσμεύοντας ουσιαστικά τη στροφή των διατομών. Έτσι είναι αναμενόμενο, μιας και είδαμε παραπάνω ότι τα στρεπτικά φαινόμενα παίζουν μεγάλο ρόλο στην συμπεριφορά του φορέα, τα αποτελέσματα σε αυτή την περίπτωση προσομοίωσης να διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Είναι φυσικό τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν γι' αυτό τον τρόπο προσομοίωσης να μην αντιπροσωπεύουν ακριβώς την πραγματική συμπεριφορά του φορέα, αποφασίστηκε όμως να παρουσιαστούν και να συγκριθούν με τα υπόλοιπα αποτελέσματα ώστε να φανεί ποια θα ήταν η συμπεριφορά του φορέα σε περίπτωση που τα τόξα ήταν στρεπτικά πλήρως εξασφαλισμένα και σε ποιο βαθμό η στροφή των διατομών επηρεάζει την συμπεριφορά του αυτή. Σε αυτή τη περίπτωση εκτός από τη Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA), η μόνη άλλη ανάλυση που εξετάστηκε ήταν η GMNA καθώς τα διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων αφορούν μη γραμμικό υλικό.

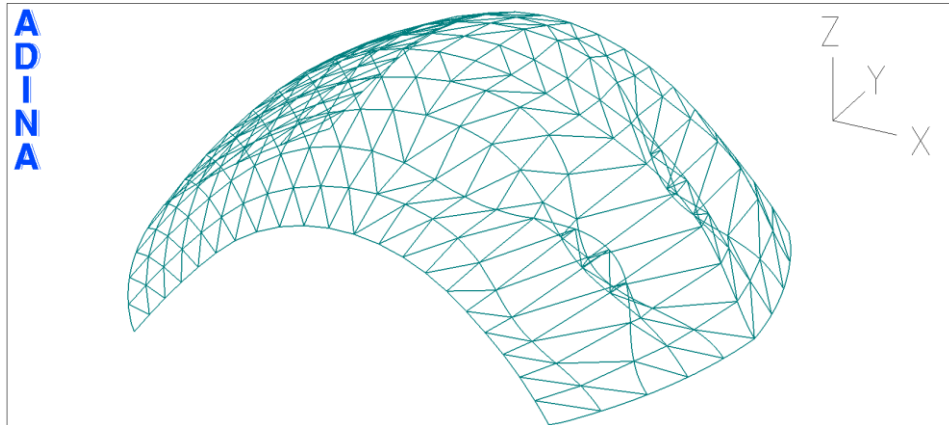
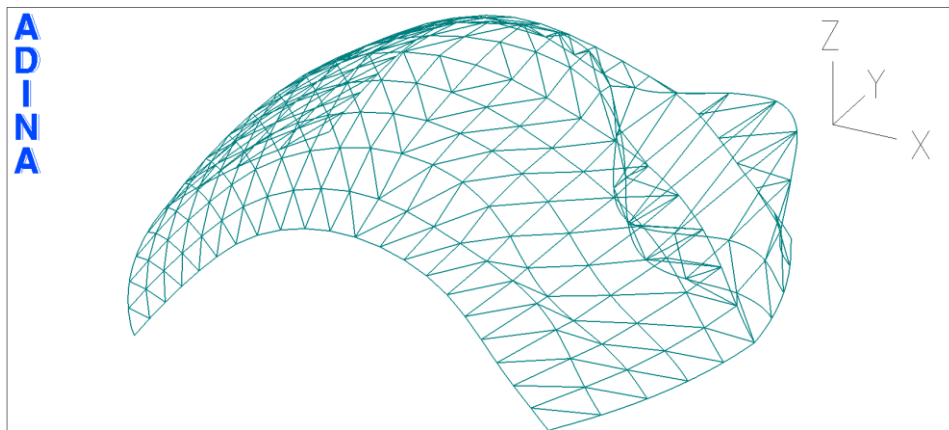
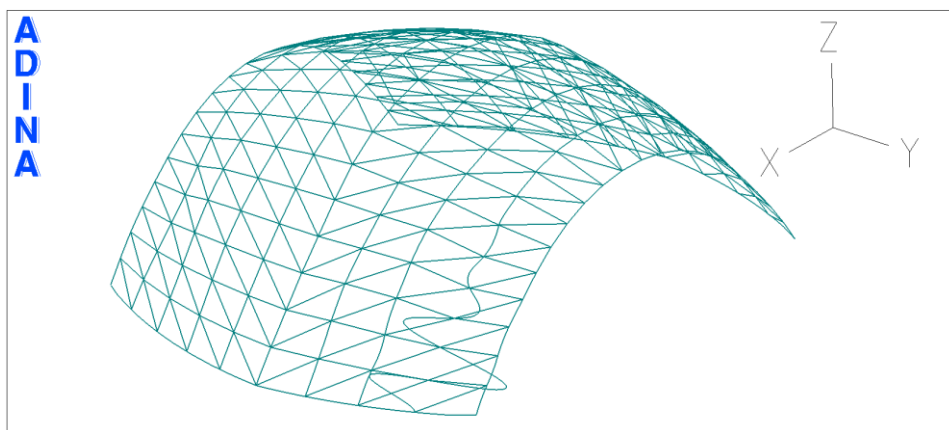
4.5.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (Linearized Buckling Analysis - LBA)

Η ανάλυση LBA και εδώ έγινε για τους συνδυασμούς φορτίσεων ΟΚΛ και ΟΚΑ. Εξήχθησαν και παρουσιάζονται οι πρώτες πέντε ιδιομορφές μαζί με τα αντίστοιχα κρίσιμα φορτία που φαίνονται στον Πίνακα 4-6. Όπως παρατηρείται και ήταν αναμενόμενο, οι ιδιομορφές είναι διαφορετικές με των παραπάνω δύο περιπτώσεων ενώ τα κρίσιμα φορτία πολύ μεγαλύτερα. Στην περίπτωση αυτή της προσομοίωσης έχει θεωρηθεί ότι οι στροφές που μπορούν να εμφανιστούν στις διατομές είναι πολύ μικρές και γι' αυτό διαφέρουν οι ιδιομορφές με των παραπάνω δύο περιπτώσεων όπου εμφανίζονται πλευρικοί και στρεπτοκαμπτικοί λυγισμοί, αλλά και γενικά στρεπτικά φαινόμενα στην περίπτωση των Warping beam elements. Εδώ οι ιδιομορφές που συναντούνται στις πρώτες τέσσερις ιδιομορφές (εικόνα) είναι καθολικοί λυγισμοί των τόξων εντός του επιπέδου τους, και γι' αυτό το λόγο τα κρίσιμα φορτία είναι μεγάλα. Στη 5^η ιδιομορφή παρουσιάζεται λυγισμός του 9^{ου} τόξου στην ανατολική του βάση εκτός του επιπέδου του.

Πίνακας 4-6: Κρίσιμα φορτία – Φορτικοί Συντελεστές

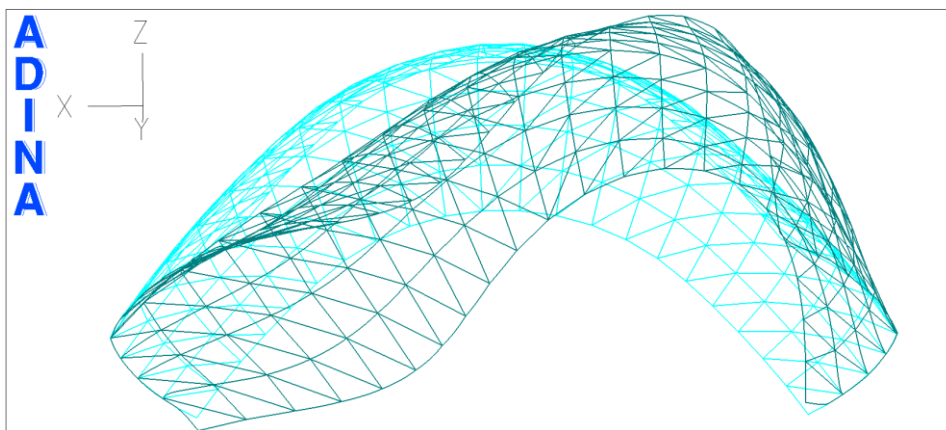
	ΟΚΛ	ΟΚΑ
1 ^η Ιδιομορφή	26,57	17,50
2 ^η Ιδιομορφή	31,05	20,47
3 ^η Ιδιομορφή	39,58	26,12
4 ^η Ιδιομορφή	50,69	33,64
5 ^η Ιδιομορφή	52,97	36,03

Εικόνα 4-32: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 1^η Ιδιομορφή, Νοτιοανατολική όψηΕικόνα 4-33: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 2^η Ιδιομορφή, Νοτιοανατολική όψη

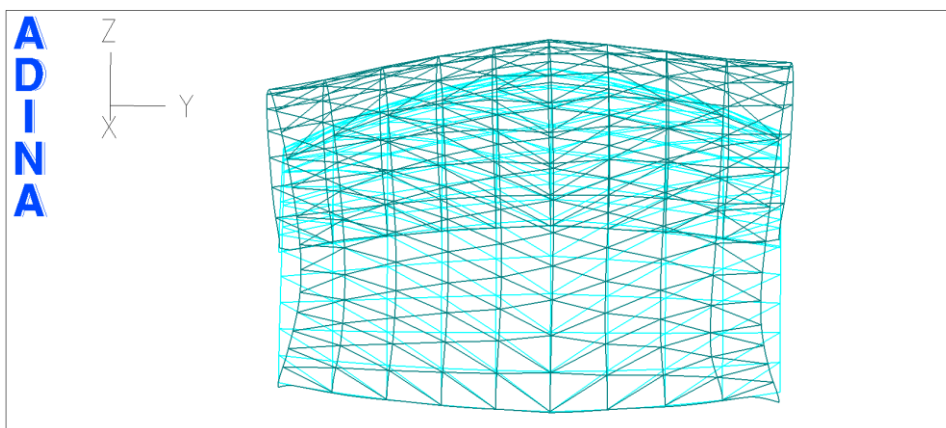
Εικόνα 4-34: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 3^η Ιδιομορφή, Νοτιοανατολική όψηΕικόνα 4-35: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 4^η Ιδιομορφή, Νοτιοανατολική όψηΕικόνα 4-36: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 5^η Ιδιομορφή, Βορειοανατολική όψη

4.5.2 Μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού (GMNA)

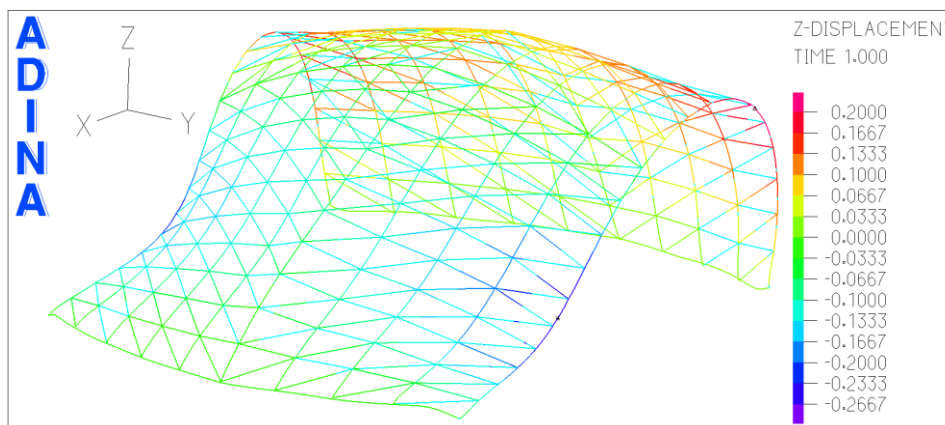
Σε αυτή περίπτωση προσομοίωσης, όπως εξηγήθηκε, τα διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων εξήχθησαν για μη γραμμικό υλικό και γι' αυτό το λόγο δεν μπορεί να γίνει ανάλυση GNA, παρά μόνο μη γραμμική ανάλυση που λαμβάνει υπόψη και τη μη γραμμικότητα υλικού. Η ανάλυση GMNA έγινε και για συνδυασμό φορτίσεων σύμφωνα με την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας αλλά και Λειτουργικότητας. Στην Εικόνα 4-37 και την Εικόνα 4-38 φαίνεται ο παραμορφωμένος φορέας όπως αυτός προέκυψε από τις αναλύσεις. Παρατηρείται ότι η μορφή της παραμόρφωσης είναι παρόμοια με αυτή των προηγούμενων παραμορφώσεων, αλλά όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-39 οι μετατοπίσεις του φορέα είναι σε πολύ μεγάλο βαθμό μικρότερες από τις προηγούμενες περιπτώσεις. Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι ο φορέας είναι αρκετά πιο δύσκαμπτος, όταν οι τιμές στρωφών των διατομών είναι πολύ μικρές. Τα οριακά φορτία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-17 όπου παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της ανατολικής στήριξης του 9^{ου} τόξου, παραμένουν περίπου τα ίδια, με τη διαφορά των μικρότερων μετακινήσεων που αναφέρθηκε, κάτι που επιβεβαιώνει την αυξημένη δυσκαμψία του φορέα.



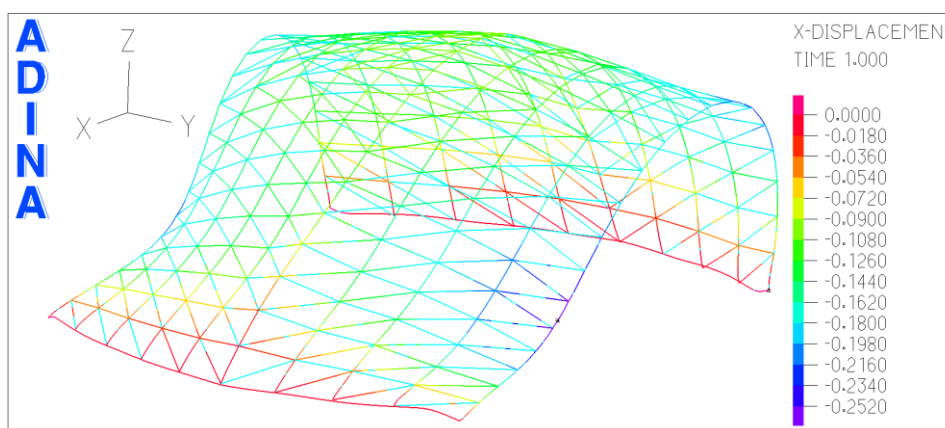
Εικόνα 4-37: Παραμορφωμένος Φορέας, Βόρεια όψη



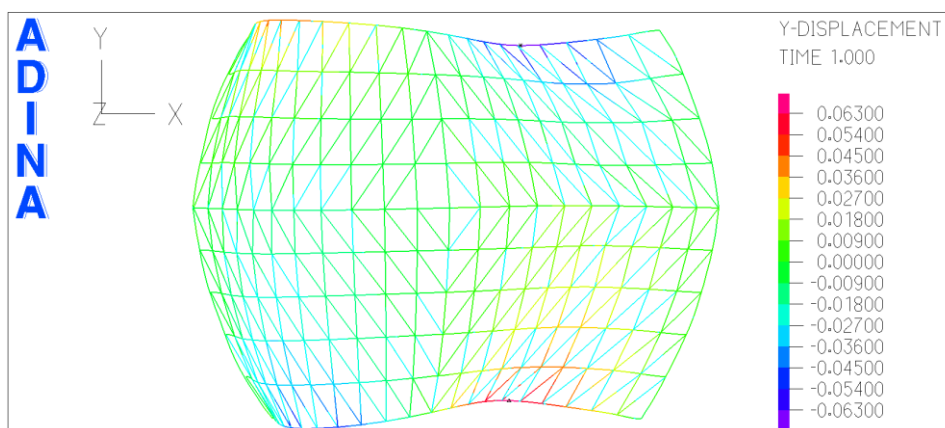
Εικόνα 4-38: Παραμορφωμένος Φορέας, Ανατολική όψη



(α)



(β)

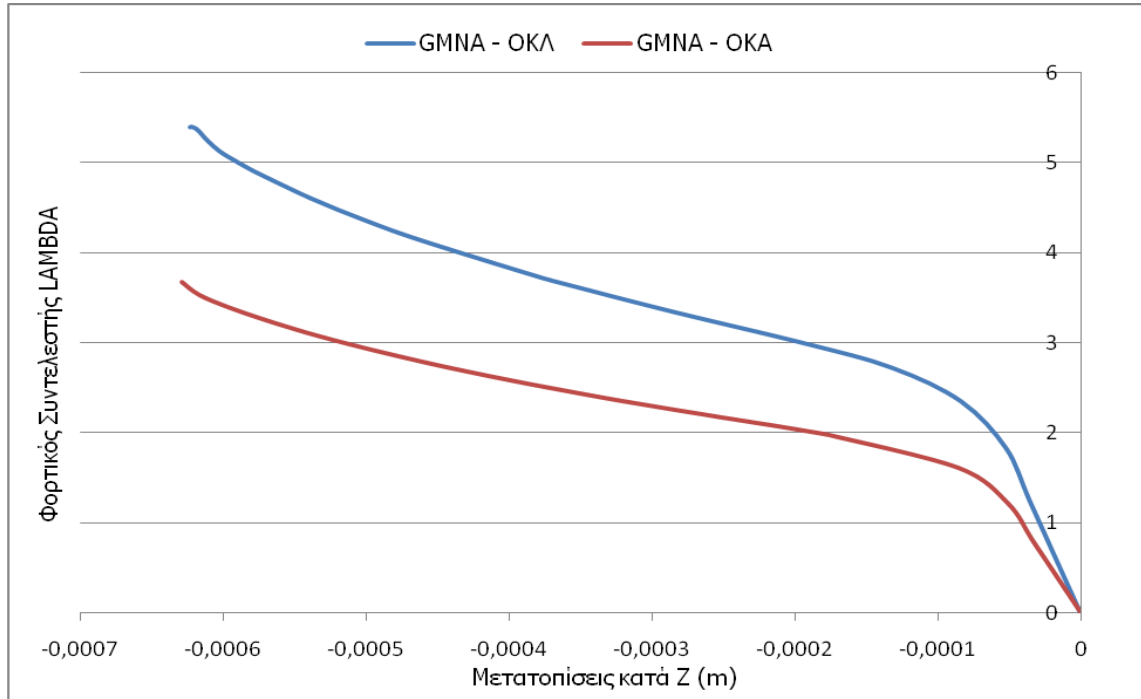


(γ)

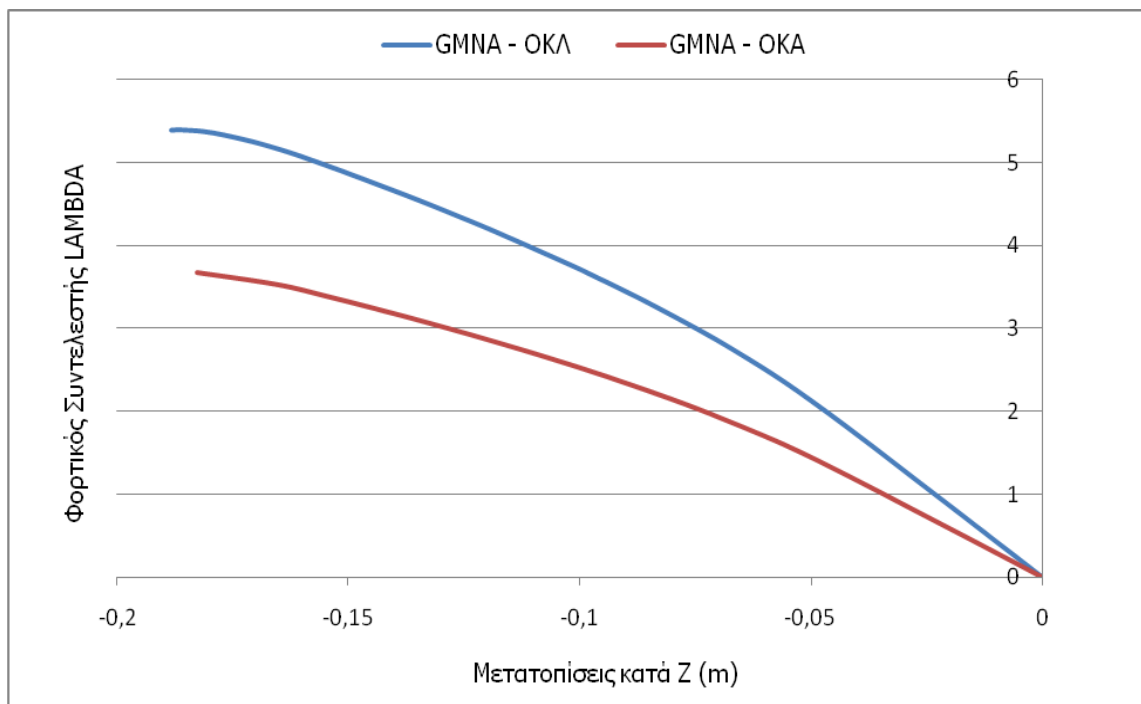
Εικόνα 4-39: Μετατοπίσεις κατά τον άξονα Z (α), τον άξονα X (β) και τον άξονα Y (γ)

Οι δρόμοι ισορροπίας που εξήχθησαν είναι και σε αυτή τη περίπτωση για την ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου η οποία διαρρέει πρώτη, για το μικρότερο δηλαδή φορτικό συντελεστή, και φαίνονται στο Σχήμα 4-17, και δευτερευόντως για το σημείο του 9^{ου} τόξου με την μεγαλύτερη μετατόπιση οι οποίοι φαίνονται στο Σχήμα 4-18. Στη περίπτωση του δρόμου ισορροπίας της στήριξης, τα διαγράμματα για ΟΚΛ και ΟΚΑ είναι αρχικά γραμμικά, με δυσκαμψία η οποία μειώνεται με μικρό ρυθμό, ενώ στη συνέχεια παρατηρείται διαρροή μέσω μη ευκρινούς ευσταθούς σημείου διακλάδωσης το οποίο

ακολουθείται από ανοδικό μεταλαστικό κλάδο. Στους δρόμους ισορροπίας που αφορούν το σημείο του 9^{ου} τόξου όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη μετατόπιση, ο δρόμος ισορροπίας παρουσιάζει πολύ μικρή μη γραμμικότητα σε αντίθεση με τις άλλες περιπτώσεις προσομοίωσης όπου το σημείο αυτό διέρρεε μέσω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού.



Σχήμα 4-17: Δρόμος Ισορροπίας, μετατοπίσεις κατά Z, ανατολικής στήριξης 9^{ου} τόξου



Σχήμα 4-18: Δρόμος Ισορροπίας, μετατοπίσεις κατά Z, σημείο 9^{ου} τόξου με μεγαλύτερη μετατόπιση

4.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΡΕΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

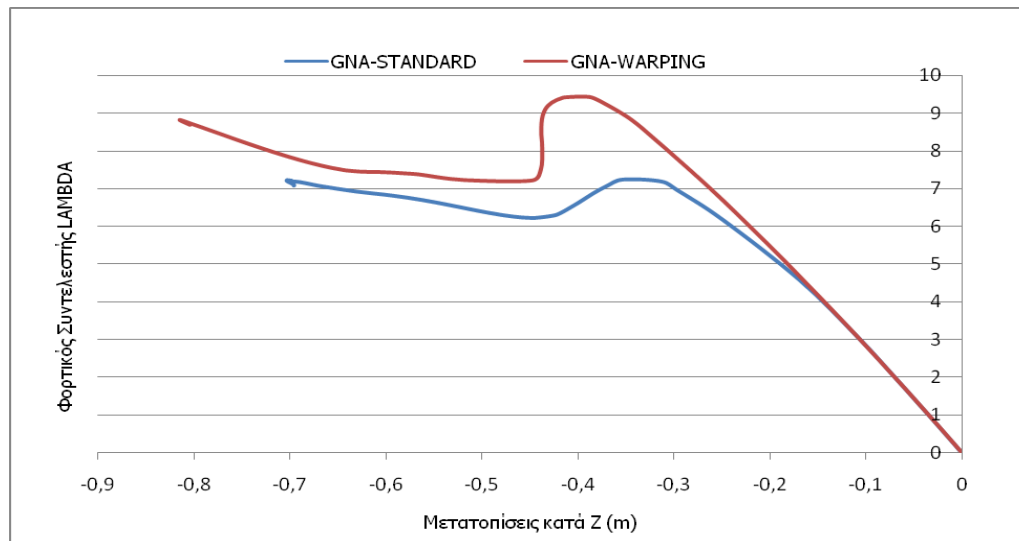
Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα γίνει σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις μη γραμμικές αναλύσεις για τους διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης. Θα συγκριθούν τα αποτελέσματα για τις αναλύσεις LBA, GNA και GMNA συγκεντρωτικά ώστε να γίνουν κατανοητά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τις κάθε περίπτωσης και να βγουν κάποια συμπεράσματα σε σχέση με το ποια μέθοδος προσομοίωσης πρέπει να χρησιμοποιείται σε ανάλογες περιπτώσεις. Για τη σύγκριση αυτή θα χρησιμοποιηθούν κυρίως οι δρόμοι ισορροπίας που εξήχθησαν παραπάνω για την κάθε περίπτωση.

4.6.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις αναλύσεις LBA

Η πρώτη διαφορά που γίνεται αντιληπτή σε αυτό το τύπο ανάλυσης είναι οι διαφορετικές ιδιομορφές που παρατηρούνται μεταξύ των τριών περιπτώσεων προσομοίωσης. Όταν η προσομοίωση γίνεται με Standard beam elements οι πρώτες τέσσερις ιδιομορφές που παρατηρούνται αφορούν αποκλειστικά το 9^ο τόξο, όπου παρατηρείται λυγισμός και εντός και εκτός επιπέδου αλλά και στροφή της διατομής. Στη προσομοίωση με Warping beam elements στις πρώτες 4 ιδιομορφές παρατηρούνται έντονα στρεπτικά φαινόμενα σε όλα τα τόξα ταυτοχρόνως, κάτι που εξηγείται από το γεγονός ότι σε αυτά τα στοιχεία λαμβάνεται υπόψη ο βαθμός ελευθερίας της στρέβλωσης, ενώ η 5^η ιδιομορφή ταυτίζεται με την 1^η ιδιομορφή της περίπτωσης των Standard beam elements αλλά για πολύ μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο. Σε όλες τις ιδιομορφές των Warping beam elements τα κρίσιμα φορτία των ιδιομορφών είναι μεγαλύτερα από τα κρίσιμα φορτία των ιδιομορφών των Standard beam elements. Στην περίπτωση όπου γίνεται προσομοίωση με διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων, όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω της δέσμωσης σχεδόν της στροφής των διατομών οι ιδιομορφές που παρουσιάζονται είναι με παραμορφώσεις των τόξων εντός επιπέδου και για πολύ μεγαλύτερα κρίσιμα φορτία σε σχέση με τις υπόλοιπες δυο περιπτώσεις.

4.6.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις αναλύσεις GNA

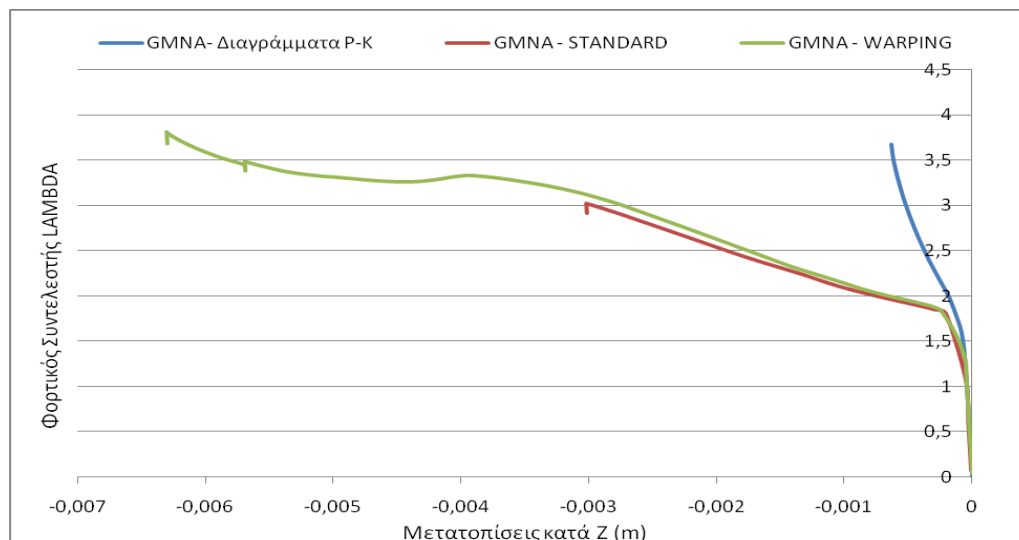
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις αναλύσεις GNA θα γίνει μεταξύ των περιπτώσεων προσομοίωσης με Standard και Warping beam element. Παρατηρείται από την Εικόνα 4-12 και την Εικόνα 4-27 ότι οι μετατοπίσεις που παρατηρούνται για την περίπτωση των Warping beam elements είναι μεγαλύτερες. Παρακάτω στο Σχήμα 4-19 γίνεται σύγκριση των δρόμων ισορροπίας που εξήχθησαν από την ανάλυση GNA για χρήση Standard και Warping beam elements και αφορούν το σημείο του 9^{ου} τόξου που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μετατόπιση στον παραμορφωμένο φορέα. Αυτοί οι δρόμοι ισορροπίας είναι που παρουσιάστηκαν και παραπάνω στο κύριο μέρος του κεφαλαίου, όπως προέκυψαν για συνδυασμό φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Αστοχίας. Από τη σύγκριση αυτή γίνεται αντιληπτό ότι παρότι οι δρόμοι ισορροπίας έχουν παρόμοια μορφή, το οριακό φορτίο για την περίπτωση των Warping beam elements είναι μεγαλύτερο, κάτι που σημαίνει ότι με χρήση των στοιχείων αυτών ο φορέας παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή όταν το υλικό θεωρείται ελαστικό και η αστοχία οφείλεται μόνο λόγω γεωμετρίας. Επιβεβαιώνεται επίσης και από τους δρόμους ισορροπίας ότι ο φορέας παρουσιάζει μεγαλύτερες μετατοπίσεις όταν γίνεται χρήση των Warping στοιχείων δοκού.



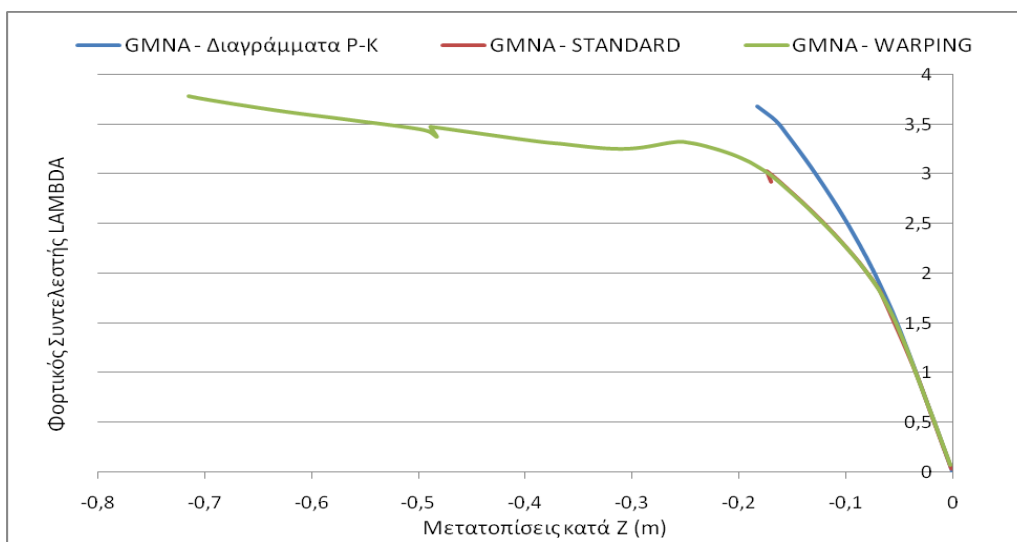
Σχήμα 4-19: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GNA για Standard και Warping beam elements

4.6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις αναλύσεις GMNA

Για τη κατανόηση των διαφορών στα αποτελέσματα των αναλύσεων GMNA, συγκρίνονται οι δρόμοι ισορροπίας των τριών περιπτώσεων προσομοίωσης για τη στήριξη του 9^{ου} τόξου στο που είναι το σημείο το οποίο φαίνεται από τις αναλύσεις να αστοχεί πρώτο, και το σημείο του 9^{ου} τόξου με τις μεγαλύτερες μετατοπίσεις και λυγίζει σε μεγαλύτερο φορτίο λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού. Από το Σχήμα 4-20 αλλά και το Σχήμα 4-21 είναι φανερό ότι οι δρόμοι ισορροπίας για Warping και Standard beam elements είναι σχεδόν ταυτόσημοι μέχρι ενός σημείου. Τα στοιχεία Warping είναι φανερό ότι επιτρέπουν στον φορέα μεγαλύτερες μετακινήσεις, αλλά και λίγο μεγαλύτερη μετελαστική αντοχή από τα Standard. Αντίθετα τα στοιχεία που ορίστηκαν με τα διαγράμματα ροπών- καμπυλοτήτων, δεν επιτρέπουν τις μεγάλες στροφές στις διατομές και γι' αυτό δεν παρουσιάζονται μεγάλες μετακινήσεις στον φορέα. Τα οριακά φορτία σε αυτή τη περίπτωση είναι κοντά στα αποτελέσματα των άλλων δύο περιπτώσεων, με τη διαφορά όμως ότι ο φορέας είναι πολύ πιο δύσκαμπτος.



Σχήμα 4-20: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GMNA για την ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου



Σχήμα 4-21: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GMNA για το σημείο του 9^{ου} τόξου με τη μεγαλύτερη μετατόπιση

4.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρών κεφάλαιο μελετάται μέσω μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων η συμπεριφορά του θόλου, και κυρίως των τόξων του, όταν αυτά προσομοιάζονται με χρήση ραβδωτών στοιχείων δοκού. Αρχικά έγινε μια περιγραφή των διαφορετικών τρόπων με τους οποίους μπορεί να γίνει η προσομοίωση των τόξων, χρησιμοποιώντας ραβδωτά στοιχεία δοκού, σύμφωνα με τις δυνατότητες του λογισμικού ADINA. Παρουσιάστηκαν κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τις κάθε περίπτωσης προσομοίωσης με σκοπό να φανεί στο τέλος του κεφαλαίου αν αυτά επιβεβαιώνονται και τελικά ποιος είναι ο καλύτερος τρόπος προσομοίωσης για φορείς ανάλογους με αυτόν της παρούσας εργασίας. Εκτελέστηκαν στη συνέχεια για κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις αναλύσεις LBA, GNA και GMNA των οποίων τα αποτελέσματα και παρουσιάστηκαν αναλυτικά με τη βοήθεια εικόνων και δρόμων ισορροπίας ώστε να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά του φορέα.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών έγινε κατανοητό ότι η αστοχία του φορέα οφείλεται φανερά στη μη γραμμικότητα υλικού και πολύ λιγότερο, έως καθόλου, στη μη γραμμικότητα γεωμετρίας. Παρατηρήθηκε ότι το σημείο του φορέα που διαρρέει πρώτο για το χαμηλότερο φορτικό συντελεστή, είναι η ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου. Ακολουθούν οι υπόλοιπες στηρίξεις για μεγαλύτερους φορτικούς συντελεστές, ενώ ιδιαίτερο ενδιαφέρον δόθηκε στο σημείο του 9^{ου} τόξου το οποίο, εκτός των στηρίξεων, αστοχεί πρώτο λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού. Η κρισιμότητα της αστοχίας των στηρίξεων – η ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου αστοχεί για φορτικό συντελεστή $\lambda=1,80$. Γι' αυτό το λόγο εξετάζεται η στήριξη αυτή των τόξων αναλυτικά στο 7^ο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Η συμπεριφορά του φορέα, είναι άμεση απόρροια των φορτίσεων οι οποίες δεν είναι απολύτως συμμετρικές προς καμία κατεύθυνση, αλλά και τις γεωμετρίας του θόλου μιας και αυτός παρουσιάζει διπλή καμπυλότητα. Έγινε επίσης έλεγχος για το πόσο επηρεάζουν τα θερμοκρασιακά φορτία αλλά και η ύπαρξη αρχικών ατελειών τη συμπεριφορά των τόξων. Σε ό,τι αφορά τα θερμοκρασιακά φορτία, αυτά δεν έχουν σχεδόν καμία επιρροή στη συμπεριφορά των τόξων, αφού αυτά λόγω της γεωμετρίας τους μπορούν να διασταλούν και να συσταλούν αναλόγως. Οι αρχικές ατέλειες δεν επηρεάζουν τα φορτία λυγισμού του φορέα, αλλά παρουσιάζεται λίγο μειωμένη η δυσκαμψία του φορέα και εμφανίζονται λίγο μεγαλύτερες μετακινήσεις.

Τέλος εξήχθησαν, μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων των τριών τρόπων προσομοίωσης, συμπεράσματα για το ποια μέθοδος είναι η καταλληλότερη. Η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων για

χρήση Standard και Warping beam elements αποδείχθηκε τελικά μεγάλη σε ότι αφορά τη μη γραμμική μεταλυγισμική και μετελαστική συμπεριφορά του φορέα. Ενώ για φορτία σχεδιασμού, τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο περιπτώσεων είναι ταυτόσημα, για μεγαλύτερους φορτικούς συντελεστές, τα Warping στοιχεία φάνηκε να δίνουν τη δυνατότητα στο θόλο για μεγαλύτερες μετακινήσεις αλλά και μεγαλύτερη μεταλυγισμική και μετελαστική αντοχή. Έτσι είναι φανερό ότι η χρήση των Warping στοιχείων αποδεικνύεται καταλληλότερη σε τέτοιες περιπτώσεις, κάτι που συμφωνεί και με τη προτροπή για χρήση των στοιχείων αυτών και από το ίδιο το λογισμικό. Η χρήση στοιχείων με ορισμό διαγραμμάτων ροπών-καμπυλότητας έγινε με σκοπό να φανεί ο βαθμός στον οποίο επηρεάζουν τη συμπεριφορά του φορέα οι στροφές των διατομών, μιας και στη περίπτωση αυτή οι στροφές έχουν σχεδόν δεσμευτεί. Αναμενόμενα σε αυτή τη περίπτωση προσομοίωσης τα αποτελέσματα απείχαν πολύ από τις άλλες δύο, δίνοντας μας να καταλάβουμε ότι η στρεπτική ικανότητα των διατομών είναι κρίσιμη για το φορέα.

Βέβαια η δυνατότητα ακριβής προσομοίωσης της στρεπτικής ικανότητας των διατομών μπορεί να αποδειχθεί δύσκολη έως απίθανη όταν γίνεται χρήση γραμμικών στοιχείων δοκού. Ο συγκεκριμένος φορέας δέχεται στη πραγματικότητα σε κάποια σημεία μερική στρεπτική εξασφάλιση, όπως στα σημεία συνδέσεων των τεγίδων και των διαγώνιων συνδέσεων δυσκαμψίας με τα τόξα. Γι' αυτό το λόγο στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται προσομοίωση των τόξων με χρήση επιφανειακών στοιχείων όπου μπορούν όσο το δυνατόν περισσότερο να ξεπεραστούν τέτοια προβλήματα, με αποτέλεσμα να γίνεται ακόμα πιο κοντινή στη πραγματικότητα προσέγγιση στη συμπεριφορά του φορέα.

5 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μη γραμμικές αναλύσεις που έγιναν στο θόλο, για την περίπτωση όπου, για τα τόξα του θόλου η προσομοίωση έχει γίνει με χρήση επιφανειακών στοιχείων. Τα υπόλοιπα μέλη του θόλου, όπως οι τεγίδες, οι διαγώνιοι σύνδεσμοι και οι μηκίδες του τελευταίου ορόφου, προσομοιάζονται με χρήση ραβδωτών στοιχείων δοκού. Τονίζεται ότι σε αυτό το κεφάλαιο, όπως έγινε και με τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, όπου έγιναν επίσης μη γραμμικές αναλύσεις για στο θόλο, δίνεται ιδιαίτερο βάρος σχεδόν αποκλειστικά στην συμπεριφορά των τόξων. Τα υπόλοιπα μέλη του θόλου, όπως οι τεγίδες και οι διαγώνιοι σύνδεσμοι, είναι ευθύγραμμα αμφιαρθρωτά στοιχεία και γι' αυτό το λόγο είναι απλός ο υπολογισμός των φαινομένων λυγισμού κανονιστικά (Κεφάλαιο 3) και σε αυτή τη περίπτωση θεωρούμε ότι μας καλύπτει για τη συμπεριφορά τους, κάτι και το οποίο έγινε και για την περιγραφή αποτελεσμάτων του προηγούμενου κεφαλαίου. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η προσομοίωση των τόξων με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, και υπενθυμίζεται πως έχει γίνει η προσομοίωση των υπόλοιπων μελών με ραβδωτά στοιχεία δοκού. Γίνεται επίσης λόγος για το πώς προσομοιάστηκαν οι συνδέσεις των τεγίδων και των διαγώνιων συνδέσμων με τα τόξα, καθώς και η στηρίξεις των τόξων στις βάσεις τους.

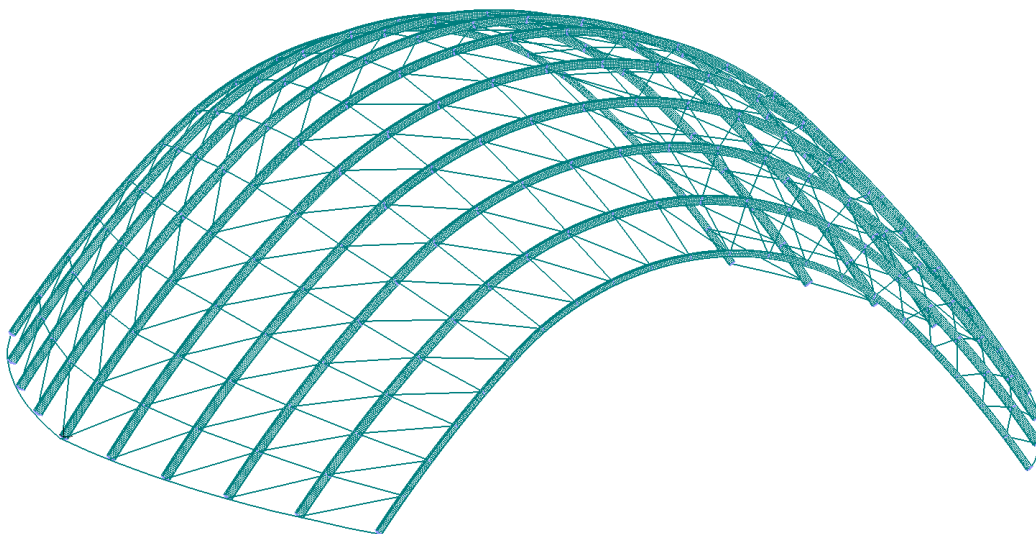
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων μαζί με τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν για κάθε αποτέλεσμα. Όπως ακριβώς έγινε και για το προηγούμενο κεφάλαιο, όπου τα τόξα προσομοιάστηκαν με χρήση ραβδωτών στοιχείων δοκού, οι αναλύσεις οι οποίες εκτελέστηκαν και των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται, είναι γραμμικοποιημένες αναλύσεις λυγισμού (LBA), μη γραμμικές αναλύσεις με τη θεώρηση μη γραμμικότητας γεωμετρίας (GNA), αλλά και μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού (GMNA). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών περιγράφονται καλύτερα με την βοήθεια εικόνων των παραμορφωμένων φορέων, εικόνων όπου φαίνονται οι τάσεις οι οποίες αναπτύσσονται στο φορέα και τα σημεία πλαστικοποίησης του υλικού, αλλά και δρόμων ισορροπίας οι οποίοι έχουν εξαχθεί από το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε. Εξετάζεται επίσης, με μη γραμμικές αναλύσεις, ο φορέας όταν λαμβάνονται υπόψη αρχικές ατέλειες και πως αυτές επηρεάζουν την συμπεριφορά των τόξων. Τέλος ελέγχεται η επιρροή των θερμοκρασιακών φορτίων στα τόξα του φορέα.

Στο τέλος του κεφαλαίου, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων τα οποία εξήχθησαν από τις αναλύσεις που έγιναν σε αυτό το κεφάλαιο, δηλαδή με χρήση επιφανειακών στοιχείων για την προσομοίωση των τόξων, με τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, όπου χρησιμοποιήθηκαν ραβδωτά στοιχεία για την προσομοίωση. Γίνεται, επίσης, σύγκριση των αποτελεσμάτων του Κεφαλαίου 4 και 5 με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον κανονιστικό έλεγχο ο οποίος παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Όπως εξηγήθηκε στον αναγνώστη και στην εισαγωγή του προηγούμενου κεφαλαίου, είναι σημαντικό να επισκεφτεί ξανά το Κεφάλαιο 2.2 κατά τη διάρκεια μελέτης των αποτελεσμάτων από τις αναλύσεις, ώστε να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο έχει γίνει η ονομασία του κάθε τόξου, και ο προσανατολισμός του θόλου σε σχέση με τα σημεία ορίζοντα, κάτι που θα βοηθήσει στη κατανόηση των αποτελεσμάτων.

5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΞΩΝ ΜΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

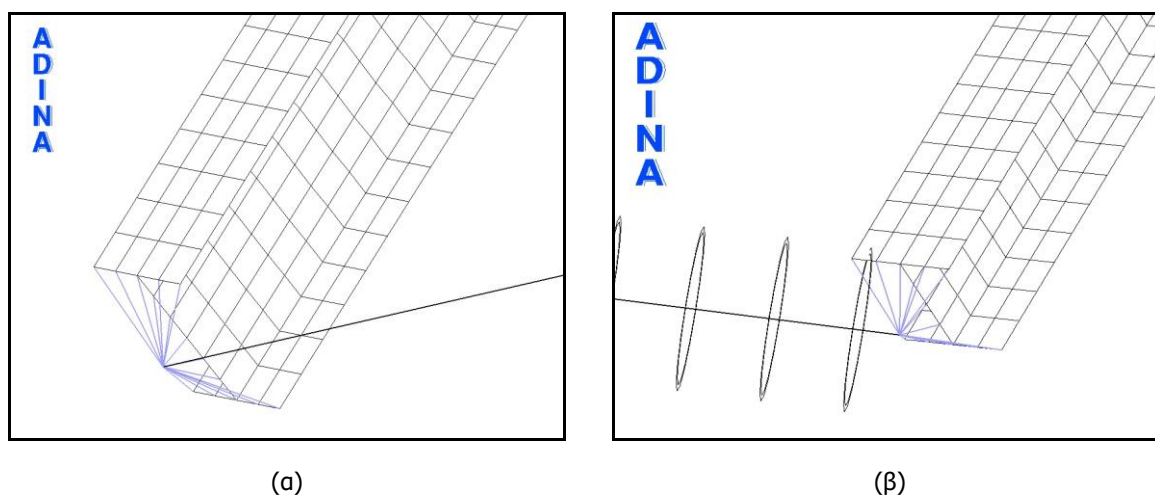
Για να γίνει η προσομοίωση των τόξων με επιφανειακά στοιχεία ήταν απαραίτητο να σχεδιαστεί η τρισδιάστατη γεωμετρία των τόξων στο φορέα, όπου σχεδιάστηκαν οι επιφάνειες των πελμάτων και των κορμών για κάθε το καθένα. Έγινε η επιλογή, μιας και όπως προαναφέρθηκε η συμπεριφορά των τόξων είναι αυτή που μας ενδιαφέρει σε αυτό το κεφάλαιο, τα υπόλοιπα μέλη του θόλου, δηλαδή οι τεγίδες, οι διαγώνιοι σύνδεσμοι και οι μηκίδες του ανώτατου ορόφου, να προσομοιαστούν με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία δοκού, όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ως γνωστών, τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, είναι δισδιάστατα στοιχεία, καταπονύμενα εντός επιπέδου ως κέλυφος και κάθετα στο επίπεδο ως πλάκα. Ο ορισμός τους απαιτεί προσδιορισμό του υλικού, του οποίου τα χαρακτηριστικά περιγράφηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο, του πάχους του κάθε στοιχείου και χρησιμοποιούνται στις επιφάνειες των διπλών ταυ, έτσι όπως αυτές έχουν σχεδιαστεί στο πρόγραμμα AutoCAD. Στην παρακάτω Εικόνα 5-1 φαίνεται η γεωμετρία του φορέα, πριν τη παραμόρφωση, όπως αυτός έχει προσομοιαστεί με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων (Shell elements) στο λογισμικό ADINA που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις.

ADINA



Εικόνα 5-1: Εικόνα φορέα με επιφανειακά στοιχεία όπως προσομοιώθηκε στο λογισμικό ADINA, Νοτιοδυτική Όψη

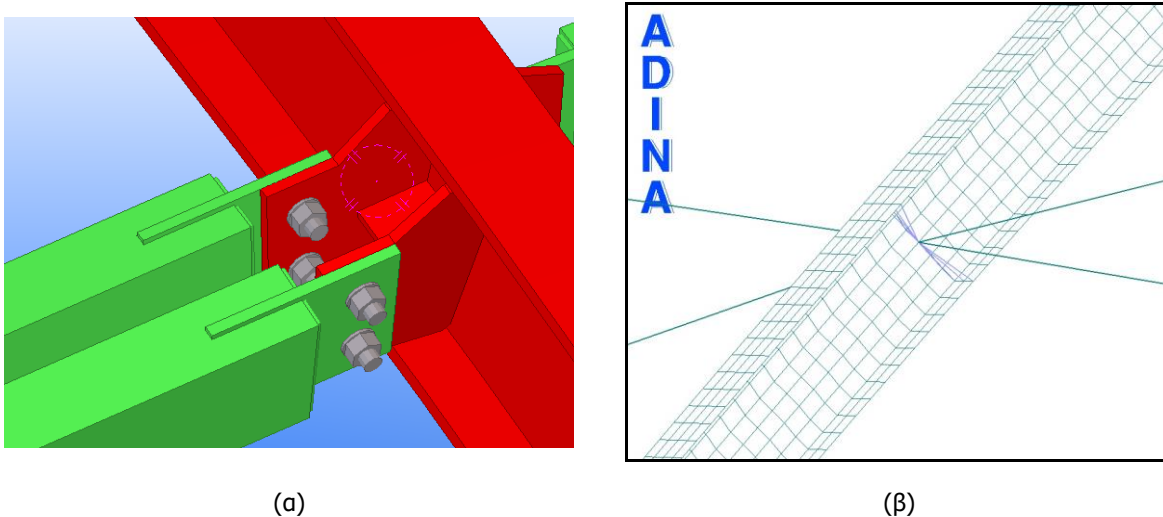
Για τη διακριτοποίηση του φορέα, ακολουθήθηκε η διαδικασία κατά την οποία γίνεται διακριτοποίηση των γραμμών που συνιστούν τις επιφάνειες. Εφόσον αυτές διακριτοποιήθηκαν, τότε διακριτοποιούνται και οι επιφάνειες τις οποίες απαρτίζουν οι γραμμές αυτές, κάτι που γίνεται καθώς στη γεωμετρία ιεραρχικά η γραμμή είναι κατώτερη της επιφάνειας. Η διακριτοποίηση των γραμμών αυτών έγινε έτσι ώστε τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία που θα προκύψουν να είναι όσο το δυνατόν πιο τετατραγωνοποιημένα. Έτσι οι γραμμές κατά μήκος των τόξων στα πέλματα και στους κορμούς διακριτοποιήθηκαν με βάση το μήκος του στοιχείου το οποίο τέθηκε 0,05 m, οι γραμμές καθ' ύψος των κορμών με μήκος 0,045 m και οι γραμμές κατά πλάτος των πελμάτων με μήκος 0,035 m. Δόθηκε επίσης ιδιαίτερη προσοχή ώστε στις συναρμογές των επιφανειών η διακριτοποίηση να είναι ίδια, ώστε το πλέγμα των πεπερασμένων επιφανειακών στοιχείων να έχει κοινούς κόμβους. Τα υπόλοιπα μέλη του φορέα, προσομοιάστηκαν με πεπερασμένα ραβδωτά στοιχεία δοκού (beam elements), με τις τεγίδες και τους διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας να διακριτοποιούνται με ένα στοιχείο ανά τεγίδα και διαγώνιο, ενώ οι μηκίδες του τελευταίου ορόφου διακριτοποιήθηκαν με στοιχεία μήκους 0,1 m το καθένα. Οι εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών γίνεται σε σημείο εκτός των διατομών στήριξης, στο οποίο δεσμεύονται όλες οι μετακινήσεις και στροφές, με τη μορφή πλήρους πάκτωσης δηλαδή. Στη συνέχεια το σημείο αυτό ενώνεται με τη διατομή στήριξης της δοκού μέσω άκαμπτων στοιχείων όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-2(α), δηλαδή στοιχεία που παρουσιάζουν άπειρη δυσκαμψία, τα οποία καλούνται "rigid links". Στο σημείο αυτό, το οποίο λέγεται και "master point/node", καταλήγουν και οι διαγώνιοι σύνδεσμοι που βρίσκονται στη βάση του θόλου. Τα εξωτερικά τόξα, όπως έχει αναφερθεί, στηρίζονται πάνω στις μηκίδες του τελευταίου ορόφου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-2(β), και αυτά με χρήση rigid links, τα οποία από τη διατομή στήριξης των εξωτερικών τόξων καταλήγουν σε σημείο της μηκίδας.



Εικόνα 5-2: Στήριξη (α) εσωτερικών τόξων και (β) εξωτερικών τόξων με χρήση rigid links

Σχολιάστηκε και στα συμπεράσματα του προηγούμενου κεφαλαίου ότι η δυνατότητα ακριβούς προσομοίωσης της στρεπτικής ικανότητας των μελών μπορεί να αποδειχθεί πολύ δύσκολη όταν γίνεται χρήση ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό συμβαίνει και λόγω της στρεπτικής δυσκαμψίας που προσφέρουν στα τόξα του φορέα, οι συνδέσεις με τις τεγίδες και τους διαγώνιους συνδέσμους οι οποίες γίνονται μέσω κομβοελασμάτων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-3(α). Κάποια από αυτά τα προβλήματα μπορούν να ξεπεραστούν όταν γίνεται χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων και να πλησιαστεί η συμπεριφορά της προσομοίωσης με τον πραγματικό φορέα. Για την ακρίβεια χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα των άκαμπτων στοιχείων "rigid links" ώστε να συνδεθεί ολόκληρη η διατομή του τόξου, με το συγκεκριμένο σημείο της διατομής αυτής στο οποίο συνδέονται οι τεγίδες

και οι διαγώνιοι σύνδεσμοι, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 5-3(β). Υπενθυμίζεται ακόμα, ότι, στα σημεία αυτά όπου ενώνονται οι διαγώνιοι σύνδεσμοι και οι τεγίδες με τα τόξα, έχουν ελευθερωθεί όλες οι καμπτικές στροφές με την τοποθέτηση εσωτερικών αρθρώσεων στις άκρες των μελών αυτών.



Εικόνα 5-3: Σύνδεση τεγίδων με τόξο (α) στην πραγματικότητα και (β) πως προσομοιώθηκε στο ADINA

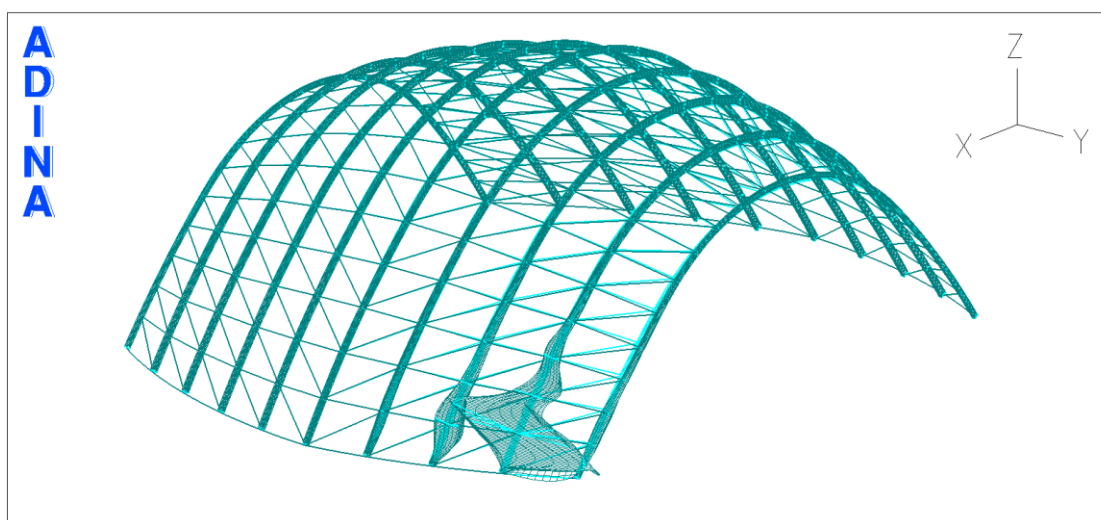
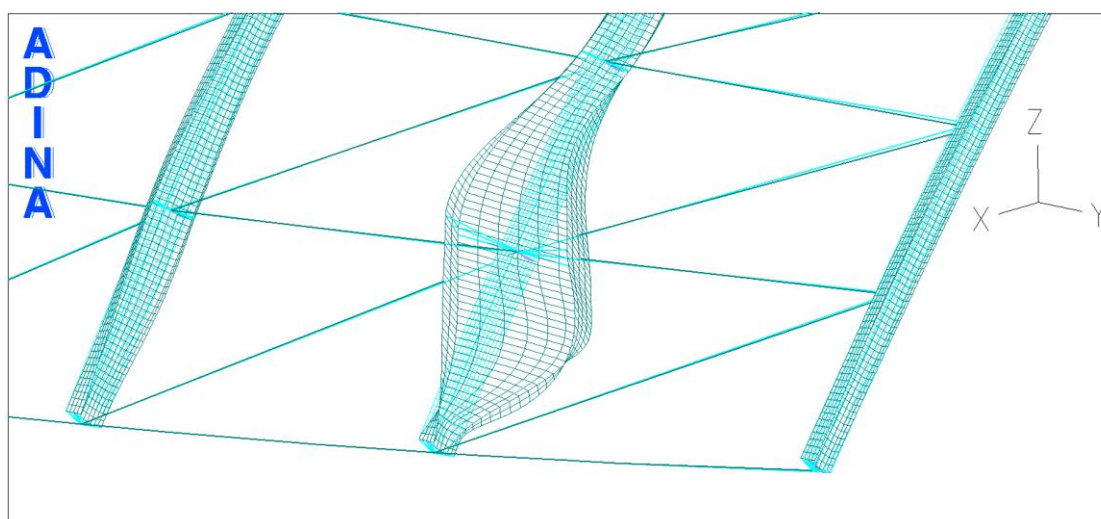
5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

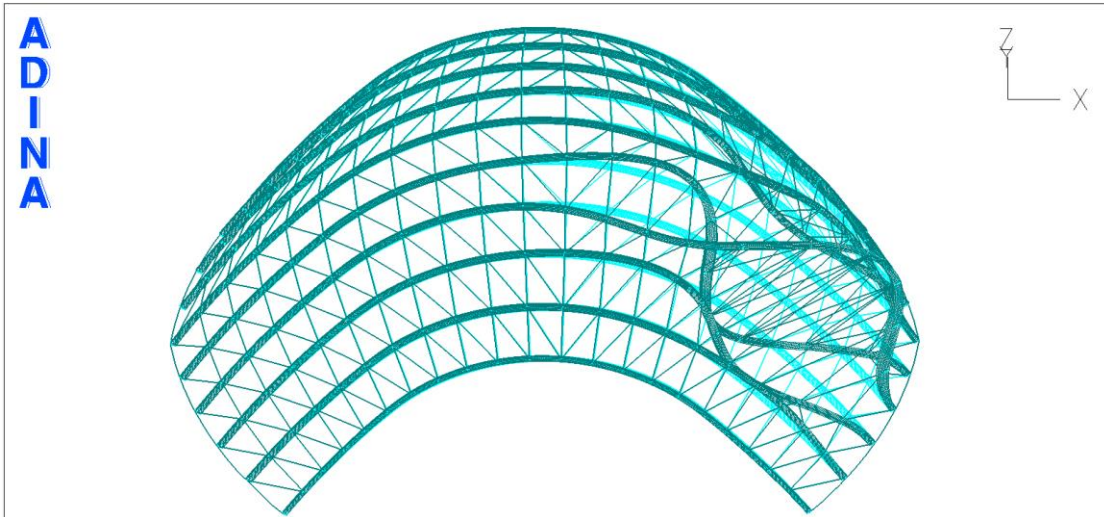
5.3.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (Linearized Buckling Analysis –LBA)

Από τις αναλύσεις LBA που έγιναν για το μοντέλο, όπου η προσομοίωση των τόξων γίνεται με χρήση των επιφανειακών στοιχείων του λογισμικού ADINA (Shell elements), προέκυψαν οι ιδιομορφές και τα κρίσιμα φορτία του φορέα για φόρτιση σύμφωνα με τους συνδυασμούς για Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ) και Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ). Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω, συγκεκριμένα, τα κρίσιμα φορτία στον Πίνακα 5-1, μαζί με Εικόνες (Εικόνα 5-4-Εικόνα 5-11) του μοντέλου από το λογισμικό ADINA στις οποίες φαίνεται ο παραμορφωμένος φορέας. Παρατηρείται ότι για τους δύο συνδυασμούς φορτίσεων οι ιδιομορφές που προκύπτουν είναι ίδιες, με μόνη διαφορά στα κρίσιμα φορτία λυγισμού. Η πρώτη ιδιομορφή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-4 και την Εικόνα 5-5, εκφράζεται κυρίως με πλευρικό λυγισμό κοντά στην ανατολική βάση του 9^{ου} τόξου, ενώ ταυτόχρονα πλευρικός λυγισμός μικρότερης κλίμακας εμφανίζεται στις βάσεις των γειτονικών τόξων. Στη δεύτερη ιδιομορφή (Εικόνα 5-6, Εικόνα 5-7) παρατηρείται λυγισμός των τόξων κυρίως κατά τον ισχυρό άξονα τους αλλά και σε μικρότερο βαθμό προς τον ασθενή άξονα, με το φαινόμενο αυτό να είναι εντονότερο στο 3^ο, 4^ο και 5^ο τόξο του θόλου. Παρατηρείται στα τόξα αυτά, επίσης, στρόφη της διατομής σε σχέση με τον αρχική απαραμόρφωτη μορφή του φορέα. Στην τρίτη και τέταρτη ιδιομορφή, όπως φαίνονται από την Εικόνα 5-8 έως την Εικόνα 5-11 παρουσιάζεται τοπικός λυγισμός στην στήριξη του 9^{ου} τόξου του θόλου, με την διαφορά ότι στην τρίτη ιδιομορφή παρατηρείται ταυτόχρονα και πλευρικός λυγισμός στο τόξο αυτό, παρόμοιος με αυτόν που εμφανίστηκε στην πρώτη ιδιομορφή. Τα κρίσιμα φορτία είναι πολύ μεγαλύτερα από αυτά που προέκυψαν σε σχέση με τις περιπτώσεις των Standard και Warping beam elements του προηγούμενου κεφαλαίου, ενώ ο έντονος λυγισμός κατά τον ισχυρό άξονα που εμφανίζεται στη 2^η ιδιομορφή, καταλαβαίνουμε ότι οφείλεται κυρίως στο τρόπο με τον οποίο έχουν προσομοιωθεί οι συνδέσεις οι οποίες προσφέρουν μεγαλύτερη στρεπτική δυσκαμψία στα τόξα από ότι στις περιπτώσεις των beam elements, κάτι το οποίο είναι και πιο κοντά στην πραγματική συμπεριφορά του φορέα.

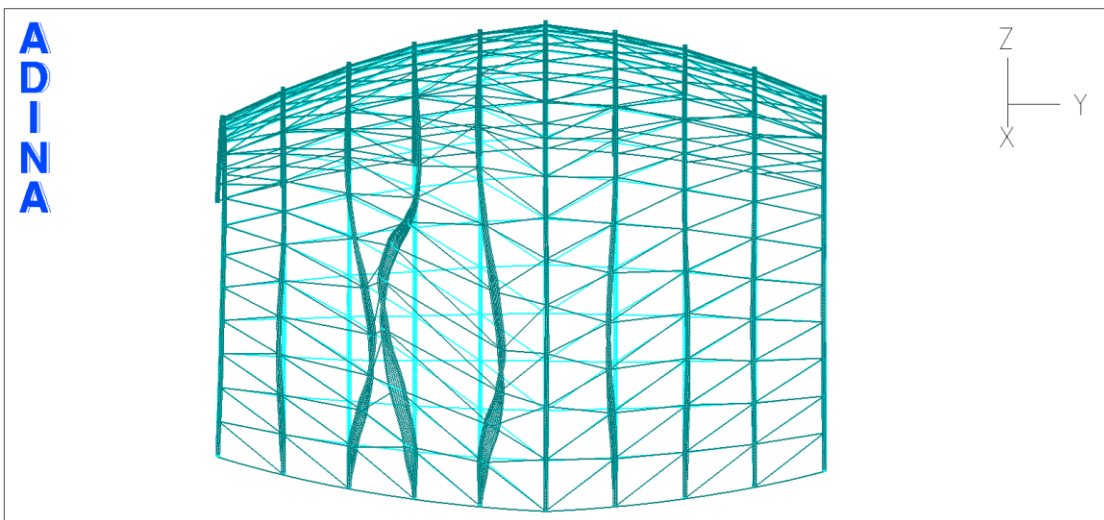
Πίνακας 5-1 : Κρίσιμα φορτία – Φορτικοί Συντελεστές

	ΟΚΛ	ΟΚΑ
1 ^η Ιδιομορφή	22,34	15,10
2 ^η Ιδιομορφή	24,15	16,11
3 ^η Ιδιομορφή	25,97	17,51
4 ^η Ιδιομορφή	26,21	17,68

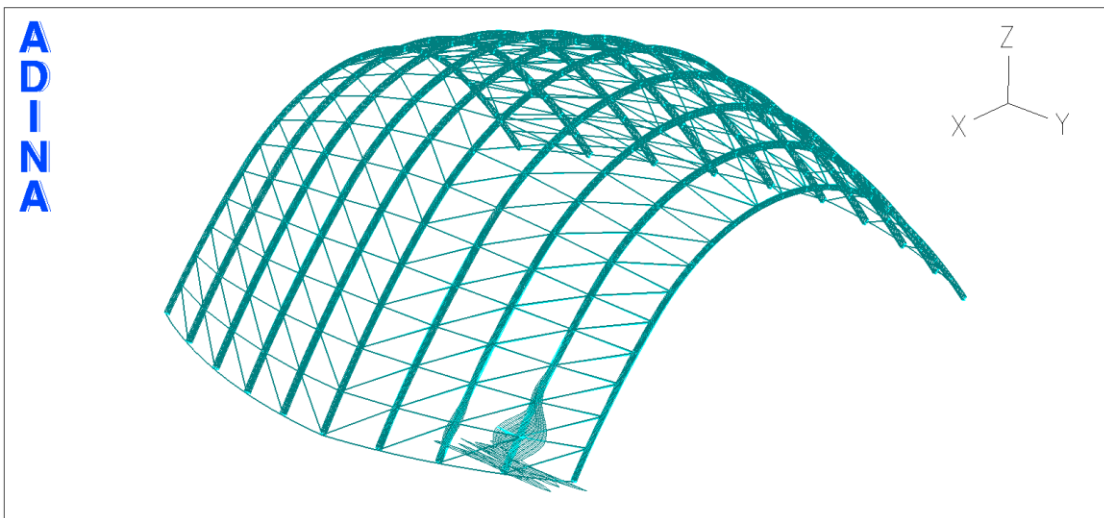
Εικόνα 5-4: Παραμορφωμένος φορέας σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή, Βορειοανατολική όψηΕικόνα 5-5: Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή



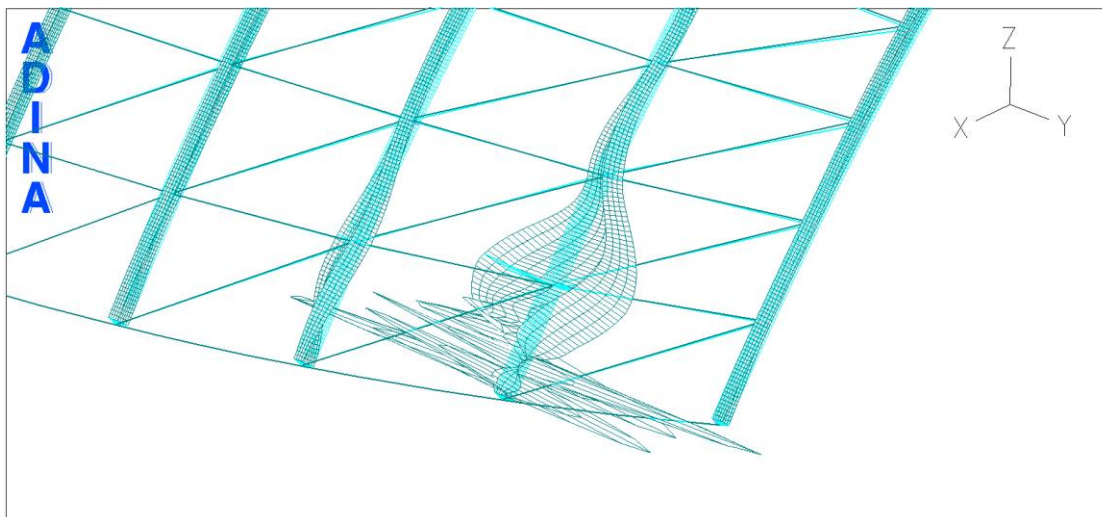
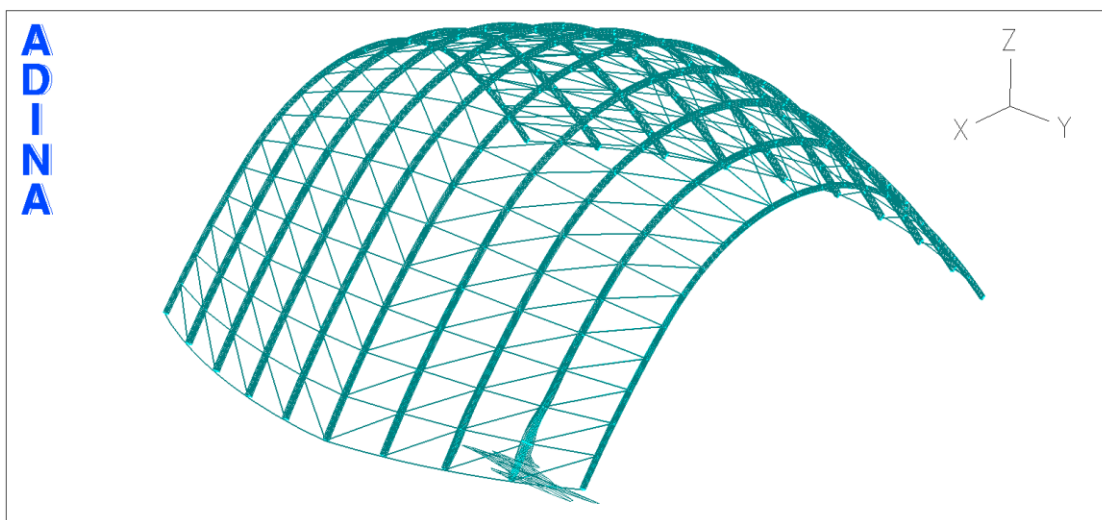
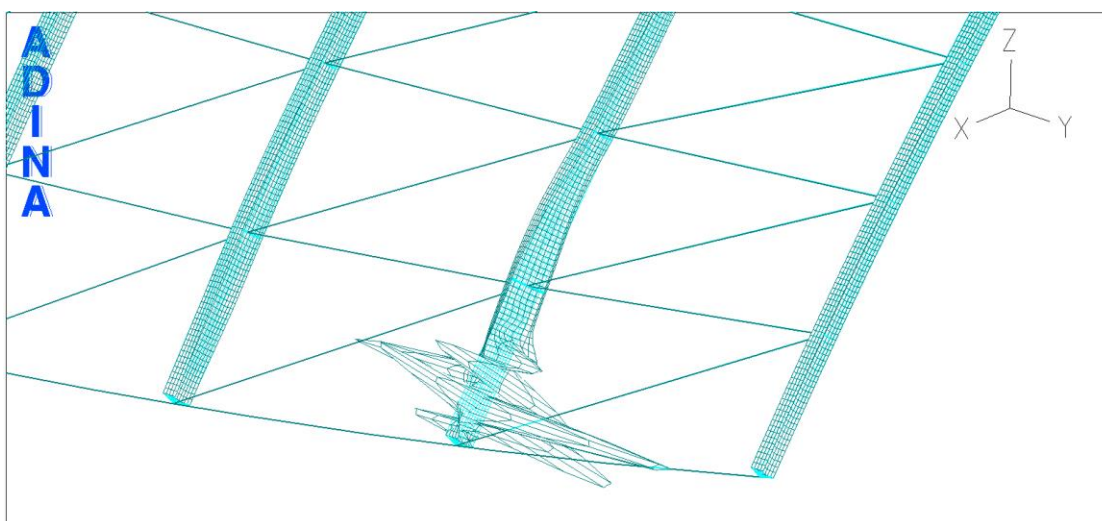
Εικόνα 5-6: Παραμορφωμένος φορέας σύμφωνα με την 2^η ιδιομορφή, Νότια όψη



Εικόνα 5-7: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 2^η Ιδιομορφή, Ανατολική όψη

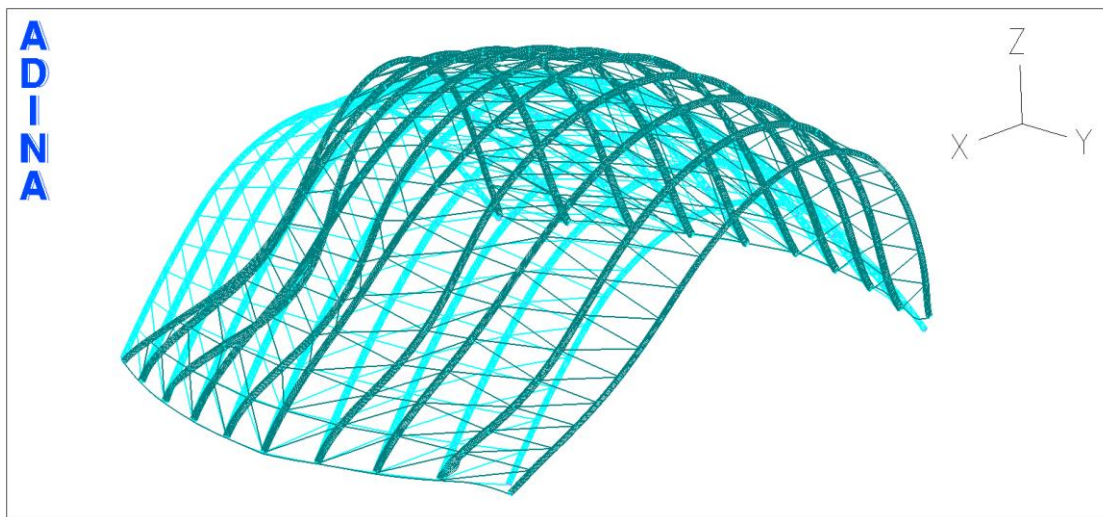


Εικόνα 5-8: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 3^η Ιδιομορφή

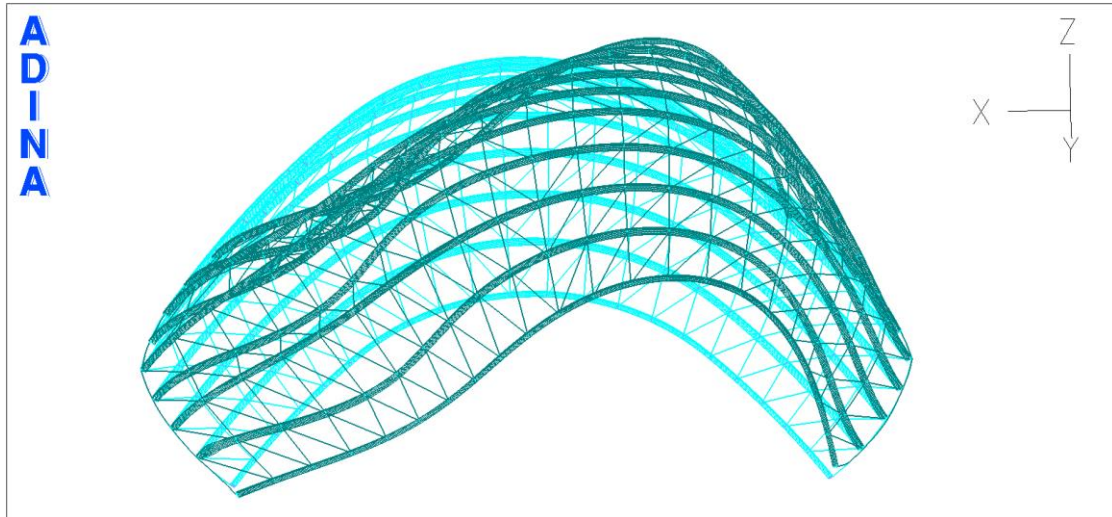
Εικόνα 5-9: Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα σύμφωνα με την 3^η ιδιομορφήΕικόνα 5-10: Παραμορφωμένος Φορέας σύμφωνα με την 4^η Ιδιομορφή, Βορειοανατολική όψηΕικόνα 5-11: Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα σύμφωνα με την 4^η ιδιομορφή

5.3.2 Μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας (GNA)

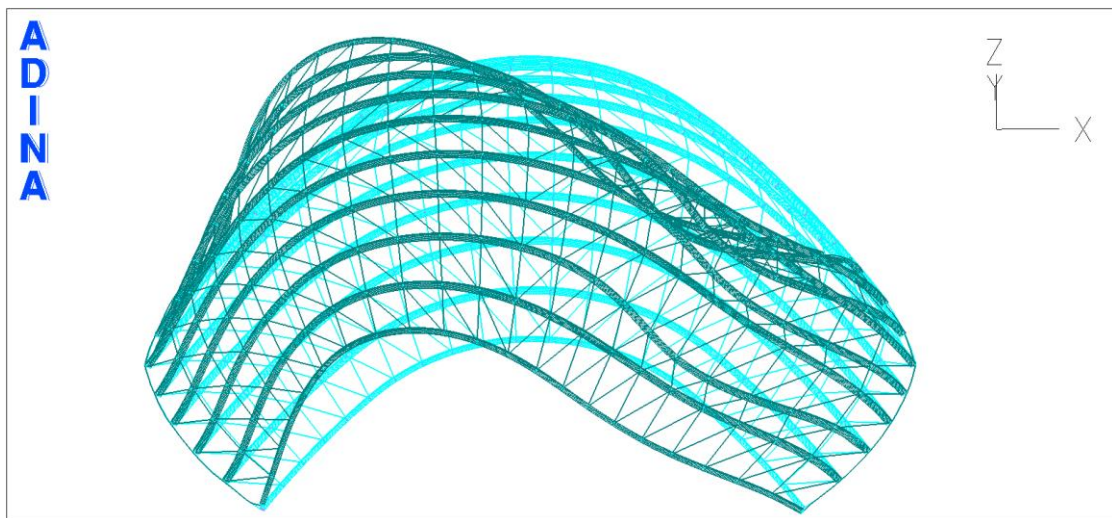
Στην ανάλυση αυτή το υλικό του φορέα θεωρείται ελαστικό, ενώ θεωρούνται μεγάλες μετακινήσεις (kinematics-large displacements) ώστε να γίνει αντιληπτή η μη γραμμικότητα γεωμετρίας του φορέα. Η ανάλυση αυτή έγινε με τη μέθοδο arc-length του λογισμικού ADINA, ενώ εξετάστηκαν και οι δύο συνδυασμοί φορτίσεων, για Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας και Οριακή Κατάσταση Αστοχίας. Όπως φαίνεται στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω, εμφανίζονται όπως και στις άλλες περιπτώσεις προσομοίωσης του φορέα, μετακινήσεις προς τα αρνητικά του άξονα X, δηλαδή προς τα δυτικά καθώς και προς τα αρνητικά του άξονα Z από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν πίεση και τα θετικά του άξονα Z από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν αναρρόφηση. Οι μετακινήσεις αυτές, όπως φαίνονται στην Εικόνα 5-12 έως και την Εικόνα 5-15, αλλά και την Εικόνα 5-17 όπου φαίνονται οι μετατοπίσεις του φορέα κατά τους τρεις άξονες, συμφωνούν με τις ιδιομορφές σε ένα βαθμό. Εκτός από τις μεγάλες μετακινήσεις που παρουσιάζουν τα ακριανά τόξα, κάτι που οφείλεται στο ότι στηρίζονται στη μηκίδα του τελευταίου ορόφου που επιτρέπει παραπάνω μετακινήσεις από τις στηρίξεις των υπόλοιπων τόξων, παρατηρούνται μεγάλες μετακινήσεις στο 3^ο, 5^ο, και 7^ο τόξο όπως και στη δεύτερη ιδιομορφή. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, επίσης, παρουσιάζει και η ανατολική βάση του 9^{ου} τόξου η οποία φαίνεται να έχει λυγίσει στρεπτοκαμπικά, με τοπική εκτροπή κυρίως του κάτω πέλματος προς τα θετικά του άξονα Y, όπως φαίνεται στην λεπτομέρεια της παραμόρφωσης αυτής στην Εικόνα 5-16. Γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκε το σημείο αυτό του φορέα για να εξαχθεί ο δρόμος ισορροπίας που παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 5-1 και το Σχήμα 5-2 και βοηθάει στην κατανόηση της συμπεριφοράς του φορέα.



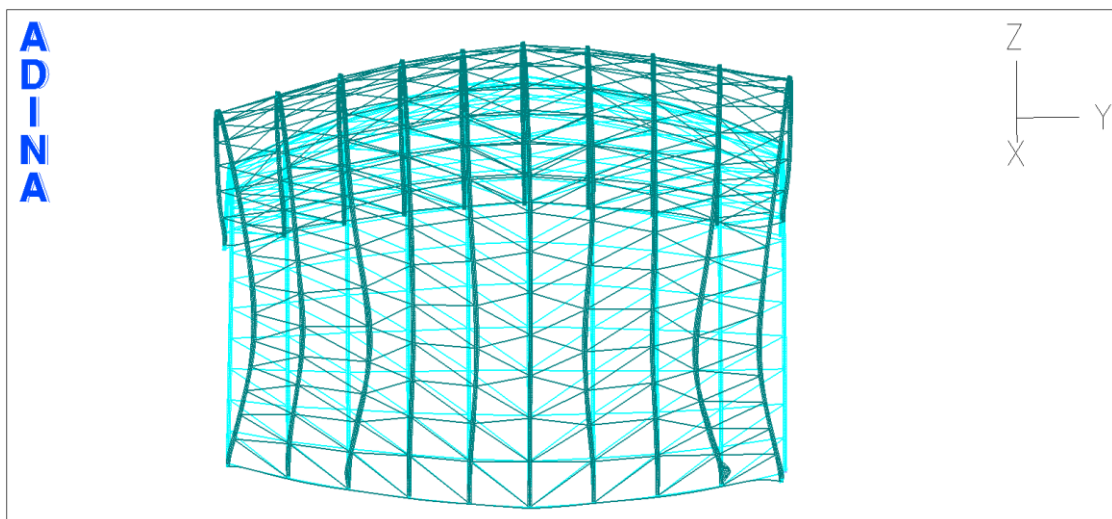
Εικόνα 5-12: Παραμορφωμένος φορέας, Βορειοανατολική όψη



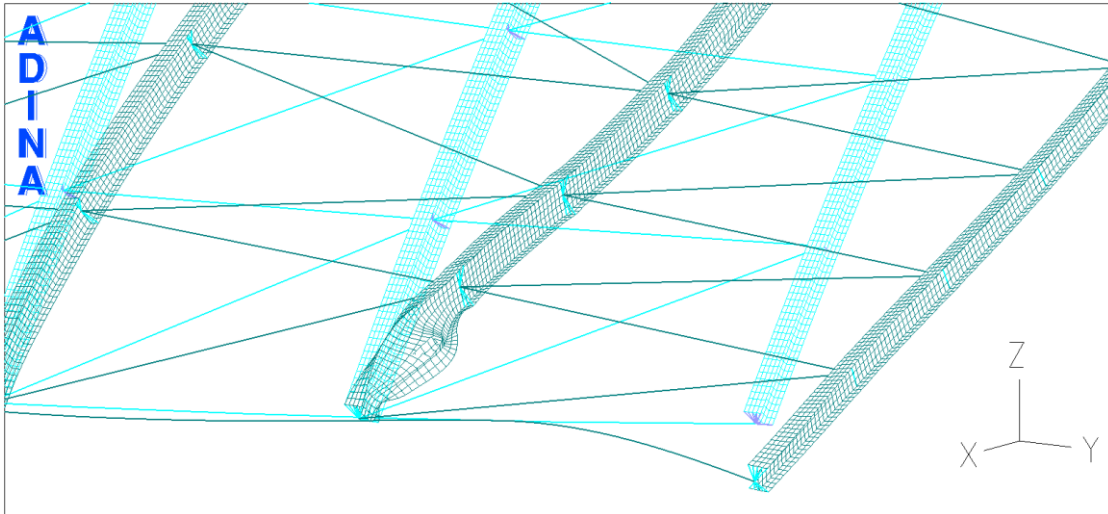
Εικόνα 5-13: Παραμορφωμένος Φορέας, Βόρεια όψη



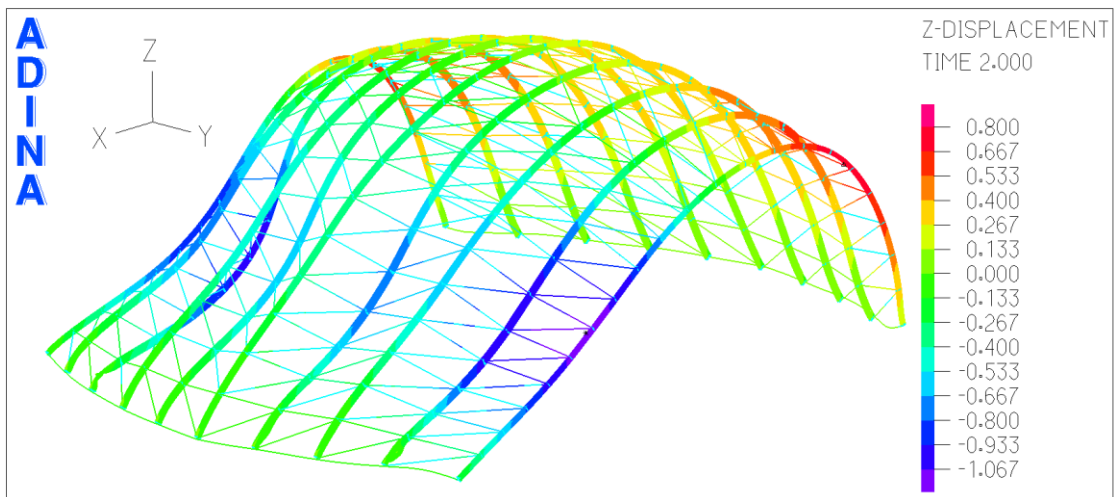
Εικόνα 5-14: Παραμορφωμένος Φορέας, Νότια όψη



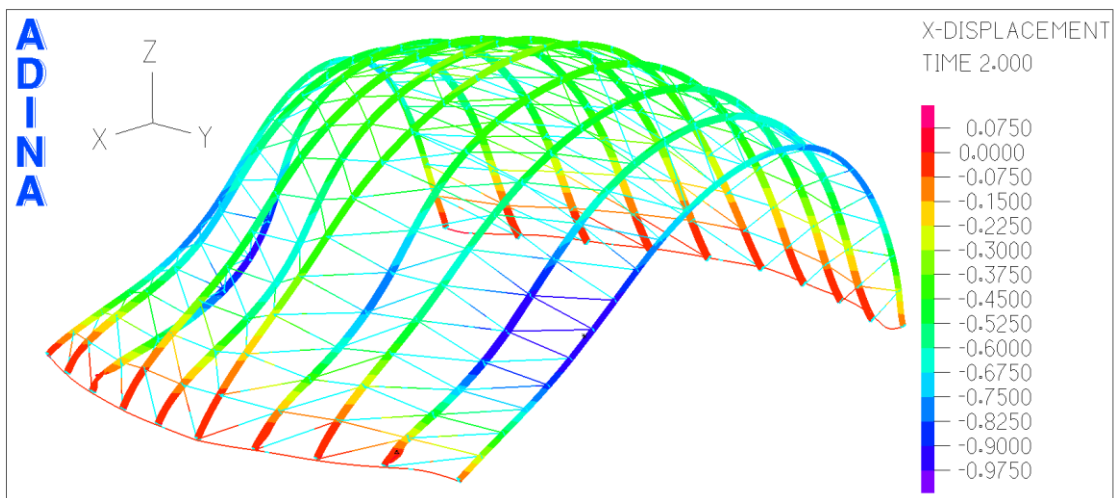
Εικόνα 5-15: Παραμορφωμένος Φορέας, Ανατολική όψη



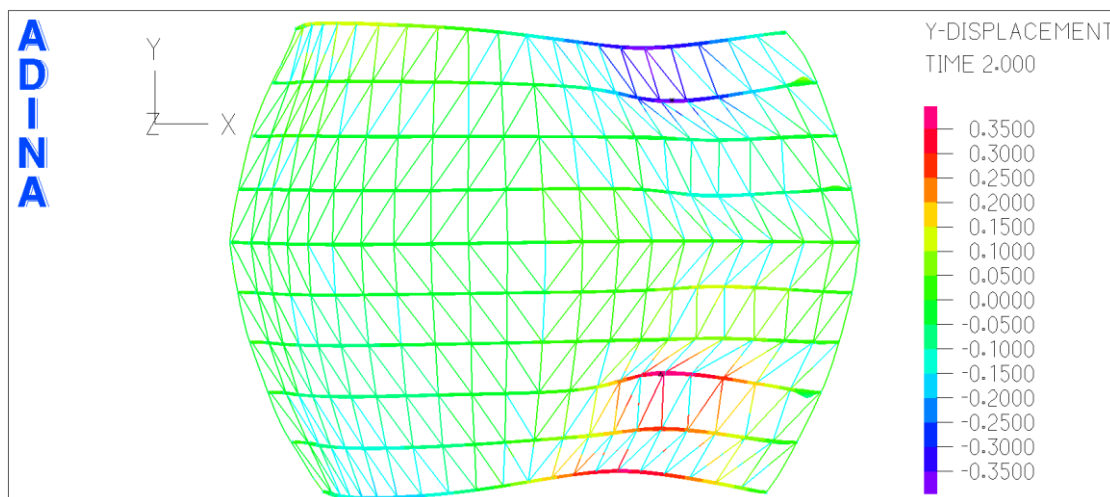
Εικόνα 5-16: Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα, ανατολική βάση 9^{ου} τόξου.



(α)



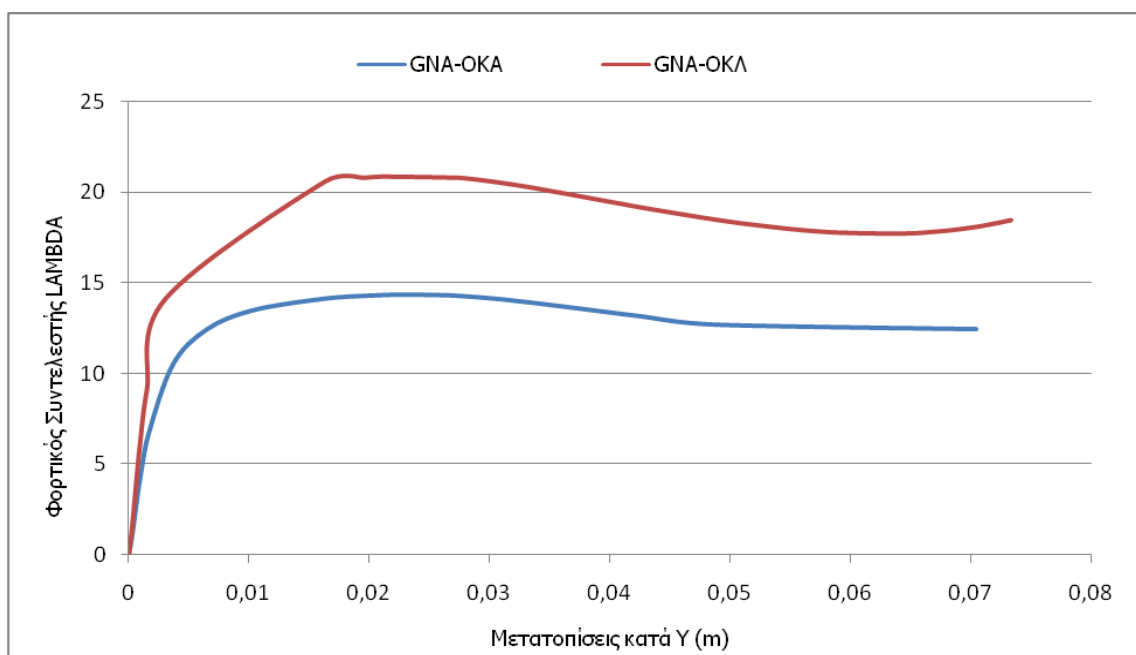
(β)

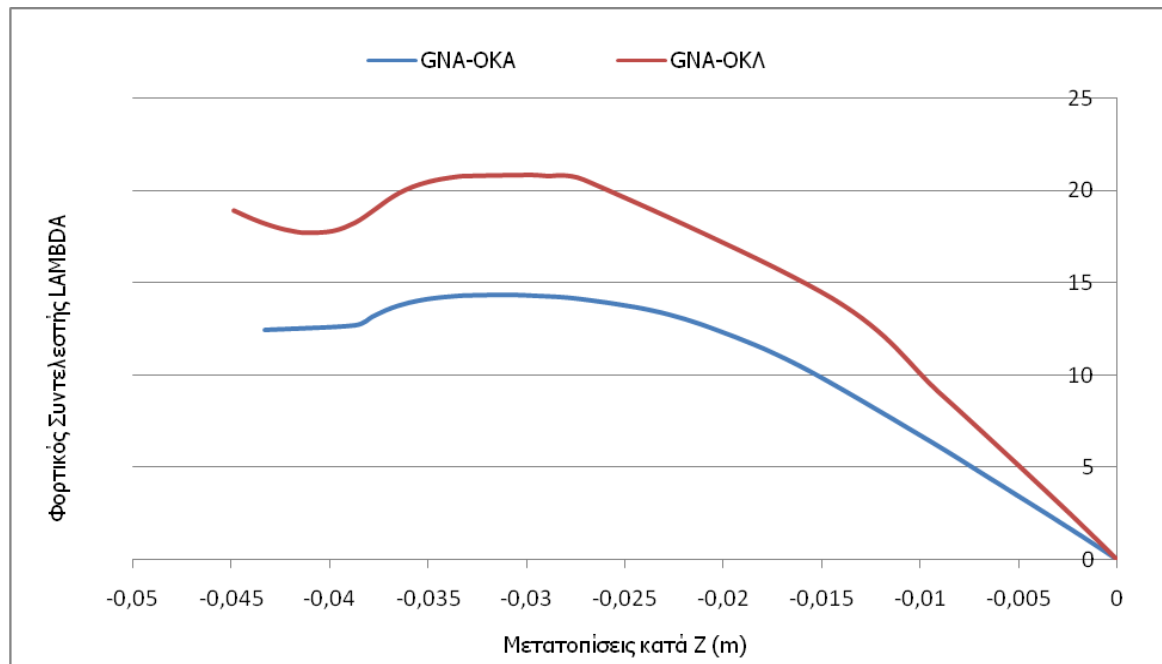


(γ)

Εικόνα 5-17: Μετατοπίσεις κατά τον άξονα Z (α), τον άξονα X (β) και τον άξονα Y (γ)

Οι δρόμοι ισορροπίας που παρουσιάζονται, είναι για το σημείο στην ανατολική βάση του 9^{ου} τόξου του φορέα, όπου παρατηρείται λυγισμός στον παραμορφωμένο φορέα. Οι μετακινήσεις είναι κατά τους άξονες Z και Y και για συνδυασμό φορτίσεων σύμφωνα με την Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας και Οριακή Κατάσταση Αστοχίας. Για τις περιπτώσεις φόρτισης ΟΚΛ και προς τον άξονα Y αλλά και τον Z οι δρόμοι ισορροπίας φαίνεται να έχουν εμφανές σημείο διακλάδωσης μεταξύ ανοδικού και καθοδικού κλάδου το οποίο εμφανίζεται για φορτικό συντελεστή $\lambda=20,8$. Στην περίπτωση φόρτισης ΟΚΑ οι δρόμοι ισορροπίας είναι πιο ομαλοί, χωρίς εμφανές σημείο διακλάδωσης αλλά με μέγιστο συντελεστή φόρτισης $\lambda=14,37$. Άρα, όπως θα εξηγηθεί και αναλυτικά παρακάτω στα συμπεράσματα του κεφαλαίου, από τα διαγράμματα αυτά, αλλά και για άλλα σημεία του φορέα τα οποία όμως δεν παρουσιάζονται για λόγους συντομίας, παρατηρείται αρκετά μεγαλύτερη αντοχή του φορέα αυτού απέναντι σε αστοχία λόγω μη γραμμικότητας γεωμετρίας, σε αντίθεση με την περίπτωση που τα τόξα προσομοιάζονται με ραβδωτά στοιχεία δοκού.

Σχήμα 5-1: Δρόμος Ισορροπίας, μετατοπίσεις κατά Y, ανατολική βάση του 9^{ου} τόξου

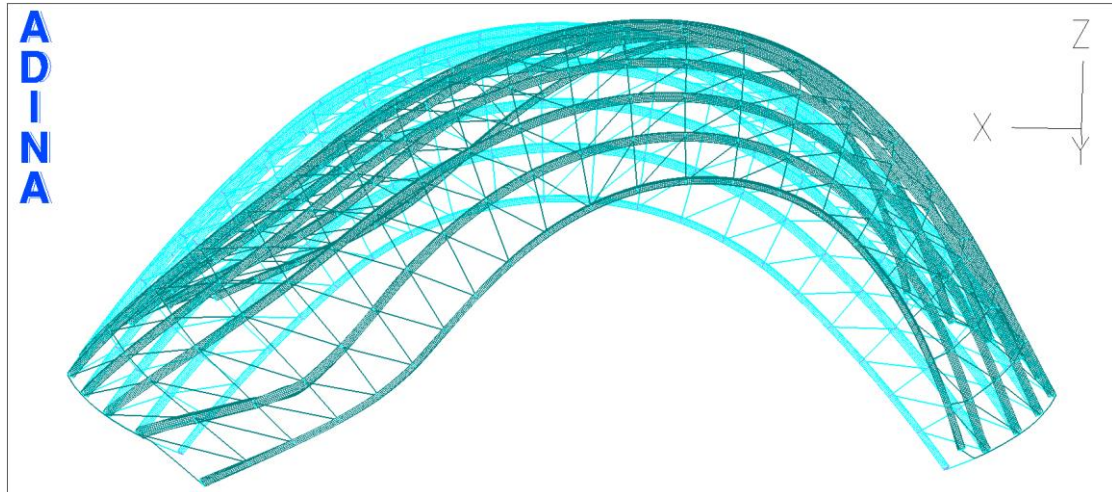


Σχήμα 5-2: Δρόμος Ισορροπίας, μετατοπίσεις κατά Z, ανατολική βάση του 9^{ου} τόξου

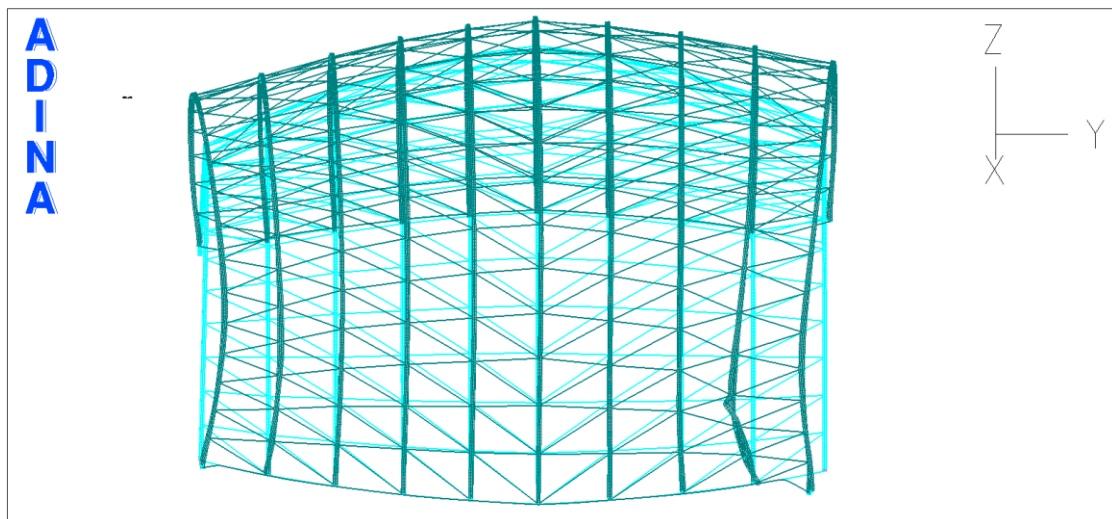
5.3.3 Μη γραμμική ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού (GMNA)

Για την ανάλυση αυτή, χρησιμοποιήθηκε πλαστικό διγραμμικό υλικό με κράτυνση, χάλυβας ποιότητας S355, ενώ θεωρούνται και μεγάλες μετακινήσεις (kinematics-large displacements). Η ανάλυση αυτή έγινε με τη μέθοδο arc-length του λογισμικού ADINA, ενώ εξετάστηκαν και οι δύο συνδυασμοί φορτίσεων, για Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας και Αστοχίας. Η παραμόρφωση του φορέα εκφράζεται με κατεύθυνση όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις αναλύσεων και προσομοιώσεων, δηλαδή προς τα δυτικά καθώς και προς τα αρνητικά του άξονα Z από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν πίεση και τα θετικά του άξονα Z από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν αναρρόφηση, όπως και φαίνεται στην Εικόνα 5-18 και Εικόνα 5-19. Στην Εικόνα 5-20 όπου παρουσιάζεται μια λεπτομέρεια της ανατολικής βάσης του 9^{ου} τόξου, παρατηρείται να έχει αστοχήσει το τόξο λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, όχι όμως στο ίδιο σημείο με την GNA, όπου είχε παρατηρηθεί λυγισμός στη στήριξη του τόξου. Οι μεγαλύτερες μετατοπίσεις εμφανίζονται στο 9^ο και 10^ο τόξο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-21, όπου παρουσιάζονται οι μετακινήσεις του φορέα προς τους τρεις άξονες για το οριακό φορτίο, ενώ οι μετατοπίσεις στα άλλα τόξα είναι αρκετά μικρότερες.

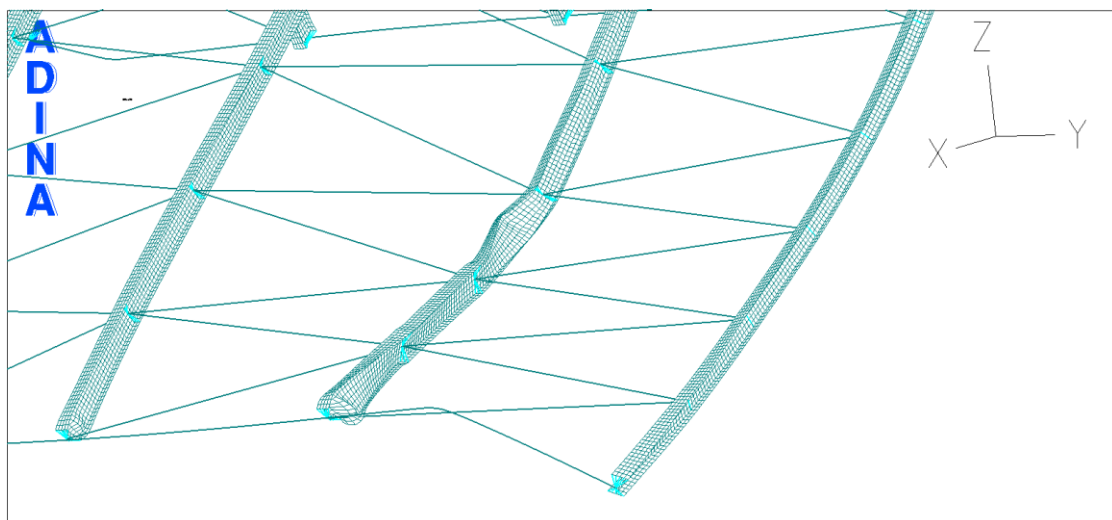
Ένα από τα πλεονεκτήματα χρήσης επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων σε σχέση με τα ραβδωτά στοιχεία δοκού, είναι ότι μπορούν να φανούν και να παρουσιαστούν πάνω στο φορέα, οι τάσεις που αναπτύσσονται για κάθε φάση της φόρτισης αλλά και να φανούν τα σημεία στα οποία το υλικό έχει πλαστικοποιηθεί. Γι' αυτό το λόγο παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω, με τη βοήθεια εικόνων, ο τρόπος με τον οποίο έχουν αστοχήσει τα διάφορα σημεία του φορέα, οι τάσεις στα σημεία αυτά και οι αντίστοιχοι φορτικοί συντελεστές για τους οποίους αυτά τα φαινόμενα παρατηρούνται. Από τα στοιχεία αυτά επιλέγονται και σημεία για τα οποία και εξάγονται δρόμοι ισορροπίας. Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό επίσης ότι οι αναλύσεις με μη γραμμικό υλικό, σταματάνε τη στιγμή που οποιοδήποτε στοιχείο φτάσει τη μέγιστη δυνατή παραμόρφωση υλικού ($\epsilon=22\%$), κάτι που δεν συμβαίνει στις αναλύσεις όπου χρησιμοποιούνται στοιχεία δοκού, εξού και οι μικρότερες μετακινήσεις σε αυτή την περίπτωση.



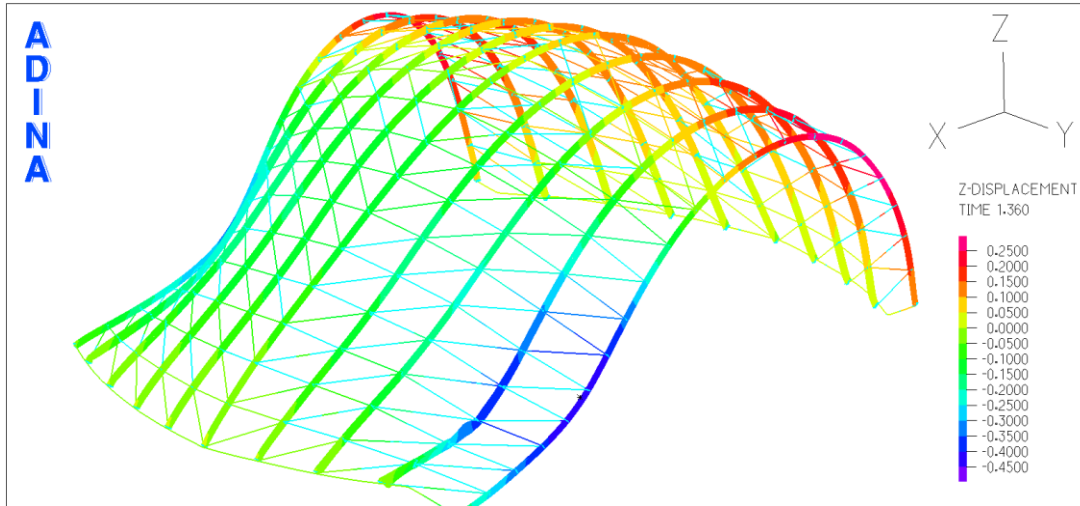
Εικόνα 5-18: Παραμορφωμένος φορέας, Βόρεια όψη



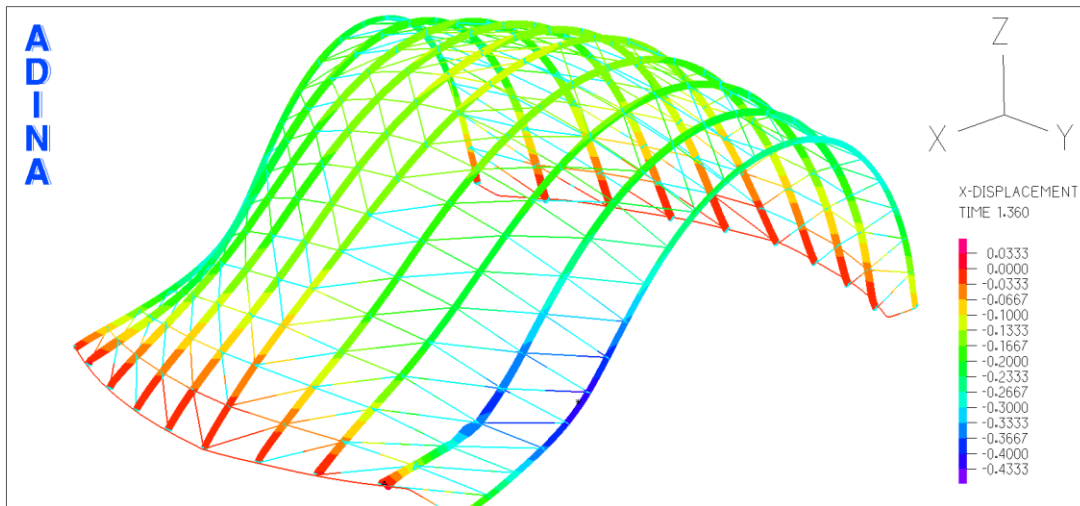
Εικόνα 5-19: Παραμορφωμένος φορέας, Ανατολική όψη



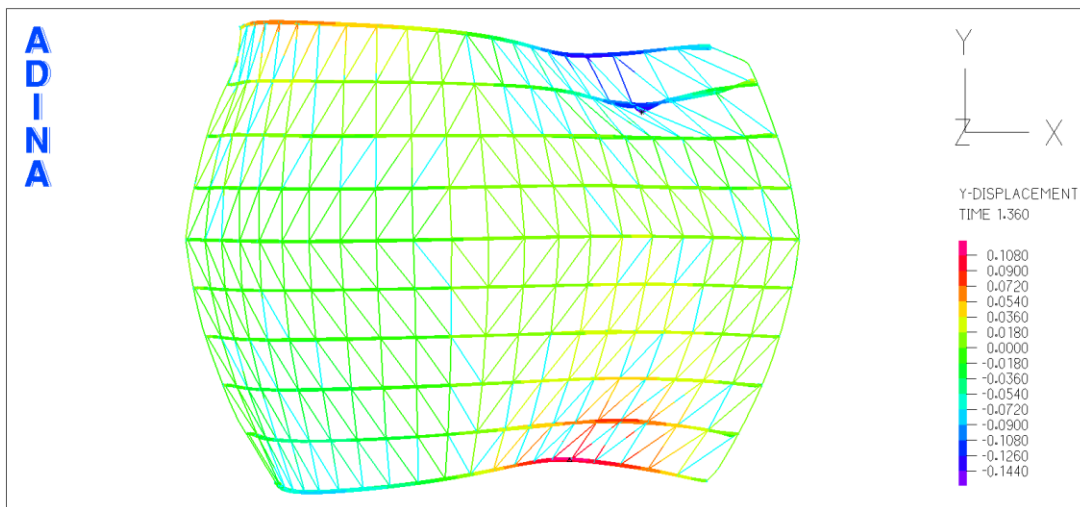
Εικόνα 5-20: Λεπτομέρεια παραμορφωμένου φορέα



(α)



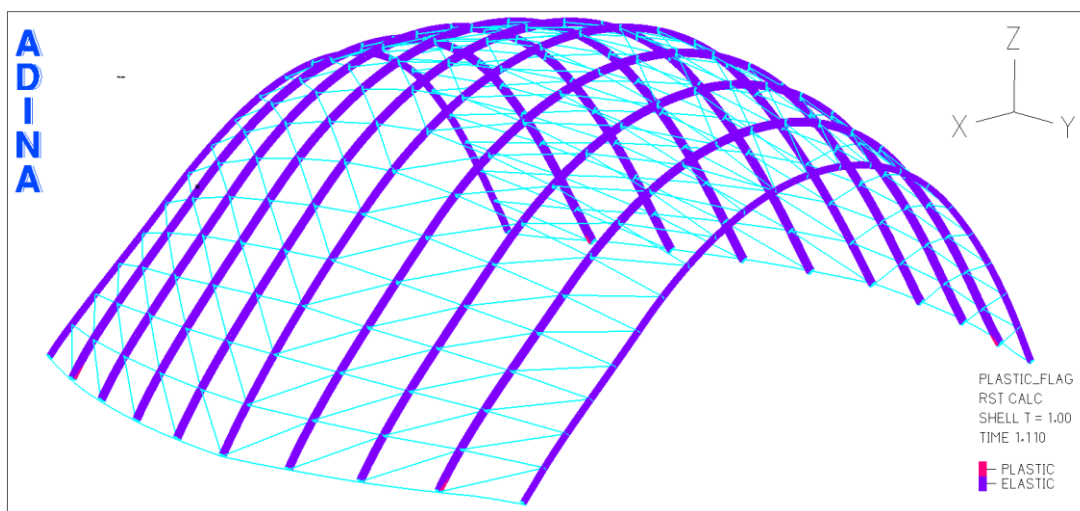
(β)



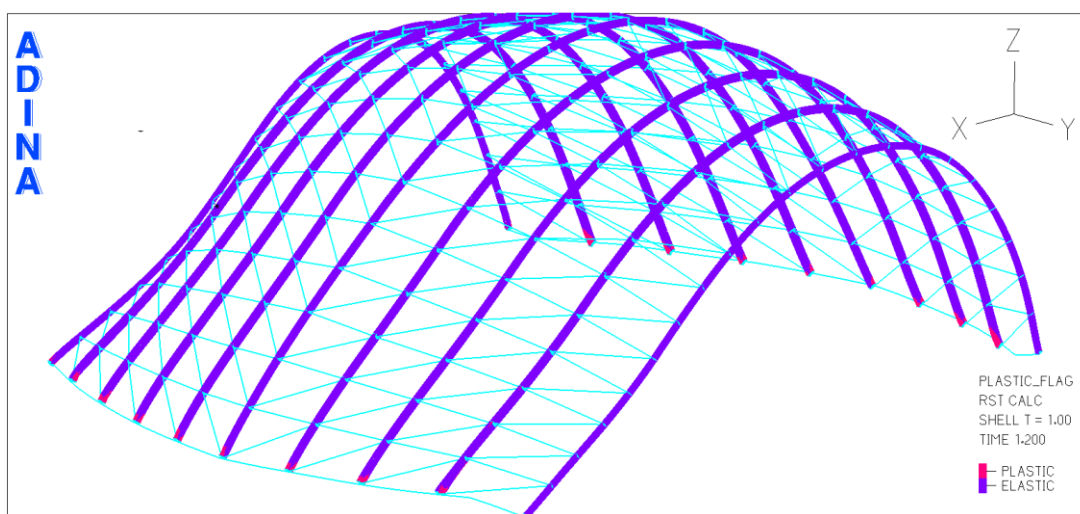
(γ)

Εικόνα 5-21: Μετατοπίσεις κατά τον άξονα Z (α), τον άξονα X (β) και τον άξονα Y (γ)

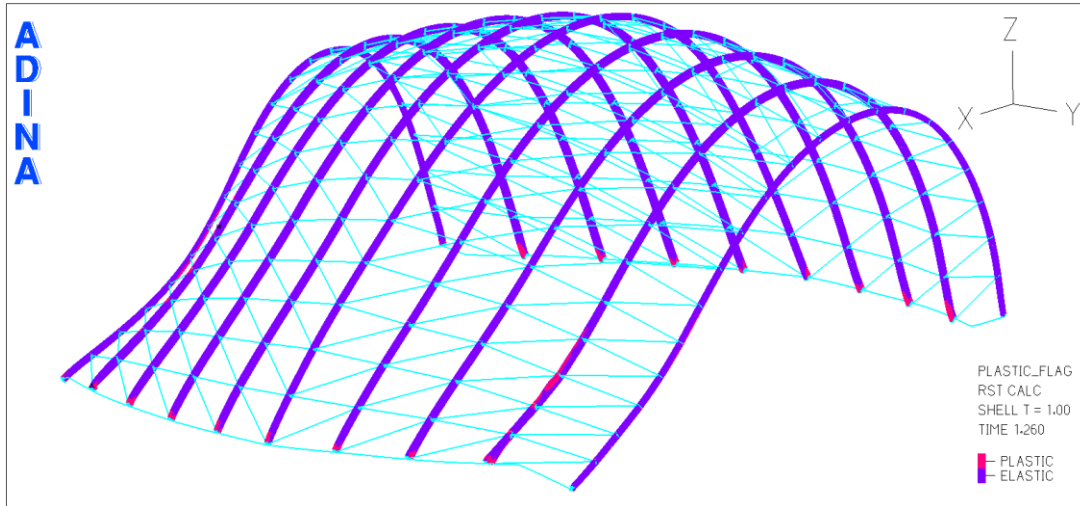
Στην Εικόνα 5-22 παρουσιάζεται σταδιακά η συμπεριφορά του φορέα, δείχνοντας, με ροζ χρώμα, για ποιο φορτικό συντελεστή πλαστικοποιείται το υλικό σε διάφορα σημεία. Για $\lambda=2,055$ για την ΟΚΛ και $\lambda=1,48$ για την ΟΚΑ αρχίζουν να παρουσιάζονται οι πρώτες διαρροές του υλικού καθώς, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5-22(α), έχει πλαστικοποιηθεί μέρος του κάτω πέλματος αρχικά στην ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου και στη συνέχεια και στην απέναντι στήριξη του 9^{ου} τόξου, αλλά και στις στηρίξεις του 2^{ου} τόξου. Καθώς αυξάνεται η φόρτιση, η διαρροή του υλικού εξαπλώνεται σε ολόκληρη τη διατομή στις προαναφερθείσες στηρίξεις καθώς και στις στηρίξεις των υπόλοιπων τόξων (Εικόνα 5-22(β)). Στην Εικόνα 5-22(γ) και για φορτικό συντελεστή $\lambda=4,09$ στην ΟΚΛ και $\lambda=2,72$ στην ΟΚΑ φαίνεται να έχουν πλαστικοποιηθεί οι διατομές σε όλες τις στηρίξεις των τόξων, ενώ αρχίζει να παρουσιάζεται διαρροή αρχικά στο άνω πέλμα του 2^{ου} τόξου και στη συνέχεια στο άνω πέλμα του 9^{ου} τόξου και στα κάτω πέλματα του 1^{ου} και 10^{ου}, από τη μεριά του θόλου στην οποία τα φορτία του ανέμου ασκούν πίεση. Τέλος στην Εικόνα 5-22(δ) φαίνεται να έχει διαρρεύσει τελείως το 9^ο τόξο λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού και το υλικό να έχει πλαστικοποιηθεί σε ολόκληρη την αντίστοιχη διατομή, κάτι που συμβαίνει για φορτικό συντελεστή $\lambda=4,62$ στην ΟΚΛ και $\lambda=3,14$ στην ΟΚΑ.



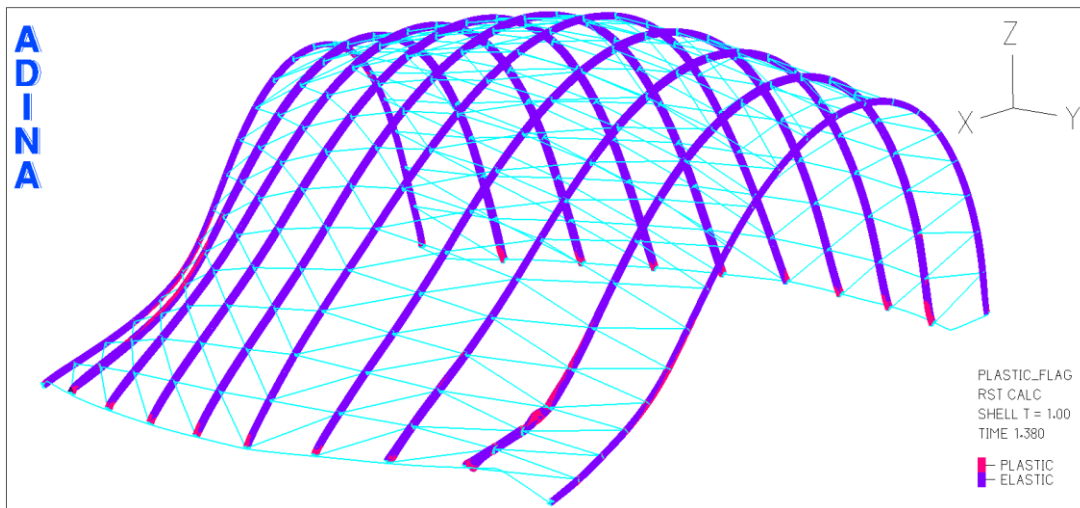
(α)



(β)

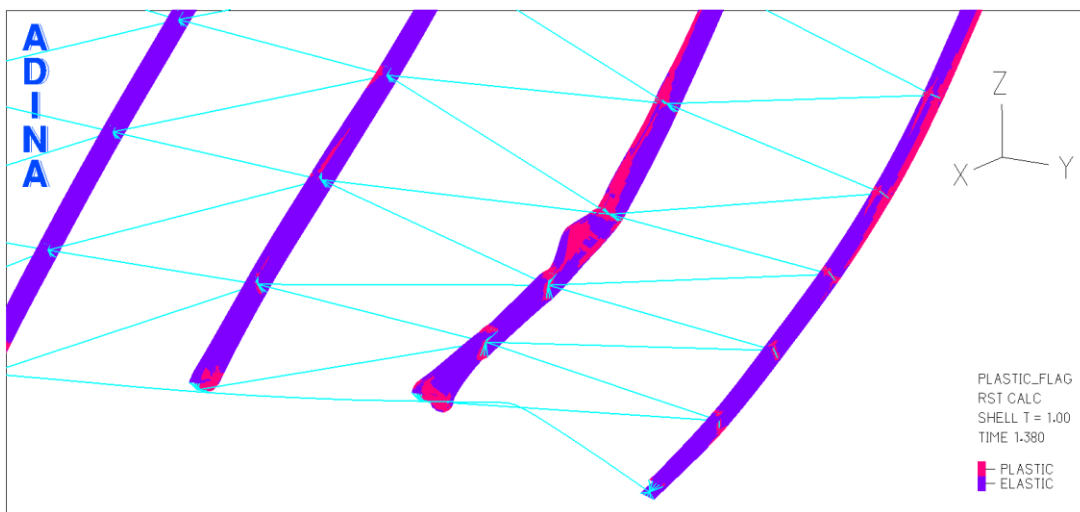


(γ)



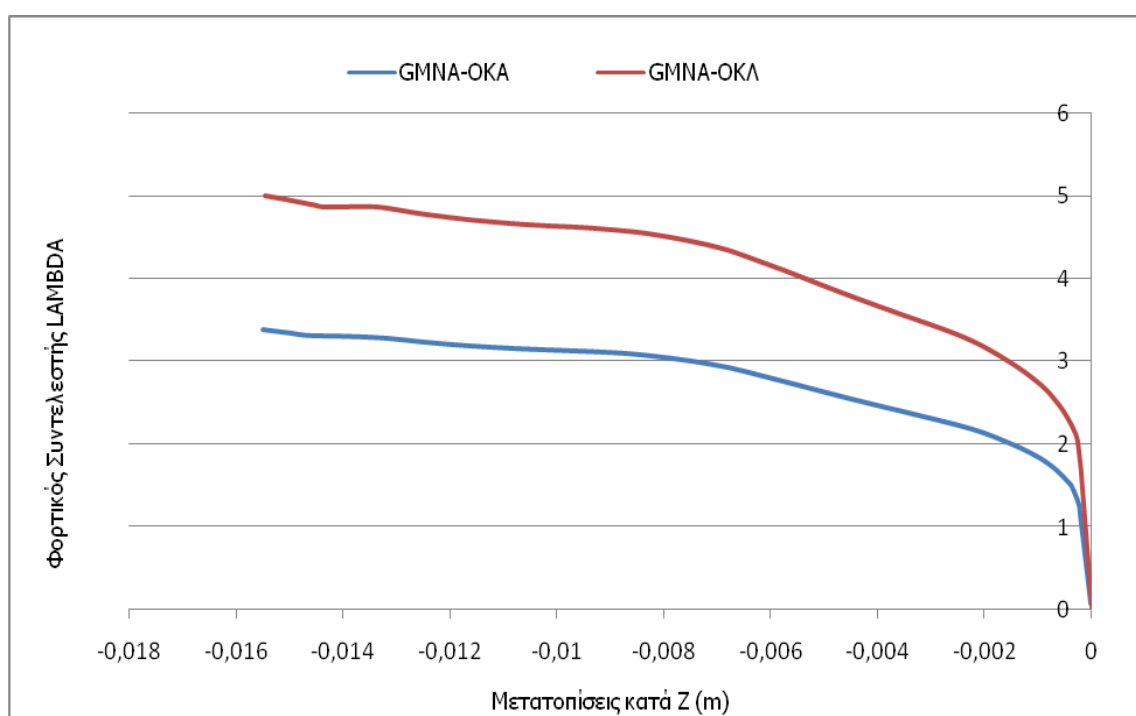
(δ)

Εικόνα 5-22: Σταδιακή πλαστικοποίηση υλικού στο φορέα, Βορειοανατολική όψη

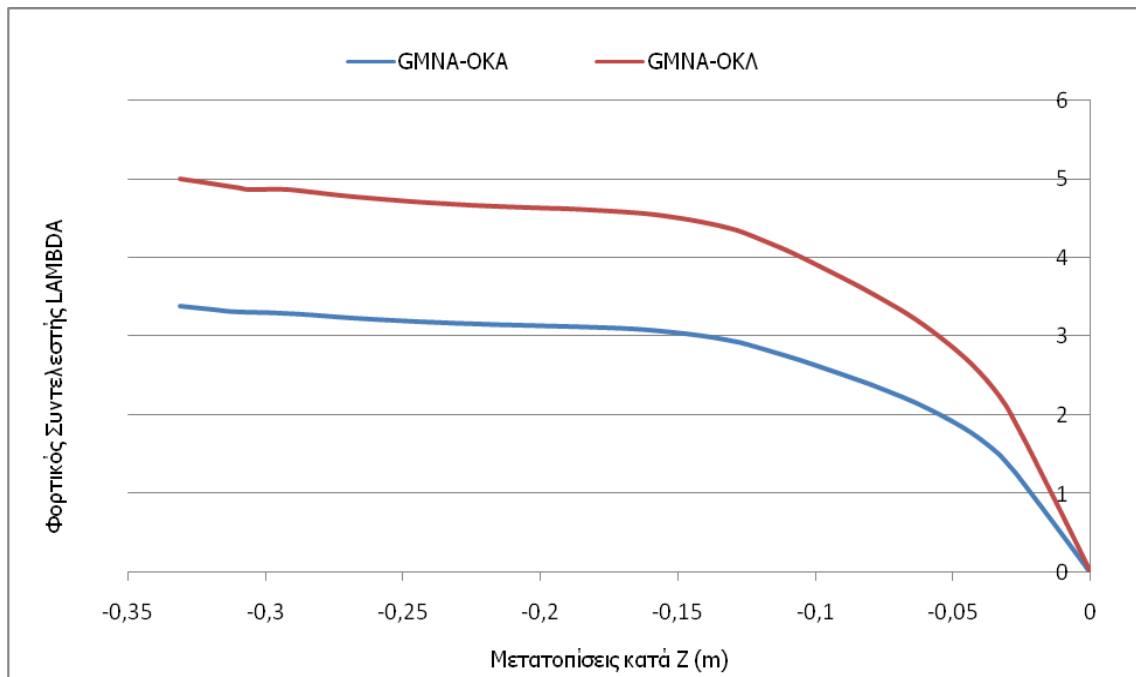


Εικόνα 5-23: Λεπτομέρεια αστοχίας, ανατολική βάση 9^{ου} τόξου

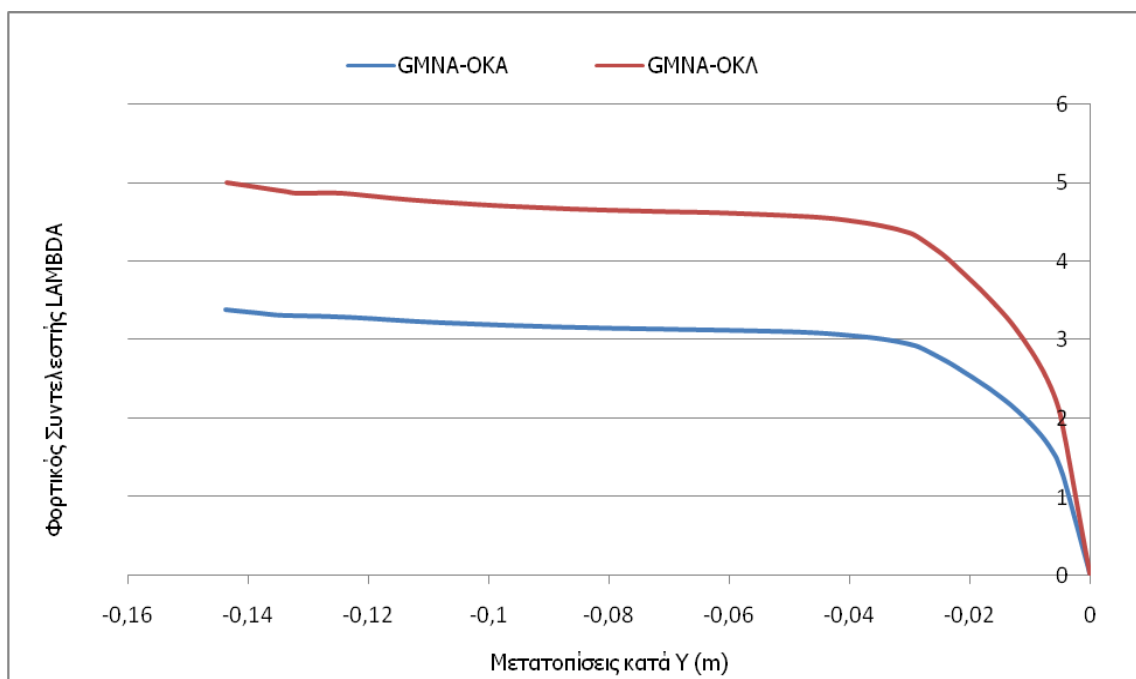
Σύμφωνα με τις παραπάνω εικόνες είδαμε ότι σημείο του φορέα που διαρρέει πρώτα, είναι η ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου. Έτσι επιλέχθηκε να εξαχθεί ο δρόμος ισορροπίας του σημείου αυτού για μετακινήσεις κατά τον άξονα Z, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-3. Στον δρόμο ισορροπίας παρατηρείται η συμπεριφορά του σημείου αυτού, καθώς αυξάνεται ο φορτικός συντελεστής. Τα διαγράμματα για την περίπτωση της ΟΚΛ και ΟΚΑ είναι παρόμοια, και εμφανίζουν γραμμικότητα με σταθερή δυσκαμψία μέχρι το φορτικό συντελεστή $\lambda=2,055$ και $\lambda=1,48$ αντίστοιχα, όπου και εμφανίζεται η διαρροή. Στη συνέχεια παρατηρείται μέσω σημείου διακλάδωσης ανοδικός μετελαστικός κλάδος. Στο φορέα, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, καθώς αυξάνεται ο φορτικός συντελεστής, διαρρέουν και οι υπόλοιπες στηρίξεις, ενώ για λίγο μεγαλύτερο φορτίο παρουσιάζεται και στρεπτοκαμπτικός λυγισμός κοντά στη βάση του 9^{ου} τόξου. Κρίθηκε ότι, αυτό το σημείο παρουσιάζει ενδιαφέρον, μιας και είναι το πρώτο εκτός των στηρίξεων το οποίο αστοχεί. Γι' αυτό εξήχθησαν και εδώ δρόμοι ισορροπίας, που φαίνονται στο Σχήμα 5-4, για μετατοπίσεις κατά τον άξονα Z και στο Σχήμα 5-5, για μετατοπίσεις κατά τον άξονα Y. Παρατηρείται στους δρόμους ισορροπίας αυτούς, ότι η δυσκαμψία παραμένει σταθερή και ο δρόμος γραμμικός μέχρι ο φορτικός συντελεστής να φτάσει τη τιμή όπου παρατηρείται και η πρώτη διαρροή της στήριξης, δηλαδή $\lambda=2,055$ για ΟΚΛ και $\lambda=1,48$ για ΟΚΑ. Στο σημείο αυτό παρατηρείται μικρή μείωση της δυσκαμψίας, ενώ για $\lambda=4,32$ για ΟΚΛ και $\lambda=2,89$ για ΟΚΑ φαίνεται να παρατηρείται αρκετά μεγαλύτερη μείωση της δυσκαμψίας, η οποία ακολουθείται από ανοδικό δευτερεύοντα κλάδο. Σύμφωνα με τα παραπάνω, αλλά και τους άλλους δρόμους ισορροπίας που εξήχθησαν, που όμως για λόγους συντομίας δεν παρουσιάζονται, γίνεται κατανοητό ότι ο φορέας σε όλα τα σημεία που αστοχούν παρουσιάζει μετελαστική αντοχή. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη κράτυνση την οποία παρουσιάζει το υλικό που χρησιμοποιήθηκε, αλλά και στην ανακατανομή τάσεων που συμβαίνει λόγω της υπερστατικότητας του.



Σχήμα 5-3: Δρόμος ισορροπίας, μετατοπίσεις κατά τον άξονα Z, ανατολική στήριξη 9^{ου} τόξου



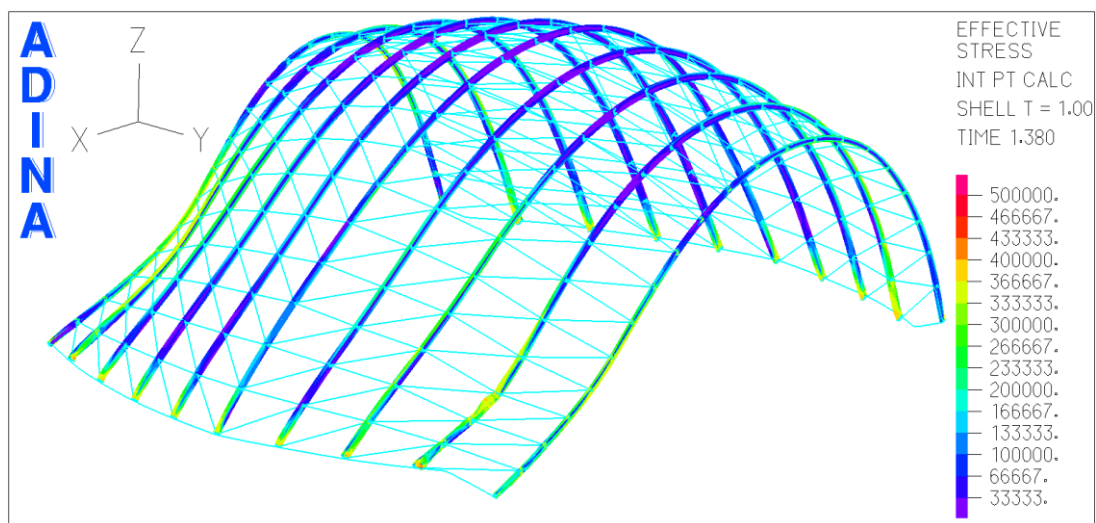
Σχήμα 5-4: Δρόμος ισορροπίας, μετατοπίσεις κατά τον άξονα Z, σημείο αστοχίας 9^{ου} τόξου



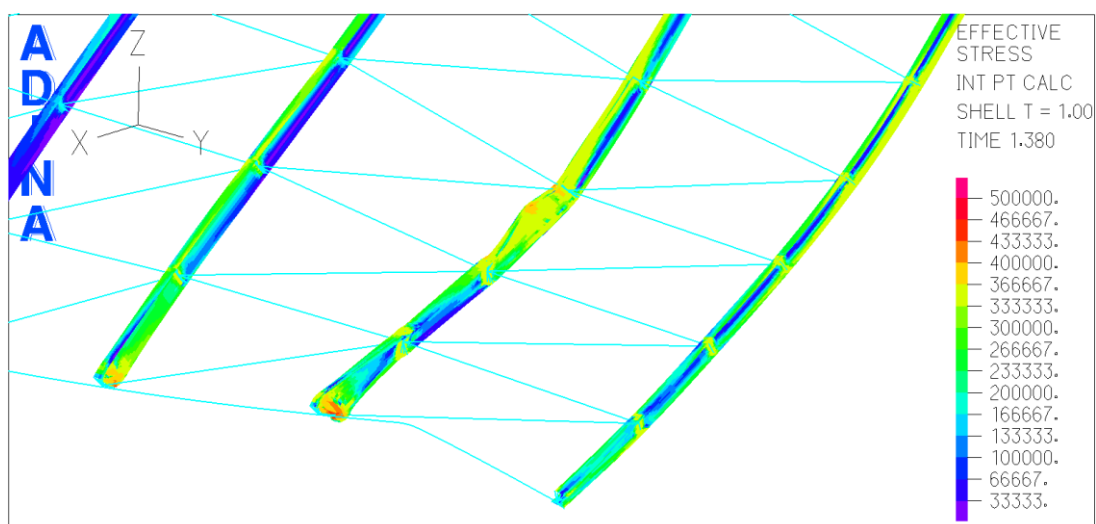
Σχήμα 5-5: Δρόμος ισορροπίας, μετατοπίσεις κατά τον άξονα Y, σημείο αστοχίας 9^{ου} τόξου

Παρακάτω, στην Εικόνα 5-24 παρουσιάζονται οι τάσεις που αναπτύσσονται σε ολόκληρο το φορέα και φαίνεται ποια σημεία δέχονται τις μεγαλύτερες τάσεις. Αυτά είναι οι στηρίξεις του φορέα, αλλά το σημείο του 9^{ου} τόξου που διαρρέει στρεπτοκαμπτικά, καθώς και κάποια σημεία του 1^{ου}, 2^{ου} και 10^{ου} τόξου. Παρατηρείται ότι, όπως ήταν αναμενόμενο, τα σημεία που έχουν ξεπεράσει την τάση διαρροής του υλικού, η οποία είναι 355 MPa, συμπίπτουν με τα σημεία που φαίνονται στην Εικόνα 5-22, στα οποία παρατηρείται η πλαστικοποίηση του υλικού. Στην Εικόνα 5-25 φαίνεται λεπτομερώς η ανατολική βάση του 9^{ου} τόξου και το σημείο που παρατηρείται ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός. Στο σημείο αυτό φαίνεται το πάνω πέλμα του διπλού ταυ το οποίο εκτρέπεται εκτός επιπέδου του τόξου, να έχει

συγκεντρώνει τις μεγαλύτερες τάσεις, ενώ μικρότερες τάσεις εμφανίζονται στην υπόλοιπη διατομή, η οποία έχει όμως επίσης διαρρεύσει. Οι μεγαλύτερες τάσεις σε ολόκληρο το φορέα που φτάνουν την τιμή 510MPa παρουσιάζονται στην ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου.



Εικόνα 5-24: Αναπτυσσόμενες τάσεις στο φορέα, Βορειοανατολική όψη

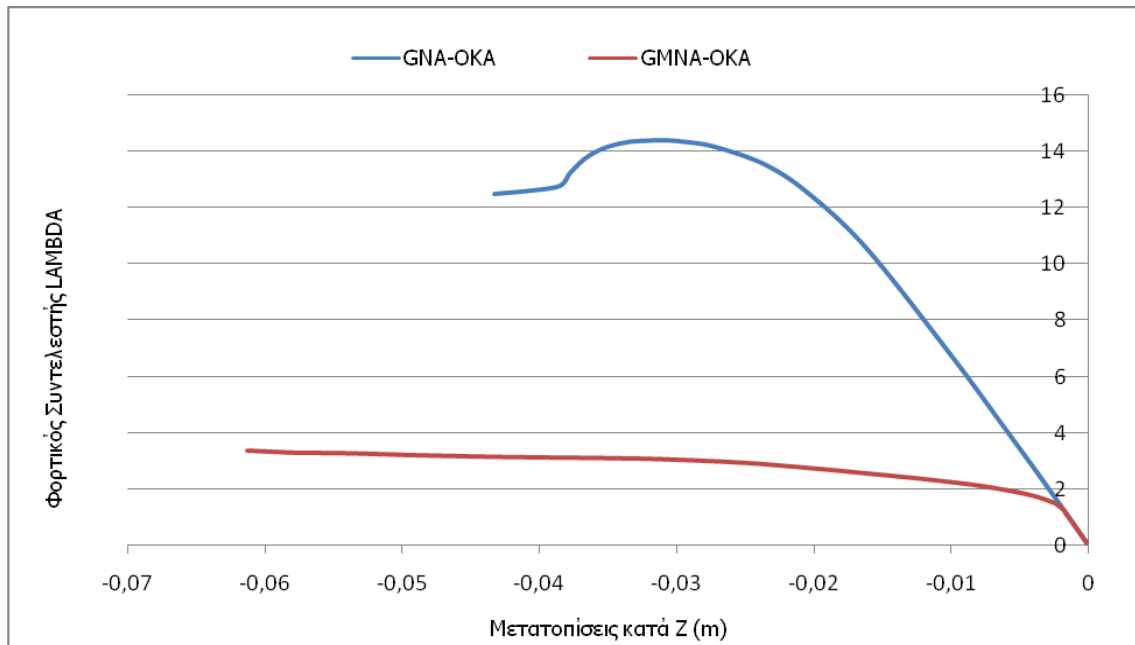


Εικόνα 5-25: Λεπτομέρεια ανατολικής βάσης 9^{ου} τόξου, αναπτυσσόμενες τάσεις

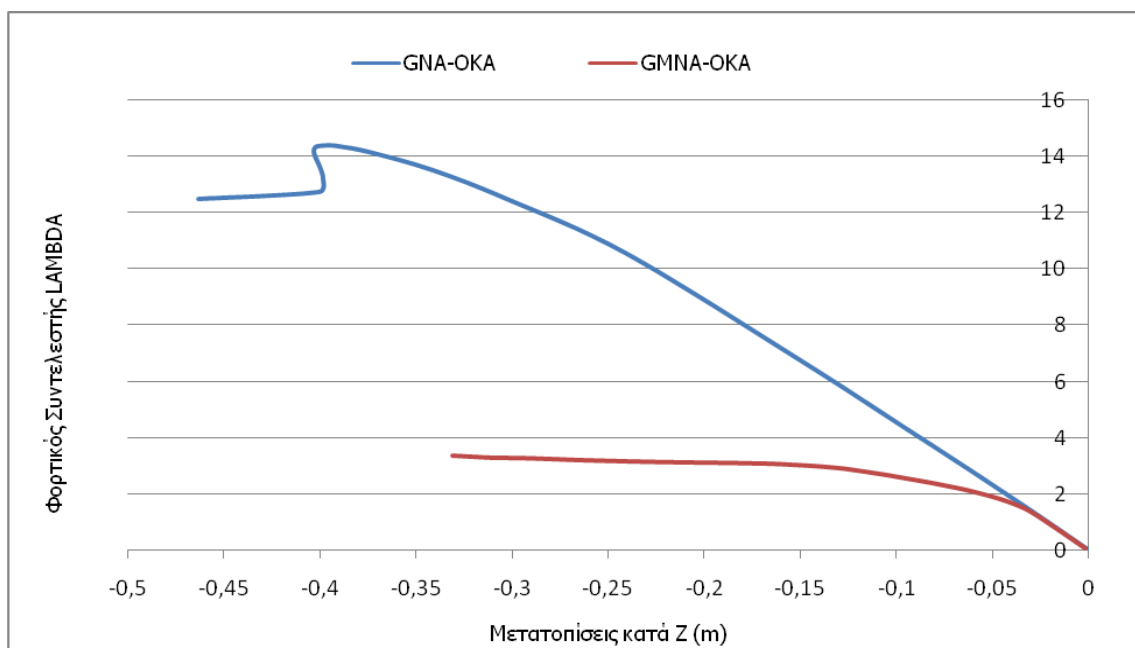
5.3.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων των αναλύσεων GNA και GMNA

Σε αυτό το κομμάτι, γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τις αναλύσεις GNA και GMNA, ώστε να γίνει αντιληπτό αν η μη γραμμικότητα γεωμετρίας ή υλικού συμβάλει περισσότερο στην αστοχία του φορέα. Μιας και όπως φάνηκε από τα παραπάνω αποτελέσματα, η μορφή των διαγραμμάτων είναι σχεδόν ίδια για τις περιπτώσεις φόρτισης Οριακής Κατάστασης Αστοχίας και Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας, η σύγκριση μεταξύ GNA και GMNA θα γίνει μόνο για τους συνδυασμούς φόρτισης ΟΚΑ. Παρατηρείται γενικά ότι η μορφή αστοχίας για μη γραμμικότητα γεωμετρίας είναι διαφορετική από αυτή για μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας. Στην GNA παρουσιάζεται στρεπτοκαμπτικός λυγισμός με εκτροπή του κάτω πέλματος στο 9^ο τόξο κοντά στη ανατολική στήριξη, ενώ στην GMNA ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός παρουσιάζεται, σε άλλο σημείο του 9^{ου} τόξου λιγότερο κοντά στη στήριξη. Στη GMNA επίσης παρατηρείται να έχουν αστοχήσει και οι διατομές των στηριξέων. Έτσι επιλέγεται να συγκριθούν τα αποτελέσματα των δύο αναλύσεων μέσω

διαγραμμάτων δρόμων ισορροπίας, ένας για το σημείο της στήριξης, και ένας για το σημείο του 9^{ου} τόξου που παρουσιάζει στρεπτοκαμπτικό λυγισμό στη GMNA. Στο Σχήμα 5-6 συγκρίνονται οι δρόμοι ισορροπίας για την ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου, όπου παρατηρείται ότι είναι εμφανώς κρίσιμη η μη γραμμικότητα υλικού και ότι η πλαστικοποίηση του υλικού επιτρέπει μεγαλύτερες μετακινήσεις στο σημείο αυτό για τη περίπτωση της GMNA. Στο Σχήμα 5-7 συγκρίνονται οι δρόμοι ισορροπίας για το σημείο του 9^{ου} τόξου όπου στη GMNA εμφανίζεται ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός. Και σε αυτή τη περίπτωση επιβεβαιώνεται ότι η αστοχία του θόλου οφείλεται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό στη μη γραμμικότητα υλικού.



Σχήμα 5-6: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GNA και GMNA για ανατολική στήριξη 9^{ου} τόξου

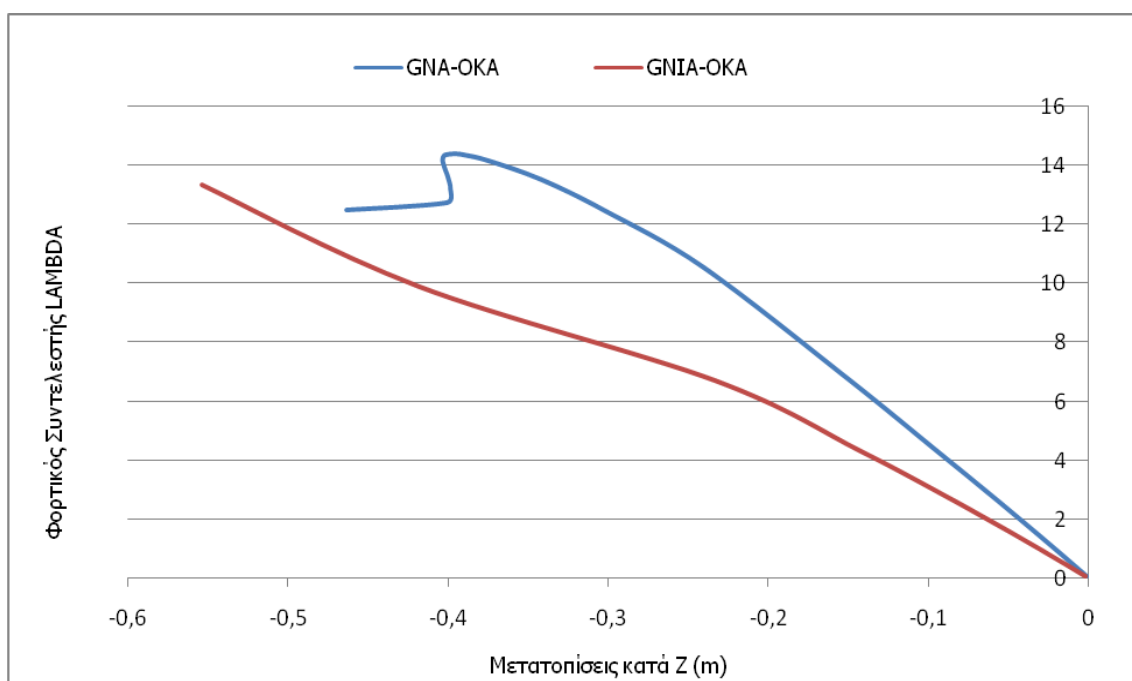


Σχήμα 5-7: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GNA και GMNA για το σημείο του 9^{ου} τόξου που εμφανίζει στρεπτοκαμπτικό λυγισμό στην GMNA

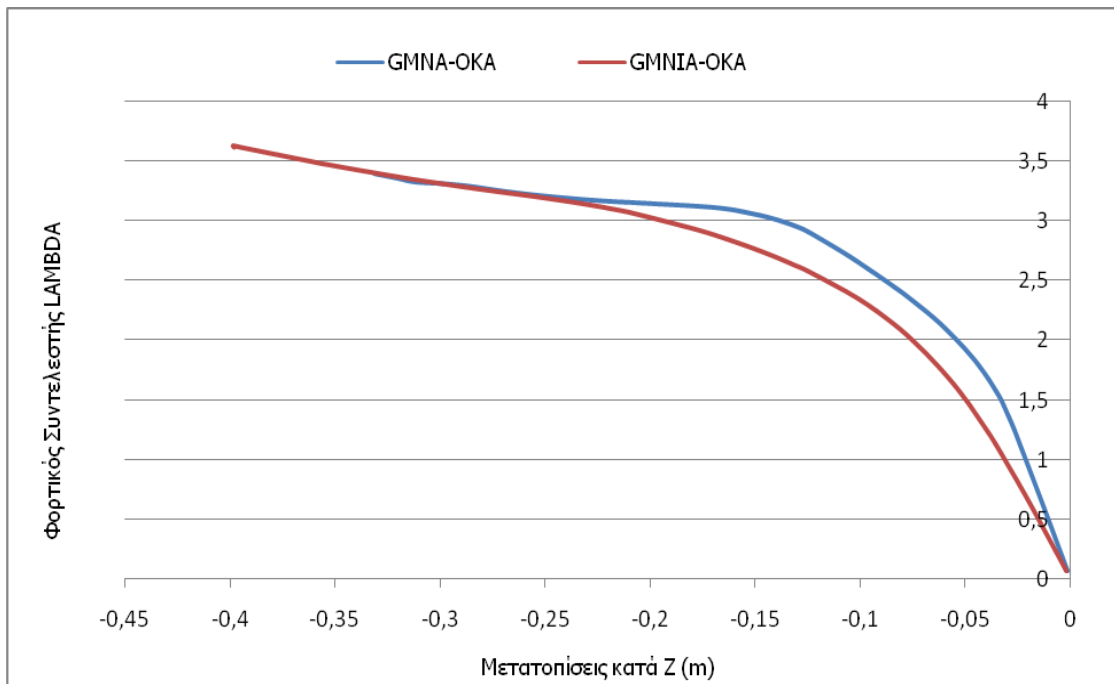
5.3.4 Επιρροή αρχικών ατελειών στην συμπεριφορά των τόξων

Όπως έχει εξηγηθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η επίδραση των ατελειών στη μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής εξαρτάται από το είδος του φορέα και τον κυρίαρχο μηχανισμό αστοχίας του. Η ατέλεια που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί είναι με την μορφή απόκλισης από την ιδεατή γεωμετρία, μεγέθους $L/250$ και σχήμα σύμφωνα με την πρώτη ιδιομορφή του φορέα, όπως αυτή υπολογίστηκε κατά την ανάλυση LBA. Έγινε αρχικά ανάλυση μη γραμμικότητας γεωμετρίας με ατέλειες (GNIA) και στη συνέχεια ανάλυση μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού (GMNIA) για Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας και Αστοχίας. Όπως όμως φάνηκε παραπάνω οι δρόμοι ισορροπίας και γενικά η συμπεριφορά του φορέα είναι παρόμοια για τους δύο αυτούς συνδυασμούς φορτίσεων και γι' αυτό το λόγο εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μόνο για την ανάλυση με συνδυασμό ΟΚΑ. Η σύγκριση των αναλύσεων γίνεται με τη βοήθεια των δρόμων ισορροπίας που παρουσιάζονται παρακάτω.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων εξήχθησαν δρόμοι ισορροπίας για το σημείο του 9^{ου} τόξου όπου παρατηρείται ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός στις προηγούμενες αναλύσεις και συγκρίνονται έτσι ώστε να φανεί η πραγματική επιρροή της ατέλειας στη λειτουργία του φορέα. Για την περίπτωση των αναλύσεων GNA και GNIA, παρατηρείται στο Σχήμα 5-8 ότι στην ανάλυση GNIA η αρχική ατέλεια έχει ως συνέπεια την κατάργηση του σημείου διακλάδωσης και του καθοδικού κλάδου, εμφανίζοντας έναν αρκετά πιο γραμμικό δρόμο ισορροπίας που «εγγράφεται» στην γωνία μεταξύ του κυρίου και δευτερεύοντα δρόμου. Παρότι ο λυγισμός στην περίπτωση χρήσης ατέλειας δεν εμφανίζεται πλέον απότομα, παρατηρείται ότι έχει μειωθεί η δυσκαμψία του φορέα. Στις αναλύσεις όπου χρησιμοποιείται και μη γραμμικότητα υλικού (GMNA, GMNIA), η ύπαρξη ατέλειας έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση λίγο μικρότερης δυσκαμψίας, χωρίς όμως να αλλάζει το τελικό οριακό φορτίο, κάτι που φαίνεται στο Σχήμα 5-9.



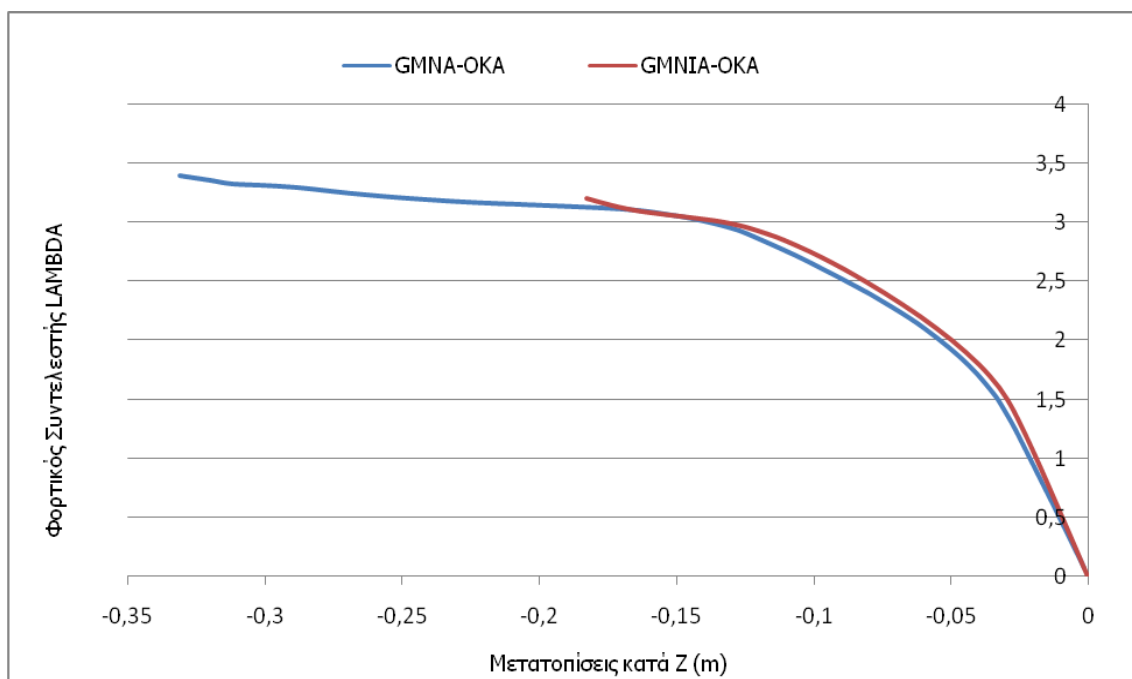
Σχήμα 5-8: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GNA και GNIA (OKA)



Σχήμα 5-9: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GMNA και GMNIA (OKA)

5.3.5 Επιρροή θερμοκρασιακών φορτίων στην συμπεριφορά των τόξων

Για να γίνει κατανοητή η επιρροή των θερμοκρασιακών φορτίων ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία όπως και στην περίπτωση των beam elements. Έγιναν δηλαδή αναλύσεις GMNA, με και χωρίς την άσκηση θερμοκρασιακών φορτίων και εξήχθησαν οι δρόμοι ισορροπίας για το σημείο του 9^{ου} τόξου στο οποίο εμφανίζεται ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός, ώστε να συγκριθούν. Αυτό που παρατηρείται από το Σχήμα 5-10 είναι ότι οι δρόμοι ισορροπίας είναι σχεδόν ταυτόσημοι όσο ο κλάδος είναι ανοδικός. Στο σημείο αυτό ο δρόμος ισορροπίας ο οποίος έχει προκύψει από την ανάλυση με τα θερμοκρασιακά φορτία σταματάει. Αυτό οφείλεται, όπως προαναφέρθηκε, στο γεγονός ότι η ανάλυση αυτή έγινε με την μέθοδο Newton-Raphson και γι' αυτό το λόγο δεν υπάρχει η δυνατότητα να παρουσιαστούν καθοδικοί κλάδοι στους δρόμους ισορροπίας. Δυστυχώς στο μοντέλο με επιφανειακά στοιχεία δεν είναι δυνατό να φανούν οι αξονικές καταπονήσεις που δέχονται τα τόξα, όπως έγινε στην περίπτωση των beam elements, για να συγκριθούν στις δύο περιπτώσεις. Από τους δρόμους ισορροπίας όμως που εξήχθησαν, αλλά και τις αντιδράσεις των στηρίξεων, μπορεί να επιβεβαιωθεί το συμπέρασμα ότι τα τόξα δεν επηρεάζονται από τα θερμοκρασιακά φορτία. Αυτό συμβαίνει, καθώς, όπως έχει εξηγηθεί και στο παραπάνω κεφάλαιο, η γεωμετρία τους επιτρέπει την συστολή και διαστολή τους χωρίς αυτή να παρεμποδίζεται και να καταλήγει σε επιπλέον καταπόνηση τους. Για τα υπόλοιπα μέλη βέβαια η επιρροή της θερμοκρασίας είναι καθοριστική, μιας και παρατηρούμε μεγάλη αύξηση των αξονικών δυνάμεων.



Σχήμα 5-10: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GMNA για σημείο 9ου τόξου με και χωρίς θερμοκρασιακά φορτία

5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΔΟΚΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Σε αυτό το μέρος του κεφαλαίου γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν παραπάνω για το μοντέλο που κάνει χρήση επιφανειακών στοιχείων για την προσομοίωση των τόξων, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το προηγούμενο κεφάλαιο όπου η προσομοίωση των τόξων έγινε με πεπερασμένα στοιχεία δοκού. Θα συγκριθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις αναλύσεις LBA, GNA, και GMNA με τη βοήθεια συγκρίσεων δρόμων ισορροπίας για κοινά σημεία του φορέα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ξανά, ότι, γενικά η προσομοίωση με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία θεωρείται ακριβέστερη. Αυτό οφείλεται, ανάμεσα και σε άλλους λόγους, στο γεγονός ότι η εξάπλωση της πλαστικοποίησης του υλικού σε κάθε διατομή γίνεται πιο ομαλά, αλλά και στο γεγονός ότι οι παραμορφώσεις προσομοιάζονται με καλύτερο τρόπο. Επίσης, στο συγκεκριμένο φορέα για τον οποίο έγινε χρήση επιφανειακών στοιχείων, υπήρξε καλύτερη προσομοίωση των συνδέσεων των τεγιδών και των διαγώνιων συνδέσμων με τα τόξα, προσφέροντας κάποια παραπάνω στρεπτική εξασφάλιση, η οποία δεν μπορούσε να προσομοιωθεί στις περιπτώσεις όπου έγινε χρήση των beam elements.

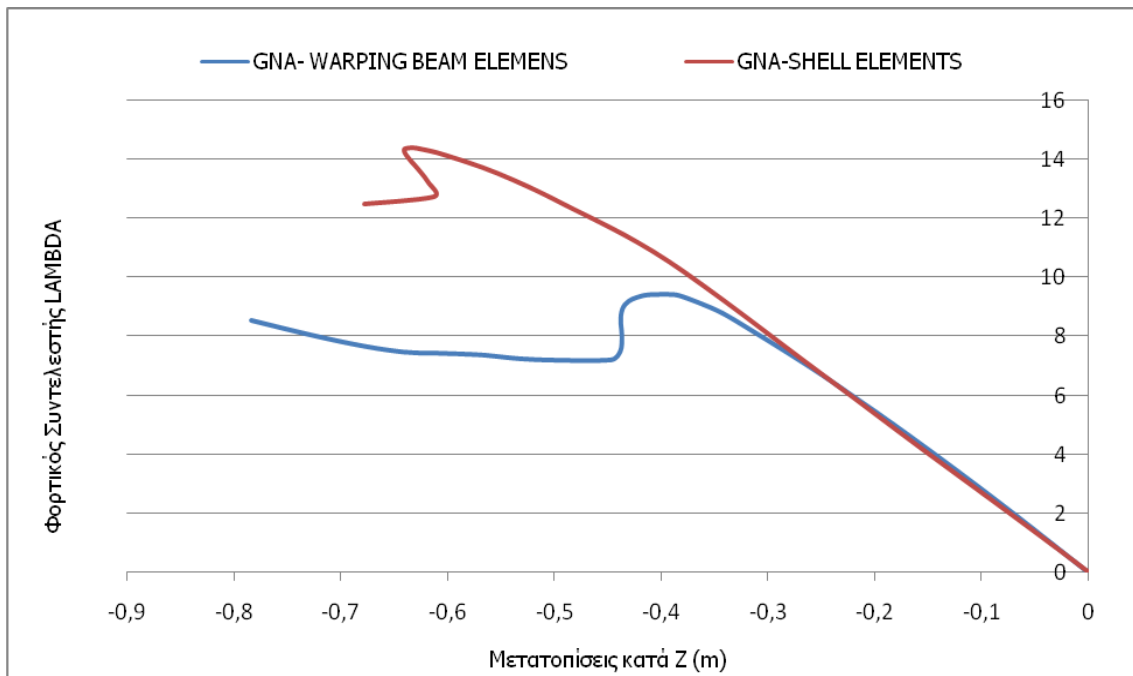
5.4.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις αναλύσεις LBA

Στην ανάλυση LBA που έγινε για το μοντέλο με τα επιφανειακά στοιχεία είναι ξεκάθαρο ότι οι διαφορές με τα μοντέλα στα οποία έγινε χρήση beam elements, προκύπτουν από την αυξημένη στρεπτική δυσκαμψία που εμφανίζει το πρώτο. Αυτή έχει προκύψει κυρίως, όπως έχει προαναφερθεί, από τον τρόπο με τον οποίο προσομοιώθηκαν οι συνδέσεις των τεγιδών και διαγώνιων συνδέσμων με τα τόξα. Δεν εμφανίζονται τα, έντονα και εκτεταμένα σε όλα τα τόξα, στρεπτικά φαινόμενα που εμφανίζονται στη προσομοίωση με Warping beam elements. Η πρώτη ιδιομορφή του μοντέλου με τα επιφανειακά στοιχεία, είναι ίδιας μορφής με την πρώτη ιδιομορφή του μοντέλου των Standard beam elements και την τέταρτη ιδιομορφή του μοντέλου με Warping beam elements, αλλά για αρκετά μεγαλύτερο κρίσιμο φορτίο. Επίσης στη προσομοίωση αυτού του κεφαλαίου εμφανίζεται στη δεύτερη ιδιομορφή

καθολικός λυγισμός των τόξων κατά τον ισχυρό άξονα τους αλλά και σε μικρότερο βαθμό προς τον ασθενή άξονα, κάτι που δεν εμφανίζεται στα μοντέλα των Standard και Warping beam elements, αλλά εμφανίζεται στη προσομοίωση που έχει γίνει στο προηγούμενο κεφάλαιο με τη χρήση των διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων, όπου έχει σχεδόν δεσμευτεί η στροφή των διατομών. Τέλος, αντίθετα με τα προσομοιώματα των beam elements, εμφανίζονται τοπικοί λυγισμοί στη τρίτη και τέταρτη ιδιομορφή.

5.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις αναλύσεις GNA

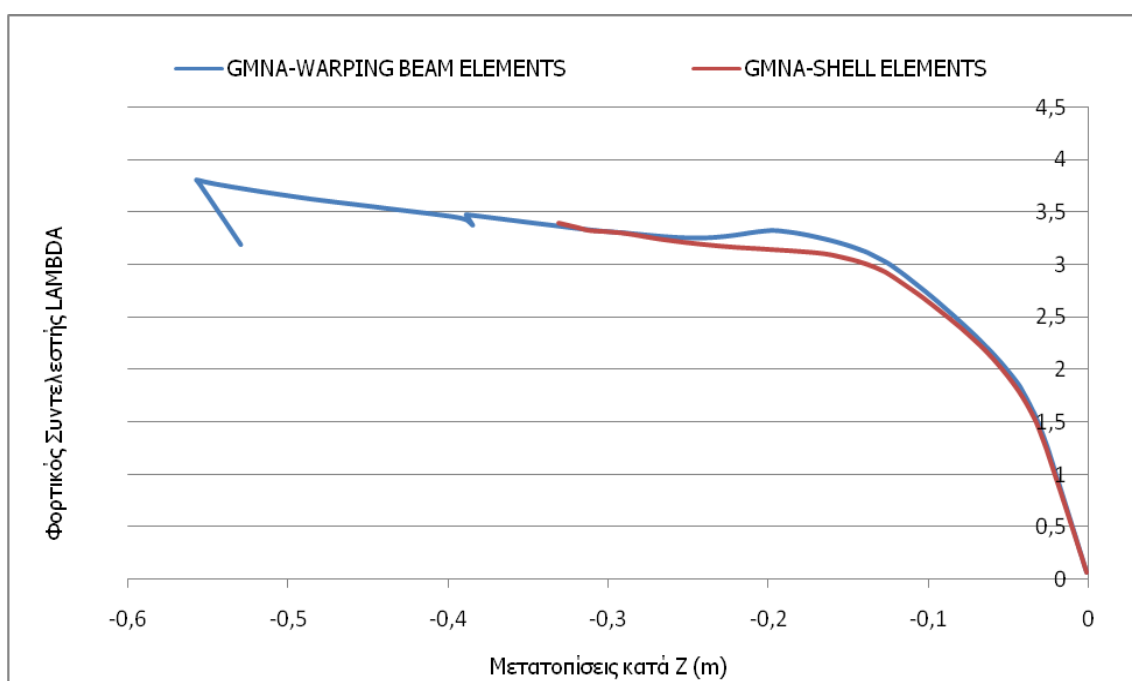
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις αναλύσεις GNA θα γίνει μεταξύ των περιπτώσεων προσομοίωσης με επιφανειακά στοιχεία και Warping beam elements, μιας και στο προηγούμενο κεφάλαιο εξήχθη το συμπέρασμα ότι αυτή ήταν η καλύτερη δυνατή προσομοίωση με στοιχεία δοκού. Παρατηρείται από τις εικόνες, που περιγράφουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών, ότι οι μετατοπίσεις που παρατηρούνται για την περίπτωση των Warping beam elements είναι μεγαλύτερες. Παρακάτω στο Σχήμα 5-11 γίνεται σύγκριση των δρόμων ισορροπίας που εξήχθησαν από την ανάλυση GNA για χρήση επιφανειακών στοιχείων και Warping beam elements και αφορούν το σημείο του 9^{ου} τόξου που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μετατόπιση στον παραμορφωμένο φορέα, όπως προέκυψαν για συνδυασμό φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Αστοχίας. Από τη σύγκριση αυτή γίνεται αντιληπτό ότι το κρίσιμο φορτίο για την περίπτωση των επιφανειακών στοιχείων είναι μεγαλύτερο, κάτι που σημαίνει ότι με χρήση των στοιχείων αυτών ο φορέας παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή όταν το υλικό θεωρείται ελαστικό και η αστοχία οφείλεται μόνο λόγω γεωμετρίας. Επιβεβαιώνεται επίσης και από τους δρόμους ισορροπίας ότι ο φορέας παρουσιάζει μεγαλύτερες μετατοπίσεις όταν γίνεται χρήση των Warping στοιχείων δοκού.



Σχήμα 5-11: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GNA για επιφανειακά στοιχεία και Warping beam elements

5.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για τις αναλύσεις GMNA

Για τη κατανόηση των διαφορών στα αποτελέσματα των αναλύσεων GMNA μεταξύ των μοντέλων που κάνουν χρήση επιφανειακών στοιχείων και Warping beam elements συγκρίνονται οι δρόμοι ισορροπίας των δυο περιπτώσεων προσομοίωσης για το σημείο του 9^{ου} τόξου, που όπως φάνηκε στα αποτελέσματα αστοχεί λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού. Από το Σχήμα 5-12 είναι φανερό ότι οι δρόμοι ισορροπίας για επιφανειακά στοιχεία και Warping beam elements είναι σχεδόν ταυτόσημοι μέχρι ενός σημείου. Τα στοιχεία Warping είναι φανερό ότι επιτρέπουν στον φορέα μεγαλύτερες μετακινήσεις, αλλά και λίγο μεγαλύτερη μετελαστική αντοχή από τα επιφανειακά. Αυτό συμβαίνει καθώς η ανάλυση για τα επιφανειακά στοιχεία έχει σταματήσει στο σημείο εκείνο, όπου οποιοδήποτε σημείο του φορέα έφτασε στη μέγιστη παραμόρφωση υλικού ($\epsilon=0,22$), κάτι που δεν έχουν τη δυνατότητα να κάνουν αναλύσεις οι οποίες γίνονται με ραβδωτά στοιχεία δοκού.



Σχήμα 5-12: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας GMNA για επιφανειακά στοιχεία και Warping beam elements

5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάστηκε η συμπεριφορά των τόξων του θόλου, για τη περίπτωση που η προσομοίωση τους γίνεται με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου περιγράφεται αναλυτικά το πώς έγινε η προσομοίωση αυτή, ενώ δίνεται και ιδιαίτερο βάρος για το πώς έγινε η προσομοίωση των ελασμάτων που αποσκοπούν στην ένωση των τεγίδων αλλά και των διαγώνιων συνδέσμων με τα τόξα και τα οποία λειτουργούν και σαν νευρώσεις. Η προσομοίωση έγινε με τη χρήση άκαμπτων κόμβων (rigid links) ώστε να συνδεθεί ολόκληρη η διατομή του τόξου, με το συγκεκριμένο σημείο της διατομής αυτής στο οποίο συνδέονται οι τεγίδες και οι διαγώνιοι σύνδεσμοι και να έχουμε πλησιέστερη στη πραγματικότητα συμπεριφορά του θόλου. Εκτελέστηκαν στη συνέχεια αναλύσεις LBA, GNA και GMNA των οποίων τα αποτελέσματα και παρουσιάστηκαν αναλυτικά με τη βοήθεια εικόνων και δρόμων ισορροπίας, ώστε να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά του φορέα.

Όπως ήταν αναμενόμενο και είχε αναφερθεί, αυτός ο τρόπος προσομοίωσης των κομβοελασμάτων που λειτουργούν και σαν νευρώσεις για τα τόξα, προσέφερε σε αυτά μεγαλύτερη στρεπτική δυσκαμψία. Έτσι, είναι λογικό τα αποτελέσματα στις αναλύσεις LBA αλλά και τις αναλύσεις με θεώρηση γεωμετρικής μη γραμμικότητας, να διαφέρουν σε σχέση με αυτά που εξήχθησαν για τα μοντέλα όπου έχει γίνει χρήση στοιχείων δοκού για την προσομοίωση των τόξων. Συγκεκριμένα στα αποτελέσματα της Γραμμικοποιημένης Ανάλυσης Λυγισμού τα κρίσιμα φορτία έχουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές, ενώ υπάρχουν ιδιομορφές οι οποίες εκφράζονται με καθολικό λυγισμό των τόξων εντός του επιπέδου τους, αλλά και ιδιομορφές που εμφανίζουν τοπικό λυγισμό στην ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου. Ένα από τα πλεονεκτήματα χρήσης των επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων είναι η δυνατότητα τους κατά τις αναλύσεις να κατανοούν και να εκφράζουν καλύτερα τις περιπτώσεις όπου υπάρχει τοπικός λυγισμός. Στα αποτελέσματα της GNA, μέσα από δρόμους ισορροπίας, αλλά και εικόνες όπου φαίνεται ο λυγισμός του φορέα και οι μέγιστες μετατοπίσεις, έγινε κατανοητό ότι σε αυτή τη περίπτωση προσομοίωσης παρουσιάζει ο θόλος μεγαλύτερη αντοχή, με το οριακό φορτίο να είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με τα μοντέλα των στοιχείων δοκού.

Ακολουθούμε, στο κεφάλαιο, τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων όπου έχει ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα γεωμετρίας αλλά και υλικού, ώστε να προσδιοριστεί η συνολική αντοχή του θόλου. Είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικό το γεγονός ότι τα αποτελέσματα αυτά της ανάλυσης GMNA, είναι πολύ κοντά με αυτά του μοντέλου με τα ραβδωτά στοιχεία δοκού. Στη προσομοίωση που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο έχουμε, επίσης, τη πρώτη διαρροή του υλικού να συμβαίνει στη ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου για φορτικό συντελεστή $\lambda=1,48$ στους συνδυασμούς φόρτισης της Οριακής Κατάστασης Αστοχίας. Στη συνέχεια και με αύξηση του φορτικού συντελεστή, παρατηρούνται αστοχίες με τη μορφή διαρροής του υλικού σε όλες τις στηρίξεις του θόλου. Ο θόλος παρουσιάζει, όμως, μεγάλη μετελαστική αντοχή, έχει, δηλαδή, τη δυνατότητα παραλαβής παραπάνω φορτίων ακόμα και όταν ο χάλυβας στις στηρίξεις ξεπεράσει τη τάση διαρροής του. Έτσι, με περαιτέρω αύξηση των φορτίων παρατηρείται στρεπτοκαμπτικός λυγισμός στο σημείο του 9^{ου} τόξου όπου είχε παρατηρηθεί και για το μοντέλο με τα ραβδωτά στοιχεία δοκού. Σημειώνεται ότι το μοντέλο με χρήση επιφανειακών στοιχείων δείχνει να επιτρέπει στο θόλο μικρότερες συνολικές μετακινήσεις, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι έχει τη δυνατότητα να θέσει όριο στη μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση του υλικού ($\epsilon=0,22$), όπου και οι αναλύσεις σταματούν.

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων GNA και GMNA, και τη σύγκριση τους γίνεται κατανοητό ότι ο φορέας αστοχεί κυρίως λόγω υλικού, ενώ η γεωμετρική μη γραμμικότητα δεν είναι κρίσιμη σε ότι αφορά τη συνολική αντοχή του θόλου. Από τους δρόμους γίνεται επίσης κατανοητό ότι σε όλα τα σημεία του ο θόλος εμφανίζει, όπως προαναφέρθηκε, μεγάλη αντοχή μετά τη διαρροή του υλικού κάτι φαίνεται από τους ανοδικούς δευτερεύοντες κλάδους των δρόμων ισορροπίας, και οφείλεται τόσο στη κράτυνση του υλικού, αλλά στην υπερστατικότητα του φορέα που επιτρέπει ανακατανομή της έντασης. Τέλος, στο παρών κεφάλαιο, έγινε έλεγχος για να φανεί το πόσο επηρεάζουν τα θερμοκρασιακά φορτία αλλά και η ύπαρξη αρχικών ατελειών τη συμπεριφορά των τόξων. Σε ό,τι αφορά τα θερμοκρασιακά φορτία, αυτά δεν έχουν σχεδόν καμία επιρροή στη συμπεριφορά των τόξων, αφού αυτά λόγω της γεωμετρίας τους μπορούν να διασταλούν και να συσταλούν αναλόγως. Οι αρχικές ατέλειες δεν επηρεάζουν τα φορτία λυγισμού του φορέα, αλλά παρουσιάζεται λίγο μειωμένη η δυσκαμψία του φορέα και εμφανίζονται λίγο μεγαλύτερες μετακινήσεις.

Σε γενικές γραμμές τα αποτελέσματα αυτά που εξήχθησαν για το σχεδιασμό του θόλου με χρήση μη-γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων και παρουσιάζονται σε αυτό και το προηγούμενο κεφάλαιο, δείχνουν να συμφωνούν σε κάποιο βαθμό με τον σχεδιασμό που έγινε στον θόλο με κανονιστική προσέγγιση. Για την ακρίβεια, το σημείο που φαίνεται να αστοχεί πρώτο στις μη γραμμικές αναλύσεις που έγιναν, το οποίο είναι η ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου, είναι και το σημείο στο οποίο στα αποτελέσματα του κανονιστικού σχεδιασμού, εμφανίζεται ο μεγαλύτερος βαθμός αξιοποίησης. Επίσης

μεγάλοι βαθμοί αξιοποίησης εμφανίζονται σε όλες τις στηρίξεις των τόξων στην κανονιστική προσέγγιση, κάτι που φαίνεται και στις στηρίξεις του μοντέλου στο οποίο έγιναν οι μη γραμμικές αναλύσεις, καθώς μετά την αστοχία της ανατολικής στήριξης του 9^{ου} τόξου, και όσο ανεβαίνει ο φορτικός συντελεστής, και οι υπόλοιπες στηρίξεις αστοχούν με τη σειρά τους. Η μόνη μεγάλη διαφορά που παρατηρείται στον κανονιστικό σχεδιασμό είναι οι μεγάλοι βαθμοί αξιοποίησης που εμφανίζουν οι στηρίξεις των ακραίων τόξων. Στις μη γραμμικές αναλύσεις, δεν παρατηρείται κάποια αστοχία στο σημείο αυτό του θόλου, όσο μεγαλώνει ο φορτικός συντελεστής, ούτε οι τάσεις που δέχονται τα ακραία τόξα στις στηρίξεις τους φαίνεται να είναι μεγάλες. Αυτό μπορεί όμως να εξηγηθεί εύκολα, καθώς όπως υπενθυμίζεται, τα ακραία τόξα στηρίζονται πάνω στις μηκίδες του τελευταίου ορόφου και όχι μεμονωμένα όπως τα υπόλοιπα. Οι μηκίδες όμως στηρίζονται σε σημείο πιο εσωτερικά του θόλου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι μηκίδες να κάμπτονται κοντά στο σημείο που στηρίζονται και έτσι το ακριανό ακραίο τόξο μπορεί να πάρει μετακινήσεις λόγω της μηκίδας στην οποία στηρίζεται. Οι μετακινήσεις αυτές τείνουν να ανακουφίσουν την ένταση στα ακραία τόξα, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει άνοδος των τάσεων.

6 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΤΟΞΟΥ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στα προηγούμενα κεφάλαια, από τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων με χρήση ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων δοκού και επιφανειακών στοιχείων, καθώς και από το κανονιστικό σχεδιασμό, διαπιστώθηκε ότι το 9° τόξο ήταν αυτό το οποίο παρουσιάζει την πιο κρίσιμη συμπεριφορά. Στο τόξο αυτό εκφράζονται οι περισσότερες ιδιομορφές, ενώ όπως φαίνεται από τις αναλύσεις με μη γραμμικότητα υλικού, σε αυτό παρατηρείται και το πρώτο σημείο του θόλου όπου παρουσιάζεται διαρροή υλικού, για το μικρότερο δηλαδή φορτικό συντελεστή. Για αυτό το τόξο κρίθηκε ενδιαφέρων να εξεταστεί η συμπεριφορά του μεμονωμένα, εκτός δηλαδή του θόλου. Στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζεται συνεπώς μια προσπάθεια μέσω επίσης μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων να συγκριθεί η συμπεριφορά του τόξου, όταν αυτό βρίσκεται εντός του θόλου και όταν είναι μεμονωμένο. Οι συνθήκες στήριξης του μεμονωμένου τόξου γίνονται έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά σε αυτές που έχει εντός του θόλου, τοποθετώντας στηρίξεις που δεσμεύουν την μετακίνηση εκτός επιπέδου στα σημεία όπου οι τεγίδες και οι διαγώνιοι σύνδεσμοι ενώνονται με το τόξο αυτό.

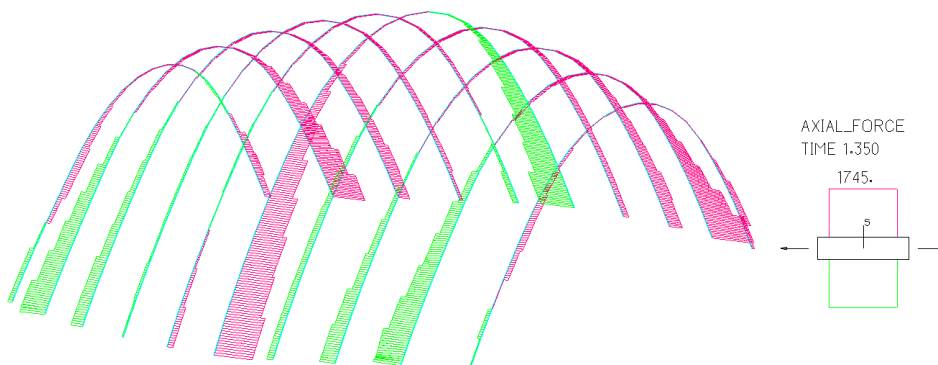
Αρχικά στο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια αναλυτική περιγραφή της συμπεριφοράς του τόξου όπως φάνηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, δηλαδή εντός του θόλου. Υπενθυμίζονται οι τρόποι και τα σημεία αστοχίας που εμφανίζονται στο τόξο αυτό, τα εντατικά μεγέθη τα οποία ασκούνται, ενώ παράλληλα συσχετίζεται η συμπεριφορά του με τη γενική συμπεριφορά ολόκληρου του φορέα. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι αναλύσεις που έγιναν για τη περίπτωση του μεμονωμένου τόξου. Οι αναλύσεις και τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι για μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις αυτές συγκρίνονται με τα αποτελέσματα για το τόξο όταν αυτό βρίσκεται εντός του θόλου. Τέλος στα συμπεράσματα γίνεται προσπάθεια ερμηνείας της συμπεριφοράς του μεμονωμένου τόξου και για ποιον λόγο παρουσιάζονται τυχόν διαφορές στη συμπεριφορά του για τις δύο περιπτώσεις.

6.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΞΟΥ ΣΤΟ ΘΟΛΟ

Όπως αναφέρθηκε, το 9^ο τόξο, που αποτελεί το βασικό αντικείμενο του κεφαλαίου, είναι αυτό που διαρρέει πρώτο στο θόλο. Η φόρτιση για την οποία το τόξο αυτό έχει παρουσιάσει την εν λόγω συμπεριφορά, είναι για φορτία ανέμου τα οποία ασκούν πίεση στο ένα μισό του θόλου, και αναρρόφηση στο άλλο μισό, η οποία και είναι η πιο κρίσιμη περίπτωση φορτίου, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2.4. Αρχικά παρουσιάζεται διαρροή υλικού στη στήριξη του, ενώ στη συνέχεια για μεγαλύτερο φορτικό συντελεστή παρουσιάζεται στρεπτοκαμπτικός λυγισμός σε σημείο λίγο ανώτερα της στήριξης αυτής. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα εντατικά μεγέθη που ασκούνται στο τόξο αυτό, οι αντιδράσεις του θόλου αλλά και ο τρόπος αστοχίας του τόξου.

6.2.1 Εντατικά μεγέθη που ασκούνται στο 9^ο τόξο εντός θόλου

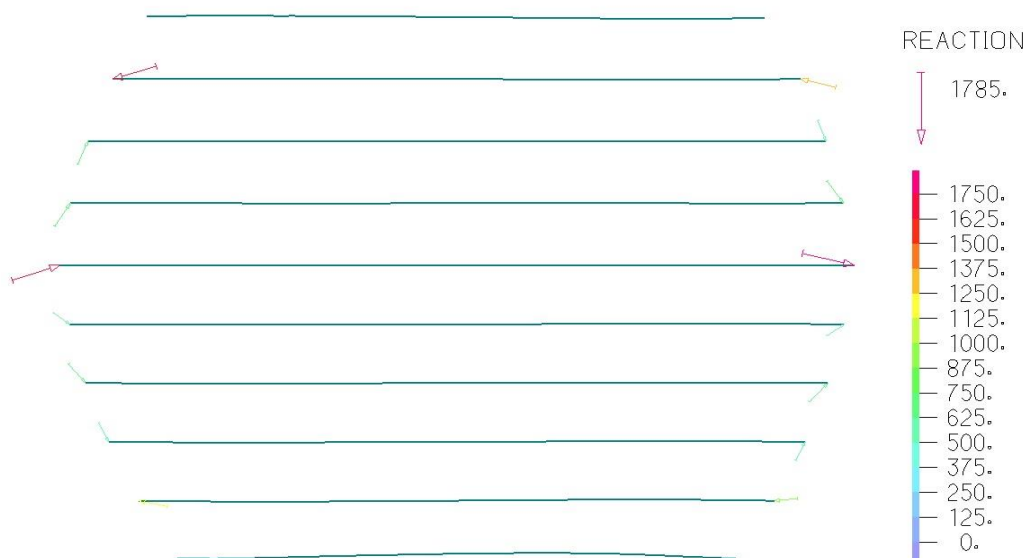
Γενικά, από τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν, όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 6-1, φαίνεται ότι όλα τα τόξα του θόλου, δέχονται και θλιπτικές και εφελκυστικές αξονικές δυνάμεις. Οι αξονικές δυνάμεις με το μεγαλύτερο μέτρο εμφανίζονται στο μεσαίο, 6^ο, τόξο, αλλά και στο κρίσιμο τόξο, το 9^ο. Ο λόγος που το 9^ο τόξο τελικά είναι το κρίσιμο και αυτό στο οποίο εκφράζεται η αστοχία είναι επειδή έχει μικρότερη διατομή από το 6^ο μεσαίο τόξο το οποίο καταπονείται περισσότερο. Οι αξονικές που έχουν εξαχθεί από το λογισμικό ADINA, και παρουσιάζονται, είναι για τη χρονική στιγμή κατά την οποία το 9^ο τόξο δέχεται τις μεγαλύτερες τιμές δυνάμεων, οι οποίες εμφανίζονται για φορτικό συντελεστή $\lambda=1,48$ για το συνδυασμό φορτίσεων Οριακής Κατάστασης Αστοχίας. Στο σημείο αυτό, όπως παρατηρήσαμε στα παραπάνω κεφάλαια, συμβαίνει διαρροή του υλικού στη στήριξη του, και γι' αυτό το λόγο οι αξονικές θλιπτικές δυνάμεις που δέχεται το τόξο αρχίζουν να μειώνονται, ενώ τέλος όταν συμβαίνει ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός ανώτερα της στήριξης για φορτίο $\lambda=3,14$ αυτές σχεδόν μηδενίζονται στα ανατολικά του τόξου.



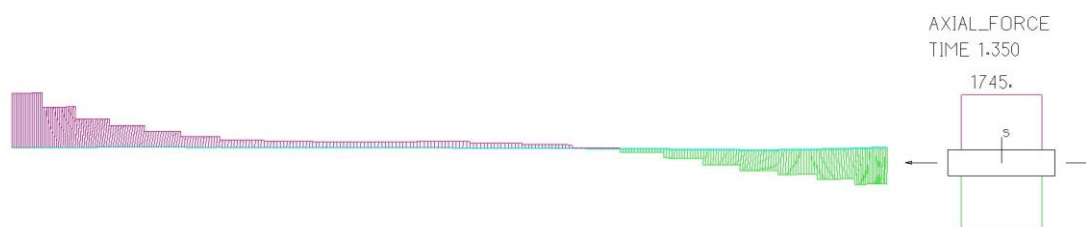
Εικόνα 6-1: Αξονικές δυνάμεις στα τόξα του φορέα, Βορειοανατολική όψη

Οι μεγαλύτερες αντιδράσεις που παρατηρούνται στις στηρίξεις του 6^{ου} και του 9^{ου} τόξου, όπως φαίνονται στην Εικόνα 6-2, δικαιολογούν το γεγονός ότι σε αυτά τα τόξα εμφανίζεται η μεγαλύτερη αξονική καταπόνηση. Φαίνεται ότι οι αντιδράσεις των στηρίξεων των τόξων αυτών δημιουργούν ζεύγη δυνάμεων. Έτσι εμποδίζεται η στροφή ολόκληρου του φορέα αλλά και οι μετακινήσεις εκτός επιπέδου. Συγκεκριμένα για το 9^ο τόξο, στην Εικόνα 6-3, παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό. Όπως φαίνεται και προαναφέρθηκε, το τόξο θλίβεται στο ανατολικό μέρος του ενώ στο

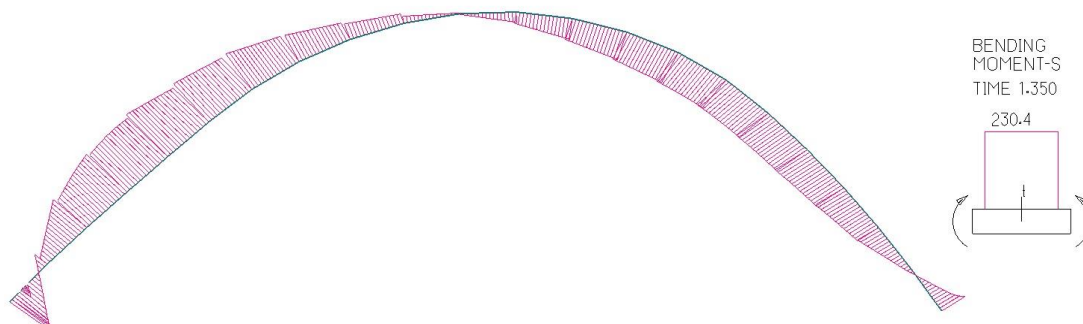
υπόλοιπο εφελκύεται. Στην Εικόνα 6-4 και στην Εικόνα 6-5 φαίνονται οι καμπτικές ροπές κατά τον κύριο άξονα και οι τέμνουσες που ασκούνται εντός επιπέδου αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα εντατικά μεγέθη όπως οι καμπτικές ροπές κατά τον ασθενή άξονα, οι τέμνουσες εκτός επιπέδου αλλά και οι στρεπτικές ροπές δεν παρουσιάζονται για λόγους συντομίας, μιας και οι τιμές τους είναι ελάχιστες και δεν συμβάλουν στην αστοχία του φορέα.



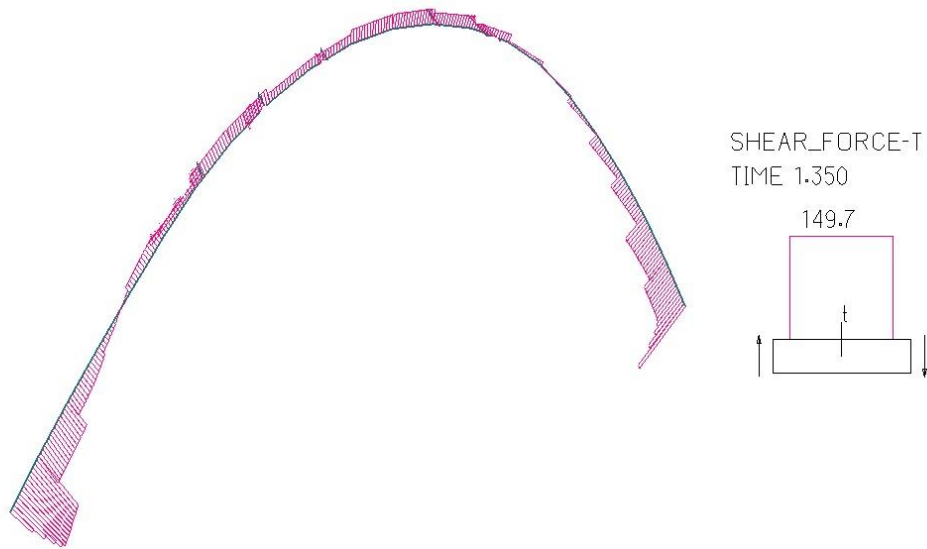
Εικόνα 6-2: Αντιδράσεις στηρίξεων του θόλου



Εικόνα 6-3: Αξονικές δυνάμεις στο 9^ο τόξο

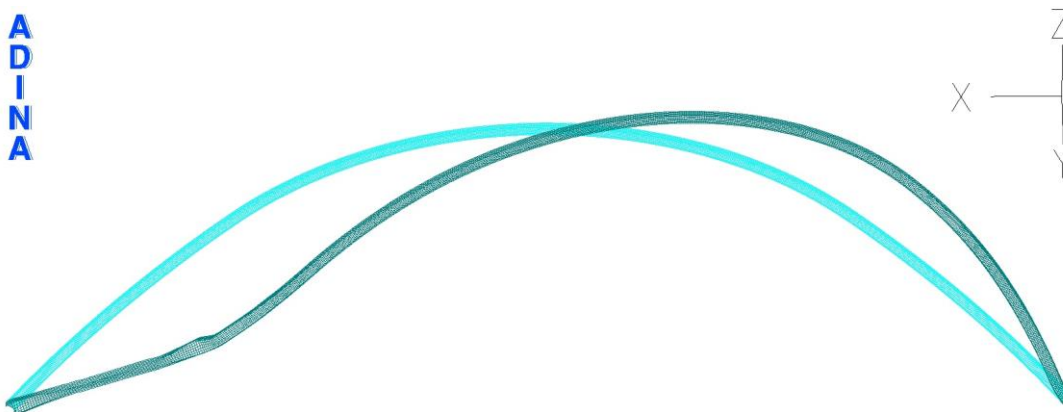


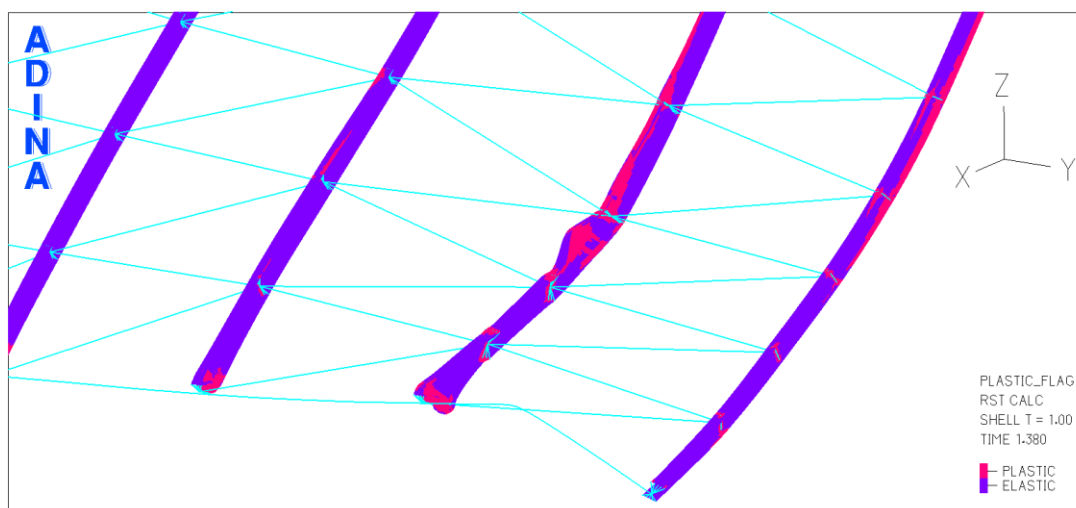
Εικόνα 6-4: Καμπτικές ροπές κατά τον κύριο άξονα στο 9^ο τόξο

Εικόνα 6-5: Τέμνουσες δυνάμεις στο 9^ο τόξο

6.2.2 Αστοχία και παραμόρφωση του 9^{ου} τόξου εντός θόλου

Το 9^ο τόξο, όπως και ολόκληρος ο θόλος, φαίνεται στην Εικόνα 6-6 να παρουσιάζει μετακινήσεις προς τα αρνητικά του άξονα X (προς τα δυτικά) καθώς και προς τον κάτω, δηλαδή προς τα αρνητικά του άξονα Z, από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν πίεση και προς τον πάνω, δηλαδή προς τα θετικά του άξονα Z, από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν αναρρόφηση. Παρατηρούνται επίσης και μερικές μετατοπίσεις κατά τα αρνητικά του άξονα Y στο σημείο, κυρίως, όπου εμφανίζεται η αστοχία του τόξου. Στην Εικόνα 6-7 όπου παρουσιάζεται λεπτομερώς η αστοχία του τόξου αυτού, μπορεί να φανεί καλύτερα η διαρροή του υλικού. Αυτή παρατηρείται αρχικά στην ανατολική στήριξη, ενώ στη συνέχεια φαίνεται και ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός που εμφανίζεται για μεγαλύτερο φορτικό συντελεστή ανώτερα της στήριξης στο τόξο. Όπως είδαμε και παραπάνω η πολύ μεγάλη τιμή των αξονικών δυνάμεων σε συνδυασμό της κάμψης δικαιολογούν την εμφάνιση αυτών των ειδών αστοχίας στο τόξο.

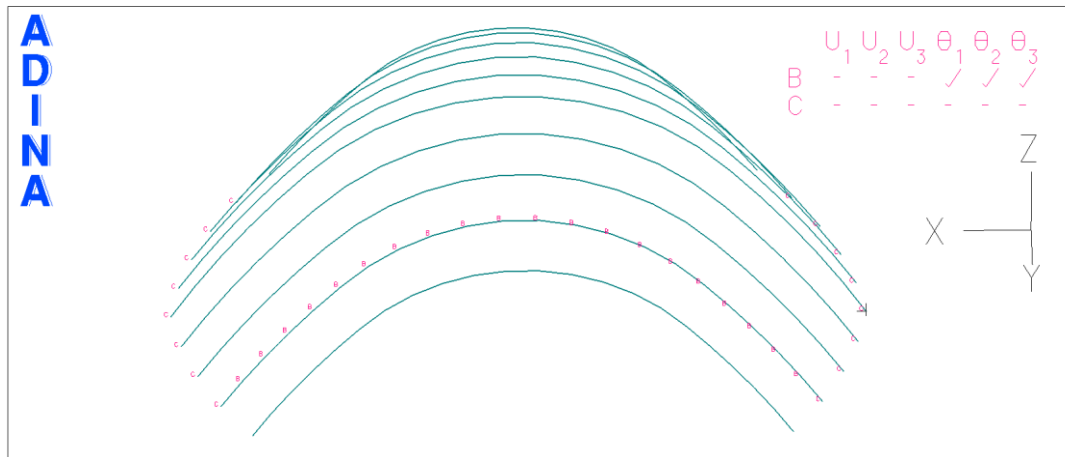
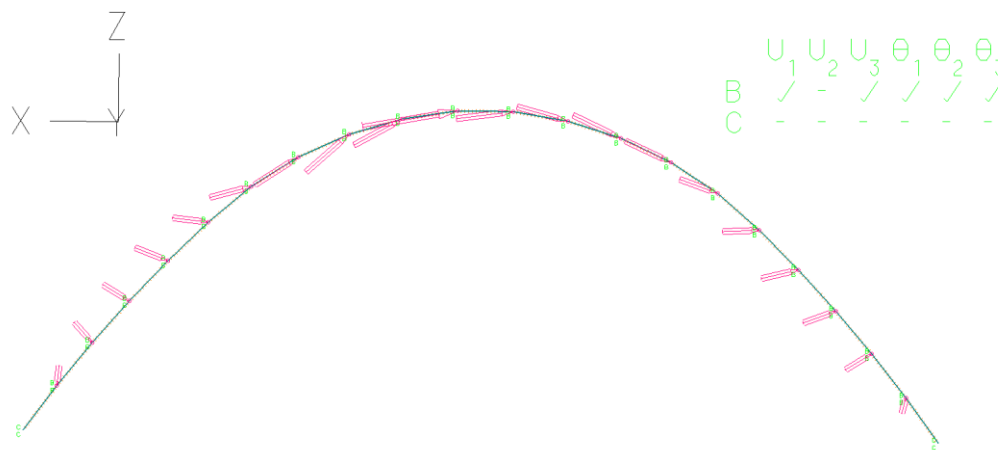
Εικόνα 6-6: Παραμόρφωση 9^{ου} τόξου

Εικόνα 6-7: Λεπτομέρεια αστοχίας 9^{ου} τόξου, ανατολική στήριξη

6.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΤΟΞΟΥ

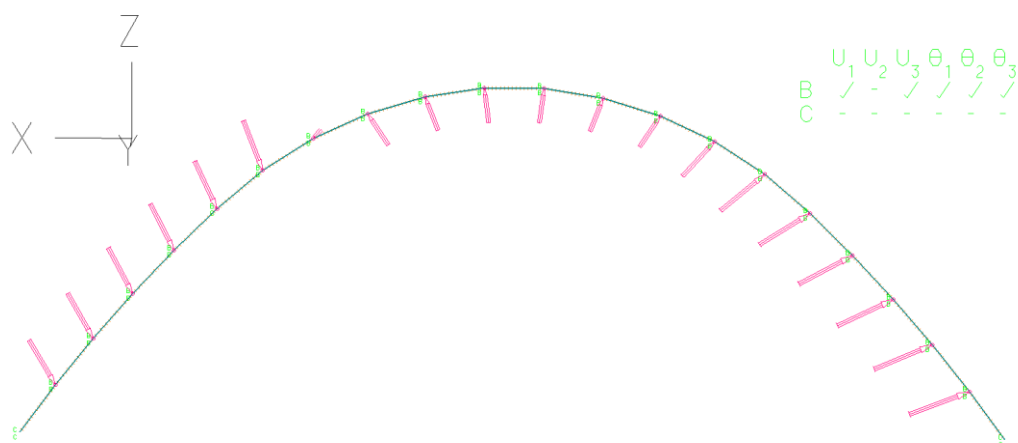
Το 9^ο τόξο του θόλου, όπως φάνηκε, ήταν είχε την πιο κρίσιμη συμπεριφορά στο θόλο, ήταν δηλαδή, αυτό που αστοχούσε πρώτο στο φορέα. Κρίθηκε λοιπόν αρκετά ενδιαφέρον να εξεταστεί η συμπεριφορά του για την περίπτωση που είναι μεμονωμένο, εκτός θόλου. Η προσομοίωση του μοντέλου αυτού του μεμονωμένου τόξου έγινε όσο δυνατόν καλύτερα, ώστε να πλησιάζει αυτή της περίπτωσης που το τόξο βρίσκεται εντός του θόλου. Για την ακρίβεια, στα σημεία όπου τέμνονται οι τεγίδες και οι διαγώνιοι σύνδεσμοι στο τόξο εντός του θόλου, τοποθετήθηκαν εξασφαλίσεις που αποτρέπουν τις μετακινήσεις εκτός επιπέδου. Οι στηρίξεις στις βάσεις του τόξου παρέμειναν πακτώσεις, όπως και στην περίπτωση του θόλου. Τα προσομοιώματα για τα οποία έγιναν αναλύσεις για το μεμονωμένο τόξο, έγιναν με χρήση Waring στοιχείων δοκού και με χρήση επιφανειακών στοιχείων. Όπως φάνηκε από τα προηγούμενα κεφάλαια, η συμπεριφορά του τόξου στις δύο περιπτώσεις αυτές είναι αρκετά κοντινή για αναλύσεις που χρησιμοποιούν μη γραμμικό υλικό. Έτσι οι αναλύσεις με τα πεπερασμένα στοιχεία δοκού, έγιναν με σκοπό να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά του φορέα, μέσω εντατικών μεγεθών, τα οποία θα συγκριθούν με τα εντατικά μεγέθη τις περίπτωσης του τόξου εντός του θόλου. Οι αναλύσεις με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία έγιναν με σκοπό να γίνει οπτικά πιο κατανοητός ο τρόπος αστοχίας του τόξου. Όλες οι αναλύσεις έγιναν με τη μέθοδο arc-length του λογισμικού ADINA και είναι μη γραμμικές με χρήση πλαστικού διγραμμικού υλικού, χάλυβα ποιότητας S355, ενώ χρησιμοποιήθηκε η θεώρηση μεγάλων μετακινήσεων ώστε να ληφθεί υπόψη και η μη γραμμικότητα γεωμετρίας.

Σε ότι αφορά τον τρόπο με τον οποίο φορτίστηκε το μοντέλο του μεμονωμένου τόξου εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις. Κατά τη πρώτη περίπτωση τέθηκαν αρθρώσεις, στο τόξο εντός του θόλου, που απαγορεύουν τις μετακινήσεις προς όλους τους άξονες, στα σημεία που ενώνεται αυτό με τις τεγίδες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-8. Έγιναν απλές γραμμικές αναλύσεις στο μοντέλο αυτό για τα φορτία σχεδιασμού του θόλου και εξήχθησαν οι αντιδράσεις στις αρθρώσεις που τοποθετήθηκαν στο 9^ο τόξο του θόλου. Αυτές οι αντιδράσεις χρησιμοποιήθηκαν ως φορτίσεις για την ανάλυση του μεμονωμένου τόξου, όπως φαίνονται στην Εικόνα 6-9. Δυστυχώς τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις αναλύσεις με αυτή τη φόρτιση, δεν αξίζουν παρουσίασης, μιας και το τόξο φαίνεται να διαρρέει για μικρότερα από τα ασκούμενα φορτία. Αυτό το γεγονός οδήγησε στο συμπέρασμα ότι πρέπει οι φορτίσεις να προσομοιωθούν τελικά με διαφορετικό τρόπο.

Εικόνα 6-8: Αρθρώσεις στο 9^ο τόξο του θόλου

Εικόνα 6-9: Πρώτη περίπτωση φόρτισης μεμονωμένου τόξου

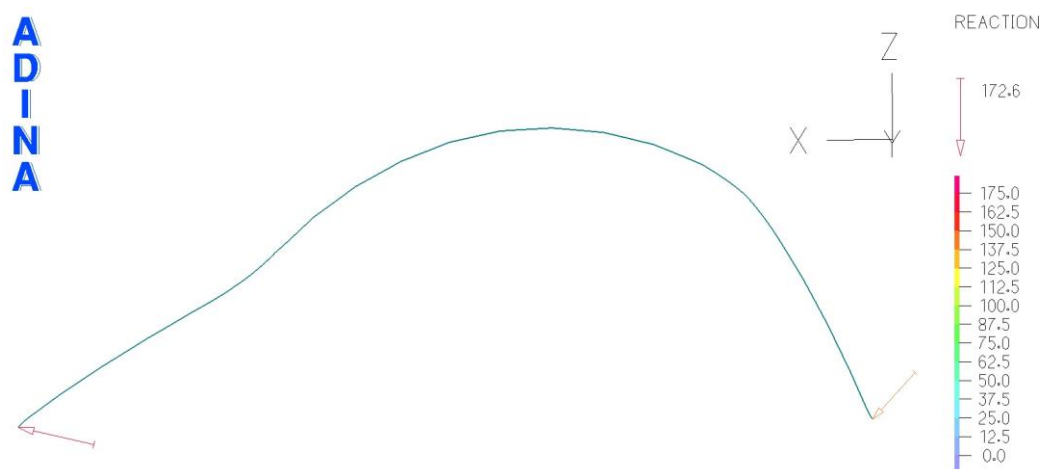
Η δεύτερη περίπτωση φόρτισης που δοκιμάστηκε, αφού η προηγούμενη προσπάθεια απέτυχε στο να δώσει χρήσιμα αποτελέσματα, ήταν και η πιο απλή. Για την ακρίβεια τοποθετήθηκαν σημειακά φορτία στις θέσεις όπου ενώνονται στο μοντέλο του θόλου οι τεγίδες με το τόξο. Τα σημειακά αυτά φορτία που τοποθετήθηκαν υπολογίστηκαν από τα κατανεμημένα φορτία που ασκούνται στο μοντέλο του θόλου πάνω στις τεγίδες πολλαπλασιασμένα με το μήκος επιρροής των τεγίδων για το τόξο, δηλαδή το μισό μήκος των εκατέρωθεν τεγίδων. Το πώς ασκήθηκαν αυτές οι φορτίσεις φαίνονται στην παρακάτω Εικόνα 6-10, και ορίστηκαν σύμφωνα με την κρίσιμη περίπτωση φόρτισης όπως αυτή έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 2.4, για τη φόρτιση ανέμου, δηλαδή, κατά την οποία στον μισό θόλο ασκούνται θετικές πιέσεις και στο άλλο μισό ασκείται αναρρόφηση. Οι αναλύσεις που έγιναν εδώ ήταν τύπου GMNA και τα αποτελέσματα της παρουσιάζονται παρακάτω. Αρχικά παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη που ασκούνται στο τόξο μαζί με τις αντιδράσεις στις στηρίξεις, κάτι που θα βοηθήσει στην κατανόηση της συμπεριφοράς του τόξου και τη σύγκριση του με τη συμπεριφορά αυτού όταν βρίσκεται εντός του θόλου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, όπου φαίνεται καλύτερα ο τρόπος και τα σημεία αστοχίας του τόξου.



Εικόνα 6-10: Δεύτερη περίπτωση φόρτισης του μεμονωμένου τόξου

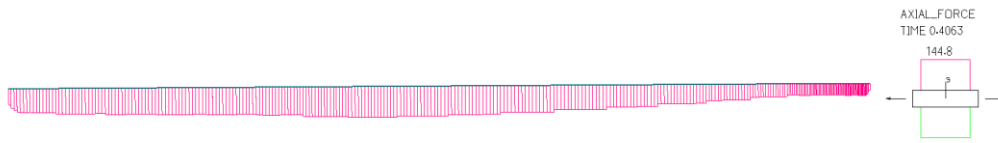
6.3.1 Εντατικά μεγέθη στο μεμονωμένο τόξο

Παρακάτω, μέσω εικόνων που εξήχθησαν από το λογισμικό ADINA που χρησιμοποιήθηκε, παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη που προέκυψαν για τη δεύτερη περίπτωση φόρτισης του μεμονωμένου τόξου. Υπενθυμίζεται ότι η περίπτωση φόρτισης αυτής καθώς και οι συνθήκες στήριξης προέκυψαν από την προσπάθεια να προσομοιωθεί το μεμονωμένο τόξο με τέτοιο τρόπο ώστε να ταιριάζει όσο το δυνατόν περισσότερο στην προσομοίωση του τόξου όταν αυτό βρίσκεται εντός του θόλου. Οι αντιδράσεις που ασκούνται στις στηρίξεις του τόξου, και φαίνονται στην Εικόνα 6-11 μοιάζουν να είναι διαφορετικής μορφής από τις αντίστοιχες αντιδράσεις του τόξου για την περίπτωση που αυτό βρίσκεται εντός του θόλου. Για την ακρίβεια, φαίνεται από τη φορά τους ότι το τόξο σε αυτή τη περίπτωση εφελκύεται. Αυτό το γεγονός επιβεβαιώνεται και στην Εικόνα 6-12, όπου παρουσιάζονται οι μέγιστες αξονικές δυνάμεις που εμφανίζονται στο τόξο κατά τη φόρτιση του. Όπως παρατηρείται υπάρχει μεγάλη διαφορά σε σχέση με τις αξονικές που δέχεται το τόξο εντός του θόλου καθώς σε αυτή τη περίπτωση εμφανίζονται μόνο εφελκυστικές δυνάμεις οι οποίες έχουν και πολύ μικρότερη τιμή. Στην Εικόνα 6-13 παρατηρούνται οι καμπτικές ροπές κατά τον κύριο άξονα οι οποίες σε αυτή τη περίπτωση εμφανίζονται να έχουν την ίδια μορφή με μεγαλύτερες όμως τιμές, ενώ στην Εικόνα 6-14 φαίνονται και οι τέμνουσες δυνάμεις οι οποίες λογικά είναι σχεδόν ίδιες με την περίπτωση που το τόξο είναι εντός του θόλου.



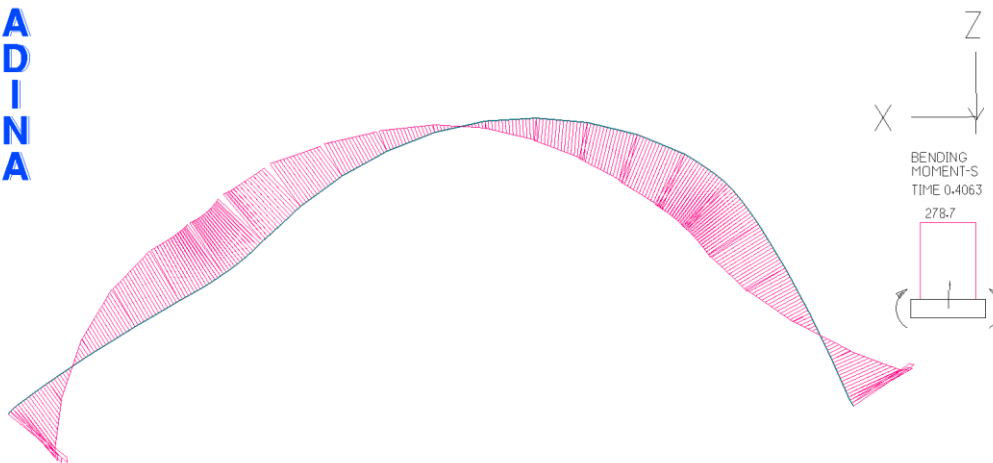
Εικόνα 6-11: Αντιδράσεις στηρίξεων μεμονωμένου τόξου για τη δεύτερη περίπτωση φόρτισης

ADINA



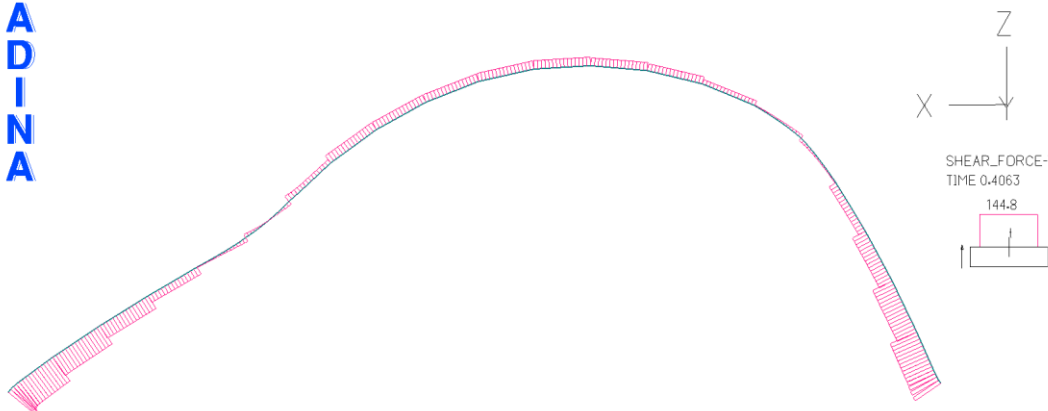
Εικόνα 6-12: Μέγιστες αξονικές δυνάμεις στο μεμονωμένο τόξο

ADINA



Εικόνα 6-13: Καμπτικές ροπές κατά τον κύριο άξονα στο μεμονωμένο τόξο

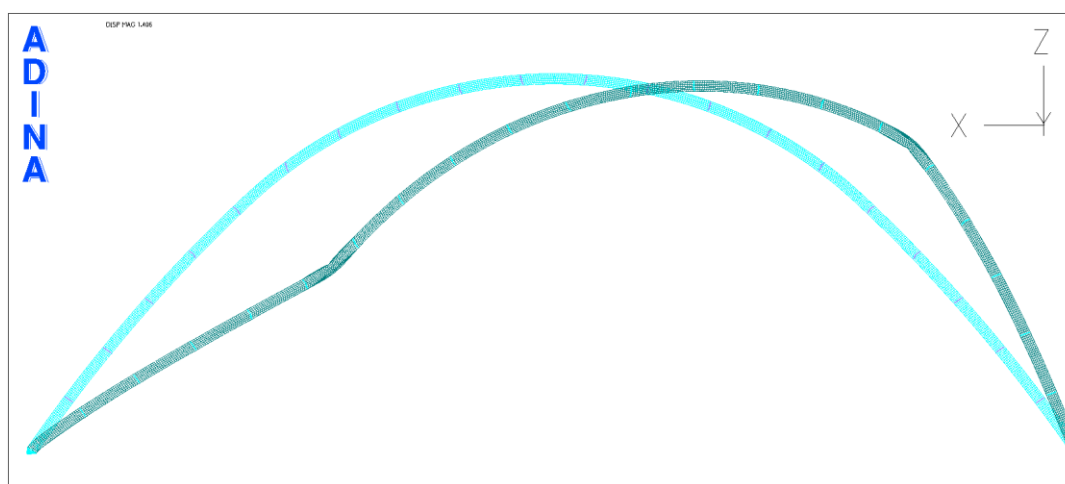
ADINA



Εικόνα 6-14: Τέμνουσες δυνάμεις στο μεμονωμένο τόξο

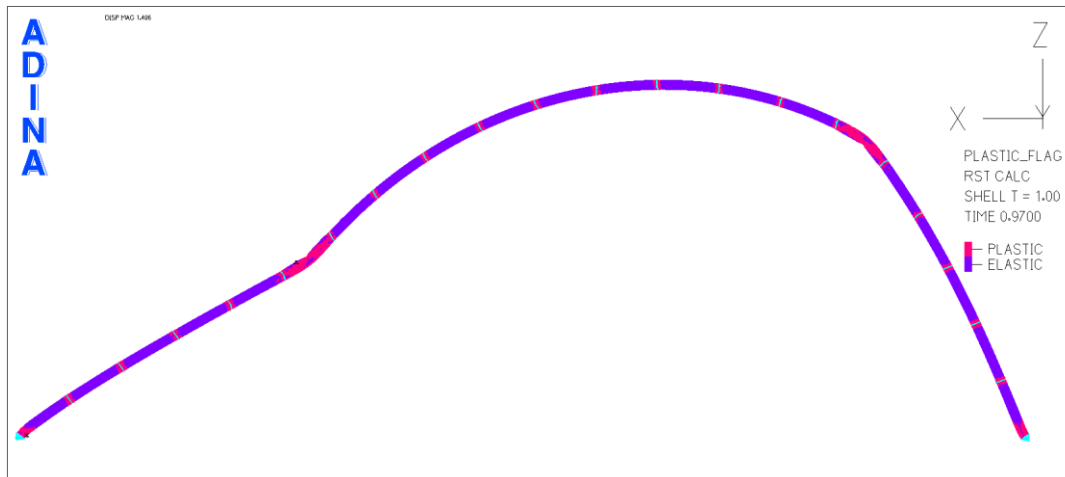
6.3.2 Αστοχία και παραμόρφωση στο μεμονωμένο τόξο

Οι μετατοπίσεις που εμφανίζονται στο μεμονωμένο τόξο είναι παρόμοιες με αυτές του τόξου όταν βρίσκεται εντός του θόλου. Παρουσιάζονται μετακινήσεις προς τα αρνητικά του άξονα X (προς τα δυτικά), καθώς και προς τα κάτω, δηλαδή προς τα αρνητικά του άξονα Z από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν πίεση και προς τα πάνω, δηλαδή προς τα θετικά του άξονα Z, από την μεριά του φορέα όπου τα φορτία του ανέμου δημιουργούν αναρρόφηση. Η διαφορά όμως που παρατηρείται είναι ότι δεν εμφανίζονται μετακινήσεις εκτός επιπέδου, προς τον άξονα Y δηλαδή, μιας και έχουν τοποθετηθεί εξασφαλίσεις που εμποδίζουν πλήρως την μετατόπιση εκτός επιπέδου. Το παραμορφωμένο τόξο φαίνεται στην Εικόνα 6-15.



Εικόνα 6-15: Παραμόρφωση μεμονωμένου τόξου

Σε ότι αφορά την αστοχία του φορέα, αυτή φαίνεται στην Εικόνα 6-16 και είναι αναμενόμενα διαφορετική από αυτή του τόξου εντός του θόλου. Όπως φάνηκε παραπάνω οι αξονικές δυνάμεις που ασκούνται στο τόξο σε αυτή τη περίπτωση είναι πάρα πολύ μικρότερες σε σχέση με το τόξο εντός του θόλου, ενώ είναι και σε όλο το τόξο εφελκυστικές. Αυτός είναι ο βασικός λόγος για τον οποίο η αστοχία που παρατηρείται είναι διαφορετική. Οι καμπτικές ροπές κατά τον κύριο άξονα αλλά και οι τέμνουσες είναι αρκετά κοντά σε μορφή και μέτρο με την περίπτωση του τόξου εντός του θόλου. Έτσι παρατηρείται ότι ο λόγος για τον οποίο αστοχεί το τόξο στην περίπτωση αυτή είναι κυρίως η κάμψη αλλά και οι διατμητικές δυνάμεις. Πρώτη διαρροή, για μικρότερο φορτικό συντελεστή δηλαδή, παρατηρείται στις στηρίξεις του φορέα, κάτι που συμφωνεί και με την αστοχία του τόξου στο θόλο. Παρ' όλα αυτά λόγω της μεγάλης μετελαστικής αντοχής που προσφέρει η κράτυνση του υλικού στο φορέα, επιτρέπεται η περαιτέρω αύξηση των φορτίων. Στη συνέχεια λοιπόν, η αστοχία που παρατηρείται εκτός των στηρίξεων είναι πολύ διαφορετική με αυτή του τόξου εντός του θόλου. Για την ακρίβεια, παρατηρείται περαιτέρω αστοχία σε δύο σημεία του φορέα, ένα σε σημείο που βρίσκεται στη μεριά του τόξου όπου τα φορτία ανέμου είναι ασκούν πίεση, και το άλλο στο σημείο του φορέα όπου ο άνεμος προκαλεί αναρρόφηση. Η αστοχία που παρατηρείται, συμβαίνει εδώ κυρίως λόγω κάμψης, μιας και δεν υπάρχουν θλιπτικές δυνάμεις στο τόξο. Έτσι παρατηρούνται πλευρικοί λυγισμοί, με εκτροπή ενός από τα δύο πέλματα εκτός επιπέδου οι οποίοι συμβαίνουν μεταξύ των σημείων όπου έχει απαγορευτεί η μετακίνηση εκτός επιπέδου.



Εικόνα 6-16: Αστοχία του μεμονωμένου τόξου

6.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρών κεφάλαιο εξετάστηκε η συμπεριφορά του 9^{ου} τόξου μεμονωμένα, το οποίο είναι το πιο κρίσιμο τόξο όταν αυτό βρίσκεται εντός του θόλου, δηλαδή είναι αυτό που αστοχεί πρώτο. Αρχικά παρουσιάστηκε αναλυτικότερα σε σχέση με τα προηγούμενα κεφάλαια η συμπεριφορά του τόξου εντός του θόλου. Παρουσιάστηκαν τα εντατικά μεγέθη που ασκούνται στο τόξο αυτό μαζί με τις αντιδράσεις των στηρίξεων του θόλου, αλλά έγινε και λόγος για τον τρόπο με τον οποίο εμφανίζεται η αστοχία του. Παρατηρήθηκε ότι το τόξο όταν βρίσκεται εντός του θόλου δέχεται πολύ μεγάλες αξονικές δυνάμεις οι οποίες είναι θλιπτικές στο ένα μισό του τόξου και εφελκυστικές στο άλλο μισό. Αυτές οι καταπονήσεις σε συνδυασμό με τις μεγάλες καμπτικές ροπές κατά τον κύριο άξονα και τις διατμητικές δυνάμεις συμβάλουν στην αστοχία του. Η αστοχία που παρατηρείται στο τόξο όταν είναι εντός θόλου είναι αρχικά διαρροή υλικού στις στηρίξεις του, ενώ στη συνέχεια, καθώς αυξάνεται ο φορτικός συντελεστής παρατηρείται στρεπτοκαμπτικός λυγισμός στην ανατολική μεριά του, ο οποίος συμβάλει τελικά στην απομείωση της αντοχής του.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις αναλύσεις που έγιναν σε αυτό το τόξο όταν λειτουργεί μεμονωμένα, δηλαδή εκτός του θόλου. Παρουσιάστηκαν δύο προσπάθειες προσομοίωσης της φόρτισης για το μεμονωμένο τόξο. Σκοπός των προσομοιώσεων αυτών ήταν η φόρτιση που ασκείται στο μεμονωμένο τόξο, να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερη στο τρόπο με τον οποίο αυτό φορτίζεται όταν βρίσκεται εντός του θόλου. Η πρώτη περίπτωση φόρτισης, η οποία προέκυψε λαμβάνοντας τις αντιδράσεις στηρίξεων οι οποίες είχαν τοποθετηθεί στο τόξο όταν αυτό είναι εντός του θόλου, δεν κατάφεραν να δώσουν αξιοποιήσιμα αποτελέσματα. Η δεύτερη περίπτωση φόρτισης ήταν για τις δυνάμεις οι οποίες προέκυψαν απευθείας από τη φόρτιση του τόξου όταν αυτό είναι εντός του θόλου. Συγκεκριμένα υπολογίστηκαν σημειακά φορτία τα οποία ασκήθηκαν στο μεμονωμένο τόξο, με βάση τα κατανεμημένα φορτία τα οποία ασκούνται στις τεγίδες το θόλου. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων που προέκυψαν για αυτή τη φόρτιση στο μεμονωμένο τόξο παρουσιάστηκαν εκτενώς στο κεφάλαιο αυτό, με αναφορά στα εντατικά μεγέθη που δέχεται το τόξο αλλά και τον τρόπο με τον οποίο αστοχεί. Παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση αυτή που το τόξο λειτουργεί μεμονωμένα, οι αξονικές δυνάμεις τις οποίες δέχεται είναι αποκλειστικά εφελκυστικές, ενώ είναι μεγαλύτερες οι καμπτικές ροπές που δέχεται σε σχέση με το τόξο εντός του θόλου. Η αστοχία του μεμονωμένου τόξου επίσης, όπως είναι αναμενόμενο, διαφέρει με την αστοχία του όταν αυτό είναι εντός του θόλου. Εκτός από την αρχική διαρροή υλικού που συμβαίνει στην στήριξή του, η οποία συμφωνεί με την αρχική αστοχία του τόξου εντός του θόλου, παρατηρούνται για μεγαλύτερο φορτικό συντελεστή, σε

δύο σημεία του τόξου, διαρροές λόγω κάμψης, εν αντιθέσει με το τόξο εντός του θόλου που αστοχεί λόγω στρεπτοκάμπτικού λυγισμού, κάτι που οφείλεται και στις θλιπτικές δυνάμεις τις οποίες δέχεται.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τη σύγκριση που έγινε σε αυτό το κεφάλαιο είναι άκρως ενδιαφέροντα για την λειτουργία του θόλου και του κρίσιμου τόξου. Γίνεται κατανοητό ότι, τελικά, η χωρική συμπεριφορά του θόλου είναι καθοριστική για τη συμπεριφορά του τόξου, και συνεπώς δεν μπορεί να προσομοιωθεί όταν το τόξο αυτό λειτουργεί μεμονωμένα. Σε αυτό πολύ μεγάλο ρόλο παίζει η καμπυλότητα του θόλου η οποία εκφράζεται και προς τις δύο κατευθύνσεις, αλλά και η μη συμμετρία των φορτίσεων κατά μήκος των τεγιδών του θόλου. Δημιουργείται, επίσης, λόγω των παραπάνω, η τάση σε ολόκληρο το φορέα του θόλου να εμφανίσει στροφή εκτός επιπέδου των τόξων η οποία τελικά παρεμποδίζεται από τα ζεύγη δυνάμεων που εμφανίζονται στο 6° και 9° τόξο. Είναι, λοιπόν, αδύνατο η συμπεριφορά αυτή να προσομοιωθεί και να εξεταστεί σε μοντέλο όπου ένα από τα τόξα, πόσο μάλλον αυτό που αστοχεί πρώτο, λειτουργεί μεμονωμένα.

7 ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΟΞΟΥ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται, μέσω λεπτομερέστερων μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων, έλεγχος για τις στηρίξεις των τόξων. Η στήριξη που εξετάζεται είναι αυτή που αστοχεί πρώτη, δηλαδή για τον μικρότερο φορτικό συντελεστή, σύμφωνα με τις αναλύσεις του τρίτου, τέταρτου και πέμπτου κεφαλαίου. Υπενθυμίζεται ότι στα αποτελέσματα του τέταρτου κεφαλαίου όπου οι προσομοιώσεις για τα τόξα γίνονται με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία δοκού, η πρώτη διαρροή για τη στήριξη αυτή φαίνεται για φορτικό συντελεστή $\lambda=1,83$ στις αναλύσεις οι οποίες γίνονται για συνδυασμό φόρτισης Οριακής Κατάστασης Αστοχίας. Στο πέμπτο κεφάλαιο όπου η προσομοίωση των τόξων γίνεται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, η πρώτη διαρροή της στήριξης εμφανίζεται για φορτικό συντελεστή $\lambda=1,44$. Και στις δύο περιπτώσεις, όπως προαναφέρθηκε, η στήριξη αυτή είναι το σημείο του θόλου στο οποίο παρατηρείται η πρώτη διαρροή, όμως ο φορέας παρουσιάζει συνολικά μεγάλη μετελαστική αντοχή, πέραν του σημείου πλαστικοποίησης της διατομής της στήριξης. Η μετελαστική αντοχή αυτή που παρατηρείται οφείλεται στο γεγονός ότι ο δομικός χάλυβας που έχει χρησιμοποιηθεί παρουσιάζει κράτυνση, αλλά και στην υπερστατικότητα του φορέα που δίνει την δυνατότητα ανακατανομής των τάσεων και επιτρέπει την περαιτέρω αύξηση του φορτικού συντελεστή.

Αρχικά στο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η γεωμετρία της σύνδεσης, το πώς δηλαδή στηρίχθηκαν τα τόξα πάνω στη βάση σκυροδέματος, με την βοήθεια παραπάνω ελασμάτων και νευρώσεων που τοποθετήθηκαν. Περιγράφονται επίσης οι κοχλίες που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνδεση αυτή αλλά και ο τρόπος με τον οποίο ενώθηκαν οι νευρώσεις και τα ελάσματα με το κύριο τόξο. Στη συνέχεια, εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο προσομοιώθηκε η σύνδεση αυτή στο λογισμικό ADINA, ώστε να γίνουν οι μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις.

Ακολούθως παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων που έγιναν για τη στήριξη. Οι αναλύσεις που έγιναν για το μοντέλο της στήριξης, είναι μη γραμμικές με θεώρηση μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού (GMNA). Οι υπόλοιπες αναλύσεις που θα μπορούσαν να γίνουν εδώ όπως η GNA και LBA δεν έχουν κανένα ιδιαίτερο νόημα, καθώς στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου διερευνάται η συνολική αντοχή της στήριξης, και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι δύο μορφές μη γραμμικότητας. Τα αποτελέσματα φαίνονται με τη μορφή εικόνων της κατανομής των τάσεων, των σημείων διαρροής του υλικού και των παραμορφώσεων σε ολόκληρο το μοντέλο της στήριξης. Παρουσιάζονται, επίσης, δρόμοι ισορροπίας για σημεία του μοντέλου που εμφανίζουν ενδιαφέρον. Τέλος εξάγονται συμπεράσματα, με τη βοήθεια των παραπάνω αποτελεσμάτων, για τη

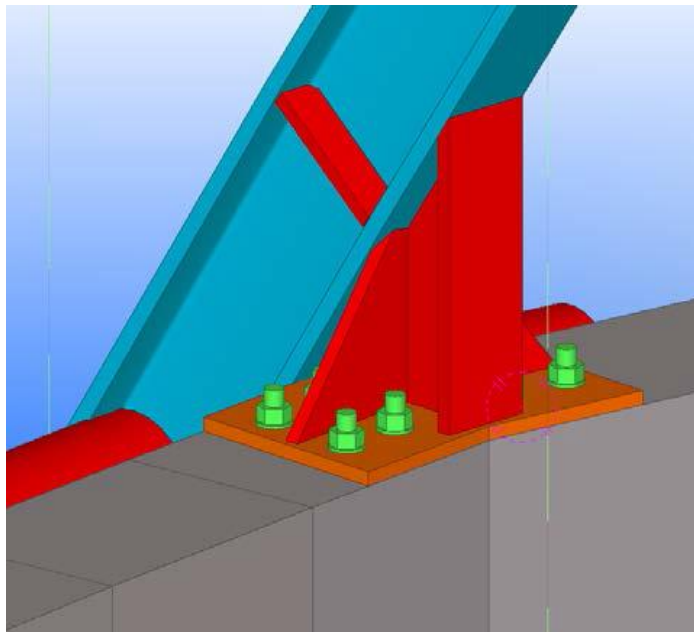
Σύγκριση κανονιστικής προσέγγισης και μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων για το σχεδιασμό χαλύβδινου θόλου ελεύθερης μορφής

συμπεριφορά της στήριξης, και περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο τελικά κατασκευάστηκε η στήριξη στο πραγματικό έργο, οι διαφορές με το μοντέλο που εξετάστηκε και για ποιο λόγο έγιναν οι αλλαγές αυτές.

7.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΑ ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ

7.2.1 Γεωμετρία της στήριξης

Το τόξο στηρίζεται στην πλάκα σκυροδέματος που βρίσκεται στη κορυφή του κτιρίου "The Oval". Στη στήριξη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-1, υπάρχει ένα οριζόντιο έλασμα πάχους $t=20\text{mm}$, το οποίο έρχεται σε επαφή με τη πλάκα του σκυροδέματος. Η σύνδεση αυτή γίνεται με τη βοήθεια οκτώ κοχλιών τύπου M27 και ποιότητας 8.8 με προένταση. Στο οριζόντιο έλασμα αυτό έχει τοποθετηθεί κοντό μεταλλικό υποστυλώμα μέσω συγκόλλησης, πάνω στο οποίο στηρίζεται το τόξο. Η στήριξη επίσης ενισχύεται και με την ύπαρξη τριγωνικών ελασμάτων που τοποθετούνται εκατέρωθεν του κοντού υποστυλώματος. Τέλος έχουν τοποθετηθεί ελάσματα τα οποία λειτουργούν ως νευρώσεις για το κορμό και τα πέλματα του διπλού ταυ του τόξου. Όλα τα παραπάνω ελάσματα που αναφέρθηκαν είναι πάχους $t=20\text{mm}$. Παρατηρείται ότι το τόξο συνεχίζει να εκτείνεται για μικρό μήκος κάτω από τη στήριξη, το μέρος αυτού του τόξου όμως δεν φέρει φορτία.



Εικόνα 7-1: Σχέδιο στήριξης εσωτερικού τόξου

7.2.2 Χαρακτηριστικά στοιχεία κοχλιών

Όπως αναφέρθηκε, οι κοχλίες που χρησιμοποιούνται είναι τύπου M27 και ποιότητας 8.8 με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται στον Πίνακα 7-1, ενώ για τις μη γραμμικές αναλύσεις που εκτελέστηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού ADINA, χρειάστηκε να υπολογιστεί η δύναμη προέντασης μέσω του τύπου (7-1) που ορίζεται από τους κανόνες του Ευρωκώδικα. Η δύναμη της προέντασης του κάθε κοχλία υπολογίστηκε στα 257.04KN.

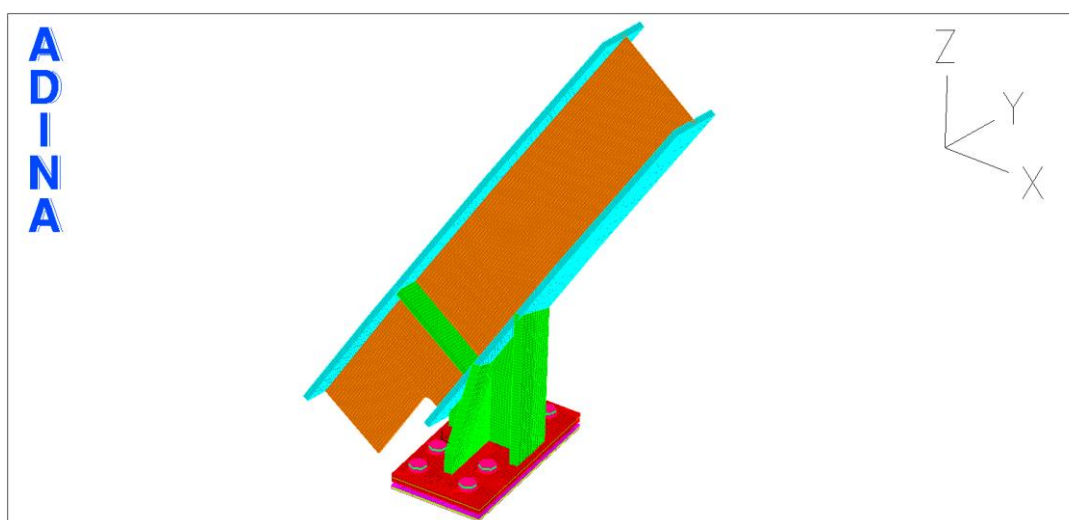
$$F_{p,c}=0,7 \times f_{ub} \times A_s \quad (7-1)$$

Πίνακας 7-1: Χαρακτηριστικά στοιχεία κοχλιών

8 M27			8.8	
#	8		$f_{yb} =$	64 kN/cm ²
d=	27	mm	$f_{ub} =$	80 kN/cm ²
do=	30	mm		
dm=	43.10	mm		
A=	5.73	cm ²		
As=	4.59	cm ²		

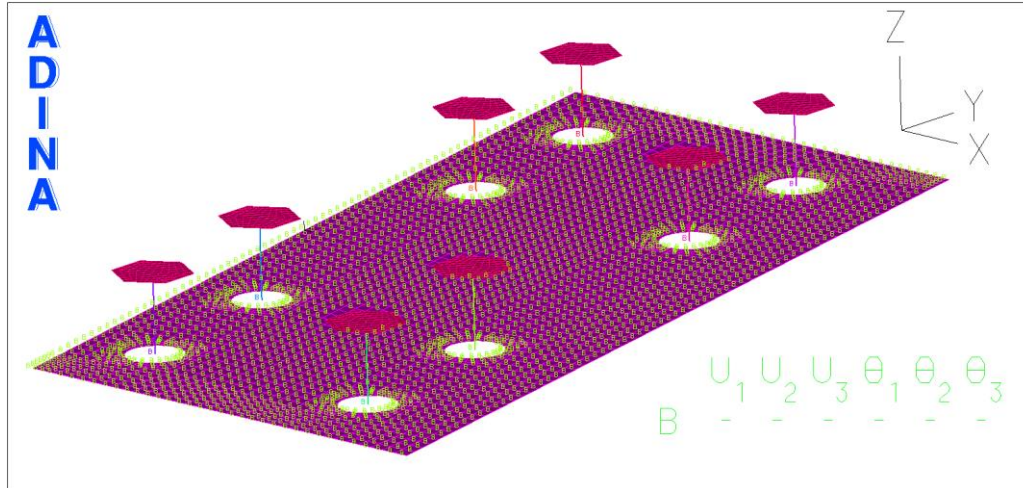
7.2.3 Προσομοίωση μοντέλου με χρήση λογισμικών

Αρχικά για τη προσομοίωση του μοντέλου της στήριξης έγινε επεξεργασία της γεωμετρίας στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD. Η ανάγκη να προσομοιωθεί το μοντέλο με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων, απαιτούσε την επεξεργασία της τρισδιάστατης γεωμετρίας του σχεδίου της στήριξης με την μετατροπή των στερεών στοιχείων σε μέσες επιφάνειες. Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία αυτή, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό FEMAP για τη δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων επιφανειακών στοιχείων σε κάθε επιφάνεια. Δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε τα στοιχεία αυτά να είναι κατά το μεγαλύτερο δυνατό βαθμό τετραγωνικού σχήματος, κάτι που θα βοηθούσε στη σύγκλιση των αλγορίθμων των αναλύσεων που θα γίνονταν σε επόμενο στάδιο στο λογισμικό ADINA. Επίσης ελέγχθηκαν τα μέλη τα οποία ενώνονται μεταξύ τους, έτσι ώστε να έχουν κοινούς κόμβους στα σημεία ένωσης. Στη συνέχεια το μοντέλο περάστηκε με τη μορφή Nastran στο λογισμικό ADINA, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-2, και οι υπόλοιπες ρυθμίσεις για σωστή προσομοίωση του μοντέλου συνεχίστηκαν σε αυτό το λογισμικό.



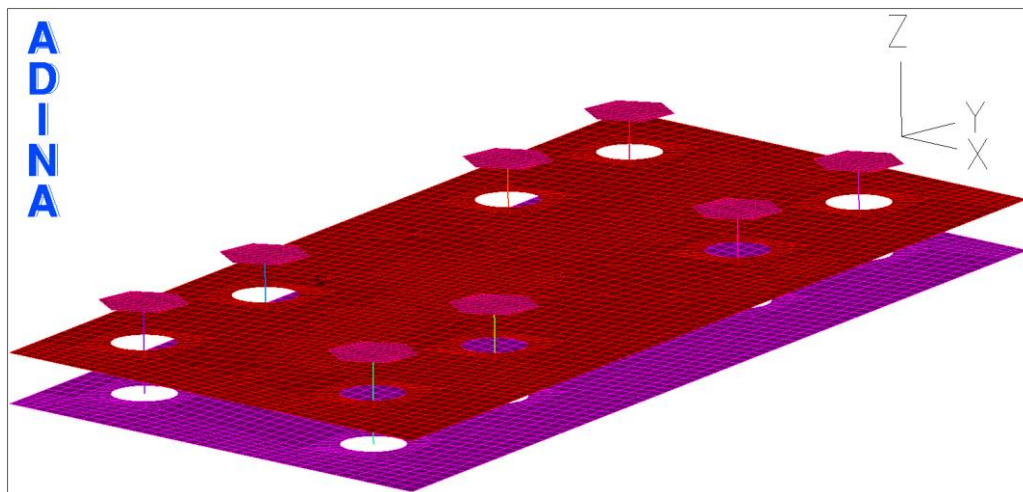
Εικόνα 7-2: Προσομοίωμα μοντέλου στήριξης στο λογισμικό ADINA

Το κατώτερο οριζόντιο έλασμα που παρατηρείται στο μοντέλο προσομοίωσης της στήριξης, είναι αυτό που τοποθετείται εντός του σκυροδέματος, και γι' αυτό το λόγο δεσμεύεται με πάκτωση, η οποία εφαρμόζεται σε όλους τους κόμβους της. Επίσης με πακτώσεις στηρίζονται στο κατώτερο κόμβο τους οι κορμοί των κοχλιών, οι οποίοι έχουν προσομοιωθεί με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία δοκού.



Εικόνα 7-3: Πακτωμένο οριζόντιο έλασμα (εντός σκυροδέματος) και κοχλίες

Προσομοιάστηκαν, επίσης, οι επαφές οι οποίες θα δημιουργούνται στον μοντέλο. Ήταν απαραίτητο να οριστούν μέσω του λογισμικού ADINA, επιφάνειες επαφής, οι οποίες αποτελούνται από το οριζόντιο έλασμα που βρίσκεται άνω του σκυροδέματος, το οριζόντιο έλασμα που βρίσκεται εντός του σκυροδέματος και είναι πακτωμένο και των περικοχλίων όπως φαίνονται στην Εικόνα 7-4. Η πρώτη επαφή που ορίστηκε με βάση τις επιφάνειες αυτές, είναι μεταξύ των δύο οριζοντίων ελασμάτων, που ουσιαστικά, μιας και το κάτω οριζόντιο έλασμα έχει πακτωθεί πλήρως, προσομοιάζει την επαφή του πάνω οριζοντίου ελάσματος με το σκυρόδεμα. Η δεύτερη επαφή είναι μεταξύ του άνω οριζοντίου ελάσματος, που βρίσκεται πάνω στο σκυρόδεμα, με τα περικόχλια των κοχλιών M27.

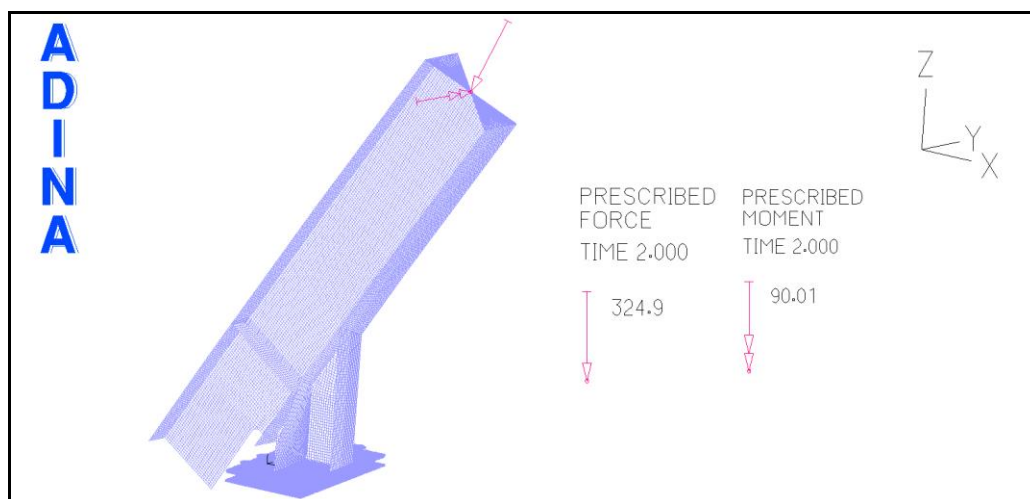


Εικόνα 7-4: Επιφάνειες επαφής στο μοντέλο της στήριξης

Σε αυτό το σημείο, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, η προσομοίωση των κορμών των κοχλιών έχει γίνει στη περίπτωση αυτή με χρήση ραβδωτών πεπερασμένων στοιχείων, αλλά αυτού του είδους η προσομοίωση δεν θεωρείται πάντα επαρκής. Στη περίπτωση της στήριξης που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο, οι διατμητικές δυνάμεις που λαμβάνουν οι κοχλίες είναι ελάχιστες, κάτι που σημαίνει ότι η

προσομοίωση με ραβδωτά στοιχεία για τον κορμό επαρκεί. Αντίθετα, αν υπάρχουν μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις σε κάποια στήριξη οι οποίες ασκούν διατμητικές δυνάμεις στους κοχλίες, τότε πρέπει οι κορμοί τους να προσομοιάζονται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, ή σαν στερεά μέλη, έτσι ώστε να γίνεται αντιληπτή από το λογισμικό η διατμητική επαφή των κορμών των κοχλιών με τα οριζόντια ελάσματα, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν κρίσιμες περιπτώσεις αστοχίας είναι άλλες, όπως η σύνθλιψη άντιγας ή η διατμητική αστοχία του κορμού του κοχλία.

Οι φορτίσεις που ασκήθηκαν, ώστε να ελέγχει η στήριξη, εξήχθησαν από το μοντέλο ολόκληρου του θόλου και είναι τα εντατικά μεγέθη που ασκούνται για το αντίστοιχο σημείο της κρίσιμης ανατολικής στήριξης του 9^{ου} τόξου. Όπως φαίνεται από την Εικόνα 7-5, τα μεγαλύτερα σε τιμή εντατικά μεγέθη που ασκούνται στο τόξο και τοποθετήθηκαν σαν φορτίσεις στο μοντέλο της στήριξης είναι η θλιπτική αξονική δύναμη, οι διατμητικές δυνάμεις και η κάμψη κατά τον κύριο άξονα. Ασκήθηκαν στο μοντέλο της στήριξης και τα υπόλοιπα εντατικά μεγέθη, όπως οι στρεπτικές ροπές και η ροπή κατά τον ασθενή άξονα, αλλά λόγω των μικρών τιμών τους, δεν αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά τη συμπεριφορά της στήριξης.



Εικόνα 7-5: Φορτίσεις για τον έλεγχο του μοντέλου στήριξης

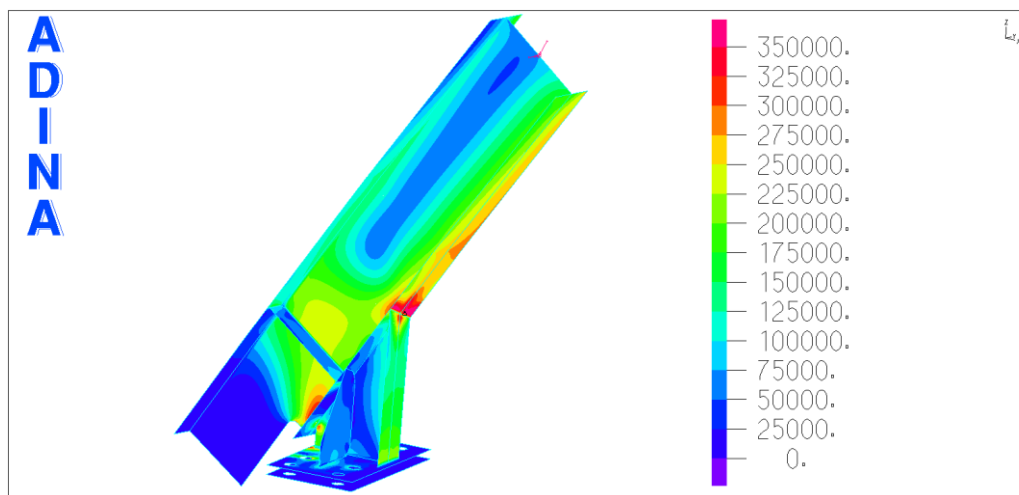
7.3 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ

Για την ανάλυση που έγινε στο μοντέλο της στήριξης, χρησιμοποιήθηκε πλαστικό διγραμμικό υλικό με κράτυνση, χάλυβας ποιότητας S355 για όλα τα μέλη της στήριξης, εκτός από τους κοχλίες. Οι κορμοί των κοχλιών, όσο και τα περικόχλια, προσομοιώθηκαν με χρήση ελαστικού χάλυβα. Τα περικόχλια έχουν μεγάλο πάχος και έτσι θεωρείται ρεαλιστική εκτίμηση η προσομοίωση με ελαστικό χάλυβα. Η ανάλυση που έγινε είναι μη γραμμική με θεώρηση μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού (GMNA), γιατί αναζητείται η πραγματική αντοχή του μοντέλου. Είναι λογικό, λόγω των πολλών εξασφαλίσεων που υπάρχουν στο μοντέλο, με την παρουσία του κοντού υποστυλώματος αλλά και των κάθετων τριγωνικών ελασμάτων και των νευρώσεων, να γίνεται η εκτίμηση ότι κρίσιμη θα είναι η αστοχία του υλικού σε κάποιο σημείο του και όχι κάποιος πιθανός λυγισμός. Προς επιβεβαίωση αυτού, η ανάλυση έγινε και με θεώρηση μικρών μετακινήσεων, όπου και αποδείχθηκε ότι τα αποτελέσματα ήταν ίδια με αυτή που χρησιμοποίησε θεώρηση μεγάλων μετακινήσεων. Αρχικά έγινε μια ανάλυση με μέθοδο σύγκλισης Newton-Raphson ώστε να ασκηθούν στο μοντέλο οι δυνάμεις προέκτασης των κοχλιών, για να κλείσουν κενά μεταξύ των επιφανειών και να λειτουργήσουν οι επαφές που έχουν οριστεί μεταξύ τους, χωρίς τις υπόλοιπες φορτίσεις σχεδιασμού που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Στη συνέχεια έγινε ανάλυση τύπου Collapse: arc-length, με τα φορτία σχεδιασμού να ασκούνται όπως φαίνονται στην

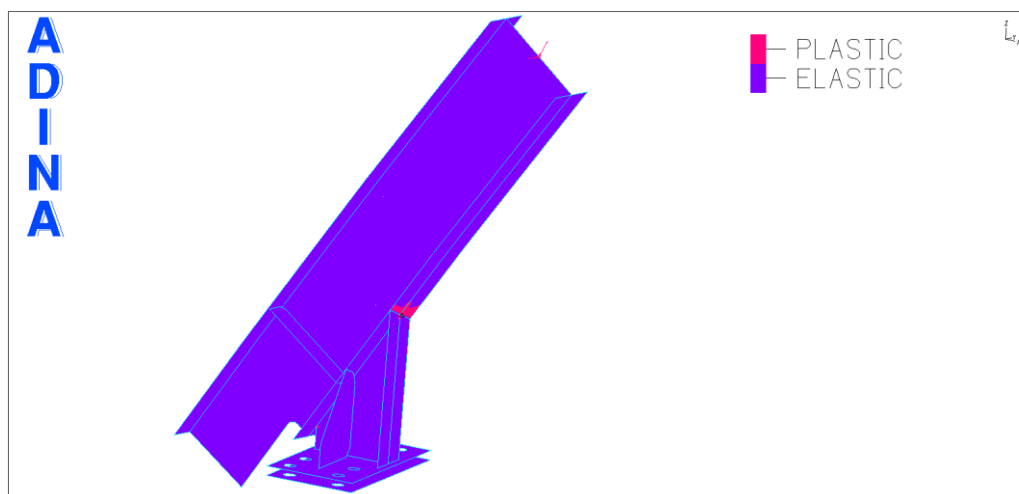
Εικόνα 7-5. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης, μαζί την ερμηνεία της συμπεριφοράς του μοντέλου παρουσιάζονται παρακάτω.

7.3.1 Αποτελέσματα μη γραμμικής ανάλυσης

Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατηρείται, όπως αναμενόταν, ότι η αστοχία του μοντέλου οφείλεται στη μη γραμμικότητα του υλικού. Ο φορέας φαίνεται να αστοχεί, όπως στην Εικόνα 7-8, επειδή η παραμόρφωση του υλικού, φτάνει την μέγιστη δυνατή, δηλαδή 22%. Η αστοχία αυτή παρατηρείται στο σημείο ένωσης του πέλματος του κοντού υποστυλώματος της στήριξης με το τόξο του θόλου. Στο σημείο αυτό εμφανίζεται και η πρώτη διαρροή του υλικού για μικρό φορτίο, με συντελεστή φόρτισης $\lambda=1$, αλλά μιας και το μοντέλο παρουσιάζει μετελαστική αντοχή, επιτρέπεται αυτή η οριακή εκμετάλλευση του υλικού του. Για αυτή φόρτιση, σε αυτό το σημείο, ο χάλυβας, φτάνει την τάση διαρροής του στα 355MPa, κάτι που φαίνεται και στην Εικόνα 7-6, αλλά η κράτυνση που εμφανίζει, σε συνδυασμό με την υπερστατικότητα του φορέα που επιτρέπει την ανακατανομή τάσεων, προσδίδουν στο μοντέλο τη μετελαστική αντοχή του, με αποτέλεσμα ο συντελεστής φόρτισης να αυξάνεται και πέρα από αυτό το σημείο. Στην Εικόνα 7-7 φαίνεται πιο ξεκάθαρα το σημείο αυτό του μοντέλου όπου παρατηρείται η μικρή πλαστικοποίηση του υλικού.

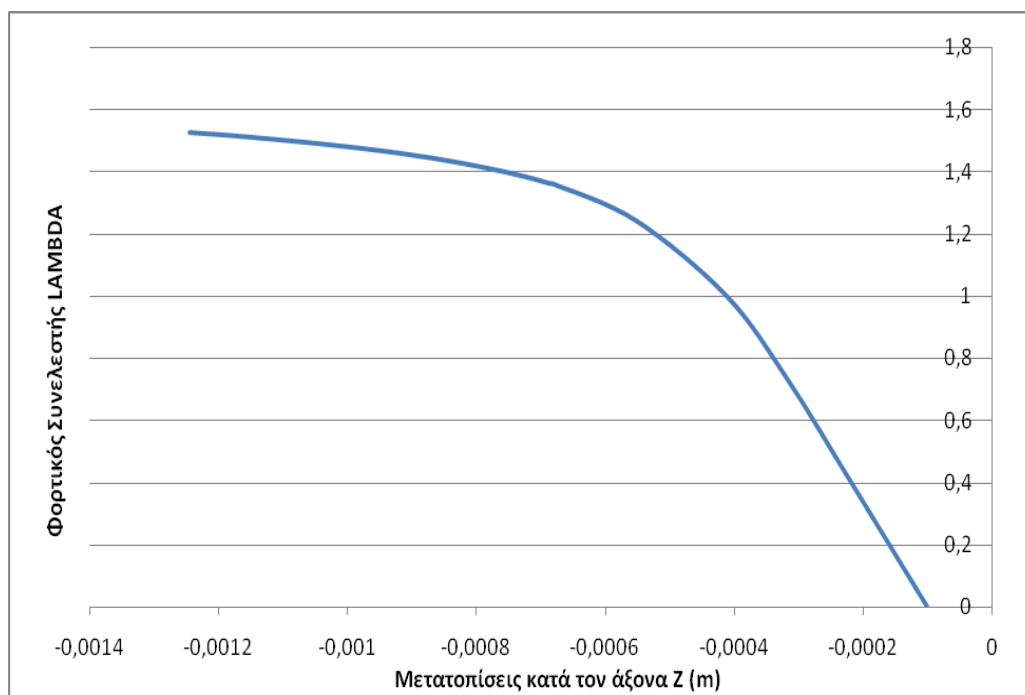


Εικόνα 7-6: Αναπτυσσόμενες τάσεις για φορτικό συντελεστή $\lambda=1,00$



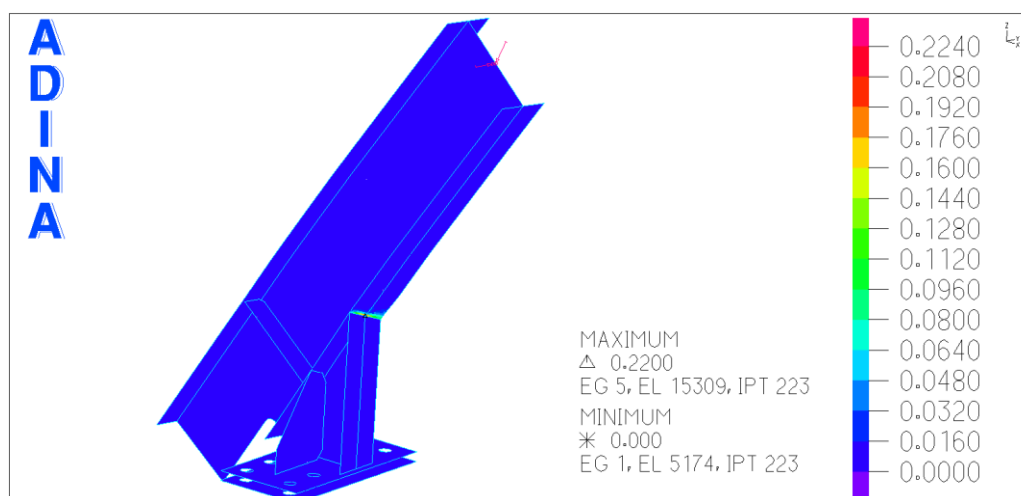
Εικόνα 7-7: Σημείο πλαστικοποίησης του μοντέλου για φορτικό συντελεστή $\lambda=1,00$

Παρακάτω παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας για το σημείο αυτό που πλαστικοποιείται πρώτο, για φορτικό συντελεστή $\lambda=1$, όπως φάνηκε παραπάνω. Παρατηρείται και επιβεβαιώνεται αυτό που αναφέρθηκε παραπάνω, το γεγονός ότι δηλαδή το μοντέλο παρουσιάζει μεταλυγισμική αντοχή. Στο παρακάτω δρόμο ισορροπίας φαίνεται ότι το σημείο αυτό που πλαστικοποιείται πρώτο, για $\lambda=1$, συνεχίζει να παρουσιάζει σχεδόν γραμμική συμπεριφορά καθώς ο φορτικός συντελεστής αυξάνεται, με τη μεγαλύτερη μείωση της δυσκαμψίας να αρχίζει να φαίνεται πιο έντονα για φορτικό συντελεστή $\lambda=1,2$ με $\lambda=1,3$. Η μη γραμμικότητα εμφανίζεται χωρίς κάποιο σημείο διακλάδωσης, αλλά εκφράζεται όπως φαίνεται ομαλά, ενώ το οριακό φορτίο όπως φαίνεται εδώ είναι για φορτικό συντελεστή $\lambda=1,53$.



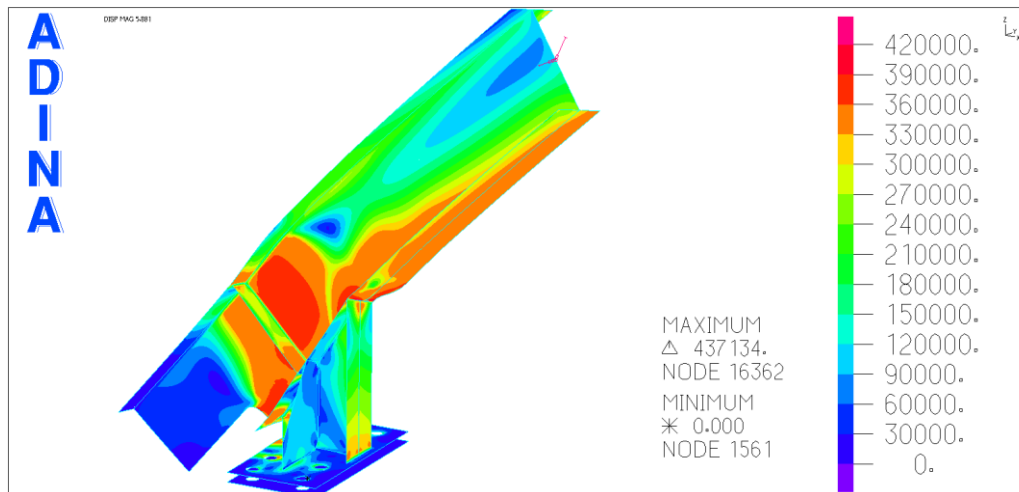
Σχήμα 7-1: Δρόμος ισορροπίας για το σημείο που διαρρέει πρώτο

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω δρόμο ισορροπίας, το μοντέλο παρουσιάζει μετελαστική αντοχή, με την οριακή φόρτιση, να είναι για φορτικό συντελεστή $\lambda=1,53$. Για αυτό το φορτίο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-8, το υλικό φτάνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη παραμόρφωση του, 22%, στο σημείο όπου ενώνεται το κοντό υποστύλωμα με το κάτω πέλμα του τόξου.

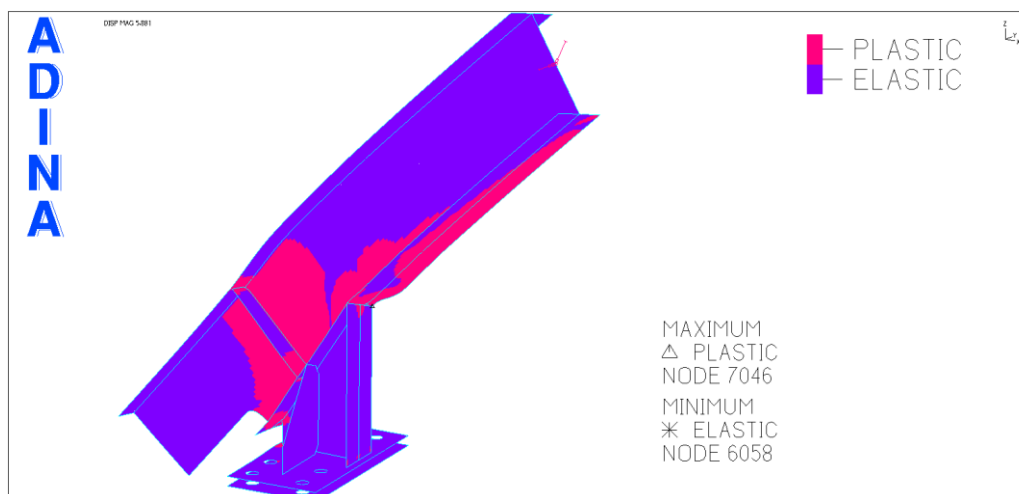


Εικόνα 7-8: Παραμορφώσεις υλικού για το οριακό φορτίο

Οι τάσεις για το οριακό φορτίο φαίνεται να έχουν αυξηθεί πέραν του ορίου διαρροής του υλικού σε μεγαλύτερο μέρος του μοντέλου, με το υλικό να φαίνεται να έχει πλαστικοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό στο κάτω πέλαμα καθώς και στον κορμό γύρω από τις νευρώσεις. Επίσης φαίνεται να έχει πλαστικοποιηθεί το υλικό σε μικρό βαθμό στα ελάσματα των νευρώσεων, αλλά και στο οριζόντιο έλασμα στα σημεία όπου αυτό ενώνεται με το κοντό υποστύλωμα.

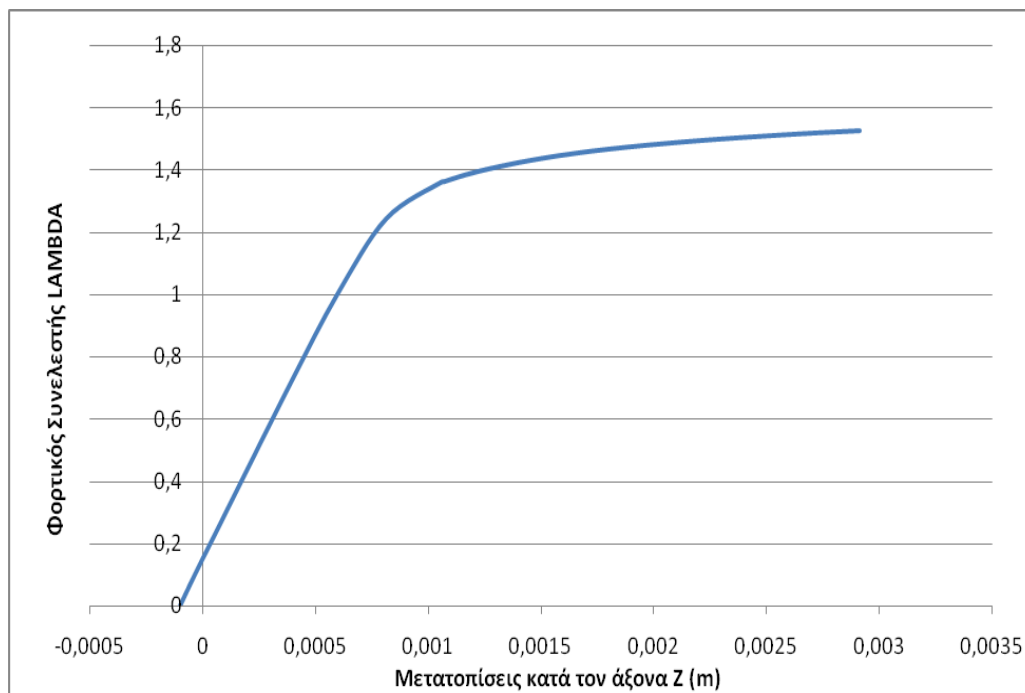


Εικόνα 7-9: Αναπτυσσόμενες τάσεις για το οριακό φορτίο



Εικόνα 7-10: Σημεία πλαστικοποίησης υλικού για το οριακό φορτίο

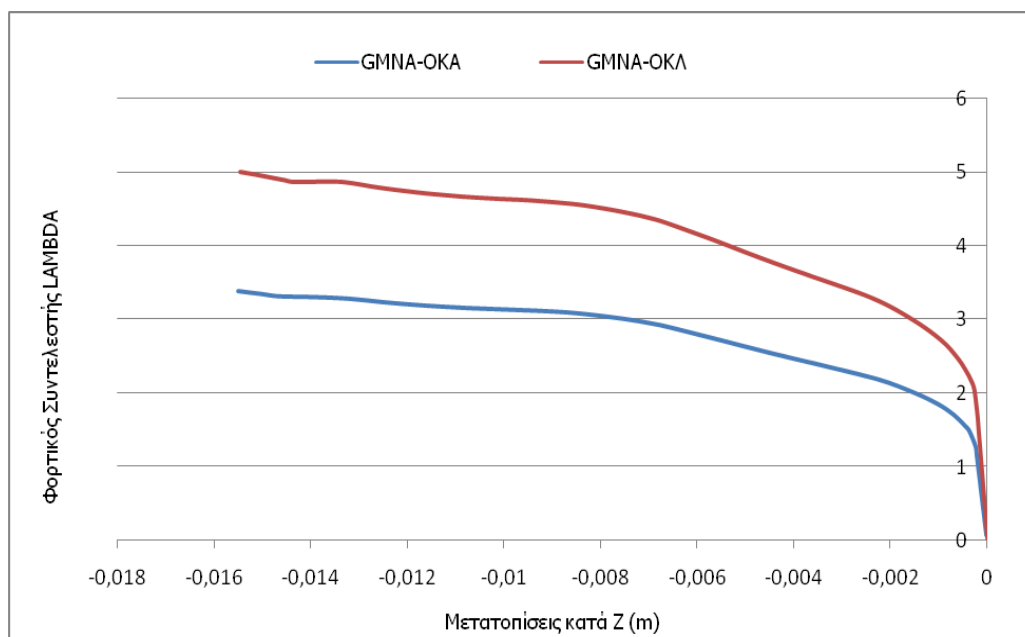
Παρακάτω, για να γίνει πιο κατανοητή η συμπεριφορά του μοντέλου, παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας σημείου του κορμού που πλαστικοποιείται στο Σχήμα 7-2. Σε αντιπαράθεση με τον δρόμο ισορροπίας που παρουσιάστηκε παραπάνω στο Σχήμα 7-1, το σημείο του κορμού, εμφανίζει γραμμική συμπεριφορά μέχρι ο φορτικός συντελεστής να φτάσει τη τιμή $\lambda=1,25$ όπου και αρχίζει να παρατηρείται σταδιακή μείωση της δυσκαμψίας, αλλά με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι στην περίπτωση του παραπάνω δρόμου ισορροπίας. Και εδώ το οριακό φορτίο είναι για φορτικό συντελεστή $\lambda=1,53$, όπου σταματάει, λογικά, η ανάλυση μιας και η παραμόρφωση του υλικού έχει φτάσει σε ένα σημείο του μοντέλου την μέγιστη τιμή της.



Σχήμα 7-2: Δρόμος ισορροπίας σημείου κορμού που πλαστικοποιείται

7.3.2 Σύγκριση με τα αποτελέσματα του θόλου και με τη πραγματική στήριξη του έργου

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, φάνηκε, ότι η λεπτομερής εξέταση της στήριξης παρουσιάζει οριακό φορτίο στη τιμή $\lambda=1,53$ λόγω αστοχίας του χάλυβα. Η μείωση της δυσκαμψίας και η διαρροή του υλικού αρχίζει να εμφανίζεται στο τόξο για φορτικό συντελεστή $\lambda=1,25$. Στις αναλύσεις του θόλου όπου η προσομοίωση των τόξων έχει γίνει με επιφανειακά στοιχεία η στήριξη των τόξων έχει προσομοιωθεί με απλή πάκτωση όλων των κόμβων της τελευταίας διατομής και η συμπεριφορά της φαίνεται από το δρόμο ισορροπίας που φαίνεται παρακάτω, και έχει παρουσιαστεί και στο Κεφάλαιο 5.



Σχήμα 5-3: Δρόμος ισορροπίας, μετατοπίσεις κατά τον άξονα Z, ανατολική στήριξη 9ου τόξου, Προσομοίωμα ολόκληρου θόλου, επιφανειακά στοιχεία

Στη περίπτωση του μοντέλου ολόκληρου του θόλου, παρατηρείται ότι, για φορτίσεις της Οριακής Κατάστασης Αστοχίας, η αστοχία του υλικού παρατηρείται για $\lambda=1,4$ το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι κοντά στα αποτελέσματα διαρροής για τη λεπτομερή ανάλυση της στήριξης που διαρρέει για φορτίο $\lambda=1,25$. Η μεγάλη διαφορά με το μοντέλο του θόλου έγκειται στο τελικό οριακό φορτίο. Και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει μετελαστική συμπεριφορά, στην οποία οφείλεται ο ανοδικός δευτερεύων κλάδος, με το οριακό φορτίο όμως του μοντέλου στήριξης να είναι πολύ μικρότερο. Το οριακό φορτίο της στήριξης αυτής μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει και τη συνολική αντοχή ολόκληρου του θόλου.

Είναι πολύ σημαντικό, να αναφερθεί, ότι η προσομοίωση της στήριξης έτσι όπως γίνεται στο κεφάλαιο αυτό αποτελεί μια αρκετά συντηρητική προσέγγιση για τον προσδιορισμό της αντοχής της. Αυτό συμβαίνει, καθώς, στο προσομοίωμα δεν έχουν προστεθεί κάποια κομβοελάσματα, τα οποία χρησιμεύουν για την σύνδεση των τόξων με τους διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας. Επίσης κατά τη τελική μελέτη του έργου, προστέθηκε στη γεωμετρία του θόλου μια κεφαλοδοκός η οποία θα βρίσκεται στις βάσεις του. Η κεφαλοδοκός αυτή δεν έχει ληφθεί υπόψη στα πλαίσια της εργασίας αυτής σε κανένα μοντέλο του θόλου, αλλά αξίζει ιδιαίτερης αναφοράς σε αυτό το σημείο καθώς τα κομβοελάσματα που χρησιμοποιούνται για την ένωση της με τα τόξα, μπορούν να αυξήσουν την αντοχή της στήριξης. Τα κομβοελάσματα αυτά εκτός της προφανής χρησιμότητάς τους για τις συνδέσεις μπορούν να λειτουργήσουν παράλληλα και ως νευρώσεις πάνω στο τόξο, παραλαμβάνοντας έτσι αυξημένες τοπικές εντάσεις και αυξάνοντας ουσιαστικά την αντοχή της στήριξης και συνεπώς ολόκληρου του θόλου. Η παρακάτω Εικόνα 7-11, από το πραγματικό έργο, δείχνει τον τρόπο με τον οποίο τελικά έγινε η στήριξη αυτή των τόξων.



Εικόνα 7-11: Στήριξη τόξου

7.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρών κεφάλαιο εξετάζεται η αντοχή της στήριξης ενός από τα τόξα του θόλου. Συγκεκριμένα, η στήριξη που ελέγχεται είναι η ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου του θόλου, η οποία από τις αναλύσεις για ολόκληρο το μοντέλο του θόλου παρουσιάστηκε ως η πιο κρίσιμη. Αρχικά παρουσιάζεται στο κεφάλαιο η γεωμετρία της στήριξης με τα μέλη από τα οποία αποτελείται αλλά και τα χαρακτηριστικά των κοχλιών που χρησιμοποιήθηκαν. Εν συνεχεία, γίνεται περιγραφή του τρόπου με τον οποίο έγινε η προσομοίωση του μοντέλου της στήριξης για το λογισμικό ADINA. Εκτός του ADINA τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν το AutoCAD για τη επεξεργασία της γεωμετρίας και το FEMAP για τη δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων.

Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από το λογισμικό ADINA, για τις μη γραμμικές αναλύσεις που έγιναν στο μοντέλο. Οι φορτίσεις που ασκήθηκαν στο τόξο του μοντέλου στήριξης, είναι σύμφωνα με τα εντατικά μεγέθη που ασκούνται στο αντίστοιχο σημείο του τόξου στο μοντέλο ολόκληρου του θόλου, για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας. Παρατηρείται ότι η αστοχία της στήριξης συμβαίνει λόγω υλικού, του οποίου η πρώτη διαρροή εμφανίζεται στο σημείο ένωσης του πέλματος του κοντού υποστυλώματος με το τόξο. Το μοντέλο παρουσιάζει μετελαστική αντοχή με το δευτερεύοντα κλάδο των δρόμων ισορροπίας να είναι ανοδικός. Το κρίσιμο φορτίο για το οποίο η στήριξη αστοχεί είναι για φορτικό συντελεστή $\lambda=1,53$, όπου στο σημείο που ενώνεται το κοντό υποστυλώμα με το τόξο, η παραμόρφωση του υλικού φτάνει τη μέγιστη δυνατή τιμή της, δηλαδή 22%. Τέλος, τα αποτελέσματα αυτά συγκρίθηκαν με αυτά ολόκληρου του θόλου, όπου το οριακό φορτίο είναι μεγαλύτερο, παρότι η διαρροή της στήριξης στο μοντέλο του θόλου γίνεται σε πλησίον φορτίο με αυτό του μοντέλου της στήριξης. Αυτό συμβαίνει γιατί ο τρόπος προσομοίωσης της στήριξης στο μοντέλο ολόκληρου του θόλου, που έγινε με ποιο απλό τρόπο και όχι τόσο ρεαλιστικό, δεν δίνει τις μεγάλες παραμορφώσεις για τόσο χαμηλούς φορτικούς συντελεστές. Έγινε, επίσης, σύγκριση του προσομοιώματος της στήριξης με το πώς έγινε η στήριξη αυτή στο πραγματικό έργο, η οποία οδήγησε στο συμπέρασμα ότι ο έλεγχος ο οποίος έχει γίνει σε αυτό το κεφάλαιο μπορεί να χαρακτηριστεί ως συντηρητικός.

8 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολήθηκε με τον σχεδιασμό χαλύβδινου θόλου ελεύθερης μορφής. Ο θόλος αποτελεί μέρος του, εν εξελίξει, κατασκευαστικού έργου "The Oval" στη Λεμεσό της Κύπρου. Σκοπός της εργασίας είναι ο σχεδιασμός του θόλου με κανονιστικές μεθόδους και εν συνεχεία με μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις και σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο αυτών μεθόδων. Επιπλέον γίνονται κάποιες λεπτομερέστερες διερευνήσεις για την συμπεριφορά του κρίσιμου τόξου, όταν αυτό λειτουργεί μεμονωμένα, εκτός δηλαδή του θόλου. Γίνεται, τέλος, έλεγχος της ακριβούς προσομοίωσης της στήριξης του κρίσιμου τόξου, ώστε να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η πραγματική αντοχή της, και κατά συνέπεια και του θόλου.

Αρχικά, στο πρώτο κεφάλαιο, δίνονται με λίγα λόγια πληροφορίες για το "The Oval", του οποίου μέρος είναι ο προς εξέταση χαλύβδινος θόλος. Το κτίριο αυτό, του οποίου η κατασκευή αναμένεται να ολοκληρωθεί τον Μάρτιο του 2017, οφείλει το όνομα του, αλλά και τον ιδιαίτερο αρχιτεκτονικό σχεδιασμό του, στην οβάλ σχήματος επένδυση του. Ο θόλος βρίσκεται στην κορυφή του σκελετού του κτιρίου και αποτελεί μέρος της στήριξης της οβάλ επένδυσης. Η γεωμετρία του θόλου παρουσιάζεται αναλυτικά στο δεύτερο κεφάλαιο και αποτελείται από δέκα τόξα διατομής διπλού ταυ, τις τεγίδες και τους διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή και μελέτη του θόλου είναι ο δομικός χαβάζ ποιότητας S355, αλλά και ο χάλυβας ποιότητας 8.8 για τους κοχλίες και τα αγκύρια. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα φορτία τα οποία είναι δυνατόν να ασκηθούν στο φορέα, συγκεκριμένα, τα μόνιμα φορτία από το ίδιο βάρος του δομικού χάλυβα και από το ίδιο βάρος της επένδυσης του κτιρίου, τα φορτία ανέμου, τα σεισμικά φορτία αλλά και τα φορτία λόγω διαδικασιών καθαρισμού της επένδυσης του θόλου. Κρίθηκε ότι ο πιο κρίσιμος συνδυασμός φόρτισης είναι για το σενάριο που τα φορτία ανέμου ασκούν πιέσεις στο ένα μισό του φορέα και αναρρόφηση στο υπόλοιπο μισό, σε συνδυασμό με τα μόνιμα φορτία, ενώ τα φορτία καθαρισμού αλλά και τα σεισμικά φορτία δεν μπορούν να συνδυαστούν με αυτά του ανέμου. Αυτός ο κρίσιμος συνδυασμός φόρτισης χρησιμοποιήθηκε για τις μη γραμμικές αριθμητικές αναλύσεις στο θόλο στις περιπτώσεις Οριακής Κατάστασης Αστοχίας και Λειτουργικότητας.

Ο κανονιστικός σχεδιασμός ο οποίος έγινε μέσω του λογισμικού SAP2000, έδωσε τον βαθμό αξιοποίησης του κάθε μέλους για συνδυασμούς φορτίσεων στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας, ο οποίος υπολογίστηκε μέσω σχέσεων αλληλεπίδρασης που απορρέουν από τον Ευρωκώδικα 3. Οι μεγαλύτεροι βαθμοί αξιοποίησης παρατηρήθηκαν στα τόξα και ειδικότερα στις στήριξής του. Το πιο

Σύγκριση κανονιστικής προσέγγισης και μη γραμμικών αριθμητικών αναλύσεων για το σχεδιασμό χαλύβδινου θόλου ελεύθερης μορφής

κρίσιμο σημείο του θόλου, κατά τον κανονιστικό σχεδιασμό αποδείχθηκε ότι είναι η ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου, όπου ο βαθμός αξιοποίησης έχει τιμή 0,931. Παρουσιάστηκαν, επίσης, οι μέγιστες μετακινήσεις που υπολογίστηκαν για το θόλο στη περίπτωση της Οριακής Κατάστασης Λειτουργικότητας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνονται μη γραμμικές αναλύσεις για το θόλο, με τη προσομοίωση των τόξων να γίνεται με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία δοκού. Το λογισμικό ADINA που χρησιμοποιήθηκε, δίνει την δυνατότητα στο χρήστη να κάνει τη προσομοίωση των ραβδωτών στοιχείων, όταν έχουμε να κάνουμε με μέλη διατομής διπλού ταυ, με τρεις διαφορετικούς τρόπους: Τα Standard και τα Warning ραβδωτά στοιχεία δοκού, αλλά και την προσομοίωση των στοιχείων με χρήση διαγραμμάτων ροπών καμπυλοτήτων. Στη συνέχεια στο πέμπτο κεφάλαιο έγιναν αναλύσεις όπου για τη προσομοίωση των τόξων χρησιμοποιήθηκαν επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Εκτελέστηκαν Γραμμικοποιημένες Αναλύσεις Λυγισμού (LBA), μη γραμμικές αναλύσεις με θεώρηση γεωμετρικής μη γραμμικότητας (GNA) και μη γραμμικές αναλύσεις με θεώρηση μη γραμμικότητας γεωμετρίας και υλικού (GMNA), και για τις τρεις περιπτώσεις προσομοίωσης. Εξετάστηκε, επίσης, η επιρροή των αρχικών ατελειών αλλά και των θερμοκρασιακών φορτίων που πιθανών να ασκούνται στον θόλο, στη συμπεριφορά των τόξων του. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν ώστε να γίνει εκτίμηση του ποιος από τους τρόπους προσομοίωσης είναι ιδανικότερος.

Στη συνέχεια, κρίθηκε ενδιαφέρον να εξεταστεί η συμπεριφορά του κρίσιμου τόξου, αυτού δηλαδή που παρουσιάζει για μικρότερο φορτικό συντελεστή τη πρώτη διαρροή, σε περίπτωση που λειτουργεί μεμονωμένα. Παρουσιάστηκε ο τρόπος προσομοίωσης του μεμονωμένου τόξου, ο τρόπος φόρτισής του και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μη γραμμικές αναλύσεις GMNA που έγιναν στο μοντέλο αυτό. Συγκρίθηκε η συμπεριφορά του με τη περίπτωση που το τόξο βρίσκεται εντός θόλου, παρατηρώντας ότι παρουσιάζουν διαφορές, οι οποίες και ερμηνεύτηκαν. Τέλος, εξετάζεται το μοντέλο της στήριξης ενός τόξου του θόλου. Η προσομοίωση του μοντέλου έχει γίνει με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων. Εξετάζεται και εντοπίζεται η συνολική αντοχή του μοντέλου αυτού, καθώς και η αιτία για την οποία αστοχεί. Από τη στιγμή που από στις αναλύσεις για ολόκληρο το θόλο φαίνεται ότι η ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου είναι το πρώτο σημείο το οποίο διαρρέει, με τη πιο ακριβή προσομοίωσή της είναι δυνατόν να εξαχθεί η πραγματική αντοχή ολόκληρου του φορέα. Βέβαια, όπως εξηγείται στο αντίστοιχο κεφάλαιο, τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τις αναλύσεις αυτές, μπορούν να θεωρηθούν συντηρητικές, καθώς η προσομοίωση δεν περιλαμβάνει κάποια κομβοελάσματα που τελικά τοποθετήθηκαν και χρησιμεύουν στη σύνδεση των υπόλοιπων μελών του θόλου με το τόξο κοντά στη στήριξή του.

8.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων που εκτελέστηκαν με προσομοίωση των τόξων τόσο με ραβδωτά πεπερασμένα στοιχεία δοκού όσο και με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, φαίνεται ότι το πρώτο σημείο που διαρρέει, καθώς ο φορτικός συντελεστής αυξάνεται, είναι η ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου. Όσο αυξάνει, πέραν του σημείου αυτού, ο φορτικός συντελεστής, εμφανίζεται διαρροή και στις υπόλοιπες στηρίξεις των τόξων, εκτός των ακραίων. Ο φορέας μετά από την διαρροή των στηρίξεων συνεχίζει να έχει την ικανότητα να δέχεται μεγαλύτερες φορτίσεις, κάτι που οδηγεί στην εμφάνιση στρεπτοκαμπτικού λυγισμού στην ανατολική μεριά του 9^{ου} τόξου. Παρατηρείται, ότι αυτή η συμπεριφορά του φορέα, που παρουσιάζει τη πρώτη αστοχία στην ανατολική στήριξη του 9^{ου} τόξου, συμφωνεί απολύτως με τον κανονιστικό έλεγχο, μιας και εκεί ο μεγαλύτερος βαθμός αξιοποίησης εμφανίζεται στο ίδιο σημείο.

Από τις αναλύσεις GNA και GMNA οι οποίες έγιναν για τη προσομοίωση με ραβδωτά αλλά και επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, παρατηρείται ότι η αστοχία του φορέα οφείλεται στη μη

γραμμικότητα υλικού και σε πολύ μικρό βαθμό στη γεωμετρική μη γραμμικότητα. Παρουσιάζει μάλιστα μεγάλη μετελαστική αντοχή, κάτι που γίνεται κατανοητό από τη δυνατότητα παραλαβής μεγαλύτερου φορτίου από το φορέα ακόμα και μετά από τις πρώτες διαρροές που εμφανίζονται, αλλά και τη μορφή των δρόμων ισορροπίας. Όλοι οι δρόμοι ισορροπίας που έχουν εξαχθεί για αναλύσεις οι οποίες λαμβάνουν υπόψη και τη μη γραμμικότητα υλικού, και για οποιοδήποτε σημείο του θόλου, παρουσιάζουν ανοδικό δευτερεύοντα κλάδο.

Οι αρχικές ατέλειες μπορεί να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τη μη γραμμική συμπεριφορά ενός φορέα και γι' αυτό το λόγο πρέπει να εξετάζονται. Στο μοντέλο του θόλου, έγιναν δοκιμές αναλύσεων με τη θεώρηση αρχικών ατελειών (GNIA, GMNIA) στα τόξα του φορέα, σύμφωνα με τις ιδιομορφές τους. Παρατηρήθηκε ότι όταν ο φορέας εξετάζεται μόνο με γεωμετρική μη γραμμικότητα και ελαστικό υλικό, η αρχική ατέλεια έχει ως συνέπεια την κατάργηση του σημείου διακλάδωσης και την ενοποίηση του κυρίου και του δευτερεύοντα δρόμου ισορροπίας, σε έναν, ενιαίο, καμπύλο δρόμο ισορροπίας που «εγγράφεται» στην γωνία μεταξύ του κυρίου και δευτερεύοντα δρόμου. Παρότι ο λυγισμός στην περίπτωση χρήσης ατέλειας δεν εμφανίζεται πλέον απότομα, παρατηρείται ότι η μείωση της δυσκαμψίας γίνεται ταχύτερα. Όταν ο φορέας εξετάζεται και με μη γραμμικότητα υλικού, οι ατέλειες δεν φαίνεται να επηρεάζουν καθόλου τη μορφή των δρόμων ισορροπίας, οι οποίοι όμως παρουσιάζουν λίγο μικρότερη δυσκαμψία. Η μικρή επιρροή των ατελειών στην ανάλυση GMNIA είναι αναμενόμενη, αφού όπως δείχθηκε η αστοχία του φορέα οφείλεται κυρίως στη μη γραμμικότητα υλικού. Επίσης, η συμπεριφορά των τόξων ελέγχθηκε και για την περίπτωση που σε αυτά ασκούνται θερμοκρασιακά φορτία. Όπως φάνηκε, η συμπεριφορά των τόξων δεν επηρεάζεται λόγω θερμοκρασίας. Αυτό είναι κατά ένα βαθμό αναμενόμενο, καθώς η γεωμετρία τους επιτρέπει την συστολή και διαστολή τους, χωρίς αυτή να παρεμποδίζεται και να καταλήγει σε επιπλέον καταπόνηση τους. Για τα υπόλοιπα μέλη βέβαια η επιρροή της θερμοκρασίας είναι καθοριστική, μιας και παρατηρούμε μεγάλη αύξηση των αξονικών δυνάμεων.

Ο κανονιστικός σχεδιασμός έχει γίνει με γραμμικές μεθόδους, οπότε έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις μη γραμμικές αναλύσεις. Ως γνωστών αν για ένα φορέα είναι κρίσιμη για τη συμπεριφορά του η μη γραμμικότητα υλικού ή γεωμετρίας, ο σχεδιασμός με γραμμικές μεθόδους μπορεί να οδηγήσει σε κάποια σφάλματα. Υπάρχει, λοιπόν, η ανάγκη διατύπωσης των εξισώσεων ισορροπίας στην παραμορφωμένη γεωμετρία, αλλά και η ικανότητα του υλικού να εισέρχεται στη μετελαστική περιοχή του. Συγκεκριμένα για το θόλο, η κανονιστική μελέτη έχει υποδείξει ως πιο κρίσιμα σημεία τις βάσεις των τόξων με το μεγαλύτερο βαθμό αξιοποίησης στην ανατολική βάση-στήριξη του 9^{ου} τόξου. Αυτό συμφωνεί απολύτως με τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων. Η πιο σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο τρόπων αναλύσεων είναι στη συμπεριφορά των ακραίων τόξων. Στο κανονιστικό έλεγχο, για τις στηρίξεις στα ακριανά τόξα ο βαθμός αξιοποίησης είναι αρκετά μεγάλος, ενώ στις μη γραμμικές αναλύσεις καθώς αυξάνεται ο φορτικός συντελεστής δεν φαίνεται να αστοχεί το σημείο εκείνο, και οι τάσεις που δέχεται είναι πολύ μικρές. Ο λόγος που δεν δέχεται μεγάλες τάσεις στις μη γραμμικές αναλύσεις μεγάλες τάσεις το ακραίο τόξο, είναι λόγω της στήριξής του. Όπως έχει αναφερθεί τα ακραία τόξα στηρίζονται πάνω στις μηκίδες του τελευταίου ορόφου και όχι μεμονωμένα όπως τα υπόλοιπα. Οι μηκίδες όμως, οι οποίες στηρίζονται σε σημείο πιο εσωτερικά του θόλου, κατά τις μη γραμμικές αναλύσεις κάμπτονται κοντά στο σημείο στήριξης τους με αποτέλεσμα το ακραίο τόξο να μπορεί να πάρει μετακινήσεις, και να ανακουφίζεται από τις τάσεις που θα δεχόταν σε αντίθετη περίπτωση.

Ενδιαφέροντα συμπεράσματα εξήχθηκαν και σε ό,τι αφορά τους διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης των τόξων στις μη γραμμικές αναλύσεις στο λογισμικό ADINA. Η διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων για χρήση Standard και Warping beam elements αποδείχθηκε τελικά μεγάλη σε ότι αφορά τη μη γραμμική μετελαστική συμπεριφορά του φορέα. Ενώ για φορτία σχεδιασμού, τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο περιπτώσεων είναι ταυτόσημα, για μεγαλύτερους φορτικούς

συντελεστές, τα Warping στοιχεία φάνηκε να δίνουν τη δυνατότητα στο θόλο για μεγαλύτερες μετακινήσεις αλλά και μεγαλύτερη μετελαστική αντοχή. Έτσι είναι φανερό ότι η χρήση των Warping στοιχείων αποδεικνύεται καταλληλότερη σε τέτοιες περιπτώσεις, κάτι που συμφωνεί και με τη προτροπή για χρήση των στοιχείων αυτών και από το ίδιο το λογισμικό. Η χρήση στοιχείων με ορισμό διαγραμμάτων ροπών-καμπυλότητας έγινε με σκοπό να φανεί ο βαθμός στον οποίο επηρεάζουν τη συμπεριφορά του φορέα οι στροφές των διατομών, μιας και στη περίπτωση αυτή οι στροφές έχουν σχεδόν δεσμευτεί. Αναμενόμενα σε αυτή τη περίπτωση προσομοίωσης τα αποτελέσματα απείχαν πολύ από τις άλλες δύο, δίνοντας μας να καταλάβουμε ότι η στρεπτική ικανότητα των διατομών είναι κρίσιμη για το φορέα.

Γενικά η προσομοίωση με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία θεωρείται ακριβέστερη. Αυτό οφείλεται, ανάμεσα και σε άλλους λόγους, στο γεγονός ότι η εξάπλωση της πλαστικοποίησης του υλικού σε κάθε διατομή γίνεται πιο ομαλά, αλλά και στο γεγονός ότι οι παραμορφώσεις του υλικού προσομοιάζονται με καλύτερο τρόπο. Επίσης, στο θόλο που εξετάζεται, όταν γίνεται χρήση επιφανειακών στοιχείων, δίνεται η δυνατότητα να γίνει καλύτερη προσομοίωση των συνδέσεων τεγιδών και διαγώνιων συνδέσμων με τα τόξα που προσφέρουν κάποια στρεπτική εξασφάλιση στα τόξα, η οποία δεν μπορούσε να προσομοιωθεί στις περιπτώσεις όπου έγινε χρήση beam elements. Έτσι οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται για τις μη γραμμικές αναλύσεις οι οποίες λαμβάνουν υπόψη μόνον τη γεωμετρική μη γραμμικότητα, με το μοντέλο με τα επιφανειακά στοιχεία να εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή. Στις αναλύσεις όμως οι οποίες λαμβάνουν υπόψη και τη μη γραμμικότητα υλικού, είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικό το γεγονός ότι τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά με αυτά του μοντέλου με τα ραβδωτά στοιχεία δοκού.

Οι αναλύσεις που έγιναν στο μοντέλο του μεμονωμένου τόξου, που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 6, έδωσαν αποτελέσματα τα οποία αναδεικνύουν διαφορετική τη συμπεριφορά του σε σχέση με τη συμπεριφορά του τόξου όταν αυτό βρίσκεται και λειτουργεί εντός του θόλου. Γίνεται κατανοητό ότι, τελικά, η χωρική συμπεριφορά του θόλου είναι καθοριστική για τη συμπεριφορά του τόξου, και συνεπώς δεν μπορεί να προσομοιωθεί όταν το τόξο αυτό λειτουργεί μεμονωμένα. Σε αυτό πολύ μεγάλο ρόλο παίζει η καμπυλότητα του θόλου η οποία εκφράζεται και προς τις δύο κατευθύνσεις, αλλά και η μη συμμετρία των φορτίσεων κατά μήκος των τεγιδών του θόλου. Δημιουργείται, επίσης, λόγω των παραπάνω, η τάση σε ολόκληρο το φορέα του θόλου να εμφανίσει στρόφη ολόκληρος εκτός επιπέδου των τόξων η οποία τελικά παρεμποδίζεται από τα ζεύγη δυνάμεων που εμφανίζονται στο 6° και 9° τόξο. Είναι, λοιπόν, αδύνατο η συμπεριφορά αυτή να προσομοιωθεί και να εξεταστεί σε μοντέλο όπου ένα από τα τόξα, πόσο μάλλον αυτό που αστοχεί πρώτο, λειτουργεί μεμονωμένα. Στο τελευταίο κεφάλαιο, εξετάστηκε η αντοχή του μοντέλου της στήριξης, η οποία, αν και ο έλεγχος γίνεται συντηρητικά, αποτελεί την συνολική αντοχή του θόλου.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <http://mycourses.ntua.gr/>, Γαντές Χ., "Σημειώσεις Μαθήματος Μη γραμμική Συμπεριφορά Μεταλλικών Κατασκευών"
- [2] <http://mycourses.ntua.gr/>, Γαντές Χ., "Παρουσιάσεις Μαθήματος Μη γραμμική Συμπεριφορά Μεταλλικών Κατασκευών"
- [3] Ιωάννης Κ. Βάγιας, Ιωάννης Χ. Ερμόπουλος, Γεώργιος Ι. Ιωαννίδης, 2013, "Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα με Παραδείγματα Εφαρμογής", Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- [4] Κουνάδης Α., 2004, "Μη γραμμική θεωρία Ελαστικής Ευστάθειας", Εκδόσεις Συμεών
- [5] Ιωάννης Κ. Βάγιας, 2003, "Σιδηρές Κατασκευές, Ανάλυση και διαστασιολόγηση", Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- [6] <http://www.cybarco.com/theoval>
- [7] Μ. Παπαδρακάκης, "Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, Ελλάδα, 2001.
- [8] ADINA R & D Inc. (2006), "Theory and Modeling Guide Volume I: ADINA"
- [9] ADINA R & D Inc. (2006), "ADINA Primer"
- [10] Eurocode-EN1990:2002, "Basis of structural design"
- [11] Eurocode 1-EN1991-Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings
- [12] Eurocode 1-EN1991-Actions on structures - Part 1-4 General actions - Wind actions
- [13] Eurocode 3-EN1993-Design of steel structures - Part 1-1 General rules and rules for buildings