



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## Μελέτη ικρίωματος για σκυροδέτηση γέφυρας



**Διπλωματική Εργασία**

**Γεωργίας Σαράκη - Andrea Christophe Iftime**

Επιβλέπων: Δρ. Ιωάννης Βάγιας, Καθηγητής ΕΜΠ

**Αθήνα 2011**







# Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε τον κύριο Ιωάννη Βάγια, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στη σχολή Πολιτικών Μηχανικών, για τη πολύτιμη στήριξη και την καθοδήγηση που επέδειξε κατά την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την όλη βοήθειά του.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών κύριο Γ. Ιωαννίδη και τον Λέκτορα της σχολής Πολιτικών Μηχανικών κύριο Τ. Αβραάμ για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μας εργασίας.

Τέλος, ευχαριστούμε τον υποψήφιο διδάκτορα Κωνσταντίνο Καλοχαιρέτη για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε, και τη βοήθεια που μας παρείχε στην επίλυση προβλημάτων που ανέκυψαν κατά τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA.





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Διπλωματική Εργασία

**Μελέτη ικριώματος για σκυροδέτηση γέφυρας**

Επιβλέπων: Δρ. Ιωάννης Βάγιας, Καθηγητής ΕΜΠ

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη ενός μεταλλικού πύργου που πρόκειται να αποτελέσει τμήμα ενός συστήματος προσωρινής υποστήλωσης του καταστρώματος της υπό κατασκευή τοξωτής μεταλλικής γέφυρας Τ4 στην εθνική οδό Τρίπολης Καλαμάτας. Το έργο έχει αναληφθεί από την εταιρεία κατασκευής ικριωμάτων PERI και για να διαπιστωθεί η καταλληλότητα ή όχι της μόρφωσης του φορέα σύμφωνα με τα πρότυπα αυτής, τόσο σε ότι αφορά την προτεινόμενη διάταξη των μελών αλλά και της επιλογής του τύπου των διατομών, θα διερευνηθούν εναλλακτικοί τρόποι μόρφωσης του μεταλλικού πύργου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι προδιαγραφές του Ευρωκώδικα, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκε ένα μεγάλο πλήθος αριθμητικών αναλύσεων στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο πραγματοποιείται μία εισαγωγική αναφορά στα ικριώματα, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στα ικριώματα προσωρινής υποστήλωσης για γέφυρες που αποτελούν κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής. Ειδικότερα παρουσιάζεται συνοπτικά το υπό μελέτη τεχνικό έργο και η πρόταση για προσωρινή υποστήριξη του καταστρώματος της τοξωτής μεταλλικής γέφυρας με μεταλλικούς πύργους σύμφωνα με το σύστημα VARIOKIT που προτείνει η εταιρία PERI.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA, αρχικά για την προσομοίωση του συστήματος εφεδράνου - πλάκας και σε επόμενη φάση για την προσομοίωση του υπό μελέτη φορέα. Ακολούθως περιγράφονται οι

πιθανές γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν για τη μελέτη του φορέα και παρουσιάζονται τα είδη αναλύσεων που θα πραγματοποιηθούν.

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο εξετάζονται πέντε εναλλακτικοί τρόποι μόρφωσης του μεταλλικού πύργου. Η 1<sup>η</sup> περίπτωση που εξετάζεται αφορά τη προσομοίωση του πύργου σύμφωνα με τη γεωμετρία που προτείνει η PERI. Στη 2<sup>η</sup> περίπτωση μειώνεται ο αριθμός των συνδέσμων δυσκαμψίας (τύπου Λ), ενώ στη συνέχεια αυτοί αντικαθίστανται με χιαστί συνδέσμους (3<sup>η</sup> περίπτωση). Τέλος αφαιρούνται σε πρώτο στάδιο όλοι οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας (4<sup>η</sup> Περίπτωση) και στη συνέχεια μειώνεται ο αριθμός των ορόφων του φορέα διατηρώντας το συνολικό του ύψος αναλλοίωτο (5<sup>η</sup> Περίπτωση).

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται διερεύνηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του φορέα. Στόχος των αναλύσεων είναι να εξεταστεί η επίδραση της ποιότητας του υλικού, της μορφής των διατομών, της γεωμετρικής ατέλειας και της δυσκαμψίας στην φέρουσα ικανότητα. Επίσης θα εξεταστούν κάποιες παράμετροι που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων και αφορούν το πρόγραμμα.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο πραγματοποιούνται αναλυτικοί έλεγχοι τάσεων και επάρκειας στα υποστυλώματα του φορέα για δύο διαφορετικούς τύπους διατομών, τις σωληνωτές και τις σύνθετες διατομές οι οποίες έχουν στόχο να προσομοιώσουν τις διατομές που χρησιμοποιούνται από την PERI. Οι αναλυτικοί έλεγχοι θα γίνονται σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία.





NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
DIVISION OF STRUCTURAL ENGINEERING  
Laboratory of steel structures

Diploma Thesis

***Scaffold design for concreting of bridge deck***

Supervisor: Dr. Ioannis Vagias, Professor N.T.U.A.

**ABSTRACT**

The objective of this diploma thesis is to study a metal tower that will be part of a system of temporary shoring of the deck of the arched metal bridge T4 on the new Highway from Tripoli to Kalamata. The work was undertaken by PERI, a company specialized in scaffolding. In order to determine the appropriateness of both the proposed layout of the members and the type of cross sections we will explore alternative ways of design of the metal tower. For this purpose, the recommendations of Eurocode 3 were used, while a large number of numerical analyses were carried out using the finite element program ADINA.

In the first chapter constitutes an introductory reference to scaffolding, with particular emphasis on temporary shoring of bridges which is the main subject of this diploma thesis.

The second section provides a brief presentation of the finite element program ADINA, initially for the simulation of the slab-bearings system and a subsequent phase to simulate the metal tower itself. Later on we describe the possible linear and nonlinear analyses that can be applied to design the metal tower.

The third chapter examines five alternatives of design of the metal tower. The first case considered for the simulation of the tower is in accordance with the geometry proposed by PERI. In the second case the number of concentrically braced frames of V bracing type is reduced by half, and then replaced by braced frames of X bracing type. After that, these braced frames are completely removed (fourth case) and finally many horizontal bracing members are removed (fifth case).

In the fourth chapter parameters affecting the behavior of the steel tower are investigated. The aim of the analyses is to examine the influence of material quality, shape of the cross sections of the geometric imperfection and of stiffness in the modification of bearing capacity of the tower.

In the fifth chapter effective stresses are calculated for U and pipe cross sections according to Eurocode 3 recommendations, and compared to those obtained from the finite element program ADINA.

In the sixth chapter general conclusions resulting from the diploma thesis are presented.

# Περιεχόμενα

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1 Ικριώματα	15
1.2 Ιστορική αναδρομή	16
1.3 Τύποι ικριωμάτων και εφαρμογές	17
1.4 Παρουσίαση του υπό μελέτη τεχνικού έργου	20
1.5 Η βαρέως τύπου υποστήλωση σε έργα πολιτικού μηχανικού – Κατασκευή VARIOKIT	23

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Δράσεις και προσομοίωμα ανάλυσης

2.1 Παρουσίαση του ADINA για την προσομοίωση του συστήματος εφεδράνου- πλάκας με τρισδιάστατα και επιφανειακά στοιχεία	35
2.2 Δράση του ανέμου	46
2.3 Μόρφωση του μεταλλικού πύργου στο ADINA	59
2.3.1 Γεωμετρία του φορέα	59
2.3.2 Συνοριακές συνθήκες του φορέα	61
2.4 Παραδοχές για τη μοντελοποίηση του φορέα	62
2.5 Μέθοδοι ανάλυσης και ελέγχου	65
2.6 Ατέλειες	68
2.7 Παραδοχές του προγράμματος ADINA	70
2.8 Διατομές	73
2.9 Είδη αναλύσεων	74

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Διερεύνηση εναλλακτικών τρόπων μόρφωσης του φορέα

3.1	Περίπτωση 1 <sup>η</sup> : Προτεινόμενος Πύργος από την PERI	79
3.1.1	Αρχικές Διατομές	81
3.1.2	Αύξηση εμβαδού διατομών συνδέσμων	86
3.1.3	Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, χωρίς ατέλεια	89
3.2	Περίπτωση 2 <sup>η</sup> : Πύργος μόνο με εξωτερικούς συνδέσμους δυσκαμψίας, τύπου Λ	92
3.2.1	Αρχικές διατομές	92
3.2.2	Αύξηση εμβαδού διατομών συνδέσμων	98
3.2.3	Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, χωρίς ατέλεια	102
3.3	Περίπτωση 3 <sup>η</sup> : Πύργος μόνο με εξωτερικούς χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας	104
3.3.1	Αρχικές διατομές	105
3.3.1.1	Χωρίς ενδιάμεσο κόμβο στους χιαστί συνδέσμους	106
3.3.1.2	Με ενδιάμεσο κόμβο στους χιαστί συνδέσμους	108
3.3.2	Αύξηση εμβαδού διατομών των χιαστί συνδέσμων	109
3.3.2.1	Χωρίς ενδιάμεσο κόμβο στους χιαστί συνδέσμους	109
3.3.2.2	Με ενδιάμεσο κόμβο στους χιαστί συνδέσμους	111
3.3.3	Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, χωρίς ατέλεια	114
3.4	Περίπτωση 4 <sup>η</sup> : Πύργος χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας	116
3.4.1	Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, χωρίς ατέλεια	120
3.5	Περίπτωση 5 <sup>η</sup> : Πύργος με λιγότερους ορόφους χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας	122
3.5.1	Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, χωρίς ατέλεια	126

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του φορέα**

4.1	Η επιρροή της ατέλειας στη συμπεριφορά του φορέα	129
4.2	Συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας για αναλύσεις με διαφορετικό πλήθος βημάτων	133
4.3	Η επιρροή της ποιότητας του υλικού στη συμπεριφορά του φορέα	134
4.4	Η επιρροή του τύπου των διατομών των υποστυλωμάτων στη συμπεριφορά του φορέα	137
4.5	Συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας για όλες τις περιπτώσεις μόρφωσης του φορέα	138

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Έλεγχος μελών με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3**

5.1	Σωληνωτές διατομές	145
5.2	Σύνθετες διατομές U	154

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Γενικά συμπεράσματα**

## **Βιβλιογραφία**



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Ικριώματα

Τα ικριώματα αποτελούν προσωρινές κατασκευές που χρησιμοποιούνται συνήθως για να υποστηρίξουν ανθρώπους και υλικά κατά τη διάρκεια κατασκευής ή επισκευής ενός κτιρίου. Συνήθως είναι ένα αρθρωτό σύστημα από μεταλλικούς σωλήνες , αν και μπορεί να αποτελείται από άλλα υλικά όπως το μπαμπού σε χώρες της Νοτιοανατολικής Ασίας.



Σχήμα 1.1 : Φωτογραφία ικριωμάτων από μπαμπού σε κτίριο στο Hong Kong

## 1.2 Ιστορική αναδρομή

Ιστορικές αναφορές κάνουν λόγο για χρήση ικριωμάτων τόσο στην αρχαία Ελλάδα όσο και στην αρχαία Αίγυπτο, ενώ έχει καταγραφεί η χρήση τους και από τους κινέζους για την κατασκευή ψηλών κτιρίων.

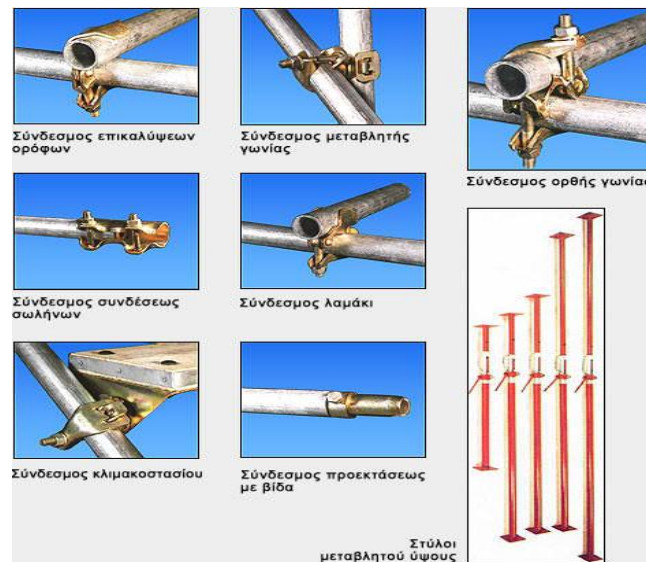
Ειδικότερα οι πρώτες περιγραφές ικριωμάτων εμφανίζονται στην αιγυπτιακή αρχιτεκτονική. Το ξύλο ήταν ένα προϊόν εισαγωγής στην Αίγυπτο ιδιαίτερα υψηλού κόστους, γι' αυτό σκαλωσιές χρησιμοποιούνταν όπου ήταν απολύτως απαραίτητο π.χ. για την τοποθέτηση πέτρας στα θεμέλια κατασκευών. Αυτό έχει πολύ καλά καταγραφεί σε αιγυπτιακά αγγεία και ιδιαίτερα η χρησιμοποίηση ικριωμάτων ως υλικά υποστήλωσης με χρήση σχοινίων. Αυτός ο τύπος ικριωμάτων μπορούσε να συναρμολογηθεί και αποσυναρμολογηθεί πολύ γρήγορα. Στην αρχαία Ελλάδα, αρχαιολογικά ευρήματα αποδεικνύουν την χρήση σπάνιων και ακριβών υλικών που χρησιμοποιούνταν στις κατασκευές ως σκαλωσιές και βαρούλκα. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούσαν αγριοσυκιά η οποία έχει καλή αντοχή αλλά δεν είναι αρκετά καλής ποιότητας ώστε να χρησιμοποιηθεί σε μόνιμες κατασκευές.

Η συνεχής βελτίωση των μεθόδων κατασκευής, χαρακτηρίζει την ρωμαϊκή εποχή. Η χρήση ενός μίγματος λάσπης και σπασμένων πετρών είχε μεγάλη εφαρμογή στις κατασκευές και κατά συνέπεια στην εξέλιξη των ικριωμάτων. Την εποχή του Μεσαίωνα και της Αναγέννησης η κατασκευή τεραστίων κτιρίων απαιτούσε την εξέλιξη βαρέως τύπου γερανών και ικριωμάτων παρά το υψηλό κόστος τους.

Στα μέσα του 19ου αιώνα η κατασκευή πλαισίων από χάλυβα και ξύλο είχε εφαρμοσθεί με επιτυχία, με αποτέλεσμα να μπορεί να εξελιχθεί το ικρίωμα. Ταυτόχρονα στις Η.Π.Α. κατασκευάστηκαν ικρίωματα από χαλυβδοσωλήνα και συνδέσμους τα οποία μπορούσαν να μεταφερθούν.

Στις αρχές τις δεκαετίας του 1930, τα ικρίωματα από χαλυβδοσωλήνα και συνδέσμους χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη ιδιαίτερα από τις χώρες εκείνες με ίδια παραγωγή χάλυβα. Στην Ελλάδα η χρησιμοποίηση αυτού του τύπου ικριωμάτων κυριαρχεί μέχρι και σήμερα καθώς μόνο αυτός κατασκευάζεται από τις ελληνικές εταιρίες που ασχολούνται με αυτό τον κλάδο. Η εφαρμογή τους είναι ευρεία και αφορά κυρίως έργα ανασύλωσης μνημείων ή άλλων κατασκευών όσο και έργα προσωρινής υποστήλωσης γεφυρών και άλλων μεγάλων κατασκευών.





Σχήμα 1.2 Συνδέσεις σε σωληνωτά ικριώματα

### 1.3 Τύποι ικριωμάτων και εφαρμογές

- Ικριώματα όψεως : έχουν εφαρμογή σε επισκευές και ανασυλώσεις. Συνήθως στηρίζονται με δεσμούς στο παρακείμενο κτίριο.



Σχήμα 1.3 : Ικριώματα όψεως στην Ακρόπολη και στον πύργο του ΟΤΕ

- Ικριώματα υποστήριξης: είναι κατασκευές προσωρινής υποστήριξης μεγάλων έργων όπως γέφυρες, σήραγγες κ.α. Παραμένουν μέχρι να πήξει η επιφάνεια από σκυρόδεμα και να μπορεί να παραλάβει τα φορτία σχεδιασμού.



Σχήμα 1.4 : Ικρίωματα υποστήλωσης σε σταθμό παραγωγής ενέργειας στη Γερμανία

- Κλιμακοστάσια: χρησιμοποιούνται για την ασφαλή πρόσβαση εργαζομένων σε διάφορα επίπεδα.



Σχήμα 1.5: Κλιμακοστάσιο για την πρόσβαση σε χώρο εργασίας



- Συστήματα αναρρίχησης: έχουν εφαρμογή στην κατασκευή ψηλών τοιχίων από σκυρόδεμα.

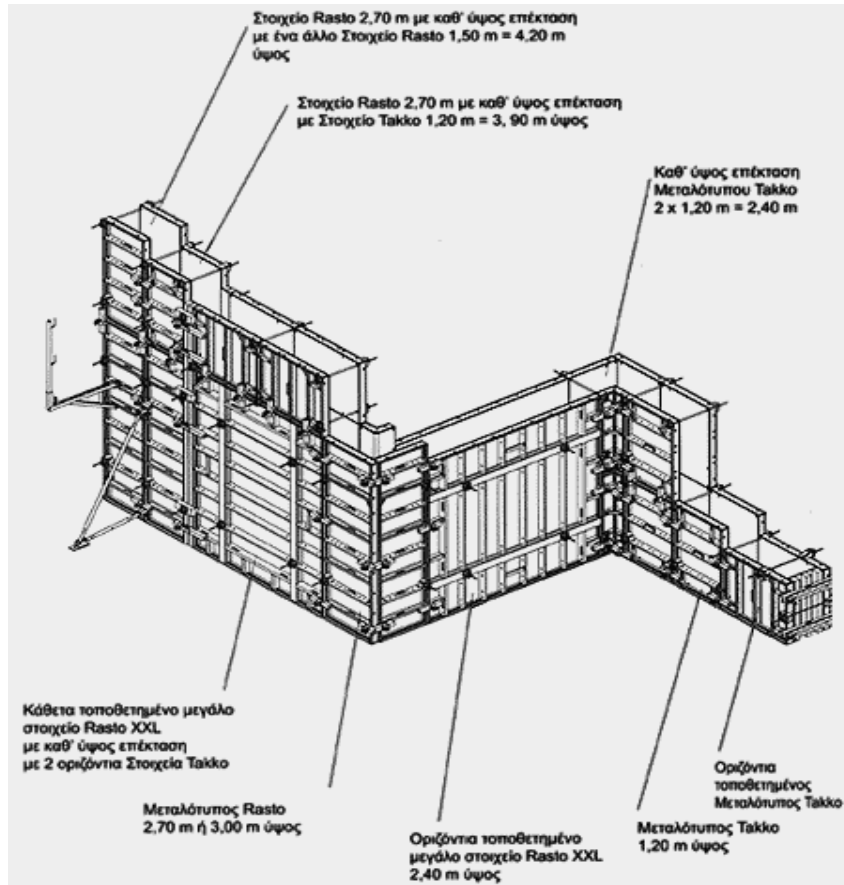


Σχήμα 1.6: Σύστημα αναρρίχησης για την κατασκευή βάθρων γέφυρας

- Μεταλλότυποι πλακών, τοιχίων και υποστυλωμάτων.



Σχήμα 1.7: Μεταλλότυπος ελαφρύ τύπου με χαλύβδινα πανέλα



Σχήμα 1.8: Μεταλότυπος για την κατασκευή τοιχείου

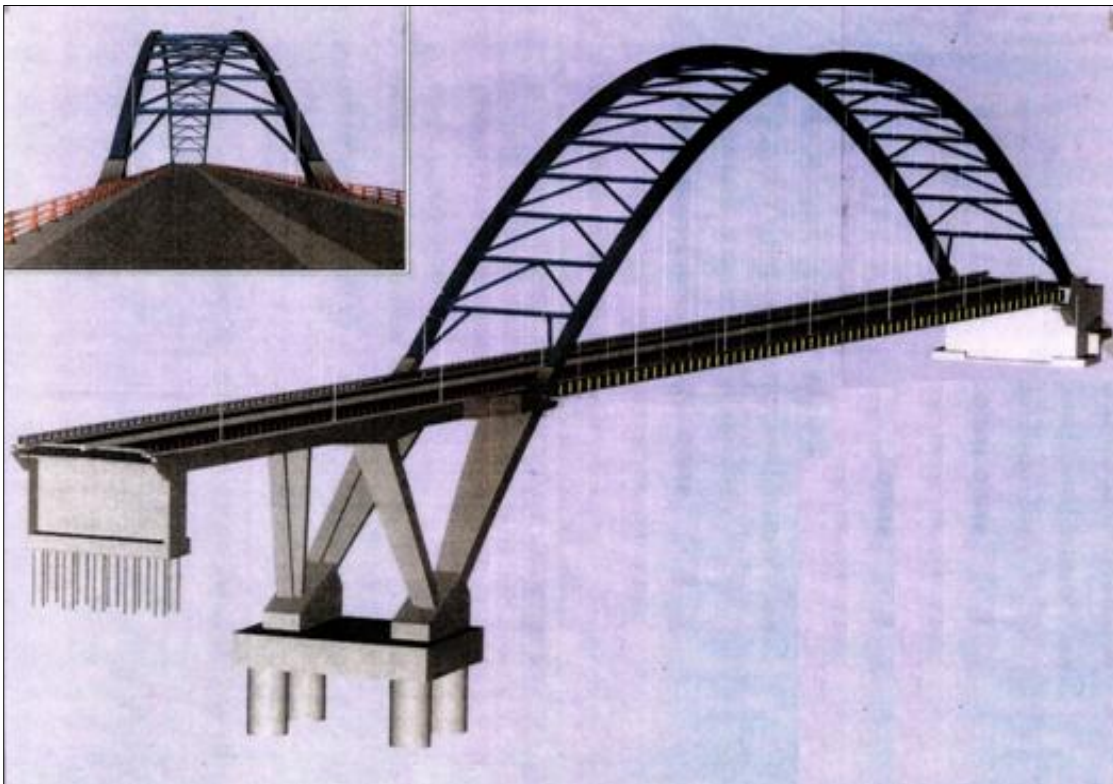
#### 1.4 Παρουσίαση του υπό μελέτη τεχνικού έργου

Στην παρούσα διπλωματική εργασία καλούμαστε να μελετήσουμε συστήματα υποστήριξης για γέφυρες. Συγκεκριμένα θα ασχοληθούμε με την προσωρινή υποστήριξη της τοξωτής μεταλλικής γέφυρας (T4) δύο ανοιγμάτων (A0 - M1 - A2) με κατάστρωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα στην εθνική οδό Τρίπολης-Καλαμάτας, στο τμήμα Παραδείσια – Τσάκωνα, σε τμήμα της οδού που είχε υποστεί κατολίσθηση και έτσι ήταν επιβεβλημένη η κατασκευή της γέφυρας αυτής.

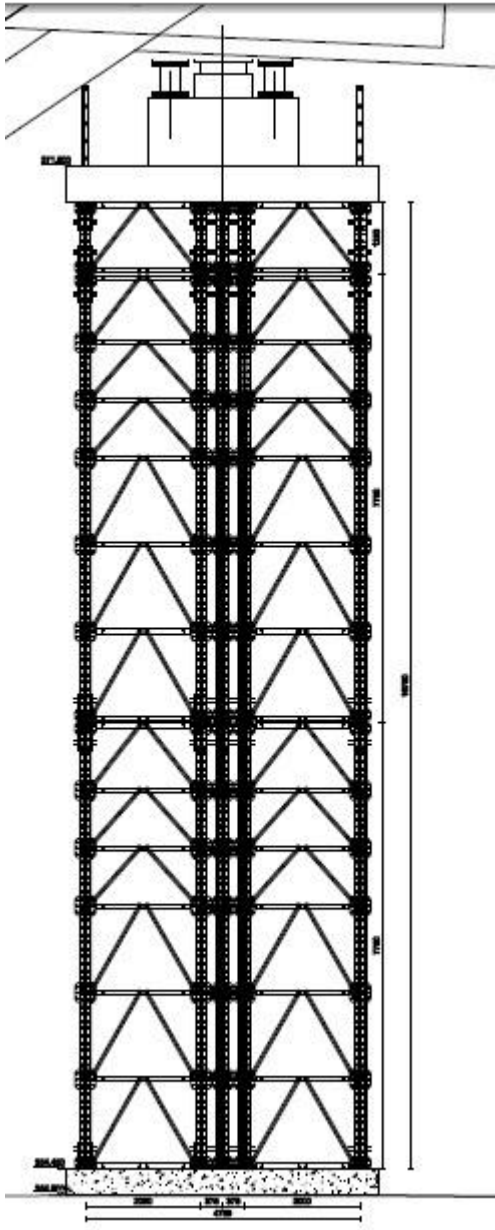
Το άνοιγμα A0-M1 γεφυρώνεται με ένα αντιριδωτό προεντεταμένο φορέα ενώ το άνοιγμα M1-A2 με έναν προεντεταμένο πρόβολο 40m αντεριζόμενο στο μεσόβαθρο M1 και ένα χαλύβδινο τοξωτό φορέα ανοίγματος 260m με ανηρημένο το σύμμικτο κατάστρωμά του.

Ο τοξωτός φορέας αποτελείται από δύο παραβολικά τόξα.

- Εγκάρσια αξονική απόσταση τόξων: 22.20m
- Μέγιστο ύψος τόξου από το κατάστρωμα : 46 m
- Μέγιστο ύψος καταστρώματος από το φυσικό έδαφος : 30 m
- Συνολικό μέγιστο ύψος τόξου από το φυσικό έδαφος : 76 m
- Συνολικό μήκος : 390 m
- Μήκος 1<sup>ου</sup> ανοίγματος : 90 m
- Μήκος 2<sup>ου</sup> ανοίγματος : 300 m



Σχήμα 1.9 Προοπτικό Σχέδιο – Προμελέτη τοξωτής γέφυρας T4



Σχήμα 1.10 : Όψη πύργου

Τα φορτία του ανοίγματος μήκους 260 μεταφέρονται μέσω καλωδίων στο μεταλλικό τοξωτό φορέα και από εκεί στο έδαφος.

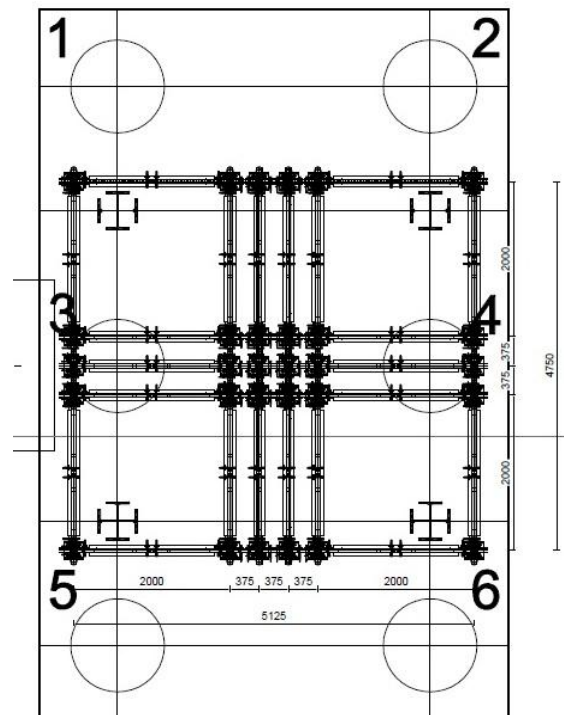
Ωστόσο μέχρι να πήξει η πλάκα σκυροδέματος και να μπορεί να λειτουργήσει το περιγραφόμενο στατικό σύστημα απαιτείται ένα χρονικό διάστημα της τάξης των 28 ημερών κατά το οποίο πρέπει να ληφθεί ειδική μέριμνα για την προσωρινή υποστήριξη του καταστρώματος.

Λαμβάνοντας υπόψη τις ειδικές απαιτήσεις του συγκεκριμένου έργου και συγκεκριμένα τα εξής:

- Μεγάλο άνοιγμα
- Μεγάλο ύψος
- Μεγάλο πλάτος καταστρώματος

η εταιρεία PERI πρότεινε το κατάστρωμα να στηρίζεται προσωρινά με πύργους της εικονιζόμενης μορφής.

Σχήμα 1.11 : Κάτοψη πύργου



Ο συγκεκριμένος πύργος έχει ύψος 16,75 μέτρα, πλάτος στην εικονιζόμενη διεύθυνση 4,75 μέτρα ενώ στην εγκάρσια 5,125 όπως φαίνεται στην παραπάνω κάτοψη.

Οι μεγάλες διαστάσεις της κάτοψης του καταστρώματος, οι μεγάλες υψομετρικές διαφορές του καταστρώματος από το έδαφος αλλά και η σημαντική διακύμανση του εύρους της υψομετρικής διαφοράς αυτής φέρνουν την απαίτηση για ένα μεγάλο πλήθος μεταλλικών πύργων πυκνά διατεταγμένων μεταξύ τους με τη δυνατότητα κατασκευής καθενός εξ' αυτών σε διαφορετικό ύψος.

Ο καθένας από αυτούς πρέπει να μπορεί να παραλάβει φόρτιση με κατακόρυφη συνιστώσα 12000 KN και οριζόντια 600KN στην κάθε διεύθυνση σύμφωνα με τον κατασκευαστή της γέφυρας. Γνωρίζοντας ότι ο κάθε πύργος έχει 14-30 μ ύψος πρέπει να έχει επαρκή δυσκαμψία μέσω της χρησιμοποίησης των αντίστοιχων συνδέσμων και της πυκνής διάταξης δευτερευόντων μελών σε διάφορες στάθμες ώστε να μειώνονται σημαντικά τα μήκη λυγισμού των υποστυλωμάτων.

Αυτού του τύπου οι κατασκευές έχουν και επιπρόσθετες απαιτήσεις. Οι συνδέσεις μεταξύ των μελών γίνονται στο έδαφος και πρέπει να είναι απλές στην εκτέλεση τους ώστε να πραγματοποιούνται και από ανειδίκευτο προσωπικό με επαρκή ταχύτητα ενώ η ανέγερση τους γίνεται με γερανό. Εξίσου εύκολη πρέπει να είναι και η αποσυναρμολόγηση τους καθώς συχνά επαναχρησιμοποιούνται τα ίδια μέλη σε επόμενο στάδιο κατασκευής, ενώ πολλές εταιρίες ενοικιάζουν τα μέλη αυτά και έτσι υπάρχει η δυνατότητα τα χρησιμοποιηθούν σε ένα εντελώς διαφορετικό έργο.

Παρακάτω θα παρουσιάσουμε συνοπτικά τις διατομές και τα μέλη σύνδεσης που χρησιμοποιεί η εταιρεία PERI , στην οποία έχει ανατεθεί το έργο, καθώς και τα πλεονεκτήματα που συνεπάγεται η χρησιμοποίησή τους.

Ειδικότερα θα αναφερθούμε στο σύστημα βαρέως τύπου υποστύλωσης VARIOKIT που έχει εφαρμογή στο συγκεκριμένο έργο.

## **1.5 Η βαρέως τύπου υποστύλωση σε έργα πολιτικού μηχανικού – Κατασκευή VARIOKIT**

Η βαρέως τύπου υποστύλωση χρησιμοποιείται πολλά χρόνια σε έργα πολιτικού μηχανικού. Η εταιρεία PERI είναι η πρώτη που ασχολήθηκε με την εφαρμογή αυτού του τύπου υποστύλωσης και έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης μέχρι να καταλήξει στο σύστημα VARIOKIT με τη μορφή

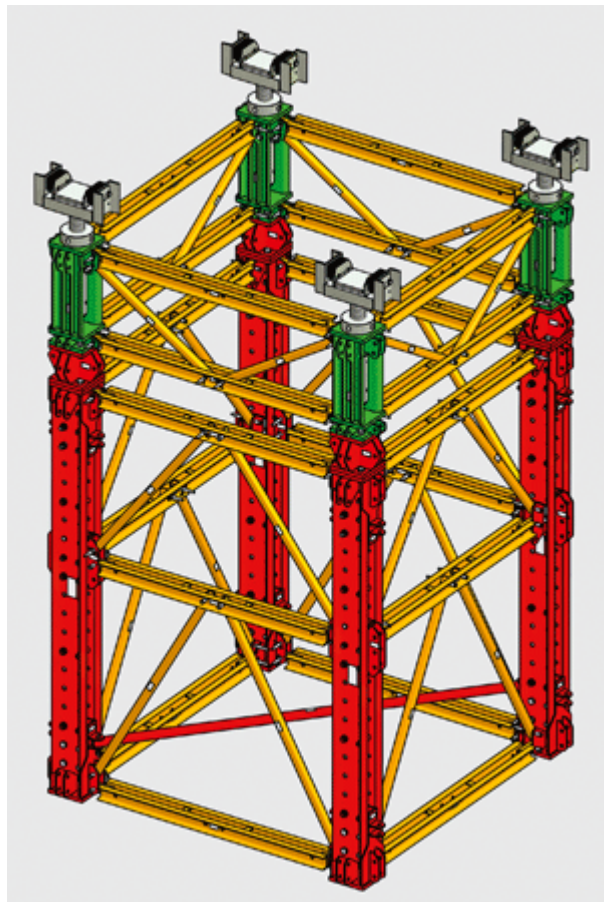


που αυτό έχει σήμερα. Το σύστημα VARIOKIT έχει εξελιχθεί με σκοπό να μπορεί να αυξηθεί η φέρουσα ικανότητα σε σύγκριση με τις συμβατικές σκαλωσιές χωρίς να χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν οι συνηθισμένες πρότυπες διατομές από χάλυβα. Είναι ανταγωνιστικό για την κατασκευή αυτών των πύργων σε σχέση με τις παραπάνω μεθόδους κυρίως λόγω του εύρους των εξαρτημάτων που το συνοδεύουν και την ευελιξία που αυτό συνεπάγεται για την κατασκευή. Για παράδειγμα, η χρησιμοποίηση μελών μεταβλητού μήκους διευκολύνει τον προγραμματισμό του έργου και μειώνει σημαντικά το κόστος κατασκευής. Οι πύργοι σχεδιασμένοι με VARIOKIT είναι ικανοί να φέρουν φορτία έως 2400 KN ενώ το ύψος τους μπορεί να ανέλθει έως 40 m.

Η εταιρεία PERI προτείνει τα παρακάτω είδη συναρμολόγησης:

#### Πρότυπος πύργος

Τα 4 πόδια συναρμολογούνται χρησιμοποιώντας τα πρότυπα εξαρτήματα σύνδεσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια αξονική διάσταση 2 x 2 μ.



Σχήμα 1.12 : Πρότυπος Πύργος



### Πύργος με επιπλέον πόδια

Σε περιπτώσεις όπου έχουμε πολύ υψηλές φορτίσεις, υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης επιπλέον υποστυλωμάτων ανά 37,5 cm. Αυτό επιφέρει σημαντική αύξηση στην επιτρεπόμενη φέρουσα ικανότητα.

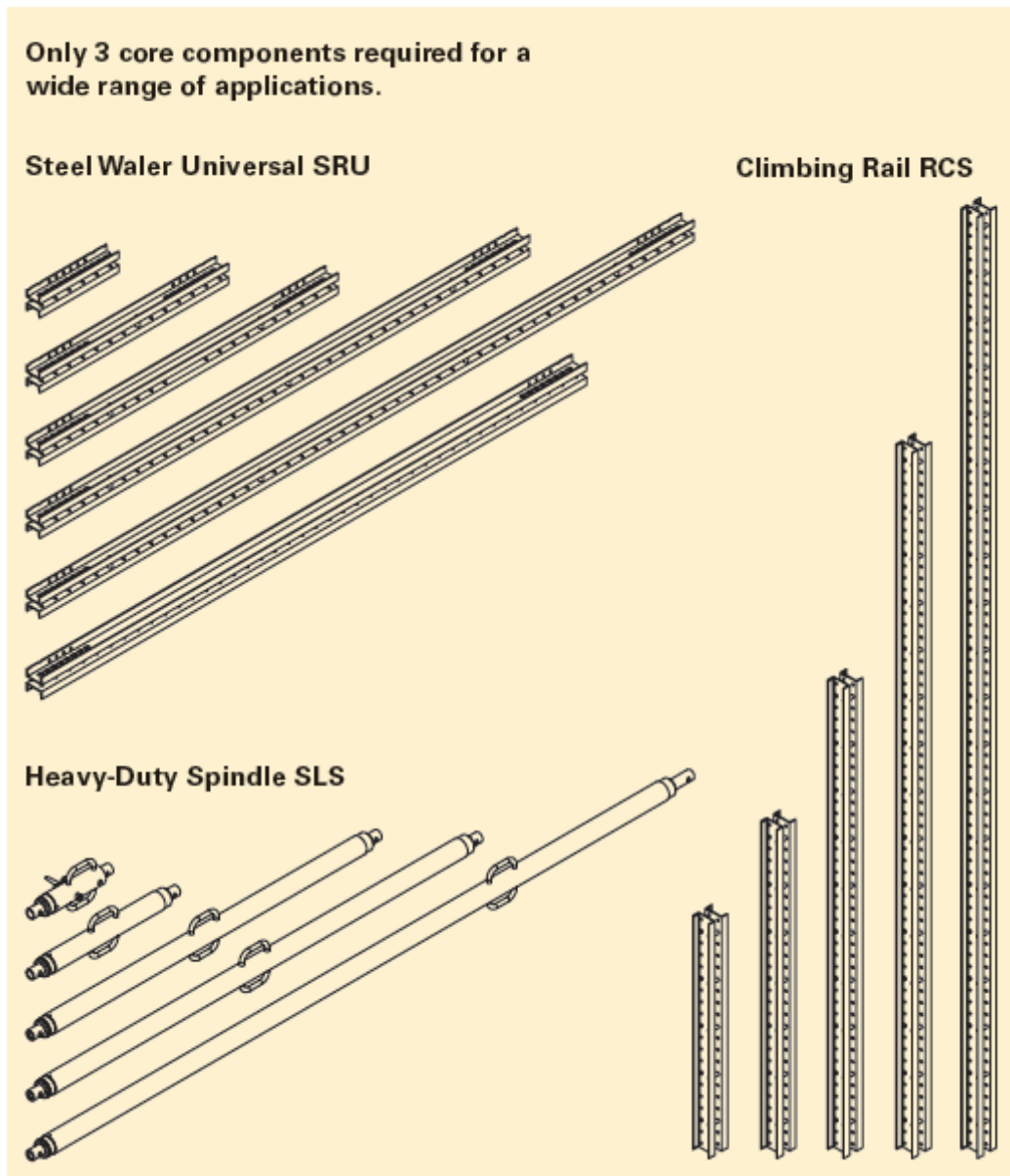
Ο φορέας μας ανήκει σε αυτή την κατηγορία. Αποτελείται από 4 πρότυπους πύργους και 14 επιπλέον υποστυλώματα.

### Υποστυλώσεις με πλαίσιωτούς πύργους

Είναι ένας συνδυασμός από υποστυλώματα με δευτερεύοντα μέλη, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των οποίων εξαρτώνται από την εκάστοτε φόρτιση.

Τα πιο σημαντικά οφέλη της κατασκευής VARIOKIT είναι :

- Ευέλικτη χρήση των κύριων μελών λόγω μεταβλητότητας του μήκους τους.
- Το σύστημα αυτό απαιτεί λίγα επιπλέον μέλη για τις συνδέσεις ή άλλα εξαρτήματα τα οποία έχουν τη δυνατότητα να επαναχρησιμοποιηθούν.
- Βελτιωμένη προσαρμογή στις απαιτήσεις του έργου.
- Δυνατότητα χρησιμοποίησης των μελών του συστήματος VARIOKIT και σε άλλες εφαρμογές στην οικοδομική.



Σχήμα 1.13 : Κύρια μέλη του συστήματος VARIOKIT



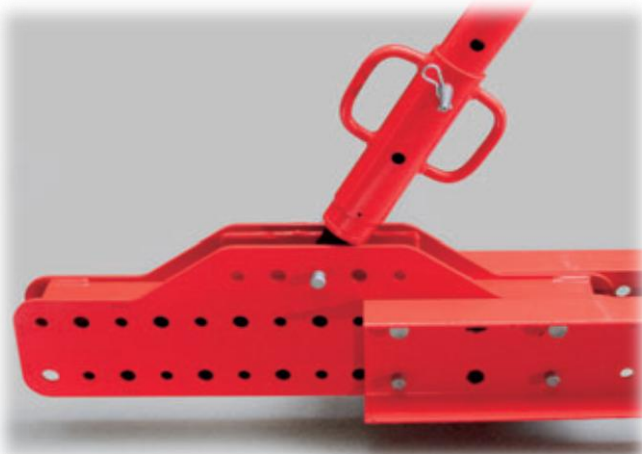
Σχήμα 1.14 : Δικτύωμα για τη γεφύρωση ανοίγματος

Μια επιπλέον σημαντική δυνατότητα που έχει το σύστημα VARIOKIT είναι αυτή να συνεργάζεται με απλούστερα συστήματα σκαλωσιών όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Οι διατομές αυτές χρησιμοποιούνται εδώ προκειμένου να γεφυρωθεί το άνοιγμα και η υπόλοιπη ανωδομή στηρίζεται σε απλές σκαλωσιές που συνεργάζονται με την κατασκευή VARIOKIT στην ανάληψη φορτίων.

Στο πλήρες σετ κατασκευής VARIOKIT, υπάρχουν μόνο λίγοι τύποι συνδέσεων με τα εξής πλεονεκτήματα:

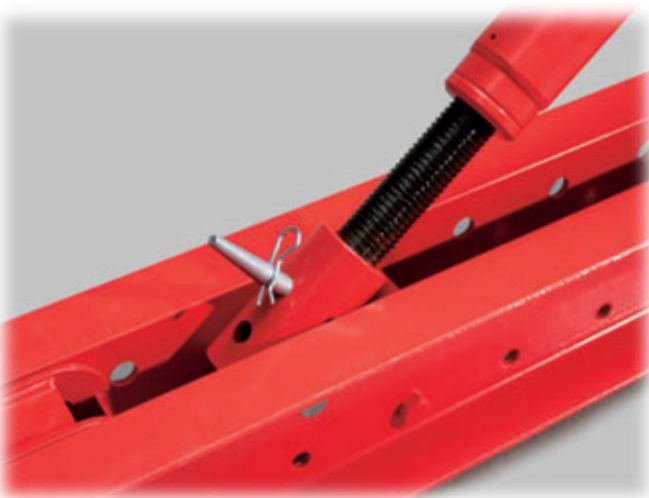
- Ελάχιστα διαφορετικά εξαρτήματα για τις συνδέσεις.
- Οι συνδέσεις είναι τυποποιημένες και γνωρίζουμε πόσο φορτίο αντέχουν
- Απλή και εύκολη επί τόπου συναρμολόγηση και από ανειδίκευτο προσωπικό.

Οι διαθέσιμοι τύποι συνδέσεων από την PERI είναι οι εξής:



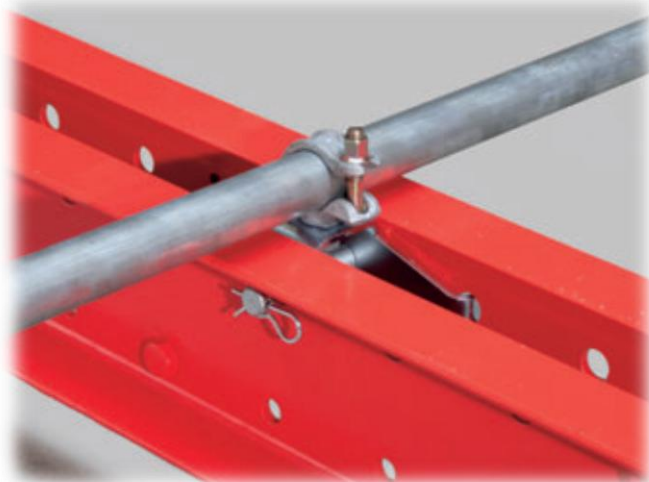
Σχήμα 1.15 : Άκαμπτη ζεύξη μελών τύπου RCS

Άκαμπτη σύνδεση για τη ζεύξη μελών διατομής RCS η οποία δεν επιφέρει μείωση στη φέρουσα ικανότητα του μέλους, ενώ επιπλέον επιτρέπει τη σύνδεση βαρέως τύπου ατράκτων SLS .



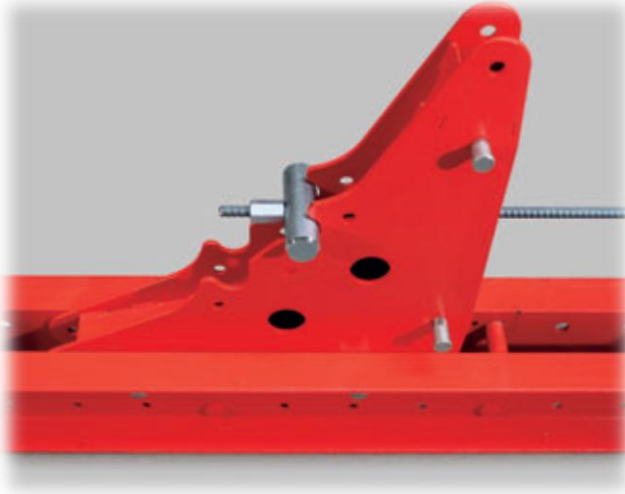
Σχήμα 1.16 : Προσαρμογή ατράκτου SLS σε RCS

Σύνδεση που επιτρέπει την προσαρμογή βαρέως τύπου ατράκτων SLS στα μέλη διατομής RCS.



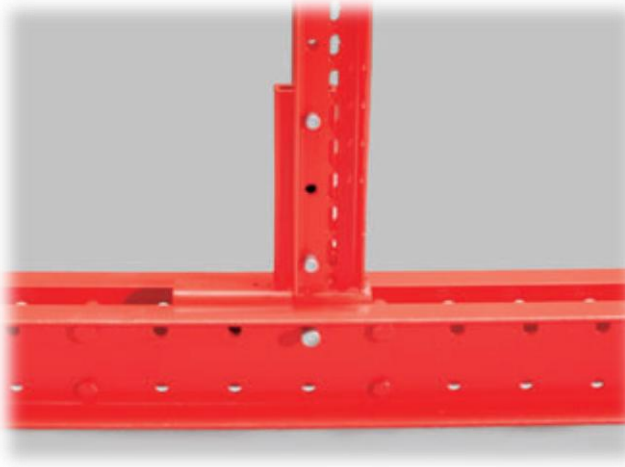
Σχήμα 1.17 : Σύνδεση σωληνωτής διατομής με μέλος τύπου RCS

Σύνδεση μέλους σωληνωτής διατομής με μέλος διατομής RCS. Αυτή η σύνδεση επιτρέπει τη συνεργασία μελών συνηθισμένων κατασκευών ικριωμάτων με τα μέλη που κατασκευάζει η PERI.



Άκαμπτη σύνδεση που επιτρέπει τη ζεύξη μελών RCS για την κατασκευή πλαισιωτών φορέων με μεταφορά ροπής.

Σχήμα 1.18 : Γωνιακή άκαμπτη ζεύξη μελών τύπου RCS


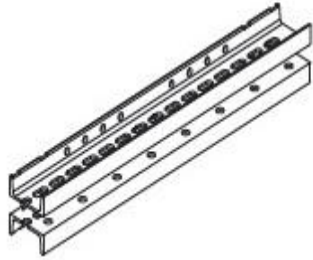
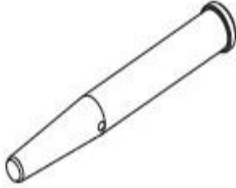
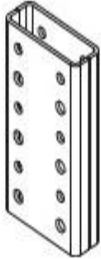
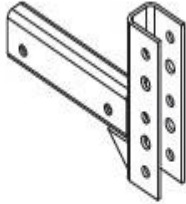
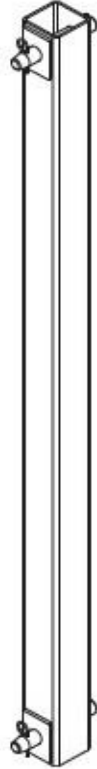


Αρθρωτή σύνδεση RCS / SRU μελών μεταξύ τους υπό γωνία 90 μοιρών.

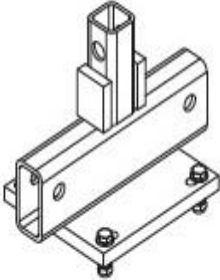
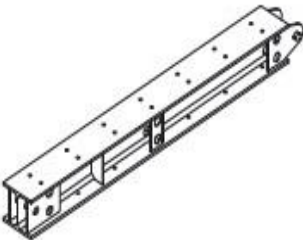

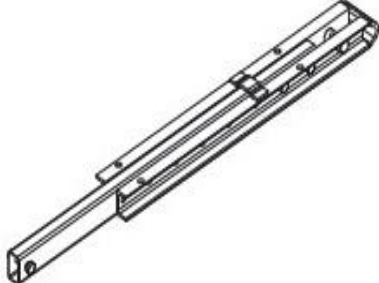
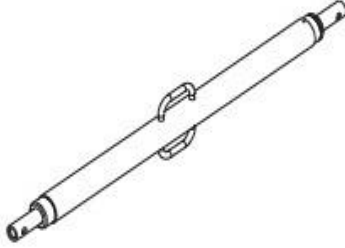
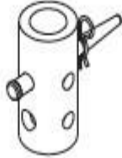
Σχήμα 1.19: Γωνιακή σύνδεση μελών RCS/SRU

Παρακάτω ακολουθούν οι Πίνακες 1.1 και 1.2 με τις διατομές και τα μέσα σύνδεσης του συστήματος VARIOKIT της PERI.



	Wgt. kg		Wgt. kg
<b>Climbing Rail Connector RCS 97</b>	32,80	<b>Steel Waler Universal SRU</b>	
			
<b>Pin <math>\sigma</math> 26 x 120</b>	0,73	SRU 72	18,20
		SRU 97	24,40
<b>Climbing Rail Connector 40</b>	12,70	SRU 122	31,00
		SRU 147	37,60
<b>Angle Connector RCS/SRU</b>	9,56	SRU 172	44,40
		SRU 197	51,00
		SRU 222	57,60
		SRU 247	64,40
		SRU 272	71,00
		SRU 297	77,60
		SRU 347	91,00
		SRU 397	104,00
		SRU 447	117,00
		SRU 497	131,00
		SRU 547	144,00
		SRU 597	157,00
		SRU 597	158,00
		<b>Truss Strut HD</b>	
		HD 2247	56,50
		HD 2000	51,10
			

Πίνακας 1.1: Διατομές PERI του συστήματος VARIOKIT

	Wgt. kg		Wgt. kg
<b>Main Beam HDT</b>		<b>Heavy Duty Roller Bracket VARIOKIT</b>	12,20
HDT 880	1117,00		
HDT 440	579,00		
HDT 280	376,00		
		<b>Climbing Rail RCS</b>	
<b>Heavy-Duty Spindle SLS</b>		RCS 248	130,00
SLS 40/80	12,00	RCS 348	183,00
SLS 80/140	14,30	RCS 498	262,00
SLS 100/180	17,90	RCS 748	394,00
SLS 140/240	24,40	RCS 998	525,00
SLS 200/300	31,80		
SLS 260/360	37,93		
SLS 320/420	44,30	<b>Strut SRU L = 1,65-2,40m</b>	32,50
SLS 380/480	50,50		
		<b>Spindle Adapter SLS/RCS</b>	4,11
			

Πίνακας 1.2: Διατομές PERI του συστήματος VARIOKIT

Συμπερασματικά όσον αφορά τις διατομές που χρησιμοποιεί η PERI μπορούμε να αναφέρουμε τα εξής:

- Διαφέρουν σημαντικά από τις αντίστοιχες χαλύβδινες πρότυπες.
- Υπάρχουν αρκετά λιγότερες επιλογές σε ότι αφορά τη μορφή των διατομών (χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά σύνθετες διατομές U για τα κύρια μέλη και κοίλες ορθογωνικές ή κυκλικές για τους συνδέσμους ακαμψίας). Ειδικότερα, στο σύστημα VARIOKIT απαιτούνται ελάχιστα εξαρτήματα για την συναρμολόγηση του:
  - Τρία βασικά εξαρτήματα: Μεταλλική Δοκός RCS, Μεταλλική Δοκός SRU, Ρυθμιζόμενος μοχλός βαρέως τύπου SLS
  - Παρελκόμενα όπως σωλήνες σκαλωσιάς και «χούφτες», ειδικοί σύνδεσμοι σταθερής ή μεταβλητής γωνίας για σωληνωτά μέλη
- Οι συνδέσεις είναι εντελώς διαφορετικές τόσο σε σχέση με τις συμβατικές κατασκευές από χάλυβα όσο και με τις συνηθισμένες κατασκευές ικριωμάτων. Συγκεκριμένα μπορούμε να παρατηρήσουμε τα ακόλουθα:
  - Τα κύρια μέλη διατρέχονται από οπές τόσο στα πέλματα όσο και στον κορμό καθ' όλο το ύψος τους κάτι που διευκολύνει την υλοποίηση οποιουδήποτε διαθέσιμου τύπου σύνδεσης σε οποιοδήποτε μήκος επιλέξουμε χωρίς την παρέμβαση κάποιου συνεργείου
  - Τα μέσα σύνδεσης δεν είναι οι συνηθισμένες από τις χαλύβδινες κατασκευές λεπίδες σύνδεσης αλλά ειδικά διαμορφωμένα μέλη τα οποία επίσης διατρέχονται σε όλη την επιφάνειά τους από οπές κατά τα πρότυπα των κυρίων μελών
  - Οι γνωστές κοχλιώσεις και συγκολλήσεις αντικαθίστανται από συνδέσεις με ειδικά βλήτρα προσαρμοσμένα στις διαθέσιμες οπές.

Τα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή του συστήματος VARIOKIT είναι πολλαπλά. Οι πολλαπλές οπές σε όλα τα εξαρτήματα του συστήματος VARIOKIT μας διευκολύνουν να δώσουμε το κατάλληλο μήκος σε οποιοδήποτε μέλος της κατασκευής επιθυμούμε με την τοποθέτηση των βλήτρων σύνδεσης σε όποιο μήκος επιθυμούμε χωρίς επιπλέον μείωση της φέρουσας ικανότητας. Τα διατιθέμενα μέλη είναι τα εξής:

- Μεταλλική Δοκός SRU (16 μήκη από 72 cm έως 6 m)
- Μεταλλική Δοκός RCS (5 μήκη από 2.5 m έως 10 m)



- Ρυθμιζόμενοι μοχλοί βαρέως τύπου SLS (8 μήκη διαρκώς προσαρμοζόμενα από 40 cm έως 4.80 m)

Έτσι επιτυγχάνεται μία πολύ καλή προσαρμογή στις απαιτήσεις του εκάστοτε τεχνικού έργου.

Τα βλήτρα και οι οπές έχουν ένα μέγεθος καθιστώντας τις συνδέσεις εντελώς τυποποιημένες εξοικονομώντας έτσι υπολογιστικό χρόνο και διευκολύνοντας έτσι οποιαδήποτε τροποποίηση της τελευταίας στιγμής στο εργοτάξιο.

Αναιρείται η όποια ανάγκη πραγματοποίησης συγκολλήσεων, οι οποίες είναι απαγορευτικές σε προσωρινές κατασκευές όπου κυρίαρχο μέλημα αποτελεί η ταχεία επαναχρησιμοποίηση όλων των εξαρτημάτων.

Ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα που διευκολύνει και επιταχύνει τη φάση ανέγερσης των ικριωμάτων αποτελεί η δυνατότητα να ενσωματωθούν μηχανισμοί υδραυλικής ή μηχανικής μετακίνησης γεγονός που προσδίδει επιπλέον ευελιξία.

Τα μόνα μειονεκτήματα που έχουν αυτές οι κατασκευές σχετίζονται με το κόστος και αφορούν την σπατάλη υλικού π.χ. η διάνοιξη οπών σε όλο το μήκος και ειδικότερα στα πέλματα ενός μέλους είναι αντισυμβαλλόμενη. Επιπλέον η απαίτηση του ευρωκώδικα για ελαστικό έλεγχο δεν μας επιτρέπει να λάβουμε υπόψη στο σχεδιασμό την ολκιμότητα που έχει ο χάλυβας σαν υλικό.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά ενός τέτοιου φορέα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ευρωκώδικα 3 για διαφορετικές διατομές με στόχο να ελέγξουμε την καταλληλότητα χρησιμοποίησης των διατομών που προτείνει η PERI και πόσο ικανοποιητικά συμπεριφέρονται σε αυτού του τύπου τις κατασκευές.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Δράσεις και προσομοίωμα ανάλυσης

Στη παρούσα διπλωματική εργασία οι αριθμητικές αναλύσεις του φορέα μας πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

Στο παρόν κεφάλαιο, αρχικά γίνεται η παρουσίαση αυτού του προγράμματος για την προσομοίωση του συστήματος εφεδράνου - πλάκας με τρισδιάστατα και επιφανειακά στοιχεία με στόχο τον υπολογισμό των δυνάμεων που μεταφέρονται από τη πλάκα φόρτισης στον μεταλλικό πύργο.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται υπολογισμός των δράσεων του ανέμου σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-3 για μεταλλικούς πύργους. Σε επόμενη φάση προχωρούμε στην παρουσίαση των βημάτων που ακολουθήσαμε για την προσομοίωση του φορέα μας στο ADINA μαζί με κάποιες παραδοχές που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για τον υπολογισμό τάσεων και τροπών. Ακολούθως περιγράφονται οι πιθανές γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν για τη μελέτη του φορέα μας ενώ υπολογίζεται σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα και η γεωμετρική ατέλεια που θα εφαρμοστεί στον φορέα μας.

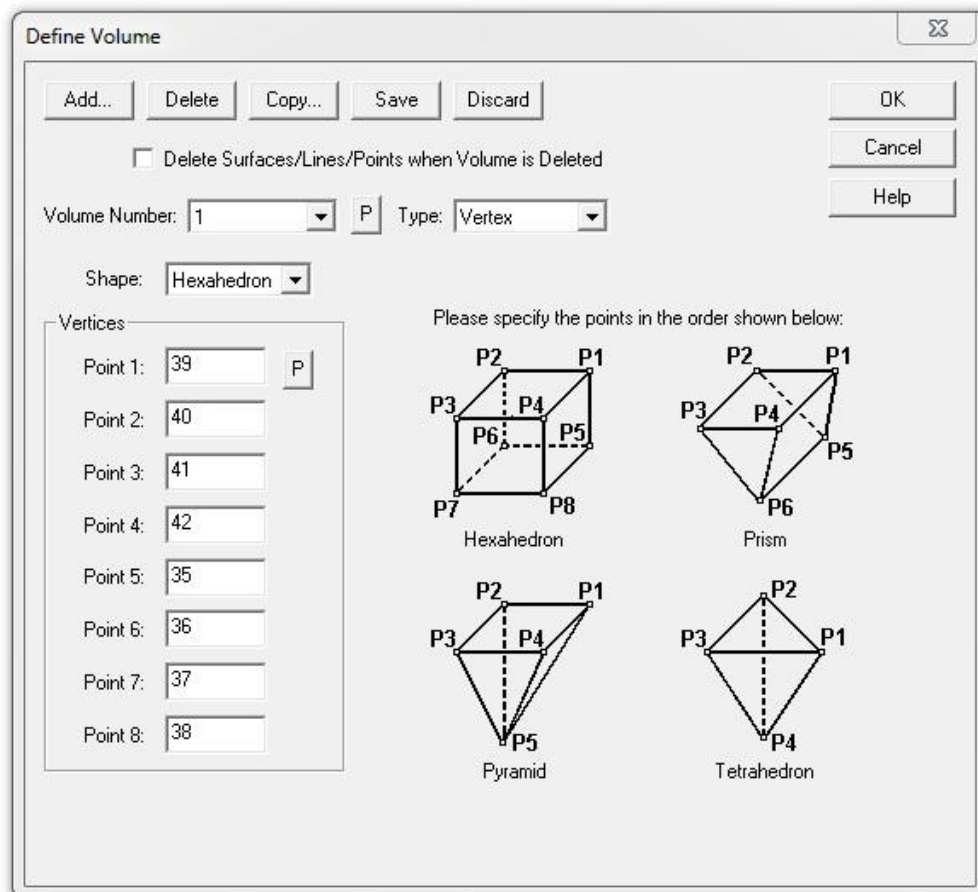
Τέλος παρουσιάζονται τα είδη αναλύσεων στα οποία θα προχωρήσουμε, καθώς και τα γεωμετρικά και αδρανειακά μεγέθη των διατομών που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια αυτών.

### **2.1 Παρουσίαση του ADINA για την προσομοίωση του συστήματος εφεδράνου-πλάκας με τρισδιάστατα και επιφανειακά στοιχεία**

Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής μας εργασίας θα προσομοιάσουμε το τμήμα του φορέα που εξασφαλίζει τη μεταφορά του φορτίου από το κατάστρωμα στο μεταλλικό φορέα.

## Γεωμετρία

Αρχικά ορίζουμε τα σημεία του φορέα με την εντολή **Geometry -> Points** και για κάθε ένα σημείο τις συντεταγμένες του x, y, z σε m. Στη συνέχεια με την εντολή **Geometry -> Lines -> Define** ορίζουμε τις γραμμές του φορέα μας και με την εντολή **Geometry -> Surfaces -> Define** την επιφάνεια της πλάκας. Ακολούθως, ορίζουμε το πάχος αυτής (60 cm) μέσω της εντολής **Geometry -> Surfaces -> Thickness**. Στη συνέχεια ορίζουμε τη γεωμετρία του εξαέδρου με την εντολή **Geometry -> Volumes -> Define**. Με την επιλογή **Type: Vertex** δίνουμε τα σημεία με τη σειρά που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα ώστε να προκύψουν αυτόματα οι επιφάνειες του εξαέδρου.

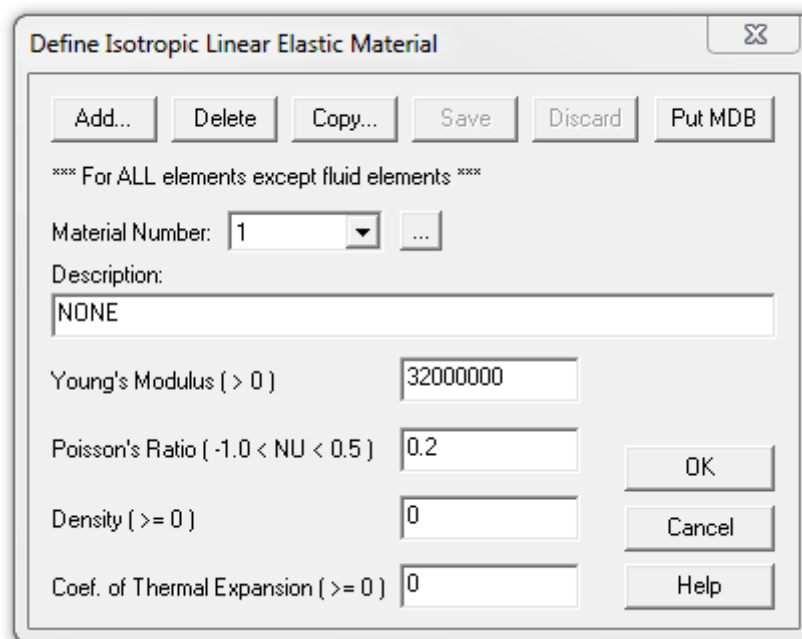


Σχήμα 2.1: Ορισμός όγκου εξαέδρου

## Υλικό

Το υλικό κατασκευής είναι οπλισμένο σκυρόδεμα ενώ κατά την προσομοίωση του φορέα κάνουμε τις εξής παραδοχές:

Το υλικό μας είναι ιστροπικό ελαστικό με μέτρο ελαστικότητας  $E = 32,000,000 \text{ KN/m}^2$  και λόγο Poisson  $\nu = 0.2$ . Χρησιμοποιούμε την εντολή **Model > Materials > Elastic > Isotropic** όπου προσθέτουμε τις παραπάνω ελαστικές σταθερές.

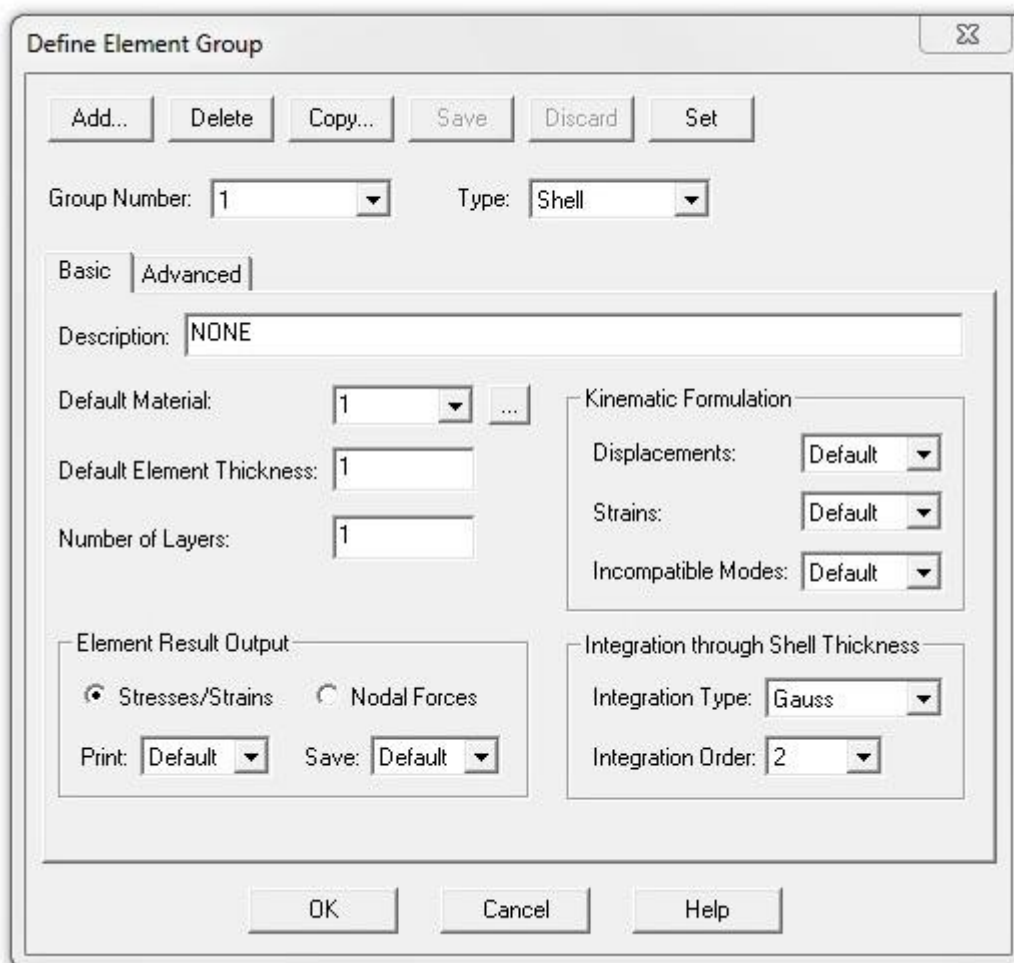


Σχήμα 2.2: Ορισμός ελαστικών σταθερών του υλικού

Στη συνέχεια ορίζουμε τις συνθήκες στήριξης του φορέα μας. Η προσομοίωση τους θα γίνει μέσω ελατηρίων σταθεράς  $EA/L$  (προσεγγιστικά με προεπιλογή διατομών) σε κάθε διεύθυνση. Αυτό το πετυχαίνουμε με την εντολή **Model -> Materials -> Spring Property Set**. Στόχος μας είναι να υπολογίσουμε τη δύναμη επαναφοράς του κάθε ελατηρίου πολλαπλασιάζοντας τη σταθερά του ελατηρίου  $K$  επί την αντίστοιχη μετακίνηση. Οι δυνάμεις αυτές μεταφέρονται ίσες και αντίθετες στον μεταλλικό πύργο.

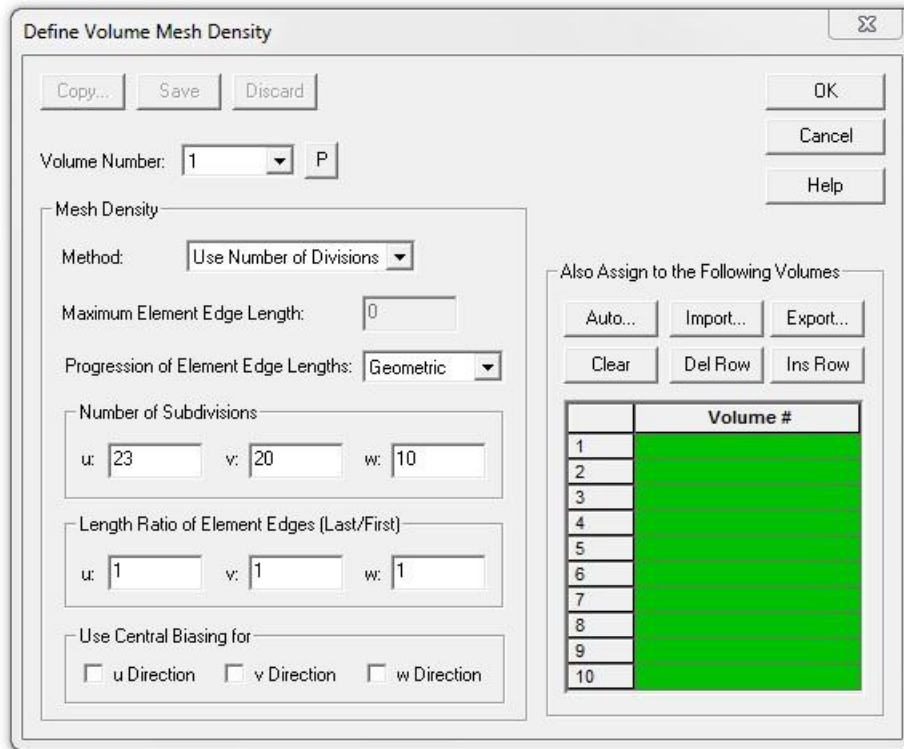
### Διακριτοποίηση του φορέα με δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων

Χρησιμοποιούμε στοιχεία κελύφους και στοιχεία 3-D. Με την εντολή **Meshing -> Element Groups** ορίζουμε τα element groups 1, 2 και 3 σε καθένα από τα οποία επιλεγουμε αντιστοίχα **Type: Shell, 3-D Solid** και **Spring**. Στην επιλογή Default Material επιλέγουμε τον αριθμό που αντιστοιχεί στο υλικό που χρησιμοποιούμε.



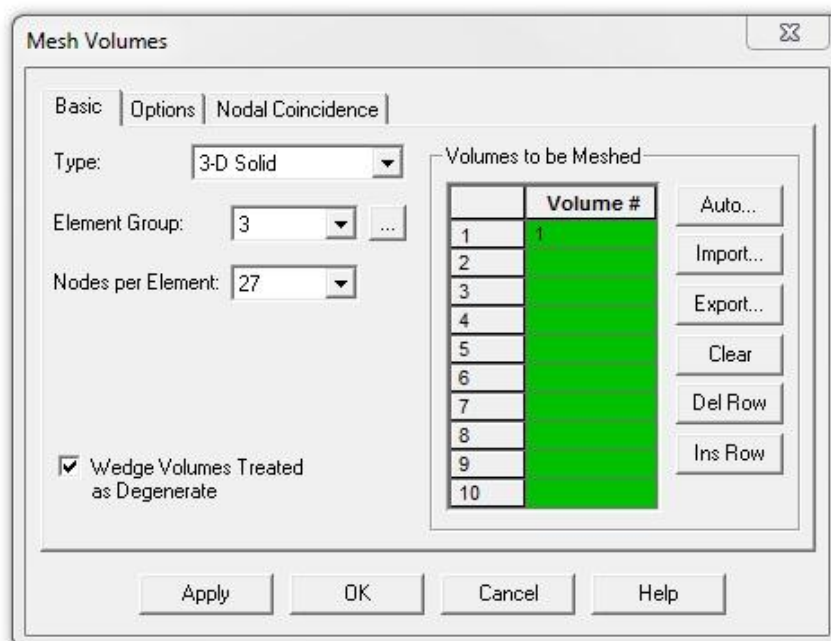
Σχήμα 2.3: Ορισμός τύπου πεπερασμένων στοιχείων

Γίνεται χρήση της εντολής **Meshing -> Mesh Density -> Volume** και ορίζουμε **Method: Use Number of Divisions** όπου εισάγουμε τον αριθμό των διαιρέσεων του όγκου σε κάθε μία από τις τρεις διευθύνσεις του.



Σχήμα 2.4: Διαίρεση Όγκου

Τέλος, με χρήση της εντολής **Meshing -> Create Mesh -> Volume** δημιουργούμε δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων για τον όγκο. Επιλέγουμε **Volume #: 1, Type: 3-D Solid, Element Group:3** και **Nodes per Element: 27** ώστε να πετύχουμε τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια.

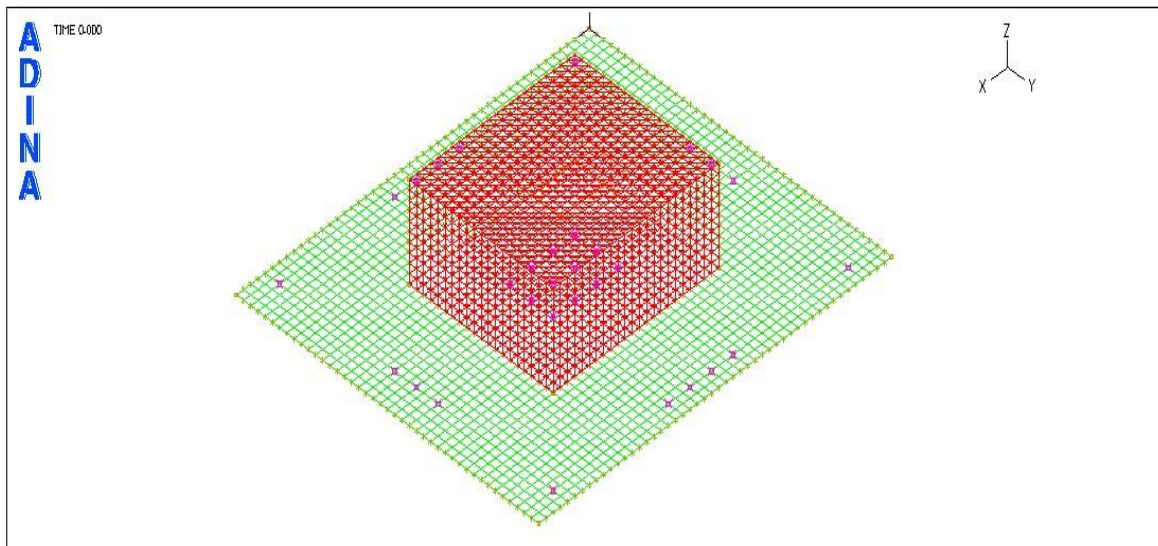


Σχήμα 2.5: Διακριτοποίηση Όγκου

Με ανάλογο τρόπο θα προχωρήσουμε στη διακριτοποίηση της επιφάνειας της πλάκας. Οι εντολές που θα χρησιμοποιήσουμε είναι αντίστοιχα με παραπάνω οι εξής:

- **Meshing -> Mesh Density -> Surface**
- **Meshing -> Create Mesh -> Surface**

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω διαδικασιών προκύπτει ο φορέας του σχήματος 2.6.



Σχήμα 2.6: Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων

Σε αυτό το στάδιο θα πρέπει να εξασφαλίσουμε τη συνεργασία μεταξύ της πλάκας και του τρισδιάστατου όγκου. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να ακολουθηθεί η εξής πορεία

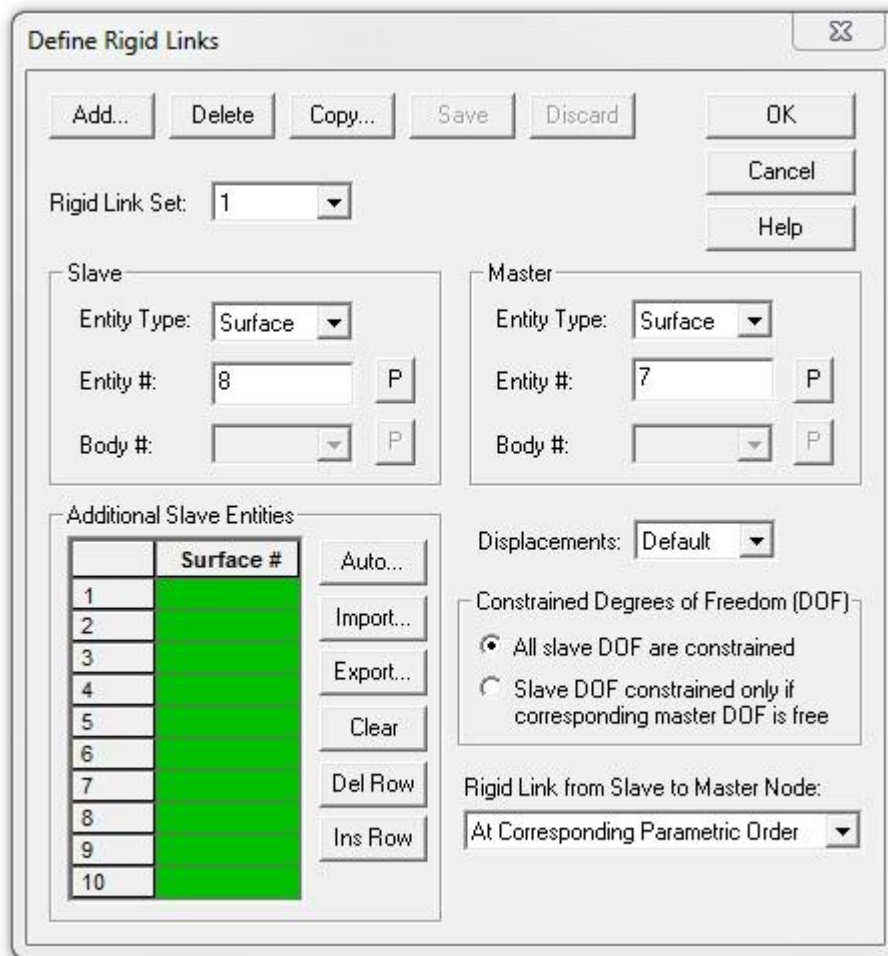
Η κάτω επιφάνεια του κύβου πρέπει να απέχει κατά μια απόσταση της τάξης  $10^{-5}$  μ από την πλάκα. Εάν είναι κολλημένες μεταξύ τους το μοντέλο μας θα είναι λανθασμένο επειδή θα θεωρηθεί μονολιθική σύνδεση ενώ εάν η απόσταση αυτή μεγαλώσει η διαδικασία που θα περιγράψουμε παρακάτω δεν θα μπορεί να εφαρμοστεί επειδή τα δύο αυτά στοιχεία θα συμπεριφέρονται ανεξάρτητα.

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA μας δίνει δύο δυνατότητες όσον αφορά τον τρόπο συνεργασίας των δύο επιφανειών μεταξύ τους.

Η πρώτη αφορά στη δημιουργία δύο contact groups και στη συνέχεια στην εισαγωγή συντελεστή τριβής ωστόσο λόγω των αβεβαιοτήτων που υπήρχαν προχωρήσαμε στην εφαρμογή της εναλλακτικής. Η διαδικασία έχει ως εξής :



Ορίζουμε μία νέα επιφάνεια η οποία έχει ίσο εμβαδό με την κάτω έδρα του εξαέδρου και ανήκει στην πλάκα. Στη συνέχεια δημιουργούμε άκαμπτους συνδέσμους **Rigid Links** μεταξύ των δύο επιφανειών. Με την εντολή **Model -> Constraints -> Rigid Links** πετυχαίνουμε την επιθυμητή σχέση εξάρτησης, με τις μετακινήσεις της επιφάνειας «**slave**» να ακολουθούν αυτές της επιφάνειας «**master**». Συγκεκριμένα, με αυτή τη διαδικασία τα στοιχεία της πλάκας ακολουθούν τις μετακινήσεις της κάτω έδρας του εξαέδρου.



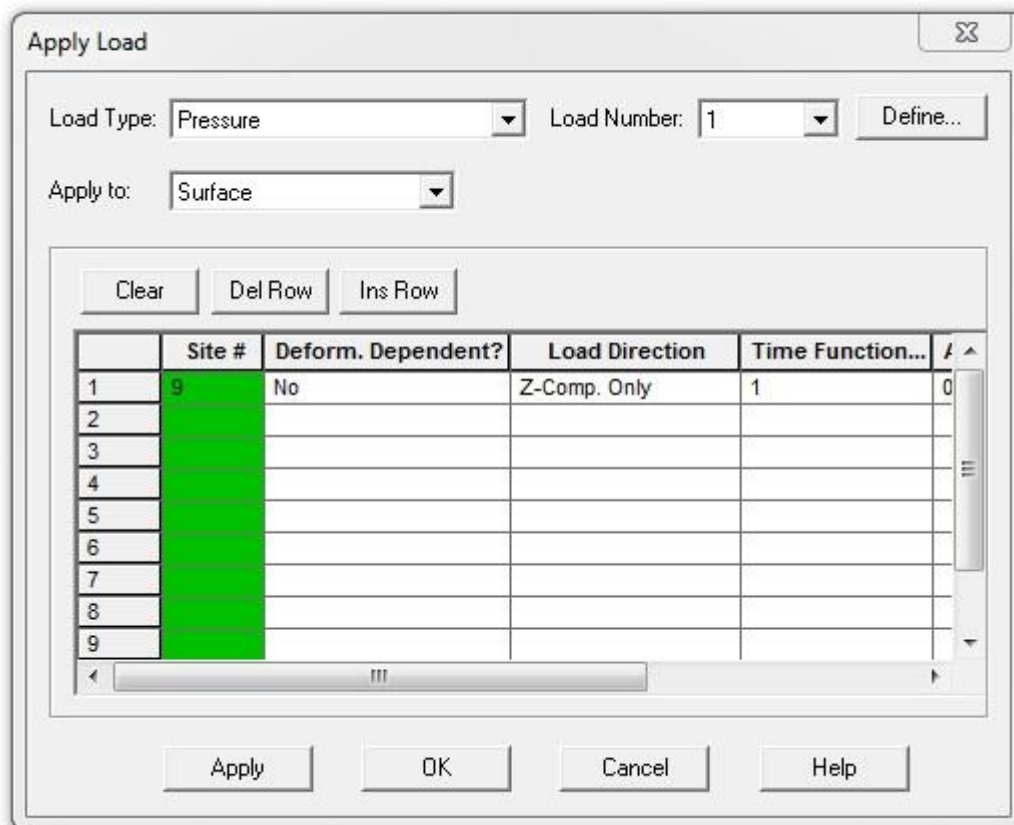
Σχήμα 2.7: Δημιουργία Rigid Links

### Φόρτιση του φορέα

Με χρήση της εντολής **Model -> Loading -> Apply** εφαρμόζουμε το κατανεμημένο φορτίο στην επιφάνεια του εφεδράνου (surface 9) επιλέγοντας **Load Type: Pressure** και **Apply to: Surface**. Στην επιλογή **Define -> Add** ορίζουμε το μέγεθος του φορτίου:

- 12,000 KN/m<sup>2</sup> κατακόρυφο ( άξονα z) και
- 600 KN/m<sup>2</sup> οριζόντιο στις δύο διευθύνσεις (άξονες x,y)

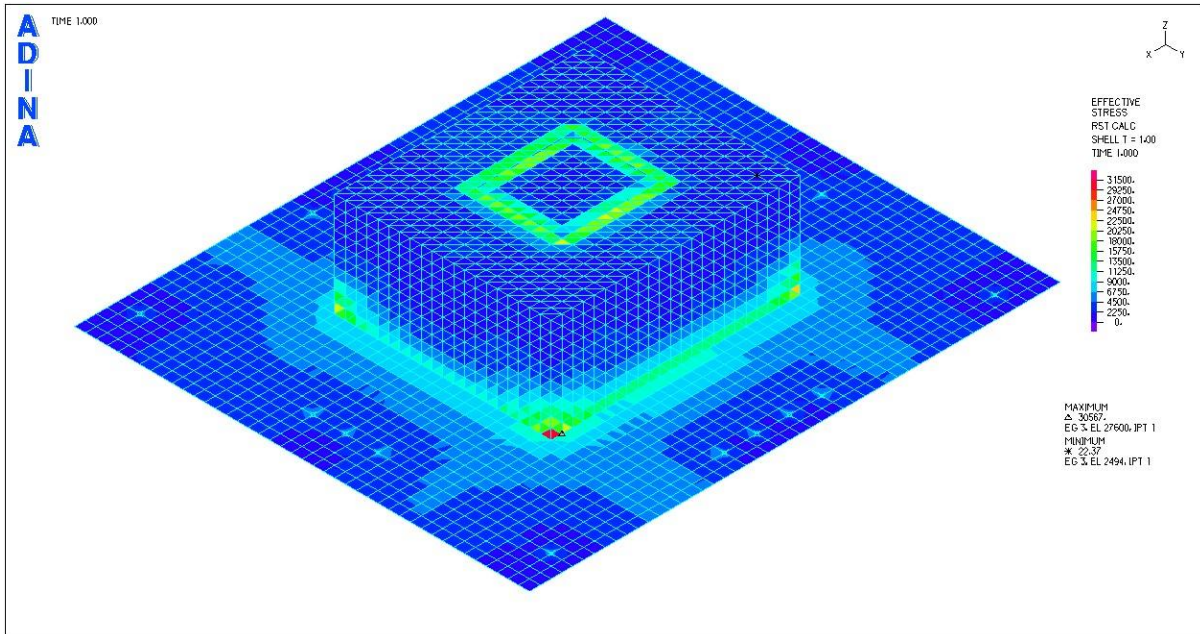
Στην επιλογή **Load Direction** δηλώσαμε την κατεύθυνση του φορτίου και τέλος επιλέγουμε **Deformation Dependent: No** ώστε να μην αλλάζει η κατεύθυνση του φορτίου συναρτήσει των παραμορφώσεων.



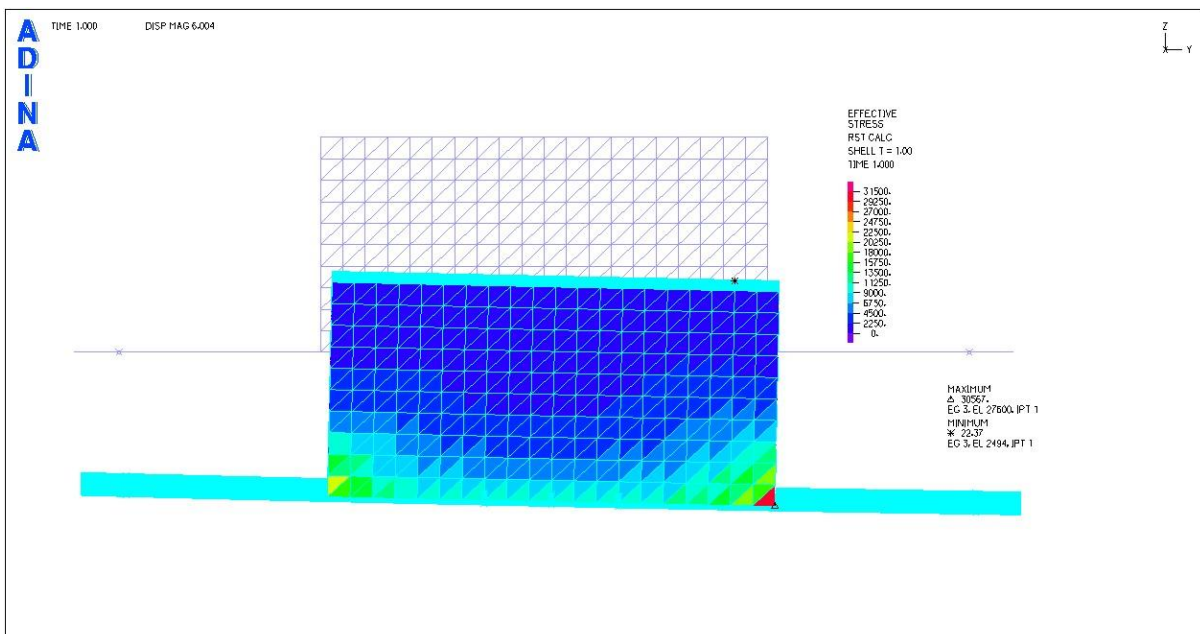
Σχήμα 2.8: Επιβολή φορτίου

### Στατική Ανάλυση

Η στατική ανάλυση πραγματοποιείται επιλέγοντας στη θέση **Analysis Type: Statics** και στη συνέχεια **Solution -> Data File/Run**. Η ανάλυση αυτή μας δίνει τάσεις και μετακινήσεις στο φορέα.



Σχήμα 2.9: Εικόνα Δρωσών τάσεων στον φορέα (προοπτικό)



Σχήμα 2.10: Εικόνα Δρωσών τάσεων στον φορέα, όψη y-z

Στη συνέχεια μέσω της εντολής **List -> Value List -> Zone** βρίσκουμε τις μετακινήσεις στους κόμβους του φορέα. Ειδικότερα, επιλέγουμε **Zone Name: Element Group 2**, που αντιστοιχεί στους κόμβους των ελατηρίων, και με αυτόν τρόπο έχουμε προσδιορίσει όλες τις μετακινήσεις στις θέσεις των ελατηρίων σε κάθε άξονα x,y,z όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1.

Ακολούθως, πολλαπλασιάζοντας την σταθερά του ελατηρίου **K** (KN/m) με την αντίστοιχη μετακίνηση **U** (m) σε κάθε άξονα προκύπτουν οι αντίστοιχες δυνάμεις επαναφοράς **F** (KN) των ελατηρίων:

$$F=K*U$$

Συγκεντρωτικά οι μετακινήσεις **U** και οι δυνάμεις **F** για κάθε κόμβο αποτυπώνονται στον Πίνακα 2.1.

Στο επόμενο βήμα οι δυνάμεις  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  του Πίνακα 2.1 μεταφέρονται στο μεταλλικό πύργο σαν επικόμβια φορτία και θα αποτελέσουν τη φόρτιση του φορέα. Όπως φαίνεται από το σχήμα 2.10 η στροφή της πλάκας λόγω των οριζοντίων δυνάμεων προκαλεί μία σημαντική διαφοροποίηση στις τιμές της κατακόρυφης δύναμης από θέση σε θέση. Συγκεκριμένα η ανύψωση της πλάκας επιφέρει τη μείωση του κατακόρυφου φορτίου στα 344.96 KN ενώ η βύθιση αυτής αυξάνει το κατακόρυφο φορτίο στα 447.35 KN. Σημειώνουμε πως, εάν η πλάκα δε είχε διαφορικές μετακινήσεις η κατακόρυφη αντίδραση θα ήταν σε όλους τους κόμβους ίδια και ίση με 400 KN.

NODES	DISPL_X (m)	Fx (KN)	DISPL_Y (m)	Fy (KN)	DISPL_Z ( m )	Fz (KN)
105	0,000643	19,29	0,000665	19,95	0,001150	344,96
121	0,000666	19,97	0,000665	19,94	0,001228	368,27
124	0,000666	19,98	0,000665	19,94	0,001241	372,19
127	0,000667	20,00	0,000664	19,93	0,001254	376,11
130	0,000667	20,01	0,000664	19,93	0,001267	380,03
146	0,000669	20,06	0,000665	19,94	0,001327	398,22
905	0,000664	19,92	0,000666	19,98	0,001228	368,50
<b>921</b>	<b>0,000665</b>	19,95	<b>0,000666</b>	19,97	<b>0,001309</b>	392,63
<b>924</b>	<b>0,000666</b>	19,99	<b>0,000666</b>	19,97	<b>0,001322</b>	396,61
<b>927</b>	<b>0,000668</b>	20,03	<b>0,000666</b>	19,97	<b>0,001335</b>	400,55
<b>930</b>	<b>0,000669</b>	20,07	<b>0,000666</b>	19,97	<b>0,001348</b>	404,46
946	0,000669	20,08	0,000666	19,98	0,001406	421,90
1055	0,000664	19,92	0,000666	19,99	0,001241	372,44
<b>1071</b>	<b>0,000665</b>	19,95	<b>0,000667</b>	20,01	<b>0,001322</b>	396,58
<b>1074</b>	<b>0,000666</b>	19,99	<b>0,000667</b>	20,01	<b>0,001335</b>	400,55
<b>1077</b>	<b>0,000668</b>	20,03	<b>0,000667</b>	20,01	<b>0,001348</b>	404,50
<b>1080</b>	<b>0,000669</b>	20,07	<b>0,000667</b>	20,01	<b>0,001361</b>	408,41
1096	0,000669	20,08	0,000666	19,99	0,001419	425,83
1205	0,000664	19,92	0,000667	20,00	0,001254	376,31
<b>1221</b>	<b>0,000665</b>	19,95	<b>0,000668</b>	20,04	<b>0,001335</b>	400,50
<b>1224</b>	<b>0,000666</b>	19,99	<b>0,000668</b>	20,04	<b>0,001348</b>	404,48
<b>1227</b>	<b>0,000668</b>	20,03	<b>0,000668</b>	20,04	<b>0,001361</b>	408,42
<b>1230</b>	<b>0,000669</b>	20,07	<b>0,000668</b>	20,04	<b>0,001374</b>	412,33
1246	0,000670	20,09	0,000667	20,00	0,001432	429,70
2005	0,000664	19,91	0,000668	20,03	0,001314	394,20
2021	0,000665	19,96	0,000669	20,07	0,001392	417,63
2024	0,000666	19,98	0,000669	20,06	0,001405	421,53
2027	0,000667	20,00	0,000669	20,07	0,001418	425,44
2030	0,000667	20,02	0,000669	20,07	0,001431	429,36
2046	0,000669	20,08	0,000668	20,04	0,001491	447,35

Πίνακας 2.1 Μετακινήσεις και Δυνάμεις κατά x,y και z

## 2.2 Δράση του Ανέμου

### Η θεμελιώδης βασική ταχύτητα τα ανέμου $v_{b,0}$

Η θεμελιώδης βασική ταχύτητα ανέμου  $v_{b,0}$  είναι η μέση ταχύτητα ανέμου διάρκειας 10 λεπτών, με ετήσια πιθανότητα υπέρβασης 0,02, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση του ανέμου, σε ύψος 10 m πάνω από επίπεδη ανοιχτή περιοχή εδάφους με χαμηλή βλάστηση, όπως γρασίδι και με μεμονωμένα εμπόδια ανά αποστάσεις μεταξύ τους τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων (έδαφος κατηγορίας II).. Στο Εθνικό Προσάρτημα έχουν υιοθετηθεί οι εξής τιμές για την  $v_{b,0}$ :

- Για τα νησιά και παράλια μέχρι 10km από την ακτή  $v_{b,0}=33\text{m/s}$  και
- Για την υπόλοιπη Ελλάδα  $v_{b,0}=27\text{m/s}$ .

Οπότε, η θεμελιώδης βασική ταχύτητα του ανέμου της περιοχής που πραγματοποιείται το έργο προσδιορίστηκε σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, Μέρος 1 – 4 και το αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα

$$v_{b,0}=27 \text{ m/sec}$$

### Βασική ταχύτητα ανέμου $v_b$

Είναι η θεμελιώδης βασική ταχύτητα ανέμου τροποποιημένη προκειμένου να λάβει υπόψη τη διεύθυνση του θεωρούμενου ανέμου (συντελεστής διεύθυνσης,  $c_{dir}$ ) και την εποχή, εάν απαιτείται (εποχικός συντελεστής,  $c_{season}$ ). Στη δικιά μας περίπτωση, όπως και στις περισσότερες, οι συντελεστές αυτοί είναι ίσοι με την μονάδα.

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 27 \text{ m/sec}$$

### Τραχύτητα του εδάφους

Η τραχύτητα του εδάφους εξαρτάται κυρίως από το ύψος και την πυκνότητα των εμποδίων (κτίρια και δένδρα) γύρω από την εξεταζόμενη περιοχή. Επηρεάζει την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου καθ' ύψος. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, Μέρος 1 – 4 προβλέπονται 5 κατηγορίες εδάφους (0, I, II, III και IV). Για το έργο μας επιλέγουμε κατηγορία εδάφους II:

- Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δένδρα, κτίρια) σε απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων.

**Μέση ταχύτητα ανέμου**

Είναι η βασική ταχύτητα ανέμου τροποποιημένη προκειμένου να λάβει υπόψη την επίδραση της τραχύτητας του εδάφους (συντελεστής τραχύτητας,  $c_r(z)$ ) και την τοπογραφία (συντελεστής αναγλύφου,  $c_0(z)$ ).

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$$

Για τον άνεμο θεωρείται ότι ισχύει πρακτικά η θεωρία του οριακού στρώματος και η ταχύτητα μεταβάλλεται καθ' ύψος με λογαριθμικό τρόπο (ισχύει μέχρι ύψους  $z_{max}=200m$ ). Η μεταβολή αυτή της ταχύτητας του ανέμου καθ' ύψος, για τις διάφορες τραχύτητες του εδάφους, δίνεται από τον συντελεστή τραχύτητας  $c_r(z)$ .

Ο **συντελεστής τραχύτητας  $c_r(z)$**  δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln(z/z_0) \quad \text{για } z_{min} \leq z \leq z_{max}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{min}) \quad \text{για } z < z_{min}$$

όπου ο συντελεστής εδάφους  $k_r$  δίνεται από την σχέση:

$$k_r = 0.19 \cdot (z_0 / z_{0,II})^{0.07}$$

Στις σχέσεις αυτές :

- $z_0$  είναι το μήκος τραχύτητας σε m
- $z_{0,II}=0.05$  m για έδαφος κατηγορίας II
- $z_{min}$  το ελάχιστο ύψος που ορίζεται ανάλογα με την κατηγορία εδάφους
- $z_{max}$  λαμβάνεται ίσο με 200 m

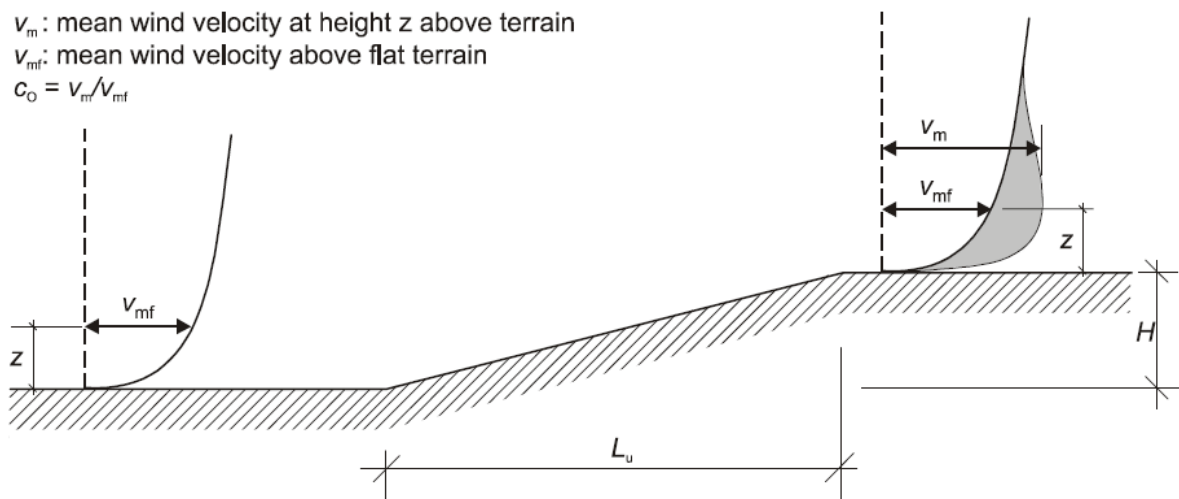
Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν όταν το έδαφος στη διεύθυνση του ανέμου έχει ομοιόμορφη τραχύτητα σε αρκετά μεγάλο μήκος ώστε να μπορεί να θεωρηθεί η κατηγορία εδάφους σταθερή. Σε περίπτωση αμφιβολίας σχετικά με την τραχύτητα του εδάφους, ιδίως σε περιπτώσεις όπως π.χ. όταν στις διάφορες διευθύνσεις γύρω από το κτίριο ισχύουν διαφορετικές τραχύτητες εδάφους ή όταν πάνω σε μία διεύθυνση αλλάζει η τραχύτητα του εδάφους συνιστάται να λαμβάνεται η δυσμενέστερη δηλαδή η μικρότερη.

Οι παράμετροι  $z_0$  και  $z_{min}$  για κατηγορία εδάφους II είναι:

- $z_0=0.05$  m

-  $z_{\min}=2 \text{ m}$

Ο **συντελεστής αναγλύφου** λαμβάνει υπόψη την αύξηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου που παρατηρείται σε κορυφές των λόφων ή σε κοιλάδες και χαράδρες.



Σχήμα 2.11:Αύξηση της ταχύτητας του ανέμου λόγω ανάγλυφου του εδάφους

Ορίζεται ως ο λόγος της μέσης ταχύτητας,  $v_m(z)$ , στην πλαγιά ή την κορυφή του λόφου προς την ταχύτητα στη βάση του λόφου (σε επίπεδο έδαφος,  $v_{mf}(z)$ ). Σε κοιλάδες αν δεν αναμένεται επιτάχυνση της πνοής του ανέμου λόγω της διαμόρφωσης του περιβάλλοντος χώρου, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση μας, μπορεί να λαμβάνεται  $c_0=1$ . Συγκεντρωτικά ισχύουν οι παρακάτω Πίνακες:

Αρχικές Παραδοχές				Τραχύτητα 2		
	$v_{b,0}$ (m/sec)	$C_{dir}$	$C_{season}$	$z_0$	$z_{\min}$	$z_{\max}$
	27	1	1	0,05	2	200

Πίνακας 2.2: Αρχικές Παραδοχές ανεμοφόρτισης



H(m)	z(m)	z <sub>0</sub> (m)	z <sub>01</sub> (m)	k <sub>r</sub>	c <sub>r</sub> (z)	
1,50	2	0,05	0,05	0,19	0,70	z=1.95m<z <sub>min</sub>
3,00	3,45	0,05	0,05	0,19	0,80	
4,50	4,95	0,05	0,05	0,19	0,87	
5,50	5,95	0,05	0,05	0,19	0,91	
6,50	6,95	0,05	0,05	0,19	0,94	
7,75	8,2	0,05	0,05	0,19	0,97	
9,25	9,7	0,05	0,05	0,19	1,00	
10,75	11,2	0,05	0,05	0,19	1,03	
12,25	12,7	0,05	0,05	0,19	1,05	
13,25	13,7	0,05	0,05	0,19	1,07	
14,25	14,7	0,05	0,05	0,19	1,08	
15,50	15,95	0,05	0,05	0,19	1,10	
16,75	17,2	0,05	0,05	0,19	1,11	

Πίνακας 2.3: Υπολογισμός συντελεστή τραχύτητας συναρτήσει του ύψους z

### Ταχύτητα αιχμής-Πίεση αιχμής

Γενικώς, η ταχύτητα του ανέμου δεν είναι σταθερή. Η μέση ταχύτητα μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου ανάλογα με τα καιρικά φαινόμενα και τις μετεωρολογικές διαταραχές. Αλλά και στην περίπτωση που αυτή μπορεί να θεωρηθεί σταθερή η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου διακυμαίνεται, λόγω των στροβιλισμών, γύρω από την μέση τιμή  $v_m$ . Για τον προσδιορισμό της δράσης του ανέμου σε κάθε ύψος z υπολογίζουμε την πίεση ταχύτητας αιχμής, η οποία περιλαμβάνει μέσες και μικρής διάρκειας διακυμάνσεις ταχύτητας και δίνεται από τη σχέση:

$$q_p(z) = [1+7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z)$$

όπου:

- $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα, που εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το υψόμετρο και τη βαρομετρική πίεση που αναμένονται σε μία περιοχή κατά τη διάρκεια ανεμοθύελλας ( $\rho=1,25 \text{ Kg/m}^3$ )
- $I_v(z)$  είναι η ένταση του στροβιλισμού σε ύψος z

Η ένταση του στροβιλισμού  $I_v(z)$  σε ύψος z υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$I_v(z) = \frac{kI}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{για} \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{για} \quad z < z_{\min}$$

όπου:

$k_i$  είναι ο συντελεστής στροβιλισμού, ίσος με τη μονάδα.

Ο υπό μελέτη μεταλλικός πύργος μπορεί να διαιρεθεί καθ' ύψος σε 13 φατνώματα το καθένα από τα οποία έχει ύψος 1.00m, 1.25m ή 1.50m.

Ως φάτνωμα μπορούμε να ορίσουμε οποιοδήποτε κατάλληλο τμήμα του πύργου ή του ιστού, που διαιρείται κατακόρυφα ώστε να υπολογιστούν οι προβαλλόμενες επιφάνειες και οι συντελεστές ανεμοφόρτισης. Συνήθως, αλλά όχι απαραίτητα, τα φατνώματα λαμβάνονται στα σημεία τομής των ορθοστατών και των ράβδων της κυρίας δικτύωσης. Στον παρακάτω Πίνακα φαίνεται για κάθε φάτνωμα το ύψος  $z$  σε m από την επιφάνεια του εδάφους, το ύψος  $H(m)$  από τη βάση του μεταλλικού πύργου, ο συντελεστής τραχύτητας  $c_r(z)$ , ο συντελεστής αναγλύφου ή διαφορετικά συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης, η ένταση στροβιλισμού  $I_v(z)$ , η μέση ταχύτητα ανέμου  $v_m(z)$ , η βασική ταχύτητα ανέμου  $v_b$  και πίεση αιχμής  $q_p$ .

Φάτνωμα	H(m)	Z(m)	$c_r$	$c_0$	$v_b$ (m/s)	$v_m$ (m/s)	$I_v$	$q_p$ (kN/m)
1	1,50	2,00	0,70	1,00	27,00	18,92	0,27	0,65
2	3,00	3,45	0,80	1,00	27,00	21,72	0,24	0,78
3	4,50	4,95	0,87	1,00	27,00	23,57	0,22	0,88
4	5,50	5,95	0,91	1,00	27,00	24,52	0,21	0,93
5	6,50	6,95	0,94	1,00	27,00	25,31	0,20	0,97
6	7,75	8,20	0,97	1,00	27,00	26,16	0,20	1,01
7	9,25	9,70	1,00	1,00	27,00	27,02	0,19	1,06
8	10,75	11,20	1,03	1,00	27,00	27,76	0,18	1,10
9	12,25	12,70	1,05	1,00	27,00	28,41	0,18	1,14
10	13,25	13,70	1,07	1,00	27,00	28,80	0,18	1,16
11	14,25	14,70	1,08	1,00	27,00	29,16	0,18	1,19
12	15,50	15,95	1,10	1,00	27,00	29,58	0,17	1,21
13	16,75	17,20	1,11	1,00	27,00	29,96	0,17	1,23

Πίνακας 2.4: Υπολογισμός της Πίεσης αιχμής  $q_p$  συναρτήσεως του ύψους  $z$

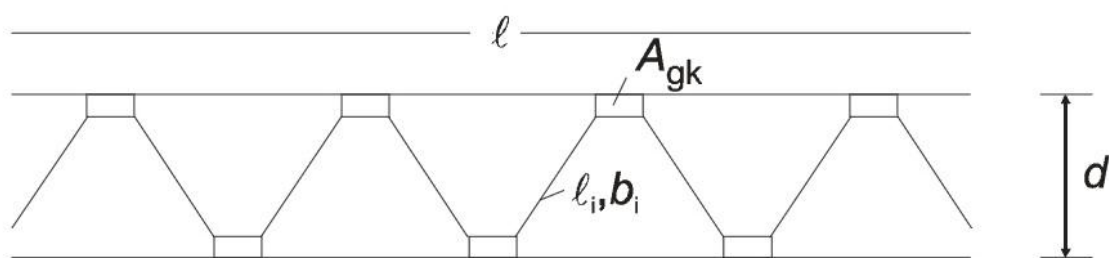
Ο Ευρωκώδικας 3, Μέρος 3-1 προβλέπει δύο διαδικασίες προσδιορισμού της ανεμοφόρτισης, έναν για νέες και έναν για υφιστάμενες κατασκευές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγη η διαδικασία για νέες κατασκευές όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

### Συντελεστής δύναμης ανέμου $c_{f,s}$ για νέες κατασκευές

Για τον υπολογισμό της ανεμοφόρτισης, η κατασκευή πρέπει να χωρίζεται σε μια σειρά από φατνώματα, τα οποία αποτελούνται από πολλά παρόμοια ή σχεδόν παρόμοια δομικά τμήματα. Οι επιφάνειες πρόσπτωσης της ανεμοπίεσης πρέπει να περιλαμβάνουν τις επιφάνειες προβολής κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου, αγνοώντας επιφάνειες παράλληλες στη διεύθυνση του ανέμου και στη περιοχή σκίασης (π.χ. σε δικτυώσεις).

Ο αριθμός των φατνωμάτων πρέπει να είναι επαρκής, έτσι ώστε να προσομοιώνεται σωστά η ανεμοφόρτιση για τον υπολογισμό του συνολικού συστήματος. Στον υπό μελέτη μεταλλικό πύργο έχουμε 13 στον αριθμό.

Ο συντελεστής δύναμης  $c_f$  θα υπολογιστεί σύμφωνα με τη μέθοδο που προτείνει ο Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-3 για μεταλλικούς πύργους. Για την εφαρμογή της μεθόδου που ακολουθείται παρακάτω, πρέπει να χρησιμοποιείται η μέγιστη δύναμη του ανέμου που βρίσκεται εντός γωνίας  $\pm 30^\circ$  ως προς την ονομαστική διεύθυνση, έτσι ώστε να προσδιορίζεται η μέγιστη ανεμοφόρτιση στην κατεύθυνση του ανέμου.



Σχήμα 2.12: Δικτυωτή κατασκευή ή ικρίωμα

Ο λόγος πληρότητας  $\varphi$  καθορίζεται από τη σχέση :

$$\varphi = \frac{A}{A_c}$$

όπου:

$A$  είναι το άθροισμα της προβαλλόμενης επιφάνειας των μελών και των κομβοελασμάτων, κάθετα προς την όψη:  $A = \sum_i b_i \cdot l_i + \sum_k A_{gk}$

$A_c$  είναι η επιφάνεια που περικλείεται μεταξύ των ακραίων στοιχείων, προβαλλόμενα κάθετα προς την όψη:  $A_c = d \cdot l$

$l, d$  είναι το μήκος και πλάτος του δικτυώματος

$l_i, b_i$  είναι το μήκος και το πλάτος του μεμονωμένου μέλους  $i$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12, προβαλλόμενου κάθετα στην όψη

$A_{gk}$  είναι η επιφάνεια του κομβοελάσματος  $k$ .

Η επιφάνεια αναφοράς  $A_{ref}$  προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$A_{ref} = A$$

Ο φορέας μας αποτελείται από 13 φαντώματα, με το ύψος του καθενός να λαμβάνεται ως πλάτος  $d$ : 1,00 m, 1.25 m ή 1,50 m και με μήκος  $l$ : 4.75 m ή 5,125 m, ανάλογα ποια όψη εξετάζουμε, έτσι προκύπτουν οι Πίνακες 2.5 και 2.6. Σε κάθε φάντωμα εξετάζουμε όλα τα διαφορετικά μέλη, μήκους και πλάτους  $l_i$  και  $b_i$ .

d (m)	l (m)	li (m)	bi (m)	A (m <sup>2</sup> )	Ac (m <sup>2</sup> )	Agk (m <sup>2</sup> )	φ
1	4,75	2	0,1	0,4	4,75	0,3	0,504931
		0,375	0,07	0,0525			
		1,414	0,07	0,39592			
		1	0,25	1,25			
				2,39842			
1,25	4,75	2	0,1	0,4	5,9375	0,3	0,465395
		0,375	0,07	0,0525			
		1,601	0,07	0,44828			
		1,25	0,25	1,5625			
				2,76328			
1,5	4,75	2	0,1	0,4	7,125	0,3	0,439627
		0,375	0,07	0,0525			
		1,803	0,07	0,50484			
		1,5	0,25	1,875			
				3,13234			

Πίνακας 2.5: Υπολογισμός συντελεστή πληρότητας φ για φάτνωμα μήκους 4,75m

d (m)	l(m)	li (m)	bi (m)	A (m <sup>2</sup> )	Ac (m <sup>2</sup> )	Agk (m <sup>2</sup> )	φ
1	5,125	2	0,1	0,4	5,125	0,36	0,533594
		0,375	0,07	0,07875			
		1,414	0,07	0,39592			
		1	0,25	1,5			
				2,73467			
1,25	5,125	2	0,1	0,4	6,40625	0,36	0,493585
		0,375	0,07	0,07875			
		1,601	0,07	0,44828			
		1,25	0,25	1,875			
				3,16203			
1,5	5,125	2	0,1	0,4	7,6875	0,36	0,467459
		0,375	0,07	0,07875			
		1,803	0,07	0,50484			
		1,5	0,25	2,25			
				3,59359			

Πίνακας 2.6: Υπολογισμός συντελεστή πληρότητας φ για φάτνωμα μήκους 5,125 m

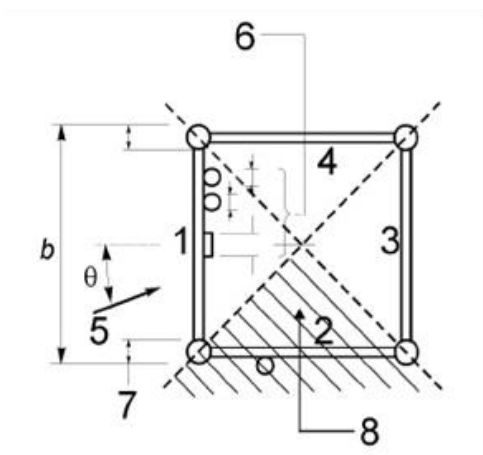
Ο ολικός συντελεστής ανεμοφόρτισης  $c_f$  στην κατεύθυνση του ανέμου σε ένα δομικό τμήμα της κατασκευής λαμβάνεται ίσος με:

$$\sum c_f = c_{f,S} + c_{f,A}$$

όπου:

$c_{f,S}$  είναι ο συντελεστής ανεμοφόρτισης της κατασκευής χωρίς εξαρτήματα, που προσδιορίζεται παρακάτω χρησιμοποιώντας τον συντελεστή πλήρωσης,  $\phi$ , για την κατασκευή χωρίς εξαρτήματα

$c_{f,A}$  είναι ο συντελεστής ανεμοφόρτισης που αφορά τα δευτερεύοντα στοιχεία της κατασκευής όπως είναι σκάλες, καλώδια, κάτοπτρα.



1. Όψη επιφάνειας 1
2. Όψη επιφάνειας 2
3. Όψη επιφάνειας 3
4. Όψη επιφάνειας 4
5. Άνεμος
6. Εξαρτήματα (προβολή κάθετα στην επιφάνεια 1)
7. Ορθοστάτης (προβολή κάθετα στην επιφάνεια)
8. Εξαρτήματα που βρίσκονται στην περιοχή που είναι εκχωρημένη στην όψη 2

Σχήμα 2.13: Κάτοψη τετραγωνικής κατασκευής

Για δικτυωτές κατασκευές με τετραγωνική ή ισοσκελή τριγωνική κάτοψη, που έχουν ίση επιφάνεια σε όλες τις όψεις, ο συνολικός συντελεστής ανεμοφόρτισης  $\sum c_{f,S}$  ενός τμήματος στην κατεύθυνση του ανέμου δίνεται από τη σχέση:

$$\sum c_{f,S} = K_{\theta} \cdot c_{f,S,0}$$

όπου :  $c_{f,S,0}$  είναι ο συνολικός συντελεστής ώσης του ανέμου ενός φατνώματος  $j$ ,

$K_{\theta}$  είναι ο συντελεστής πρόσπτωσης του ανέμου, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$K_{\theta} = 1,0 + K_1 K_2 \sin^2 2\theta \text{ για τετραγωνικές δικτυωτές κατασκευές}$$

$$\text{Όπου: } K_1 = \frac{0,55 \cdot A_f}{A_S} + \frac{0,8 \cdot (A_c + A_{c,\text{sup}})}{A_S}$$

$$\begin{aligned} K_2 &= 0,2 && \text{για } 0 \leq \varphi \leq 0,2 \text{ και } 0,8 \leq \varphi \leq 1,0 \\ &= \varphi && \text{για } 0,2 < \varphi \leq 0,5 \\ &= 1 - \varphi && \text{για } 0,5 < \varphi < 0,8 \end{aligned}$$

όπου:  $\theta$  είναι η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου, κάθετα στην όψη 1 (σχήμα 2.13)

$\varphi$  είναι ο συντελεστής πληρότητας, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, Μέρος 1-4.

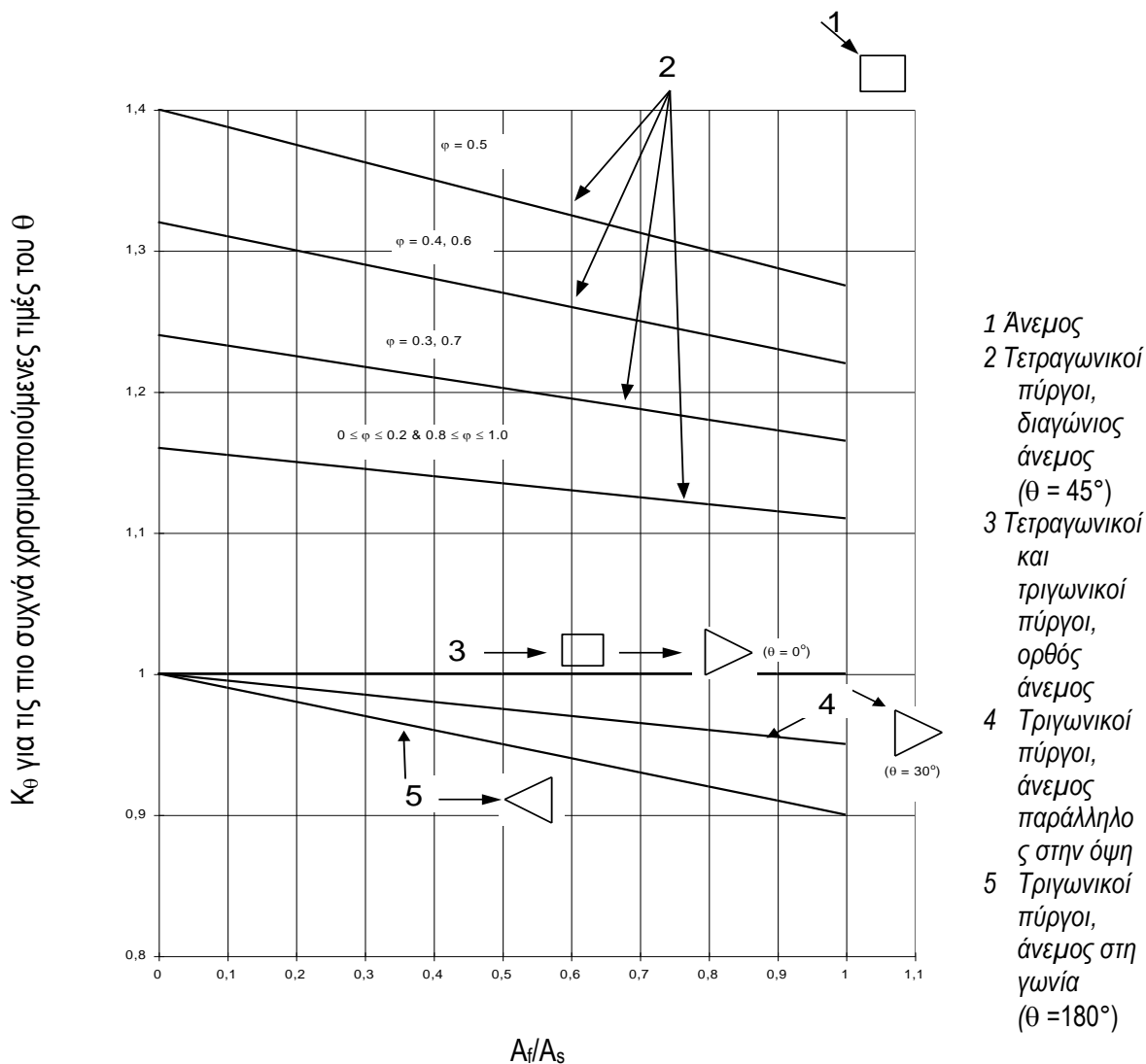
$A_f$  είναι η ολική επιφάνεια προβολής των μελών κοίλης επίπεδης διατομής της πρόσοψης, κάθετη στην πρόσοψη

$A_c$  είναι η ολική επιφάνεια προβολής των μελών κυκλικής διατομής της πρόσοψης, κάθετη στην πρόσοψη σε υποκρίσιμες συνθήκες

$A_{c,\text{sup}}$  είναι η ολική επιφάνεια προβολής των μελών κυκλικής διατομής της πρόσοψης, κάθετη στην πρόσοψη σε υπερκρίσιμες συνθήκες

$$\text{Ισχύει: } A_S = A_f + A_c + A_{c,\text{sup}}$$

Οι τιμές του συντελεστή  $K_\theta$  μπορούν να προσδιοριστούν και γραφικά από το Σχήμα 2.14 που ακολουθεί.



Σχήμα 2.14: Συντελεστής πρόσπτωσης ανέμου  $K_\theta$

Οι τιμές των ολικών συντελεστών ανεμοφόρτισης  $c_{f,s,0}$  που ισχύουν για δικτυωτούς πύργους τετραγωνικής ή τριγωνικής κατόψεως  $j$  και αποτελείται από μέλη με κοίλες επίπεδες και κυκλικές διατομές λαμβάνονται από :

$$c_{f,s,0,j} = c_{f,0,f} \cdot \frac{A_f}{A_s} + c_{f,0,c} \cdot \frac{A_c}{A_s} + c_{f,0,c,sup} \cdot \frac{A_{c,sup}}{A_s}$$

όπου:  $c_{f,0,f}$ ,  $c_{f,0,c}$  and  $c_{f,0,c,sup}$  είναι οι συντελεστές δύναμης σε φατνώματα αποτελούμενα από μέλη επιφάνειας επίπεδης, κυκλικής για υποκρίσιμη ροή του ανέμου και κυκλικής για υπερκρίσιμη ροή του ανέμου αντίστοιχα. Στον φορέα μας οι συντελεστές  $c_{f,0,c}$  και  $c_{f,0,c,sup}$  δεν υφίστανται αφού  $A_c$ ,  $A_{c,sup}=0$  όταν δεν έχουμε μέλη κυκλικής διατομής .



Για τον συντελεστή  $c_{f,0,f}$  ισχύει:

$$c_{f,0,f} = 1,76 \cdot C_1 [1 - C_2 \cdot \varphi + \varphi^2]$$

με:  $C_1 = 2,25$  για τετραγωνικές κατασκευές

$C_2 = 1,50$  για τετραγωνικές κατασκευές

Ακολουθούν οι Πίνακες 2.6 και 2.7 όπου υπολογίζεται ο συντελεστής  $c_{fs}$  για μήκη 4,75m και 5,125m αντίστοιχα.

Φάτνωμα	$C_{fs,0}$	$K_1$	$K_2$	$K_\theta$	$C_1$	$C_2$	$C_{fs}$
1	2,11	0,55	0,44	1,00	2,25	1,50	2,11
2	2,11	0,55	0,44	1,00	2,25	1,50	2,11
3	2,11	0,55	0,44	1,00	2,25	1,50	2,11
4	1,97	0,55	0,50	1,00	2,25	1,50	1,97
5	1,97	0,55	0,50	1,00	2,25	1,50	1,97
6	2,05	0,55	0,47	1,00	2,25	1,50	2,05
7	2,11	0,55	0,44	1,00	2,25	1,50	2,11
8	2,11	0,55	0,44	1,00	2,25	1,50	2,11
9	2,11	0,55	0,44	1,00	2,25	1,50	2,11
10	1,97	0,55	0,50	1,00	2,25	1,50	1,97
11	1,97	0,55	0,50	1,00	2,25	1,50	1,97
12	2,05	0,55	0,47	1,00	2,25	1,50	2,05
13	2,05	0,55	0,47	1,00	2,25	1,50	2,05

Πίνακας 2.6: Υπολογισμός συντελεστή  $c_{fs}$  για φάτνωμα μήκους 4.75m

Φάτνωμα	$C_{fs,0}$	$K_1$	$K_2$	$K_\theta$	$C_1$	$C_2$	$C_{fs}$
1	2,05	0,55	0,47	1,00	2,25	1,50	2,05
2	2,05	0,55	0,47	1,00	2,25	1,50	2,05
3	2,05	0,55	0,47	1,00	2,25	1,50	2,05
4	1,92	0,55	0,47	1,00	2,25	1,50	1,92
5	1,92	0,55	0,47	1,00	2,25	1,50	1,92
6	1,99	0,55	0,49	1,00	2,25	1,50	1,99
7	2,05	0,55	0,47	1,00	2,25	1,50	2,05
8	2,05	0,55	0,47	1,00	2,25	1,50	2,05
9	2,05	0,55	0,47	1,00	2,25	1,50	2,05
10	1,92	0,55	0,47	1,00	2,25	1,50	1,92
11	1,92	0,55	0,47	1,00	2,25	1,50	1,92
12	1,99	0,55	0,49	1,00	2,25	1,50	1,99
13	1,99	0,55	0,49	1,00	2,25	1,50	1,99

Πίνακας 2.7: Υπολογισμός συντελεστή  $c_{fs}$  για φάτνωμα μήκους 5.125m

### Δυνάμεις ανέμου

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, Μέρος 1 – 4 η συνολική δύναμη του ανέμου  $F_w$  η οποία επενεργεί επί μιας κατασκευής ή επί ενός επιμέρους στοιχείου της, προσδιορίζεται είτε με υπολογισμό δυνάμεων χρησιμοποιώντας τους συντελεστές δύναμης, είτε με υπολογισμό δυνάμεων από τις πιέσεις επί των επιφανειών. Έτσι, μπορεί να υπολογιστεί άμεσα από τη σχέση:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

Όπου:

$c_s c_d$  είναι ο δυναμικός συντελεστής και λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα. Αυτό μπορεί να γίνει για κτίρια των οποίων το ύψος είναι μικρότερο από το τετραπλάσιο της διάστασης κατά τη διεύθυνση του ανέμου. Πράγματι  $16,75 < 4 \cdot 4,75 = 19$

φάτνωμα	$C_f(4.75)$	$C_f(5.125)$	$A_{ref}(4.75)$	$A_{ref}(5.125)$	$F(4.75)$	$F(5.125)$
1	2,11	2,05	3,13	3,59	4,29	4,78
2	2,11	2,05	3,13	3,59	5,18	5,76
3	2,11	2,05	3,13	3,59	5,80	6,45
4	1,97	1,92	2,40	2,74	4,37	4,86
5	1,97	1,92	2,40	2,74	4,58	5,08
6	2,05	1,99	2,76	3,16	5,76	6,40
7	2,11	2,05	3,13	3,59	7,04	7,83
8	2,11	2,05	3,13	3,59	7,31	8,13
9	2,11	2,05	3,13	3,59	7,56	8,41
10	1,97	1,92	2,40	2,74	5,50	6,11
11	1,97	1,92	2,40	2,74	5,60	6,22
12	2,05	1,99	2,76	3,16	6,87	7,63
13	2,05	1,99	2,76	3,16	7,00	7,77

Πίνακας 2.8: Υπολογισμός δυνάμεων ανέμου που ασκούνται σε κάθε φάτνωμα

## 2.3 Μόρφωση του μεταλλικού πύργου στο ADINA

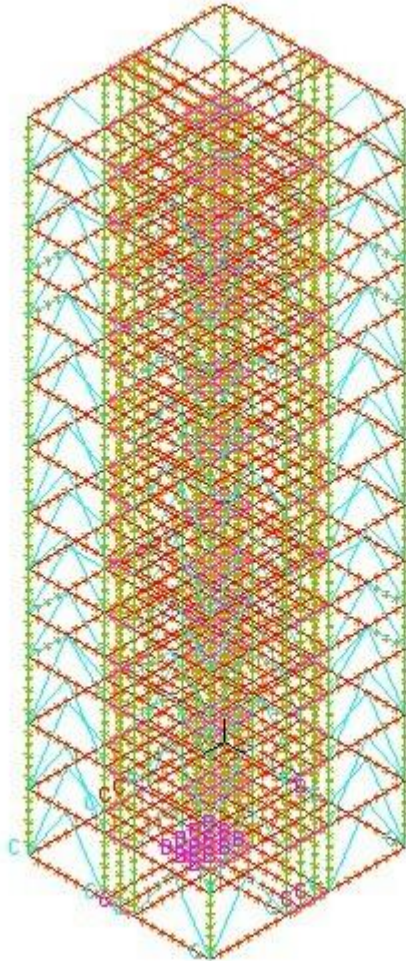
Γνωρίζοντας τα φορτία που μεταβιβάζονται από την πλάκα και τα φορτία λόγω του ανέμου μπορούμε να προχωρήσουμε στη μόρφωση του μεταλλικού πύργου.

Αυτή έγινε με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA, το μοντέλο παρουσιάζεται παρακάτω.

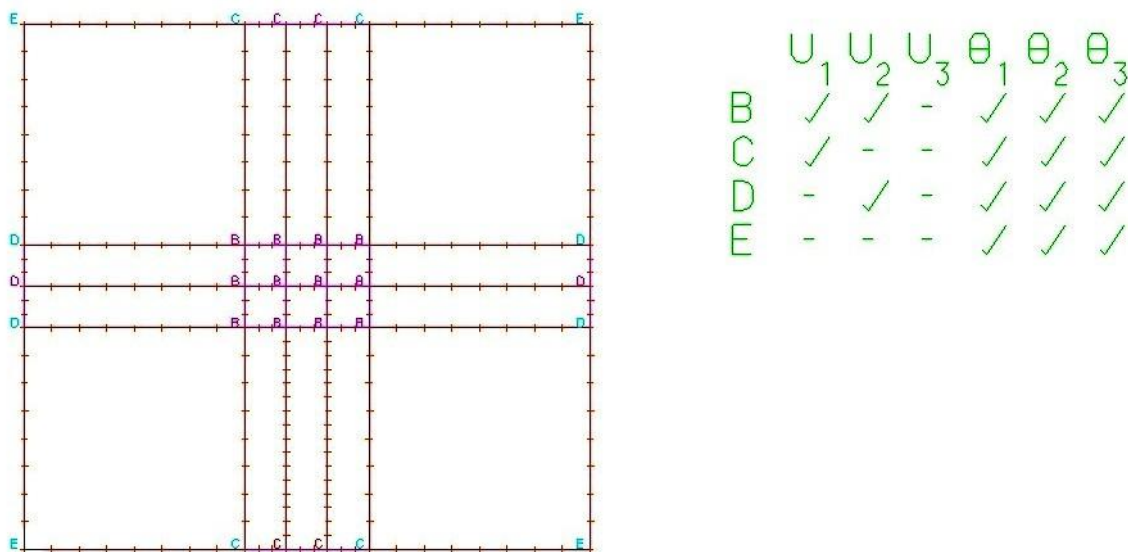
### 2.3.1 Γεωμετρία του φορέα

Ο φορέας μας αποτελείται από γραμμικά στοιχεία, στόχος μας είναι να προσομοιώσουμε το φορέα κατά τα πρότυπα της PERI. Αποτελείται από τέσσερις πρότυπους πύργους διαστάσεων 2 x 2 m και 14 επιπλέον υποστυλώματα που έχουν τοποθετηθεί ανά 37,5 cm. Συγκεκριμένα δύο επιπλέον σε κάθε φάτνωμα στη x διεύθυνση και ένα επιπλέον στην y διεύθυνση. Έτσι οι διαστάσεις της κάτοψης προκύπτουν 5.125\*4,75 μ.

Ο πύργος αγγίζει τα 16,75 m ύψος και διαιρείται σε 14 στάθμες στα επίπεδα 0, 1.50, 3.00, 4.50, 5.50, 6.50, 7.75, 9.25, 10.75, 12.25, 13.25, 14.25, 15.50 και 16.75. Σε κάθε πρότυπο πύργο τοποθετούνται σύνδεσμοι  $\Lambda$  χωρίς εκκεντρότητα περιμετρικά και σε κάθε φάνωμα, δηλαδή 72 σύνδεσμοι σε κάθε πρότυπο πύργο.



Σχήμα 2.15: Προοπτικό σχέδιο του μεταλλικού πύργου



Σχήμα 2.16: Κάτοψη μεταλλικού πύργου

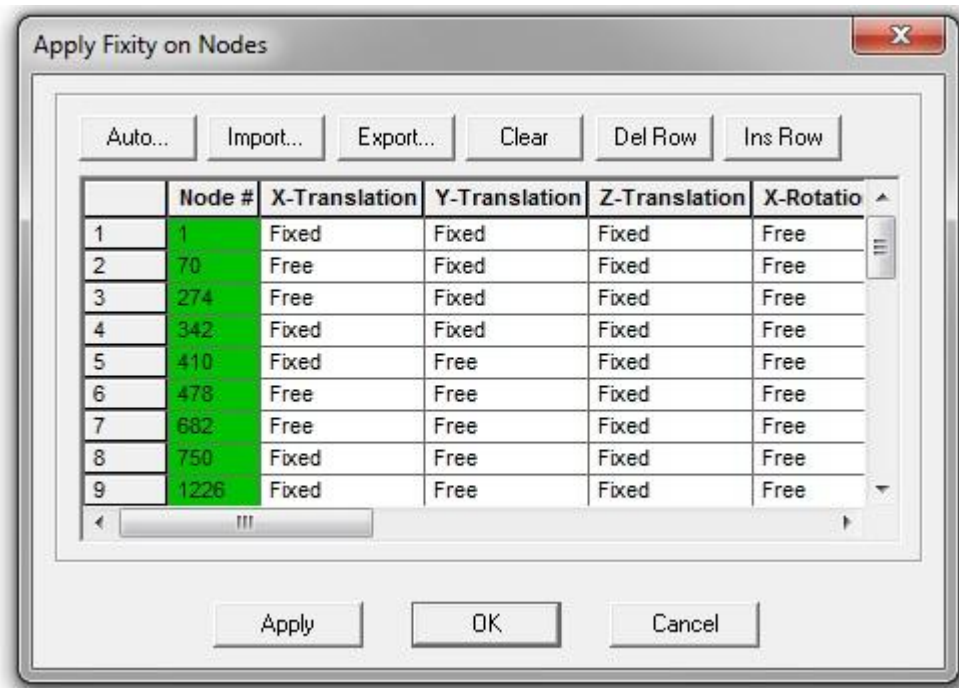
### 2.3.2 Συνοριακές συνθήκες του φορέα

Ο φορέας μας εδράζεται πάνω σε πλάκα σκυροδέματος, που εμποδίζει πλήρως την κατακόρυφη μετακίνηση του. Αυτό μας οδηγεί στο να δεσμεύσουμε την κατακόρυφη μετακίνηση σε όλα τα υποστυλώματα. Οριζόντια δέσμευση δεν υπάρχει στον πραγματικό φορέα, επειδή ο φορέας μας συμπιέζεται με μεγάλη αξονική δύναμη κάτι που επιτρέπει την ενεργοποίηση μηχανισμών τριβής μεταξύ του μεταλλικού φορέα και της πλάκας σκυροδέματος που αποτρέπουν την οριζόντια μετακίνησή του.

Λόγω αβεβαιοτήτων ως προς τη λήψη του συντελεστή τριβής, αποφασίσαμε να δεσμεύσουμε επιπλέον την οριζόντια μετακίνηση των περιφερειακών υποστυλωμάτων στη βάση τους, ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία μηχανισμού ενώ παράλληλα επιτρέπεται η συνεργασία των δοκών της στάθμης '0' με τα υποστυλώματα.

Συγκεντρωτικά, οι δεσμεύσεις που επιβλήθηκαν είναι η κατακόρυφη σε όλα τα υποστυλώματα και επιπλέον η οριζόντια στα περιφερειακά. Συγκεκριμένα επιλέξαμε όλους τους κόμβους (nodes) στη βάση των υποστυλωμάτων και επιλέγουμε την εντολή **Model -> Boundary Conditions -> Apply Fixity on Nodes**. Στους κόμβους που αντιστοιχούν στα εσωτερικά υποστυλώματα επιλέγουμε την επιλογή **Fixed** για **Z-Translation** και **Free** για τις υπόλοιπες μετακινήσεις και στροφές. Στα

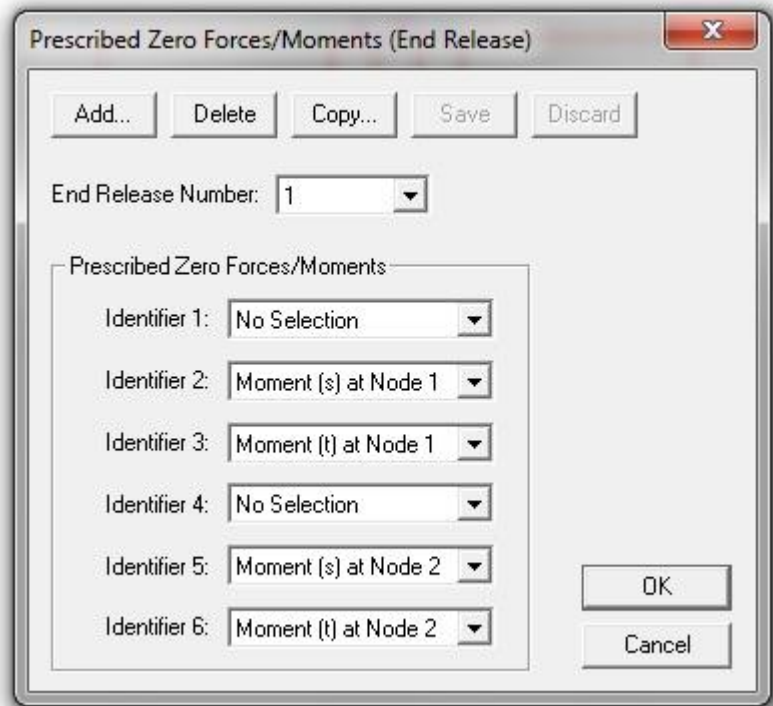
περιμετρικά υποστυλώματα δεσμεύουμε επιπλέον την εκτός επιπέδου μετακίνηση κάτι που σημαίνει ότι στα 4 γωνιακά υποστυλώματα έχουμε δεσμεύσει όλες τις μετακινήσεις.



Σχήμα 2.17: Επιβολή συνοριακών συνθηκών στους κόμβους (nodes)

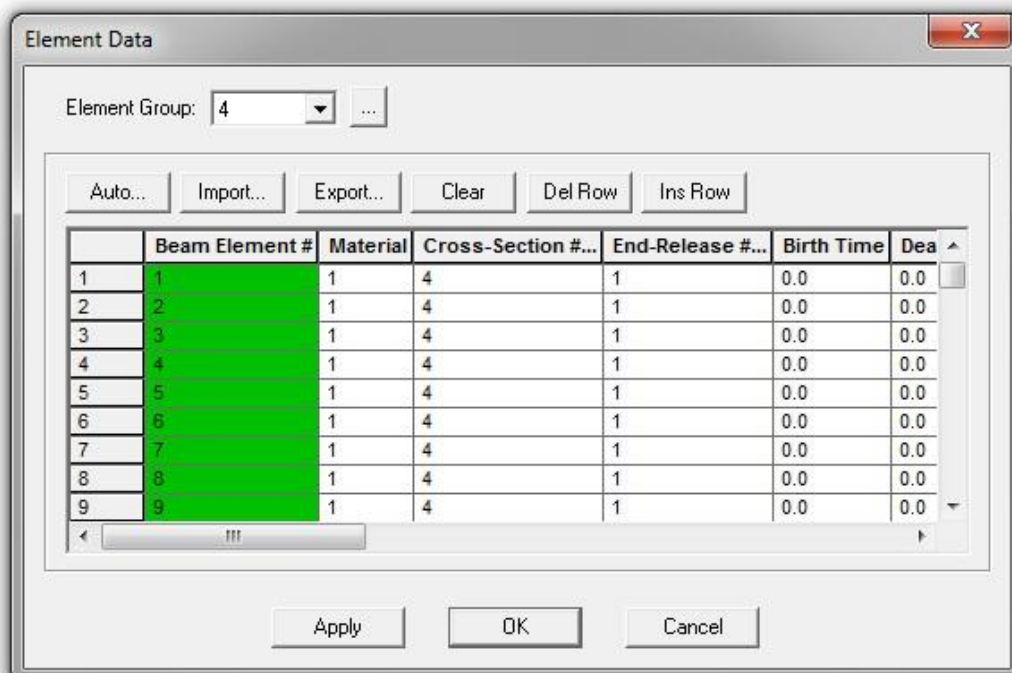
## 2.4 Παραδοχές για τη μοντελοποίηση του φορέα

Σύμφωνα με τον ευρωκώδικα 3, μέρος 3-1 παράγραφος 5.2.3 που αφορά την προσομοίωση των συνδέσεων σε πύργους όπου δεν ακολουθείται η διαδικασία του τριγωνισμού απαιτείται οι συνδέσεις να είναι άκαμπτες και να εξασφαλίζουν τη μεταφορά ροπής από το ένα μέλος στο άλλο οπότε στο υπολογιστικό μοντέλο μπορούμε να θεωρήσουμε συνέχεια υλικού σε όλους τους κόμβους εκτός από τις συνδέσεις των συνδέσμων δυσκαμψίας με τον υπόλοιπο φορέα όπου έχουμε εσωτερικές αρθρώσεις. Για να το πετύχουμε αυτό αρχικά χρησιμοποιούμε την εντολή **model->boundary conditions->end release** και επιλέγουμε την απελευθέρωση ροπής κάμψης κατά τους 2 άξονες της διατομής στους κόμβους αρχής και τέλους κάθε στοιχείου (**element**) .



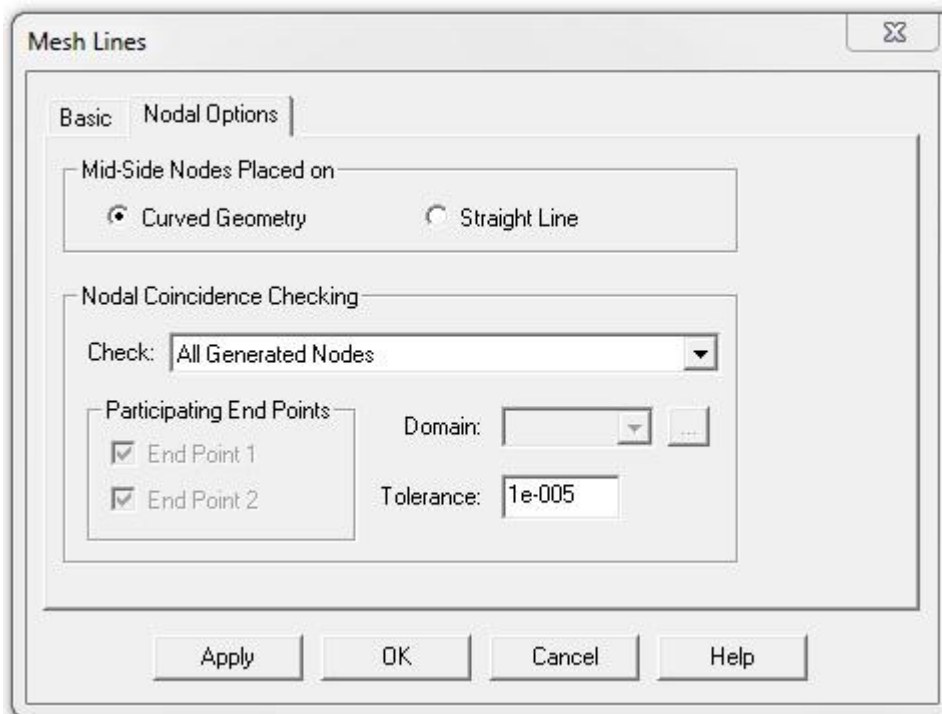
Σχήμα 2.18: Απελευθέρωση καμπτικών ροπών

Στη συνέχεια μέσω της εντολής **meshing->elements->element data** επιλέγουμε τα στοιχεία που αντιστοιχούν στους συνδέσμους δυσκαμψίας και ορίζουμε **end release # 1** που δημιουργήσαμε.



Σχήμα 2.19: Επιβολή End Release στα Elements

Ο φορέας μας αποτελείται αποκλειστικά από γραμμικά μέλη και καθένα διαιρείται σε ένα πεπερασμένο πλήθος στοιχείων. Η διακριτοποίηση του φορέα πρέπει να γίνεται ώστε να εξασφαλίζεται ότι σε κάθε κόμβο του τα nodes των μελών που συντρέχουν να συμπίπτουν. Η τοποθέτηση των nodes κατά μήκος ενός μέλους γίνεται με μια ακρίβεια που καθορίζεται από το χρήστη και έτσι προκύπτει το αντίστοιχο σφάλμα. Πολλές φορές τα nodes των μελών που συντρέχουν σε ένα κόμβο δεν συμπίπτουν επακριβώς οπότε πρέπει πάντα να γίνεται η επιλογή **Meshing->Create Mesh->Nodal Options->Nodal Coincidence Checking, Check: All Generated Nodes** ώστε να εξασφαλίζεται η σύνδεση των μελών μεταξύ τους σε όλα τα σημεία.



Σχήμα 2.20: Επιλογή για σύμπτωση των nodes



## 2.5 Μέθοδοι ανάλυσης και ελέγχου

Σκοπός του σχεδιασμού των κατασκευών είναι ο προσδιορισμός των εντατικών μεγεθών και των παραμορφώσεων των μελών του φορέα και ο έλεγχος ότι η ένταση και οι παραμορφώσεις βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων. Οι θεωρίες ανάλυσης που χρησιμοποιούνται κάθε φορά πρέπει να είναι τόσο προσεγγιστικές όσο επιτρέπεται και τόσο ακριβείς όσο επιβάλλεται. Αυτό εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τα γεωμετρικά και αδρανειακά μεγέθη του φορέα και των μελών του, καθώς και από το είδος και την ένταση που του επιβάλλεται.

Η συμπεριφορά των κατασκευών επηρεάζεται από δύο μη γραμμικότητες, τη μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού λόγω διαρροής του χάλυβα και τη γεωμετρική μη γραμμικότητα λόγω μεγάλων μετατοπίσεων. Οι πραγματικές κατασκευές έχουν αποκλίσεις από τις θεωρητικά ιδεατές, από άποψη τόσο γεωμετρίας όσο και παραμένουσων τάσεων που δημιουργούνται στην αφόρτιστη κατάσταση. Οι αποκλίσεις αυτές διακρίνονται σε γεωμετρικές και δομικές ατέλειες, ο ορισμός των οποίων δίνεται στη παράγραφο 2.2.1. Οι μέθοδοι ανάλυσης των κατασκευών, που περιγράφονται παρακάτω, διακρίνονται από το εάν λαμβάνουν ή όχι υπόψη τις δύο μη γραμμικότητες και τις ατέλειες.

### Γραμμική Ελαστική Ανάλυση (Linear Analysis, LA)

Οι παραμορφώσεις  $w$  και οι ανηγμένες παραμορφώσεις  $\epsilon$  είναι μικρές, ώστε η συμπεριφορά να είναι ελαστική και η επίλυση να γίνεται με βάση την αρχική, απαραμόρφωτη, γεωμετρία του φορέα. Η ανάλυση αυτή ονομάζεται και ελαστική ανάλυση με βάση τη θεωρία της 1<sup>ης</sup> τάξης.

Όταν επιβάλλεται να ληφθούν φαινόμενα 2ης τάξης (γεωμετρική μη γραμμικότητα), χρησιμοποιείται η θεωρία 2ης τάξης, η οποία απαιτεί επαναληπτικές διαδικασίες επίλυσης. επειδή σε αυτή τη περίπτωση δεν ισχύει η αρχή της επαλληλίας, γίνεται αναφορά σε κάποια συγκεκριμένη κατανομή φορτίων, τα οποία αυξάνονται βήμα - βήμα, χρησιμοποιώντας ένα πολλαπλασιαστή φόρτισης. Κάθε βήμα επιλέγεται αρκετά μικρό ώστε να μπορεί να υποτεθεί ότι η συμπεριφορά του είναι γραμμική κατά τη διάρκεια του βήματος. Η κατάσταση παραμόρφωσης στο τέλος ενός βήματος φόρτισης, χρησιμοποιείται ως γεωμετρία αναφοράς για το επόμενο βήμα. Επομένως η ελαστική θεωρία 2ης τάξης συντίθεται από τη διαδοχική επίλυση αναλύσεων 1ης τάξης του φορέα, του οποίου η γεωμετρία μεταβάλλεται σε κάθε βήμα, με βάση την προηγούμενη ιστορία φόρτισης.

### **Πλαστική ανάλυση (Materially non-linear Analysis, MNA)**

Οι παραμορφώσεις  $w$  είναι μικρές, αλλά οι ανηγμένες παραμορφώσεις  $\epsilon$  μεγάλες. Η επίλυση γίνεται με βάση την απαραμόρφωτη γεωμετρία του φορέα, αλλά λαμβάνονται υπόψη ανελαστικές παραμορφώσεις. Η ανάλυση αυτή ονομάζεται και πλαστική ανάλυση με βάση τη θεωρία της 1<sup>ης</sup> τάξης.

Εδώ γίνεται διάκριση ως προς τον τύπο της πλαστικής ανάλυσης. Για ραβδόμορφους φορείς διάκριση γίνεται μεταξύ της θεωρίας που λαμβάνει υπόψη τη μη γραμμικότητα σε επίπεδο κάθε ίνας της διατομής, ή συνολικά ολόκληρης της διατομής. Επίσης από το εάν λαμβάνονται υπόψη οι ελαστικές παραμορφώσεις ή όχι.

### **Γεωμετρικώς μη γραμμική, ελαστική ανάλυση (Geometrically non-linear Analysis, GNA)**

Οι ανηγμένες παραμορφώσεις  $\epsilon$  είναι μικρές, αλλά οι παραμορφώσεις  $w$  μεγάλες. Η ανάλυση είναι ελαστική, αλλά η επίλυση γίνεται με βάση την παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα. Εδώ γίνεται διάκριση ως προς το τι θεωρούνται παραμορφώσεις, δεδομένου ότι ο όρος  $w$  έχει μια γενικευμένη σημασία.

Αν είναι μικρές οι μετατοπίσεις  $w$  αλλά μεγάλες οι στροφές  $\varphi = dw/dx$ , τότε η σχέση μεταξύ ροπών - καμπυλοτήτων είναι γραμμική και η μη γραμμικότητα αφορά μόνο την ανάλυση στο παραμορφωμένο σύστημα. Η ανάλυση αυτή ονομάζεται και γραμμική θεωρία ευστάθειας ή ανάλυση με θεωρία 2<sup>ης</sup> τάξης. Η εφαρμογή της δίνει λύσεις μόνο μέχρι το φορτίο λυγισμού. Αν οι μετατοπίσεις  $w$  είναι μεγάλες, τότε η σχέση μεταξύ ροπών - καμπυλοτήτων είναι μη γραμμική. Η ανάλυση αυτή ονομάζεται και μη γραμμική θεωρία ευστάθειας ή ανάλυση με τη θεωρία της 3<sup>ης</sup> (ή ανώτερης) τάξης, δίνει δε λύσεις και πέραν του φορτίου λυγισμού. Η εφαρμογή μη γραμμικής ευστάθειας δεν αφορά ραβδόμορφους φορείς, δεδομένου ότι στα έργα Πολιτικού Μηχανικού οι μετατοπίσεις είναι περιορισμένες για λόγους λειτουργικότητας. Αντιθέτως σε επιφανειακούς φορείς (πλάκες, κελύφη) είναι αναγκαία η εφαρμογή της όταν αναζητείται το οριακό φορτίο, όπου σημαντικό ρόλο παίζει η μεταλυγισμική συμπεριφορά.

### Γεωμετρικώς μη γραμμική, πλαστική ανάλυση (Geometrically and Materially non-linear Analysis, GMNA)

Οι παραμορφώσεις  $w$  (με την έννοια των προηγουμένως εκτεθέντων) και οι ανηγμένες παραμορφώσεις  $\varepsilon$  είναι μεγάλες. Από συνδυασμό των προηγουμένως εκτεθέντων, έχουμε εφαρμογή της θεωρίας πλαστικών αρθρώσεων ή πλαστικών ζωνών 2<sup>ης</sup> ή 3<sup>ης</sup> τάξης.

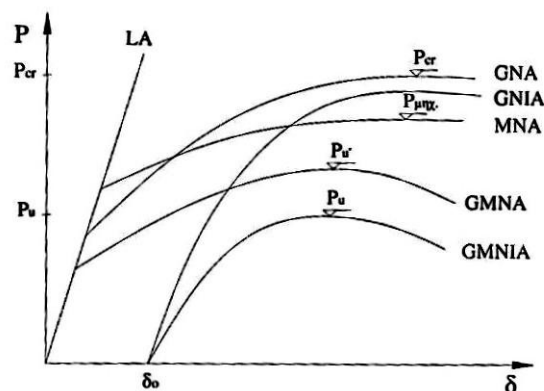
### Γεωμετρικώς μη γραμμική, ελαστική ανάλυση με αρχικές ατέλειες (Geometrically non-linear Analysis with Imperfections, GNIA)

Η ανάλυση αυτή είναι ίδια με την GNA, με την διαφορά ότι λαμβάνονται υπόψη και οι αρχικές ατέλειες. Συνήθως οι δομικές ατέλειες ενσωματώνονται στις γεωμετρικές και η ανάλυση γίνεται με βάση τις ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες. Η μορφή των ατελειών επιλέγεται συνήθως να ακολουθεί την πρώτη μορφή λυγισμού (πρώτη ιδιομορφή της ιδιομορφικής ανάλυσης). Το μέγεθος των ατελειών δίνεται από τους διάφορους κανονισμούς.

### Γεωμετρικώς μη γραμμική, πλαστική ανάλυση με αρχικές ατέλειες (Geometrically and Materially non-linear Analysis with Imperfections, GMNIA)

Η ανάλυση αποτελεί συνδυασμό των υπολοίπων και δίνει τα πραγματικά οριακά φορτία της κατασκευής ή του εξεταζόμενου μέλους.

Στο Σχήμα 2.21 Δίνεται σχηματικά η σχέση μεταξύ του γενικευμένου φορτίου και της γενικευμένης παραμόρφωσης για τους διάφορους τύπους ανάλυσης. Παρατηρούμε ότι μόνο η GMNIA δίνει από μόνη της το πραγματικό οριακό φορτίο. Σε όλες τις άλλες μεθόδους απαιτούνται στη συνέχεια της ανάλυσης πρόσθετοι έλεγχοι για το προσδιορισμό του φορτίου αυτού.



Σχήμα 2.21: Δρόμοι ισορροπίας των κατασκευών για διάφορες αναλύσεις

## 2.6 Ατέλειες

### Γενικά

Οι σύγχρονοι κανονισμοί απαιτούν να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση οι παραμένουσες τάσεις και οι γεωμετρικές ατέλειες, όπως η έλλειψη κατακορυφότητας, η έλλειψη ευθυγραμμίας, ατέλειες συναρμογής και αναπόφευκτες μικρές εκκεντρότητες που παρουσιάζονται στη πράξη στις συνδέσεις. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες τεχνητές γεωμετρικές ατέλειες με τιμές που να αντιπροσωπεύουν τις επιρροές όλων αυτών των τύπων ατελειών.

Η συμπεριφορά πραγματικών χαλύβδινων κατασκευών είναι πάντοτε διαφορετική από αυτή που προβλέπεται θεωρητικά. Οι κύριες αιτίες αυτής της απόκλισης, λόγω της οποίας μπορεί να μειωθεί σοβαρά η φέρουσα ικανότητα, είναι:

- Οι γεωμετρικές ατέλειες, οι οποίες οφείλονται σε απόκλιση από την ευθυγραμμία, σε μη παραλληλότητα των πελμάτων, σε εκκεντρότητα του εφαρμοζόμενου φορτίου από την ιδεατή του θέση, σε ανοχές της συναρμολόγησης, σε έλλειψη κατακορυφότητας του μέλους, κλπ.
- Οι δομικές ατέλειες, οι οποίες οφείλονται σε παραμένουσες τάσεις που δημιουργούνται στην αφόρτιστη κατάσταση κατά τη διαδικασία έλασης, παραγωγής, συγκόλλησης κλπ, ή στη μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού.

Οι ατέλειες βρίσκονται στη περιοχή των συνήθων κατασκευαστικών ανοχών, είναι γενικά μη ορατές και δεν μπορούν να καθοριστούν με ακρίβεια εκ των προτέρων, πρέπει όμως, όπως προαναφέρθηκε, να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό με κάποιο κατάλληλο τρόπο.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες, με τιμές που απεικονίζουν τις πιθανές επιδράσεις όλων των τύπων ατελειών που προαναφέρθηκαν, εκτός εάν οι επιδράσεις αυτές περιλαμβάνονται στις σχέσεις ελέγχου ευστάθειας των μελών.

Σύμφωνα με των Ευρωκώδικα 3, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω ατέλειες:

- Καθολικές ατέλειες για πλαίσια και συστήματα δυσκαμψίας
- Τοπικές ατέλειες για μεμονωμένα μέλη

**Ατέλειες για ανάλυση πλαισίων**

Το θεωρούμενο σχήμα καθολικών ατελειών μπορεί να προκύπτει από την ελαστική μορφή λυγισμού της κατασκευής στο αντίστοιχο επίπεδο λυγισμού.

Για πλαίσια τα οποία είναι ευαίσθητα σε λυγισμό με πλευρική μετάθεση, η επίδραση των ατελειών λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυσή τους μέσω μιας ισοδύναμης ατέλειας που περιλαμβάνει αρχική κλίση. Οι καθολικές ατέλειες προσδιορίζονται ως εξής:

**Καθολικές ατέλειες, Σχήμα 2.22:**

Αυτές έχουν τη μορφή αρχικής κλίσης του φορέα. Η γωνία κλίσης είναι:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m$$

όπου  $\varphi_0 = 1/200$  βασική τιμή

$\alpha_h$  μειωτικός συντελεστής σχετικός με το ύψος  $h$ , εφαρμόσιμος σε υποστυλώματα:

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \quad \text{αλλά} \quad \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$$

$h$  ύψος κατασκευής σε μέτρα

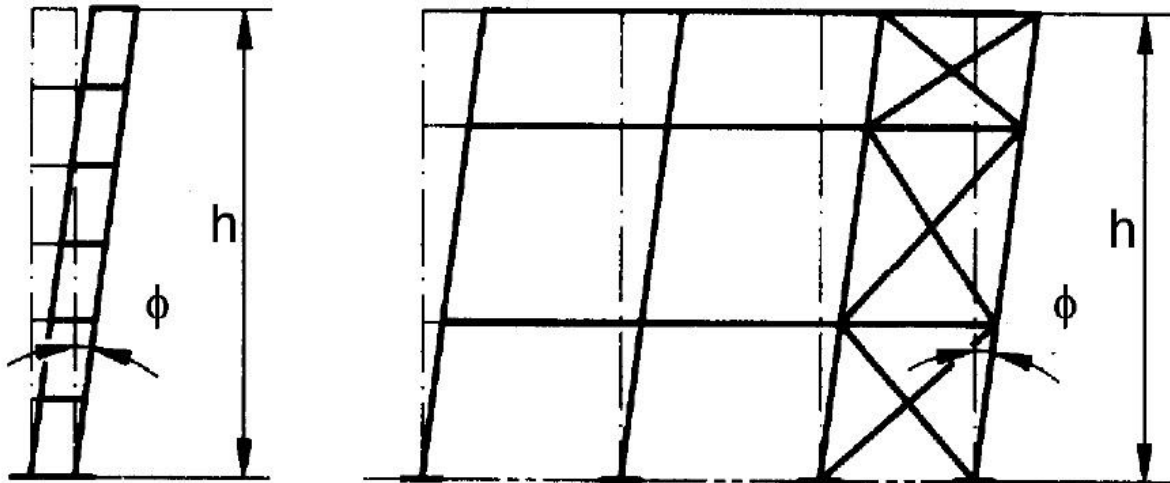
$\alpha_m$  μειωτικός συντελεστής σχετικός με τον αριθμό των στύλων σε έναν όροφο,

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

$m$  αριθμός των στύλων σε μία σειρά και περιλαμβάνει μόνο εκείνους τους στύλους που φέρουν κατακόρυφο φορτίο  $N_{Ed}$  όχι μικρότερο του 50% της μέσης τιμής του φορτίου των στύλων στο υπό θεώρηση κατακόρυφο επίπεδο.

$\varphi_0$ (m)	$\alpha_h$	$\alpha_m$	H (m)	m	$\Phi$
0,005	1	0,775	16,75	5	0,0039

Πίνακας 2.9: Προσδιορισμός καθολικής ατέλειας



Σχήμα 2.22: Ισοδύναμες ατέλειες κλίσης και αρχικής καμπυλότητας

## 2.7 Παραδοχές του προγράμματος ADINA

Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA εφαρμόζεται η θεωρία Bernoulli-Euler με κάποιες τροποποιήσεις ώστε να λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των διαμητικών παραμορφώσεων στο έργο παραμορφώσεως αφού δεν χρησιμοποιείται η θεωρία Timoshenko όπου υφίσταται η επιπεδότητα των διατομών στην παραμορφωμένη εικόνα αλλά λαμβάνεται υπόψη η στροφή του παραμορφωμένου άξονα σε σχέση με τον απαραμόρφωτο.

Οι παραδοχές που γίνονται από το πρόγραμμα για στοιχεία δοκού είναι ότι οι αξονικές δυνάμεις ασκούνται στο κέντρο βάρους της διατομής και δεν προκαλούν ροπές 2<sup>ης</sup> τάξης ενώ οι διαμητικές δυνάμεις ασκούνται στο κέντρο διάτμησης και δεν προκαλούν στρέψη, ενώ για να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της στρέβλωσης πρέπει η στρεπτική ακαμψία να είναι μεταβλητή. Τα στοιχεία δοκού που χρησιμοποιούμε στο φορέα μας επιδέχονται την επιλογή μεγάλων στροφών-μετακινήσεων, ωστόσο χρησιμοποιείται πάντα η θεωρία απειροστών τροπών. Το πρόγραμμα διαχωρίζει τις στροφές και μετακινήσεις στερεού σώματος από τις παραμορφώσεις. Οι αναλύσεις με αυτά τα στοιχεία είναι κατάλληλες κυρίως για αναλύσεις ευστάθειας φορέων ενώ σε αυτές τις αναλύσεις το φαινόμενο της στρέβλωσης λαμβάνεται υπόψη κατά προσέγγιση μόνο και πάλι μέσω τροποποίησης της σταθεράς στρέψης.

Ελαστοπλαστικό υλικό - στοιχεία δοκού

Μόνο για σωληνωτές η ορθογωνικές διατομές, εδώ χρησιμοποιούνται οι ακριβείς συναρτήσεις για τη στρέβλωση ενώ υπολογίζεται και με ακρίβεια η στρεπτική ακαμψία. Η ελαστοπλαστική σχέση τάσεων παραμορφώσεων βασίζεται στο νόμο διαρροής VON MISES σε τρεις διαστάσεις. Εάν η ανάλυση είναι με μεγάλες στροφές/μετατοπίσεις χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\int_0^t \mathbf{S} = \mathbf{C} \int_0^t \boldsymbol{\varepsilon}$$

όπου  $\int_0^t \mathbf{S}$  είναι οι τάσεις riola-kirchhof

$\mathbf{C}$  είναι το μητρώο ελαστικών σταθερών του οποίου τα στοιχεία είναι συναρτήσεις του λόγου Poisson  $\nu$  και του μέτρου ελαστικότητας  $E$

$\int_0^t \boldsymbol{\varepsilon}$  οι τροπες κατά Green-Lagrange

Ενώ κατά τη θεώρηση μικρών μετατοπίσεων/μικρών τροπών χρησιμοποιείται η σχέση

$$\int_0^t \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \int_0^t \mathbf{e} \text{ δηλαδή ο νόμος του Hooke}$$

Το μητρώο  $\mathbf{C}$  είναι το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις. Είναι φανερό ότι όταν υπάρχει θεώρηση μικρών μετατοπίσεων/τροπών μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο γραμμικά ελαστικό υλικό.

Υπολογισμός τροπών

Στην περίπτωση μονοαξονικής έντασης οι τροπές κατά το νόμο του Hooke δίνονται από τη σχέση

$$e_0 = (l - l_0) / l_0$$

ενώ κατά Green-Lagrange

$$\varepsilon = 0.5(l^2 - l_0^2) / l_0^2$$

Οι τροπές κατά Green-Lagrange χρησιμοποιούνται κατά τη θεώρηση μεγάλων μετατοπίσεων/μικρών τροπών επειδή οι μεγάλες στροφές και οι κινήσεις στερεού σώματος δεν της επηρεάζουν ενώ για μικρές τροπές/ μικρές γωνιακές παραμορφώσεις οι τροπές κατά Green-Lagrange και κατά Hooke είναι ταυτόσημες.

Κατά τη θεώρηση μικρών τροπών το εμβαδόν της διατομής παραμένει αμετάβλητο στην παραμορφωμένη και την παραμόρφωση κατάσταση. Η τάση για μονοαξονική ένταση από το νόμο του Hooke δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = F/A_0$$

κατά Cauchy, δηλαδή η πραγματικά αναπτυσσόμενη τάση δίνεται από τη σχέση

$$\tau = \sigma^* A_0 / A$$

ενώ η τάση κατά Piola-Kirchhoff δίνεται από τη σχέση

$$S = \sigma^* l_0 / l$$

Όταν οι τροπές είναι μικρές (οι τροπές θεωρούνται μικρές όταν είναι κάτω από 2%) οι τάσεις κατά Piola-Kirchhoff είναι παραπλήσιες με τις τάσεις Cauchy αφού αφαιρεθούν οι στροφές στερεού σώματος. Αυτό σημαίνει ότι εάν ο φορέας δεν υφίσταται σημαντικές στροφές στερεού σώματος, οι τάσεις Cauchy και Piola-Kirchhoff είναι ταυτόσημες. Επίσης κατά τη στροφή στερεού σώματος, οι τάσεις Piola-Kirchhoff δεν μεταβάλλονται και έτσι καθίστανται ένα χρήσιμο εργαλείο ώστε να μην προκύψουν τάσεις από στροφή στερεού σώματος στα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Κατά τη θεώρηση μεγάλων μετατοπίσεων/μικρών τροπών οι τάσεις και οι τροπές που προκύπτουν από την ανάλυση προκύπτουν κατά Piola-Kirchhoff και κατά Green-Lagrange αντίστοιχα λόγω των διευκολύνσεων που παρέχουν για αυτές τις αναλύσεις όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Οι παραπάνω σχέσεις δίνουν μια καλή προσέγγιση για τη συμπεριφορά του φορέα όταν αυτός συμπεριφέρεται ελαστικά οπότε για τις μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας θα πρέπει να λαμβάνεται αρκετά μικρό χρονικό βήμα επιβολής του φορτίου ώστε να θεωρείται ότι ο φορέας συμπεριφέρεται ελαστικά ανάμεσα σε δύο βήματα.

Οι παραπάνω παραδοχές αφορούν ραβδόμορφους φορείς που αποτελούνται από στοιχεία δοκού beam elements και αποτελούν χρήσιμο θεωρητικό υπόβαθρο και οδηγό για τα είδη αναλύσεων που θα πρέπει να τρέξουμε καθώς και για την αναμενόμενη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν.



## 2.8 Διατομές

Πριν αναφερθούμε στα είδη αναλύσεων στα οποία θα προχωρήσουμε, χρήσιμο είναι να αναφέρουμε τις διατομές που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια αυτών. Ο φορέας μας είναι ραβδόμορφος, αποτελείται από στοιχεία δοκού δικομβικά, η συμπεριφορά των οποίων περιγράφεται από:

- Τη διατομή και το υλικό
- Εναλλακτικά από διαγράμματα ροπών καμπυλοτήτων για διάφορες στάθμες της αξονικής δύναμης και εισάγοντας όλα τα αδρανειακά μεγέθη της διατομής.

Η εταιρεία PERI χρησιμοποιεί σύνθετες διατομές όπως τις έχουμε περιγράψει στην εισαγωγή, η χρησιμοποίηση των οποίων είναι δυσχερής στην παρούσα φάση καθώς δεν μπορούν να συνδυαστούν με ελαστοπλαστικό υλικό ώστε να προκύψουν από το πρόγραμμα οι τάσεις στα διάφορα σημεία του φορέα που θα προσδιορίσουν και την αντοχή του στα επιβαλλόμενα φορτία. Η δυνατότητα αυτή υπάρχει μόνο για ορθογωνικές και σωληνωτές διατομές οπότε αυτές θα επιλεγούν καταρχήν για τις αναλύσεις μας.

Οι σωληνωτές διατομές που θα χρησιμοποιήσουμε στις αναλύσεις μας είναι τύπου CHS και τα αδρανειακά - γεωμετρικά τους μεγέθη παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.10.

<b>CHS</b>	<b>D</b>	<b>t</b>	<b>A</b>	<b>I</b>
	<b>Mm</b>	<b>mm</b>	<b>cm<sup>2</sup></b>	<b>cm<sup>4</sup></b>
273x16	273	16	129	10710
177.8x12.5	177,8	12,5	64,91	2230
168.3x8	168,3	8	40,29	1297
88.9x7.1	88,9	7,1	18,2	154

Πίνακας 2.10: Γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά κοίλων κυκλικών διατομών

Τα αδρανειακά και γεωμετρικά μεγέθη των ορθογωνικών διατομών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.11.

Rectangular	b	h	A	I <sub>y</sub>
	cm	cm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>
150x150	15	15	225	281,25
160x100	16	10	160	133,3333
100x80	10	8	80	53,33333
30x70	3	7	21	12,25

Πίνακας 2.11: Γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά κοίλων κυκλικών διατομών

## 2.9 Είδη αναλύσεων

### Στατική ανάλυση

Ο υπό μελέτη φορέας, στην παρούσα διπλωματική είναι ένας μεταλλικός πύργος που θα κατασκευαστεί προκειμένου να αποτελέσει τμήμα ενός συστήματος προσωρινής υποστήριξης της τοξωτής γέφυρας T4 της εθνικής οδού Τρίπολης Καλαμάτας. Ο κατασκευαστής της γέφυρας έχει γνωστοποιήσει τα φορτία που μεταβιβάζονται από το κατάστρωμα στη γέφυρα, και σε συνδυασμό με το φορτίο από τον άνεμο αποτελούν τα φορτία σχεδιασμού της κατασκευής.

Μετά τη μόρφωση του φορέα, την επιβολή των συνθηκών στήριξης και των φορτίων πρέπει να γίνει η εκλογή ενός συνδυασμού της διατομής των μελών της κατασκευής και της ποιότητας του χάλυβα. Η επιλογή αυτή πρέπει να είναι κατάλληλη προκειμένου τα φορτία να μεταβιβάζονται με ασφάλεια στο έδαφος και όλα τα μέλη της κατασκευής να παραμένουν στην ελαστική περιοχή για τα φορτία σχεδιασμού, όπως προβλέπει ο κανονισμός για τα ικριώματα.

Οι στατικές αναλύσεις που θα τρέξουμε ανάλογα με τις παραμέτρους που θα επιλέξουμε μας δίνουν διαφορετικές δυνατότητες.

Η επιλογή ελαστικού υλικού με μέτρο ελαστικότητας  $E=210,000,000 \text{ KN/m}^2$  και λόγο Poisson  $\nu=0.3$  προσομοιώνει τις ελαστικές σταθερές ενός τυπικού δομικού χάλυβα και μπορεί να συνδυαστεί με οποιαδήποτε διατομή. Για ελαστικά υλικά πρέπει να γίνεται πάντα η επιλογή θεώρησης μικρών μετατοπίσεων (στατική 1<sup>ης</sup> τάξης). Με την επιλογή **meshing -> element groups -> element result output, result type : nodal forces** καθίσταται δυνατή από το πρόγραμμα η εξαγωγή διαγραμμάτων εντατικών μεγεθών σε όλα τα μέλη του φορέα.

Στη συνέχεια επιλέγονται ξεχωριστά για κάθε element group ο/οι δυσμενέστερος/οι συνδυασμός/οί εντατικών μεγεθών και εφαρμόζοντας το νόμο διαρροής κατά von mises διαπιστώνεται εάν όλοι οι παραπάνω συνδυασμοί έχουν τάση μικρότερη του ορίου διαρροής ενώ ακολούθως μπορεί να υπολογιστεί και το μέγιστο ποσοστό εκμετάλλευσης της κάθε διατομής.

Η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω μπορεί να γίνει αυτόματα από το πρόγραμμα με την επιλογή **meshing -> element groups -> element result output, result type : stresses/strains**. Το πρόγραμμα υπολογίζει τις τάσεις σε όλους τους κόμβους του φορέα ενώ με την επιλογή **list->extreme values->zone** στο post-processing εμφανίζονται οι δυσμενέστερες τάσεις κάθε element group. Για να καταστεί αυτό δυνατό, πρέπει να δώσουμε κάποιο όριο διαρροής. Θα επιλέξουμε ελαστοπλαστικό υλικό χωρίς κράτυνση. Αυτό αποτελεί μια σημαντική διευκόλυνση γιατί έτσι όλοι οι αναγκαίοι υπολογισμοί γίνονται από το ADINA, κερδίζοντας έτσι υπολογιστικό χρόνο. Σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί ο περιορισμός στις διατομές καθώς το ελαστοπλαστικό υλικό, όπως έχουμε προαναφέρει συνδυάζεται μόνο με ορθογωνικές και σωληνωτές διατομές. Συνδυαζόμενο δε με θεώρηση μεγάλων μετατοπίσεων, πετυχαίνουμε ένα υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας στους υπολογισμούς μας.

Οι αναλύσεις με γραμμικά στοιχεία και ελαστοπλαστικό υλικό αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο στην προσπάθεια να εξετάσουμε όλες τις παραμέτρους που επιδρούν στην αντοχή ενός φορέα, με τον περιορισμό βέβαια της χρησιμοποίησης των παραπάνω τύπων διατομών.

### Ανάλυση λυγισμού

Ο λυγισμός ως φαινόμενο αναφέρεται στην ξαφνική μεγάλη αύξηση των παραμορφώσεων ενός φορέα για μικρή αύξηση των επιβαλλόμενων φορτίων. Η μέγιστη τιμή του φορτίου για την οποία ο φορέας παραμένει ευθύγραμμος πριν καμπυλωθεί ονομάζεται κρίσιμο φορτίο λυγισμού.

Η ανάλυση λυγισμού γίνεται με την επιλογή **Analysis Type-> Linearized Buckling**. Επιλέγουμε θεώρηση μεγάλων μετατοπίσεων/ στροφών μέσω της εντολής **Control -> Analysis Assumptions -> Kinematics , Displacements/ Rotations: Large**. Ακολούθως επιλέγουμε τον επιθυμητό αριθμό ιδιομορφών που θέλουμε να προκύψουν από την ανάλυση, **Number of Buckling Loads/ Modes** από το εικονίδιο **Analysis Options**.

Από την ανάλυση λυγισμού παίρνουμε το σχήμα της κάθε ιδιομορφής με τον αντίστοιχο φορτικό συντελεστή με τον οποίο πολλαπλασιάζονται τα στατικά φορτία ώστε να λυγίσει ο φορέας κατά τη

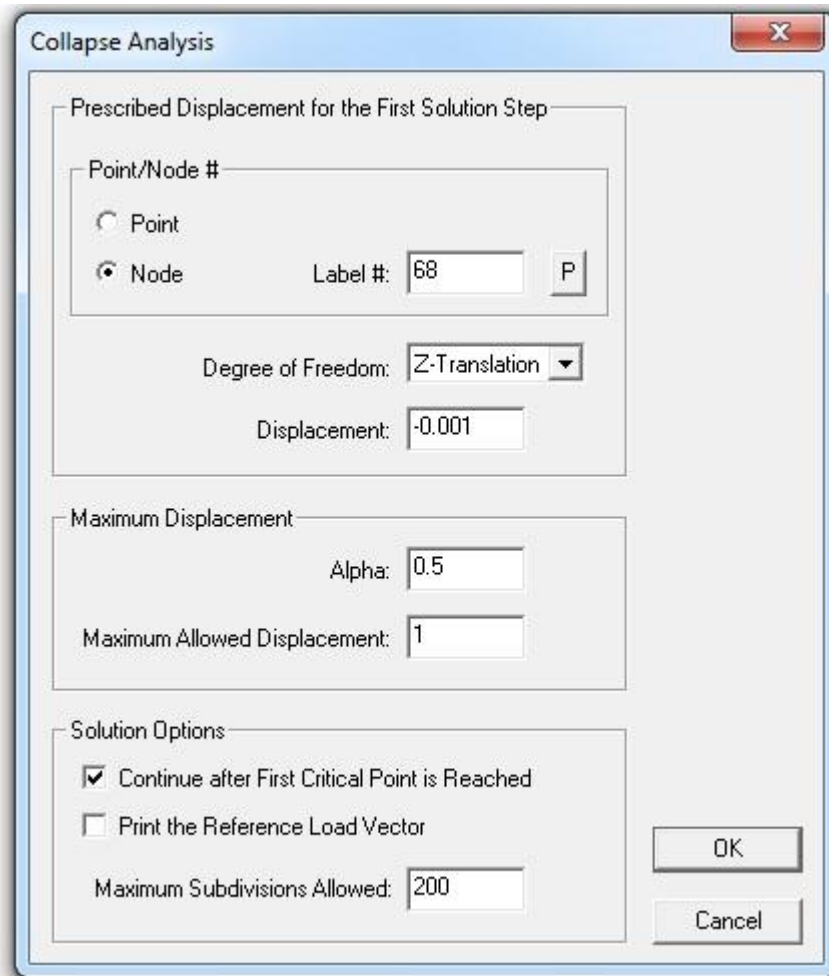
συγκεκριμένη ιδιομορφή. Συνήθως ενεργοποιείται μόνο η πρώτη ιδιομορφή καθώς η δεύτερη αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο φορτίο και η κατασκευή θα έχει ήδη καταρρεύσει. Ωστόσο ο φορέας μας έχει περίπου τετραγωνική κάτοψη οπότε οι δύο πρώτες ιδιομορφές του θα έχουν πολύ κοντινές τιμές μεταξύ τους και μπορεί να υπάρξει αλληλεπίδραση των δυο πρώτων ιδιομορφών.

Οι ιδιομορφικές αναλύσεις μας δείχνουν τον τρόπο που θα λυγίσει ο φορέας συναρτήσει των ελαστικών σταθερών του υλικού και των φορτίων που επιβάλλονται στην κατασκευή. Από την ανάλυση λυγισμού προκύπτουν και τα μέλη της κατασκευής που είναι τα πιο ευπαθή σε λυγισμό καθώς είναι αυτά που θα ενεργοποιηθούν από τις δύο πρώτες ιδιομορφές. Εάν ο φορτικός συντελεστής των ιδιομορφών 1 και 2 είναι πολύ μικρός σε σχέση με αυτόν των ιδιομορφών 3 και 4 πρέπει να εξετάσουμε κατά πόσο είναι εφικτό να μην ενεργοποιηθούν οι πρώτες 2 ιδιομορφές και να ενεργοποιηθούν οι 2 επόμενες. Αυτό μπορεί επί παραδείγματι να συμβεί εάν κάποια δευτερεύοντα μέλη είναι υποδιαστασιολογημένα και ιδιαίτερα ευπαθή σε λυγισμό και με μια μικρή αύξηση στη διατομή τους μπορούμε να πετύχουμε την ενεργοποίηση των 2 επόμενων ιδιομορφών και μαζί τη δραματική αύξηση της αντοχής του φορέα σε λυγισμό.

### **Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με και χωρίς γεωμετρική ατέλεια**

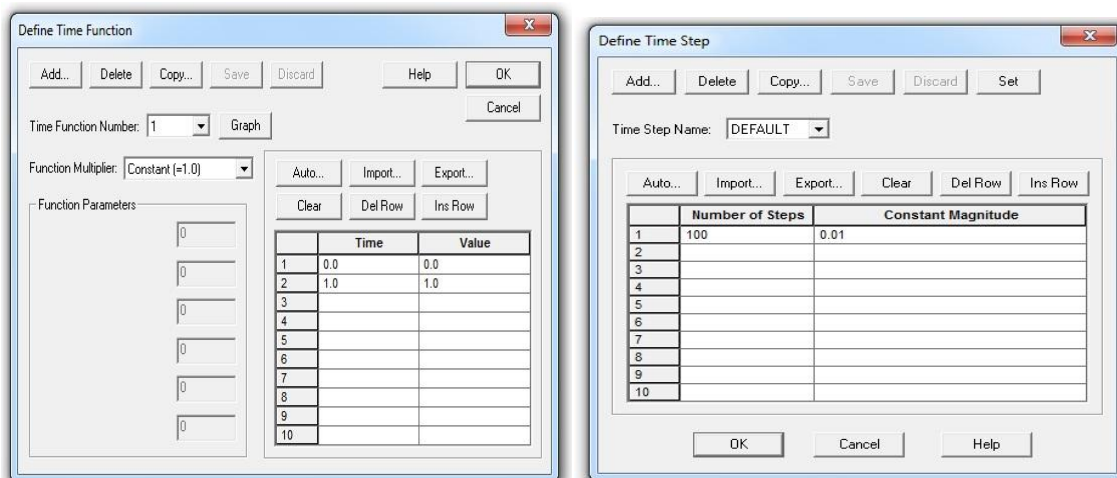
Η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας γίνεται με την επιλογή **Analysis Type-> Collapse Analysis**. Κατά τη διάρκεια της ανάλυσης επιβάλλονται σταδιακά φορτία πολλαπλάσια των στατικών. Τα φορτία αυξάνονται σε κάθε βήμα και επιβάλλονται στην παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα ώστε σε συνδυασμό με την σταδιακή μείωση της δυσκαμψίας να εκδηλωθεί το φαινόμενο του λυγισμού για κάποιο φορτικό συντελεστή. Με την επιλογή **continue after the critical point is reached** η ανάλυση συνεχίζεται και μετά την εύρεση του φορτίου λυγισμού. Έτσι μπορούμε να πάρουμε τον καθοδικό κλάδο στο δρόμο ισορροπίας ή να αποτυπωθεί η όποια μεταλυγισμική αντοχή του φορέα.

Η ανάλυση γίνεται με τη μέθοδο Arc- Length, οι ρυθμίσεις της οποίας ορίζονται από το εικονίδιο Analysis Options. Ορίζουμε ένα κόμβο αναφοράς, στην περίπτωση μας τον κόμβο με τη μεγαλύτερη οριζόντια μετατόπιση, με μία αρχική μετατόπιση μικρού μεγέθους κατά τη διεύθυνση της φόρτισης στον κόμβο αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.23. Επιπλέον δίνεται μία ενδεικτική τιμή στην παράμετρο alpha, η οποία χρησιμοποιείται για να ορίσει τη μέγιστη μετατόπιση κατά τη διάρκεια κάθε βήματος της μεθόδου.



Σχήμα 2.23: Ορισμός ρυθμίσεων μεθόδου Arc- Length

Η χρονική εφαρμογή του φορτίου ορίζεται μέσω της εντολής **Control -> Time Function**, ενώ με την εντολή **Control -> Time Step** ορίζουμε τα βήματα αυτής, δηλαδή σε πόσα βήματα επιβάλλεται το φορτίο στον συνολικό χρόνο εφαρμογής του, Σχήμα 2.24.



Σχήμα 2.24: Χρονική συνάρτηση και επιλογή βημάτων εφαρμογής του φορτίου

Στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας δίνουμε στον φορέα μας ατέλεια με τη μορφή της πρώτης ή και της δεύτερης ιδιομορφής. Θεωρούμε αρχική γεωμετρική ατέλεια όπως αυτή υπολογίστηκε στη παράγραφο 2. του παρόντος κεφαλαίου. Εισάγεται μέσω της εντολής **Model -> Initial Conditions -> Imperfection** με **Initial Condition Type: Node** για την εφαρμογή της ατέλειας σε κόμβο. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.25 πληκτρολογούμε τον αριθμό της ιδιομορφής που θα ακολουθεί η ατέλεια ( Buckling Mode), τον αριθμό του κόμβου στον οποίο θα εφαρμοστεί (Node), τη διεύθυνση εφαρμογής του (Direction) και το μέγεθός της (Displacement). Η ατέλεια επιλέγεται να έχει την κατεύθυνση του οριζώντιου φορτίου.

	Buckling Mode #	Node #	Direction	Displacement
1	1	66	Y-Translation	-0.04
2	2	66	X-Translation	-0.04
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Σχήμα 2.25: Εισαγωγή γεωμετρικής ατέλειας

### **Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού με και χωρίς γεωμετρική ατέλεια**

Η ανάλυση πραγματοποιείται εκ νέου με τη μέθοδο Arc Length. Η γεωμετρική ατέλεια ορίζεται όπως παραπάνω. Εξακολουθεί να υφίσταται η θεώρηση μεγάλων μετατοπίσεων/ στροφών και η μόνη διαφοροποίηση αφορά στην εισαγωγή διγραμμικού ελαστοπλαστικού υλικού με τις ιδιότητες ενός συνήθους δομικού χάλυβα. Αυτή αποτυπώνεται στον δρόμο ισορροπίας ο οποίος δίνει τον πραγματικό φορτικό συντελεστή κατάρρευσης της κατασκευής.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

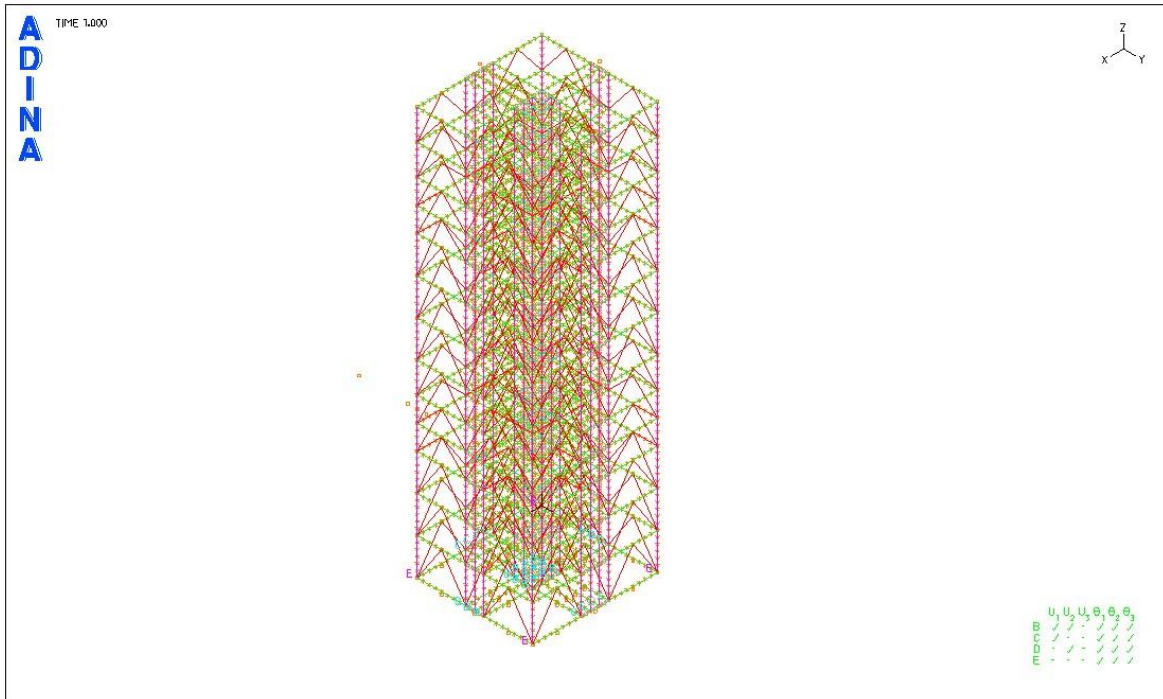
## Διερεύνηση εναλλακτικών τρόπων μόρφωσης του φορέα

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται εναλλακτικοί τρόποι μόρφωσης του μεταλλικού πύργου. Γίνεται χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA για τον προσδιορισμό του κρίσιμου φορτίου λυγισμού και για την εύρεση του δρόμου ισορροπίας.

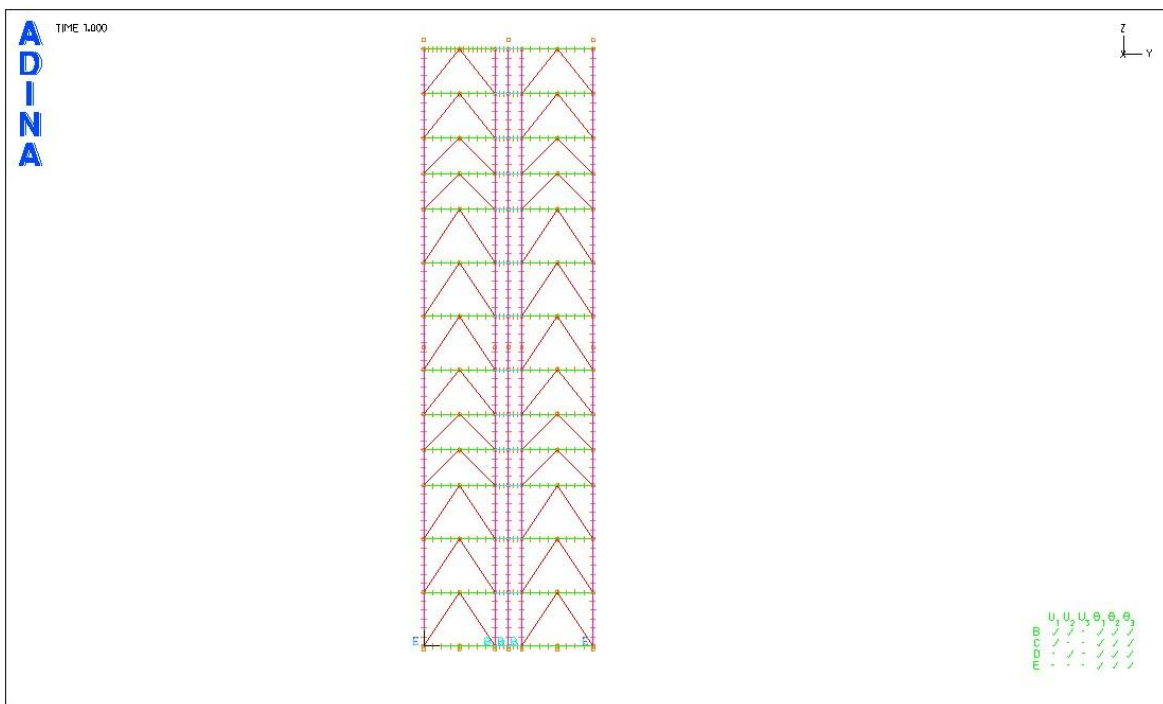
Αρχικά καλούμαστε να προσομοιώσουμε τον πύργο σύμφωνα με τη γεωμετρία που προτείνει η PERI, δηλαδή με 4 πρότυπους πύργους, δεκαέξι επιπλέον υποστυλώματα και συνδέσμους δυσκαμψίας  $\Lambda$  χωρίς εκκεντρότητα περιμετρικά σε κάθε πρότυπο πύργο, κάτι που αντιστοιχεί σε 16 συνδέσμους σε κάθε στάθμη. Σε επόμενη φάση θα μειώσουμε τον αριθμό των συνδέσμων δυσκαμψίας σε 8 ανά υψομετρική στάθμη ενώ στη συνέχεια θα τους αντικαταστήσουμε με χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας. Τέλος θα αφαιρέσουμε σε πρώτο στάδιο όλους τους συνδέσμους δυσκαμψίας και στη συνέχεια 6 από τις 13 στάθμες του φορέα μας κρατώντας το συνολικό του ύψος αναλλοίωτο.

### 3.1 Περίπτωση 1<sup>η</sup>: Προτεινόμενος Πύργος από την PERI

Ο φορέας μας αποτελείται από τέσσερις πρότυπους πύργους και 14 επιπλέον υποστυλώματα ανά 37,5 cm. Κάθε πρότυπος πύργος, όπως έχει περιγραφεί και στη Παράγραφο 1.5, αποτελείται από τέσσερα πόδια που δίνουν ως αποτέλεσμα μια αξονική διάσταση 2 x 2 m. Σε κάθε πλευρά του πρότυπου πύργου έχουμε συνδέσμους δυσκαμψίας τύπου  $\Lambda$ , δηλαδή συνολικά τέσσερις συνδέσμους σε κάθε όροφο του πρότυπου πύργου. Ο υπό μελέτη πύργος έχει ύψος 16,75 μέτρα, πλάτος στην y διεύθυνση 4,75 μέτρα ενώ στην x διεύθυνση 5,125 μέτρα. Ακολουθούν τα Σχήματα 3.1 και 3.2 όπου παρουσιάζεται το προοπτικό σχέδιο και η όψη y-z του μεταλλικού πύργου αντίστοιχα για την περίπτωση που μελετάμε.



Σχήμα 3.1: Προοπτικό σχέδιο 1<sup>ης</sup> περίπτωσης



Σχήμα 3.2: Όψη y-z, 1<sup>ης</sup> περίπτωσης



### 3.1.1 Αρχικές Διατομές

Στον παρακάτω Πίνακα παρουσιάζονται οι διατομές που θα χρησιμοποιήσουμε αρχικά στα φέροντα στοιχεία της κατασκευής μας. Το υλικό κατασκευής μας είναι χάλυβας S235.

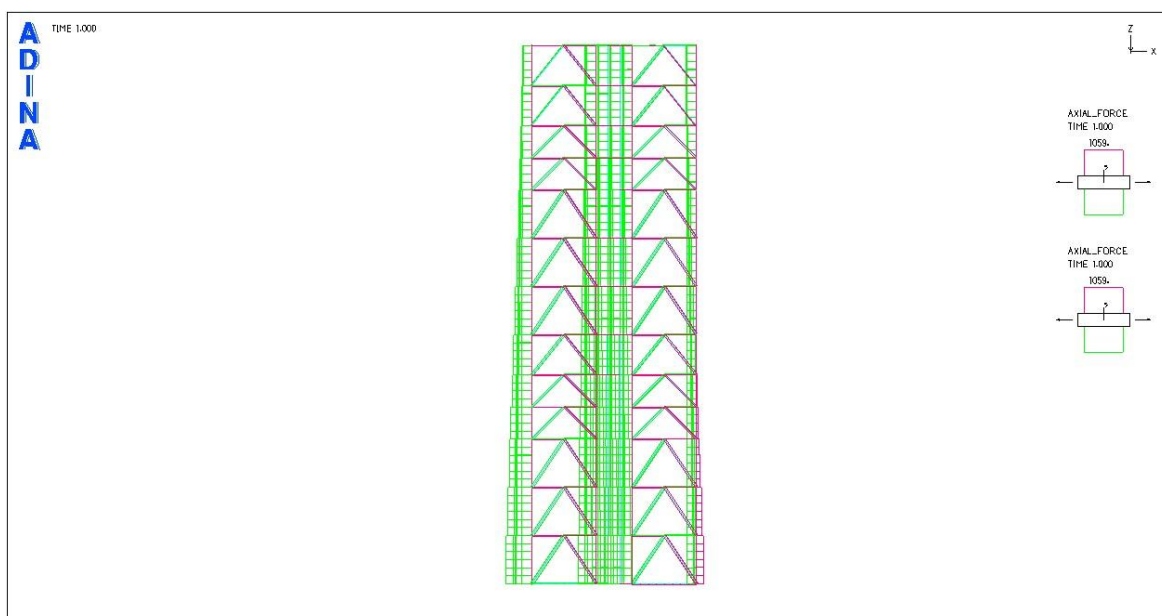
	CHS	d	t	A	I
		mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>
Υποστύλωμα	273x16	273	16	129	10710
Δοκοί	168.3x8	168,3	8	40,29	1297
Σύνδεσμοι Λ	88.9x7.1	88,9	7,1	18,2	154

Πίνακας 3.1: Διατομές CHS

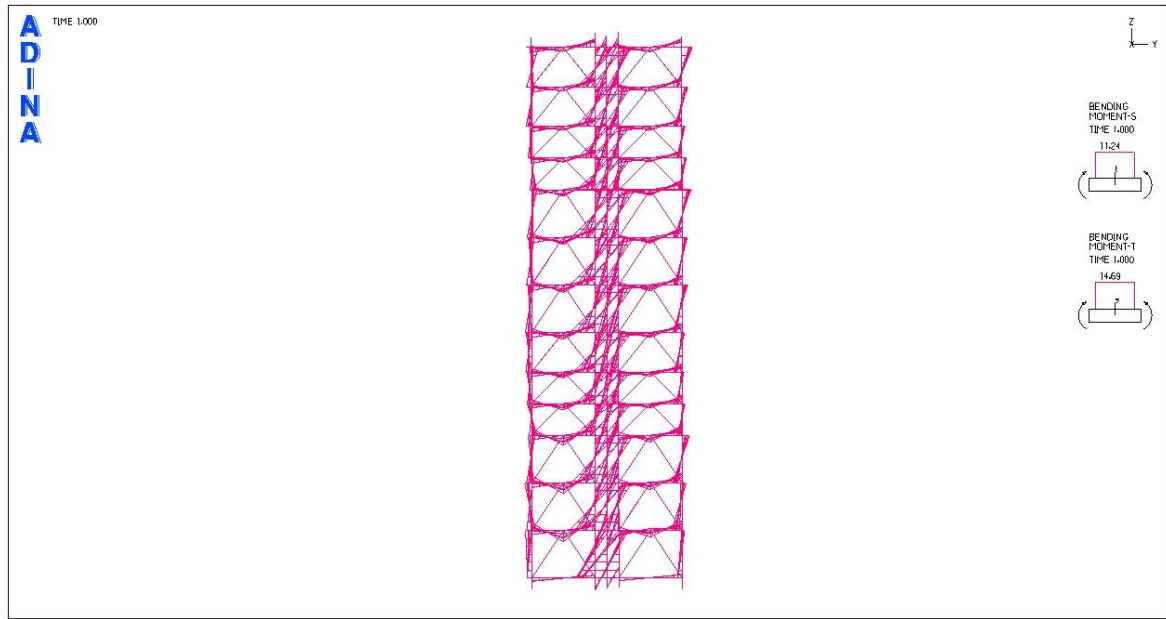
Αρχικά πραγματοποιούμε δύο στατικές αναλύσεις:

Την πρώτη για να εξάγουμε διαγράμματα εντατικών μεγεθών και μία δεύτερη από την οποία προκύπτουν οι τάσεις σε όλα τα στοιχεία του φορέα και στην οποία θα αναζητήσουμε τη μέγιστη τάση κατά von mises που ασκείται σε κάθε element group με σκοπό να προσδιορίσουμε το μέγιστο ποσοστό εκμετάλλευσης των διατομών κάθε ομάδας μελών του φορέα.

Συγκεκριμένα το element group 1 αντιστοιχεί στα υποστυλώματα, τα element groups 2 και 3 αντιστοιχούν σε δοκούς και το element group 4 αντιστοιχεί στους συνδέσμους δυσκαμψίας. Παρακάτω παραθέτουμε τα αποτελέσματα των στατικών αναλύσεων:



Σχήμα 3.3 : Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων



Σχήμα 3.4 : Διάγραμμα καμπτικών ροπών

Από τα 2 παραπάνω σχήματα φαίνεται ότι ο φορέας αναπτύσσει κυρίως αξονική ένταση, αφού η μέγιστη αξονική που αναπτύσσεται ανέρχεται σε 1059 KN ενώ οι μέγιστες ροπές ανέρχονται σε 11.24 και 14.69 KNm για καθένα από τους 2 άξονες της κάμψης. Οι τέμνουσες δυνάμεις είναι και αυτές της ίδιας τάξης μεγέθους με ακραίες τιμές 77.9 και 23.3 KN.

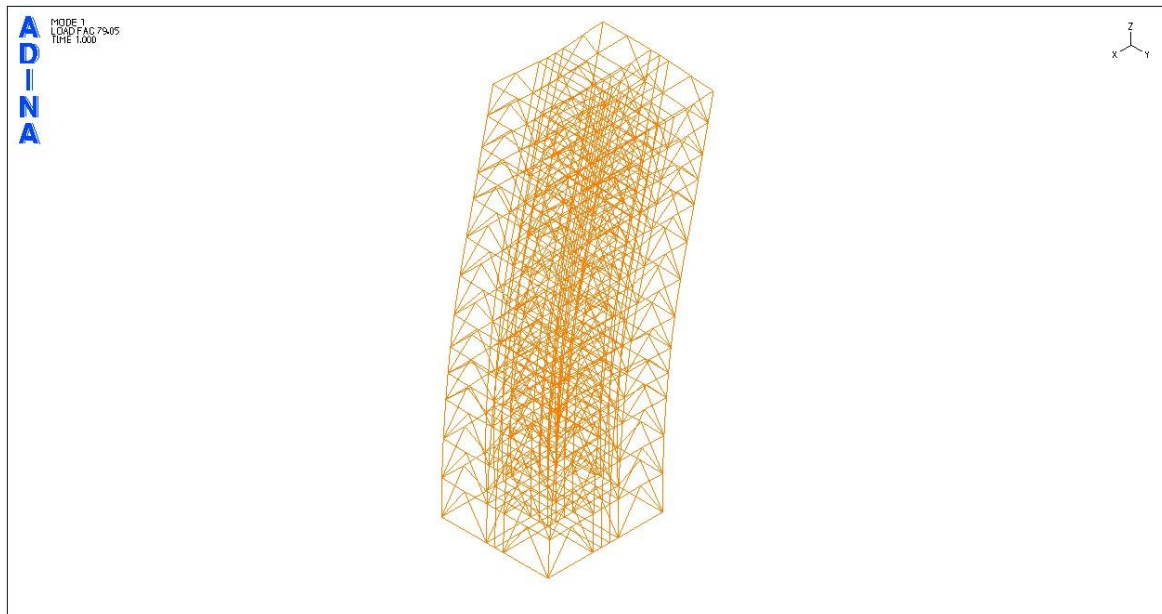
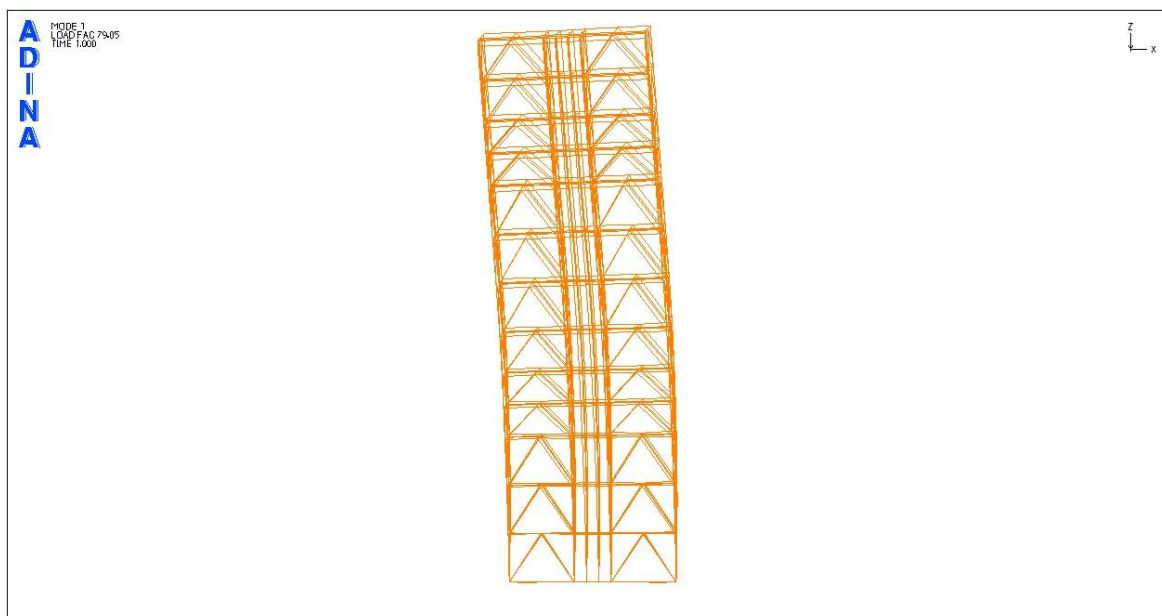
Από τη δεύτερη στατική ανάλυση προκύπτουν οι μέγιστες τάσεις που καταπονούν κάθε μέλος της κατασκευής. Συγκεκριμένα στα υποστυλώματα η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση ανέρχεται σε 86000KN/m<sup>2</sup> με μέγιστο ποσοστό εκμετάλλευσης 36,6% στις δοκούς 95632KN/m<sup>2</sup> με μέγιστο ποσοστό εκμετάλλευσης 40.7% ενώ στους συνδέσμους δυσκαμψίας 38483 KN/m<sup>2</sup> με μέγιστο ποσοστό εκμετάλλευσης 16,4%.

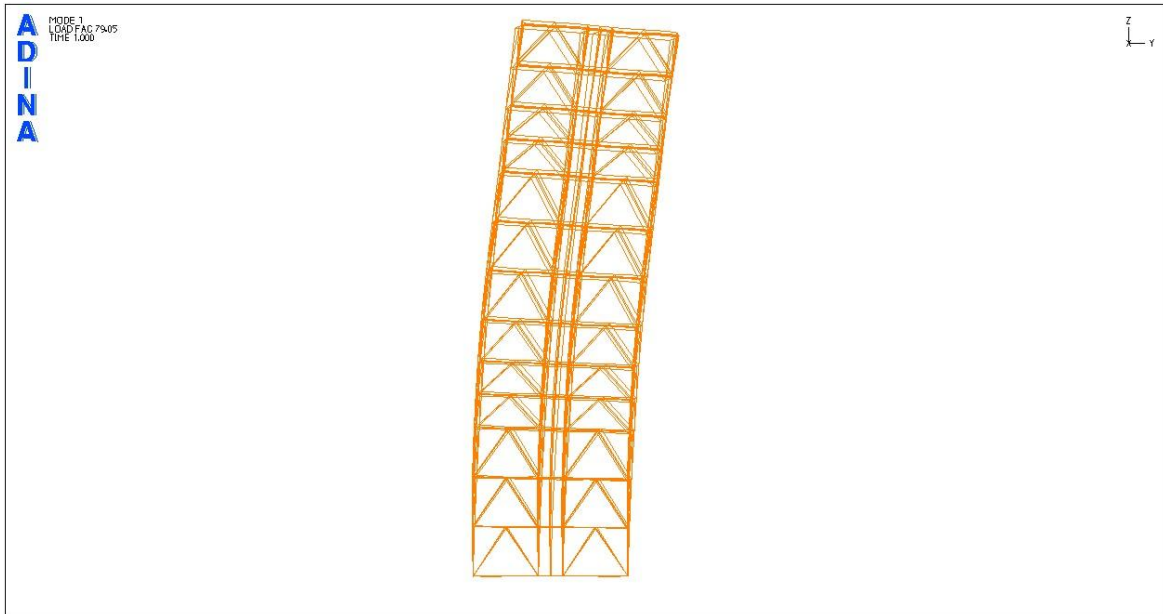
Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι τα υποστυλώματα και οι δοκοί είναι υπερδιαστασιολογημένα ωστόσο μία στατική ανάλυση δεν προσφέρεται πάντα για εξαγωγή τέτοιων συμπερασμάτων καθότι αγνοεί τα φαινόμενα 2<sup>ης</sup> τάξης.

Για να διαπιστωθεί κατά πόσο αυτά πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι απαραίτητο να προχωρήσουμε σε αναλύσεις λυγισμού που θα μας δώσουν το κρίσιμο φορτίο λυγισμού της κάθε ιδιομορφής και στη συνέχεια σε μη γραμμικές αναλύσεις που θα μας δώσουν το φορτίο κατάρρευσης της κατασκευής.

**Ιδιομορφές λυγισμού**

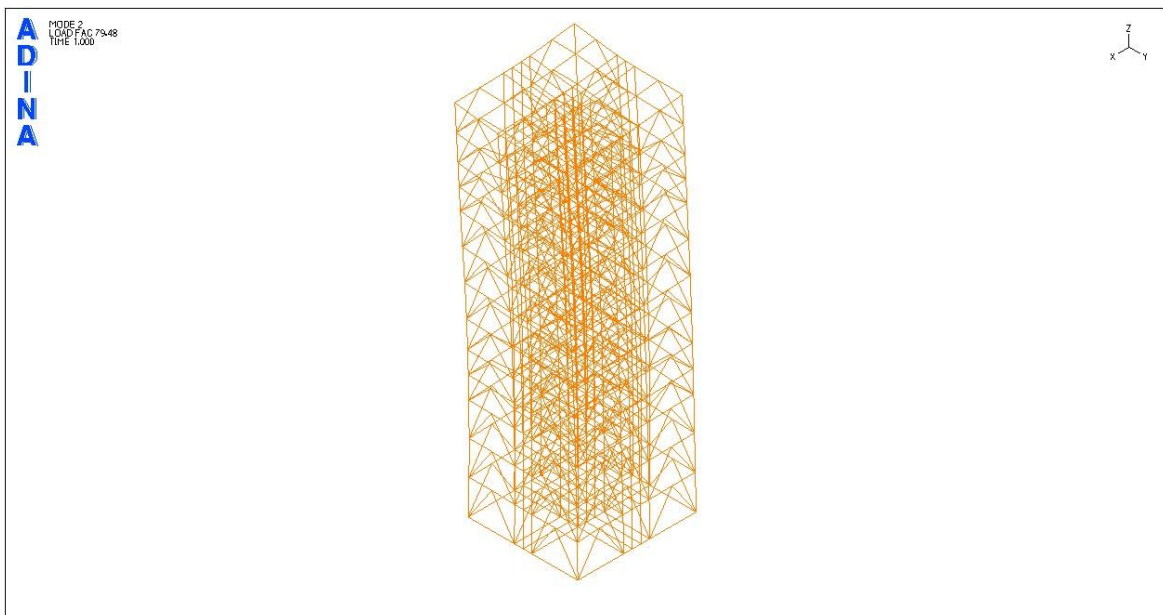
Φορτικός συντελεστής πρώτης ιδιομορφής: 79.05

Σχήμα 3.5: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)Σχήμα 3.67: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη x- z)

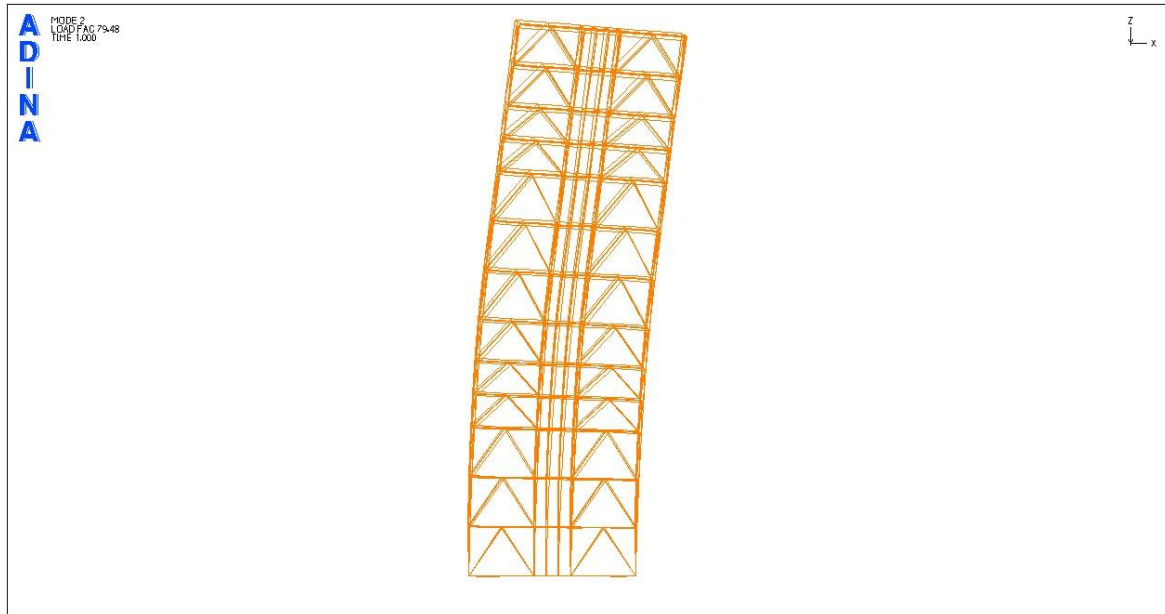
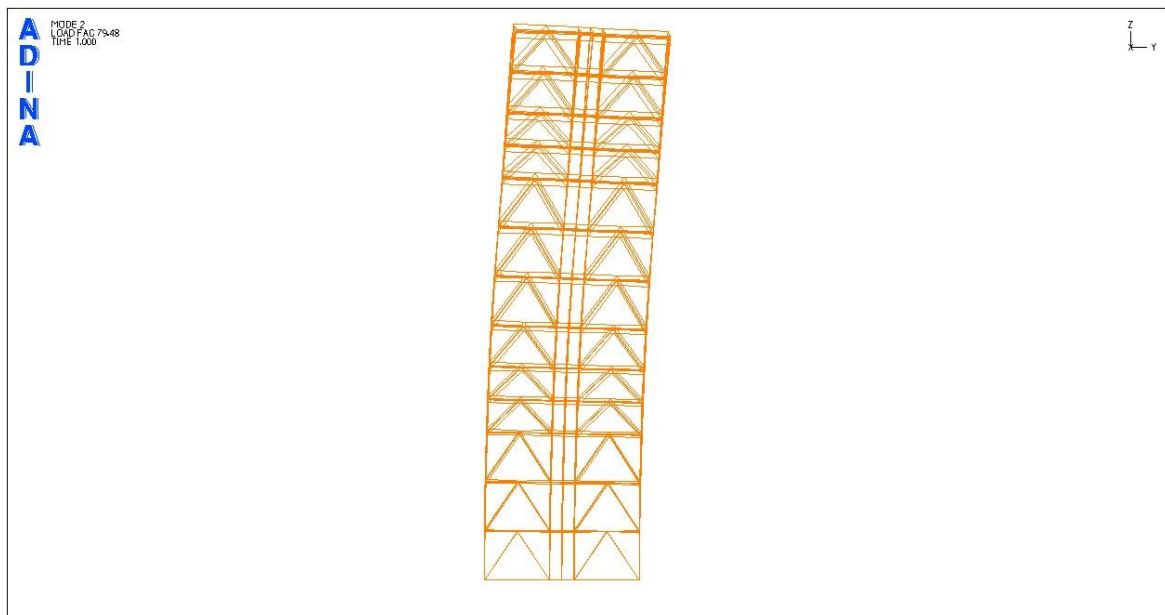


Σχήμα 3.7: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη y- z)

Φορτικός συντελεστής δεύτερης ιδιομορφής: 79.48



Σχήμα 3.8: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

Σχήμα 3.9: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη x- z)Σχήμα 3.10: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη y- z)

Παρατηρούμε ότι οι δύο πρώτες ιδιομορφές έχουν παραπλήσια κρίσιμα φορτία λυγισμού αφού για την πρώτη ιδιομορφή ο πολλαπλασιαστής επί των στατικών φορτίων είναι 79,05 ενώ για την

δεύτερη 79,48. Ως προς το σχήμα των ιδιομορφών παρατηρούμε ότι ο φορέας συμπεριφέρεται σαν πρόβολος ενώ η τιμή του φορτίου λυγισμού είναι πολύ μεγάλη οπότε αναμένουμε η επιρροή των φαινομένων 2<sup>ης</sup> τάξης να είναι περιορισμένη.

Κάθε μέλος των συνδέσμων δυσκαμψίας στις παραπάνω αναλύσεις προσομοιώνεται από ένα στοιχείο δοκού με απελευθερώσεις ροπών στα άκρα του. Εκ των υστέρων διαπιστώθηκε ότι αυτός ο τρόπος προσομοίωσης των συνδέσμων στερείται ακρίβειας καθώς η απουσία ενδιάμεσου κόμβου κατά την προσομοίωση του φορέα δεν επιτρέπει να εκφραστεί το φαινόμενο του λυγισμού. Ωστόσο με την τοποθέτηση ενδιάμεσου κόμβου και συγκρίνοντας με τις παλαιότερες αναλύσεις μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα φαίνεται οι νέες αναλύσεις λυγισμού θα μας δείξουν πόσο επηρεάζεται η αντοχή σε λυγισμό του φορέα από τη λυγηρότητα των ράβδων η οποία είχε πρωτύτερα αγνοηθεί ενώ σε επόμενο στάδιο θα φανεί πόσο επηρεάζεται και η φέρουσα ικανότητα του φορέα που αποτελεί και το σημείο αναφοράς στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Όπως διαπιστώνεται, η πτώση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού είναι θεαματική αφού ο πολλαπλασιαστής επί των στατικών φορτίων ανέρχεται πλέον σε 14.78 για τις 2 πρώτες ιδιομορφές έναντι 79,05 και 79,48 πριν την εισαγωγή ενδιάμεσου κόμβου στους συνδέσμους δυσκαμψίας.

Εδώ το φαινόμενο του λυγισμού εκδηλώνεται σε μεμονωμένα μέλη των συνδέσμων και οι ιδιομορφές μεγαλύτερης τάξης προκύπτουν από μικρή αύξηση του φορτίου. Είναι ξεκάθαρο ότι η αντοχή σε λυγισμό των συνδέσμων είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτή των υπολοίπων μελών του φορέα. Το ενδιαφέρον μας πλέον στρέφεται στο κατά πόσο η λυγηρότητα των συνδέσμων θα επηρεάσει και την φέρουσα ικανότητα του φορέα και πόσο θα βελτιωθεί αυτή εάν αυξήσουμε τη διατομή των συνδέσμων έτσι ώστε ο λυγισμός να εκδηλώνεται σε όλο το φορέα και όχι σε μεμονωμένα μέλη.

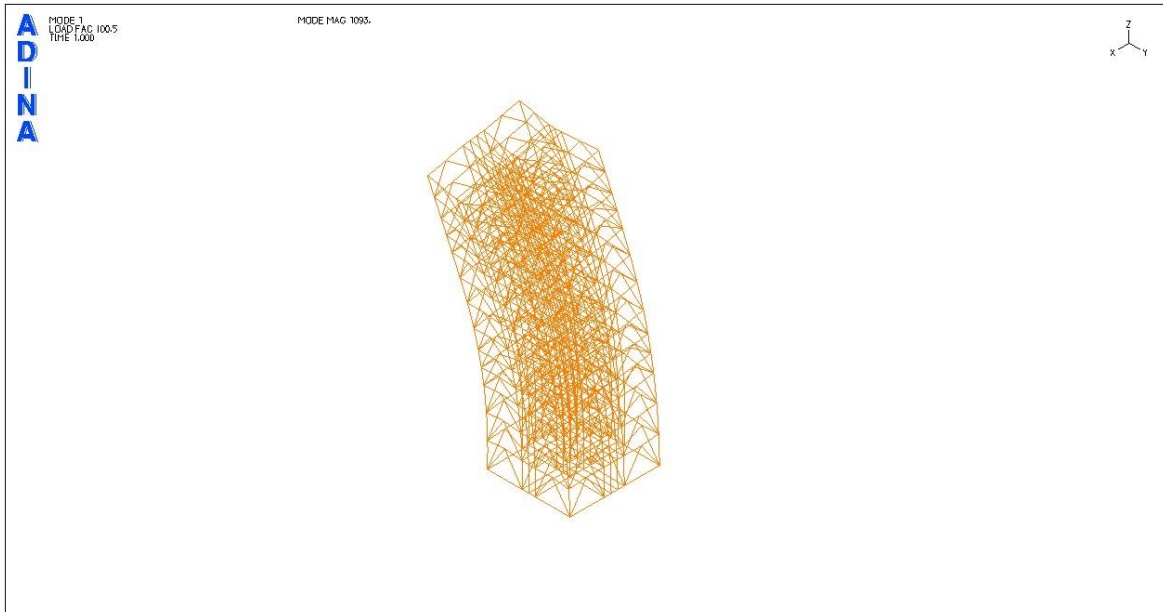
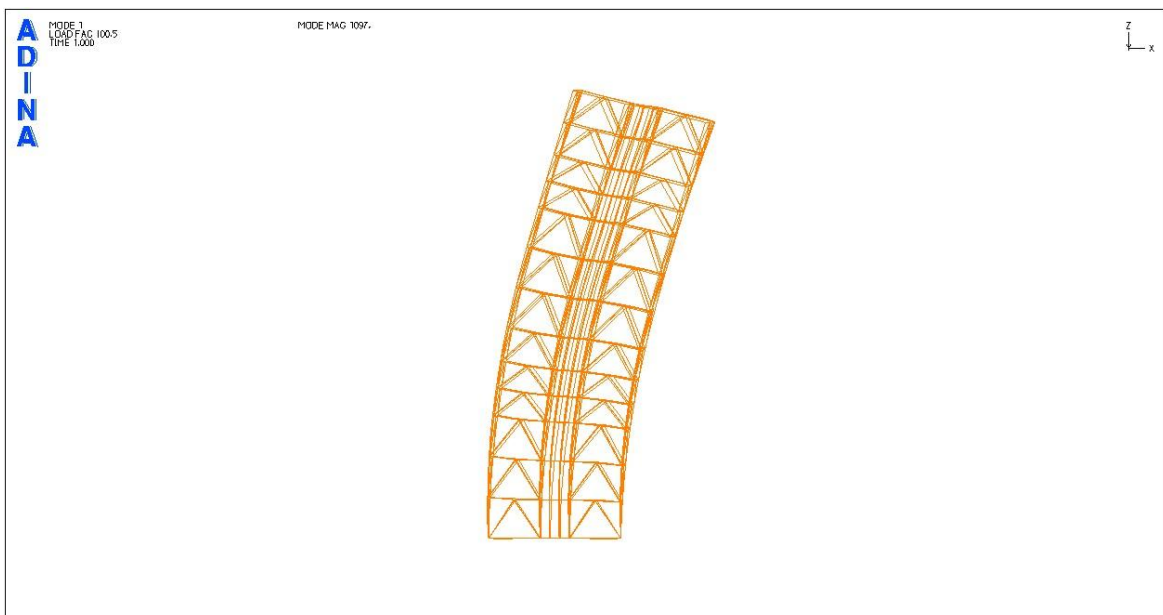
### **3.1.2 Αύξηση εμβαδού διατομών συνδέσμων**

Προκειμένου να βελτιώσουμε τη συμπεριφορά σε λυγισμό της κατασκευής αυξάνουμε το εμβαδό της διατομής των συνδέσμων αφού αυτοί ήταν τα πιο ευπαθή σε λυγισμό μέλη της κατασκευής.

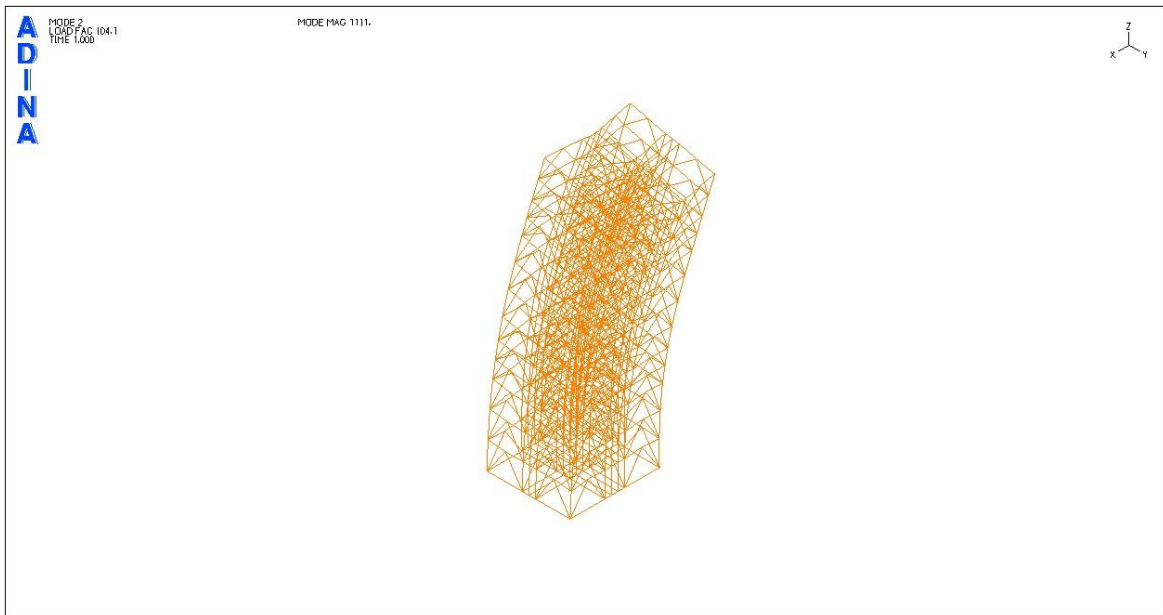
Η καινούργια διατομή που θα χρησιμοποιηθεί είναι CHS 177,8\*12,5. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε τις ιδιομορφές λυγισμού πριν και μετά την εισαγωγή ενδιάμεσου κόμβου στους συνδέσμους δυσκαμψίας.

**Ιδιομορφές λυγισμού**

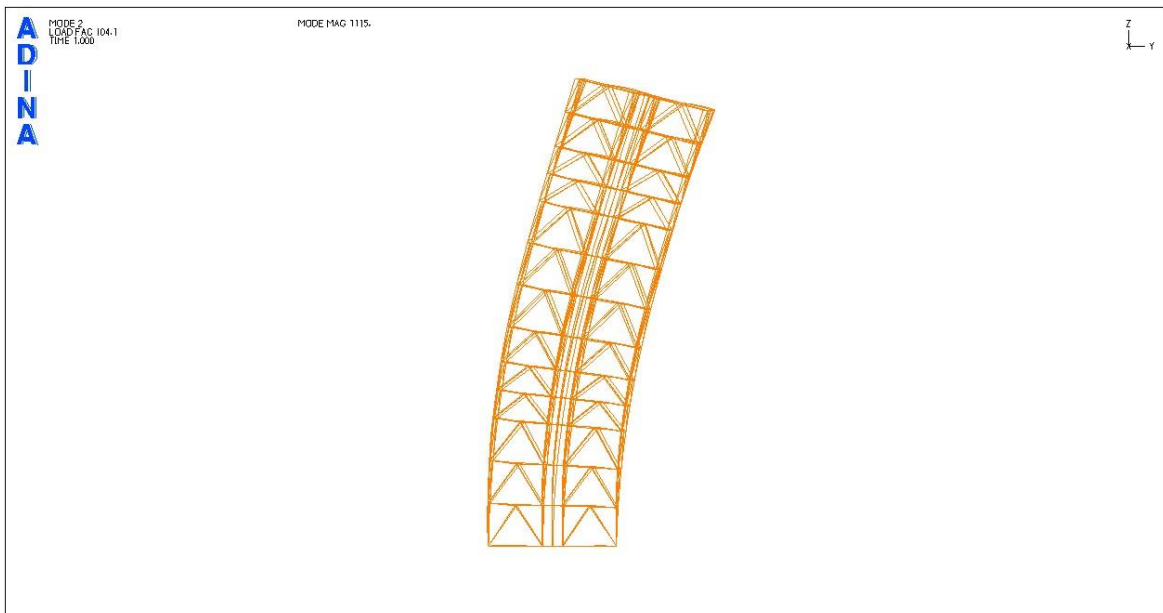
Φορτικός συντελεστής πρώτης ιδιομορφής: 100.5

Σχήμα 3.11: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)Σχήμα 3.12: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη x- z)

Φορτικός συντελεστής δεύτερης ιδιομορφής: 104.1



Σχήμα 3.13: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 3.14: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη y- z)

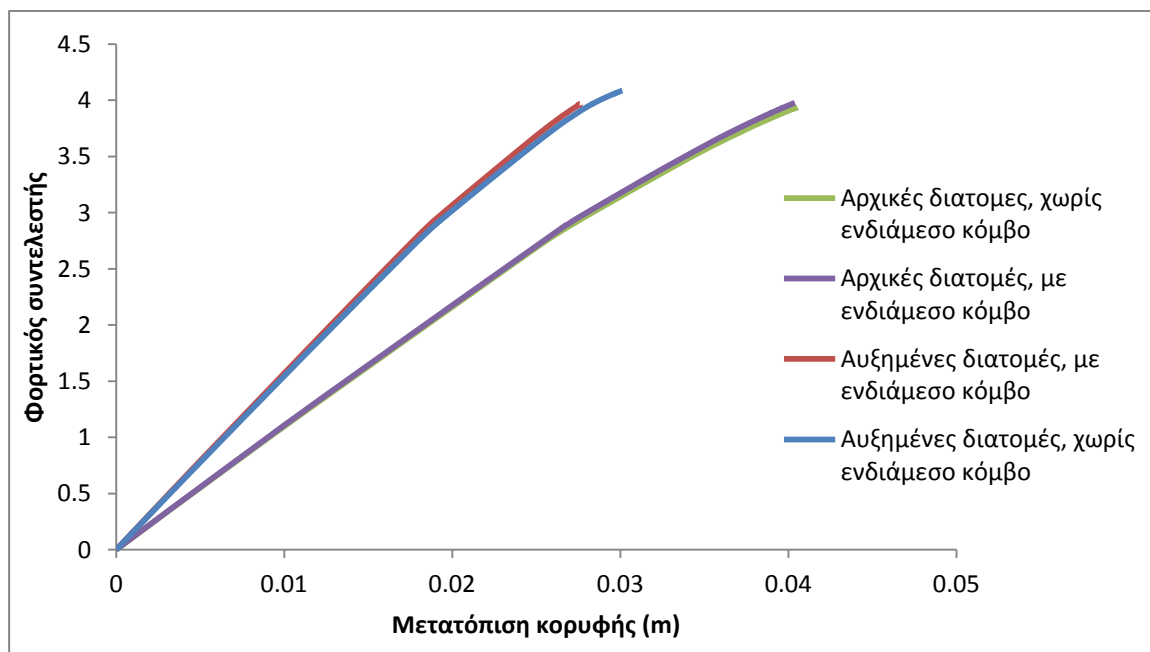


### Ιδιομορφές λυγισμού μετά την εισαγωγή ενδιάμεσου κόμβου στους συνδέσμους δυσκαμψίας

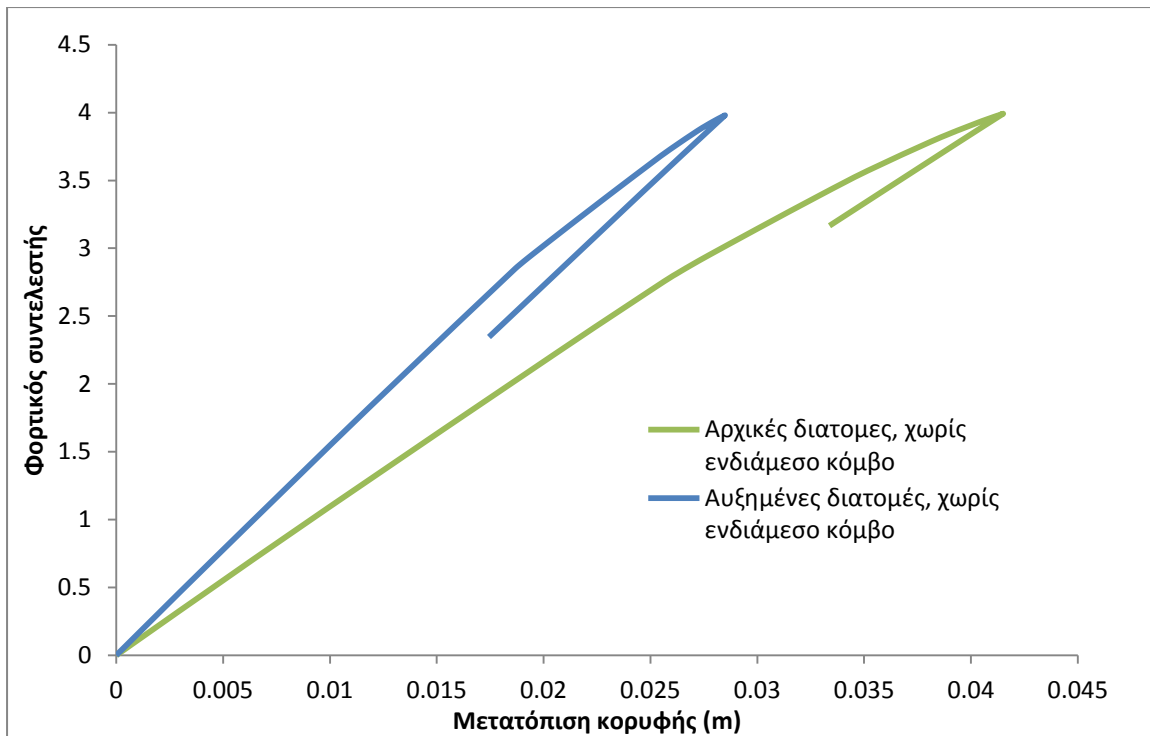
Μετά την αλλαγή στη διακριτοποίηση των συνδέσμων δυσκαμψίας ο πύργος λυγίζει πανομοιότυπα με την προηγούμενη περίπτωση. Για την πρώτη ιδιομορφή ο φορτικός συντελεστής είναι 105.6 και για τη δεύτερη 106,9. Παρατηρούμε δηλαδή μια κάποια αύξηση στις τιμές των φορτικών συντελεστών. Κάτι τέτοιο δεν ήταν αναμενόμενο, καθότι με την εισαγωγή ενδιάμεσου κόμβου οι ράβδοι μπορούν πλέον να λυγίσουν. Η αύξηση των συντελεστών μπορεί να εξηγηθεί μόνο από το γεγονός ότι η αλλαγή στη διακριτοποίηση βελτίωσε το επίπεδο ακρίβειας στους υπολογισμούς ενώ παράλληλα η αύξηση του εμβαδού των διατομών των συνδέσμων τους κατέστησε πρακτικώς αλύγιστους.

### 3.1.3 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού(GMNA), χωρίς ατέλεια

Όλες οι παραπάνω αναλύσεις λυγισμού έχουν ως αντικείμενο το κρίσιμο φορτίο λυγισμού της κατασκευής θεωρώντας ελαστικό υλικό και δεν λαμβάνουν υπόψη τη διαρροή του υλικού. Στις αναλύσεις που παρουσιάζουμε συγκεντρωτικά παρακάτω προσαυξάνονται βήμα βήμα τα στατικά φορτία της κατασκευής οδηγώντας την στην κατάρρευση για καθεμία από τις περιπτώσεις που αναφέραμε.



Σχήμα 3.15(α) : Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής, για την περίπτωση με εσωτερικούς και εξωτερικούς συνδέσμους Λ, πριν και μετά την αύξηση των διατομών των συνδέσμων



Σχήμα 3.15(β) : Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής, για την περίπτωση με εσωτερικούς και εξωτερικούς συνδέσμους  $\Lambda$  – διαγράμματα που παρουσιάζουν καθοδικό κλάδο

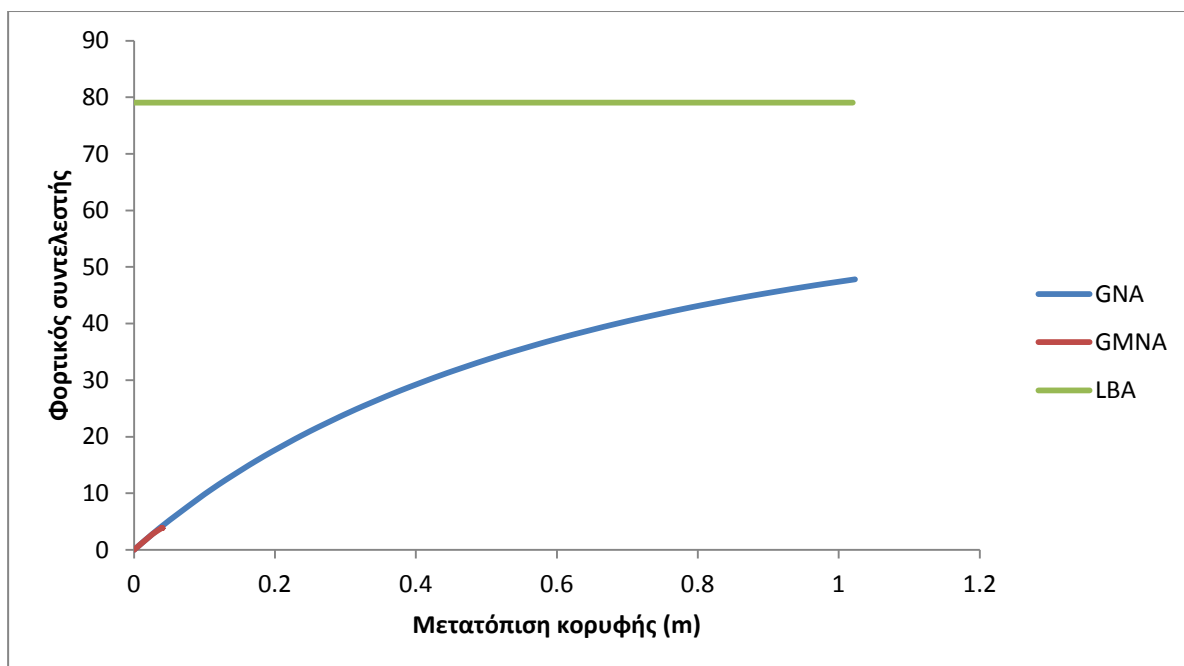
Έτσι ο φορτικός συντελεστής πολλαπλασιάζει σε κάθε βήμα τα στατικά φορτία για να μας δώσει τελικά τα φορτία που οδηγούν στην κατάρρευση της κατασκευής. Οι παραπάνω δρόμοι ισορροπίας μας δίνουν το φορτικό συντελεστή  $\Lambda$  συναρτήσει της μετακίνησης κορυφής και μας επιτρέπουν να διαπιστώσουμε κατά πόσο οι παράμετροι που μελετάμε επηρεάζουν τη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής.

Από τη μορφή των δρόμων ισορροπίας στο σχήμα 3.15(α) φαίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις ο φορτικός συντελεστής μεγαλώνει για κάθε βήμα και φτάνει μέχρι την τιμή 4. Στο σχήμα 3.15(β) παρουσιάζονται δύο εκ των αναλύσεων του σχήματος της (α) περίπτωσης στις οποίες εμφανίζεται και ένας δεύτερος καθοδικός κλάδος στο δρόμο ισορροπίας .

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν με ασφάλεια από τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων είναι πως αύξηση στο εμβαδό της διατομής των συνδέσμων κάνει την κατασκευή πιο δύσκαμπτη αφού αυτή αστοχεί για μικρότερες μετατοπίσεις. Επιπλέον, από το πρώτο διάγραμμα φαίνεται ότι η εισαγωγή ενδιάμεσου κόμβου που συνοδεύεται από μεγάλη μείωση του φορτίου λυγισμού (συγκρίνοντας τους δρόμους ισορροπίας με τις αρχικές διατομές στους συνδέσμους δυσκαμψίας) δεν επιφέρει καμία ουσιαστική μεταβολή τόσο της δυσκαμψίας όσο και της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής αφού οι καμπύλες πριν και μετά την εισαγωγή

ενδιάμεσου κόμβου στους συνδέσμους πρακτικά ταυτίζονται. Από το πρώτο διάγραμμα φαίνεται ότι τόσο η αύξηση στις διατομές των συνδέσμων όσο και η διαφοροποίηση στη διακριτοποίησή τους δεν επηρεάζει ουσιαδώς την φέρουσα ικανότητα του φορέα. Ωστόσο δεν μπορούμε να αποφανθούμε με βεβαιότητα για την τιμή του φορτίου αστοχίας σε όλες τις υπό εξέταση περιπτώσεις καθώς δεν εμφανίζεται καθοδικός κλάδος σε όλους τους δρόμους ισορροπίας, παρόλη την αύξηση του αριθμού των βημάτων επί παραδείγματι από 100 σε 500. Περαιτέρω αύξηση του αριθμού των βημάτων αυξάνει δυσανάλογα τον υπολογιστικό χρόνο κάτι που την καθιστά πρακτικά ανέφικτη με τα διαθέσιμα υπολογιστικά μέσα.

Στο σχήμα 3.16 παρουσιάζεται συγκριτικά σε ενιαίο διάγραμμα οι δρόμοι ισορροπίας που έχουν προκύψει στο ADINA για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας (GNA) και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού ταυτόχρονα προκειμένου να είναι άμεσα ορατή η επίδραση της κάθε μη γραμμικότητας στη συμπεριφορά του φορέα.

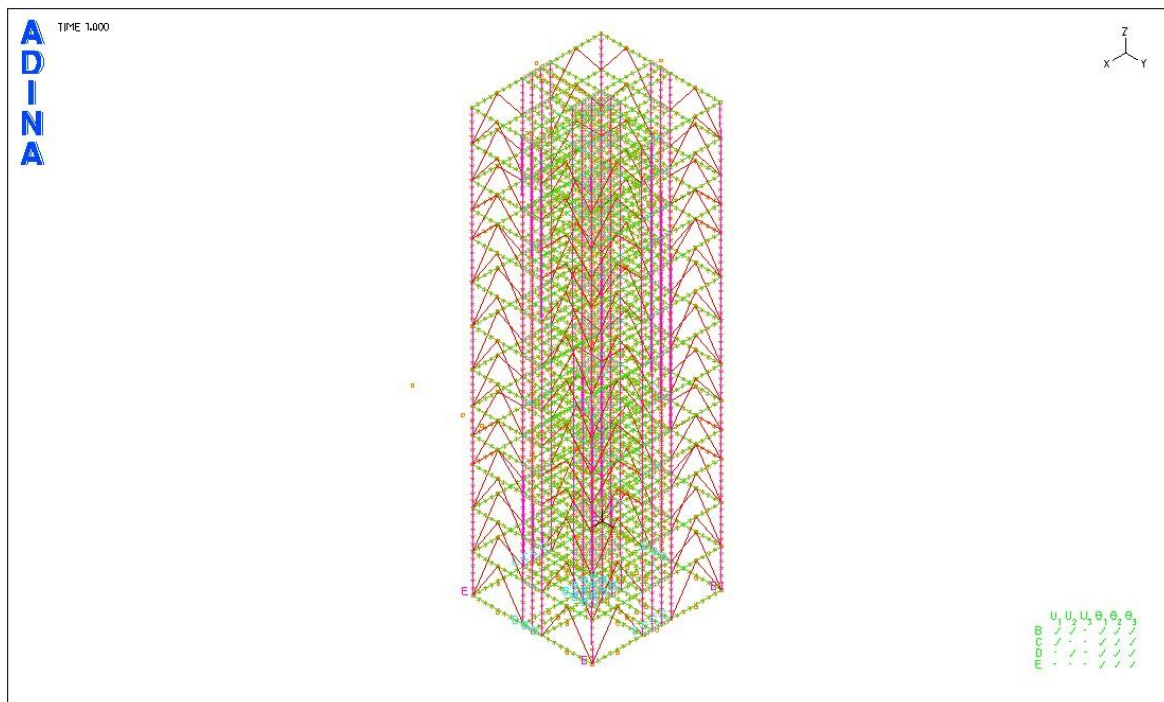


Σχήμα 3.16: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής για εσωτερικούς και εξωτερικούς συνδέσμους τύπου Λ, με αρχικές διατομές

Στις επόμενες αναλύσεις θα εξετάσουμε κατά πόσο μεταβάλλεται η συμπεριφορά του φορέα συναρτήσει του πλήθους των συνδέσμων δυσκαμψίας. Γι' αυτό θα αφαιρέσουμε τους εσωτερικούς συνδέσμους δυσκαμψίας και θα επαναλάβουμε τις ίδιες αναλύσεις. Στόχος μας είναι επίσης να δημιουργήσουμε ένα φορέα όπου θα έχει επαλειφθεί ο κλάδος της ταλάντωσης και θα προσφέρεται για τη διεξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

### 3.2 Περίπτωση 2<sup>η</sup>: Πύργος μόνο με εξωτερικούς συνδέσμους δυσκαμψίας, τύπου Λ

Σε αυτή την περίπτωση αφαιρούμε όλους τους εσωτερικούς συνδέσμους δυσκαμψίας Λ και έχουμε συνδέσμους μόνο στις εξωτερικές πλευρές του πύργου, όπως φαίνεται στο προοπτικό Σχέδιο 3.16 που ακολουθεί.



Σχήμα 3.17: Προοπτικό σχέδιο 2<sup>ης</sup> περίπτωσης

#### 3.2.1 Αρχικές διατομές

Ομοίως με την 1<sup>η</sup> Περίπτωση που εξετάσαμε, οι διατομές που θα χρησιμοποιήσουμε αρχικά είναι οι εξής :

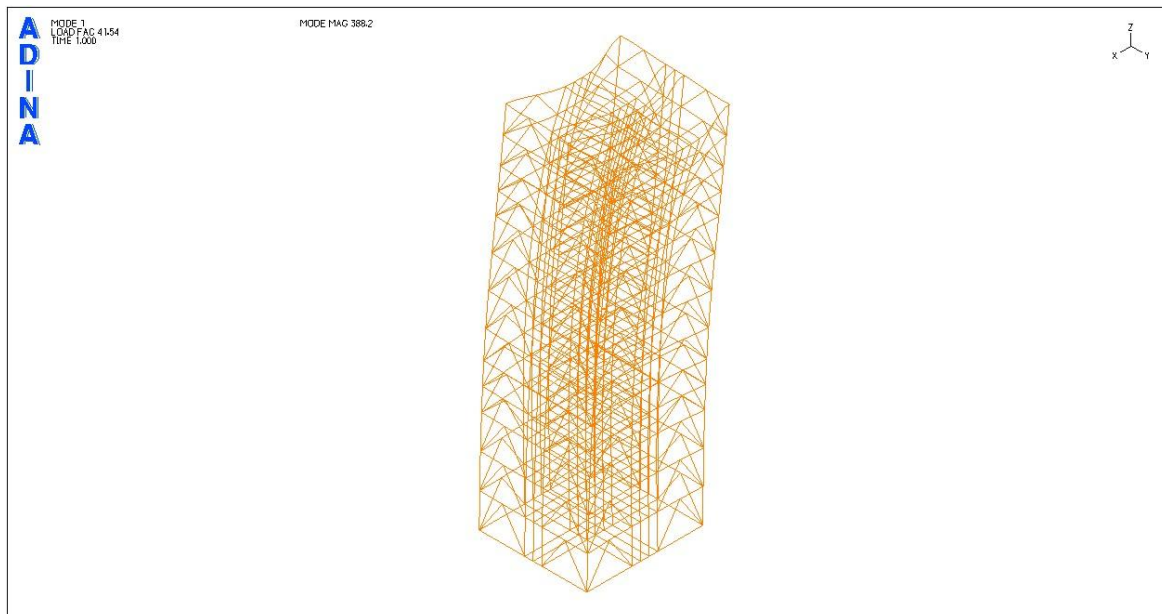
	CHS	d	t	A	I
		mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>
Υποστύλωμα	273x16	273	16	129	10710
Δοκοί	168.3x8	168,3	8	40,29	1297
Σύνδεσμοι Λ	88.9x7.1	88,9	7,1	18,2	154

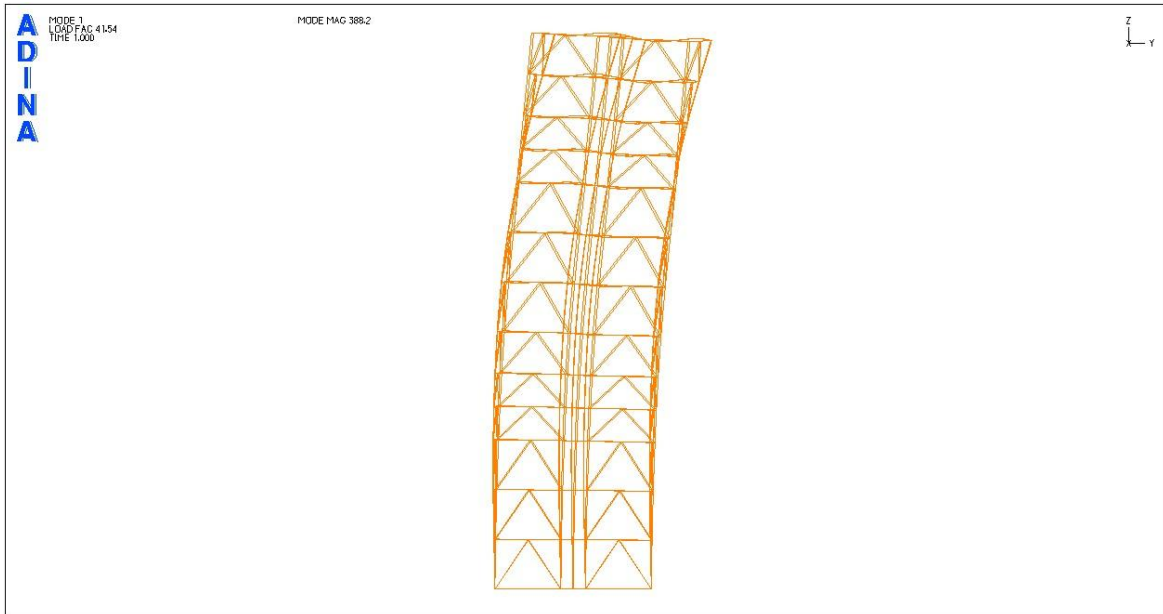
Πίνακας 3.2: Διατομές CHS

Οι εναπομείνουσες αναλύσεις του κεφαλαίου 3 έχουν στόχο να συγκρίνουν τα φορτία κατάρρευσης για εναλλακτικούς τρόπους μόρφωσης του φορέα και να εξετάσουν τις παραμέτρους που επηρεάζουν το μέγεθος του φορτίου κατάρρευσης για κάθε περίπτωση. Οι αναλύσεις που θα παρουσιάσουμε είναι αναλύσεις λυγισμού και μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού, με τις αρχικές ή αυξημένες διατομές συνδέσμων καθώς και με ή χωρίς ενδιάμεσο κόμβο στους συνδέσμους.

### Ιδιομορφές λυγισμού

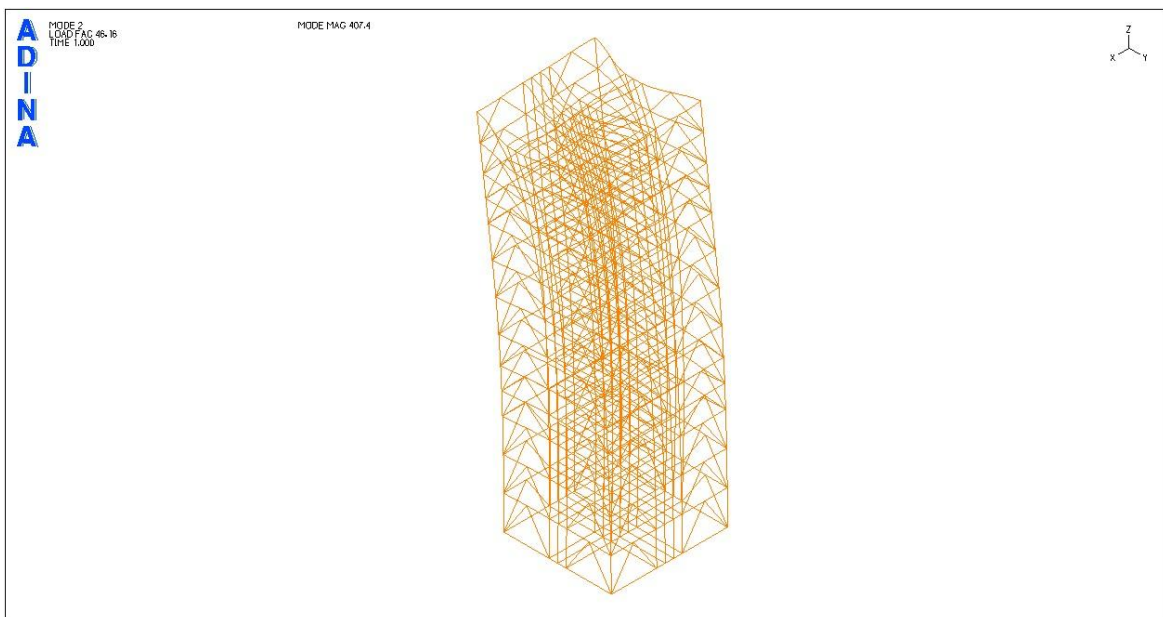
Φορτικός συντελεστής πρώτης ιδιομορφής: 41,54

Σχήμα 3.18: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

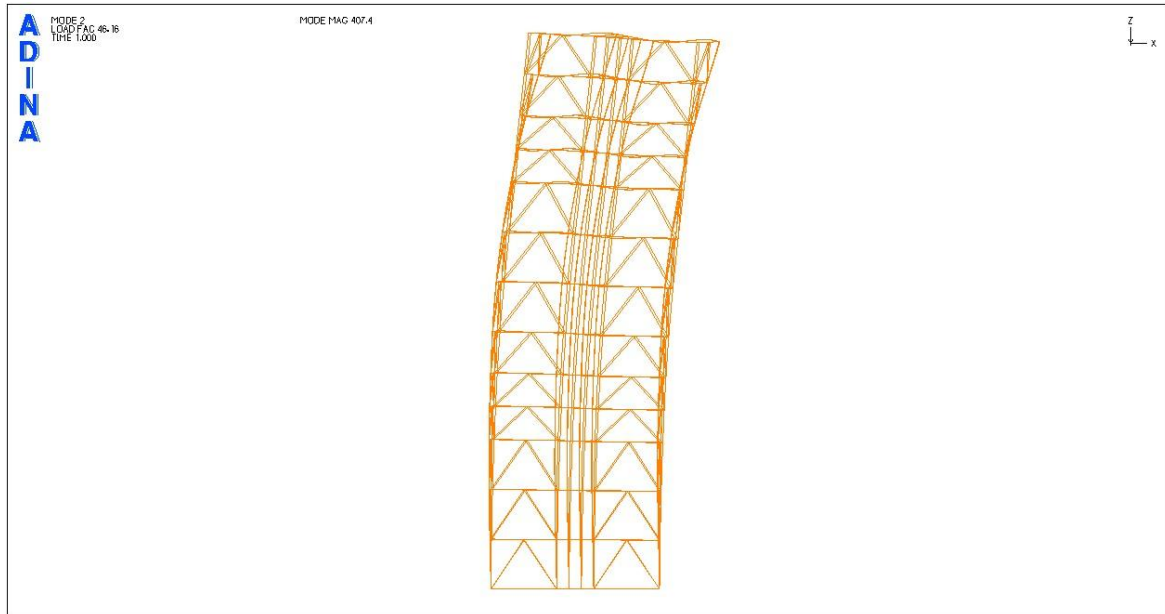


Σχήμα 3.19: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη y- z)

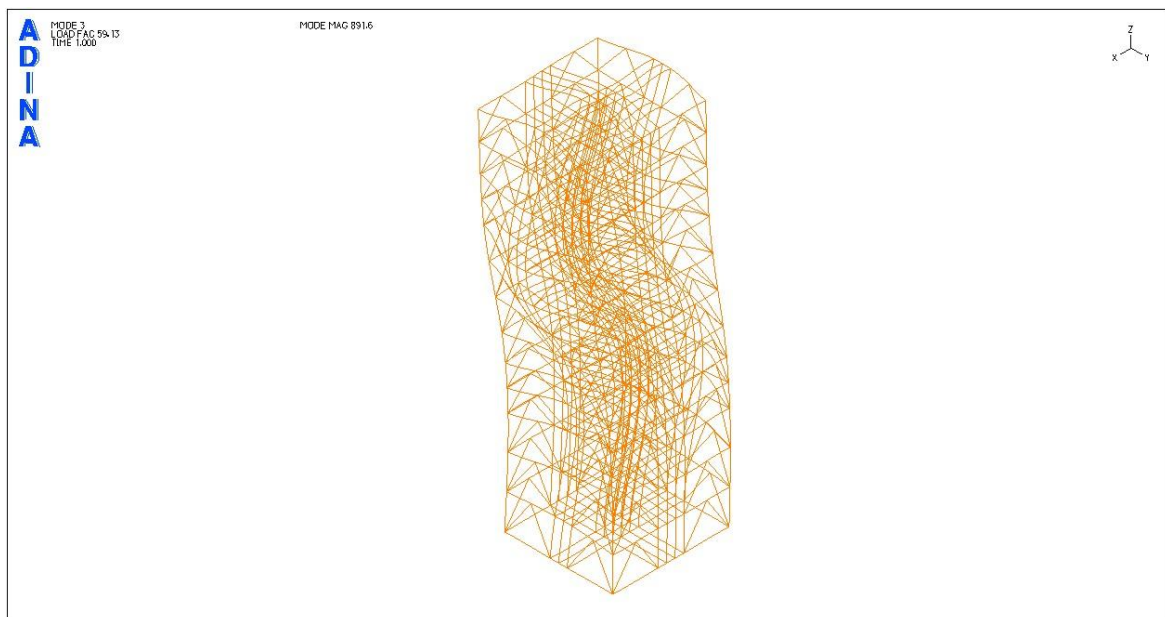
Φορτικός συντελεστής δεύτερης ιδιομορφής: 46,16



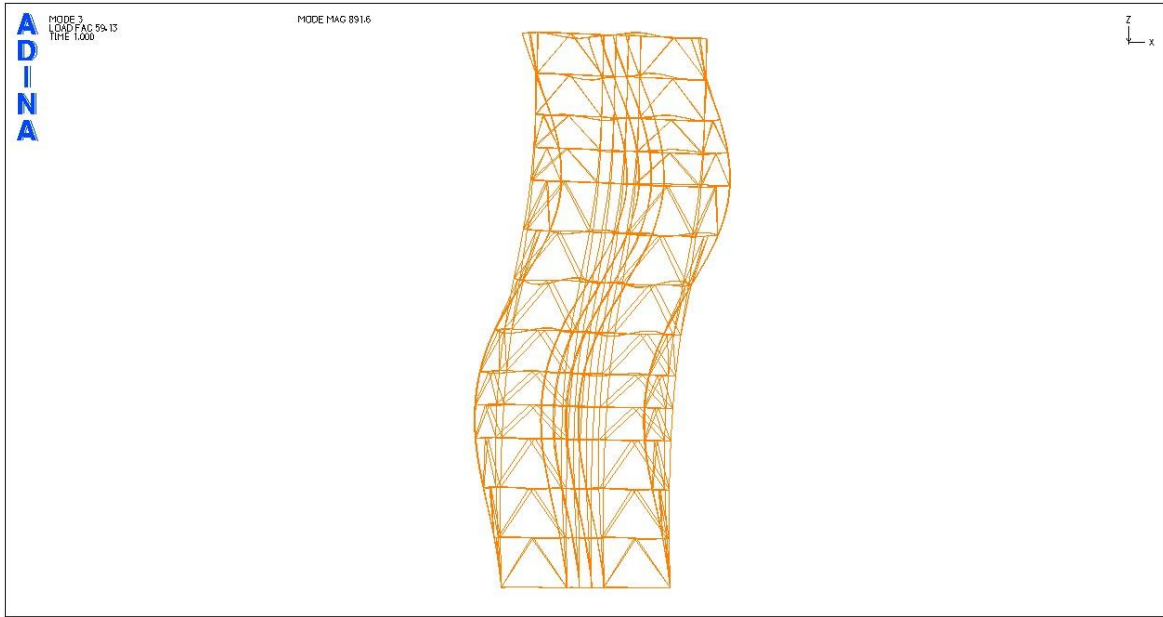
Σχήμα 3.20: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

Σχήμα 3.21: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη x- z)

Φορτικός συντελεστής τρίτης ιδιομορφής: 59,13

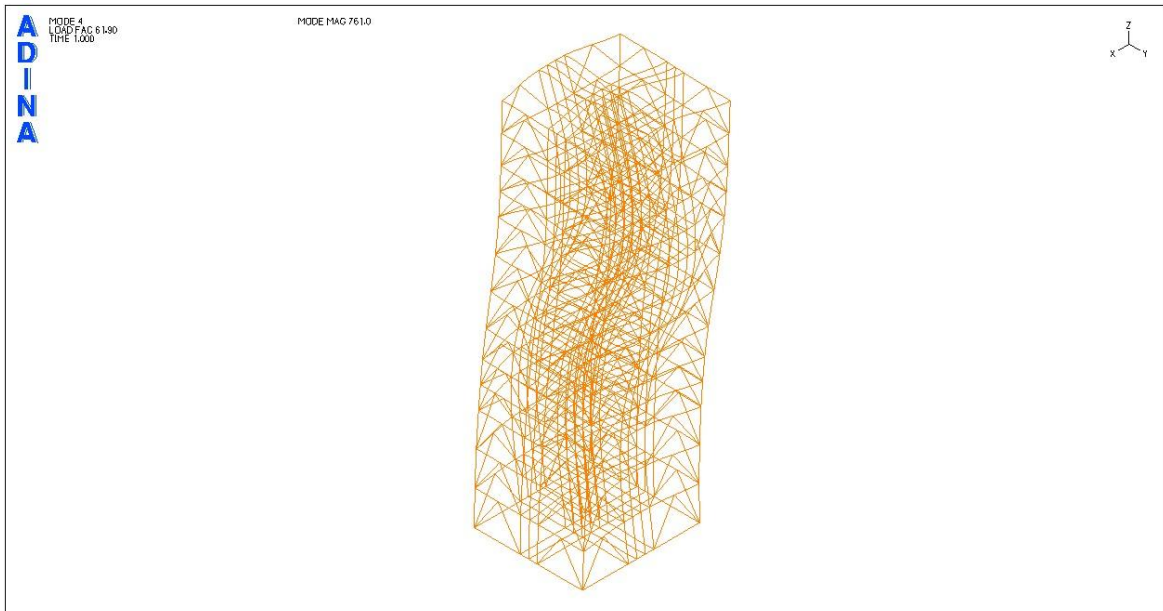
Σχήμα 3.22: 3<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)





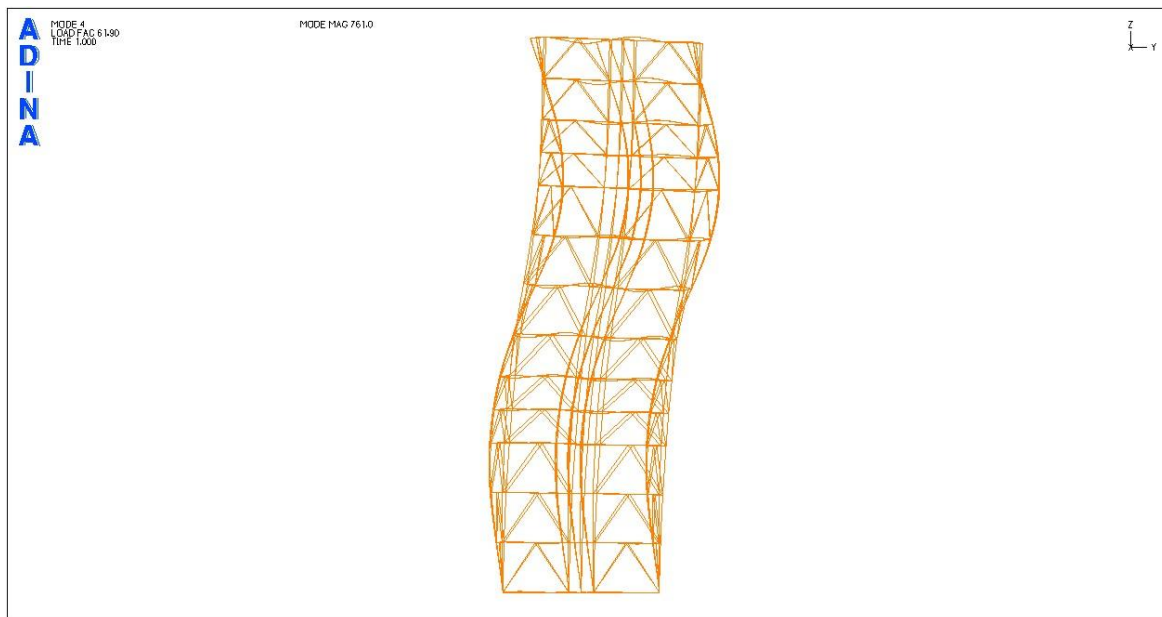
Σχήμα 3.23: 3<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη x- z)

Φορτικός συντελεστής τέταρτης ιδιομορφής: 61,90



Σχήμα 3.24: 4<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 3.25.: 4<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη y- z)

Οι αναλύσεις λυγισμού για διατομή των συνδέσμων CHS 88,9\*7,1 πριν την εισαγωγή ενδιάμεσου κόμβου στους συνδέσμους δίνει φορτικό συντελεστή 41,54, δηλαδή υποδιπλασιάστηκε σε σχέση με το φορέα όπου είχαμε το διπλάσιο αριθμό συνδέσμων (79,05), ωστόσο παραμένει αρκετά μεγάλος για να θεωρήσουμε ότι ο φορέας δεν είναι ευπαθής σε λυγισμό. Οι δύο πρώτες ιδιομορφές λυγίζουν με εκτροπή της κορυφής ενώ οι δύο επόμενες έχουν ημιτονοειδή μορφή με δύο ημικύματα.

Η εισαγωγή ενδιάμεσου κόμβου στους συνδέσμους θα επιφέρει και εδώ μεγάλη πτώση του φορτικού συντελεστή για λυγισμό μαζί με την αναμενόμενη αλλαγή του σχήματος των ιδιομορφών αφού εδώ ο λυγισμός εκδηλώνεται στους ευπαθέστερους σε λυγισμό θλιβόμενους συνδέσμους. Ο φορτικός συντελεστής για λυγισμό παίρνει τις ακόλουθες τιμές για τις τέσσερις πρώτες ιδιομορφές:

- 7,873 για την 1<sup>η</sup>
- 7,873 για την 2<sup>η</sup>
- 7,976 για την 3<sup>η</sup>
- 7,976 για την 4<sup>η</sup>

Στον προηγούμενο φορέα με το διπλάσιο αριθμό συνδέσμων η φέρουσα ικανότητα του φορέα δεν φάνηκε να έχει επηρεαστεί από την αλλαγή στη διακριτοποίηση και την πτώση του φορτικού συντελεστή για λυγισμό σε 14.78. Το ενδιαφέρον μας στρέφεται στο να διαπιστώσουμε κατά πόσο

θα επηρεαστεί η φέρουσα ικανότητα του φορέα όταν αφαιρέσουμε τους μισούς συνδέσμους πριν και μετά την αύξηση του εμβαδού της διατομής και για τις δύο εναλλακτικές στη διακριτοποίηση των συνδέσμων. Έτσι θα εξακριβωθεί η συνεισφορά του πλήθους των συνδέσμων στην αντοχή του φορέα σε συνδυασμό με τις δύο εναλλακτικές στη διακριτοποίηση των συνδέσμων.

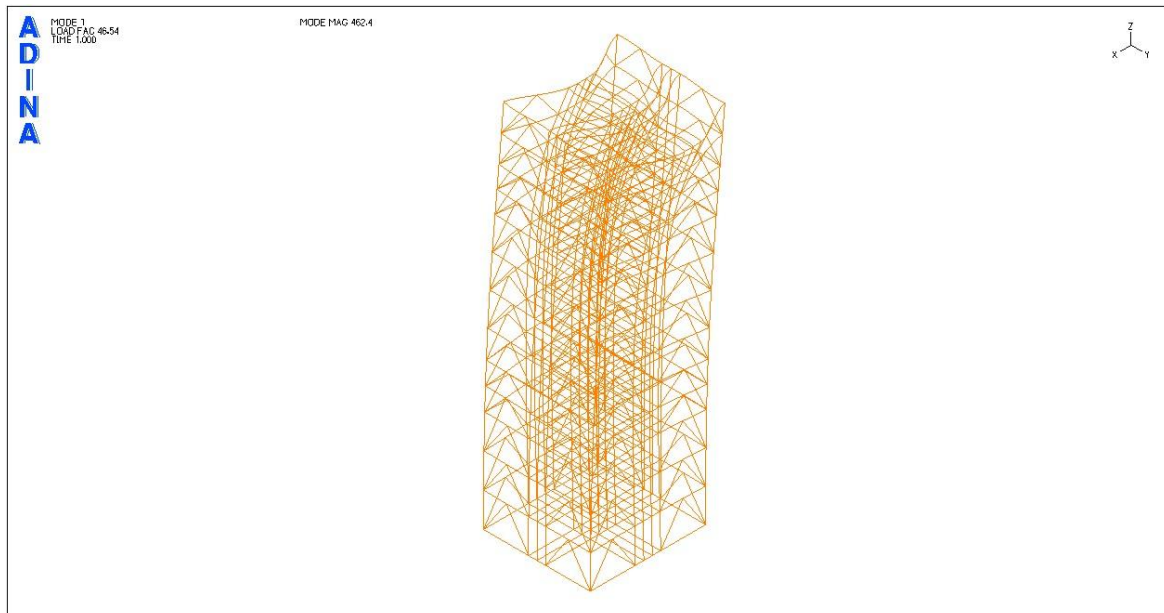
### 3.2.2 Αύξηση εμβαδού διατομών συνδέσμων

Η καινούρια διατομή που θα χρησιμοποιηθεί για τους συνδέσμους είναι, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση CHS 177,8\*12,5.

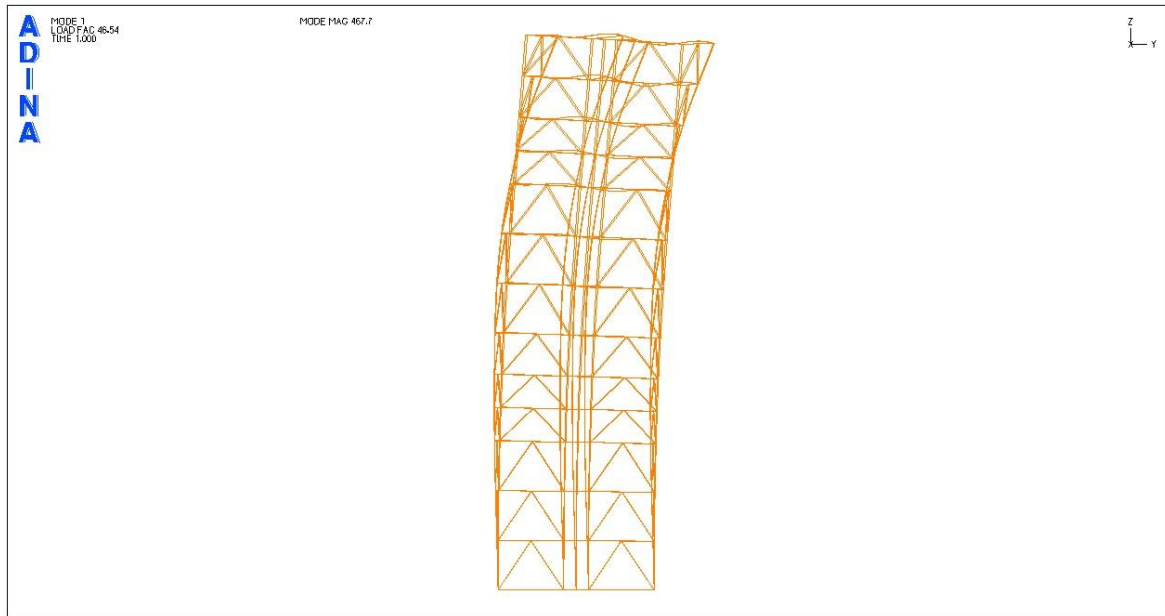
Παρακάτω παρουσιάζονται οι τέσσερις πρώτες ιδιομόρφες λυγισμού πριν και μετά την αλλαγή στη διακριτοποίηση των μελών των συνδέσμων δυσκαμψίας.

#### Ιδιομορφές λυγισμού

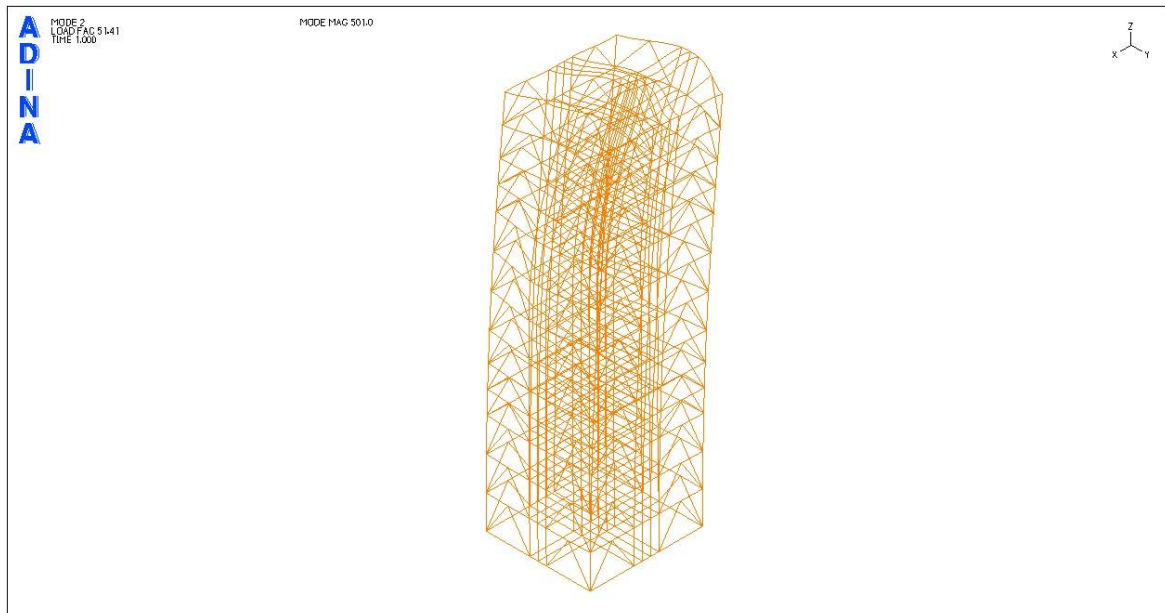
Φορτικός συντελεστής πρώτης ιδιομορφής: 46,54

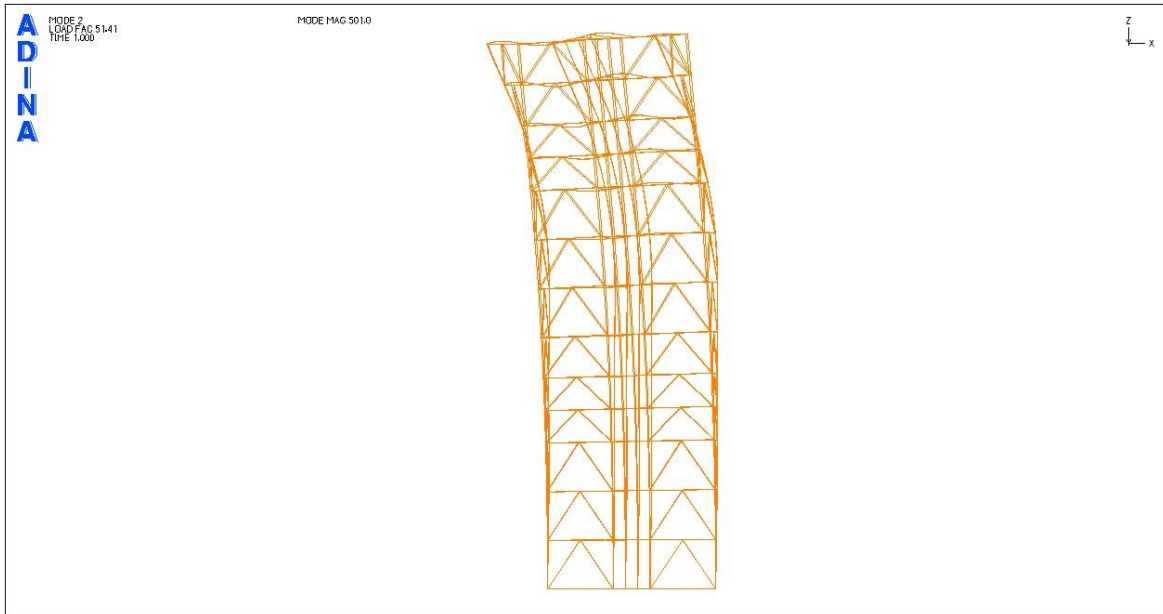


Σχήμα 3.26: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

Σχήμα 3.27: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη y- z)

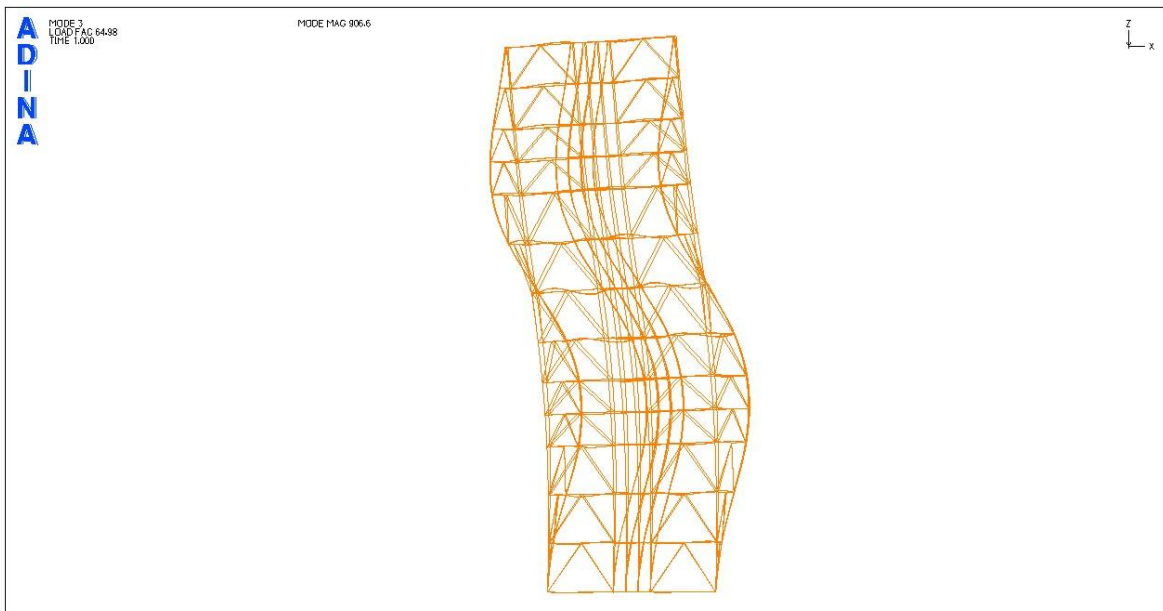
Φορτικός συντελεστής δεύτερης ιδιομορφής: 51,41

Σχήμα 3.28: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



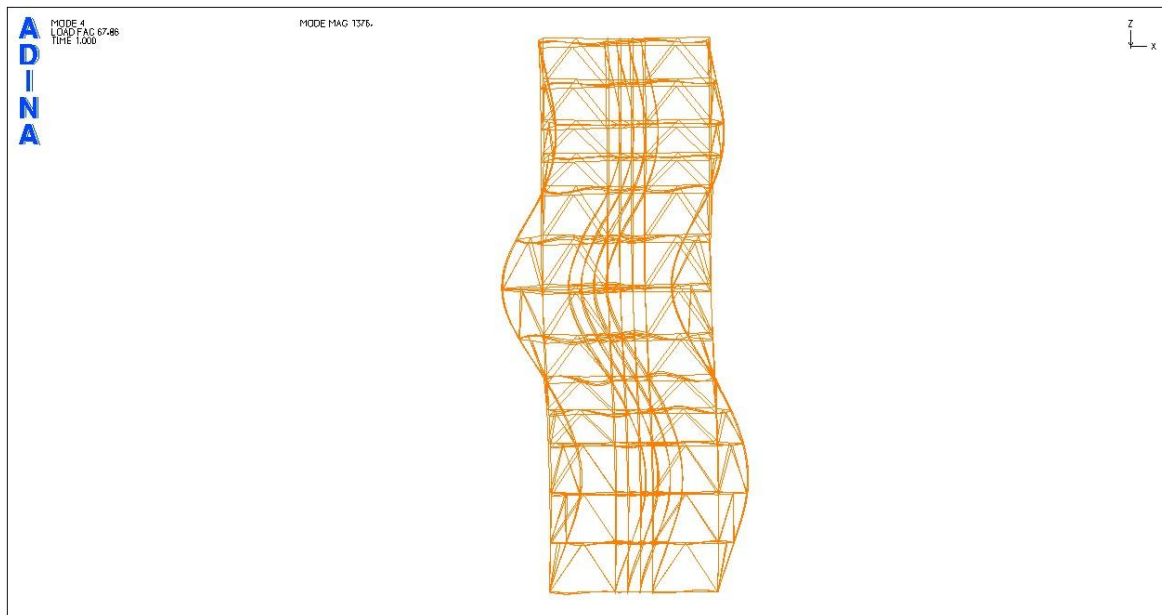
Σχήμα 3.29: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη x- z)

Φορτικός συντελεστής τρίτης ιδιομορφής: 64,98



Σχήμα 3.30: 3<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη x- z)

Φορτικός συντελεστής τέταρτης ιδιομορφής: 67,86



Σχήμα 3.31: 4<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη x- z)

Το σχήμα των τριών πρώτων ιδιομορφών είναι πανομοιότυπο με την περίπτωση του πύργου με το διπλάσιο αριθμό συνδέσμων παρ' όλο που η τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού υποδιπλασιάζεται. Διαφοροποίηση παρατηρούμε στην 4<sup>η</sup> ιδιομορφή στην οποία ο φορέας λυγίζει στο επίπεδο x-z (όπως και στην 3<sup>η</sup> ιδιομορφή) με 3 ημικύματα.

#### **Ιδιομορφές λυγισμού μετά την εισαγωγή ενδιάμεσου κόμβου στους συνδέσμους δυσκαμψίας**

Μετά την αλλαγή στη διακριτοποίηση των συνδέσμων δυσκαμψίας ο πύργος λυγίζει πανομοιότυπα με την προηγούμενη περίπτωση, Οι τιμές του φορτικού συντελεστή για τις τέσσερις πρώτες ιδιομορφές είναι οι εξής:

- 46,60 για την 1<sup>η</sup>
- 55,81 για την 2<sup>η</sup>
- 68,10 για την 3<sup>η</sup>
- 76,73 για την 4<sup>η</sup>

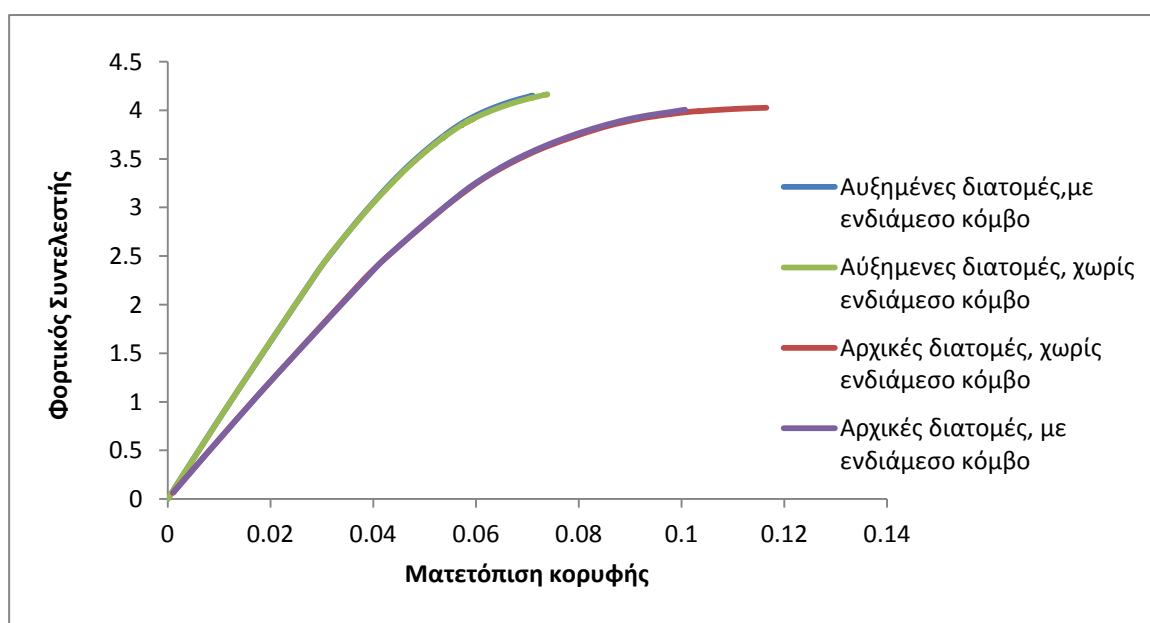
Παρατηρούμε δηλαδή ότι η τιμή του φορτικού συντελεστή της 1<sup>ης</sup> ιδιομορφής και στις δύο περιπτώσεις παραμένει πρακτικώς αναλλοίωτη, ενώ στις υπόλοιπες τρεις ιδιομορφές έχουμε μια κάποια αύξηση στις τιμές των φορτικών συντελεστών. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, καθότι η

αύξηση του εμβαδού των διατομών των συνδέσμων τους κατέστησε πρακτικώς αλύγιστους οπότε είναι λογικό να μην υπάρχει ουσιαστική αλλαγή στην τιμή του φορτικού συντελεστή πριν και μετά την διακριτοποίηση των συνδέσμων. Εντύπωση μας προκαλεί η κάποια αύξηση των τιμών του κρίσιμου φορτίου λυγισμού μετά την αλλαγή στη διακριτοποίηση για τις ιδιομορφές ανώτερης τάξης, κάτι που δεν έχει φυσικό νόημα-ωστόσο δεν αναμένεται να επηρεάσει τη φέρουσα ικανότητα του φορέα και μπορεί να αγνοηθεί.

### 3.2.3 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού (GMNA), χωρίς ατέλεια

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση της παραγράφου 3.1.3 προχωρούμε σε αναλύσεις για την εύρεση του φορτίου κατάρρευσης του φορέα με εξωτερικούς συνδέσμους μόνο ώστε να διερευνηθεί η επιρροή των ίδιων παραμέτρων συναρτήσει του πλήθους των συνδέσμων.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα φορτικού συντελεστή – μετατόπισης κορυφής για διαφοροποίηση στη διακριτοποίηση των συνδέσμων δυσκαμψίας με εισαγωγή ενδιάμεσου κόμβου και το εμβαδό της διατομής τους.



Σχήμα 3.32: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής, , για την περίπτωση με εξωτερικούς συνδέσμους  $\Lambda$ , πριν και μετά την αύξηση των διατομών των συνδέσμων

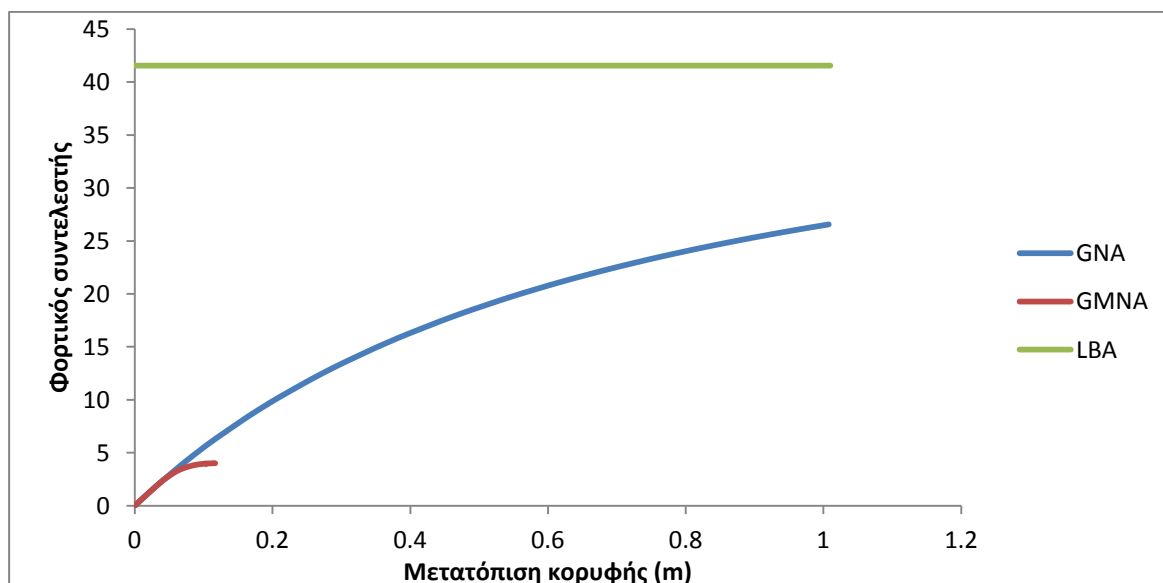
Αρχικά βλέπουμε υπάρχει μία περιοχή στην οποία η κατασκευή μας συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά και οι μετατοπίσεις αυξάνονται αναλογικά με την αύξηση του φορτικού συντελεστή - κατ' επέκταση με την αύξηση του φορτίου - και μια δεύτερη περιοχή όπου παρατηρούμε μία μείωση της

δυσκαμψίας, δηλαδή περαιτέρω αύξηση του φορτικού συντελεστή επιφέρει μεγαλύτερες μετατοπίσεις. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται πιο έντονα στον αρχικό και λιγότερο δύσκαμπτο φορέα με μικρότερο εμβαδό στις διατομές των συνδέσμων. Συγκεκριμένα, σε αυτό τον φορέα η ελαστική περιοχή δεν είναι τόσο ξεκάθαρη και έχει μικρότερο εύρος ενώ και οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται στην αστοχία είναι σχεδόν διπλάσιες.

Με την εισαγωγή ενδιάμεσου κόμβου στους συνδέσμους δεν παρατηρείται καμία αξιόλογη διαφοροποίηση στη συμπεριφορά του φορέα, ενώ η αύξηση της διατομής των συνδέσμων όπως ήταν αναμενόμενο, επιδρά θετικά και οδηγεί σε μικρή αύξηση του φορτίου κατάρρευσης. Ο φορτικός συντελεστής από 4,0 αυξάνεται σε 4,2, έχουμε δηλαδή μία αύξηση της τάξεως του 5% περίπου.

Παρατηρούμε ότι με αφαίρεση των εσωτερικών συνδέσμων δυσκαμψίας δεν παρατηρείται καμία μείωση του φορτικού συντελεστή της κατασκευής, αντιθέτως βλέπουμε μία αύξηση αυτού. Ωστόσο δεν είμαστε σε θέση να θεωρήσουμε ασφαλή αυτά τα αποτελέσματα καθώς δεν είμαστε βέβαιοι ότι έχει επιτευχθεί το οριακό φορτίο σε ορισμένες αναλύσεις της πρώτης περίπτωσης λόγω της απουσίας ενός καθοδικού κλάδου στους δρόμους ισορροπίας.

Στο σχήμα 3.33 παρουσιάζεται συγκριτικά σε ενιαίο διάγραμμα οι δρόμοι ισορροπίας που έχουν προκύψει στο ADINA για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας (GNA) και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού

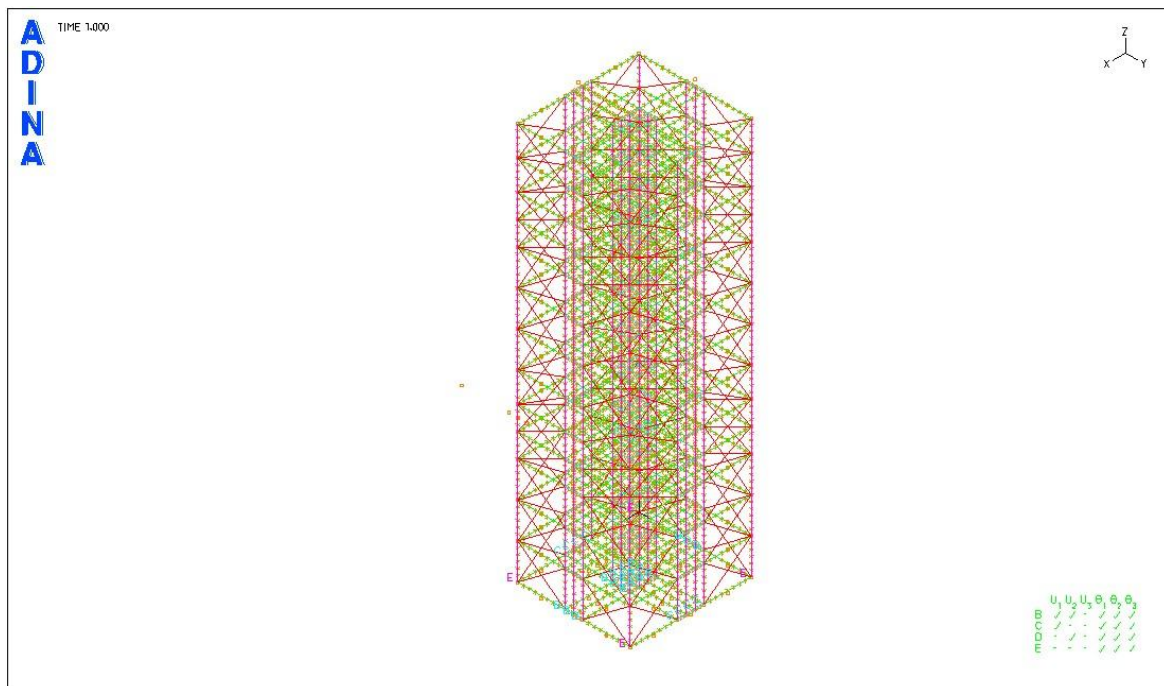


Σχήμα 3.33: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής για εξωτερικούς συνδέσμους τύπου Λ, με αρχικές διατομές

Στις επόμενες αναλύσεις θα εξετάσουμε κατά πόσο μεταβάλλεται η συμπεριφορά του φορέα συναρτήσει του τύπου των συνδέσμων δυσκαμψίας. Γι' αυτό θα αντικαταστήσουμε τους συνδέσμους τύπου Λ της 2<sup>ης</sup> περίπτωσης που εξετάσαμε με χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας και θα επαναλάβουμε τις ίδιες αναλύσεις.

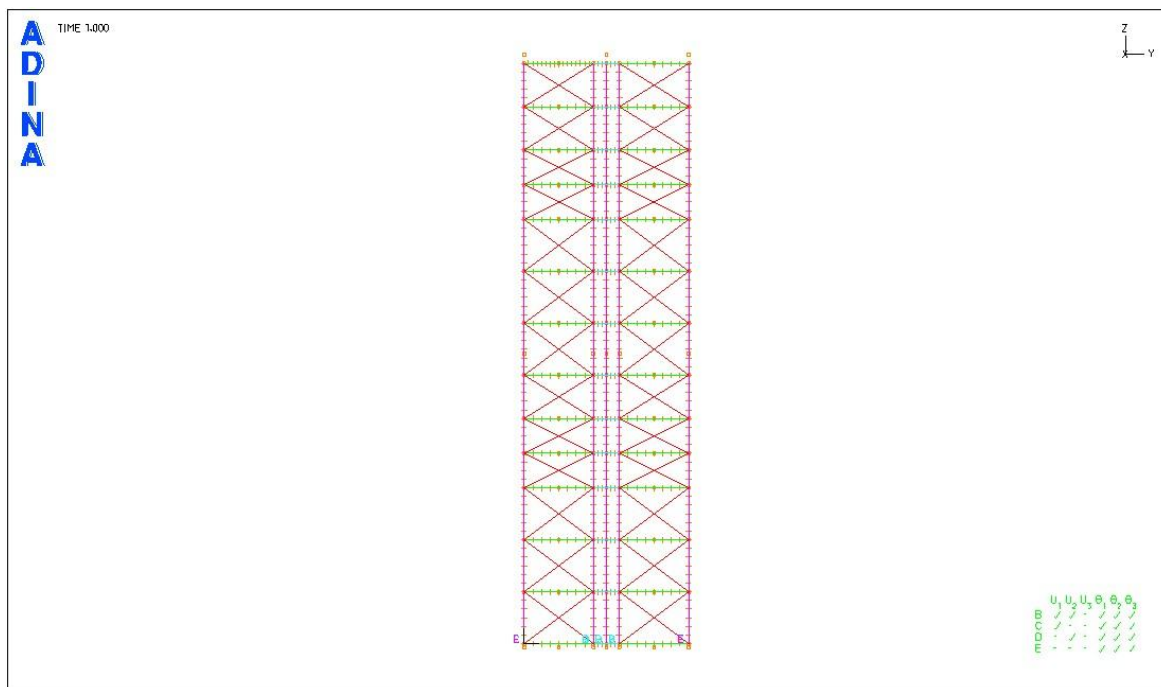
### 3.3 Περίπτωση 3<sup>η</sup>: Πύργος μόνο με εξωτερικούς χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας

Στην 3<sup>η</sup> Περίπτωση που εξετάζουμε, αντικαθιστούμε τους συνδέσμους δυσκαμψίας τύπου Λ του φορέα της 2<sup>ης</sup> περίπτωσης με χιαστί συνδέσμους, οι οποίοι τοποθετούνται μόνο στις εξωτερικές πλευρές. Ακολουθούν το προοπτικό σχέδιο και η όψη y-z της υπό μελέτη περίπτωσης.



Σχήμα 3.34: Προοπτικό σχέδιο 3<sup>ης</sup> περίπτωσης





Σχήμα 3.35: Όψη y-z, 3ης περίπτωσης

### 3.3.1 Αρχικές διατομές

Οι αρχικές διατομές που χρησιμοποιούμε παραμένουν ίδιες με τις προηγούμενες περιπτώσεις, όπως φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα 3.3. Το υλικό που χρησιμοποιούμε είναι χάλυβας S235.

	CHS	d	t	A	I
		mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>
Υποστύλωμα	273x16	273	16	129	10710
Δοκοί	168.3x8	168,3	8	40,29	1297
Χιαστί Σύνδεσμοι	88.9x7.1	88,9	7,1	18,2	154

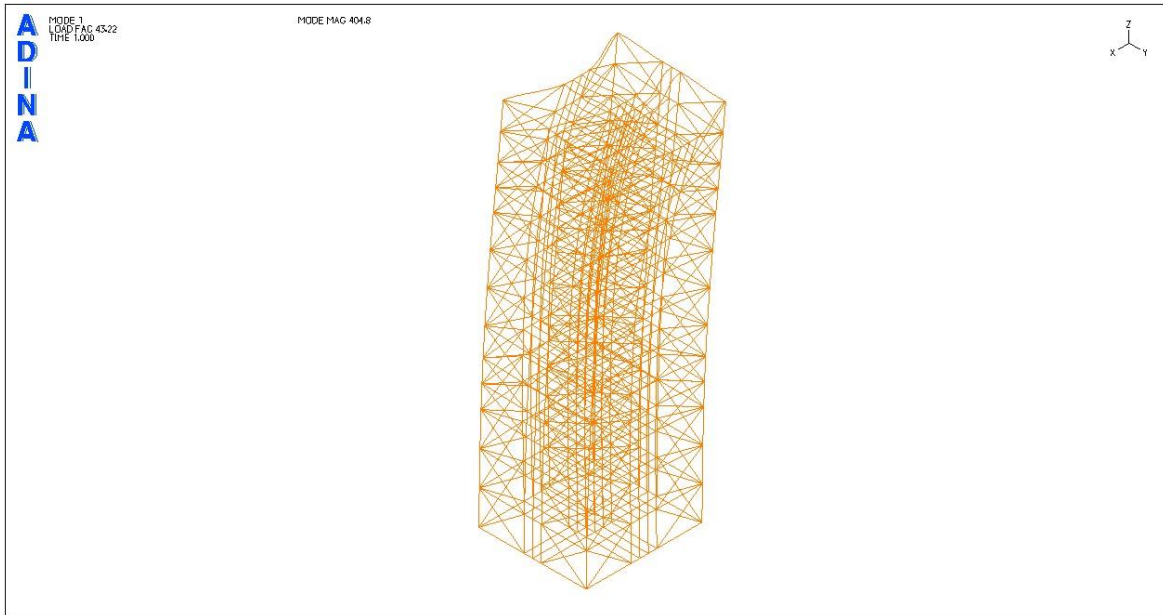
Πίνακας 3.3: Διατομές CHS

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε αναλύσεις λυγισμού και μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού, αρχικά με τις διατομές που παρουσιάσαμε παραπάνω στον πίνακα 3.3 και ακολούθως με αυξημένες τις διατομές των χιαστί συνδέσμων. Επιπλέον οι ίδιες αναλύσεις θα πραγματοποιηθούν και για πυκνότερη διακριτοποίηση των συνδέσμων, δηλαδή πριν και μετά την τοποθέτηση ενδιάμεσου κόμβου σε αυτούς.

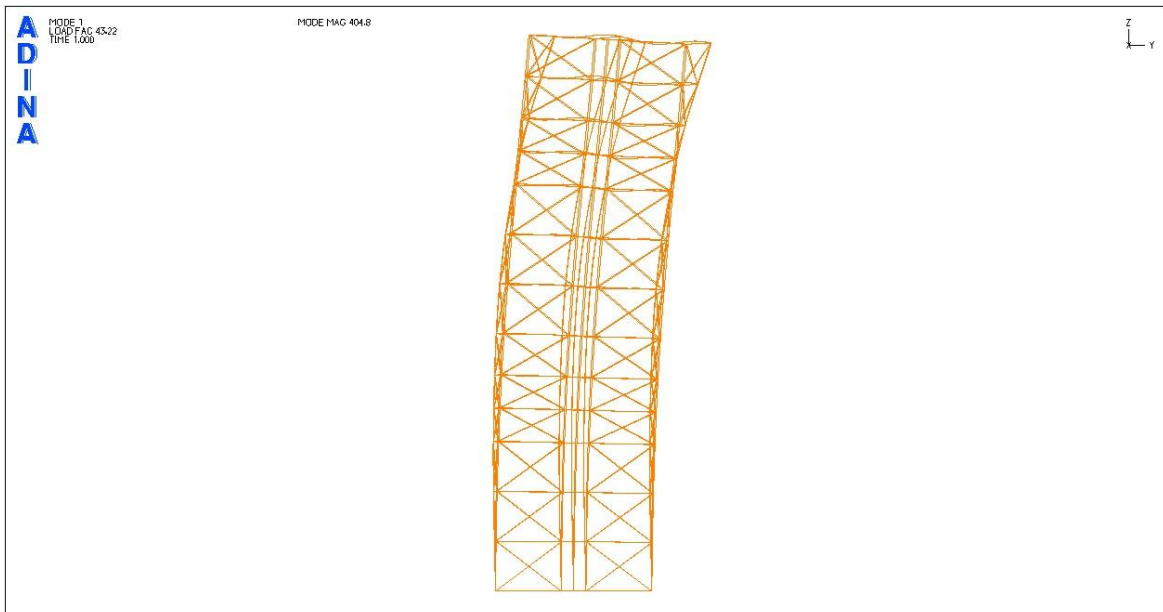
### 3.3.1.1 Χωρίς ενδιάμεσο κόμβο στους χιαστί συνδέσμους

#### Ιδιομορφές λυγισμού

Φορτικός συντελεστής πρώτης ιδιομορφής: 43,22

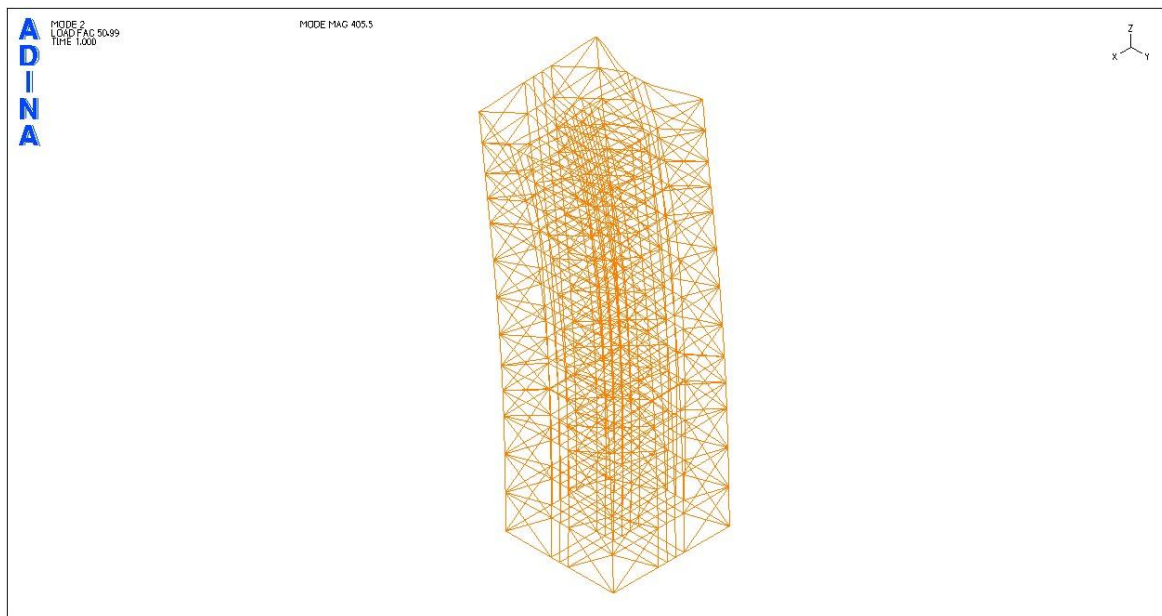


Σχήμα 3.36: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

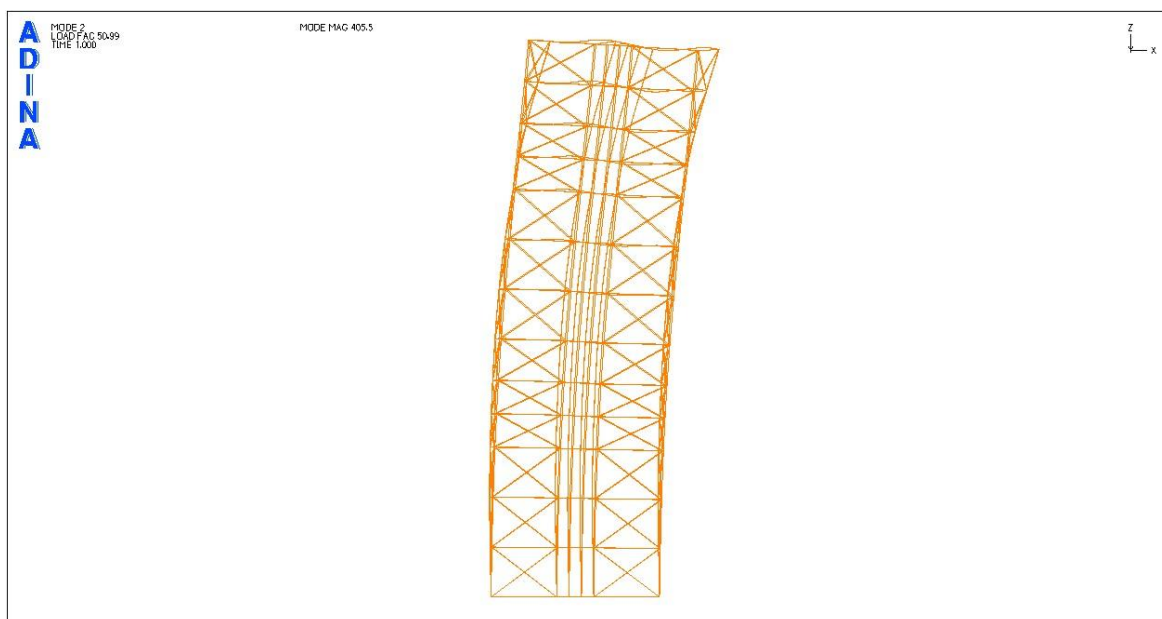


Σχήμα 3.37: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη y-z)

Φορτικός συντελεστής δεύτερης ιδιομορφής: 50,99



Σχήμα 3.38: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 3.39: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη x- z)

Οι αναλύσεις λυγισμού για διατομή των συνδέσμων CHS 88,9\*7,1 πριν την εισαγωγή ενδιάμεσου κόμβου στους συνδέσμους δίνει φορτικό συντελεστή 43,22, δηλαδή ελάχιστα μεγαλύτερο σε σχέση με την αντίστοιχη περίπτωση του φορέα της 2<sup>ης</sup> Περίπτωσης όπου αντί για χιαστί συνδέσμους είχαμε συνδέσμους τύπου Λ (φορτικός συντελεστής πρώτης ιδιομορφής 41,54). Ο φορτικός συντελεστής παραμένει αρκετά μεγάλος και θεωρούμε ότι ο φορέας δεν πρέπει να είναι ευπαθής σε λυγισμό. Οι δύο πρώτες ιδιομορφές λυγίζουν με εκτροπή της κορυφής και παρουσιάζονται στα σχήματα 3.34 – 3.37.

### 3.3.1.2 Με ενδιάμεσο κόμβο στους χιαστί συνδέσμους

#### Ιδιομορφές λυγισμού

Στις συνδέσεις των συνδέσμων δυσκαμψίας με τον υπόλοιπο φορέα δημιουργούμε εσωτερικές αρθρώσεις απελευθερώνοντας τις καμπτικές ροπές στα στοιχεία των συνδέσμων στα σημεία όπου αυτοί συνδέονται με τον υπόλοιπο φορέα. Στην περίπτωση που τοποθετούμε ενδιάμεσο κόμβο στους χιαστί συνδέσμους δοκιμάζουμε δύο εναλλακτικούς τρόπους προσομοίωσης αυτού.

Στην πρώτη περίπτωση στο σημείο τομής των συνδέσμων δημιουργούμε δύο εσωτερικές αρθρώσεις. Αυτό επιτυγχάνεται θεωρώντας ότι η μία διαγώνιος έχει πλήρη συνέχεια ενώ η άλλη αποτελείται από δύο στοιχεία στις άκρες των οποίων απελευθερώνουμε τις καμπτικές ροπές. Ο φορτικός συντελεστής για λυγισμό παίρνει τις ακόλουθες τιμές για τις δύο πρώτες ιδιομορφές:

- 5,201 για την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή
- 6,564 για την 2<sup>η</sup> ιδιομορφή

Στη δεύτερη περίπτωση θεωρούμε σύνδεση των συνδέσμων με πλήρη αποκατάσταση της συνέχειας αυτών, κάτι που επιτυγχάνεται χωρίς καμία περαιτέρω τροποποίηση. Ο φορτικός συντελεστής για λυγισμό παίρνει τις ακόλουθες τιμές για τις δύο πρώτες ιδιομορφές:

- 10,65 για την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή
- 10,69 για την 2<sup>η</sup> ιδιομορφή

Μετά την αλλαγή στη διακριτοποίηση των συνδέσμων δυσκαμψίας και την εισαγωγή ενδιάμεσου κόμβου στους χιαστί συνδέσμους παρατηρούμε μεγάλη πτώση του φορτικού συντελεστή για λυγισμό και για τις δύο περιπτώσεις που εξετάσαμε παραπάνω, μαζί με την αναμενόμενη αλλαγή του σχήματος των ιδιομορφών αφού το φαινόμενο του λυγισμού εκδηλώνεται σε μεμονωμένα μέλη

των συνδέσμων και όχι καθολικά στο φορέα όπως είναι επιθυμητό. Από τα παραπάνω αποτελέσματα καθίσταται σαφές ότι η αντοχή σε λυγισμό των συνδέσμων είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με αυτή των υπολοίπων μελών του φορέα. Θα επιλέξουμε ως βέλτιστες τις αναλύσεις λυγισμού της δεύτερης περίπτωσης όπου έχουμε μεγαλύτερο φορτικό συντελεστή.

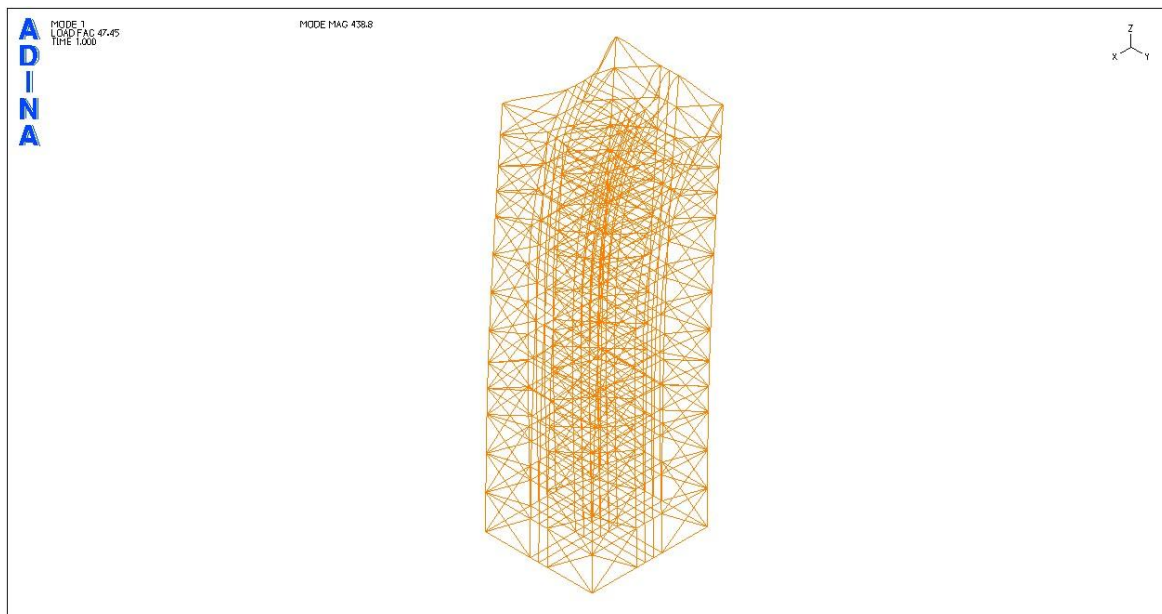
### 3.3.2 Αύξηση εμβαδού διατομών των χιαστί συνδέσμων

Η νέα διατομή που θα χρησιμοποιήσουμε για τους χιαστί συνδέσμους είναι, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η CHS 177,8\*12,5. Ακολουθούν αναλύσεις λυγισμού και μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας για τις δύο περιπτώσεις διακριτοποίησης του φορέα όπως τις περιγράψαμε παραπάνω.

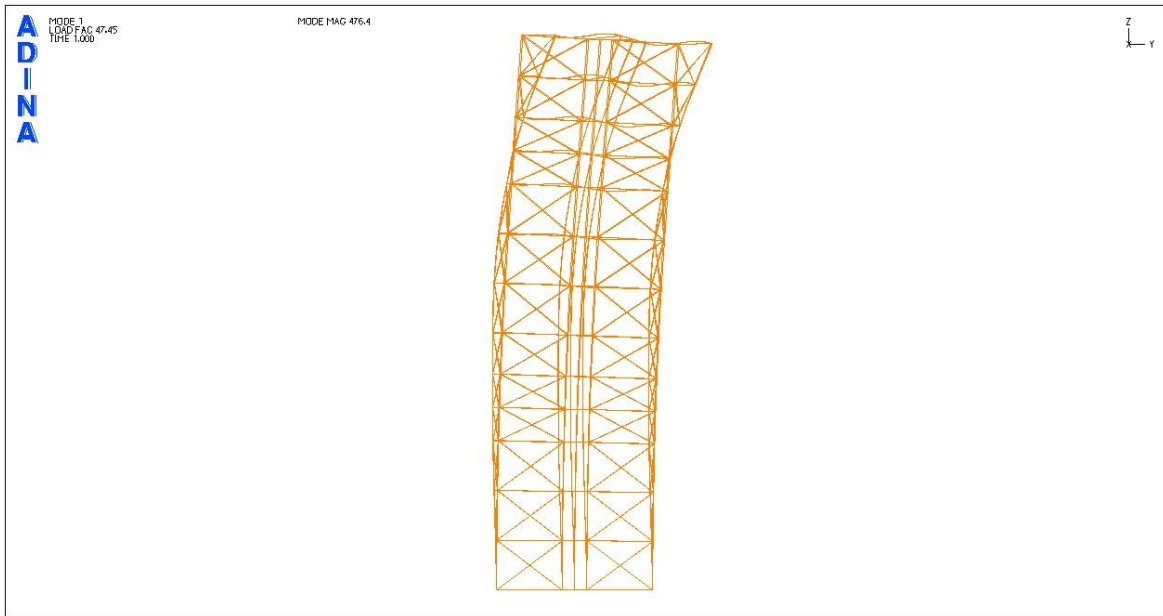
#### 3.3.2.1 Χωρίς ενδιάμεσο κόμβο στους χιαστί συνδέσμους

##### Ιδιομορφές λυγισμού

Φορτικός συντελεστής πρώτης ιδιομορφής: 47.45

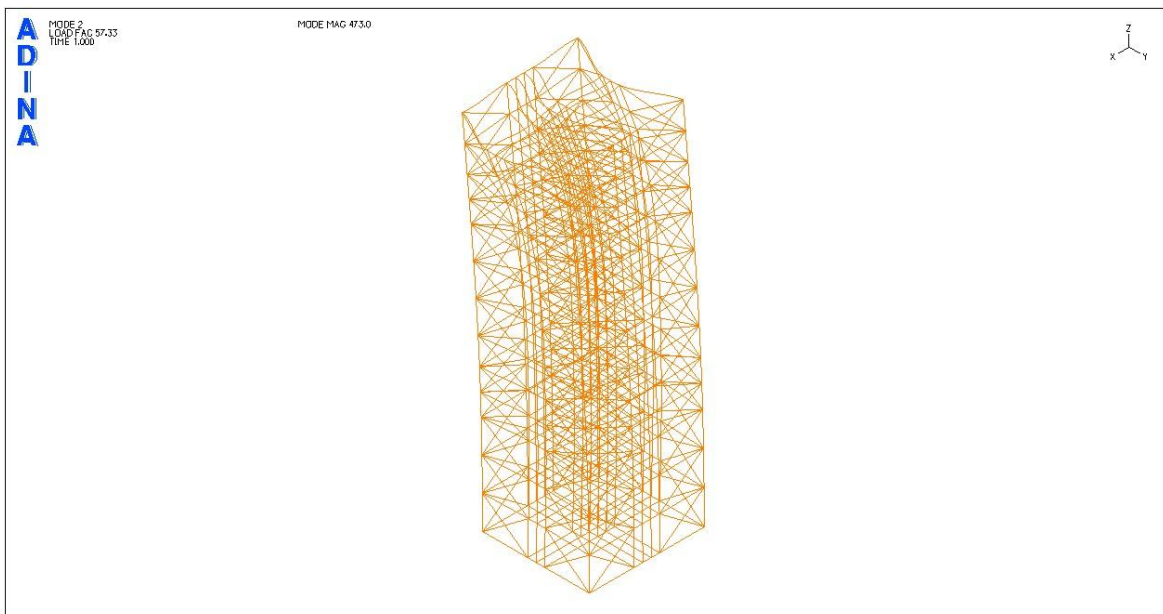


Σχήμα 3.40: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

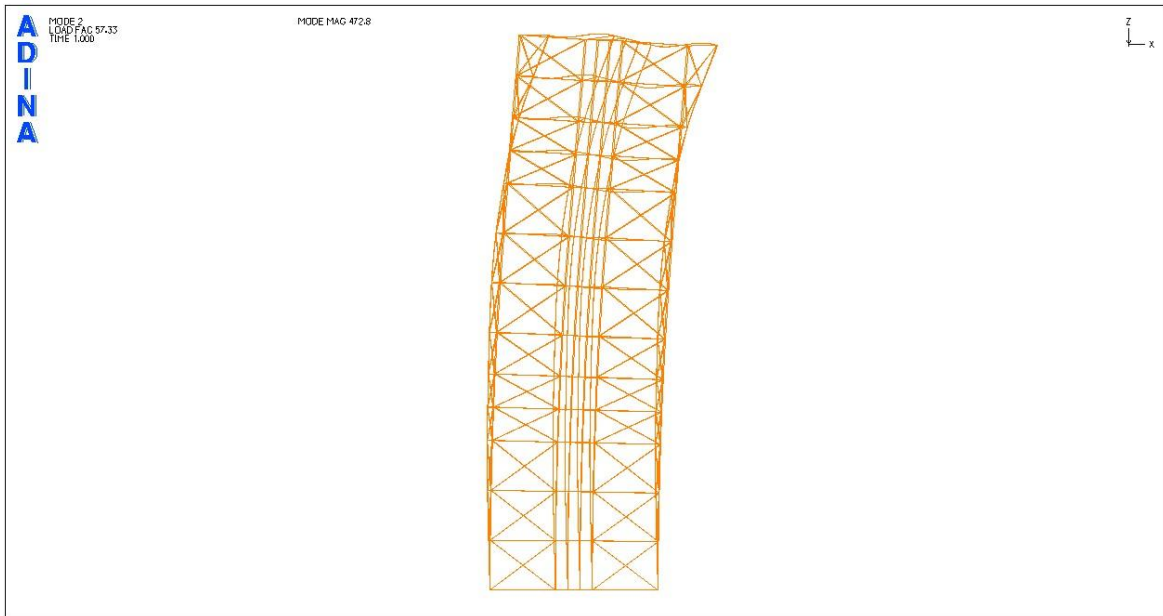


Σχήμα 3.41: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη y- z)

Φορτικός συντελεστής δεύτερης ιδιομορφής: 57.33



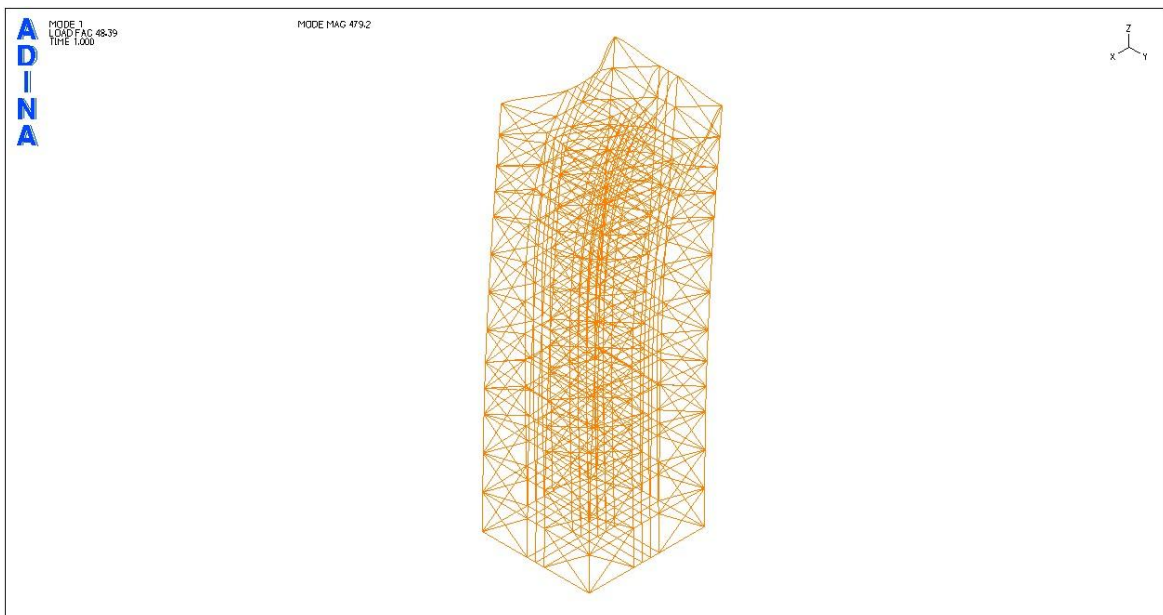
Σχήμα 3.42: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

Σχήμα 3.43: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη x- z)

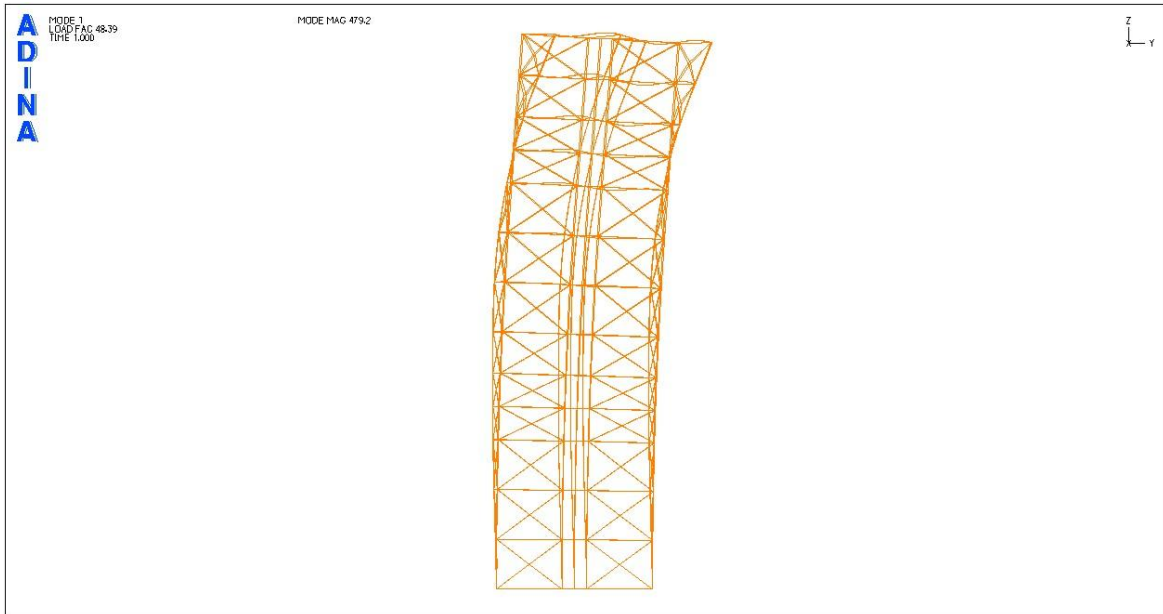
### 3.3.2.2 Με ενδιάμεσο κόμβο στους χιαστί συνδέσμους

#### Ιδιομορφές λυγισμού

Φορτικός συντελεστής πρώτης ιδιομορφής: 48,39

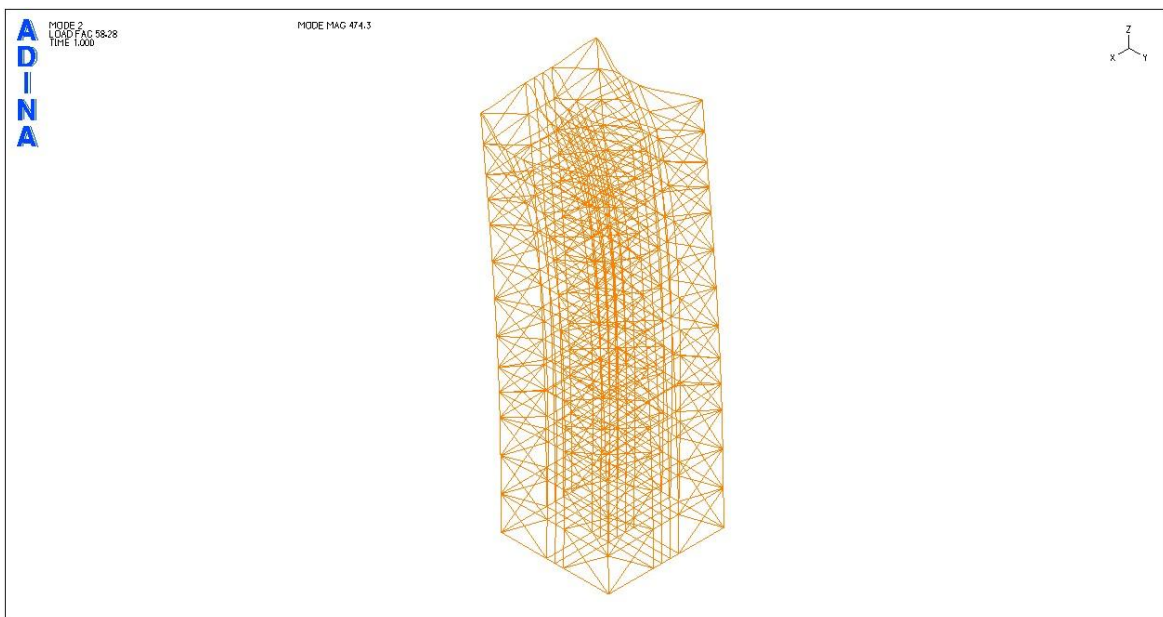
Σχήμα 3.45: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)





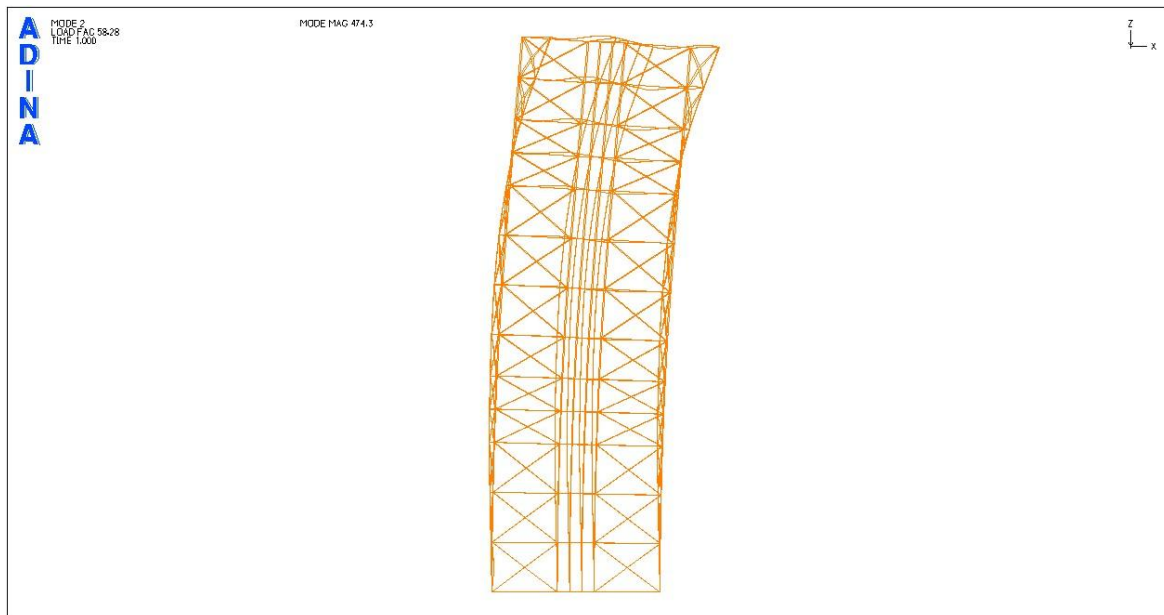
Σχήμα 3.44: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη y- z)

Φορτικός συντελεστής δεύτερης ιδιομορφής: 58,28



Σχήμα 3.46: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 3.47: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη x- z)

Παρατηρούμε ότι ο πύργος λυγίζει πανομοιότυπα στις δύο περιπτώσεις, δηλαδή πριν και μετά την εισαγωγή ενδιάμεσου κόμβου στους συνδέσμους. Οι τιμές του φορτικού συντελεστή στην περίπτωση όπου δεν έχουμε ενδιάμεσο κόμβο στους συνδέσμους είναι οι εξής:

- 47,45 για την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή
- 57,33 για την 2<sup>η</sup> ιδιομορφή

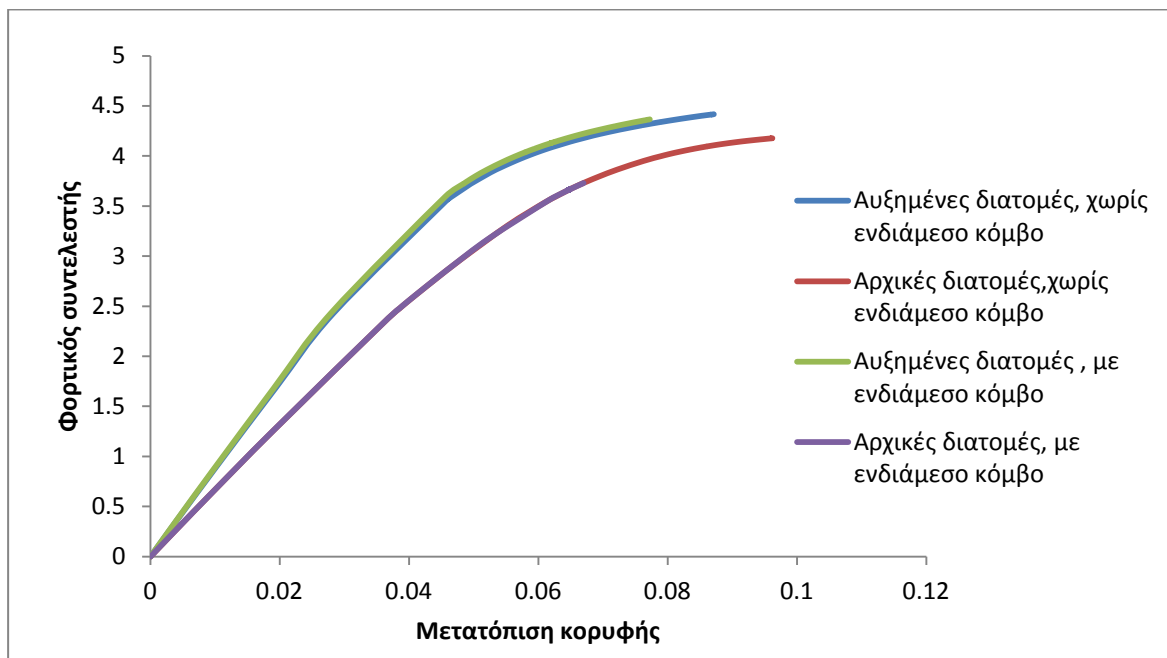
ενώ για την περίπτωση με ενδιάμεσο κόμβο έχουμε αντίστοιχα:

- 48,39 για την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή
- 58,28 για την 2<sup>η</sup> ιδιομορφή

Βλέπουμε δηλαδή ότι η τιμή του φορτικού συντελεστή και στις δύο ιδιομορφές για τις δύο περιπτώσεις παραμένει σχεδόν ίδιος, με μία μικρή αύξηση να παρατηρείται στις αναλύσεις λυγισμού με την πυκνότερη διακριτοποίηση. Παρατηρούμε δηλαδή ότι η αύξηση στο εμβαδό των διατομών έφερε τα προσδοκώμενα αποτελέσματα αφού η αλλαγή στη διακριτοποίηση των συνδέσμων που επιτρέπει την εκδήλωση λυγισμού σε αυτούς δεν επιφέρει καμία ουσιαστική μεταβολή όσον αφορά το σχήμα των ιδιομορφών και το μέγεθος του φορτικού συντελεστή για λυγισμό.

### 3.3.3 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού, χωρίς ατέλεια

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας του επιβαλλόμενου φορτικού συντελεστή συναρτήσει της αναπτυσσόμενης μετατόπισης κορυφής. Η μορφή των δρόμων ισορροπίας μας δείχνει ότι σε όλες τις περιπτώσεις ο φορτικός συντελεστής μεγαλώνει για κάθε βήμα και παίρνει τιμές κοντά στο 4. Αρχικά η κατασκευή μας συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά και οι μετατοπίσεις αυξάνονται αναλογικά με την αύξηση του φορτικού συντελεστή και κατ' επέκταση με την αύξηση του φορτίου και στη συνέχεια εμφανίζεται ένας μη γραμμικός κλάδος στον οποίο οι μετατοπίσεις αυξάνουν δυσανάλογα σε σχέση με το φορτίο.



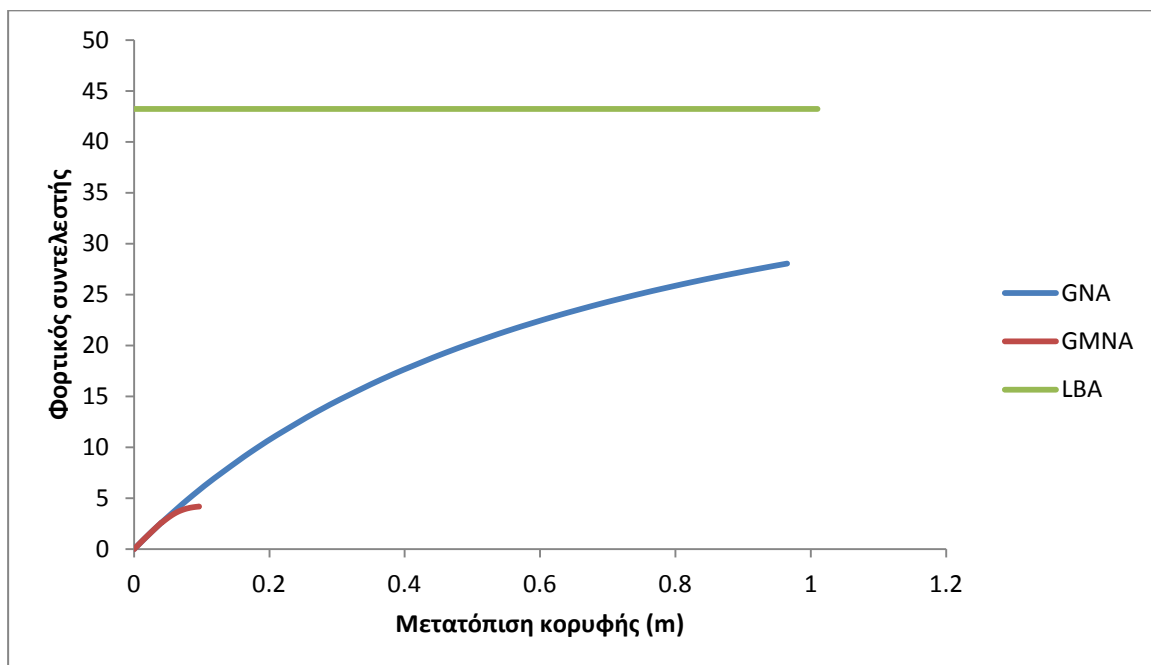
Σχήμα 3.48: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής, για την περίπτωση με εξωτερικούς συνδέσμους Χ, πριν και μετά την αύξηση των διατομών των συνδέσμων

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τους παραπάνω δρόμους ισορροπίας, όπως ήταν αναμενόμενο είναι όμοια με αυτά των προηγούμενων περιπτώσεων που εξετάσαμε. Αύξηση στο εμβαδό της διατομής των συνδέσμων κάνει την κατασκευή πιο δύσκαμπτη αφού αυτή αστοχεί για μικρότερες μετατοπίσεις ενώ παρατηρούμε και ότι η δυσκαμψία της κατασκευής αυξάνει όταν χρησιμοποιούνται χιαστί σύνδεσμοι αντί των συνδέσμων τύπου Λ.

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι οι χιαστί σύνδεσμοι μας δίνουν ελάχιστα μεγαλύτερο φορτικό συντελεστή σε σχέση με τους συνδέσμους τύπου Λ με αύξηση της τάξεως του 5% περίπου όταν

χρησιμοποιήθηκαν οι αυξημένες διατομές ενώ για την περίπτωση χρησιμοποίησης των αρχικών διατομών CHS 88,9\*7,1 στους συνδέσμους παρουσιάστηκε πτώση της τάξης του 9% σε σχέση με το φορέα με τους συνδέσμους Λ, εξετάζοντας βέβαια τους φορείς με πυκνότερη διακριτοποίηση των συνδέσμων. Αυτό οφείλεται πιθανότατα στην αύξηση του μήκους των θλιβομένων μελών κάτι που αυξάνει τη λυγηρότητα τους και κατ' επέκταση επιφέρει μία μείωση στη συνολική αντοχή του φορέα, κάτι που καταδεικνύουν οι παραπάνω αναλύσεις.

Στο σχήμα 3.49 παρουσιάζεται συγκριτικά σε ενιαίο διάγραμμα οι δρόμοι ισορροπίας που έχουν προκύψει στο ADINA για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας (GNA) και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού.



Σχήμα 3.49: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής για χιαστί συνδέσμους με αρχικές διατομές

Στις επόμενες αναλύσεις θα εξετάσουμε κατά πόσο μεταβάλλεται η συμπεριφορά του φορέα από την μη ύπαρξη συνδέσμων δυσκαμψίας αλλά και από την αλλαγή της ποιότητας του χάλυβα από S235 σε S355. Γι' αυτό θα αφαιρέσουμε όλους τους συνδέσμους και θα επαναλάβουμε τις ίδιες αναλύσεις.

### 3.4 Περίπτωση 4<sup>η</sup>: Πύργος χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας

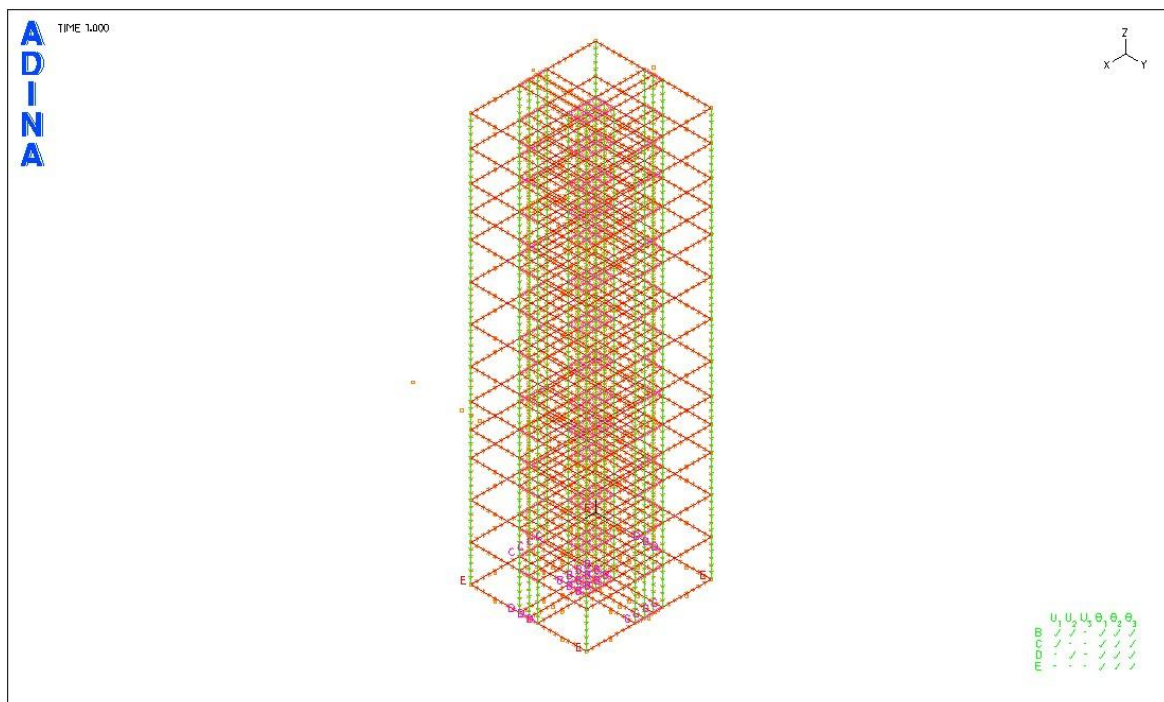
Στην 4<sup>η</sup> Περίπτωση έχουν αφαιρεθεί από τον φορέα μας όλοι οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας. Ακολουθούν το προοπτικό σχέδιο και η όψη y-z της υπό μελέτη περίπτωσης.

Οι διατομές που θα χρησιμοποιηθούν για τα μέλη του φορέα φαίνονται στον πίνακα 3.4:

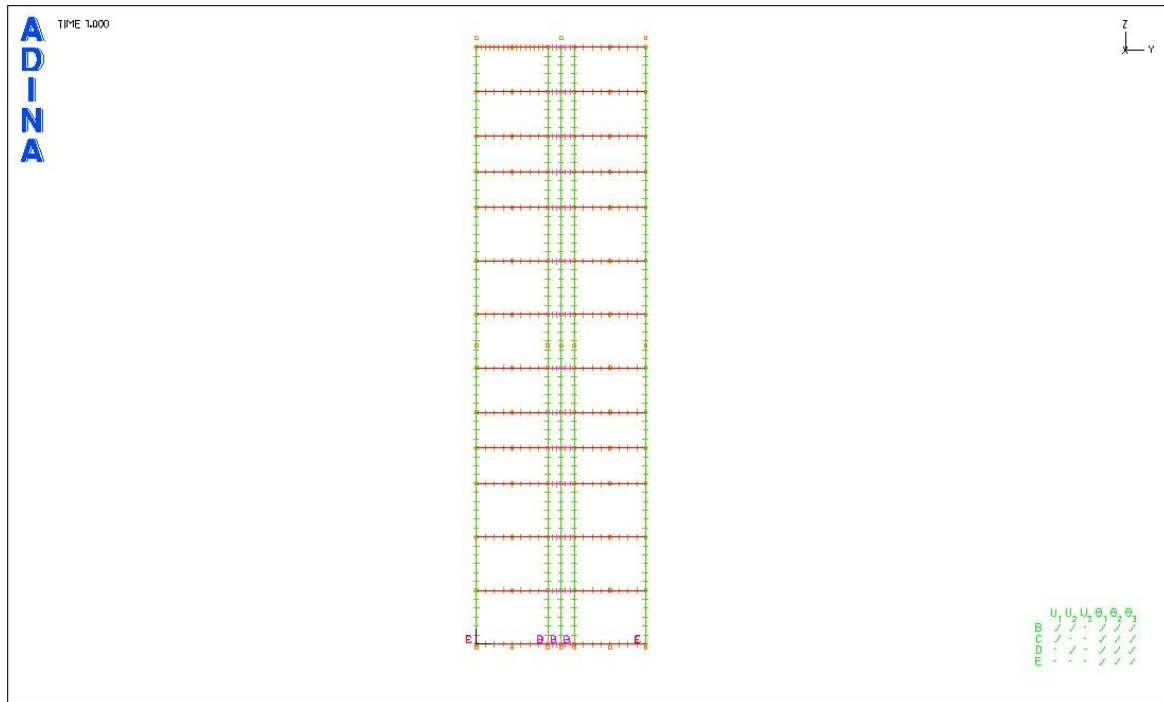
	CHS	D	t	A	I
		Mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>
Υποστυλώματα	273x16	273	16	129	10710
Δοκοί	168.3x8	168,3	8	40,29	1297

Πίνακας 3.4: Διατομές CHS

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε αναλύσεις λυγισμού και μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού με τις διατομές που παρουσιάσαμε παραπάνω. Αρχικά οι αναλύσεις μας θα πραγματοποιηθούν με υλικό κατασκευής χάλυβα S235 και στη συνέχεια με χάλυβα S355. Ενδιαφέρον θα έχει να δούμε κατά πόσο επηρεάζεται η φέρουσα ικανότητα της κατασκευής μας από την απουσία συνδέσμων αλλά και από την αλλαγή της ποιότητας του χάλυβα.



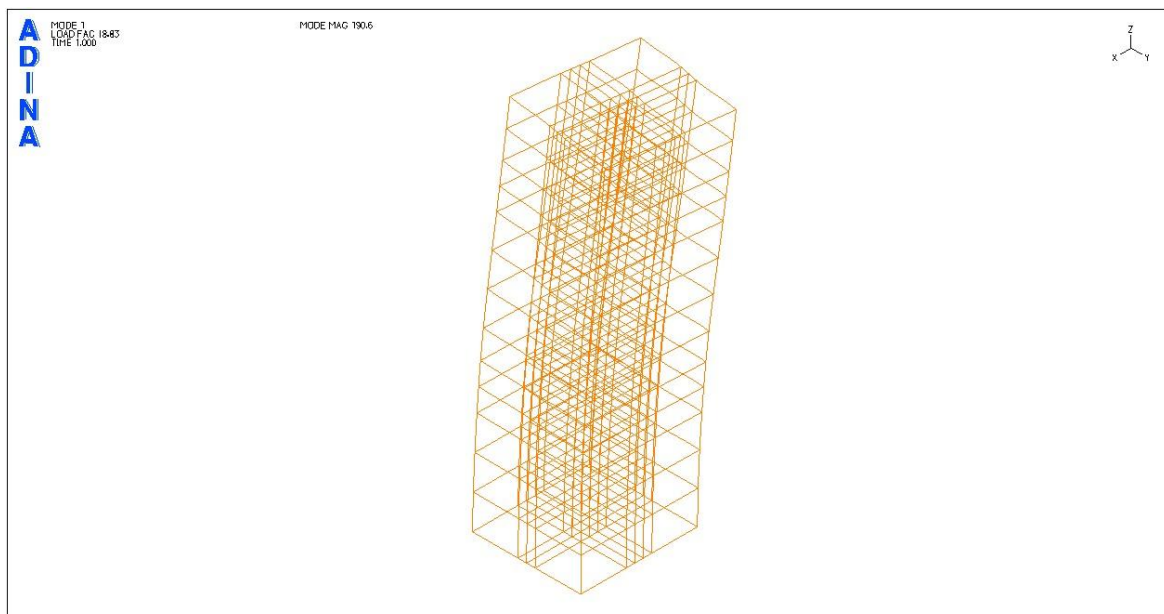
Σχήμα 3.50: Προοπτικό σχέδιο 3<sup>ης</sup> περίπτωσης



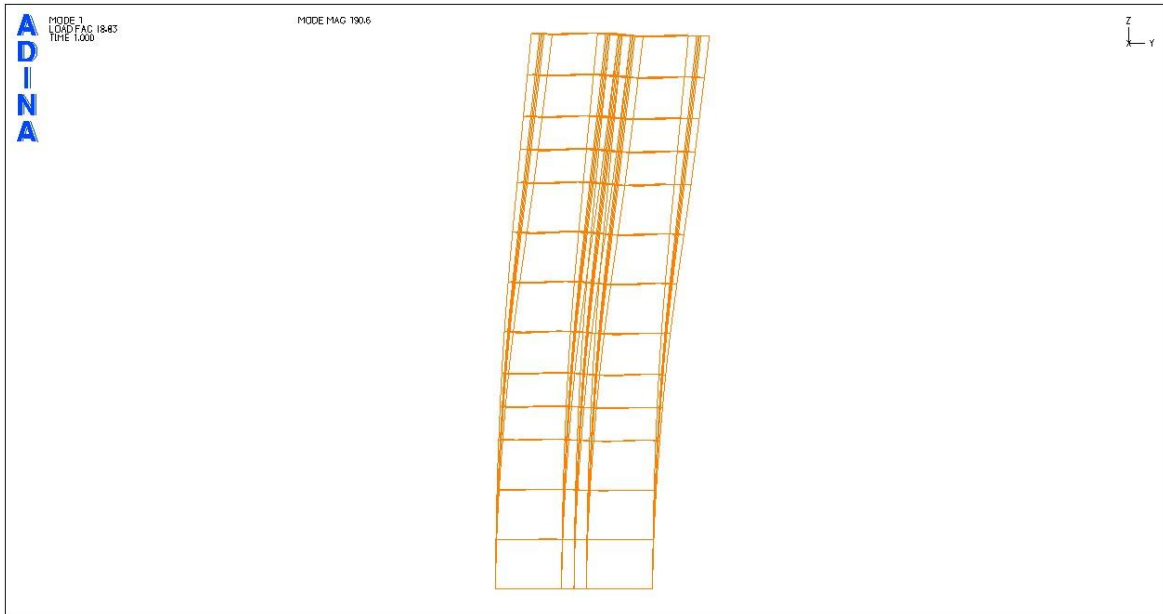
Σχήμα 3.51: Όψη y-z, 3<sup>ης</sup> περίπτωσης

### Ιδιομορφές λυγισμού

Φορτικός συντελεστής 1<sup>ης</sup> ιδιομορφής: 18,83

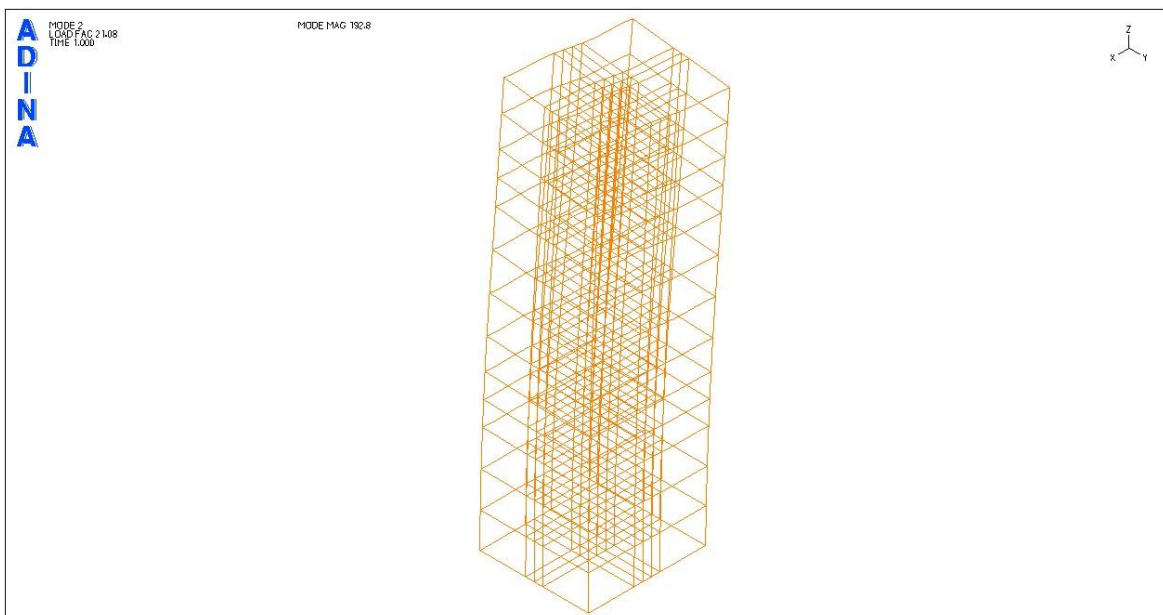


Σχήμα 3.52: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

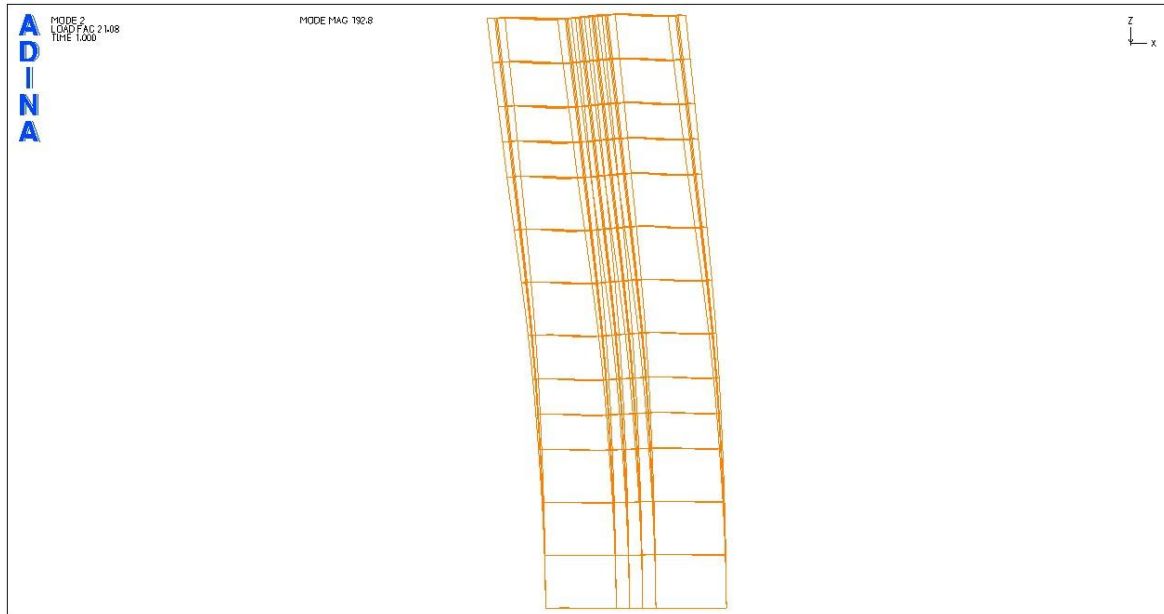


Σχήμα 3.53: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη y- z)

Φορτικός συντελεστής 2<sup>ης</sup> ιδιομορφής: 21,08



Σχήμα 3.54: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 3.55: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη x- z)

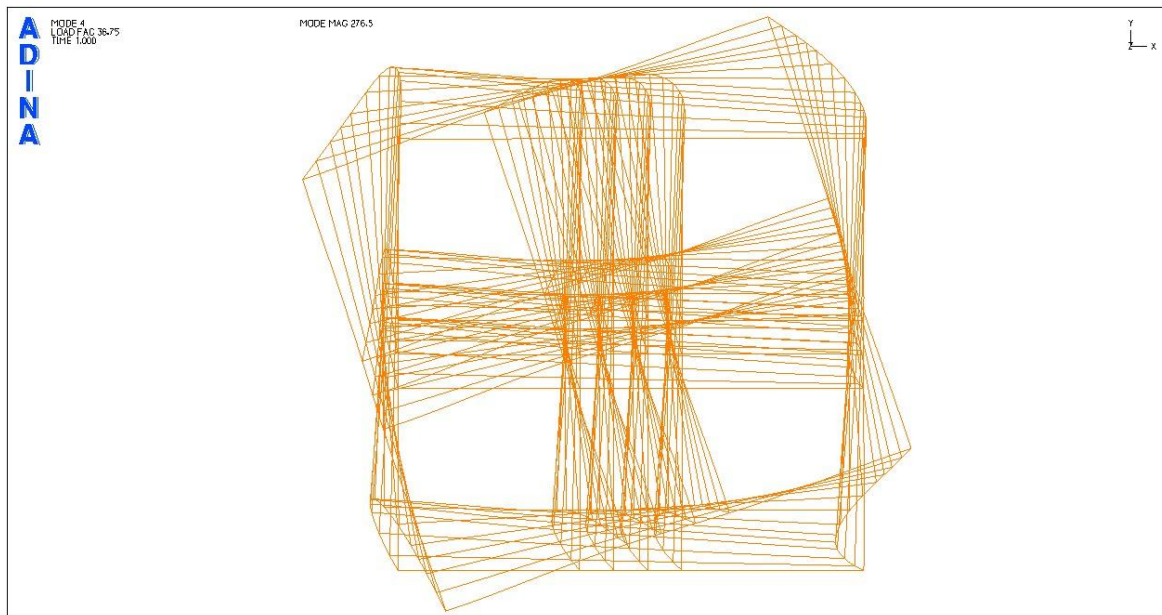
Φορτικός συντελεστής 3<sup>ης</sup> ιδιομορφής: 31,24



Σχήμα 3.56: 3<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού , κάτοψη



Φορτικός συντελεστής 4<sup>ης</sup> ιδιομορφής: 36,75



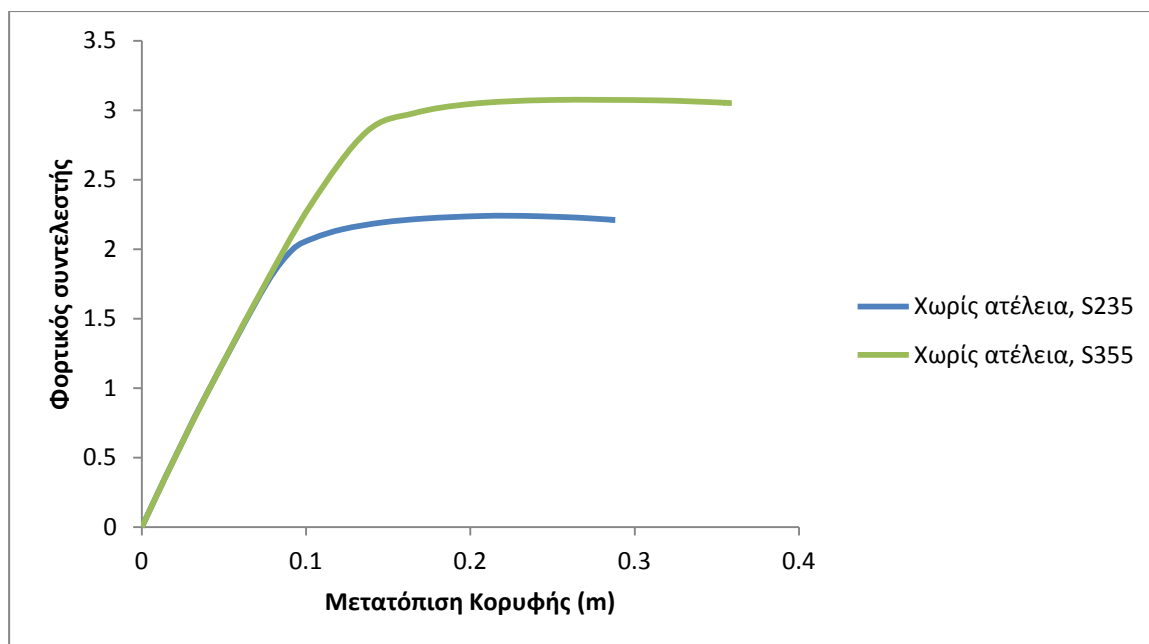
Σχήμα 3.57: 4<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού , κάτοψη

Παρατηρούμε ότι οι δύο πρώτες ιδιομορφές έχουν παραπλήσια κρίσιμα φορτία λυγισμού αφού για την πρώτη ιδιομορφή ο πολλαπλασιαστής επί των στατικών φορτίων είναι 18,83 ενώ για την δεύτερη 21,08. Ο φορτικός συντελεστής έχει υποδιπλασιαστεί σε σχέση με την περίπτωση όπου είχαμε εξωτερικούς μόνο συνδέσμους, είτε αυτοί ήταν τύπου Λ είτε αυτοί ήταν τύπου χιαστί. Ωστόσο η τιμή του παραμένει υψηλή ώστε να θεωρήσουμε ότι η κατασκευή μας δεν θεωρείται ευπαθής στα φαινόμενα 2<sup>ας</sup> τάξεως.

### 3.4.1 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, χωρίς ατέλεια

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε τις μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας, χωρίς ατέλεια που πραγματοποιήσαμε για χάλυβα S235 και για χάλυβα S355. Στο σχήμα 3.55 έχουμε τους δρόμους ισορροπίας του επιβαλλόμενου φορτικού συντελεστή συναρτήσει της μετατόπισης κορυφής.



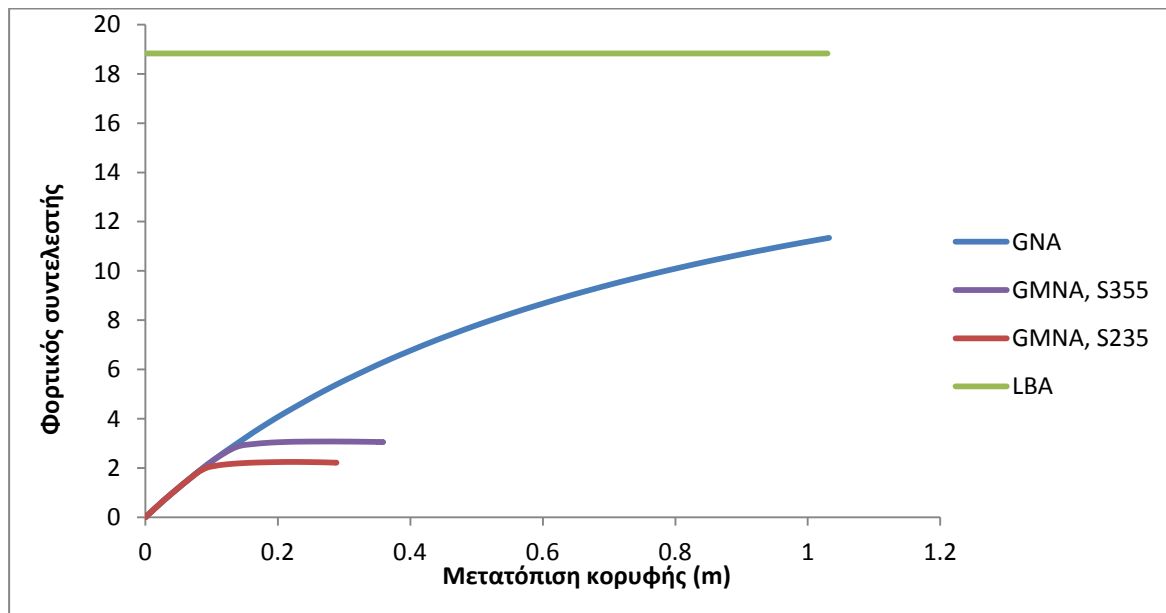


Σχήμα 3.58: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής, χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας, για διαφορετική ποιότητα υλικού

Η μορφή των δρόμων ισορροπίας μας δείχνει ότι σε όλες τις περιπτώσεις ο φορτικός συντελεστής μεγαλώνει για κάθε βήμα και φτάνει μέχρι την τιμή 2 περίπου για χάλυβα S235, ενώ για χάλυβα S355 φτάνει περίπου την τιμή 3,2. Μπορούμε να πούμε ότι τα διαγράμματα είναι διγραμμικά. Αρχικά βλέπουμε υπάρχει μία γραμμική περιοχή, όπου η κατασκευή μας συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά και οι μετατοπίσεις αυξάνονται αναλογικά με την αύξηση του φορτικού συντελεστή και κατ' επέκταση με την αύξηση του φορτίου ενώ στο δεύτερο κλάδο οι μετατοπίσεις αυξάνονται χωρίς περαιτέρω αύξηση του φορτίου. Η εικόνα του δρόμου ισορροπίας δείχνει ότι η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στο φορέα δεν επιφέρει μείωση στη φέρουσα ικανότητα αυτού μέχρι κάποια μετατόπιση και ότι η επιβολή του οριακού φορτίου στην κατασκευή δεν θα επιφέρει άμεση κατάρρευση αυτής.

Παρατηρούμε ότι η φέρουσα ικανότητα της κατασκευής έχει μειωθεί σημαντικά λόγω της απουσίας των συνδέσμων δυσκαμψίας και συνοδεύεται από μεγάλη αύξηση των μετατοπίσεων. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήσαμε την ίδια ανάλυση για χάλυβα S355. Όπως αναφέραμε και παραπάνω ο φορτικός συντελεστής έφτασε περίπου την τιμή 3,2, είχαμε δηλαδή αύξηση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής ανάλογη με την αύξηση στην ποιότητα του υλικού. Γενικά, για χάλυβα υψηλής ποιότητας φαίνεται ο φορέας μας να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στα φορτία σχεδιασμού της κατασκευής.

Στο σχήμα 3.59 παρουσιάζεται συγκριτικά σε ενιαίο διάγραμμα οι δρόμοι ισορροπίας που έχουν προκύψει στο ADINA για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας (GNA) και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού.



Σχήμα 3.59: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής, χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας

Στις επόμενες αναλύσεις θα εξετάσουμε κατά πόσο μεταβάλλεται η συμπεριφορά του φορέα αν μειώσουμε τον αριθμό των ορόφων διατηρώντας σταθερό το συνολικό ύψος της κατασκευής.

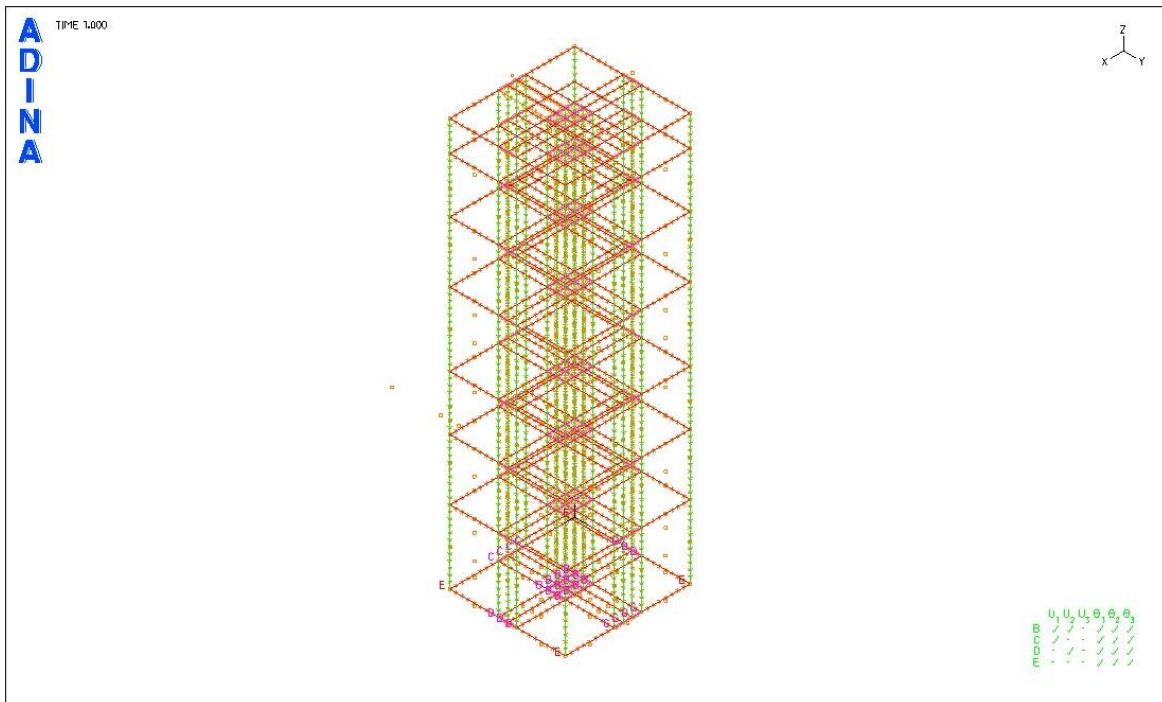
### 3.5 Περίπτωση 5<sup>η</sup>: Πύργος με λιγότερους ορόφους χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας

Στην 5<sup>η</sup> Περίπτωση ο φορέας μας αποτελείται συνολικά από επτά ορόφους, αντί για δεκατρείς που είχε στις προηγούμενες τέσσερις περιπτώσεις που εξετάσαμε, και έχει συνολικό ύψος 16,75 μέτρα. Επιπλέον, όπως στην 4<sup>η</sup> Περίπτωση, απουσιάζουν οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας. Οι διατομές που θα χρησιμοποιηθούν για τα μέλη του φορέα είναι ίδιες με τις προηγούμενες περιπτώσεις και παρουσιάζονται στον πίνακα 3.5.

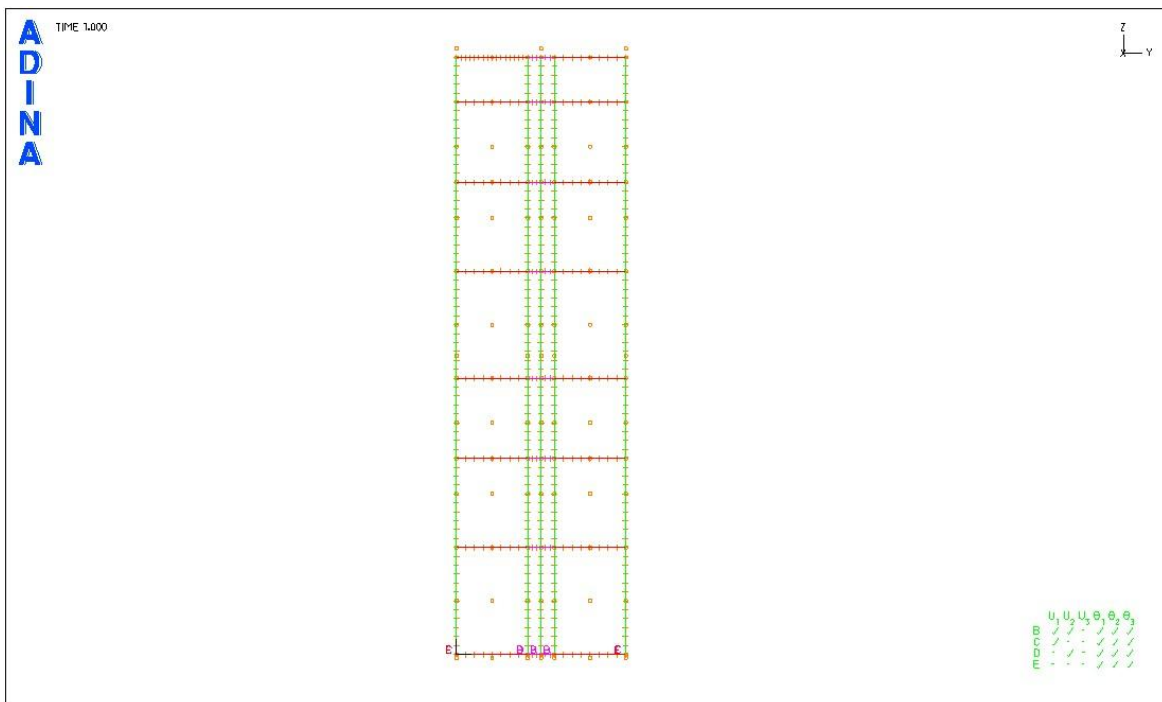
	CHS	d	t	A	I
		mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>
Υποστυλώματα	273x16	273	16	129	10710
Δοκοί	168.3x8	168,3	8	40,29	1297

Πίνακας 3.5: Διατομές CHS

Ακολουθούν το προοπτικό σχέδιο και η όψη y-z της υπό μελέτη περίπτωσης.



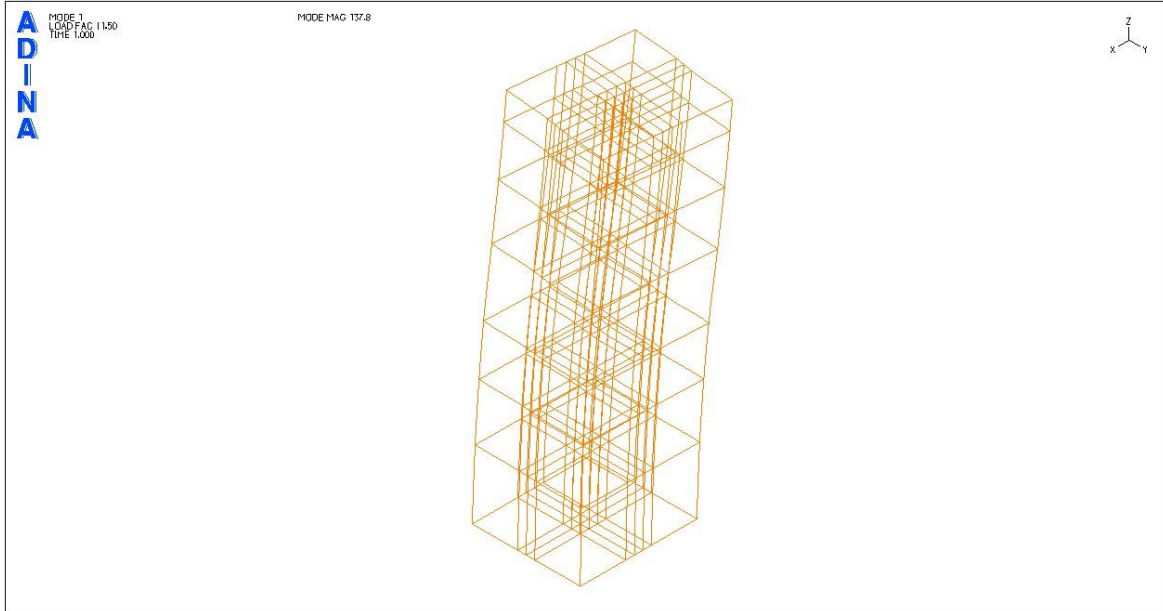
Σχήμα 3.60: Προοπτικό σχέδιο 5<sup>ης</sup> περίπτωσης



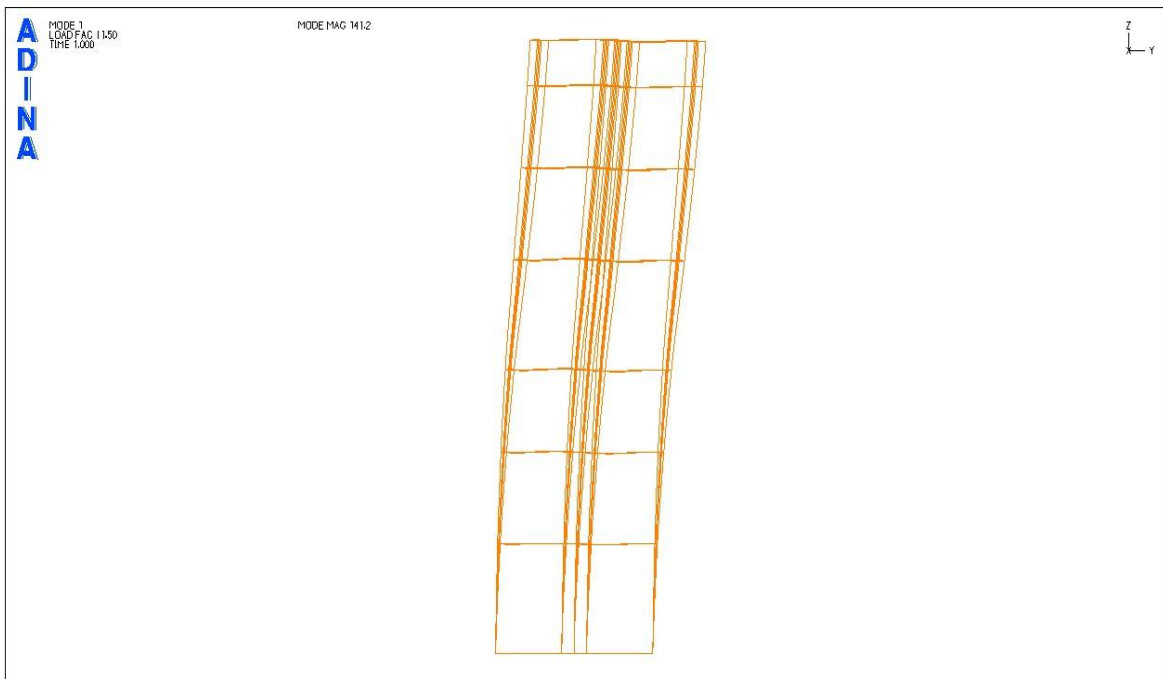
Σχήμα 3.61: Όψη y-z, 5<sup>ης</sup> περίπτωσης

## Ιδιομορφές λυγισμού

Φορτικός συντελεστής πρώτης ιδιομορφής: 11.5

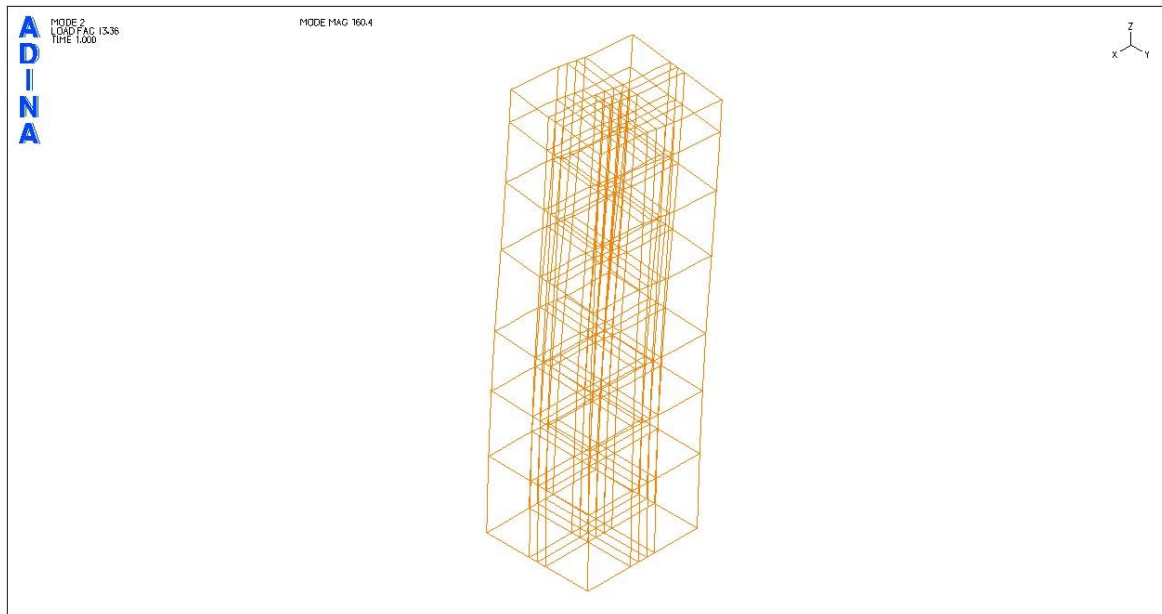


Σχήμα 3.62: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

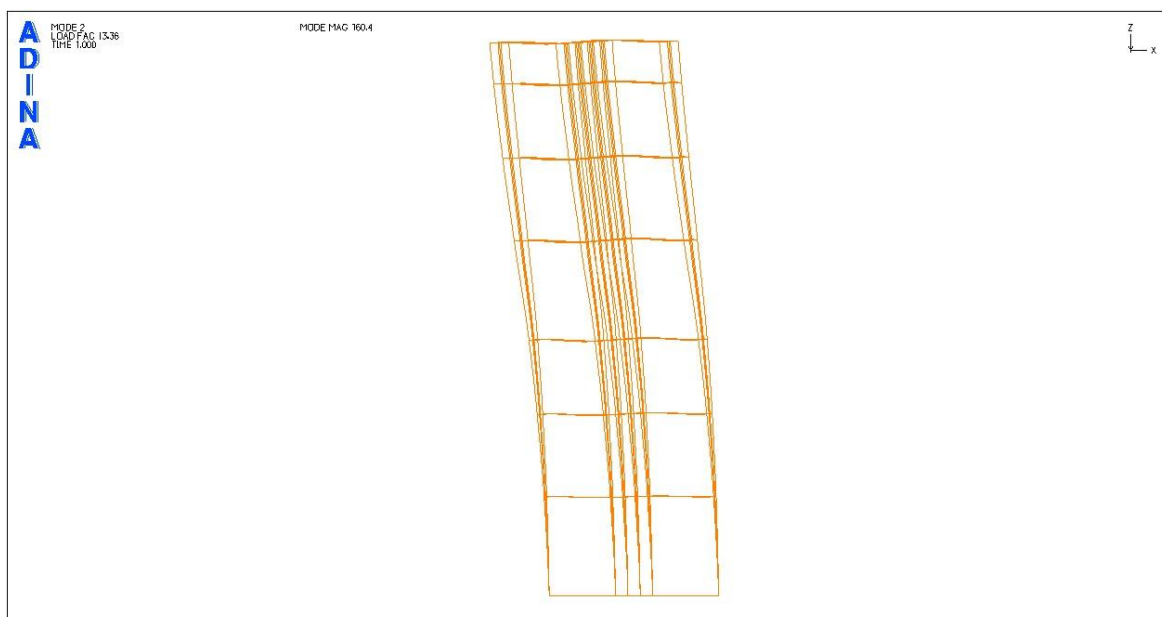


Σχήμα 3.63: 1<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη y- z)

Φορτικός συντελεστής δεύτερης ιδιομορφής: 13.36



Σχήμα 3.64: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 3.65: 2<sup>η</sup> ιδιομορφή λυγισμού (όψη x- z)

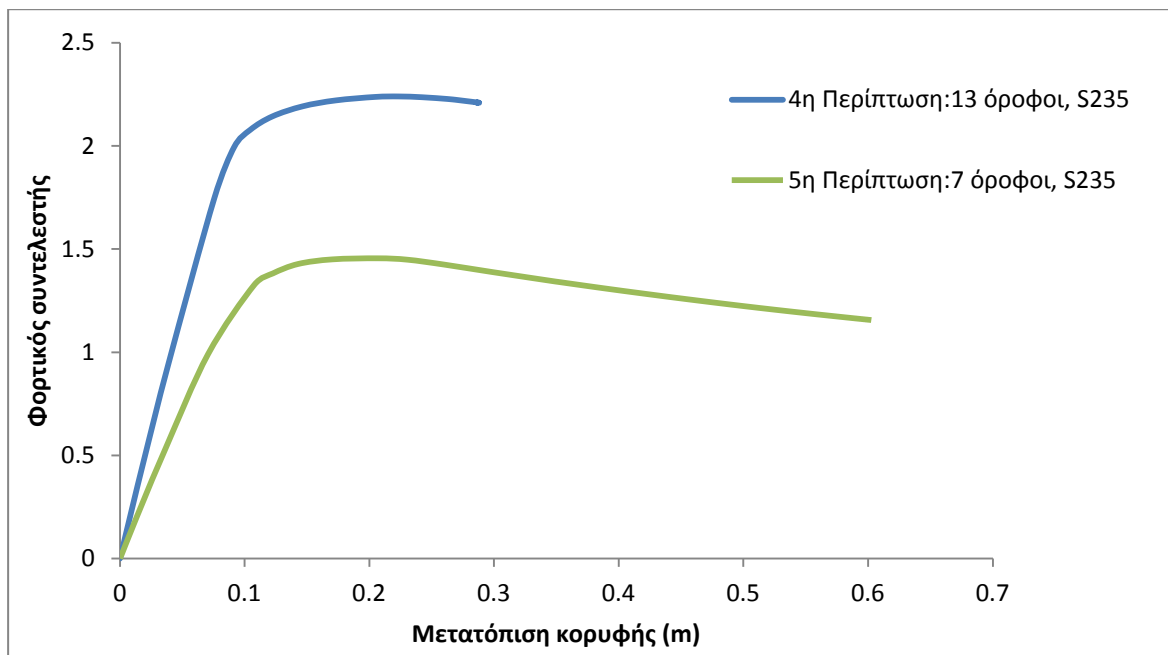
Παρατηρούμε ότι για τις δύο πρώτες ιδιομορφές, οι ιδιοτιμές του φορτίου λυγισμού είναι:

- 11,50 για την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή
- 13,36 για την 2<sup>η</sup> ιδιομορφή

Ο φορτικός συντελεστής έχει μειωθεί σημαντικά σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις που εξετάσαμε ωστόσο η τιμή αυτή παραμένει ικανοποιητική για αντοχή σε λυγισμό.

### 3.5.1 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, χωρίς ατέλεια

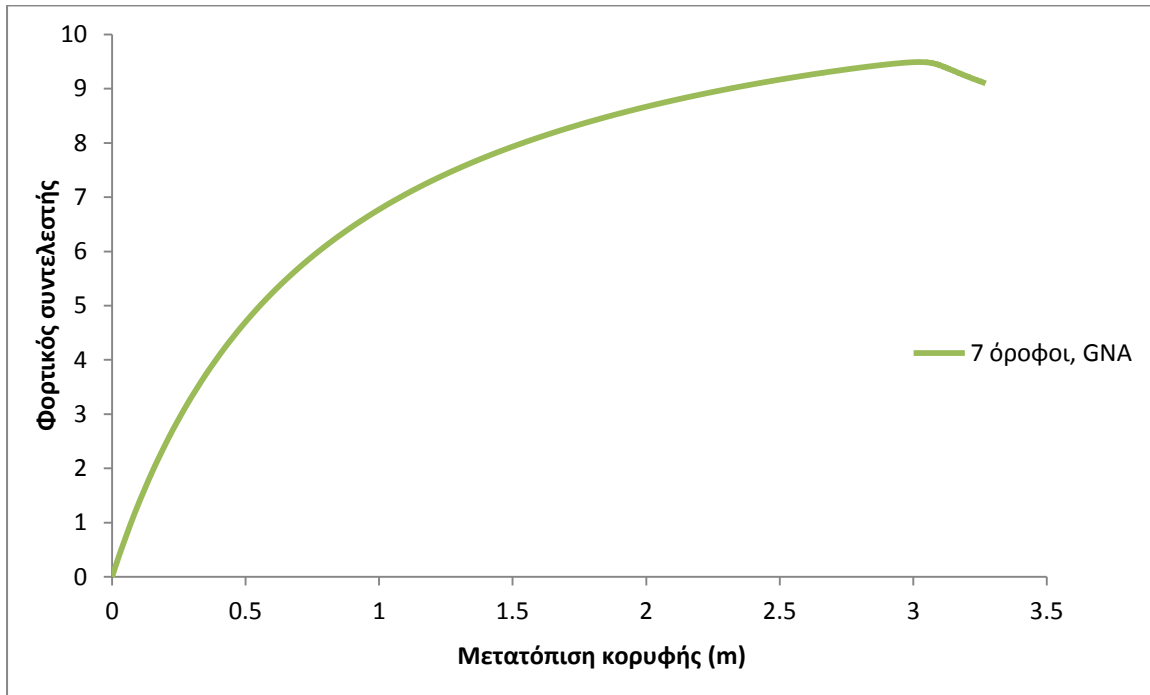
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, χωρίς ατέλεια που πραγματοποιήσαμε για χάλυβα S355 και θα τη συγκρίνουμε με την αντίστοιχη ανάλυση της 4<sup>ης</sup> περίπτωσης, δηλαδή όταν ο φορέας μας αποτελούταν από δεκατρείς ορόφους, χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας και το υλικό ήταν χάλυβας S355. Στο σχήμα 3.62 έχουμε τους δρόμους ισορροπίας του επιβαλλόμενου φορτικού συντελεστή συναρτήσει της μετατόπισης κορυφής για τους δύο φορείς που περιγράψαμε προηγουμένως.



Σχήμα 3.66: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής- Σύγκριση μεταξύ των περιπτώσεων πριν και μετά την αφαίρεση οριζοντίων μελών (δοκών) από 6 στάθμες

Ο φορέας έχει σημαντικά μικρότερη αντοχή σε σχέση με αυτόν με τους επιπλέον ορόφους ενώ στο δρόμο ισορροπίας εμφανίζεται και ένας καθοδικός κλάδος ο οποίος συνεχίζει για μετατοπίσεις μέχρι 1 μέτρο ενώ ο φορτικός συντελεστής στην κατάρρευση είναι 1,5.

Στην προσπάθειά μας να ερμηνεύσουμε την προέλευση του καθοδικού αυτού κλάδου προχωρήσαμε σε μία μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας μόνο (GNA), την οποία παρουσιάζουμε παρακάτω.



Σχήμα 3.67: Δρόμος ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής, χωρίς συνδέσμους, με λιγότερο πλήθος οριζοντίων μελών, ελαστικό υλικό

Από τη μορφή του παραπάνω δρόμου ισορροπίας καθίσταται σαφές ότι ο καθοδικός κλάδος στο δρόμο ισορροπίας στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού οφείλεται στη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων που μεταφράζεται σε σταδιακή μείωση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής μέχρι την τελική αστοχία.





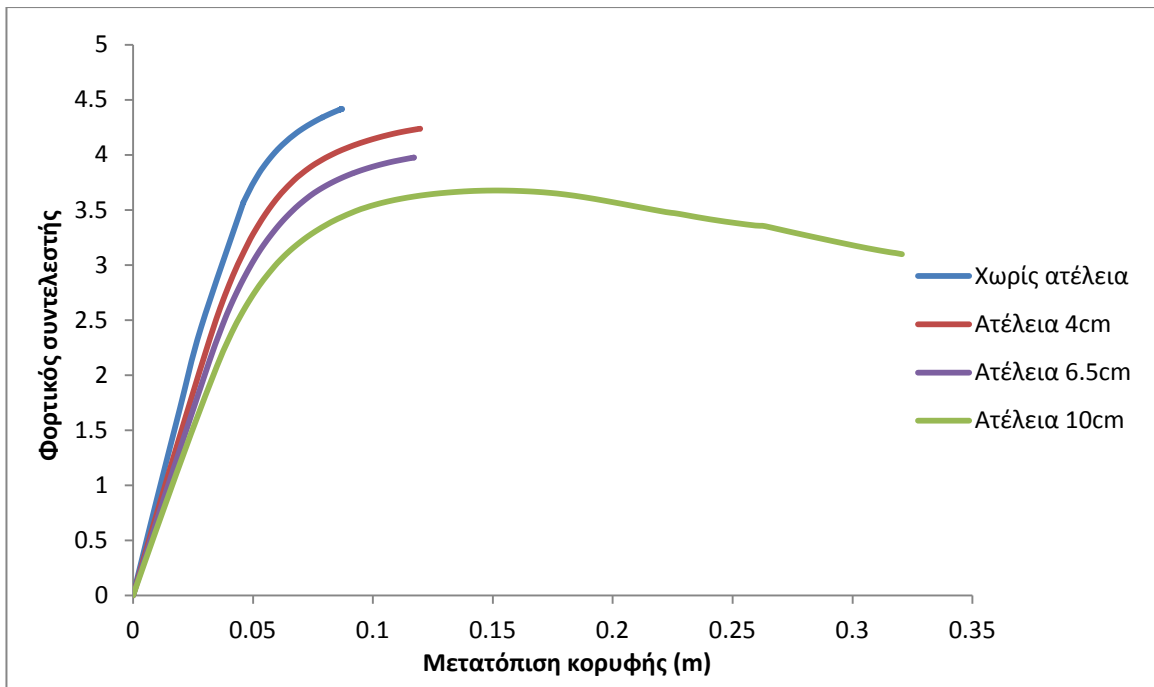
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του φορέα

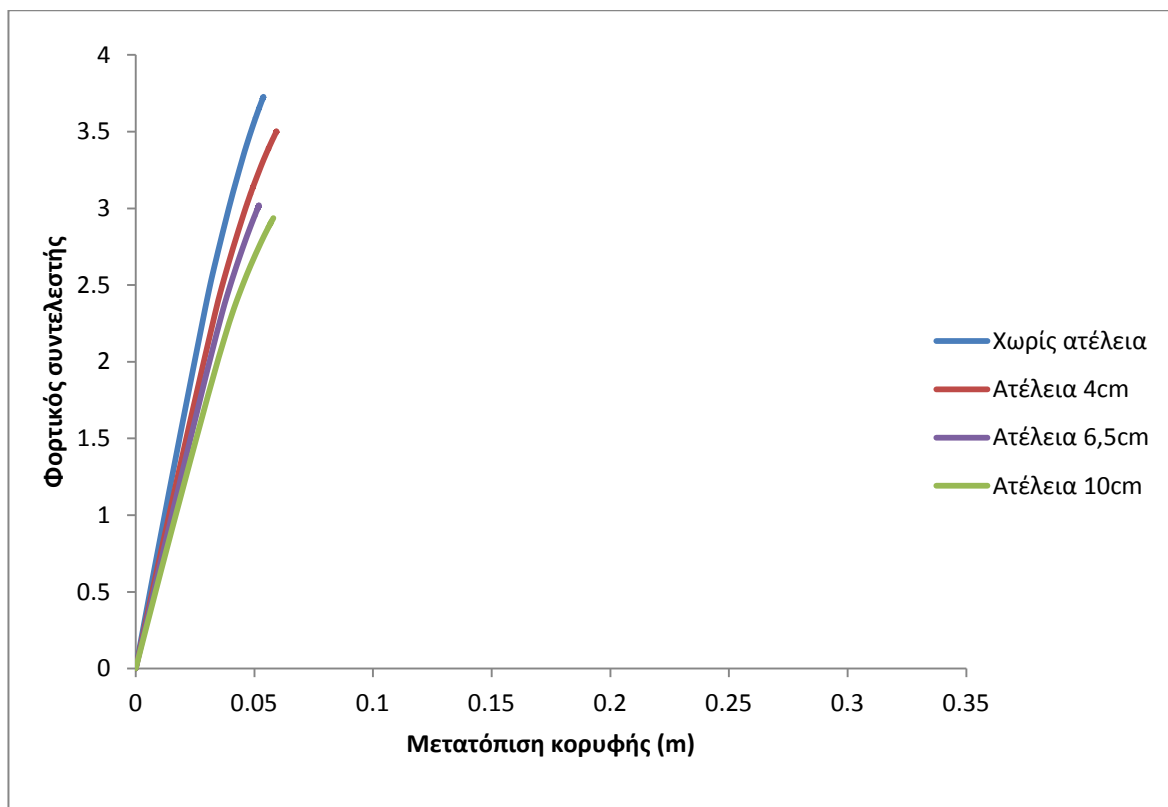
Στο παρόν κεφάλαιο της διπλωματικής μας εργασίας θα διερευνήσουμε τις παραμέτρους που επηρεάζουν την φέρουσα ικανότητα του πύργου μας. Στόχος των αναλύσεων είναι να εξετάσουμε την επίδραση της ποιότητας του υλικού, της μορφής των διατομών, της γεωμετρικής ατέλειας και της δυσκαμψίας στην φέρουσα ικανότητα. Επίσης θα διερευνήσουμε πως επηρεάζεται η φέρουσα ικανότητα του φορέα από παραμέτρους που αφορούν το πρόγραμμα όπως η πυκνότητα στη διακριτοποίηση κάποιων μελών αλλά και ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται για την εύρεση του πραγματικού οριακού φορτίου της κατασκευής.

### 4.1 Η επιρροή της ατέλειας στη συμπεριφορά του φορέα

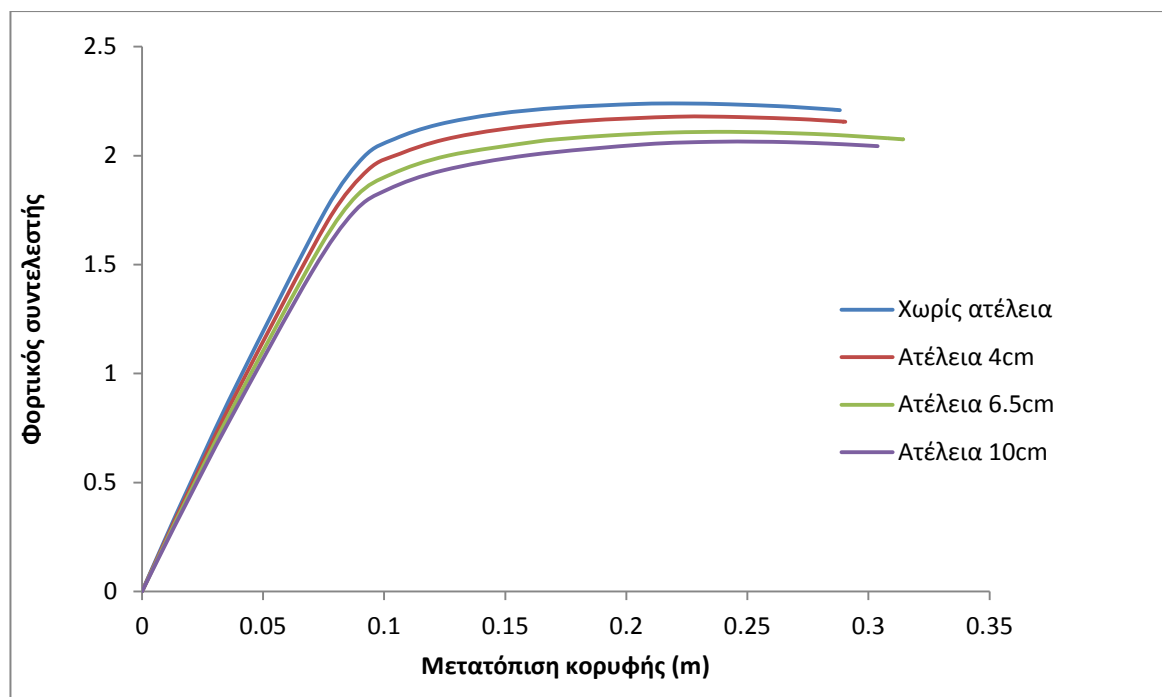
Στην παράγραφο αυτή θα προσπαθήσουμε να μελετήσουμε την επιρροή της ατέλειας στη συμπεριφορά του φορέα και συνεπώς στο δρόμο ισορροπίας που προκύπτει στη μη γραμμική ανάλυση με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Για το λόγο αυτό θα εξετάσουμε 3 διαφορετικές τιμές ατελειών. Αρχικά θα επιβάλλουμε ατέλεια με τη μορφή μετατόπισης κορυφής κατά το σχήμα της πρώτης ιδιομορφής, μεγέθους 6,5 cm, όπως προκύπτει από την παράγραφο 2.6 σύμφωνα με τον κανονισμό. Στη συνέχεια δίνουμε νέες τιμές στο μέγεθος της ατέλειας 4 και 10 cm για να διαπιστώσουμε κατά πόσο αυτή επηρεάζει τη φέρουσα ικανότητα του φορέα και κατ' επέκταση να γίνει μία εκτίμηση για το επίπεδο ασφάλειας της κατασκευής για την κάθε περίπτωση που μελετάμε. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα και αναφέρονται σε αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας για τρεις από τις περιπτώσεις φορέων που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα θα παρουσιάσουμε συγκριτικά διαγράμματα φορτίου - μετατόπισης στους φορείς με χιαστί συνδέσμους, με συνδέσμους τύπου Λ στις εξωτερικές πλευρές και χωρίς καθόλου συνδέσμους για τα μεγέθη της ατέλειας που αναφέραμε.



Σχήμα 4.1: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής, για διάφορες τιμές ατέλειας, με χιαστί συνδέσμους



Σχήμα 4.2: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής, για διάφορες τιμές ατέλειας, με εξωτερικούς συνδέσμους τύπου Λ



Σχήμα 4.3: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής, για διάφορες τιμές ατέλειας, χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας

Τα αποτελέσματα των παραπάνω αναλύσεων δείχνουν ότι η γεωμετρική ατέλεια επηρεάζει με καθοριστικό τρόπο τόσο το φορτίο αστοχίας της κατασκευής όσο και τη δυσκαμψία αυτής. Συγκεκριμένα στον φορέα με τους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας ο τελικός φορτικός συντελεστής μετά την εισαγωγή ατέλειας 10 cm πέφτει από 4,5 σε 3,6, στον φορέα με τους συνδέσμους Λ στις εξωτερικές πλευρές αυτός μειώνεται από 3,75 σε 2,9 ενώ στον φορέα χωρίς συνδέσμους αυτός μειώνεται από 2,2 σε 1,9. Παρατηρούμε δηλαδή ότι οι φορείς με τους συνδέσμους επηρεάζονται περισσότερο από την εισαγωγή ατέλειας σε σχέση με το φορέα που δεν έχει συνδέσμους, λόγω της αυξημένης στάθμης του φορτίου που επιτυγχάνεται στους πιο δύσκαμπτους φορείς. Αυτό ισχύει και σε ότι αφορά την δυσκαμψία αυτών των κατασκευών αφού η μείωση της κλίσης των διαγραμμάτων φορτίου – μετατόπισης (και άρα η μείωση της δυσκαμψίας) αφού εισαγάγουμε την ατέλεια είναι πιο έντονη στους φορείς που έχουν συνδέσμους σε σχέση με το φορέα χωρίς συνδέσμους, σε κάθε περίπτωση βέβαια η επιρροή της ατέλειας θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη στη μελέτη του φορέα. Πιο συγκεκριμένα η δυσκαμψία των κατασκευών φαίνεται να επηρεάζεται περισσότερο από την ατέλεια για αυξημένη στάθμη του φορτίου η οποία επιτυγχάνεται στους πιο δύσκαμπτους φορείς με συνδέσμους.

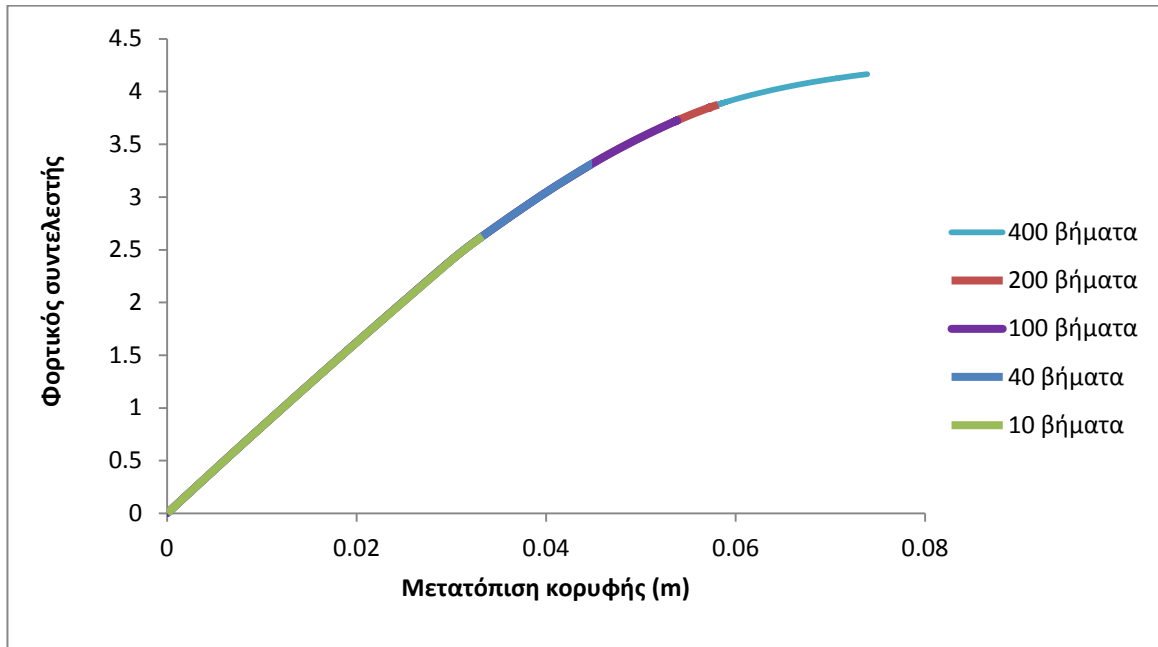
Η σημαντική επιρροή της ατέλειας εξηγείται και από τον τρόπο με τον οποίο την εισαγάγουμε στο φορέα μας. Αυτή υλοποιείται δίνοντας κάποια τιμή ατέλειας σε ένα κόμβο ενώ χρησιμοποιείται και

το σχήμα της κάποιας ιδιομορφής που θα ορίσουμε. Οι πρώτες ιδιομορφές στους φορείς που μελετάμε συνοδεύονται από εκτροπή της κορυφής οπότε η ατέλεια επελέγη να δοθεί σαν οριζόντια μετατόπιση στον κόμβο με τη μέγιστη μετατόπιση κορυφής. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων των αναλύσεων μας δείχνει ότι η περιοχή στην οποία εισαγάγουμε την ατέλεια γίνεται σημαντικά πιο ευπαθής μετά την εισαγωγή αυτής. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι ο τέλειος φορέας αστοχεί με τη δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στη βάση των υποστυλωμάτων του, ενώ στον ατελή αυτές δημιουργούνται σε κόμβους του φορέα κοντά στην κορυφή.

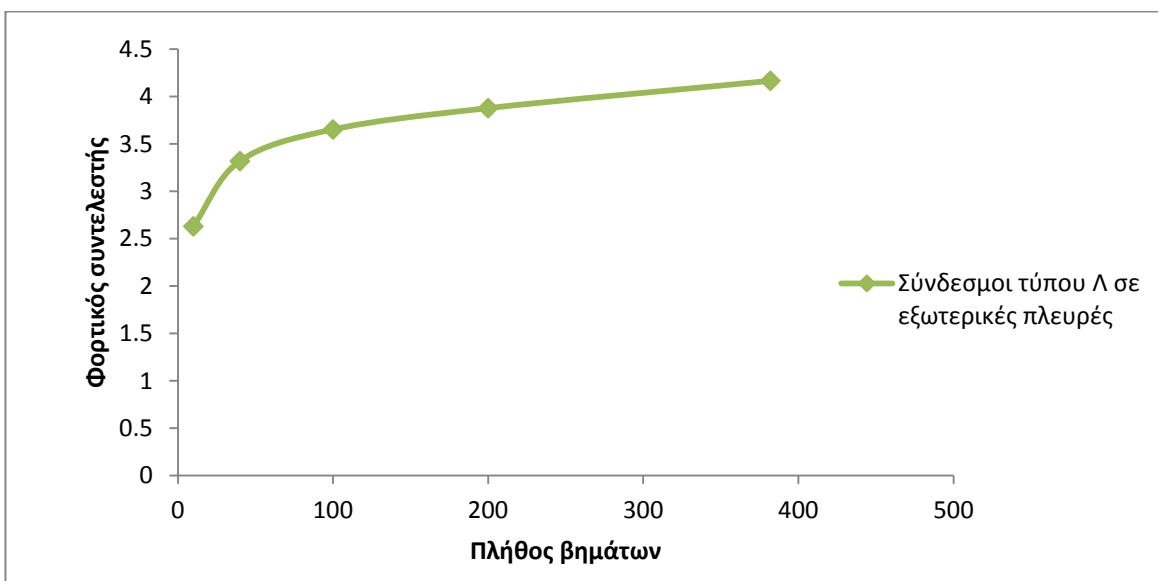
Μία ακόμα παρατήρηση που προκύπτει από τα παραπάνω συγκριτικά διαγράμματα και αφορούν αυτά της δεύτερης περίπτωσης για το φορέα με εξωτερικούς συνδέσμους δυσκαμψίας τύπου Λ είναι πώς αυτά είναι γραμμικά σχεδόν μέχρι το φορτίο που επιβάλλεται στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης και διαφέρουν αρκετά από τα διαγράμματα για τις άλλες περιπτώσεις φορέων που έχουν πολύ ευρύτερο μη γραμμικό κλάδο.

Η εξήγηση είναι ότι ο αριθμός των βημάτων που έχει επιλεγεί για την ανάλυση (100) δεν είναι αρκετός για να περιγράψει τη συμπεριφορά του φορέα μέχρι την αστοχία του. Γι' αυτό σε αυτό τον φορέα θα γίνουν αναλύσεις κατά τις οποίες θα μεταβάλλεται ο αριθμός των βημάτων από 10 μέχρι 400 ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσο υπάρχει διαφοροποίηση στην καμπύλη φορτίου μετατόπισης ανάλογα με τον αριθμό των βημάτων που επιλέγονται και εν κατακλείδι κατά πόσο ο αριθμός των βημάτων που επιλέγησαν μπορεί να έχει επηρεάσει την ακρίβεια των αναλύσεων που έχουν πραγματοποιηθεί.

## 4.2 Συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας για αναλύσεις με διαφορετικό πλήθος βημάτων



Σχήμα 4.4: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής, για διαφορετικό πλήθος βημάτων, με εξωτερικούς συνδέσμους δυσκαμψίας τύπου Λ, χωρίς ατέλεια

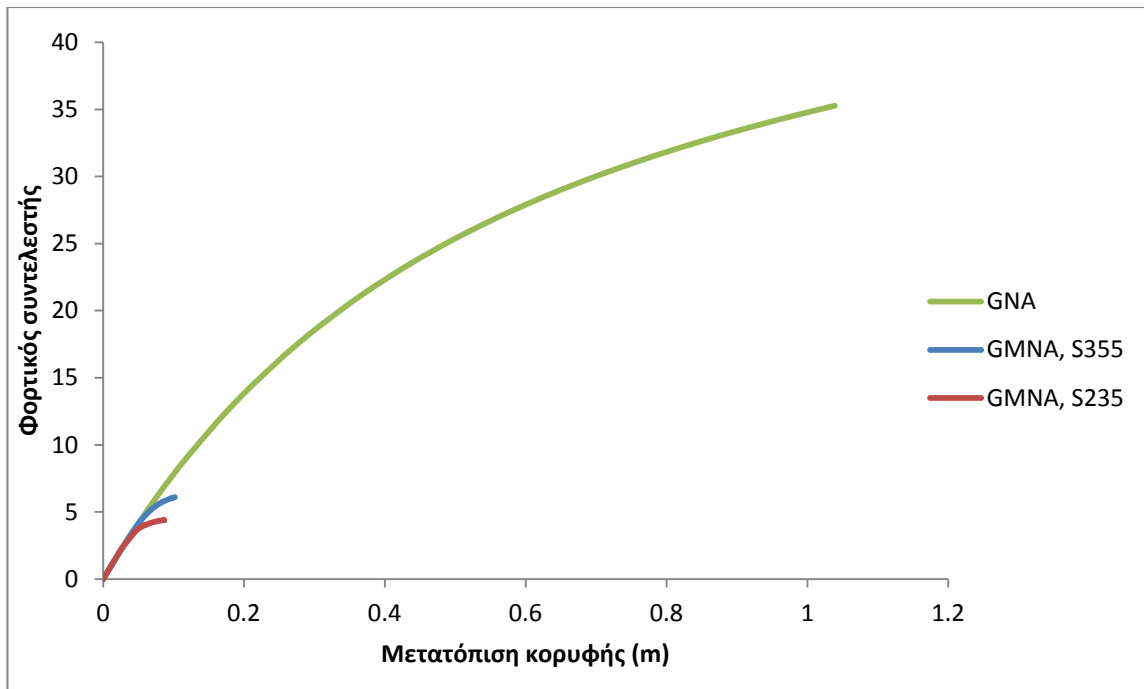


Σχήμα 4.5: Διάγραμμα φορτικού συντελεστή συναρτήσει του πλήθους των βημάτων για την περίπτωση του φορέα με συνδέσμους δυσκαμψίας τύπου Λ στις εξωτερικές πλευρές

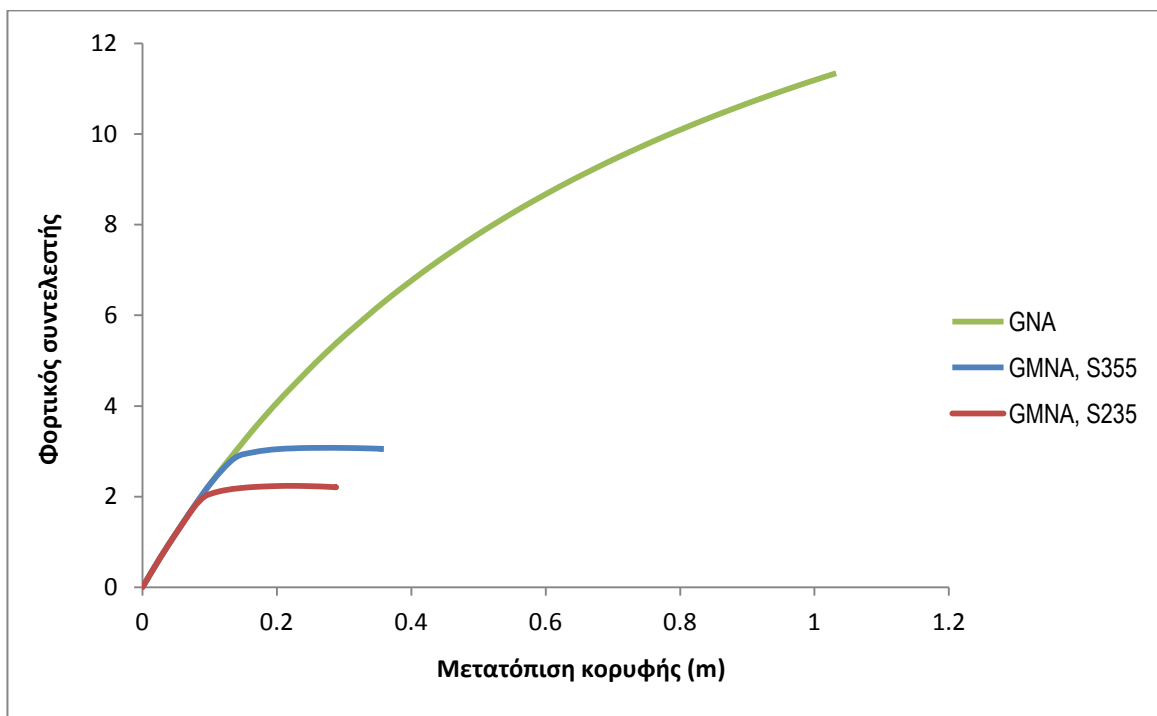
Παρατηρούμε ότι οι δρόμοι ισορροπίας συμπίπτουν ανεξαρτήτως του αριθμού των βημάτων που επιλέγουμε για την ανάλυσή μας. Η πραγματοποίηση αναλύσεων με μεγαλύτερο αριθμό βημάτων δίνει περισσότερα σημεία στην καμπύλη φορτίου μετατόπισης εφόσον η κατασκευή δεν έχει χάσει την αντοχή της να φέρει φορτία. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με 400 βήματα επιβεβαιώνει την αρχική μας υπόθεση ότι ο αριθμός των βημάτων που είχαν αρχικά επιλεγεί δεν ήταν επαρκής καθώς αγνοείτω περίπου το 10% της συνολικής φέρουσας ικανότητας καθώς και το μεγαλύτερο μη γραμμικό τμήμα της καμπύλης φορτίου μετατόπισης της κατασκευής. Η πραγματοποίηση ωστόσο μη γραμμικών αναλύσεων με αυξημένο αριθμό βημάτων συνεπάγεται και πολύ μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος αφού ο χρόνος που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί μία ανάλυση με 400 βήματα είναι δυσανάλογα μεγαλύτερος σε σχέση με μία ανάλυση με 100 βήματα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι και τα 300 επιπλέον βήματα αφορούν το μη γραμμικό κλάδο της καμπύλης όπου η κατασκευή δεν παρουσιάζει γραμμικά ελαστική συμπεριφορά κάτι που μεταφράζεται σε δυσχέρεια σύγκλισης της αριθμητικής μεθόδου ARC LENGTH.

### **4.3 Η επιρροή της ποιότητας του υλικού στη συμπεριφορά του φορέα**

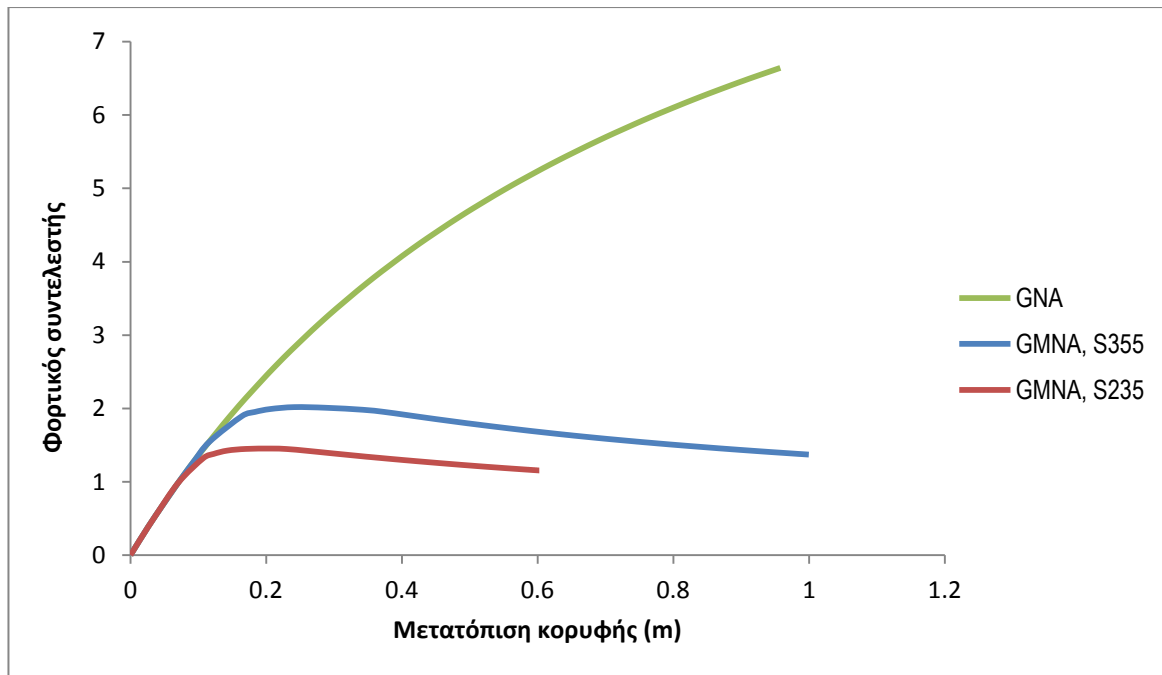
Στη συνέχεια θα εξετάσουμε την επιρροή της ποιότητας του υλικού της κατασκευής για δύο περιπτώσεις φορέων : τον πλέον εύκαμπτο φορέα χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας(με 7 και 13 ορόφους) ο οποίος είχε δώσει το μικρότερο φορτίο κατάρρευσης και τον σημαντικά πιο δύσκαμπτο φορέα με τους χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας και αυξημένες διατομές των συνδέσμων ο οποίος είχε δώσει το μέγιστο φορτίο κατάρρευσης. Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται για ποιότητες χάλυβα S235 και S355 και τα συγκριτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω, υπό τη μορφή διαγραμμάτων φορτίου μετατόπισης. Για την κάθε περίπτωση που εξετάζουμε παραθέτουμε και τη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας μόνο (GNA) η οποία μας βοηθά να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα.



Σχήμα 4.6: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή – μετατόπιση κορυφής, για διαφορετικής ποιότητας χάλυβα, με χιαστί συνδέσμους (Περίπτωση 3<sup>η</sup>)



Σχήμα 4.7: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή – μετατόπιση κορυφής, για διαφορετικής ποιότητας χάλυβα, χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας στον φορέα (Περίπτωση 4<sup>η</sup>)



Σχήμα 4.8: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή – μετατόπιση κορυφής, για διαφορετικής ποιότητας χάλυβα, χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας στον φορέα, με 7 ορόφους (Περίπτωση 5<sup>η</sup>)

Παρατηρούμε ότι και για τις τρεις περιπτώσεις φορέων η όποια μεταβολή στην ποιότητα του υλικού θα επιφέρει και περίπου ανάλογη μεταβολή στη φέρουσα ικανότητα του φορέα. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί ως εξής : παρ' όλη τη μείωση της δυσκαμψίας της κατασκευής από την αφαίρεση των συνδέσμων δυσκαμψίας η αντοχή της σε λυγισμό παραμένει αρκετά υψηλή ώστε να εξακολουθεί να κυριαρχεί η μη γραμμικότητα υλικού έτσι ώστε η όποια μεταβολή στην ποιότητα του υλικού να παίζει καθοριστικό ρόλο στη φέρουσα ικανότητα του φορέα. Μάλιστα από την παρατήρηση των παραπάνω διαγραμμάτων και τη σύγκριση των αναλύσεων GMNA με τις αναλύσεις GNA φαίνεται ότι αυτές ταυτίζονται μέχρι να υπεισέλθει η επιρροή του ορίου διαρροής του υλικού και πλαστικοποίηση κάποιας διατομής. Όσο αυξάνουμε την ποιότητα του χάλυβα τόσο μεγαλώνει και το μήκος που ταυτίζονται οι GNA και GMNA αναλύσεις και μάλιστα όσο μεγαλύτερο είναι το οριακό φορτίο της GNA ανάλυσης σε σχέση με αυτό της GMNA τόσο πιο σημαντική είναι η επιρροή της μη γραμμικότητας υλικού σε σχέση με τη μη γεωμετρική μη γραμμικότητα. Επίσης όσο πλησιάζουν τα οριακά φορτία των GNA και GMNA αναλύσεων τόσο μεγαλώνει η επίδραση του λυγισμού στη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής.

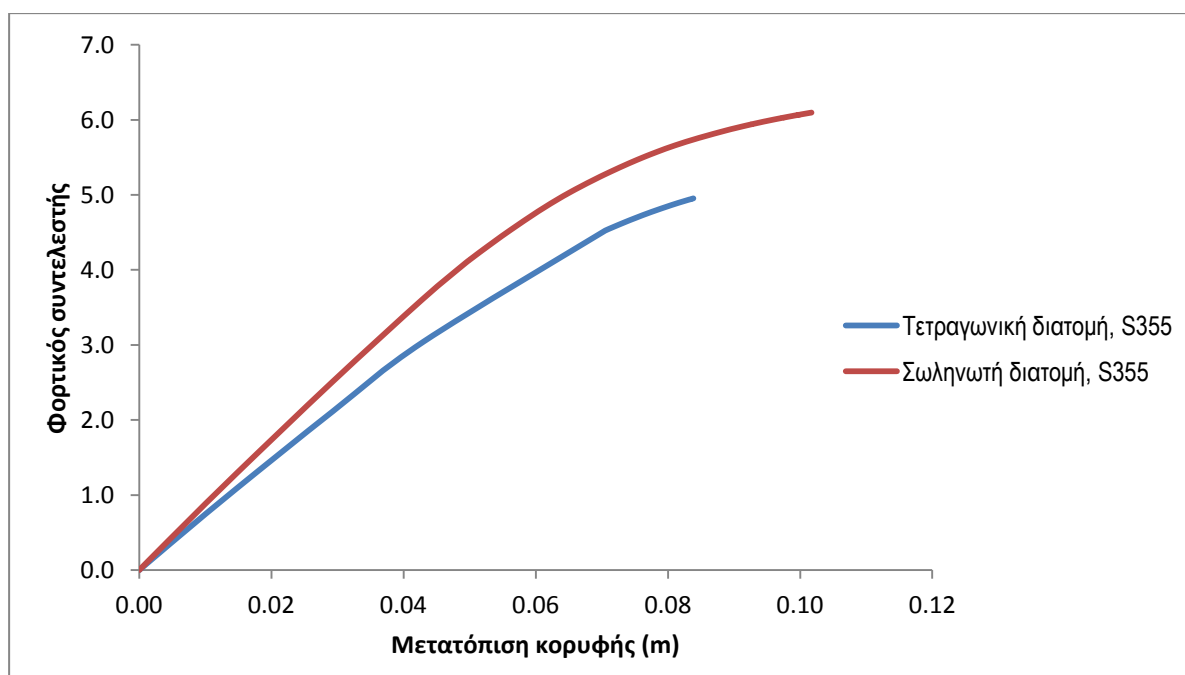
Συμπερασματικά για τις συνηθισμένες ποιότητες δομικού χάλυβα και για όλες τις περιπτώσεις φορέων που μελετάμε η μόρφωσή τους είναι τέτοια που κυριαρχεί η μη γραμμικότητα υλικού. Ειδικά



για τις πιο δύσκαμπτες εκδοχές του φορέα (ως προς το πλήθος και το είδος των συνδέσμων) αυτός μπορεί να διαστασιολογείται με αισθητά βελτιωμένο επίπεδο αντοχής αν αυξηθεί η ποιότητα του υλικού.

#### 4.4 Η επιρροή του τύπου των διατομών των υποστυλωμάτων στη συμπεριφορά του φορέα

Οι διατομές που χρησιμοποιήθηκαν στις παραπάνω αναλύσεις είναι κοίλες κυκλικές διατομές CHS. Είναι διατομές που χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή ικριωμάτων οποιουδήποτε τύπου καθώς η χρησιμοποίησή τους συνεπάγεται και τη βέλτιστη εκμετάλλευση του υλικού. Η εταιρεία PERI όμως τις χρησιμοποιεί μόνο για τους συνδέσμους δυσκαμψίας ενώ για τα υπόλοιπα μέλη προτείνει τη χρησιμοποίηση σύνθετων διατομών SRU. Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA δεν μας δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε αυτές τις διατομές σε αναλύσεις με ελαστοπλαστικό υλικό, ωστόσο μπορούν να εξαχθούν ιδιαίτερα χρήσιμα συμπεράσματα εάν χρησιμοποιήσουμε ορθογωνικές διατομές στις οποίες γίνεται η χειρότερη δυνατή εκμετάλλευση του υλικού. Επιλέγουμε νέα υποστυλώματα τετραγωνικής διατομής με πλευρά μήκους 11,36 cm οι οποίες έχουν το ίδιο εμβαδό με τις αντίστοιχες σωληνωτές που είχαν αρχικά χρησιμοποιηθεί. Ενδεικτική της σπατάλης του υλικού η οποία συντελείται είναι η πώση της ροπής αδράνειας  $10710\text{cm}^4$  για την κοίλη κυκλική διατομή σε  $1387,82\text{cm}^4$  για την συμπαγή ορθογωνική.

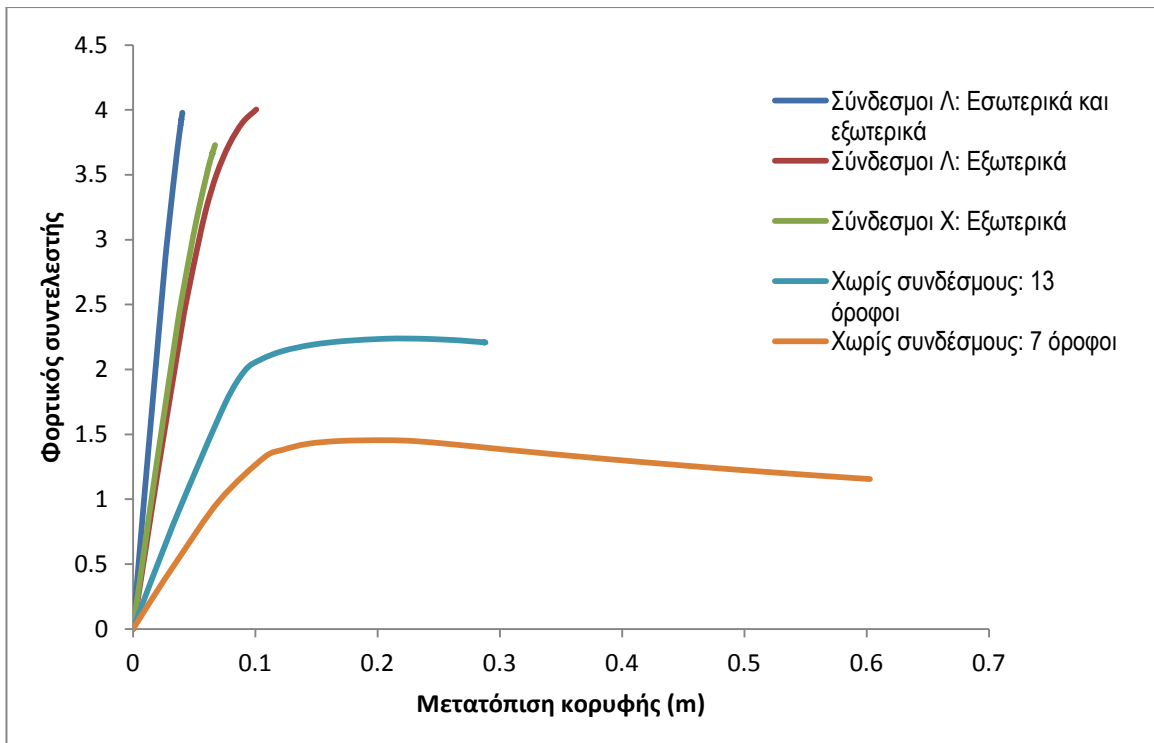


Σχήμα 4.9: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής, για διαφορετικού τύπου διατομή στα υποστυλώματα, με χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας

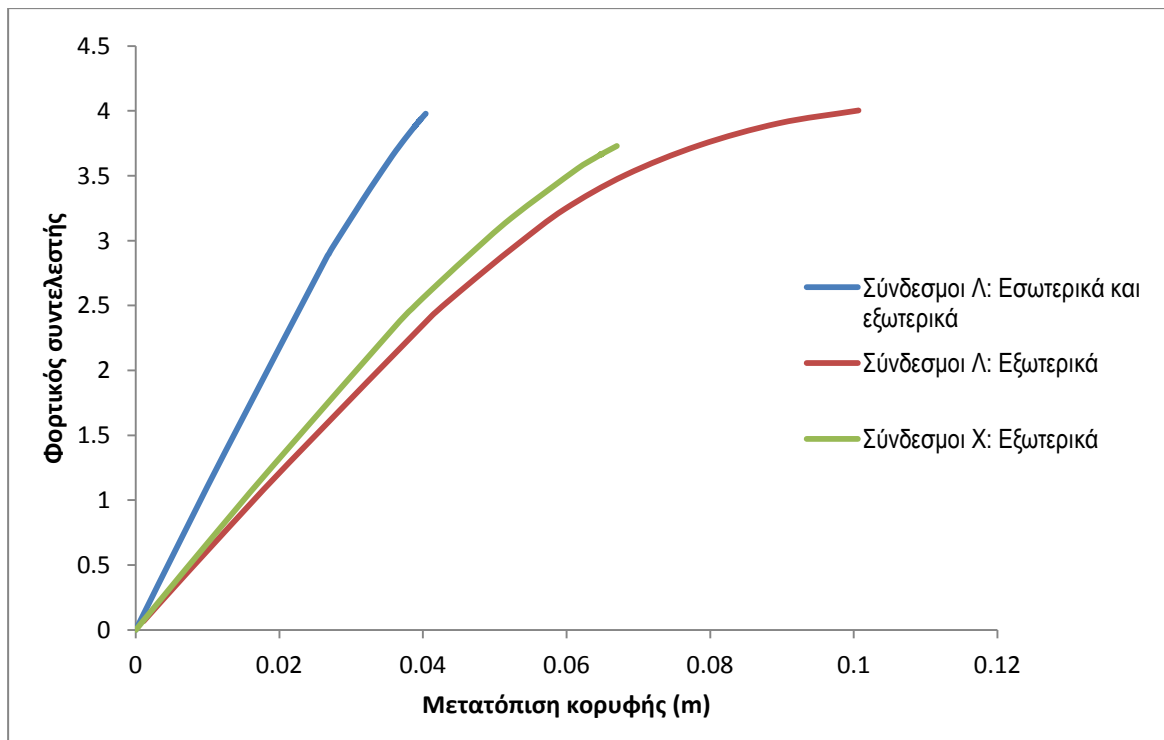
Παρατηρούμε ότι με την αλλαγή του τύπου των διατομών των υποστυλωμάτων από κοίλες κυκλικές σε ορθογωνικές επέρχεται και μία κάποια μείωση τόσο της δυσκαμψίας όσο και της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο. Η διάταξη των μελών του φορέα είναι τέτοια ώστε τα μήκη λυγισμού των μελών να είναι πολύ μικρά ώστε η μη γραμμικότητα υλικού να είναι καθοριστική σε σχέση με τη γεωμετρική μη γραμμικότητα αφού παρ' όλη τη χρησιμοποίηση τόσο αντιστοιχοοικονομικών μελών για τα υποστυλώματα του φορέα η συμπεριφορά αυτού παραμένει πολύ καλή. Σε αυτό συμβάλλει και ο τύπος της φόρτισης ο οποίος προκαλεί κυρίως αξονική ένταση. Οπότε η χρησιμοποίηση διατομών τύπου SRU αντί των κοίλων κυκλικών δεν αναμένεται να επιφέρει ουσιώδεις μεταβολές στη συμπεριφορά του φορέα.

#### **4.5 Συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας για όλες τις περιπτώσεις μόρφωσης του φορέα**

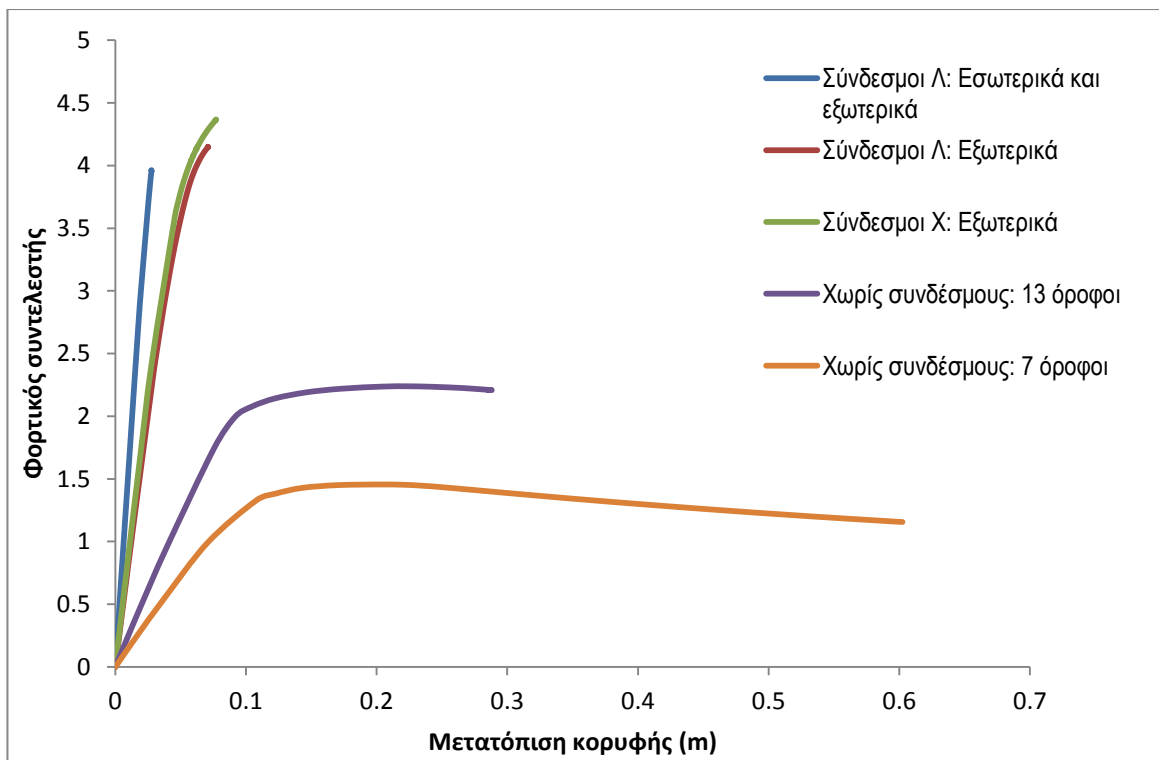
Παρακάτω παραθέτουμε τους δρόμους ισορροπίας για όλες τις εναλλακτικές περιπτώσεις μόρφωσης του φορέα, δηλαδή για συνδέσμους  $\Lambda$  περιμετρικά και στους τέσσερις πρότυπους πύργους, για μειωμένο πλήθος συνδέσμων  $\Lambda$ , για την περίπτωση που αυτοί αντικαθίστανται από χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας και τέλος για τις περιπτώσεις που ο φορέας εξετάζεται χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας πριν και μετά την αφαίρεση δοκών σε 6 στάθμες. Οι παραπάνω περιπτώσεις θα εξετασθούν για τους φορείς με πυκνή διακριτοποίηση στους συνδέσμους τόσο για αρχικές όσο και για αυξημένες διατομές συνδέσμων. Από τη σύγκριση των παραπάνω περιπτώσεων μεταξύ τους θα αποσαφηνιστεί ποιοι παράγοντες συμβάλλουν περισσότερο στη δυσκαμψία και τη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής και ποια στοιχεία συμβάλλουν στην βέλτιστη διαστασιολόγηση μιας τέτοιας κατασκευής.



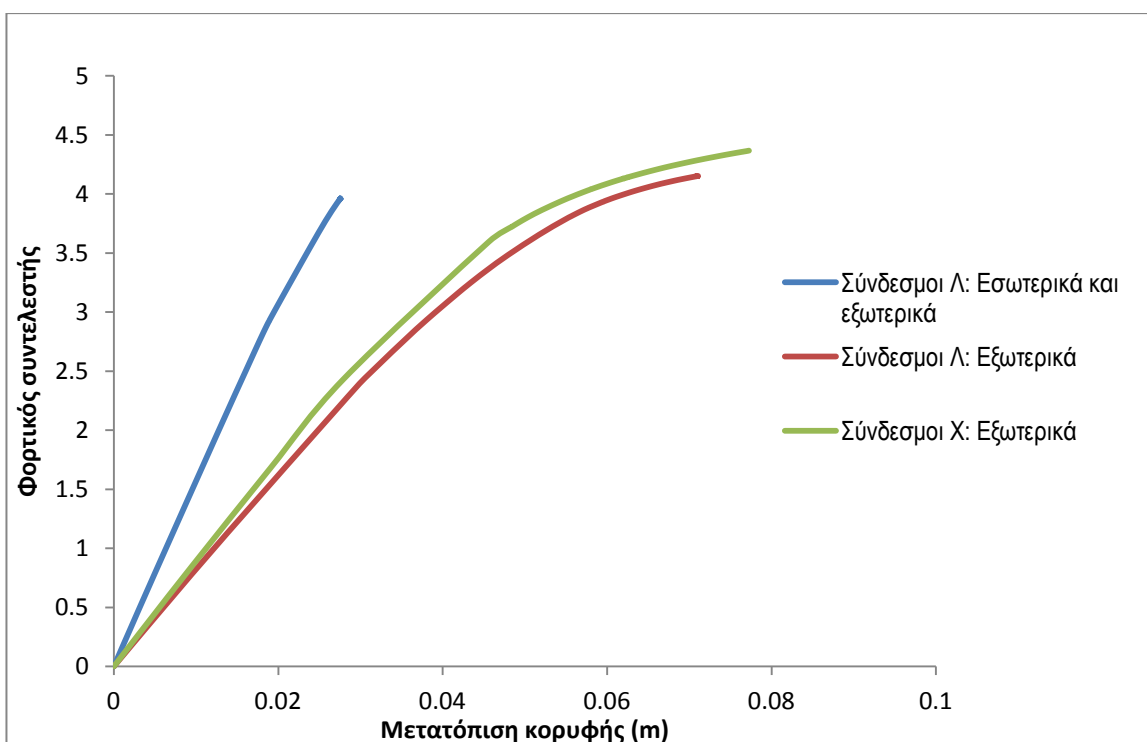
Σχήμα 4.10(α): Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής (χωρίς ατέλεια, με αρχικές διατομές και πυκνή διακριτοποίηση) για εναλλακτικούς τρόπους μόρφωσης του φορέα



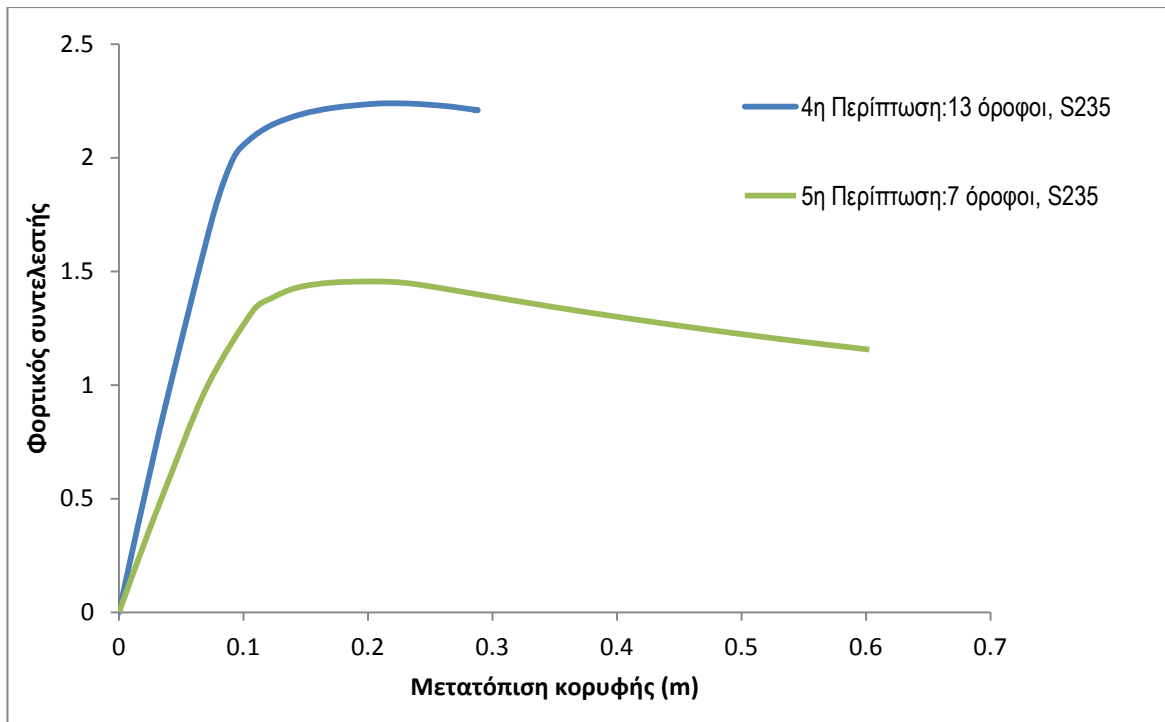
Σχήμα 4.10(β): Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής (χωρίς ατέλεια, με αρχικές διατομές και πυκνή διακριτοποίηση) για εναλλακτικούς τρόπους μόρφωσης του φορέα



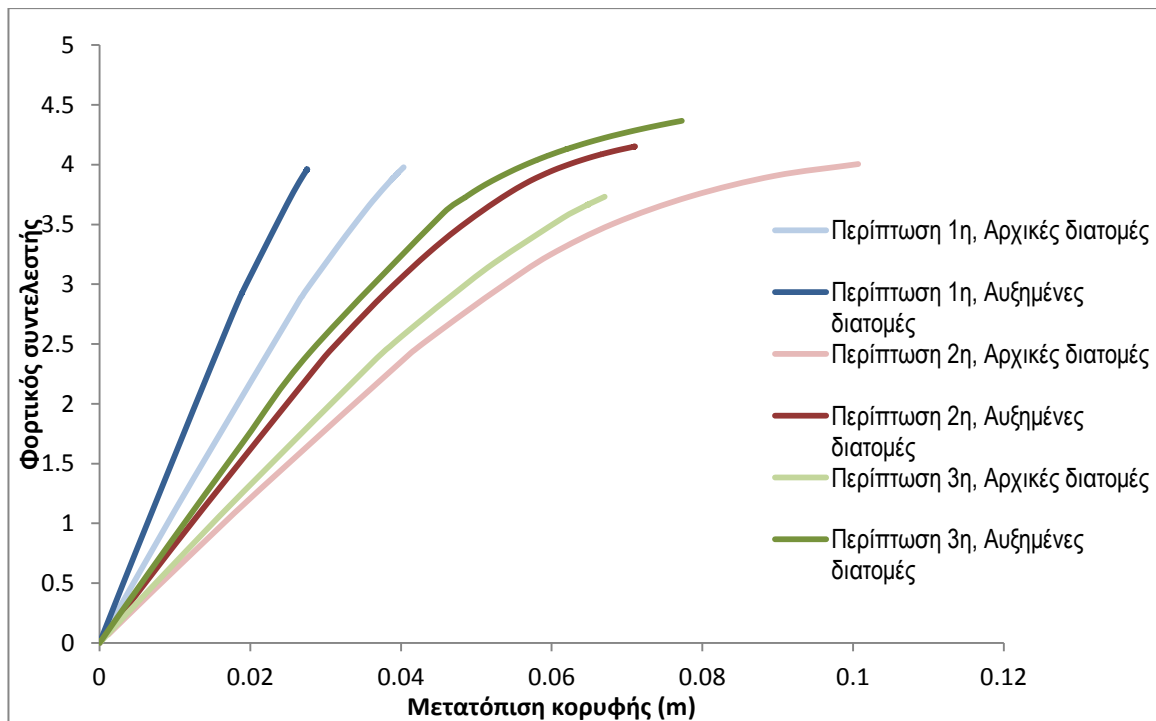
Σχήμα 4.11(α): Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής (χωρίς ατέλεια, με αυξημένες διατομές και πυκνή διακριτοποίηση) για εναλλακτικούς τρόπους μόρφωσης του φορέα



Σχήμα 4.11(β): Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής (χωρίς ατέλεια, με αυξημένες διατομές και πυκνή διακριτοποίηση) για εναλλακτικούς τρόπους μόρφωσης του φορέα



Σχήμα 4.12: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής (χωρίς ατέλεια) για εναλλακτικούς τρόπους μόρφωσης του φορέα



Σχήμα 4.13: Δρόμοι ισορροπίας φορτικού συντελεστή - μετατόπιση κορυφής (χωρίς ατέλεια, με αρχικές και αυξημένες διατομές, με πυκνή διακριτοποίηση) για εναλλακτικούς τρόπους μόρφωσης του φορέα

Από τα συγκριτικά διαγράμματα για τις παραπάνω περιπτώσεις μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Από τα συγκριτικά διαγράμματα των αναλύσεων τόσο για συνδέσμους με αρχικές όσο και για αυξημένες διατομές φαίνεται να επέρχεται μία πολύ ελαφρά βελτίωση της συμπεριφοράς της κατασκευής τόσο όσο αφορά την δυσκαμψία αυτής όσο και το φορτίο αστοχίας της εάν αντικαταστήσουμε τους συνδέσμους  $\Lambda$  χωρίς εκκεντρότητα με χιαστί συνδέσμους δυσκαμψίας. Οι σύνδεσμοι  $X$  έχουν μεγαλύτερο μήκος από τους συνδέσμους  $\Lambda$  (άρα χρησιμοποιείται επιπλέον υλικό για να κατασκευαστούν) ενώ η σύνδεση των χιαστών μεταξύ τους έχει θεωρηθεί ότι εξασφαλίζει πλήρη αποκατάσταση της συνέχειας και των δύο διαγωνίων κάτι που απαιτεί αυξημένο κόστος για να επιτευχθεί. Εναλλακτικός τρόπος σύνδεσης των διαγωνίων μεταξύ τους θα επιδείνωνε τη συμπεριφορά της κατασκευής (παρ 3.3.1.2) ενώ σε κάθε περίπτωση η συνδεσμολογία με χιαστί συνδέσμους απαιτεί μεγαλύτερο αριθμό συνδέσεων σε σχέση με αυτή με συνδέσμους  $\Lambda$  κάτι που την καθιστά αντικοινομική. Εάν μάλιστα αναλογιστούμε τη δυνατότητα που προσφέρει η PERI και αφορά τη χρησιμοποίηση μελών για συνδέσμους μεταβλητού μήκους αυτός ο τύπος συνδέσμων καθίσταται ιδιαίτερα ευέλικτος και προσαρμόσιμος στις απαιτήσεις ενός έργου όπως η προσωρινή υποστήλωση μίας γέφυρας μεγάλου ανοίγματος με τους υπό μελέτη πύργους ικριωμάτων.

Μία ακόμα χρήσιμη παρατήρηση που προκύπτει είναι ότι η τοποθέτηση επιπλέον συνδέσμων και στο εσωτερικό του φορέα, ενώ δεν φαίνεται να επιφέρει κάποια αύξηση στη φέρουσα ικανότητα της κατασκευής βελτιώνει αισθητά τη δυσκαμψία της κατασκευής, κάτι πολύ σημαντικό σε αυτού του τύπου τις κατασκευές όπου οι απαιτήσεις λειτουργικότητας παίζουν καθοριστικό ρόλο. Η συνεισφορά των επιπλέον συνδέσμων στη βελτίωση της συμπεριφορά της κατασκευής γίνεται πιο εμφανής εάν παρατηρήσουμε το σχήμα 4.13 όπου φαίνεται ότι ο φορέας με την πυκνότερη διάταξη συνδέσμων  $\Lambda$  εμβαδού  $18,2 \text{ cm}^2$  παρουσιάζεται αρκετά πιο δύσκαμπτος από τους 2 φορείς με μικρότερο πλήθος συνδέσμων διατομών  $64,91 \text{ cm}^2$ . Δηλαδή ο διπλασιασμός στο πλήθος των συνδέσμων δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τον τριπλασιασμό στο εμβαδό της διατομής τους καθιστώντας αυτό τον τρόπο μόρφωσης του φορέα πολύ πιο αποτελεσματικό σε σχέση με τους εναλλακτικούς τρόπους που διερευνήθηκαν.

Σε ότι αφορά τα φορτία αστοχίας της κατασκευής οι φορείς με μικρότερο πλήθος συνδέσμων φάνηκε να ανταποκρίνονται καλύτερα από τους υπόλοιπους. Ωστόσο εάν λάβουμε υπ' όψη τους γραμμικά ελαστικούς κλάδους των διαγραμμάτων παρατηρούμε ότι την καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζουν και πάλι οι φορείς με αυξημένο πλήθος συνδέσμων τύπου  $\Lambda$ . Γνωρίζοντας ότι ο

ευρωκώδικας 3 επιβάλλει η διαστασιολόγηση αυτού του τύπου των κατασκευών να γίνεται με ελαστικό έλεγχο, καθίσταται ακόμα περισσότερο σαφής η καλύτερη απόκριση του φορέα με αυξημένο πλήθος συνδέσμων για τις απαιτήσεις του έργου για το οποίο προορίζεται.

Όπως ήταν αναμενόμενο οι φορείς χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερες μετακινήσεις για τα επιβαλλόμενα φορτία κάτι που εκφράζεται από τη μειωμένη κλίση του δρόμου ισορροπίας. Ο φορέας με τους 13 ορόφους χωρίς συνδέσμους αναπτύσσει μετακίνηση κορυφής 17 εκατοστών στο σημείο καμψής του δρόμου ισορροπίας, δηλαδή παρουσιάζει ανεπίτρεπτα μεγάλες μετακινήσεις ακόμα και όσο παραμένει στην ελαστική περιοχή ενώ και η πτώση στη φέρουσα ικανότητα είναι τεράστια σε σύγκριση με τους φορείς που έχουν συνδέσμους. Το μόνο πλεονέκτημα μιας τέτοιας κατασκευής είναι ότι αστοχεί για πολύ μεγάλες μετελαστικές μετακινήσεις χωρίς να εμφανίζεται κάποιος απότομος καθοδικός κλάδος στο δρόμο ισορροπίας. Κάτι τέτοιο δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον αν αναλογιστούμε ότι μελετάμε πύργο προσωρινής υποστήριξης καταστρώματος γέφυρας το οποίο δεν θα μπορούσε να ακολουθήσει τις μετακινήσεις αυτές.

Εάν αφαιρεθούν και οι 6 από τους 13 ορόφους παρατηρείται και πάλι πολύ σημαντική επιδείνωση στη συμπεριφορά της κατασκευής. Συγκεκριμένα η δυσκαμψία της κατασκευής μειώνεται ακόμα περισσότερο συνοδευόμενη από νέα μεγάλη πτώση της φέρουσας ικανότητας αυτής ενώ μετά το σημείο καμψής εμφανίζεται δευτερεύων πτωτικός κλάδος στο δρόμο ισορροπίας με την κατασκευή ωστόσο να παραμένει ευσταθής για πολύ μεγάλες μετακινήσεις.

Είναι πλέον σαφές ότι η όποια μείωση στο πλήθος των μελών της κατασκευής επιδρά με ιδιαίτερα δυσμενή τρόπο στη συμπεριφορά αυτής. Η προτεινόμενη από την PERI πυκνή διάταξη των οριζοντίων μελών του φορέα οδηγεί σε μικρά μήκη λυγισμού καθιστώντας επουσιώδη έως ανύπαρκτη την επιρροή του φαινομένου του λυγισμού στην αντοχή των υποστυλωμάτων ενώ η πυκνή διάταξη των συνδέσμων δυσκαμψίας περιορίζει στο ελάχιστο την οριζόντια εκτροπή του φορέα υπό την επιβολή ιδιαίτερα μεγάλων φορτίων που μεταβιβάζονται στο φορέα από το κατάστρωμα της γέφυρας, αυξάνοντας παράλληλα σε μεγάλο βαθμό και τη φέρουσα ικανότητα του φορέα.





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## Έλεγχος μελών με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3

Στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιήσουμε αναλυτικούς ελέγχους τάσεων και επάρκειας στα υποστυλώματα του φορέα μας για δύο διαφορετικούς τύπους διατομών, τις σωληνωτές που αποτελούν το μέτρο αναφοράς στις αναλύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί έως τώρα, αλλά και σύνθετες διατομές αποτελούμενες από πρότυπα ελάσματα της σειράς UPN οι οποίες έχουν στόχο να προσομοιώσουν τις διατομές που χρησιμοποιούνται από την PERI. Τα αποτελέσματα του αναλυτικού ελέγχου τάσεων θα συγκριθούν με αυτά που προκύπτουν από το πρόγραμμα για τις σωληνωτές διατομές ώστε να διαπιστωθούν τυχόν αποκλίσεις. Στη συνέχεια οι έλεγχοι θα επεκταθούν και για τις σύνθετες διατομές. Οι αναλυτικοί έλεγχοι θα γίνουν σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3.

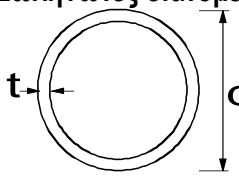
### 5.1 Σωληνωτές διατομές

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει έλεγχος των υποστυλωμάτων του φορέα μας για την περίπτωση που εξετάσαμε στην παράγραφο 3.1, όπου είχαμε εσωτερικούς και εξωτερικούς συνδέσμους δυσκαμψίας τύπου Λ. Οι διατομές που χρησιμοποιούμε είναι οι εξής:

	CHS	d	t	A	I
		mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>
Υποστύλωμα	273x16	273	16	129	10710
Δοκοί	168.3x8	168,3	8	40,29	1297
Αρχικές διατομές συνδέσμων	88.9x7.1	88,9	7,1	18,2	154

Πίνακας 5.1: Πίνακας διατομών

Η κατηγοριοποίηση των διατομών μας θα πραγματοποιηθεί σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 και συγκεκριμένα με τον παρακάτω πίνακα 4.2:

Σωληνωτές διατομές						
						
Κατηγορία	Διατομή σε κάμψη και/ή θλίψη					
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\varepsilon^2$					
	<b>ΣΗΜΕΙΩΣΗ</b> Για $d/t > 90\varepsilon^2$ βλέπε EN 1993-1-6.					
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	$f_y$	235	275	355	420	460
	$\varepsilon$	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	$\varepsilon^2$	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

Πίνακας 5.2: Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος για θλιβόμενα στοιχεία

Για χάλυβα S235  $f_y=235$  MPa και  $\varepsilon=\sqrt{235/f_y} = 1$

### Κατηγορία διατομής υποστυλώματος

Από τον πίνακα 5.2 για την κατάταξη σωληνωτών διατομών, από χάλυβα S235, σε καθαρή κάμψη και θλίψη προκύπτει ότι:

$$d/t = 273/16 = 17,1 < 50\varepsilon = 50$$

Επομένως η διατομή μας ανήκει στην κατηγορία 1.

Για την ροπή αδράνειας ισχύει:

$$I = \pi \cdot (D_{εξ}^4 - D_{εσ}^4) / 64 = \pi \cdot (27,3^4 - 24,1^4) / 64 = 10706,8 \text{ cm}^4$$

### Εντατικά μεγέθη του φορέα

Από τα διαγράμματα εντατικών μεγεθών που έχουμε παρουσιάσει στην παράγραφο 3.1.1, συγκεκριμένα στα σχήματα 3.3 και 3.4, παρατηρούμε ότι δυσμενέστερο είναι το αριστερό υποστυλώμα της βάσης σε όψη x-z με σημαντικά μεγαλύτερη αξονική δύναμη. Παρατηρούμε ότι τα μεγέθη των καμπτικών ροπών, αλλά και των τεμνουσών, έχουν μικρές τιμές σε όλες τις διατομές των μελών του φορέα σε σχέση με την τιμή της αξονικής δύναμης, οπότε δεν παίζουν καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό του δυσμενέστερου υποστυλώματος.

Τα εντατικά μεγέθη για το κρίσιμο υποστύλωμα είναι:

$$N_{Ed} = 1059 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,y} = 0.10 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,z} = 0.665 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,y} = 1.88 \text{ kNm} \text{ και } M_{Ed,y} = 2,62 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,z} = 1.95 \text{ kNm} \text{ και } M_{Ed,z} = 1,89 \text{ kNm}$$

Να επισημάνουμε ότι λόγω πλήρους συμμετρίας δεν υπάρχουν διακριτοί κύριοι άξονες στις κυκλικές διατομές.

### Έλεγχος διατομής σε διάτμηση

Για την πλαστική διατμητική αντοχή ισχύει

$$V_{pl,Rd} = A_v \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}}$$

Όπου για κυκλικές διατομές και σωλήνες με ομοιόμορφο πάχος

$$A_v = 2 \cdot A / \pi = 2 \cdot 129 / \pi = 82,24 \text{ cm}^2$$

Οπότε

$$V_{pl,Rd} = A_v \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = 82,24 \text{ cm}^2 \cdot 23,5 \text{ kN / cm}^2 / (\sqrt{3} \cdot 1.00) = 1115.81 \text{ kN}$$

Είναι προφανές ότι ο έλεγχος σε διάτμηση ικανοποιείται και δεν χρειάζεται απομείωση των αντοχών σε ροπές κάμψης  $M_{pl,Rd,y}$  και  $M_{pl,Rd,z}$  λόγω παρουσίας διάτμησης αφού

$$V_{Ed,y}, V_{Ed,z} \ll 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$$

### Έλεγχος διατομής σε κάμψη και αξονική δύναμη

Για διατομές κατηγορίας 1 ή 2, η επίδραση της αξονικής δύναμης λαμβάνεται υπόψη με μείωση της πλαστικής ροπής αντοχής. Το κριτήριο σχεδιασμού γράφεται:

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd}$$

Όπου για κοίλες κυκλικές διατομές ισχύει:

$$M_{N,y,Rd} = M_{N,z,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot (1 - n^{1,7}) \text{ και } n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$$

Η ροπή πλαστικοποίησης της εξεταζόμενης διατομής είναι:

$$M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 3968,06 \text{ cm}^3 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,00 = 93249,50 \text{ kNcm}$$

Όπου η πλαστική ροπή αντίστασης υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$W_{pl} = 4 \cdot t \cdot (D_{εσ} + t/2)^2 = 4 \cdot 1,6 \cdot (24,1 + 1,6/2)^2 = 3968,06 \text{ cm}^3$$

Η πλαστική αντοχή σχεδιασμού  $N_{pl,Rd}$  προκύπτει:

$$N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0} = 129 \text{ cm}^2 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,00 = 3035,78 \text{ kN}$$

Άρα  $n=0,35$  και  $M_{N,y,Rd} = M_{N,z,Rd} = 77685 \text{ kNcm}$

Το κριτήριο ικανοποιείται οπότε δεν χρειάζεται απομείωση καμπτικών αντοχών λόγω αξονικής δύναμης.

Παρατηρούμε ότι η πλαστική ροπή  $M_{N,y,Rd}$  και  $M_{N,z,Rd}$  έχουν σημαντικά μεγαλύτερης τάξης μεγέθους τιμή από τις καμπτικές ροπές  $M_{Ed,y}$  και  $M_{Ed,z}$  οπότε ο έλεγχος της διατομής του υποστυλώματος σε κάμψη είναι περιττός.

### Έλεγχος μέλους υπό κάμψη και αξονική θλίψη

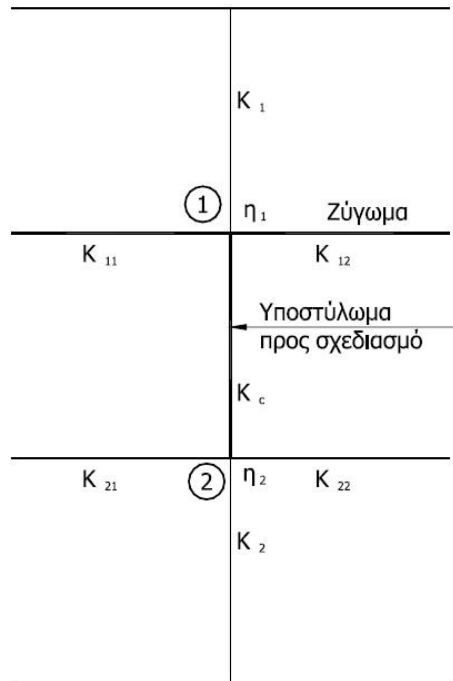
Για διατομές κατηγορίας 1, για μέλη που δεν είναι ευαίσθητα σε στρεπτική παραμόρφωση (η κοίλη κυκλική διατομή δεν είναι ευαίσθητη σε στρεπτικές καταπονήσεις επομένως  $\chi_{LT}=1,00$ ) και για διαξονική κάμψη περί τον άξονα y και z, θα πρέπει να ισχύει:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed,y}}{M_{y,Rk}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{Ed,z}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

όπου  $N_{Rk} = N_{pl,Rd} = 3035,78 \text{ kN}$

$$M_{y,Rk} = M_{pl,Rd,y} = 93249,50 \text{ kNcm}$$

$$M_{z,Rk} = M_{pl,Rd,z} = 93249,50 \text{ kNcm}$$



Σχήμα 5.1: Συντελεστές κατανομής  $\eta_1$  και  $\eta_2$  για συνεχή υποστυλώματα

Ο συντελεστής κατανομής ( $\eta$ ) εξαρτάται από:

- τη ροπή αδράνειας του εκάστοτε μέλους
- το μήκος του
- τη μεταθετότητα ή μη και τη δυνατότητα στροφής των άκρων του και
- την ύπαρξη ή μη αξονικής δύναμης

Οι συντελεστές κατανομής των άκρων του υπό εξέταση υποστυλώματος, είναι οι εξής:

$$\eta_1 = \frac{K_c + K_1}{K_c + K_1 + K_{11} + K_{12}} \quad \text{και} \quad \eta_2 = \frac{K_c + K_2}{K_c + K_2 + K_{22} + K_{21}}$$

όπου  $K_c$ ,  $K_1$  και  $K_2$  είναι συντελεστές ενεργού δυσκαμψίας των υποστυλωμάτων και  $K_{12}$ ,  $K_{11}$ ,  $K_{21}$ ,  $K_{22}$  και  $K_{22}$  είναι οι συντελεστές ενεργού δυσκαμψίας των δοκών. Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε  $K_c$ ,  $K_1$  και  $K_{11}$ . Ο συντελεστής  $\eta_2$  είναι μονάδα αφού στη βάση του υποστυλώματος έχουμε άρθρωση. Ο συντελεστής ενεργού δυσκαμψίας για το υπό εξέταση υποστυλώμα δίνεται ως εξής:

$$K_c = I_c / L_c$$

$I_c$ : η ροπή αδράνειας του υποστυλώματος

$L_c$ : το μήκος του υποστυλώματος

Οι συντελεστές ενεργού δυσκαμψίας των ζυγωμάτων είναι:

$$K_{ij} = \alpha I_{ij} / L_{ij}$$

όπου

$I_{ij}$ : η ροπή αδράνειας του μέλους

$L_{ij}$ : το μήκος του μέλους και

$\alpha$ : συντελεστής που εξαρτάται από τις συνθήκες στρωφικής δέσμεισης των απομακρυσμένων άκρων του μέλους και δίνεται από τον παρακάτω πίνακα 5.3.

Συνθήκες στρωφικής δέσμεισης του απομακρυσμένου άκρου της δοκού	Συντελεστής ενεργού δυσκαμψίας $K$ δοκού (με την προϋπόθεση ότι η δοκός παραμένει ελαστική)
Πάκτωση στο απομακρυσμένο άκρο	1,00 I/L (1-0,4N/N <sub>E</sub> )
Άρθρωση στο απομακρυσμένο άκρο	0,75 I/L (1-1,0 N/N <sub>E</sub> )
Στροφή όπως στο πλησιέστερο άκρο (διπλή καμπυλότητα)	1,50 I/L (1-0,2N/N <sub>E</sub> )
Στροφή ίση και αντίθετη προς αυτήν του πλησιέστερου άκρου (απλή καμπυλότητα)	0,50 I/L (1-1,0N/N <sub>E</sub> )

Πίνακας 5.3: Προσεγγιστικοί τύποι για μειωμένους συντελεστές δυσκαμψίας δοκών λόγω αξονικής δύναμης, όπου  $N_E = \pi^2 \cdot E \cdot I / L^2$

Σύμφωνα με τα παραπάνω για τη δυσκαμψία του υποστυλώματος έχουμε:

$$K_c = 10706,8 \text{ cm}^4 / 150 \text{ cm} = 71,38 \text{ cm}^3$$

$$K_1 = 10706,8 \text{ cm}^4 / 150 \text{ cm} = 71,38 \text{ cm}^3$$

Ενώ για την δυσκαμψία του ζυγώματος:

$$K_{11} = \frac{1,50 \cdot I_{11}}{L_{11}} \cdot \left( 1 - 0,20 \cdot \frac{N}{N_E} \right) = \frac{1,50 \cdot 1297,21}{200} \cdot \left( 1 - 0,20 \cdot \frac{32}{6721,87} \right) = 9,72 \text{ cm}^3$$

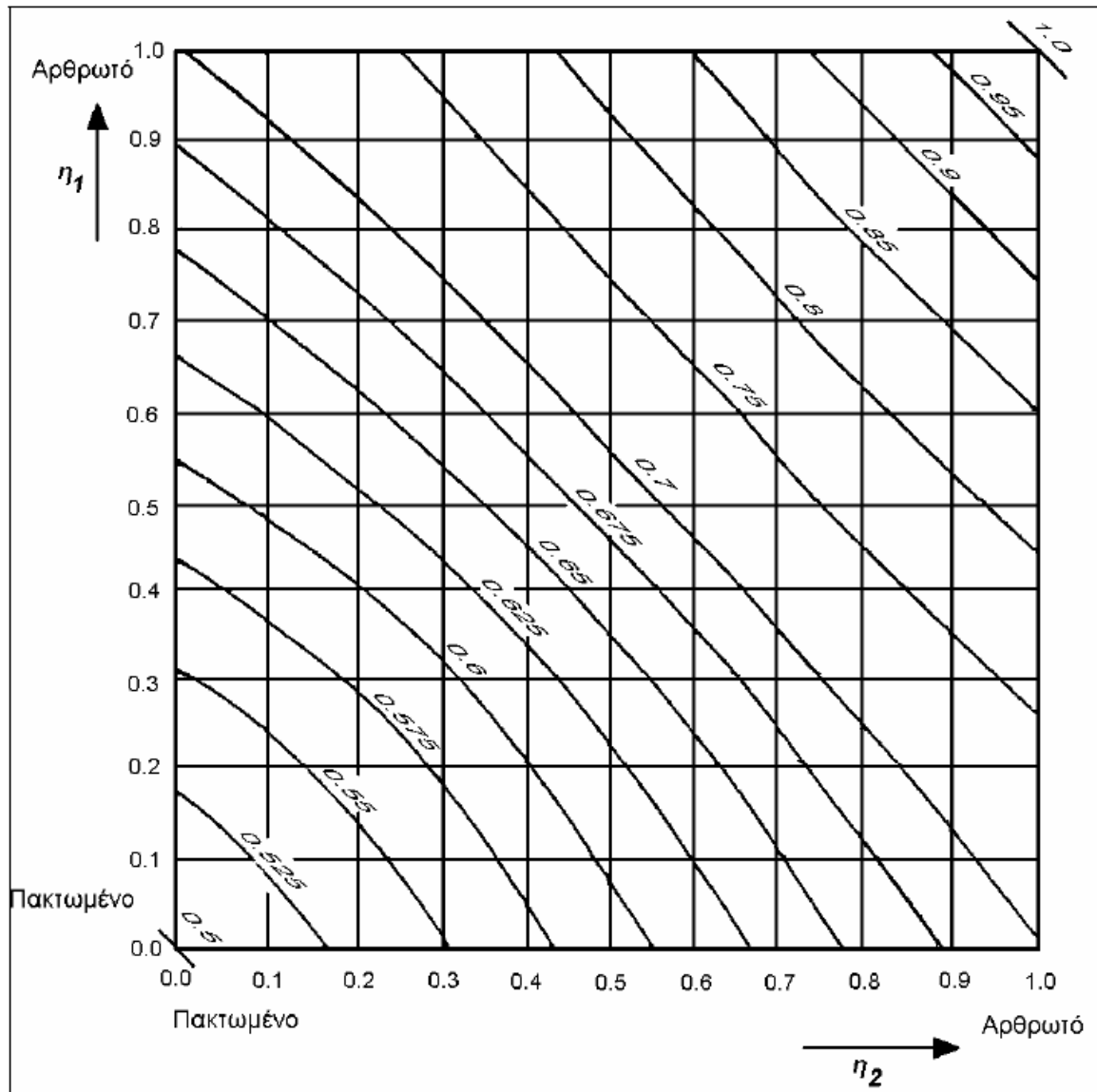
για την οποία θεωρούμε στροφή όπως στο πλησιέστερο άκρο (διπλή καμπυλότητα) σύμφωνα με την πρώτη κανονική μορφή λυγισμού για αμετάθετα πλαίσια.

Έτσι ο συντελεστής κατανομής  $\eta_1$  θα είναι:

$$\eta_1 = \frac{K_c + K_1}{K_c + K_1 + K_{11}} = (71,38 + 71,38) / (71,38 + 71,38 + 9,72) = 0,94$$

Ο συντελεστής  $\eta_2$  όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω ισούται με τη μονάδα,  $\eta_2 = 1,00$ .

Εκτιμούμαι γραφικά από το σχήμα 4. τον συντελεστή ισοδύναμου μήκους λυγισμού, για υποστύλωμα με αμετάθετα άκρα για  $\eta_1=0,94$  και  $\eta_2=1,00$  ->  $\beta_y=0,97$ .



Σχήμα 5.2: Συντελεστές ισοδύναμου μήκους λυγισμού  $L_{cr} / L$  για υποστυλώμα με αμετάθετα άκρα

Επομένως το μήκος λυγισμού του υποστυλώματος εντός του επιπέδου του πλαισίου θα είναι:

$$L_y = \beta_y \cdot L = 0.97 \times 150 \text{ cm} = 145,5 \text{ cm}$$

Υπολογίζεται η λυγηρότητα  $\lambda_y$  και η ανηγμένη λυγηρότητα  $\bar{\lambda}_y$ :

$$\lambda_y = L_y / i_y = 145,5 \text{ cm} / 9,1 \text{ cm} = 16,11$$

$$\bar{\lambda}_y = \lambda_y / \lambda_1 = 16,11 / 93,9 = 0,17 \quad \text{όπου } \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9$$

Για λυγηρότητα  $\bar{\lambda} \leq 0,2$  ή για  $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0,04$  οι επιδράσεις του λυγισμού μπορούν να αγνοούνται και να εφαρμόζονται μόνο έλεγχοι διατομών.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 υπάρχουν δύο εναλλακτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό των συντελεστών αλληλεπίδρασης. Για τον σύνθετο έλεγχο ισχύει:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_{y} \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed,y}}{M_{y,Rk}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{Ed,z}}{M_{z,Rk}} = \frac{1059}{3035,78} + \frac{262}{93249,50} + \frac{189}{93249,50} = 0,35 \leq 1$$

### Ελαστικός έλεγχος σε οριακή κατάσταση αστοχίας

Για τον ελαστικό έλεγχο σε τέμνουσα μπορεί να χρησιμοποιείται το παρακάτω κριτήριο για ένα κρίσιμο σημείο της διατομής:

$$\frac{T_{Ed}}{f_y / \sqrt{3} \gamma_{M0}} \leq 1,00$$

Όπου

$$T_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_v}$$

και  $V_{Ed}$  η τιμή σχεδιασμού της τέμνουσας

$A_v$  η επιφάνεια διάτμηση  $A_v = 2 \cdot A / \pi = 2 \cdot 129 / \pi = 82,24 \text{ cm}^2$

Επομένως για την τέμνουσα  $V_{Ed,y} = 0.10 \text{ kN}$  και  $V_{Ed,z} = 0.665 \text{ kN}$  η παραπάνω σχέση γράφεται αντίστοιχα:

$$T_{Ed,xz} = \frac{V_{Ed,z}}{A_v} \quad \text{και} \quad T_{Ed,xy} = \frac{V_{Ed,y}}{A_v}$$

Άρα για τις διατμητικές τάσεις ισχύει:

$$T_{Ed,xz} = \frac{0,665 \text{ kN}}{82,24 \text{ cm}^2} = 12,15 \text{ kN/m}^2$$

$$T_{Ed,xy} = \frac{0,1 \text{ kN}}{82,24 \text{ cm}^2} = 80,86 \text{ kN/m}^2$$



Η ανάλυση είναι ελαστική, οπότε η συνισταμένη ορθή τάση προκύπτει ως το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους δρυσών τάσεων λόγω αξονικής δύναμης και καμπτικών ροπών. Η κατανομή των ορθών τάσεων μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\sigma_x = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed,y}}{W_{el}} + \frac{M_{Ed,z}}{W_{el}}$$

όπου  $w_{el} = \pi \cdot t \cdot (d - t/2)^2 = 3116,51 \text{ cm}^3$

$$\sigma_x = 1059 \text{ kN}/129,18 \text{ cm}^2 + 262 \text{ kNcm}/3116,51 \text{ cm}^3 + 189 \text{ kNcm}/3116,51 \text{ cm}^3 = 83423,31 \text{ kN/m}^2$$

Ο σύνθετος έλεγχος von Mises, που συνιστά τον έλεγχο της αλληλεπίδρασης κάμψης και διάτμησης, απαιτεί την ικανοποίηση της παρακάτω ανισότητας:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{Ed,xz}^2 + 3\tau_{Ed,xy}^2} \leq f_y / \gamma_{M0}$$

$$\sigma_{VM} = 83424,43 \text{ kN/m}^2$$

Η αντίστοιχη τάση που δίνει το πρόγραμμα ADINA είναι 83264,5 kN/m<sup>2</sup>. Οι δύο τιμές έχουν ελάχιστη απόκλιση της τάξης του 0,19%. Στους παρακάτω Πίνακες 5.4 και 5.5 παρουσιάζονται οι έλεγχοι τάσεων για τις θέσεις του φορέα όπου αναπτύσσεται μέγιστη αξονική, μέγιστη τέμνουσα και μέγιστη καμπτική ροπή στα υποστυλώματα, καθώς και η αντίστοιχη απόκλιση με τις τιμές που δίνει το ADINA.

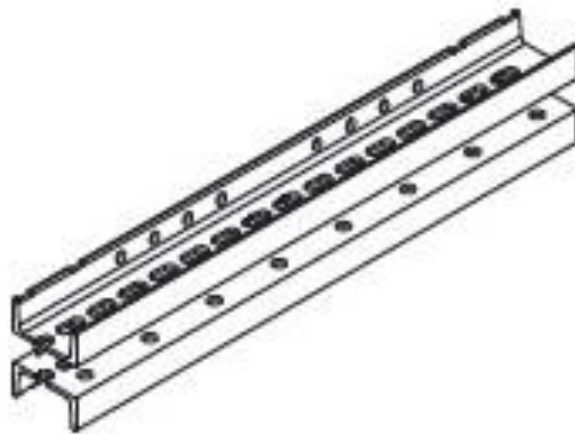
		$N_{Ed}$	$V_{Ed,y}$	$V_{Ed,z}$	$M_{Ed,y}$	$M_{Ed,z}$
Υποστυλώματα	Μέγιστη αξονική	<b>1059,00</b>	0,10	0,67	2,62	1,89
	Μέγιστη τέμνουσα	405,35	<b>19,47</b>	1,65	1,29	0,05
	Μέγιστη καμπτική ροπή	401,20	16,87	5,51	3,91	<b>12,43</b>

Πίνακας 5.4: Εντατικά μεγέθη για διάφορες θέσεις του φορέα στα υποστυλώματα και δοκούς σύμφωνα με το πρόγραμμα ADINA

		$T_{Ed,xz}$	$T_{Ed,xy}$	$\sigma_x$	Τάση von Mises αναλυτικός τρόπος	Τάση von Mises από ADINA	Απόκλιση %
Υποστυλώματα	Μέγιστη αξονική	80,86	12,16	83424,31	83424,43	83264,5	0,19
	Μέγιστη τέμνουσα	200,63	2367,46	31809,81	32074,90	32680,20	-1,89
	Μέγιστη καμπτική ροπή	669,99	2048,88	28323,06	28568,10	28463,30	0,37

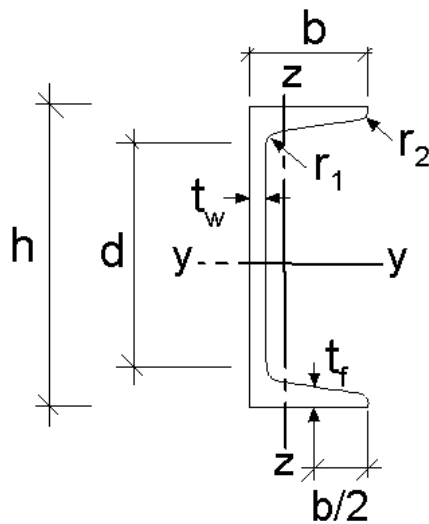
Πίνακας 5.5: Έλεγχος von Mises και σύγκριση αποτελεσμάτων με αυτά του προγράμματος ADINA

## 5.2 Σύνθετες διατομές U



Σχήμα 5.3: Διατομή SRU της εταιρίας PERI

Οι διατομές που χρησιμοποιούνται από την PERI είναι SRU όπως φαίνεται στο σχήμα 5.3. Εμείς, σε αυτή την παράγραφο θα προσπαθήσουμε να προσομοιάσουμε αυτές τις διατομές των υποστυλωμάτων χρησιμοποιώντας σύνθετες διατομές αποτελούμενες από δύο πρότυπα ελάσματα U320. Η απόσταση μεταξύ των ελασμάτων είναι 2cm και η απόσταση μεταξύ των κεντροβαρικών τους αξόνων είναι  $h_0=7,2\text{cm}$ . Το ύψος  $h$  της κάθε διατομής U είναι 320mm και τα αδρανειακά της μεγέθη φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

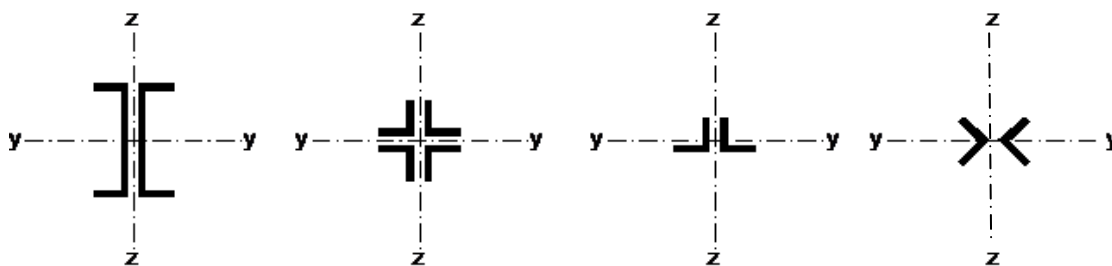


Σχήμα 5.4: Πρότυπη διατομή UPN

		UPN320
h	(mm)	320
b	(mm)	100
$t_w$	(mm)	14
$t_f$	(mm)	17,5
A	(cm <sup>2</sup> )	75,8
d	(mm)	246
$I_y$	(cm <sup>4</sup> )	10870
$W_{el,y}$	(cm <sup>3</sup> )	679
$W_{pl,y}$	(cm <sup>3</sup> )	826
$A_{vz}$	(cm <sup>2</sup> )	47,11
$I_z$	(cm <sup>4</sup> )	597
$W_{el,z}$	(cm <sup>3</sup> )	80,6
$W_{pl,z}$	(cm <sup>3</sup> )	152
It	(cm <sup>4</sup> )	66,7
$I_w \times 10^{-3}$	(cm <sup>6</sup> )	96,1

Πίνακας 5.6: Αδρανειακά μεγέθη πρότυπων διατομών σειράς UPN

Οι δύο πρότυπες διατομές U θα συνδεθούν μεταξύ τους με κοχλίες M20 καθ' ύψος του υποστυλώματος. Το σύνθετο υποστύλωμα θα χωριστεί σε φάνωματα, μήκους  $a=25\text{cm}$  το κάθε ένα και θα υπάρχουν 2 κοχλίες σε κάθε φάνωμα η απόσταση των οποίων στον άξονα z θα ισούται με  $I_z=120\text{mm}$ .



Σχήμα 5.5: Πολυμελείς διατομές με μικρή απόσταση μεταξύ των κυρίων μελών

Σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 θλιβόμενα στοιχεία με πολυμελείς διατομές και κύρια μέλη σε επαφή ή σε μικρή απόσταση μεταξύ τους και συνδεδεμένα μέσω λεπίδων θα πρέπει να ελέγχονται για λυγισμό ως ένα ενιαίο μονομελές μέλος, αγνοώντας την επίδραση της διατμητικής δυσκαμψίας ( $S_v = \infty$ ), όταν ικανοποιούνται οι συνθήκες του Πίνακα 5.9.

Τύπος του μέλους πολυμελούς διατομής	Μέγιστη απόσταση μεταξύ των λεπίδων *)
Μέλη σύμφωνα με το σχήμα 5.5 συνδεδεμένα με κοχλίες ή συγκολλήσεις	15 $i_{min}$
*) κέντρο με κέντρο απόσταση των συνδέσεων $i_{min}$ είναι η ελάχιστη ακτίνα αδρανείας ενός πέλματος ή ενός γωνιακού	

Πίνακας 5.7: Μέγιστες αποστάσεις των λεπίδων σύνδεσης σε πολυμελείς διατομές με μικρή απόσταση μεταξύ των κυρίων μελών

Στην περίπτωση μας  $i_{min} = i_z = 2.81 \text{ cm} \rightarrow 15 \cdot i_{min} = 42,15 \text{ cm}$  άρα μπορούμε να αγνοήσουμε την επίδραση της διαμητρικής δυσκαμψίας στον έλεγχο σε λυγισμό.

Οι ενεργές ροπές αδρανείας των μελών σύνθετης διατομής με λεπίδες σύνδεσης μπορούν να λαμβάνονται ως:

$$I_{\text{eff}} = 0,5h_0^2 A_{\text{ch}} + 2\mu I_{\text{ch}}$$

όπου  $I_{\text{ch}}$  = η εντός επιπέδου ροπή αδρανείας ενός πέλματος

$I_b$  = η εντός επιπέδου ροπή αδρανείας μιας λεπίδας σύνδεσης

$\mu$  = συντελεστής αποδοτικότητας από τον Πίνακα 5.8

Κριτήριο	Συντελεστής αποδοτικότητας $\mu$
$\lambda \geq 150$	0
$75 < \lambda < 150$	$\mu = 2 - \frac{\lambda}{75}$
$\lambda \leq 75$	1,0
όπου $\lambda = \frac{L}{i_0}$ ; $i_0 = \sqrt{\frac{I_1}{2A_{\text{ch}}}}$ ; $I_1 = 0,5h_0^2 A_{\text{ch}} + 2I_{\text{ch}}$	

Πίνακας 5.8: Συντελεστής αποτελεσματικότητας  $\mu$

Από τα παραπάνω υπολογίζουμε:

$$I_1 = 3158.74 \text{ cm}^4$$

$$i_0 = 4.57 \text{ cm} \text{ και } \lambda = 32.86 \text{ οπότε } \rightarrow \mu = 1,0$$

$$\text{Οπότε } I_{\text{eff}} = 3158.74 \text{ cm}^4$$

Χαρακτηριστικά σύνθετου υποστυλώματος		
Ύψος υποστυλώματος (cm)	L	150
Οριζόντια απόσταση κ.β. Πελμάτων (cm)	h <sub>0</sub>	7,2
Ροπή αδράνειας Υποστυλώματος (cm <sup>4</sup> )	I <sub>eff</sub>	3158,74
Μήκος του ενός φατνώματος (cm)	α	25
Αριθμός φατνωμάτων	n	6
Εμβαδόν (cm <sup>2</sup> )	A	151,6
Ελαστική ροπή αντίστασης κατά τον άξονα y (cm <sup>3</sup> )	W <sub>el,y</sub>	1358,75
Ελαστική ροπή αντίστασης κατά τον άξονα z (cm <sup>3</sup> )	W <sub>el,z</sub>	275,12
Ροπή αδράνειας κατά τον ισχυρό άξονα (cm <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub>	21740

Πίνακας 5.9: Χαρακτηριστικά σύνθετου υποστυλώματος, διατομές U320

Για το κρίσιμο φορτίο λυγισμού χωρίς την επιρροή των διατμητικών παραμορφώσεων ισχύει:

$$N_{cr} = N_E = \pi^2 \cdot E \cdot I_{eff} / (\beta \cdot L^2) = 27097,11 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = 1110 \text{ kN}$$

Για  $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0,04$  οι επιδράσεις του λυγισμού μπορούν να αγνοούνται. Στην περίπτωση μας ισχύει

$$\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} = 0,038 \text{ άρα αγνοείται η επίδραση του λυγισμού.}$$

Όπως αναφέραμε και παραπάνω τα κύρια μέλη της διατομής μας βρίσκονται σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους οπότε μπορούμε να μελετήσουμε την διατομή ως ένα ενιαίο μέλος. Τα εντατικά μεγέθη του φορέα είναι:

$$N_{Ed} = 1076.46 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,y} = 0.6 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,z} = 0.91 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,y} = 3.35 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,z} = 0.75 \text{ kNm}$$

Οι τέμνουσες είναι πολύ μικρές και η επίδραση τους μπορεί να αγνοηθεί.

### Έλεγχος σε θλίψη

Η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης  $N_{Ed}$  σε κάθε διατομή πρέπει να ικανοποιεί:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

Για διατομές κατηγορίας 1 η αντοχή σχεδιασμού της διατομής για ομοιόμορφη θλίψη  $N_{c,Rd}$  πρέπει να καθορίζεται όπως παρακάτω:

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = 3562,6 \text{ kN} \quad \text{ικανοποιείται ο έλεγχος.}$$

### Ελαστικός έλεγχος σε οριακή κατάσταση αστοχίας

Ο ελαστικός έλεγχος ορθών τάσεων της διατομής σε διαξονική κάμψη απαιτεί την ικανοποίηση της ανισότητας:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{el,Rd,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{el,Rd,z}} \leq 1$$

Η ορθή τάση  $\sigma_x$  λόγω των καμπτικών ροπών και της αξονικής δύναμης δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_x = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed,y}}{W_{el,y}} + \frac{M_{Ed,z}}{W_{el,z}} = 76198.22 \text{ kN/m}^2$$

Ο ελαστικός έλεγχος διατμητικών τάσεων απαιτεί την ικανοποίηση της ανισότητας:

$$\frac{T_{Ed}}{f_y / \sqrt{3} \gamma_{M0}} \leq 1,00$$

Όπου

$$T_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_v}$$

και  $V_{Ed}$  η τιμή σχεδιασμού της τέμνουσας

$A_v$  η επιφάνεια διάτμησης

Στη διατομή που μελετάμε η τέμνουσα  $V_{Ed,z}$  παραλαμβάνεται σχεδόν αποκλειστικά από τον κορμό της διατομής, ενώ τα πέλματα έχουν αμελητέα συμμετοχή. Συνεπώς η επιφάνεια διατμήσεως θεωρείται η επιφάνεια των κορμών. Άρα για την τέμνουσα  $V_{Ed,z}$  γράφουμε:

$$T_{Ed,xz} = \frac{V_{Ed,z}}{2 \cdot h_w \cdot t_w} = 96.58 \text{ kN/m}^2$$

Για την τέμνουσα  $V_{Ed,y}$ , αυτή παραλαμβάνεται αποκλειστικά από τα πέλματα, χωρίς τη συνεισφορά του κορμού, άρα:

$$\tau_{Ed,xy} = \frac{V_{Ed,y}}{4 \cdot b \cdot t_f} = 107.14 \text{ kN/m}^2$$

Ο σύνθετος έλεγχος von Mises, που συνιστά τον έλεγχο της αλληλεπίδρασης κάμψης και διάτμησης, απαιτεί την ικανοποίηση της παρακάτω ανισότητας:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{Ed,xz}^2 + 3\tau_{Ed,xy}^2} \leq f_y / \gamma_{M0}$$

$$\sigma_{VM} = 76198.63 \text{ kN/m}^2$$

Η τάση που προκύπτει είναι σημαντικά μικρότερη από την τάση διαρροής, οπότε αξίζει να μειώσουμε την διατομή του σύνθετου υποστυλώματος χρησιμοποιώντας U300 αντί για U320 και να δούμε πόσο θα μεταβληθεί η τάση.

Για σύνθετη διατομή αποτελούμενη από δύο πρότυπα ελάσματα U300 προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

Χαρακτηριστικά σύνθετου υποστυλώματος		
Ύψος υποστυλώματος (cm)	L	150
Οριζόντια απόσταση κ.β. Πελμάτων (cm)	$h_0$	7,2
Ροπή αδράνειας Υποστυλώματος (cm <sup>4</sup> )	$I_{eff}$	2514,096
Μήκος του ενός φατνώματος (cm)	$a$	25
Αριθμός φατνωμάτων	n	6
Εμβαδόν (cm <sup>2</sup> )	A	117,6
Ελαστική ροπή αντίστασης κατά τον άξονα y (cm <sup>3</sup> )	$W_{el,y}$	1070,67
Ελαστική ροπή αντίστασης κατά τον άξονα z (cm <sup>3</sup> )	$W_{el,z}$	167,61
Ροπή αδράνειας κατά τον ισχυρό άξονα (cm <sup>4</sup> )	$I_y$	16060

Πίνακας 5.10: Χαρακτηριστικά σύνθετου υποστυλώματος, διατομές U300

Τα εντατικά μεγέθη του φορέα με τη νέα διατομή είναι:

$$N_{Ed} = 1068,22 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,y} = 0.2 \text{ kN}$$

$$V_{Ed,z} = 1,28 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,y} = 3,85 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,z} = 1,22 \text{ kNm}$$

### Ελαστικός έλεγχος σε οριακή κατάσταση αστοχίας

Η ορθή τάση  $\sigma_x$  λόγω των καμπτικών ροπών και της αξονικής δύναμης δίνεται από την σχέση:

$$\sigma_x = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed,y}}{W_{el,y}} + \frac{M_{Ed,z}}{W_{el,z}} = 101685,1 \text{ kN/m}^2$$

Για τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται ισχύει:

$$\tau_{Ed,xz} = \frac{V_{Ed,z}}{2 \cdot h_w \cdot t_w} = 201,45 \text{ kN/m}^2 \quad \text{και} \quad \tau_{Ed,xy} = \frac{V_{Ed,y}}{4 \cdot b \cdot t_f} = 50 \text{ kN/m}^2$$

Ο σύνθετος έλεγχος von Mises απαιτεί την ικανοποίηση της παρακάτω ανισότητας:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{Ed,xz}^2 + 3\tau_{Ed,xy}^2} \leq f_y / \gamma_{M0}$$

$$\sigma_{VM} = 101685,83 \text{ kN/m}^2$$

Στη συνέχεια πραγματοποιούμε σύνθετο έλεγχο τάσεων για σωληνωτές και σύνθετες διατομές με πρότυπα ελάσματα U, για ίδιο εμβαδόν A, με στόχο να συγκρίνουμε την απόδοση της σύνθετης διατομής σε σχέση με την σωληνωτή διατομή. Τα αποτελέσματα των ελέγχων φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Εμβαδόν διατομής υποστυλώματος A=117,6 cm <sup>2</sup>		
	Σύνθετη διατομή με U300	Σωληνωτή διατομή
Τάσεις von Mises (kN/m <sup>2</sup> )	101685,83	91119,64
Μέγιστο ποσοστό εκμετάλλευσης διατομής %	43,27	38,77

Πίνακας 5.11: Σύγκριση τάσεων von Mises, για διαφορετικό τύπο διατομής με ίδιο εμβαδόν A

Εμβαδόν διατομής υποστυλώματος A=151,6 cm <sup>2</sup>		
	Σύνθετη διατομή με U320	Σωληνωτή διατομή
Τάσεις von Mises (kN/m <sup>2</sup> )	76198,63	71016,32
Μέγιστο ποσοστό εκμετάλλευσης διατομής %	32,42	30,22

Πίνακας 5.12: Σύγκριση τάσεων von Mises, για διαφορετικό τύπο διατομής με ίδιο εμβαδόν A



Όπως ήταν αναμενόμενο η σωληνωτή διατομή παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά από τη σύνθετη διατομή αποτελούμενη από δύο πρότυπα ελάσματα U. Συγκεκριμένα υπό τα στατικά φορτία στο δυσμενέστερο υποστύλωμα εμβαδού  $117,6\text{cm}^2$  αναπτύσσεται τάση  $101685,83\text{ kN/m}^2$  όταν χρησιμοποιείται η σύνθετη διατομή και  $91119,64\text{ kN/m}^2$  όταν χρησιμοποιείται η σωληνωτή.

Όταν αυξήσουμε το εμβαδό των υποστυλωμάτων σε  $151,6\text{ cm}^2$  παρατηρούμε μία σύγκλιση στις τιμές των τάσεων για τους δύο τύπους διατομών που εξετάζονται, αφού στη σύνθετη διατομή αναπτύσσεται τάση  $76198,63\text{ kN/m}^2$  ενώ στη σωληνωτή  $71016,32\text{ kN/m}^2$ .

Οι τάσεις που αναπτύσσονται απέχουν αρκετά από το όριο διαρροής του υλικού καθιστώντας την επιλογή οποιασδήποτε διατομής ασφαλή. Οι σύνθετες διατομές παρουσιάζουν ικανοποιητική αντοχή σε σύγκριση με τις σωληνωτές κάτι που ήταν αναμενόμενο λόγω της μόρφωσης του φορέα με πυκνά διατεταγμένα οριζόντια μέλη που οδηγεί σε μικρά μήκη λυγισμού των υπό εξέταση υποστυλωμάτων και λόγω της φύσης της φόρτισης με προεξέχουσα την αξονική δύναμη.

Μπορούν να αποτελέσουν μία πολύ καλή εναλλακτική για τις σωληνωτές διατομές αν αναλογιστούμε την διευκόλυνση που επιτυγχάνεται στη μόρφωση των συνδέσεων με τη χρησιμοποίησή τους.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## Γενικά συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία κληθήκαμε να μελετήσουμε ένα μεταλλικό πύργο που σχεδιάζεται προκειμένου να αποτελέσει τμήμα ενός συστήματος προσωρινής υποστύλωσης του καταστρώματος της υπό κατασκευή τοξωτής μεταλλικής γέφυρας T4 στην εθνική οδό Τρίπολης Καλαμάτας. Το έργο ανέλαβε η εταιρεία κατασκευής ικριωμάτων PERI και με βάση κάποια δεδομένα από την προμελέτη που αφορούν τη γεωμετρία του φορέα και τα επιβαλλόμενα από το κατάστρωμα φορτία προχωρήσαμε σε αναζήτηση πιθανών τρόπων διαστασιολόγησης της κατασκευής.

Σε πρώτη φάση αναζητήσαμε τους τύπους των διατομών που χρησιμοποιεί η εταιρεία σε ανάλογες κατασκευές μέσω της ιστοσελίδας της προκειμένου να γίνει μία πρώτη απόπειρα για την εύρεση κατάλληλων διατομών που θα φέρουν με επάρκεια τα φορτία που μεταβιβάζει το κατάστρωμα της γέφυρας μέσω του εφεδράνου και της πλάκας φόρτισης στο μεταλλικό πύργο. Παράλληλα μελετήσαμε τις κανονιστικές διατάξεις που αφορούν μεταλλικούς πύργους, ιστούς και καπνοδόχους από τον ευρωκώδικα 3 μέρος 3-1 ενώ έγινε και μία γενικότερη αναζήτηση για τις κατασκευές ικριωμάτων στο διαδίκτυο προκειμένου να πληροφορηθούμε για την εξέλιξη σχετικά με αυτού του τύπου τις κατασκευές καθώς και τις σύγχρονες απαιτήσεις της αγοράς.

Στη συνέχεια της διπλωματικής μας εργασίας επιχειρήσαμε να προχωρήσουμε στην προσομοίωση του φορέα μας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Σε πρώτη φάση κατασκευάσαμε το προσομοίωμα του συστήματος εφεδράνου-πλάκας φόρτισης ενώ οι στηρίξεις του φορέα ήταν ελατήρια ίδιας σταθεράς και οι αντιδράσεις των ελατηρίων ήταν οι δράσεις επί του μεταλλικού πύργου. Στη συνέχεια υπολογίσαμε το φορτίο του ανέμου όπως προβλέπεται από τις κανονιστικές διατάξεις και μελετήσαμε το πρόβλημα των συνοριακών συνθηκών του φορέα μας. Ο φορέας μας εδράζεται επί πλάκας σκυροδέματος και οι ολισθήσεις αποφεύγονται λόγω της ανάπτυξης δυνάμεων τριβής μεταξύ της πλάκας και του πύργου. Οι συνοριακές συνθήκες που τελικώς επελέγησαν παρουσιάζονται στην παράγραφο 2.3.2.

Σε επόμενη φάση προχωρήσαμε στη μόρφωση του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Η διαδικασία αυτή ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα παρ' όλες τις αυτοματοποιημένες λειτουργίες που έχει το πρόγραμμα καθώς η εισαγωγή και των 678 σημείων του φορέα έπρεπε να γίνει με την εισαγωγή των συντεταγμένων καθενός εξ' αυτών ξεχωριστά ενώ και η εισαγωγή των 908 γραμμών ορίζεται από τα σημεία αρχής και τέλους για καθεμία γραμμή ξεχωριστά. Για την προσομοίωση του φορέα χρησιμοποιήθηκαν ραβδωτά στοιχεία τα οποία υστερούν σε ακρίβεια έναντι των επιφανειακών εξαλείφοντας έτσι το όποιο πλεονέκτημα σε ακρίβεια του προγράμματος σε σχέση με άλλα ανταγωνιστικά κάτι που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επιλογή του συγκεκριμένου προγράμματος για την προσομοίωση ενός τέτοιου φορέα ήταν εσφαλμένη καθότι κατέστησε την προσομοίωση εξαιρετικά χρονοβόρα. Δυσχέρεια παρουσιάστηκε και κατά τη διακριτοποίηση του φορέα αφού αυτή χρειάστηκε να επαναληφθεί αρκετές φορές ώστε να συμπέσουν οι κόμβοι του προσομοιώματος με τους κόμβους του φορέα αφού αυτό δεν γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα και πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη εντολή.

Αφού επιλύθηκαν οι δυσχέρειες που αντιμετωπίζαμε σχετικά με τη χρήση του προγράμματος προχωρήσαμε στην διερεύνηση εναλλακτικών τρόπων για την προσομοίωση του φορέα μας. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν οι εξής περιπτώσεις και αφορούν το πλήθος και το είδος των συνδέσμων δυσκαμψίας:

- Πύργος με συνδέσμους  $\Lambda$  χωρίς εκκεντρότητα στις όψεις και το εσωτερικό της κατασκευής
- Πύργος με συνδέσμους  $\Lambda$  χωρίς εκκεντρότητα μόνο στις όψεις της κατασκευής
- Πύργος με συνδέσμους  $X$  με εξασφάλιση της συνέχειας υλικού μόνο στις όψεις της κατασκευής
- Πύργος χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας
- Πύργος χωρίς συνδέσμους δυσκαμψίας με μειωμένο πλήθος οριζοντίων μελών

Σε αυτές τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκαν σωληνωτές διατομές η χρήση των οποίων απαντάται συχνά σε τέτοια έργα, χρησιμοποιήθηκε ελαστοπλαστικό υλικό που προσομοιώνει ένα τυπικό δομικό χάλυβα ενώ οι αναλύσεις ήταν μη γραμμικές γεωμετρίας και υλικού κατά τις οποίες το φορτίο μεταβάλλεται από βήμα σε βήμα μέχρι την οριστική απώλεια της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής.

Άλλες παράμετροι που εξετάστηκαν στις αναλύσεις ήταν η επίδραση της ποιότητας του υλικού, της γεωμετρικής ατέλειας και του τύπου των διατομών στη συμπεριφορά της κατασκευής ώστε να αποφανθούμε για την καταλληλότητα ή όχι της μόρφωσης του φορέα σύμφωνα με τα πρότυπα της

PERI τόσο σε ότι αφορά την προτεινόμενη διάταξη των μελών αλλά και της επιλογής του τύπου των διατομών. Η επίδραση της ποιότητας του υλικού ήταν καταλυτική σε ότι αφορά τη φέρουσα ικανότητα του φορέα αφού αύξηση της ποιότητας του υλικού είχε ανάλογη επίδραση στη φέρουσα ικανότητα του φορέα. Σημαντική ήταν και η επίδραση της γεωμετρικής ατέλειας η οποία πρέπει απαραίτητως να λαμβάνεται υπ' όψη στο σχεδιασμό κατά την προσομοίωση της κατασκευής.

Η προτεινόμενη συνδεσμολογία των μελών του φορέα ήταν τέτοια που κατέστησε την επιλογή οποιουδήποτε τύπου διατομής αποδεκτό αφού η συμπεριφορά των σωληνωτών διατομών δεν παρουσίασε ιδιαίτερα σημαντικές αποκλίσεις σε σχέση με τις συμπαγείς ορθογωνικές.

Αυτό καθιστά και την προτεινόμενη συνδεσμολογία και την πλέον κατάλληλη σε σχέση με τις εναλλακτικές που μελετήθηκαν αφού εξασφαλίζει τη μέγιστη αντοχή στη γραμμικά ελαστική περιοχή, μικρές μετακινήσεις μέσω της αυξημένης ακαμψίας και κυρίως βοηθά στη διατήρηση μικρών διατομών εάν χρησιμοποιηθεί χάλυβας υψηλής ποιότητας ενώ τέλος κρίνεται και πιο συμφέρουσα οικονομικά σε σχέση με τη χρησιμοποίηση χιαστί συνδέσμων.



# Βιβλιογραφία

---

- [1] Ι. Βάγιας, Σιδηρές Κατασκευές, Ανάλυση και διαστασιολόγηση, Κλειδάριθμος, 2009
- [2] Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, Κλειδάριθμος 2008
- [3] Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, Σιδηρές Κατασκευές, Παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Κλειδάριθμος, 2008
- [4] Ιωάννης Χ. Ερμόπουλος, Σιδηρές και Σύμμικτες Γέφυρες, Κλειδάριθμος, 2008
- [5] Χ. Γαντές, Σημειώσεις του μαθήματος 9<sup>ου</sup> εξαμήνου Ε.Μ.Π «ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»
- [6] Ευρωκώδικας 3 : Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα, Μέρος 1-1 : Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια, EN 1993-1-1, 2005
- [7] Ευρωκώδικας 3 : Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα, Μέρος 3.1 : Πύργοι, ιστοί και καπνοδόχοι – Πύργοι και ιστοί, EN 1993-3-1, 2005
- [8] Ιωάννης Χ. Ερμόπουλος, Ευρωκώδικας 1, Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις επί των κατασκευών, Ερμηνευτικά σχόλια και παραδείγματα εφαρμογής, Κλειδάριθμος, 2005
- [9] Μ. Παπαδρακάκης, Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, Παπασωτηρίου, 2001
- [10] Adina Systems 8.5 Online Manuals, ADINA R&D, Inc (February 2008)

- 
- [11] Διπλωματική εργασία του Κωνσταντίνου Α. Φραγκόπουλου, Αναλυτική και αριθμητική διερεύνηση προβλημάτων διατμητικού λυγισμού, Αθήνα, 2005
- [12] Άρθρο “An Analytical Criterion for Buckling Strength of Built-up Compression Members”, Aslani, 1991
- [13] <http://www.peri.de>