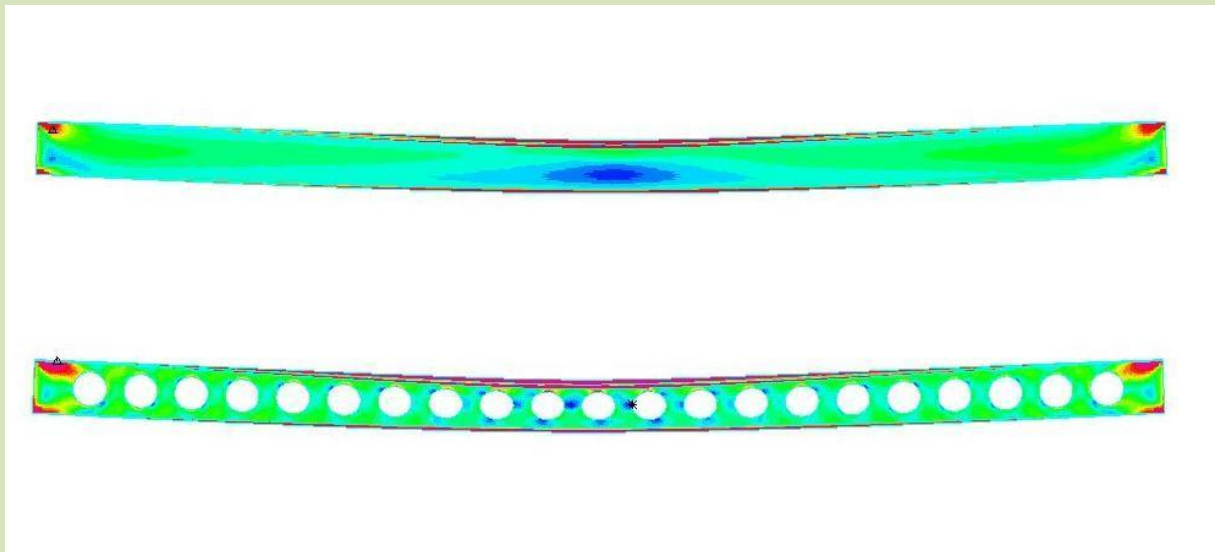




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ, ΤΟΠΙΚΟΥ
ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΣΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ ΔΟΚΟΥΣ ΜΕ
ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ**



Θεοδώρα Μίντζια

Επιβλέπων: Αναπλ. Καθ. Ε.Μ.Π. Δρ. Χάρης Γαντές

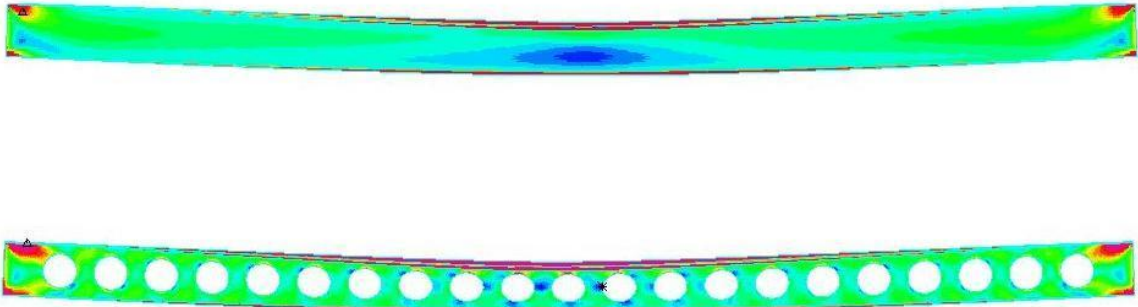
Αθήνα, Ιούλιος 2010



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

Διπλωματική Εργασία

**ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ, ΤΟΠΙΚΟΥ
ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΣΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ ΔΟΚΟΥΣ ΜΕ
ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ**



Θεοδώρα Μίντζια

Επιβλέπων: Αναπλ. Καθ. Ε.Μ.Π. Δρ. Χάρης Γαντές

Αθήνα, Ιούλιος 2010

Στους γονείς μου,
Δημήτρη και Χριστίνα,
που με στηρίζουν πάντα
και για όλα όσα μου έχουν προσφέρει

Ευχαριστώ...

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί το πέρας της πενταετούς φοίτησής μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την ευκαιρία αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στη συγκεκριμένη προσπάθεια.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Χάρη Γαντέ, Αναπληρωτή Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, για την πολύτιμη βοήθειά του και την υποστήριξή του στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Γ. Ιωαννίδη και το Λέκτορα κ. Ι. Ραυτογιάννη της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου για την αμέριστη συμπαράσταση και την ανεκτίμητη προσφορά τους.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

**Διπλωματική Εργασία
της φοιτήτριας Θεοδώρας Μίντζια**

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π. Δρ. Χάρης Γαντές

**ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΛΕΥΡΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ, ΤΟΠΙΚΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΚΑΙ
ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΣΕ ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ ΔΟΚΟΥΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΔΙΑΚΕΝΑ ΚΟΡΜΟΥ**

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των φαινομένων του πλευρικού λυγισμού, του τοπικού λυγισμού και της πλαστικοποίησης σε χαλύβδινες δοκούς διατομής διπλού ταυ, με και χωρίς διάκενα κορμού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι προδιαγραφές του Ευρωκώδικα 3, ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκε ένα μεγάλο πλήθος αριθμητικών αναλύσεων στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA ώστε να είναι φανερή η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγική αναφορά στα είδη των διατομών που χρησιμοποιούνται στις μεταλλικές κατασκευές και στις διαδικασίες κατασκευής τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζονται οι πιθανές μορφές αστοχίας μιας χαλύβδινης συμπαγούς δοκού διατομής διπλού ταυ που κάμπτεται υπό την επίδραση ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου, καθώς αυτό αποτελεί το αντικείμενο των αριθμητικών αναλύσεων για τα επόμενα κεφάλαια. Παρουσιάζονται βασικές έννοιες της ελαστικής κάμψης δοκών, περιγράφονται οι πιθανές γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν για τη μελέτη των χαλύβδινων δοκών και εξετάζονται οι πιθανοί τρόποι αστοχίας τους, αφού προηγηθεί η κατάταξη των διατομών σε κατηγορίες με βάση τον Ευρωκώδικα 3. Γίνεται αναφορά στις κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 για τον υπολογισμό της αντοχής των δοκών.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην επιλογή των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των αριθμητικών αναλύσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για περιπτώσεις αστοχίας συμπαγών δοκών λόγω σχηματισμού πλαστικού

μηχανισμού κατάρρευσης, ενώ ταυτόχρονα γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αναμενόμενα αποτελέσματα από τη θεωρία μη γραμμικότητας υλικού.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για περιπτώσεις πλευρικού λυγισμού δοκών, με παράλληλη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα του Ευρωκώδικα 3. Εξετάζονται διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των φορέων, όπως η θέση εφαρμογής του φορτίου και το μέγεθος της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αριθμητικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για φορείς στους οποίους εκδηλώνεται τοπικός λυγισμός, ο οποίος αποτελεί τον κύριο παράγοντα αστοχίας τους.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αριθμητικές αναλύσεις για φορείς στους οποίους εμφανίζεται αλληλεπίδραση των μορφών αστοχίας που έχουν περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια.

Στο όγδοο κεφάλαιο αναφέρονται οι κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 για τον έλεγχο των κυψελωτών δοκών (ή δοκών με διάκενα κορμού), ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζεται και το θεωρητικό υπόβαθρο για τη στατική τους αντιμετώπιση.

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για δοκούς με πολλαπλές κυκλικές οπές και διερευνώνται οι πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας τους.

Στο δέκατο κεφάλαιο εξετάζεται μέσω αριθμητικών αναλύσεων η σταδιακή απομείωση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού και της φέρουσας ικανότητας δοκών με κυκλικές οπές, μέσω της αύξησης της διαμέτρου των κυκλικών οπών. Επίσης, διερευνώνται, μέσω αριθμητικών αναλύσεων, οι πιθανές μορφές αστοχίας των δοκών.

Στο ενδέκατο 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
By Theodora Mintzia

Supervisor: Dr. Charis Gantes, Associate Professor N.T.U.A

INTERACTION OF LATERAL-TORSIONAL BUCKLING, LOCAL BUCKLING AND YIELDING OF STEEL BEAMS WITH AND WITHOUT WEB OPENINGS

Abstract

The objective of the present diploma thesis is to investigate the phenomena of lateral-torsional buckling, local buckling and yielding of steel beams, with I-cross sections, with and without web openings. For this purpose, the recommendations of Eurocode 3 were used, while a large number of numerical analyses were carried out using the Finite Element software ADINA, in order to compare the results.

The first chapter constitutes an introduction to the types of profiles used in steel structures and to their manufacturing process.

The second chapter presents the modes of failure of a solid steel beam under the influence of transverse distributed line load, which constitutes the object of numerical analyses in the following chapters. There is a reference to the basic principles of bending, a description of the linear and non-linear analyses which can be applied for the study of steel beams and a description of the modes of failure, after the classification of cross sections in categories according to Eurocode 3. The normative recommendations of Eurocode 3 are also presented.

The third chapter consists of the presentation of the Finite Element software ADINA, which is used in all analyses. Particular emphasis is given to the application of the appropriate boundary conditions used in numerical simulations.

The fourth chapter presents the results of numerical analyses for beams which fail due to plastic collapse. There is also a comparison between them and the results obtained by the theory of material non-linearity.

In the fifth chapter, the numerical analyses of lateral-torsional buckling are presented, while the results are compared to the results given by Eurocode 3. There is an examination of various factors influencing the behavior of beams, such as the position of application of distributed line load and the size of the initial geometric imperfection.

The sixth chapter presents the results of numerical analyses where local buckling appears and causes failure of the steel member.

The seventh chapter presents the results of numerical analyses where there is an interaction of modes of failure described in previous chapters.

In the eighth chapter, the recommendations of Eurocode 3 concerning the resistance and modes of failure of castellated beams are presented, while the theoretical basis for their static behavior is approached.

The ninth chapter deals with the numerical analyses of castellated beams and their possible modes of failure.

The tenth chapter looks into the progressive reduction of the critical buckling load and the resistance of castellated beams by increasing the diameter of holes. Furthermore, numerical analyses are used to investigate the failure of castellated beams.

The eleventh chapter presents the general conclusions resulted from the diploma thesis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
Εισαγωγή	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
Μορφές αστοχίας καμπτόμενης χαλύβδινης συμπαγούς δοκού	29
2.1 Τεχνική θεωρία κάμψης	29
2.2 Ελαστική και πλαστική ανάλυση	35
2.2.1 Ελαστική ανάλυση	35
2.2.2 Πλαστική ανάλυση	37
2.3 Μέθοδοι ανάλυσης και ελέγχου	38
2.4 Κατάταξη διατομών	40
2.5 Αστοχία λόγω σχηματισμού πλαστικού μηχανισμού κατάρρευσης	45
2.6 Ελαστικός έλεγχος σε οριακή κατάσταση αστοχίας	51
2.7 Πλαστικός έλεγχος σε οριακή κατάσταση αστοχίας	51
2.7.1 Πλαστικός έλεγχος σε τέμνουσα	51
2.7.2 Έλεγχος απομείωσης της αντοχής σε ροπή κάμψης λόγω παρουσίας τέμνουσας	52
2.7.3 Πλαστικός έλεγχος σε μονοαξονική κάμψη	53
2.7.4 Πλαστικός έλεγχος σε διαξονική κάμψη	53
2.8 Λυγισμός -Δρόμοι ισορροπίας	54
2.8.1 Είδη λυγισμού	54
2.8.2 Οριακό σημείο-Σημείο διακλάδωσης-Μεταλυγισμική αντοχή	54

2.9 Πλευρικός λυγισμός καμπτόμενης δοκού	57
2.9.1 Αντοχή των μελών σε πλευρικό λυγισμό	60
2.9.1.1 Καμπύλες πλευρικού λυγισμού	60
2.9.1.2 Καμπύλες πλευρικού λυγισμού για ελατές διατομές ή ισοδύναμες συγκολλητές διατομές	62
2.9.1.3 Υπολογισμός ελαστικής κρίσιμης ροπής πλευρικού λυγισμού	54
2.10 Τοπικός λυγισμός καμπτόμενης δοκού	69
2.11 Ανακεφαλαίωση	72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Παρουσίαση του προγράμματος πεπερασμένων

στοιχείων ADINA **73**

3.1 Παρουσίαση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA για ανάλυση καμπτόμενης δοκού με στοιχεία κελύφους (shell elements)	73
3.2 Αποτελέσματα κρίσιμου φορτίου πλευρικού λυγισμού για διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης αμφιέριστης δοκού	86
3.3 Αποτελέσματα μη γραμμικών αναλύσεων υλικού και γεωμετρίας για διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης αμφιέριστης δοκού	101
3.4 Επεξήγηση της συμπεριφοράς του φορέα για άρθρωση και στα 2 άκρα της δοκού	114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πλαστικοποίηση αμφιέριστης συμπαγούς δοκού **117**

4.1 Δημιουργία πλαστικού μηχανισμού κατάρρευσης	117
4.2 Αμφιέριστη δοκός μήκους 10m διατομής κατηγορίας 1 πλευρικά	

εξασφαλισμένη καθ' όλο το μήκος της	118
4.2.1 Έλεγχος διάτμησης	122
4.2.2 Έλεγχος έναντι πλευρικού λυγισμού	122
4.2.3 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του πλευρικά μη εξασφαλισμένου φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	124
4.2.4 Μη γραμμική ανάλυση υλικού για τον πλευρικά εξασφαλισμένο φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	128
4.2.5 Σύγκριση δρόμου ισορροπίας ADINA με τον αναλυτικό δρόμο ισορροπίας	141
4.3 Αμφιέρειστη δοκός μήκους 5m διατομής κατηγορίας 1	142
4.3.1 Έλεγχος διάτμησης	144
4.3.2 Έλεγχος έναντι πλευρικού λυγισμού	144
4.3.3 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	145
4.3.4 Μη γραμμική ανάλυση υλικού με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	149
4.3.5 Σύγκριση δρόμου ισορροπίας ADINA με τον αναλυτικό δρόμο ισορροπίας	158

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Πλευρικός λυγισμός αμφιέρειστης συμπαγούς δοκού 159

5.1 Αμφιέρειστη δοκός μήκους 12m διατομής κατηγορίας 1	159
5.1.1 Έλεγχος διάτμησης	161
5.1.2 Έλεγχος έναντι πλευρικού λυγισμού	161
5.1.3 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	162
5.1.4 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	168

5.1.5 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	171
5.1.6 Συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας για όλες τις αναλύσεις	188
5.1.7 Επιρροή της ατέλειας στη συμπεριφορά του φορέα	189
5.1.8 Επιρροή της θέσης εφαρμογής του φορτίου στη συμπεριφορά του φορέα	191
5.2 Αμφιέρειστη δοκός μήκους 15m διατομής κατηγορίας 1	194
5.2.1 Έλεγχος διάτμησης	195
5.2.2 Έλεγχος έναντι πλευρικού λυγισμού	195
5.2.3 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	196
5.2.4 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	198
5.2.5 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	200
5.2.6 Συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας για όλες τις αναλύσεις	208
5.2.7 Επιρροή της ατέλειας στη συμπεριφορά του φορέα	209
5.2.8 Επιρροή της θέσης εφαρμογής του φορτίου στη συμπεριφορά του φορέα	210
5.3 Αμφιέρειστη δοκός μήκους 18m διατομής κατηγορίας 1	212
5.3.1 Έλεγχος διάτμησης	213
5.3.2 Έλεγχος έναντι πλευρικού λυγισμού	213
5.3.3 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	214
5.3.4 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	216
5.3.5 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το	

πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	218
5.3.6 Συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας για όλες τις αναλύσεις	226
5.3.7 Επιρροή της ατέλειας στη συμπεριφορά του φορέα	227
5.3.8 Επιρροή της θέσης εφαρμογής του φορτίου στη συμπεριφορά του φορέα	228
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	
Τοπικός λυγισμός αμφιέριστης συμπαγούς δοκού	231
6.1 Αμφιέριστη δοκός μήκους 20m διατομής κατηγορίας 4	231
6.1.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	233
6.1.2 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	235
6.1.3 Σύγκριση δρόμων ισορροπίας για διαφορετικά πάχη διατομών κατηγορίας 4	241
6.2 Αμφιέριστη δοκός μήκους 14m διατομής κατηγορίας 4	247
6.2.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	248
6.2.2 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	250
6.2.3 Σύγκριση δρόμων ισορροπίας για διαφορετικά πάχη διατομών κατηγορίας 4	255
6.3 Αμφιέριστη δοκός μήκους 8m διατομής κατηγορίας 4	264
6.3.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	264
6.3.2 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	267

6.3.3 Σύγκριση δρόμων ισορροπίας για διαφορετικά πάχη διατομών κατηγορίας 4	274
6.4 Ανακεφαλαίωση	280

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Αλληλεπίδραση μορφών αστοχίας αμφιέριστης συμπαγούς δοκού **281**

7.1 Αλληλεπίδραση πλευρικού λυγισμού και τοπικού λυγισμού	281
7.1.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	282
7.1.2 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	284
7.1.3 Επιρροή της ατέλειας στη συμπεριφορά του φορέα	291
7.2 Αλληλεπίδραση πλευρικού λυγισμού και διαρροής	293
7.2.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	294
7.2.2 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	295
7.2.3 Επιρροή της ατέλειας στη συμπεριφορά του φορέα	301

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Ανάλυση των κυψελωτών δοκών με βάση τον Ευρωκώδικα 3 **303**

8.1 Μέθοδος ανάλυσης	303
8.2 Μορφές αστοχίας κυψελωτών δοκών	304
8.3 Αντοχή δοκών με πολυγωνικά ανοίγματα στον κορμό τους	306

8.4 Αντοχή δοκών με κυκλικά ανοίγματα στον κορμό τους	311
8.5 Παράδειγμα δοκού με πολλαπλά κυκλικά ανοίγματα στον κορμό της	317
8.5.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δοκού και γεωμετρικοί περιορισμοί	317
8.5.2 Εντατικά μεγέθη σχεδιασμού	318
8.5.3 Αντοχή απλών ταυ στις τομές aa	318
8.5.4 Αντοχή απλών ταυ στις τομές bb	319
8.5.5 Αντοχή συμπαγών τμημάτων του κορμού	321
8.5.6 Αντοχή του κορμού στις στηρίξεις	322

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Σύγκριση κανονιστικών διατάξεων και αριθμητικών αναλύσεων για την αστοχία δοκών με κυκλικές οπές

323

9.1 Προσομοίωση δοκού με κυκλικές οπές στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA	323
9.1.1 Πρώτη μέθοδος	323
9.1.2 Δεύτερη μέθοδος	327
9.2 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για πλευρικό λυγισμό δοκού μήκους 20m με κυκλικές οπές	332
9.2.1 Γεωμετρικά-αδρανειακά χαρακτηριστικά και αντοχή της αντίστοιχης συμπαγούς δοκού	332
9.2.2 Γραμμική ανάλυση λυγισμού και μη γραμμικές	

αναλύσεις στο ADINA για την αντίστοιχη συμπαγή δοκό	335
9.2.3 Έλεγχος κυψελωτής δοκού σε πλευρικό λυγισμό	337
9.2.4 Προσομοίωση κυψελωτής δοκού στο ADINA	340
9.2.5 Γραμμική ανάλυση λυγισμού της κυψελωτής δοκού στο ADINA	342
9.2.6 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας του φορέα	348
9.2.7 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας του φορέα	349
9.2.8 Συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας για όλες τις αναλύσεις της κυψελωτής δοκού	361
9.2.9 Συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας για τις μη γραμμικές αναλύσεις συμπαγούς και κυψελωτής δοκού	362
9.3 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για την πλευρικά εξασφαλισμένη δοκό μήκους 20m με κυκλικές οπές	364
9.3.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού της κυψελωτής δοκού 20m με πλευρικές εξασφαλίσεις στο ADINA	364
9.3.2 Μορφή αστοχίας της κυψελωτής δοκού 20m με πλευρικές εξασφαλίσεις	378
9.3.3 Μη γραμμική ανάλυση υλικού της κυψελωτής δοκού 20m με πλευρικές εξασφαλίσεις στο ADINA	382
9.4 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για τοπικό λυγισμό της δοκού μήκους 20m με κυκλικές οπές	392
9.4.1 Αστοχία της κυψελωτής δοκού λόγω τοπικού λυγισμού στα άκρα της	392
9.4.2 Αστοχία της κυψελωτής δοκού λόγω αλληλεπίδρασης διαρροής και τοπικού λυγισμού στο μέσο της	405

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10**Αριθμητικές αναλύσεις δοκών με κυκλικές οπές 417**

10.1 Αμφιέρειστη κυψελωτή δοκός μήκους 8,1m	417
10.1.1 Αποτελέσματα αναλύσεων για πλευρικό λυγισμό κυψελωτής δοκού	417
10.1.2 Αποτελέσματα αναλύσεων για συνδυασμό πλευρικού και τοπικού λυγισμού κυψελωτής δοκού I	429
10.1.3 Αποτελέσματα αναλύσεων για συνδυασμό πλευρικού και τοπικού λυγισμού κυψελωτής δοκού II	438
10.2 Αμφιέρειστη κυψελωτή δοκός μήκους 13,7m	440
10.2.1 Αποτελέσματα αναλύσεων για πλευρικό λυγισμό κυψελωτής δοκού	440
10.2.2 Αποτελέσματα αναλύσεων για τοπικό λυγισμό κυψελωτής δοκού	445
10.3 Αμφιέρειστη κυψελωτή δοκός μήκους 20m	454
10.3.1 Αποτελέσματα αναλύσεων για πλευρικό λυγισμό κυψελωτής δοκού	454
10.3.2 Αποτελέσματα αναλύσεων για τοπικό λυγισμό κυψελωτής δοκού	457

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11**Γενικά Συμπεράσματα 461****Βιβλιογραφία 465**

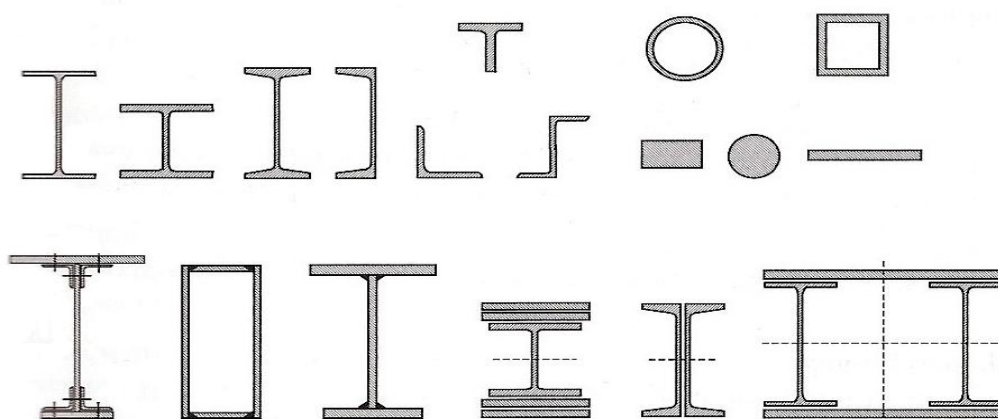
Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Στο παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τύποι των διατομών που χρησιμοποιούνται στις μεταλλικές κατασκευές και οι διαδικασίες κατασκευής τους. Γίνεται εκτενέστερη παρουσίαση των κυψελωτών δοκών ή δοκών με διάκενα κορμού (castellated beams) που αποτελούν σημαντικό μέρος της εργασίας αυτής.

Πρότυπες ελατές διατομές θερμής έλασης

Πρόκειται για τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διατομές, οι οποίες παράγονται σε διάφορες διαστάσεις και πάχη, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αντιμετώπιση των κατασκευαστικών και υπολογιστικών απαιτήσεων για μεγάλο εύρος κατασκευών. Οι πλέον συνήθεις διατομές είναι τα διπλά ταυ (υψίκورμα ή πλατύπελμα), οι διατομές μορφής U, Z, τα ισοσκελή και ανισοσκελή γωνιακά και οι διατομές μορφής ταυ, οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορες φάσεις της κατασκευής και συναρμολόγησης ενός μεταλλικού σκελετού. Ξεχωριστή κατηγορία πρότυπων ελατών διατομών που πλέον με τη ραγδαία εξέλιξη στην τεχνολογία των συγκολλήσεων χρησιμοποιούνται ευρέως, είναι οι κοίλες διατομές (κυκλικές, τετραγωνικές, ορθογωνικές, εξαγωνικές).



Σχήμα 1.1

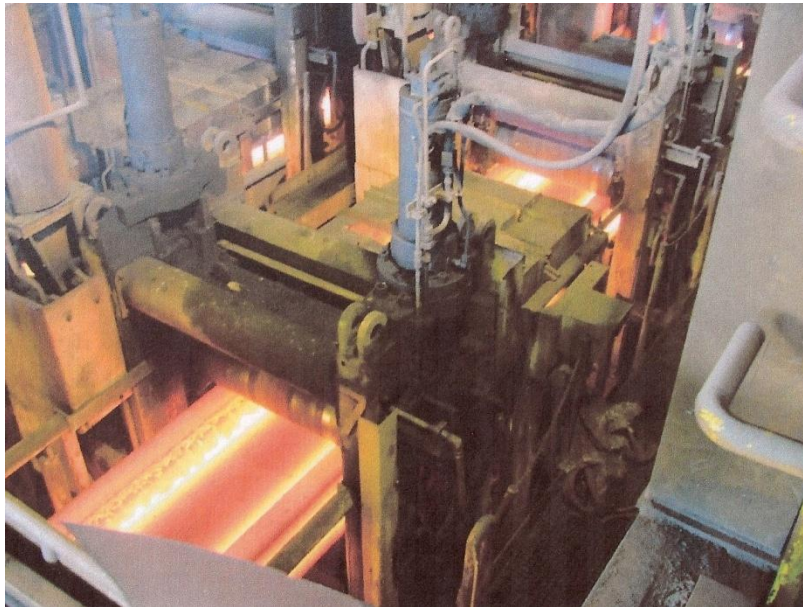
Πρότυπες και σύνθετες χαλύβδινες διατομές θερμής έλασης

Η θερμή έλαση είναι η διαδικασία κατά την οποία γίνεται μορφοποίηση του μετάλλου με κατάλληλες διατάξεις όταν αυτό έχει πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό επιτυγχάνεται αρχικά μέσω της χύτευσης του μετάλλου, η οποία γίνεται σε κλίβανους (το προϊόν της είναι ρευστό μέταλλο) και στη συνέχεια της στερεοποιήσεώς του με διάφορες μεθόδους.

Το μέταλλο μέσα σε έναν κλίβανο οξυγόνου μετατρέπεται αρχικά σε ρευστή κατάσταση και μετά το διαχωρισμό του καθαρού μετάλλου από τις διάφορες προσμίξεις του, ξεκινάει η διαδικασία της στερεοποιήσεώς του σε υγρόψυκτα καλούπια συνεχούς τροφοδοσίας, στο πέρας των οποίων υπάρχουν κύλινδροι, οι οποίοι μορφοποιούν το ρευστό μέταλλο καθώς αυτό στερεοποιείται. Μέσω της διαδικασίας της θερμής έλασης, μπορούν να κατασκευαστούν είτε επίπεδα στοιχεία (πλάκες) είτε απ'ευθείας πρότυπες ολόσωμες διατομές συγκεκριμένων διαστάσεων. Καθώς ο σίδηρος βρίσκεται σε ημιστερεά κατάσταση (θερμοκρασία 1200-1300°C), διέρχεται από μια σειρά διαδοχικών κυλίνδρων που του δίνουν σταδιακά το επιθυμητό σχήμα και τον συμπιέζουν ώστε να ελαττωθεί το πάχος του κορμού. Στη συνέχεια, ακολουθεί η ψύξη από το περιβάλλον, καθώς το μέλος κινείται πάνω στον κυλιόμενο διάδρομο και η θερμοκρασία του μετάλλου σε αυτήν τη φάση είναι μεταξύ 800-1000°C. Καθώς, όμως, τα άκρα των πελμάτων της διατομής είναι περισσότερο εκτεθειμένα στην επίδραση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, ψύχονται ταχύτερα από την περιοχή συναρμογής κορμού και πελμάτων και αποτέλεσμα αυτής της ανομοιόμορφης ψύξης είναι η ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων (θλιπτικών στις άκρες των πελμάτων και εφελκυστικών στην ένωση κορμού και πελμάτων). Οι εσωτερικές αυτές τάσεις δε μειώνουν τη φέρουσα ικανότητα του μέλους, καθώς λόγω ισορροπίας έχουν μηδενική συνισταμένη δύναμη και μηδενική συνισταμένη ροπή. Κατ'αυτόν τον τρόπο, ολοκληρώνεται η διαδικασία της θερμής έλασης και η παραγωγή των πρότυπων ελατών διατομών χάλυβα.



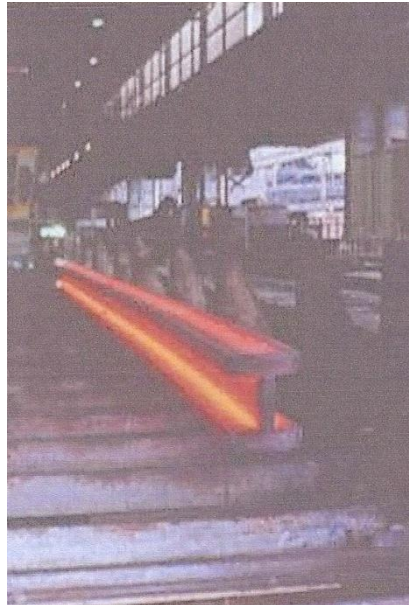
Σχήμα 1.2
Διαδικασία θερμής έλασης



Σχήμα 1.3
Διαδικασία θερμής έλασης



Σχήμα 1.4
Στερεοποίηση ρευστού μετάλλου σε καλούπια



Σχήμα 1.5

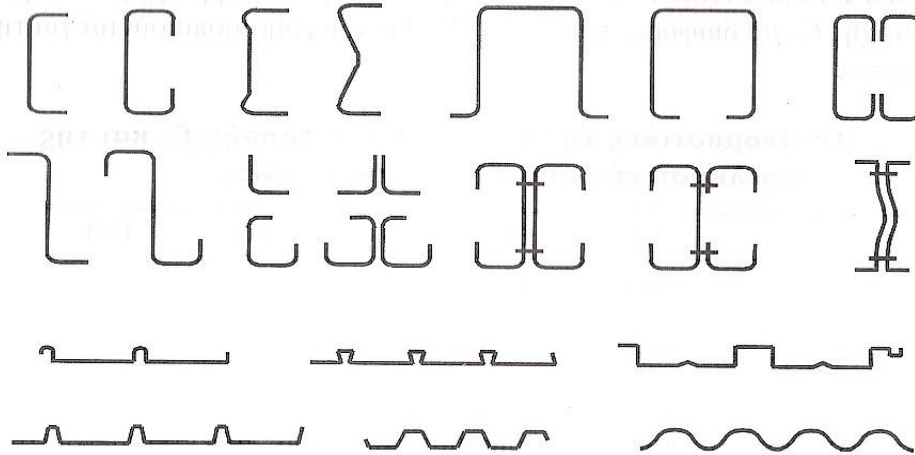
Τελικό στάδιο θερμής έλασης μετάλλου (ψύξη πάνω σε κυλιόμενη ταινία)

Πρότυπες λεπτότοιχες διατομές ψυχρής έλασης

Στο παρελθόν, η μόρφωση και η χρήση λεπτότοιχων διατομών ψυχρής έλασης ήταν περιορισμένη κυρίως σε κατασκευές όπου είχε μεγάλη σπουδαιότητα η μείωση του βάρους, όπως η κατασκευή αεροσκαφών, σιδηροδρομικών οχημάτων και γενικώς μεταφορικών μέσων. Αργότερα, διατομές ψυχρής έλασης χρησιμοποιήθηκαν ως επικαλύψεις, αλλά και ως φέροντα δομικά στοιχεία δευτερεύουσας σημασίας.

Η σημαντική έρευνα, η βελτίωση και η πρόοδος της κατασκευαστικής τεχνολογίας, η ικανοποιητική προστασία έναντι των σοβαρών κινδύνων της οξειδωσης, η εφαρμογή νέων μεθόδων πυροπροστασίας, αλλά και η αυξημένη αντοχή του υλικού, οδήγησαν στην ευρύτερη χρησιμοποίηση των διατομών ψυχρής έλασης, ώστε σήμερα στις περισσότερες χώρες, η βιομηχανία παραγωγής διατομών και χαλυβδοφύλλων ψυχρής έλασης, να είναι ο ταχύτερα αναπτυσσόμενος κλάδος του βιομηχανικού χάλυβα.

Βασικό πλεονέκτημα της χρήσης τους είναι η σημαντική μείωση του βάρους, η οποία εντούτοις δε συμβαδίζει με μείωση του κόστους λόγω των ειδικών μέσων που χρησιμοποιούνται και του ιδιαίτερα ακριβότερου έτοιμου προϊόντος. Για το λόγο αυτό, απαιτείται ενδελεχής μελέτη του κόστους όταν πρόκειται να γίνει χρήση τους. Οι διατομές αυτές κατασκευάζονται από γαλβανισμένα ή μη επίπεδα ελάσματα, τα οποία έχουν σταθερό πάχος καθ'όλο το μήκος τους αλλά και σε όλη τη διατομή.



Σχήμα 1.6

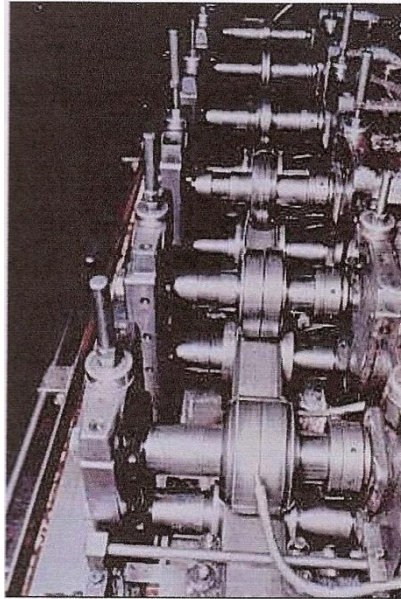
Πρότυπες και σύνθετες χαλύβδινες διατομές ψυχρής έλασης

Η διαδικασία που ακολουθείται σε αυτήν την περίπτωση διαφέρει από την «εν θερμώ» έλαση ως προς το τελικό στάδιο μορφοποίησης της διατομής. Αρχικά απαιτείται η μορφοποίηση του μετάλλου σε επίπεδα ελάσματα ή επίπεδες πλάκες μέσω της θερμής έλασης. Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται μηχανές ελάσεως (Σχήματα 1.7, 1.8), με τις οποίες επιτυγχάνεται το τελικό σχήμα της διατομής. Χρησιμοποιείται μια διάταξη πολλαπλών ελαστρων. Κάθε ένα έλαστρο μειώνει το πάχος των επίπεδων πλακών όπως αυτά παράγονται από την διαδικασία της θερμής έλασης. Το υλικό που τροφοδοτεί τη μηχανή έλασης δεν έχει υψηλές θερμοκρασίες και βρίσκεται σε στερεά κατάσταση.



Σχήμα 1.7

Μηχανολογικός εξοπλισμός ψυχρής έλασης



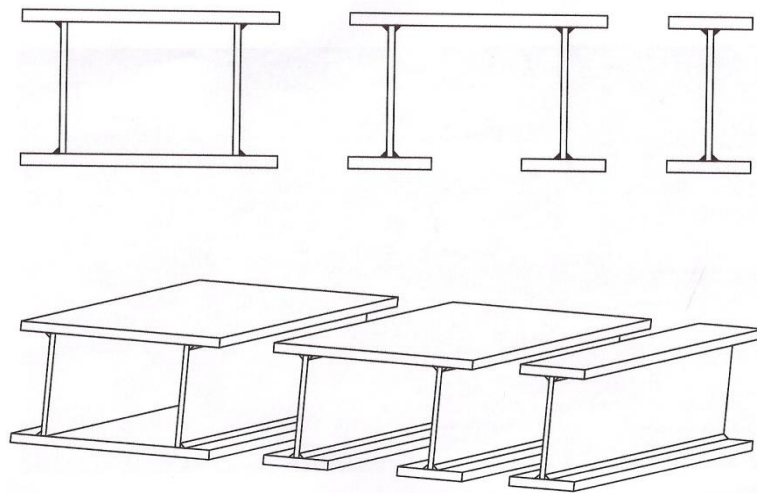
Σχήμα 1.8
Μηχανή έλασης μετάλλου «εν ψυχρώ»



Σχήμα 1.9
Τελικά προϊόντα ψυχρής έλασης

Συγκολλητές διατομές

Κατασκευάζονται από χαλύβδινα ελάσματα τα οποία συγκολλούνται μεταξύ τους δημιουργώντας ποικίλες μορφές διατομών. Βασικό πλεονέκτημά τους είναι η ελευθερία στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό, καθώς επιτρέπουν την κατασκευή κάποιου γεωμετρικού τύπου διατομής που δεν περιλαμβάνεται στις κατηγορίες των πρότυπων ελατών διατομών. Συγκολλητές σύνθετες διατομές συναντούμε σε σύμμικτες γέφυρες, όπου απαιτούνται διατομές μεγαλύτερου ύψους από τις πρότυπες, ενώ ταυτόχρονα οι ίδιες διατομές μπορούν να παραχθούν ως ασύμμετρες με διαφορά στα πλάτη των δύο πελμάτων. Η επέκταση της εφαρμογής των συγκολλητών σύνθετων διατομών σε πολυώροφα κτίρια, σε αθλητικά κέντρα και γραφεία, πέρα από τις καθιερωμένες σύμμικτες γέφυρες και βιομηχανικές εγκαταστάσεις μεγάλων ανοιγμάτων, αναδεικνύει τα ανταγωνιστικά πλεονεκτήματά τους έναντι των πρότυπων διατομών, ειδικά σε ειδικές κατασκευές υψηλών προδιαγραφών και απαιτήσεων.



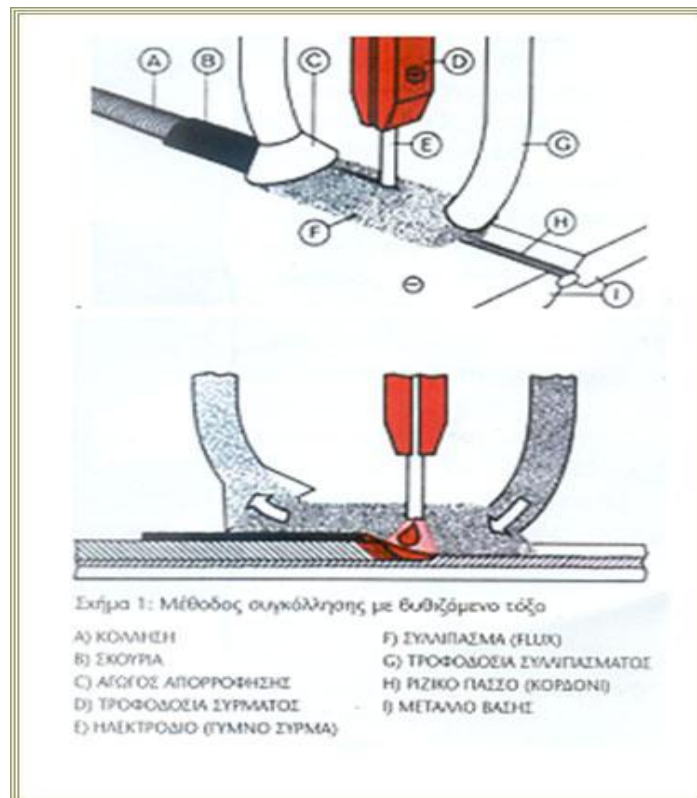
Σχήμα 1.10
Συγκολλητές διατομές

Αρχικά το μέταλλο χυτεύεται και μέσω της εν θερμώ έλασής του μορφοποιείται σε επίπεδες πλάκες, οι οποίες στη συνέχεια κόβονται κατά μήκος σε διάφορα πλάτη και σχήματα από αυτοματοποιημένες μηχανές κοπής και μετά συγκολλούνται μεταξύ τους από εξειδικευμένα μηχανήματα και διαπιστευμένο προσωπικό.

Η μέθοδος συγκόλλησης με «βυθιζόμενο τόξο» αποτελεί την κύρια μέθοδο συγκόλλησης σύνθετων διατομών. Είναι η αυτόματη παραλλαγή της συγκόλλησης κάτω από προστατευτικό στρώμα σκουριάς, όπου η

χειρωνακτική της παραλλαγή είναι η κλασική συγκόλληση με επικαλυμμένα ηλεκτρόδια. Βασικά της πλεονεκτήματα είναι ότι βελτιώνει κατά μεγάλο βαθμό τους ρυθμούς παραγωγής και την ποιότητα κατασκευής. Η μέθοδος παρουσιάζεται στο σχήμα 1.11. Η συγκόλληση βυθιζόμενου τόξου είναι μέθοδος καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου υπό μορφή γυμνού σύρματος συνεχούς τροφοδοσίας.

Το γυμνό ηλεκτρόδιο εκτυλίσσεται από το τύμπανο, που στη συνέχεια τροφοδοτείται με σταθερή ταχύτητα μέσω ράουλων προς την περιοχή της συγκόλλησης και στο μέταλλο βάσης. Ταυτόχρονα, συλλίπασμα τροφοδοτείται στην περιοχή συγκόλλησης μέσω ενός σωλήνα από μικρό σιλό όπου βρίσκεται αποθηκευμένο, καλύπτοντας το λουτρό της συγκόλλησης, ενώ σύστημα ανάκτησης αναρροφά τις ποσότητες συλλιπάσματος που απομένουν μετά τη συγκόλληση. Το συλλίπασμα λειτουργεί αποξειδωτικά, προστατεύοντας ταυτόχρονα τη διαδικασία της συγκόλλησης από το περιβάλλον. Για την κίνηση του συστήματος υπάρχει ηλεκτροκινητήρας όπου η ταχύτητα και οι παράμετροι της τάσης και της έντασης του ρεύματος ρυθμίζονται από πίνακα ελέγχου.



Σχήμα 1.11

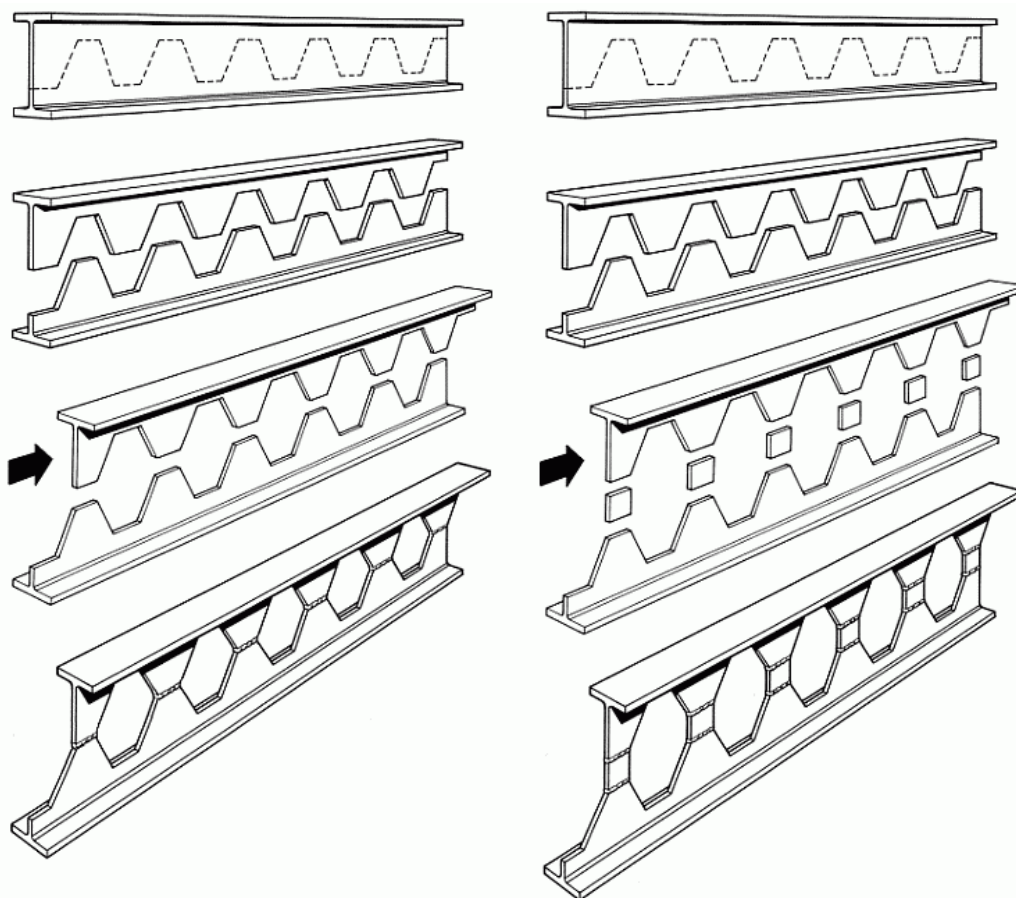
Σχηματική παρουσίαση της μεθόδου συγκόλλησης με «βυθιζόμενο τόξο»

Κυφελωτές δοκοί ή δοκοί με διάκενα κορμού

Οι χαλύβδινες δοκοί με οπές κατά μήκος του κορμού τους κατασκευάζονται από πρότυπες διατομές θερμής ελάσεως τύπου I-H ή U. Συνηθέστερη είναι η περίπτωση κατασκευής τους από διατομές διπλού ταυ. Οι δοκοί κόβονται στον κορμό τους και τα δύο κομμάτια διατομής T που προκύπτουν, συγκολλούνται και σχηματίζουν τη νέα δοκό με οπές, σύμφωνα με τη διαδικασία που φαίνεται στα επόμενα σχήματα.

Κατασκευάζονται δοκοί με κυκλικές, ελλειπτικές, εξαγωνικές και οκταγωνικές οπές.

Ένας από τους κύριους λόγους της κατασκευής αυτού του τύπου δοκών είναι η διευκόλυνση που προσφέρουν στη διέλευση αγωγών και σωληνώσεων μέσα από τις οπές του κορμού. Επιπρόσθετα, είναι πολλές φορές επιθυμητή η παρουσία τους σε γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων (πχ. στάδια) προσφέροντας ταυτόχρονα ένα οπτικά εντυπωσιακό αποτέλεσμα.

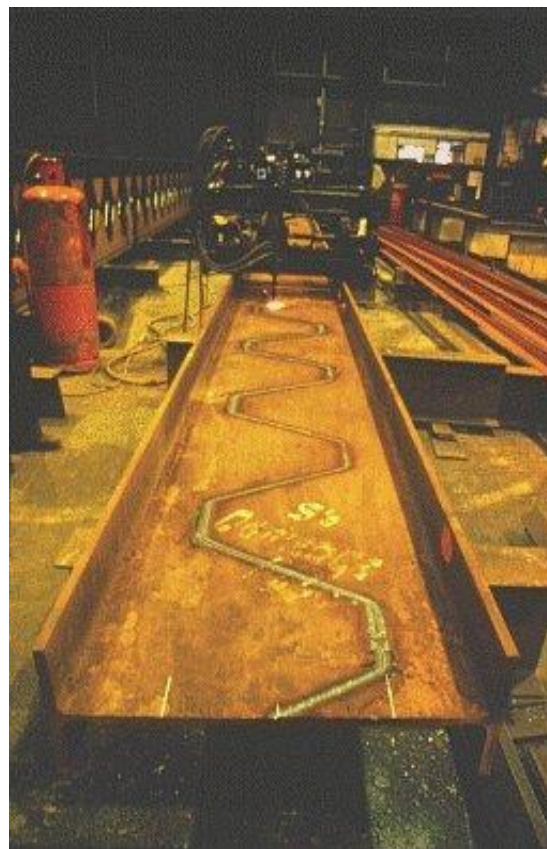


Σχήμα 1.12

Διαδικασία κατασκευής δοκών με πολυγωνικές οπές



Σχήμα 1.13
Φωτογραφίες από τα στάδια κατασκευής δοκών με πολυγωνικές οπές



Σχήμα 1.14
Κοπή πρότυπων διατομών διπλού ταυ για την κατασκευή δοκών με πολυγωνικές οπές



Σχήμα 1.15
Κοπή πρότυπων διατομών διπλού ταυ για την κατασκευή δοκών με κυκλικές οπές



Σχήμα 1.16
Στάδια κατασκευής δοκών με κυκλικές οπές



Σχήμα 1.17

Εικόνα διαμορφωμένης δοκού με κυκλικές οπές στον κορμό της

Οι κυψελωτές δοκοί που προκύπτουν προφανώς έχουν μεγαλύτερο ύψος από τις πρότυπες διατομές από τις οποίες έχουν προέλθει.

Παρουσιάζουν αρκετά **πλεονεκτήματα**:

-Έχουν μικρότερο βάρος από τις αντίστοιχες πρότυπες διατομές ίδιου ύψους, πρόκειται γενικά για ελαφρύτερες κατασκευές από τις πρότυπες διατομές.

-Προσφέρουν μεγαλύτερη αντοχή σε καμπτική ροπή, λόγω της αύξησης του ύψους συγκριτικά με τις πρότυπες διατομές από τις οποίες κατασκευάστηκαν. Για το λόγο αυτό είναι κατάλληλες σε περιπτώσεις μεγάλων ανοιγμάτων.

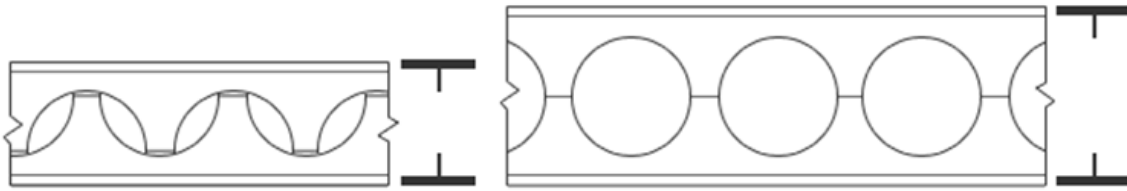
-Έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής.

-Διευκολύνουν τη διέλευση αγωγών, σωληνώσεων και συστημάτων εξαερισμού μέσα από τις οπές του κορμού. Αυτή άλλωστε η λειτουργία συνιστά έναν από τους κύριους λόγους της κατασκευής τους, που οδηγεί και στη μείωση του συνολικού ύψους του ορόφου.

-Μπορούν εύκολα να συναρμολογηθούν στο εργοτάξιο.

-Προσφέρουν καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα, γι' αυτό συνηθίζεται η χρήση τους σε εμφανείς θέσεις.

-Είναι εύκολο να καμπυλωθούν και να καμφθούν υπό γωνία.



Σχήμα 1.18

Μεταβολή ύψους κυψελωτής δοκού συγκριτικά με το ύψος της αρχικής συμπαγούς δοκού

Τα **μειονεκτήματα** που παρουσιάζουν είναι τα ακόλουθα:

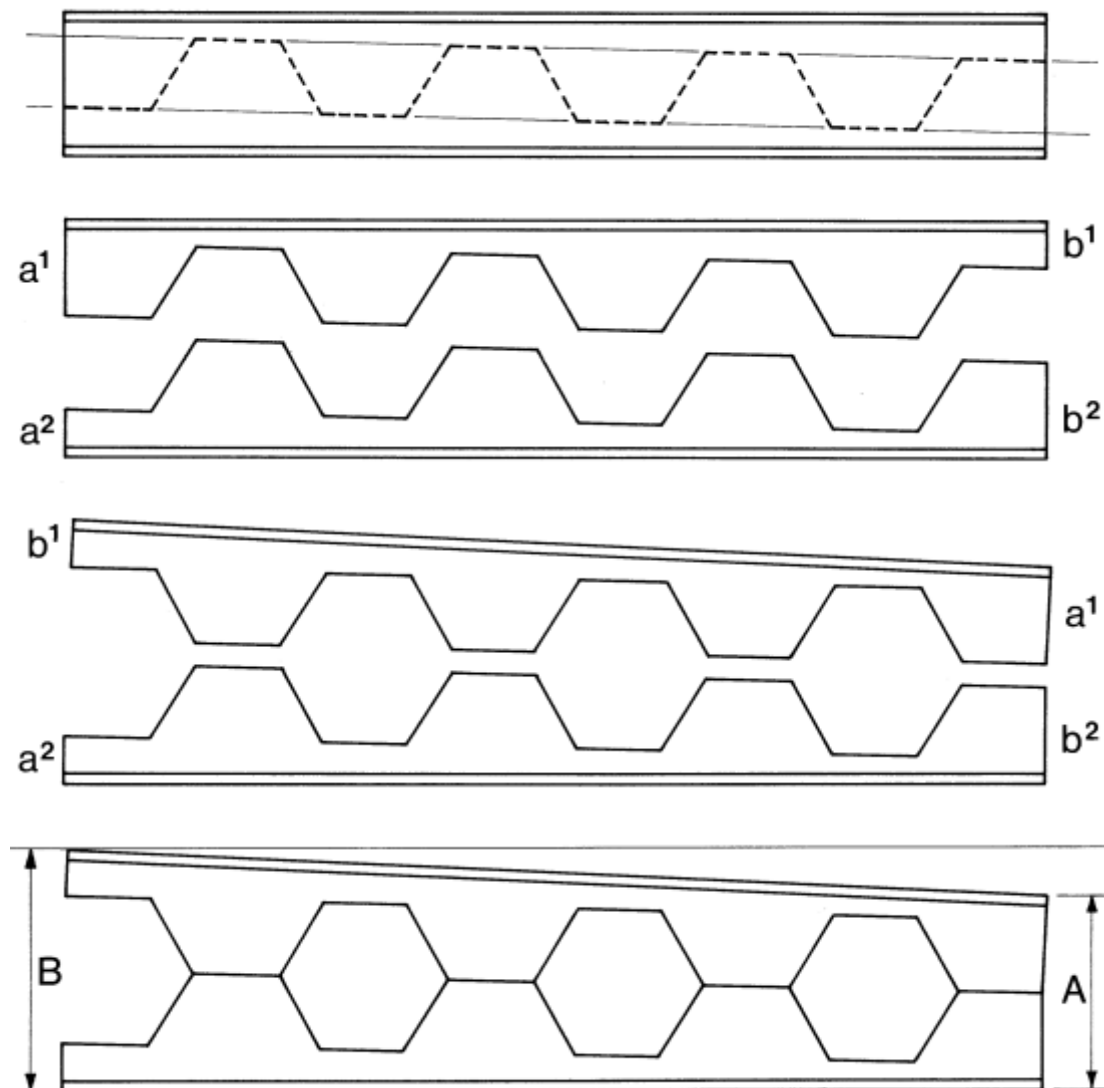
-Έχουν μικρή αντοχή σε διάτμηση λόγω των ανοιγμάτων και ευνοούν την ανάπτυξη λυγισμού του κορμού. Για το λόγο αυτό συχνά τοποθετούνται ενισχύσεις γύρω από τα ανοίγματα. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου έχουμε μεγάλα συγκεντρωμένα φορτία ή το στατικό μοντέλο του φορέα είναι συνεχής δοκός πολλών ανοιγμάτων, δεν ενδείκνυται η χρήση των κυψελωτών δοκών. Προτιμάται να χρησιμοποιούνται κυψελωτές δοκοί όταν τα επιβαλλόμενα φορτία είναι σχετικά μικρά.

-Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται πυροπροστασία, δε συνίσταται η χρήση τους, αφού απαιτείται στρώμα επικάλυψης τουλάχιστον 20% παχύτερο σε σύγκριση με τις ελατές διατομές για να αποκτήσουν τον ίδιο βαθμό πυραντίστασης.

Δυνατότητες κατασκευής κυψελωτών δοκών

Οι δοκοί με διάκενα στον κορμό τους προσφέρουν πολλές δυνατότητες κοπής τους και τελικής διαμόρφωσής τους, γεγονός που αφήνει περιθώρια ελευθερίας ως προς τη δημιουργία τους αναλόγως με το εκάστοτε επιδιωκόμενο αποτέλεσμα. Το τελικό τους ύψος μπορεί να καθοριστεί κατά βούληση, προσαρμόζοντας το σχέδιο κοπής της αρχικής δοκού.

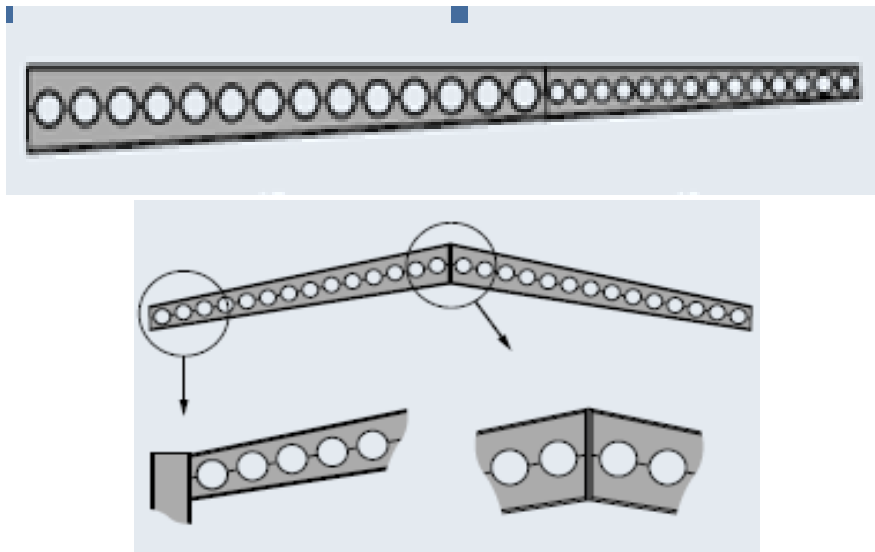
Επίσης, είναι δυνατό να κατασκευαστούν κυψελωτές δοκοί με μεταβαλλόμενο ύψος, κόβοντας τη συμπαγή δοκό υπό γωνία και όχι παράλληλα στον κεντροβαρικό της άξονα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.19. Μετά από την κοπή, ένα από τα δύο ίσα τμήματα αντιστρέφεται και τα δύο μισά συγκολλούνται κατά μήκος, έτσι ώστε στο ένα άκρο να έχουμε τα δύο τμήματα μικρού ύψους και στο άλλο άκρο τα δύο τμήματα μεγάλου ύψους.



Σχήμα 1.19

Διαδικασία κατασκευής κυψελωτών δοκών μεταβαλλόμενου ύψους

Η ίδια διαδικασία είναι εφικτή και για τις δοκούς με κυκλικές οπές στον κορμό τους. Οι κυψελωτές δοκοί συνιστούν μάλιστα την πιο οικονομική μέθοδο παραγωγής χαλύβδινων δοκών μεταβαλλόμενου ύψους. Οι τελικές δοκοί μπορούν να έχουν οπές ίδιας ή διαφορετικών διαμέτρων. Είναι ιδανική λύση για την περίπτωση προβόλων, αφού συνδυάζουν τα απαιτούμενα του μεγάλου ύψους και συνεπώς μεγάλης ροπής αδράνειας στην περιοχή της στήριξης, και του ελαττωμένου ύψους και συνεπώς ελαττωμένου βάρους στο άκρο του προβόλου.



Σχήμα 1.20

Σχηματική απεικόνιση κυψελωτών δοκών μεταβαλλόμενου ύψους



Σχήμα 1.21

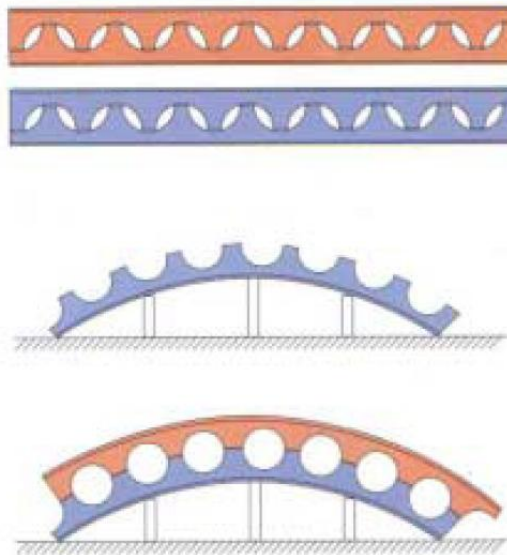
Πρόβολοι 12m από κυψελωτές δοκούς μεταβαλλόμενου ύψους, σε γήπεδο rugby στο Λονδίνο

Μία επιπλέον δυνατότητα κατά την παραγωγή κυψελωτών δοκών είναι ο συνδυασμός μίας ελαφρύτερης πάνω ημιδιατομής με μία βαρύτερη κάτω ημιδιατομή. Προφανώς, τα τμήματα αυτά θα αποκοπούν από

διαφορετικές ελατές διατομές. Εφόσον ο αριθμός των κυψελωτών δοκών που θα παραχθούν είναι άρτιος, δε θα υπάρξει σπατάλη υλικού. Ο τελευταίος αυτός σχεδιασμός είναι ενδεικτικός όταν θέλουμε να συνδυάσουμε ένα υποδάπεδο από χαλύβδινη δοκό με ένα δάπεδο από σκυρόδεμα. Στην περίπτωση αυτή, οι κοχλίες συνδέονται με το άνω πέγμα της κυψελωτής δοκού προκειμένου να εξασφαλιστεί η σταθερή αγκύρωση του σκυροδέματος στη χαλύβδινη δοκό.

Διαδικασία καμπύλωσης κυψελωτών δοκών

Οι κυψελωτές δοκοί μπορούν, όπως έχει επισημανθεί, εύκολα να καμπυλωθούν και να καμφθούν υπό γωνία. Οι κυψελωτές δοκοί που είναι πολύ καμπυλωμένες, κατασκευάζονται από τμήματα διαφορετικών ελατών διατομών, γίνεται η καμπύλωση τους κατά την απαιτούμενη ακτίνα και ακολουθεί η συγκόλληση με τρόπο ώστε να εξασφαλιστεί ότι τα δύο τμήματα θα εναρμονιστούν πλήρως μεταξύ τους. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται στη συνέχεια για το ζεύγος των τμημάτων που δεν έχει χρησιμοποιηθεί. Υπάρχουν πολλές μορφές κυψελωτών δοκών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατ'αυτόν τον τρόπο, όπως κυκλικές, ελλειπτικές και παραβολοειδείς.



Σχήμα 1.22
Διαδικασία καμπύλωσης κυψελωτών δοκών

Συνιστούν την πλέον αποδεκτή λύση στην τοποθέτηση καμπυλωμένων δοκών οροφής, συνδυάζοντας μία σημαντική εξοικονόμηση βάρους, αλλά και χρημάτων όσον αφορά τη διαδικασία της καμπύλωσής

τους. Η οικονομική μάλιστα ωφέλεια είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερο είναι το άνοιγμα που πρέπει να γεφυρωθεί.



Σχήμα 1.23.α
Εικόνες καμπυλωμένων κυψελωτών δοκών



Σχήμα 1.23.β
Εικόνα καμπύλων κυψελωτών δοκών



Σχήμα 1.24
Είσοδος πάρκου στο Άμστερνταμ



Σχήμα 1.25
Σιδηροδρομικός σταθμός στο Άμστερνταμ



Σχήμα 1.26
Κέντρο αναψυχής στην περιοχή του Lancaster, Αγγλία

Βασικές λειτουργίες κυψελωτών δοκών

Όπως αναφέρθηκε, σημαντικός λόγος για τη χρησιμοποίηση των κυψελωτών δοκών, εκτός από τη γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων και την ταυτόχρονη παρουσία ενός ωραίου αισθητικά αποτελέσματος, είναι η ενσωμάτωση των λειτουργιών ενός κτιρίου ώστε να είναι εύκολη η χάραξη και η εγκατάσταση. Προσφέρουν σε κτιριακούς χώρους τη δυνατότητα για εύκολη εγκατάσταση αγωγών, σωληνώσεων, συστημάτων εξαερισμού, πυρόσβεσης και καλωδιώσεων. Προφανώς, για το σκοπό αυτό είναι ευνοϊκή η χρήση δοκών με κυκλικές οπές κατά μήκος του κορμού τους.

Καθίσταται, επίσης, εύκολη η προσέγγιση του αντίστοιχου εξοπλισμού και η δυνατότητα συντήρησης, επισκευής ή αντικατάστασής του κατά τη διάρκεια ζωής του κτιρίου.

Βασικό πλεονέκτημα της χρήσης κυψελωτών δοκών είναι ότι ελαχιστοποιείται το συνολικό ύψος της κατασκευής, λόγω αυτής της ικανότητας ενσωμάτωσης των κτιριακών λειτουργιών.



Σχήμα 1.27

Διέλευση αγωγών μέσα από τις κυκλικές οπές κυψελωτών δοκών



Σχήμα 1.28
Διέλευση πολλών αγωγών διαμέσου επιμηκυμένων ανοιγμάτων
(ελλειπτικής μορφής)

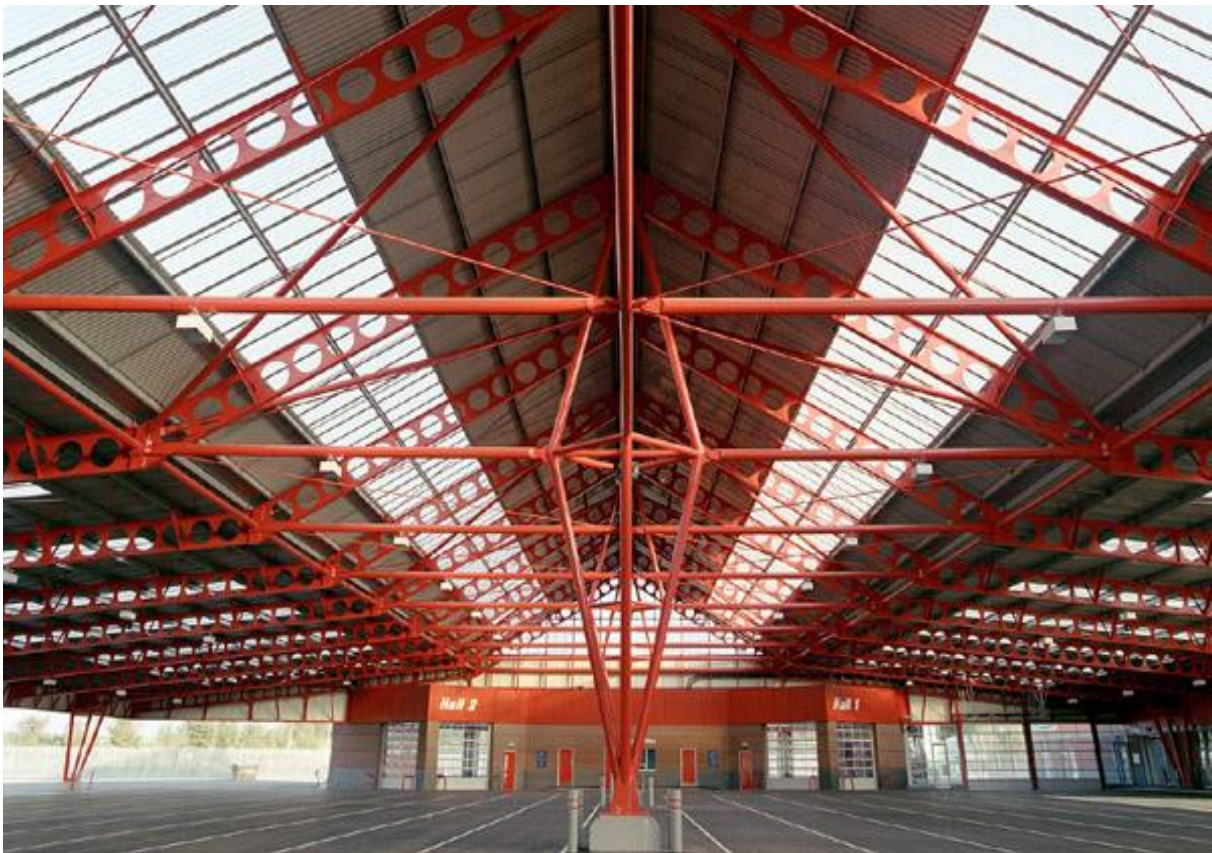


Σχήμα 1.29
Διέλευση αγωγών διαμέσου πολυγωνικών οπών

Στα σχήματα 1.28 και 1.29 φαίνονται πολυγωνικά και ελλειπτικά ανοίγματα για τη διέλευση αγωγών και σωληνώσεων.

Ο οικονομικότερος, ωστόσο, σχεδιασμός προβλέπει τη διέλευση κυκλικών σωληνώσεων διαμέσου δοκών με κυκλικές οπές.

Οι κυψελωτές δοκοί χρησιμοποιούνται ευρέως ως κύριες δοκοί ή διαδοκίδες σε πλαίσια. Συγκριτικά με τις συμπαγείς δοκούς από τις οποίες προήλθαν, έχουν ύψος περίπου 1,6 φορές μεγαλύτερο και αντοχή περίπου 7πλάσια. Πραγματοποιώντας σύγκριση κόστους μεταξύ των κυψελωτών δοκών και των δικτυωμάτων, προφανώς θα προτιμηθεί η χρήση κυψελωτών δοκών, αφενός γιατί είναι λιγότερο απαιτητική και κοπιαστική η διαδικασία κατασκευής τους, και αφετέρου γιατί το κόστος βαφής των δικτυωμάτων είναι σημαντικά υψηλό.



Σχήμα 1.30
Στεγασμένος χώρος αυτοκινήτων, Μ.Βρετανία



Σχήμα 1.31
Στεγασμένος χώρος αυτοκινήτων, Μ.Βρετανία



Σχήμα 1.32
Κατασκευή νοσοκομειακής μονάδας, Preston, Μ.Βρετανία



Σχήμα 1.33
Κυφελωτές δοκοί με πολυγωνικές οπές



Σχήμα 1.34
Κέντρο τύπου που χρησιμοποιήθηκε για τους Ολυμπιακούς Αγώνες 2004,
Αθήνα

Ευρύτεροι τομείς χρήσης κυψελωτών δοκών

Βασικοί τύποι κατασκευών στις οποίες χρησιμοποιούνται οι κυψελωτές δοκοί είναι: αθλητικές εγκαταστάσεις-στάδια, νοσοκομεία, χώροι parking.

Η φέρουσα ικανότητα και η οικονομία που προσφέρουν οι κυψελωτές δοκοί οροφής σε κατασκευές μεγάλων ανοιγμάτων, τις καθιστούν κατάλληλες και ευρέως διαδεδομένες για χρήση σε αθλητικές εγκαταστάσεις. Είναι ελαφρύτερες από τις συμπαγείς δοκούς και φυσικά πολύ πιο οικονομικές από τις δικτυωτές δοκούς.



Σχήμα 1.35
Αθλητικές εγκαταστάσεις στη Μεγάλη Βρετανία

Όσον αφορά στους χώρους parking, με μία διαδικασία προκαμπύλωσής τους, οι κυψελωτές δοκοί αποκτούν τη δυνατότητα να αντισταθμίσουν τα βέλη κάμψης από τα στατικά φορτία, ενώ η καμπύλωσή τους ευνοεί την αποστράγγιση των υδάτων. Επιπρόσθετα, η παρουσία των οπών στον κορμό των δοκών συμβάλλει σημαντικά στη διαδικασία εξαερισμού, γεγονός που απαιτείται από τους κανόνες υγιεινής. Τέλος, τα μεγάλα ανοίγματα παρέχουν ένα φωτεινό και ευάερο χώρο, προσφέροντας ένα αίσθημα προσωπικής ασφάλειας.



Σχήμα 1.36
Χώροι parking στη Μεγάλη Βρετανία

Είναι τέλος δυνατή η κατασκευή δοκών με μεμονωμένα ανοίγματα στον κορμό τους. Οι θέσεις και η διάταξη των ανοιγμάτων αποφασίζονται από το μελετητή του έργου. Συνήθως πρόκειται για ορθογωνικά ή κυκλικά ανοίγματα τα οποία υλοποιούνται με διατάξεις διάτρησης.



Σχήμα 1.37
Ορθογωνικά ανοίγματα σε κύρια δοκό

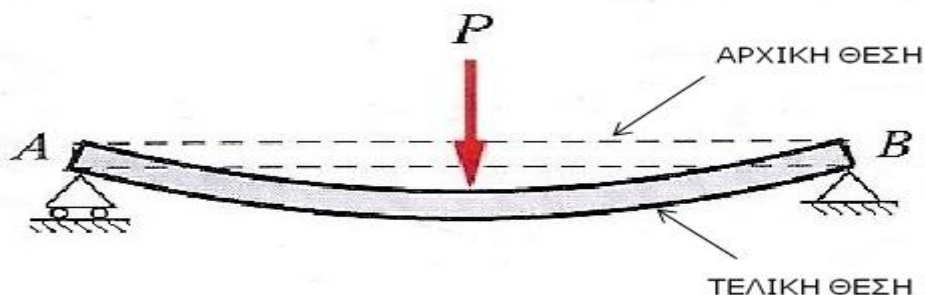
Κεφάλαιο 2

Μορφές αστοχίας καμπτόμενης χαλύβδινης συμπαγούς δοκού

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι πιθανές μορφές αστοχίας μιας χαλύβδινης συμπαγούς δοκού διατομής διπλού ταυ που κάμπτεται υπό την επίδραση ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου. Δίνονται κάποια γενικά στοιχεία και βασικές έννοιες της ελαστικής κάμψης δοκών, περιγράφονται οι πιθανές γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν για τη μελέτη των χαλύβδινων δοκών και εξετάζονται οι πιθανοί τρόποι αστοχίας τους, αφού προηγηθεί η κατάταξη των διατομών σε κατηγορίες με βάση τον Ευρωκώδικα 3. Ταυτόχρονα παρουσιάζονται και οι απαιτούμενοι έλεγχοι επάρκειας που πρέπει να ικανοποιούνται ώστε να μην επέλθει το κάθε είδος αστοχίας.

2.1 Τεχνική θεωρία κάμψης

Η εντατική κατάσταση στην οποία βρίσκεται μία δοκός που υποβάλλεται σε εγκάρσια φόρτιση ονομάζεται κάμψη. Αν για παράδειγμα, σε μία αμφιέρειστη δοκό επιβληθεί ένα εγκάρσιο φορτίο P , τότε η δοκός θα παραμορφωθεί κατά τη διεύθυνση του επιβαλλόμενου φορτίου και ο άξονας της θα καμφθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1

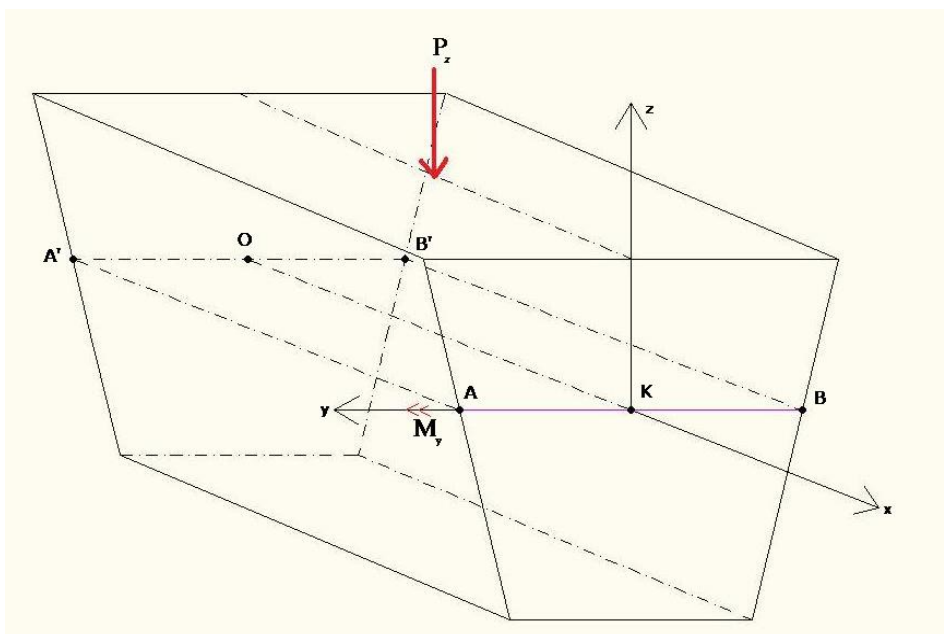
Παραμόρφωση αμφιέρειστης δοκού λόγω εγκάρσιου φορτίου

Κατά την καταπόνηση σε κάμψη αναπτύσσονται καμπτικές ροπές, οι οποίες προκαλούν τόσο την καμπύλωση της δοκού, όσο και τη δημιουργία τάσεων εντός του υλικού της. Επομένως, με την έννοια κάμψη αναφερόμαστε τόσο στις αναπτυσσόμενες τάσεις, όσο και στις προκαλούμενες παραμορφώσεις που ονομάζονται βέλη κάμψης.

Βασικές παραδοχές της τεχνικής θεωρίας κάμψης είναι οι ακόλουθες:

- Το υλικό της ράβδου είναι ομογενές και ισότροπο. Οι ελαστικές ιδιότητές του δεν εξαρτώνται από τη διεύθυνση.
- Ισχύει ο νόμος του Hooke, σύμφωνα με τον οποίο οι αναπτυσσόμενες τάσεις σ είναι γραμμικώς ανάλογες των ανηγμένων παραμορφώσεων ϵ . Ο φορέας συμπεριφέρεται ελαστικά.
- Ισχύει η παραδοχή Bernoulli, σύμφωνα με την οποία κάθε διατομή επίπεδη και κάθετη στον άξονα της δοκού πριν την κάμψη, παραμένει επίπεδη και κάθετη και μετά από αυτήν.
- Οι γραμμικές διαστάσεις της διατομής είναι μικρές σε σχέση με το μήκος της δοκού.
- Οι μετακινήσεις ενός τυχαίου σημείου κατά τον άξονα της δοκού και εγκάρσια σε αυτόν (βέλη κάμψεως) είναι μικρές σε σχέση με τις διαστάσεις της διατομής (θεωρία μικρών παραμορφώσεων).
- Η επιρροή της διατμητικής παραμόρφωσης επί του βέλους κάμψεως θεωρείται αμελητέα.

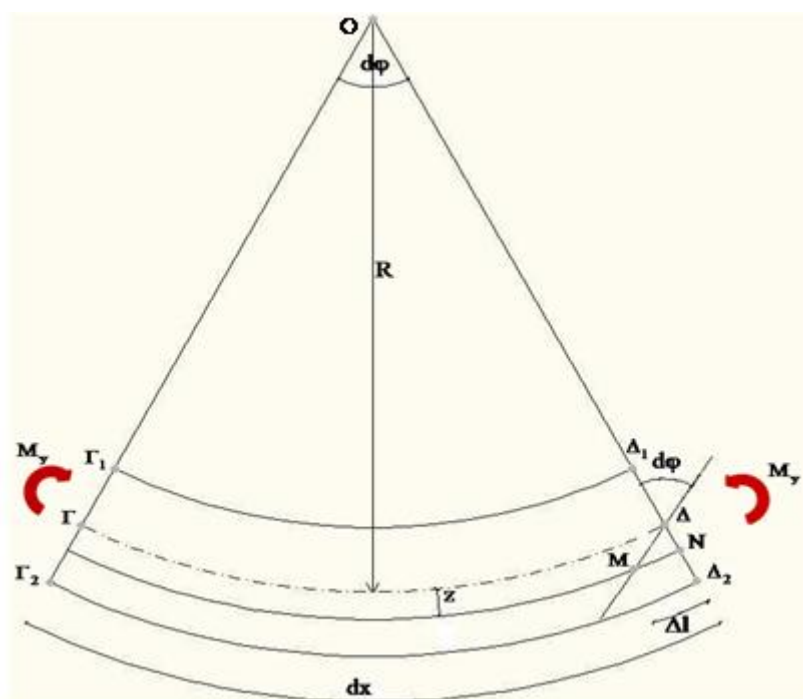
Κατά την καμπύλωση του κεντροβαρικού άξονα, επέρχεται επιμήκυνση των κατώτερων ινών και βράχυνση των ανώτερων. Ο κεντροβαρικός άξονας καλείται ουδέτερος άξονας, καθώς ούτε επιμηκύνεται ούτε θλίβεται. Στο σχήμα 2.2 φαίνεται ο ουδέτερος κεντροβαρικός άξονας OK, το ουδέτερο επίπεδο ABB'A', η τομή AB του ουδετέρου επιπέδου με τη διατομή που ονομάζεται ουδέτερη γραμμή και οι κύριοι άξονες y, z της διατομής.



Σχήμα 2.2

Ουδέτερος άξονας καμπτόμενης δοκού

Έστω η αμφιέρειστη δοκός του σχήματος 2.1 υπό τη δράση του φορτίου P . Η φόρτιση της δοκού πραγματοποιείται κατά τον άξονα z και η δοκός κάμπτεται ως προς τον άξονα y . Αποκόπτοντας από τη δοκό ένα στοιχειώδες τμήμα dx και με βάση την παραδοχή Bernoulli, έχουμε τα εξής:



Σχήμα 2.3

Καμπύλωση στοιχειώδους τμήματος καμπτόμενης δοκού

Ο κεντροβαρικός άξονας Ox παραμορφώνεται σε τόξο κύκλου ακτίνας R . Οι διατομές $\Gamma_1\Gamma_2$ και $\Delta_1\Delta_2$ έχουν στραφεί κατά γωνία $d\phi/2$ καθεμία ως προς την κάθετη διεύθυνση.

Από την ομοιότητα των τριγώνων $O\Gamma\Delta$ και ΔMN ισχύει:

$$\frac{\Delta l}{dx} = \frac{z}{R} \quad (2.1)$$

Ο λόγος $\frac{\Delta l}{dx}$ εκφράζει την ανηγμένη παραμόρφωση ϵ , η οποία σύμφωνα με

το νόμο του Hooke δίνεται από τη σχέση: $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει $\sigma = \frac{E}{R} \cdot z$. (2.2)

Ο λόγος E/R είναι σταθερός για όλα τα σημεία της κάθε ίνας και επομένως η σχέση (2.2) αποκτά τη μορφή: $\sigma = C \cdot z$

Η ουδέτερη γραμμή μιας διατομής είναι το ίχνος του ουδετέρου επιπέδου στη συγκεκριμένη διατομή και σε αυτήν οι ορθές τάσεις λόγω κάμψης είναι μηδενικές, ταυτίζεται δε με τον κεντροβαρικό άξονα της διατομής. Διαιρεί τη διατομή σε θλιβόμενη και εφελκυσόμενη ζώνη.

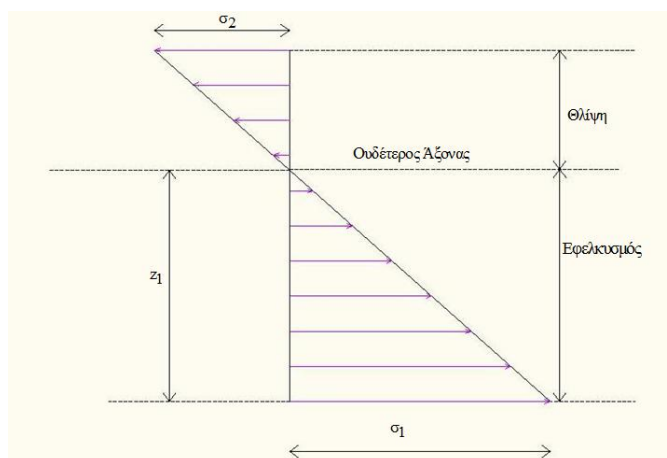
Με βάση την ισορροπία του στοιχειώδους τμημάτος, πρέπει το άθροισμα των ροπών των στοιχειωδών δυνάμεων $\sigma \cdot dA$ ως προς τον άξονα y να είναι ίσο με την καμπτική ροπή M_y .

$$\text{Ισχύει δηλαδή: } M_y = \int z \sigma dA = \frac{E}{R} \int z^2 dA = \frac{E}{R} \cdot I_y \quad (2.3)$$

η οποία με βάση τη σχέση (2.2) δίνει τελικά:

$$\sigma_x = \frac{M_y}{I_y} \cdot z \quad (2.4)$$

Άρα η κατανομή των ορθών τάσεων καθορίζεται πλήρως από τη ροπή κάμψης και τη ροπή αδράνειας της διατομής.



Σχήμα 2.4

Κατανομή ορθών τάσεων λόγω κάμψης σε τυχαία διατομή

Ως ελαστική ροπή αντίστασης διατομής ως προς τον άξονα y ορίζεται ο λόγος της ροπής αδράνειας της διατομής ως προς τον άξονα y , προς την απόσταση της πιο απομακρυσμένης ίνας από τον ίδιο άξονα. Όμοια ορίζεται και η ελαστική ροπή αντίστασης ως προς τον άξονα z . Δηλαδή:

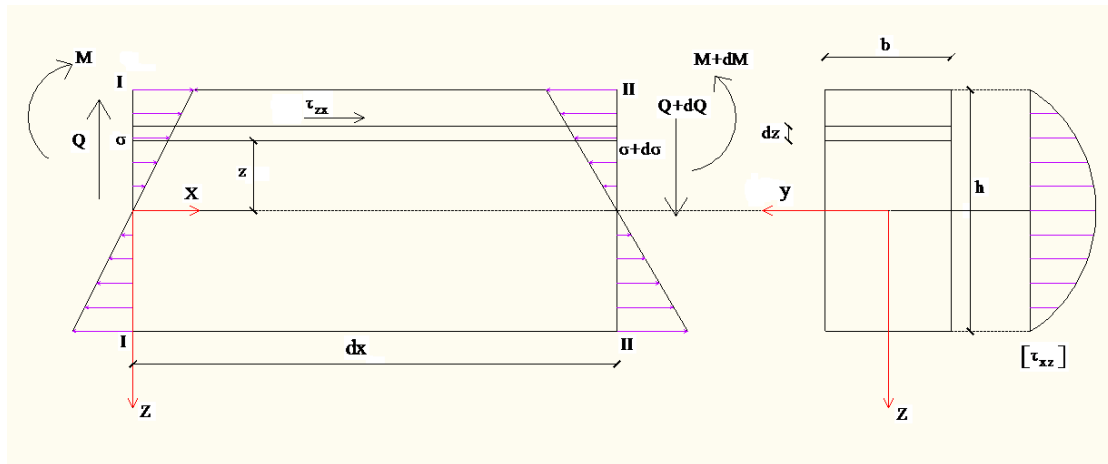
$$W_{el,y} = \frac{I_y}{z} \quad \text{και} \quad W_{el,z} = \frac{I_z}{y} \quad (2.5)$$

Αν η ουδέτερη γραμμή συνιστά και άξονα συμμετρίας της διατομής, τότε οι ακραίες ίνες της θλιβόμενης και η εφελκυσόμενης ζώνης απέχουν την ίδια απόσταση από τον άξονα y , συνεπώς ισχύει: $W_{el,y}^o = W_{el,y}^u$.

Επομένως, η κατανομή των ορθών τάσεων μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\sigma_x = \frac{M_y}{W_{el}}$$

Υπό την επίδραση των εγκάρσιων φορτίων, εκτός από καμπτική ροπή, εμφανίζεται και τέμνουσα δύναμη. Επομένως, στη δοκό εκτός από ορθές τάσεις σ , αναπτύσσονται και διατμητικές τάσεις τ . Καθώς η συμπεριφορά της δοκού είναι ελαστική και επειδή ισχύει η αρχή της ανεξαρτησίας των ελαστικών παραμορφώσεων, η παρουσία των διατμητικών τάσεων δεν επηρεάζει την κατανομή των ορθών τάσεων στη διατομή.



Σχήμα 2.5

Κατανομή διατμητικών τάσεων σε δοκό ορθογωνικής διατομής λόγω κάμψης

Από την ισορροπία κατά τον άξονα x του στοιχειώδους τμήματος της δοκού μεταξύ των διατομών I και II, ισχύει:

$$\sum F_x = 0 \Rightarrow \sigma \cdot b \cdot dz + \tau_{zx} \cdot b \cdot dx = (\sigma + d\sigma) \cdot b \cdot dz \Rightarrow \tau_{zx} = \frac{d\sigma \cdot dz \cdot b}{dx \cdot b} \quad (2.6)$$

$$\text{Είναι } \sigma_x = \frac{M_y}{I_y} \cdot z \Rightarrow \frac{d\sigma}{dx} = \frac{dM_y}{dx} \cdot z = \frac{Q \cdot z}{I_y} \quad (2.7)$$

$$\text{Επομένως, η (2.6) γίνεται: } \Rightarrow \tau_{zx} = \frac{Q \cdot b \cdot z \cdot dz}{b \cdot I_y}$$

Το μέγεθος $b \cdot z \cdot dz$ είναι η στατική ροπή S_y της στοιχειώδους επιφάνειας $b \cdot dz$ ως προς τον άξονα y.

Επομένως, η διατμητική τάση δίνεται τελικά από τη σχέση:

$$\tau_{zx} = \frac{Q \cdot S_y}{b \cdot I_y} \quad (2.8)$$

Σε όλην την παράγραφο, εξετάσθηκε φόρτιση κατά τον κατακόρυφο άξονα z και συνεπώς κάμψη της δοκού περί τον άξονα y. Ανάλογες σχέσεις ισχύουν και για φόρτιση κατά y και συνεπώς κάμψη κατά z.

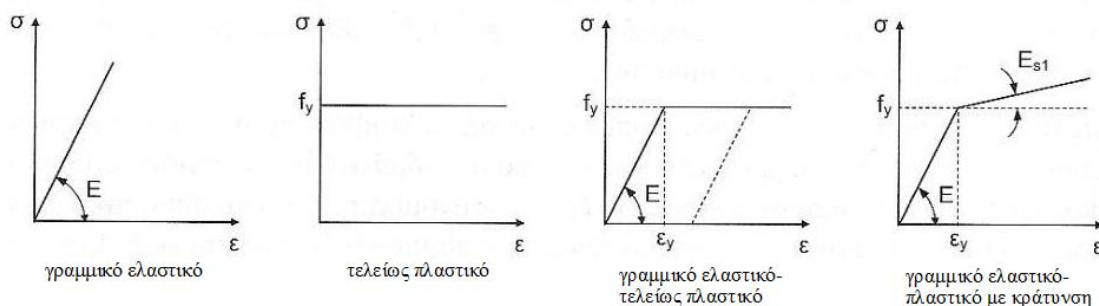
2.2 Ελαστική και πλαστική ανάλυση

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, η τεχνική θεωρία κάμψης αναφέρεται στην ελαστική συμπεριφορά του φορέα και βασίζεται στη θεωρία μικρών μετατοπίσεων. Πρόκειται επομένως, για ελαστική ανάλυση 1^{ης} τάξεως. Η ελαστική ανάλυση μπορεί να εφαρμόζεται σε όλες τις περιπτώσεις διατομών, ανεξαρτήτως αν η αντοχή τους προσδιορίζεται με βάση την ελαστική ή πλαστική αντοχή τους. Αντιθέτως, η πλαστική ανάλυση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις περιπτώσεις και για να είναι δυνατή η εφαρμογή της πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις.

Στην παράγραφο αυτή γίνεται αναφορά στις 2 μεθόδους ανάλυσης και στα χαρακτηριστικά τους.

2.2.1 Ελαστική ανάλυση

Κατά την ελαστική ανάλυση, υποτίθεται ελαστική συμπεριφορά του φορέα και η σχέση τάσης-παραμόρφωσης του υλικού θεωρείται ότι είναι γραμμική για οποιαδήποτε στάθμη των τάσεων. Η παραμόρφωση είναι επομένως ανάλογη με την τάση, δηλαδή το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά καθ'όλη τη φόρτιση.



Σχήμα 2.6

Διαγράμματα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων

Κατά την ελαστική ανάλυση στατικώς ορισμένων φορέων, τα εντατικά μεγέθη προκύπτουν από τις εξισώσεις στατικής ισορροπίας, ενώ στους υπερστατικούς φορείς τα εντατικά μεγέθη πρέπει να ικανοποιούν τις συνθήκες ισορροπίας και να προκαλούν μετακινήσεις που είναι συμβατές με την ελαστική συνέχεια του φορέα και τις συνθήκες στήριξης. Οι εξισώσεις ισορροπίας δεν επαρκούν για να προσδιοριστούν τα άγνωστα μεγέθη και πρέπει να συμπληρωθούν με απλές γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ των μετακινήσεων του φορέα, οι οποίες ονομάζονται εξισώσεις συμβιβαστού

των παραμορφώσεων και εξασφαλίζουν τη συμβατότητα των μετακινήσεων στην παραμορφωμένη κατάσταση.

Για τον υπολογισμό των εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών και των αντιδράσεων χρησιμοποιούνται κυρίως δύο γενικές μέθοδοι προσέγγισης. Η πρώτη είναι η μέθοδος των δυνάμεων, σύμφωνα με την οποία απελευθερώνονται κάποιοι κόμβοι του φορέα ώστε αυτός να μετατραπεί σε στατικά ορισμένο που ονομάζεται θεμελιώδης φορέας. Οι άγνωστες μεταβλητές είναι οι αναγκαίες δυνάμεις που θα επαναφέρουν τη συμβατότητα της γεωμετρίας. Επιλύεται ένα σύστημα εξισώσεων ίσων με τον αριθμό των άγνωστων δυνάμεων, ώστε η κατασκευή να γίνει στατικώς ορισμένη.

Η δεύτερη είναι η μέθοδος των μετακινήσεων, κατά την οποία επιβάλλονται δεσμεύσεις μετακινήσεων, ώστε να εμποδίζεται η μετακίνηση των κόμβων, και προσδιορίζονται οι απαιτούμενες δυνάμεις που προκαλούν τις δεσμεύσεις. Στη συνέχεια επιτρέπεται η μετακίνηση των κόμβων μέχρι να μηδενιστούν οι δυνάμεις. Οι άγνωστες μεταβλητές της μεθόδου είναι οι δυνατές επικόμβιες μετακινήσεις και στροφές. Ο αριθμός των δυνάμεων δεσμεύσεως που πρέπει να εφαρμοσθούν πρόσθετα στο φορέα, ισούται με τον αριθμό των δυνατών επικόμβιων μετακινήσεων, η δε ανάλυση απαιτεί και πάλι την επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων.

Η ελαστική ανάλυση διακρίνεται σε δύο κατηγορίες:

-Ελαστική ανάλυση 1ης τάξεως, σύμφωνα με την οποία οι εξισώσεις ισορροπίας των δυνάμεων και του συμβιβαστού των παραμορφώσεων αναφέρονται στην αρχική απαραμόρφωτη γεωμετρία του φορέα. Χρησιμοποιείται όταν οι μετατοπίσεις των διατομών του φορέα και οι ανηγμένες παραμορφώσεις των ακραίων ινών κάθε διατομής είναι μικρές, ώστε η συμπεριφορά του φορέα να θεωρείται ελαστική. Ισχύει η αρχή της επαλληλίας, κατά την οποία το αποτέλεσμα μιας συνολικής δράσης είναι ίσο με το άθροισμα των αποτελεσμάτων των επιμέρους δράσεων που συνιστούν την ολική δράση. Η αρχή της επαλληλίας ισχύει μόνο όταν το υλικό είναι ελαστικό ($\sigma = E \cdot \epsilon$) και η γεωμετρία της κατασκευής δε μεταβάλλεται λόγω μη γραμμικής συμπεριφοράς.

-Ελαστική ανάλυση 2^{ης} τάξεως, σύμφωνα με την οποία οι εξισώσεις ισορροπίας αναφέρονται στην παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα. Λαμβάνεται επομένως υπόψη η επίδραση των παραμορφώσεων του φορέα στα εντατικά μεγέθη του. Σε αυτήν την περίπτωση δεν ισχύει η αρχή της επαλληλίας, ενώ για την επίλυση του φορέα χρησιμοποιούνται κυρίως κατάλληλα προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή, λόγω ανάγκης υλοποίησης μεγάλου αριθμού υπολογισμών. Συγκεκριμένα, η ελαστική

θεωρία 2^{ης} τάξεως συντίθεται από τη διαδοχική επίλυση αναλύσεων 1^{ης} τάξεως του φορέα, του οποίου η γεωμετρία μεταβάλλεται σε κάθε βήμα, με βάση την προηγούμενη ιστορία φόρτισης.

Αξίζει να υπογραμμιστεί ότι η υπόθεση της γραμμικής συμπεριφοράς φορτίου-παραμορφώσεων είναι δυνατόν να εφαρμοστεί είτε για 1^{ης} είτε για 2^{ης} τάξεως ελαστική ανάλυση, ακόμα και όταν η αντοχή της διατομής βασίζεται στην πλαστική αντοχή.

2.2.2 Πλαστική ανάλυση

Η πλαστική ανάλυση λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις της μη γραμμικότητας του υλικού κατά τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων των δράσεων, ενώ χρησιμοποιείται μόνο εφόσον τα μέλη της κατασκευής διαθέτουν επαρκή στροφική ικανότητα στις θέσεις όπου δημιουργείται πλαστική άρθρωση.

Οι προϋποθέσεις εφαρμογής της πλαστικής ανάλυσης είναι οι ακόλουθες:

-Ο χάλυβας πρέπει να διαθέτει επαρκή ολκιμότητα, ώστε να μπορεί να αναπτυχθεί η πλαστική αντοχή των διατομών.

-Μετά τη δημιουργία της πλαστικής άρθρωσης, αυτή πρέπει να έχει την ικανότητα να στραφεί υπό σχεδόν σταθερή ροπή, ίση με την πλαστική ροπή της διατομής. (Βλέπε παράγρ.2.5)

-Η πλαστική άρθρωση πρέπει να έχει αρκετή στροφική ικανότητα, χωρίς να προηγηθεί τοπικός ή πλευρικός λυγισμός, έτσι ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί μηχανισμός κατάρρευσης με ανακατανομή των ροπών.

Είναι απαραίτητη η γνώση του διαγράμματος τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων του υλικού για την πραγματοποίηση γραμμικής ανάλυσης. Εάν η τάση μειωθεί σε οποιοδήποτε σημείο της πλαστικής περιοχής, η καμπύλη αποφόρτισης είναι ευθεία γραμμή παράλληλη με τον ελαστικό κλάδο του διαγράμματος σ-ε. Υποθέτοντας απόλυτη πλαστικότητα μετά την υπέρβαση του ορίου διαρροής, αμελούνται τα αποτελέσματα της κράτυνσης, γεγονός που είναι υπέρ της ασφαλείας.

Η πλαστική ανάλυση βασίζεται στη μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού ακόμα και αν αμελούνται τα φαινόμενα 2ας τάξεως. Οι πλαστικές αναλύσεις 2^{ης} τάξεως απαιτούν γενικά τη χρήση προγραμμάτων υπολογιστή. Αξίζει να υπογραμμιστεί ότι επειδή η πλαστική ανάλυση είναι βασικά μη γραμμική, η αρχή της επαλληλίας δεν ισχύει.

Ο σχεδιασμός δοκών με τη μέθοδο πλαστικής ανάλυσης συνεπάγεται οικονομία της κατασκευής, η οποία είναι τόσο μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η υπερστατικότητα του φορέα.

2.3 Μέθοδοι ανάλυσης και ελέγχου

Όπως επισημάνθηκε στην παράγραφο 2.2, υπάρχουν δύο είδη μη γραμμικότητας: η μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού λόγω διαρροής του χάλυβα και η γεωμετρική μη γραμμικότητα λόγω μεγάλων μετατοπίσεων. Είναι σύνηθες η πραγματική γεωμετρία (ευθυγραμμία και στρέβλωση μελών, κατακορυφότητα υποστυλωμάτων) να αποκλίνει από την ιδεατή λόγω ατελειών κατά τη διαδικασία παραγωγής και ανέγερσης. Οι αποκλίσεις αυτές ονομάζονται γεωμετρικές ατέλειες. Επίσης, λόγω διαφορών, κυρίως θερμικών, επιρροών παρεμποδίζονται συχνά οι ελεύθερες παραμορφώσεις κατά τη διαδικασία παραγωγής και επεξεργασίας των μελών (έλαση, κοπές, συγκολλήσεις), με αποτέλεσμα να δημιουργούνται παραμένουσες τάσεις στην αφόρτιση κατάσταση. Οι αποκλίσεις αυτές ονομάζονται δομικές ατέλειες.

Οι μέθοδοι ανάλυσης των κατασκευών διακρίνονται αναλόγως εάν λαμβάνουν ή όχι υπόψη τις δύο μη γραμμικότητες και τις ατέλειες. Οι μέθοδοι ανάλυσης σύμφωνα με την ορολογία του Ευρωκώδικα 3 περί σχεδιασμού κελυφών, είναι οι εξής:

ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (Linear Analysis-LA)

Οι παραμορφώσεις του φορέα και οι ανηγμένες παραμορφώσεις ϵ είναι μικρές, ώστε η συμπεριφορά να είναι ελαστική και η επίλυση να γίνεται με βάση την αρχική απαραμόρφωτη γεωμετρία του φορέα. Είναι η ελαστική ανάλυση 1^{ης} τάξεως που εξετάσθηκε παραπάνω.

ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (Material Non-linear Analysis-MNA)

Οι παραμορφώσεις του φορέα είναι μικρές, αλλά οι ανηγμένες παραμορφώσεις είναι μεγάλες. Η επίλυση γίνεται με βάση την απαραμόρφωτη γεωμετρία του φορέα, αλλά λαμβάνονται υπόψη ανελαστικές παραμορφώσεις. Ονομάζεται και πλαστική ανάλυση με βάση τη θεωρία 1^{ης} τάξεως.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ, ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (Geometrically Non-linear Analysis-GNA)

Οι ανηγμένες παραμορφώσεις είναι μικρές, αλλά οι παραμορφώσεις του φορέα είναι μεγάλες. Η ανάλυση είναι ελαστική, αλλά η επίλυση γίνεται με βάση την παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα. Εδώ πρέπει να γίνει διάκριση με βάση τη σημασία του όρου "παραμορφώσεις" του φορέα. Εάν οι μετατοπίσεις είναι μικρές, αλλά οι στροφές μεγάλες, τότε η σχέση 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^{ης} τάξεως. Δίνει αποτελέσματα μόνο μέχρι το φορτίο λυγισμού.

Αν οι μετατοπίσεις είναι μεγάλες, τότε η σχέση ροπών-καμπυλοτήτων είναι μη γραμμική. Η ανάλυση αυτή ονομάζεται και μη γραμμική θεωρία ευστάθειας ή ανάλυση με θεωρία 3^{ης} (ή ανώτερης) τάξεως, ενώ δίνει λύσεις και πέραν του φορτίου λυγισμού. Σε επιφανειακούς φορείς (πλάκες, κελύφη) είναι αναγκαία η εφαρμογή της όταν αναζητείται το οριακό φορτίο, όπου παίζει σημαντικό ρόλο η μεταλυγισμική συμπεριφορά.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ, ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (Geometrically and Materially Non-linear Analysis-GMNA)

Οι παραμορφώσεις και οι ανηγμένες παραμορφώσεις είναι μεγάλες.

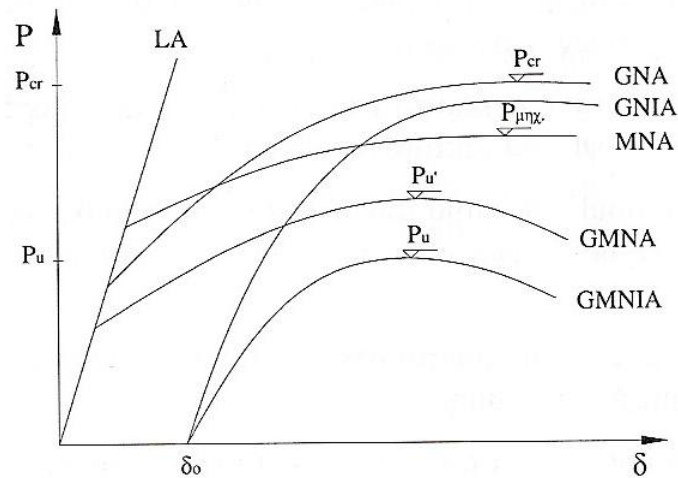
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ, ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΡΧΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ (Geometrically Non-linear Analysis with Imperfections-GNIA)

Η ανάλυση αυτή είναι η ίδια με την GNA, με επιπλέον την παρουσία ατελειών. 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 1^η ιδιομορφή λυγισμού και το μέγεθός τους δίνεται από τους διάφορους κανονισμούς.

ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΣ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ, ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΑΡΧΙΚΕΣ ΑΤΕΛΕΙΕΣ (Geometrically and Materially Non-linear Analysis with Imperfections-GMNIA)

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

Στο σχήμα 2.7 απεικονίζεται η σχέση του γενικευμένου φορτίου και της γενικευμένης παραμόρφωσης για τους διάφορους τύπους ανάλυσης. Όπως φαίνεται, μόνο η GMNIA δίνει το πραγματικό οριακό φορτίο. Οι υπόλοιπες αναλύσεις απαιτούν πρόσθετους ελέγχους για τον προσδιορισμό του φορτίου αυτού. Είναι συνεπώς απαραίτητο να γνωρίζουμε κάθε μη-γραμμικότητα υλικού και μη-γραμμικότητα γεωμετρίας ώστε να υπολογιστεί η πραγματική συμπεριφορά της κατασκευής και η μέγιστη φέρουσα ικανότητά της.



Σχήμα 2.7

Καμπύλες απόκρισης των κατασκευών για διάφορες αναλύσεις

Τα είδη των αναλύσεων που περιγράφηκαν παραπάνω θα μας απασχολήσουν καθ'όλη τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπου θα γίνονται αντίστοιχες αναλύσεις με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

2.4 Κατάταξη διατομών

Με βάση την έκταση στην οποία η αντοχή και η στρωφική ικανότητα των διατομών περιορίζεται από τον τοπικό λυγισμό, οι διατομές κατατάσσονται στις ακόλουθες τέσσερις κατηγορίες:

Διατομές κατηγορίας 1: Είναι εκείνες που μπορούν να σχηματίσουν πλαστική άρθρωση με την απαιτούμενη από την πλαστική ανάλυση στρωφική ικανότητα χωρίς μείωση της αντοχής τους.

Διατομές κατηγορίας 2: Είναι εκείνες που μπορούν να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχής τους, αλλά έχουν περιορισμένη στρωφική ικανότητα λόγω τοπικού λυγισμού.

Διατομές κατηγορίας 3: Είναι εκείνες στις οποίες η τάση στην ακραία θλιβόμενη ίνα του χαλύβδινου μέλους, υποθέτοντας ελαστική κατανομή των τάσεων, μπορεί να φθάσει το όριο διαρροής, αλλά ο τοπικός λυγισμός εμποδίζει την ανάπτυξη της πλαστικής ροπής αντοχής.

Διατομές κατηγορίας 4: Είναι εκείνες στις οποίες τοπικός λυγισμός θα συμβεί πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής σε ένα ή περισσότερα μέρη της διατομής.

Μοντέλο Συμπεριφοράς	Ροπή Αντοχής	Στροφική Ικανότητα	Κατηγορία
<p>Ροπή M_{pl} Τοπικός λυγισμός</p>	<p>Πλαστική ροπή της πλήρους διατομής f_y</p>	<p>Επαρκής $\frac{M}{M_{pl}}$ 1 $\frac{\Phi}{\Phi_{pl}}$ 1 $\frac{\Phi}{\Phi_{pl}}$</p>	1
<p>Ροπή M_{pl} Τοπικός λυγισμός</p>	<p>Πλαστική ροπή της πλήρους διατομής f_y</p>	<p>Περιορισμένη $\frac{M}{M_{pl}}$ 1 $\frac{\Phi}{\Phi_{pl}}$</p>	2
<p>Ροπή M_{pl} M_{el} Τοπικός λυγισμός</p>	<p>Ελαστική ροπή της πλήρους διατομής f_y</p>	<p>Καμία $\frac{M}{M_{pl}}$ 1 $\frac{\Phi}{\Phi_{pl}}$</p>	3
<p>Ροπή M_{pl} M_{el} Τοπικός λυγισμός</p>	<p>Ελαστική ροπή της ενεργού διατομής f_y</p>	<p>Καμία $\frac{M}{M_{pl}}$ 1 $\frac{\Phi}{\Phi_{pl}}$</p>	4

M_{el} ελαστική ροπή αντοχής της διατομής
 M_{pl} πλαστική ροπή αντοχής της διατομής
 M δρώσα ροπή
 Φ στροφή (καμπυλότητα) της διατομής
 Φ_{pl} στροφή (καμπυλότητα) της διατομής απαιτούμενη για να προκαλέσει πλήρη πλαστική κατανομή τάσεων στη διατομή

Πίνακας 2.1

Κατάταξη διατομών σε σχέση με τη ροπή αντοχής και τη στροφική ικανότητα

Τα όρια για τα θλιβόμενα στοιχεία κατηγορίας 1, 2 και 3 λαμβάνονται από τον πίνακα 2.2. Αν ένα στοιχείο της διατομής δεν ικανοποιεί τα όρια της κατηγορίας 3, κατατάσσεται στην κατηγορία 4.

Τα επιμέρους θλιβόμενα τμήματα μιας διατομής (π.χ. ο κορμός ή το πέλμα) ενδέχεται να ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες. Η κατάταξη της διατομής σε αυτήν την περίπτωση γίνεται με βάση την υψηλότερη κατηγορία (δυσμενέστερη) των θλιβόμενων τμημάτων της.

Εσωτερικά θλιβόμενα τμήματα						
						Άξονας κάμψης
						Άξονας κάμψης
Κατηγορία	Τμήμα που υπόκειται σε κάμψη	Τμήμα που υπόκειται σε θλίψη	Τμήμα που υπόκειται σε κάμψη και θλίψη			
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)						
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	όταν $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ όταν $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	όταν $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ όταν $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)						
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	όταν $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ όταν $\psi \leq -1^{*}$: $c/t \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) $\psi \leq -1$ εφαρμόζεται όπου η θλιπτική τάση $\sigma < f_y$ είτε η εφελκυστική παραμόρφωση $\varepsilon_y > f_y/E$

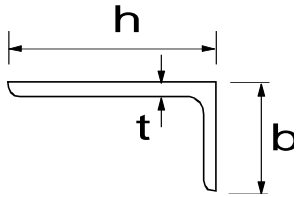
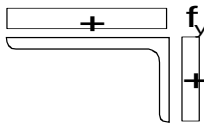
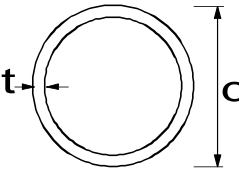
Πίνακας 2.2α

Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος για θλιβόμενα στοιχεία

Προεξέχοντα πέλματα						
Ελατές διατομές		Συγκολλητές διατομές				
Κατηγορία	Στοιχείο υπό θλίψη	Στοιχείο υπό κάμψη και θλίψη				
		Άκρο σε θλίψη		Άκρο σε εφελκυσμό		
Πλαστική κατανομή τάσεων στο στοιχείο (θλίψη θετική)						
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
Ελαστική κατανομή τάσεων στο στοιχείο (θλίψη θετική)						
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Για k_σ βλέπε EN 1993-1-5				
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Πίνακας 2.2β

Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος για θλιβόμενα στοιχεία

Γωνιακά						
<p>Αναφορά επίσης στα "Προεξέχοντα στοιχεία" (βλέπε Πίν.2.2β)</p>					<p>Δεν ισχύει για γωνιακά σε συνεχή επαφή με άλλα στοιχεία</p>	
Κατηγορία	Διατομή σε θλίψη					
Κατανομή τάσεων στη διατομή (θλίψη θετική)						
3	$h/t \leq 15\varepsilon : \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$					
Σωληνωτές διατομές						
						
Κατηγορία	Διατομή σε κάμψη και/ή θλίψη					
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$					
3	$d/t \leq 90\varepsilon^2$					
ΣΗΜΕΙΩΣΗ Για $d/t > 90\varepsilon^2$ βλέπε EN 1993-1-6.						
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

Πίνακας 2.2γ
Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος για θλιβόμενα στοιχεία

2.5 Αστοχία λόγω σχηματισμού πλαστικού μηχανισμού κατάρρευσης

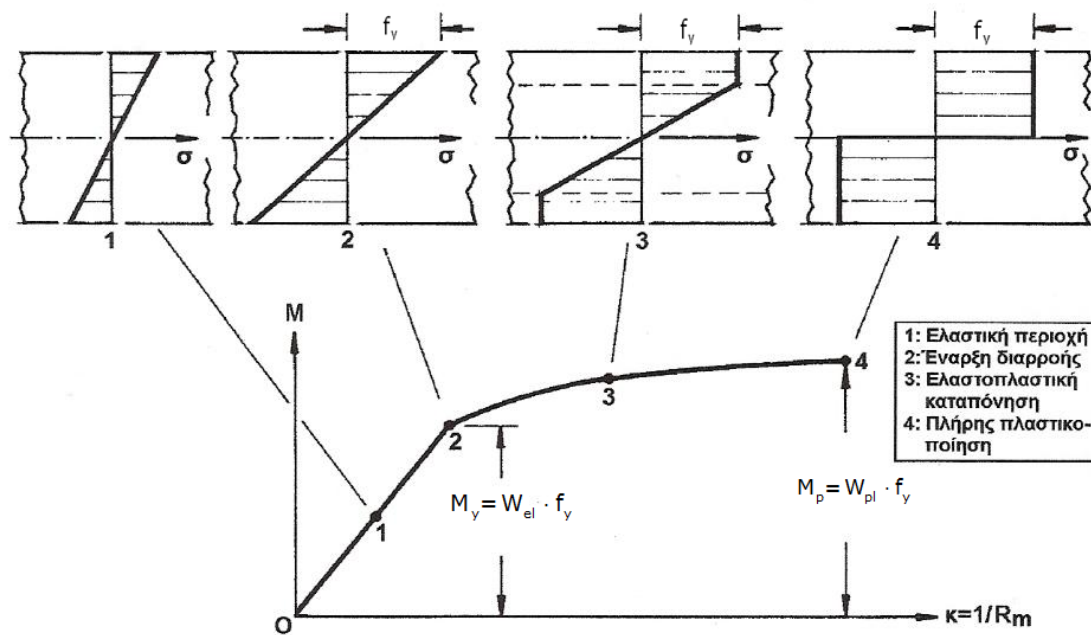
Όπως εξετάσθηκε στην παράγραφο 2.1, η κάμψη σε μια διατομή προκαλεί την ανάπτυξη ορθών τάσεων οι οποίες είναι ανάλογες της απόστασης από την ουδέτερη γραμμή. Αν η διατομή είναι συμμετρική ως προς τον άξονα της κάμψης, τότε οι μέγιστες ορθές τάσεις εμφανίζονται στα άκρα της διατομής και είναι μεταξύ τους ίσες. Για κάποια τιμή επιβαλλόμενου φορτίου, οι ακραίες ίνες της διατομής αποκτούν τάση ίση με την τάση διαρροής f_y , τη μέγιστη τάση που μπορεί να αναλάβει η διατομή. Με αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου, η διαρροή επεκτείνεται και στις εσωτερικές ίνες της διατομής. Όσο αυξάνεται η φόρτιση, η διαρροή επεκτείνεται καθ'όλο το ύψος της μεσαίας διατομής μέχρι την πλήρη πλαστικοποίηση της. Σε αυτήν τη φάση, όλες οι ίνες της διατομής έχουν τάση ίση με f_y . Η διατομή συμπεριφέρεται πλέον ως πλαστική άρθρωση, καθώς δεν έχει αντίσταση έναντι στροφής και η δυσκαμψία της είναι μηδενική. Με την ανάπτυξη πλαστικής άρθρωσης, μειώνεται αυτόματα η στατική αοριστία του φορέα κατά ένα βαθμό, αφού στην θέση αυτή είναι γνωστή και σταθερή πλέον η ροπή κάμψης, ίση με τη μέγιστη τιμή της. Αυτόματα ένας ισοστατικός φορέας μετατρέπεται σε μηχανισμό και καταρρέει. Η κατάσταση αυτή συνοδεύεται από υπερβολικές παραμορφώσεις του φορέα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται σε όλα της τα κεφάλαια με αμφιέρειστες δοκούς χάλυβα. Συνεπώς, η δημιουργία πλαστικής άρθρωσης στη μεσαία διατομή της αμφιέρειστης δοκού ταυτίζεται με τη δημιουργία πλαστικού μηχανισμού κατάρρευσης.

Η μορφή αυτή αστοχίας μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δοκούς διατομής κατηγορίας 1 καθώς έχουν τη δυνατότητα τόσο να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχής M_p , όσο και να αναπτύξουν στροφές χωρίς να εκδηλωθεί τοπικός λυγισμός. Το τελευταίο αυτό χαρακτηριστικό δεν έχουν οι διατομές κατηγορίας 2.

Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται η διαδικασία προοδευτικής πλαστικοποίησης μιας διατομής. Οι διαδοχικές φάσεις καταπόνησης είναι συνοπτικά οι εξής:

- Καταπόνηση στην ελαστική περιοχή: Στη φάση αυτή, η ορθή τάση σ κατανέμεται γραμμικά περί τον ουδέτερο άξονα της διατομής, λαμβάνοντας τιμές μικρότερες από το όριο διαρροής του χάλυβα.
- Διαρροή των ακραίων ινών: Η τάση στις ακραίες ίνες έχει γίνει ίση με την τάση διαρροής σ_y . Η αντίστοιχη καμπτική ροπή ονομάζεται ροπή διαρροής και συμβολίζεται με M_y . Επιπρόσθετα, η ροπή διαρροής προκαλεί και τις πρώτες ανηγμένες μηκύνσεις ακραίων ινών ίσες με τη μέγιστη ελαστική ανηγμένη μήκυνση $\epsilon_0 = \sigma_y / E$.
- Καταπόνηση στην ελαστοπλαστική περιοχή: Η διαρροή επεκτείνεται σταδιακά και στις εσωτερικές ίνες της διατομής και το διάγραμμα κατανομής των ορθών τάσεων αποτελείται από δύο συνεχώς ελαττούμενα τρίγωνα πάνω στον εκάστοτε ελαστικό πυρήνα της διατομής και από δύο συνεχώς αυξανόμενα ορθογώνια πάνω στο εκάστοτε πλαστικό τμήμα της διατομής. Το σύνορο μεταξύ του ελαστικού πυρήνα και του πάνω πλαστικού πυρήνα της διατομής ονομάζεται πάνω ελαστοπλαστικό σύνορο, ενώ αντίστοιχα ορίζεται και το κάτω ελαστοπλαστικό σύνορο.
- Πλήρης πλαστικοποίηση της διατομής: Ολόκληρη η διατομή εισέρχεται στην πλαστική περιοχή. Η καμπτική ροπή που αντιστοιχεί στην κατάσταση αυτή ονομάζεται ροπή πλήρους πλαστικοποίησης και συμβολίζεται με M_p . Η ροπή αυτή μετατρέπει τη διατομή στην οποία ενεργεί σε πλαστική άρθρωση. Η διαφορά της πλαστικής άρθρωσης με τη συμβατική άρθρωση είναι ότι στην πρώτη αναπτύσσεται ροπή όχι μηδενική, αλλά ίση με M_p . Στην πραγματικότητα μετατρέπεται σε πλαστική άρθρωση μια μικρή περιοχή της δοκού, εκατέρωθεν της διατομής που υφίσταται τη ροπή πλήρους πλαστικοποίησης.



Σχήμα 2.8
Διαδικασία πλαστικοποίησης διατομής

Η ροπή διαρροής υπολογίζεται από τη σχέση: $M_y = W_{el} \cdot f_y$ (2.9)
όπου W_{el} : η μικρότερη από τις ελαστικές ροπές αντίστασης των ακραίων ινών.

Από το διάγραμμα κατανομής των ορθών τάσεων της τελευταίας εικόνας του σχήματος 2.8, προσδιορίζεται η θέση της ευθείας που διαχωρίζει τη διατομή σε δύο τμήματα ίσου εμβαδού (εν προκειμένω είναι ο κεντροβαρικός άξονας της διατομής, επειδή έχει υποθεθεί διπλά συμμετρική διατομή). Η ευθεία αυτή καλείται πλαστικός ουδέτερος άξονας της διατομής και εν γένει διαφέρει από τον ελαστικό ουδέτερο άξονά της (υπενθυμίζεται ότι ο ελαστικός ουδέτερος άξονας διαιρεί τη διατομή σε εφελκυόμενη και θλιβόμενη περιοχή και διέρχεται από το κέντρο βάρους της διατομής).

Η στατική ροπή S μιας επιφάνειας εμβαδού A ως προς τους κεντροβαρικούς άξονες $y-y$ και $z-z$ της διατομής ορίζεται ως:

$$S_y = \int_A z dA \quad \text{και} \quad S_z = \int_A y dA \quad \text{αντίστοιχα.}$$

Η πλαστική ροπή αντίστασης της διατομής ορίζεται ως εξής:

$$W_{pl} = S_{1,y} + S_{2,y} \quad (2.10)$$

όπου $S_{i,y}$ η στατική ροπή του κάθε τμήματος ίσου εμβαδού ως προς τον πλαστικό ουδέτερο άξονα y^*-y^* .

Η ροπή πλήρους πλαστικοποίησης δίνεται από τη σχέση:

$$M_p = W_{pl} \cdot f_y \tag{2.11}$$

Σημειώνονται οι ροπές αντοχής για τις 4 κατηγορίες διατομών που ορίζονται με βάση τον Ευρωκώδικα 3:

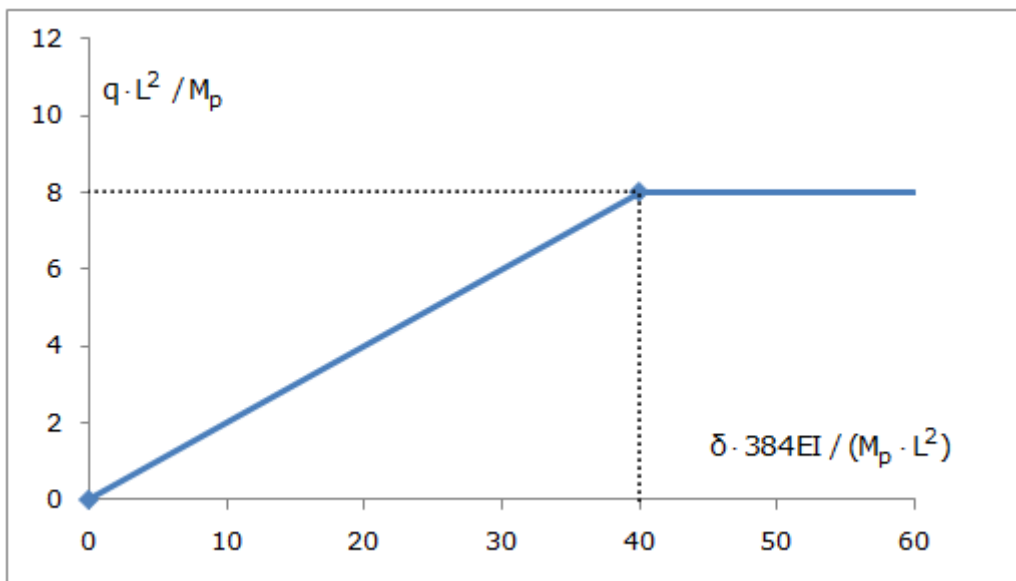
Για τις κατηγορίες 1 και 2, ως ροπή αντοχής λαμβάνεται η πλαστική ροπή M_p .

Για την κατηγορία 3 λαμβάνεται η ελαστική ροπή M_{el} (ή M_y).

Για την κατηγορία 4 λαμβάνεται η ροπή τοπικού λυγισμού $M_0 < M_{el}$.

Δεδομένου ότι η παρούσα διπλωματική εργασία μελετάει αμφιέρειστες δοκούς, δίνεται στο σχήμα 2.9 ο αναλυτικός δρόμος ισορροπίας (δηλαδή το διάγραμμα φορτίου-μετατοπίσεως) αμφιέρειστης δοκού διατομής κατηγορίας 1 ή 2, υπό καταναμημένο φορτίο.

Το καταναμημένο φορτίο που αντιστοιχεί στο σχηματισμό της πλαστικής άρθρωσης στο μέσο της αμφιέρειστης δοκού είναι ίσο με $q = 8 \cdot M_p / L^2$ και η βύθιση της μεσαίας διατομής ίση με $\delta = 40 / (384EI) M_p \cdot L^2$. Το διάγραμμα φορτίου-μετατοπίσεως είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 2.9

Δρόμος ισορροπίας αμφιέρειστης δοκού μήκους L υπό καταναμημένο φορτίο q

2.6 Ελαστικός έλεγχος σε οριακή κατάσταση αστοχίας

Ο ελαστικός έλεγχος ορθών και διατμητικών τάσεων μπορεί να εφαρμόζεται για όλες τις κατηγορίες διατομών, συνιστά δε τον απαραίτητο έλεγχο για τις διατομές κατηγορίας 3 και 4. (Στις τελευταίες, χρησιμοποιείται η απομειωμένη διατομή η οποία ονομάζεται ενεργός διατομή).

Επειδή κύριο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη διατομών διπλού ταυ, όπου γίνεται αναφορά σε γεωμετρικά και αδρανειακά μεγέθη, θα θεωρούνται τα αντίστοιχα των διατομών διπλού ταυ.

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

$$M_{Ed} \leq M_{el,Rd} \quad (2.12)$$

όπου M_{Ed} : η ροπή κάμψης σχεδιασμού
και $M_{el,Rd}$: η ελαστική ροπή αντοχής που δίνεται από την επόμενη σχέση

$$M_{el,Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.13)$$

Για τις διατομές κατηγορίας 4 αντί της ελαστικής ροπής αντίστασης, χρησιμοποιείται η ενεργός ροπή αντίστασης W_{eff} .

Ο ελαστικός έλεγχος για διαξονική κάμψη γίνεται:

$$\frac{M_{Ed,y}}{M_{el,Rd,y}} + \frac{M_{Ed,z}}{M_{el,Rd,z}} \leq 1 \quad (2.14)$$

Ο **ελαστικός έλεγχος διατμητικών τάσεων** απαιτεί την ικανοποίηση της ανισότητας:

$$T_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_w} < \frac{f_y}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \quad (2.15)$$

όπου V_{Ed} : η τέμνουσα σχεδιασμού

A_w : η επιφάνεια διατμήσεως

Όπως επισημάνθηκε, οι έλεγχοι που παρουσιάζονται αναφέρονται σε διατομές διπλού ταυ, οι οποίες συνιστούν τον κύριο φορέα μελέτης των σιδηρών κατασκευών.

Στις διατομές αυτές, η τέμνουσα δύναμη V_z παραλαμβάνεται σχεδόν αποκλειστικά από τον κορμό της διατομής, ενώ τα πέλματα έχουν αμελητέα

συμμετοχή. Συνεπώς, ως επιφάνεια διάτμησης θεωρείται η επιφάνεια του κορμού.

Επομένως για τέμνουσα $V_{Ed,z}$, η σχέση (2.15) αποκτά τη μορφή:

$$\tau_{Ed,xz} = \frac{V_{Ed,z}}{h_w t_w} \quad (2.16)$$

Εάν πρόκειται για τέμνουσα $V_{Ed,y}$, αυτή παραλαμβάνεται αποκλειστικά από τα πέλματα χωρίς συνεισφορά του κορμού. Θεωρώντας την έκφραση της διατμητικής τάσης που έχει παρουσιασθεί στην παράγραφο 2.1, ισχύει:

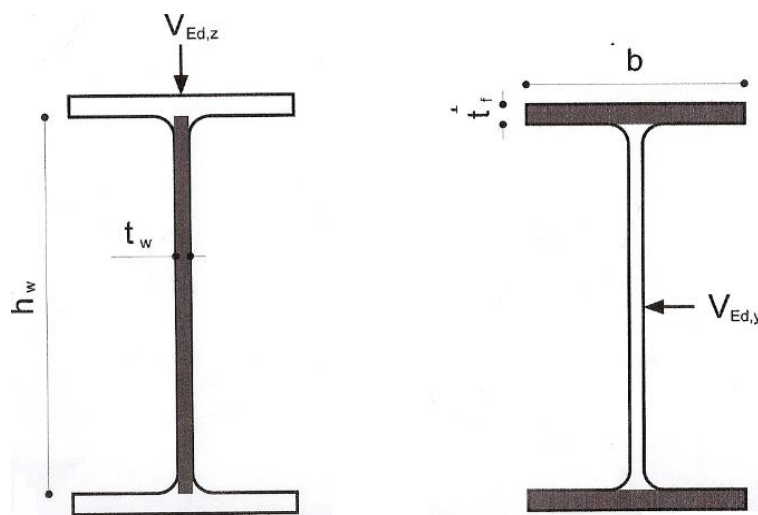
$$\tau_{xy} = \frac{V_y \cdot S_z}{I_z \cdot (2 \cdot t_f)}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές της ροπής αδράνειας και της στατικής ροπής, που είναι ίσες με $I_z = 2 \cdot \frac{(t_f \cdot b^3)}{12} = \frac{t_f \cdot b^3}{6}$ και $S_z = 2 \cdot \left(\frac{b}{2} \cdot t_f\right) \cdot \frac{b}{4} = \frac{b^2 \cdot t_f}{4}$ αντίστοιχα, προκύπτει η μέγιστη διατμητική τάση σε κάθε πέλμα ίση με:

$$\tau_{xy,max} = \frac{3}{4} \cdot \frac{V_y}{b \cdot t_f}$$

Επομένως, για τα 2 πέλματα ισχύει:

$$\tau_{Ed,xy} = \frac{1,5 \cdot V_{Ed,y}}{2bt_f} \quad (2.17)$$



Σχήμα 2.10

Επιφάνειες διάτμησης κατά τον ελαστικό έλεγχο για τις 2 περιπτώσεις φόρτισης

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

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{Ed,xy}^2 + 3\tau_{Ed,xz}^2} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.18)$$

Ο παραπάνω έλεγχος πρέπει να γίνεται εάν συνυπάρχουν οι μέγιστες ορθές και οι μέγιστες διατμητικές τάσεις στην ίδια διατομή, όπως για παράδειγμα στο μέσο συνεχούς δοκού 2 ανοιγμάτων, όπου αναπτύσσεται τόσο μέγιστη καμπτική ροπή όσο και μέγιστη τέμνουσα δύναμη. Στην περίπτωση αυτή, ελέγχονται τα σημεία της διατομής όπου αναπτύσσονται ταυτόχρονα μεγάλες τιμές ορθών και διατμητικών τάσεων.

2.7 Πλαστικός έλεγχος σε οριακή κατάσταση αστοχίας

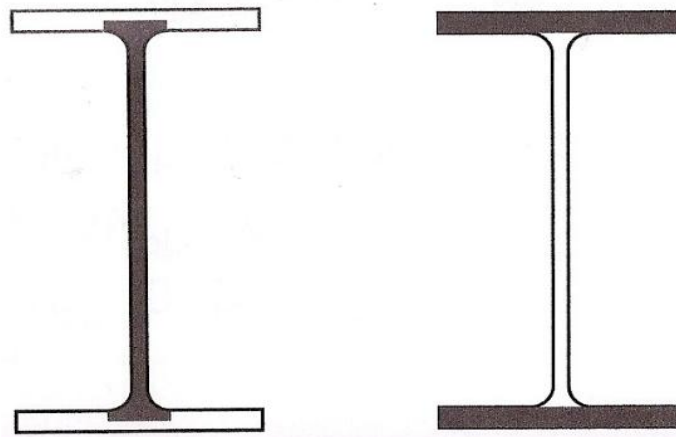
Ο πλαστικός έλεγχος επιτρέπεται να πραγματοποιηθεί εφόσον η εξεταζόμενη διατομή είναι κατηγορίας 1 ή 2. Συνιστά μάλιστα οικονομικότερο έλεγχο από τον ελαστικό, γι'αυτό προτιμάται η χρήση του έναντι του ελαστικού για τις κατηγορίες 1 και 2, εκτός αν ζητείται διαφορετικά.

2.7.1 Πλαστικός έλεγχος σε τέμνουσα

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd} \quad (2.19)$$

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

Εάν πρόκειται για τέμνουσα V_z , ως επιφάνεια διάτμησης A_v για τις ελατές διατομές θεωρείται η επιφάνεια του κορμού, προσαυξημένη με τις επιφάνειες των καμπυλών συναρμογής κορμού και πελμάτων, καθώς και τις προεκτάσεις του κορμού μέσα στα πέλματα. Για τις συγκολλητές διατομές, η επιφάνεια διάτμησης αποτελείται μόνο από την καθαρή επιφάνεια του κορμού.



Σχήμα 2.11

Επιφάνειες διάτμησης κατά τον πλαστικό έλεγχο για τις 2 περιπτώσεις φόρτισης

Για τις ελατές διατομές, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.11, η επιφάνεια διάτμησης είναι ίση με:

$$A_{vz} = A_{tot} - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \quad (2.20)$$

Εάν πρόκειται για τέμνουσα V_y , η αντίστοιχη επιφάνεια διάτμησης είναι ίση με $A_{vy} = 2 \cdot b \cdot t_f$.

$$(2.21)$$

2.7.2 Έλεγχος απομείωσης της αντοχής σε ροπή κάμψης λόγω παρουσίας τέμνουσας

Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται εφόσον στην ίδια διατομή αναπτύσσονται συγχρόνως μέγιστη ροπή και μέγιστη τέμνουσα.

Εάν $V_{Ed} > 0,5V_{pl,Rd}$, τότε η πλαστική ροπή αντοχής δίνεται από τον τύπο:

$$M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot (1 - \rho) \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad (2.22)$$

$$\text{όπου } \rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (2.23)$$

Εάν έχουμε διαξονική κάμψη, ελέγχεται αν χρειάζεται να γίνει απομείωση της αντοχής κάθε ροπής κάμψης ξεχωριστά, με την αντίστοιχη τέμνουσα.

2.7.3 Πλαστικός έλεγχος σε μονοαξονική κάμψη

$$M_{Ed} \leq M_{pl,Rd} \quad (2.24)$$

όπου $M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0}$

2.7.4 Πλαστικός έλεγχος σε διαξονική κάμψη

$$\left(\frac{M_{Ed,y}}{M_{pl,Rd,y}} \right)^a + \left(\frac{M_{Ed,z}}{M_{pl,Rd,z}} \right)^b \leq 1 \quad (2.25)$$

Για διατομές I και H, $a=2$ και $\beta=5n$ με $\beta \geq 1$.

Για κοίλες κυκλικές διατομές, $a=2$ και $\beta=2$

Για κοίλες ορθογωνικές διατομές, $a=\beta = \frac{1,66}{1 - 1,13n^2}$ με $a=\beta \leq 6$

όπου $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$

Συγκεφαλαιώνοντας, σχετικά με τα όσα έχουν μελετηθεί περί είδους ανάλυσης και ελέγχου των διατομών, υπενθυμίζεται ότι:

Η εφαρμογή πλαστικής ανάλυσης και πλαστικού ελέγχου προϋποθέτει διατομές κατηγορίας 1.

Στις διατομές κατηγορίας 2 εφαρμόζεται πλαστικός έλεγχος, αφού έχουν αντοχή ίση με τη ροπή πλαστικοποίησης, αλλά ελαστική ανάλυση, καθώς δεν έχουν επαρκή στρωφική ικανότητα λόγω τοπικού λυγισμού.

Στις διατομές κατηγορίας 3 επιτρέπεται μόνο ελαστικός έλεγχος και ελαστική ανάλυση. Η αντοχή τους είναι ίση με την ελαστική ροπή αντοχής.

Οι διατομές κατηγορίας 4 είναι αυτές στις οποίες εμφανίζεται τοπικός λυγισμός πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής. Επιτρέπεται η εφαρμογή ελαστικού ελέγχου και ελαστικής ανάλυσης, απαιτούνται όμως πρόσθετοι έλεγχοι σε κύρτωση έναντι κινδύνου τοπικού λυγισμού.

2.8 Λυγισμός- Δρόμοι ισορροπίας

2.8.1 Είδη 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. Διακρίνονται τα ακόλουθα είδη λυγισμού:

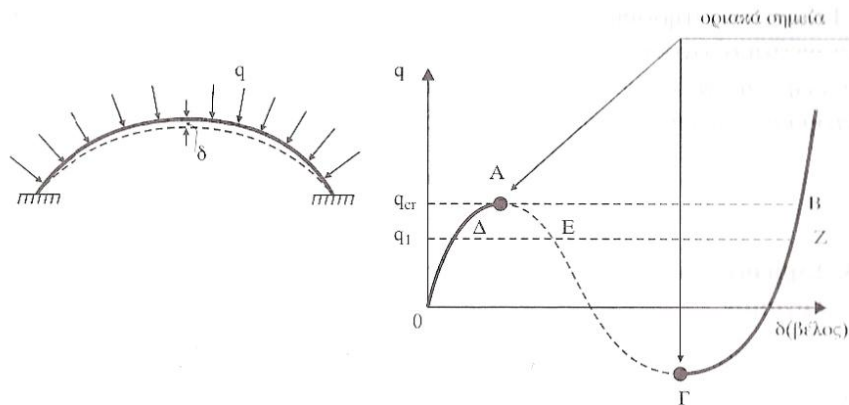
- Καμπτικός λυγισμός, κατά τον οποίο οι διατομές μετατοπίζονται χωρίς να στρέφονται
- Στρεπτικός λυγισμός, κατά τον οποίο οι διατομές στρέφονται χωρίς να μετατοπίζονται
- Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (ή πλευρικός) που αποτελεί συνδυασμό των δύο παραπάνω μορφών
- Τοπικός λυγισμός κατά τον οποίο μια συγκεκριμένη περιοχή του μέλους όπου η θλίψη είναι μέγιστη, υφίσταται τοπική παραμόρφωση

Σε καμπτόμενα μέλη, από τις παραπάνω μορφές λυγισμού, είναι πιθανή η εμφάνιση του πλευρικού και του τοπικού λυγισμού οι οποίοι και θα παρουσιασθούν στο κεφάλαιο αυτό.

2.8.2 Οριακό σημείο- Σημείο διακλαδώσεως- Μεταλυγισμική αντοχή

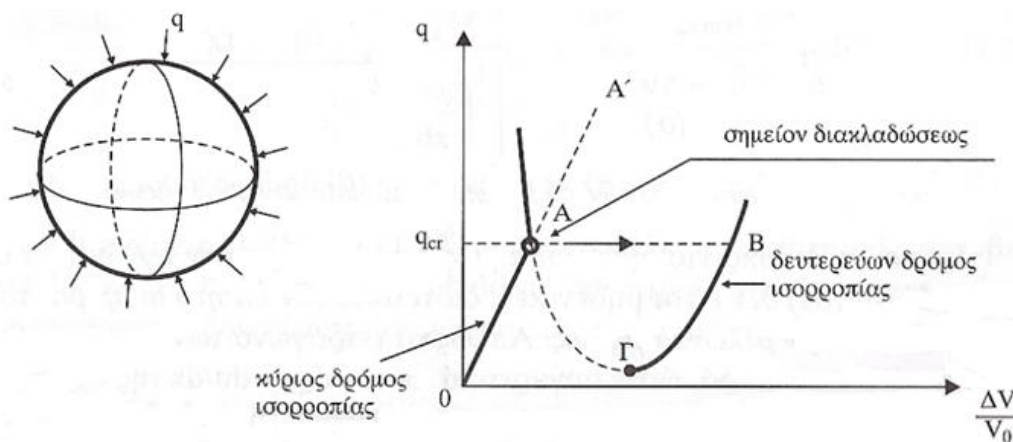
Όπως είναι γνωστό, κάθε σημείο του δρόμου ισορροπίας (δηλαδή του διαγράμματος φορτίου-μετατοπίσεως) αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη κατάσταση ισορροπίας. Υπάρχουν δύο είδη λυγισμού που εκφράζονται με διαφορετική μορφή των δρόμων ισορροπίας τους: ο λυγισμός με οριακό σημείο (nonlinear collapse) και ο λυγισμός με σημείο διακλάδωσης (bifurcation buckling).

Κατά το λυγισμό με οριακό σημείο, η δυσκαμψία της κατασκευής, άρα και η κλίση του δρόμου ισορροπίας μειώνεται με την αύξηση του φορτίου. Όταν το φορτίο γίνει ίσο με το φορτίο αστοχίας, ο δρόμος ισορροπίας έχει πλέον μηδενική κλίση και επέρχεται η αστοχία της κατασκευής σχεδόν αυτόματα. Αυτός ο τύπος αστοχίας είναι χαρακτηριστικός των χαμηλών τόξων και αψίδων υπό ομοιόμορφη εγκάρσια φόρτιση.



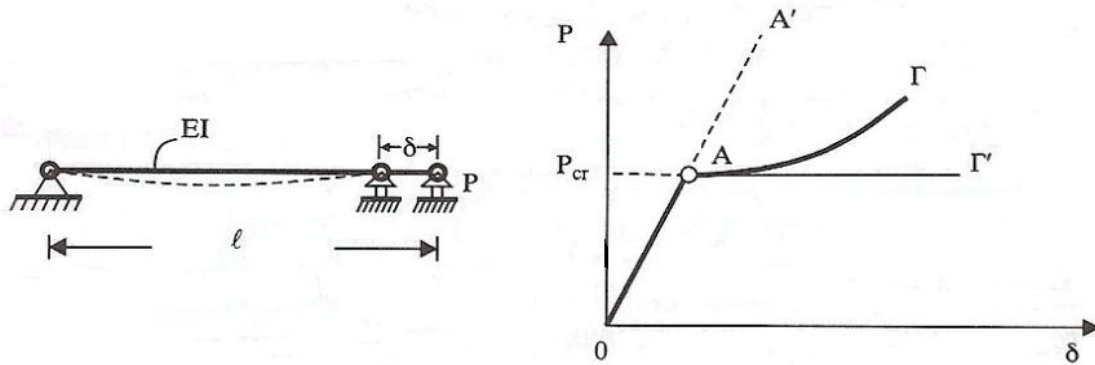
Σχήμα 2.12
Δρόμος ισορροπίας χαμηλού τόξου

Ο λυγισμός με σημείο διακλάδωσης έχει το χαρακτηριστικό ότι όταν το φορτίο φθάσει την τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού, στον αντίστοιχο δρόμο ισορροπίας οι μετατοπίσεις συνεχίζουν να αυξάνονται σαν να ακολουθούν διαφορετική πορεία από την προλυγισμική, δηλαδή το διάγραμμα δεν είναι συνεχές, αλλά αποτελείται από δύο κλάδους που τέμνονται στο λεγόμενο σημείο διακλάδωσης. Ο πρώτος κλάδος του διαγράμματος μέχρι το σημείο διακλάδωσης ονομάζεται κύριος ή θεμελιώδης δρόμος ισορροπίας, ενώ ο δεύτερος κλάδος καλείται δευτερεύων δρόμος ισορροπίας. Η αστοχία επέρχεται αν ο δρόμος ισορροπίας μετά το σημείο διακλάδωσης αποκτήσει αρνητική κλίση. Στην περίπτωση αυτή έχουμε αστοχία μέσω ασταθούς σημείου διακλάδωσης. Ο τύπος αυτός αστοχίας είναι χαρακτηριστικός για τα ψηλά τόξα και τα σφαιρικά κελύφη.



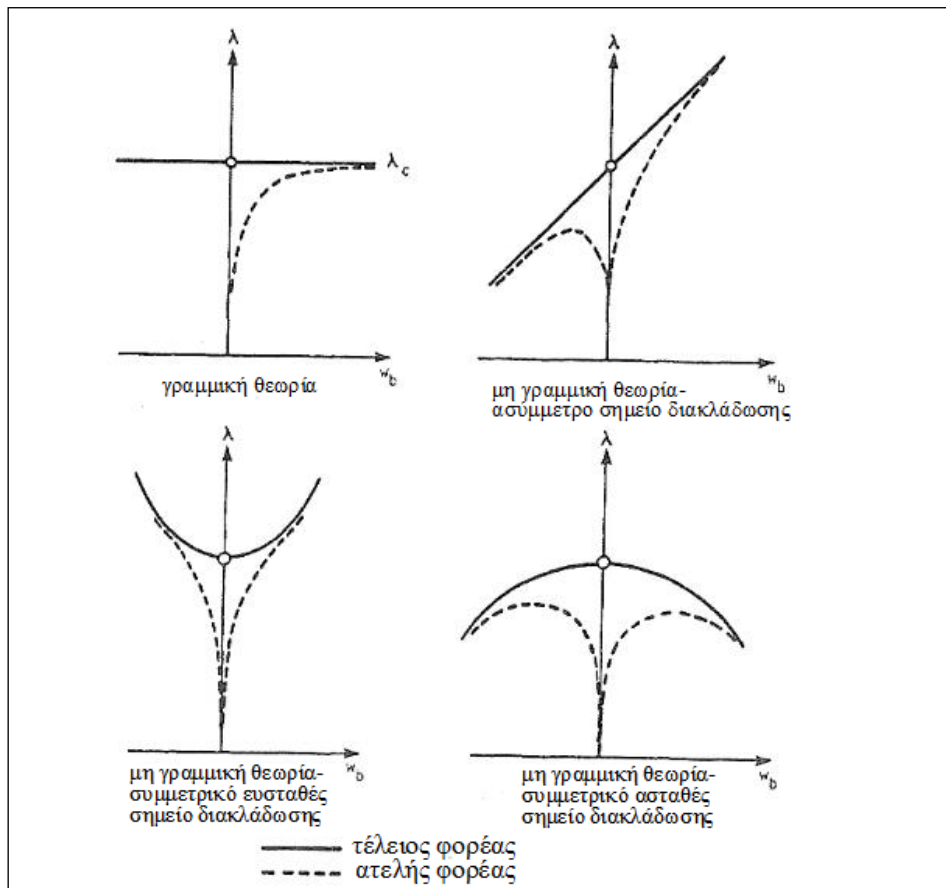
Σχήμα 2.13
Δρόμος ισορροπίας σφαιρικού κελύφους υπό ομοιόμορφη ακτινική θλίψη

Υπάρχει και η περίπτωση λυγισμού με σημείο διακλάδωσης κατά την οποία ο φορέας μπορεί να φέρει φορτίο μεγαλύτερο από το φορτίο λυγισμού, έχει δηλαδή μεταλυγισμική αντοχή. Τέτοιες είναι οι περιπτώσεις λυγισμού θλιβόμενων πλακών ή θλιβόμενων ράβδων μεγάλου μήκους.



Σχήμα 2.14

Δρόμος ισορροπίας υποστυλώματος Euler υπό αξονικό θλιπτικό φορτίο



Σχήμα 2.15

Διαφορετικά είδη δρόμων ισορροπίας για λυγισμό με σημείο διακλάδωσης τέλειων και ατελών φορέων

Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η παρουσία ατελειών καταργεί το σημείο διακλάδωσης και ως αποτέλεσμα προκύπτει ένας ενιαίος δρόμος ισορροπίας, ο οποίος τείνει ασυμπτωτικά στο δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας από την αντίστοιχη ανάλυση του τέλει φορέα. Η δυσκαμψία του φορέα μειώνεται σταδιακά και ο φορέας οδηγείται ταχύτερα στην αστοχία.

Υπενθυμίζοντας τα είδη αναλύσεων που έχουν περιγραφεί στην παράγραφο 2.3, επισημαίνεται ότι η εφαρμογή της γραμμικής θεωρίας λυγισμού δίνει αποτελέσματα μόνο για τον κύριο δρόμο ισορροπίας και το κρίσιμο φορτίο. Προκειμένου να λάβουμε πληροφορίες και για τη μεταλυγισμική συμπεριφορά του φορέα, δηλαδή για το δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας, είναι απαραίτητο να εφαρμοστεί η μη γραμμική θεωρία λυγισμού.

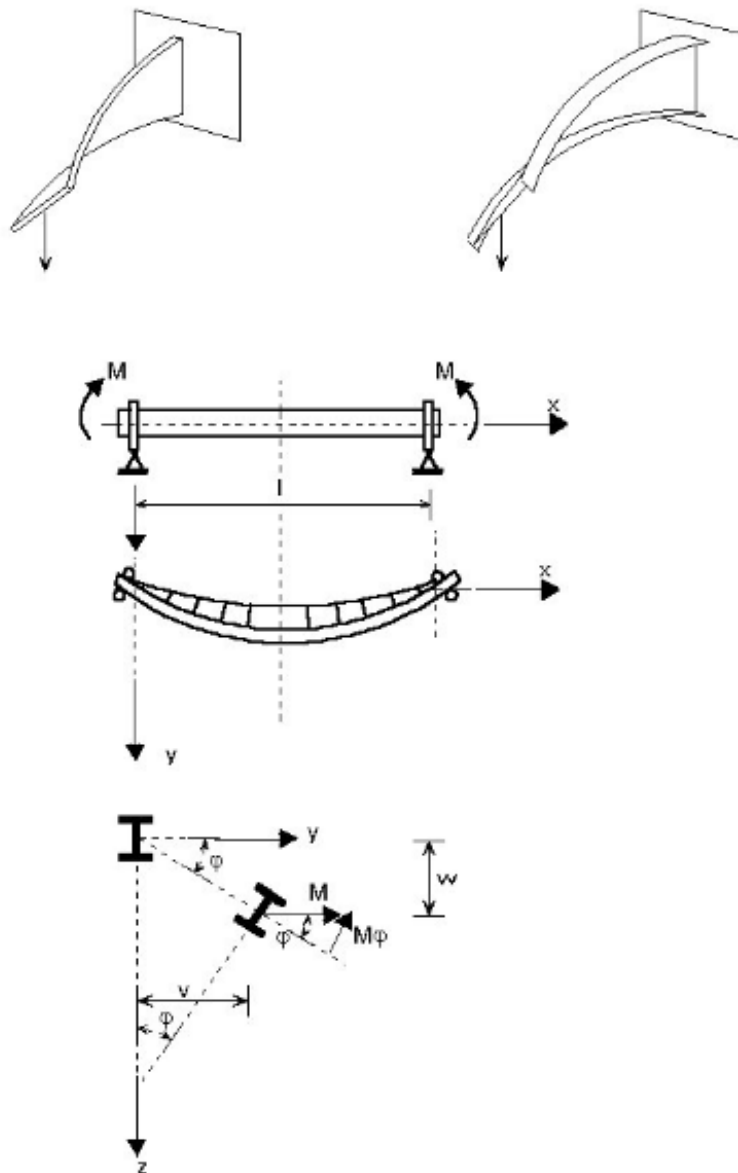
2.9 Πλευρικός λυγισμός καμπτόμενης δοκού

Πλευρικός λυγισμός είναι η μορφή αστάθειας ενός καμπτόμενου μέλους, κατά την οποία οι διατομές υπόκεινται, μετά το λυγισμό, σε στροφή περί το κέντρο διάτμησης και σε ταυτόχρονη πλευρική μετατόπιση. Εάν το μέλος υπόκειται όχι μόνο σε εγκάρσια φορτία, αλλά και σε αξονική θλίψη, ο κίνδυνος πλευρικού λυγισμού είναι μεγαλύτερος και τότε ονομάζεται στρεπτοκαμπτικός λυγισμός.

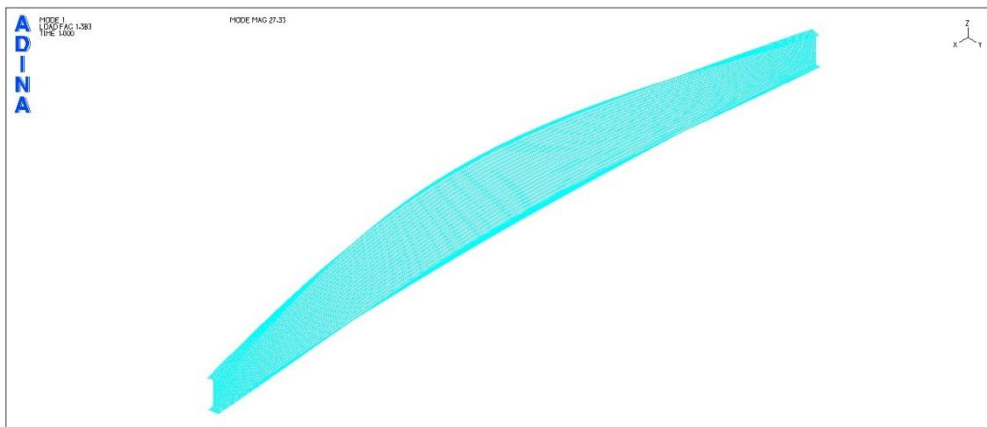
Διατομές οι οποίες είναι ευαίσθητες σε πλευρικό λυγισμό είναι οι ανοιχτές διατομές διπλού ταυ ή U, καθώς διαθέτουν μικρή στρεπτική δυσκαμψία και είναι ευαίσθητες σε στρέβλωση. Οι κλειστές διατομές, όπως κοίλες κυκλικές και κοίλες ορθογωνικές, διαθέτουν μεγάλη στρεπτική δυσκαμψία και δεν είναι ευπαθείς σε πλευρικό λυγισμό.

Το φαινόμενο του πλευρικού λυγισμού έχει την ακόλουθη ποιοτική περιγραφή: Εάν μία δοκός μη προστατευμένη έναντι πλευρικής εκτροπής υποβάλλεται σε κάμψη περί τον ισχυρό άξονα της διατομής, το ένα πέλμα της διατομής θλίβεται και αναπτύσσονται λόγω κάμψης ορθές θλιπτικές τάσεις. Το πέλμα αυτό ως θλιβόμενο έχει την τάση να λυγίσει, όμως ο κορμός παρεμποδίζει το λυγισμό του θλιβόμενου πέλματος περί τον ασθενή άξονα του πέλματος, λόγω της μεγάλης δυσκαμψίας του κορμού κατά τον άξονα αυτό. Τελικά, το θλιβόμενο πέλμα λυγίζει περί τον ισχυρό άξονα του πέλματος για αρκετά υψηλότερες τιμές φορτίου, δηλαδή εκτρέπεται πλευρικά. Το εφελκυσμένο πέλμα δεν έχει την τάση να λυγίσει, συνδέεται όμως μέσω του κορμού με το θλιβόμενο πέλμα, το οποίο εκτρέπεται

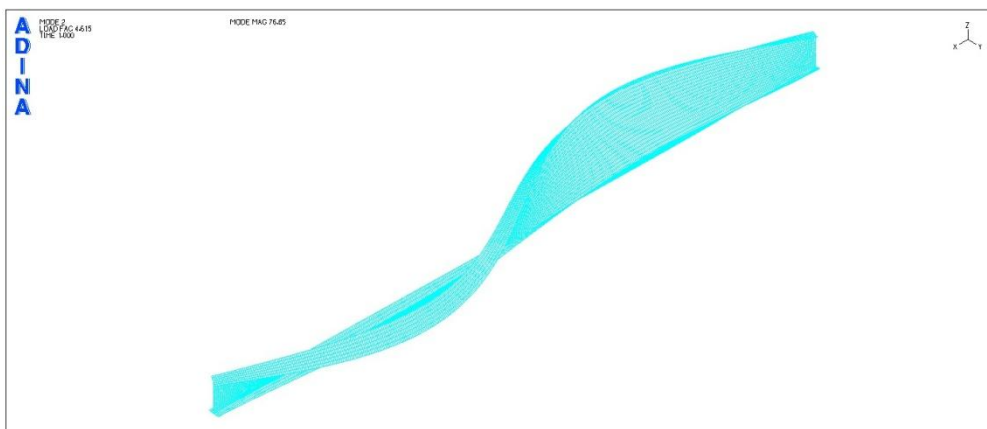
πλευρικά. Αποτέλεσμα είναι και η στροφή της διατομής περί το διαμήκη άξονα.



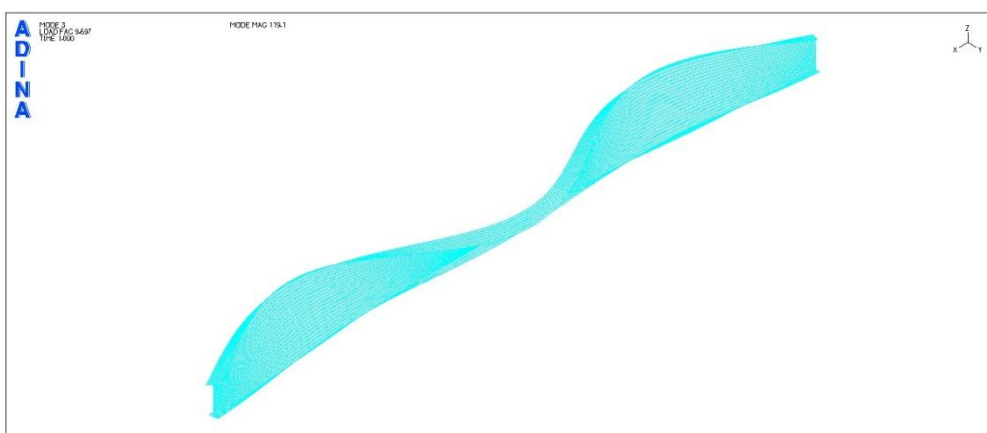
Σχήμα 2.16
Εικόνα πλευρικού λυγισμού



1^η ιδιομορφή λυγισμού



2^η ιδιομορφή λυγισμού



3^η ιδιομορφή λυγισμού

Σχήμα 2.17

Οι τρεις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού για αμφιέρειστη δοκό μήκους 20m

2.9.1 Αντοχή των μελών σε πλευρικό λυγισμό

Μία πλευρικά μη προστατευμένη δοκός σταθερής διατομής που υπόκειται σε κάμψη περί τον ισχυρό άξονα πρέπει να ελέγχεται έναντι πλευρικού λυγισμού ως εξής:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.26)$$

όπου M_{Ed} : η ροπή κάμψης σχεδιασμού περί τον ισχυρό άξονα

$M_{b,Rd}$: η ροπή αντοχής έναντι πλευρικού λυγισμού

Η ροπή αντοχής σε πλευρικό λυγισμό μιας δοκού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2.27)$$

όπου W_y : η ροπή αντίστασης της διατομής ως εξής:

- $W_y = W_{pl,y}$ για διατομές κατηγορίας 1 ή 2
- $W_y = W_{el,y}$ για διατομές κατηγορίας 3
- $W_y = W_{eff,y}$ για διατομές κατηγορίας 4

χ_{LT} : ο μειωτικός συντελεστής για πλευρικό λυγισμό.

2.9.1.1 Καμπύλες πλευρικού λυγισμού

Για καμπτόμενα μέλη σταθερής διατομής, η τιμή του μειωτικού συντελεστή χ_{LT} καθορίζεται από τη σχέση:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (2.28)$$

Πρέπει $\chi_{LT} \leq 1$

$$\text{Ισχύει: } \Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + a_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (2.29)$$

όπου a_{LT} : συντελεστής ατελειών

$$\text{και η ανηγμένη λυγηρότητα } \bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (2.30)$$

όπου W_y η αντίστοιχη ροπή αντίστασης για κάθε είδος διατομής

Η ελαστική κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού M_{cr} βασίζεται στις ιδιότητες της πλήρους διατομής και λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες φορτίσεως, την πραγματική κατανομή της ροπής και τις πλευρικές δεσμεύσεις.

Καμπύλη λυγισμού	a	b	c	d
Συντελεστής ατελειών a_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Πίνακας 2.3

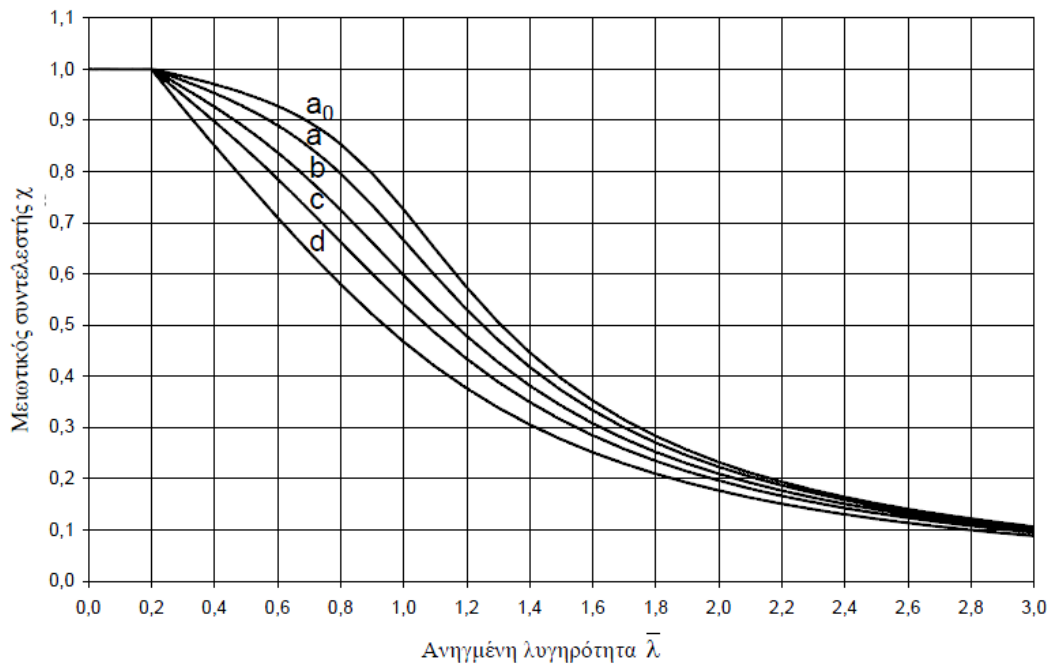
Συνιστώμενες τιμές των συντελεστών ατελειών για καμπύλες πλευρικού λυγισμού

Η κατάλληλη καμπύλη λυγισμού δίνεται από τον πίνακα 2.4

Διατομή	Όρια	Καμπύλη λυγισμού
Ελατές διατομές I	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Συγκολλητές διατομές I	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Άλλες διατομές	-	d

Πίνακας 2.4

Καμπύλες πλευρικού λυγισμού



Σχήμα 2.18
Καμπύλες λυγισμού

Οι καμπύλες λυγισμού δίνουν την τιμή του μειωτικού συντελεστή χ_{LT} ως συνάρτηση της ανηγμένης λυγηρότητας λ_{LT} .

Για λυγηρότητα $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,2$ ή για $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,04$ οι επιδράσεις πλευρικού λυγισμού μπορούν να αγνοούνται και να γίνονται μόνο έλεγχοι διατομής.

2.9.1.2 Καμπύλες πλευρικού λυγισμού για ελατές διατομές ή ισοδύναμες συγκολλητές διατομές

Για ελατές διατομές ή ισοδύναμες συγκολλητές διατομές υπό κάμψη, οι τιμές του χ_{LT} για την αντίστοιχη ανηγμένη λυγηρότητα μπορεί να καθορίζονται από

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{αλλά} \quad \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1,0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases} \quad (2.31)$$

$$\text{με } \Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + a_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (2.32)$$

Οι παρακάτω τιμές προτείνονται για ελατές διατομές ή ισοδύναμες συγκολλητές:

$$\bar{\lambda}_{LT,0}=0,4 \quad (\text{μέγιστη τιμή})$$

$$\beta=0,75 \quad (\text{ελάχιστη τιμή})$$

Διατομή	Όρια	Καμπύλη λυγισμού
Ελατές διατομές I	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
Συγκολλητές διατομές I	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

Πίνακας 2.5

Καμπύλες πλευρικού λυγισμού

Για λυγηρότητα $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$ ή για $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16$ οι επιδράσεις πλευρικού λυγισμού μπορούν να αγνοούνται και να γίνονται μόνο έλεγχοι διατομής.

Για να ληφθεί υπόψη η κατανομή της ροπής μεταξύ των πλευρικών στηρίξεων των μελών, ο μειωτικός συντελεστής χ_{LT} μπορεί να τροποποιηθεί ως εξής:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad \text{αλλά} \quad \chi_{LT,mod} \leq 1 \quad (2.33)$$

$$\text{όπου } f = 1 - 0,5(1 - k_c)[1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \quad \text{αλλά } f \leq 1,0 \quad (2.34)$$

k_c : διορθωτικός συντελεστής σύμφωνα με τον Πίνακα 2.6



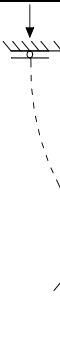

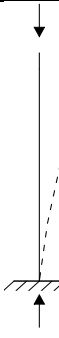
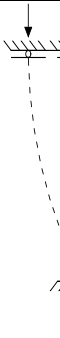



Κατανομή ροπής	k_c
 $\psi = 1$	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

Πίνακας 2.6
Διορθωτικοί συντελεστές k_c

2.9.1.3 Υπολογισμός ελαστικής κρίσιμης ροπής πλευρικού λυγισμού M_{cr}

Ισοδύναμο μήκος λυγισμού

Ορίζεται ως l το ισοδύναμο μήκος λυγισμού, ίσο προς την απόσταση δύο διαδοχικών σημείων καμπής της πρώτης μορφής λυγισμού και k ο συντελεστής ισοδύναμου μήκους λυγισμού, ώστε να ισχύει $l = k \cdot L$. Η απόσταση αυτή μπορεί να είναι μικρότερη, ή και μεγαλύτερη του πραγματικού μήκους του υποστυλώματος.

Μορφές λυγισμού χαρακτηριστικών τύπων υποστυλωμάτων						
Θεωρητικές τιμές k	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Συνθήκες στηρίξεως			άστρεπτα αμετάθετα			
			στρεπτά αμετάθετα			
			άστρεπτα μεταθετά			

Πίνακας 2.7

Συντελεστές ισοδύναμου μήκους λυγισμού υποστυλωμάτων

Αναλυτικές εκφράσεις της κρίσιμης ροπής M_{cr}

Στην περίπτωση μίας δοκού σταθερής διατομής, συμμετρικής ως προς τον ασθενή άξονα αδρανείας της και υποκείμενης σε κάμψη περί τον ισχυρό άξονα αδρανείας της, η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού υπολογίζεται από τη εξίσωση:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} + (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j)^2 - (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j) \right] \quad (2.35)$$

όπου

C_1 , C_2 και C_3 συντελεστές εξαρτώμενοι από τις συνθήκες φόρτισης και στρεπτικής στήριξης

I_t η σταθερά στρέψης

I_w η σταθερά στρέβλωσης

I_z η ροπή αδράνειας ως προς τον ασθενή άξονα

L το μήκος της δοκού μεταξύ σημείων πλευρικά

	εξασφαλισμένων
k και k_w	συντελεστές εξαρτώμενοι από το είδος των στηρίξεων ως προς την ελευθερία στροφής και στρέβλωσης των άκρων του εξεταζόμενου πλευρικά μη προστατευμένου τμήματος
$z_g = z_a - z_s$	η απόσταση του κέντρου διάτμησης από το σημείο εφαρμογής του φορτίου
z_a	η τεταγμένη του σημείου εφαρμογής του φορτίου ως προς τον κεντροβαρικό άξονα γ-γ
z_s	η τεταγμένη του κέντρου διάτμησης ως προς τον κεντροβαρικό άξονα γ-γ

Ο συντελεστής z_j δίνεται γενικά από τη σχέση:

$$z_j = z_s - \frac{0.5 \int z(y^2 + z^2) dA}{I_y}$$

Για διατομές διπλής συμμετρίας $z_j = 0$.

Οι τεταγμένες μετρώνται με αφετηρία το κέντρο βάρους της διατομής και είναι προσημασμένες με θετική φορά προς το θλιβόμενο πέλμα της διατομής.

Οι συντελεστές k και k_w λαμβάνουν τις ακόλουθες τιμές:

Για πλήρη πάκτωση λαμβάνουν τιμή 0.5,



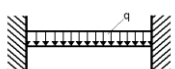

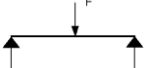

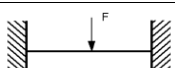

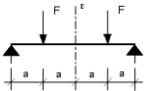
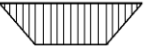
Για απλές στηρίξεις λαμβάνουν τιμή 1.0,

Για περιπτώσεις που έχουμε το ένα άκρο απλά στηριζόμενο και το άλλο πακτωμένο λαμβάνουν τιμή 0.7.

Ο συντελεστής k αφορά στη στροφή του άκρου στο οριζόντιο επίπεδο και είναι ανάλογος του ισοδύναμου μήκους λυγισμού ενός θλιβόμενου στοιχείου.

Ο συντελεστής k_w αφορά στη στρέβλωση του άκρου και λαμβάνεται ίσος προς 1,0 εκτός και εάν έχουμε λάβει ειδικά μέτρα πάκτωσης έναντι στρέβλωσης.

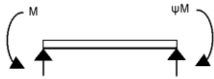

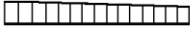
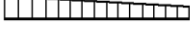
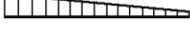





Οι τιμές των συντελεστών C_1 , C_2 και C_3 εξαρτώνται από τη φόρτιση, τις συνθήκες στήριξης και τις τιμές του συντελεστή k.

Φόρτιση και συνθήκες στήριξης	Διάγραμμα καμπτικών ροπών	Τιμές του συντελεστή k	Συντελεστές		
			C_1	C_2	C_3
		1.0	1.132	0.459	0.525
		0.5	0.972	0.304	0.980
		1.0	1.285	1.562	0.753
		0.5	0.712	0.652	1.070
		1.0	1.365	0.553	1.730
		0.5	1.070	0.432	3.050
		1.0	1.565	1.267	2.640
		0.5	0.938	0.715	4.800
		1.0	1.046	0.430	1.120
		0.5	1.010	0.410	1.890

Πίνακας 2.8

Συντελεστές C_1 , C_2 και C_3 για διάφορες τιμές του k σε περίπτωση φόρτισης μόνο με εγκάρσια φορτία (για $k_w = 1.0$).

Για περιπτώσεις που το $k=1.0$, η τιμή του C_1 συναρτήσκει του λόγου των ακραίων ροπών, δίνεται προσεγγιστικά από την ακόλουθη εξίσωση. $C_1 = 1.88 - 1.40 \cdot \psi - 0.52 \cdot \psi^2 \leq 2.70$

Φόρτιση και συνθήκες στήριξης	Διάγραμμα καμπτικών ροπών	Τιμές του συντελεστή k	Συντελεστές		
			C_1	C_2	C_3
	$\psi=+1$ 	1.0	1.000	-	1.000
		0.7	1.000	-	1.113
		0.5	1.000	-	1.114
	$\psi=+3/4$ 	1.0	1.141	-	0.998
		0.7	1.270	-	1.565
		0.5	1.305	-	2.283
	$\psi=+1/2$ 	1.0	1.323	-	0.992
		0.7	1.473	-	1.556
		0.5	1.514	-	2.271
	$\psi=+1/4$ 	1.0	1.563	-	0.977
		0.7	1.739	-	1.531
		0.5	1.788	-	2.235
	$\psi=+0$ 	1.0	1.879	-	0.939
		0.7	2.092	-	1.473
		0.5	2.150	-	2.150
	$\psi=-1/4$ 	1.0	2.281	-	0.855
		0.7	2.538	-	1.340
		0.5	2.609	-	1.975
	$\psi=-1/2$ 	1.0	2.704	-	0.676
		0.7	3.009	-	1.059
		0.5	3.093	-	1.546
	$\psi=-3/4$ 	1.0	2.927	-	0.366
		0.7	3.258	-	0.575
		0.5	3.348	-	0.837
$\psi=-1,0$ 	1.0	2.752	-	0.000	
	0.7	3.063	-	0.000	
	0.5	3.149	-	0.000	

Πίνακας 2.9

Συντελεστές C_1 , C_2 και C_3 για διάφορες τιμές του k σε περίπτωση φόρτισης μόνο με ακραίες ροπές (για $k_w = 1.0$).

Η ελαστική κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού έχει υπολογιστεί με βάση τις παραδοχές ότι ο φορέας αποτελείται από τελείως ελαστικό υλικό, ο άξονας του φορέα είναι τελείως ευθύγραμμος και το φορτίο ασκείται ακριβώς στη θέση που μας ενδιαφέρει. Στην πραγματικότητα, όλες οι κατασκευές παρουσιάζουν ατέλειες, οι οποίες οφείλονται είτε σε αποκλίσεις της πραγματικής γεωμετρίας από την ιδεατή, είτε σε ελαφρώς διαφορετική από την επιθυμητή θέση εφαρμογής του φορτίου, είτε σε ανομοιογένεια του υλικού. Οι ατέλειες επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά του φορέα και μειώνουν γενικά την τιμή της κρίσιμης ροπής πλευρικού λυγισμού.

2.10 Τοπικός λυγισμός καμπτόμενης δοκού

Τα μέλη ενός φορέα διατρέχουν γενικά τον κίνδυνο να υποστούν λυγισμό μέλους βάσει της ολικής λυγηρότητάς τους. Υπάρχει, όμως, συγχρόνως ο κίνδυνος κάποια επιμέρους θλιβόμενα στοιχεία της διατομής του φορέα να λυγίσουν τοπικά πριν την εμφάνιση καθολικού λυγισμού για μικρότερη τιμή φορτίου. Η εμφάνιση τοπικού λυγισμού οδηγεί σε μείωση της αντοχής του μέλους με την εμφάνιση ανομοιομόρφων τάσεων και πολύ συχνά στην αστοχία του. Κατά τον τοπικό λυγισμό, οι διατομές παραμορφώνονται με μεταβολή του γεωμετρικού σχήματός τους, ενώ ο άξονας του μέλους παραμένει απαραμόρφωτος.

Ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται συνήθως στις λεπτότοιχες διατομές κατηγορίας 4. Στις διατομές αυτές εμφανίζεται τοπικός λυγισμός πριν προλάβει να αναπτυχθεί η τάση διαρροής. Το πολύ μειωμένο πάχος τους σε σχέση με το πλάτος τους, καθιστά τους αντίστοιχους φορείς πολύ εύκαμπους και ασταθείς με ιδιαίτερη μη γραμμική συμπεριφορά.

Σε μία αμφιέρειστη δοκό διατομής διπλού ταυ, τοπικός λυγισμός εμφανίζεται στο θλιβόμενο άνω πέλμα και στο άνω θλιβόμενο τμήμα του κορμού, όταν ο λόγος πλάτος πέλματος/πάχος πέλματος είναι μεγάλος. Στην περίπτωση αυτή, ο τοπικός λυγισμός είναι αποτέλεσμα των ορθών θλιπτικών τάσεων λόγω της κάμψης.

Το φαινόμενο της κύρτωσης αποτελεί μία μορφή τοπικού λυγισμού και εκδηλώνεται με τη δημιουργία ρυτιδώσεων ή πτυχώσεων των επίπεδων ελασμάτων, αν για οποιοδήποτε λόγο υπάρξει υπέρβαση τάσεων σε κάποιο σημείο.

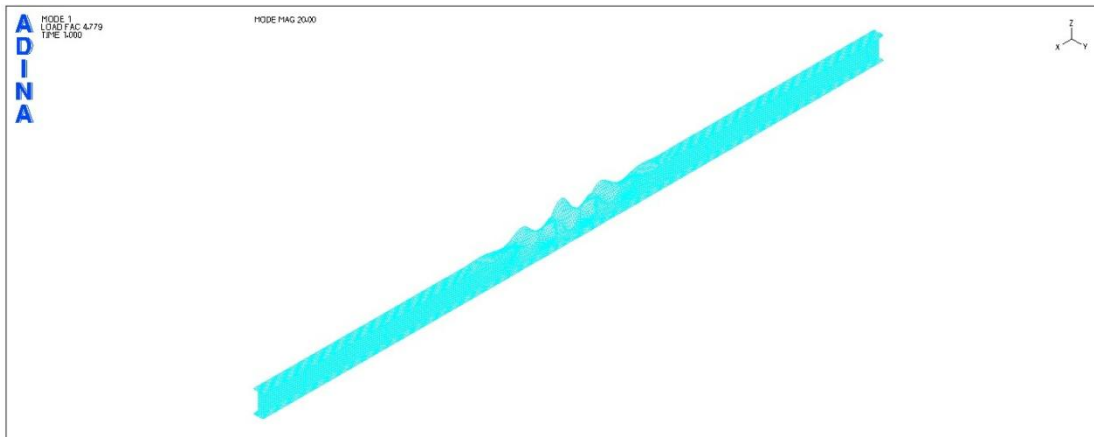
Ως μορφή τοπικού λυγισμού θεωρείται και η εμφάνιση διατμητικού λυγισμού σε υψίκορμες δοκούς με μειωμένο πάχος κορμού. Στις περιπτώσεις αυτές, ο τοπικός λυγισμός εντοπίζεται στον κορμό της δοκού, στις θέσεις μέγιστης τέμνουσας.



Σχήμα 2.19
Τοπικός λυγισμός στα θλιβόμενα πέλματα δοκού

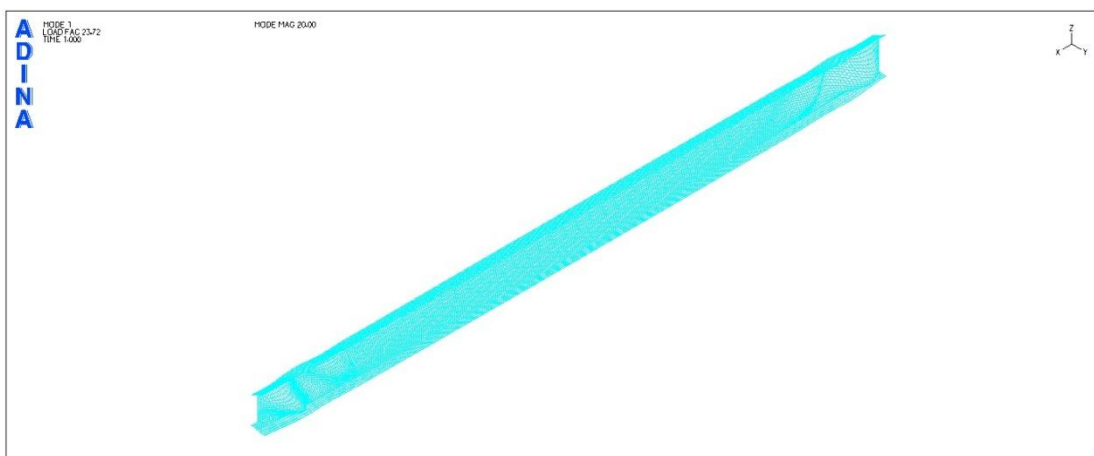


Σχήμα 2.20
Διατμητικός λυγισμός κορμού



Σχήμα 2.21

1η ιδιομορφή λυγισμού- Εμφάνιση τοπικού λυγισμού στο άνω θλιβόμενο πέλμα αμφιέρειστης δοκού



Σχήμα 2.22

1η ιδιομορφή λυγισμού- Εμφάνιση τοπικού λυγισμού λόγω διάτμησης στα άκρα αμφιέρειστης δοκού

2.11 Ανακεφαλαίωση

Σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου ήταν να δοθούν γενικά στοιχεία για την κάμψη χαλύβδινων δοκών, να περιγραφούν τα πιθανά είδη αναλύσεων που μπορούν να εφαρμοστούν για τη μελέτη της συμπεριφοράς τους και φυσικά να εξετασθούν οι πιθανές μορφές αστοχίας των καμπτόμενων χαλύβδινων συμπαγών δοκών με βάση την κατηγορία διατομής τους που προτείνει ο Ευρωκώδικας 3.

Συμπερασματικά, όσον αφορά στην αστοχία αμφιέριστων χαλύβδινων συμπαγών δοκών διατομής διπλού ταυ υπό ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο, που αποτελεί και το αντικείμενο των αριθμητικών αναλύσεων των κεφαλαίων 4-7, καταλήγουμε στα ακόλουθα:

-Η πλαστικοποίηση της μεσαίας διατομής της αμφιέριστης δοκού συνεπάγεται τη δημιουργία πλαστικού μηχανισμού κατάρρευσης που προκαλεί την αστοχία της δοκού. Η μορφή αυτή αστοχίας είναι πιθανόν να εμφανιστεί σε δοκούς διατομής κατηγορίας 1 και 2, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχής τους. Σύνηθες είναι το φαινόμενο της πλαστικοποίησης στην περίπτωση δοκών μικρής λυγηρότητας και στην περίπτωση πλευρικώς εξασφαλισμένων δοκών.

-Ο πλευρικός λυγισμός αμφιέριστων δοκών είναι πιθανός για δοκούς μεγάλης λυγηρότητας και των 4 κατηγοριών διατομής. Αποτέλεσμα του πλευρικού λυγισμού είναι η απότομη μείωση της δυσκαμψίας του φορέα. Στην περίπτωση που συνδυαστεί με ελαστικό υλικό, επιτρέπει τη μεταλυγισμική αντοχή των δοκών. Δε συμβαίνει όμως το ίδιο όταν χρησιμοποιείται ελαστοπλαστικό υλικό, που επιταχύνει την αστοχία του φορέα λόγω της αλληλεπίδρασης λυγισμού και διαρροής.

-Ο τοπικός λυγισμός συναντάται κυρίως στις διατομές κατηγορίας 3 και 4. Στις περιπτώσεις διατομών κατηγορίας 4, ο τοπικός λυγισμός συνήθως προηγείται του πλευρικού λυγισμού, αλλά και της ανάπτυξης της τάσης διαρροής. Συνιστά την κύρια μορφή αστοχίας αυτής της κατηγορίας διατομών.

Κεφάλαιο 3

Παρουσίαση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Στην παρούσα διπλωματική εργασία οι αριθμητικές αναλύσεις των δοκών έγιναν με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το συγκεκριμένο πρόγραμμα με βάση τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την εκτέλεση των αναλύσεων.

Κατά τη διεξαγωγή των αναλύσεων, προέκυψαν διάφορα ζητήματα που αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης και έρευνας για την καλύτερη δυνατή έκβαση των αποτελεσμάτων. Το κυριότερο θέμα ήταν η εύρεση της σωστής μεθόδου και των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών για την προσομοίωση αμφιέρειστης δοκού, δεδομένου ότι όλες οι αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, αναφέρονται σε αμφιέρειστες δοκούς υπό ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο.

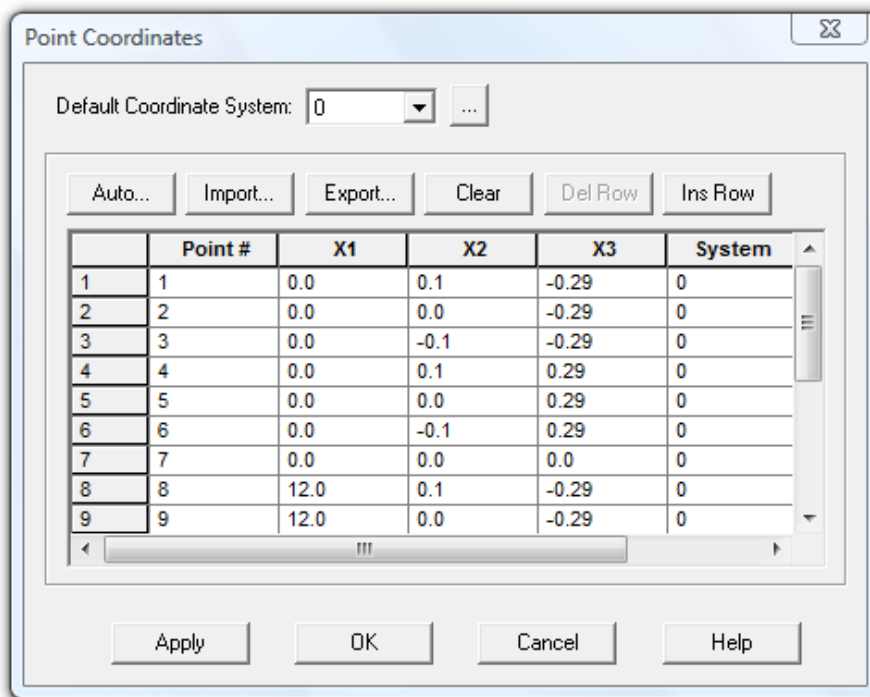
Στο κεφάλαιο αυτό, λοιπόν, γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στις συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση αμφιέρειστης χαλύβδινης δοκού στο ADINA. Παρουσιάζονται όλοι οι πιθανοί τρόποι προσομοίωσης που εξετάστηκαν και επιλέγεται ο βέλτιστος με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

3.1 Παρουσίαση του ADINA για ανάλυση καμπτόμενης δοκού και προσομοίωση με στοιχεία κελύφους (shell elements)

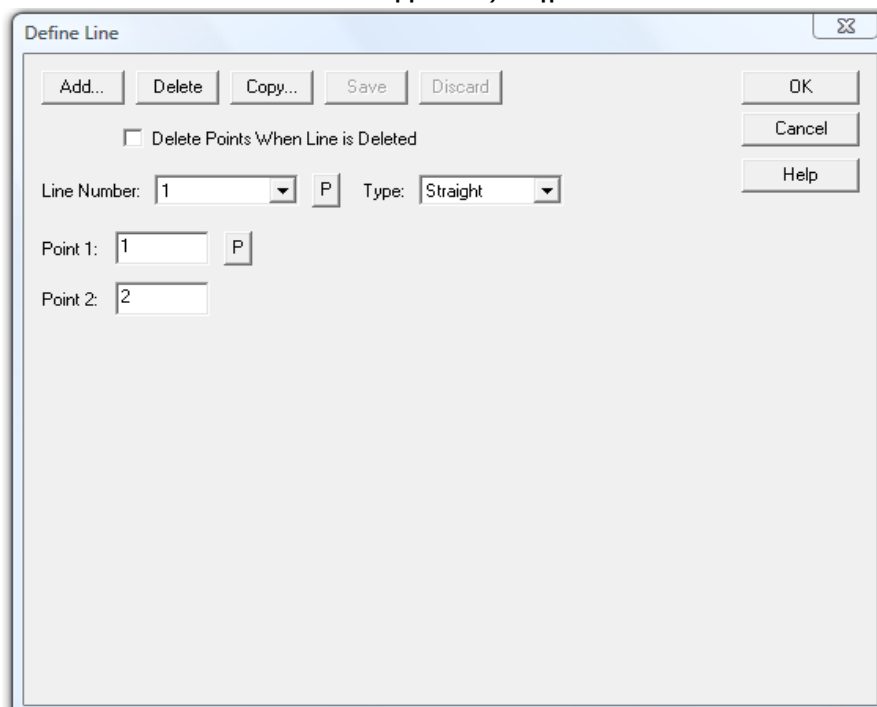
Μόρφωση γεωμετρίας

Αρχικά ορίζονται τα σημεία της δοκού με την εντολή **Geometry->Points**. Για κάθε ένα σημείο ορίζεται ο αριθμός του και οι συντεταγμένες του x, y, z σε m , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1.

Στη συνέχεια ορίζονται οι γραμμές της δοκού με την εντολή **Geometry-> Lines-> Define->Add**, κατά το σχήμα 3.2.

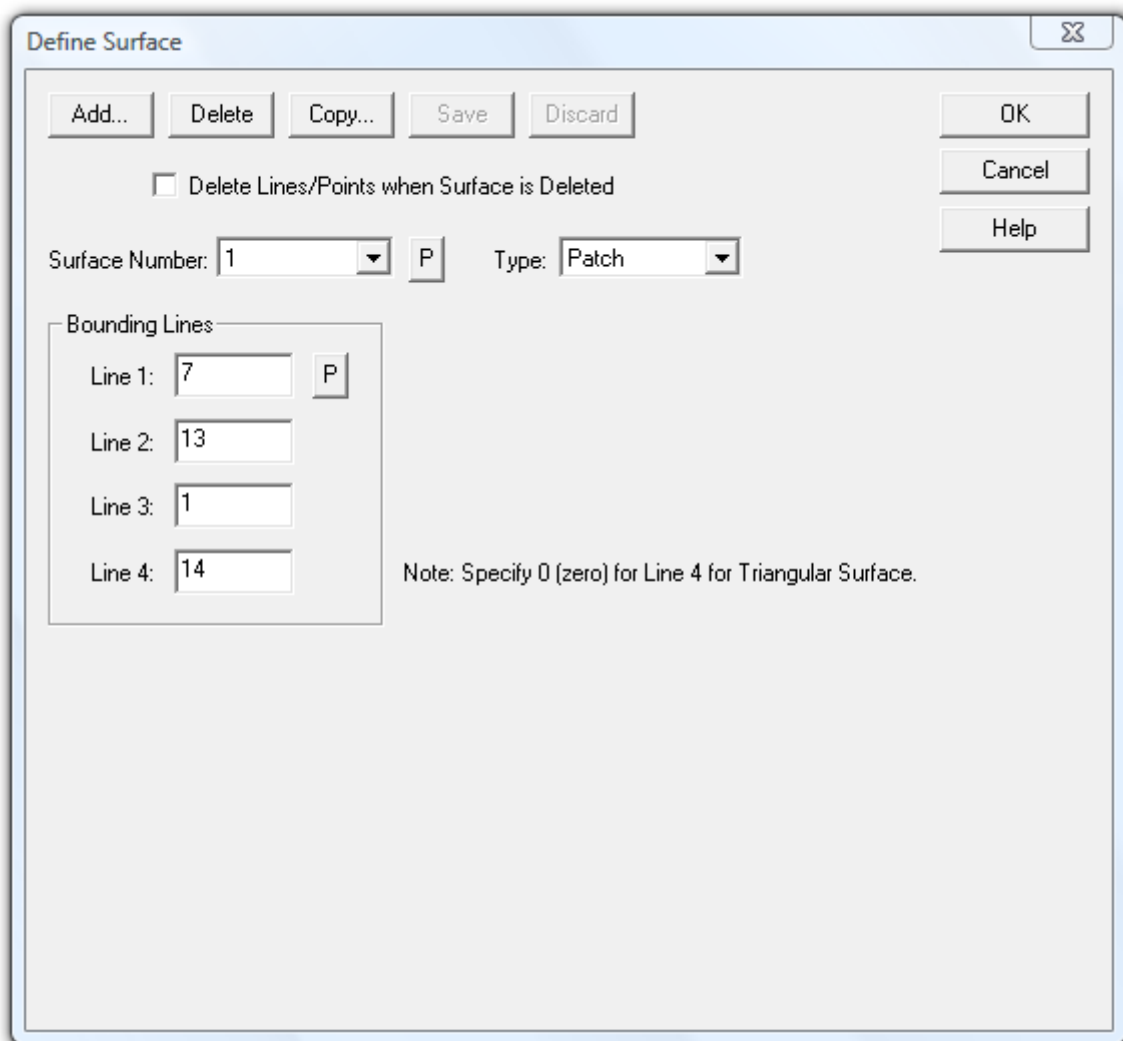


Σχήμα 3.1
Συντεταγμένες σημείων



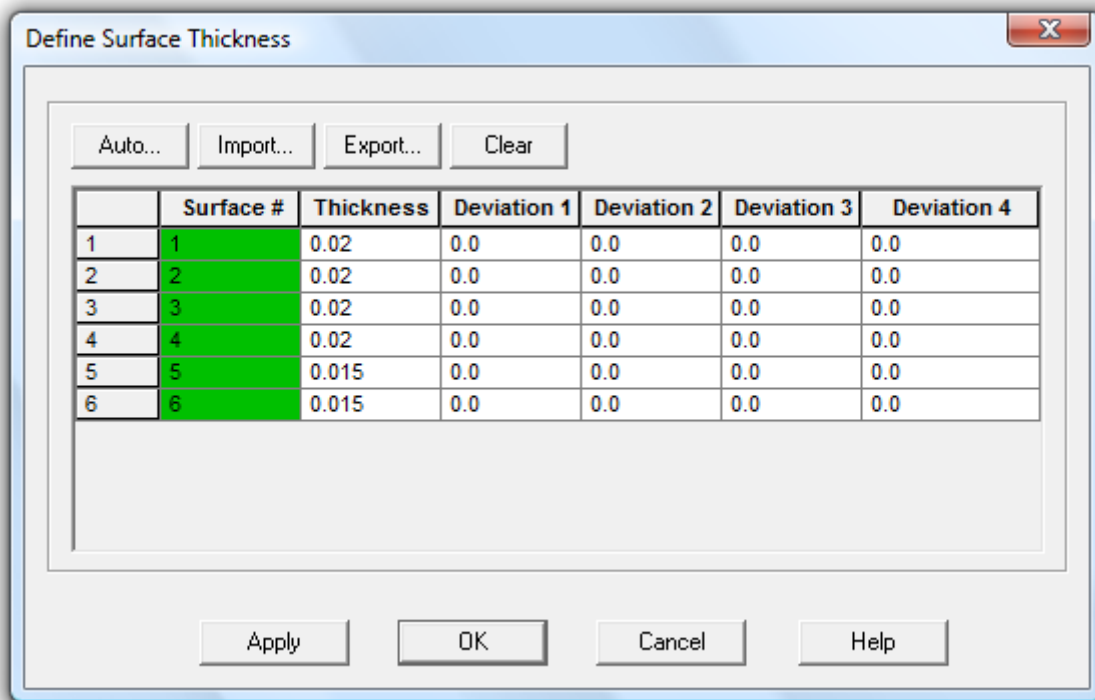
Σχήμα 3.2
Ορισμός γραμμών

Με την εντολή **Geometry->Surfaces->Define->Add** ορίζουμε τις επιφάνειες του κορμού και των πελμάτων της δοκού. Ορίζουμε 2 επιμέρους ίσες επιφάνειες για κάθε πέλμα, προκειμένου τόσο να είναι πιο ομαλή η διακριτοποίηση που θα ακολουθήσει, όσο και να είναι πιο εύκολη η εφαρμογή του κατανεμημένου φορτίου κατά μήκος των πελμάτων, στο μέσο τους. Για τον ίδιο λόγο, προτείνεται και η δημιουργία 2 επιμέρους επιφανειών για τον κορμό, ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή του φορτίου κατά μήκος του κεντροβαρικού άξονα.



Σχήμα 3.3
Ορισμός επιφανειών

Στη συνέχεια ορίζεται το πάχος των επιφανειών που δημιουργήθηκαν, μέσω της εντολής **Geometry->Surfaces->Thickness**.



Σχήμα 3.4
Ορισμός πάχους επιφανειών

Επιλογή υλικού

Στο σημείο αυτό ορίζεται το υλικό του φορέα. Ορίζονται δύο είδη υλικών, ένα ελαστικό και ένα ελαστοπλαστικό. Σε κάθε είδος ανάλυσης χρησιμοποιείται το αντίστοιχο υλικό.

-Για το ελαστικό υλικό ορίζουμε:

Μέτρο ελαστικότητας $E=210000000 \text{ kN/m}^2$

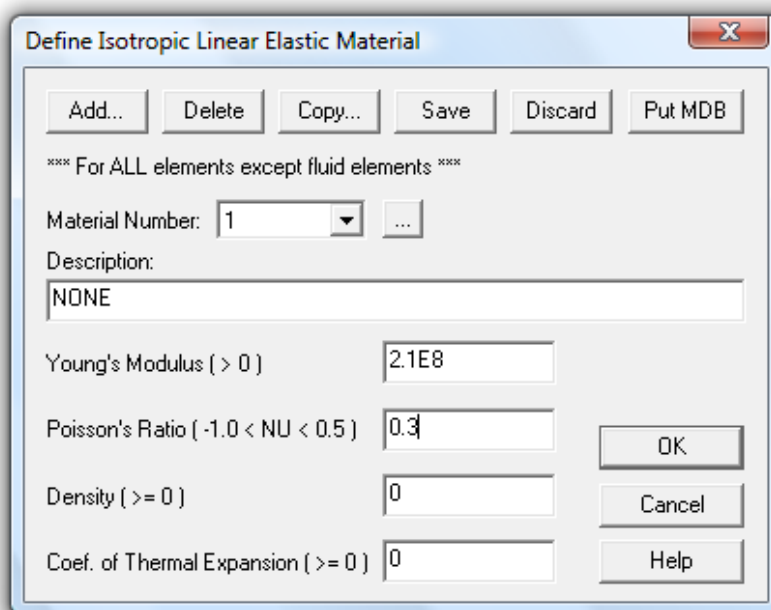
Λόγος Poisson $\nu=0,3$

Χρησιμοποιείται η εντολή: **Model->Materials->Manage Materials -> Elastic-> Isotropic->Add** όπου προσθέτουμε τις παραπάνω ελαστικές σταθερές.

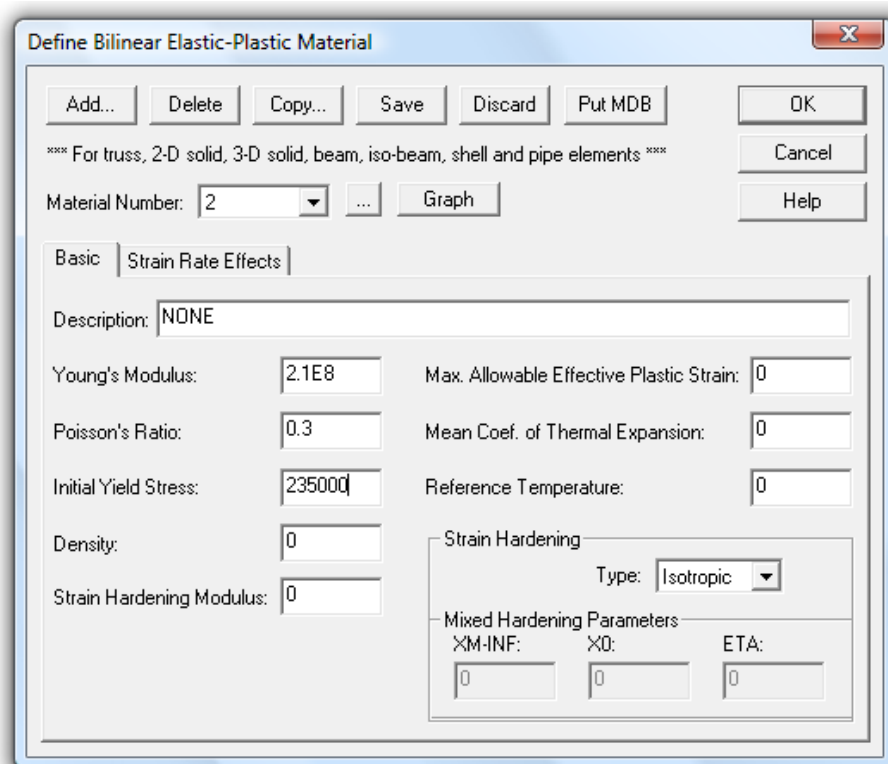
-Για το ελαστοπλαστικό υλικό πρέπει να οριστούν επίσης το όριο διαρροής του χάλυβα και η κράτυνση. Χρησιμοποιούμε χάλυβα S235 χωρίς κράτυνση.

Άρα ορίζουμε: $f_y=235000 \text{ kN/m}^2$ και $E_t=0$

Χρησιμοποιείται η εντολή: **Model->Materials->Manage Materials -> Plastic-> Bilinear->Add** όπου προσθέτουμε τις αντίστοιχες σταθερές.



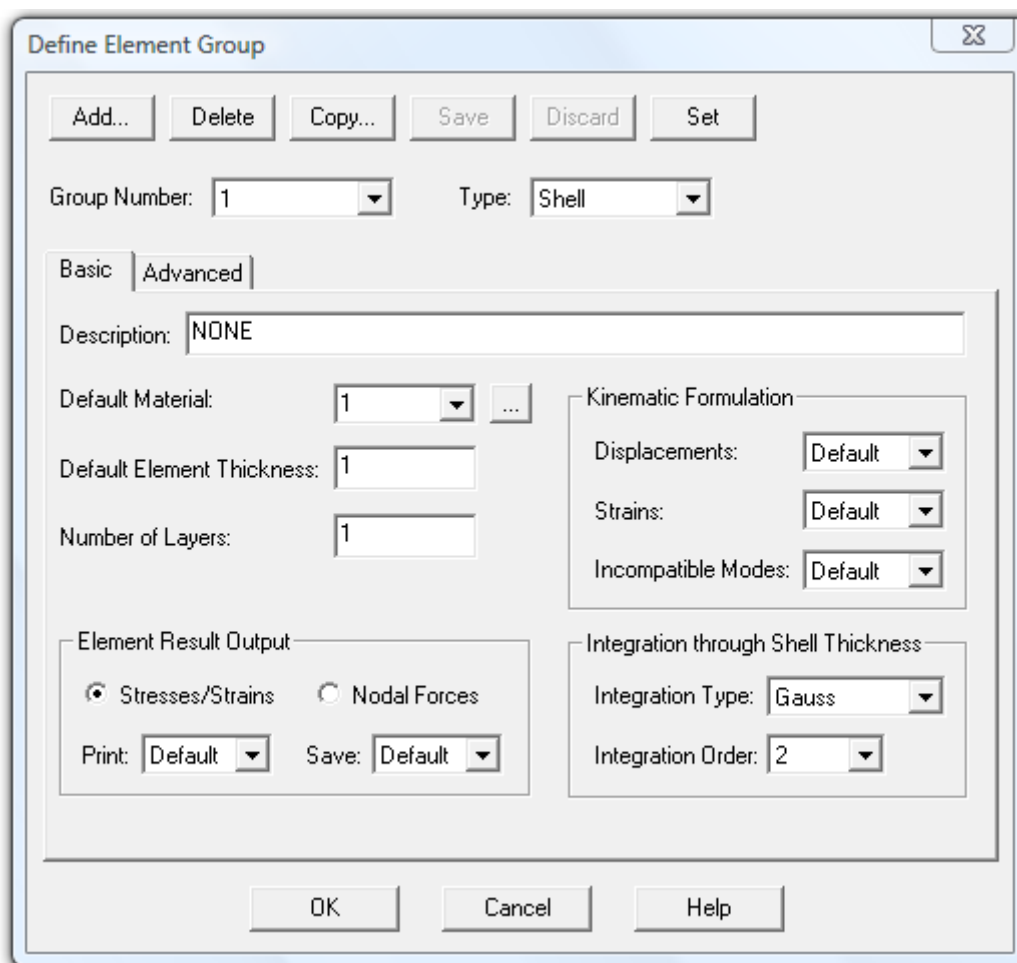
Σχήμα 3.5
Ορισμός ελαστικού υλικού



Σχήμα 3.6
Ορισμός ελαστικοπλαστικού υλικού

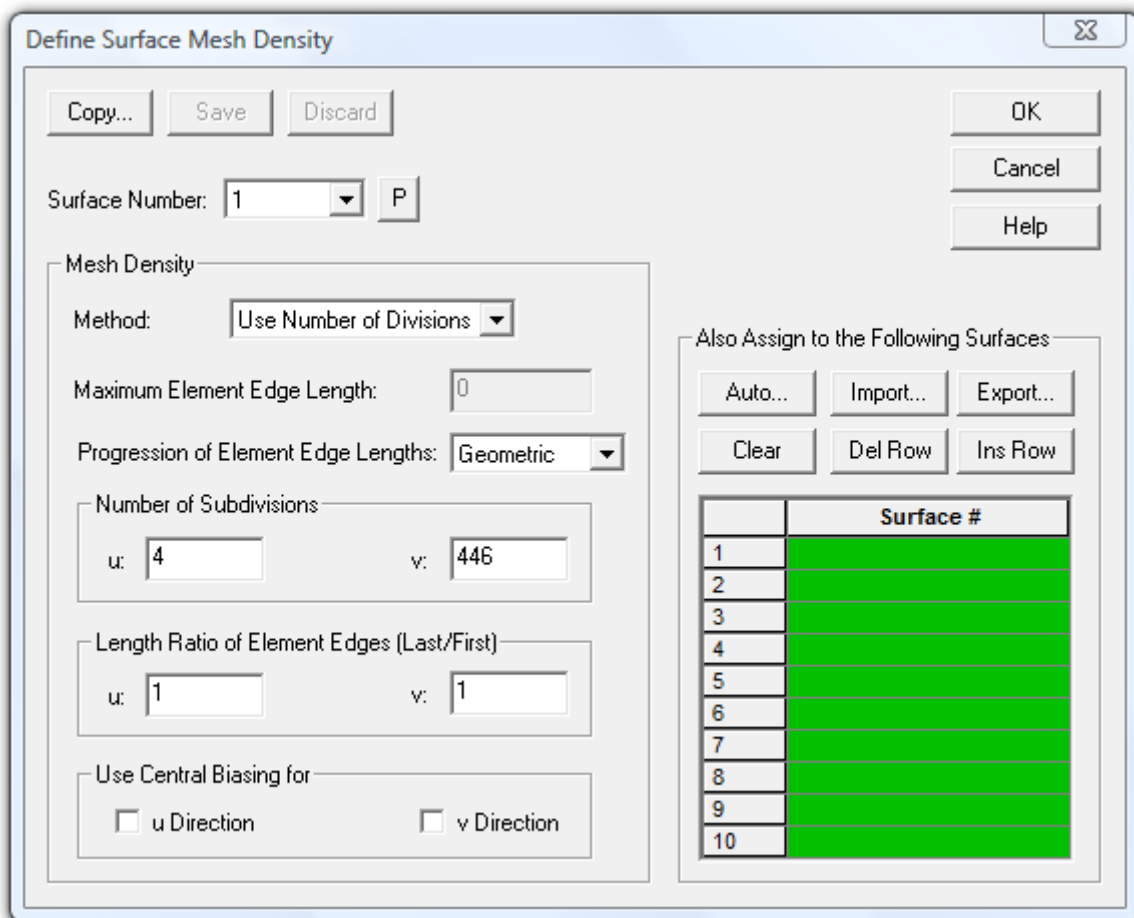
Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων

Ορίζουμε το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιήσουμε. Θα γίνει χρήση στοιχείων κελύφους (shell elements). Η εντολή που χρησιμοποιούμε είναι η εξής: **Meshing->Element Groups->Add** και επιλέγουμε **Type: Shell**, ενώ στην επιλογή **Default Material** πληκτρολογούμε τον αριθμό που μας δείχνει το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε (πχ. 1->elastic).



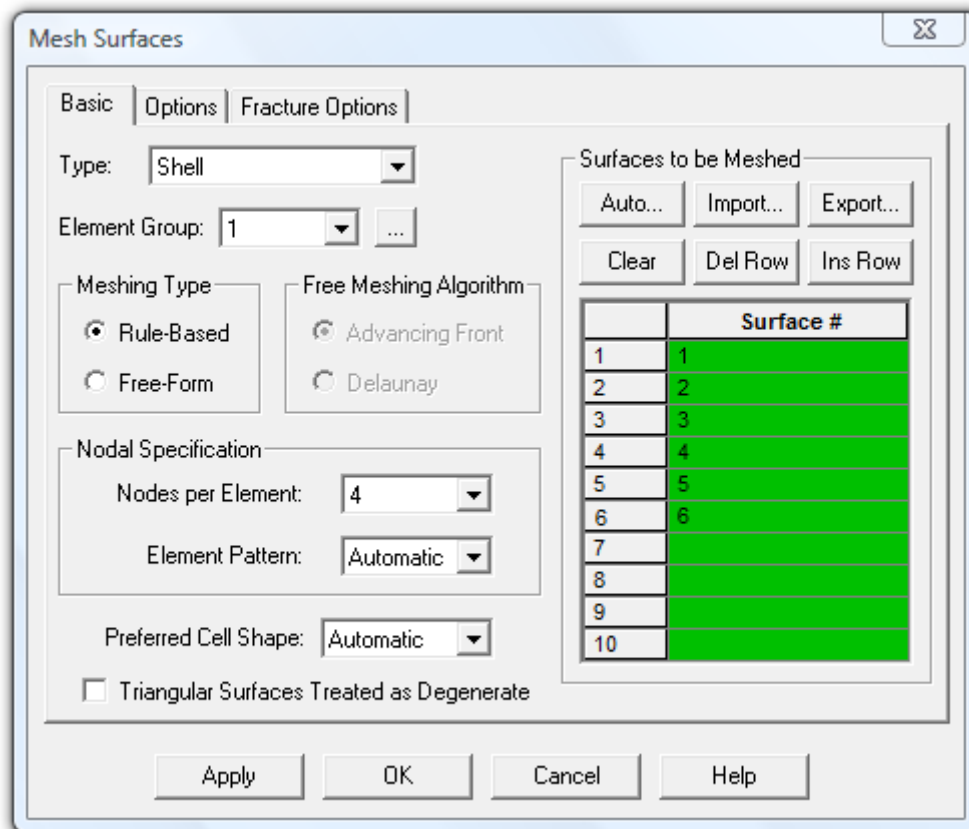
Σχήμα 3.7
Ορισμός τύπου πεπερασμένων στοιχείων

Ορίζουμε τον αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων για κάθε επιφάνεια με την προϋπόθεση ο λόγος του μήκους της μεγαλύτερης πλευράς προς τη μικρότερη να μην είναι μεγαλύτερος από 2. Γίνεται χρήση της εντολής **Meshing->Mesh Density->Surface** και ορίζουμε **Method:Use Number of Divisions**, όπου πληκτρολογούμε τον αριθμό των διαιρέσεων της επιφάνειας σε κάθε μία από τις 2 διευθύνσεις της.



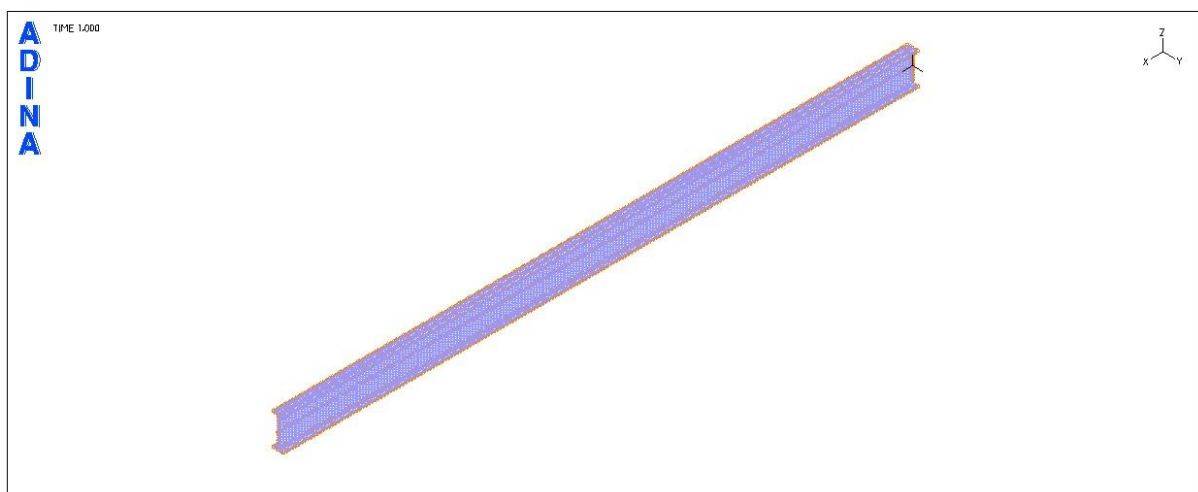
Σχήμα 3.8
Διαίρεση κάθε επιφάνειας

Τελικό στάδιο σε αυτή τη φάση είναι η δημιουργία του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων μέσω της εντολής **Meshing->Create Mesh ->Surface** όπου πληκτρολογούμε τον αριθμό κάθε επιφάνειας που πρόκειται να διακριτοποιηθεί.



Σχήμα 3.9
 Διακριτοποίηση επιφανειών

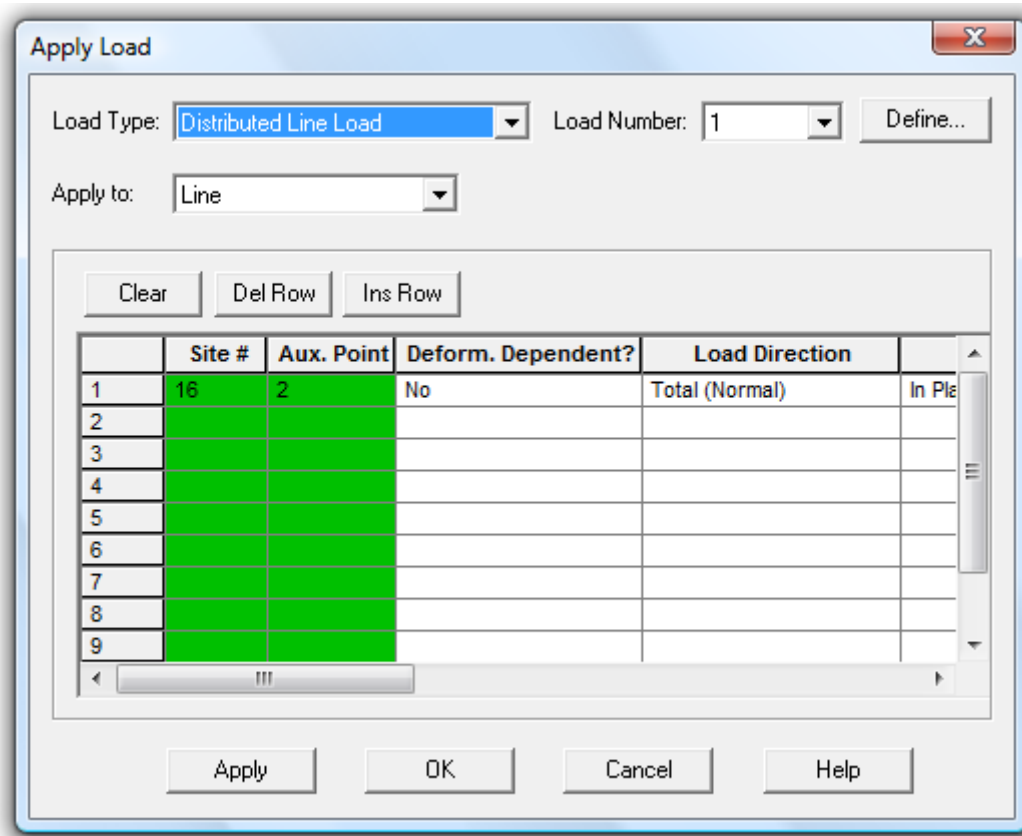
Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, προκύπτει το αποτέλεσμα του σχήματος 3.10.



Σχήμα 3.10
 Δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων

Επιβολή φόρτισης στο φορέα

Χρησιμοποιείται η εντολή **Model->Loading->Apply**, όπου για να ορίσουμε κατανεμημένο φορτίο, επιλέγουμε **Load Type:Distributed Line Load**. Με την επιλογή **Define->Add** ορίζουμε το μέγεθος του φορτίου. Επιστρέφοντας στο πρώτο παράθυρο, ορίζουμε στη θέση **Site** τον αριθμό της γραμμής όπου εφαρμόζεται το κατανεμημένο φορτίο και στη θέση **Auxiliary point** ένα σημείο το οποίο δείχνει την κατακόρυφη φορά του φορτίου. Επίσης, επιλέγουμε: **Deformation Dependent: No**, που δηλώνει ότι η κατεύθυνση του φορτίου δεν αλλάζει συναρτήσει των μεγάλων παραμορφώσεων του φορέα. Η τελευταία αυτή επιλογή θεωρήθηκε ορθή για τις αναλύσεις, καθώς αφενός το φορτίο δεν απαιτείται να έχει συγκεκριμένη διεύθυνση ως προς τον παραμορφωμένο φορέα (όπως πχ. η υδροστατική πίεση, η οποία πρέπει να είναι πάντα κάθετη στην παραμορφωμένη επιφάνεια), αφετέρου η επιλογή "default" καθυστερούσε υπερβολικά τη σύγκλιση και δεν έδινε συνήθως τα αναμενόμενα αποτελέσματα.



Σχήμα 3.11
Επιβολή φορτίου

Επιβολή συνοριακών συνθηκών στο φορέα

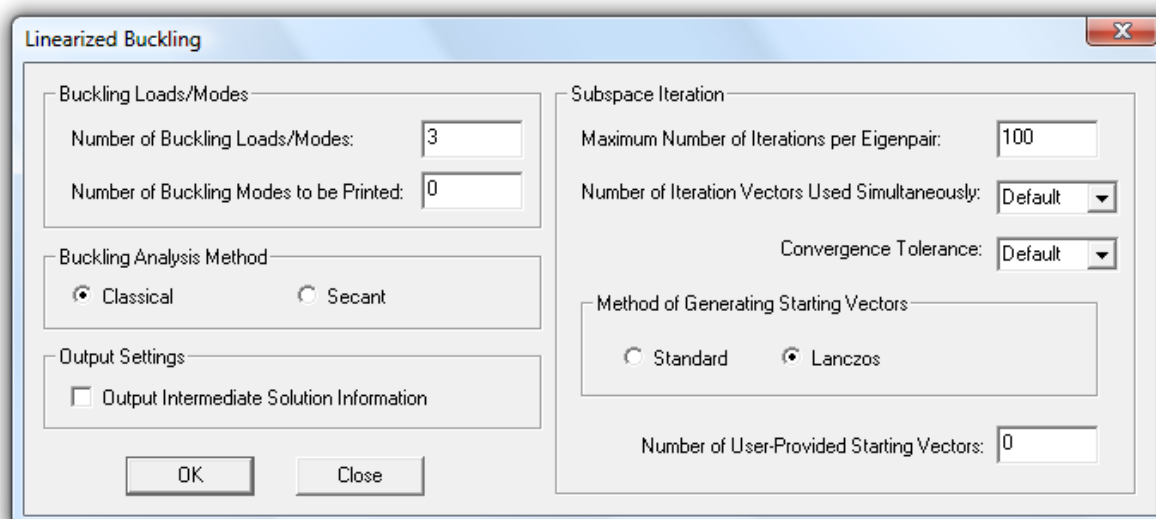
Το θέμα της επιβολής συνοριακών συνθηκών στη δοκό απασχόλησε αρκετά μέχρι να βρεθεί το μοντέλο που εκφράζει την καλύτερη δυνατή προσομοίωση αμφιέρειστης δοκού. Για το λόγο αυτό, η αντίστοιχη διερεύνηση παρουσιάζεται αναλυτικά στις παραγράφους **3.2** και **3.3**.

Προκειμένου να ολοκληρωθεί η παράγραφος 3.1, θα παρουσιαστούν τα είδη αναλύσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, θεωρώντας ωστόσο ότι ο φορέας έχει πλήρως προσομοιωθεί στο ADINA μετά και την επιβολή των συνοριακών συνθηκών (κάτι το οποίο θα παρουσιαστεί στις δύο επόμενες παραγράφους).

Είδη αναλύσεων

- **Γραμμική ανάλυση λυγισμού**

Η γραμμική ανάλυση λυγισμού πραγματοποιείται εάν στη θέση **Analysis Type** επιλέξουμε **Linearized Buckling** και στο εικονίδιο **Analysis Options** ορίσουμε τον αριθμό των απαιτούμενων ιδιομορφών **Number of Buckling Loads/Modes**, καθώς και τον αριθμό των επαναλήψεων που θα πραγματοποιήσει το πρόγραμμα για την εύρεσή τους, **Number of Iterations per Eigenpair**.



Σχήμα 3.12
Επιλογή αριθμού ιδιομορφών

Για την πραγματοποίηση της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού, είναι απαραίτητη η ενεργοποίηση μεγάλων παραμορφώσεων, μέσω της εντολής **Control->Analysis Assumptions->Kinematics** και επιλέγοντας στη θέση **Displacements/Rotations: Large**.

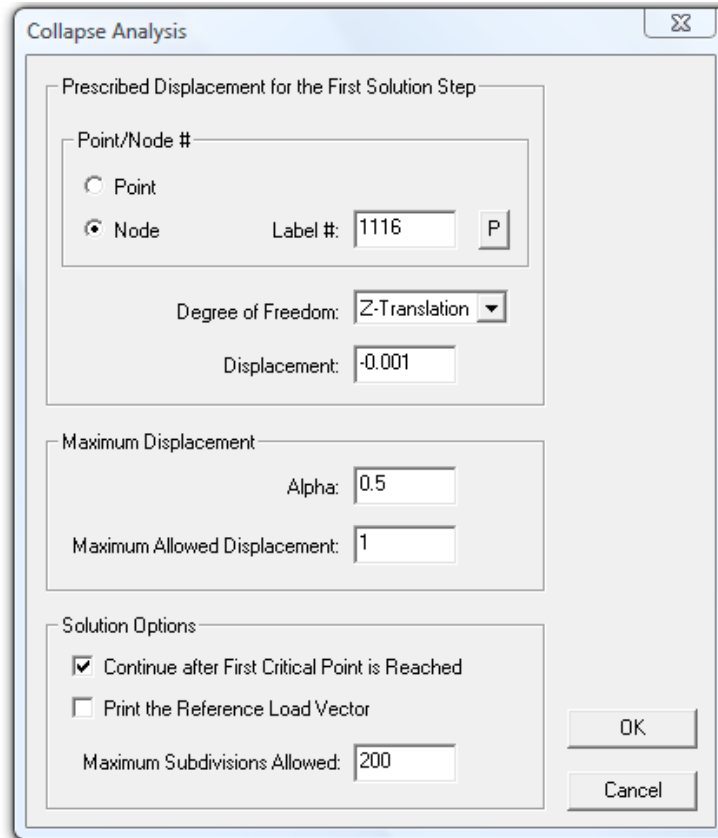
Το μοντέλο είναι έτοιμο για ανάλυση, η οποία πραγματοποιείται με την εντολή: **Solution->Data File/Run**.

- **Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας**

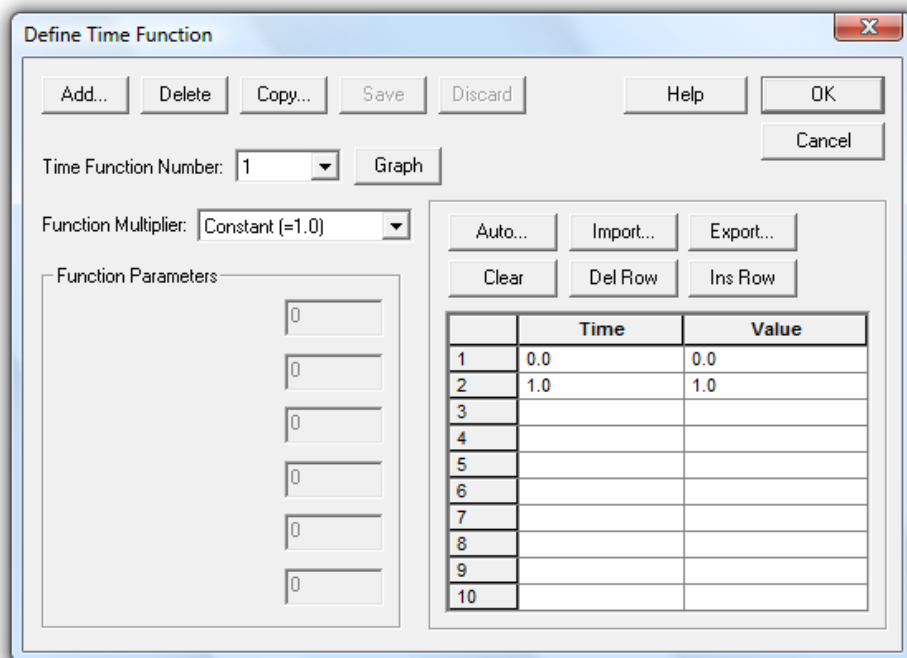
Στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας δίνουμε στο φορέα ατέλεια με τη μορφή της πρώτης ιδιομορφής. Θεωρούμε αρχική ατέλεια μικρού μεγέθους προς την κατεύθυνση της εκτροπής.

Η ανάλυση γίνεται με τη μέθοδο Arc-Length. Στη θέση **Analysis Type** επιλέγουμε **Collapse Analysis** και στη θέση **Analysis Options** ορίζουμε τις ρυθμίσεις της μεθόδου **Arc-Length**. Πρέπει να οριστεί ένας κόμβος αναφοράς (πχ. στη συνένωση κάτω πέλματος και κορμού της μεσαίας διατομής) και μια αρχική μετατόπιση μικρού μεγέθους κατά τη διεύθυνση της φόρτισης για τον κόμβο αυτό (Z-Translation: -0,001m). Επίσης πρέπει να δοθεί μία ενδεικτική τιμή στην παράμετρο alpha, η οποία χρησιμοποιείται για να ορίσει τη μέγιστη μετατόπιση κατά τη διάρκεια κάθε βήματος της μεθόδου (πχ. 0,5), να επιλεγεί η ρύθμιση **Continue after First Critical Point is Reached** ώστε η ανάλυση να συνεχιστεί και μετά την εύρεση του οριακού σημείου (ή σημείου διακλάδωσης) και τέλος να οριστεί ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός επαναλήψεων μέσα σε κάθε βήμα για τη σύγκλιση της μεθόδου, όπως φαίνεται ενδεικτικά στο σχήμα 3.13.

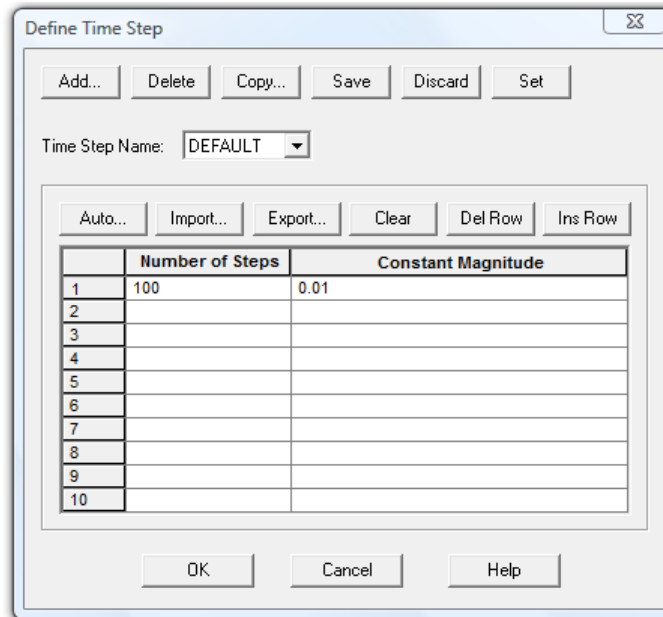
Στη συνέχεια, από το μενού επιλέγουμε **Control->Time Function** για να ορίσουμε τη χρονική εφαρμογή του φορτίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14. Επίσης, με την εντολή **Control->Time Step** ορίζουμε τα βήματα εφαρμογής του φορτίου, που δηλώνουν σε πόσα βήματα επιβάλλεται το φορτίο στο συνολικό χρόνο εφαρμογής του.



Σχήμα 3.13
Μέθοδος Arc-Length

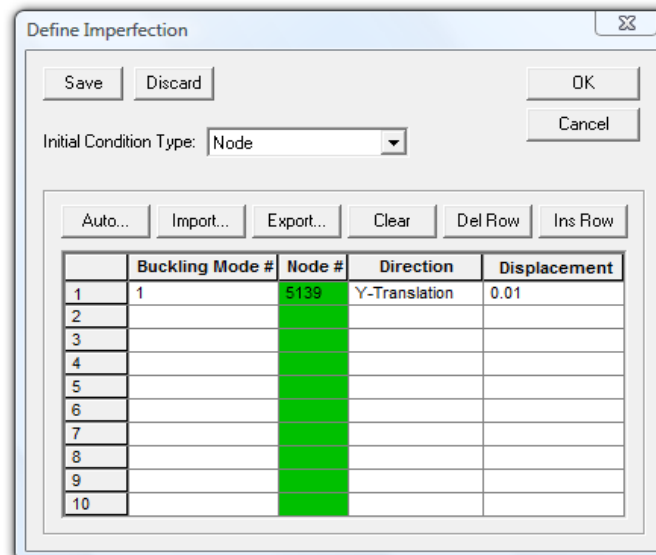


Σχήμα 3.14
Χρονική συνάρτηση εφαρμογής φορτίου



Σχήμα 3.15
Βήματα εφαρμογής φορτίου

Πρέπει επίσης να εφαρμοστεί η γεωμετρική ατέλεια. Χρησιμοποιούμε την εντολή **Model->Initial Conditions->Imperfection** και επιλέγουμε **Initial Condition Type: Node** για την εφαρμογή της ατέλειας σε κόμβο. Πληκτρολογούμε τον αριθμό της ιδιομορφής την οποία θα ακολουθεί η ατέλεια, τον αριθμό του κόμβου στον οποίο θα εφαρμοστεί, τη διεύθυνση εφαρμογής της και το μέγεθός της.



Σχήμα 3.16
Εισαγωγή γεωμετρικής ατέλειας

- **Μη γραμμική ανάλυση υλικού**

Η ανάλυση γίνεται με τη μέθοδο Arc-Length κατά τα γνωστά, αλλά δε δίνεται αρχική γεωμετρική ατέλεια στο φορέα.

Βασικό σημείο της ανάλυσης είναι ότι πρέπει να απενεργοποιηθεί η εντολή για την εφαρμογή μεγάλων παραμορφώσεων, μέσω της εντολής **Control ->Analysis Assumptions->Kinematics** και επιλέγοντας **Displacements/Rotations:Small**. Στην ανάλυση αυτή, θα γίνει χρήση του ελαστοπλαστικού υλικού που είχαμε αρχικά ορίσει, μέσω της εντολής **Define Element Group**, όπου στη θέση **Default Material** θα επιλέξουμε το αριθμό που αντιστοιχεί στο ελαστοπλαστικό υλικό.

- **Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας**

Πρόκειται για συνδυασμό των 2 παραπάνω αναλύσεων. Πραγματοποιείται ακριβώς όπως η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με ενεργοποίηση των μεγάλων παραμορφώσεων μέσω του **Control -> Analysis Assumptions ->Kinematics** και ορίζοντας **Displacements/Rotations: Large**. Δίνεται στο φορέα αρχική γεωμετρική ατέλεια και χρησιμοποιείται ελαστοπλαστικό υλικό.

3.2 Αποτελέσματα κρίσιμου φορτίου πλευρικού λυγισμού για διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης αμφιέρειστης δοκού

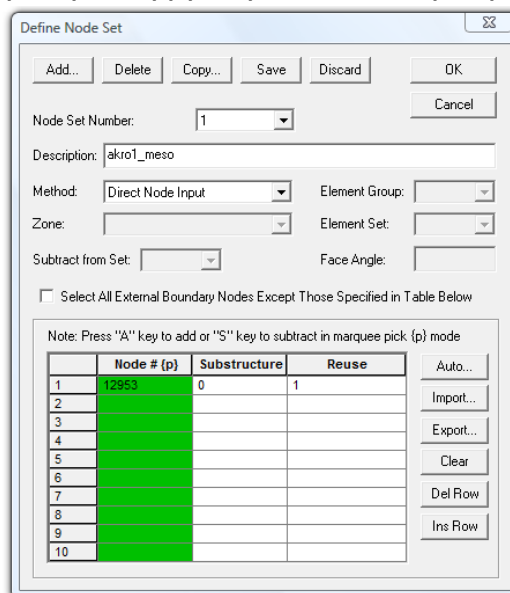
Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιασθεί η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για την εύρεση των συντοριακών συνθηκών που τελικώς χρησιμοποιήθηκαν γιατί προσομοιώνουν με καλύτερο τρόπο την αμφιέρειστη δοκό. Θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα των γραμμικών αναλύσεων λυγισμού στο ADINA για τρεις περιπτώσεις δοκών διαφορετικού μήκους και διαστάσεων διατομής, προκειμένου να συγκριθεί το κρίσιμο φορτίο λυγισμού που προέκυψε από το ADINA με το κρίσιμο φορτίο πλευρικού λυγισμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3. Η ελαστική κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού M_{cr} κατά τον Ευρωκώδικα 3 υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (2.35) του προηγούμενου κεφαλαίου και το αντίστοιχο κρίσιμο ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο προκύπτει ως $P_{cr}=8 \cdot M_{cr}/L^2$.

Στο ADINA θα εξετασθούν οι εξής μέθοδοι για την υλοποίηση των συντοριακών συνθηκών που αφορούν στην περίπτωση αμφιέρειστης δοκού:

1. Χρήση των rigid links μόνο για τους κόμβους του κορμού

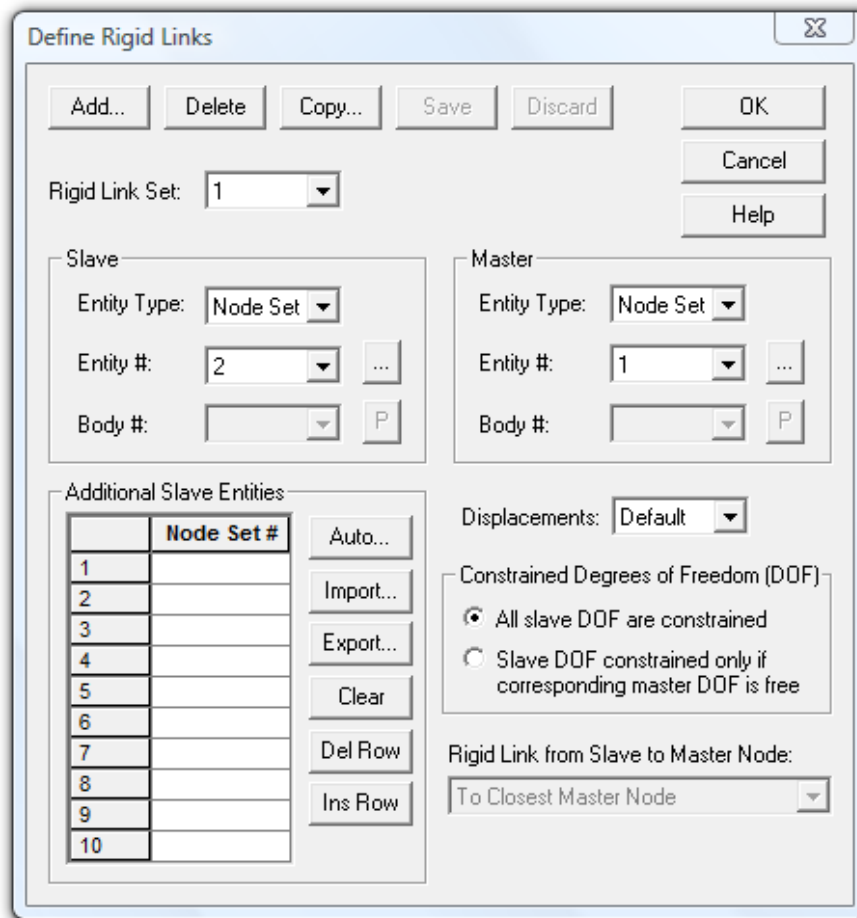
Αφού έχει πραγματοποιηθεί η διαδικασία της διακριτοποίησης του φορέα, δημιουργούνται 4 διαφορετικές κατηγορίες κόμβων μέσω της εντολής **Meshing->Nodes->Node Set**, οι 2 από τις οποίες περιλαμβάνουν τους κόμβους του κορμού των 2 ακραίων διατομών πλην του μεσαίου κόμβου, ενώ οι άλλες 2 περιλαμβάνουν το μεσαίο κόμβο κάθε ακραίας διατομής. Χρησιμοποιείται στην συνέχεια η εντολή **Model->Constraints->Rigid Links** ώστε να δημιουργηθεί σχέση εξάρτησης μεταξύ του μεσαίου κόμβου κάθε ακραίας διατομής και των υπολοίπων κόμβων του κορμού. Πληκτρολογούμε στη θέση του "master node set" τον αριθμό της κατηγορίας που αναφέρεται στο μεσαίο κόμβο κάθε διατομής, ενώ στη θέση "slave node set" τον αριθμό για την κατηγορία με τους υπόλοιπους κόμβους της διατομής. Με αυτήν τη διαδικασία, όλοι πλέον οι κόμβοι του κορμού των ακραίων διατομών ακολουθούν τις μετατοπίσεις και τις στροφές του μέσου των αντιστοίχων διατομών.

Στις 2 κατηγορίες "master node sets" επιβάλλονται τώρα οι εξής συνοριακές συνθήκες: Παγιώνονται οι βαθμοί ελευθερίας x,y,z translation και x-rotation μέσω της εντολής **Model->Boundary Conditions->Apply Fixity** και έχοντας δημιουργήσει το συγκεκριμένο είδος παγίωσης βαθμών ελευθερίας.

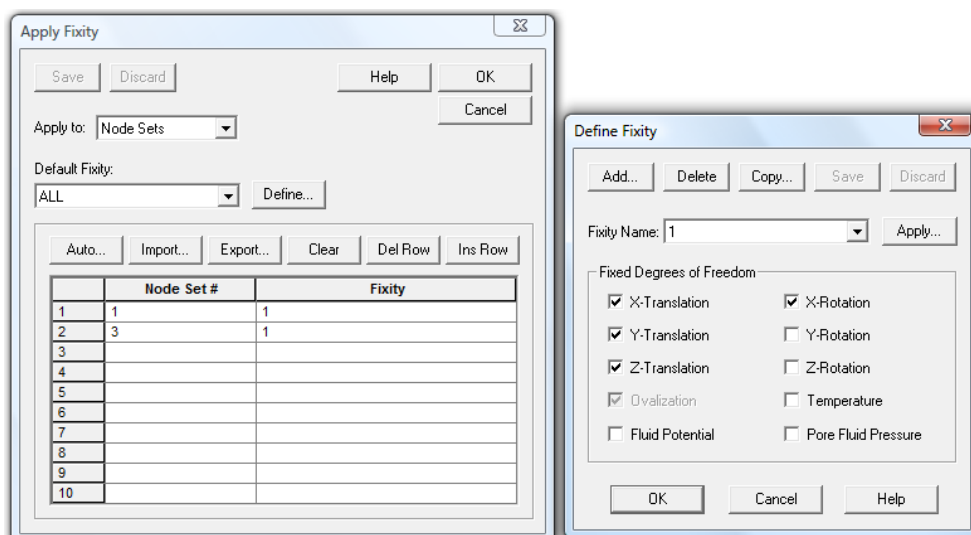


Σχήμα 3.17

Δημιουργία κατηγοριών κόμβων κορμού ακραίων διατομών



Σχήμα 3.18
Δημιουργία άκαμπτων συνδέσεων (rigid links)



Σχήμα 3.19
Επιβολή συνοριακών συνθηκών για τους "master" κόμβους

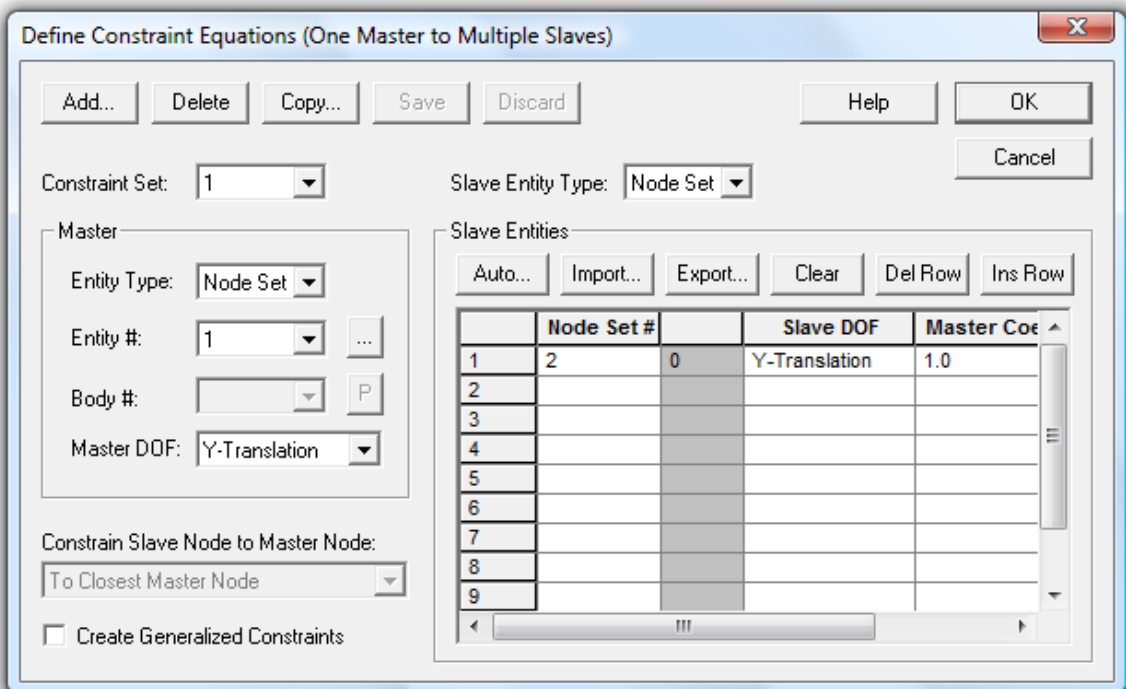
2. Χρήση των rigid links για όλους τους κόμβους της διατομής

Πραγματοποιείται ακριβώς η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω, μόνο που οι 2 από τις 4 κατηγορίες κόμβων που δημιουργούνται αρχικά, περιλαμβάνουν όλους τους κόμβους των ακραίων διατομών πλην του μεσαίου.

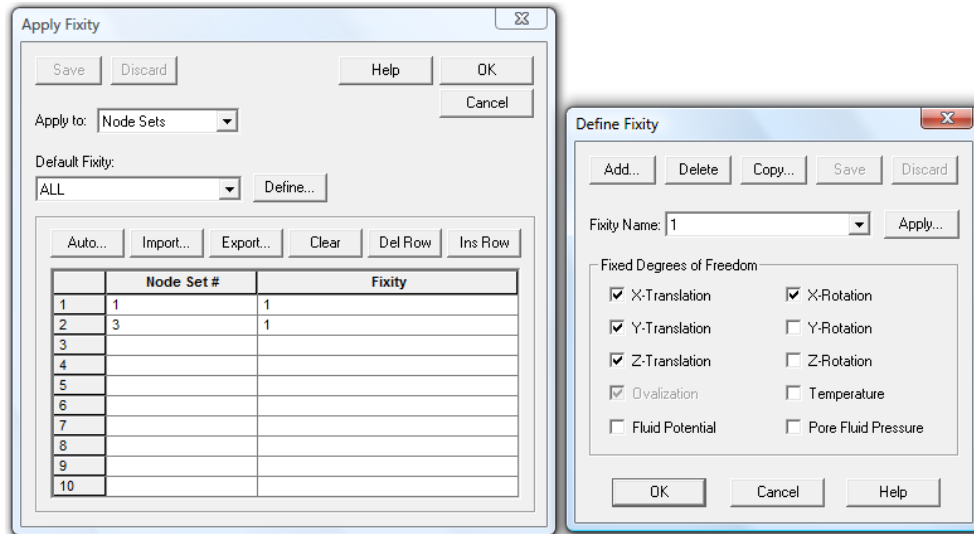
Στην περίπτωση αυτή όλοι οι κόμβοι των ακραίων διατομών υπακούουν στις δεσμεύσεις που αφορούν στις στροφές και στις μετατοπίσεις για το μεσαίο κόμβο.

3. Χρήση των constraint equations για τους κόμβους του κορμού I

Δημιουργούνται και πάλι οι 4 κατηγορίες κόμβων της περίπτωσης 1. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η εντολή **Constraints->Constraint Equations->Multiple Slaves** όπου ορίζονται οι σχέσεις που συνδέουν τον κύριο "master" κόμβο (μεσαίος κόμβος ακραίων διατομών) με τους υπόλοιπους "slave" κόμβους της διατομής. Δεσμεύονται με σχέσεις εξάρτησης οι βαθμοί ελευθερίας y,z translation των κόμβων των ακραίων διατομών συναρτήσει των αντιστοίχων βαθμών ελευθερίας των μεσαίων κόμβων των ακραίων διατομών. Όσον αφορά στις συνοριακές συνθήκες, παγιώνονται οι εξής βαθμοί ελευθερίας των 2 "master" κόμβων: x,y,z-translation και x-rotation.

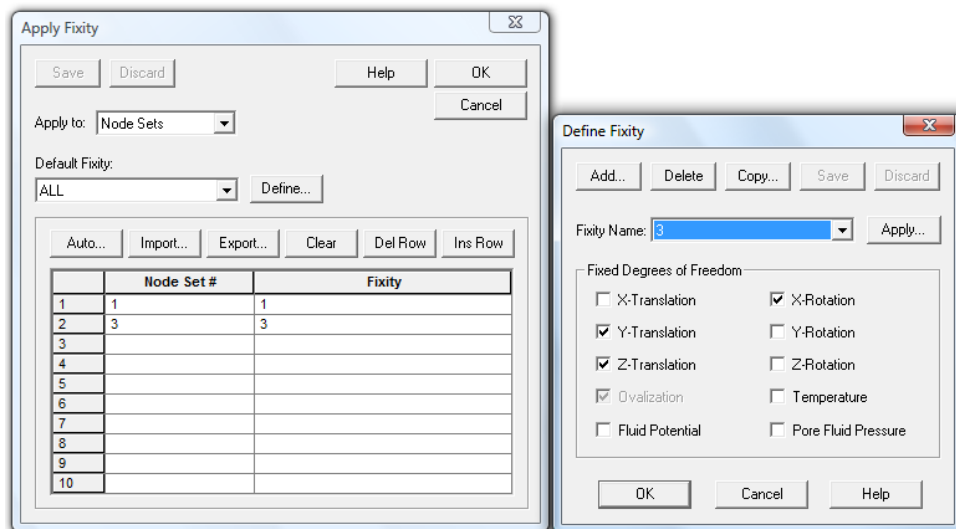


Σχήμα 3.20
Δημιουργία constraint equations



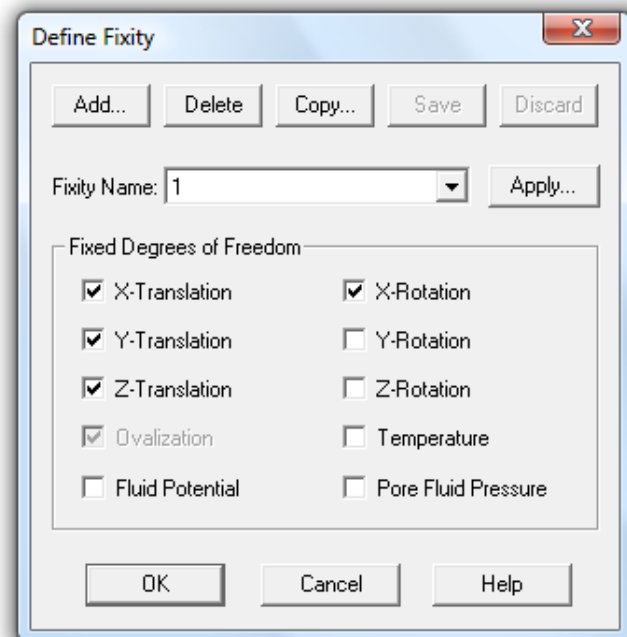
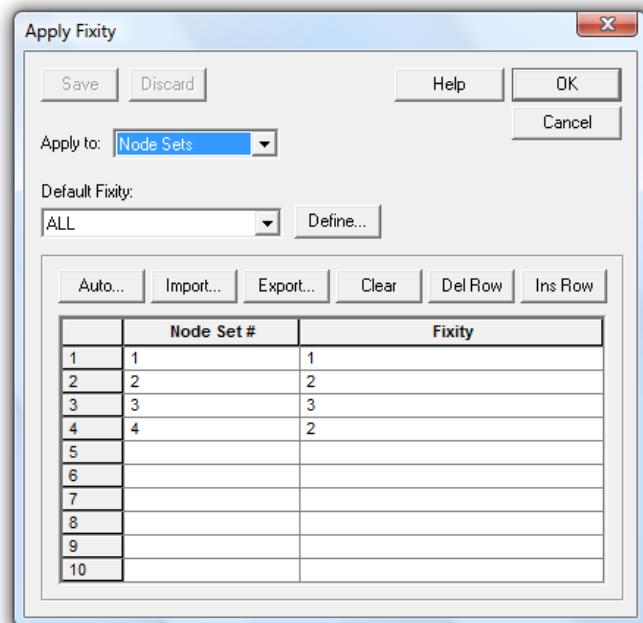
Σχήμα 3.21
Επιβολή συνοριακών συνθηκών για τους "master" κόμβους

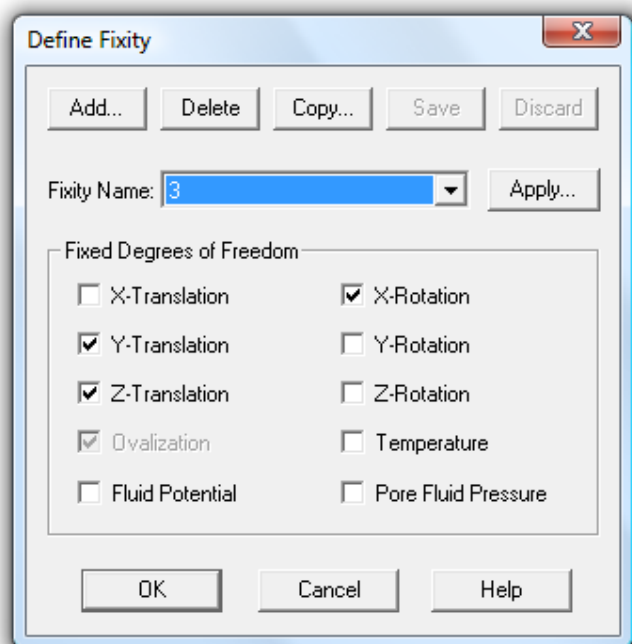
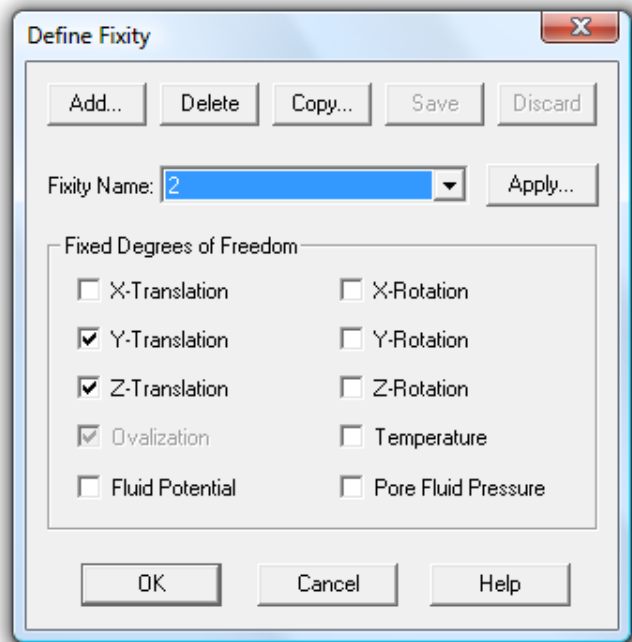
4. Χρήση των constraint equations για τους κόμβους του κορμού II
Ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία με την περίπτωση 4, με τη μόνη διαφορά ότι δεσμεύονται οι εξής βαθμοί ελευθερίας των 2 "master" κόμβων: για τον ένα "master" κόμβο παγιώνονται οι x,y,z-translation, x-rotation και για τον άλλο "master" κόμβο οι y,z-translation, x-rotation.



Σχήμα 3.22
Επιβολή συνοριακών συνθηκών για τους "master" κόμβους

- 5. Επιβολή συντοριακών συνθηκών μόνο για τους κόμβους του κορμού**
 Δημιουργούνται μετά τη διακριτοποίηση του φορέα, οι 4 κατηγορίες κόμβων της περίπτωσης 1. Στη συνέχεια επιβάλλονται ως δεσμεύσεις οι ακόλουθες: για όλους τους κόμβους του κορμού πλην του μεσαίου παγιώνονται οι βαθμοί ελευθερίας y,z -translation. Για τους μεσαίους κόμβους, στη μία ακραία διατομή δεσμεύονται οι x,y,z -translation και x -rotation και στην άλλη οι y,z -translation και x -rotation.





Σχήμα 3.23
Επιβολή συνοριακών συνθηκών στους κόμβους του κορμού των ακραίων διατομών

Αποτελέσματα για δοκό μήκους 12m

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κρίσιμου φορτίου λυγισμού, καθώς και οι αντίστοιχες εικόνες για την 1^η ιδιομορφή λυγισμού που προέκυψαν από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού του ADINA με βάση καθεμία από τις παραπάνω μεθόδους, ενδεικτικά για μία δοκό μήκους 12m διατομής διπλού ταυ, η οποία έχει τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

Ύψος ολικό διατομής $h=600\text{mm}$

Πλάτος πελμάτων $b=200\text{mm}$

Πάχος κορμού $t_w=15\text{mm}$

Πάχος πελμάτων $t_f=20\text{mm}$

Με βάση τη σχέση (2.35) του προηγούμενου κεφαλαίου, η ελαστική κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού για τη συγκεκριμένη αμφιέρειστη δοκό υπό ομοιόμορφα καταμεμημένο φορτίο στον κεντροβαρικό της άξονα, προκύπτει ίση με: $M_{cr,EC3}=289,59\text{kNm}$ και το αντίστοιχο κρίσιμο φορτίο ίσο με $P_{cr,EC3}=16,09\text{kN/m}$. Το φορτίο που αντιστοιχεί στη ροπή πλήρους πλαστικοποίησης της μεσαίας διατομής της δοκού (η οποία υπενθυμίζεται ότι δίνεται από τη σχέση $M_{pl}=W_{pl}\cdot f_y$) προκύπτει ίσο με $P_{pl}=45,64\text{kN/m}$. Επομένως, κρίσιμη μορφή αστοχίας είναι ο πλευρικός λυγισμός της δοκού.

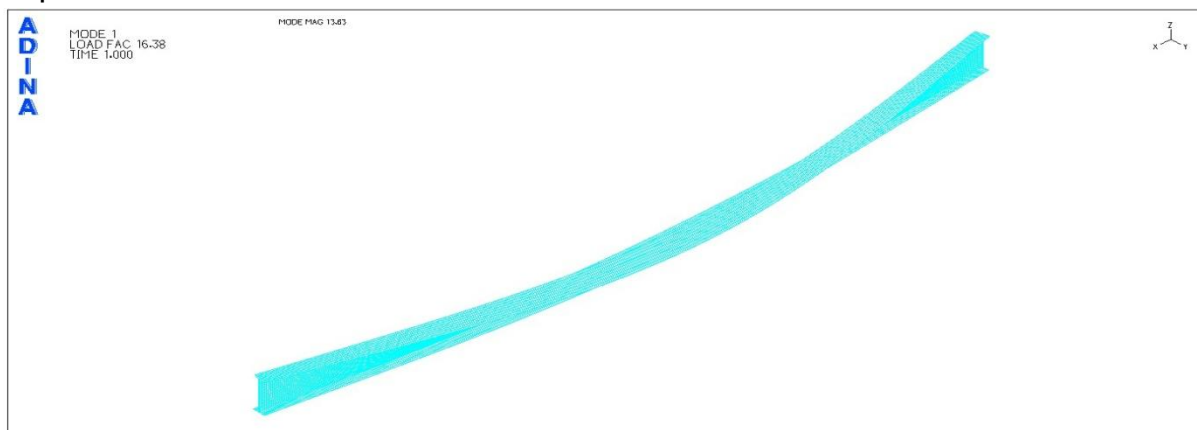
Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται οι αντίστοιχες τιμές κρίσιμου φορτίου πλευρικού λυγισμού που προέκυψαν με τις αναλύσεις του ADINA για καθεμία εκ των 5 περιπτώσεων που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Επισημαίνεται ότι η διατομή είναι κατηγορίας 1 και δεν είναι πλευρικά εξασφαλισμένη, επομένως δεν κινδυνεύει από τοπικό λυγισμό. Πράγματι, στις γραμμικές αναλύσεις λυγισμού στο ADINA εμφανίζεται πλευρικός λυγισμός, όπως αναμενόταν.

	$P_{cr,ADINA}$ (kN/m)
1 ^η μέθοδος	16,38
2 ^η μέθοδος	21,71
3 ^η μέθοδος	15,81
4 ^η μέθοδος	15,78
5 ^η μέθοδος	15,78

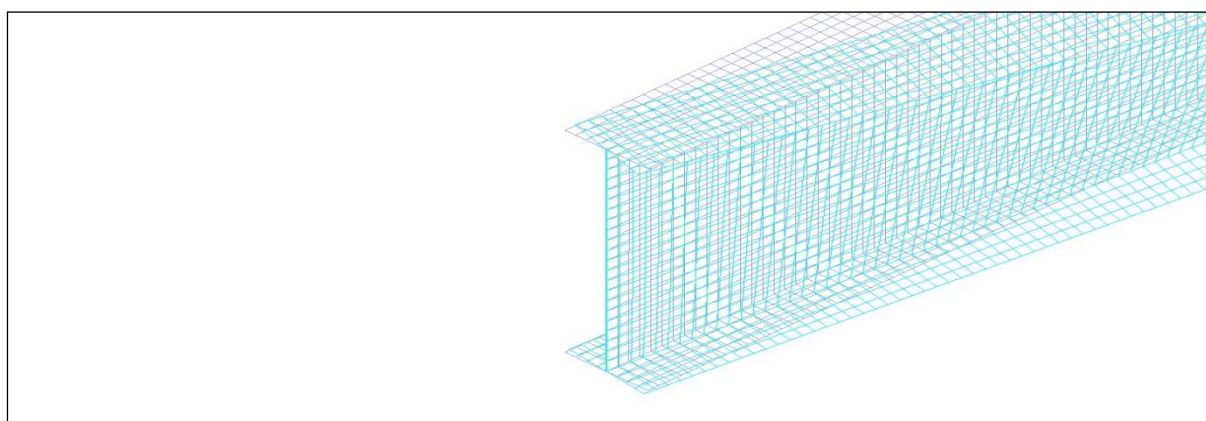
Πίνακας 3.1

Κρίσιμο φορτίο λυγισμού κατά ADINA για διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης αμφιέρειστης δοκού

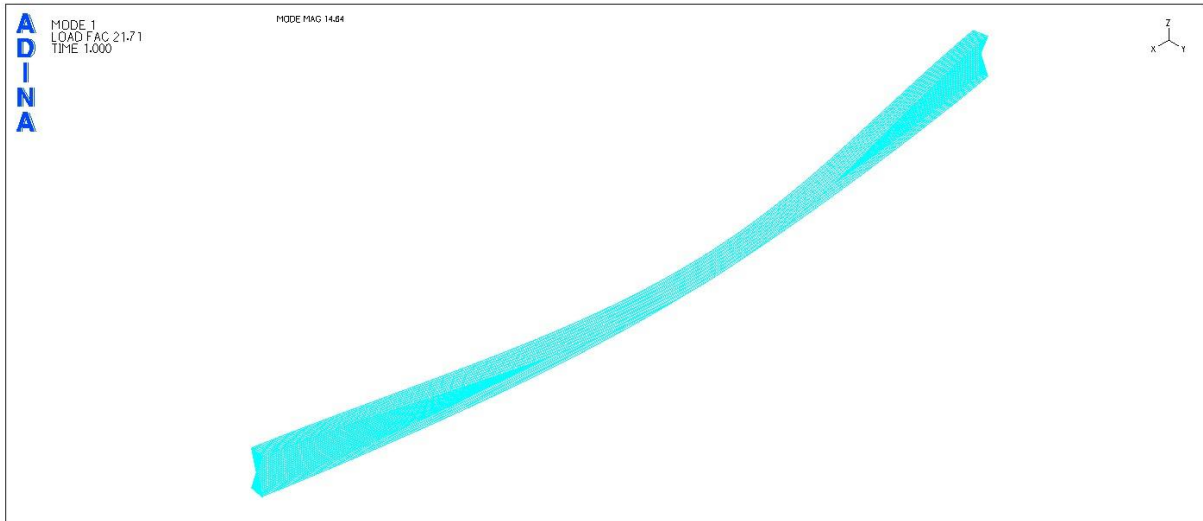
Παρατηρούμε αρχικά ότι η τιμή η οποία απέχει αρκετά από το αντίστοιχο κρίσιμο φορτίου πλευρικού λυγισμού με βάση τον Ευρωκώδικα, είναι αυτή που προκύπτει με την εφαρμογή της 2^{ης} μεθόδου προσομοίωσης. Αυτό, όπως θα δούμε και στη συνέχεια, οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτήν τη μέθοδο δημιουργήθηκαν άκαμπτες συνδέσεις για ολόκληρη την ακραία διατομή, η παρουσία των οποίων εμποδίζει την ελεύθερη στρέβλωση των άκρων. Το φαινόμενο αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι για τον υπολογισμό της κρίσιμης ελαστικής ροπής πλευρικού λυγισμού κατά Ευρωκώδικα, χρησιμοποιήθηκε για το συντελεστή k_w (ο οποίος αναφέρεται στη στρέβλωση του άκρου) η τιμή 1, δικαιολογεί την απόκλιση στα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό, εξ αρχής θα θεωρηθούν ως περισσότερο αξιόπιστες οι 4 υπόλοιπες μέθοδοι οι οποίες, όπως φαίνεται και από τα επόμενα σχήματα, επιτρέπουν την ελεύθερη στρέβλωση των άκρων.



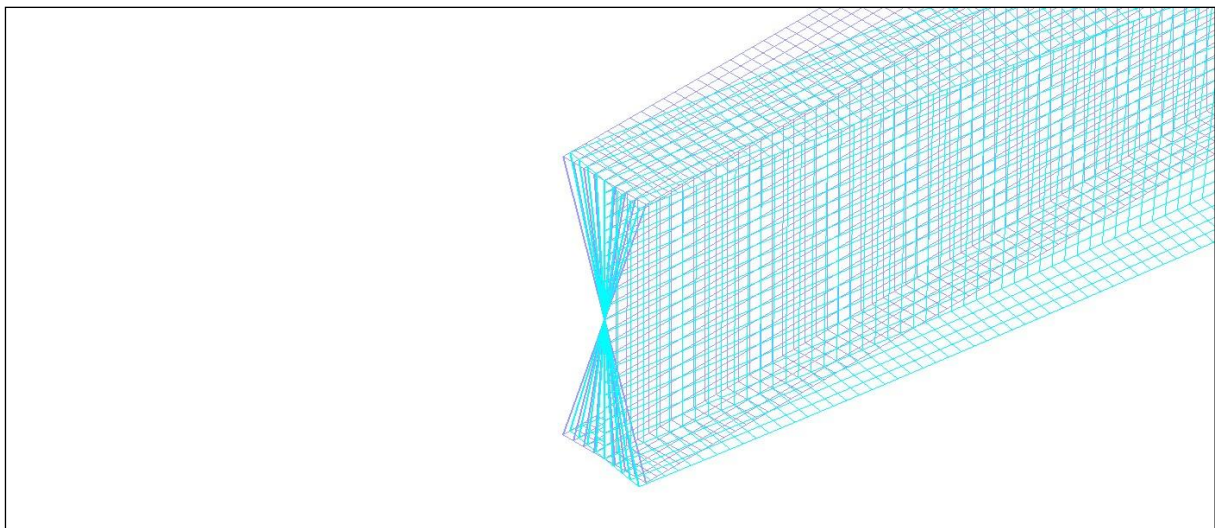
Σχήμα 3.24
1^η ιδιομορφή λυγισμού με βάση την 1^η μέθοδο



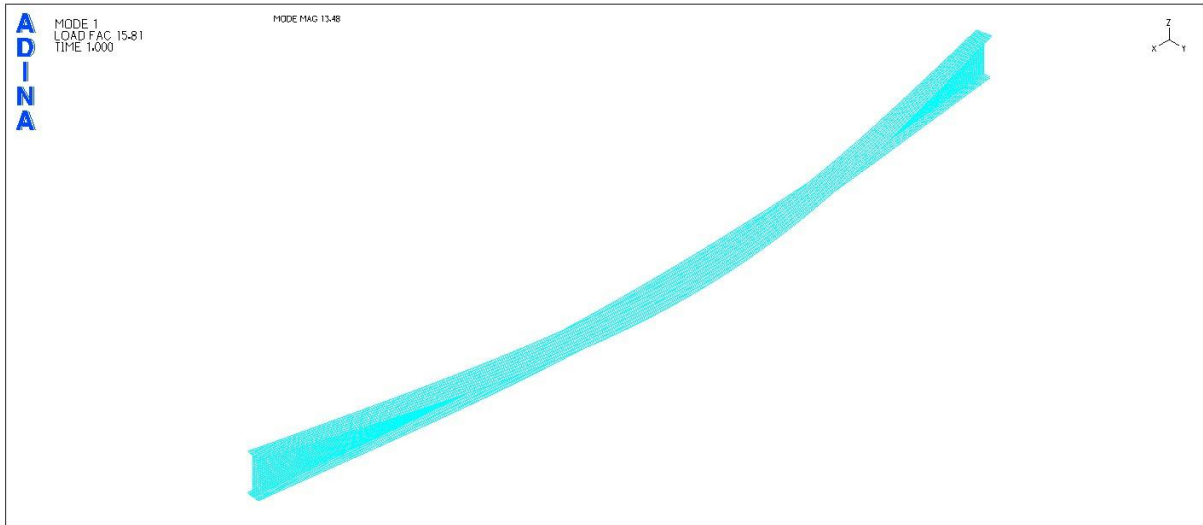
Σχήμα 3.25
1^η ιδιομορφή λυγισμού με βάση την 1^η μέθοδο (λεπτομέρεια)



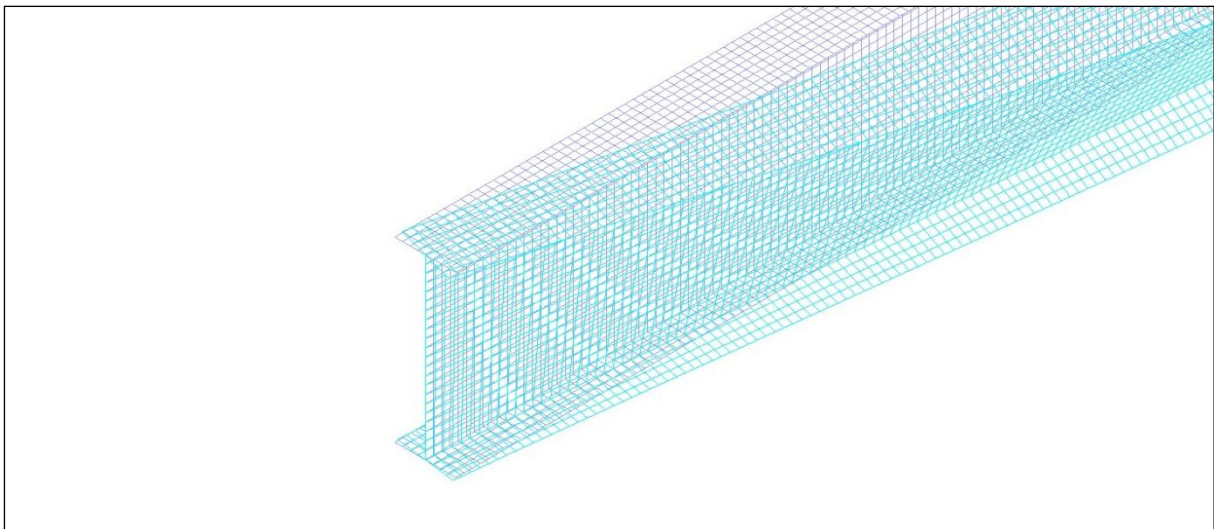
Σχήμα 3.26
1^η ιδιομορφή λυγισμού με βάση τη 2^η μέθοδο



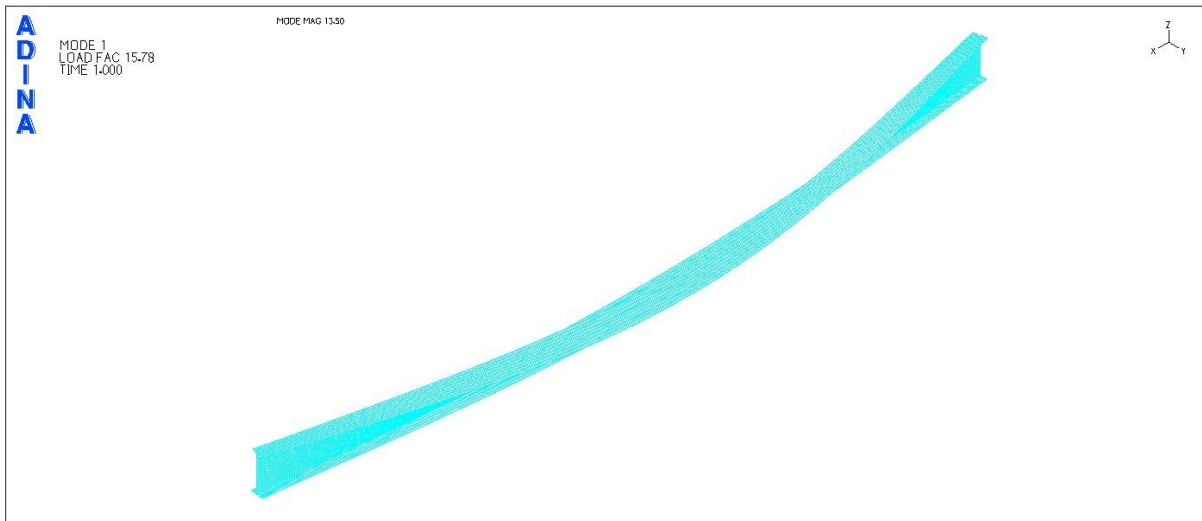
Σχήμα 3.27
1^η ιδιομορφή λυγισμού με βάση τη 2^η μέθοδο (λεπτομέρεια)



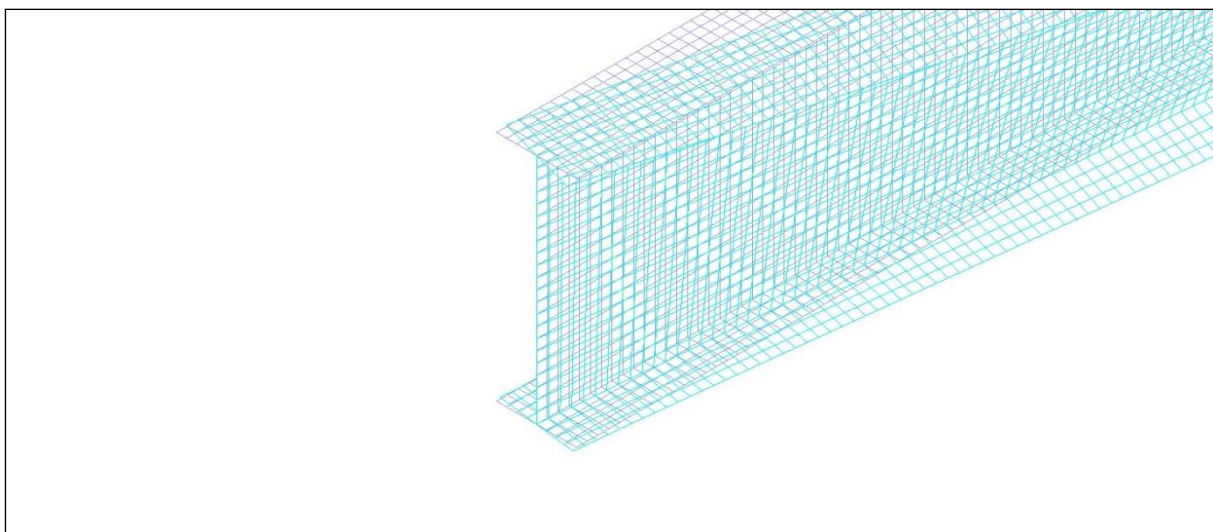
Σχήμα 3.28
1^η ιδιομορφή λυγισμού με βάση την 3^η μέθοδο



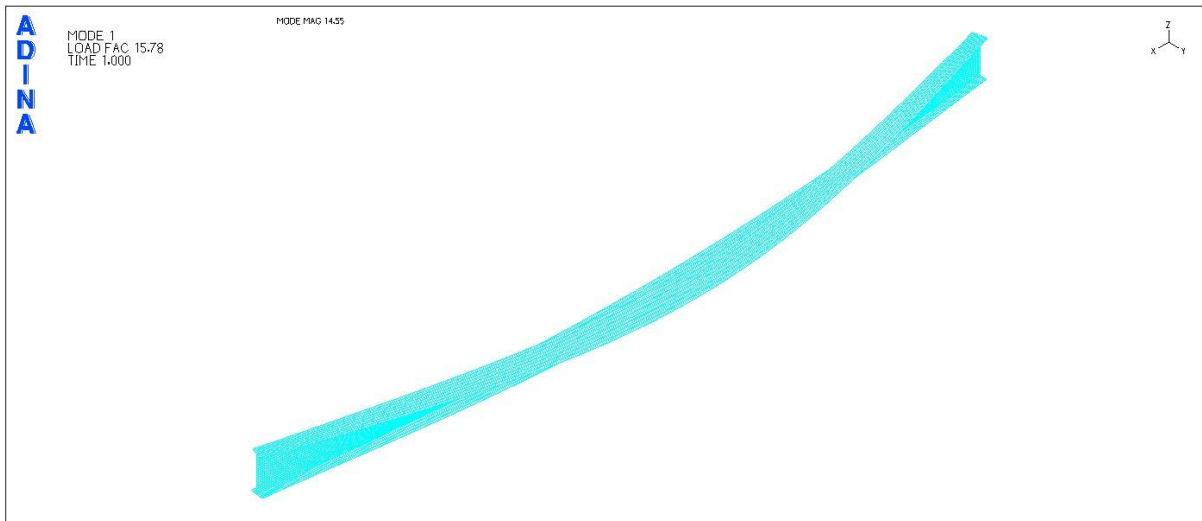
Σχήμα 3.29
1^η ιδιομορφή λυγισμού με βάση την 3^η μέθοδο (λεπτομέρεια)



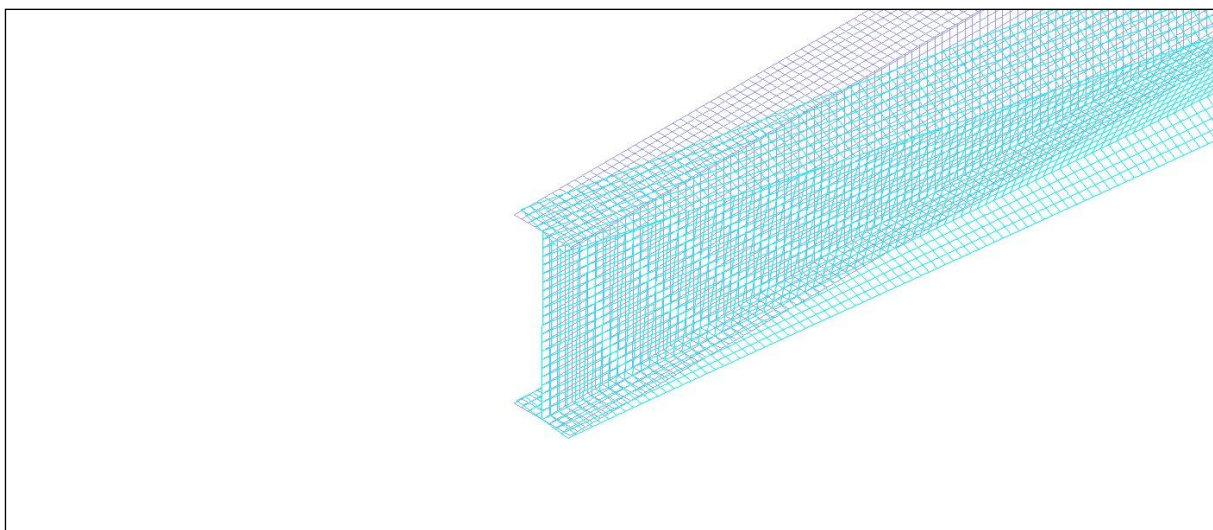
Σχήμα 3.30
1^η ιδιομορφή λυγισμού με βάση την 4^η μέθοδο



Σχήμα 3.31
1^η ιδιομορφή λυγισμού με βάση την 4^η μέθοδο (λεπτομέρεια)



Σχήμα 3.32
1^η ιδιομορφή λυγισμού με βάση την 5^η μέθοδο



Σχήμα 3.33
1^η ιδιομορφή λυγισμού με βάση την 5^η μέθοδο (λεπτομέρεια)

Με βάση τις λεπτομέρειες από τις ακραίες διατομές που φαίνονται στα παραπάνω σχήματα, επιβεβαιώνεται ότι η 2^η μέθοδος δημιουργεί μεγαλύτερο βαθμό δέσμησης από τον επιθυμητό και για το λόγο αυτό ο

πλευρικός λυγισμός της δοκού επέρχεται για αρκετά μεγαλύτερη τιμή φορτίου από την αναμενόμενη.

Θα παρουσιασθεί η εφαρμογή των 5 μεθόδων και σε άλλες 2 ακόμα περιπτώσεις δοκών ώστε να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τα κρίσιμα φορτία πλευρικού λυγισμού.

Αποτελέσματα για δοκό μήκους 10m

Αναλύεται μία δοκός μήκους 10m διατομής διπλού ταυ, η οποία έχει τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

Ύψος ολικό διατομής $h=500\text{mm}$

Πλάτος πελμάτων $b=300\text{mm}$

Πάχος κορμού $t_w=14,5\text{mm}$

Πάχος πελμάτων $t_f=28\text{mm}$

Η ελαστική κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού για τη συγκεκριμένη αμφιέριστη δοκό υπό ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στον κεντροβαρικό της άξονα, προκύπτει ίση με: $M_{cr,EC3}=1340,68\text{kNm}$ και το αντίστοιχο κρίσιμο φορτίο ίσο με $P_{cr,EC3}=107,25\text{kN/m}$. Το φορτίο που αντιστοιχεί στη ροπή πλήρους πλαστικοποίησης της μεσαίας διατομής της δοκού προκύπτει ίσο με $P_{pl}=87,97\text{kN/m}$. Επομένως, κρίσιμη μορφή αστοχίας για την αμφιέριστη δοκό είναι η πλαστικοποίηση της μεσαίας διατομής της.

Στον Πίνακα 3.2 φαίνονται οι τιμές κρίσιμου φορτίου πλευρικού λυγισμού του ADINA για καθμία εκ των 5 μεθόδων. Η διατομή είναι και πάλι κατηγορίας 1 και δεν είναι πλευρικά εξασφαλισμένη, επομένως δεν υπάρχει κίνδυνος τοπικού λυγισμού, όπως επιβεβαιώνεται και από τις γραμμικές αναλύσεις λυγισμού με το ADINA.

	$P_{cr,ADINA}$ (kN/m)
1 ^η μέθοδος	104,1
2 ^η μέθοδος	155,3
3 ^η μέθοδος	101,1
4 ^η μέθοδος	100,5
5 ^η μέθοδος	100,5

Πίνακας 3.2

Κρίσιμο φορτίο λυγισμού κατά ADINA για διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης αμφιέριστης δοκού

Αποτελέσματα για δοκό μήκους 16m

Αναλύεται μία δοκός μήκους 16m διατομής διπλού ταυ, η οποία έχει τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

Ύψος ολικό διατομής $h=700\text{mm}$

Πλάτος πελμάτων $b=300\text{mm}$

Πάχος κορμού $t_w=15\text{mm}$

Πάχος πελμάτων $t_f=25\text{mm}$

Η ελαστική κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού για τη συγκεκριμένη αμφιέριστη δοκό υπό ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στον κεντροβαρικό της άξονα, προκύπτει ίση με: $M_{cr,EC3}=696,85\text{kNm}$ και το αντίστοιχο κρίσιμο φορτίο ίσο με $P_{cr,EC3}=21,78\text{kN/m}$. Το φορτίο που αντιστοιχεί στη ροπή πλήρους πλαστικοποίησης της μεσαίας διατομής της δοκού προκύπτει ίσο με $P_{pl}=48,81\text{kN/m}$. Επομένως, κρίσιμη μορφή αστοχίας είναι ο πλευρικός λυγισμός της δοκού.

Στον Πίνακα 3.3 φαίνονται οι τιμές κρίσιμου φορτίου πλευρικού λυγισμού του ADINA για καθεμία εκ των 5 μεθόδων. Η διατομή είναι και πάλι κατηγορίας 1 και δεν είναι πλευρικά εξασφαλισμένη, επομένως δεν υπάρχει κίνδυνος τοπικού λυγισμού, όπως επιβεβαιώνεται και από τις γραμμικές αναλύσεις λυγισμού με το ADINA.

	$P_{cr,ADINA}$ (kN/m)
1 ^η μέθοδος	22,56
2 ^η μέθοδος	32,27
3 ^η μέθοδος	21,81
4 ^η μέθοδος	21,40
5 ^η μέθοδος	21,40

Πίνακας 3.3

Κρίσιμο φορτίο λυγισμού κατά ADINA για διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης αμφιέριστης δοκού

Επιβεβαιώνονται τα συμπεράσματα που είχαν προκύψει από το πρώτο παράδειγμα για την καταλληλότητα των μεθόδων. Επειδή στον τύπο του Ευρωκώδικα 3 για την εύρεση της ελαστικής κρίσιμης ροπής πλευρικού λυγισμού χρησιμοποιήθηκε η τιμή $k_w=1$ που αντιστοιχεί σε ελεύθερη στρέβλωση του άκρου, θεωρείται πιο αξιόπιστη η δέσμευση μόνο των κόμβων του κορμού και όχι ολόκληρης της διατομής.

Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τις μη γραμμικές αναλύσεις υλικού και γεωμετρίας για τις 5 παραπάνω μεθόδους, ώστε να γίνει φανερή η καταλληλότητά τους για εφαρμογή.

Επίσης, αξίζει να επισημανθεί ότι η βασική διαφοροποίηση μεταξύ των μεθόδων "rigid links" και "constraint equations" έγκειται στο ότι με την πρώτη μέθοδο οι κόμβοι που έχουν οριστεί ως δευτερεύοντες ή "slaves" υπακούουν ακριβώς στις δεσμεύσεις που έχουν οριστεί για τους κύριους ή "master" κόμβους. Αντίθετα, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο "constraint equations", γίνεται επιλογή των δεσμευμένων βαθμών ελευθερίας των "master" κόμβων που ακολουθούν οι "slaves". Θα μπορούσε κατά μία έννοια να ειπωθεί ότι με τη μέθοδο "constraint equations" μειώνεται σε κάποιο βαθμό η υπερστατικότητα του φορέα.

3.3 Αποτελέσματα μη γραμμικών αναλύσεων υλικού και γεωμετρίας για διαφορετικούς τρόπους προσομοίωσης αμφιέρειστης δοκού

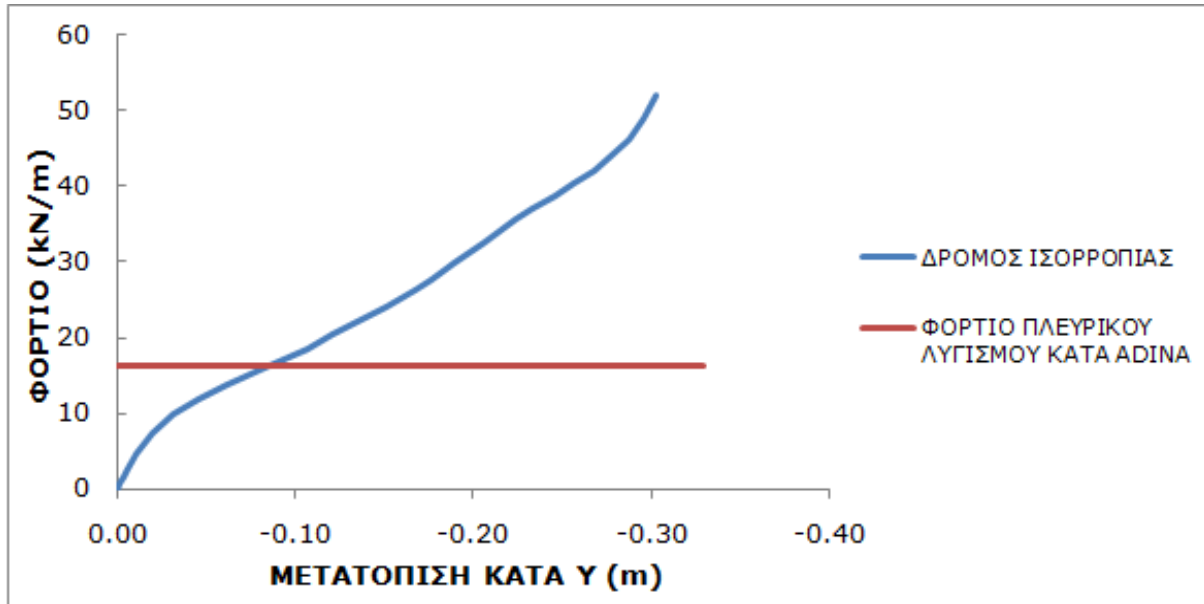
Στην παράγραφο αυτή, πραγματοποιούνται για τις δύο περιπτώσεις όπου κρίσιμη μορφή αστοχίας ήταν ο πλευρικός λυγισμός, μη γραμμικές αναλύσεις υλικού και γεωμετρίας στο ADINA ώστε να ευρεθεί η μεταλυγισμική συμπεριφορά των φορέων ανάλογα με τις εκάστοτε συννοριακές συνθήκες. Σκοπός είναι να φανεί ποια από τις 5 μεθόδους προσομοίωσης είναι η πλέον κατάλληλη και να επιλεγεί για όλες τις αριθμητικές αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Οι μη γραμμικές αναλύσεις πραγματοποιούνται με τη μέθοδο Arc-Length (collapse analysis), γίνονται για διγραμμικό χάλυβα S235 χωρίς κράτυνση και δίνεται στους φορείς αρχική γεωμετρική ατέλεια ίση με 3cm, σύμφωνη με την 1^η ιδιομορφή λυγισμού. Η ατέλεια εφαρμόζεται σε όλον το φορέα, αλλά ως χαρακτηριστικό σημείο εφαρμογής της τιμής της λαμβάνεται ο κόμβος με τη μέγιστη εκτροπή (κόμβος συνένωσης άνω πέλματος-κορμού στο μέσο της δοκού). Ως σημείο αναφοράς θεωρείται ο κόμβος συνένωσης κάτω πέλματος-κορμού στο μέσο της δοκού.

Παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας που προκύπτουν από τις μη γραμμικές αναλύσεις και στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται η τιμή του φορτίου πλευρικού λυγισμού που έχει προκύψει από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού με το ADINA.

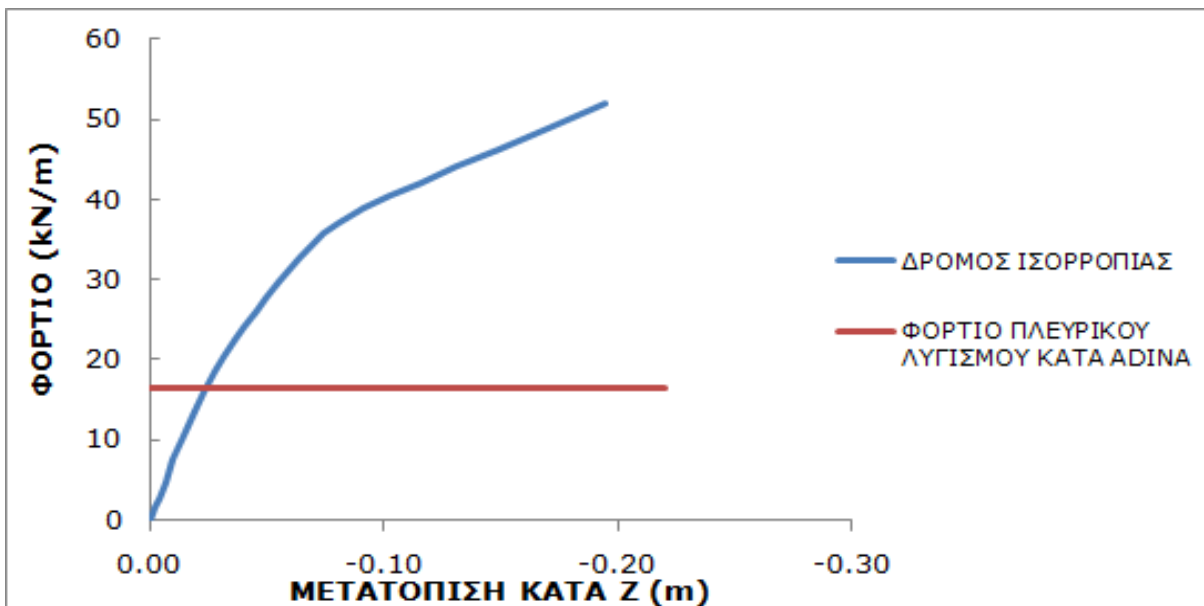
ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΜΗΚΟΥΣ 12m

1^η μέθοδος



Σχήμα 3.34

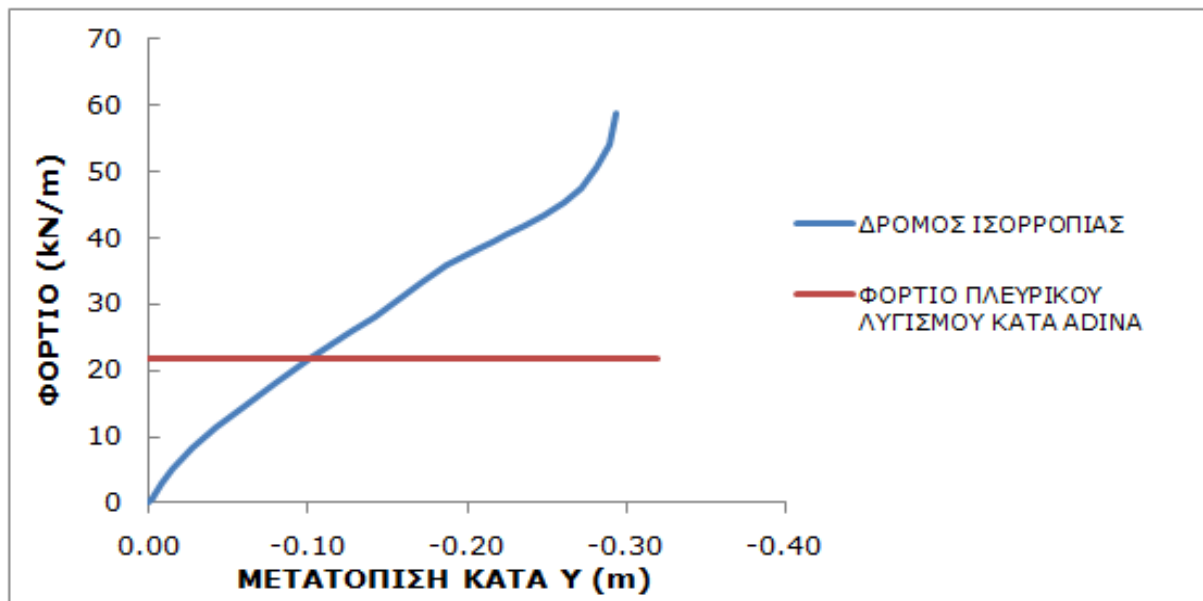
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 3.35

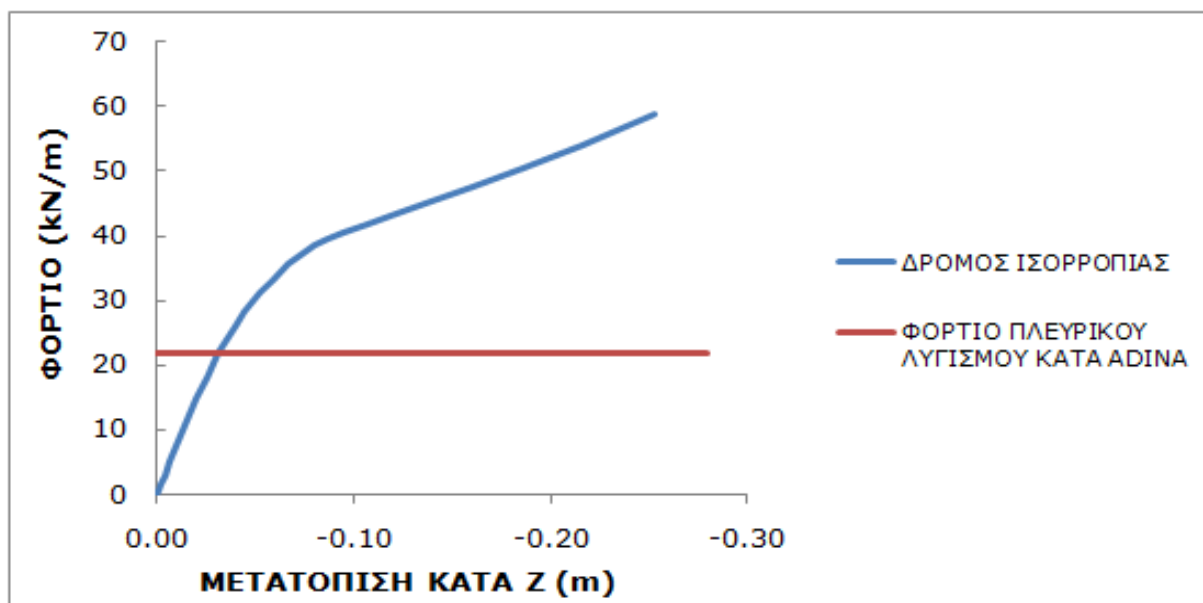
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

2^η μέθοδος



Σχήμα 3.36

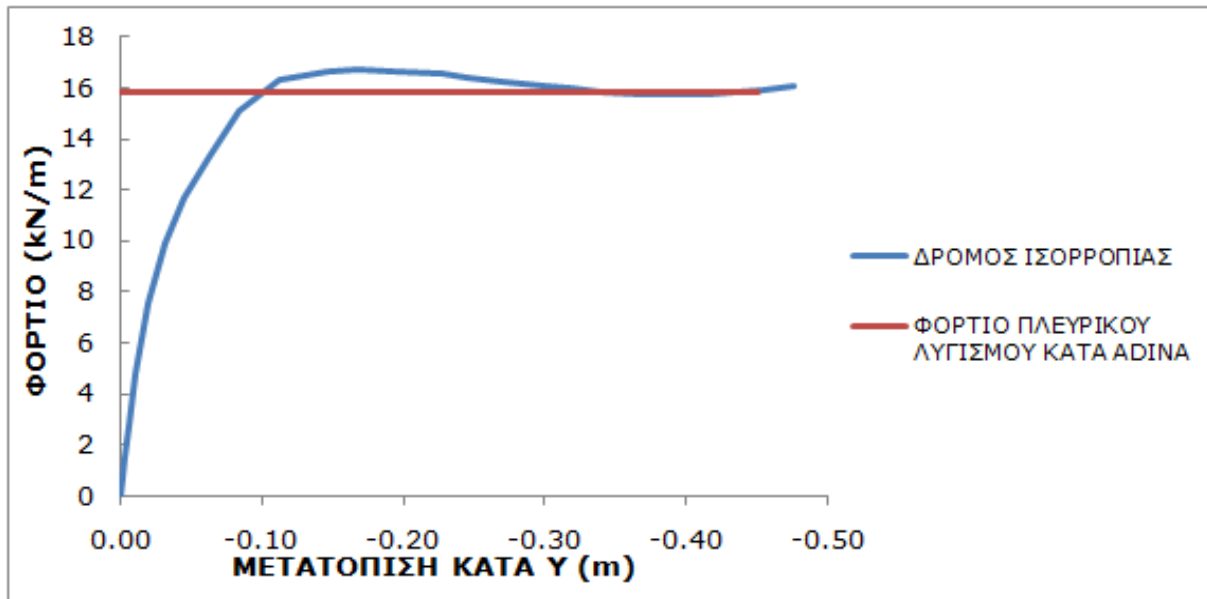
Δρόμος ισορροπίας φορτίου- y μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 3.37

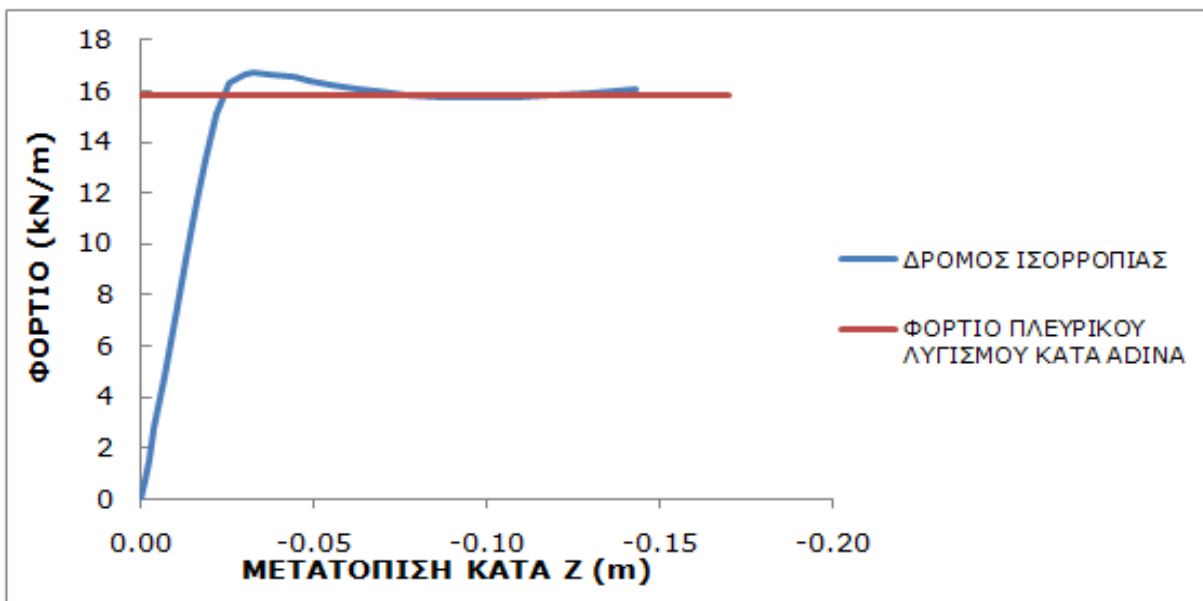
Δρόμος ισορροπίας φορτίου- z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

3^η μέθοδος



Σχήμα 3.38

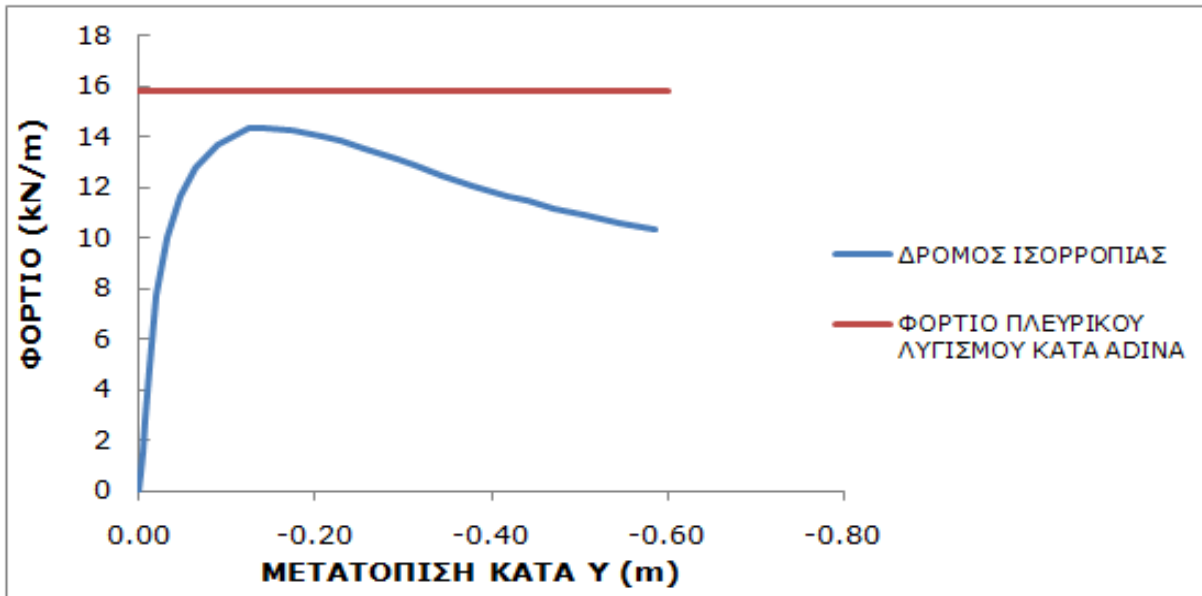
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-y μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 3.39

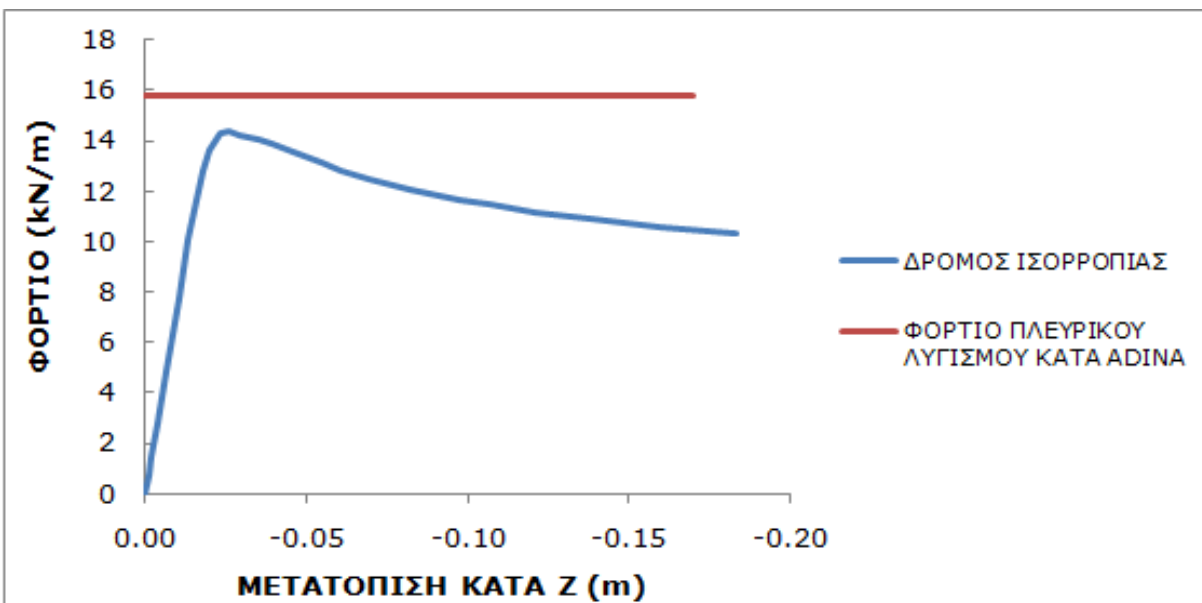
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

4^η μέθοδος



Σχήμα 3.40

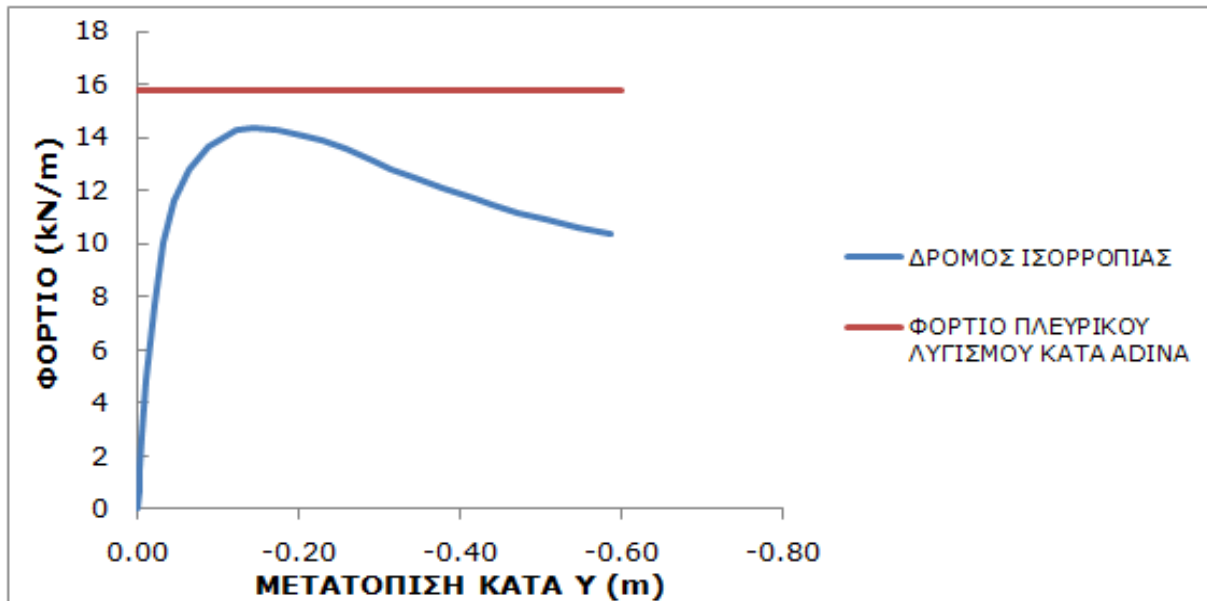
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-y μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 3.41

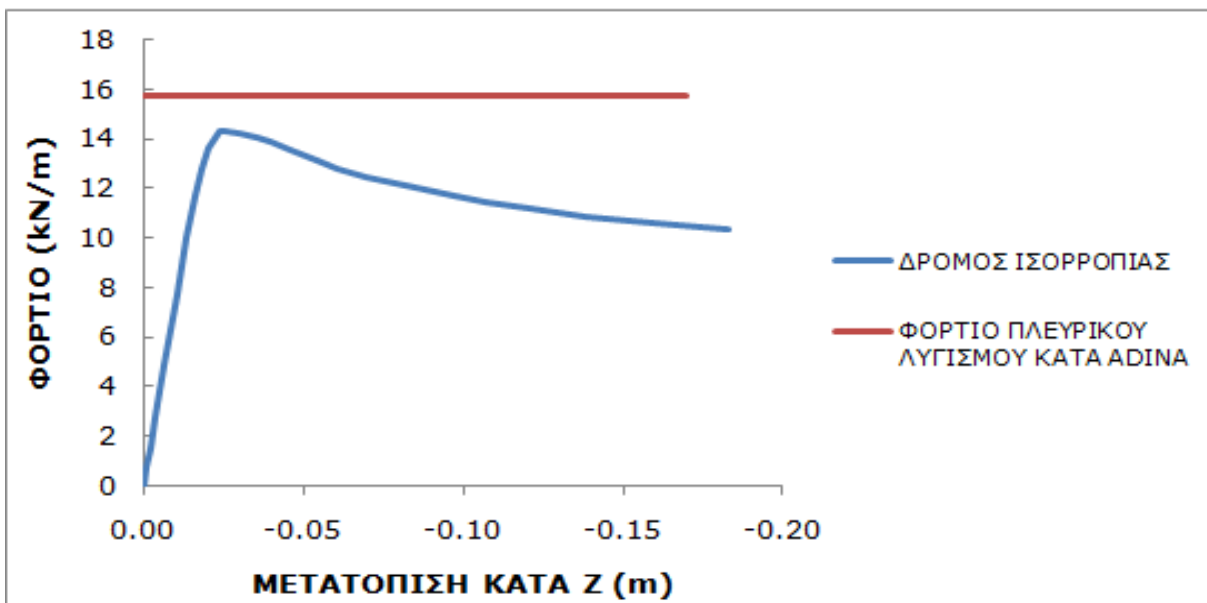
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

5^η μέθοδος



Σχήμα 3.42

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια

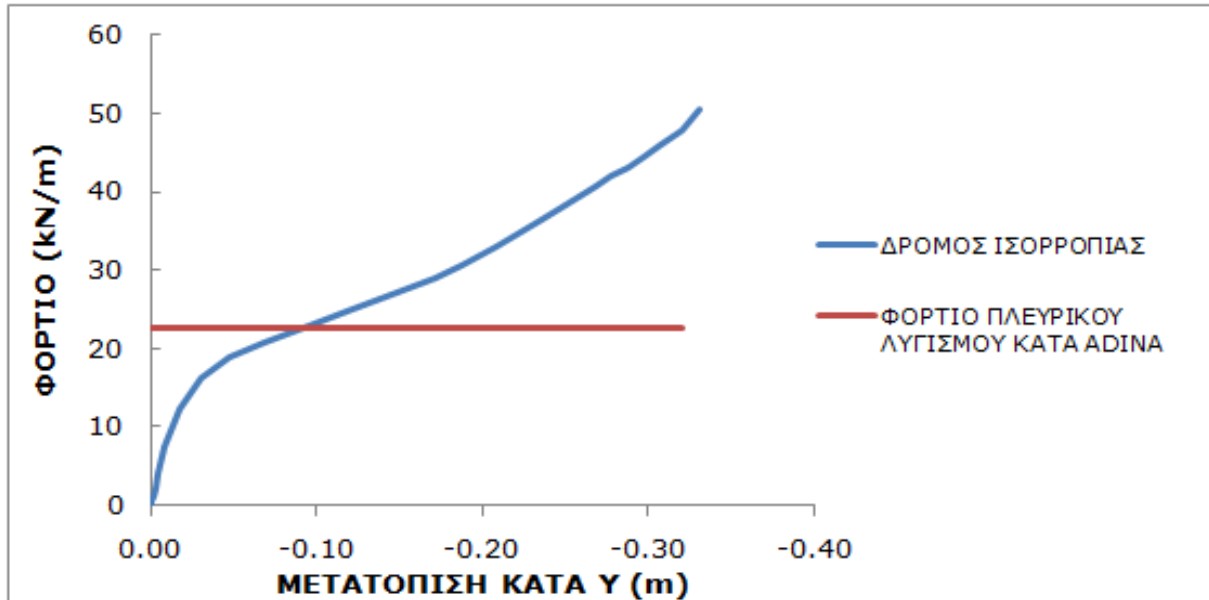


Σχήμα 3.43

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

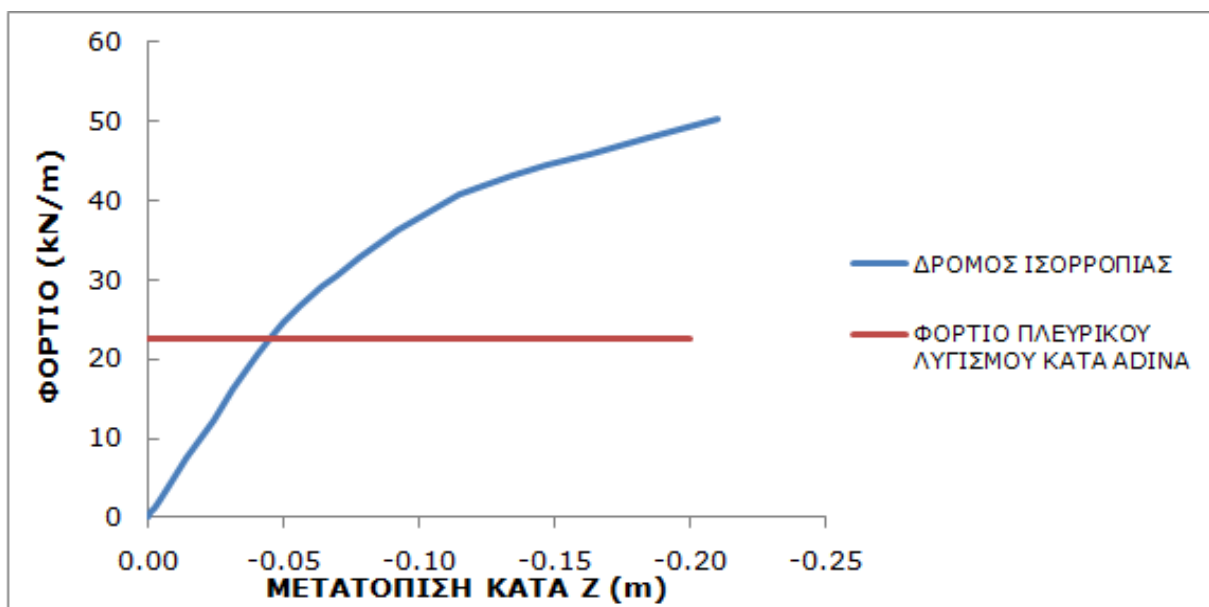
ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΟΚΟ ΜΗΚΟΥΣ 16m

1^η μέθοδος



Σχήμα 3.44

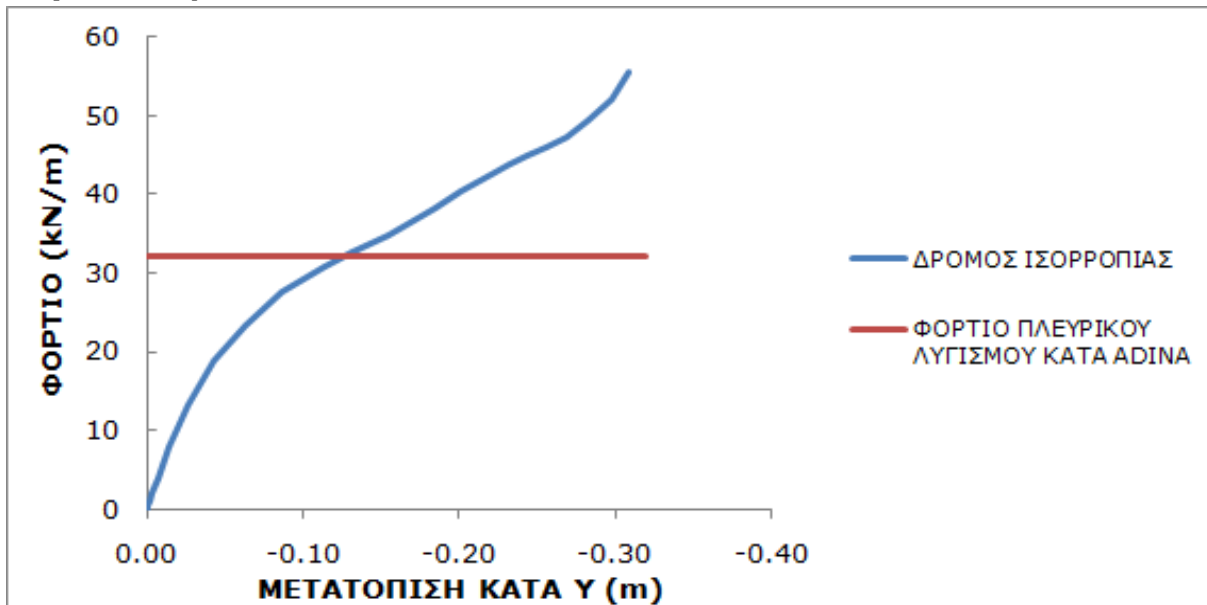
Δρόμος ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 3.45

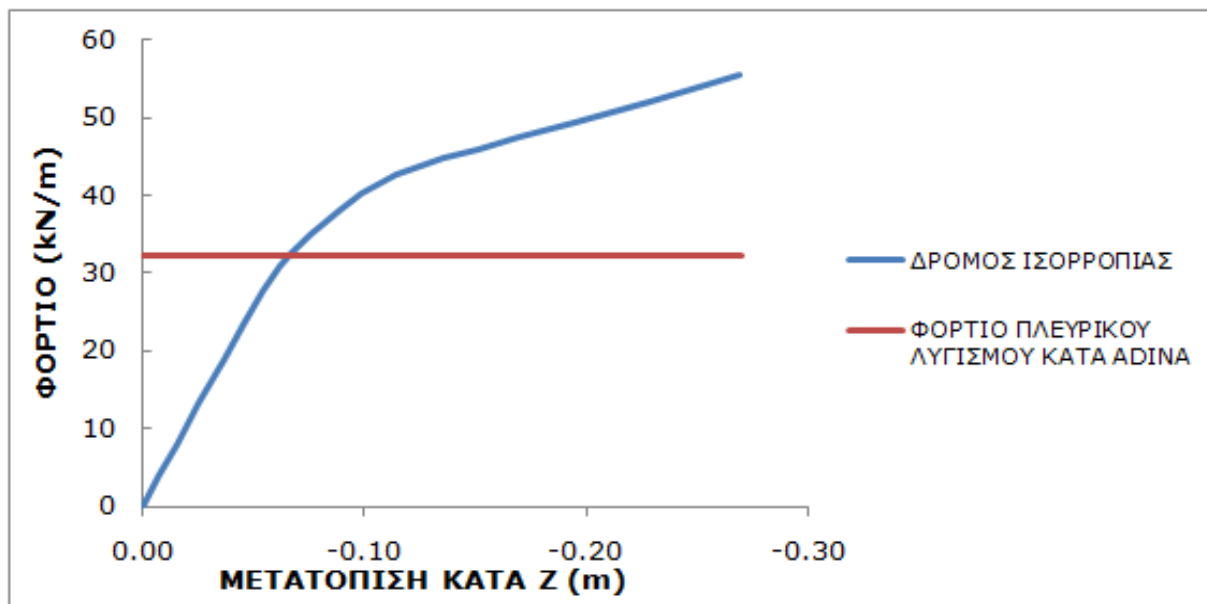
Δρόμος ισορροπίας φορτίου- z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

2^η μέθοδος



Σχήμα 3.46

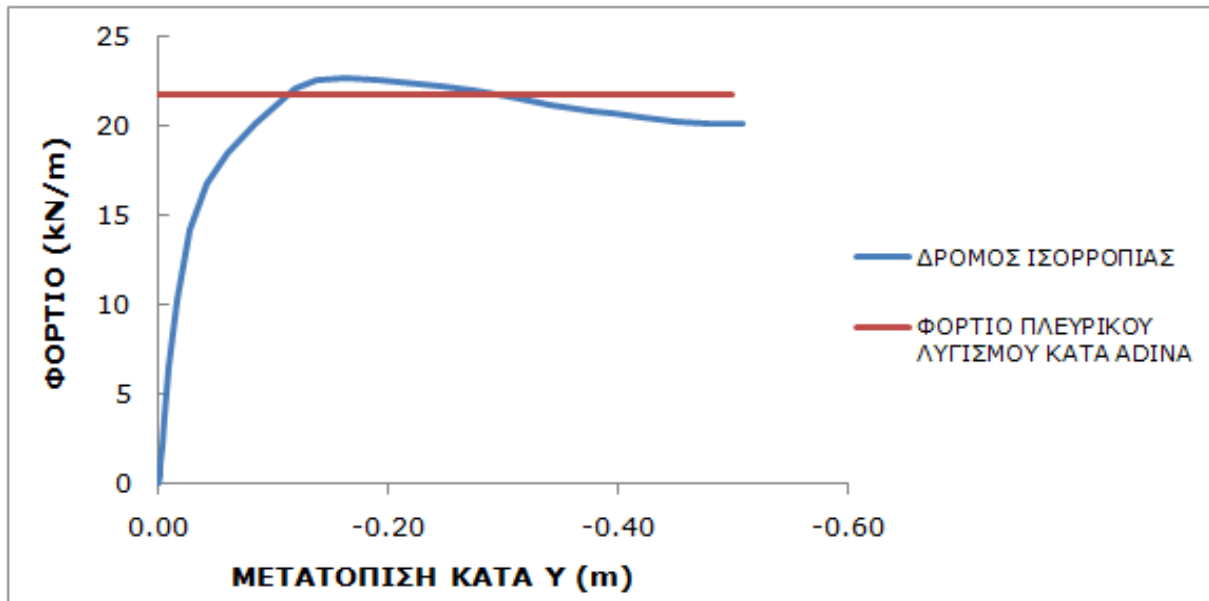
Δρόμος ισορροπίας φορτίου- y μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 3.47

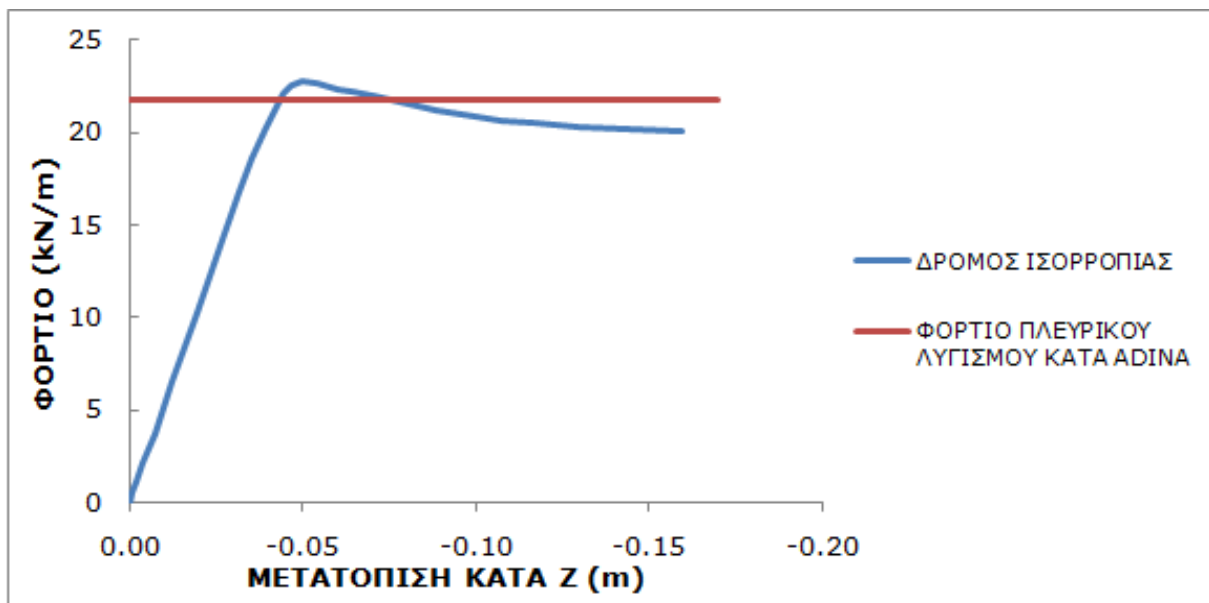
Δρόμος ισορροπίας φορτίου- z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

3^η μέθοδος



Σχήμα 3.48

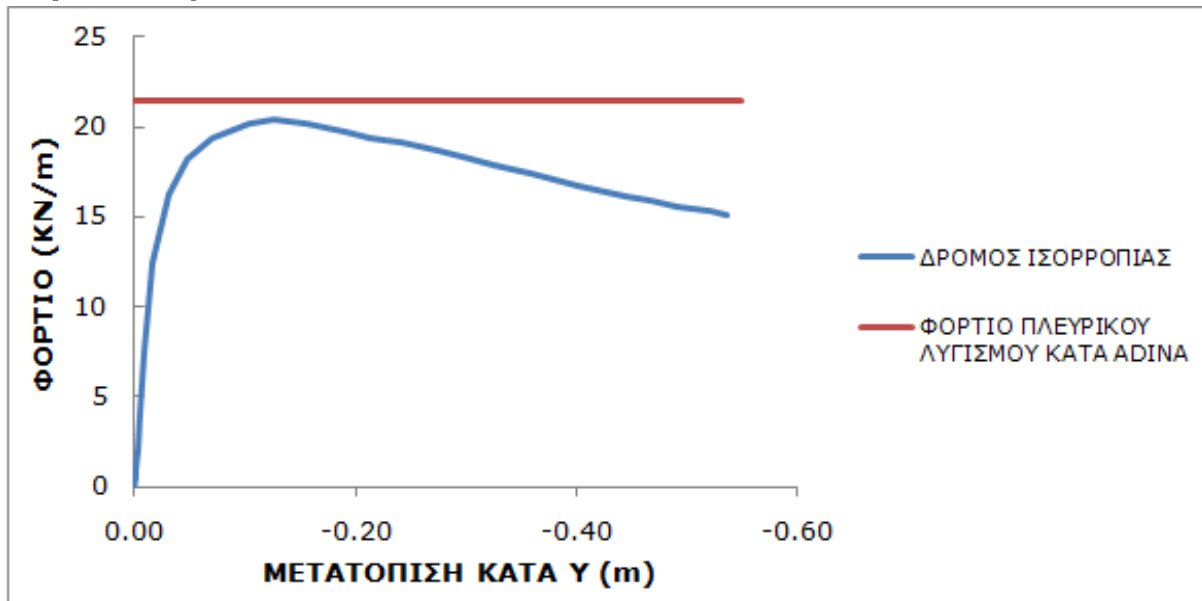
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 3.49

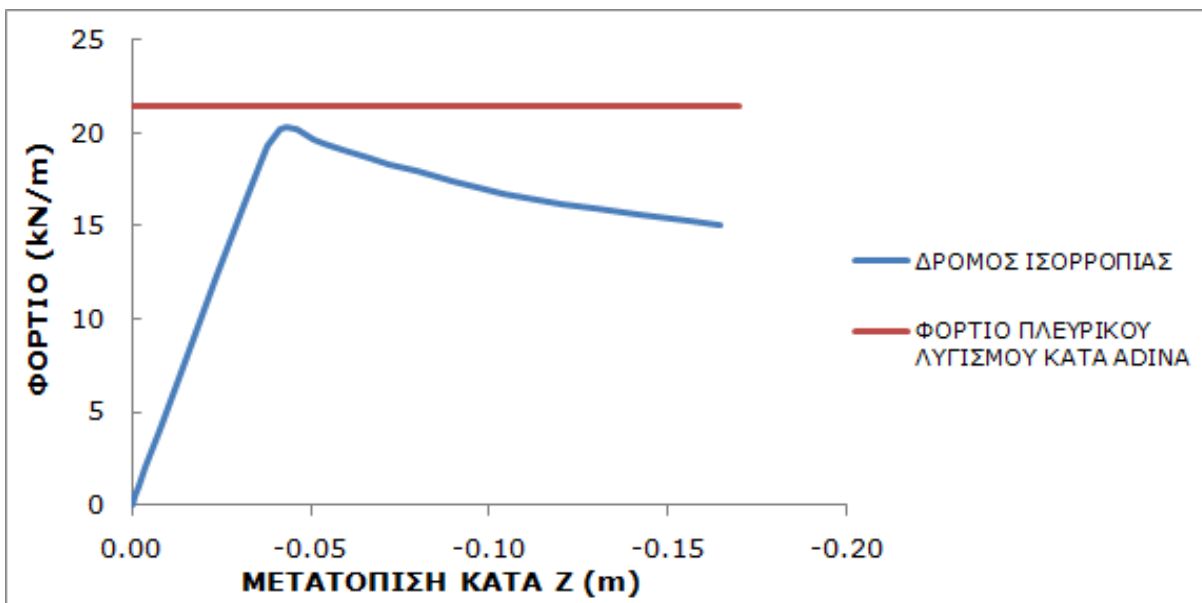
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

4^η μέθοδος



Σχήμα 3.50

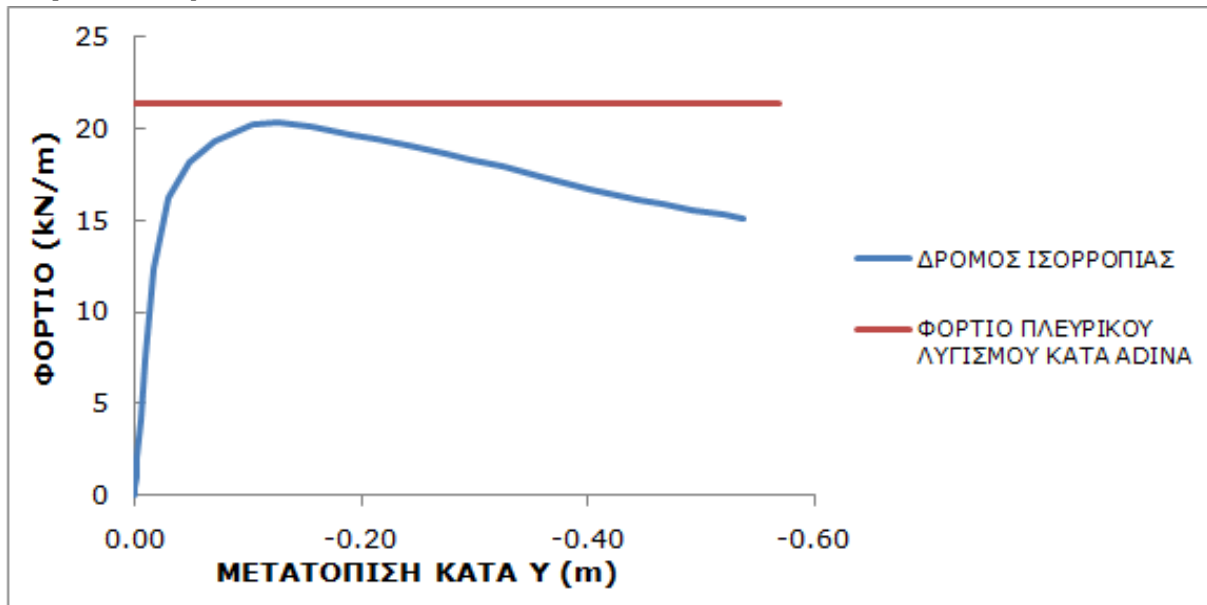
Δρόμος ισορροπίας φορτίου- y μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 3.51

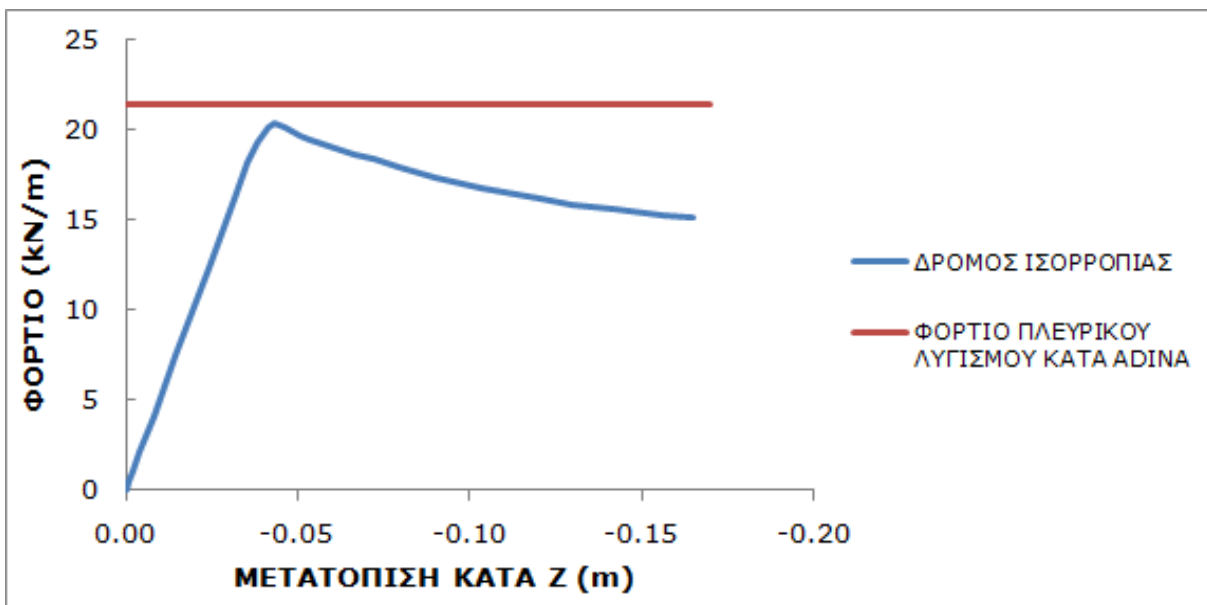
Δρόμος ισορροπίας φορτίου- z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

5^η μέθοδος



Σχήμα 3.52

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 3.53

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

Όπως παρατηρούμε, οι μέθοδοι 4 και 5 δίνουν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα τόσο στις γραμμικές όσο και στις μη γραμμικές αναλύσεις.

Είναι λογικό, καθώς συνιστούν διαφορετικούς τρόπους έκφρασης για να δηλώσουν τις ίδιες συνοριακές συνθήκες.

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται φανερό ότι στις περιπτώσεις που δεσμεύεται η αξονική μετακίνηση και στα 2 άκρα της δοκού (μέθοδοι προσομοίωσης 1,2,3), δηλαδή οι στηρίξεις αφορούν στην περίπτωση άρθρωσης και στα 2 άκρα, η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού δίνει δρόμους ισορροπίας με ανοδικό κλάδο ή οριζόντιο δρόμο ισορροπίας (στη δοκό μήκους 16m, στη 3^η μέθοδο ο δρόμος ισορροπίας μετά από έναν μικρό καθοδικό κλάδο, οριζοντιοποιείται) . Αντίθετα, στην περίπτωση που δεσμεύεται η αξονική μετακίνηση μόνο στο ένα άκρο της δοκού (μέθοδοι 4,5), δηλαδή στην περίπτωση άρθρωσης και κύλισης, οι δρόμοι ισορροπίας έχουν καθοδικό κλάδο μόλις το φορτίο προσεγγίσει την τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού (σε λίγο μικρότερη τιμή φορτίου λόγω της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας που δίνεται στο φορέα). Αυτό συνιστά και το ζητούμενο, καθώς η αστοχία στο ADINA (άρα και ο καθοδικός κλάδος) για ισοστατικούς φορείς επέρχεται όταν η τάση von Mises (ή effective stress στο ADINA) για κάποια σημεία φθάσει την τιμή του ορίου διαρροής. Με την επιλογή αρθρώσεων και στα 2 άκρα, ο φορέας είναι μία φορά υπερστατικός και καθώς δεσμεύεται η μετακίνηση κατά x όλων των κόμβων του κορμού των ακραίων διατομών, παρεμποδίζεται κατά κάποιο τρόπο η στροφή περί τον εγκάρσιο οριζόντιο άξονα και ο φορέας αρχίζει να λειτουργεί εφελκυστικά, σαν καλώδιο. Η λειτουργία των καλωδίων περιγράφεται συνοπτικά στην επόμενη παράγραφο, προκειμένου να εντοπισθούν οι ομοιότητες με τις περιπτώσεις αυτές.

Ζητούμενο όσον αφορά στον πλευρικό λυγισμό της παρούσας εργασίας είναι να διαπιστωθεί η επίδραση της διαρροής, με την παρουσία της οποίας καταλύεται η μεταλυγισμική αντοχή του φορέα και επέρχεται η αστοχία του λόγω της αλληλεπίδρασης πλευρικού λυγισμού και διαρροής. Αντιθέτως, στις περιπτώσεις υπερστατικών φορέων, αυτοί συνεχίζουν να διαθέτουν κάποια μεταλυγισμική αντοχή ακόμα και με την παρουσία διαρροής, όπως φαίνεται και στους αντίστοιχους δρόμους ισορροπίας που παρουσιάστηκαν.

Για το λόγο αυτό, επιλέγονται τελικά ως επικρατέστερες οι μέθοδοι 4 και 5 για την υλοποίηση αμφιέριστης δοκού στο ADINA. Οι τιμές των κρίσιμων φορτίων λυγισμού που προκύπτουν με βάση αυτές, προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τα αποτελέσματα του Ευρωκώδικα, όπως φαίνεται και από τα παραδείγματα που παρατέθηκαν, αλλά και από ένα μεγάλο αριθμό αρκετών ακόμα αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στο ADINA. Μάλιστα, οι τιμές ήταν ικανοποιητικές τόσο για περιπτώσεις όπου

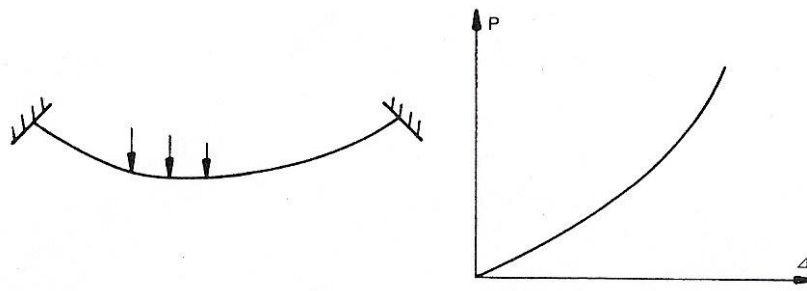
εμφανίζεται πλευρικός λυγισμός πριν τη διαρροή, όσο και για περιπτώσεις όπου ο φορέας αστοχεί λόγω σχηματισμού πλαστικού μηχανισμού κατάρρευσης, χωρίς να έχει υποστεί πλευρικό λυγισμό. Επιπρόσθετα, οι μέθοδοι αυτές προσομοιώνουν την περίπτωση ισοστατικού αμφιέριστου φορέα, ο οποίος αφού λυγίσει πλευρικά και τα σημεία που εκτρέπονται περισσότερο αποκτήσουν την τάση διαρροής, αστοχεί και προκύπτει καθοδικός κλάδος που δηλώνει ακριβώς αυτήν την αστοχία λόγω αλληλεπίδρασης πλευρικού λυγισμού και διαρροής.

Σε όλα τα επόμενα κεφάλαια, συνεπώς, θα γίνει χρήση της μεθόδου 5, δηλαδή το μέσο της μίας ακραίας διατομής δεσμεύεται ως προς τις μετατοπίσεις x,y,z και ως προς τη διαμήκη στροφή x , το μέσο της άλλης ακραίας διατομής ως προς τις μετατοπίσεις y,z και ως προς τη στροφή x , ενώ για τους υπόλοιπους κόμβους του κορμού και των 2 ακραίων διατομών παγιώνονται οι μετατοπίσεις y,z .

Σημειώνεται ότι οι παραπάνω δοκιμές είναι ενδεικτικές για την ορθότητα των μεθόδων, όσον αφορά στην περίπτωση αμφιέριστης δοκού διατομής διπλού ταυ που καταπονείται από κατακόρυφο ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο. Η διερεύνηση αφορά σε αυτόν τον τύπο φόρτισης, ο οποίος χρησιμοποιείται καθ' όλη τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

3.4 Επεξήγηση της συμπεριφοράς του φορέα για άρθρωση και στα 2 άκρα της δοκού

Όσο πιο δεσμευμένα ήταν τα άκρα της δοκού, η συμπεριφορά του φορέα προσομοιάζε με τη λειτουργία του καλωδίου, γεγονός που φαίνεται από τη μορφή του δρόμου ισορροπίας. Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μία σύντομη αναφορά στη λειτουργία των καλωδιωτών φορέων, ώστε να κατανοηθεί η συμπεριφορά της δοκού όταν διαθέτει αρθρώσεις και στα 2 άκρα της.



Σχήμα 3.54
Δρόμος ισορροπίας καλωδιωτού φορέα

Η βασική ιδιότητα των καλωδιωτών φορέων είναι η αύξηση της δυσκαμψίας με την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου. Στις περισσότερες περιπτώσεις, σε αυτόν τον τύπο κατασκευών, το μεγαλύτερο ποσοστό της δυσκαμψίας της κατασκευής παρέχεται μέσω αρχικής προέντασης του φορέα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται το επίπεδο της έντασης που μπορεί να φέρει μία τέτοια κατασκευή.

Η υψηλή αντοχή, που είναι κύριο χαρακτηριστικό των καλωδίων, επιτρέπει την παραλαβή μεγάλων αξονικών δυνάμεων με μικρές διατομές. Καθώς τα χρησιμοποιούμενα μήκη των καλωδίων είναι πολύ μεγάλα συγκριτικά με τη χρησιμοποιούμενη διατομή, τα καλώδια παρουσιάζουν μία σχεδόν απόλυτη ευκαμψία και αδυνατώντας κατ' αυτόν τον τρόπο να προσφέρουν αντίσταση τόσο σε καμπτικές ροπές όσο και σε θλιπτικές δυνάμεις, αναπτύσσουν μόνο εφελκυσμό, επιτρέποντας την πλήρη εκμετάλλευση της χρησιμοποιούμενης διατομής, δεδομένου ότι δεν υφίσταται ο κίνδυνος του λυγισμού.

Η βασική λειτουργία του καλωδίου απορρέει από το γεγονός ότι αυτό αποκτά αυτόματα σχοινοειδή μορφή για φορτία που ασκούνται πάνω του με συγκεκριμένη διεύθυνση και ένταση. Η σχοινοειδής αυτή μορφή συνεπάγεται την ανάπτυξη αποκλειστικά εφελκυστικών δυνάμεων, γεγονός που επιβάλλει την ασφαλή παραλαβή των δυνάμεων αγκυρώσεως του καλωδίου στα άκρα του. Για το λόγο αυτό, απαιτείται η παγίωση του καλωδίου στα άκρα του.

Παρόμοια είναι η περίπτωση των εξεταζόμενων δοκών που υλοποιούσαν την άρθρωση στα άκρα τους με τη δημιουργία άκαμπτων συνδέσμων (rigid links), στους οποίους δεσμεύονταν όλες οι μετακινήσεις στο χώρο και η διαμήκης στροφή. Οι δρόμοι ισορροπίας που προέκυπταν από τη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας παρουσιάζουν παρόμοια μορφή με το σχήμα 3.54. Αντίθετα, όσο μειώνεται η υπερστατικότητα του φορέα, γίνεται άμεσα φανερό η επιρροή του ελαστοπλαστικού υλικού στη μεταλυγισμική συμπεριφορά της δοκού και ο δρόμος ισορροπίας παρουσιάζει καθοδικό κλάδο.

Κεφάλαιο 4

Πλαστικοποίηση αμφιέρειστης συμπαγούς δοκού

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται δύο παραδείγματα στα οποία αμφιέρειστες δοκοί διατομής διπλού ταυ φορτιζόμενες με κατακόρυφο ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο αστοχούν μέσω της δημιουργίας πλαστικής άρθρωσης στη μεσαία διατομή τους και συνεπώς τη δημιουργία πλαστικού μηχανισμού κατάρρευσης. Τα παραδείγματα έχουν γίνει με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA, ώστε να επιβεβαιωθεί η αναμενόμενη μορφή αστοχίας που προκύπτει με βάση τους ελέγχους επάρκειας κατά τον Ευρωκώδικα 3. Στο πρώτο παράδειγμα εξετάζεται δοκός διατομής κατηγορίας 1 πλευρικά εξασφαλισμένη καθ'όλο το μήκος της και στο δεύτερο παράδειγμα εξετάζεται δοκός διατομής κατηγορίας 1 και μικρής λυγηρότητας όπου κρίσιμη μορφή αστοχίας είναι η πλαστικοποίηση της μεσαίας διατομής.

4.1 Δημιουργία πλαστικού μηχανισμού κατάρρευσης

Όπως έχει ήδη αναλυτικά αναφερθεί στο κεφάλαιο 2, η πλαστικοποίηση της μεσαίας διατομής μιας αμφιέρειστης δοκού συνιστά μια από τις πλέον πιθανές μορφές αστοχίας της. Η αστοχία αυτή αφορά βεβαίως σε διατομή κατηγορίας 1 ή 2. Εξετάζεται η περίπτωση διατομής κατηγορίας 1, η οποία έχει τόσο αντοχή σε ροπή ίση με τη ροπή πλαστικοποίησης, όσο και στρωφική ικανότητα επαρκή, ώστε να συμπεριφερθεί ως πλαστική άρθρωση χωρίς μείωση της αντοχής της. Στη διατομή αυτή έχουμε τη δυνατότητα ελαστικής και πλαστικής ανάλυσης καθώς και ελαστικού και πλαστικού ελέγχου. Η κατάταξη της διατομής στην κατηγορία 1 αυτόματα την απαλλάσσει από τον κίνδυνο τοπικού λυγισμού. Απομένουν, συνεπώς, ως πιθανές μορφές αστοχίας η διαρροή και ο πλευρικός λυγισμός. Στα δύο παραδείγματα που ακολουθούν θα εξεταστούν αμφιέρειστες δοκοί διατομής κατηγορίας 1 προκειμένου να ευρεθεί η μορφή αστοχίας τους και θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων του Ευρωκώδικα 3 με αυτά που προκύπτουν από το πρόγραμμα ADINA.

4.2 Αμφιέριστη δοκός μήκους 10m διατομής κατηγορίας 1 πλευρικά εξασφαλισμένη καθ'όλο το μήκος της

Εξετάζεται αρχικά η περίπτωση αμφιέριστης δοκού μήκους $L=10\text{m}$ η οποία δεν είναι πλευρικά εξασφαλισμένη προκειμένου να ευρεθεί η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού με βάση τον τύπο του Ευρωκώδικα 3 και να συγκριθεί με το αποτέλεσμα της ανάλυσης με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

Επιλέχθηκε διατομή με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της HEB500, δηλαδή: $h=500\text{mm}$

$$b=300\text{mm}$$

$$t_w=14,5\text{mm}$$

$$t_f=28\text{mm}$$

Ωστόσο, επειδή στο πρόγραμμα ADINA δεν είναι δυνατή η ακριβής προσομοίωση προτύπων διατομών λόγω αδυναμίας εισαγωγής στο πρόγραμμα της ακτίνας συναρμογής μεταξύ κορμού και πελμάτων, προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα θα εξετασθεί η αντίστοιχη συγκολλητή διατομή με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Πραγματοποιείται κατάταξη της διατομής με βάση τον Ευρωκώδικα 3:

$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y} = 1 \text{ για χάλυβα S235}$$

Έλεγχος κορμού για καθαρή κάμψη:

$$c/t_w = (500 - 2 \cdot 28) / 14,5 = 30,62 < 72\varepsilon = 72 \Rightarrow \text{κατηγορία 1}$$

Έλεγχος πέλματος για καθαρή κάμψη:

$$c/t_f = [(300 - 14,5) / 2] / 28 = 5,10 < 9\varepsilon = 9 \Rightarrow \text{κατηγορία 1}$$

Επομένως όλη η διατομή ανήκει στην κατηγορία 1.

Διαθέτει, συνεπώς, την ικανότητα σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης χωρίς μείωση της αντοχής της και δεν κινδυνεύει από τοπικό λυγισμό.

Τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της συγκολλητής διατομής υπολογίζονται σύμφωνα με τους τύπους 4.1-4.4.

Ροπή αδράνειας περί τον άξονα z:

$$I_z = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot t_f \cdot b_f^3 + \frac{1}{12} \cdot t_w^3 \cdot h_w \quad (4.1)$$

$$I_z = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 2,8 \cdot 30^3 + \frac{1}{12} \cdot 1,45^3 \cdot 44,4 = 12611,28\text{cm}^4$$

Ροπή αδράνειας περί τον άξονα y :

$$I_y = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot b_f \cdot t_f^3 + 2 \cdot b_f \cdot t_f \cdot (h_w / 2 + t_f / 2)^2 + \frac{1}{12} \cdot h_w^3 \cdot t_w \quad (4.2)$$

$$I_y = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 30 \cdot 2,8^3 + 2 \cdot 30 \cdot 2,8 \cdot (22,2 + 1,4)^2 + \frac{1}{12} \cdot 44,4^3 \cdot 1,45 =$$

$$= 104255,39 \text{cm}^4$$

Σταθερά στρέψης:

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot \sum_i b_i t_i^3 \quad (4.3)$$

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot 30 \cdot 2,8^3 + 44,4 \cdot 1,45^3) = 484,16 \text{cm}^4$$

Σταθερά στρέβλωσης:

$$I_w = \frac{1}{4} \cdot I_z \cdot (h_w + t_f)^2 \quad (4.4)$$

$$I_w = \frac{1}{4} \cdot 12611,28 \cdot (44,4 + 2,8)^2 = 7023978,46 \text{cm}^6$$

Πλαστική ροπή αντίστασης:

$$W_{pl} = 2 \cdot S \quad (4.5)$$

όπου S : η στατική ροπή της μισής διατομής ως προς το κέντρο βάρους ολόκληρης της διατομής

$$W_{pl} = 2 \cdot \left[b \cdot t_f \cdot \left(\frac{h_w}{2} + \frac{t_f}{2} \right) + \frac{h_w}{2} \cdot t_w \cdot \frac{h_w}{4} \right] \quad (4.6)$$

$$W_{pl} = 2 \cdot \left[30 \cdot 2,8 \cdot \left(\frac{44,4}{2} + \frac{2,8}{2} \right) + \frac{44,4}{2} \cdot 1,45 \cdot \frac{44,4}{4} \right] = 4679,42 \text{cm}^3$$

Στους παραπάνω υπολογισμούς δεν έχει ληφθεί υπόψη η συγκόλληση λόγω της μικρής της επιρροής στα αποτελέσματα και κυρίως επειδή στο πρόγραμμα ADINA έχει προσομοιωθεί μόνο ο κορμός και τα πέλματα της διατομής χωρίς την παρουσία της συγκόλλησης.

Στην περίπτωση μίας δοκού σταθερής διατομής, συμμετρικής ως προς τον ασθενή άξονα αδρανείας της και καμπτόμενης περί τον ισχυρό άξονα αδρανείας της, η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού υπολογίζεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 από την εξίσωση:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(kL)^2} \cdot \left\{ \sqrt{\frac{k}{k_w} \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 \cdot GI_t}{\pi^2 \cdot EI_z}} + (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j)^2 - (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j) \right\} \quad (4.7)$$

όπου

C_1 , C_2 και C_3 συντελεστές εξαρτώμενοι από τις συνθήκες φόρτισης και στρεπτικής στήριξης

I_t	η σταθερά στρέψης
I_w	η σταθερά στρέβλωσης
I_z	η ροπή αδράνειας ως προς τον ασθενή άξονα
L	το μήκος της δοκού μεταξύ σημείων πλευρικά εξασφαλισμένων
k και k_w	συντελεστές εξαρτώμενοι από το είδος των στηρίξεων ως προς την ελευθερία στροφής και στρέβλωσης των άκρων του εξεταζόμενου πλευρικά μη προστατευμένου τμήματος
$z_g = z_a - z_s$	η απόσταση του κέντρου διάτμησης από το σημείο εφαρμογής του φορτίου
z_a	η τεταγμένη του σημείου εφαρμογής του φορτίου ως προς τον κεντροβαρικό άξονα $y-y$
z_s	η τεταγμένη του κέντρου διάτμησης ως προς τον κεντροβαρικό άξονα $y-y$

Για αμφιέρειστη δοκό υπό ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο και $k=1$, $k_w=1$ (τα δύο άκρα της δοκού είναι στρεπτικά ελεύθερα και ελεύθερα σε στρέβλωση), ισχύουν: $C_1=1,132$, $C_2=0,459$ και $C_3=0,525$.

Το μέτρο ελαστικότητας E λήφθηκε ίσο με 210GPa και συνεπώς το μέτρο διάτμησης είναι ίσο με $G=E/[2(1+\nu)]=80,77\text{GPa}$.

Το κατανεμημένο φορτίο ασκείται στον κεντροβαρικό άξονα της δοκού, συνεπώς $z_a=0$. Επίσης το κέντρο διάτμησης για τη διατομή διπλού ταυ ταυτίζεται με το κέντρο βάρους, δηλαδή $z_s=0$.

Με αντικατάσταση όλων των μεγεθών στην εξίσωση (4.7), η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού προκύπτει ίση με:

$$M_{cr}=1340,68\text{kNm}$$

Η τιμή αυτή θα συγκριθεί με την τιμή που θα προκύψει με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

Η ροπή πλαστικοποίησης της εξεταζόμενης διατομής για χάλυβα S235 είναι ίση με:

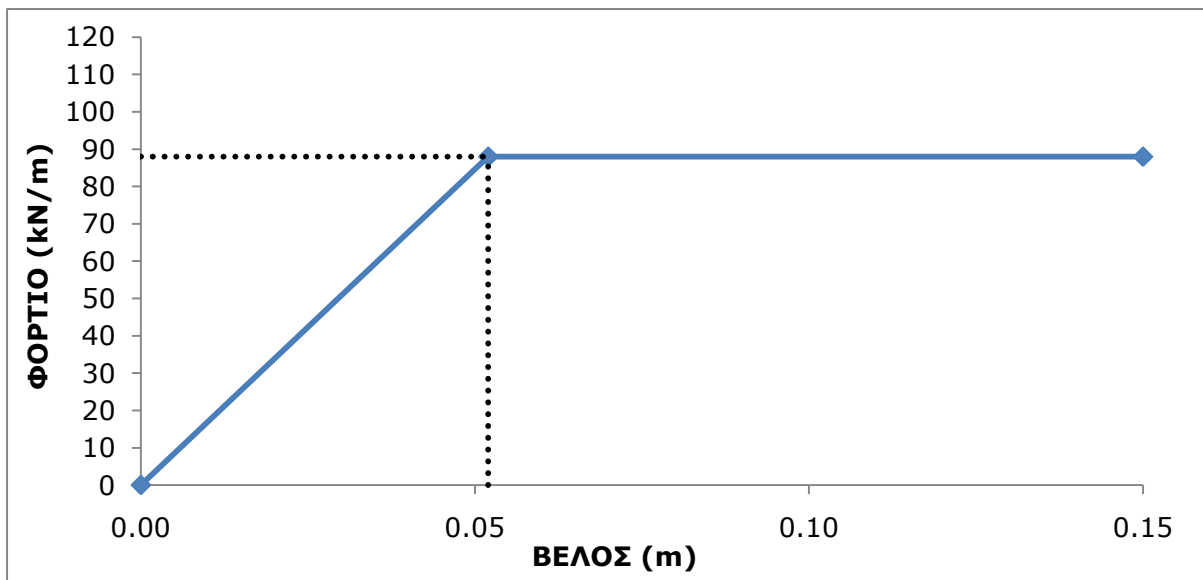
$$M_{pl}=W_{pl}\cdot f_y/\gamma_{M0}=4679,42\text{cm}^3\cdot 23,5\text{kN/cm}^2/1,00$$

$$M_{pl}=1099,66\text{kNm} < M_{cr}=1340,68\text{kNm}$$

Επομένως, ως κρίσιμη μορφή αστοχίας προκύπτει η πλαστικοποίηση της μεσαίας διατομής της αμφιέριστης δοκού και η δημιουργία πλαστικού μηχανισμού κατάρρευσης. Ωστόσο, με την πλευρική εξασφάλιση της δοκού που θα πραγματοποιηθεί στη συνέχεια, θα είναι ακόμα μεγαλύτερη η διαφορά στις παραπάνω ροπές και συνεπώς άμεσα φανερό ότι η αστοχία του φορέα οφείλεται στη διαρροή και όχι στον πλευρικό λυγισμό.

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ο αναλυτικός δρόμος ισορροπίας για την αμφιέριστη δοκό υπό καταναμεμημένο φορτίο, όπως έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 2.

Η τιμή του φορτίου διαρροής είναι ίση με $q=8 \cdot M_{pl}/L^2=8 \cdot 1099,66/10^2 \Rightarrow q=87,97 \text{ kN/m}$ και η αντίστοιχη μετατόπιση είναι ίση με $\delta=40 \cdot M_{pl} \cdot L^2/(384EI_y)=40 \cdot 1099,66 \cdot 10^2/(384 \cdot 2,1 \cdot 10^8 \cdot 104255,4 \cdot 10^{-8}) \Rightarrow \delta=0,052 \text{ m}$



Σχήμα 4.1

Δρόμος ισορροπίας αμφιέριστης δοκού υπό καταναμεμημένο φορτίο

Θα ακολουθήσει ο σχεδιασμός της δοκού σε ΟΚΑ (Οριακή Κατάσταση Αστοχίας) σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 προκειμένου να υπολογιστεί η ροπή αντοχής σε λυγισμό και η πλαστική αντοχή σε διάτμηση.

4.2.1 Έλεγχος διάτμησης

Σύμφωνα με τον πλαστικό έλεγχο διάτμησης θα πρέπει να ισχύει:

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$$

$$V_{pl,Rd} = A_{vz} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (4.8)$$

$$V_{pl,Rd} = (44,4 \cdot 1,45) \cdot \frac{23,5}{\sqrt{3} \cdot 1,00} = 873,49 \text{ kN}$$

4.2.2 Έλεγχος έναντι πλευρικού λυγισμού

Η ροπή αντοχής σε πλευρικό λυγισμό δίνεται από τη σχέση:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4.9)$$

Ισοδύναμο μήκος λυγισμού

Εφόσον πρόκειται για δοκό αμφιέρειστη, το μήκος λυγισμού είναι ίσο με το ολικό μήκος της δοκού, δηλαδή $L=10\text{m}$.

Λυγηρότητα πλευρικού λυγισμού

Η ανηγμένη λυγηρότητα πλευρικού λυγισμού είναι ίση με:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} \quad (4.10)$$

$$\text{Επομένως, } \bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{4679,42 \cdot 23,5}{134068}} = 0,91 > 0,20$$

Συνεπώς, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο πλευρικός λυγισμός.

Καμπύλες πλευρικού λυγισμού

ΔΙΑΤΟΜΗ	ΟΡΙΑ	ΚΑΜΠΥΛΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ Ι	$h/b \leq 2$ $h/b > 2$	c d

Πίνακας 4.1

Επιλογή καμπύλης πλευρικού λυγισμού

Για $h/b=500\text{mm}/300\text{mm}=1,667 < 2 \Rightarrow$ καμπύλη c

ΚΑΜΠΥΛΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ	a	b	c	d
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΤΕΛΕΙΩΝ α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Πίνακας 4.2

Συνιστώμενες τιμές συντελεστή ατελειών με βάση την καμπύλη πλευρικού λυγισμού

Επομένως, η τιμή του συντελεστή ατελειών είναι ίση με $\alpha_{LT}=0,49$ για καμπύλη πλευρικού λυγισμού c.

Μειωτικός συντελεστής χ_{LT}

Ο μειωτικός συντελεστής χ_{LT} δίνεται από τη σχέση:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad (4.11)$$

$$\text{όπου: } \Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,20) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

Αντικαθιστώντας αριθμητικά, έχουμε:

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + 0,49(0,91 - 0,20) + 0,91^2 \right] = 1,09$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{1,09 + \sqrt{1,09^2 - 0,91^2}} = 0,59 < 1$$

Η τιμή αυτή του χ_{LT} δείχνει ότι ο πλευρικός λυγισμός επηρεάζει αρκετά την αντοχή του φορέα και η αστοχία αναμένεται να οφείλεται σε συνδυασμό διαρροής και πλευρικού λυγισμού.

Για το λόγο αυτό στην παράγραφο 4.2.4 θα τοποθετηθούν πλευρικές εξασφαλίσεις σε όλο το μήκος του φορέα ώστε να εξετασθεί η μορφή αστοχίας έχοντας αποκλείσει το ενδεχόμενο πλευρικού λυγισμού.

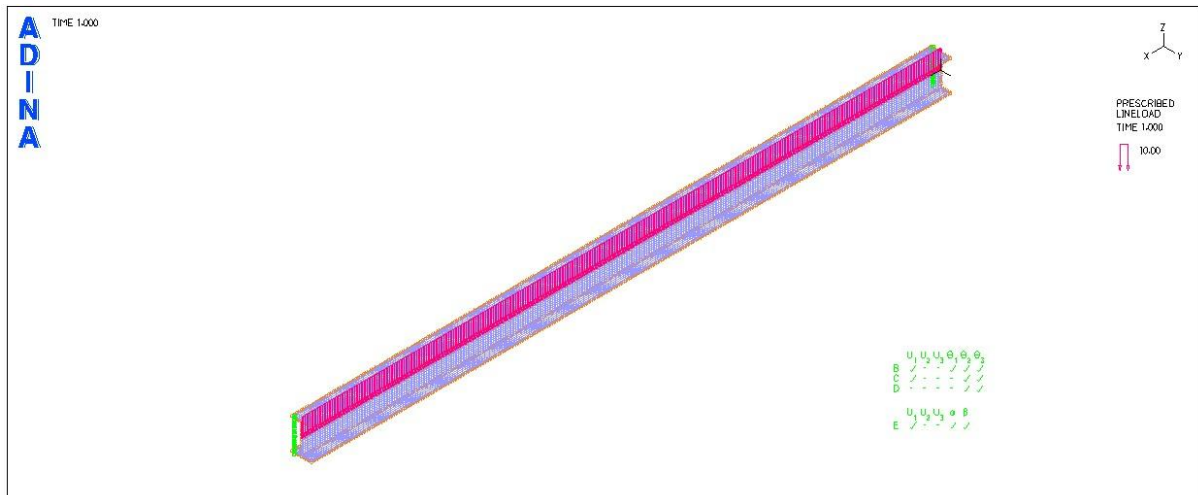
Έλεγχος

Η ροπή αντοχής είναι ίση με:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,59 \cdot 4679,42 \cdot \frac{23,5}{1,00} \text{ kNcm} = 64880,2 \text{ kNcm} = 648,80 \text{ kNm}$$

4.2.3 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του πλευρικά μη εξασφαλισμένου φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

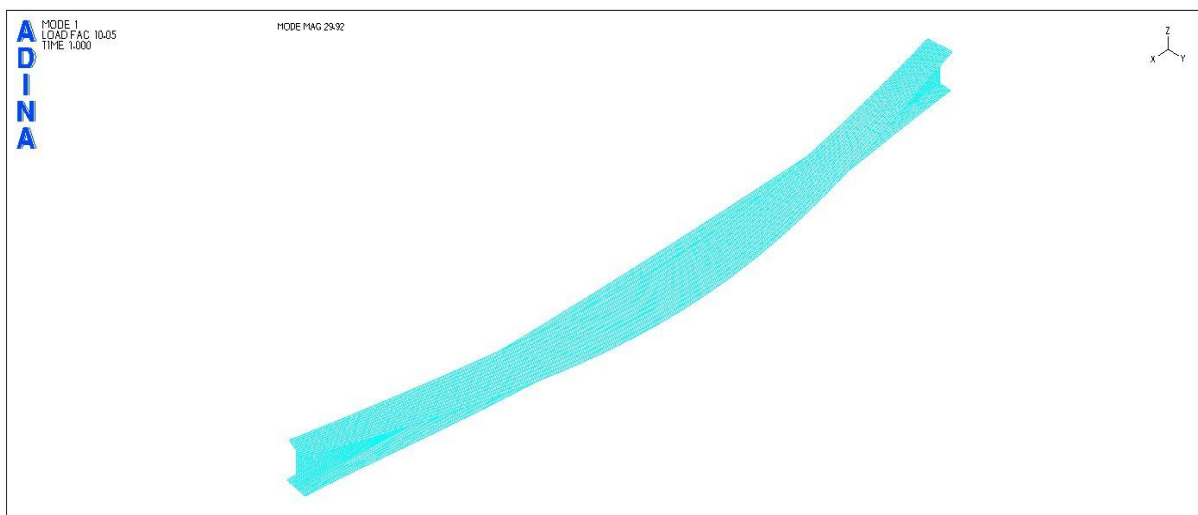
Στο φορέα ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 10kN/m στο κέντρο βάρους της δοκού.



Σχήμα 4.2

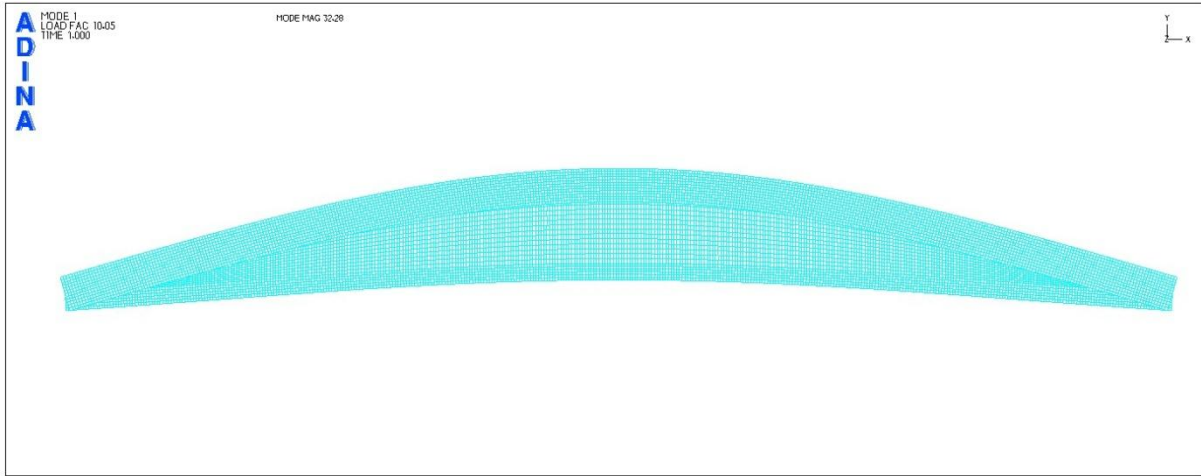
Αμφιέρειστος φορέας μήκους 10m χωρίς πλευρικές εξασφαλίσεις με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 10kN/m στον κεντροβαρικό άξονα

Στα σχήματα 4.3-4.8 φαίνονται οι 2 πρώτες ιδιομορφές λυγισμού του φορέα και τα αντίστοιχα φορτία λυγισμού.

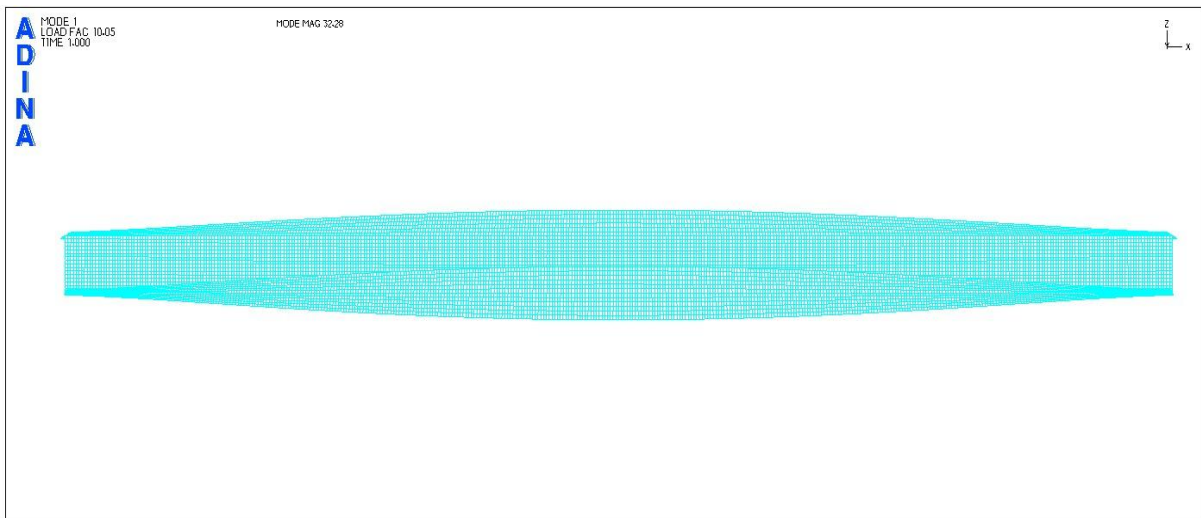


Σχήμα 4.3

1^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

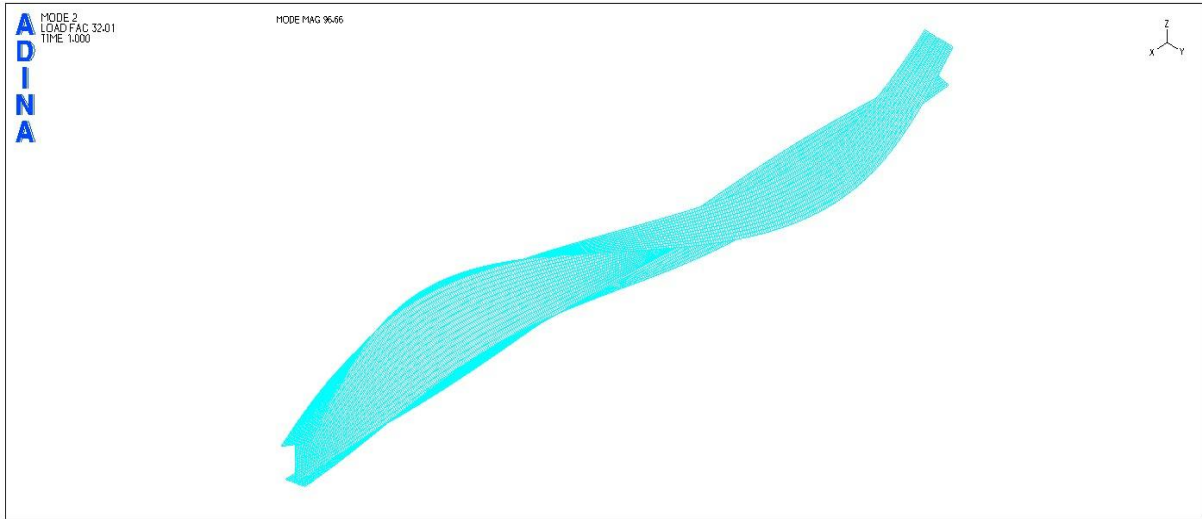


Σχήμα 4.4
1^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)

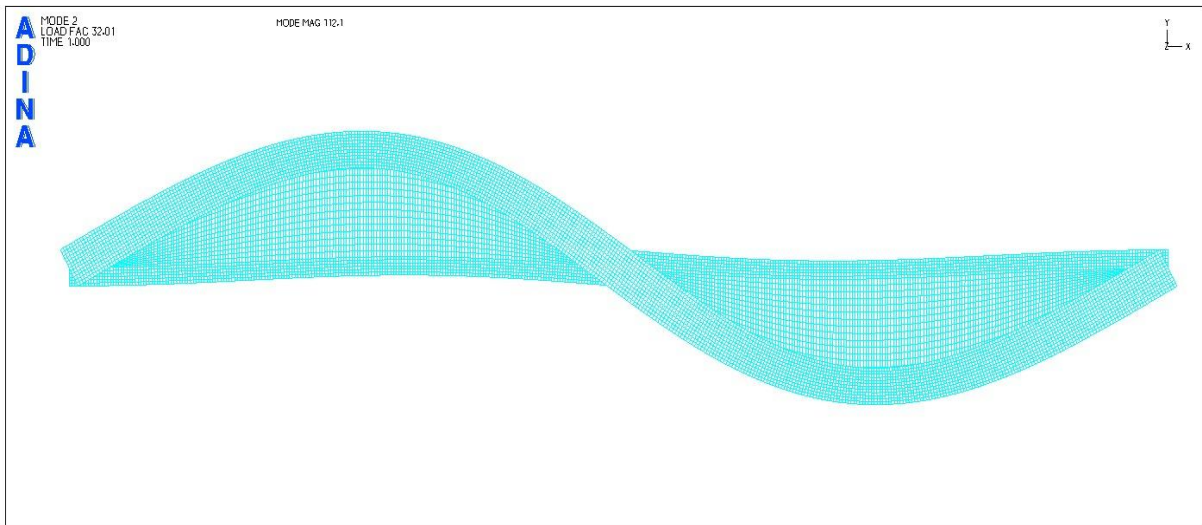


Σχήμα 4.5
1^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)

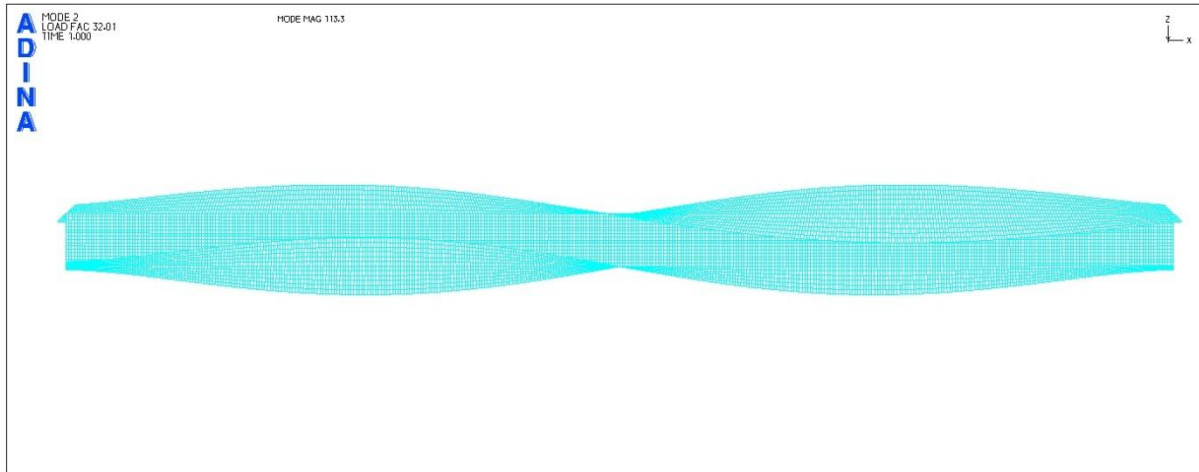
Το φορτίο λυγισμού που αντιστοιχεί στην πρώτη ιδιομορφή προέκυψε ίσο με $P_{cr}=100,50$ kN/m (το υπολογίζουμε πολλαπλασιάζοντας την τιμή του load factor της πρώτης ιδιομορφής με το φορτίο που ασκείται στο φορέα και είναι ίσο με 10kN/m). Η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=100,50 \cdot 10^2/8=1256,25$ kNm.



Σχήμα 4.6
2^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 4.7
2^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



Σχήμα 4.8
2^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)

Το φορτίο λυγισμού που αντιστοιχεί στη δεύτερη ιδιομορφή προέκυψε ίσο με $P_{cr}=320,10$ kN/m. Η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=320,10 \cdot 10^2/8=4001,25$ kNm.

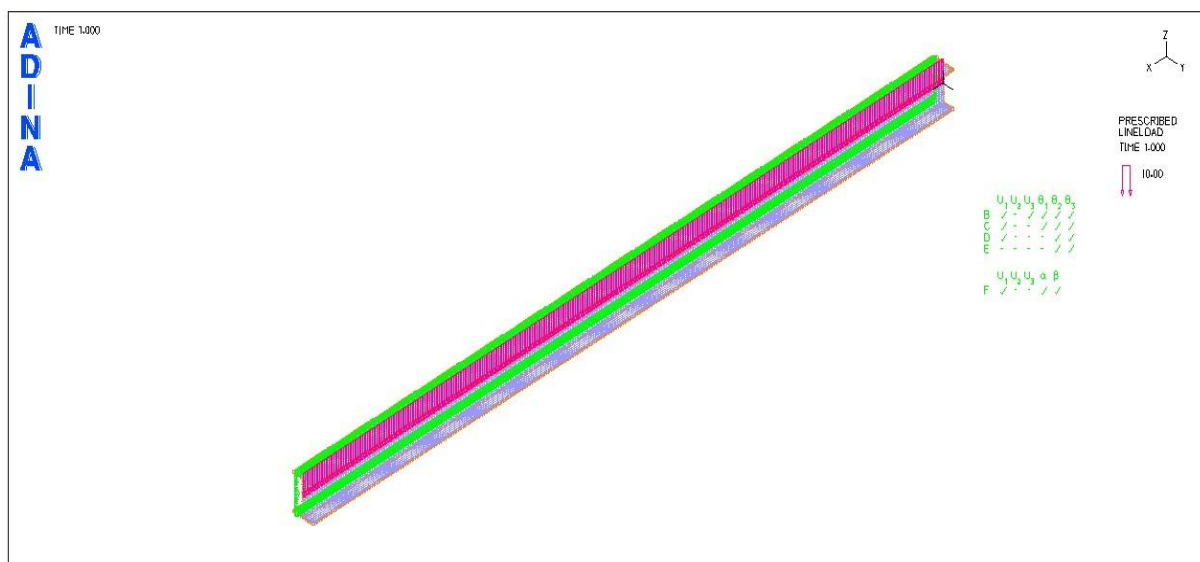
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ADINA, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι ίσο με $P_{cr}=100,50$ kN/m και η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού είναι ίση με $M_{cr}=1256,25$ kNm. Η αντίστοιχη ροπή σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα είχε προκύψει ίση με $M_{cr}=1340,68$ kNm (απόκλιση 6,3%).

Κρίσιμη μορφή αστοχίας του φορέα φαίνεται να είναι η πλαστικοποίηση της μεσαίας διατομής. Ωστόσο, επειδή η διαφορά της ροπής πλαστικοποίησης από την κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού δεν είναι πολύ μεγάλη, τοποθετούνται πλευρικές εξασφαλίσεις σε όλο το μήκος της δοκού προκειμένου να εμποδιστεί πλήρως ο πλευρικός λυγισμός και να παρατηρηθεί αστοχία καθαρά από διαρροή. Οι πλευρικές εξασφαλίσεις στο ADINA υλοποιούνται με τη μορφή κυλίσεων παραλλήλων με τον ισχυρό άξονα της διατομής στα σημεία συνένωσης κορμού και πελμάτων.

4.2.4 Μη γραμμική ανάλυση υλικού για τον πλευρικά εξασφαλισμένο φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Πραγματοποιείται απευθείας μη γραμμική ανάλυση υλικού. Επιλέχθηκε προφανώς η μη γραμμική ανάλυση υλικού δεδομένου ότι αναμένεται αστοχία του φορέα λόγω πλαστικοποίησης της μεσαίας διατομής. Θα γίνουν δύο διαφορετικές αναλύσεις: Στην πρώτη θεωρείται διγραμμικό υλικό S235 με γραμμικά ελαστική-απολύτως πλαστική συμπεριφορά, ενώ στη δεύτερη θεωρείται διγραμμικό υλικό S235 με κράτυνση $E_t=20000\text{kPa}$.

Ο πλευρικά εξασφαλισμένος φορέας ο οποίος επιλύθηκε στο ADINA φαίνεται στο σχήμα 4.9.

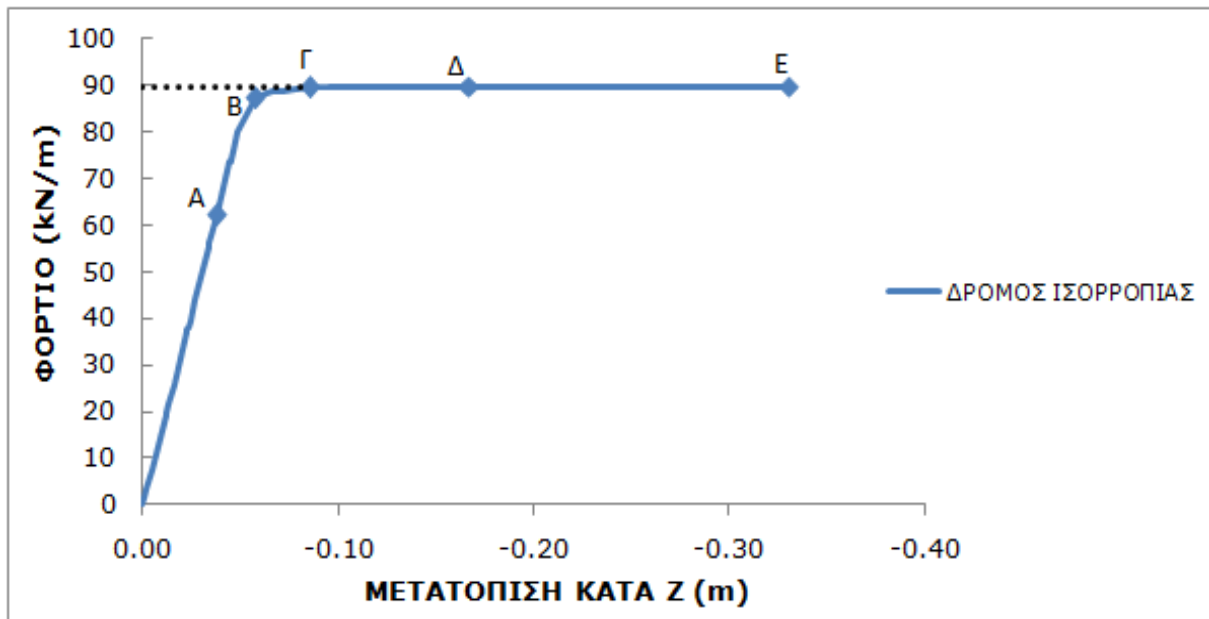


Σχήμα 4.9

Αμφιέρειστος φορέας μήκους 10m πλευρικά εξασφαλισμένος με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 10kN/m στο κέντρο βάρους

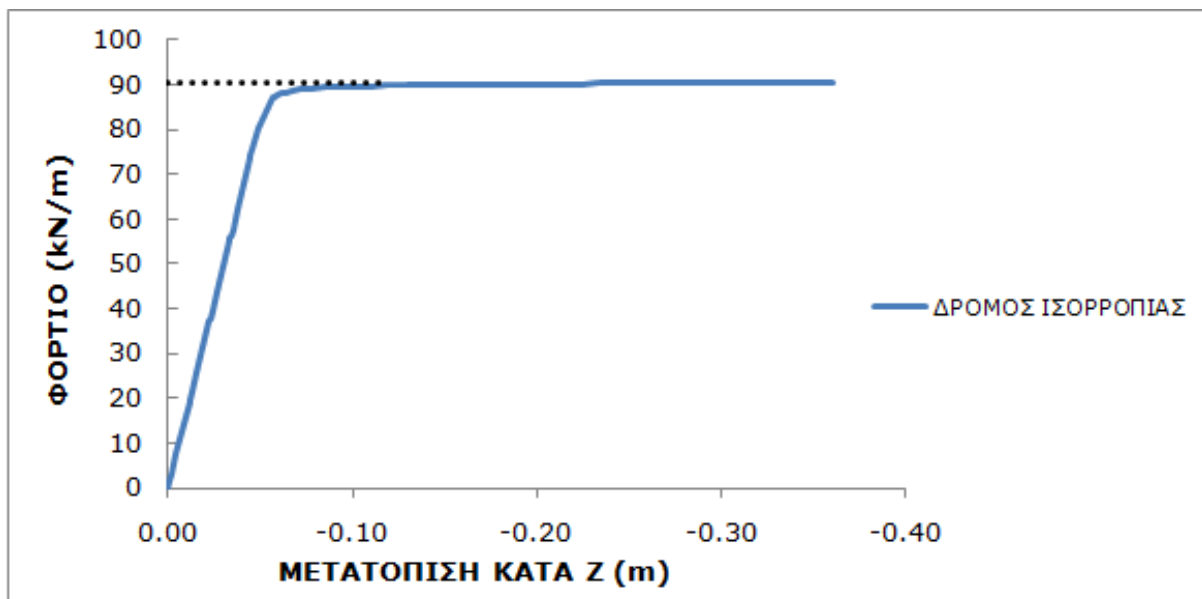
Η μη γραμμική ανάλυση υλικού πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο collapse analysis όπου θεωρήθηκε ως σημείο αναφοράς ο κόμβος της μεσαίας διατομής στο σημείο συνένωσης κορμού και κάτω πέλματος.

Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων, παρουσιάζονται στο σχήμα 4.10.α ο δρόμος ισορροπίας για την ανάλυση όπου έχουμε χάλυβα χωρίς κράτυνση και στο σχήμα 4.10.β για την ανάλυση όπου έχουμε χάλυβα με κράτυνση. Οι δρόμοι ισορροπίας απεικονίζονται έτσι ώστε στον κατακόρυφο άξονα να αντιστοιχεί το κατανεμημένο φορτίο και στον οριζόντιο άξονα η κατακόρυφη μετατόπιση του κόμβου αναφοράς για τις διάφορες τιμές φορτίσεως.



Σχήμα 4.10.α

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς (χάλυβας χωρίς κράτυνση)



Σχήμα 4.10.β

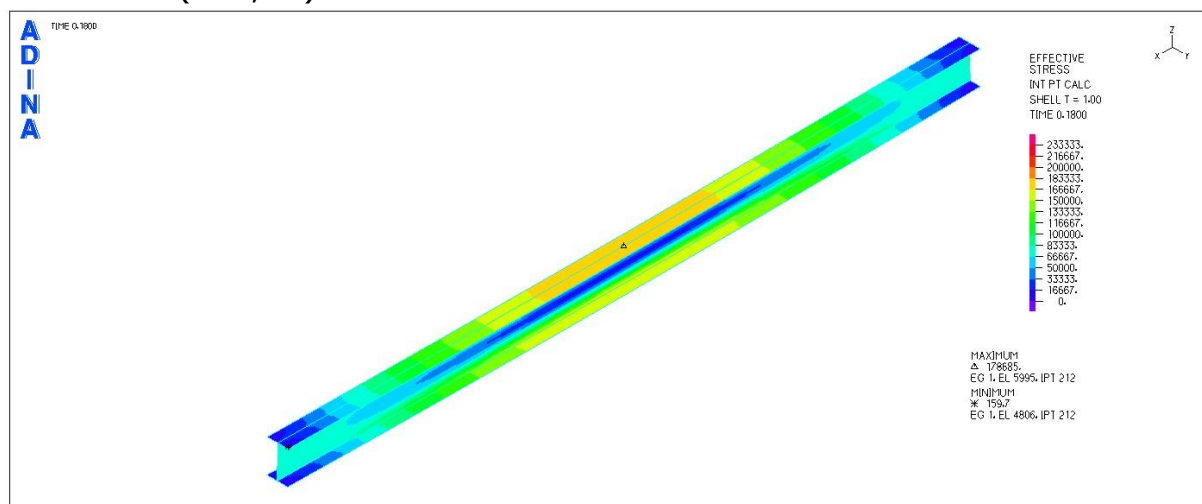
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς (χάλυβας με κράτυνση)

Η διαφοροποίηση των δύο διαγραμμάτων είναι σχεδόν αμελητέα. Από το δρόμο ισορροπίας 4.10.α, το φορτίο διαρροής προκύπτει 89,7kN/m, που αντιστοιχεί σε ροπή $M=89,7 \cdot 10^2/8=1121,25\text{kNm}$. (Υπενθυμίζεται ότι $M_{pl}=1099,66\text{kNm}$ και το αντίστοιχο φορτίο διαρροής $q=87,97\text{kN/m}$) Στα σχήματα 4.11-4.27 φαίνονται οι τάσεις κατά μήκος του φορέα για τα 5 χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας του σχήματος 4.10α, ενώ στα σχήματα 4.28-4.32 οι αντίστοιχες παραμορφώσεις της δοκού για τα 5 χαρακτηριστικά σημεία.

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ VON MISES

ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,18)

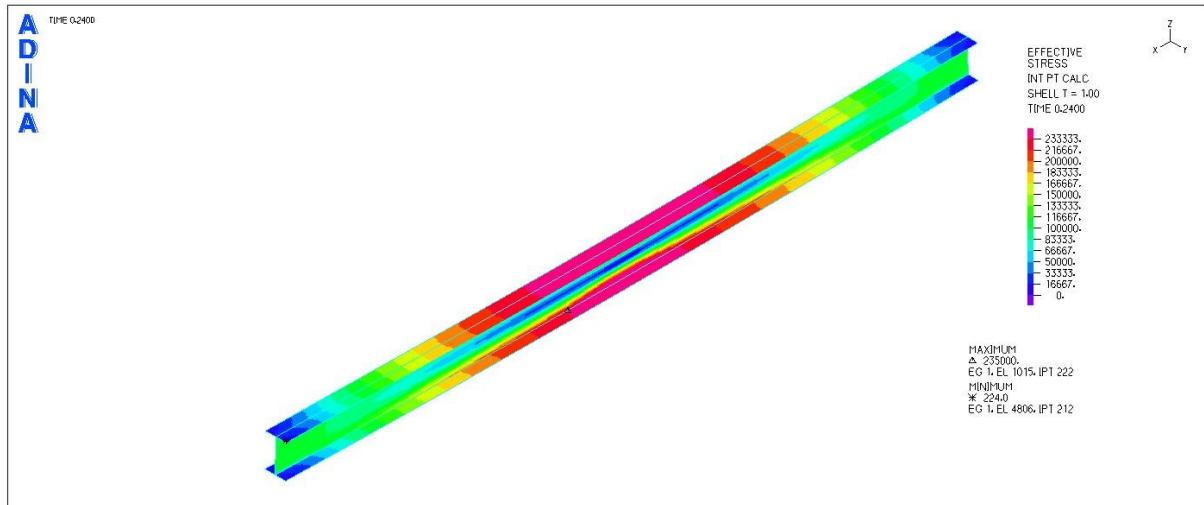


Σχήμα 4.11

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο A

Παρατηρούμε ότι δεν έχει φθάσει κανένα σημείο της δοκού την τάση διαρροής, διότι είμαστε ακόμα στον ελαστικό κλάδο.

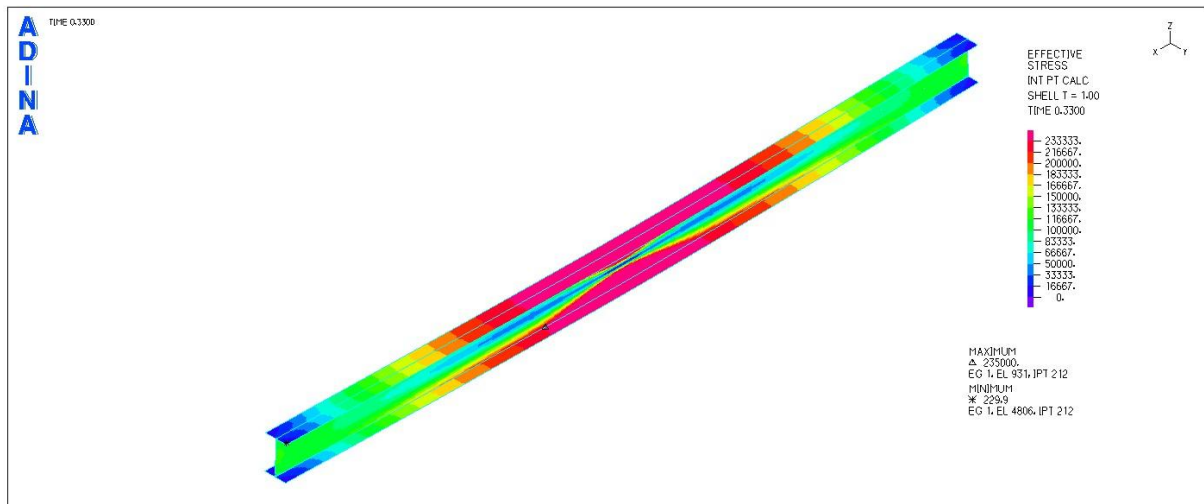
ΣΗΜΕΙΟ Β (t=0,24)



Σχήμα 4.12

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Β. Οριακά οι ακραίες ίνες της μεσαίας διατομής (καθώς και μίας μικρής περιοχής εκατέρωθεν της μεσαίας διατομής) έχουν τάση ίση με την τάση διαρροής $f_y=235\text{MPa}$.

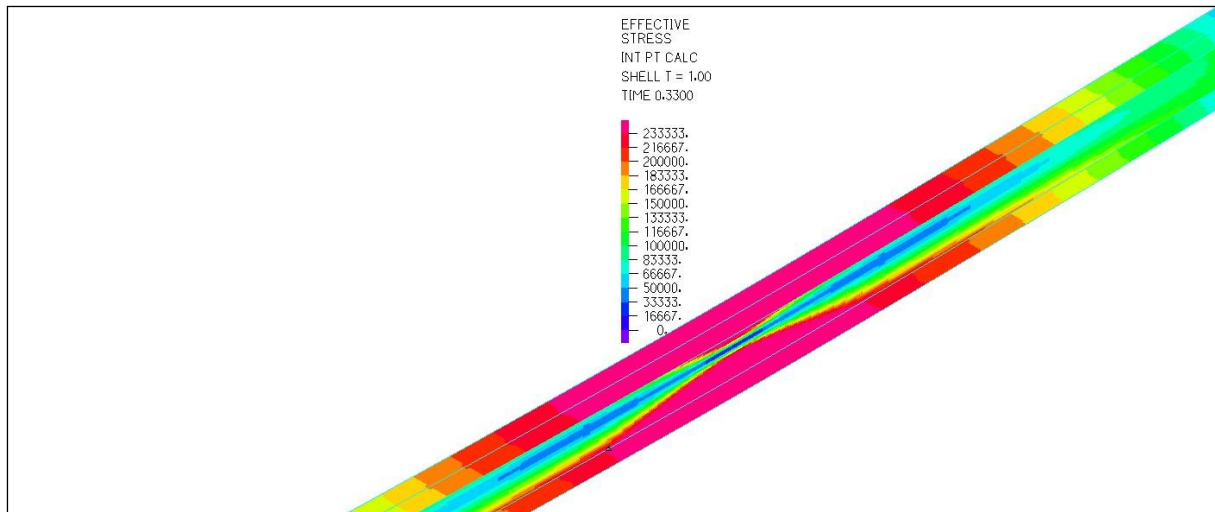
ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,33)



Σχήμα 4.13

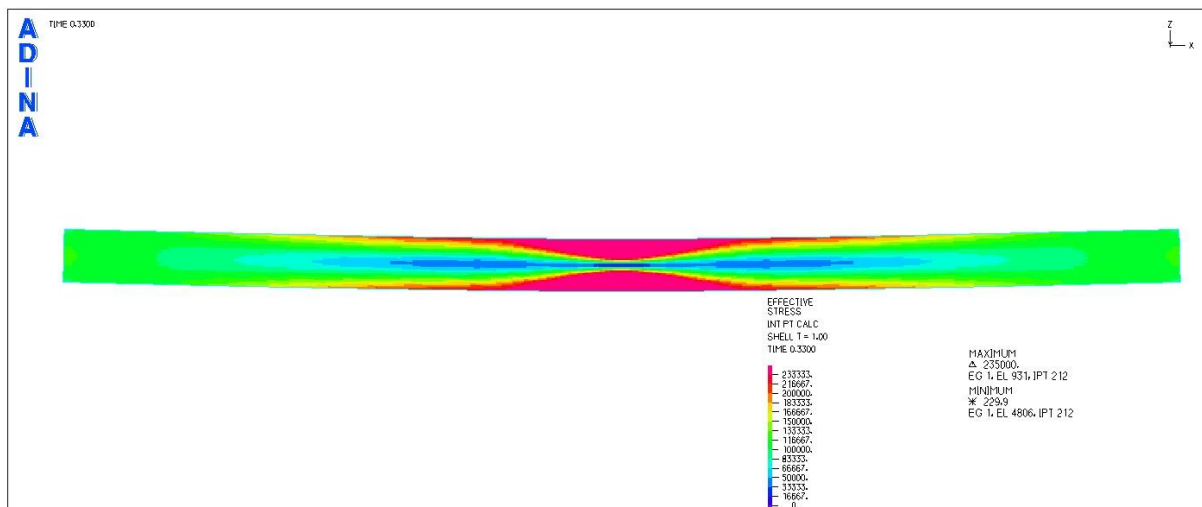
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ.

Η διαρροή έχει επεκταθεί στο μεγαλύτερο μέρος του ύψους της μεσαίας διατομής.



Σχήμα 4.14

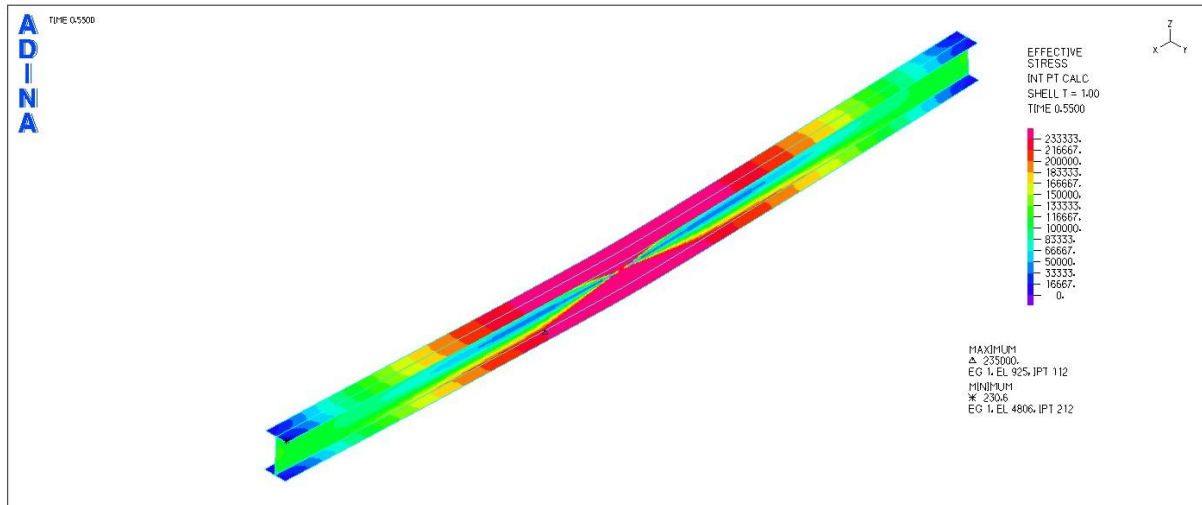
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (λεπτομέρεια)



Σχήμα 4.15

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

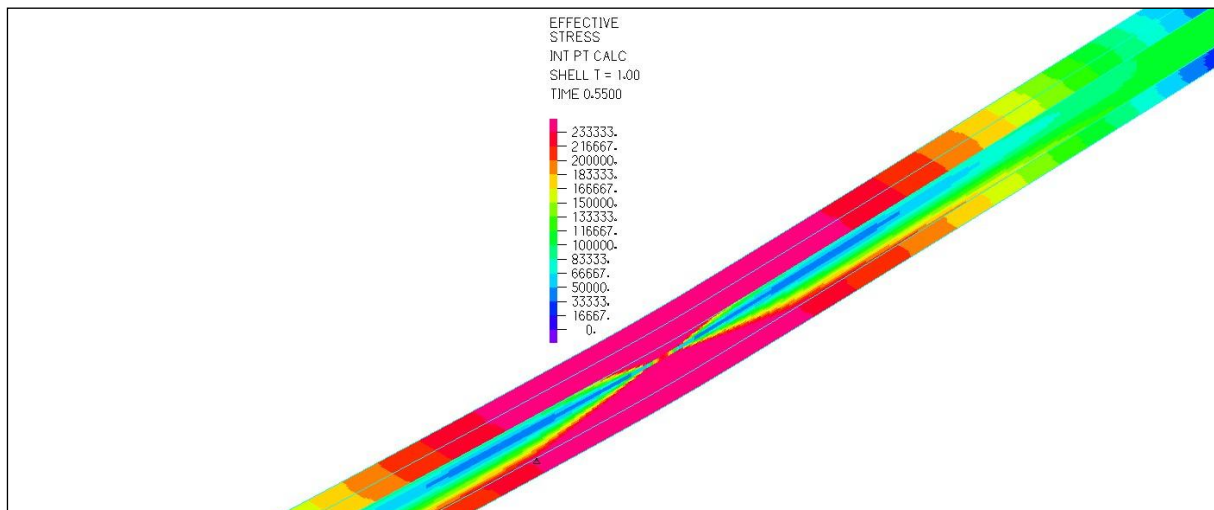
ΣΗΜΕΙΟ Δ (t=0,55)



Σχήμα 4.16

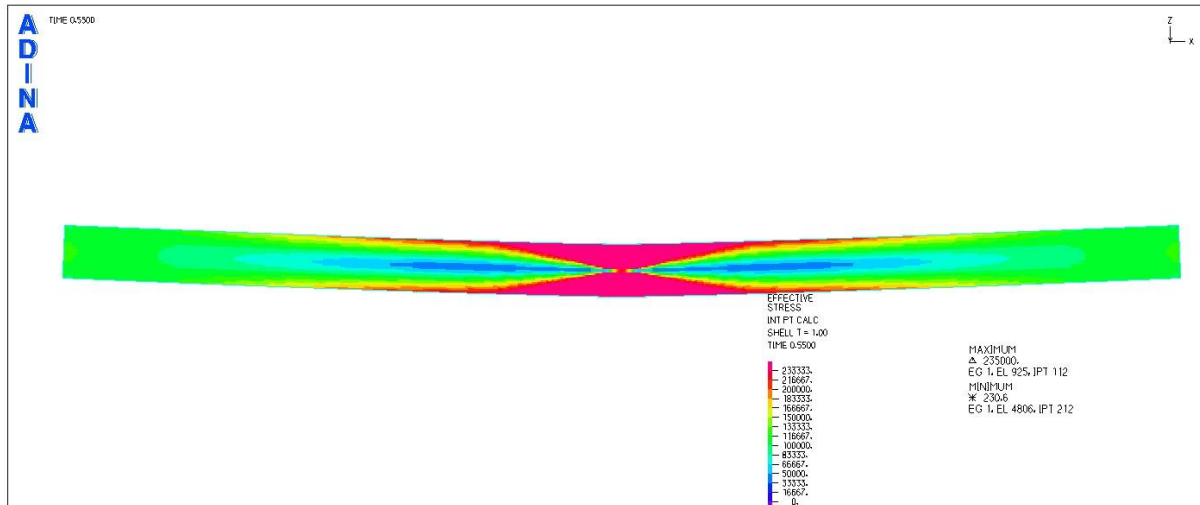
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ

Έχει πλέον πλαστικοποιηθεί ολόκληρη η μεσαία διατομή, αφού όλα τα σημεία της έχουν αποκτήσει τάση ίση με την $f_y=235\text{MPa}$. Η διαρροή έχει επεκταθεί και σε μεγάλο μέρος των γειτονικών διατομών.



Σχήμα 4.17

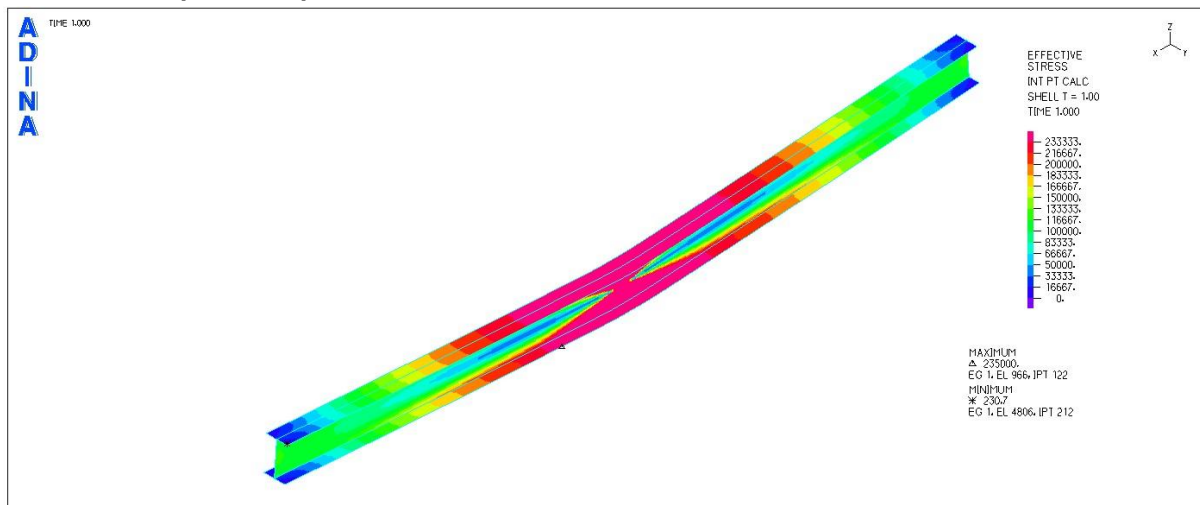
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (λεπτομέρεια)



Σχήμα 4.18

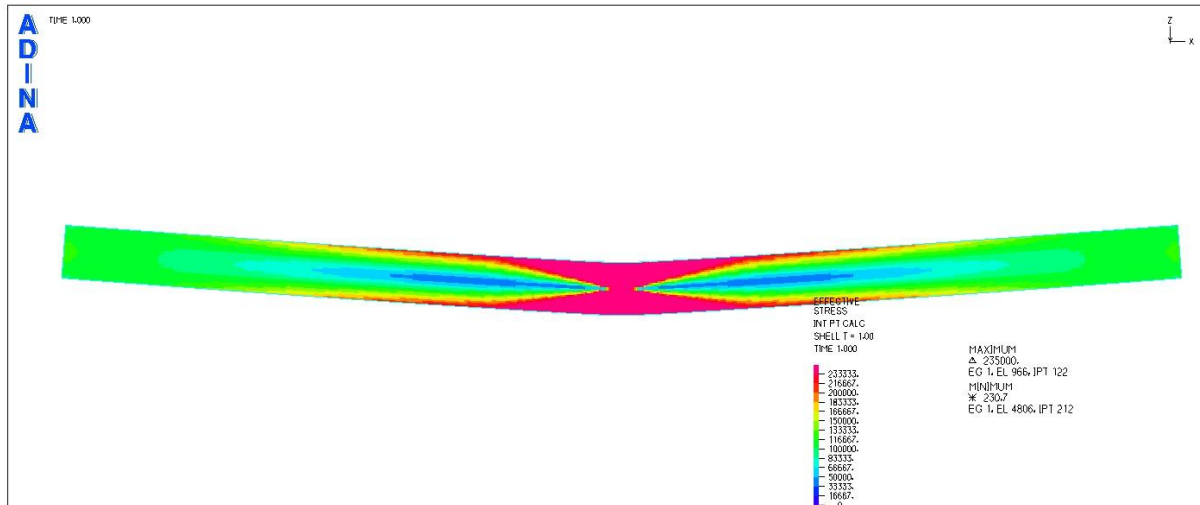
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ Ε (t=1,00)



Σχήμα 4.19

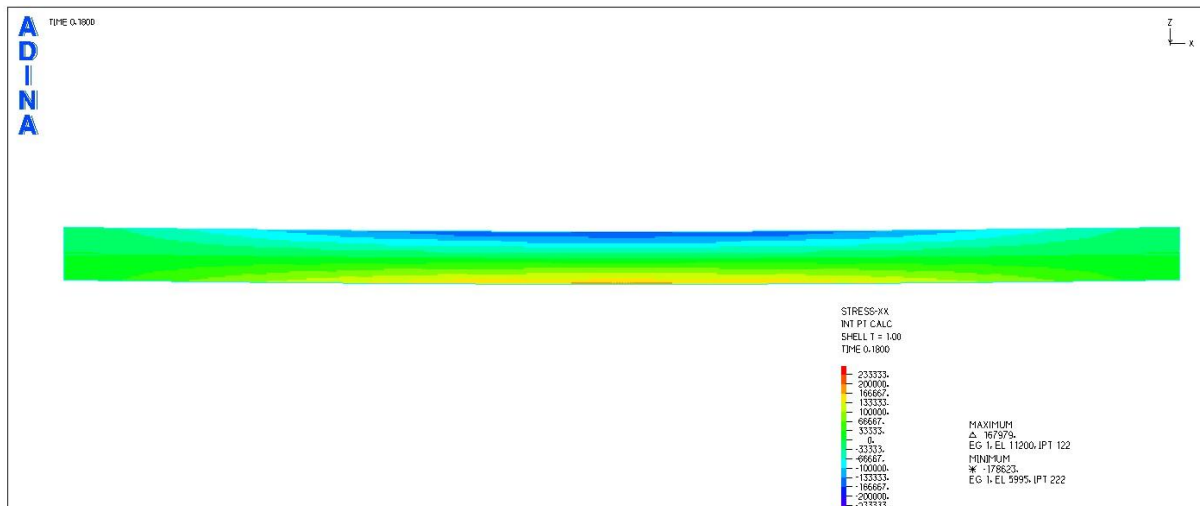
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Ε
Περισσότερα σημεία της γύρω περιοχής της μεσαίας διατομής αποκτούν τάση ίση με την τάση διαρροής.



Σχήμα 4.20
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο E (όψη)

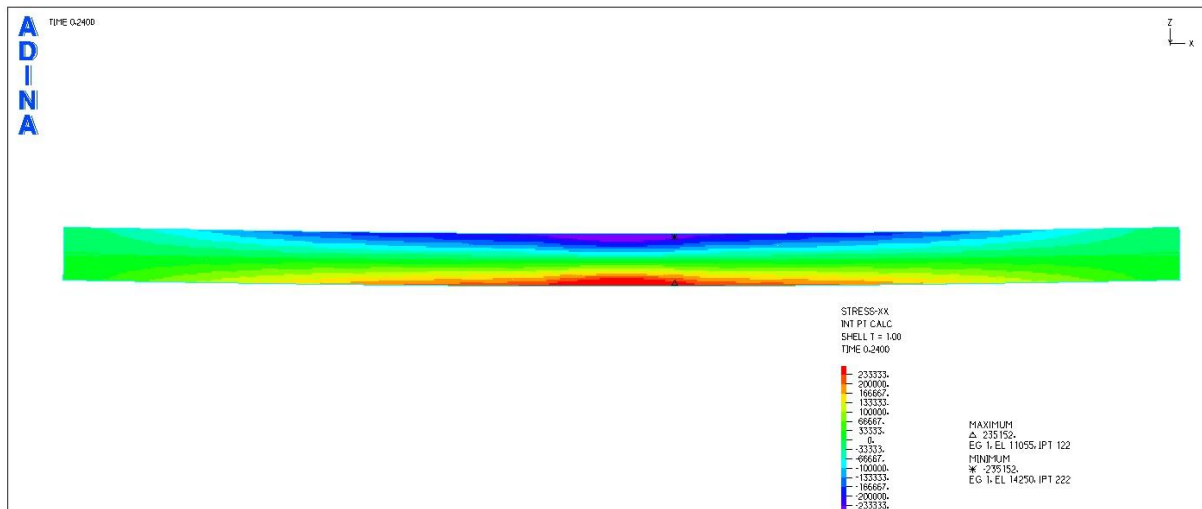
ΕΙΚΟΝΕΣ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

ΣΗΜΕΙΟ A



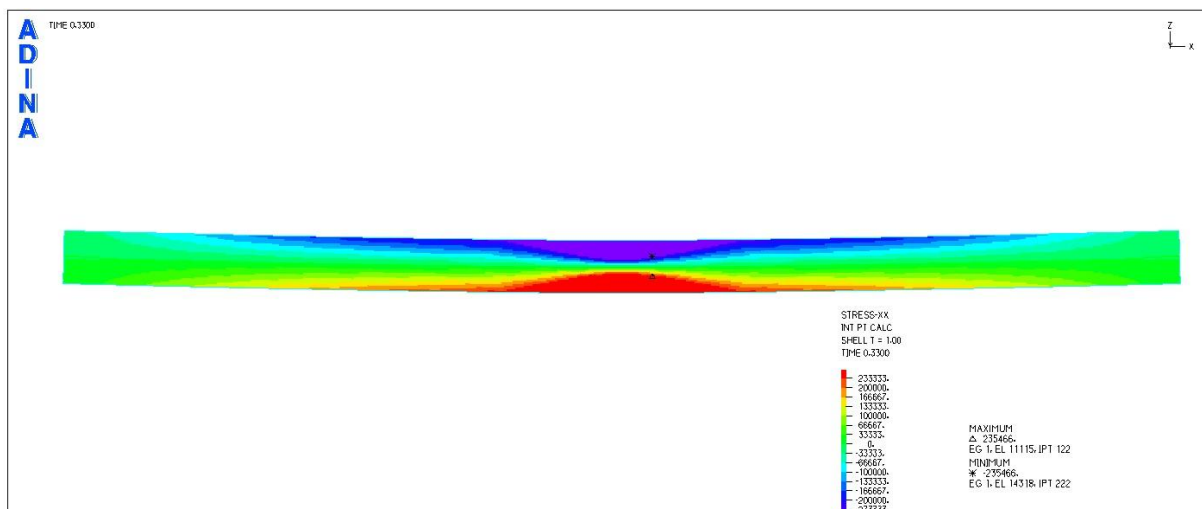
Σχήμα 4.21
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο A

ΣΗΜΕΙΟ Β



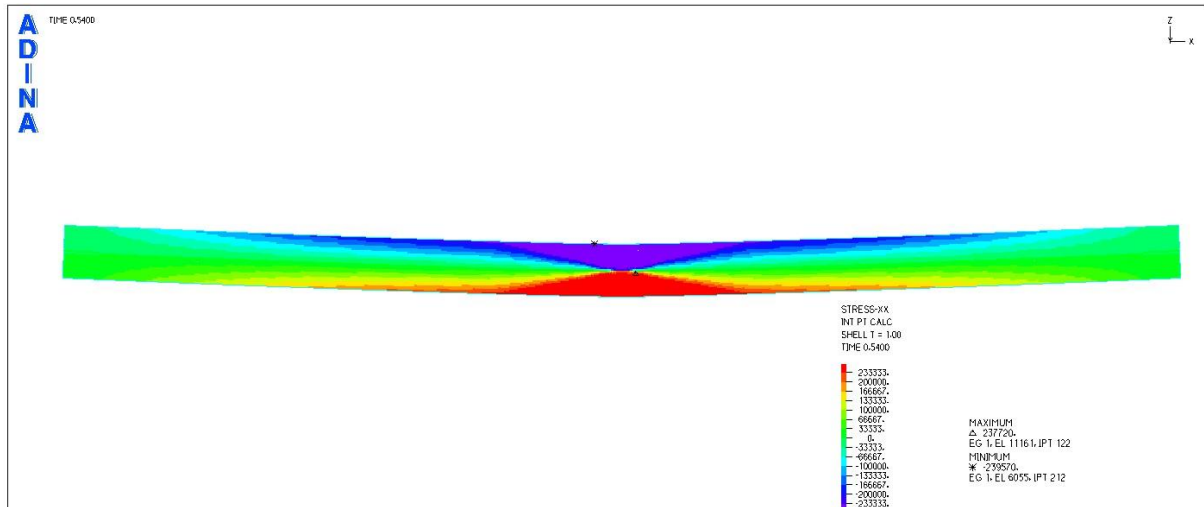
Σχήμα 4.22
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β

ΣΗΜΕΙΟ Γ



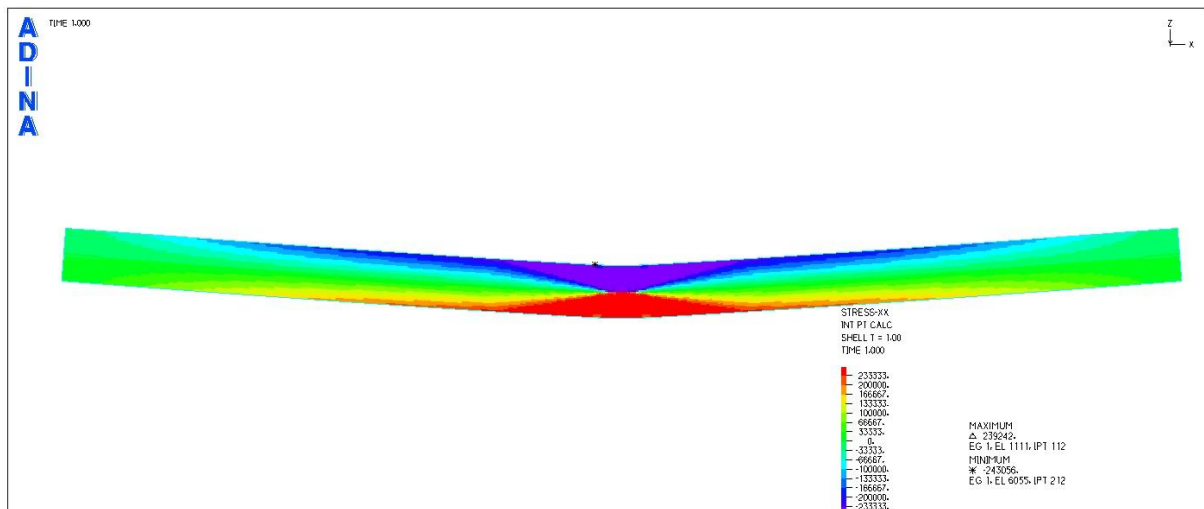
Σχήμα 4.23
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

ΣΗΜΕΙΟ Δ

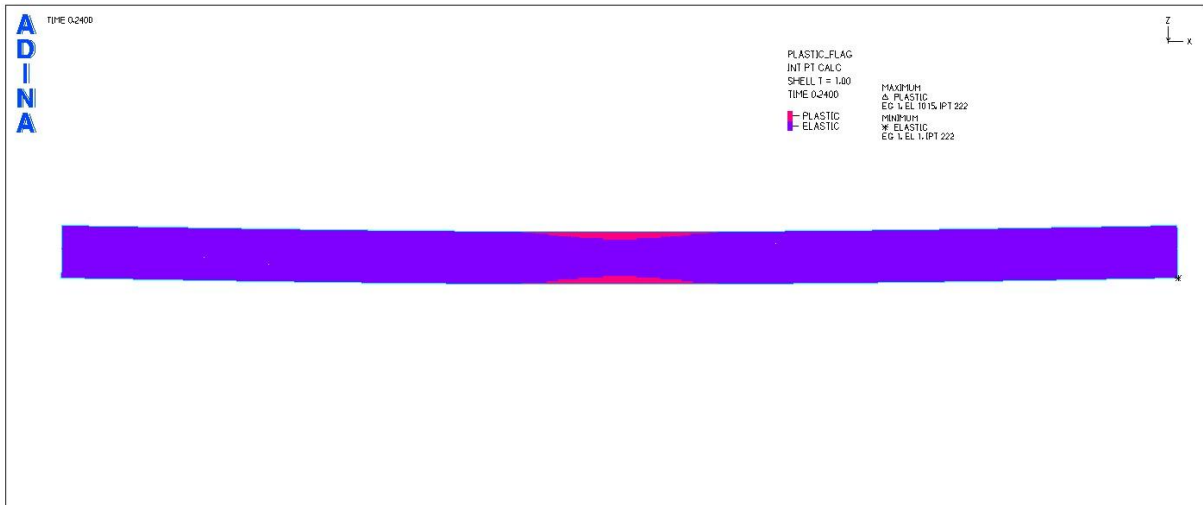


Σχήμα 4.24
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ

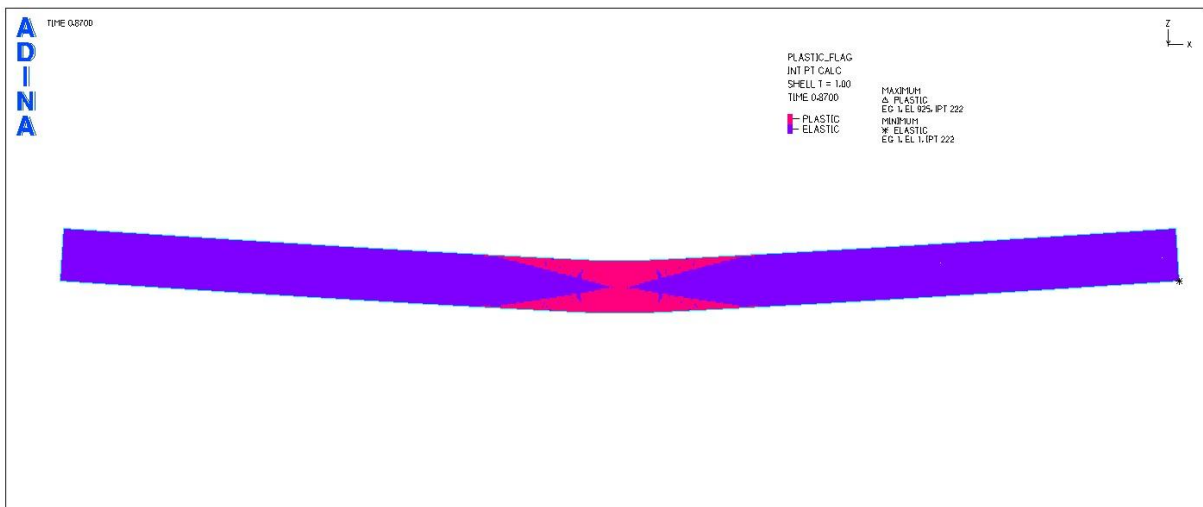
ΣΗΜΕΙΟ Ε



Σχήμα 4.25
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Ε



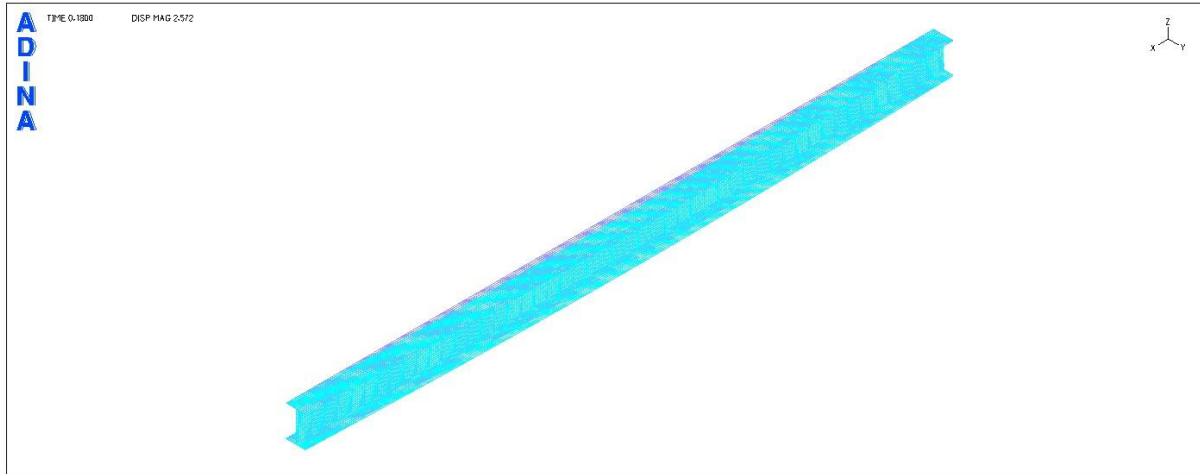
Σχήμα 4.26
Εικόνα διαρροής των ακραίων ινών της μεσαίας διατομής



Σχήμα 4.27
Εικόνα πλαστικοποίησης της μεσαίας διατομής

ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

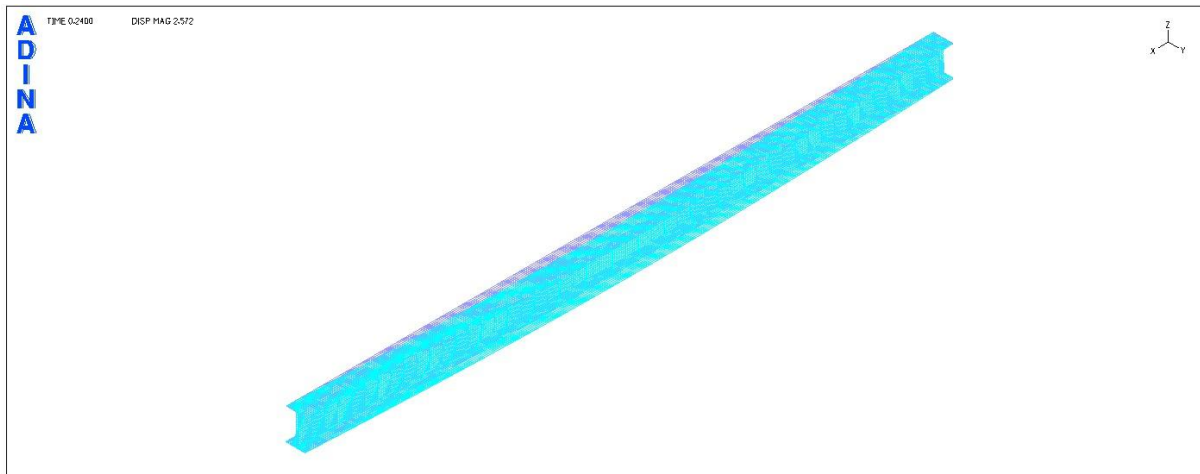
ΣΗΜΕΙΟ Α



Σχήμα 4.28

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Α

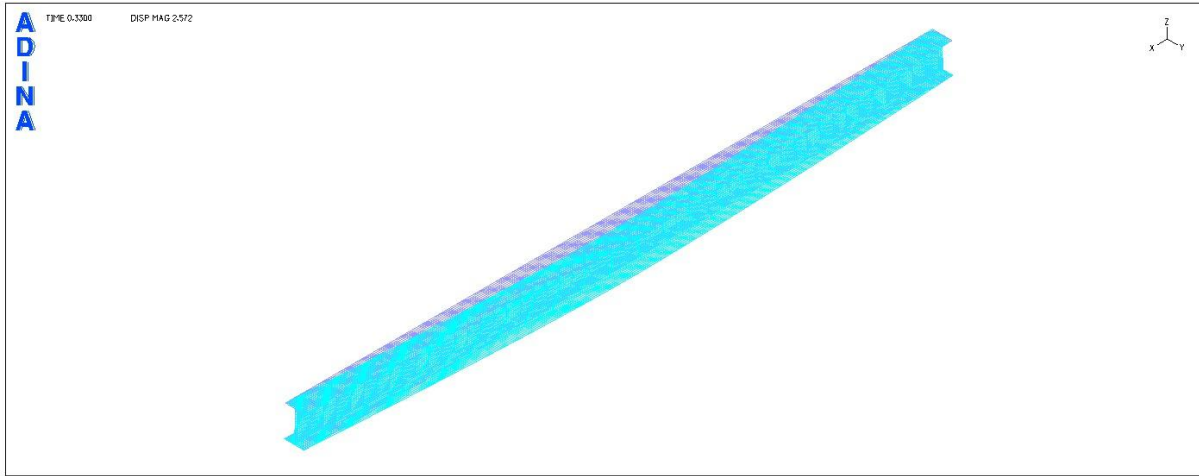
ΣΗΜΕΙΟ Β



Σχήμα 4.29

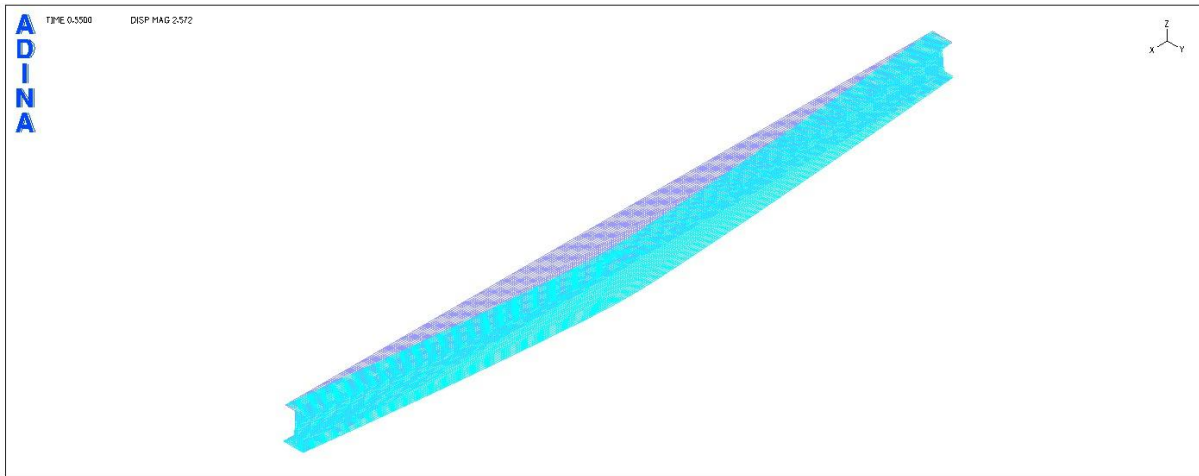
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β

ΣΗΜΕΙΟ Γ



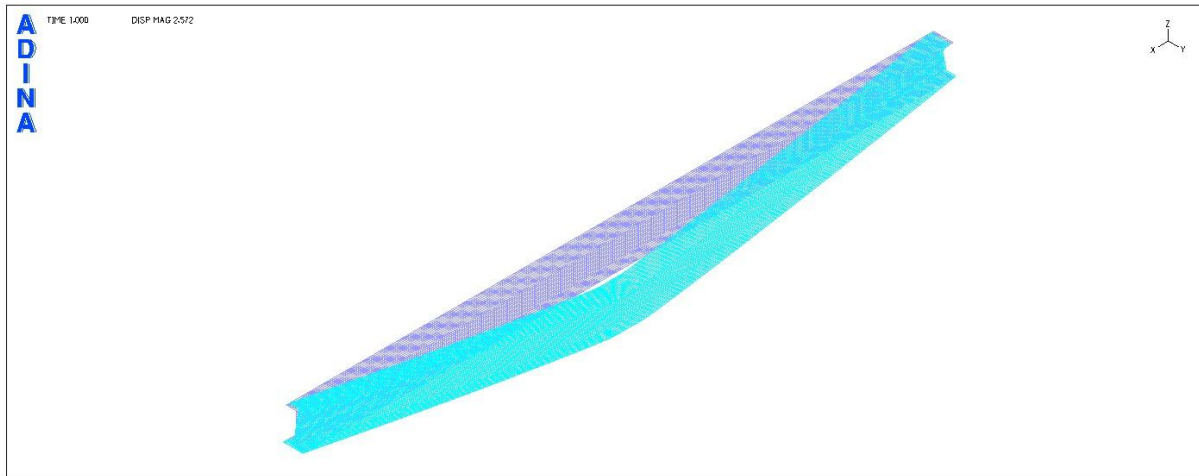
Σχήμα 4.30
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

ΣΗΜΕΙΟ Δ



Σχήμα 4.31
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ

ΣΗΜΕΙΟ Ε

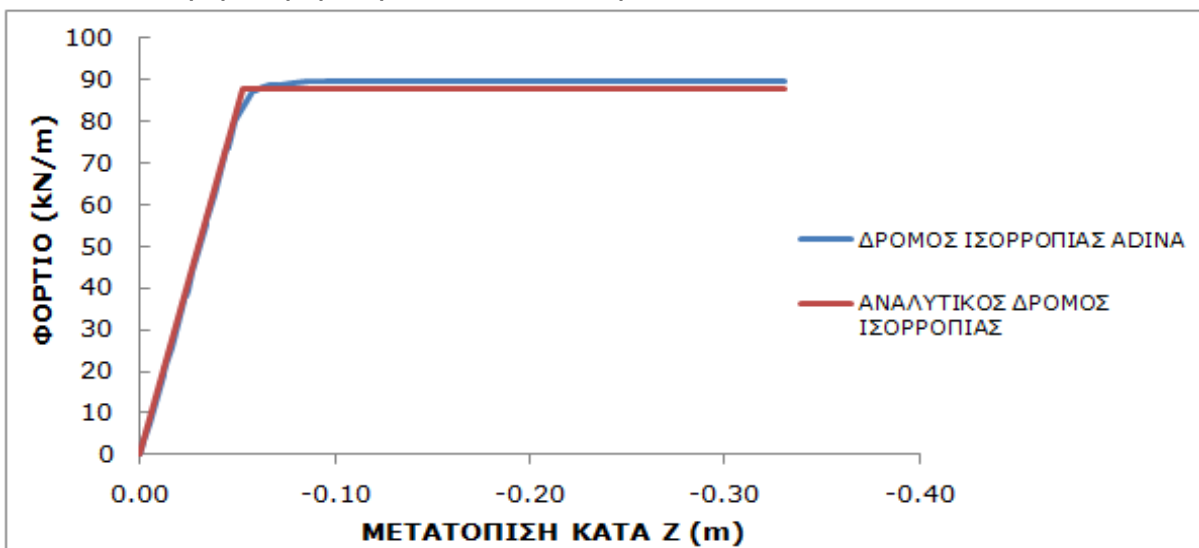


Σχήμα 4.32

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Ε

4.2.5 Σύγκριση δρόμου ισορροπίας ADINA με τον αναλυτικό δρόμο ισορροπίας

Η αστοχία του εξεταζόμενου φορέα επέρχεται με την πλαστικοποίηση του μέσου του ανοίγματος της αμφιέριστης δοκού. Η μορφή αυτή αστοχίας έχει δρόμο ισορροπίας ο οποίος έχει ήδη παρουσιασθεί. Στο σχήμα 4.33 έχουν σχεδιαστεί οι δρόμοι ισορροπίας που προέκυψαν από το ADINA και από την αναλυτική λύση στο ίδιο διάγραμμα προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.33

Συγκριτική παρουσίαση αναλυτικού δρόμου ισορροπίας και δρόμου ισορροπίας ADINA

Το φορτίο διαρροής από την αναλυτική λύση προέκυψε ίσο με 87,97kN/m ενώ από την ανάλυση με το ADINA ίσο με 89,70 kN/m. Τα αντίστοιχα βέλη για τη διαρροή προέκυψαν 0,052m από το θεωρητικό τύπο και 0,059m από την ανάλυση με το ADINA.

4.3 Αμφιέρειστη δοκός μήκους 5m διατομής κατηγορίας 1

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται αμφιέρειστη δοκός μήκους $L=5m$ η οποία δεν είναι πλευρικά εξασφαλισμένη και της οποίας η διατομή έχει αρκετά μεγάλο πάχος κορμού και πελμάτων. Θα ευρεθεί, όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού με βάση τον τύπο του Ευρωκώδικα 3 και θα συγκριθεί με το αποτέλεσμα της ανάλυσης με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Θα πραγματοποιηθεί επίσης μη γραμμική ανάλυση με το πρόγραμμα ADINA προκειμένου να βεβαιωθεί η μορφή αστοχίας του φορέα και να εξαχθεί ο δρόμος ισορροπίας, ο οποίος θα συγκριθεί με τον αντίστοιχο θεωρητικό.

Επιλέχθηκε διατομή με τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$h=500\text{mm}$$

$$b=300\text{mm}$$

$$t_w=18\text{mm}$$

$$t_f=32\text{mm}$$

Πραγματοποιείται κατάταξη της διατομής με βάση τον Ευρωκώδικα 3:

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = 1 \text{ για χάλυβα S235}$$

Έλεγχος κορμού για καθαρή κάμψη:

$$c/t_w = (500 - 2 \cdot 32) / 18 = 24,22 < 72\varepsilon = 72 \Rightarrow \text{κατηγορία 1}$$

Έλεγχος πέλματος για καθαρή κάμψη:

$$c/t_f = [(300 - 18) / 2] / 32 = 4,41 < 9\varepsilon = 9 \Rightarrow \text{κατηγορία 1}$$

Επομένως όλη η διατομή ανήκει στην κατηγορία 1.

Διαθέτει, συνεπώς, την ικανότητα σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης χωρίς μείωση της αντοχής της και δεν κινδυνεύει από τοπικό λυγισμό.

Υπολογίζονται παρακάτω τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης συγκολλητής διατομής:

Ροπή αδράνειας περί τον άξονα z:

$$I_z = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 3,2 \cdot 30^3 + \frac{1}{12} \cdot 1,8^3 \cdot 43,6 = 14421,2\text{cm}^4$$

Ροπή αδράνειας περί τον άξονα γ:

$$I_y = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 30 \cdot 3,2^3 + 2 \cdot 30 \cdot 3,2 \cdot (21,8 + 1,6)^2 + \frac{1}{12} \cdot 43,6^3 \cdot 1,8 = 117727,6 \text{cm}^4$$

Σταθερά στρέψης:

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot 30 \cdot 3,2^3 + 43,6 \cdot 1,8^3) = 740,12 \text{cm}^4$$

Σταθερά στρέβλωσης:

$$I_w = \frac{1}{4} \cdot 14421,2 \cdot (43,6 + 3,2)^2 = 7896467 \text{cm}^6$$

Πλαστική ροπή αντίστασης:

$$W_{pl} = 2 \cdot \left[30 \cdot 3,2 \cdot \left(\frac{43,6}{2} + \frac{3,2}{2} \right) + \frac{43,6}{2} \cdot 1,8 \cdot \frac{43,6}{4} \right] = 5348,23 \text{cm}^3$$

Η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού για καταναμημένο φορτίο στο κέντρο βάρους της δοκού, προκύπτει ίση με:

$$M_{cr} = 4380,43 \text{kNm}$$

Το φορτίο στο οποίο αντιστοιχεί είναι ίσο με $P_{cr} = 8 \cdot M_{cr} / L^2 = 1401,74 \text{kN/m}$.

Η τιμή αυτή θα συγκριθεί με την τιμή που θα προκύψει με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

Η ροπή πλαστικοποίησης της εξεταζόμενης διατομής για χάλυβα S235 είναι ίση με:

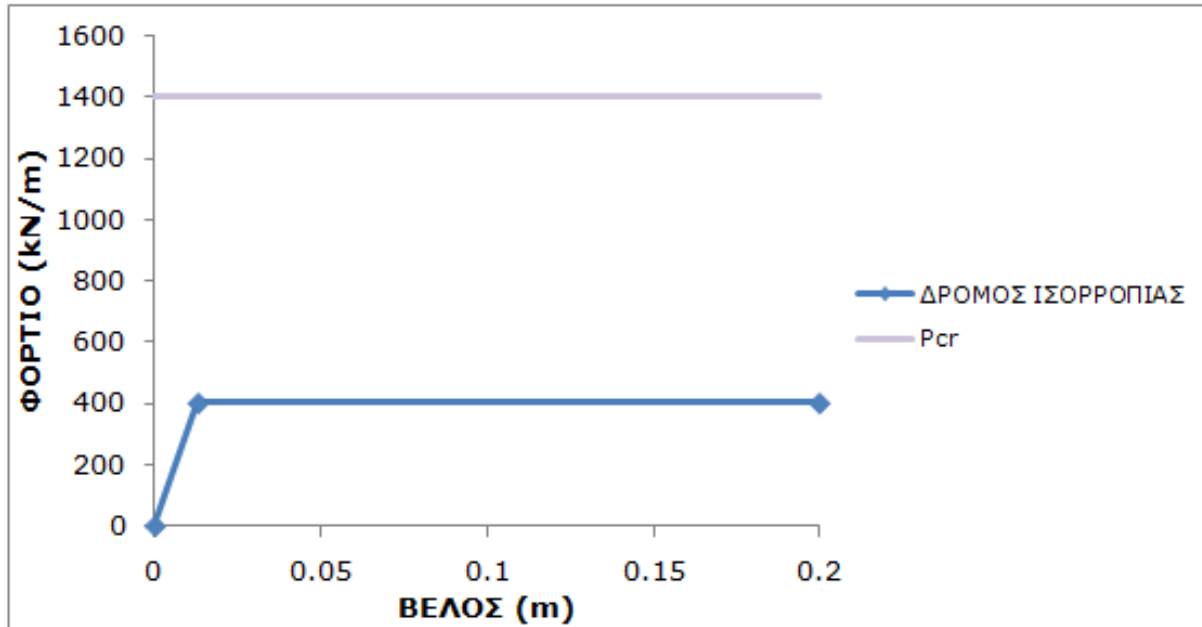
$$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 5348,23 \text{cm}^3 \cdot 23,5 \text{kN/cm}^2 / 1,00$$

$$M_{pl} = 1256,84 \text{kNm} < M_{cr} = 4380,43 \text{kNm}$$

Επομένως, κρίσιμη μορφή αστοχίας είναι καθαρά η πλαστικοποίηση της μεσαίας διατομής της αμφιέριστης δοκού και η δημιουργία πλαστικού μηχανισμού κατάρρευσης. Θα ακολουθήσει φυσικά και η ανάλυση με το πρόγραμμα ADINA προκειμένου να επιβεβαιωθεί η παραπάνω μορφή αστοχίας και να εξαχθεί ο δρόμος ισορροπίας.

Στο σχήμα 4.34 παρουσιάζεται ο αναλυτικός δρόμος ισορροπίας για την αμφιέριστη δοκό υπό καταναμημένο φορτίο.

Η τιμή του φορτίου διαρροής είναι ίση με $q = 8 \cdot M_{pl} / L^2 = 8 \cdot 1256,84 / 5^2$
 $\Rightarrow q = 402,19 \text{kN/m}$ και η αντίστοιχη μετατόπιση είναι ίση με
 $\delta = 40 \cdot M_{pl} \cdot L^2 / (384 E I_y) = 40 \cdot 1256,84 \cdot 5^2 / (384 \cdot 2,1 \cdot 10^8 \cdot 117727,6 \cdot 10^{-8})$
 $\Rightarrow \delta = 0,013 \text{m}$



Σχήμα 4.34

Δρόμος ισορροπίας αμφιέριστης δοκού υπό καταμεμημένο φορτίο

Θα ακολουθήσει ο σχεδιασμός της δοκού σε ΟΚΑ (Οριακή Κατάσταση Αστοχίας) σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 προκειμένου να υπολογιστεί η ροπή αντοχής σε λυγισμό και η πλαστική αντοχή σε διάτμηση.

4.3.1 Έλεγχος διάτμησης

Σύμφωνα με τον πλαστικό έλεγχο διάτμησης θα πρέπει να ισχύει:

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$$

$$V_{pl,Rd} = (43,6 \cdot 1,8) \cdot \frac{23,5}{\sqrt{3} \cdot 1,00} = 1064,80 \text{ kN}$$

4.3.2 Έλεγχος έναντι πλευρικού λυγισμού

Ισοδύναμο μήκος λυγισμού

Εφόσον πρόκειται για δοκό αμφιέριστη, το μήκος λυγισμού είναι ίσο με το ολικό μήκος της δοκού, δηλαδή $L=5\text{m}$.

Λυγηρότητα πλευρικού λυγισμού

Η ανηγμένη λυγηρότητα πλευρικού λυγισμού είναι ίση με:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{5348,23 \cdot 23,5}{438043}} = 0,54 > 0,20$$

Συνεπώς, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο πλευρικός λυγισμός.

Για $h/b=500\text{mm}/300\text{mm}=1,667 < 2 \Rightarrow$ καμπύλη c

Επομένως, η τιμή του συντελεστή ατελειών είναι ίση με $\alpha_{LT}=0,49$ για καμπύλη πλευρικού λυγισμού c.

Μειωτικός συντελεστής χ_{LT}

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + 0,49(0,54 - 0,20) + 0,54^2 \right] = 0,73$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,73 + \sqrt{0,73^2 - 0,54^2}} = 0,82 < 1$$

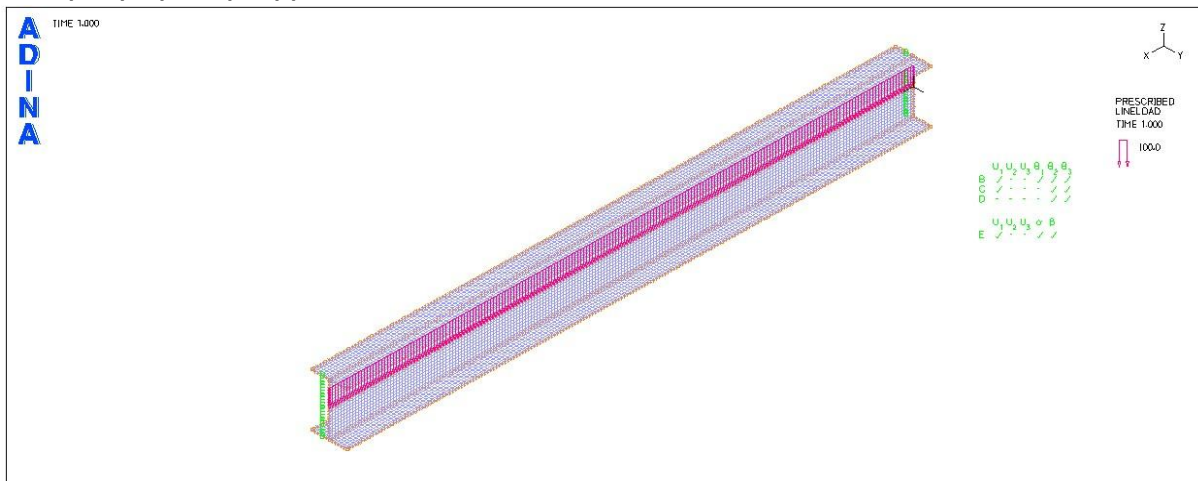
Έλεγχος

Η ροπή αντοχής είναι ίση με:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,82 \cdot 5348,23 \cdot \frac{23,5}{1,00} \text{ kNcm} = 103060 \text{ kNcm} = 1030,60 \text{ kNm}$$

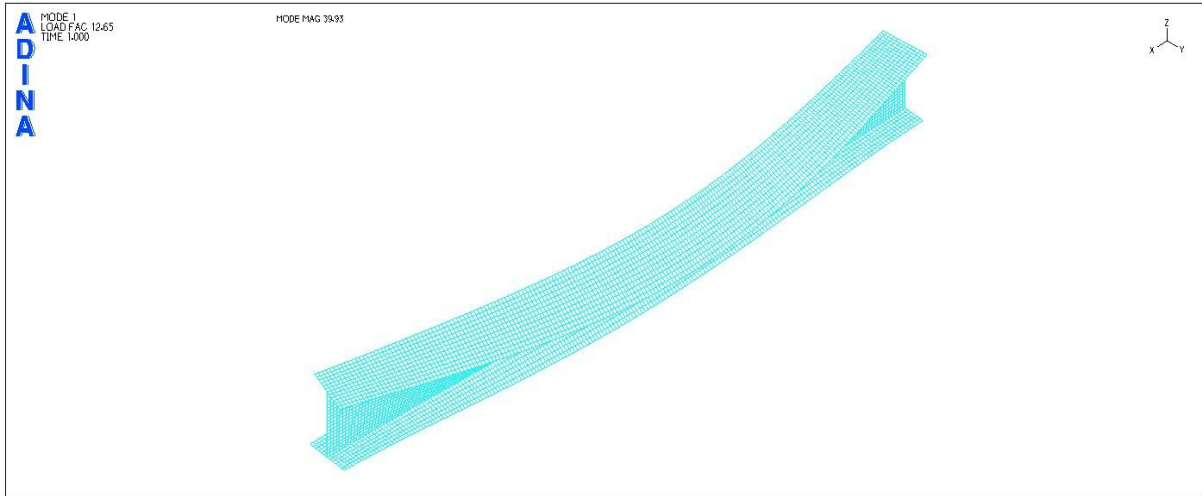
4.3.3 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Στο φορέα ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 100kN/m στο κέντρο βάρους της δοκού.

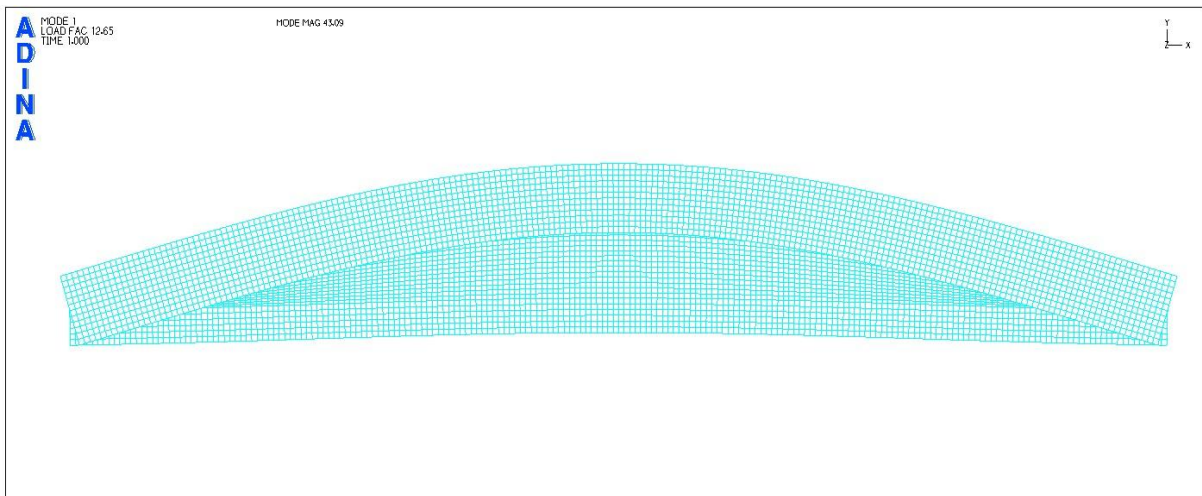


Σχήμα 4.35

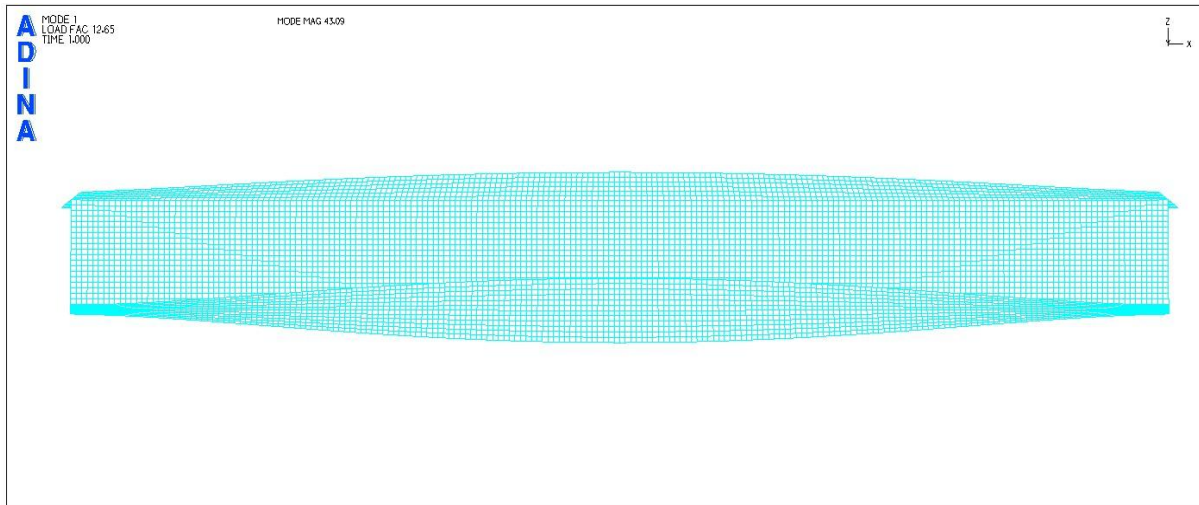
Αμφιέρειστος φορέας μήκους 5m χωρίς πλευρικές εξασφαλίσεις με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 100kN/m στον κεντροβαρικό άξονα



Σχήμα 4.36
1^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

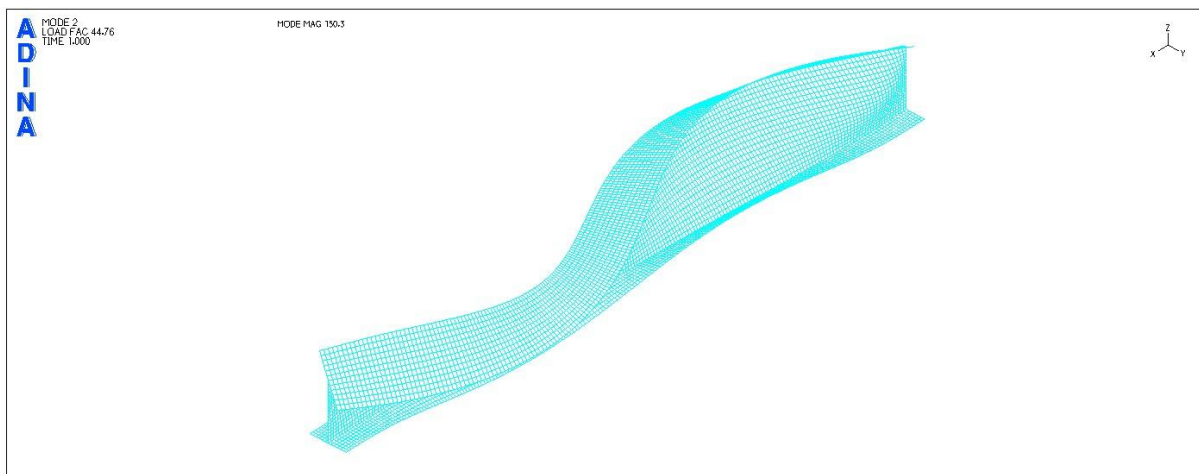


Σχήμα 4.37
1^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)

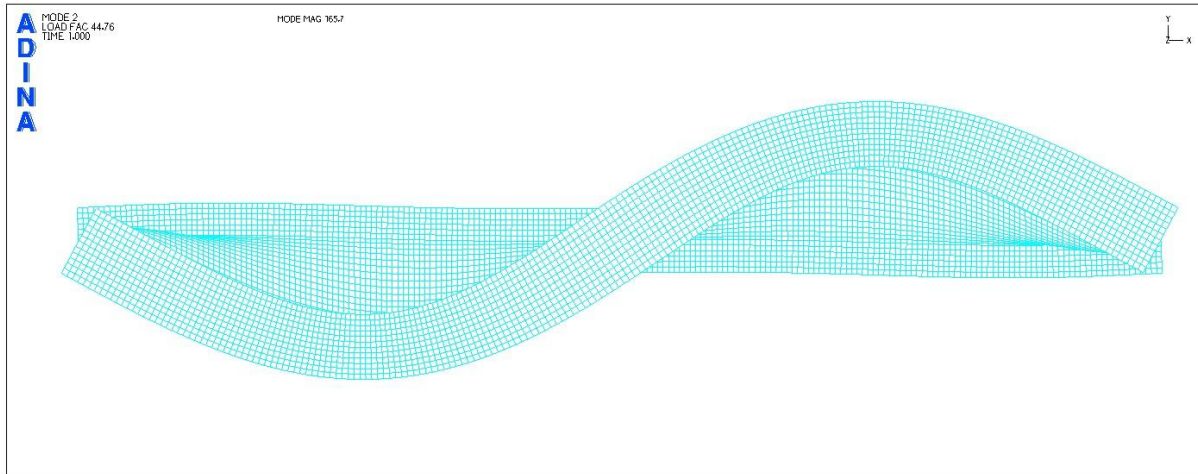


Σχήμα 4.38
1^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)

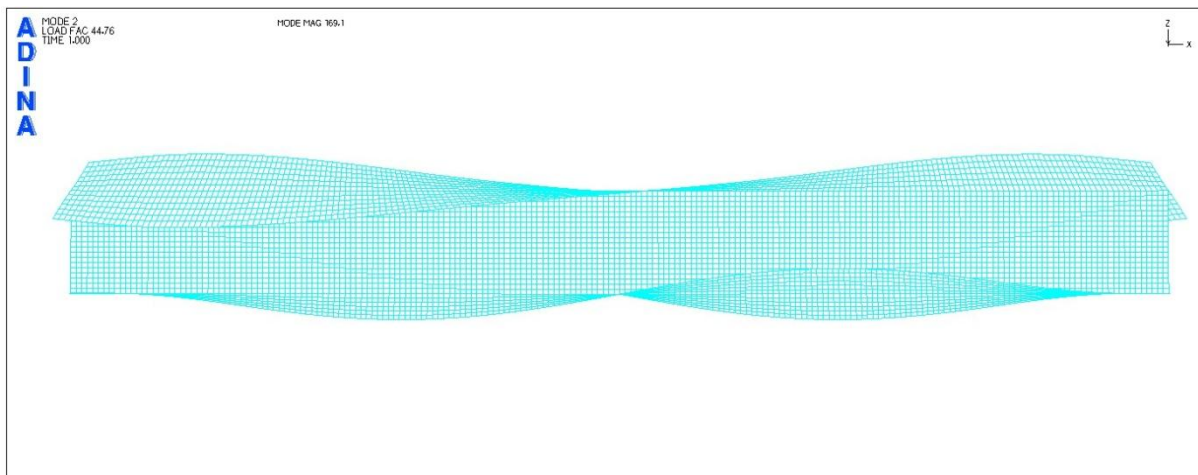
Το φορτίο λυγισμού που αντιστοιχεί στην πρώτη ιδιομορφή προέκυψε ίσο με $P_{cr}=1265\text{kN/m}$. Η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=1265 \cdot 5^2/8=3953,13\text{kNm}$.



Σχήμα 4.39
2^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 4.40
2^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



Σχήμα 4.41
2^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)

Το φορτίο λυγισμού που αντιστοιχεί στη δεύτερη ιδιομορφή προέκυψε ίσο με $P_{cr}=4476\text{kN/m}$. Η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=4476 \cdot 5^2/8=13987,50\text{kNm}$.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ADINA, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι ίσο με $P_{cr}=1265\text{kN/m}$ και η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού είναι ίση με $M_{cr}=3953,13\text{kNm}$. Η αντίστοιχη ροπή σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα είχε προκύψει ίση με $M_{cr}=4380,43\text{kNm}$ (απόκλιση 9,8%).

4.3.4 Μη γραμμική ανάλυση υλικού με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

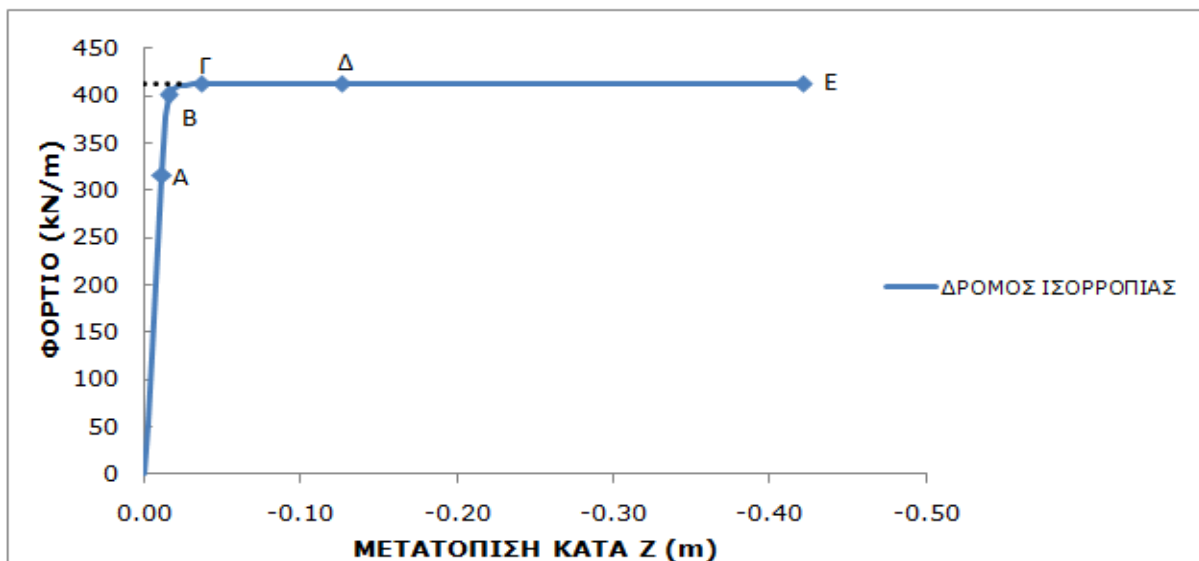
Πραγματοποιείται μη γραμμική ανάλυση υλικού, δεδομένου ότι αναμένεται αστοχία του φορέα λόγω πλαστικοποίησης της μεσαίας διατομής.

Θεωρείται αρχικά διγραμμικό υλικό S235 ελαστικό-τελείως πλαστικό και στη συνέχεια διγραμμικό υλικό S235 με κράτυνση $E_t=20000\text{kPa}$.

Η μη γραμμική ανάλυση υλικού πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο collapse analysis όπου θεωρήθηκε ως σημείο αναφοράς ο κόμβος της μεσαίας διατομής στο σημείο συνένωσης κορμού και κάτω πέλματος.

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.42 ο δρόμος ισορροπίας, όπου στον κατακόρυφο άξονα αντιστοιχεί το κατανεμημένο φορτίο και στον οριζόντιο άξονα η κατακόρυφη μετατόπιση του κόμβου αναφοράς για τις διάφορες τιμές φορτίσεως.

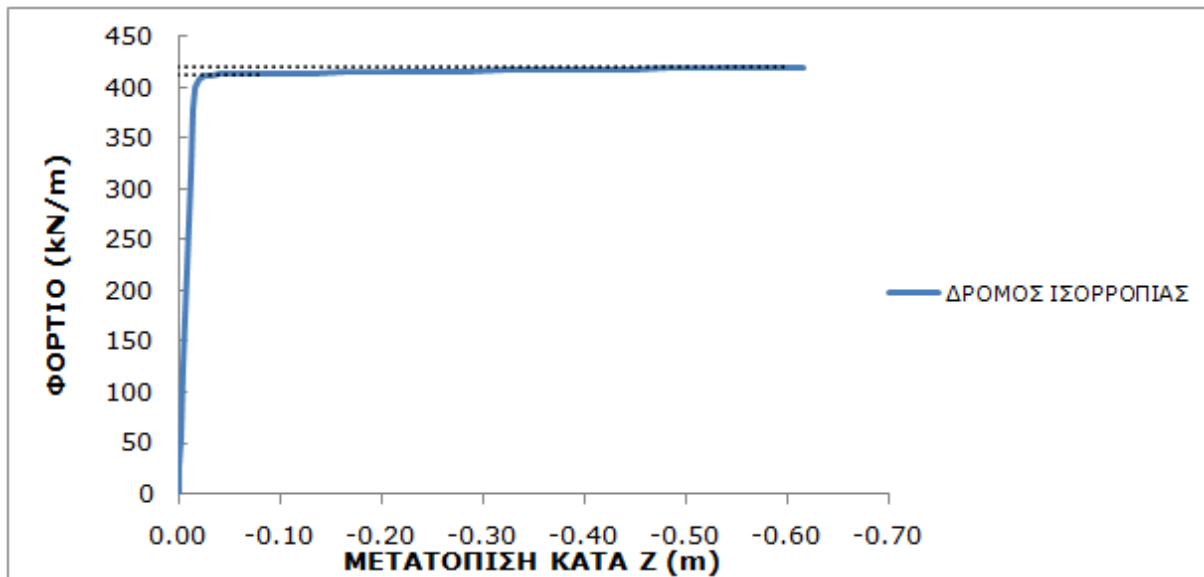
Στο σχήμα 4.42.α φαίνεται ο δρόμος ισορροπίας για το χάλυβα χωρίς κράτυνση και στο σχήμα 4.42.β για το χάλυβα με κράτυνση.



Σχήμα 4.42.α

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς (χάλυβας χωρίς κράτυνση)

Από το δρόμο ισορροπίας, το φορτίο διαρροής προκύπτει 412kN/m , που αντιστοιχεί σε ροπή $M=412 \cdot 5^2/8=1287,5\text{kNm}$. (Υπενθυμίζεται ότι έχει υπολογιστεί $M_{pl}=1256,84\text{kNm}$ που αντιστοιχεί σε φορτίο διαρροής $q=8 \cdot 1256,84/5^2=402,19\text{kN/m}$).



Σχήμα 4.42.β

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς (χάλυβας με κράτυνση)

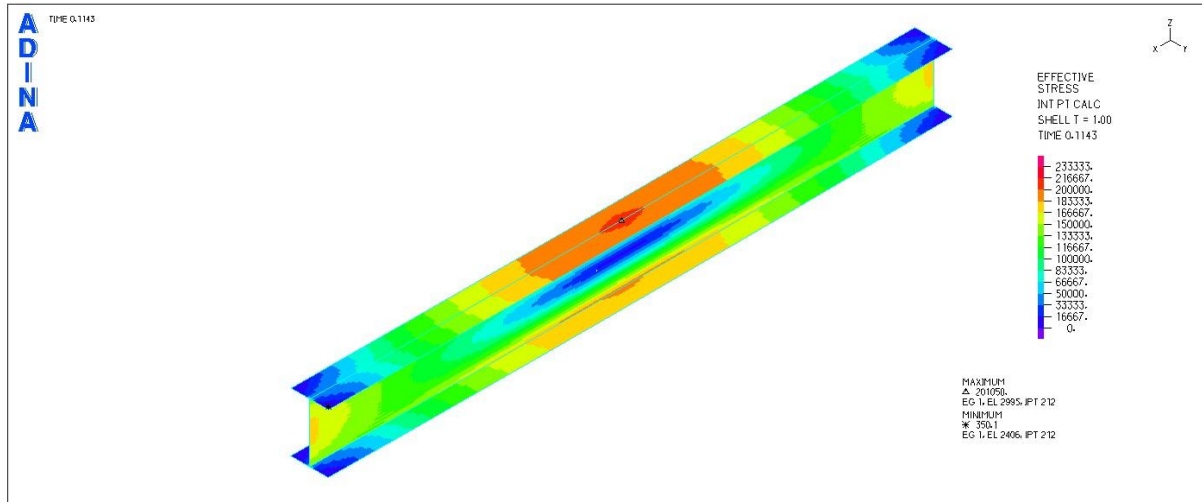
Η κύρια διαφοροποίηση των δύο παραπάνω διαγραμμάτων έγκειται στο ότι για το χάλυβα με κράτυνση η πρώτη διαρροή παρουσιάζεται για φορτίο 412kN/m (όπως και στο πρώτο διάγραμμα), αλλά το μέγιστο φορτίο είναι ίσο με 421kN/m, ακριβώς λόγω της κράτυνσης. Αντίθετα, στο διάγραμμα 4.42.α, στο φορτίο διαρροής 412kN/m δημιουργείται πλέον οριζόντιος κλάδος μέχρι την αστοχία.

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις κατά μήκος του φορέα για τα 5 χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας 4.42.α.

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ VON MISES

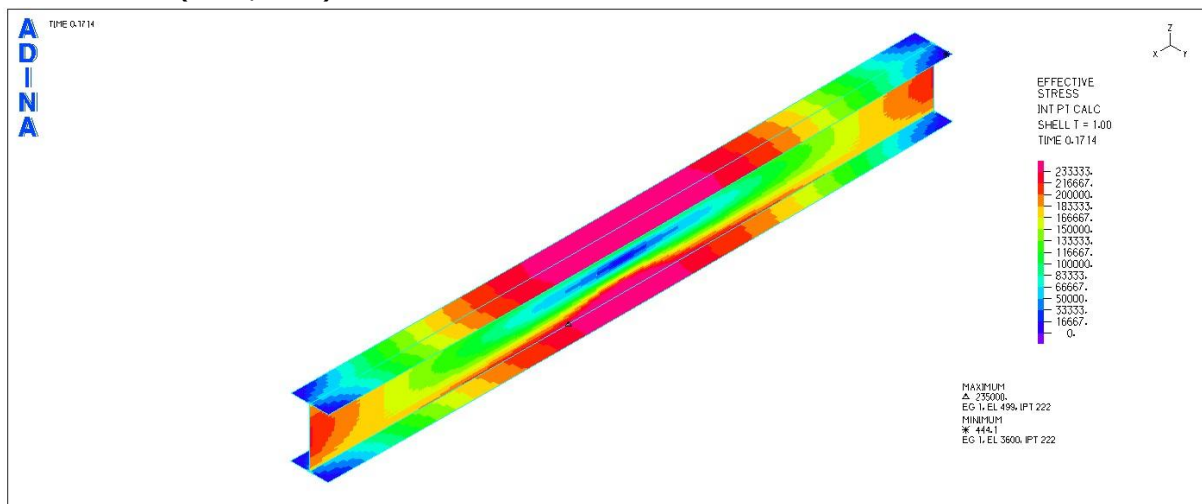
ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,114)



Σχήμα 4.43

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο A

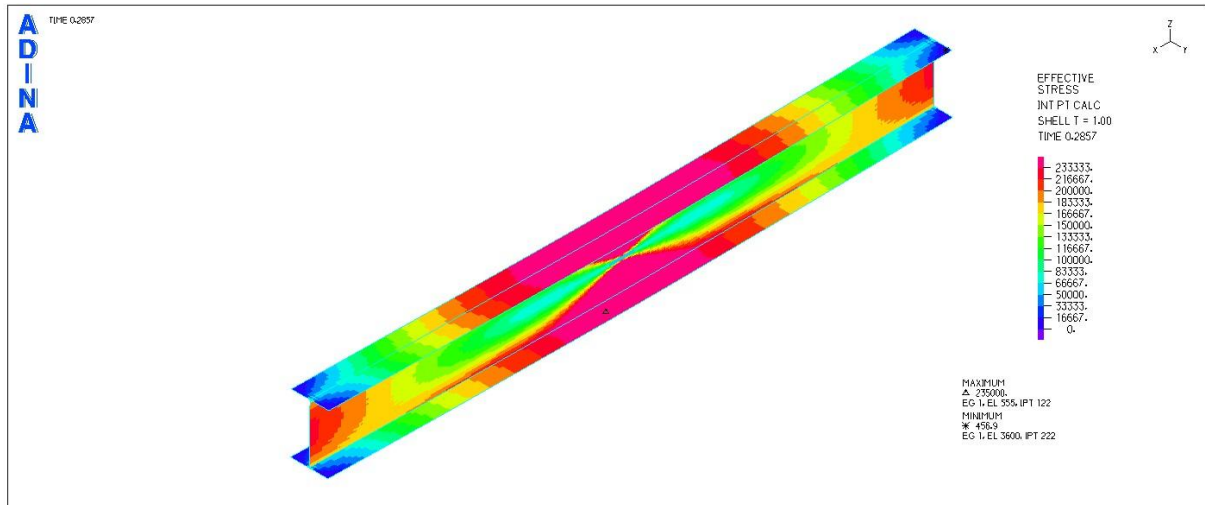
ΣΗΜΕΙΟ B (t=0,171)



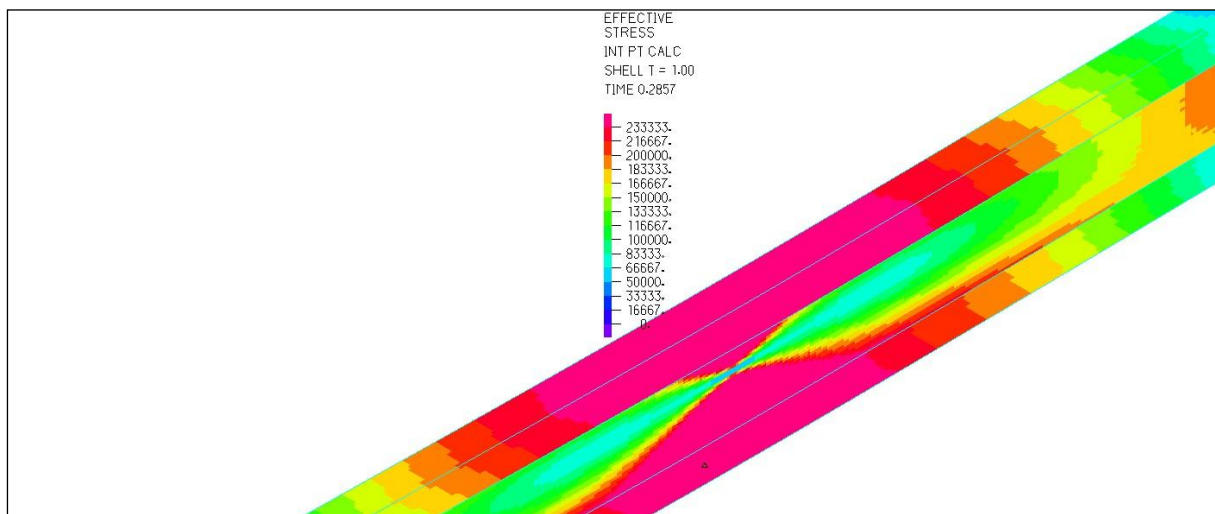
Σχήμα 4.44

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο B

ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,286)

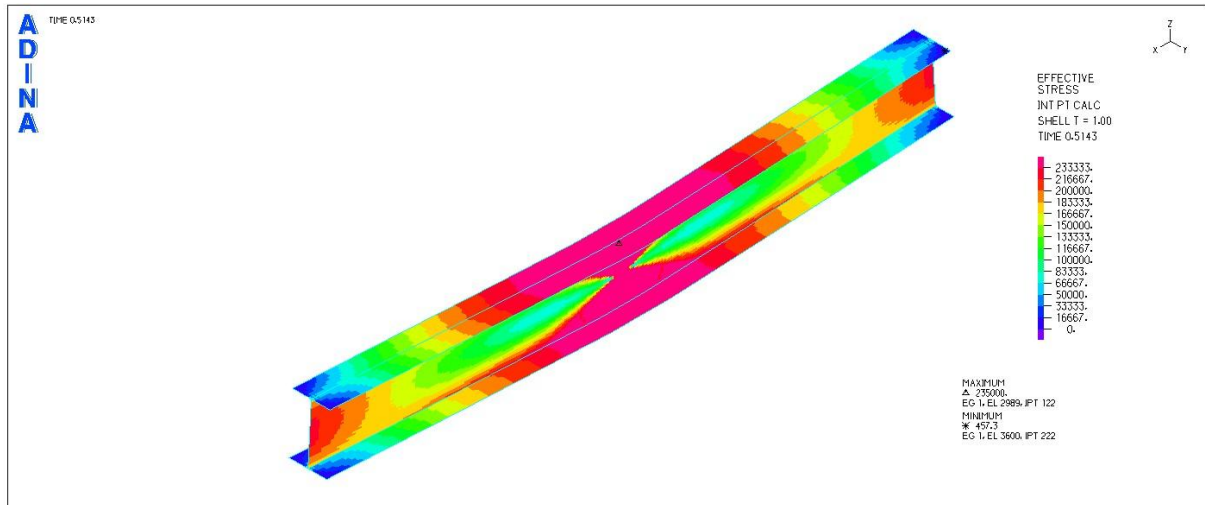


Σχήμα 4.45
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

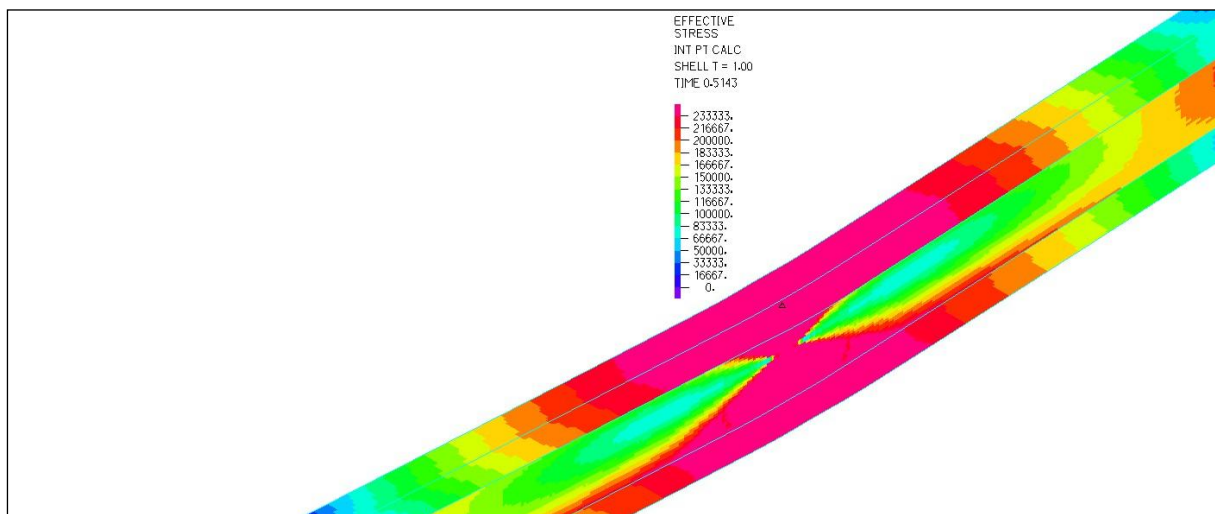


Σχήμα 4.46
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (λεπτομέρεια)

ΣΗΜΕΙΟ Δ (t=0,514)

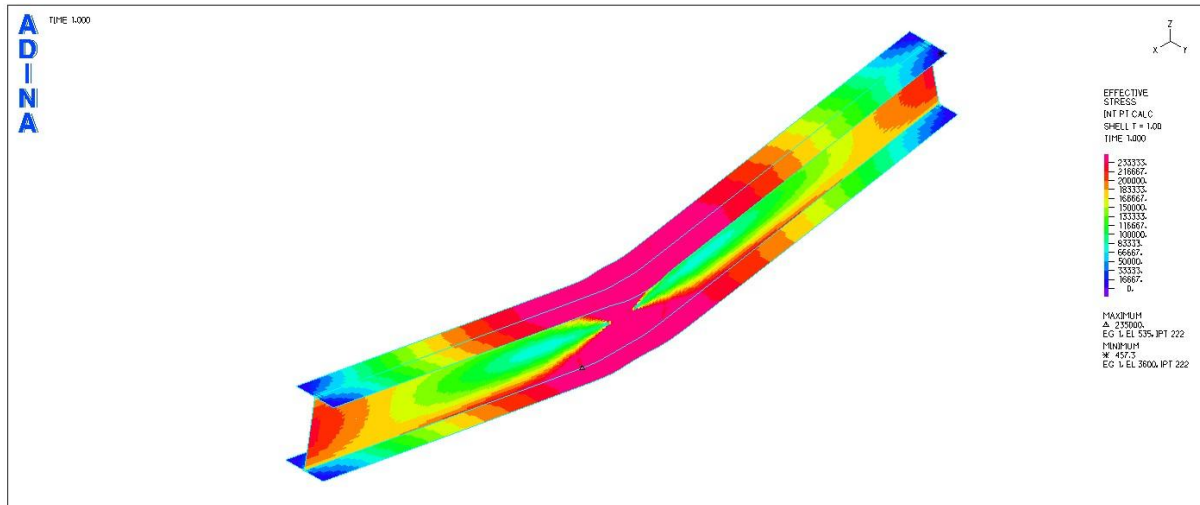


Σχήμα 4.47
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ

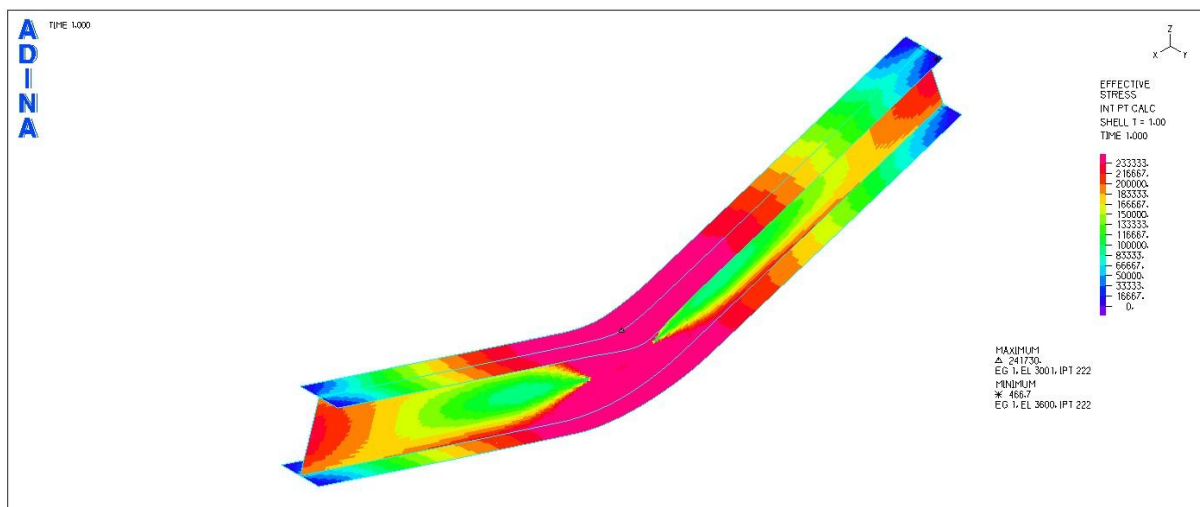


Σχήμα 4.48
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (λεπτομέρεια)

ΣΗΜΕΙΟ E (t=1,00)

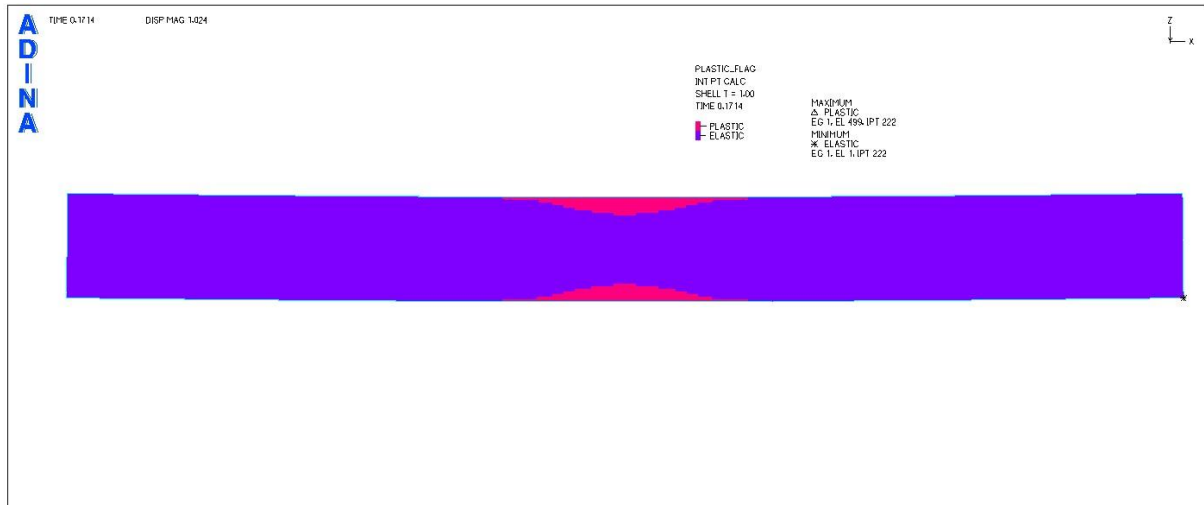


Σχήμα 4.49
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο E

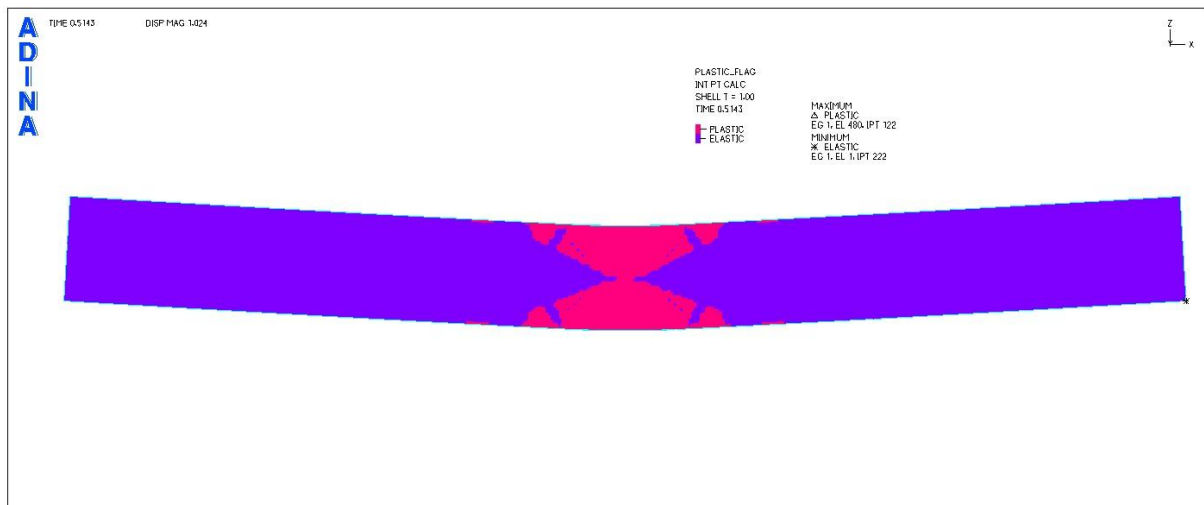


Σχήμα 4.50
Εικόνα τάσεων von Mises για το τελευταίο σημείο του δρόμου ισορροπίας για την ανάλυση χάλυβα με κράτυνση

Στο σχήμα 4.50 παρατηρούμε ότι σε αντίθεση με την ανάλυση χάλυβα χωρίς κράτυνση, εδώ οι τάσεις von Mises για κάποια σημεία της μεσαίας διατομής έχουν υπερβεί την τάση διαρροής f_y .



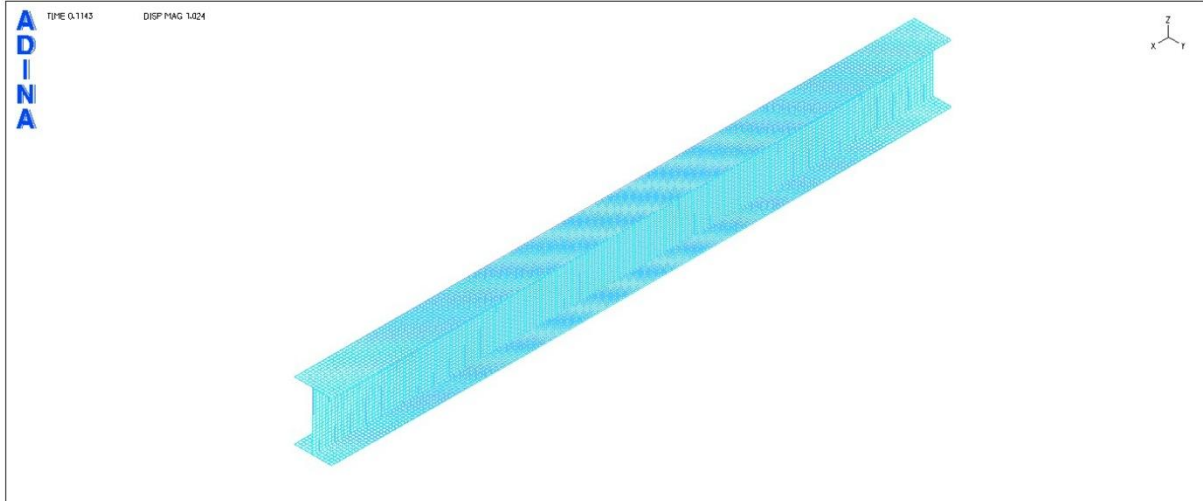
Σχήμα 4.51
 Εικόνα διαρροής των ακραίων ινών της μεσαίας διατομής



Σχήμα 4.52
 Εικόνα πλαστικοποίησης της μεσαίας διατομής

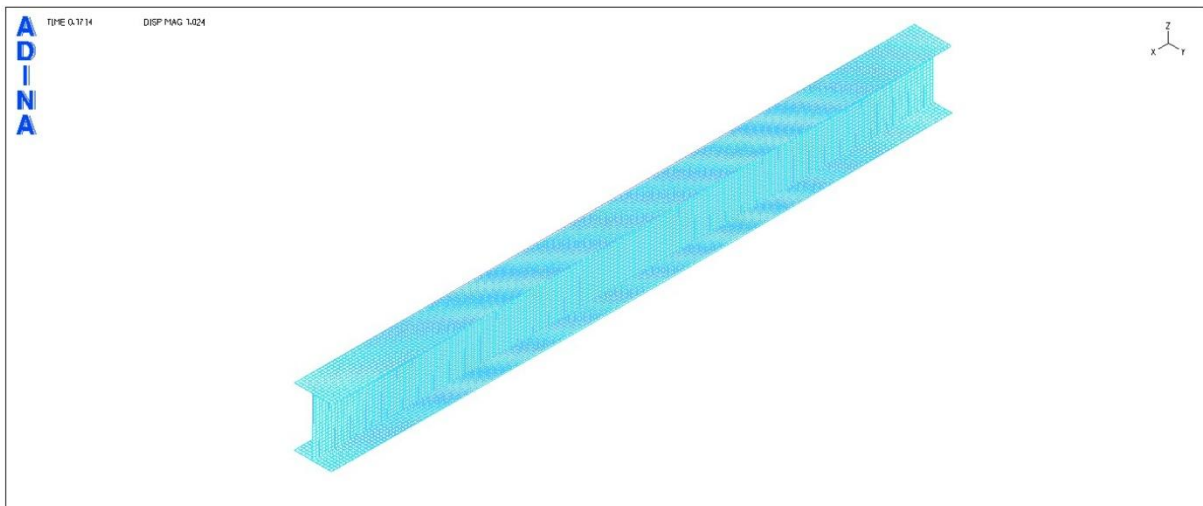
ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΣΗΜΕΙΟ Α



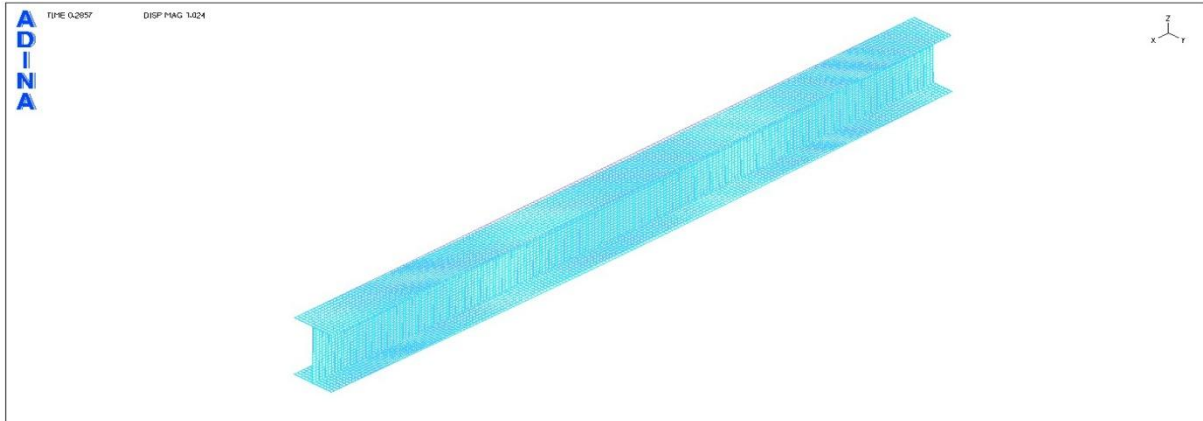
Σχήμα 4.53
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Α

ΣΗΜΕΙΟ Β



Σχήμα 4.54
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β

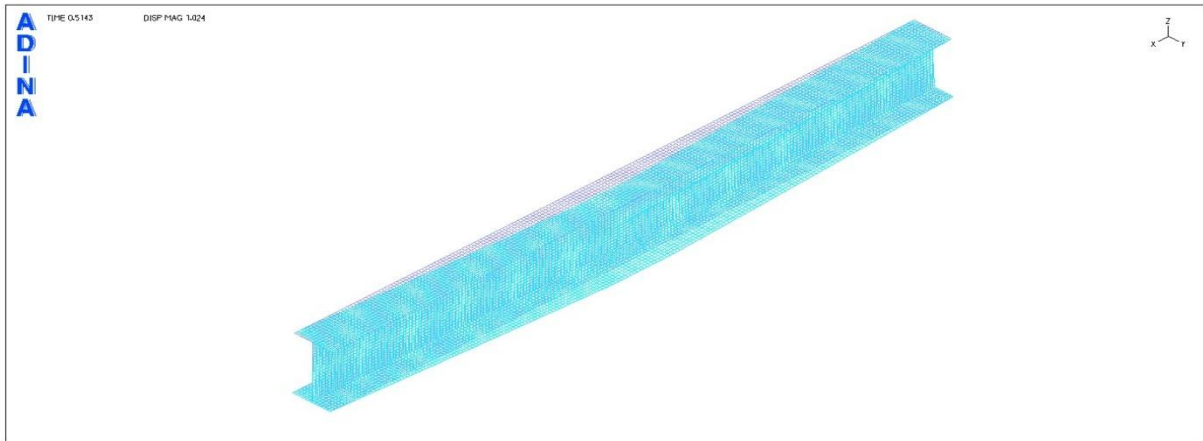
ΣΗΜΕΙΟ Γ



Σχήμα 4.55

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

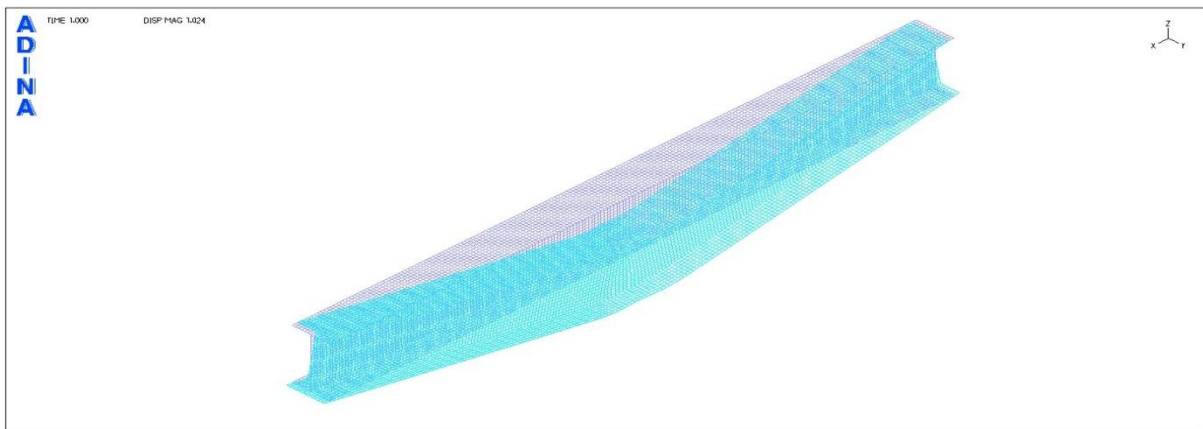
ΣΗΜΕΙΟ Δ



Σχήμα 4.56

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ

ΣΗΜΕΙΟ Ε

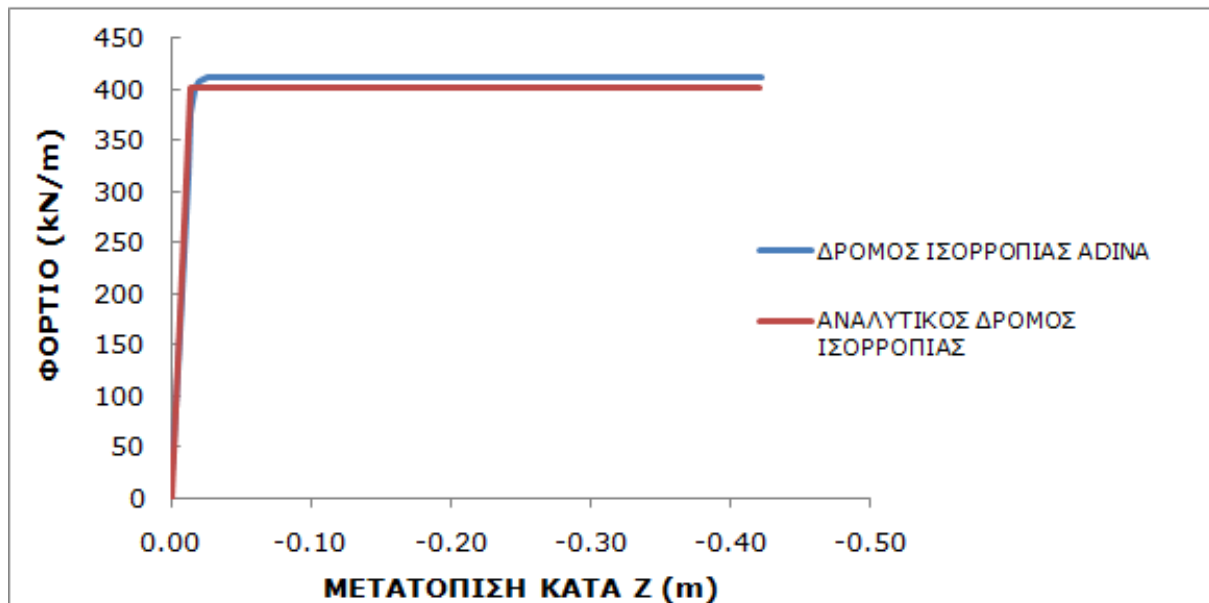


Σχήμα 4.57

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Ε

4.3.4 Σύγκριση δρόμου ισορροπίας ADINA με τον αναλυτικό δρόμο ισορροπίας

Η αστοχία του εξεταζόμενου φορέα επέρχεται με την πλαστικοποίηση του μέσου του ανοίγματος της αμφιέριστης δοκού. Η μορφή αυτή αστοχίας έχει δρόμο ισορροπίας ο οποίος έχει ήδη παρουσιασθεί. Στο σχήμα 4.58 έχουν σχεδιαστεί οι δρόμοι ισορροπίας που προέκυψαν από το ADINA και από την αναλυτική λύση στο ίδιο διάγραμμα προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.58

Συγκριτική παρουσίαση αναλυτικού δρόμου ισορροπίας και δρόμου ισορροπίας ADINA

Το φορτίο διαρροής από την αναλυτική λύση προέκυψε ίσο με 402,19kN/m ενώ από την ανάλυση με το ADINA ίσο με 412 kN/m. Τα αντίστοιχα βέλη για τη διαρροή προέκυψαν 0,013m από το θεωρητικό τύπο και 0,018m από την ανάλυση με το ADINA.

Κεφάλαιο 5

Πλευρικός λυγισμός αμφιέρειστης συμπαγούς δοκού

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται αμφιέρειστες δοκοί διατομής διπλού ταυ, μεγάλης λυγηρότητας και φορτιζόμενες με κατακόρυφο ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στις οποίες εμφανίζεται πλευρικός λυγισμός πολύ πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής. Θα γίνει χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA για τη σύγκριση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού με την τιμή του φορτίου που προκύπτει με βάση τον Ευρωκώδικα 3 και για την εύρεση του δρόμου ισορροπίας. Αρχικά θα εξετασθεί η θέση εφαρμογής του κατανεμημένου φορτίου στον κεντροβαρικό άξονα των δοκών και στη συνέχεια θα γίνουν αναλύσεις για εφαρμογή του φορτίου στο άνω και κάτω πέλμα προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Επίσης θα εξετασθούν διαφορετικές τιμές των ατελειών για τις μη γραμμικές αναλύσεις ώστε να παρουσιασθούν σε συγκριτικό διάγραμμα οι δρόμοι ισορροπίας.

5.1 Αμφιέρειστη δοκός μήκους 12m διατομής κατηγορίας 1

Εξετάζεται η περίπτωση αμφιέρειστης δοκού μήκους $L=12\text{m}$ η οποία φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στο κέντρο βάρους της και της οποίας η διατομή έχει τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$h=600\text{mm}$$

$$b=200\text{mm}$$

$$t_w=15\text{mm}$$

$$t_f=20\text{mm}$$

Πραγματοποιείται κατάταξη της διατομής με βάση τον Ευρωκώδικα 3:

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = 1 \text{ για χάλυβα S235}$$

Έλεγχος κορμού για καθαρή κάμψη:

$$c/t_w = (600 - 2 \cdot 20) / 15 = 37,33 < 72\varepsilon = 72 \Rightarrow \text{κατηγορία 1}$$

Έλεγχος πέλματος για καθαρή κάμψη:

$$c/t_f = [(200-15)/2]/20 = 4,63 < 9\varepsilon = 9 \Rightarrow \text{κατηγορία 1}$$

Επομένως όλη η διατομή ανήκει στην κατηγορία 1.

Ροπή αδράνειας περί τον άξονα z:

$$I_z = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 2,0 \cdot 20^3 + \frac{1}{12} \cdot 1,5^3 \cdot 56 = 2682,4 \text{cm}^4$$

Ροπή αδράνειας περί τον άξονα y:

$$I_y = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 20 \cdot 2,0^3 + 2 \cdot 20 \cdot 2,0 \cdot (28 + 1,0)^2 + \frac{1}{12} \cdot 56^3 \cdot 1,5 = 89258,7 \text{cm}^4$$

Σταθερά στρέψης:

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot 20 \cdot 2,0^3 + 56 \cdot 1,5^3) = 169,67 \text{cm}^4$$

Σταθερά στρέβλωσης:

$$I_w = \frac{1}{4} \cdot 2682,4 \cdot (56 + 2,0)^2 = 2255912 \text{cm}^6$$

Πλαστική ροπή αντίστασης:

$$W_{pl} = 2 \cdot \left[20 \cdot 2,0 \cdot \left(\frac{56}{2} + \frac{2,0}{2} \right) + \frac{56}{2} \cdot 1,5 \cdot \frac{56}{4} \right] = 3496,00 \text{cm}^3$$

Η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού με βάση την εξίσωση (2.35) και για κατανομημένο φορτίο στο κέντρο βάρους της δοκού, προκύπτει ίση με:

$$M_{cr} = 289,59 \text{kNm}$$

Το φορτίο στο οποίο αντιστοιχεί είναι ίσο με $P_{cr} = 8 \cdot M_{cr} / L^2 = 16,09 \text{kN/m}$.

Η ροπή πλαστικοποίησης της εξεταζόμενης διατομής για χάλυβα S235 είναι ίση με:

$$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 3496,00 \text{cm}^3 \cdot 23,5 \text{kN/cm}^2 / 1,00$$

$$M_{pl} = 821,56 \text{kNm} > M_{cr} = 289,59 \text{kNm}$$

Το αντίστοιχο φορτίο για την πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής είναι ίσο με $P_{pl} = 8 \cdot M_{pl} / L^2 = 8 \cdot 821,56 / 12^2 = 45,64 \text{kN/m}$.

Επομένως, αναμένουμε να προηγηθεί πλευρικός λυγισμός της αμφιέρειστης δοκού πριν την πλαστικοποίηση της μεσαίας διατομής. Η ανάλυση με το πρόγραμμα ADINA θα ακολουθήσει για να επιβεβαιώσει τα παραπάνω αποτελέσματα.

Θα ακολουθήσει ο σχεδιασμός της δοκού σε ΟΚΑ (Οριακή Κατάσταση Αστοχίας) σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 προκειμένου να υπολογιστεί η ροπή αντοχής σε λυγισμό και η πλαστική αντοχή σε διάτμηση.

5.1.1 Έλεγχος διάτμησης

Σύμφωνα με τον πλαστικό έλεγχο διάτμησης θα πρέπει να ισχύει:

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$$

$$V_{pl,Rd} = (56 \cdot 1,5) \cdot \frac{23,5}{\sqrt{3} \cdot 1,00} = 1139,69 \text{ kN}$$

5.1.2 Έλεγχος έναντι πλευρικού λυγισμού

Ισοδύναμο μήκος λυγισμού

Εφόσον πρόκειται για δοκό αμφιέριστη, το μήκος λυγισμού είναι ίσο με το ολικό μήκος της δοκού, δηλαδή $L=12\text{m}$.

Λυγηρότητα πλευρικού λυγισμού

Η ανηγμένη λυγηρότητα πλευρικού λυγισμού είναι ίση με:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{3496 \cdot 23,5}{28959}} = 1,68 > 0,20$$

Συνεπώς, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο πλευρικός λυγισμός.

Καμπύλες πλευρικού λυγισμού

ΔΙΑΤΟΜΗ	ΟΡΙΑ	ΚΑΜΠΥΛΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ
ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ I	$h/b \leq 2$ $h/b > 2$	c d

Πίνακας 5.1

Επιλογή καμπύλης πλευρικού λυγισμού

Για $h/b=600\text{mm}/200\text{mm}=3 > 2 \Rightarrow$ καμπύλη d

ΚΑΜΠΥΛΗ ΛΥΓΙΣΜΟΥ	a	b	c	d
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΤΕΛΕΙΩΝ α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Πίνακας 5.2

Συνιστώμενες τιμές συντελεστή ατελειών με βάση την καμπύλη πλευρικού λυγισμού

Επομένως, η τιμή του συντελεστή ατελειών είναι ίση με $\alpha_{LT}=0,76$ για καμπύλη πλευρικού λυγισμού d.

Μειωτικός συντελεστής χ_{LT}

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + 0,76(1,68 - 0,20) + 1,68^2 \right] = 2,47$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{2,47 + \sqrt{2,47^2 - 1,68^2}} = 0,23 < 1$$

Έλεγχος

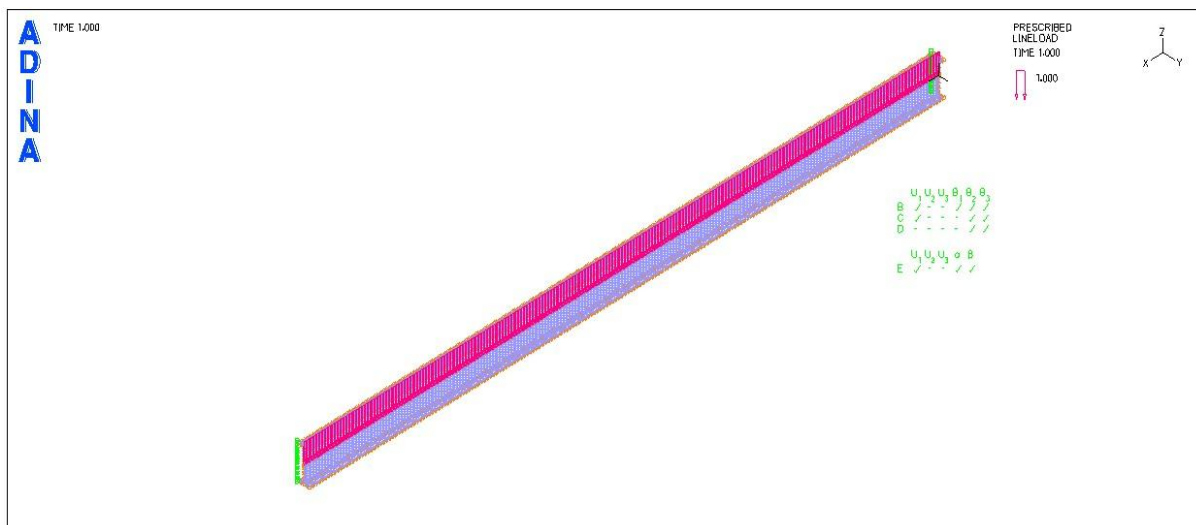
Η ροπή αντοχής είναι ίση με:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,23 \cdot 3496,00 \cdot \frac{23,5}{1,00} \text{ kNcm} = 18895,9 \text{ kNcm} = 188,96 \text{ kNm}$$

Το αντίστοιχο φορτίο αντοχής είναι ίσο με $P_{b,Rd} = 10,50 \text{ kN/m}$.

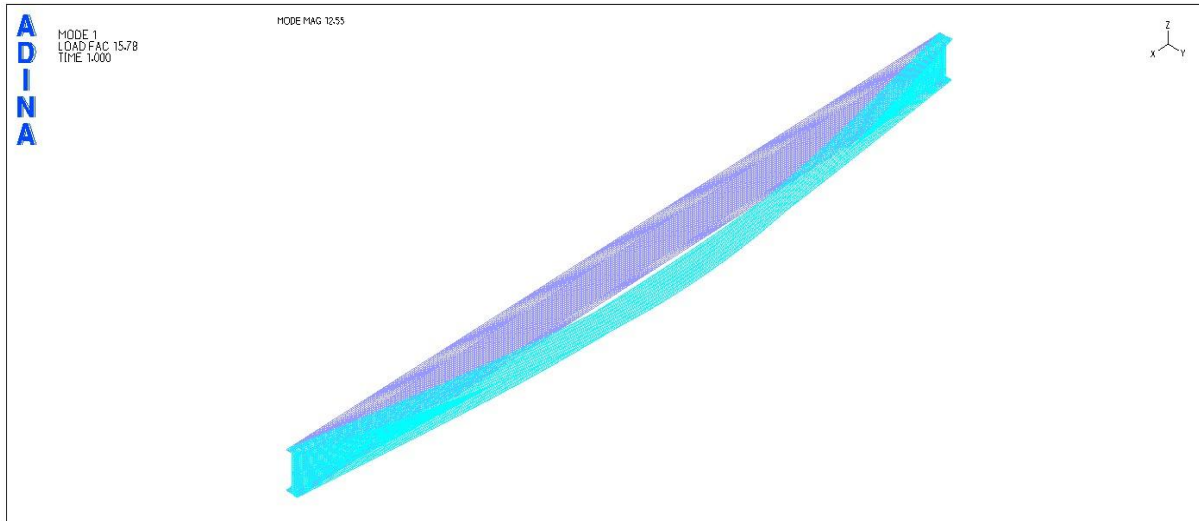
5.1.3 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Στο φορέα ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 1kN/m στο κέντρο βάρους της δοκού.



Σχήμα 5.1

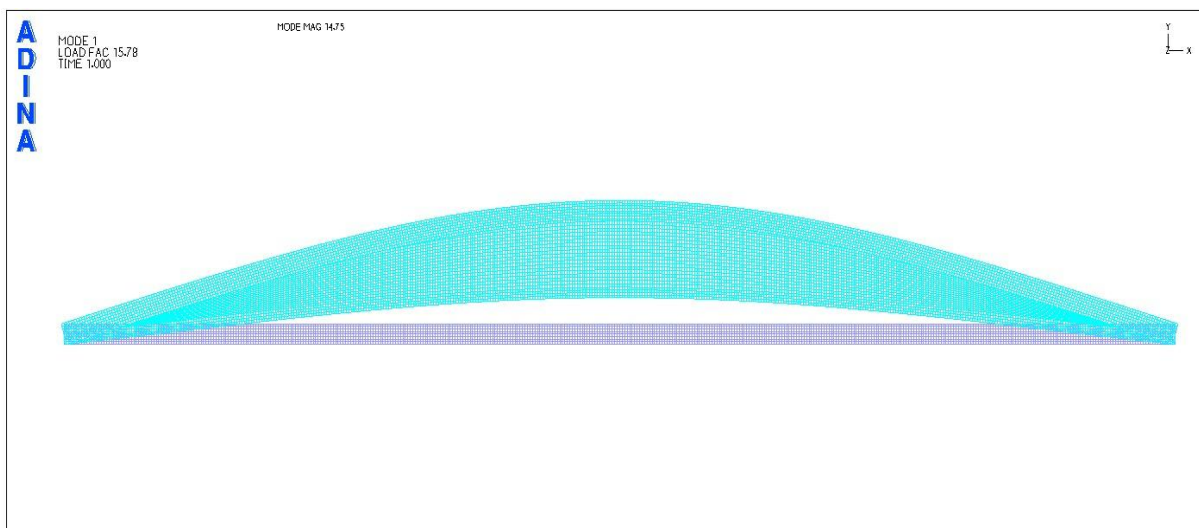
Αμφιέριστος φορέας μήκους 12m με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 1kN/m στον κεντροβαρικό άξονα



Σχήμα 5.2

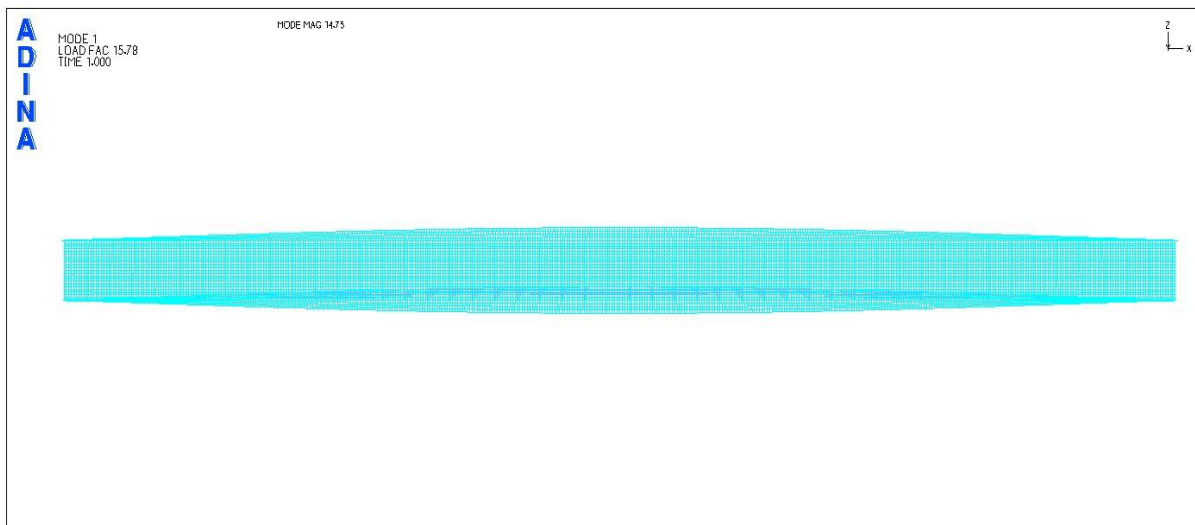
1^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

Το φορτίο λυγισμού που αντιστοιχεί στην πρώτη ιδιομορφή προέκυψε ίσο με $P_{cr}=15,78\text{kN/m}$. Η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=15,78 \cdot 12^2/8=284,04\text{kNm}$.

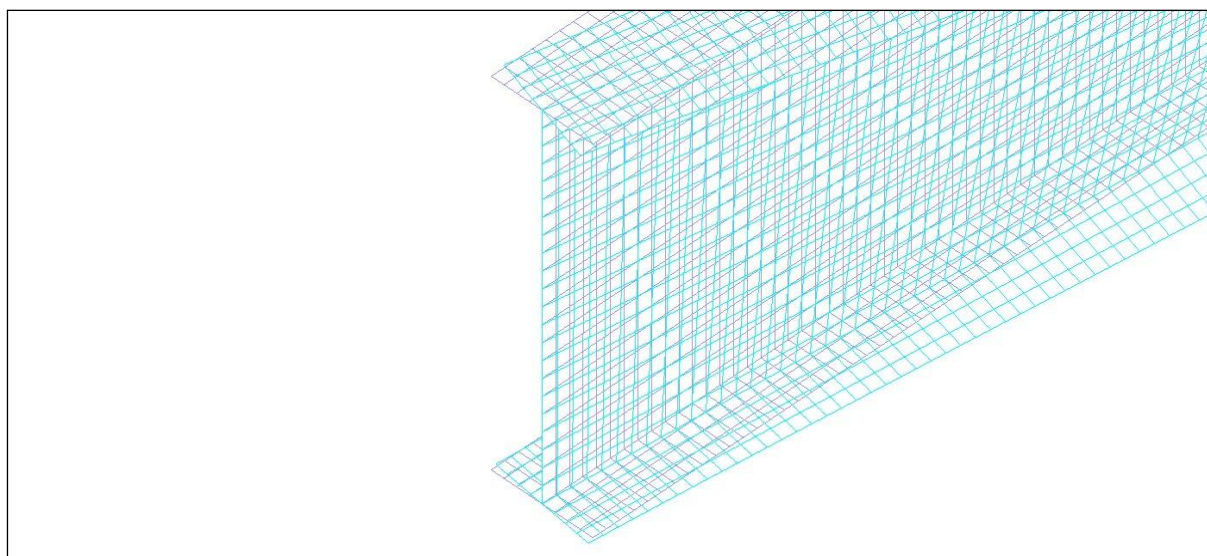


Σχήμα 5.3

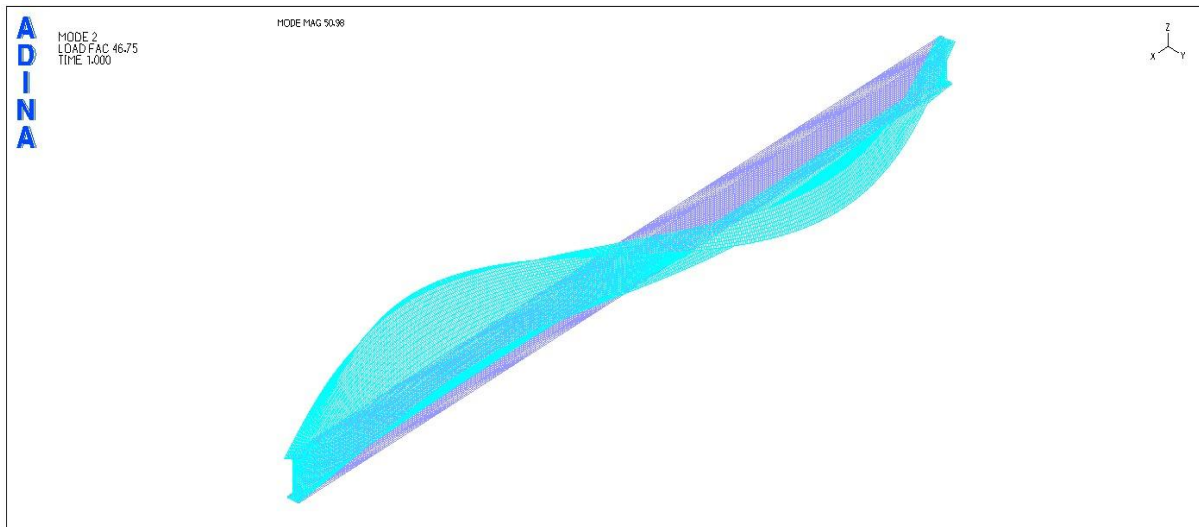
1^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



Σχήμα 5.4
1^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)

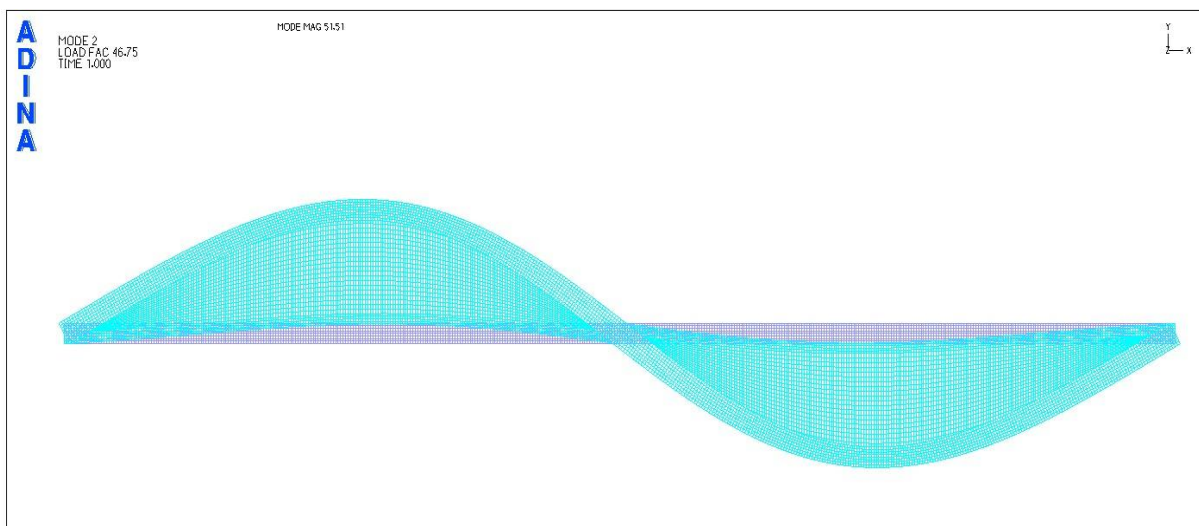


Σχήμα 5.5
Λεπτομέρεια παραμόρφωσης άκρου αμφιέριστης δοκού για την 1^η ιδιομορφή

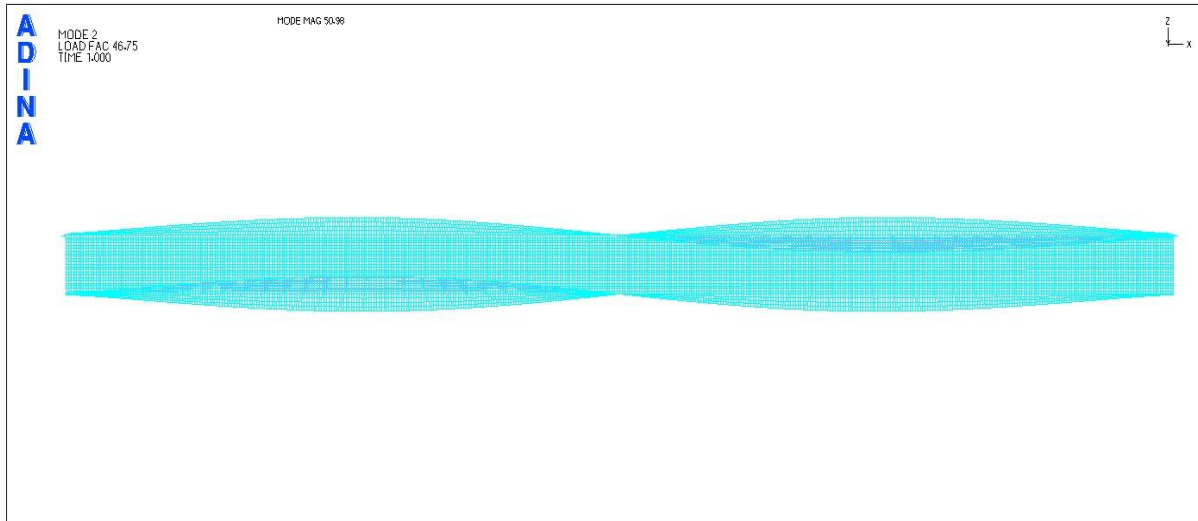


Σχήμα 5.6
2^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

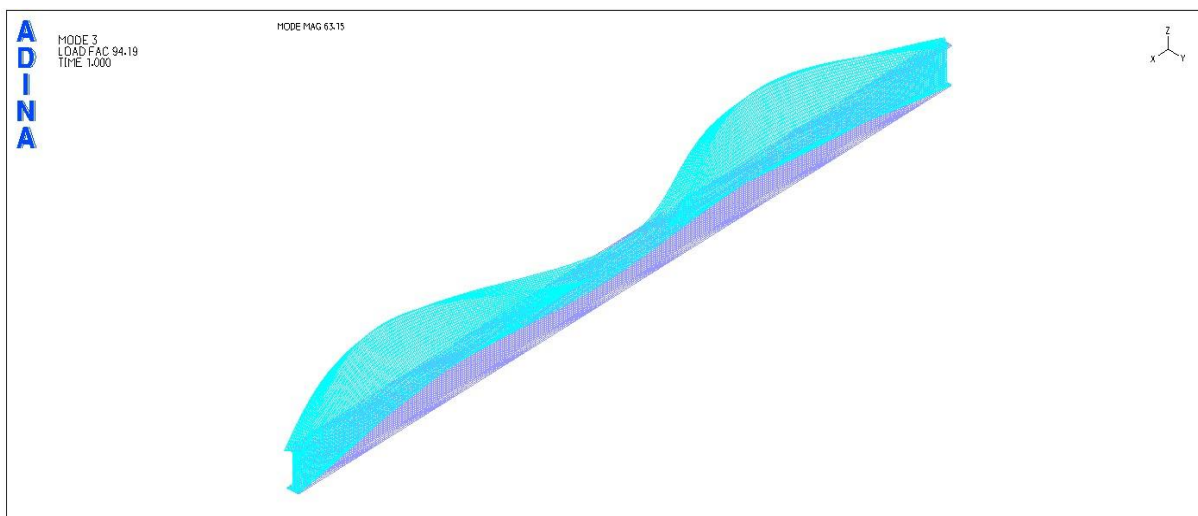
Το φορτίο λυγισμού που αντιστοιχεί στη δεύτερη ιδιομορφή προέκυψε ίσο με $P_{cr}=46,75\text{kN/m}$. Η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=46,75 \cdot 12^2/8=841,50\text{kNm}$.



Σχήμα 5.7
2^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)

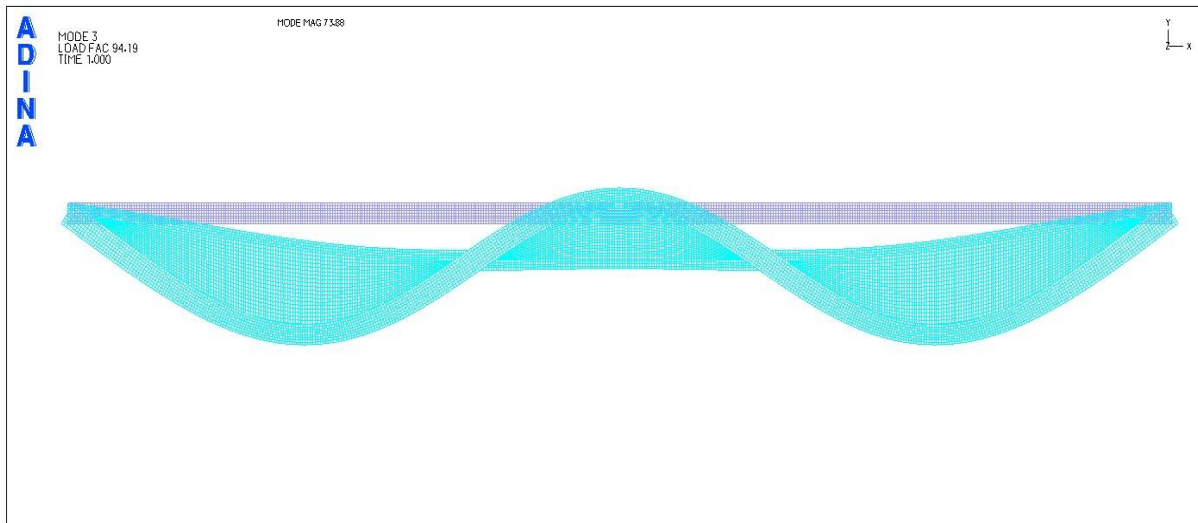


Σχήμα 5.8
2^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)

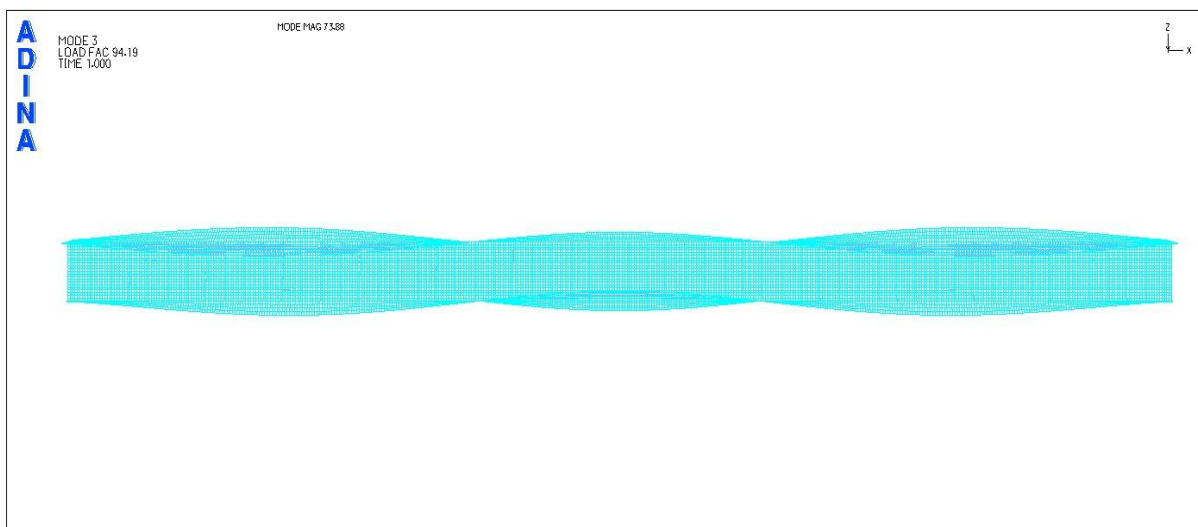


Σχήμα 5.9
3^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

Το φορτίο λυγισμού που αντιστοιχεί στην τρίτη ιδιομορφή προέκυψε ίσο με $P_{cr}=94,19\text{kN/m}$. Η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=94,19 \cdot 12^2/8=1695,42\text{kNm}$.



Σχήμα 5.10
3^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



Σχήμα 5.11
3^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ADINA, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι ίσο με $P_{cr}=15,78\text{kN/m}$ και η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού είναι ίση με $M_{cr}=284,04\text{kNm}$. Η αντίστοιχη ροπή σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα είχε προκύψει ίση με $M_{cr}=289,59\text{kNm}$ και το αντίστοιχο φορτίο ίσο με $P_{cr}=16,09\text{kN/m}$ (απόκλιση 1,9%).

5.1.4 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε χρήση γραμμικής ανάλυσης, δηλαδή η δοκός θεωρήθηκε τέλειος επίπεδος φορέας και το υλικό θεωρήθηκε ελαστικό. Με βάση τη γραμμική ανάλυση λυγισμού μπορούμε να λάβουμε πληροφορίες για το κρίσιμο φορτίο λυγισμού καθώς και για τις ιδιομορφές λυγισμού. Προκειμένου να εξάγουμε συμπεράσματα για τη μεταλυγισμική αντοχή του φορέα απαιτείται να πραγματοποιηθεί μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, η οποία βασίζεται στη θεωρία μεγάλων μετατοπίσεων και στην οποία εισάγεται στη δοκό γεωμετρική ατέλεια κατά το σχήμα κάποιας ιδιομορφής ή συνδυασμού ιδιομορφών.

Πραγματοποιείται μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με τη μέθοδο Arc-Length (collapse analysis) όπου θεωρείται ως σημείο αναφοράς ο κόμβος της μεσαίας διατομής στο σημείο συνένωσης κορμού και κάτω πέλματος. Δίνεται αρχική ατέλεια ίση με 3cm κατά τη διεύθυνση y , σύμφωνα με την πρώτη ιδιομορφή της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού. Η ατέλεια δίνεται στο σημείο συνένωσης κορμού και άνω πέλματος της μεσαίας διατομής της δοκού, στον κόμβο δηλαδή που η συγκεκριμένη ιδιομορφή παρουσιάζει μέγιστη μετακίνηση. Ο υπολογισμός της έγινε ως εξής:

Σύμφωνα με το κεφάλαιο 5.3.4/Μέρος 1-1 του Ευρωκώδικα 3, για την ανάλυση δεύτερης τάξης που λαμβάνει υπόψη το στρεπτοκαμπτικό λυγισμό ενός μέλους υπό κάμψη, οι ατέλειες λαμβάνονται ίσες με $k \cdot e_{0,d}$ όπου η συνιστώμενη τιμή του k είναι ίση με 0,5 και $e_{0,d}$ η ισοδύναμη αρχική ατέλεια στον ασθενή άξονα της εξεταζόμενης διατομής και ίση με:

$$e_{0,d} = a \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} = a \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot \frac{W_{pl,z}}{A} \quad (5.1)$$

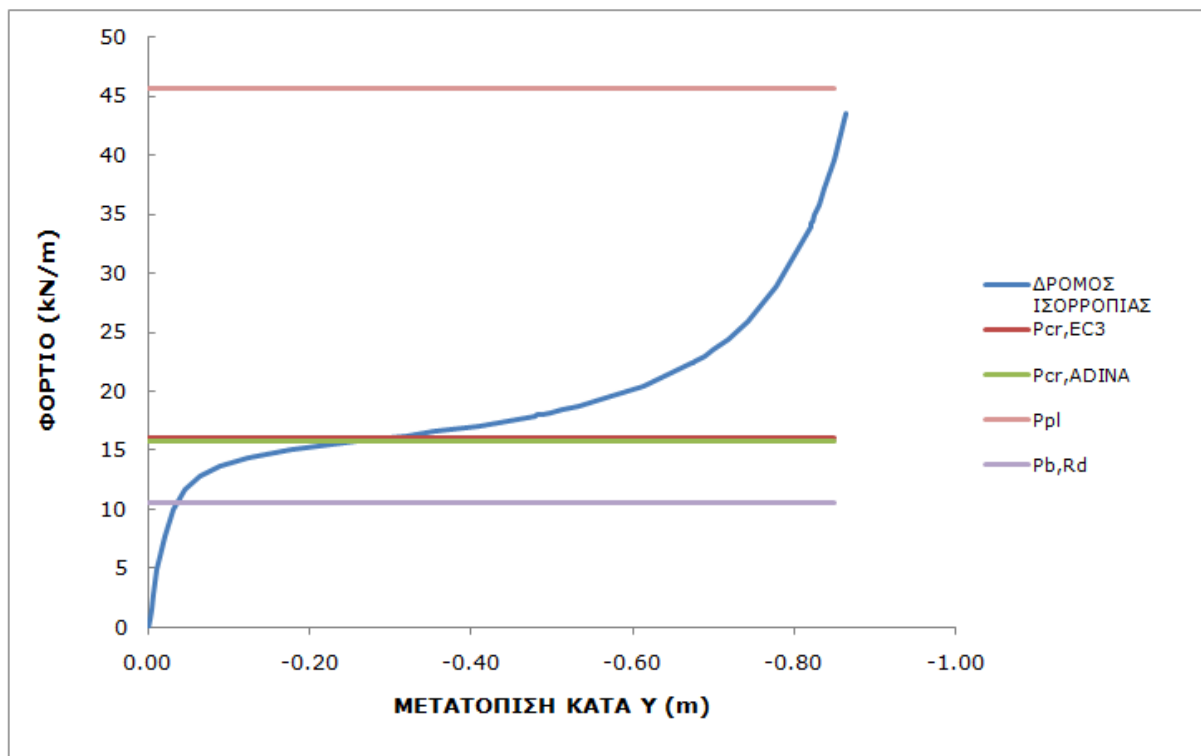
a = συντελεστής ατέλειας, ίσος με 0,76 για καμπύλη λυγισμού d

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{L_{cr,z}}{\sqrt{\frac{I_z}{A} \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}}} = \frac{1200}{\sqrt{\frac{2682,4}{164} \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{210000}{235}}}} = 3,16$$

$$\text{Επομένως, } e_{0,d} = 0,76 \cdot (3,16 - 0,2) \cdot \frac{431,50}{164} = 5,92 \text{ cm}$$

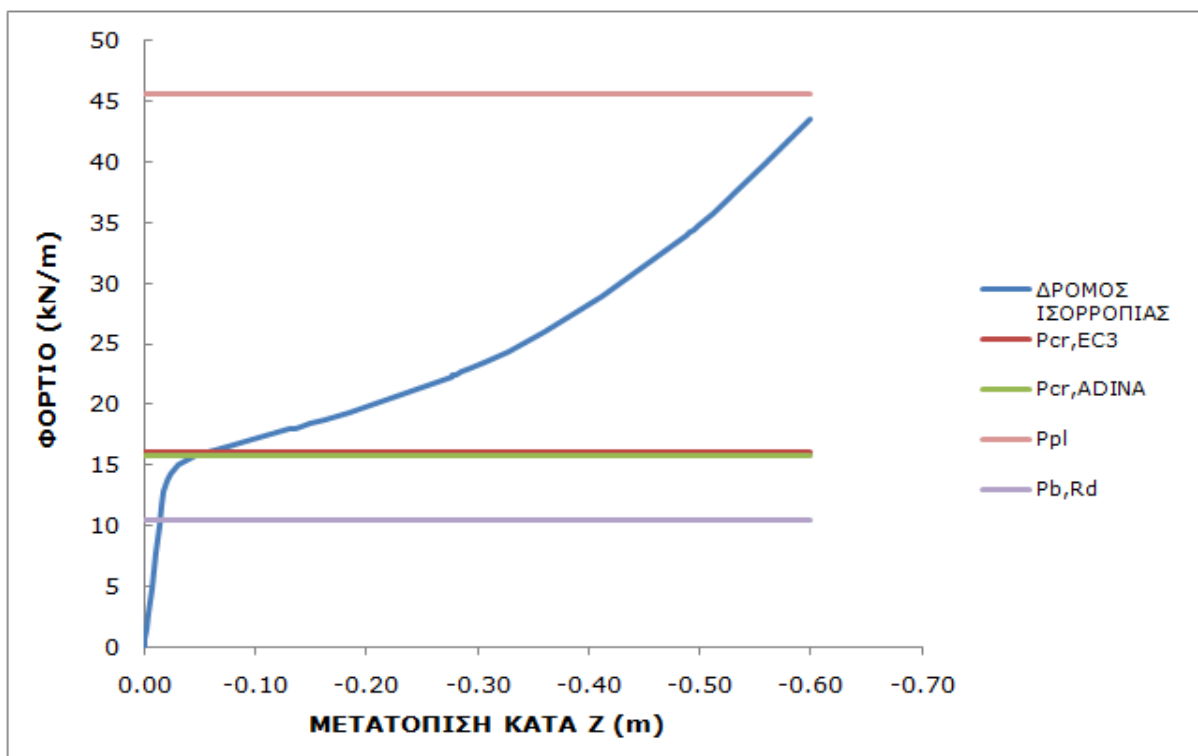
Συνεπώς η ατέλεια είναι ίση με $0,5 \cdot 5,92 = 2,96 \text{ cm}$.

Δίνεται, λοιπόν, στο φορέα αρχική γεωμετρική ατέλεια 3cm κατά το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού.



Σχήμα 5.12

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



Σχήμα 5.13

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

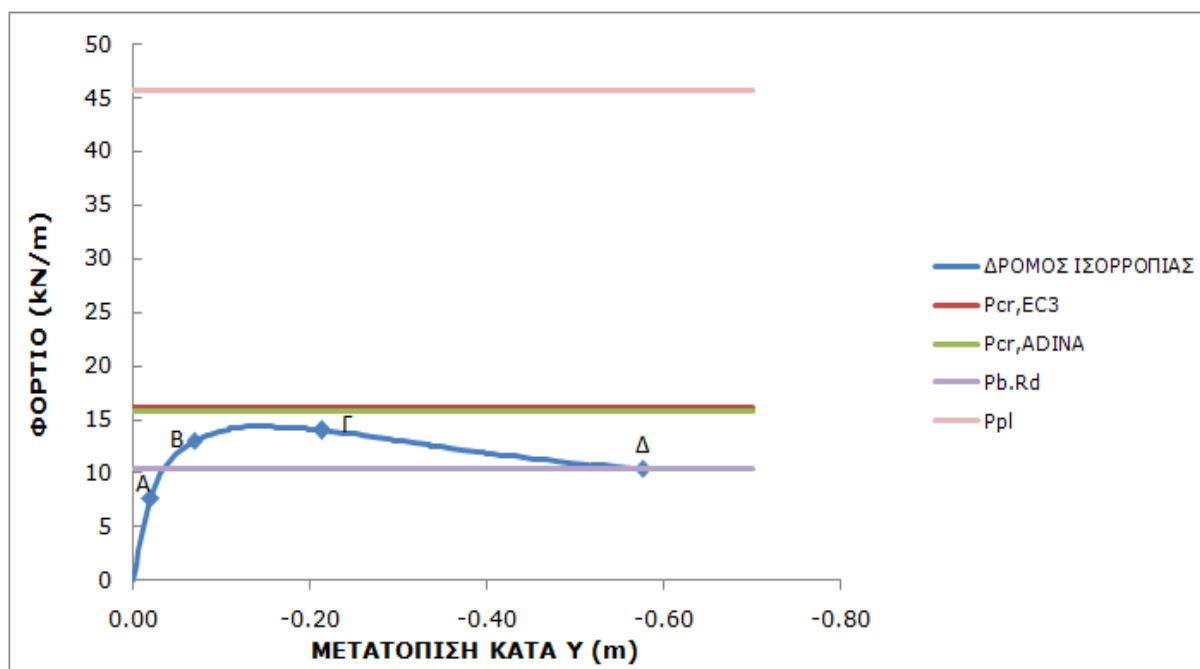
Από το δρόμο ισορροπίας της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας παρατηρούμε ότι για φορτίο ίσο περίπου με 15kN/m έχουμε σημαντική μείωση της κλίσης του διαγράμματος, που αντιστοιχεί σε μείωση της δυσκαμψίας της δοκού λόγω λυγισμού. Η τιμή αυτή είναι λίγο μικρότερη από την τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού όπως έχει υπολογιστεί από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού ($P_{cr}=15,78\text{kN/m}$) λόγω της ύπαρξης της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας, η οποία επιταχύνει την εμφάνιση πλευρικού λυγισμού στη δοκό.

Χαρακτηριστικό είναι ότι ο φορέας διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή όπως φαίνεται από τον ανοδικό κλάδο, καθώς στην ανάλυση αυτή δεν έχει υπεισέλθει η μη γραμμικότητα υλικού.

5.1.5 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

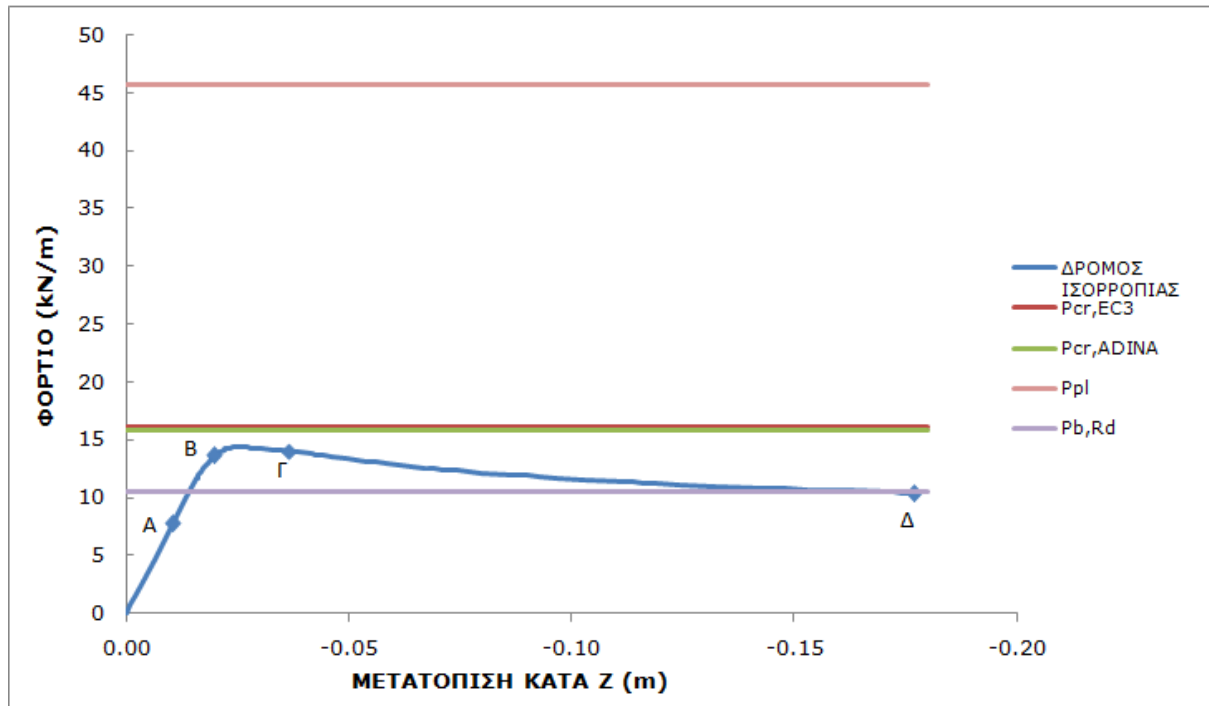
Είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί συνδυασμένη ανάλυση μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας προκειμένου να λάβουμε ακριβή αποτελέσματα για την πραγματική συμπεριφορά του φορέα και να έχουμε σαφή εικόνα της μεταλυγισμικής του συμπεριφοράς. Για κάποια τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου οι τάσεις σε κάποια σημεία της δοκού θα φθάσουν το όριο διαρροής και στη συνέχεια οι μετατοπίσεις δε θα αυξάνονται αναλογικά με την αύξηση του φορτίου. Αντιθέτως, μικρή αύξηση του φορτίου θα επιφέρει μεγάλες παραμορφώσεις καθώς η δοκός θα έχει εισέλθει στην πλαστική περιοχή μέχρι την αστοχία του φορέα.

Για το λόγο αυτό γίνεται πάλι η προηγούμενη μη γραμμική ανάλυση αλλά με υλικό ελαστικό-τελείως πλαστικό αυτήν τη φορά. Χρησιμοποιείται χάλυβας S235 χωρίς κράτυνση και δίνεται πάλι ατέλεια μεγέθους 3cm με το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής. Η μη γραμμική ανάλυση γίνεται με τη μέθοδο Arc-Length κατά τα γνωστά.



Σχήμα 5.14

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



Σχήμα 5.15

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

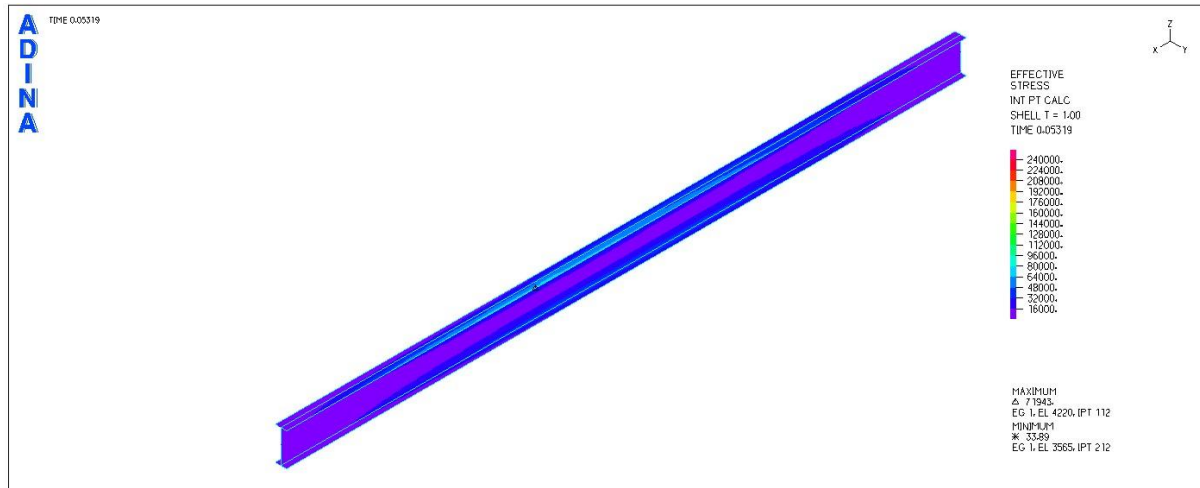
Παρατηρούμε ότι οι δρόμοι ισορροπίας για μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας παρουσιάζουν καθοδικό κλάδο μετά το λυγισμό της δοκού. Η τιμή του φορτίου που αντιστοιχεί σε λυγισμό είναι λίγο μικρότερη από το κρίσιμο φορτίο λυγισμού που έχει βρεθεί, εξαιτίας της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας όπως επισημάνθηκε και προηγουμένως. Η μη γραμμικότητα του υλικού δεν επιτρέπει στη δοκό μεταλυγισμική αντοχή, αλλά αντιθέτως επιταχύνει την αστοχία του φορέα.

Στα σχήματα 5.16-5.45 παρουσιάζονται εικόνες των τάσεων και των παραμορφώσεων της δοκού για τα 4 χαρακτηριστικά σημεία που σημειώνονται στους δρόμους ισορροπίας.

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

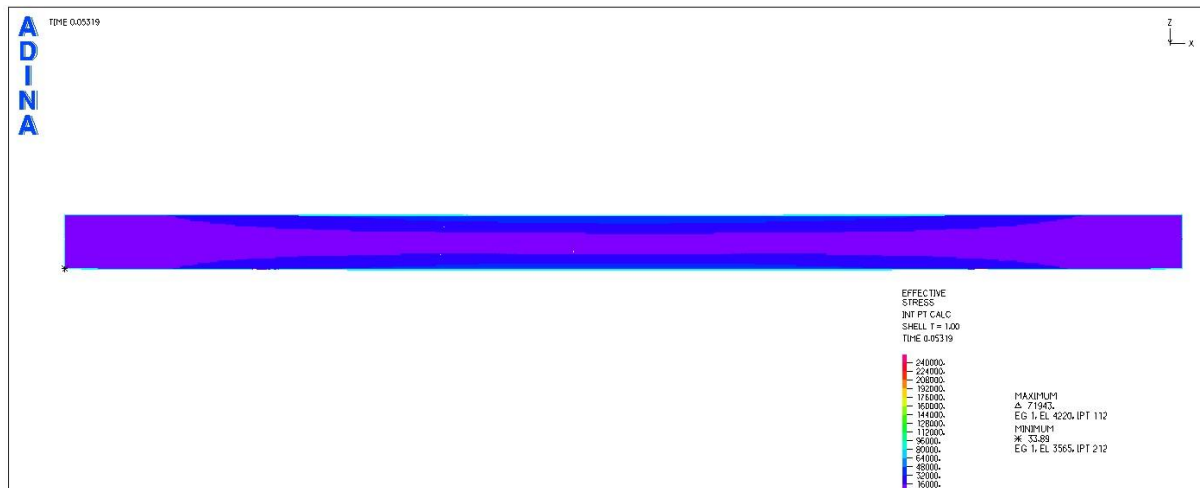
ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ VON MISES

ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,05)



Σχήμα 5.16

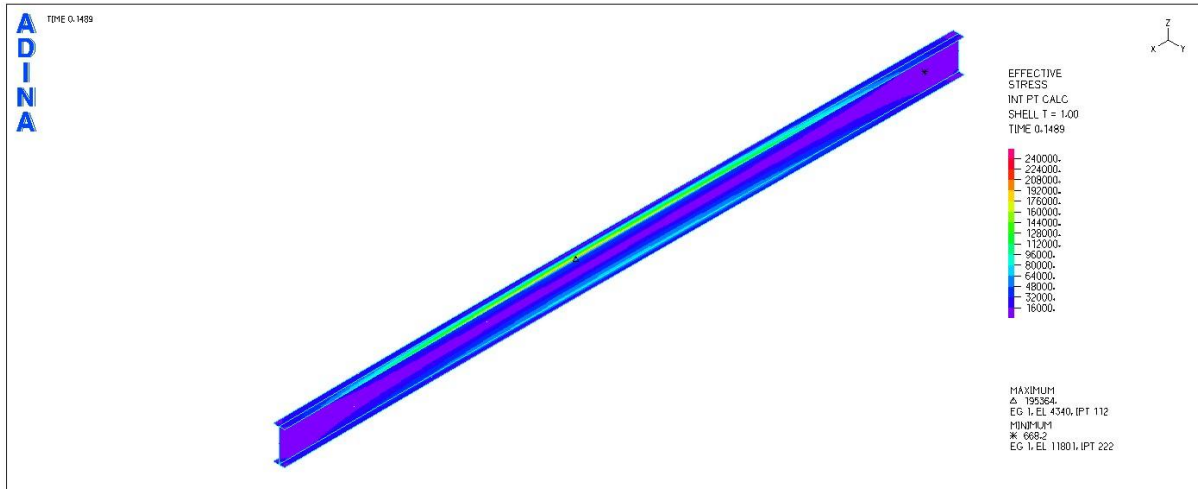
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο A (προοπτικό)



Σχήμα 5.17

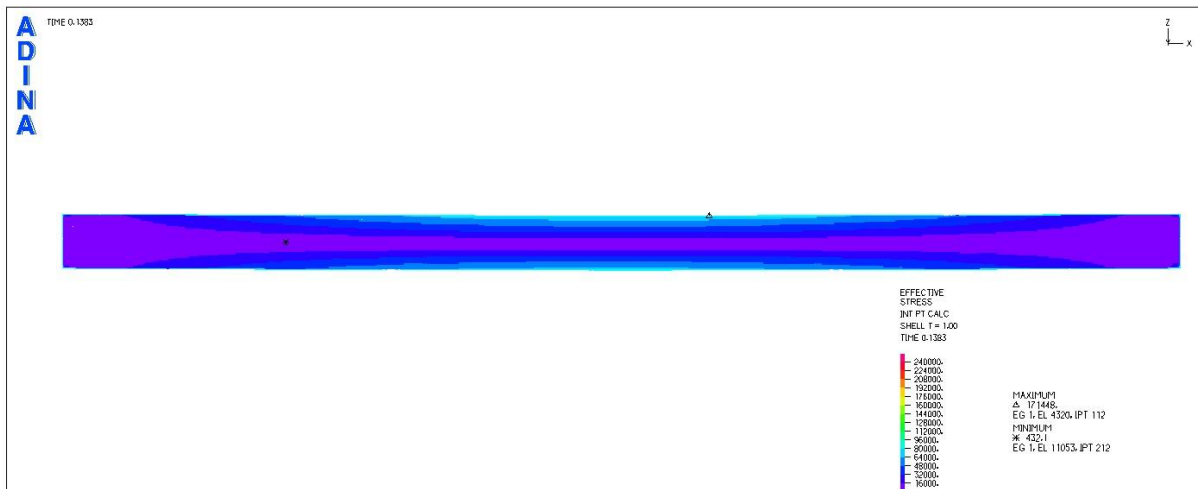
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο A (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ B (t=0,14)



Σχήμα 5.18

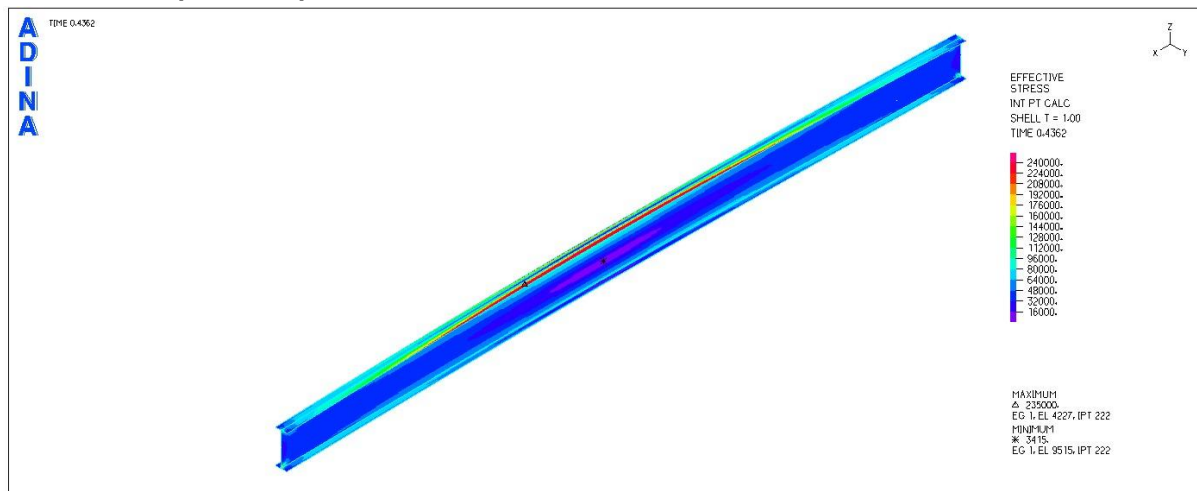
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο B (προοπτικό)



Σχήμα 5.19

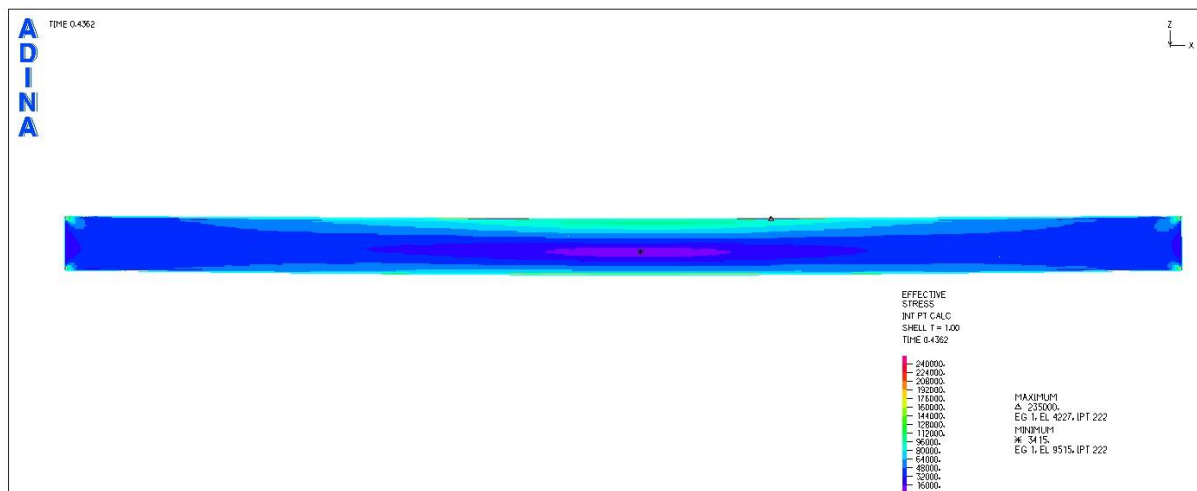
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο B (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,44)



Σχήμα 5.20

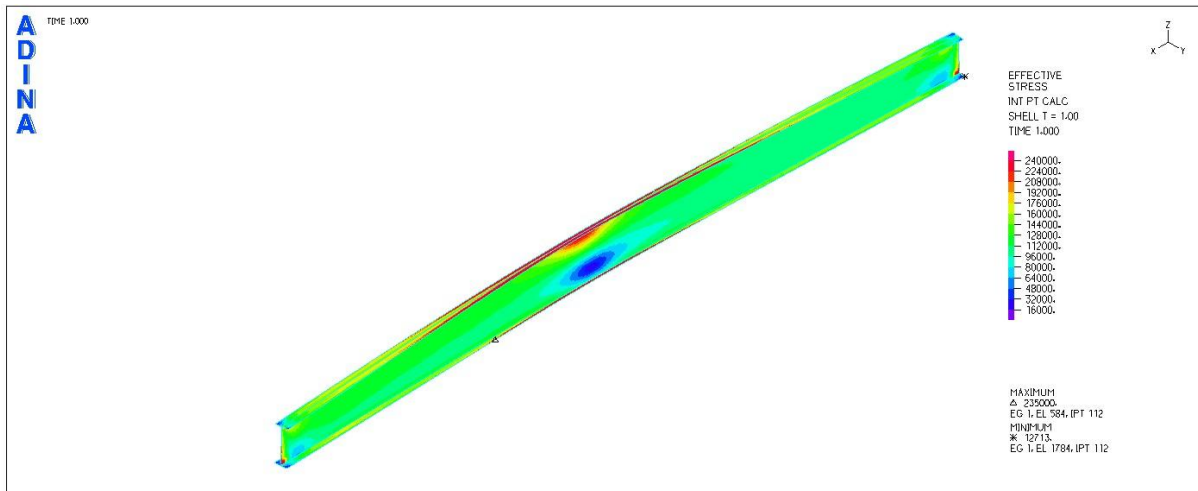
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)



Σχήμα 5.21

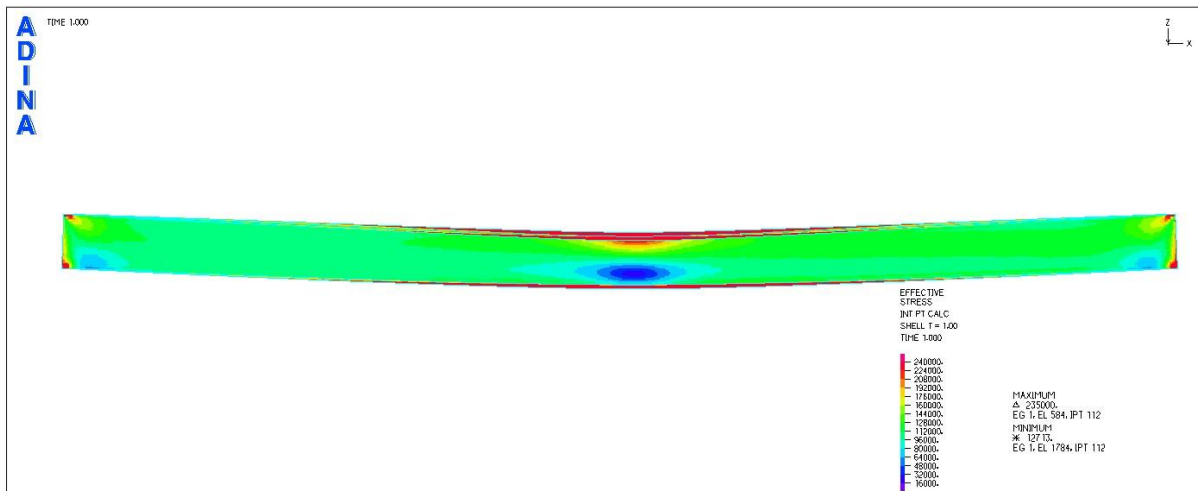
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ Δ (t=1,00)



Σχήμα 5.22

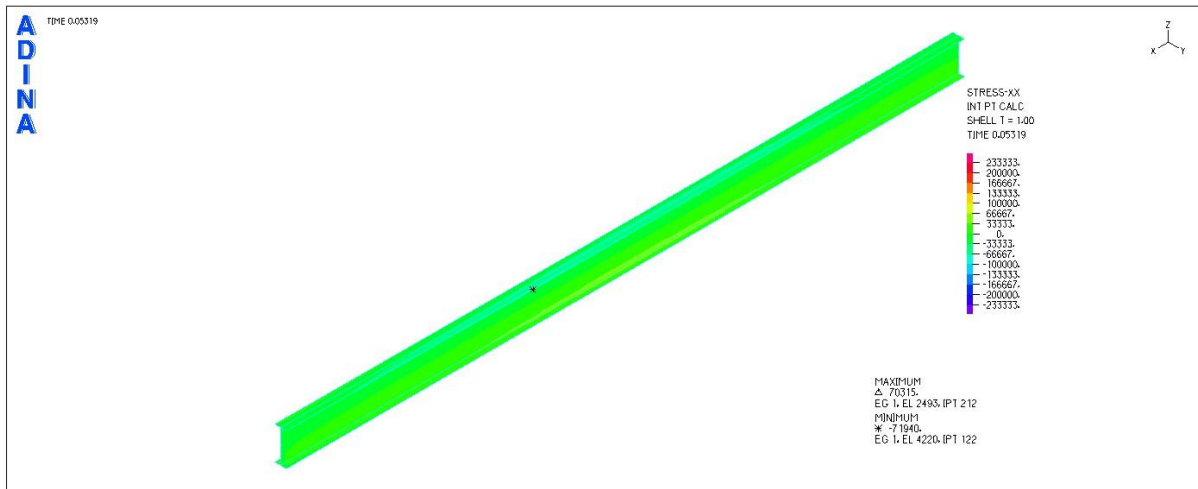
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (προοπτικό)



Σχήμα 5.23

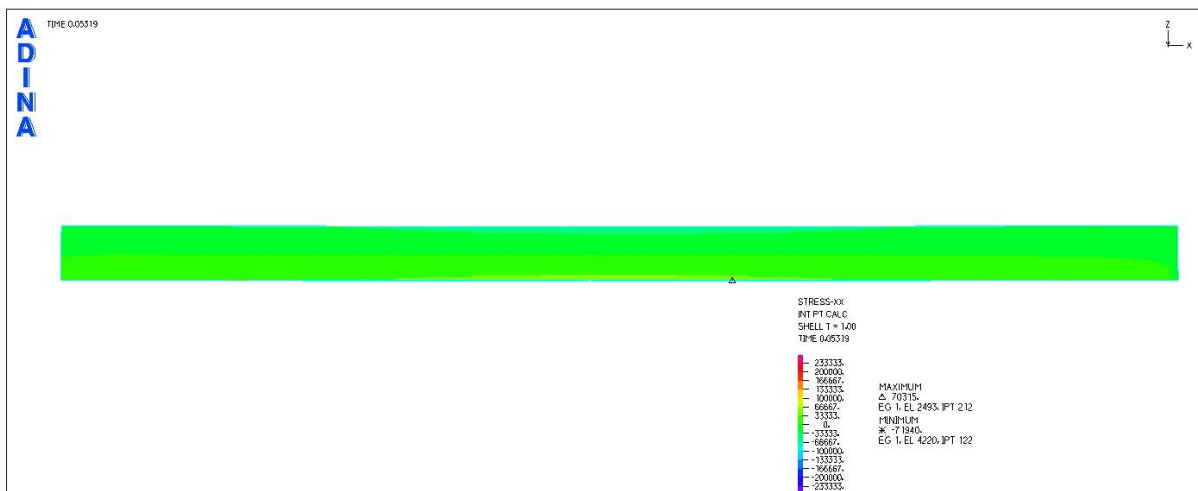
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (όψη)

ΕΙΚΟΝΕΣ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ
ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,05)



Σχήμα 5.24

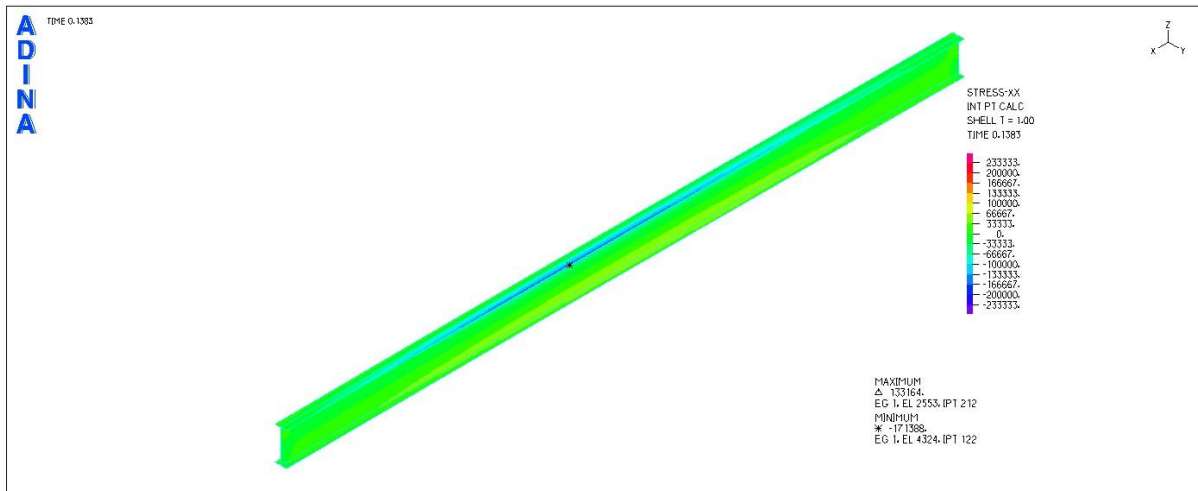
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο A (προοπτικό)



Σχήμα 5.25

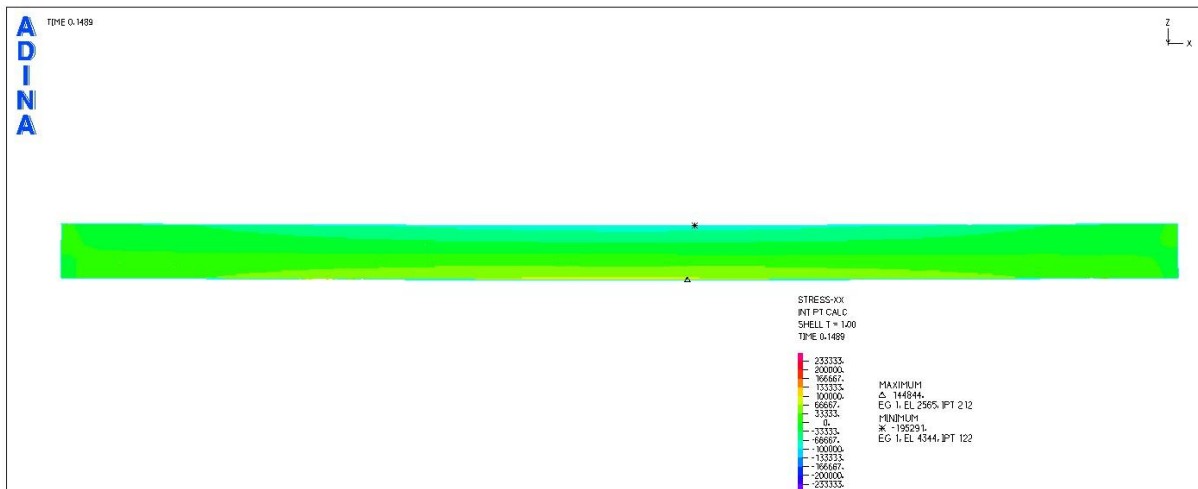
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο A (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ B (t=0,14)



Σχήμα 5.26

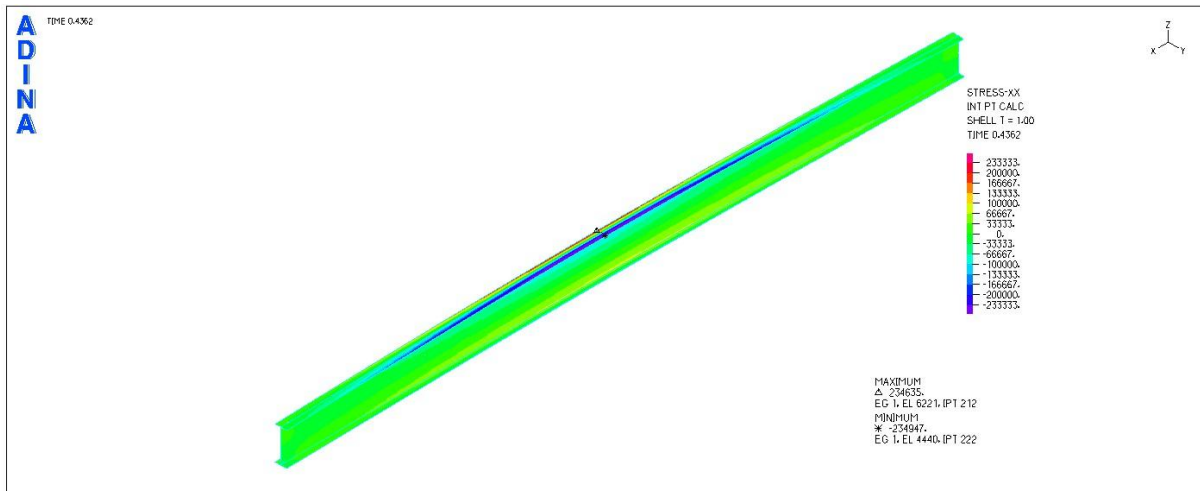
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο B (προοπτικό)



Σχήμα 5.27

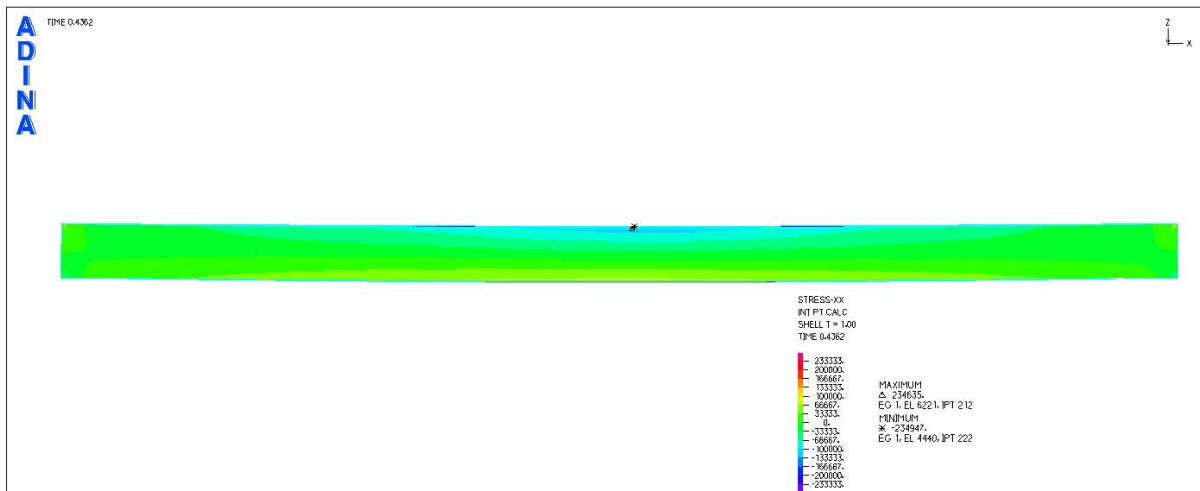
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο B (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,44)



Σχήμα 5.28

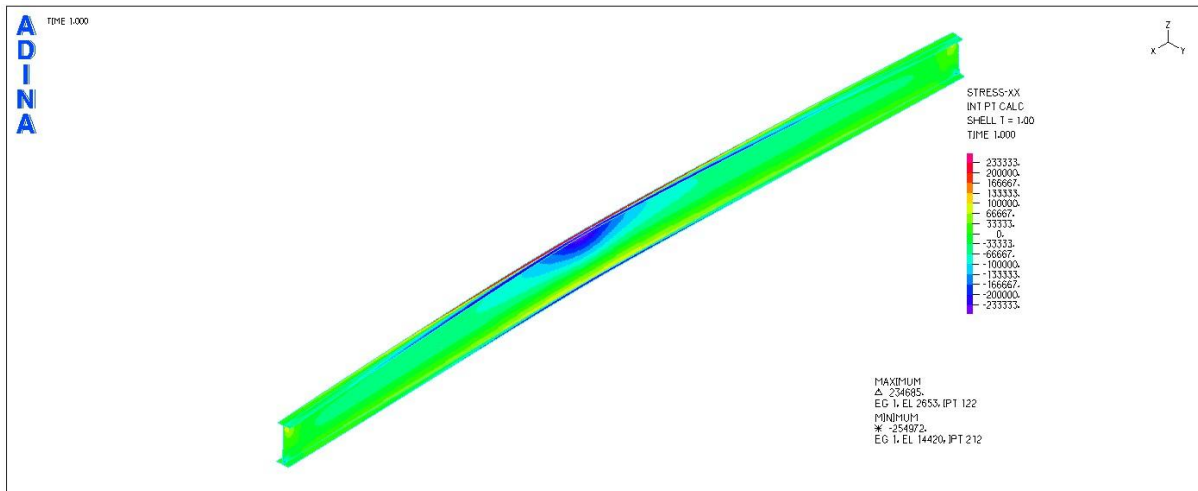
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)



Σχήμα 5.29

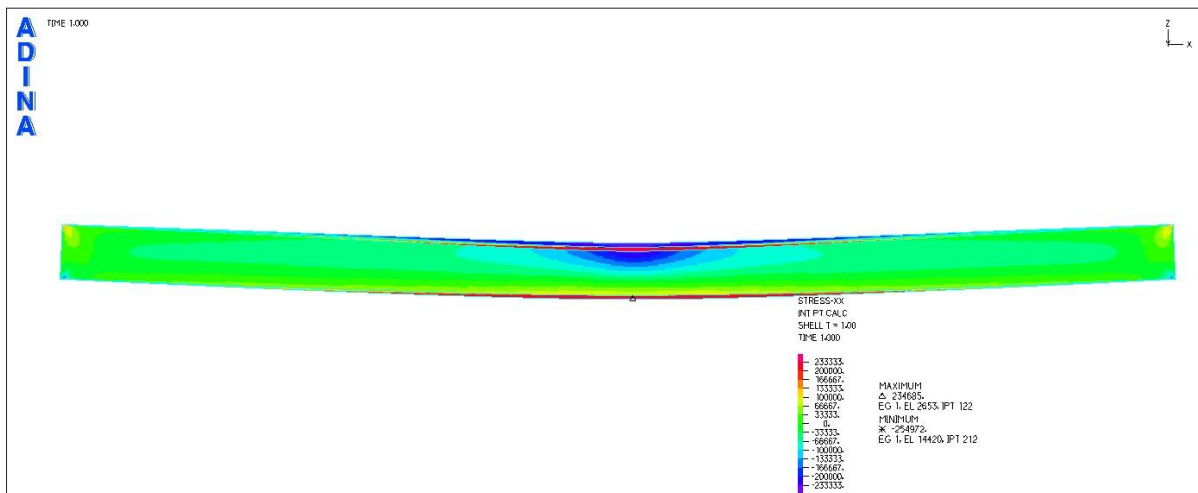
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ Δ (t=1,00)



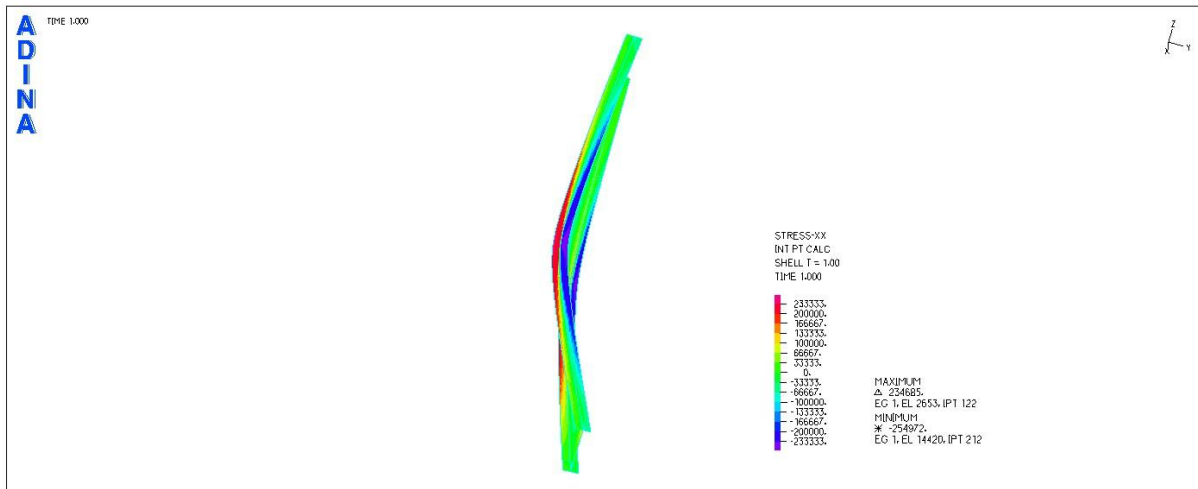
Σχήμα 5.30

Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (προοπτικό)



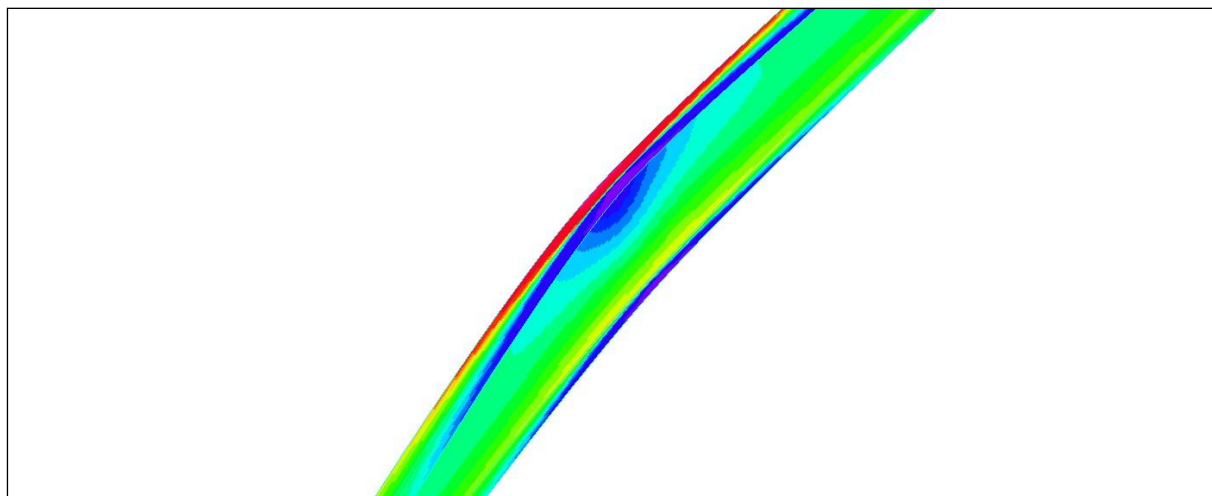
Σχήμα 5.31

Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (όψη)



Σχήμα 5.32

Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (λεπτομέρεια 1)



Σχήμα 5.33

Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (λεπτομέρεια 2)

Το σημείο A αντιστοιχεί στην ελαστική περιοχή και χαρακτηρίζεται από μικρές τιμές τάσεων και παραμορφώσεων.

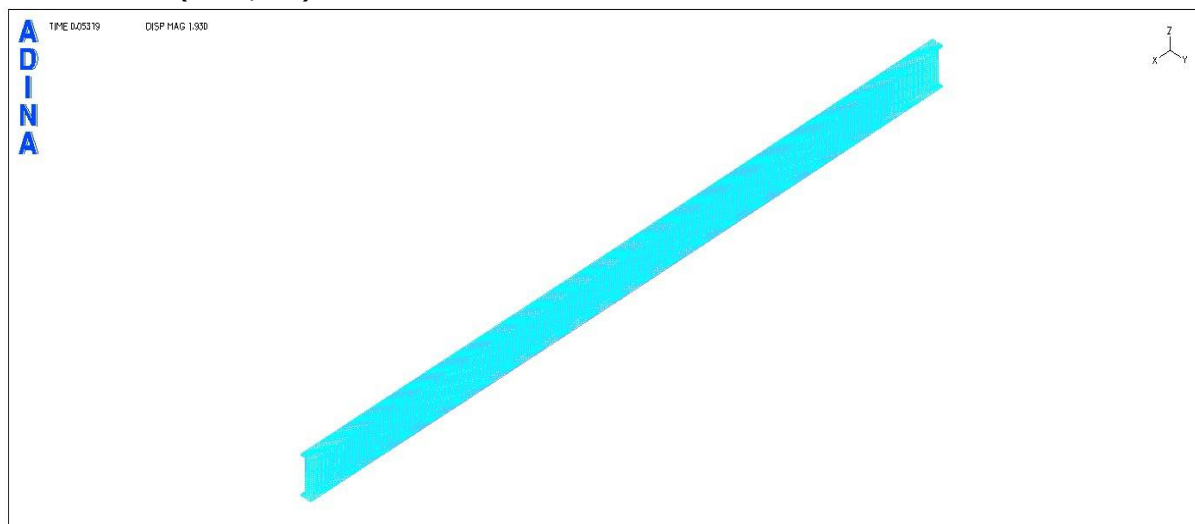
Στο σημείο B, λίγο πριν ο φορέας λυγίσει, οι τάσεις απέχουν ακόμα αρκετά από την τάση διαρροής.

Στο σημείο Γ έχει επέλθει ο λυγισμός της δοκού και κάποια σημεία του άνω πέλματος της μεσαίας διατομής έχουν αποκτήσει τάση von Mises ίση με το όριο διαρροής. Ο καθοδικός κλάδος του δρόμου ισορροπίας ξεκινάει ακριβώς όταν κάποια σημεία αποκτήσουν τάση ίση με την τάση διαρροής.

Στο σημείο Δ παρατηρούνται μεγάλες τιμές ορθών τάσεων στο άνω πέλμα στη μεσαία διατομή, που είναι το κυρίως εκτρεπόμενο λόγω πλευρικού λυγισμού. Αξιοσημείωτο είναι ότι ενώ το άνω πέλμα είναι θλιβόμενο, στο μισό άνω πέλμα παρατηρούνται θλιπτικές τάσεις και στο άλλο μισό εφελκυστικές τάσεις, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στις λεπτομέρειες 5.32 και 5.33. Αυτό προφανώς συμβαίνει διότι μπορεί η δοκός να υφίσταται κάμψη με αποτέλεσμα το άνω πέλμα της να θλίβεται, ωστόσο ο πλευρικός λυγισμός έχει ακριβώς αυτήν την ερμηνεία: τα πέλματα της δοκού λυγίζουν ως προς τον ισχυρό τους άξονα με αποτέλεσμα το μισό πέλμα να θλίβεται και το υπόλοιπο να εφελκύεται.

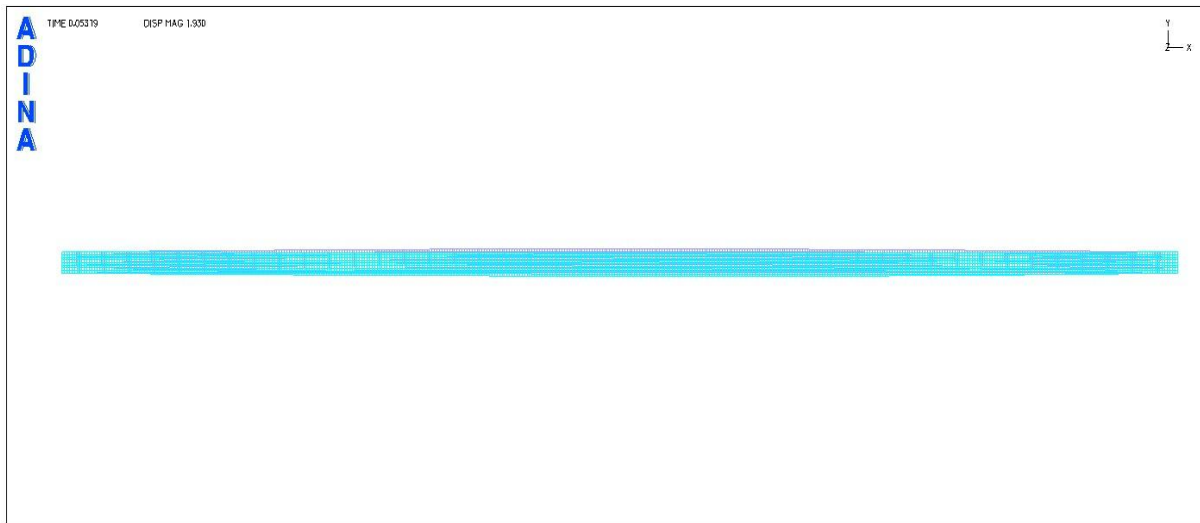
ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΣΗΜΕΙΟ A ($t=0,05$)

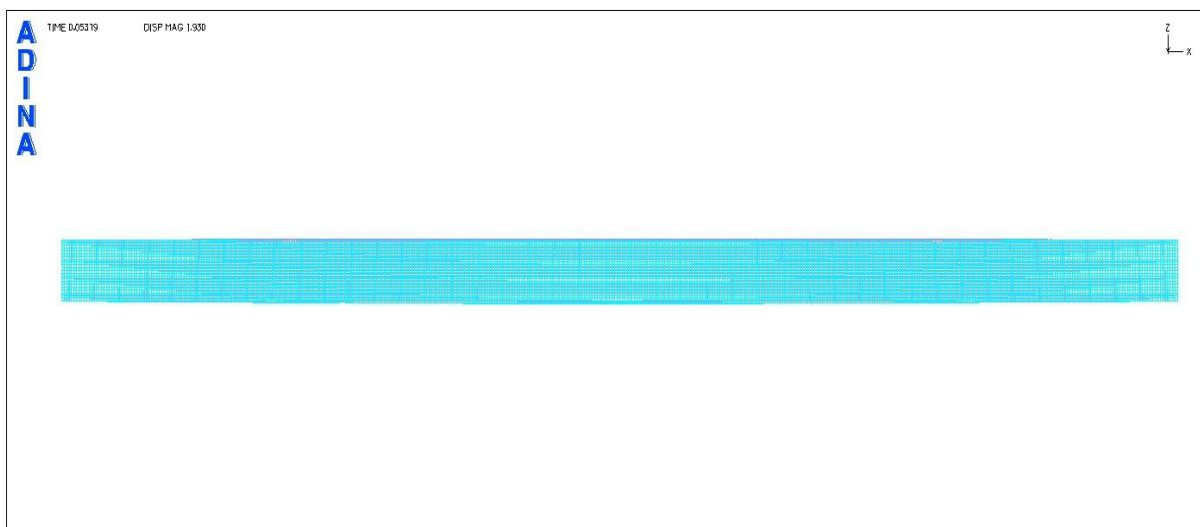


Σχήμα 5.34

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο A (προοπτικό)

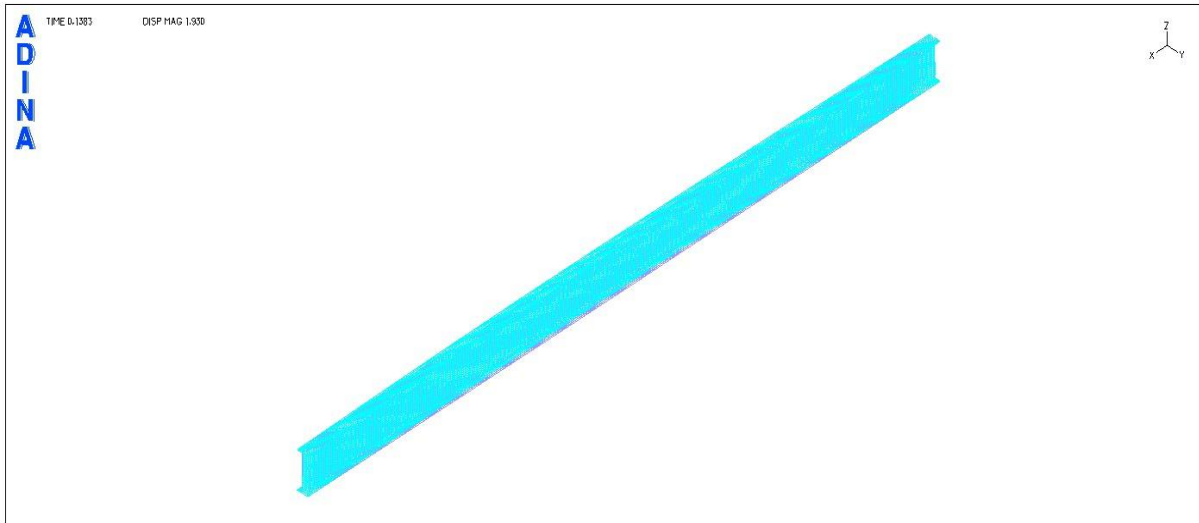


Σχήμα 5.35
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο A (κάτοψη)



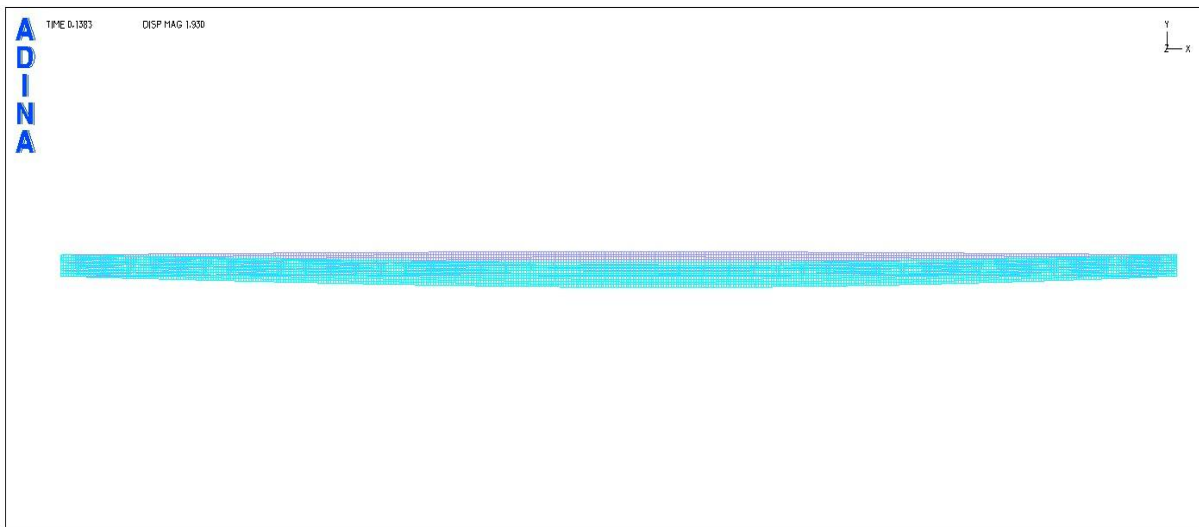
Σχήμα 5.36
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο A (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ Β (t=0,14)



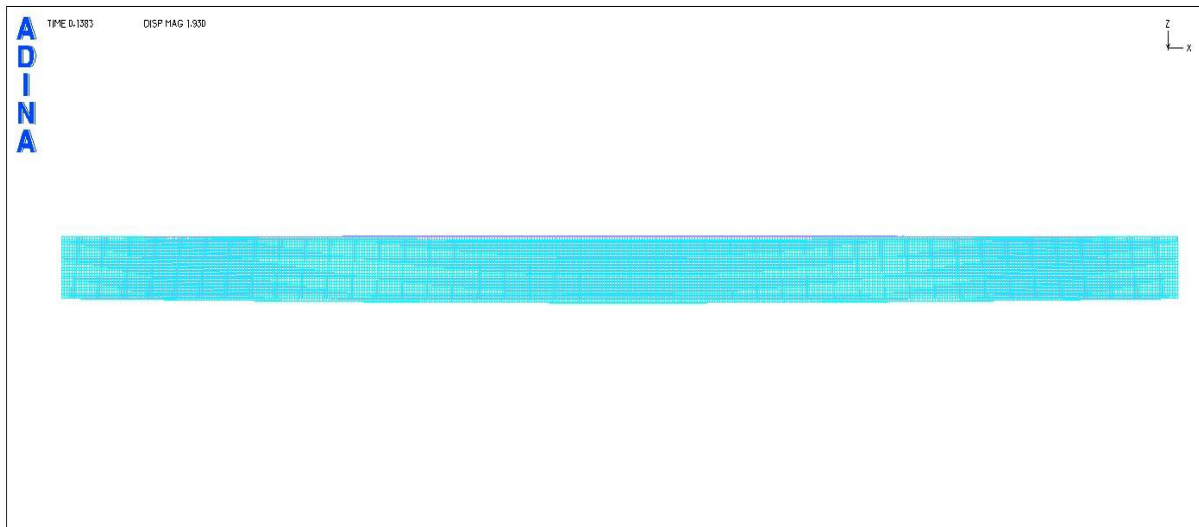
Σχήμα 5.37

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β (προοπτικό)



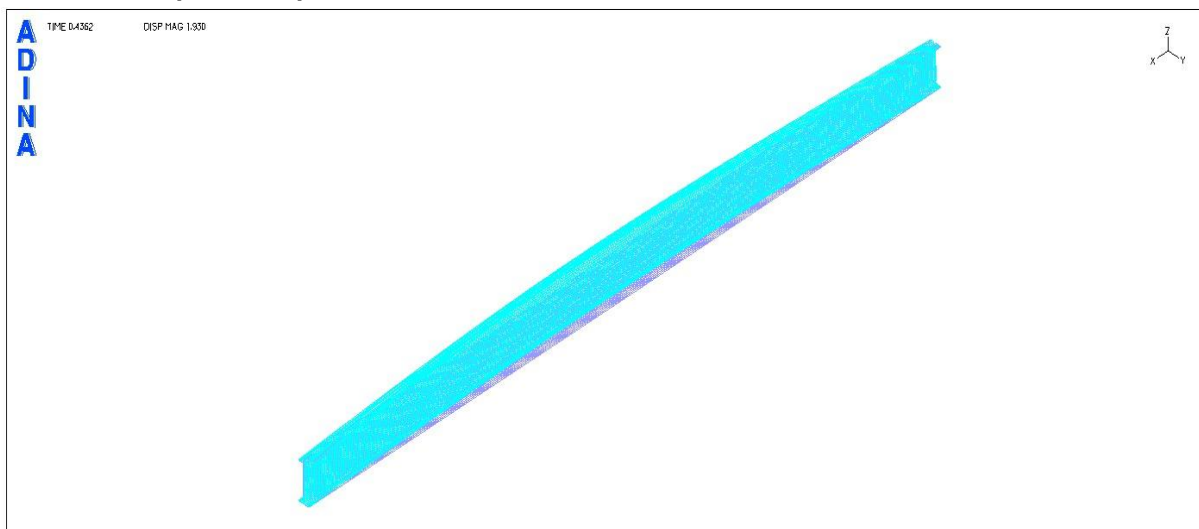
Σχήμα 5.38

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β (κάτοψη)

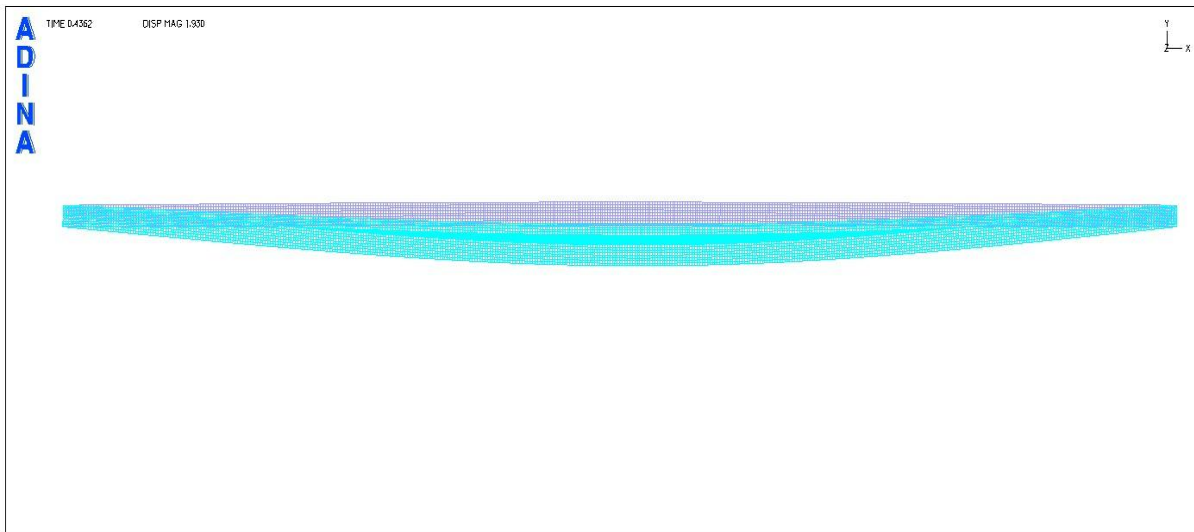


Σχήμα 5.39
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β (όψη)

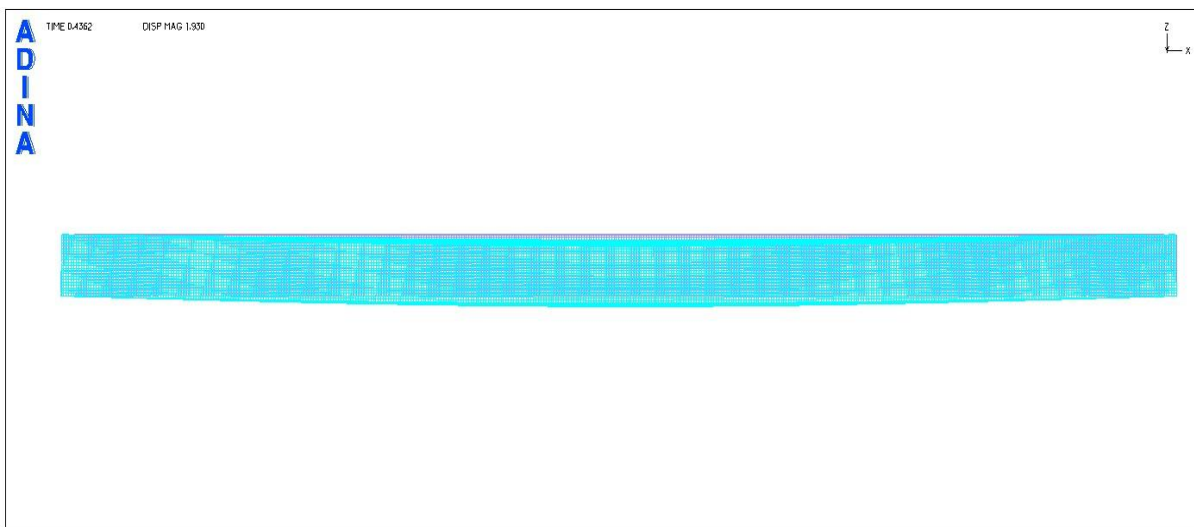
ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,44)



Σχήμα 5.40
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)

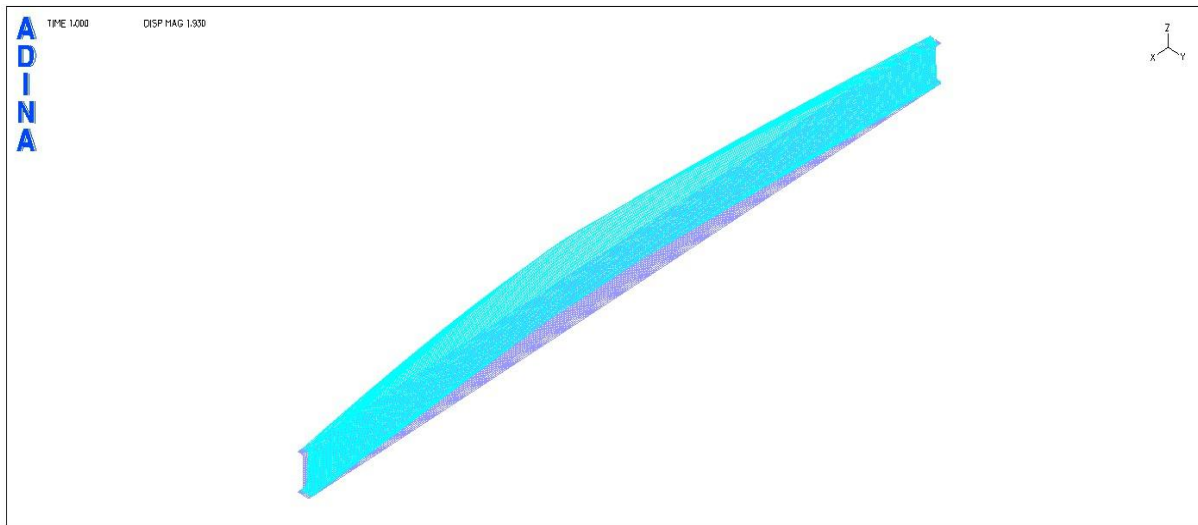


Σχήμα 5.41
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (κάτοψη)



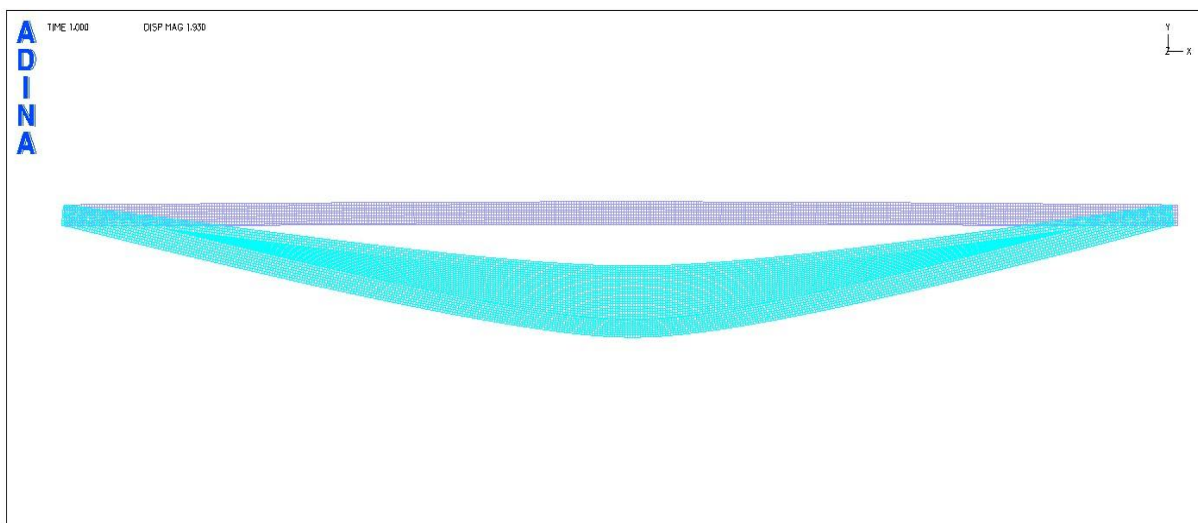
Σχήμα 5.42
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ Δ (t=1,00)



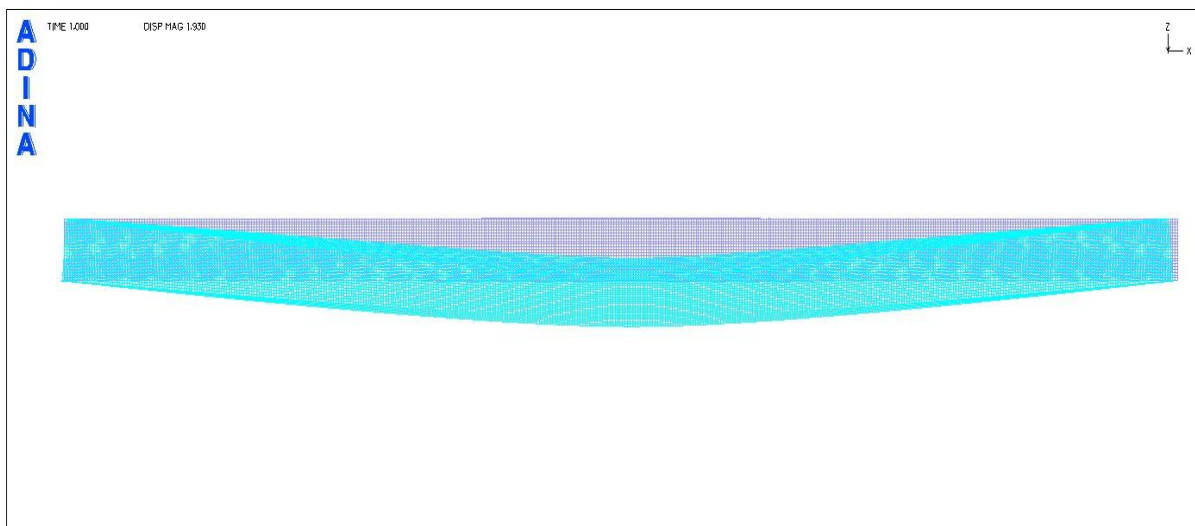
Σχήμα 5.43

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (προοπτικό)



Σχήμα 5.44

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (κάτοψη)

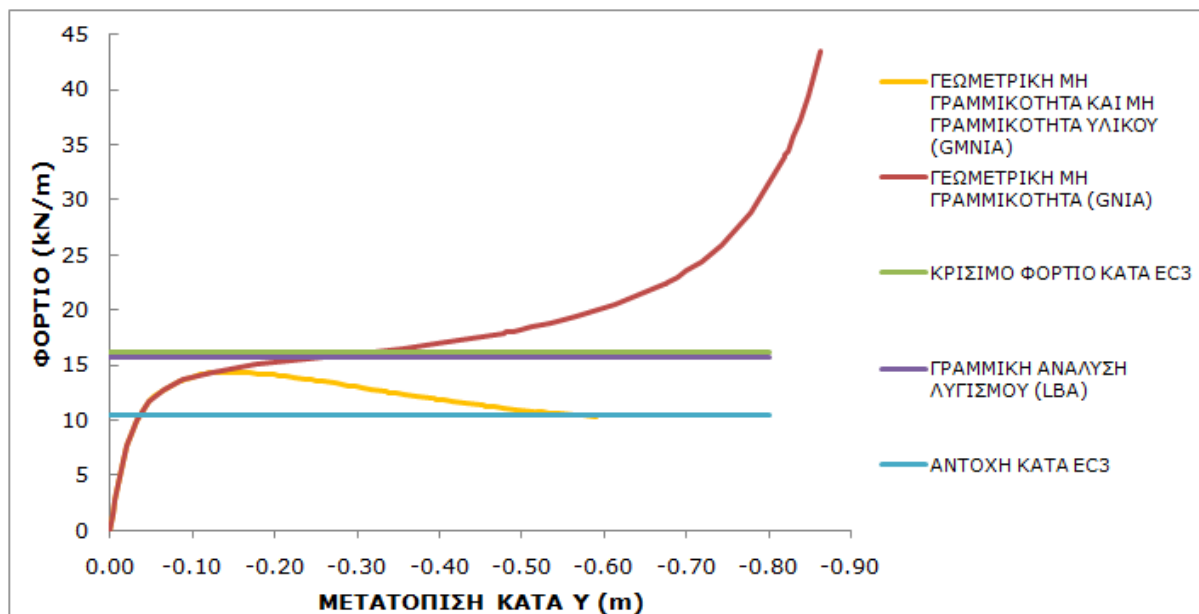


Σχήμα 5.45

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (όψη)

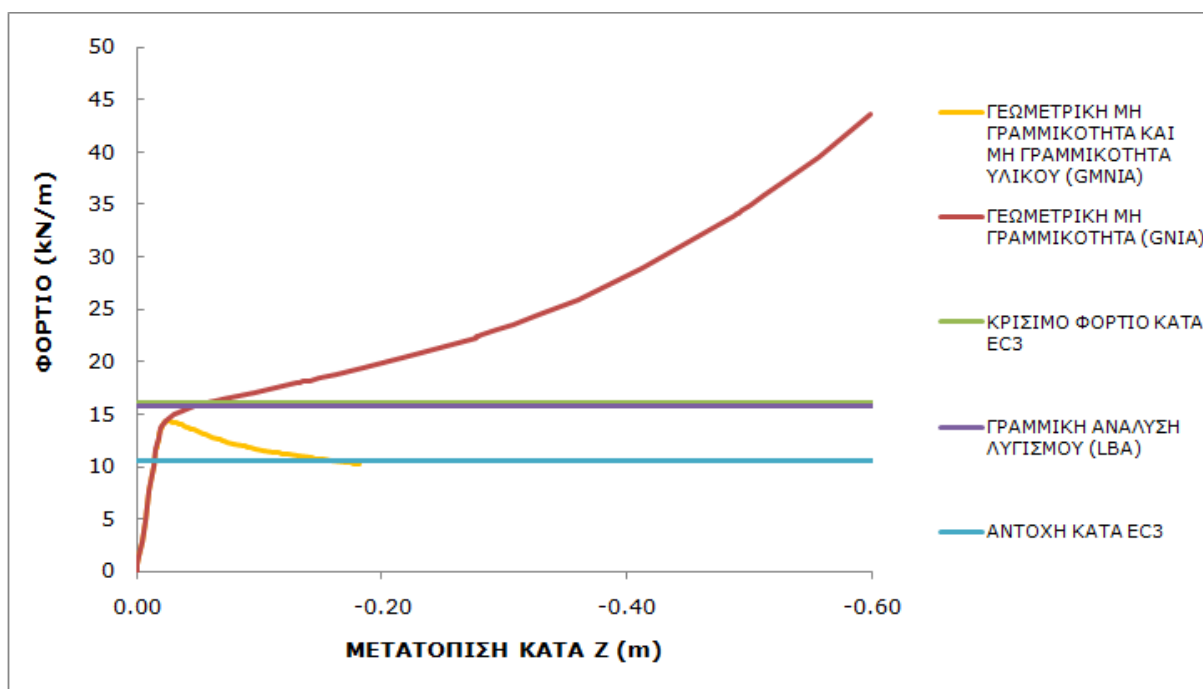
5.1.6 Συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας για όλες τις αναλύσεις

Στα σχήματα 5.46 και 5.47 παρουσιάζονται συγκριτικά σε ενιαία διαγράμματα οι δρόμοι ισορροπίας που έχουν προκύψει στο ADINA για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού ταυτόχρονα, προκειμένου να είναι άμεσα ορατή η επίδραση της κάθε μη γραμμικότητας στη συμπεριφορά του φορέα.



Σχήμα 5.46

Δρόμοι ισορροπίας για τα 2 είδη μη γραμμικότητας που εξετάστηκαν

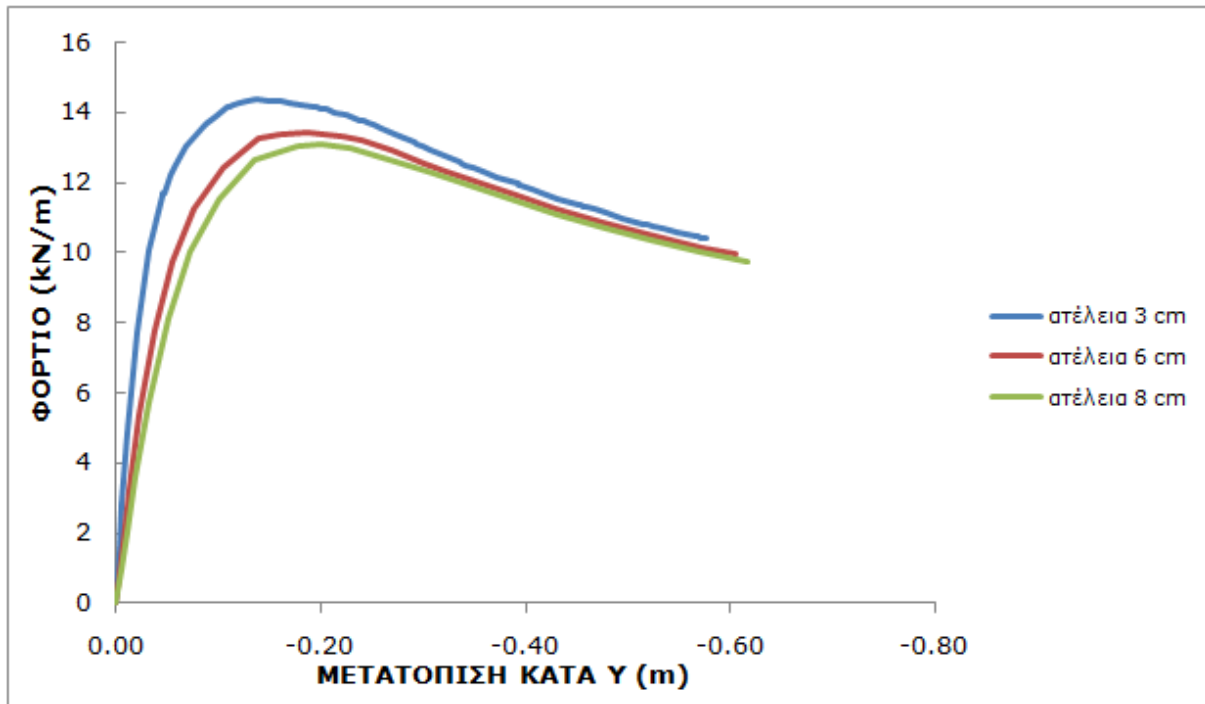


Σχήμα 5.47

Δρόμοι ισορροπίας για τα 2 είδη μη γραμμικότητας που εξετάστηκαν

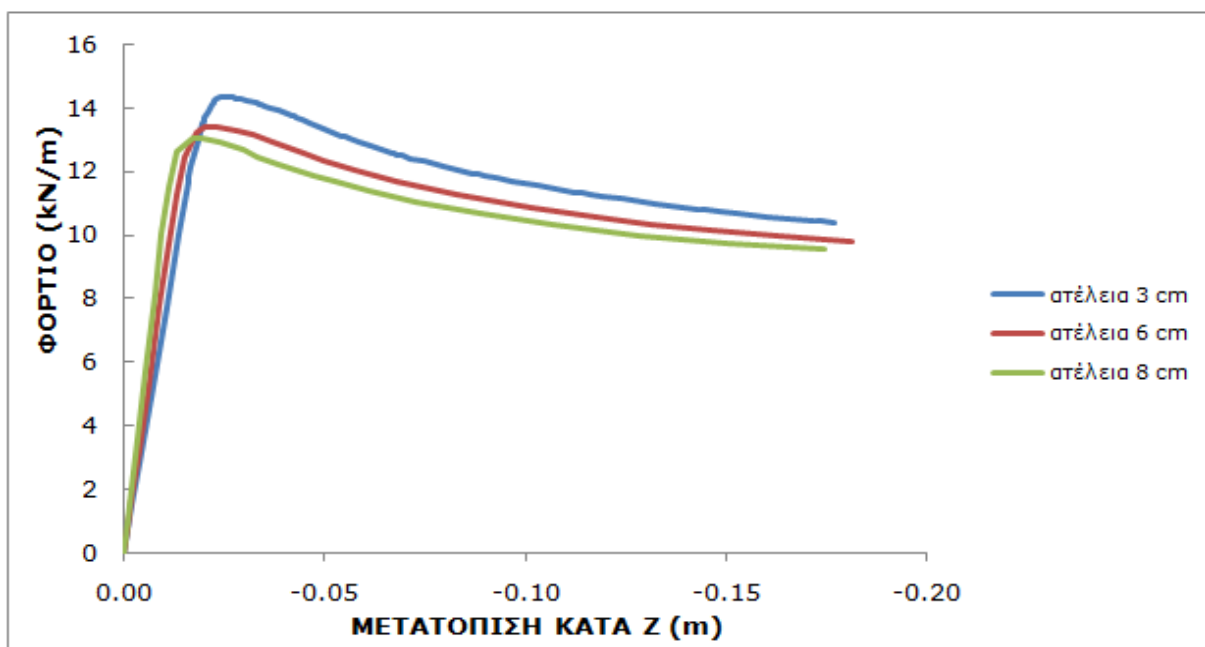
5.1.7 Επιρροή της ατέλειας στη συμπεριφορά του φορέα

Στην παράγραφο αυτή γίνεται προσπάθεια να φανεί η σημασία της ατέλειας που χρησιμοποιείται στη μη γραμμική ανάλυση με το πρόγραμμα ADINA στη συμπεριφορά του φορέα και συνεπώς στο δρόμο ισορροπίας που προκύπτει. Για το λόγο αυτό, εξετάζονται ακόμα 2 τιμές ατελειών εκτός αυτής που έχει ήδη εφαρμοστεί. Η προηγούμενη ανάλυση έχει πραγματοποιηθεί για τιμή ατέλειας ίση με 3cm κατά το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής, η οποία δίνεται στο σημείο συνένωσης κορμού και άνω πέλματος. Οι επόμενες αναλύσεις έγιναν για τιμές ατελειών 6cm και 8cm. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα και αναφέρονται σε αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας.



Σχήμα 5.48

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης για διάφορες τιμές ατέλειας



Σχήμα 5.49

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης για διάφορες τιμές ατέλειας

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι το μέγεθος της ατέλειας είναι καθοριστικό για τη συμπεριφορά του φορέα. Συγκεκριμένα, η αύξηση της ατέλειας προκαλεί αστοχία του φορέα για μικρότερη τιμή φορτίου.

5.1.8 Επιρροή της θέσης εφαρμογής του φορτίου στη συμπεριφορά του φορέα

Έως τώρα εξετάστηκε η δοκός για ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο κατά μήκος του κεντροβαρικού της άξονα. Στην παράγραφο αυτή θα γίνουν αναλύσεις για θέση άσκησης του κατανεμημένου φορτίου κατά μήκος του άνω πέλματος και κατά μήκος του κάτω πέλματος. Θα παρουσιασθούν οι τιμές του κρίσιμου φορτίου από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού με το ADINA αλλά και οι αντίστοιχες του Ευρωκώδικα. Επίσης θα παρουσιασθούν συγκριτικά οι δρόμοι ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας.

Όπως αναμένεται, το κρίσιμο φορτίο μειώνεται καθώς το φορτίο μετακινείται από το κάτω πέλμα στο άνω, επειδή το φορτίο στο κάτω πέλμα δημιουργεί μία ροπή επαναφοράς έναντι του πλευρικού λυγισμού, ενώ στο άνω πέλμα ενισχύει την πλευρική εκτροπή της δοκού.

Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι κρίσιμες ροπές πλευρικού λυγισμού κατά τον Ευρωκώδικα 3 για τις 3 θέσεις άσκησης του φορτίου ενώ στον πίνακα 5.4 τα κρίσιμα φορτία που προέκυψαν από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού με το πρόγραμμα ADINA.

	M_{cr} κατά EC3 (kNm)	P_{cr} κατά EC3 (kN/m)
Άνω πέλμα	235,60	13,09
Κέντρο βάρους	289,59	16,09
Κάτω πέλμα	355,96	19,78

Πίνακας 5.3

Συγκριτική παρουσίαση κρίσιμων φορτίων κατά τον Ευρωκώδικα 3 για διαφορετικές θέσεις άσκησης φορτίου

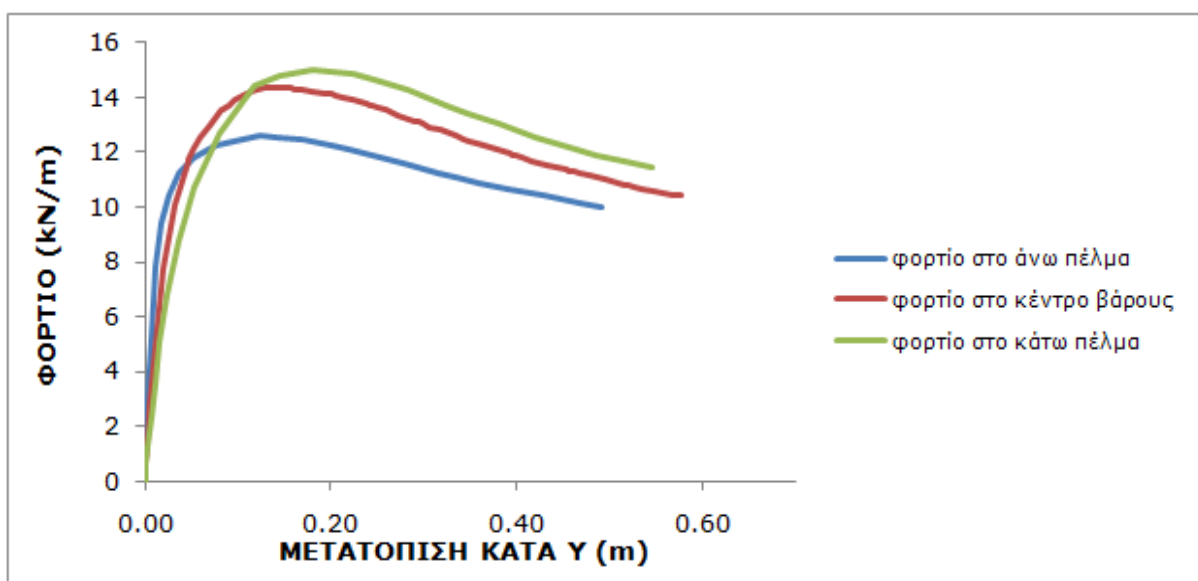
	$P_{cr,ADINA}$ (kN/m)
Άνω πέλμα	12,88
Κέντρο βάρους	15,78
Κάτω πέλμα	19,28

Πίνακας 5.4

Συγκριτική παρουσίαση κρίσιμων φορτίων από γραμμική ανάλυση λυγισμού στο ADINA για διαφορετικές θέσεις άσκησης φορτίου

Όπως αναμενόταν, όσο το φορτίο μετακινείται από το θλιβόμενο στο εφελκυσμένο πέλμα της διατομής, η κρίσιμη ροπή για την οποία εμφανίζεται πλευρικός λυγισμός αυξάνεται και συνεπώς βελτιώνεται η συμπεριφορά του φορέα.

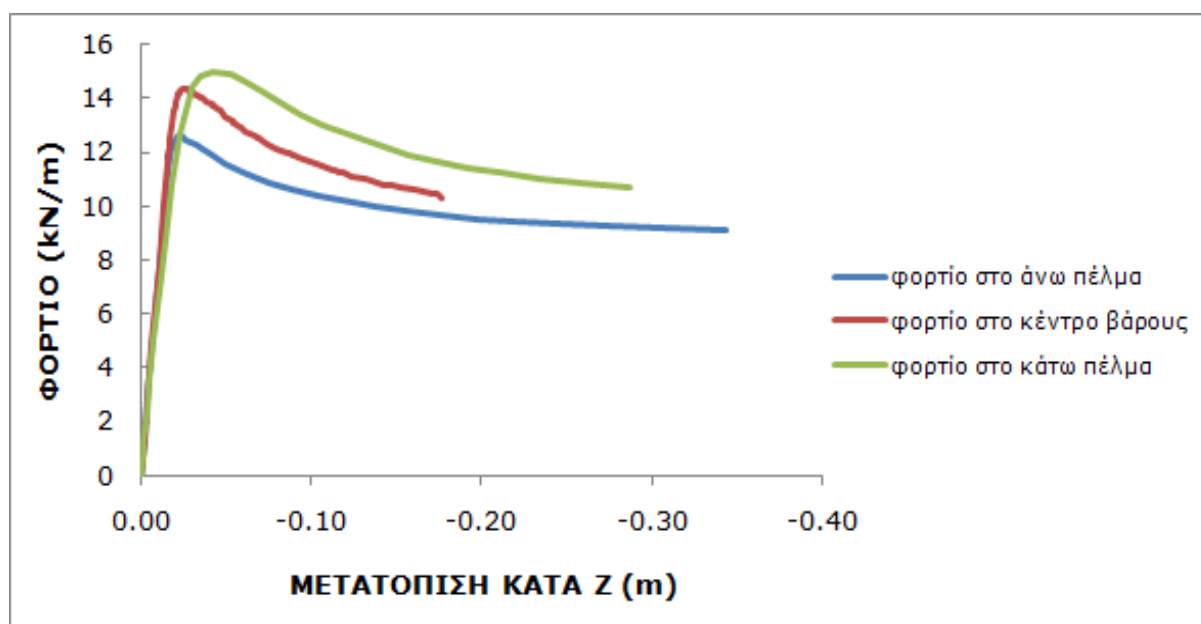
Στα διαγράμματα 5.50 και 5.51 φαίνονται συγκριτικά οι δρόμοι ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας για τις 3 θέσεις άσκησης του φορτίου



Σχήμα 5.50

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης για διαφορετικές θέσεις άσκησης του φορτίου

Σημειώνεται ότι το διάγραμμα 5.50 απεικονίζει την απόλυτη τιμή της μετατόπισης κατά γ.



Σχήμα 5.51

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης για διαφορετικές θέσεις άσκησης του φορτίου

Σημειώνεται ότι οι μη γραμμικές αναλύσεις για τις διαφορετικές θέσεις άσκησης του φορτίου έγιναν για την ίδια τιμή στέλειας ίση με 3σ προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα.

Παρατηρούμε ότι καθώς το φορτίο μετακινείται από το θλιβόμενο άνω πέλμα στο εφελκυσμένο κάτω πέλμα, η αντοχή του φορέα αυξάνεται όπως αναμενόταν.

5.2 Αμφιέρειστη δοκός μήκους 15m διατομής κατηγορίας 1

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται αμφιέρειστη δοκός μήκους $L=15m$ η οποία φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στο κέντρο βάρους της και της οποίας η διατομή έχει τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$h=800mm$$

$$b=300mm$$

$$t_w=15mm$$

$$t_f=30mm$$

Πραγματοποιείται κατάταξη της διατομής με βάση τον Ευρωκώδικα 3:

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = 1 \text{ για χάλυβα S235}$$

Έλεγχος κορμού για καθαρή κάμψη:

$$c/t_w = (800 - 2 \cdot 30) / 15 = 49,33 < 72\varepsilon = 72 \Rightarrow \text{κατηγορία 1}$$

Έλεγχος πέλματος για καθαρή κάμψη:

$$c/t_f = [(300 - 15) / 2] / 30 = 4,75 < 9\varepsilon = 9 \Rightarrow \text{κατηγορία 1}$$

Επομένως όλη η διατομή ανήκει στην κατηγορία 1.

Τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της διατομής προκύπτουν:

$$I_z = 13520,8 \text{ cm}^4$$

$$I_y = 317593,0 \text{ cm}^4$$

$$I_t = 623,25 \text{ cm}^4$$

$$I_w = 20041224 \text{ cm}^6$$

$$W_{pl} = 8983,50 \text{ cm}^3$$

Η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού για κατανεμημένο φορτίο στο κέντρο βάρους της δοκού, προκύπτει ίση με:

$$M_{cr} = 1047,89 \text{ kNm}$$

Το φορτίο στο οποίο αντιστοιχεί είναι ίσο με $P_{cr} = 8 \cdot M_{cr} / L^2 = 37,26 \text{ kN/m}$.

Η ροπή πλαστικοποίησης της εξεταζόμενης διατομής για χάλυβα S235 είναι ίση με:

$$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 8983,50 \text{ cm}^3 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,00$$

$$M_{pl} = 2111,12 \text{ kNm} > M_{cr} = 1047,89 \text{ kNm}$$

Το αντίστοιχο φορτίο για την πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής είναι ίσο με $P_{pl} = 8 \cdot M_{pl} / L^2 = 8 \cdot 211,12 / 15^2 = 75,06 \text{ kN/m}$.

Επομένως, αναμένουμε να προηγηθεί πλευρικός λυγισμός της αμφιέρειστης δοκού πριν την πλαστικοποίηση της μεσαίας διατομής. Η ανάλυση με το

πρόγραμμα ADINA θα ακολουθήσει για να επιβεβαιώσει τα παραπάνω αποτελέσματα.

Θα ακολουθήσει ο σχεδιασμός της δοκού σε ΟΚΑ (Οριακή Κατάσταση Αστοχίας) σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 προκειμένου να υπολογιστεί η ροπή αντοχής σε λυγισμό και η πλαστική αντοχή σε διάτμηση.

5.2.1 Έλεγχος διάτμησης

Σύμφωνα με τον πλαστικό έλεγχο διάτμησης θα πρέπει να ισχύει:

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$$

$$V_{pl,Rd} = (74 \cdot 1,5) \cdot \frac{23,5}{\sqrt{3} \cdot 1,00} = 1506,02 \text{ kN}$$

5.2.2 Έλεγχος έναντι πλευρικού λυγισμού

Ισοδύναμο μήκος λυγισμού

Εφόσον πρόκειται για δοκό αμφιέρειστη, το μήκος λυγισμού είναι ίσο με το ολικό μήκος της δοκού, δηλαδή $L=15\text{m}$.

Λυγηρότητα πλευρικού λυγισμού

Η ανηγμένη λυγηρότητα πλευρικού λυγισμού είναι ίση με:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{8983,5 \cdot 23,5}{104789}} = 1,42 > 0,20$$

Συνεπώς, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο πλευρικός λυγισμός.

Καμπύλες πλευρικού λυγισμού

Για $h/b=800\text{mm}/300\text{mm}=2,67 > 2 \Rightarrow$ καμπύλη d $\Rightarrow a_{LT}=0,76$

Μειωτικός συντελεστής χ_{LT}

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + 0,76 (1,42 - 0,20) + 1,42^2 \right] = 1,97$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{1,97 + \sqrt{1,97^2 - 1,42^2}} = 0,30 < 1$$

Έλεγχος

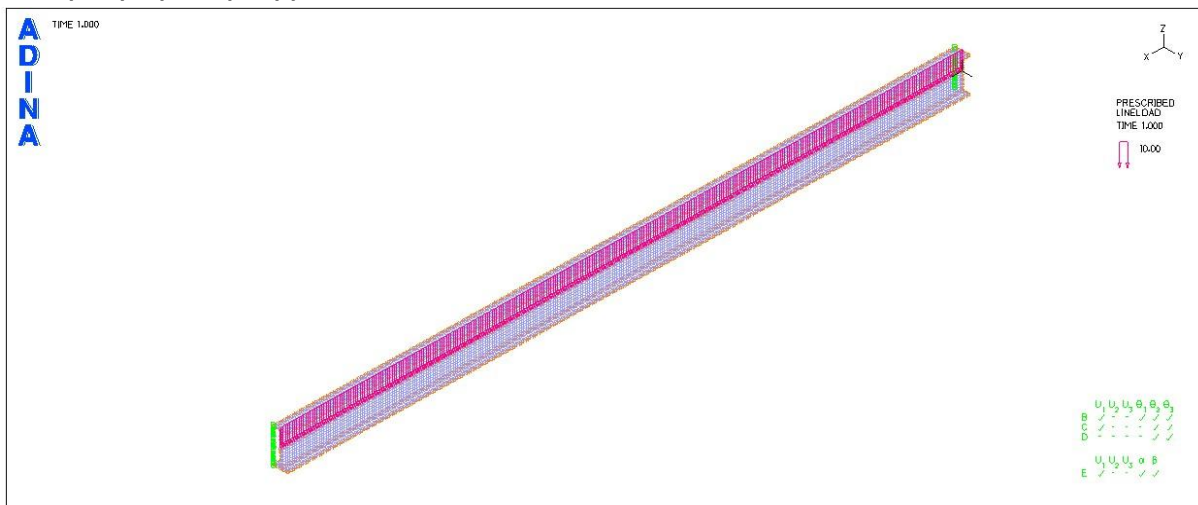
Η ροπή αντοχής είναι ίση με:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,30 \cdot 8983,50 \cdot \frac{23,5}{1,00} \text{ kNcm} = 63333,7 \text{ kNcm} = 633,34 \text{ kNm}$$

Το αντίστοιχο φορτίο αντοχής είναι ίσο με $P_{b,Rd} = 22,52 \text{ kN/m}$.

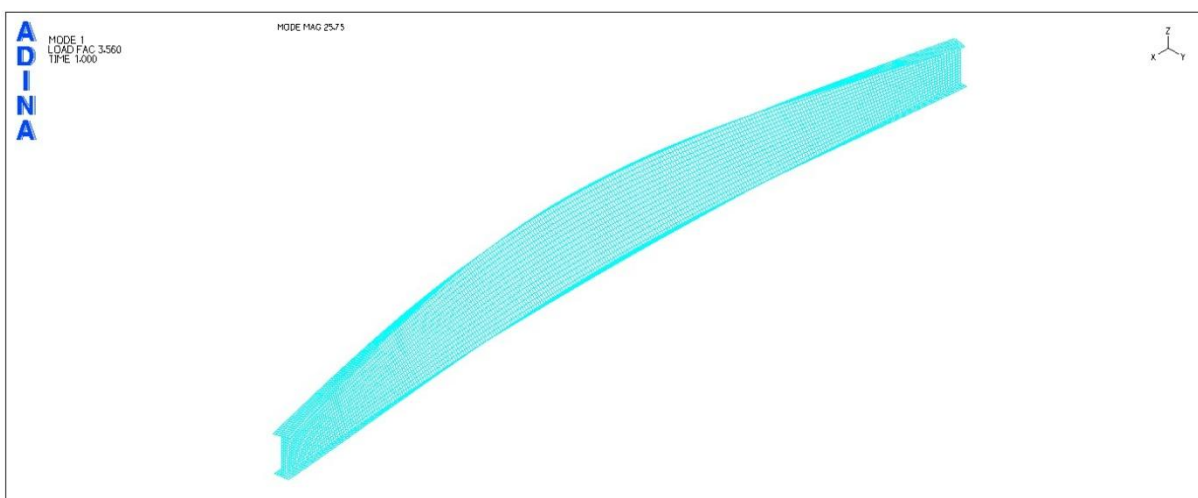
5.2.3 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Στο φορέα ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 10kN/m στο κέντρο βάρους της δοκού.



Σχήμα 5.52

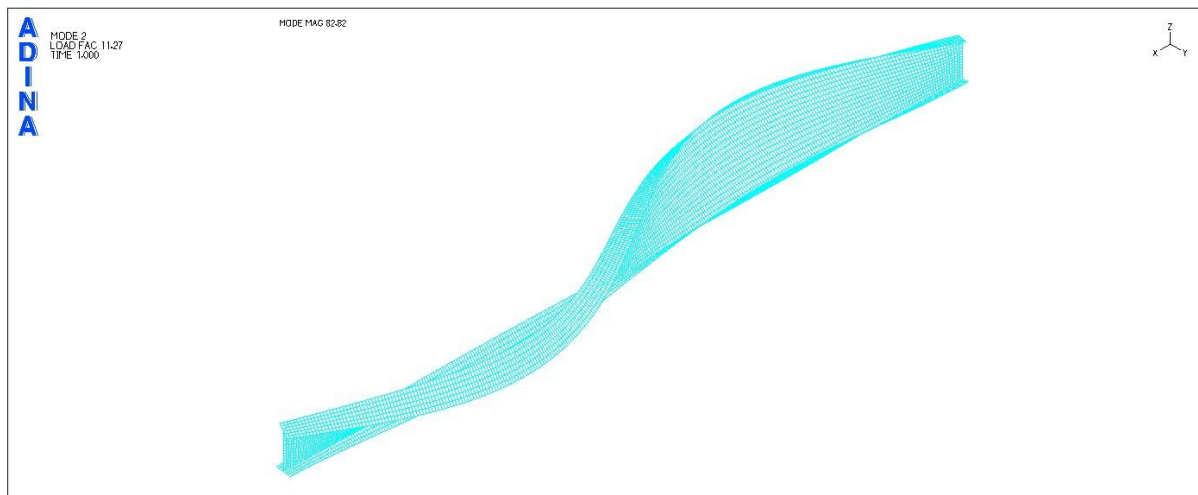
Αμφιέριστος φορέας μήκους 15m με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 10kN/m στον κεντροβαρικό άξονα



Σχήμα 5.53

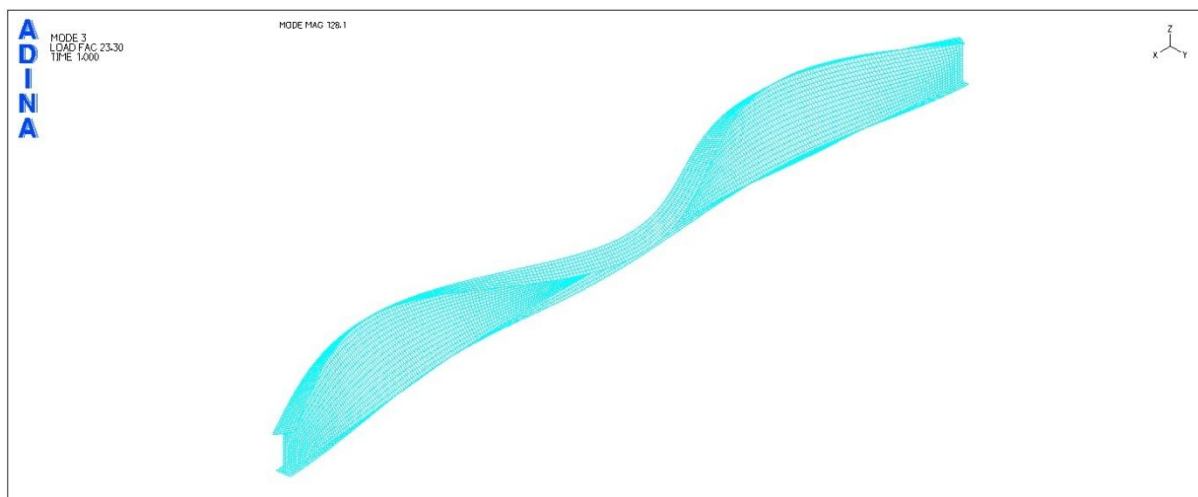
1^η ιδιομορφή λυγισμού

Το φορτίο λυγισμού που αντιστοιχεί στην πρώτη ιδιομορφή προέκυψε ίσο με $P_{cr}=35,60\text{kN/m}$. Η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=35,60 \cdot 15^2/8=1001,25\text{kNm}$.



Σχήμα 5.54
2^η ιδιομορφή λυγισμού

Το φορτίο λυγισμού που αντιστοιχεί στη δεύτερη ιδιομορφή προέκυψε ίσο με $P_{cr}=112,7\text{kN/m}$. Η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=112,7 \cdot 15^2/8=3169,69\text{kNm}$.



Σχήμα 5.55
3^η ιδιομορφή λυγισμού

Το φορτίο λυγισμού που αντιστοιχεί στην τρίτη ιδιομορφή προέκυψε ίσο με $P_{cr}=233,0\text{kN/m}$. Η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=233,0 \cdot 15^2/8=6553,13\text{kNm}$.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ADINA, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι ίσο με $P_{cr}=35,60\text{kN/m}$ και η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού είναι ίση με $M_{cr}=1001,25\text{kNm}$. Η αντίστοιχη ροπή σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα είχε προκύψει ίση με $M_{cr}=1047,89\text{kNm}$ (απόκλιση 4,5%).

5.2.4 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Πραγματοποιείται μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με τη μέθοδο Arc-Length (collapse analysis) όπου θεωρείται ως σημείο αναφοράς ο κόμβος της μεσαίας διατομής στο σημείο συνένωσης κορμού και κάτω πέλματος. Δίνεται αρχική ατέλεια ίση με 5cm κατά τη διεύθυνση y , σύμφωνα με την πρώτη ιδιομορφή της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού. Η ατέλεια δίνεται στο σημείο συνένωσης κορμού και άνω πέλματος της μεσαίας διατομής της δοκού, στον κόμβο δηλαδή που η συγκεκριμένη ιδιομορφή παρουσιάζει μέγιστη μετακίνηση.

Ισχύει:

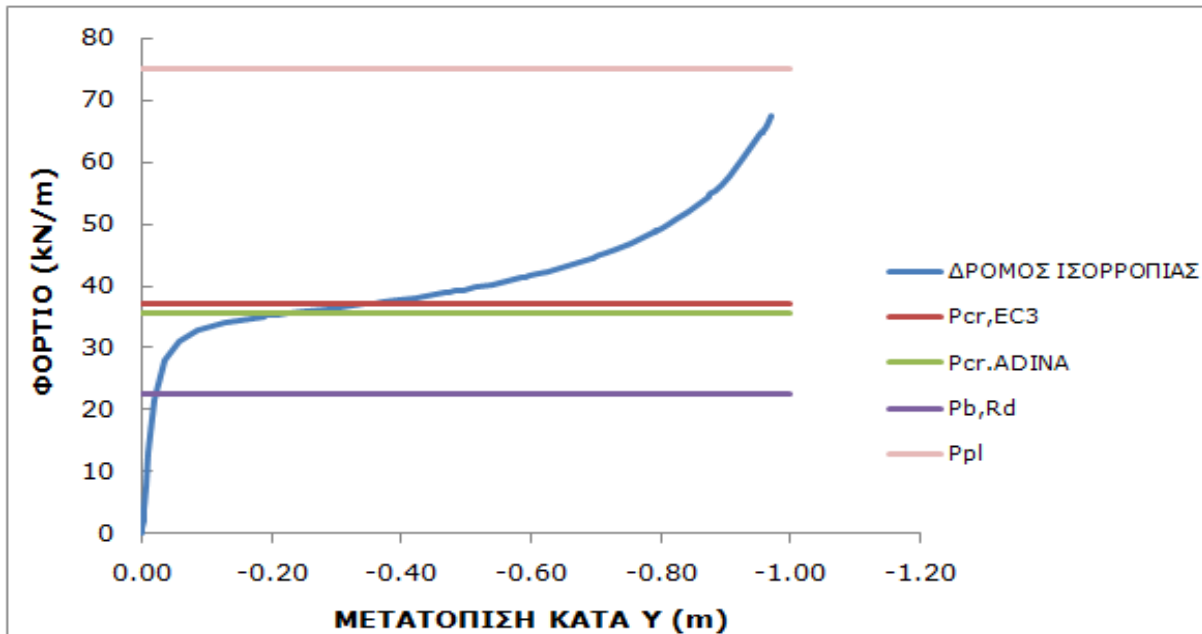
$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{L_{cr,z}}{\sqrt{\frac{I_z}{A}} \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{1500}{\sqrt{\frac{13520}{291}} \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{210000}{235}}} = 2,34$$

Επομένως, σύμφωνα με τη σχέση 5.1 έχουμε:

$$e_{0,d} = 0,76 \cdot (2,34 - 0,2) \cdot \frac{1391,63}{291} = 7,78\text{cm}$$

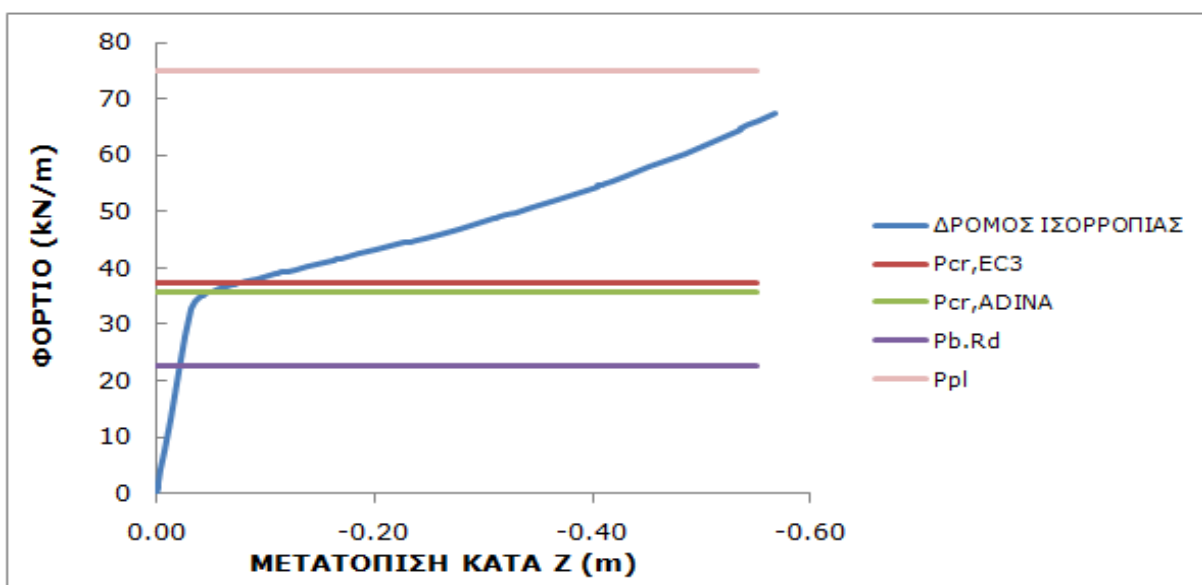
Συνεπώς η ατέλεια είναι ίση με $0,5 \cdot 7,78 = 3,89\text{cm}$.

Δίνεται, λοιπόν, στο φορέα αρχική γεωμετρική ατέλεια 4cm κατά το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού.



Σχήμα 5.56

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



Σχήμα 5.57

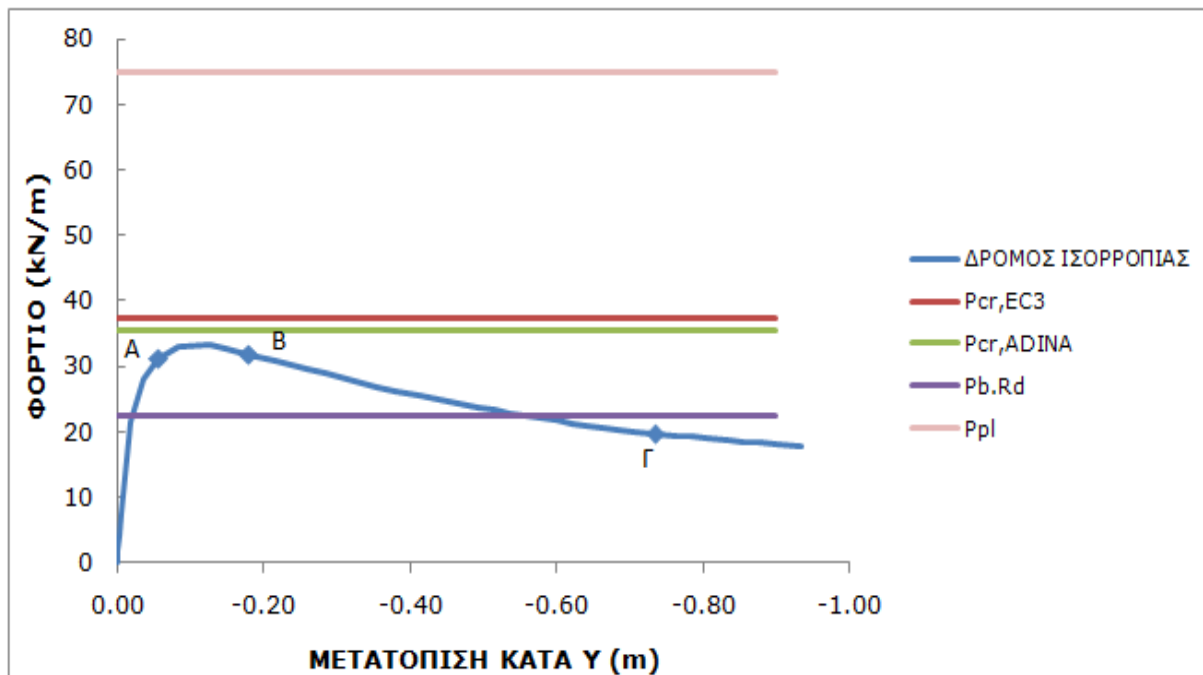
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

Από το δρόμο ισορροπίας της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας παρατηρούμε ότι για φορτίο ίσο περίπου με το φορτίο λυγισμού έχουμε σημαντική μείωση της κλίσης του διαγράμματος. Χαρακτηριστικό είναι ότι ο

φορέας διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή όπως φαίνεται από τον ανοδικό κλάδο, καθώς στην ανάλυση αυτή δεν έχει υπεισέλθει η μη γραμμικότητα υλικού.

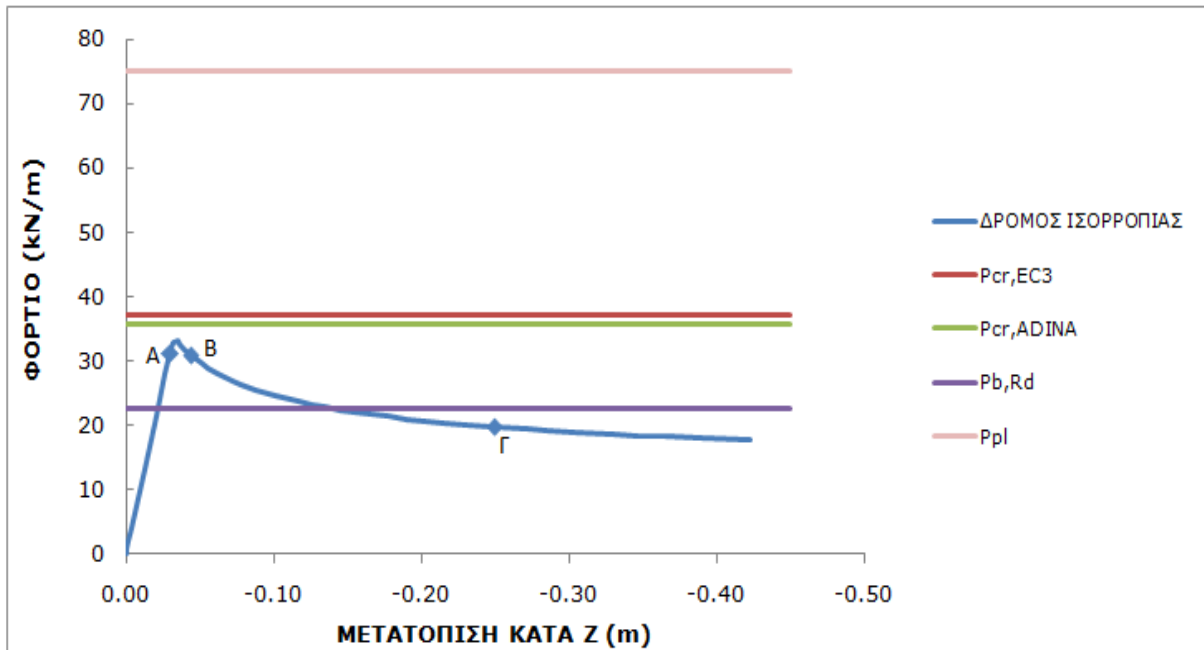
5.2.5 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Χρησιμοποιείται χάλυβας S235 χωρίς κράτυνση και δίνεται πάλι ατέλεια μεγέθους 4cm με το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής.



Σχήμα 5.58

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



Σχήμα 5.59

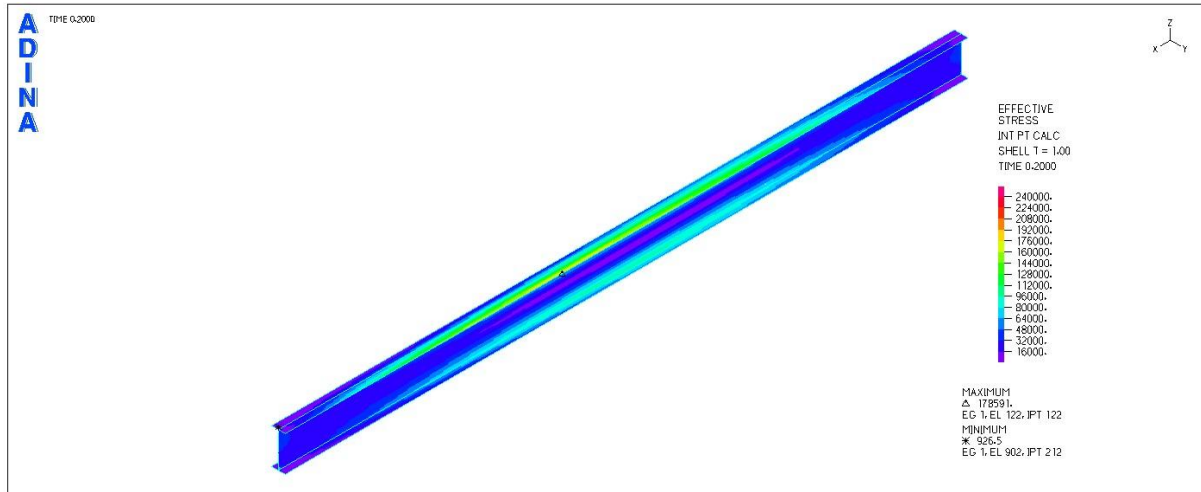
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

Παρατηρούμε ότι οι δρόμοι ισορροπίας για μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας παρουσιάζουν καθοδικό κλάδο μετά το λυγισμό της δοκού. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται εικόνες των τάσεων και των παραμορφώσεων της δοκού για τα 3 χαρακτηριστικά σημεία που σημειώνονται στους δρόμους ισορροπίας.

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ VON MISES

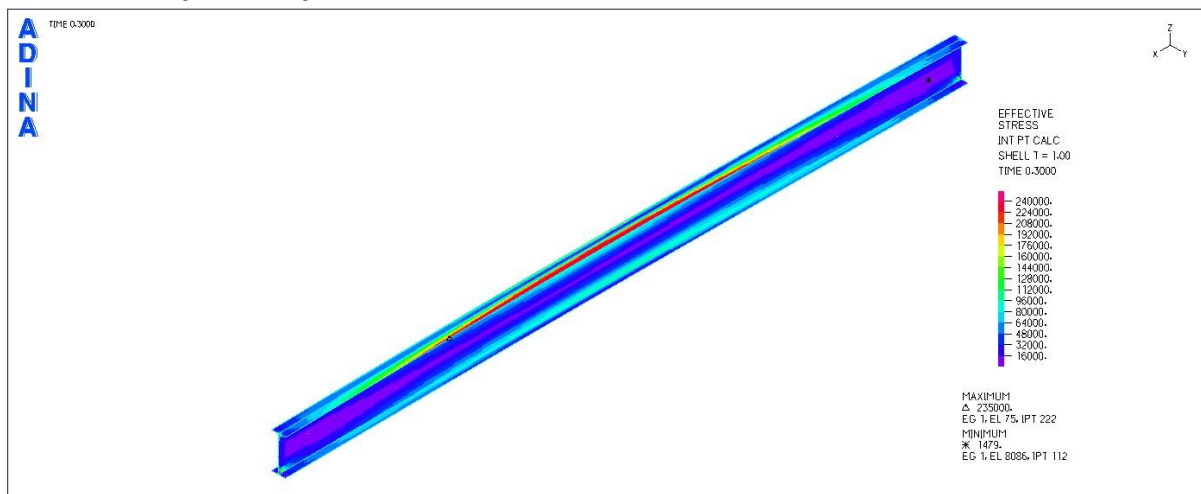
ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,20)



Σχήμα 5.60

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο A

ΣΗΜΕΙΟ B (t=0,30)

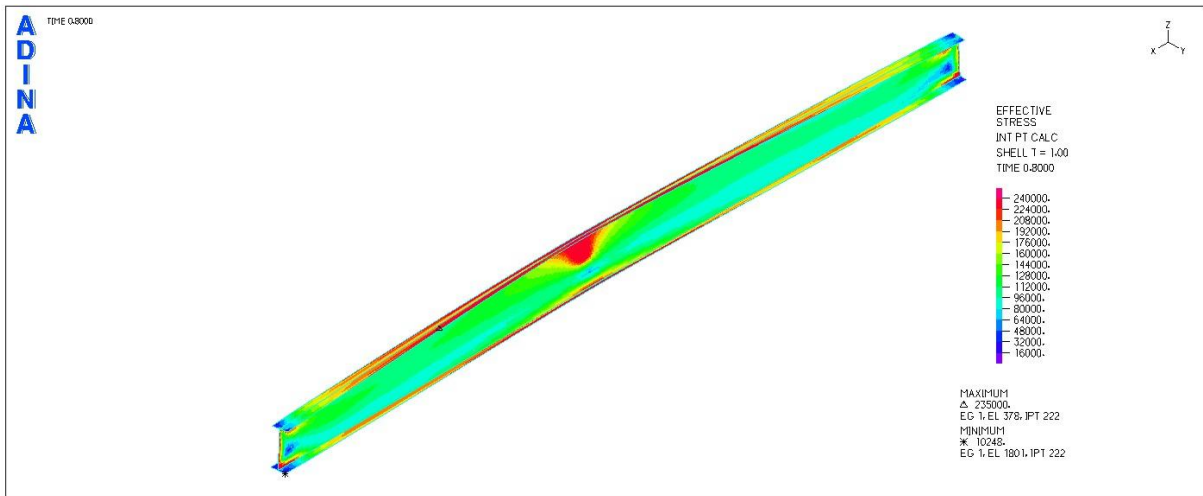


Σχήμα 5.61

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο B

Είναι χαρακτηριστικό ότι στο σημείο A κανένα σημείο δεν έχει αποκτήσει τάση von Mises ίση με το όριο διαρροής. Την επόμενη χρονική στιγμή που εξετάζεται, στο σημείο B του δρόμου ισορροπίας, κάποια σημεία του άνω πέλματος που έχει τη μέγιστη πλευρική εκτροπή, αποκτούν τάση ίση με την τάση διαρροής και προκύπτει ο καθοδικός κλάδος του δρόμου ισορροπίας.

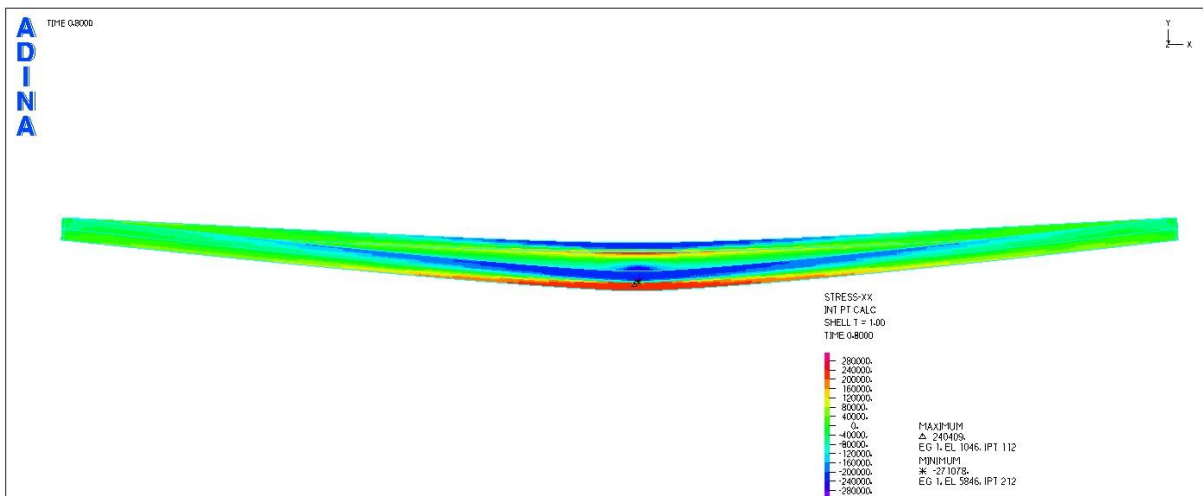
ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,80)



Σχήμα 5.62

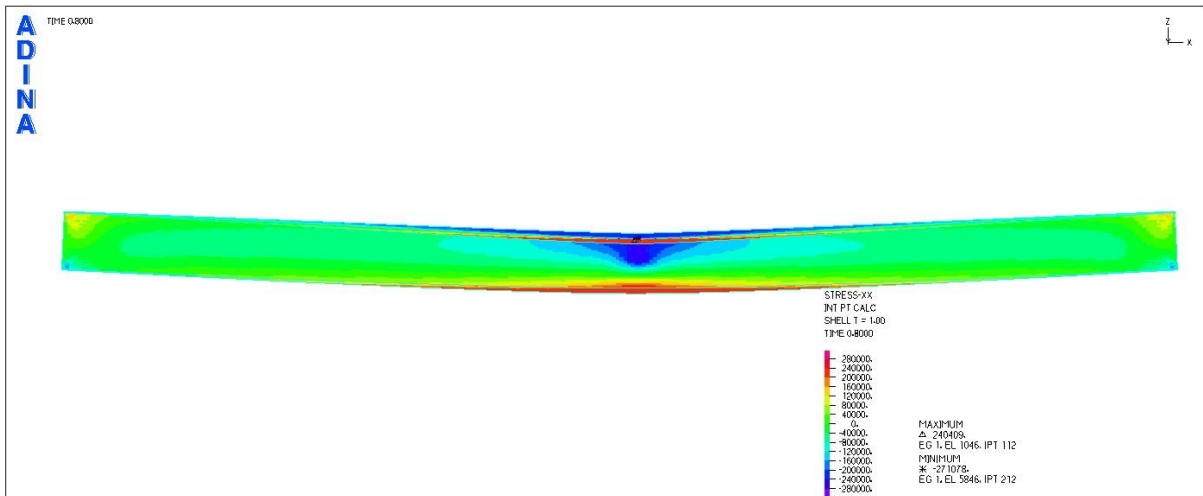
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)

ΕΙΚΟΝΕΣ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ



Σχήμα 5.63

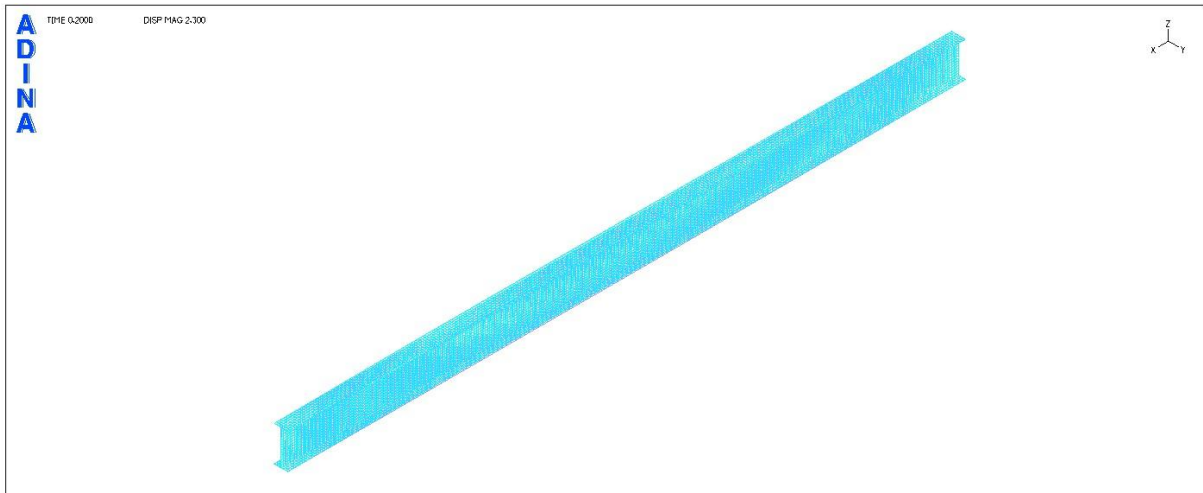
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (κάτοψη)



Σχήμα 5.64
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

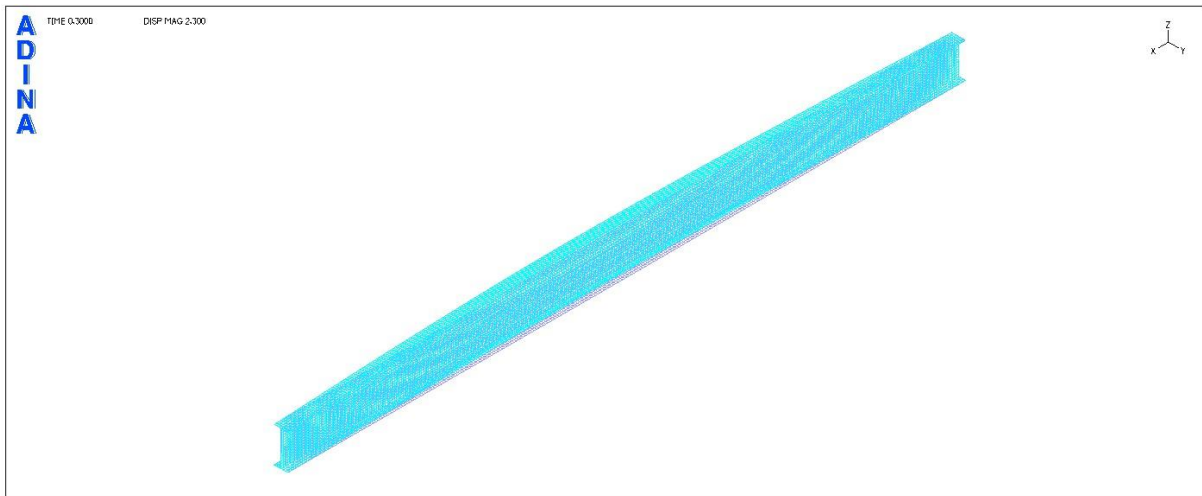
ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΣΗΜΕΙΟ Α



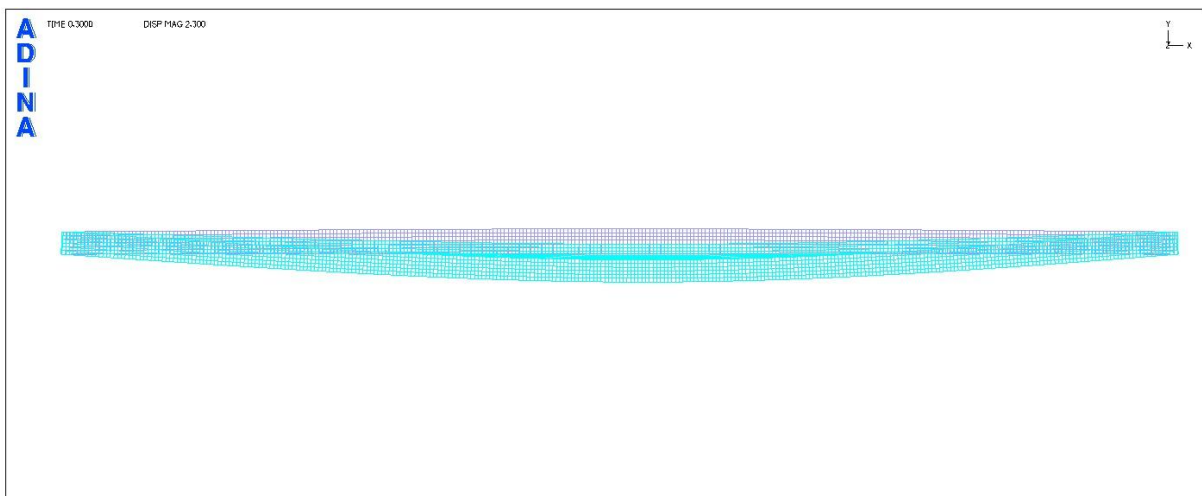
Σχήμα 5.65
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Α

ΣΗΜΕΙΟ Β



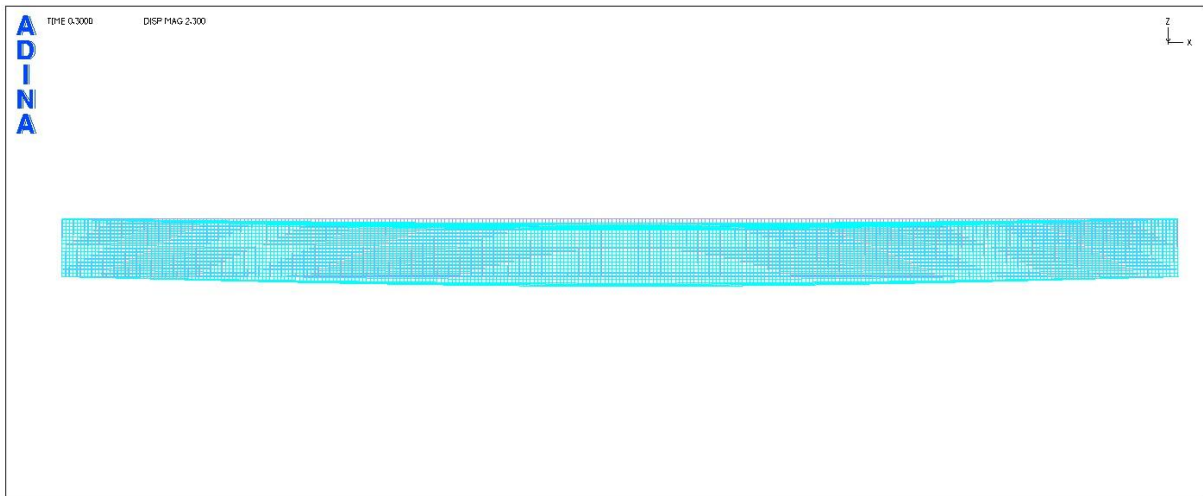
Σχήμα 5.66

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β (προοπτικό)



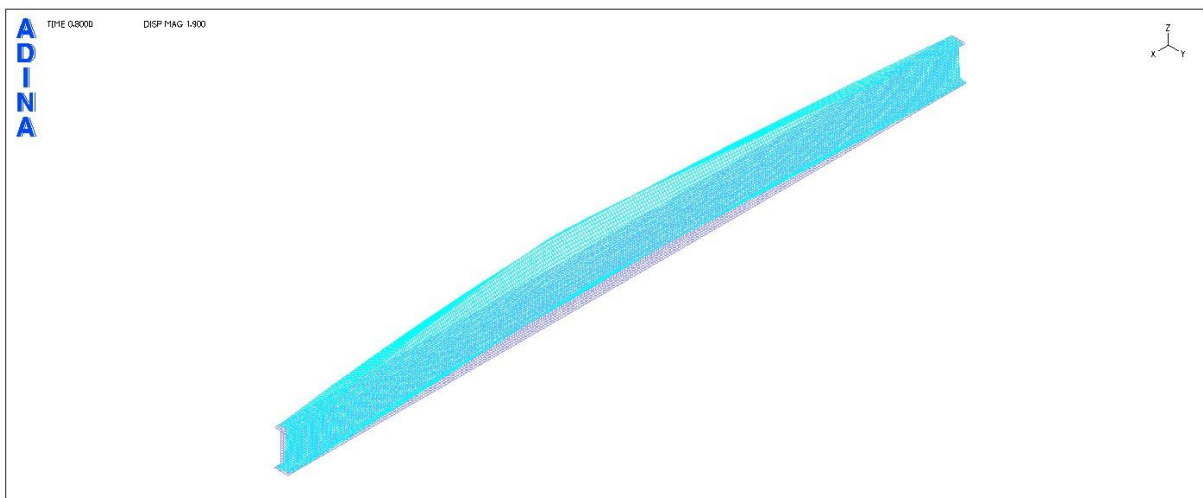
Σχήμα 5.67

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β (κάτοψη)

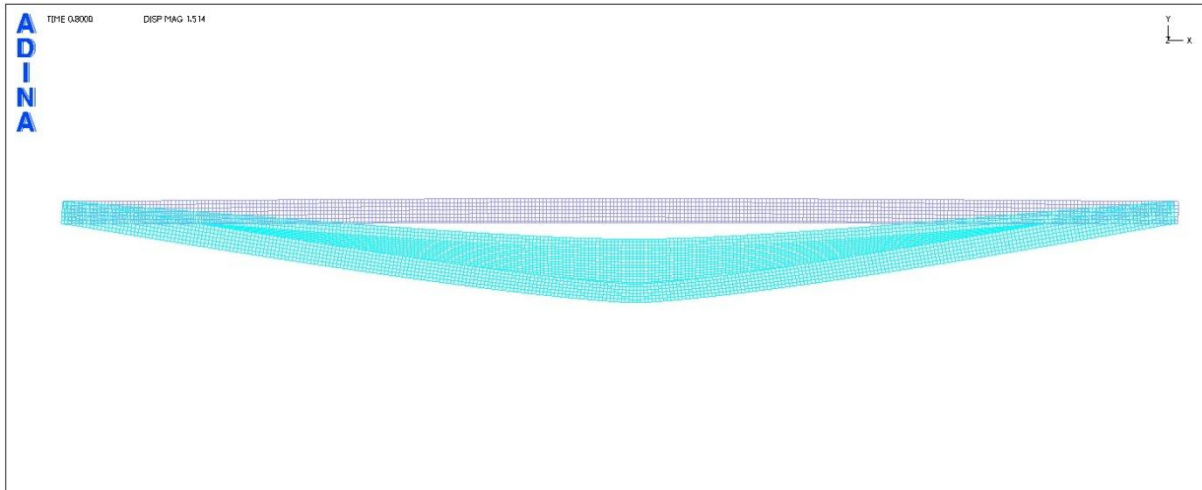


Σχήμα 5.68
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β (όψη)

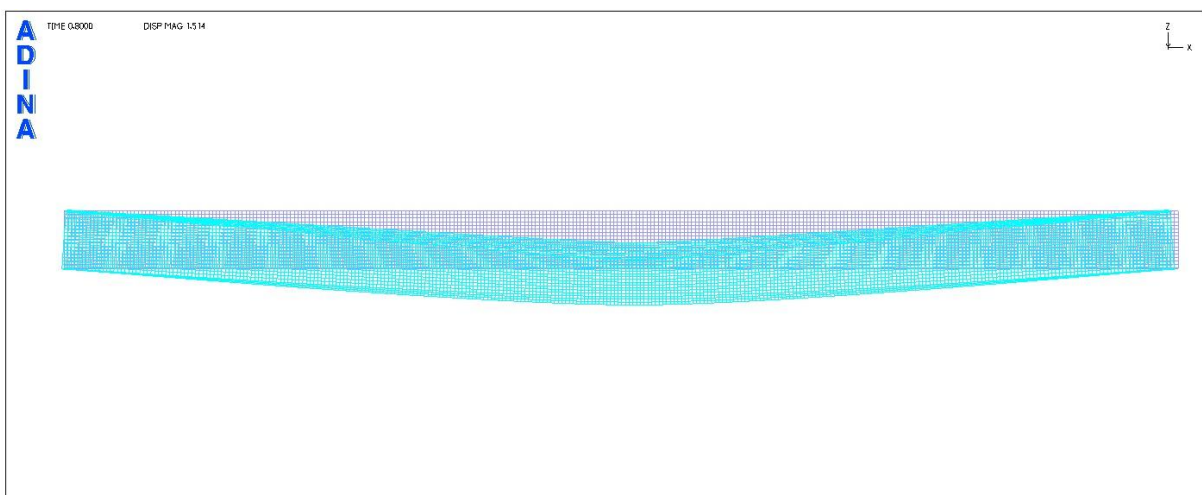
ΣΗΜΕΙΟ Γ



Σχήμα 5.69
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)



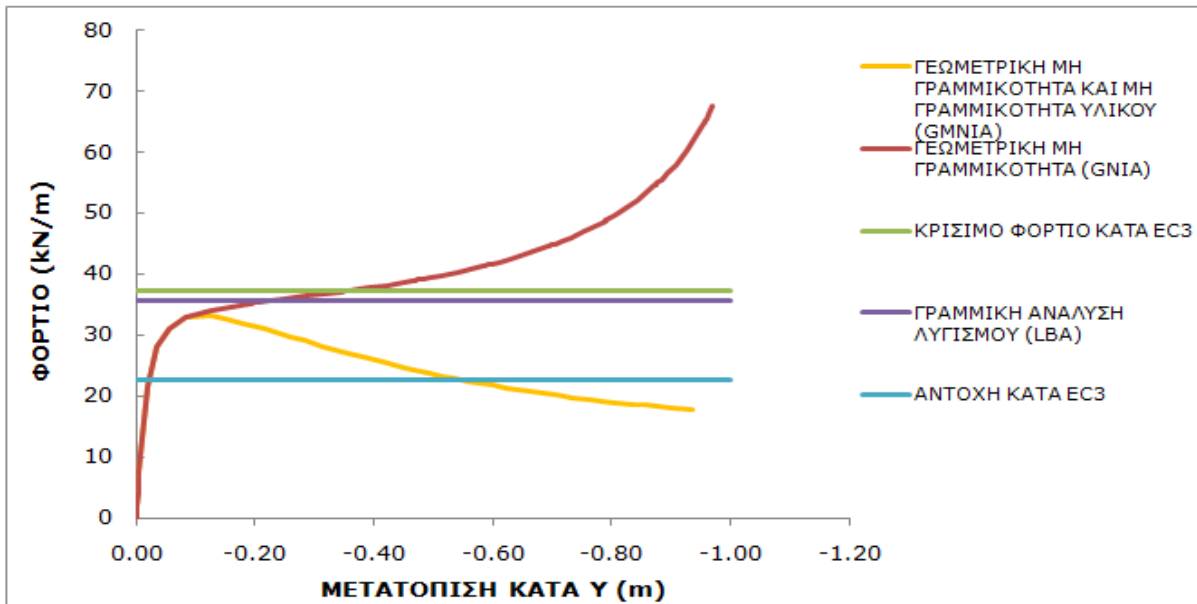
Σχήμα 5.70
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (κάτοψη)



Σχήμα 5.71
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

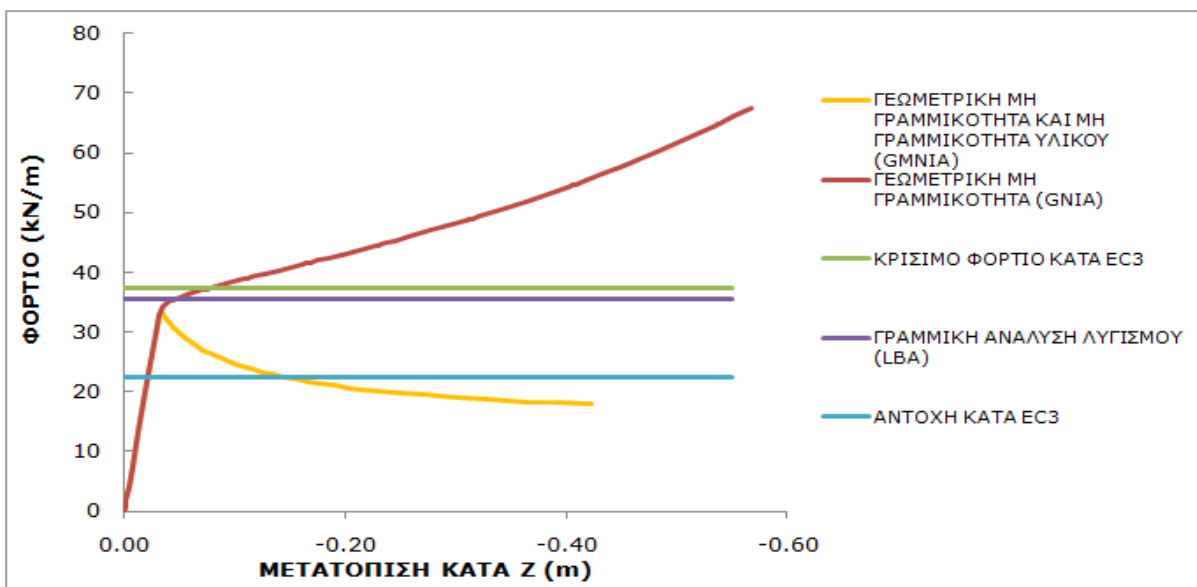
5.2.6 Συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας για όλες τις αναλύσεις

Στα σχήματα 5.72 και 5.73 παρουσιάζονται συγκριτικά σε ενιαία διαγράμματα οι δρόμοι ισορροπίας που έχουν προκύψει στο ADINA για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού.



Σχήμα 5.72

Δρόμοι ισορροπίας για τα 2 είδη μη γραμμικότητας που εξετάσθηκαν

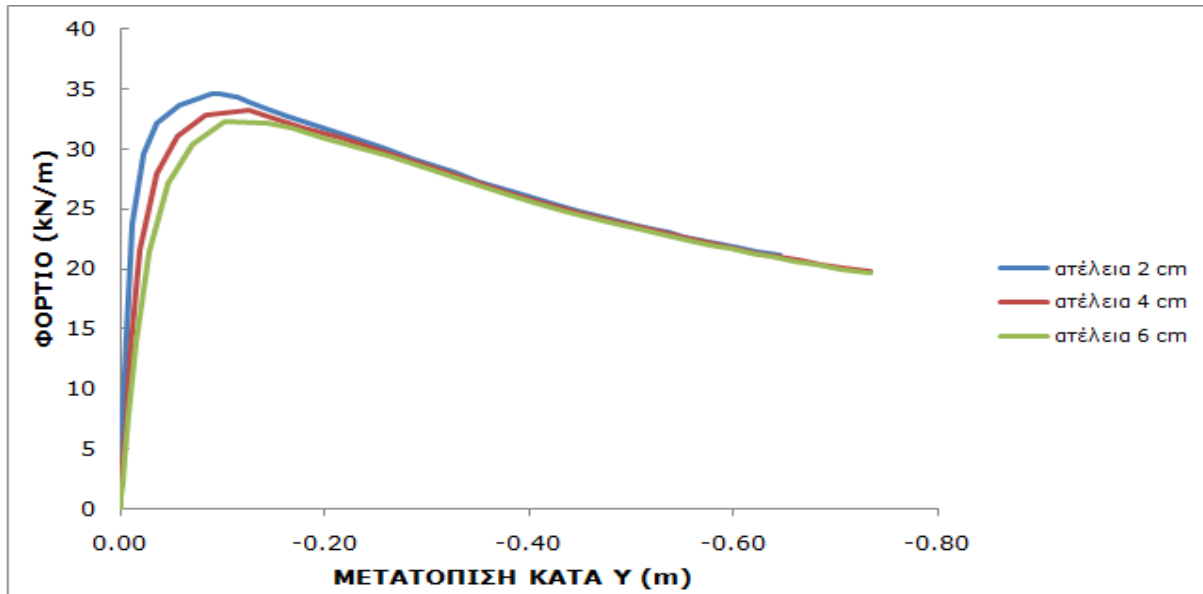


Σχήμα 5.73

Δρόμοι ισορροπίας για τα 2 είδη μη γραμμικότητας που εξετάσθηκαν

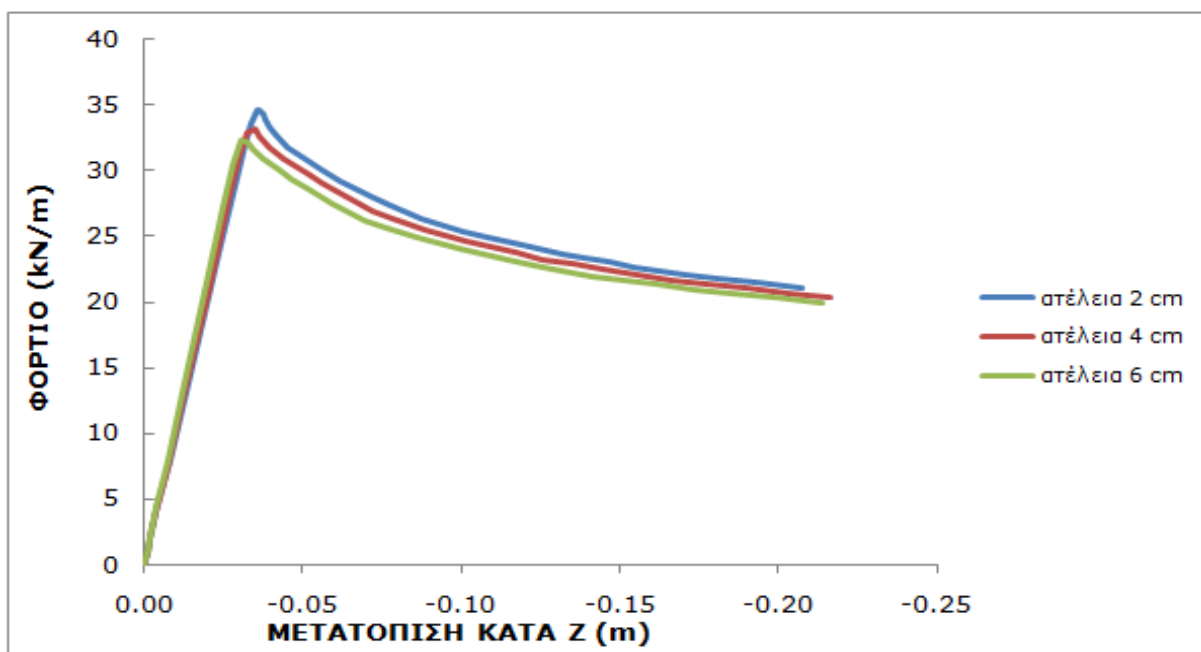
5.2.7 Επιρροή της ατέλειας στη συμπεριφορά του φορέα

Η προηγούμενη ανάλυση έχει πραγματοποιηθεί για τιμή ατέλειας ίση με 4cm κατά το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής στο σημείο συνένωσης κορμού και άνω πέλματος. Πραγματοποιούνται επίσης αναλύσεις για ατέλειες ίσες με 2cm και 6cm.



Σχήμα 5.74

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης για διάφορες τιμές ατέλειας



Σχήμα 5.75

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης για διάφορες τιμές ατέλειας

5.2.8 Επιρροή της θέσης εφαρμογής του φορτίου στη συμπεριφορά του φορέα

Στον πίνακα 5.5 παρουσιάζονται οι κρίσιμες ροπές πλευρικού λυγισμού κατά τον Ευρωκώδικα 3 για τις 3 θέσεις άσκησης του φορτίου ενώ στον πίνακα 5.6 τα κρίσιμα φορτία που προέκυψαν από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA.

	M_{cr} κατά EC3 (kNm)	P_{cr} κατά EC3 (kN/m)
Άνω πέλμα	820,53	29,17
Κέντρο βάρους	1047,89	37,26
Κάτω πέλμα	1338,24	47,58

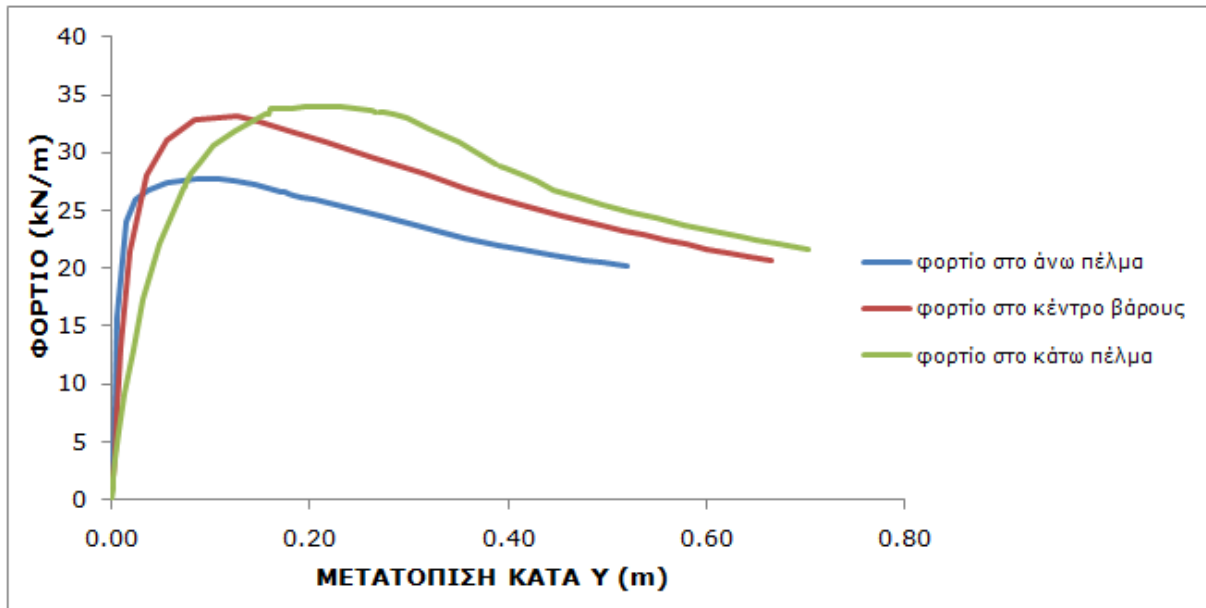
Πίνακας 5.5

Συγκριτική παρουσίαση κρίσιμων φορτίων κατά τον Ευρωκώδικα 3 για διαφορετικές θέσεις άσκησης φορτίου

	$P_{cr,ADINA}$ (kN/m)
Άνω πέλμα	27,82
Κέντρο βάρους	35,60
Κάτω πέλμα	45,37

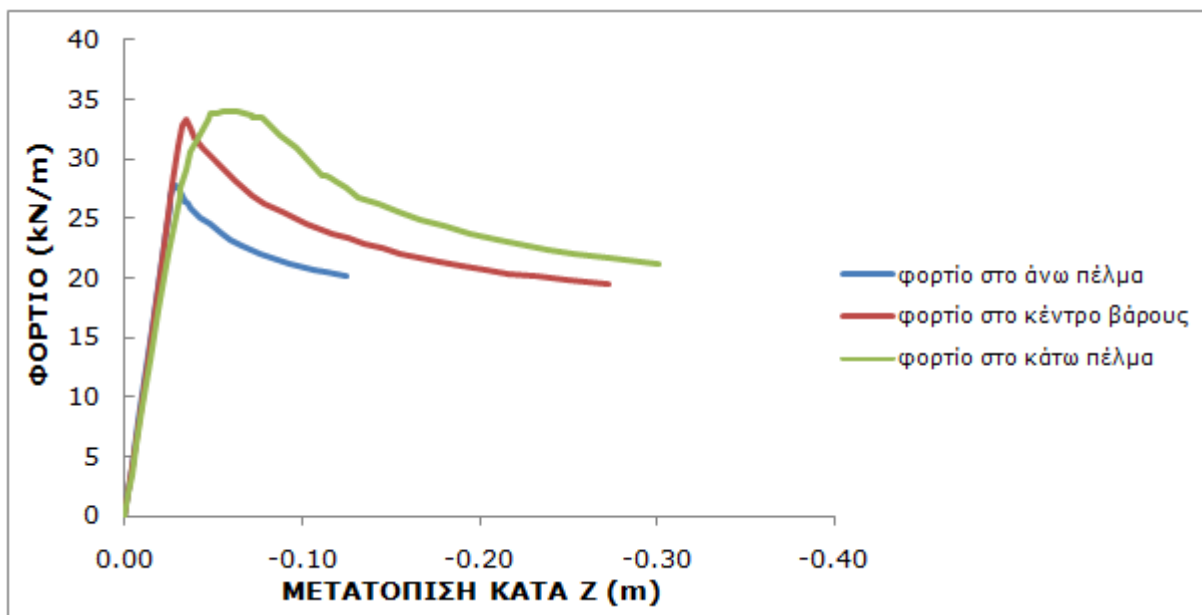
Πίνακας 5.6

Συγκριτική παρουσίαση κρίσιμων φορτίων από γραμμική ανάλυση λυγισμού στο ADINA για διαφορετικές θέσεις άσκησης φορτίου



Σχήμα 5.76

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης για διαφορετικές θέσεις άσκησης του φορτίου για μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας



Σχήμα 5.77

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου- z μετατόπισης για διαφορετικές θέσεις άσκησης του φορτίου για μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας

5.3 Αμφιέρειστη δοκός μήκους 18m διατομής κατηγορίας 1

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται αμφιέρειστη δοκός μήκους $L=18m$ η οποία φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στο κέντρο βάρους της και της οποίας η διατομή έχει τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με το προηγούμενο παράδειγμα:

$$h=800mm$$

$$b=300mm$$

$$t_w=15mm$$

$$t_f=30mm$$

Πραγματοποιείται κατάταξη της διατομής με βάση τον Ευρωκώδικα 3:

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = 1 \text{ για χάλυβα S235}$$

Έλεγχος κορμού για καθαρή κάμψη:

$$c/t_w = (800 - 2 \cdot 30) / 15 = 49,33 < 72\varepsilon = 72 \Rightarrow \text{κατηγορία 1}$$

Έλεγχος πέλματος για καθαρή κάμψη:

$$c/t_f = [(300 - 15) / 2] / 30 = 4,75 < 9\varepsilon = 9 \Rightarrow \text{κατηγορία 1}$$

Επομένως όλη η διατομή ανήκει στην κατηγορία 1.

Τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της διατομής προκύπτουν:

$$I_z = 13520,8 \text{ cm}^4$$

$$I_y = 317593,0 \text{ cm}^4$$

$$I_t = 623,25 \text{ cm}^4$$

$$I_w = 20041224 \text{ cm}^6$$

$$W_{pl} = 8983,50 \text{ cm}^3$$

Η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού για κατανεμημένο φορτίο στο κέντρο βάρους της δοκού, προκύπτει ίση με:

$$M_{cr} = 836,67 \text{ kNm}$$

Το φορτίο στο οποίο αντιστοιχεί είναι ίσο με $P_{cr} = 8 \cdot M_{cr} / L^2 = 20,66 \text{ kN/m}$.

Η ροπή πλαστικοποίησης της εξεταζόμενης διατομής για χάλυβα S235 είναι ίση με:

$$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 8983,50 \text{ cm}^3 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,00$$

$$M_{pl} = 2111,12 \text{ kNm} > M_{cr} = 836,67 \text{ kNm}$$

Το αντίστοιχο φορτίο για την πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής είναι ίσο με $P_{pl} = 8 \cdot M_{pl} / L^2 = 8 \cdot 211,12 / 18^2 = 52,13 \text{ kN/m}$.

Επομένως, αναμένουμε να προηγηθεί πλευρικός λυγισμός της αμφιέρειστης δοκού πριν την πλαστικοποίηση της μεσαίας διατομής.

5.3.1 Έλεγχος διάτμησης

Σύμφωνα με τον πλαστικό έλεγχο διάτμησης θα πρέπει να ισχύει:

$$V_{Ed} \leq V_{pl,Rd}$$

$$V_{pl,Rd} = (74 \cdot 1,5) \cdot \frac{23,5}{\sqrt{3} \cdot 1,00} = 1506,02 \text{ kN}$$

5.3.2 Έλεγχος έναντι πλευρικού λυγισμού

Ισοδύναμο μήκος λυγισμού

Εφόσον πρόκειται για δοκό αμφιέριστη, το μήκος λυγισμού είναι ίσο με το ολικό μήκος της δοκού, δηλαδή $L=18\text{m}$.

Λυγηρότητα πλευρικού λυγισμού

Η ανηγμένη λυγηρότητα πλευρικού λυγισμού είναι ίση με:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{8983,5 \cdot 23,5}{83667}} = 1,59 > 0,20$$

Συνεπώς, πρέπει να ληφθεί υπόψη ο πλευρικός λυγισμός.

Καμπύλες πλευρικού λυγισμού

Για $h/b=800\text{mm}/300\text{mm}=2,67 > 2 \Rightarrow$ καμπύλη d $\Rightarrow a_{LT}=0,76$

Μειωτικός συντελεστής χ_{LT}

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + 0,76(1,59 - 0,20) + 1,59^2 \right] = 2,29$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{2,29 + \sqrt{2,29^2 - 1,59^2}} = 0,25 < 1$$

Ήταν αναμενόμενη η μείωση του μειωτικού συντελεστή με την αύξηση του μήκους ($\chi_{LT}=0,30$ για τη δοκό μήκους 15m)

Έλεγχος

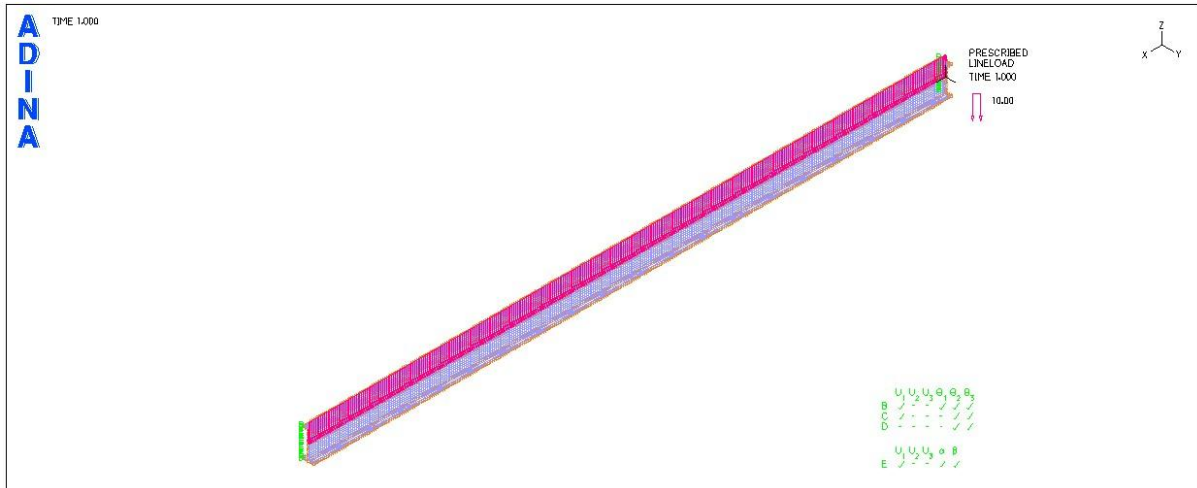
Η ροπή αντοχής είναι ίση με:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,25 \cdot 8983,50 \cdot \frac{23,5}{1,00} \text{ kNcm} = 52778 \text{ kNcm} = 527,78 \text{ kNm}$$

Το αντίστοιχο φορτίο αντοχής είναι ίσο με $P_{b,Rd}=13,03 \text{ kN/m}$.

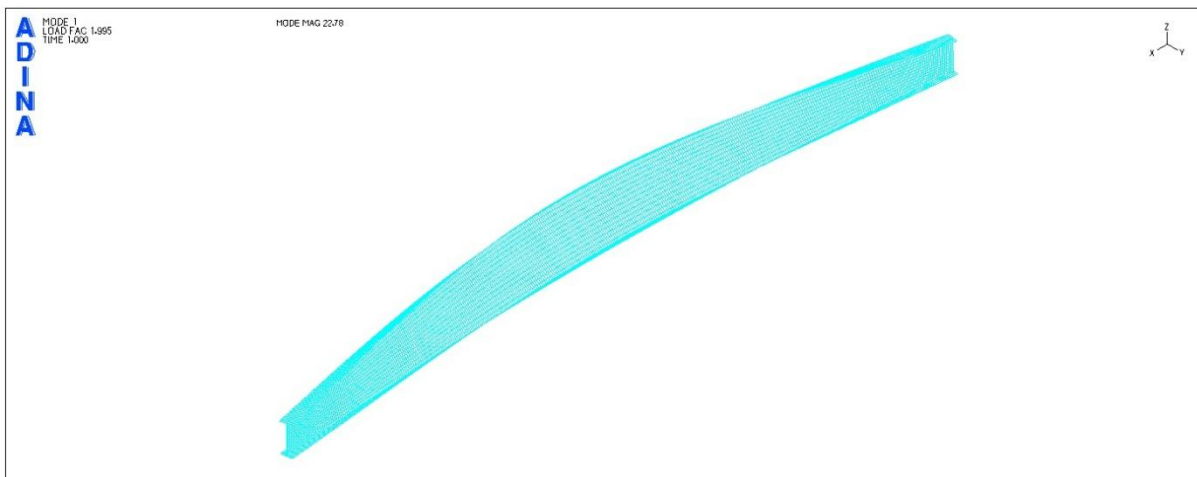
5.3.3 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Στο φορέα ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 10kN/m στο κέντρο βάρους της δοκού.



Σχήμα 5.78

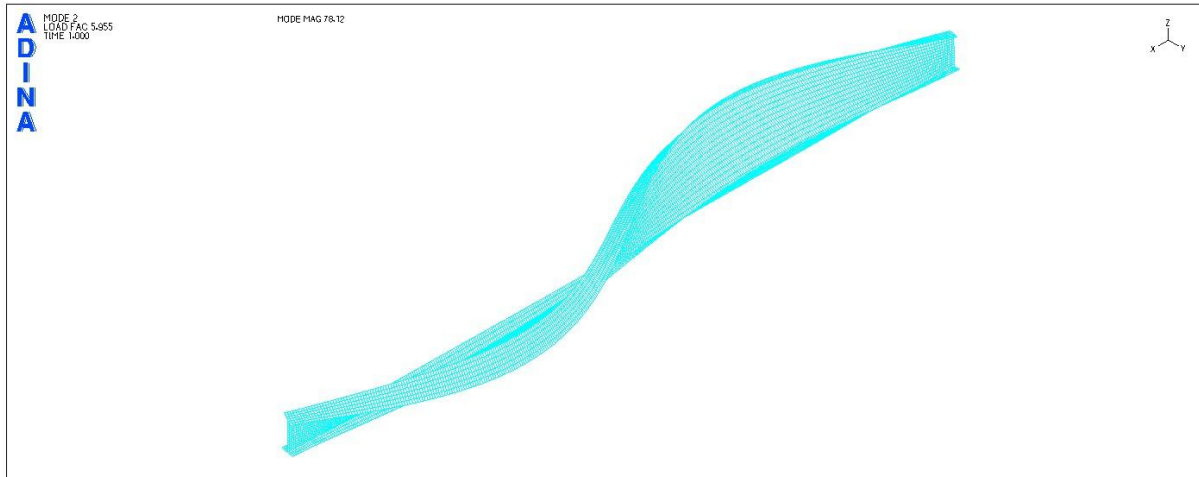
Αμφιέρειστος φορέας μήκους 18m με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 10kN/m στον κεντροβαρικό άξονα



Σχήμα 5.79

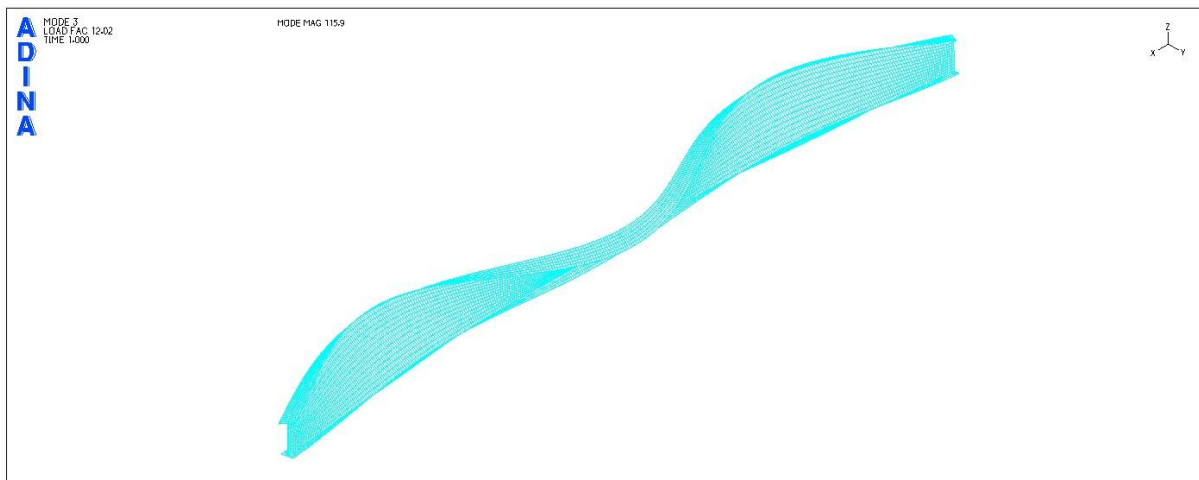
1^η ιδιομορφή λυγισμού

Το φορτίο λυγισμού που αντιστοιχεί στην πρώτη ιδιομορφή προέκυψε ίσο με $P_{cr}=19,95\text{kN/m}$. Η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=19,95 \cdot 18^2/8=807,98\text{kNm}$.



Σχήμα 5.80
2^η ιδιομορφή λυγισμού

Το φορτίο λυγισμού που αντιστοιχεί στη δεύτερη ιδιομορφή προέκυψε ίσο με $P_{cr}=59,55\text{kN/m}$. Η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=59,55 \cdot 18^2/8=2411,78\text{kNm}$.



Σχήμα 5.81
3^η ιδιομορφή λυγισμού

Το φορτίο λυγισμού που αντιστοιχεί στην τρίτη ιδιομορφή προέκυψε ίσο με $P_{cr}=120,2\text{kN/m}$. Η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=120,2 \cdot 18^2/8=4868,10\text{kNm}$.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ADINA, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι ίσο με $P_{cr}=19,95\text{kN/m}$ και η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή πλευρικού

λυγισμού είναι ίση με $M_{cr}=807,98\text{kNm}$. Η αντίστοιχη ροπή σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα είχε προκύψει ίση με $M_{cr}=836,67\text{kNm}$ (απόκλιση 3,4%).

5.3.4 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Πραγματοποιείται μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με τη μέθοδο Arc-Length (collapse analysis) όπου θεωρείται ως σημείο αναφοράς ο κόμβος της μεσαίας διατομής στο σημείο συνένωσης κορμού και κάτω πέλματος. Δίνεται αρχική ατέλεια ίση με 5cm κατά τη διεύθυνση y και σύμφωνη με την πρώτη ιδιομορφή της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού. Η ατέλεια δίνεται στο σημείο συνένωσης κορμού και άνω πέλματος της μεσαίας διατομής της δοκού, στον κόμβο δηλαδή που η συγκεκριμένη ιδιομορφή παρουσιάζει μέγιστη μετακίνηση.

Ισχύει:

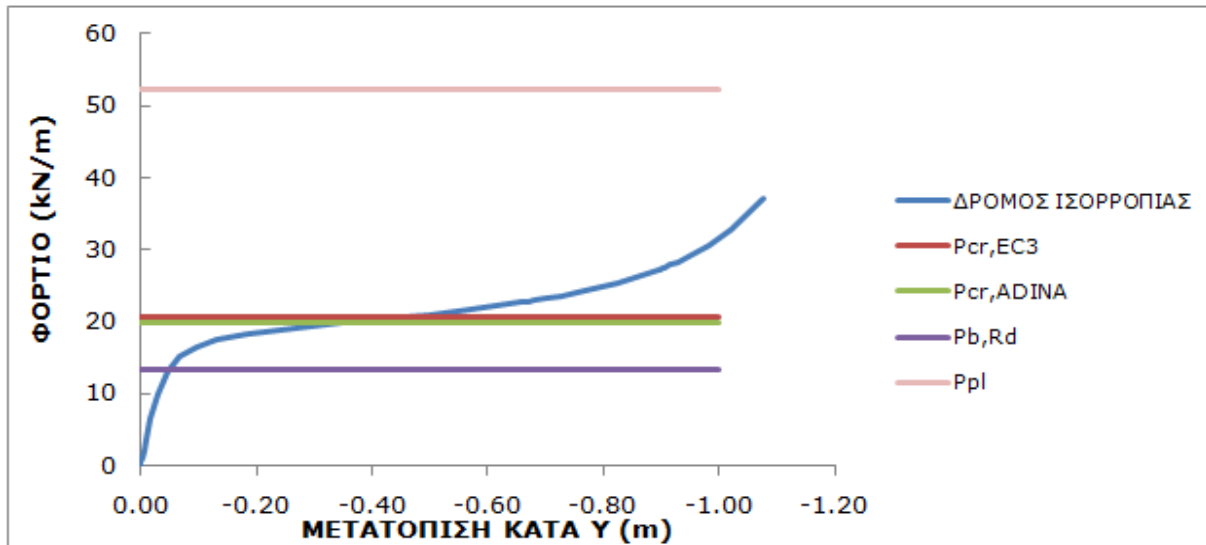
$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{L_{cr,z}}{\sqrt{\frac{I_z}{A}} \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = \frac{1800}{\sqrt{\frac{13520}{291}} \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{210000}{235}}} = 2,81$$

Επομένως, σύμφωνα με τη σχέση 5.1 έχουμε:

$$e_{0,d} = 0,76 \cdot (2,81 - 0,2) \cdot \frac{1391,63}{291} = 9,49\text{cm}$$

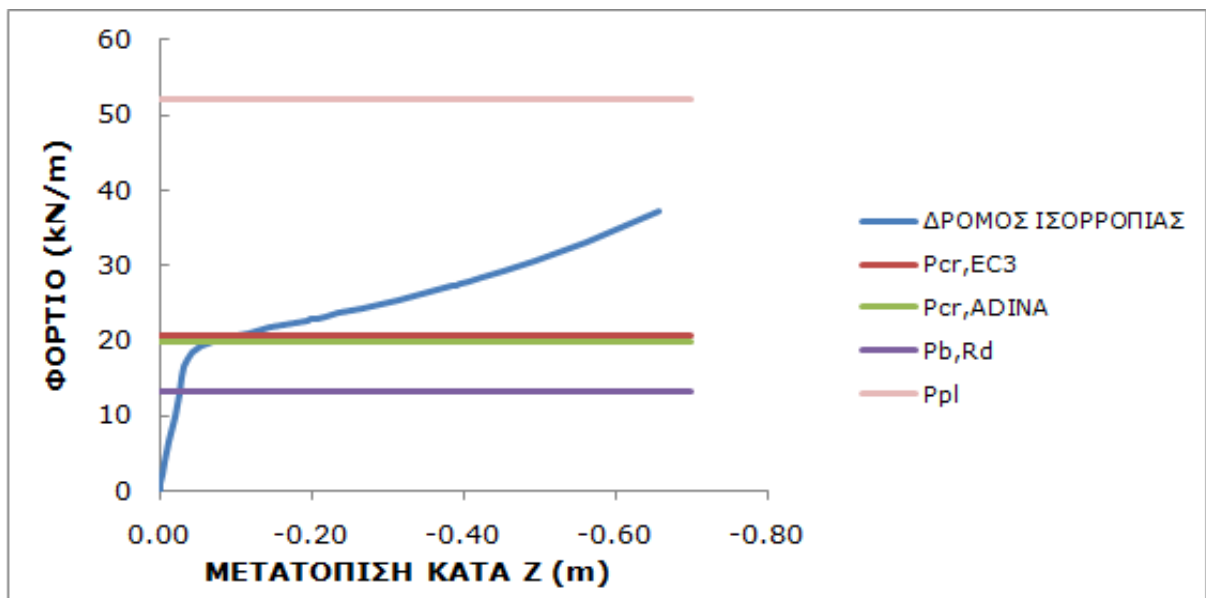
Συνεπώς η ατέλεια είναι ίση με $0,5 \cdot 9,49 = 4,75\text{cm}$.

Δίνεται, λοιπόν, στο φορέα αρχική γεωμετρική ατέλεια 5cm κατά το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού.



Σχήμα 5.82

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



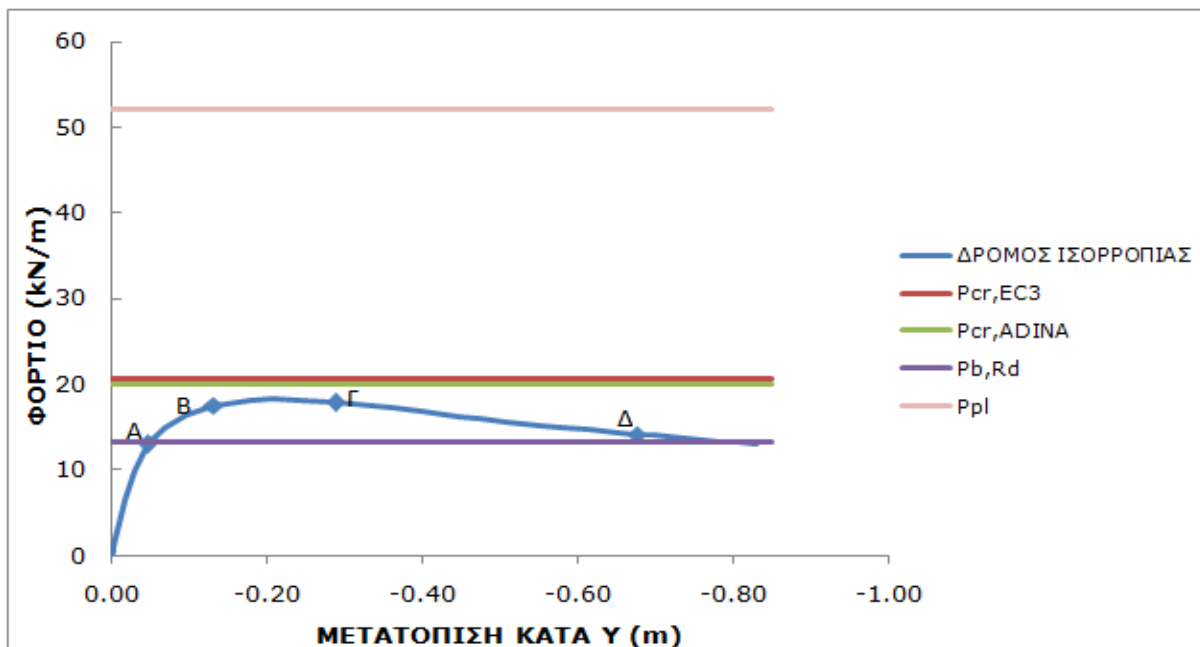
Σχήμα 5.83

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

Από το δρόμο ισορροπίας της μη γραμμικής ανάλυσης γεωμετρίας παρατηρούμε ότι για φορτίο ίσο περίπου με το φορτίο λυγισμού έχουμε σημαντική μείωση της κλίσης του διαγράμματος. Χαρακτηριστικό είναι ότι ο φορέας διαθέτει μεταλυγισμική αντοχή όπως φαίνεται από τον ανοδικό κλάδο, καθώς στην ανάλυση αυτή δεν έχει υπεισέλθει η μη γραμμικότητα υλικού.

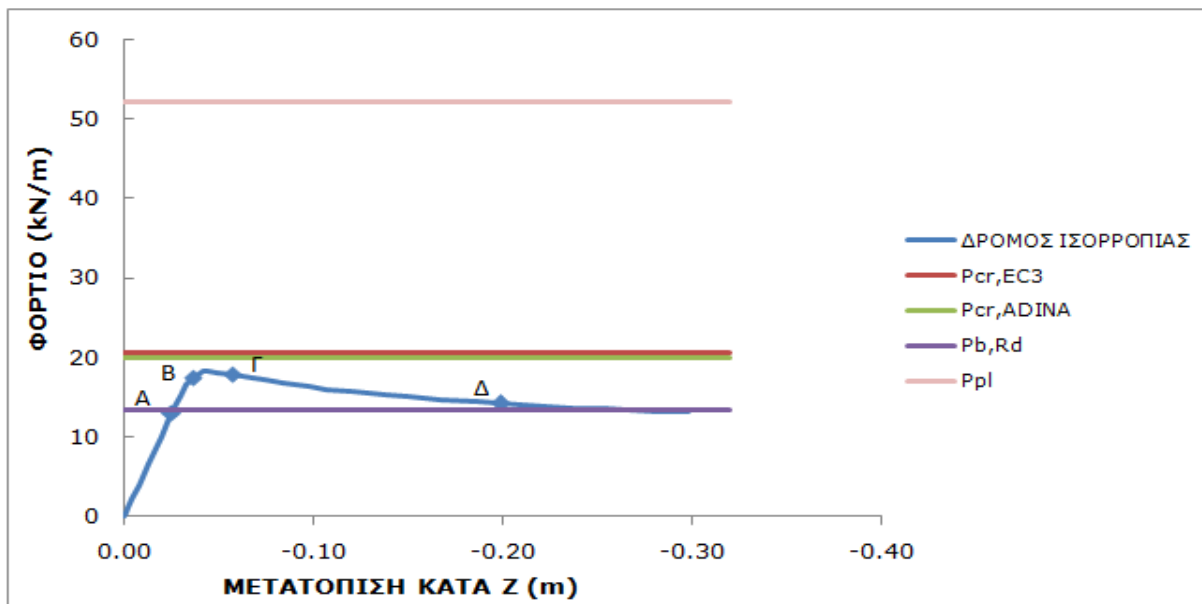
5.3.5 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Χρησιμοποιείται χάλυβας S235 χωρίς κράτυνση και δίνεται πάλι ατέλεια μεγέθους 5cm με το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής.



Σχήμα 5.84

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



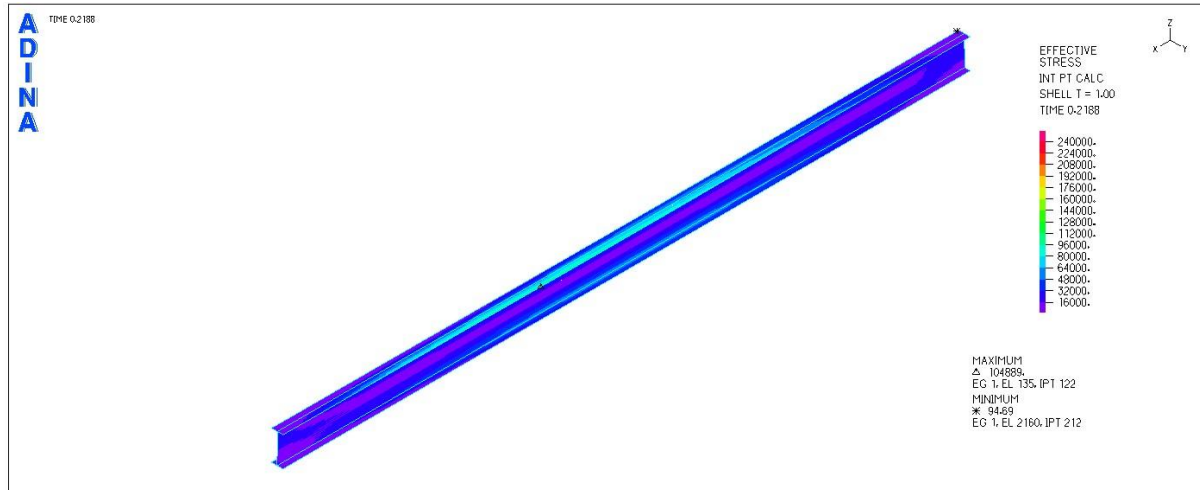
Σχήμα 5.85

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ VON MISES

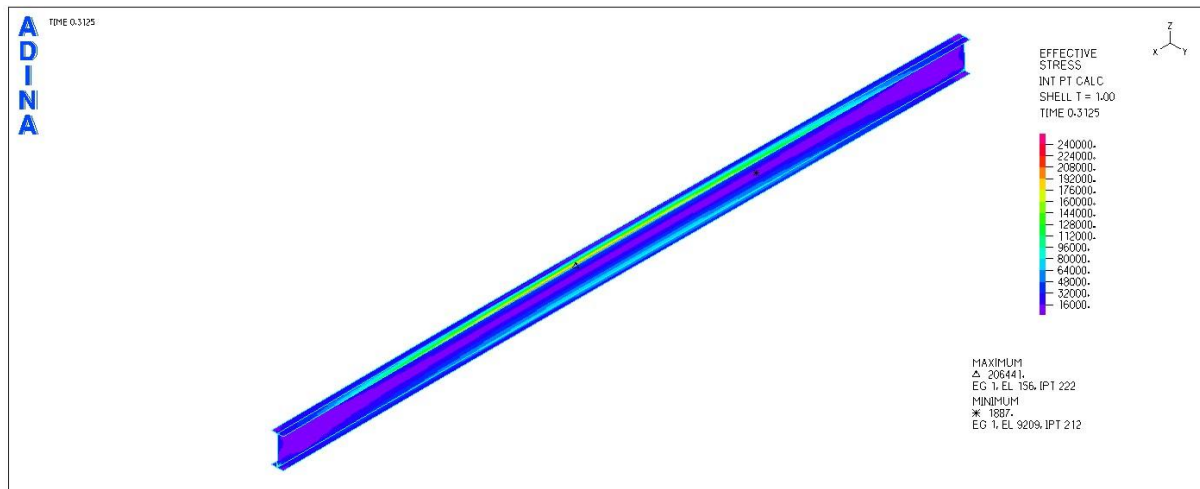
ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,22)



Σχήμα 5.86

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο A

ΣΗΜΕΙΟ B (t=0,31)

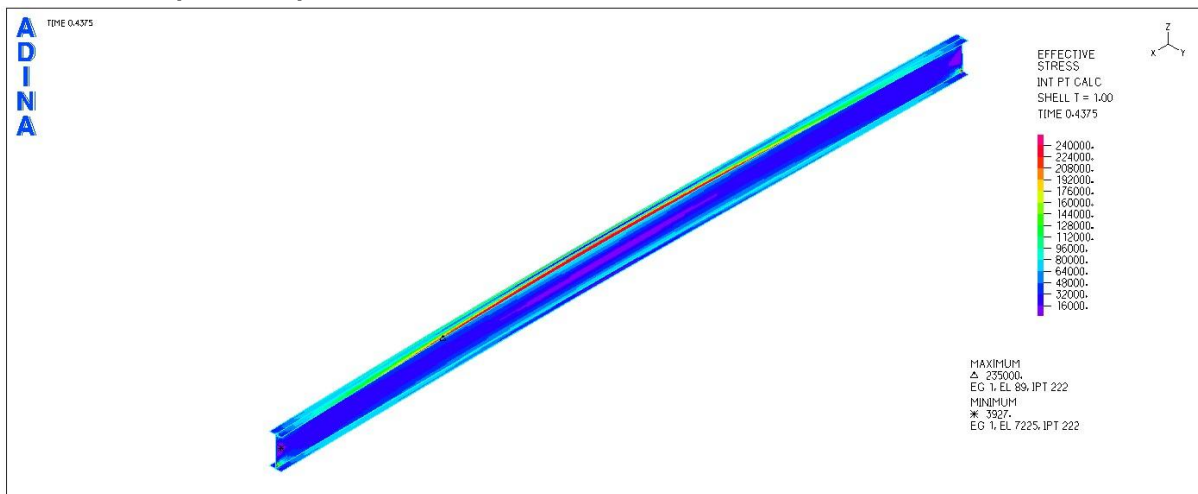


Σχήμα 5.87

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο B

Είναι χαρακτηριστικό ότι στο σημείο B κανένα σημείο δεν έχει αποκτήσει τάση von Mises ίση με το όριο διαρροής. Ακριβώς την επόμενη χρονική στιγμή κάποια σημεία του άνω πέλματος που έχουν τη μέγιστη πλευρική εκτροπή, αποκτούν τάση ίση με την τάση διαρροής και προκύπτει ο καθοδικός κλάδος του δρόμου ισορροπίας.

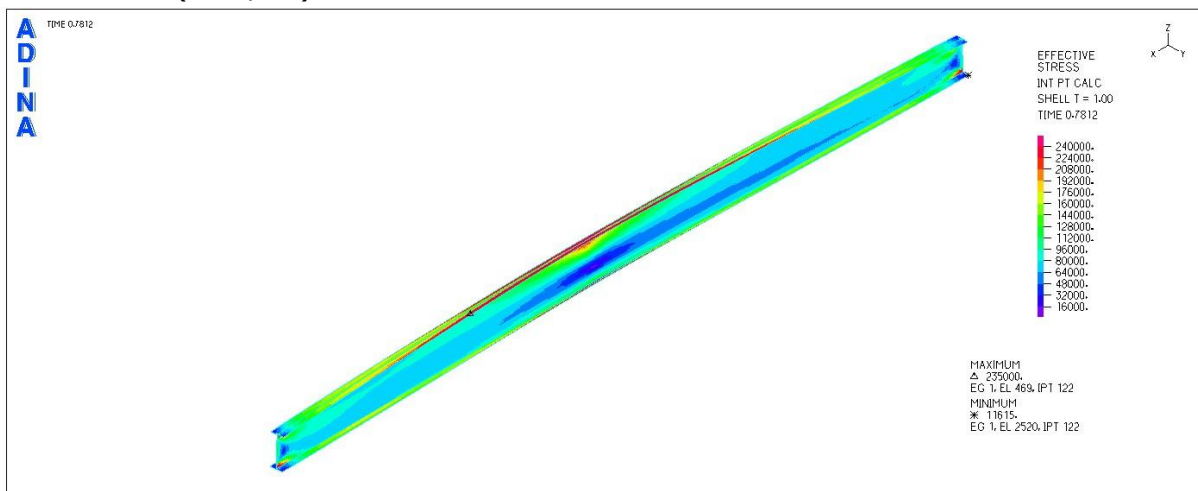
ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,44)



Σχήμα 5.88

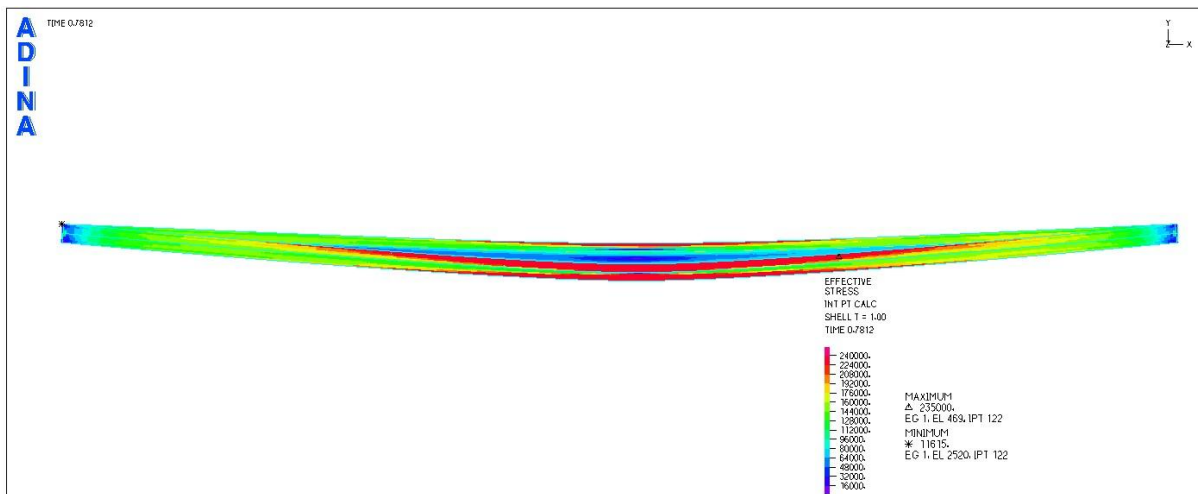
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)

ΣΗΜΕΙΟ Δ (t=0,78)



Σχήμα 5.89

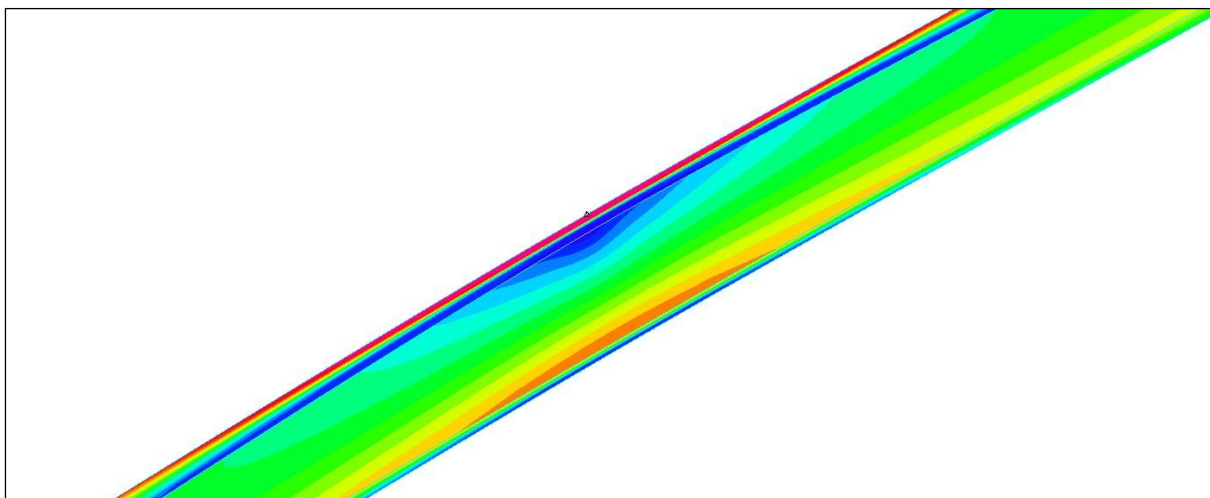
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (προοπτικό)



Σχήμα 5.90

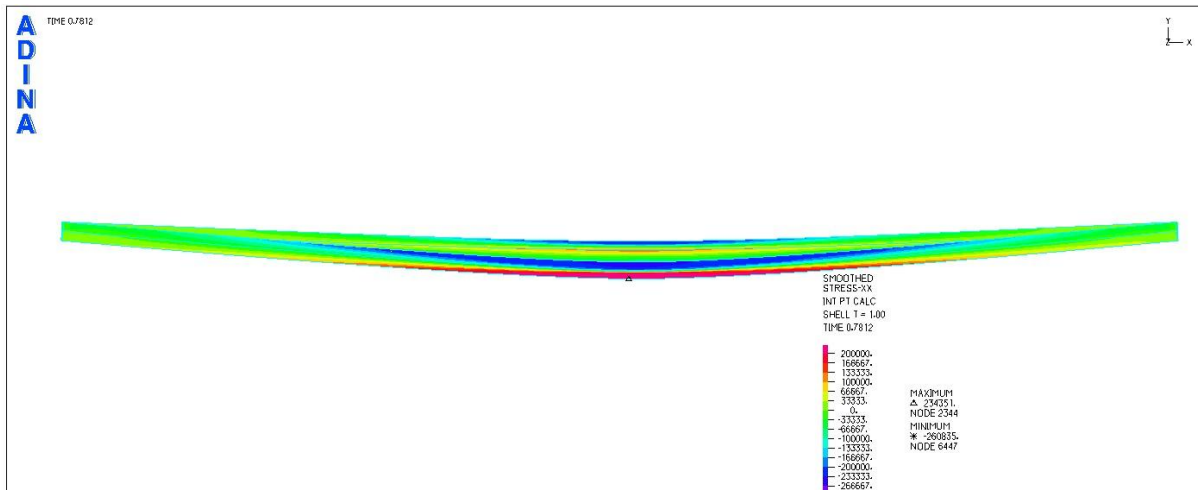
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (κάτοψη)

ΕΙΚΟΝΕΣ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ



Σχήμα 5.91

Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (λεπτομέρεια)

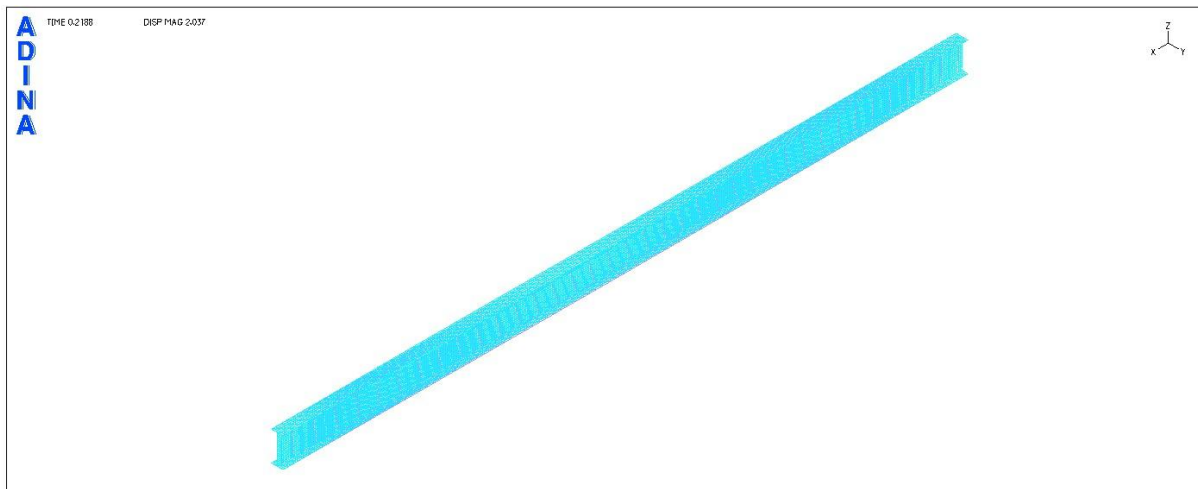


Σχήμα 5.92

Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (κάτοψη)

ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

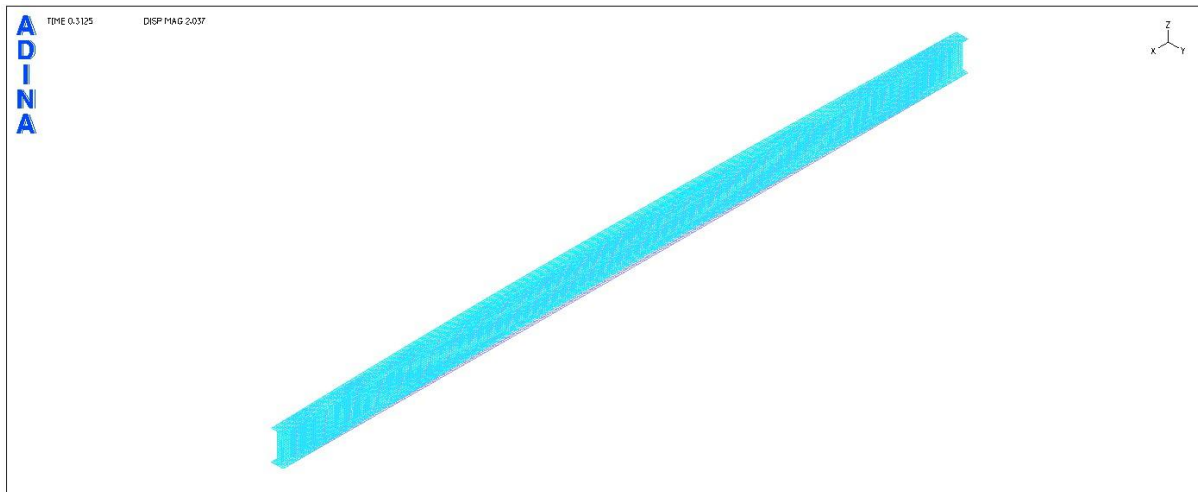
ΣΗΜΕΙΟ Α



Σχήμα 5.93

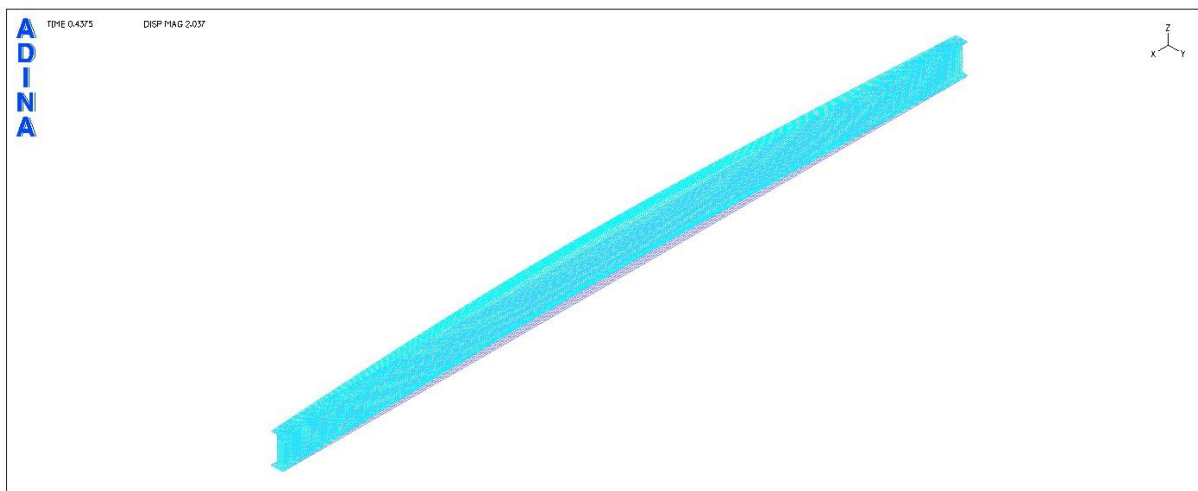
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Α

ΣΗΜΕΙΟ Β

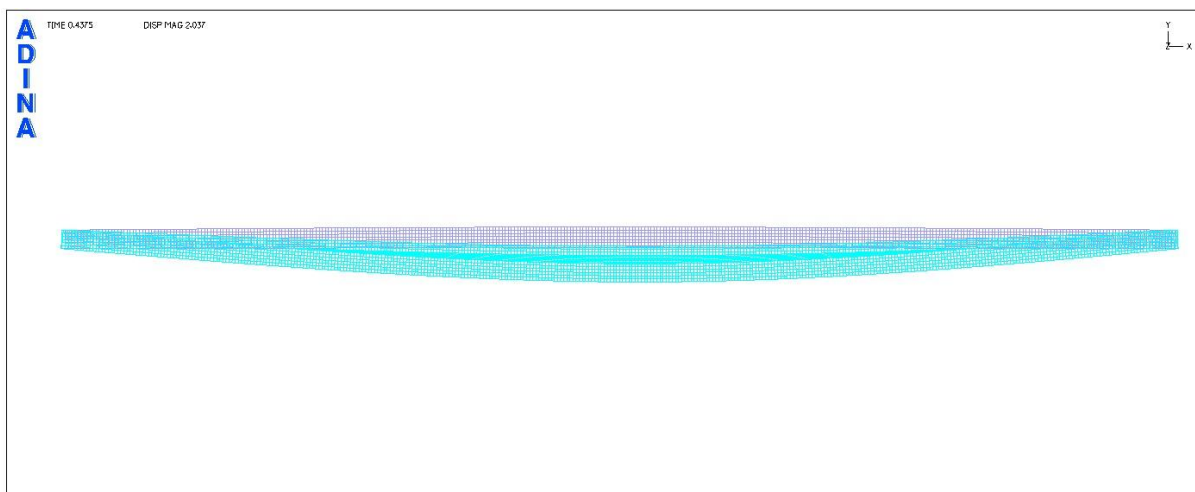


Σχήμα 5.94
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β

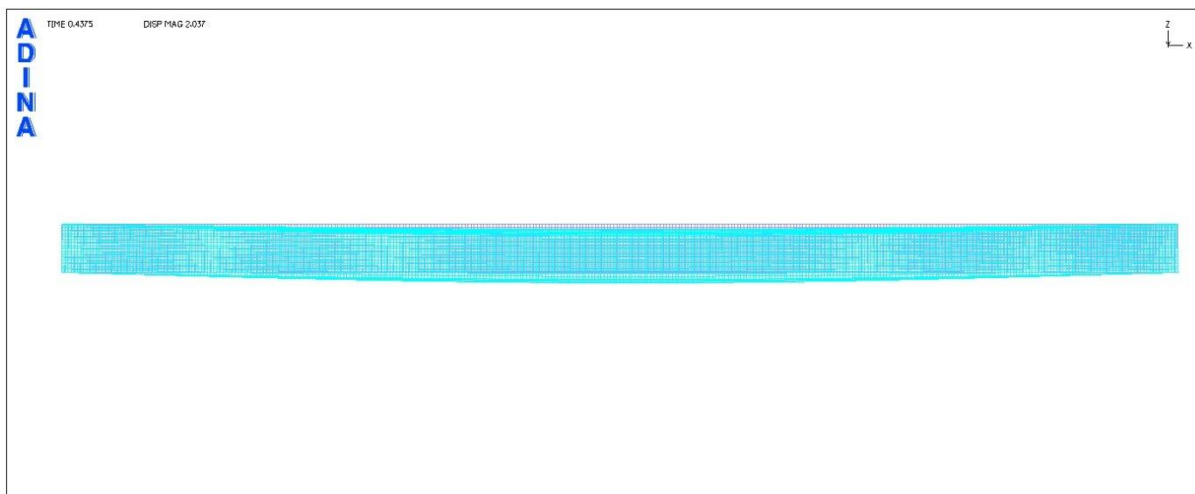
ΣΗΜΕΙΟ Γ



Σχήμα 5.95
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)

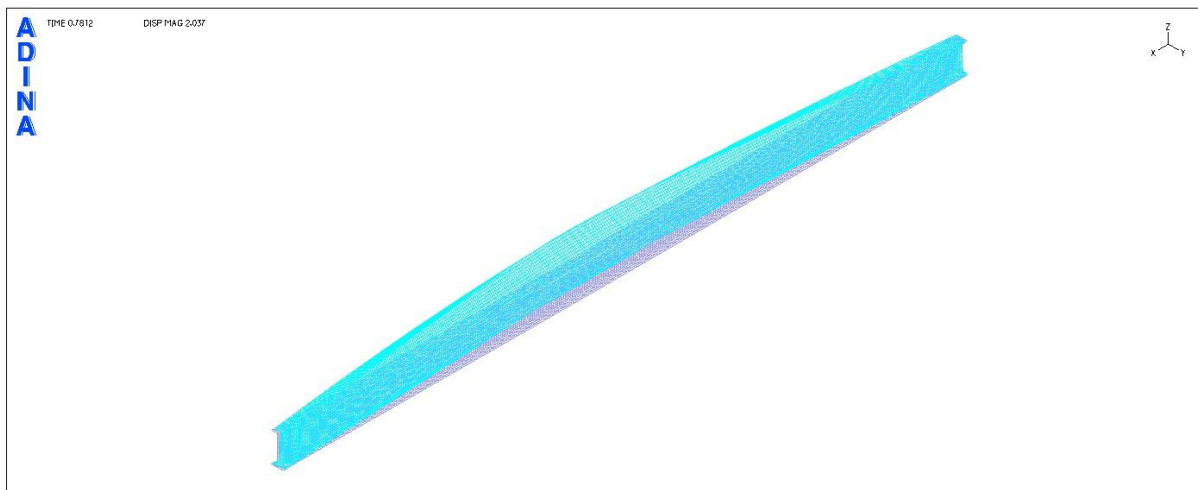


Σχήμα 5.96
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (κάτοψη)



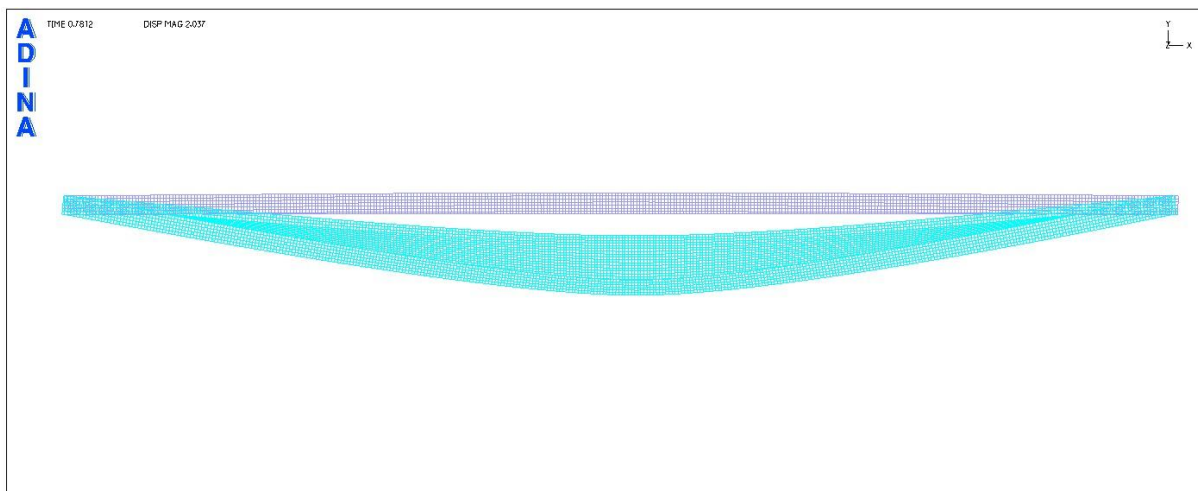
Σχήμα 5.97
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ Δ



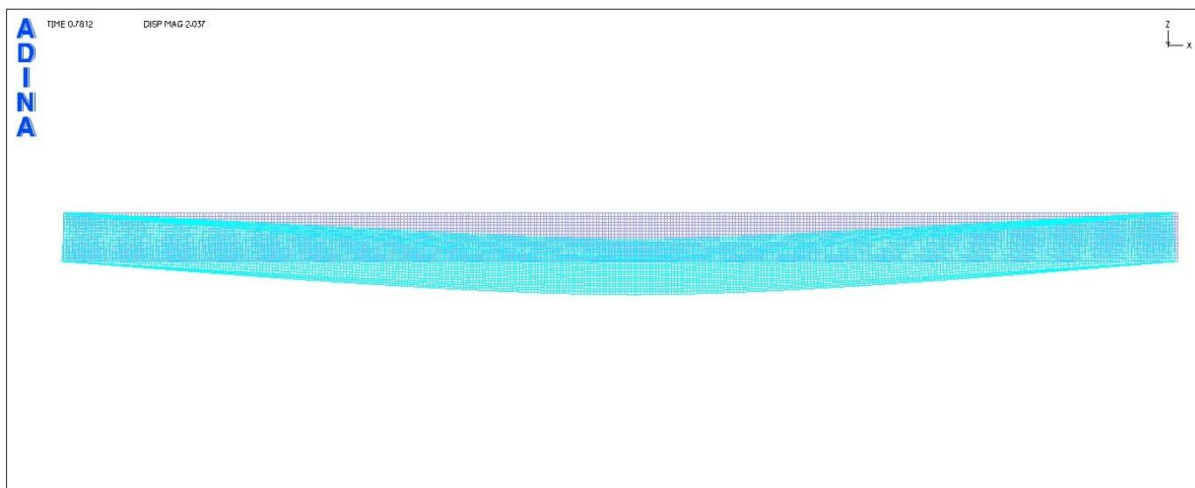
Σχήμα 5.98

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (προοπτικό)



Σχήμα 5.99

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (κάτοψη)

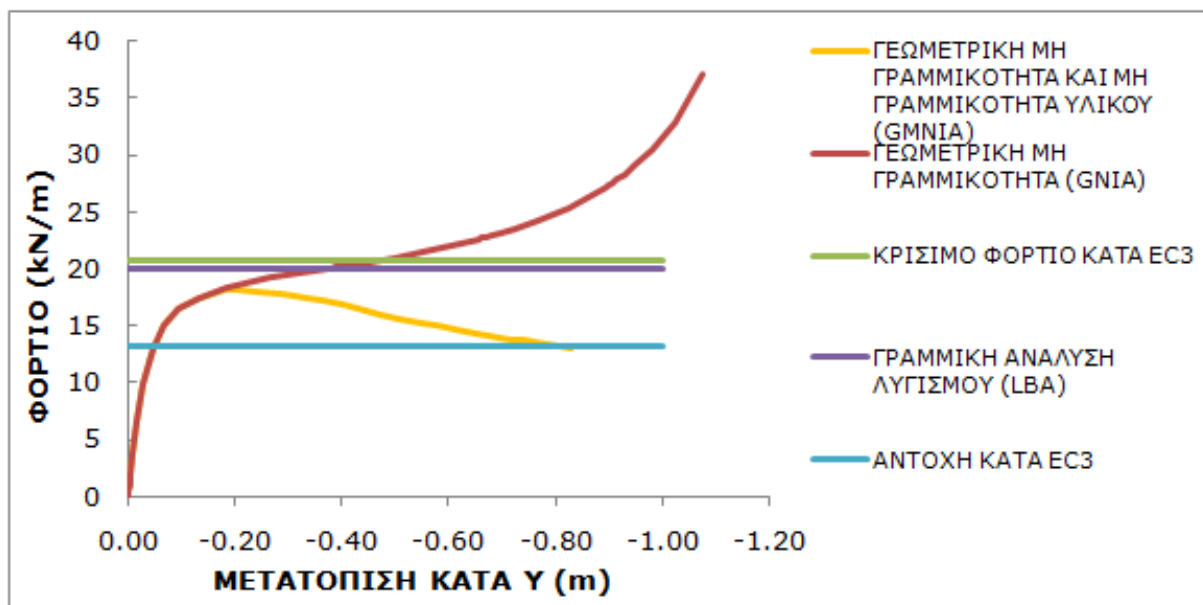


Σχήμα 5.100

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (όψη)

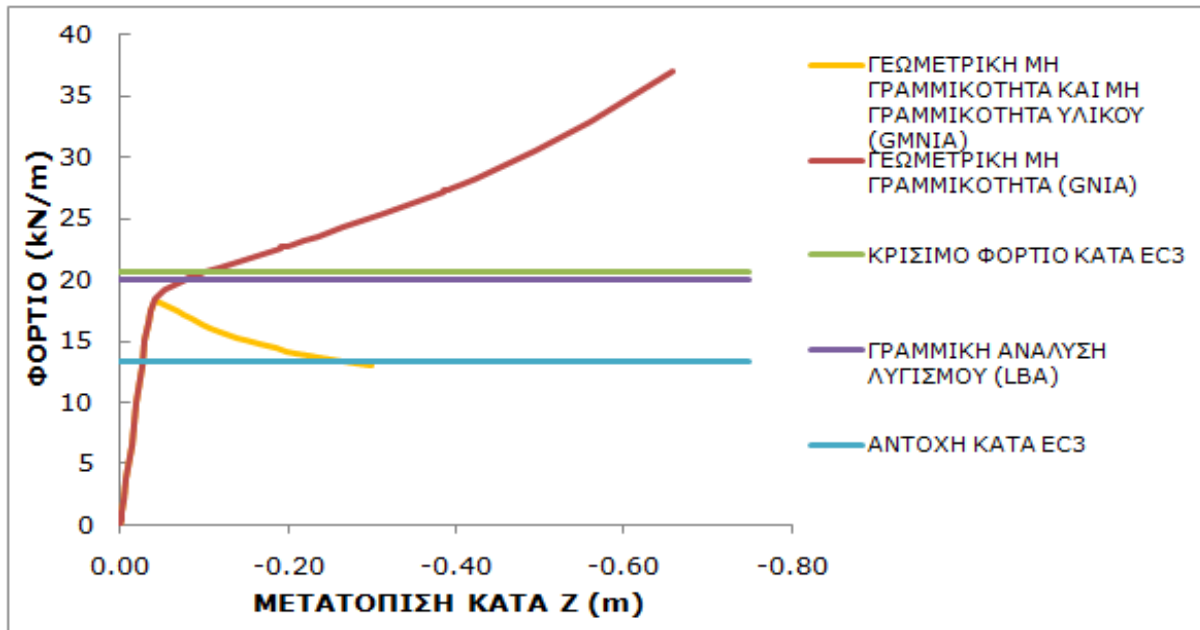
5.3.6 Συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας για όλες τις αναλύσεις

Στα σχήματα 5.101 και 5.102 παρουσιάζονται συγκριτικά σε ενιαία διαγράμματα οι δρόμοι ισορροπίας που έχουν προκύψει στο ADINA για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού ταυτόχρονα, προκειμένου να είναι άμεσα ορατή η επίδραση της κάθε μη γραμμικότητας στη συμπεριφορά του φορέα.



Σχήμα 5.101

Δρόμοι ισορροπίας για τα 2 είδη μη γραμμικότητας που εξετάσθηκαν

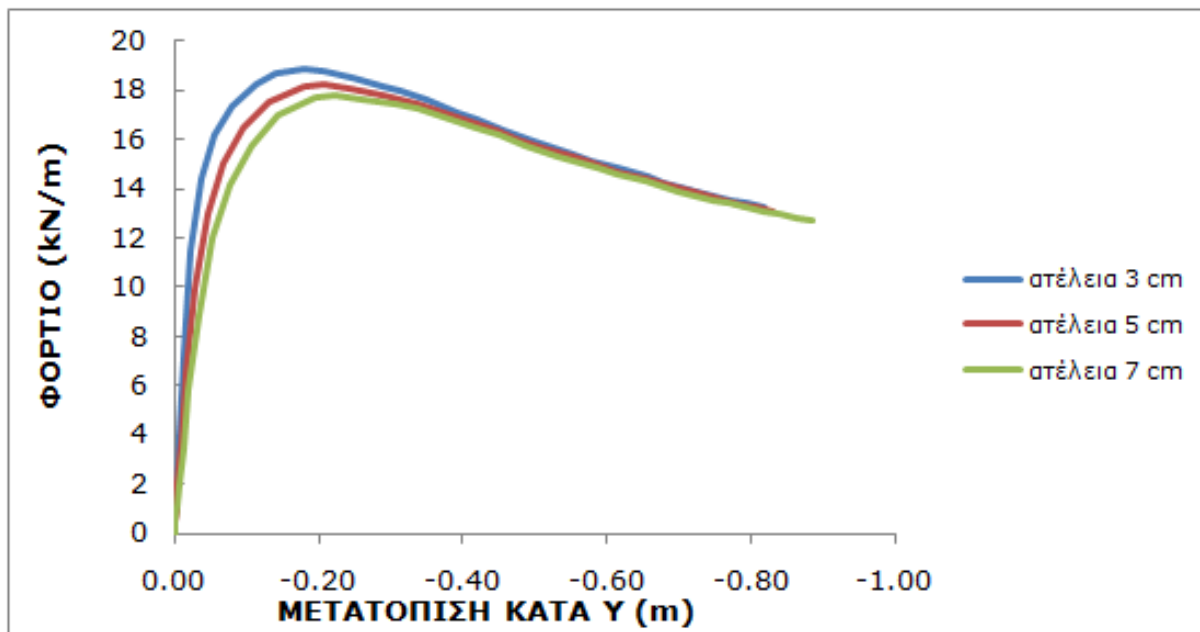


Σχήμα 5.102

Δρόμοι ισορροπίας για τα 2 είδη μη γραμμικότητας που εξετάσθηκαν

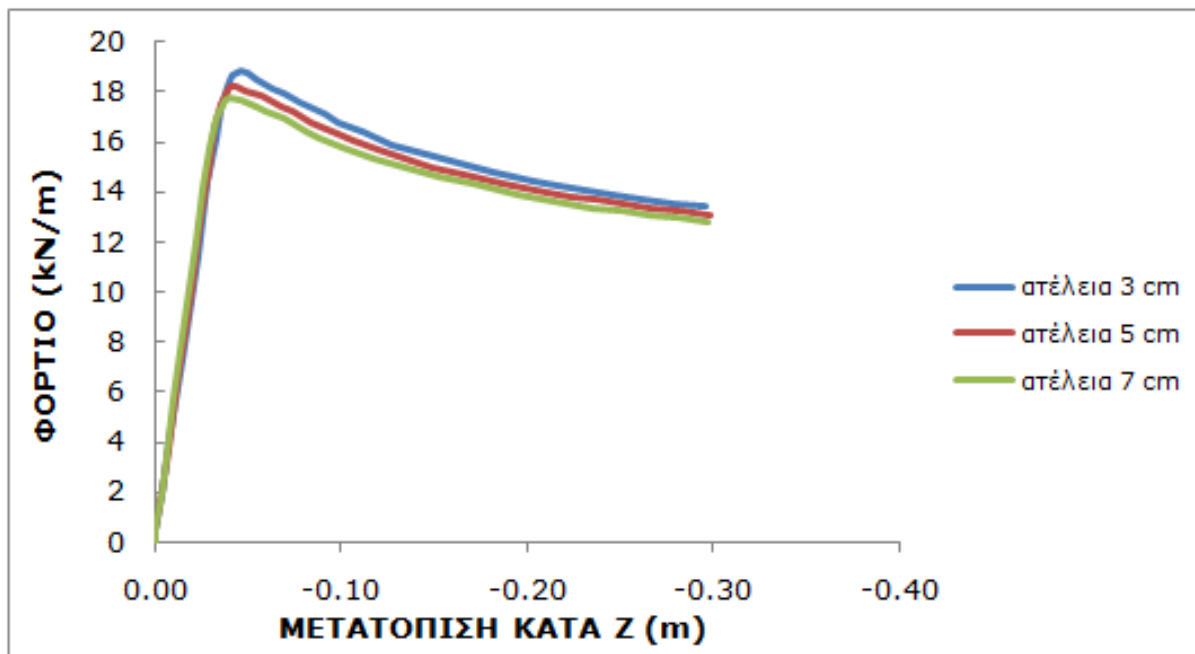
5.3.7 Επιρροή της ατέλειας στη συμπεριφορά του φορέα

Πραγματοποιούνται αναλύσεις για τιμές ατέλειας ίσες με 3cm και 7cm.



Σχήμα 5.103

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης για διάφορες τιμές ατέλειας



Σχήμα 5.104

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης για διάφορες τιμές ατέλειας

5.3.8 Επιρροή της θέσης εφαρμογής του φορτίου στη συμπεριφορά του φορέα

	M_{cr} κατά EC3 (kNm)	P_{cr} κατά EC3 (kN/m)
Άνω πέλμα	676,00	16,69
Κέντρο βάρους	836,67	20,66
Κάτω πέλμα	1035,53	25,57

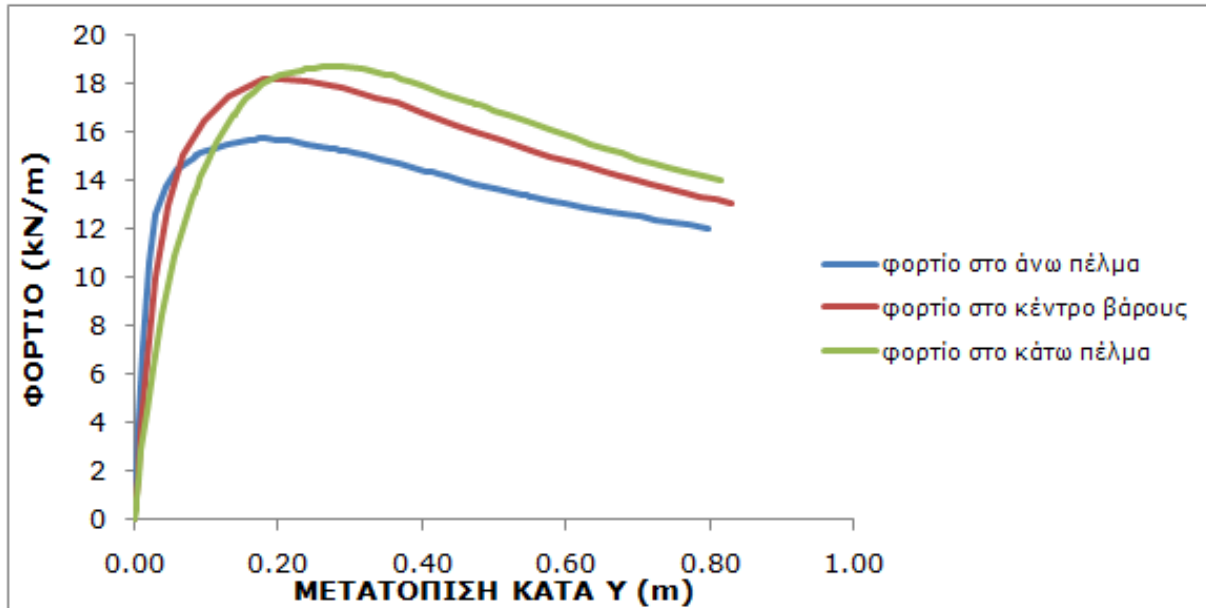
Πίνακας 5.7

Συγκριτική παρουσίαση κρίσιμων φορτίων κατά τον Ευρωκώδικα 3 για διαφορετικές θέσεις άσκησης φορτίου

	$P_{cr,ADINA}$ (kN/m)
Άνω πέλμα	16,10
Κέντρο βάρους	19,95
Κάτω πέλμα	24,64

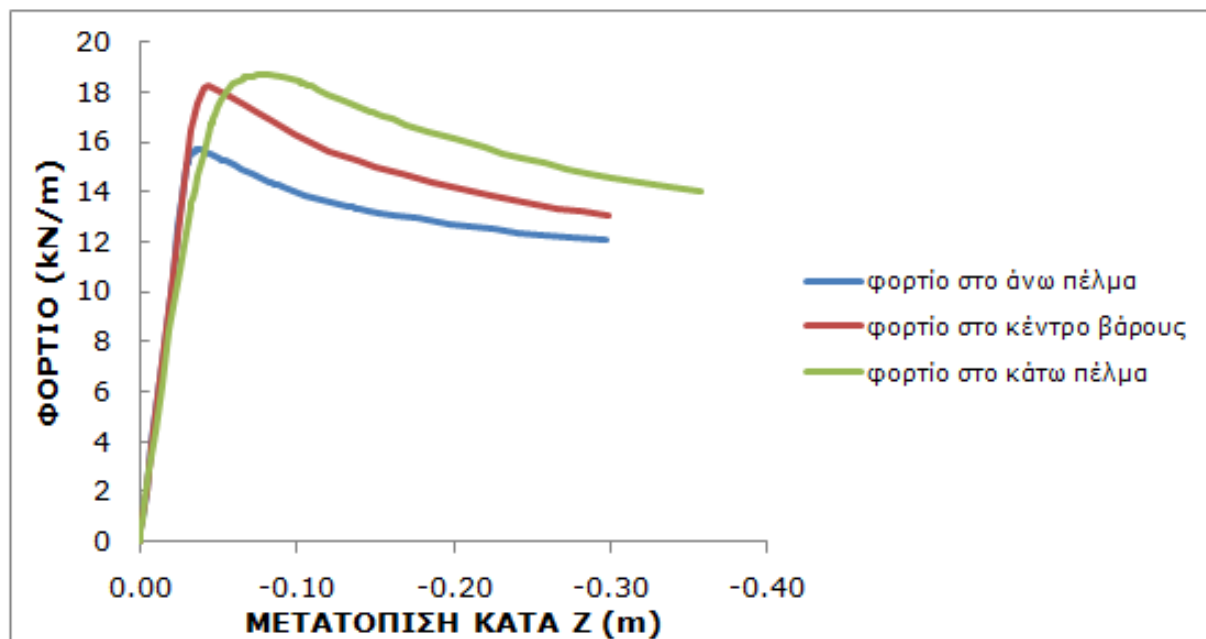
Πίνακας 5.8

Συγκριτική παρουσίαση κρίσιμων φορτίων από γραμμική ανάλυση λυγισμού στο ADINA για διαφορετικές θέσεις άσκησης φορτίου



Σχήμα 5.105

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης για διαφορετικές θέσεις άσκησης του φορτίου για μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας



Σχήμα 5.106

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου- z μετατόπισης για διαφορετικές θέσεις άσκησης του φορτίου για μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας

Κεφάλαιο 6

Τοπικός λυγισμός αμφιέρειστης συμπαγούς δοκού

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται αμφιέρειστες δοκοί διατομής διπλού ταυ με αρκετά μικρό πάχος κορμού και πελμάτων, στις οποίες εμφανίζεται τοπικός λυγισμός πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής και ο οποίος προκαλεί την αστοχία τους. Θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA προκειμένου να παρουσιασθούν εικόνες του τοπικού λυγισμού των δοκών και να ευρεθεί ο δρόμος ισορροπίας από τις μη γραμμικές αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν. Επίσης θα γίνουν δοκιμές ώστε να διερευνηθεί πότε ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται στο μέσο μιας αμφιέρειστης δοκού, δηλαδή προκαλείται λόγω της μεγάλης κάμψης στο μέσο, και πότε εμφανίζεται στα άκρα, δηλαδή πρόκειται για διατμητικό λυγισμό.

6.1 Αμφιέρειστη δοκός μήκους 20m διατομής κατηγορίας 4

Εξετάζεται η περίπτωση αμφιέρειστης δοκού μήκους $L=20\text{m}$ η οποία φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στο άνω πέλμα της και η οποία εξασφαλίζεται πλευρικά καθ'όλο το μήκος της στα σημεία συναρμογής άνω πέλματος και κορμού. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης διατομής είναι τα ακόλουθα:

$$h=700\text{mm}$$

$$b=300\text{mm}$$

$$t_w=4\text{mm}$$

$$t_f=6\text{mm}$$

Πραγματοποιείται κατάταξη της διατομής με βάση τον Ευρωκώδικα 3:

$$\varepsilon=\sqrt{235/f_y}=1 \text{ για χάλυβα S235}$$

Έλεγχος κορμού για καθαρή κάμψη:

$$c/t_w=(700-2\cdot 6)/4=172>124\varepsilon=124 \Rightarrow \text{κατηγορία 4}$$

Έλεγχος πέλματος για καθαρή κάμψη:

$c/t_f = [(300-4)/2]/6 = 24,67 > 14\varepsilon = 14 \Rightarrow$ κατηγορία 4
 Επομένως όλη η διατομή ανήκει στην κατηγορία 4.

Η παρουσία των πλευρικών εξασφαλίσεων εμποδίζει τον πλευρικό λυγισμό της δοκού και συνεπώς αναμένεται να εμφανισθεί τοπικός λυγισμός συγκεντρωμένος στην περιοχή όπου ο φορέας καταπονείται περισσότερο. Δε γνωρίζουμε εξαρχής αν θα εμφανιστεί τοπικός λυγισμός στο μέσο της αμφιέρειστης δοκού λόγω κάμψης ή στα άκρα της λόγω τέμνουσας. Ο κορμός γενικά θεωρείται με μειωμένο πάχος στα παραδείγματα του τοπικού λυγισμού που εξετάζονται. Έχοντας όμως μειώσει αρκετά και το πάχος των πελμάτων τα οποία παραλαμβάνουν μέσω αξονικών δυνάμεων την καμπτική ροπή, θεωρείται πιθανότερη η εκδήλωση τοπικού λυγισμού στο μέσο του ανοίγματος της αμφιέρειστης δοκού. Ο τοπικός λυγισμός στην περίπτωση αυτή θα εντοπιστεί στο άνω πέλμα της δοκού και σε τμήμα του κορμού, στο θλιβόμενο δηλαδή τμήμα της διατομής.

Εφόσον πρόκειται για διατομή κατηγορίας 4 δεν μπορούμε να κάνουμε πλαστική ανάλυση. Θα υπολογιστεί στην περίπτωση αυτή η ελαστική ροπή αντίστασης, η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$W_{el} = \frac{I_y}{z} \quad (6.1)$$

όπου z : η απόλυτη τιμή της απόστασης των άκρων της διατομής από τον κεντροβαρικό της άξονα

Με αριθμητική αντικατάσταση προκύπτει:

$$W_{el} = \frac{I_y}{z} = \frac{54203,68}{35} = 1548,68 \text{ cm}^3$$

Η ροπή διαρροής της εξεταζόμενης διατομής για χάλυβα S235 είναι ίση με:

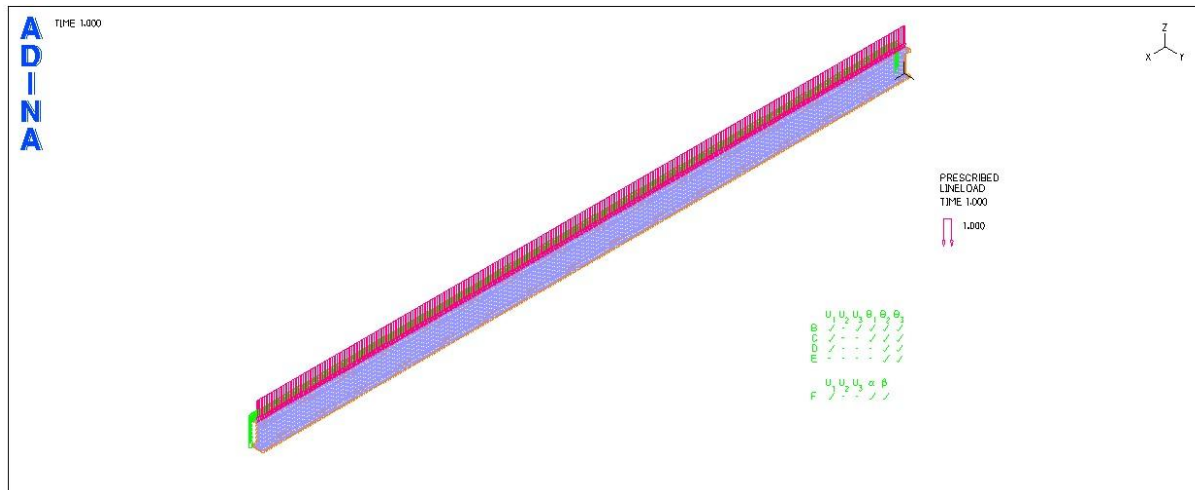
$$M_y = W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 1548,68 \text{ cm}^3 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,00$$

$$M_y = 363,94 \text{ kNm}$$

Το φορτίο διαρροής είναι ίσο με $P_y = 8 \cdot M_y / L^2 \Rightarrow P_y = 7,28 \text{ kN/m}$.

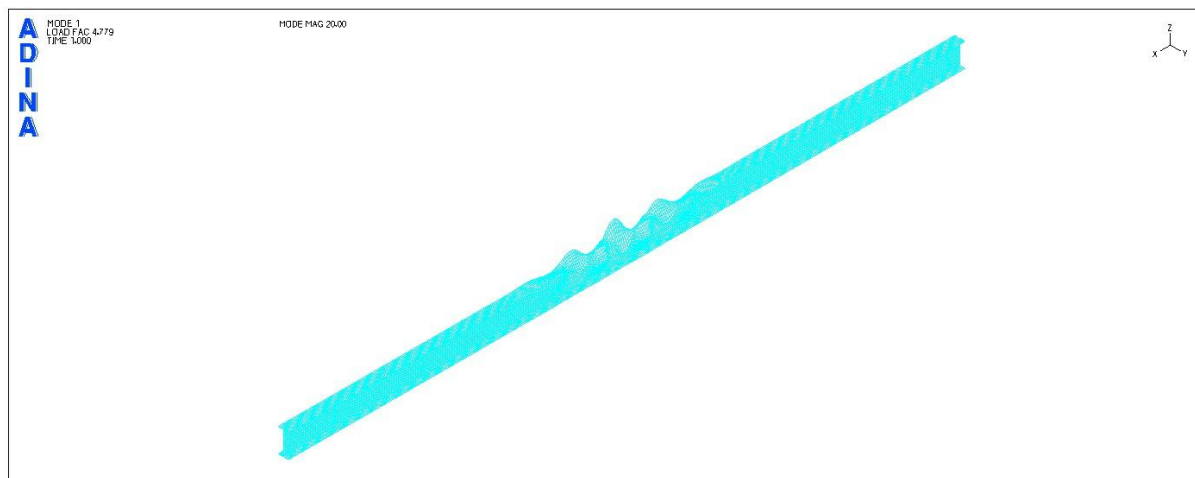
6.1.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Στο φορέα ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 1kN/m στο άνω πέλμα της δοκού.



Σχήμα 6.1

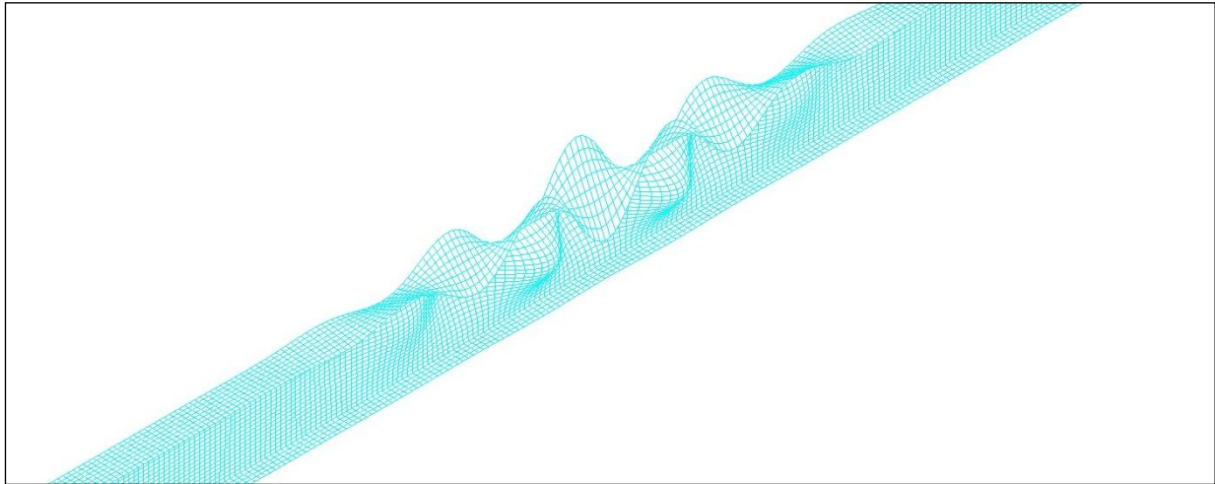
Αμφιέριστος φορέας μήκους 20m με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 1kN/m στο άνω πέλμα



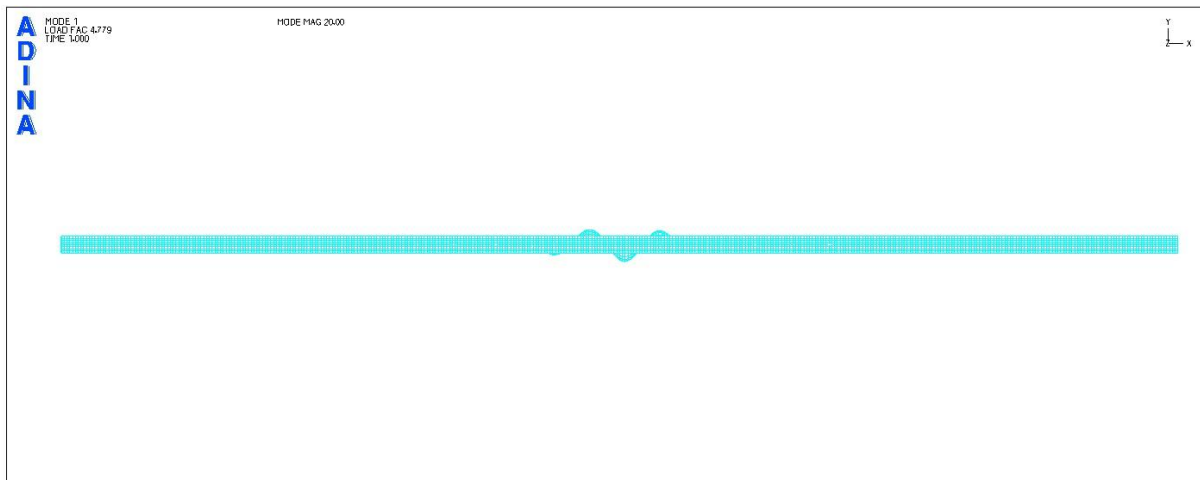
Σχήμα 6.2

1^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)

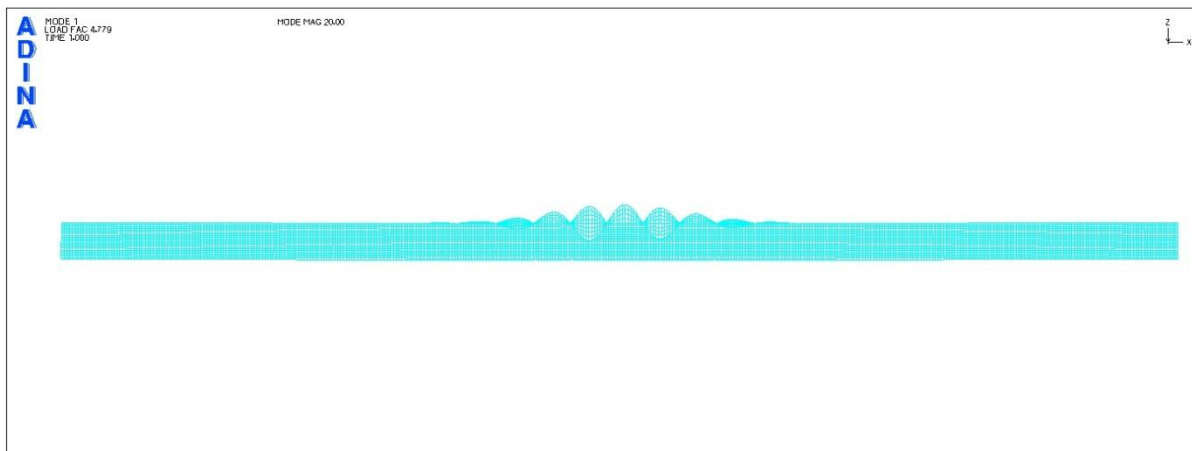
Παρατηρούμε ότι από την 1^η κιάλας ιδιομορφή λυγισμού εμφανίζεται τοπικός λυγισμός. Αυτό φυσικά ήταν αναμενόμενο καθώς οι πλευρικές εξασφαλίσεις έχουν πλήρως εμποδίσει την εμφάνιση πλευρικού λυγισμού. Το φορτίο τοπικού λυγισμού προέκυψε ίσο με $P_{cr}=4,78\text{kN/m}$. Η αντίστοιχη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=4,78 \cdot 20^2/8=239,00\text{kNm} < M_y=363,94\text{kNm}$.



Σχήμα 6.3
Λεπτομέρεια τοπικού λυγισμού



Σχήμα 6.4
1^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



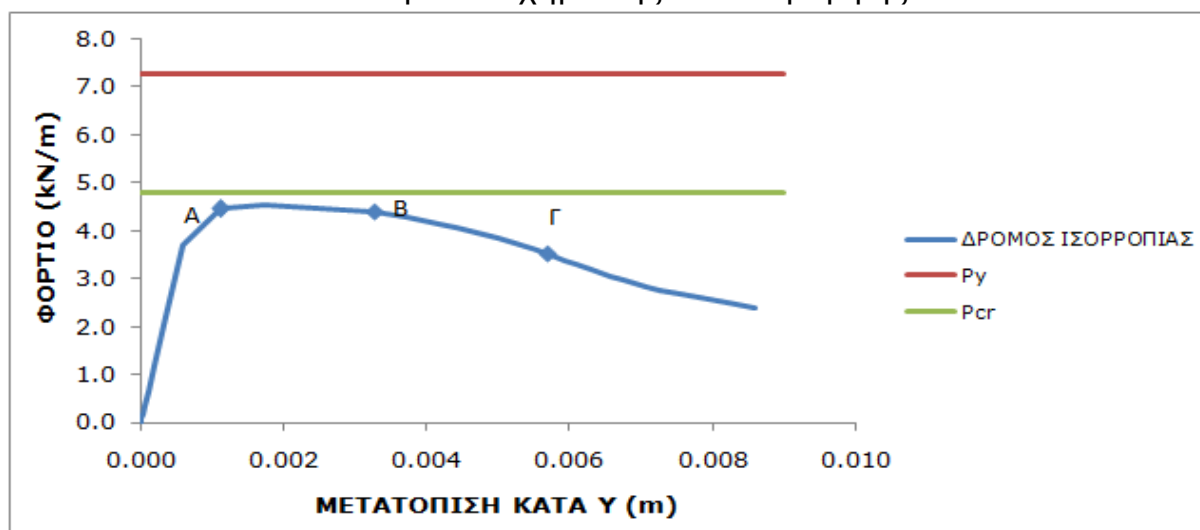
Σχήμα 6.5
1^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)

6.1.2 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

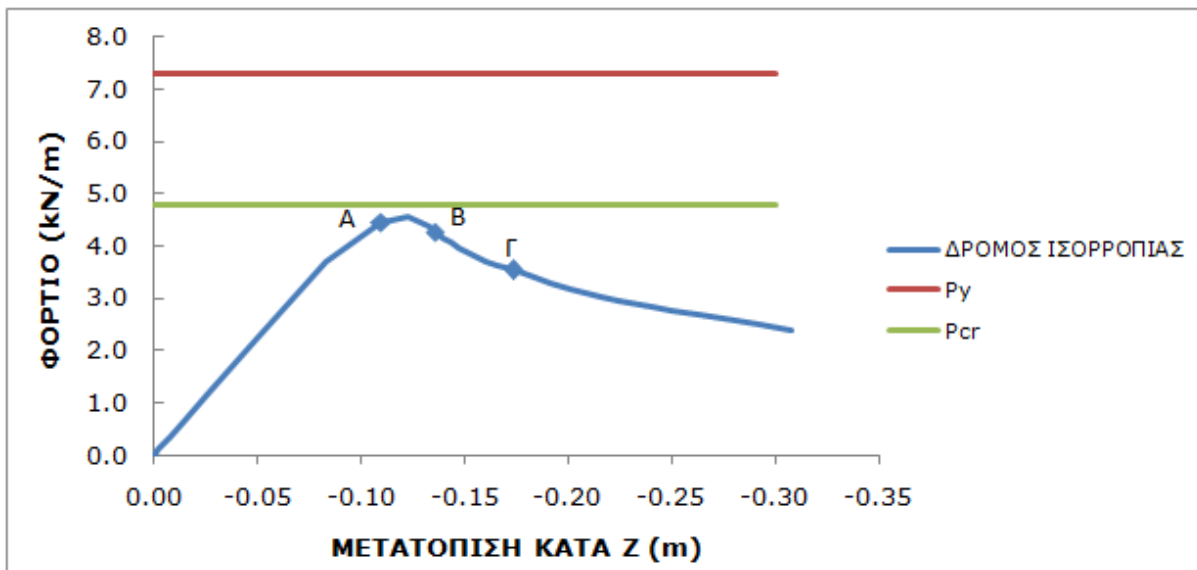
Θεωρείται διγραμμικό υλικό S235 χωρίς κράτυνση.

Η μη γραμμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο collapse analysis όπου θεωρήθηκε ως σημείο αναφοράς ο κόμβος της μεσαίας διατομής στο σημείο συνένωσης κορμού και κάτω πέλματος.

Δίνεται στο φορέα σχετικά μεγάλη αρχική γεωμετρική ατέλεια 1cm κατά τη διεύθυνση y σε κόμβο που βρίσκεται λίγο κάτω από τη συνένωση άνω πέλματος και κορμού (η οποία είναι δεσμευμένη) στη μεσαία διατομή της δοκού. Η ατέλεια δίνεται με το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής.

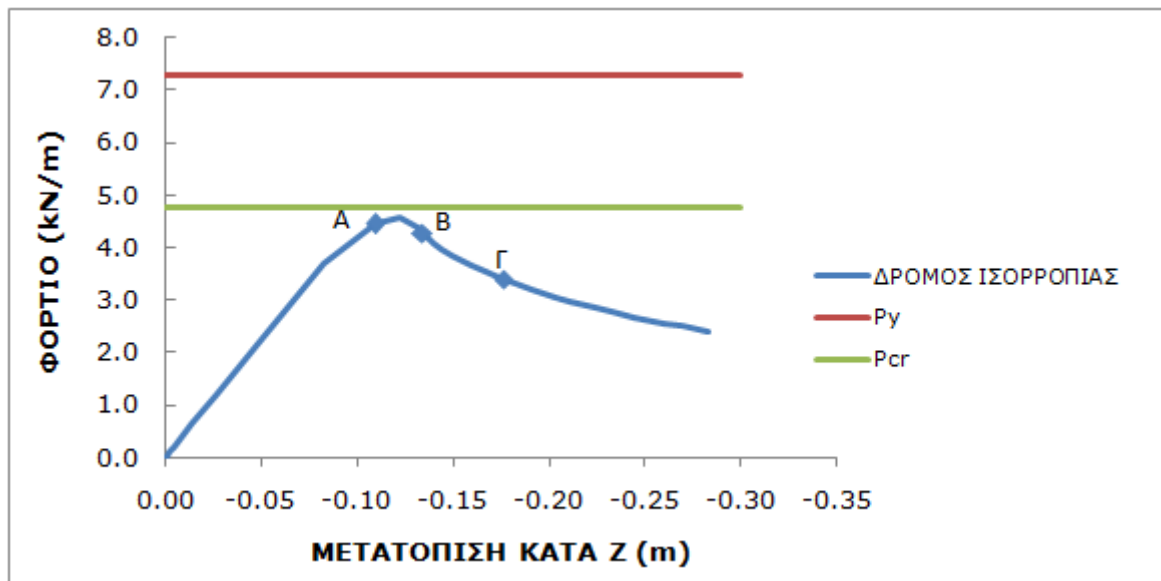


Σχήμα 6.6
Δρόμος ισορροπίας φορτίου- y μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 6.7

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια

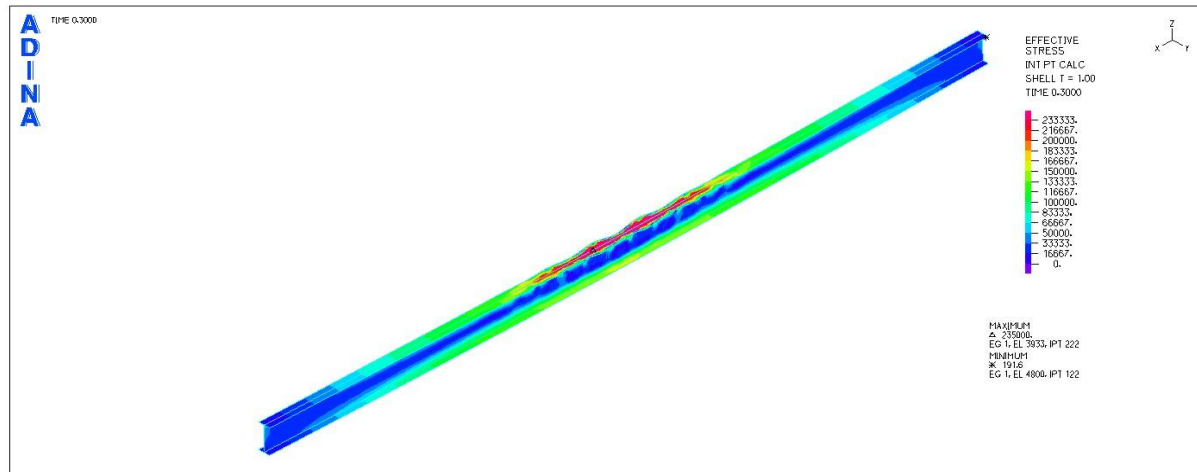


Σχήμα 6.8

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΣΗΜΕΙΟ Α (t=0,30)

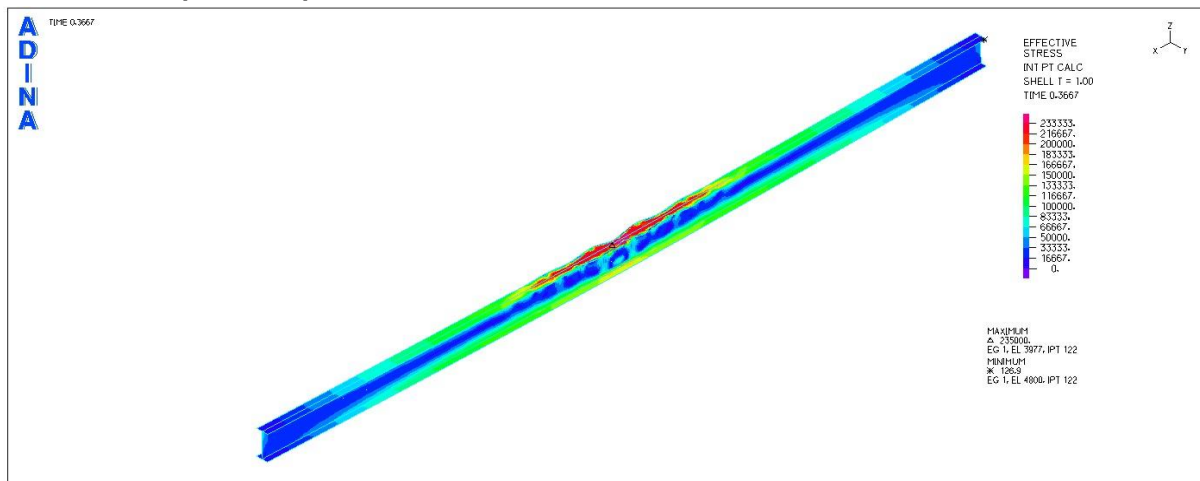


Σχήμα 6.9

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Α

Όπως αναμενόταν οι τάσεις κατά μήκος της δοκού απέχουν αρκετά από την τάση διαρροής. Εξαιρέση αποτελούν οι ιδιαίτερες αυξημένες τάσεις στο άνω πέλμα της μεσαίας διατομής, φαινόμενο που οφείλεται στον εντοπισμένο σε εκείνη την περιοχή τοπικό λυγισμό. Η μεγάλη ροπή στην περιοχή αυτή οδηγεί σε αυξημένες τοπικές θλιπτικές τάσεις οι οποίες αν ξεπεράσουν κάποιο όριο δημιουργούν τοπικό λυγισμό. Το φαινόμενο του τοπικού λυγισμού έχει ήδη εκδηλωθεί πριν την ανάπτυξη της f_y και οδηγεί με τη σειρά του στην περαιτέρω αύξηση των τάσεων στο άνω πέλμα της μεσαίας διατομής, οι οποίες όταν εξισωθούν με την f_y οδηγούν το δρόμο ισορροπίας σε καθοδικό κλάδο.

ΣΗΜΕΙΟ Β (t=0,37)

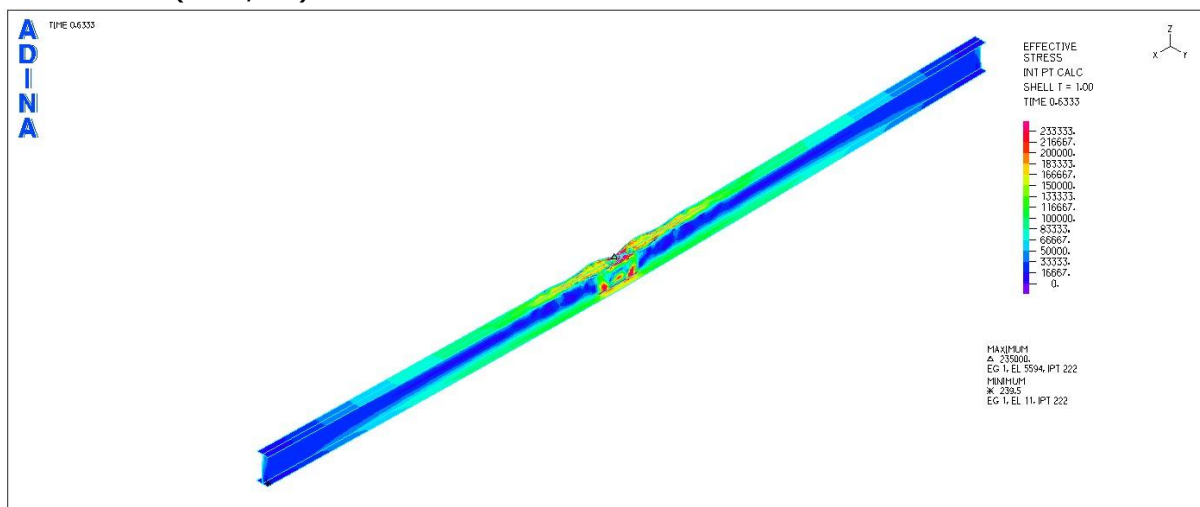


Σχήμα 6.10

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Β

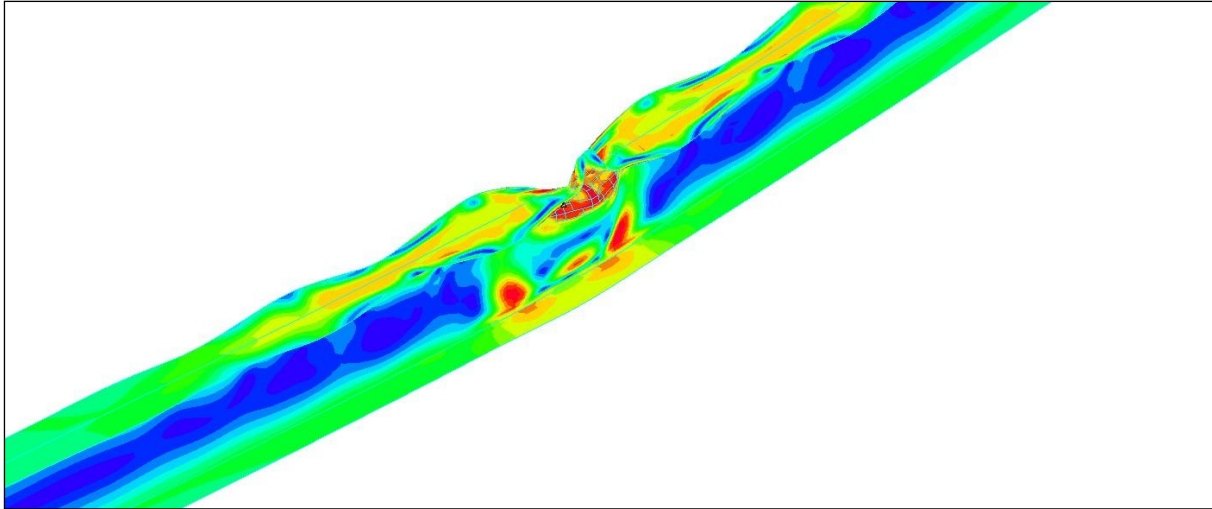
Η εικόνα των τάσεων είναι η ίδια περίπου με το σημείο Α. Παρατηρούνται αυξημένες τάσεις στην περιοχή της μεσαίας διατομής στο θλιβόμενο άνω πέλμα.

ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,63)



Σχήμα 6.11

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

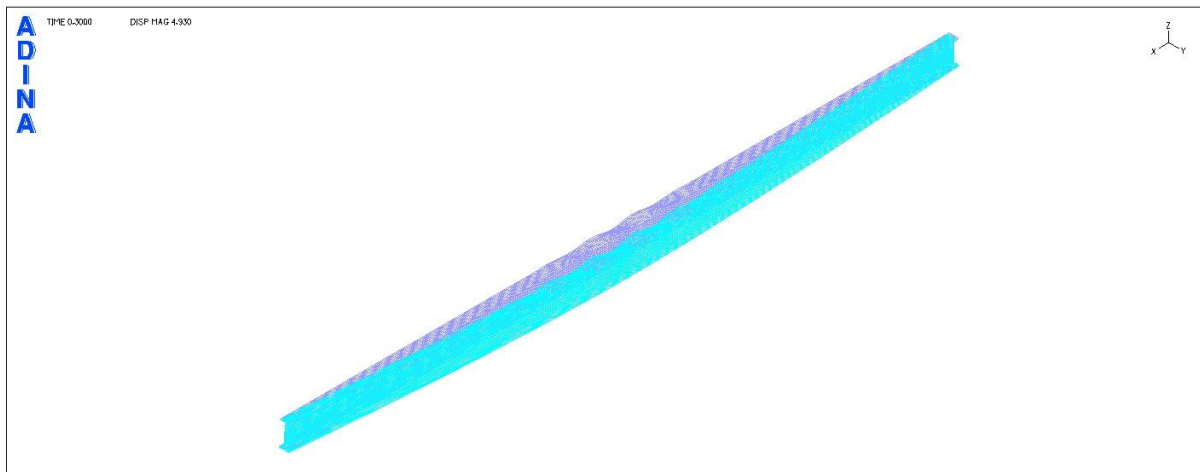


Σχήμα 6.12
Λεπτομέρεια τάσεων von Mises για το σημείο Γ

Οι τάσεις στη μεσαία διατομή παρουσιάζονται ιδιαίτερα αυξημένες, ωστόσο σε αρκετά σημεία της διατομής παραμένουν ακόμα αρκετά μικρότερες από την τάση διαρροής.

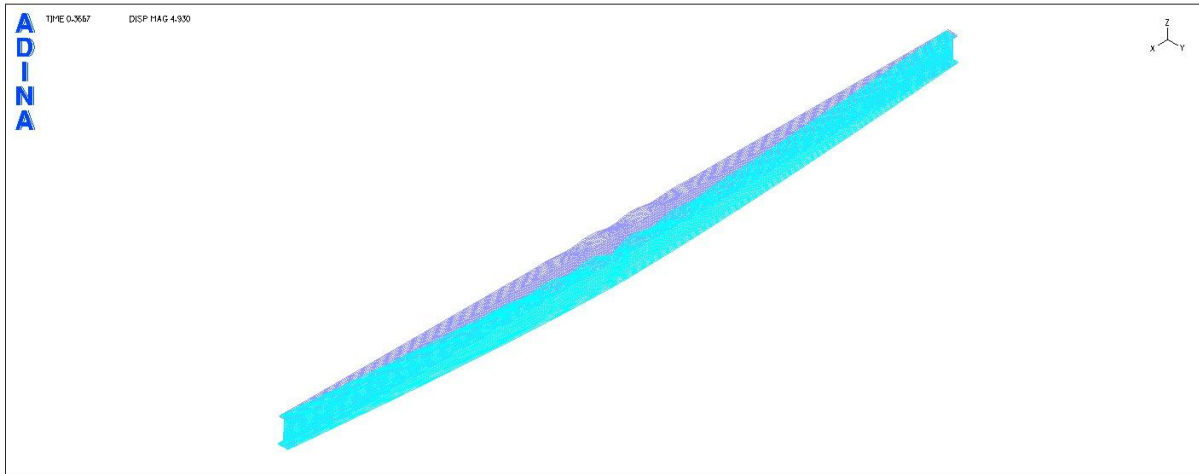
ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΣΗΜΕΙΟ Α



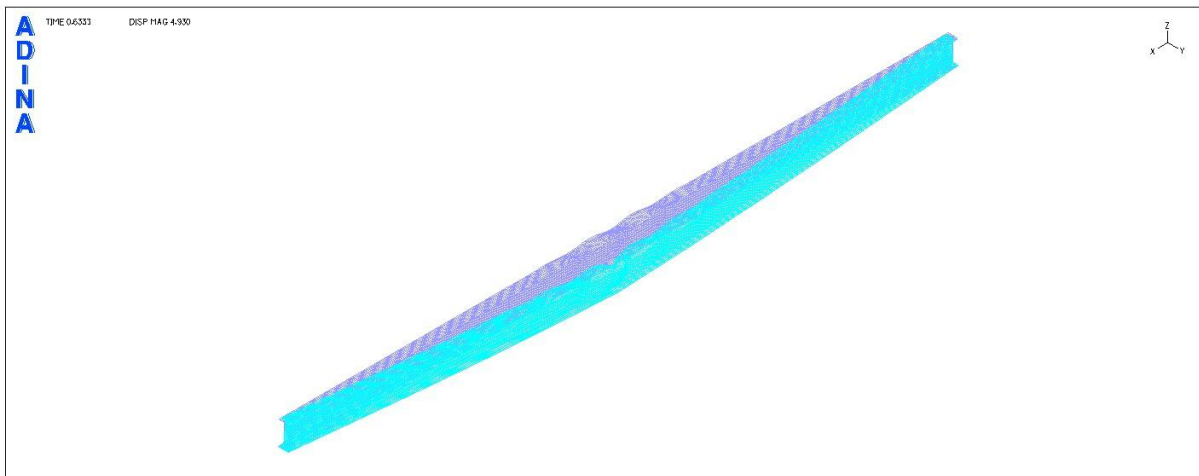
Σχήμα 6.13
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Α

ΣΗΜΕΙΟ Β



Σχήμα 6.14
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β

ΣΗΜΕΙΟ Γ



Σχήμα 6.15
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

6.1.3 Σύγκριση δρόμων ισορροπίας για διαφορετικά πάχη διατομών κατηγορίας 4

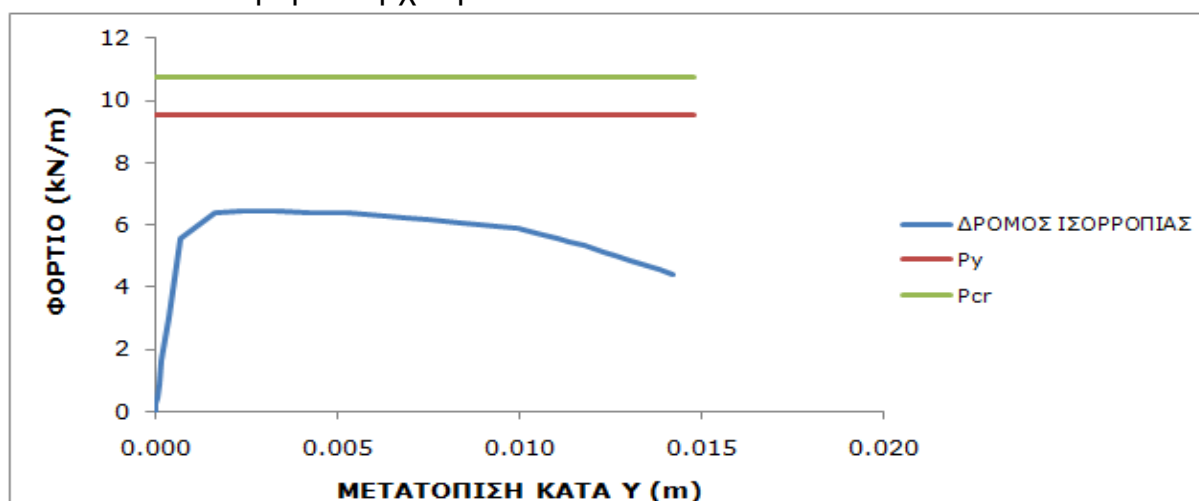
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων με το ADINA για δύο ακόμα δοκούς με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως και η δοκός της παραγράφου 6.1.1, αλλά με διαφορετικά πάχη κορμού και πελμάτων. Οι διατομές εξακολουθούν να είναι κατηγορίας 4 και οι δοκοί είναι πάλι πλευρικά εξασφαλισμένες σε όλο το μήκος τους στα σημεία συνένωσης άνω πέλματος και κορμού.

- Αρχικά εξετάζεται διατομή με πάχος κορμού $t_w=5\text{mm}$ και πάχος πελμάτων $t_f=8\text{mm}$.

Το φορτίο που θα αντιστοιχούσε στη διαρροή των ακραίων ινών της μεσαίας διατομής προκύπτει ίσο με $P_y=8 \cdot W_{el} \cdot f_y / L^2=9,51\text{kN/m}$.

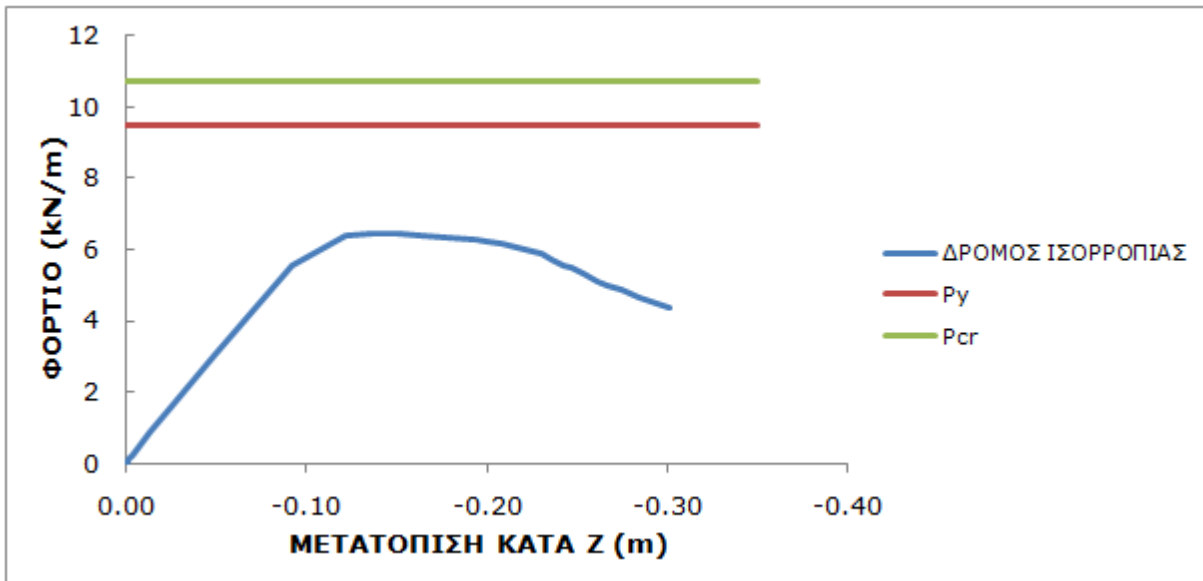
Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού στο ADINA, όπου παρουσιάζεται τοπικός λυγισμός στην 1^η κιάλας ιδιομορφή, προκύπτει το φορτίο τοπικού λυγισμού ίσο με **10,75kN/m**, τιμή λίγο μεγαλύτερη από το φορτίο διαρροής. Εξακολουθεί, συνεπώς, να φαίνεται έντονη η παρουσία του τοπικού λυγισμού. Αναμένεται αστοχία λόγω αλληλεπίδρασης των δύο φαινομένων. Σημειώνεται ότι ο τοπικός λυγισμός εξακολουθεί να εμφανίζεται στο μέσο της δοκού, στο άνω θλιβόμενο πέλμα και στο άνω τμήμα του κορμού.

Πραγματοποιείται συνδυασμένη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας, όπως ακριβώς είχε πραγματοποιηθεί στην παράγραφο 6.1.2 και δίνεται στο φορέα αρχική ατέλεια 1cm.



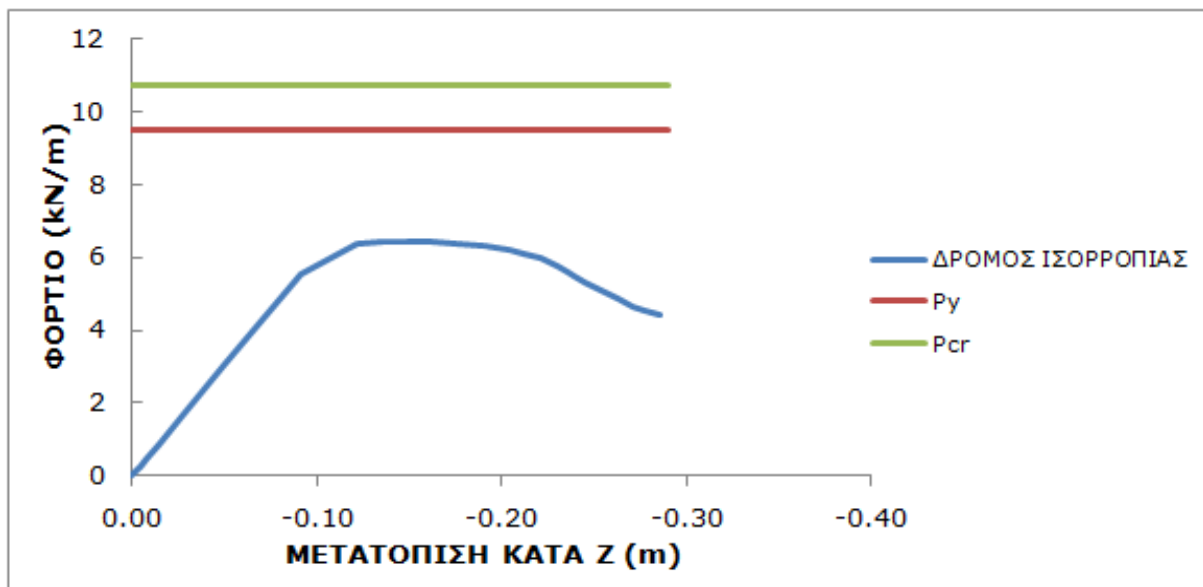
Σχήμα 6.16

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 6.17

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια

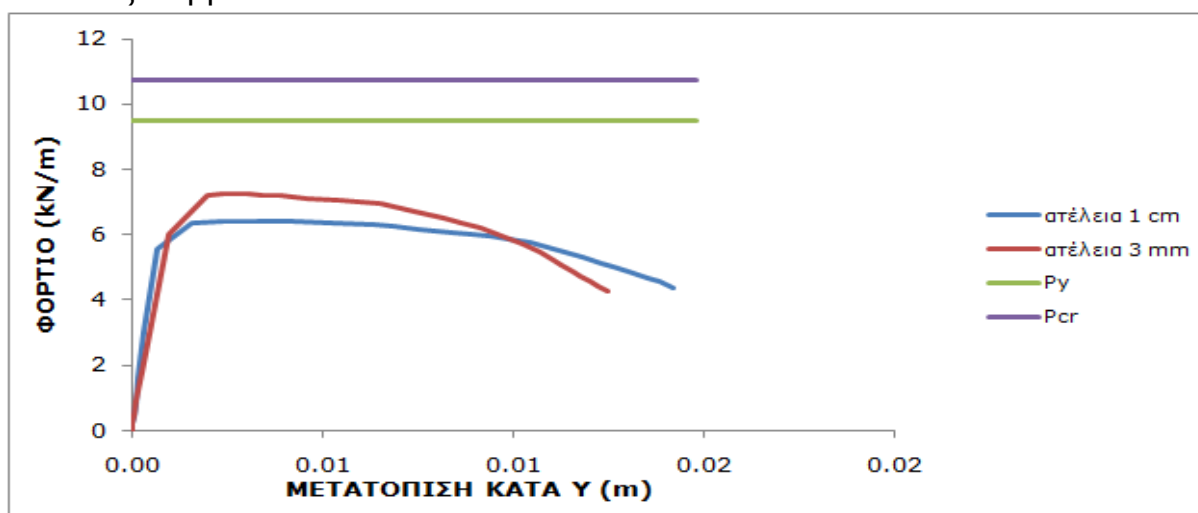


Σχήμα 6.18

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

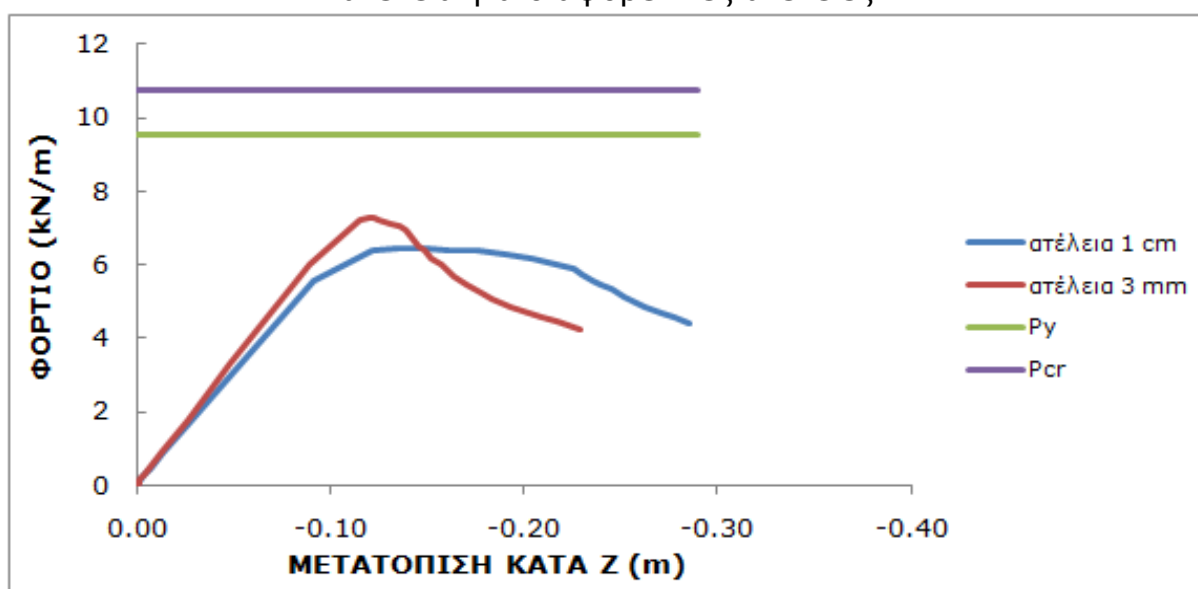
Από τους παραπάνω δρόμους ισορροπίας προκύπτει σημαντική η αλληλεπίδραση των δύο φαινομένων, η οποία οδηγεί το φορέα να αστοχήσει σε αρκετά μικρή τιμή φορτίου, ίση με 6,43kN/m. Σε αυτό οφείλεται σαφώς και η σχετικά μεγάλη αρχική γεωμετρική ατέλεια που δόθηκε στο φορέα.

Σημειώνεται ότι για μικρότερες τιμές ατελειών το φορτίο αστοχίας θα ήταν λίγο μεγαλύτερο, αλλά και πάλι αρκετά μικρότερο του φορτίου διαρροής, όπως φαίνεται και από τα επόμενα διαγράμματα που προέκυψαν για τιμή ατέλειας ίση με 3mm.



Σχήμα 6.19

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια για διαφορετικές ατέλειες



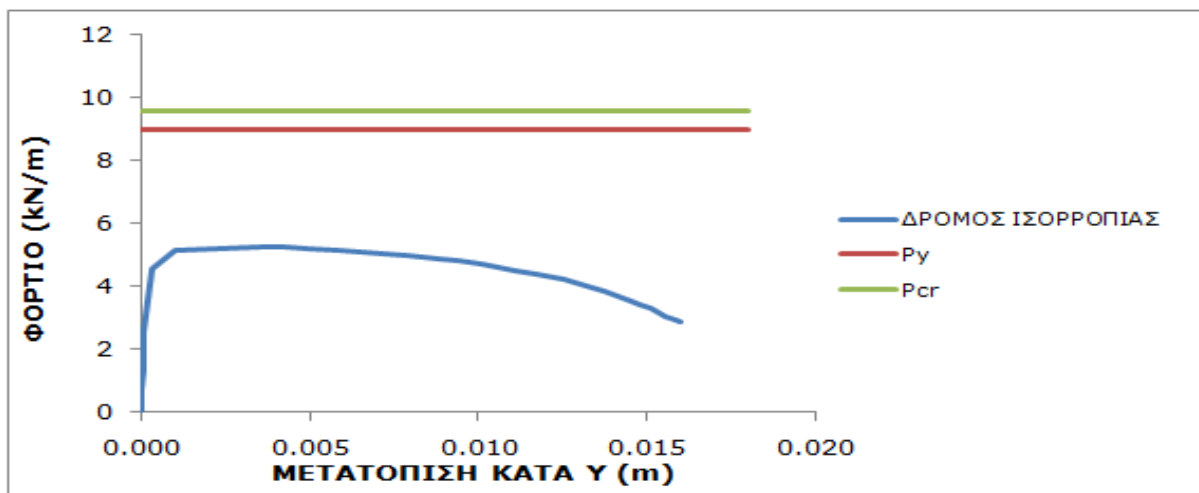
Σχήμα 6.20

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς για διαφορετικές ατέλειες

- Στη συνέχεια εξετάζεται διατομή με πάχος κορμού $t_w=6\text{mm}$ και πάχος πελμάτων $t_f=7\text{mm}$.

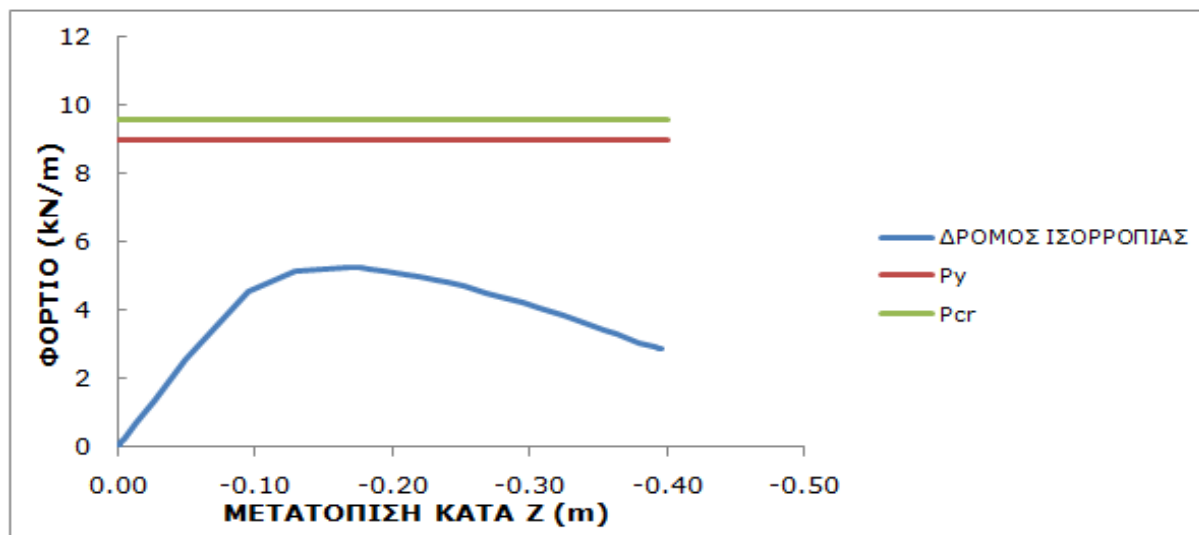
Το φορτίο διαρροής προκύπτει ίσο με $P_y=8 \cdot W_{el} \cdot f_y / L^2 = 8,94\text{kN/m}$.

Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού στο ADINA το φορτίο τοπικού λυγισμού προκύπτει ίσο με $9,59\text{kN/m}$. Ο τοπικός λυγισμός εκδηλώνεται και πάλι στο μέσο της αμφιέριστης δοκού. Πραγματοποιείται στη συνέχεια μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας.



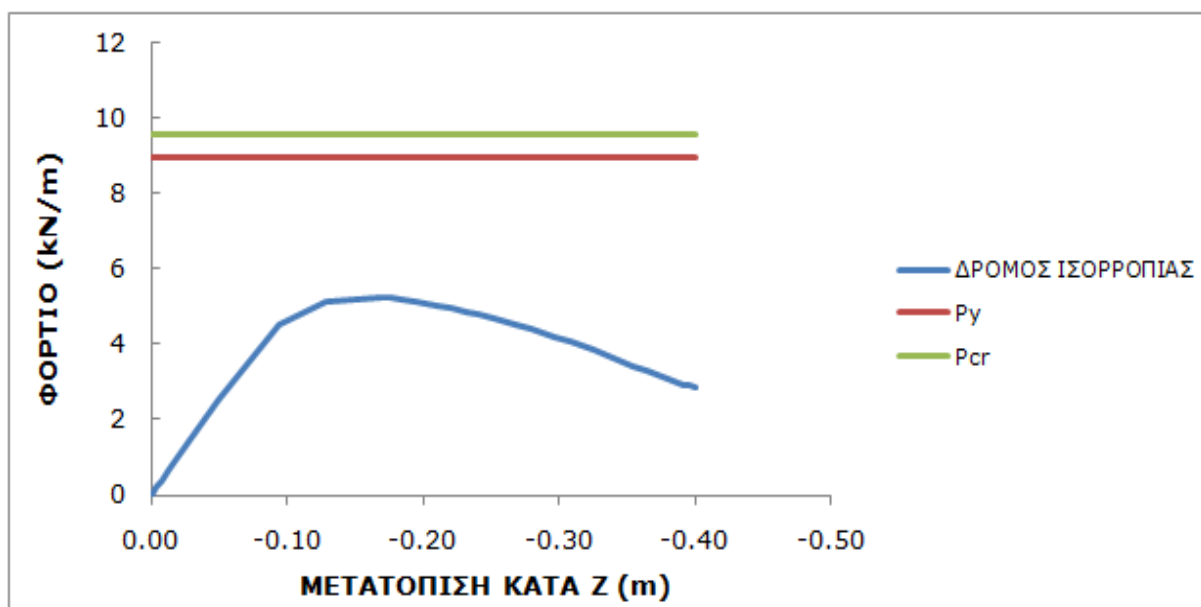
Σχήμα 6.21

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-y μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 6.22

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια

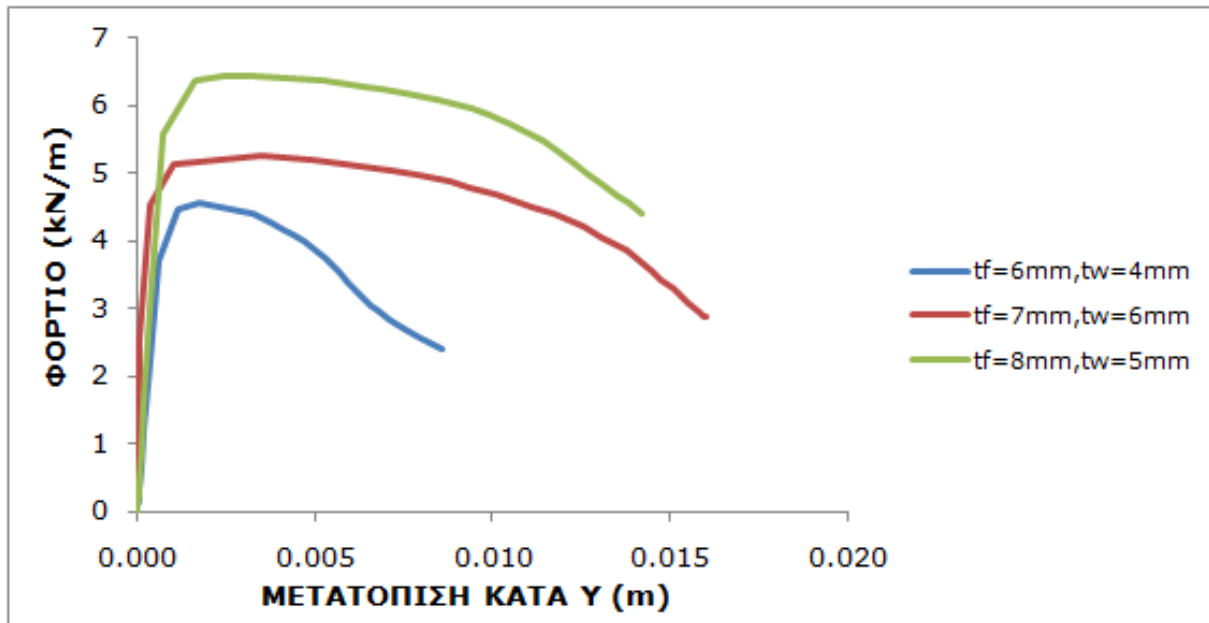


Σχήμα 6.23

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

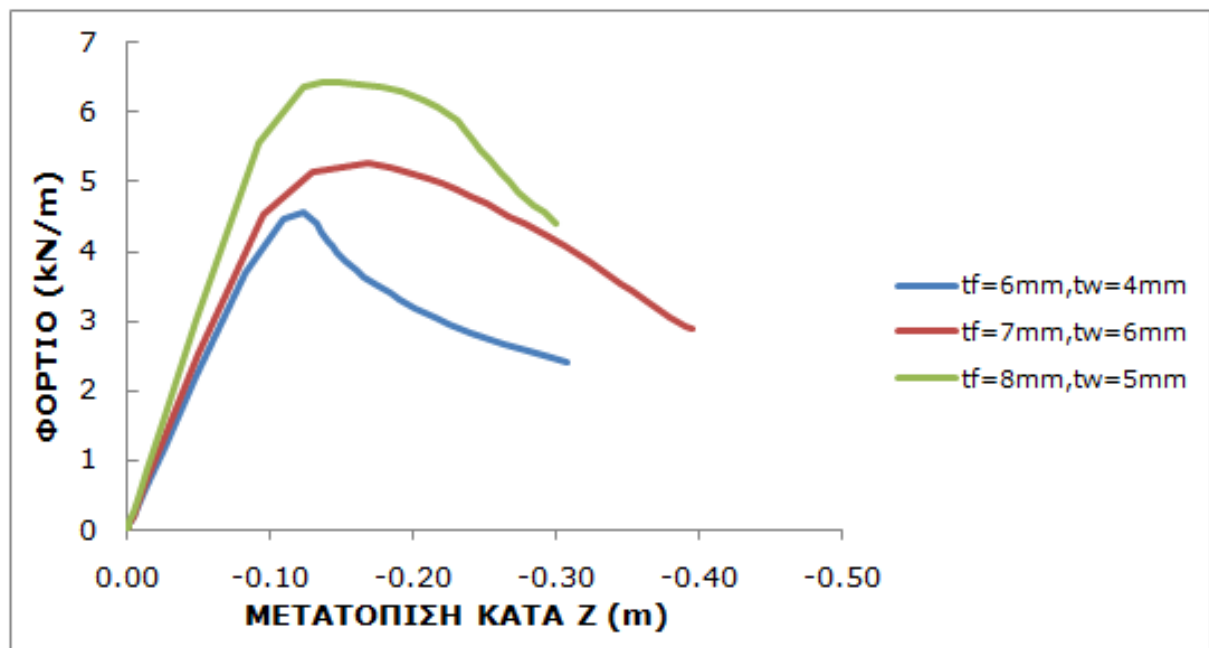
Όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα, πάλι παρατηρείται σημαντική αλληλεπίδραση των δύο φαινομένων καθώς οι τιμές των φορτίων τοπικού λυγισμού και διαρροής βρίσκονται πολύ κοντά. Ο φορέας αστοχεί επομένως σε αρκετά μικρή τιμή φορτίου, ίση με 5,27κΝ/μ.

Στα διαγράμματα 6.24-6.26 παρουσιάζονται συγκριτικά οι δρόμοι ισορροπίας για τις 3 περιπτώσεις διατομών κατηγορίας 4 που αναλύθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο. Τα διαγράμματα αναφέρονται σε μη γραμμικές αναλύσεις υλικού και γεωμετρίας για μέγεθος ατέλειας ίσο με 1cm. Είναι προφανές ότι όσο μειώνεται το πάχος του κορμού και των πελμάτων της διατομής, τόσο ελαττώνεται η αντοχή του φορέα. Για τη διατομή με πάχος κορμού $t_w=4\text{mm}$ και πάχος πελμάτων $t_f=6\text{mm}$, η αστοχία οφείλεται στον τοπικό λυγισμό. Στις άλλες δύο περιπτώσεις, οι φορείς αστοχούν λόγω αλληλεπίδρασης τοπικού λυγισμού και διαρροής για τιμή φορτίου μικρότερη από αυτήν που θα προκαλούσε τη διαρροή των ακραίων ινών της μεσαίας διατομής.



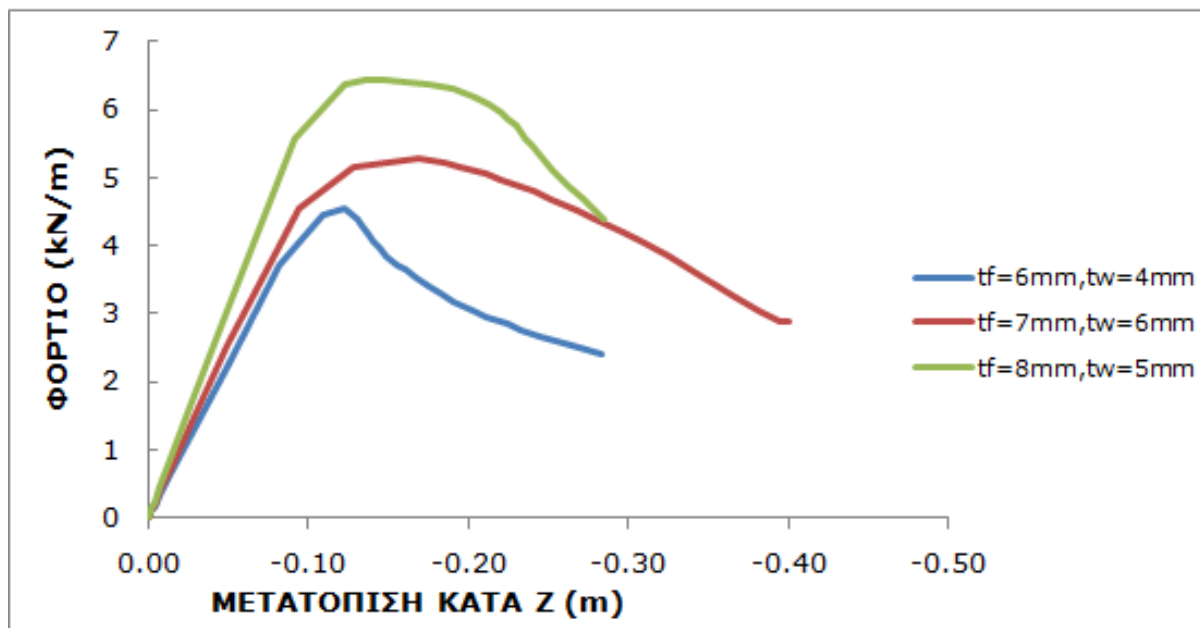
Σχήμα 6.24

Συγκριτική παρουσίαση δρόμων ισορροπίας φορτίου- y μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 6.25

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- z μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 6.26

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

Είναι προφανές ότι η αντοχή των παραπάνω φορέων εξαρτάται καθοριστικά από το πάχος των πελμάτων και όσο αυτό μειώνεται, η δοκός αστοχεί για μικρότερη τιμή φορτίου.

6.2 Αμφιέριστη δοκός μήκους 14m διατομής κατηγορίας 4

Εξετάζεται η περίπτωση αμφιέριστης δοκού μήκους $L=14\text{m}$ η οποία φορτίζεται με ομοιόμορφα καταμεμημένο φορτίο στο άνω πέλμα της και η οποία εξασφαλίζεται πλευρικά καθ'όλο το μήκος της στα σημεία συναρμογής άνω πέλματος και κορμού. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης διατομής είναι τα ακόλουθα:

$$h=700\text{mm}$$

$$b=300\text{mm}$$

$$t_w=4\text{mm}$$

$$t_f=6\text{mm}$$

Έχει ήδη πραγματοποιηθεί κατάταξη της διατομής στην παράγραφο 6.1, σύμφωνα με την οποία η συγκεκριμένη διατομή ανήκει στην κατηγορία 4.

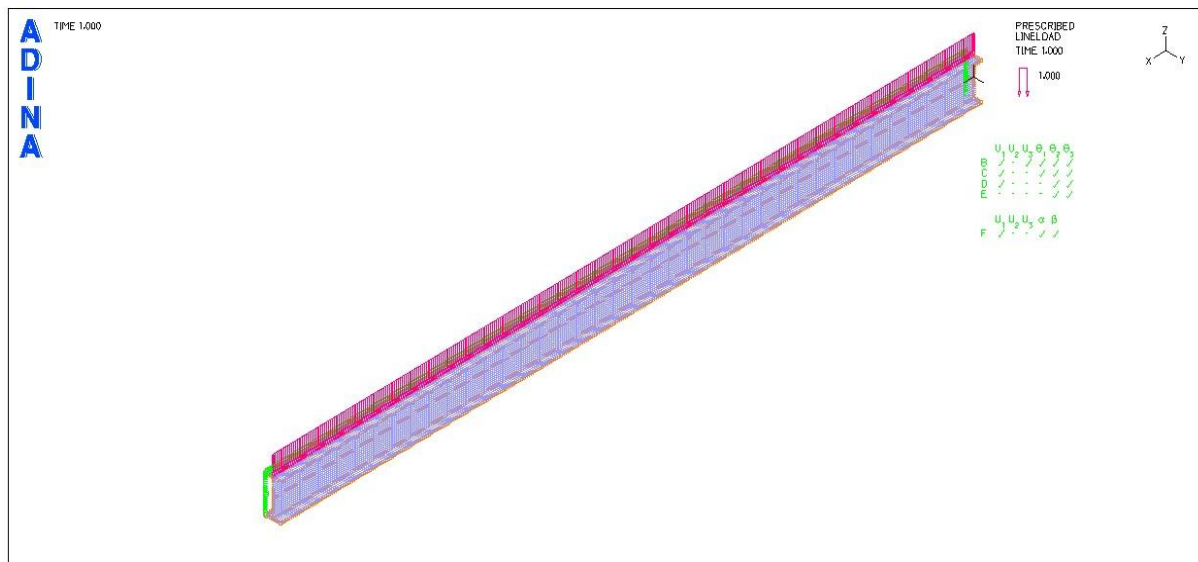
Όπως και προηγουμένως, λόγω του πολύ μικρού πάχους των πελμάτων, είναι αναμενόμενη η εκδήλωση τοπικού λυγισμού στο μέσο του ανοίγματος

της αμφιέρειστης δοκού, συγκεκριμένα στο θλιβόμενο άνω πέλμα και στο άνω τμήμα του κορμού.

Έχει ήδη υπολογιστεί για τη συγκεκριμένη διατομή η ροπή διαρροής ίση με $M_y=363,94\text{kNm}$ και το αντίστοιχο καταναμημένο φορτίο είναι ίσο με $P_y=8\cdot 363,94/14^2=14,85\text{kN/m}$.

6.2.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

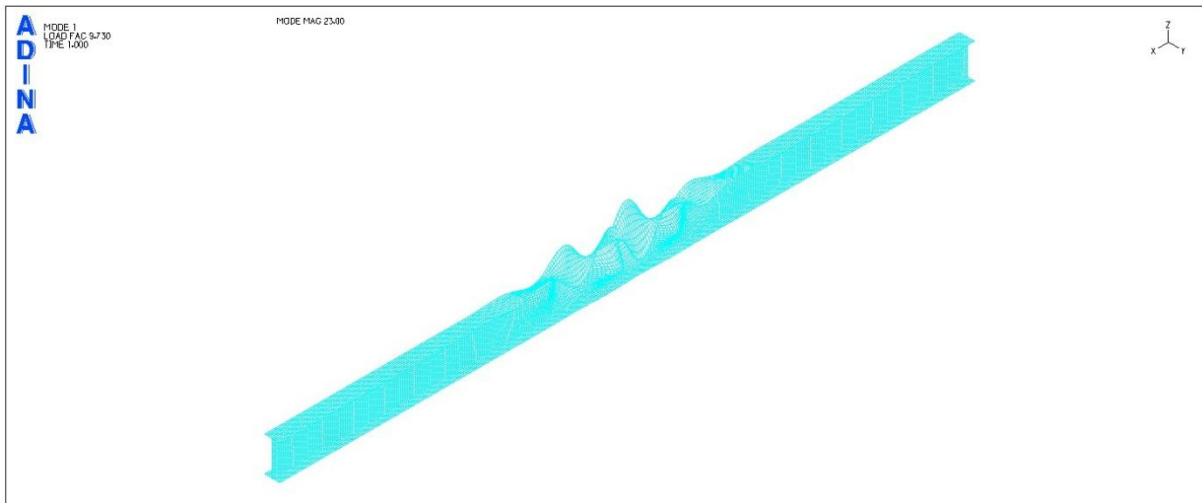
Στο φορέα ασκείται ομοιόμορφα καταναμημένο φορτίο 1kN/m στο άνω πέλμα της δοκού.



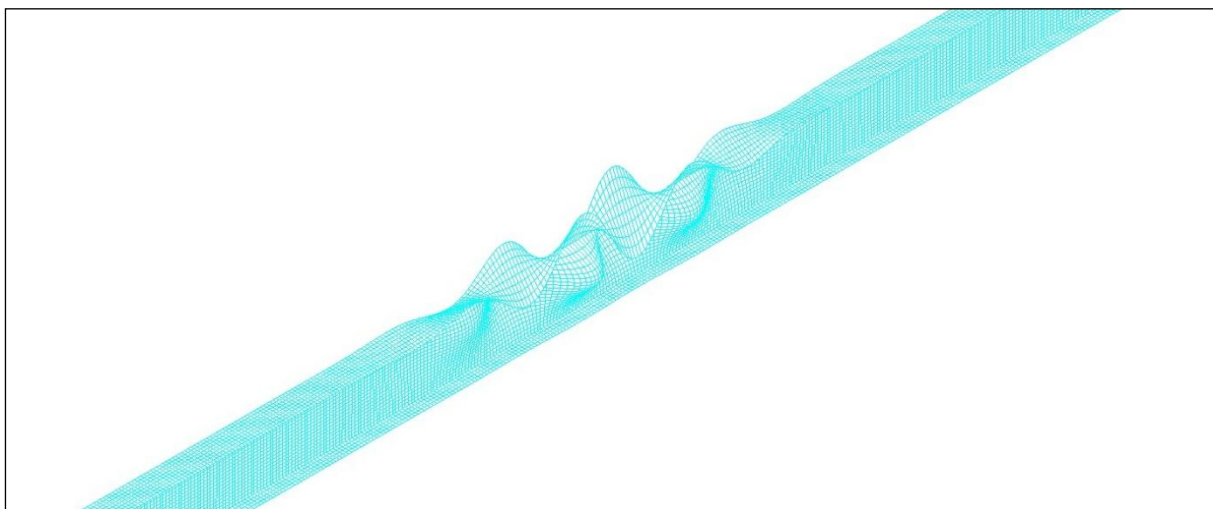
Σχήμα 6.27

Αμφιέρειστος φορέας μήκους 14m με ομοιόμορφα καταναμημένο φορτίο 1kN/m στο άνω πέλμα

Το φορτίο τοπικού λυγισμού προέκυψε ίσο με $P_{cr}=9,73\text{kN/m}$. Η αντίστοιχη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=9,73\cdot 14^2/8=238,39\text{kNm} < M_y=363,94\text{kNm}$.

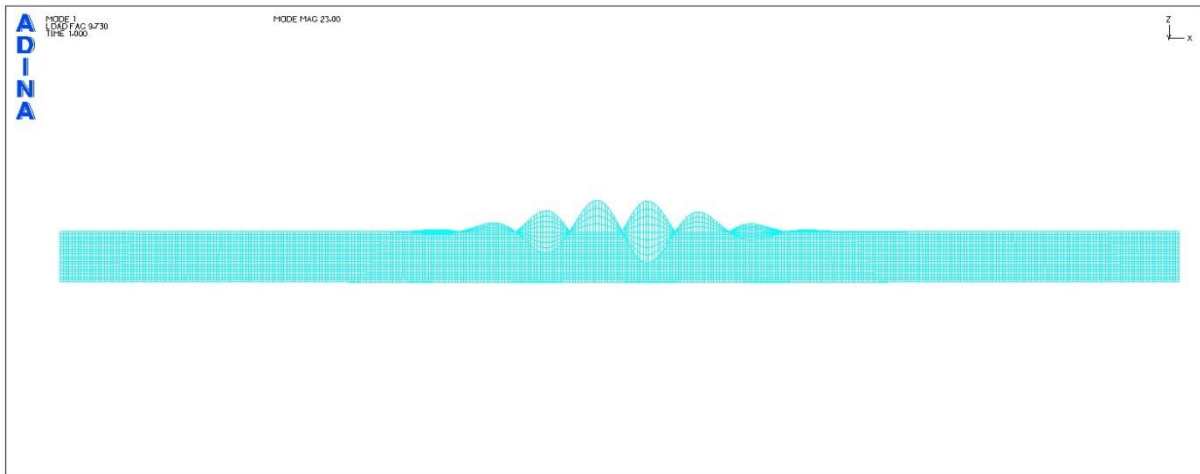


Σχήμα 6.28
1^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 6.29
Λεπτομέρεια τοπικού λυγισμού

Ο τοπικός λυγισμός εκδηλώνεται στο μέσο της δοκού εξαιτίας των μεγάλων θλιπτικών ορθών τάσεων λόγω κάμψης στην αντίστοιχη περιοχή.



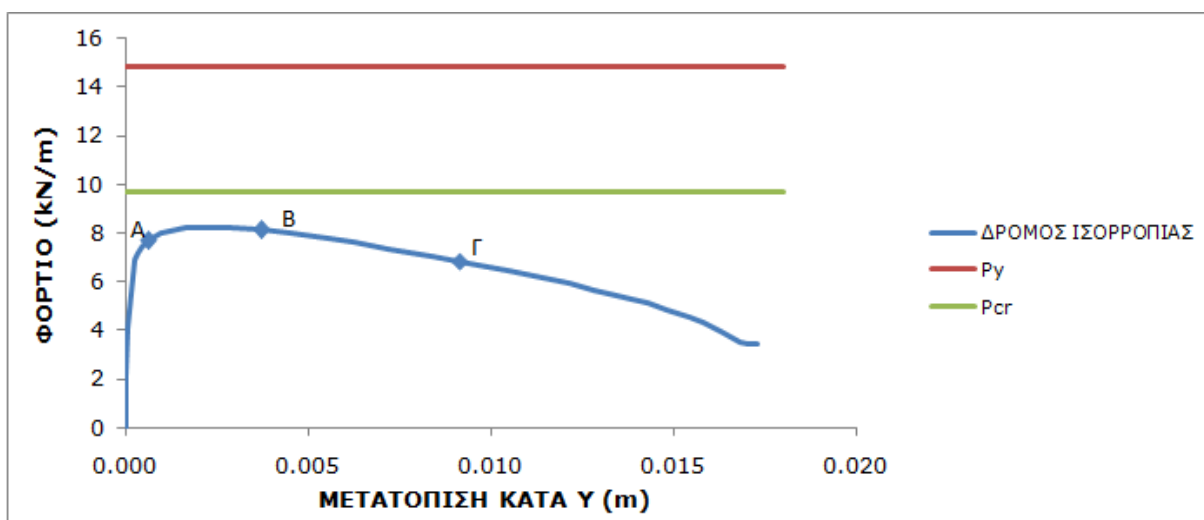
Σχήμα 6.30
1^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)

6.2.2 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

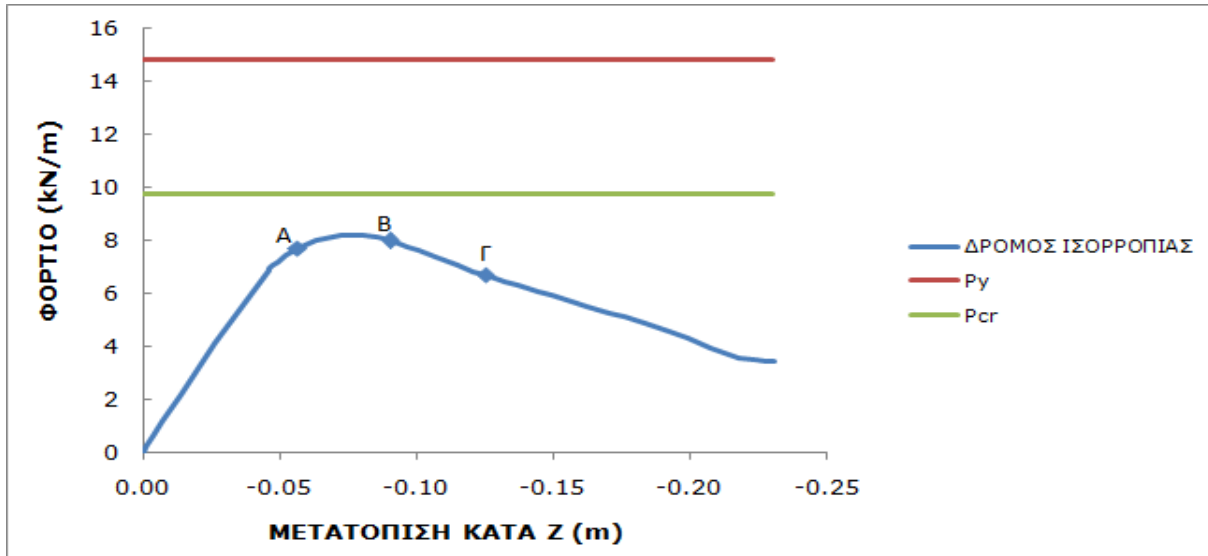
Θεωρείται διγραμμικό υλικό S235 χωρίς κράτυνση.

Η μη γραμμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο collapse analysis όπου θεωρήθηκε ως σημείο αναφοράς ο κόμβος της μεσαίας διατομής στο σημείο συνένωσης κορμού και κάτω πέλματος.

Δίνεται στο φορέα αρχική γεωμετρική ατέλεια 1cm κατά τη διεύθυνση y σε κόμβο που βρίσκεται λίγο κάτω από τη συναρμογή άνω πέλματος και κορμού (η οποία είναι δεσμευμένη) στη μεσαία διατομή της δοκού.

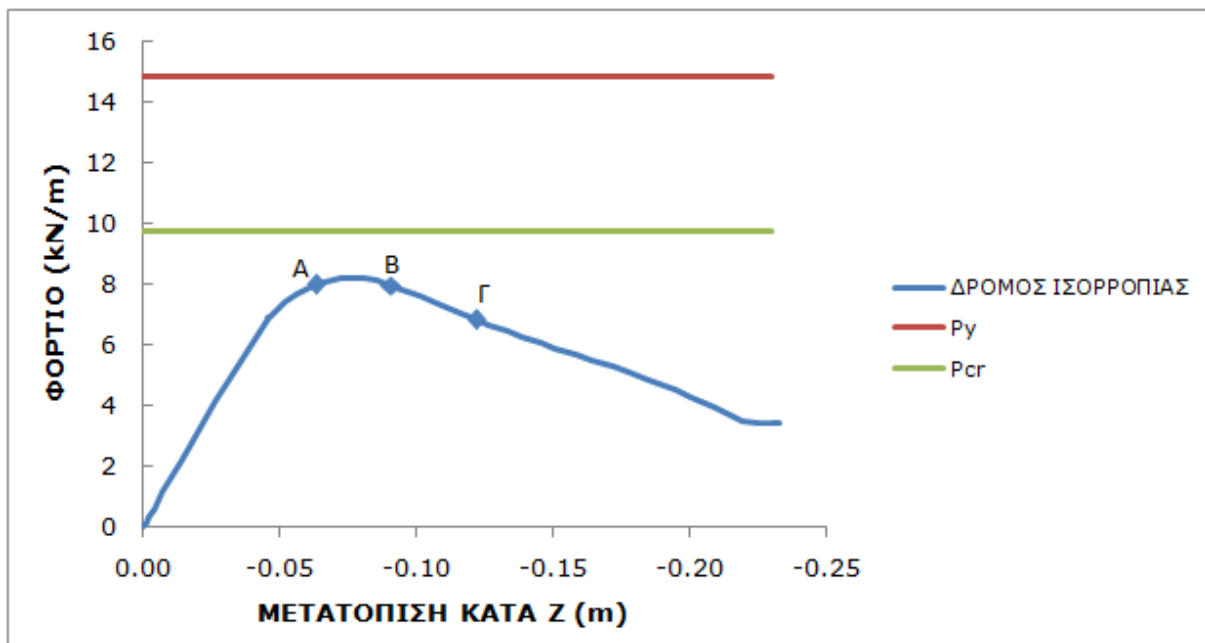


Σχήμα 6.31
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 6.32

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια

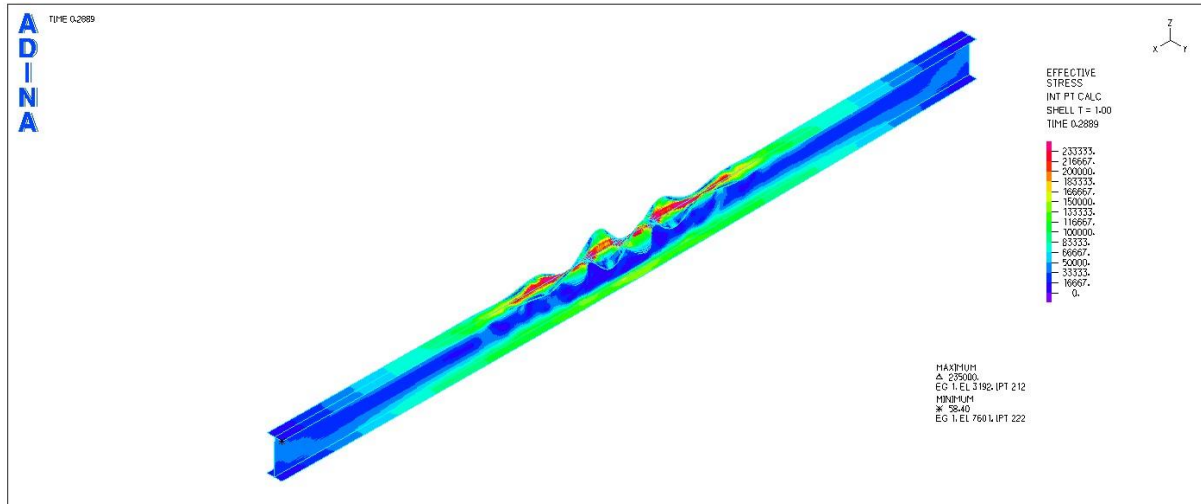


Σχήμα 6.33

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

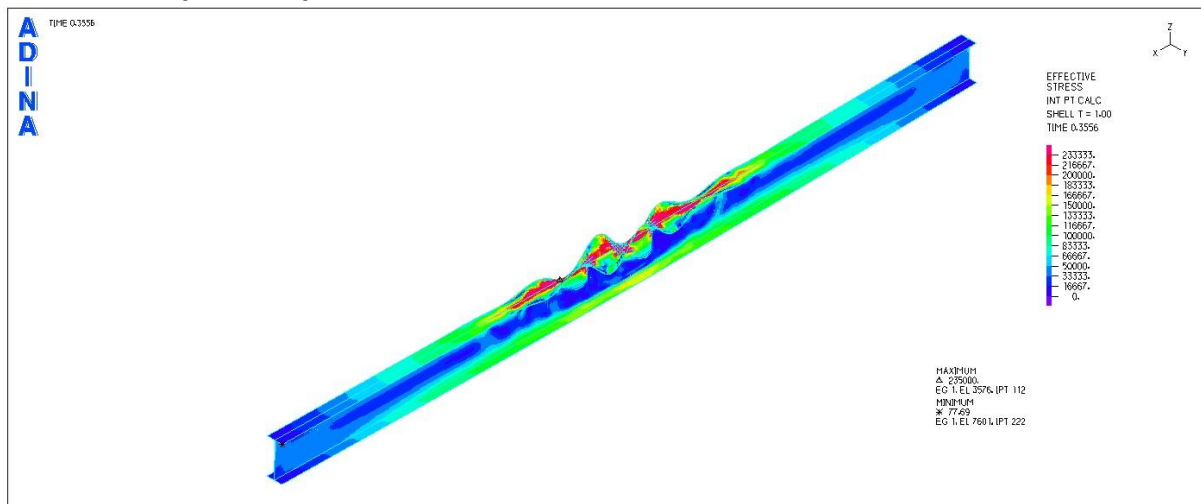
ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΣΗΜΕΙΟ Α (t=0,29)



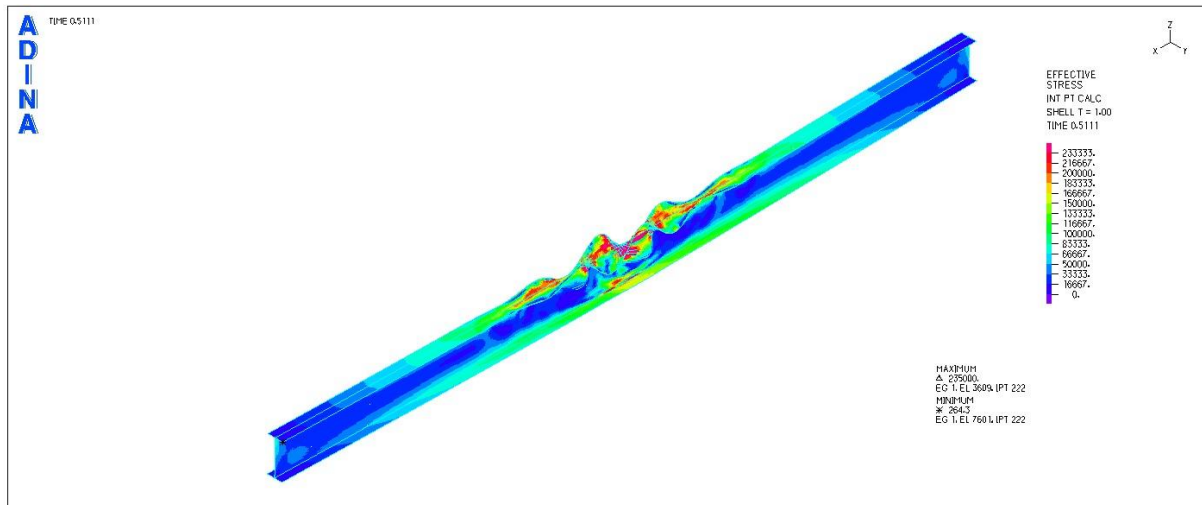
Σχήμα 6.34
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Α

ΣΗΜΕΙΟ Β (t=0,38)



Σχήμα 6.35
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Β

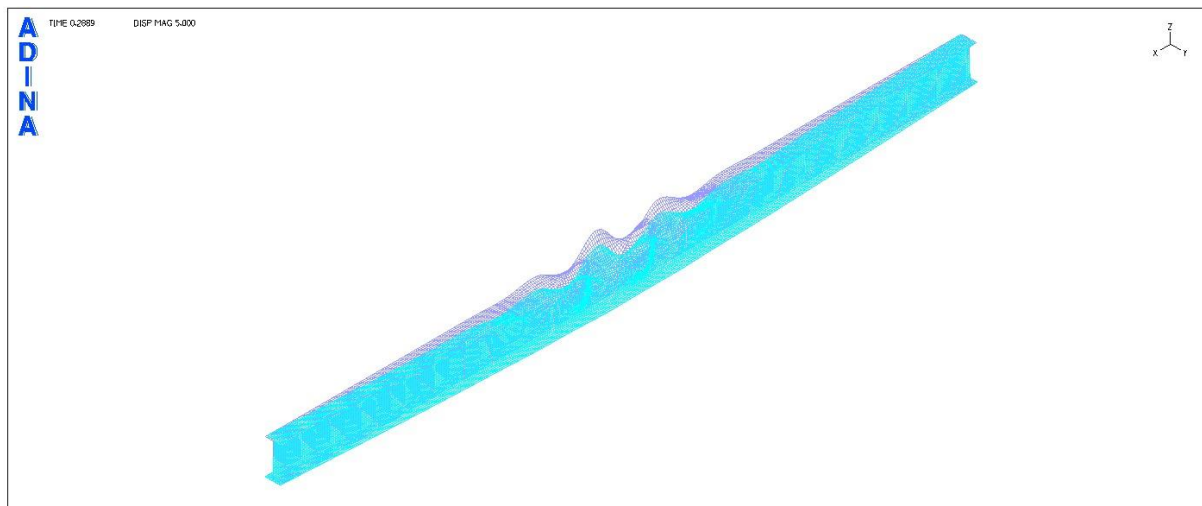
ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,51)



Σχήμα 6.36
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

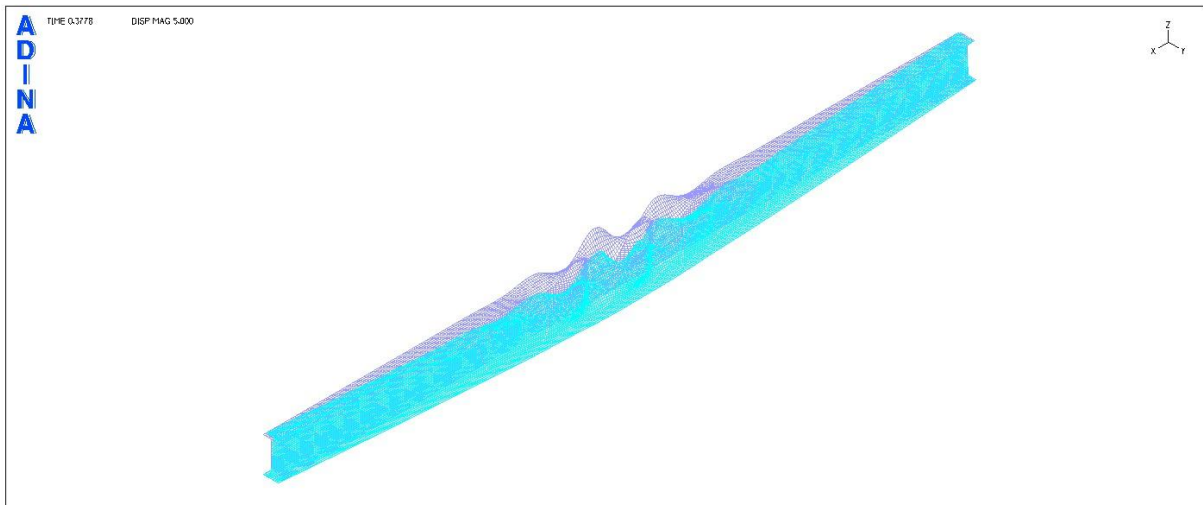
ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΣΗΜΕΙΟ Α



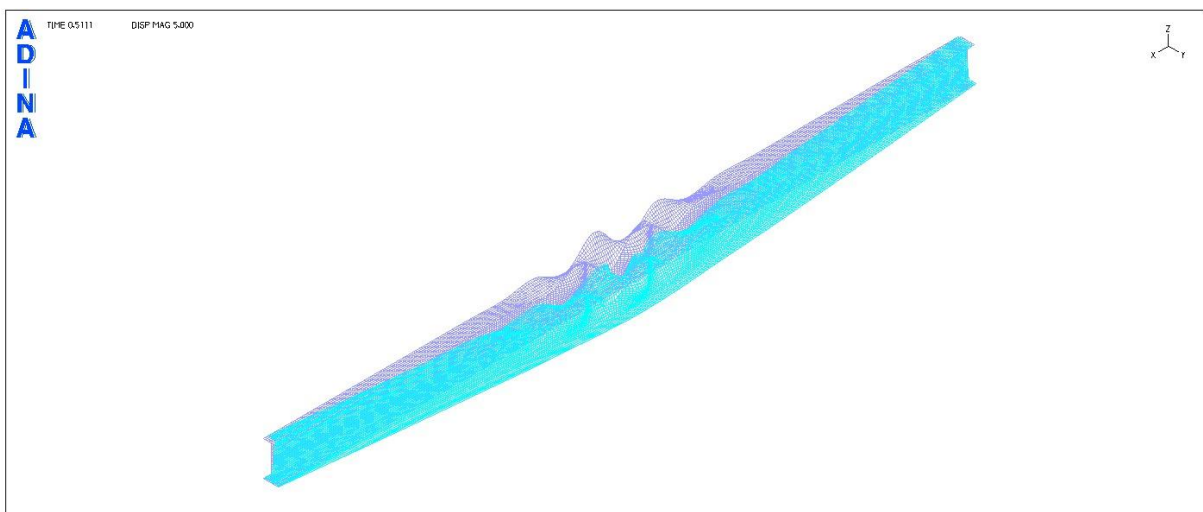
Σχήμα 6.37
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Α

ΣΗΜΕΙΟ Β



Σχήμα 6.38
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β

ΣΗΜΕΙΟ Γ



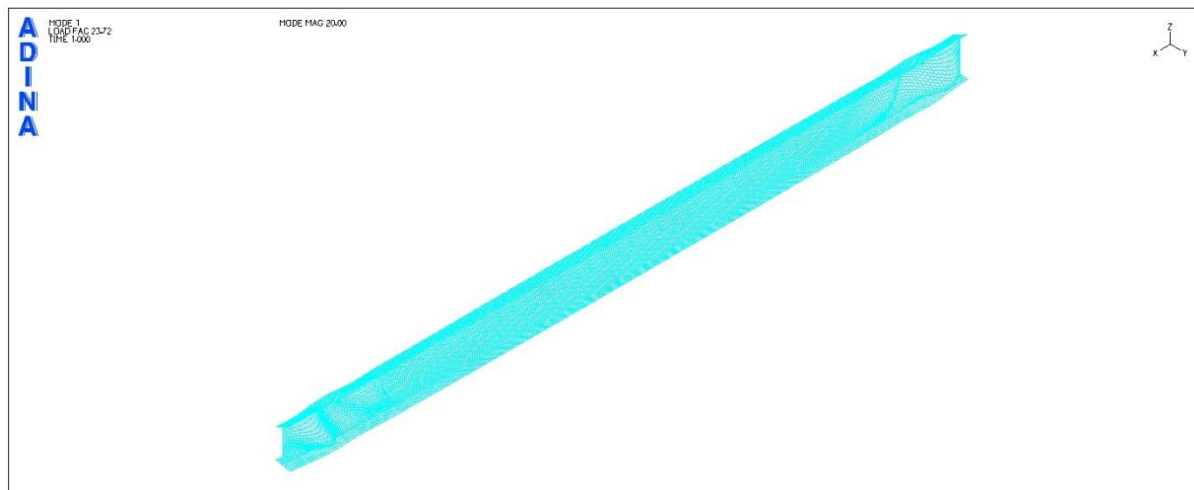
Σχήμα 6.39
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

6.2.3 Σύγκριση δρόμων ισορροπίας για διαφορετικά πάχη διατομών κατηγορίας 4

Στην παράγραφο αυτή θα εξετασθεί δοκός με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με την προηγούμενη, με μόνη διαφοροποίηση το πάχος των πελμάτων. Το πάχος τους λαμβάνεται ίσο με $t_w=10\text{mm}$, ενώ στην προηγούμενη παράγραφο ήταν ίσο με $t_w=6\text{mm}$. Η εξεταζόμενη διατομή εξακολουθεί να είναι κατηγορίας 4.

Το φορτίο που θα αντιστοιχούσε στη διαρροή των ακραίων ινών της μεσαίας διατομής προκύπτει ίσο με $P_y=8 \cdot W_{el} \cdot f_y / L^2 = 22,45\text{kN/m}$.

Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού στο ADINA προκύπτει για την 1^η ιδιομορφή το φορτίο τοπικού λυγισμού ίσο με $23,72\text{kN/m}$. Η βασική διαφορά είναι ότι ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται τώρα στα άκρα της αμφιέριστης δοκού, συγκεκριμένα στον κορμό. Ο λόγος που προέκυψε τοπικός λυγισμός οφειλόμενος στη διάτμηση είναι η ενίσχυση των πελμάτων λόγω αύξησης του πάχους τους, η οποία αυξάνει σημαντικά τη ροπή αδράνειας περί τον ισχυρό άξονα της διατομής και συνεπώς μειώνει αισθητά τις ορθές τάσεις λόγω κάμψης. Ο κορμός, αντίθετα, διατηρώντας το αρκετά μικρό πάχος του, εμφανίζεται πιο αποδυναμωμένος σε σύγκριση με τα πέλματα.



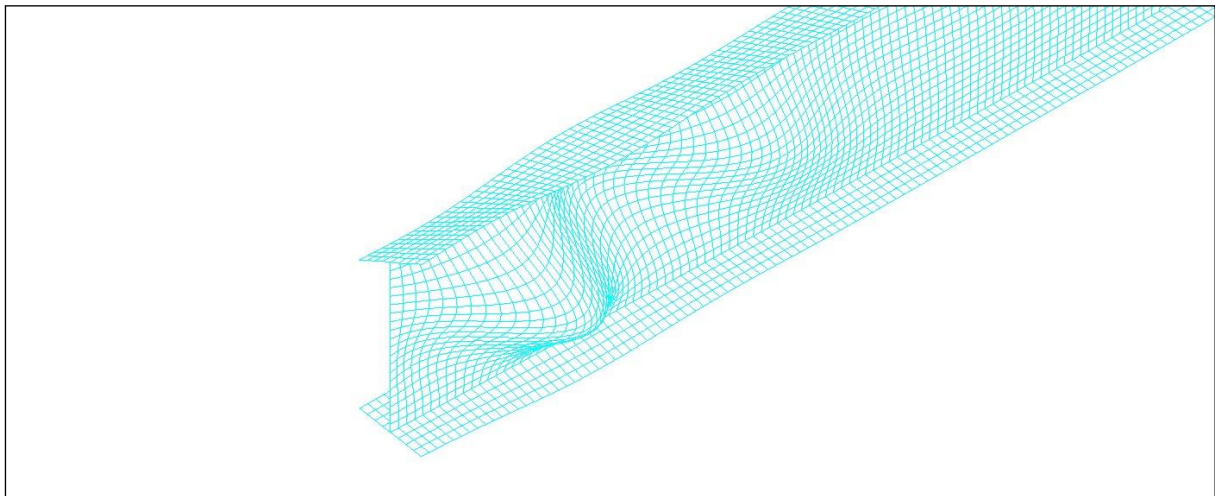
Σχήμα 6.40
1^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 6.41
1^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)

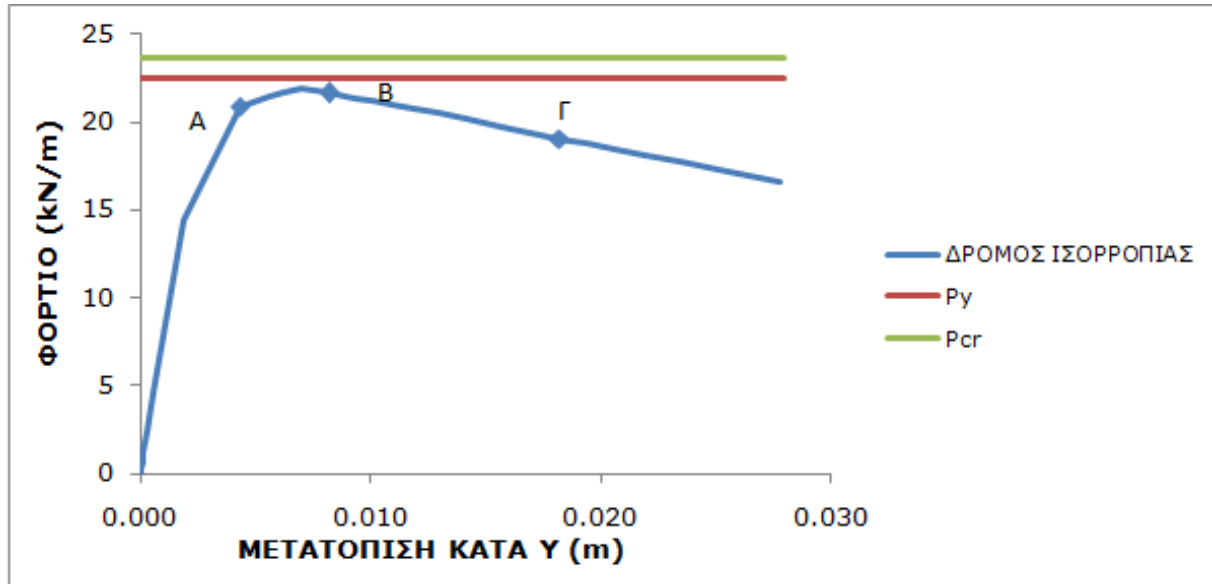


Σχήμα 6.42
1^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)

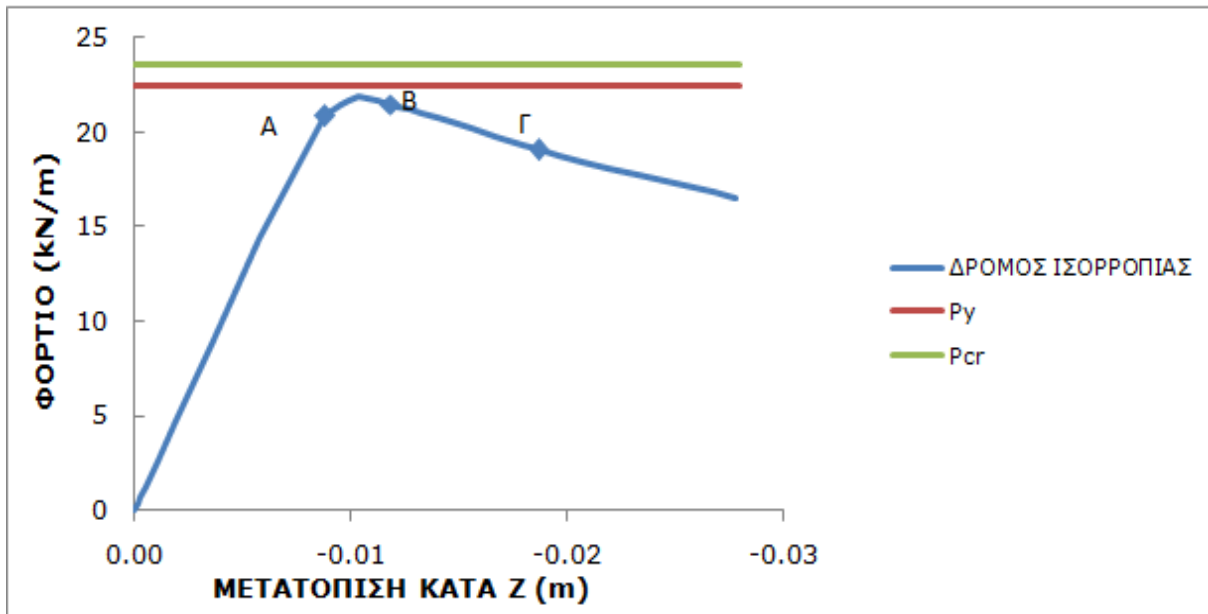


Σχήμα 6.43
Λεπτομέρεια τοπικού λυγισμού

Στα επόμενα σχήματα φαίνονται οι δρόμοι ισορροπίας που προέκυψαν από τη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας στο ADINA.

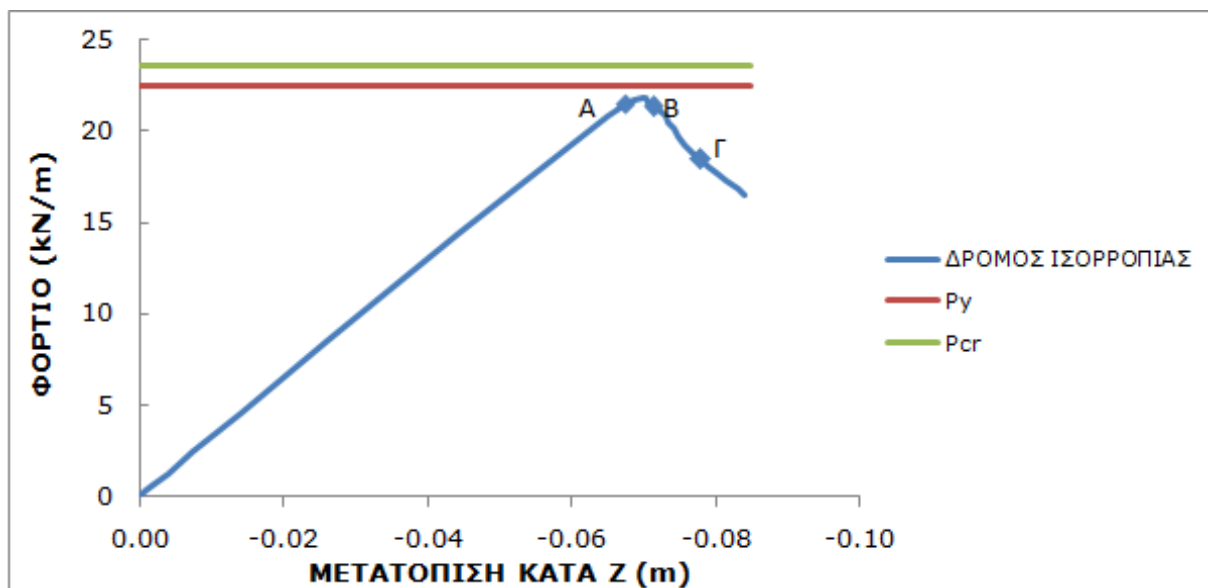


Σχήμα 6.44
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 6.45

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 6.46

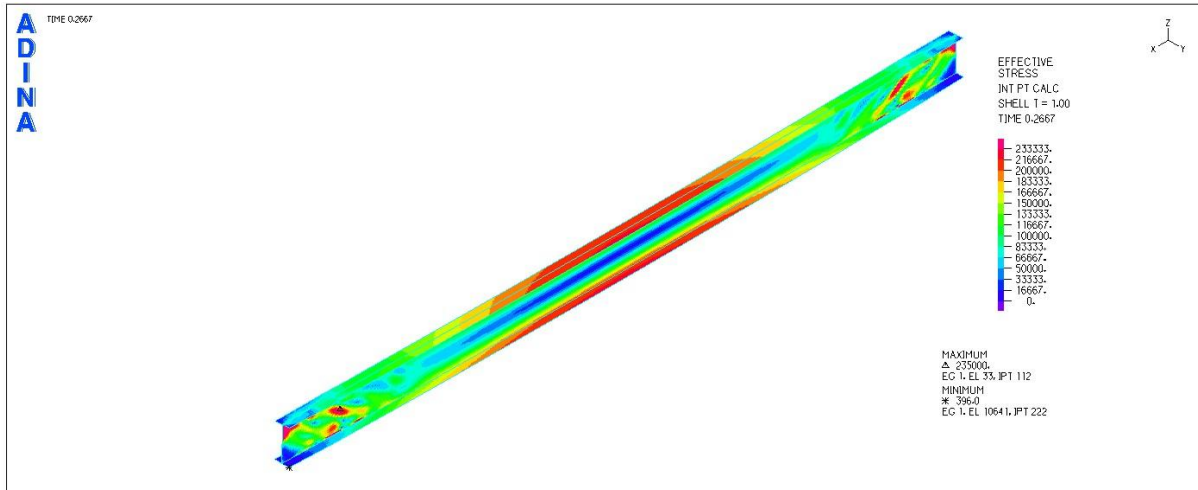
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

Ο φορέας αστοχεί λόγω της αλληλεπίδρασης διατμητικού λυγισμού και διαρροής.

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ VON MISES

ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,27)

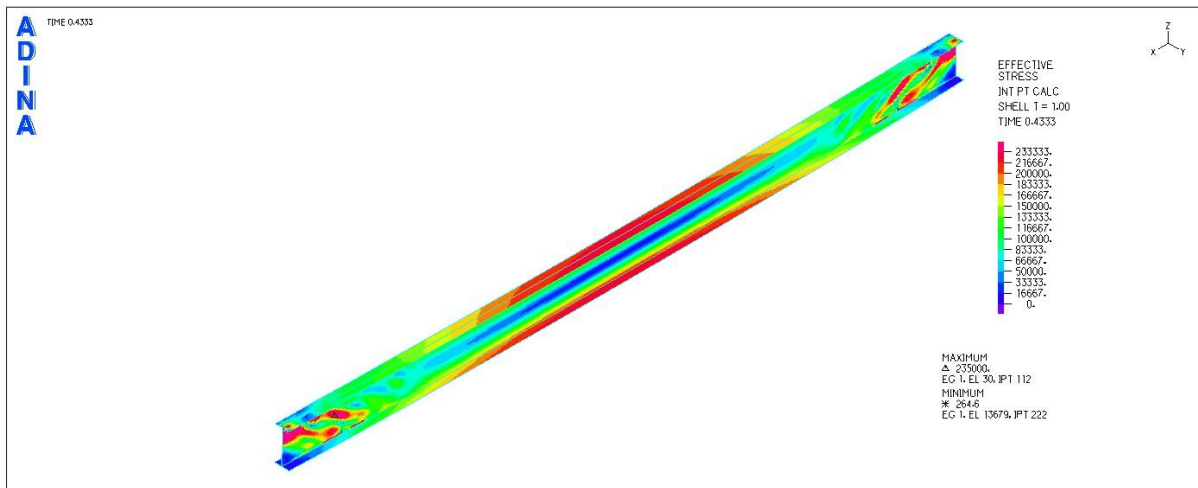


Σχήμα 6.47

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο A

Το σημείο A αντιστοιχεί στην πρώτη τιμή φορτίου για το οποίο εμφανίζεται τάση von Mises ίση με f_y .

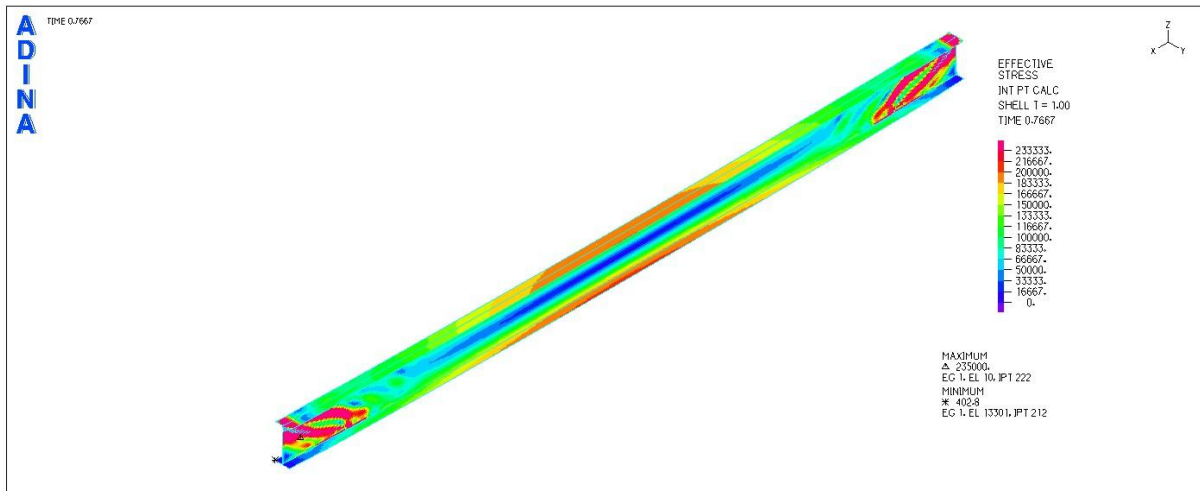
ΣΗΜΕΙΟ B (t=0,43)



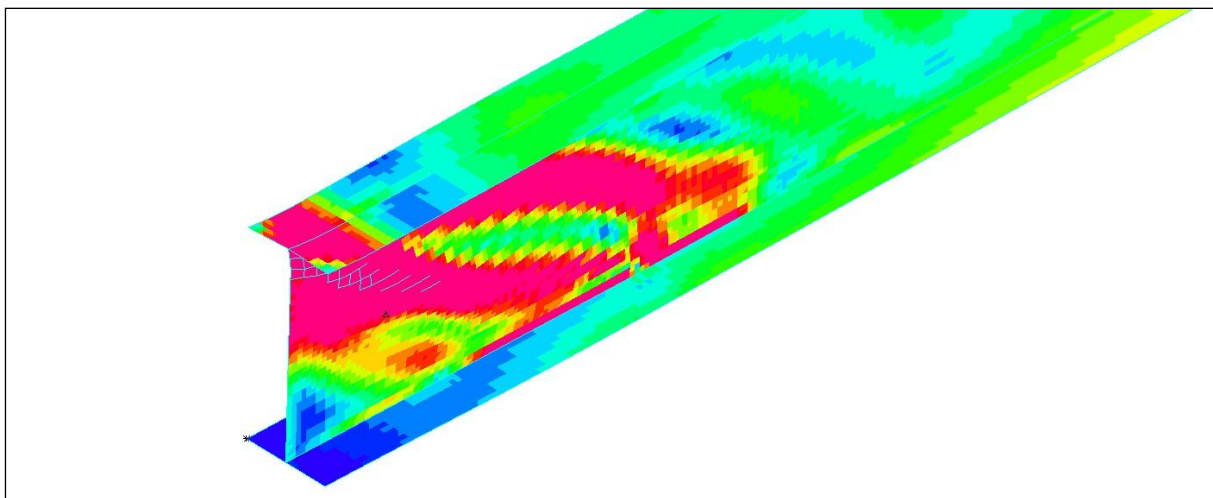
Σχήμα 6.48

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο B

ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,77)

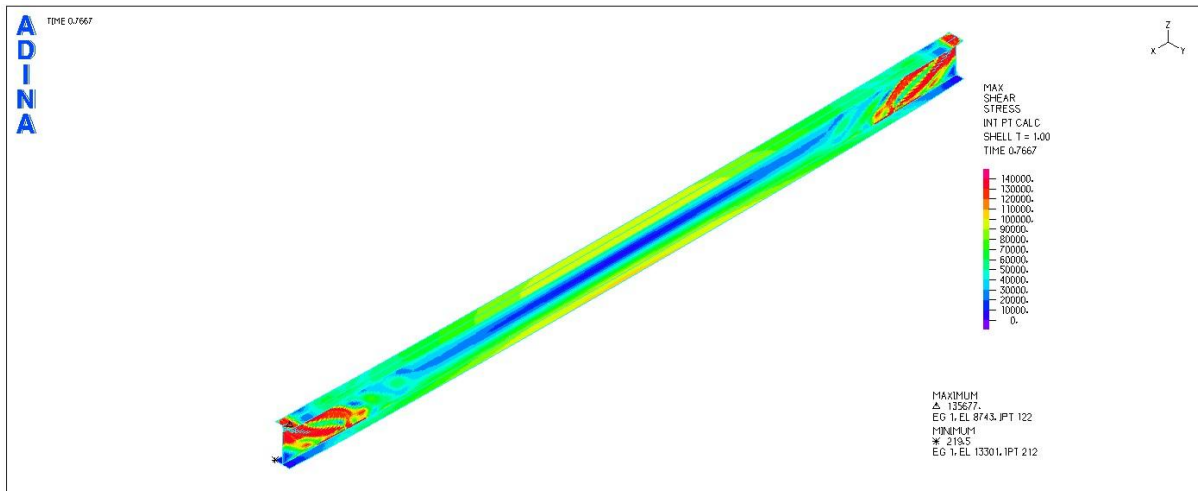


Σχήμα 6.49
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ



Σχήμα 6.50
Λεπτομέρεια τάσεων von Mises για το σημείο Γ

**ΕΙΚΟΝΕΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ
ΣΗΜΕΙΟ Γ**

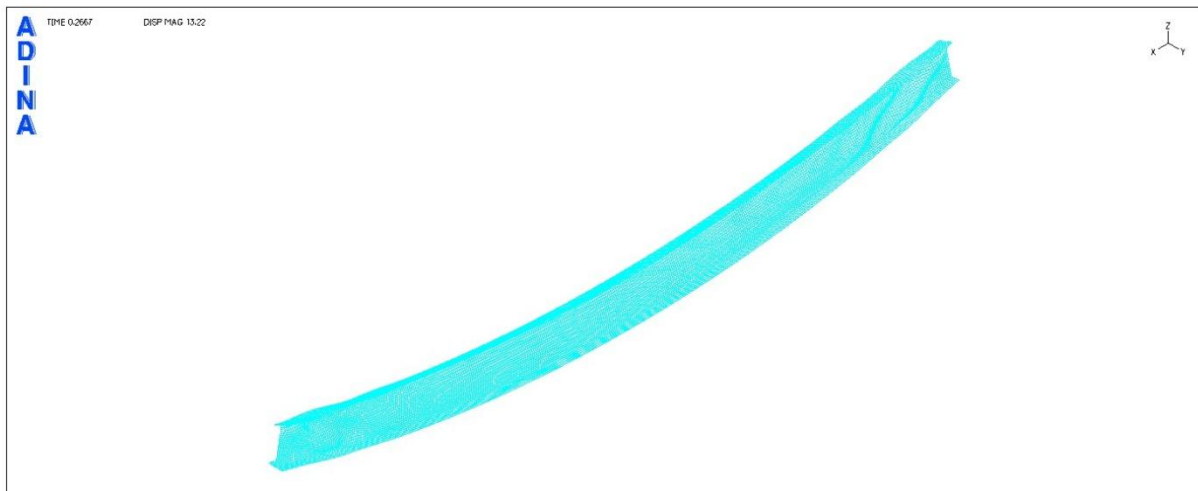


Σχήμα 6.51

Εικόνα διατμητικών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

Είναι χαρακτηριστικό ότι οι μέγιστες διατμητικές τάσεις εμφανίζονται στα άκρα και είναι ίσες με $\frac{f_y}{\sqrt{3}} = 135,677\text{MPa}$.

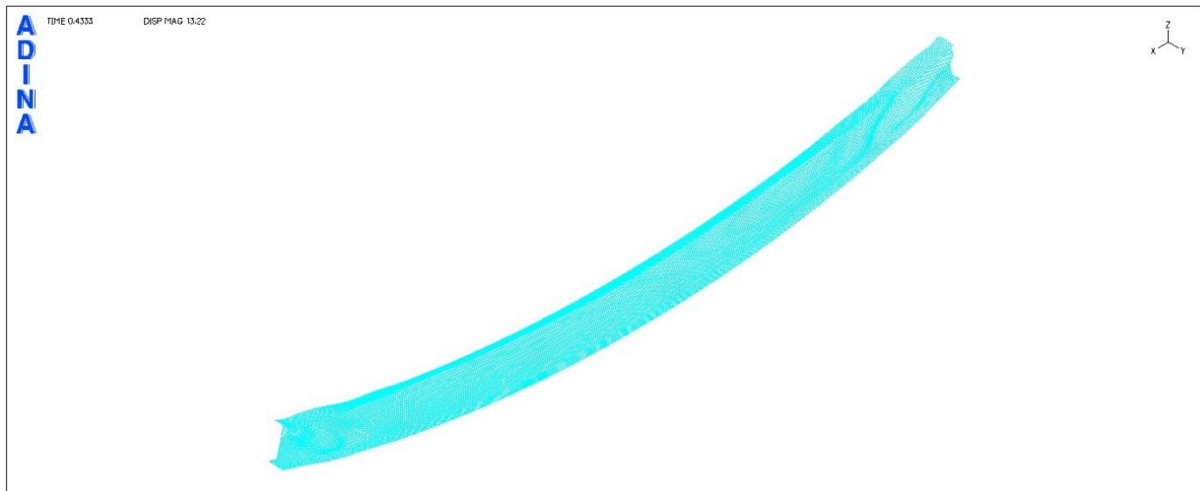
**ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ
ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ
ΣΗΜΕΙΟ Α**



Σχήμα 6.52

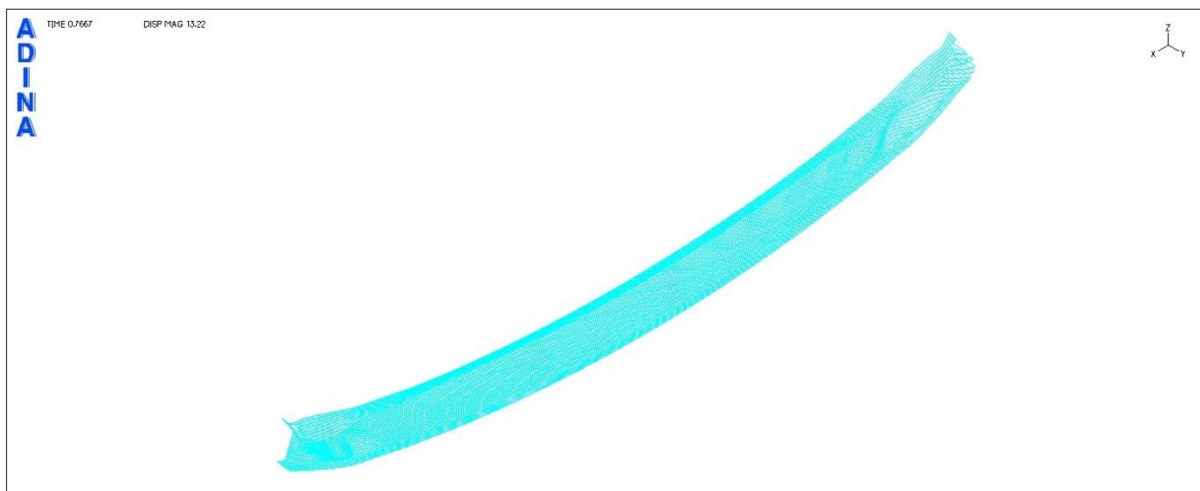
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Α

ΣΗΜΕΙΟ Β

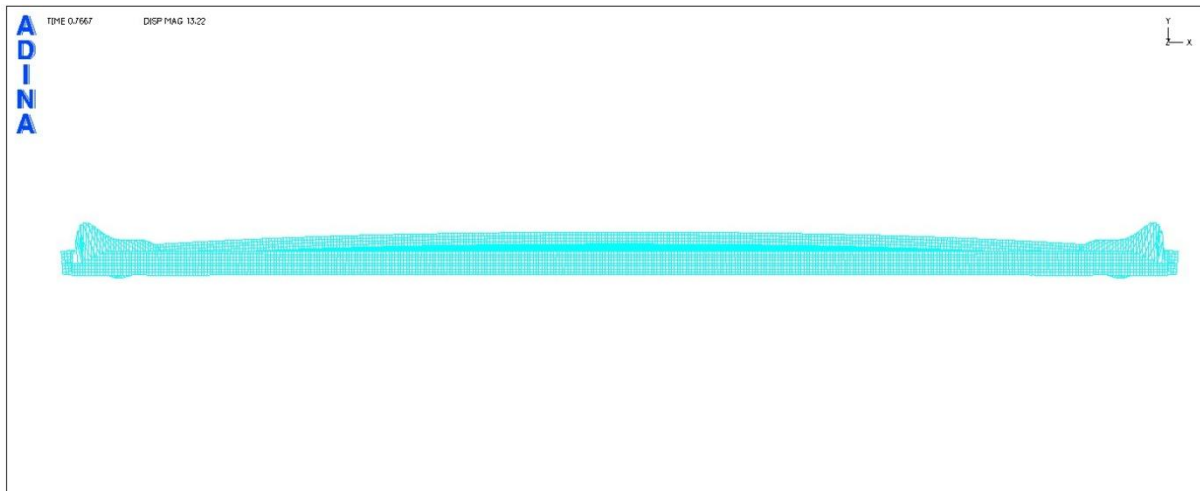


Σχήμα 6.53
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β

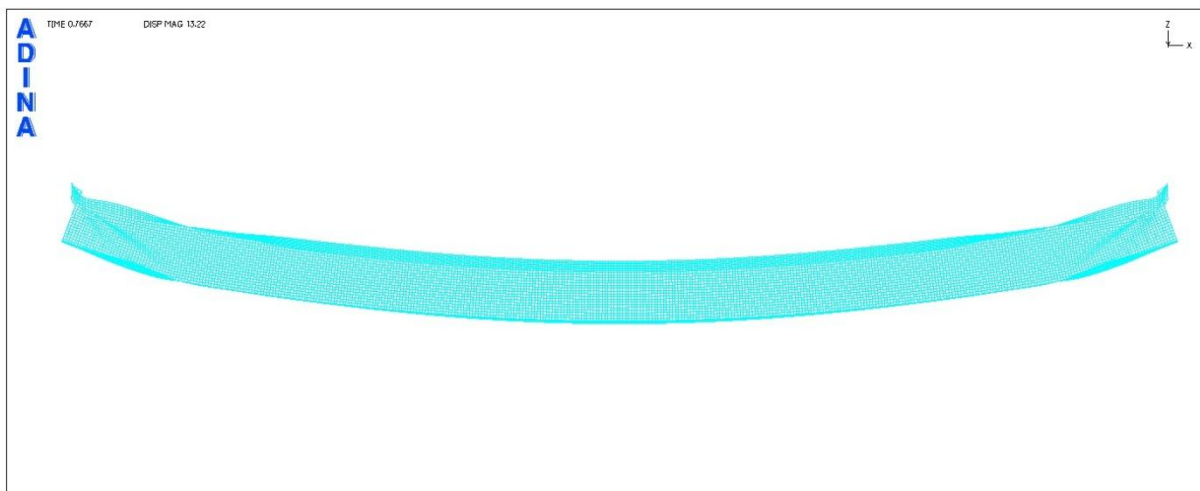
ΣΗΜΕΙΟ Γ



Σχήμα 6.54
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)



Σχήμα 6.55
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (κάτοψη)



Σχήμα 6.56
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

6.3 Αμφιέρειστη δοκός μήκους 8m διατομής κατηγορίας 4

Εξετάζεται η περίπτωση αμφιέρειστης δοκού μήκους $L=8m$ η οποία φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στο άνω πέλμα της και η οποία εξασφαλίζεται πλευρικά καθ'όλο το μήκος της στα σημεία συναρμογής άνω πέλματος και κορμού. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης διατομής είναι τα ακόλουθα:

$$h=500mm$$

$$b=300mm$$

$$t_w=4mm$$

$$t_f=10mm$$

Πραγματοποιείται κατάταξη της διατομής με βάση τον Ευρωκώδικα 3:

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = 1 \text{ για χάλυβα S235}$$

Έλεγχος κορμού για καθαρή κάμψη:

$$c/t_w = (500 - 2 \cdot 10) / 4 = 120 < 124\varepsilon = 124 \Rightarrow \text{κατηγορία 3}$$

Έλεγχος πέλματος για καθαρή κάμψη:

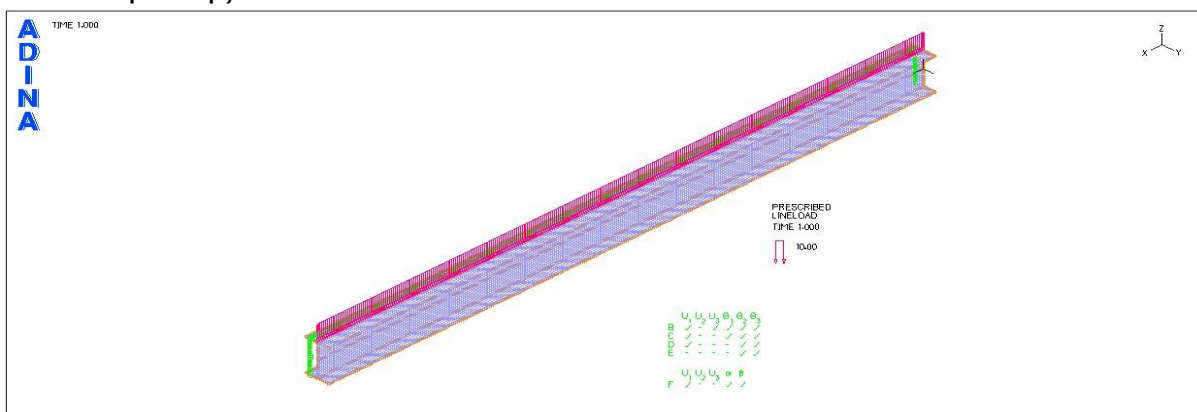
$$c/t_f = [(300 - 4) / 2] / 10 = 14,8 > 14\varepsilon = 14 \Rightarrow \text{κατηγορία 4}$$

Επομένως η διατομή ανήκει στην κατηγορία 4.

Για τη συγκεκριμένη διατομή η ροπή διαρροής προκύπτει ίση με $M_y = 373,24kNm$ και το αντίστοιχο κατανεμημένο φορτίο ίσο με $P_y = 46,66kN/m$.

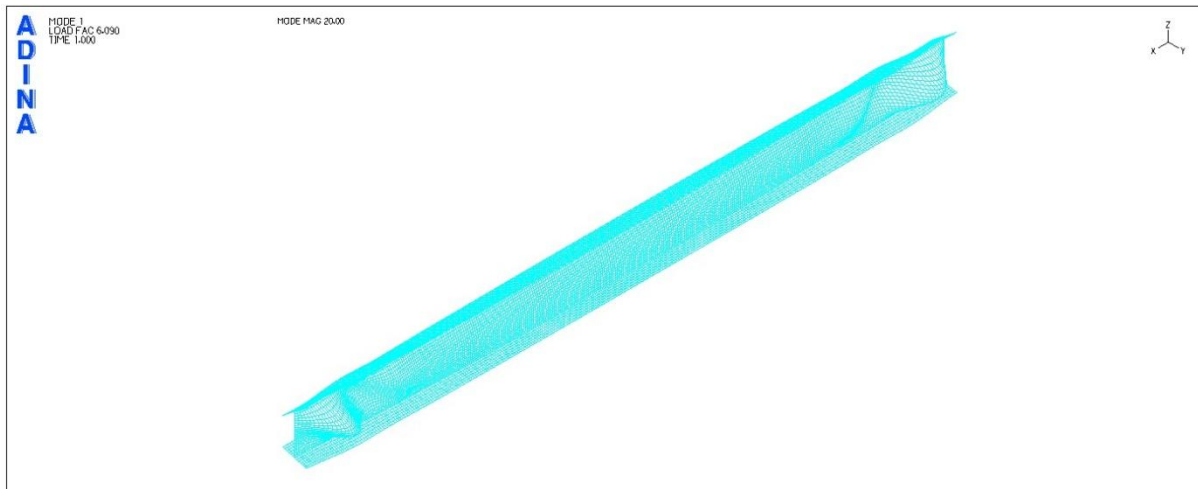
6.3.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Στο φορέα ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $10kN/m$ στο άνω πέλμα της δοκού.



Σχήμα 6.57

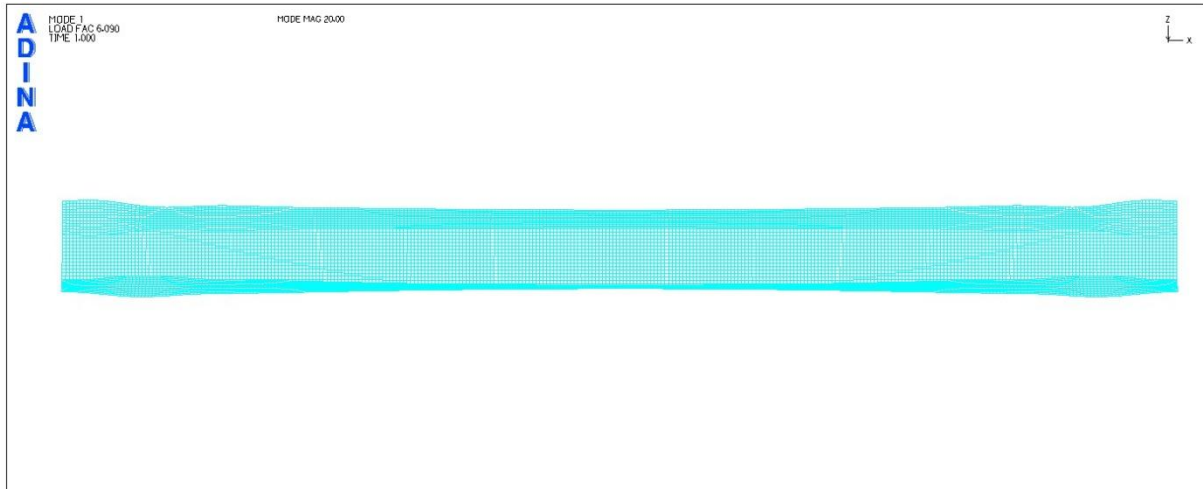
Αμφιέρειστος φορέας μήκους 8m με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο $10kN/m$ στο άνω πέλμα



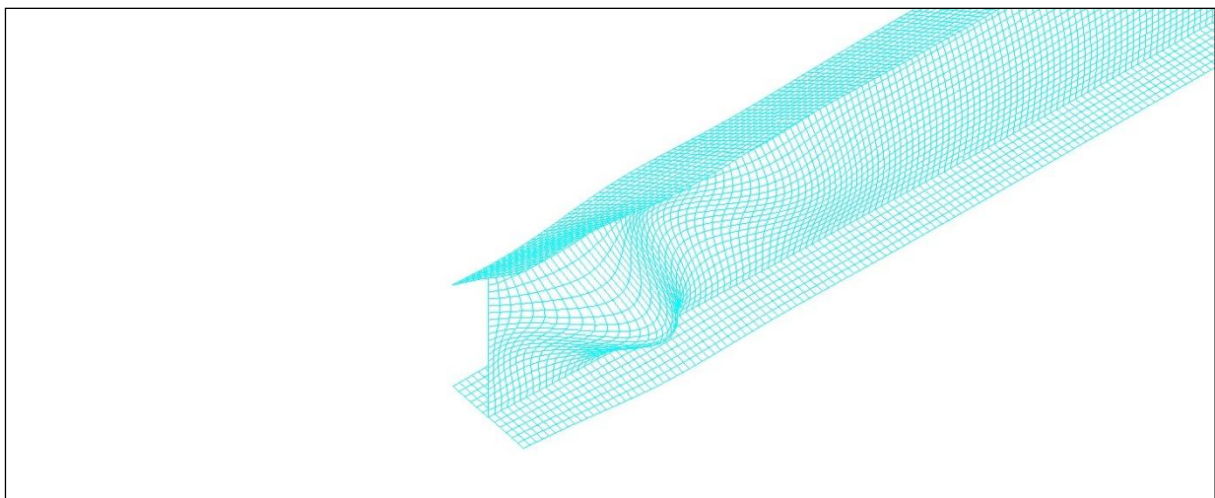
Σχήμα 6.58
1^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 6.59
1^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



Σχήμα 6.60
1^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)



Σχήμα 6.61
1^η ιδιομορφή λυγισμού (λεπτομέρεια)

Ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται στα άκρα της δοκού, γεγονός το οποίο αναμενόταν καθώς τα πέλματα έχουν μικρό πάχος, αλλά ικανό να συμβάλει στην παραλαβή των ορθών τάσεων λόγω κάμψης, ενώ ο κορμός είναι συγκριτικά ασθενέστερος λόγω πολύ μικρού πάχους για να παραλάβει τις αυξημένες διατμητικές τάσεις στα άκρα της αμφιέριστης δοκού.

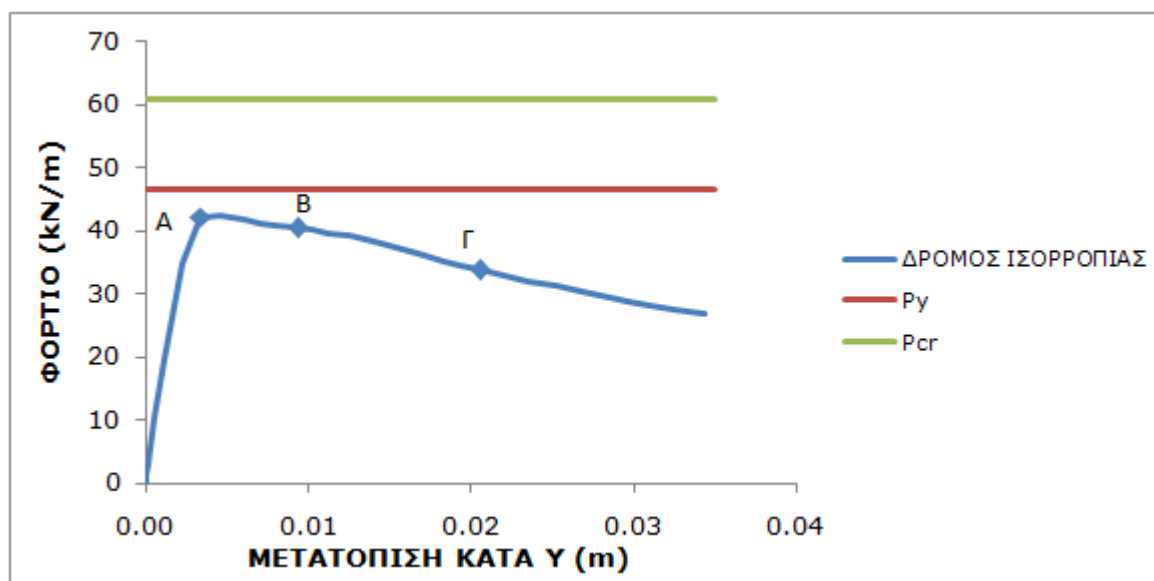
Το φορτίο τοπικού λυγισμού προέκυψε ίσο με $P_{cr}=60,90\text{kN/m}$. Η αντίστοιχη ροπή είναι ίση με $M_{cr}=487,2\text{kNm} > M_y=373,24\text{kNm}$

6.3.2 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Θεωρείται διγραμμικό υλικό S235 χωρίς κράτυνση.

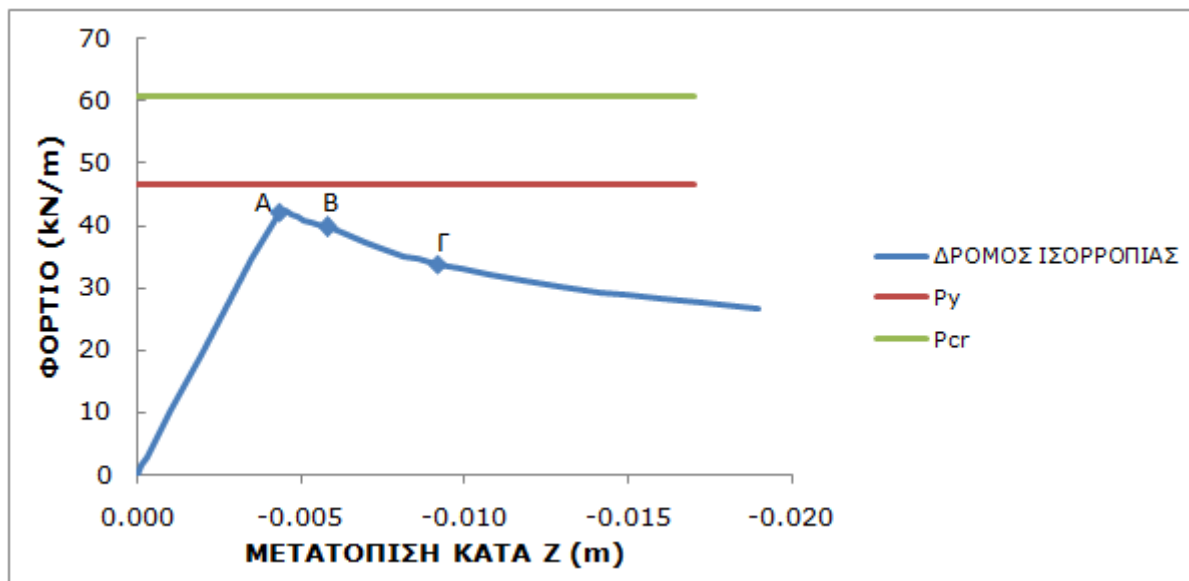
Η μη γραμμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο collapse analysis όπου θεωρήθηκε ως σημείο αναφοράς ο κόμβος της μεσαίας διατομής στο σημείο συνένωσης κορμού και κάτω πέλματος.

Δίνεται στο φορέα αρχική γεωμετρική ατέλεια 1cm κατά τη διεύθυνση y σε κόμβο κοντά στα άκρα της δοκού όπου εμφανίζεται έντονος τοπικός λυγισμός.



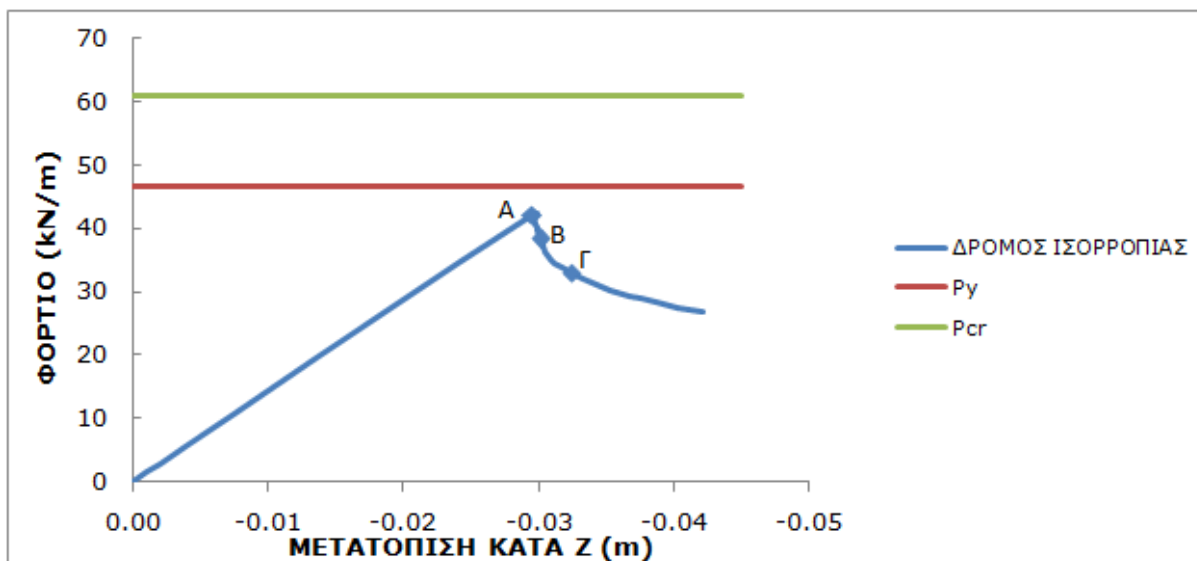
Σχήμα 6.62

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- y μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 6.63

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



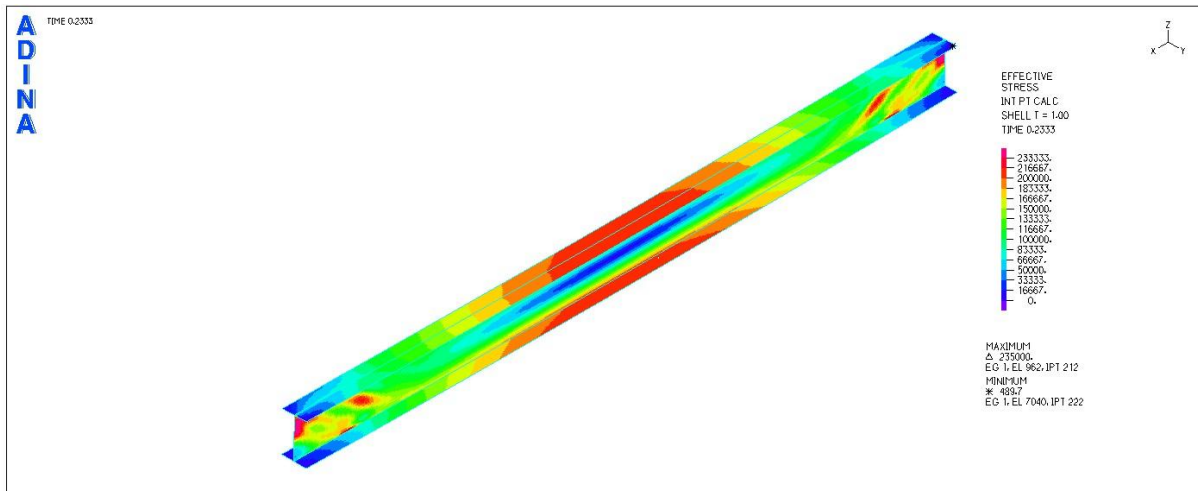
Σχήμα 6.64

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

Παρατηρούμε ότι το φορτίο αστοχίας της δοκού είναι ίσο με 42,4kN/m και οφείλεται στην αλληλεπίδραση τοπικού λυγισμού και διαρροής, καθώς μόλις οι τάσεις von Mises στα άκρα της δοκού φθάσουν την τιμή του φορτίου διαρροής, εμφανίζεται ο καθοδικός κλάδος του δρόμου ισορροπίας.

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

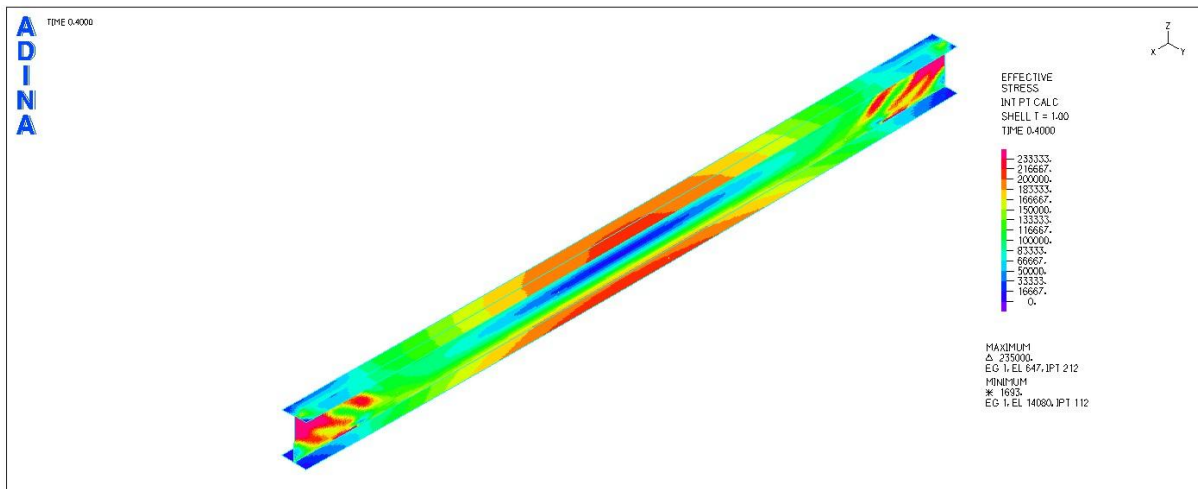
ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,23)



Σχήμα 6.65

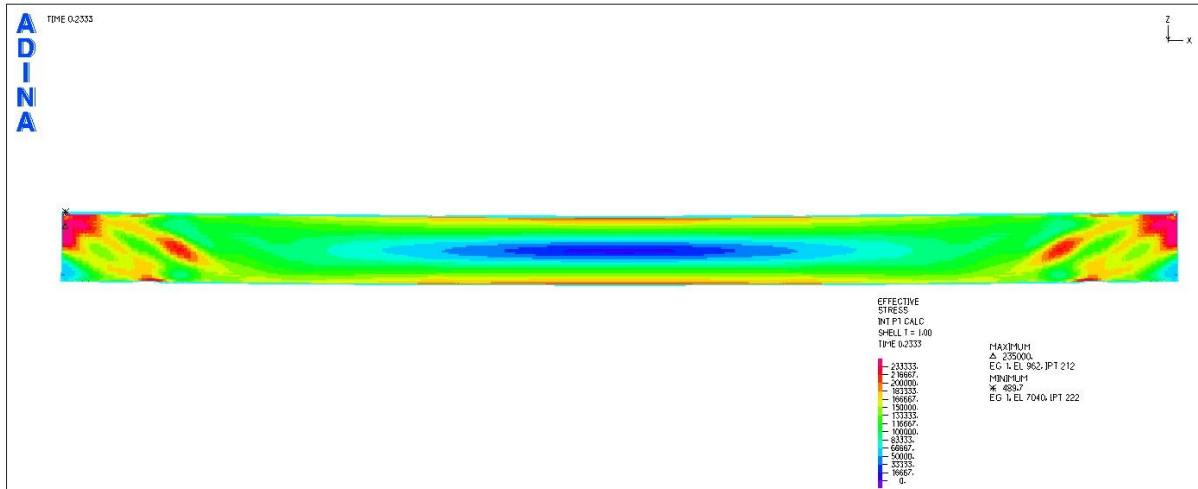
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο A

ΣΗΜΕΙΟ B (t=0,40)



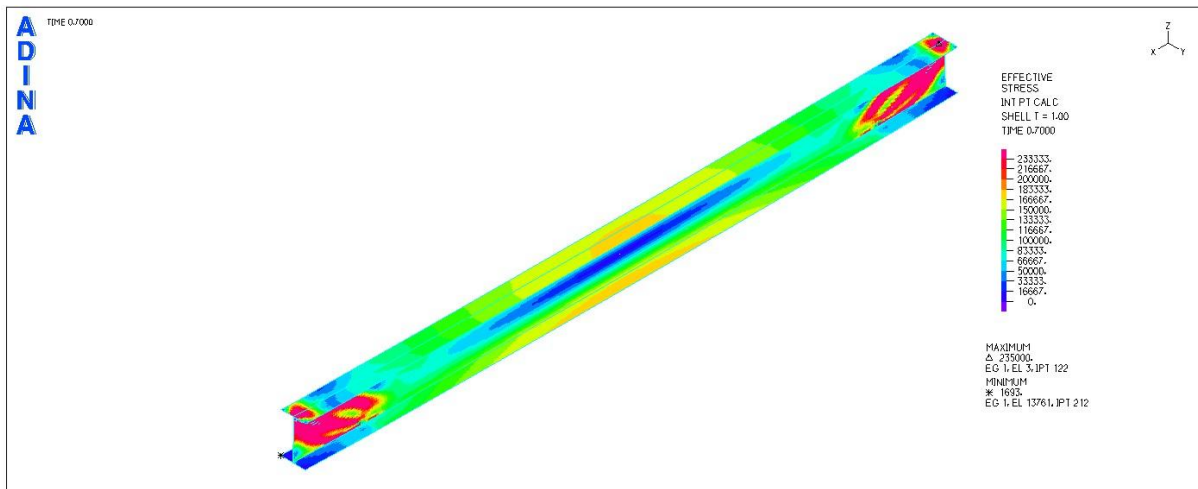
Σχήμα 6.66

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο B (προοπτικό)

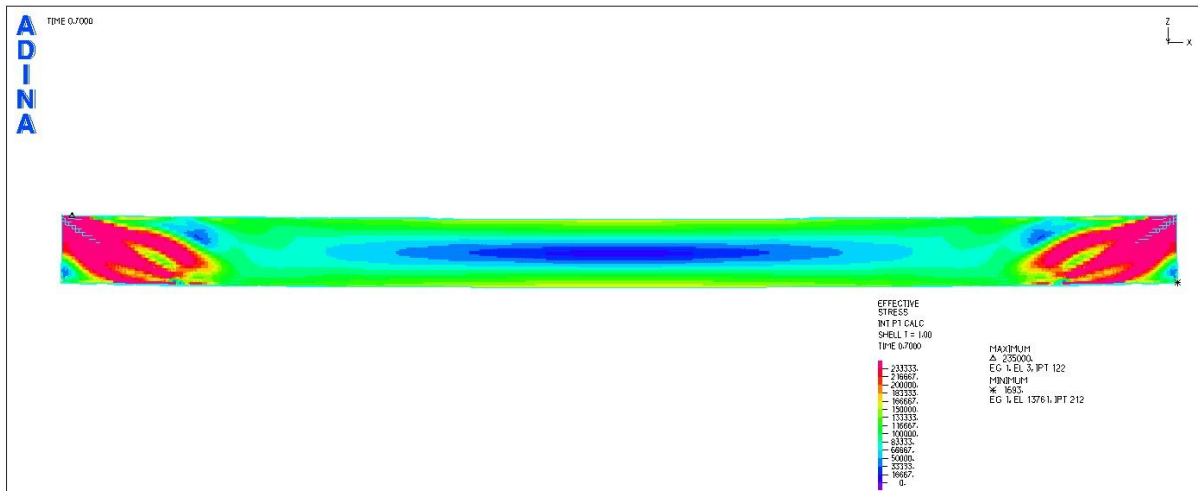


Σχήμα 6.67
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Β (όψη)

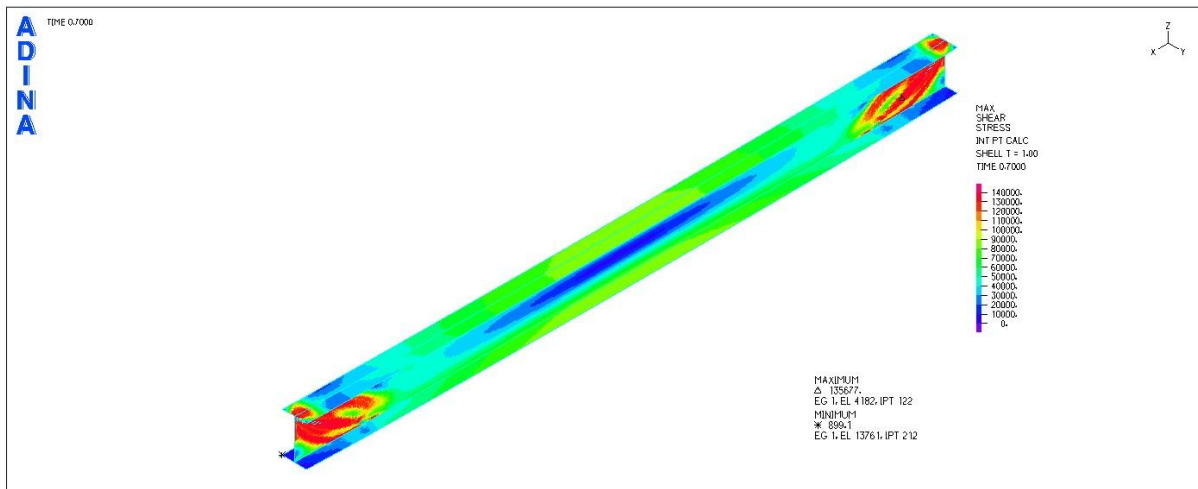
ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,70)



Σχήμα 6.68
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)



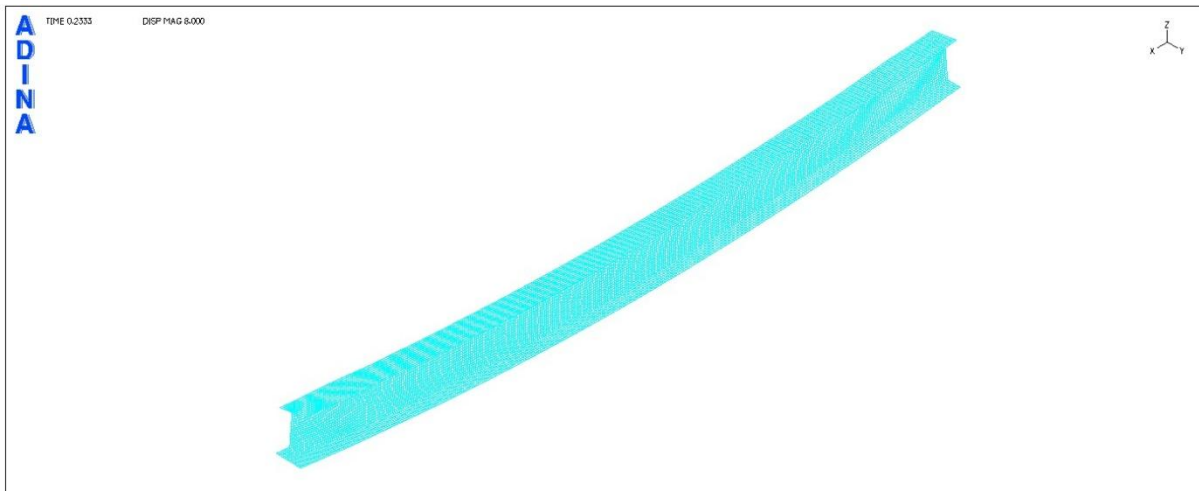
Σχήμα 6.69
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)



Σχήμα 6.70
Εικόνα διατμητικών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

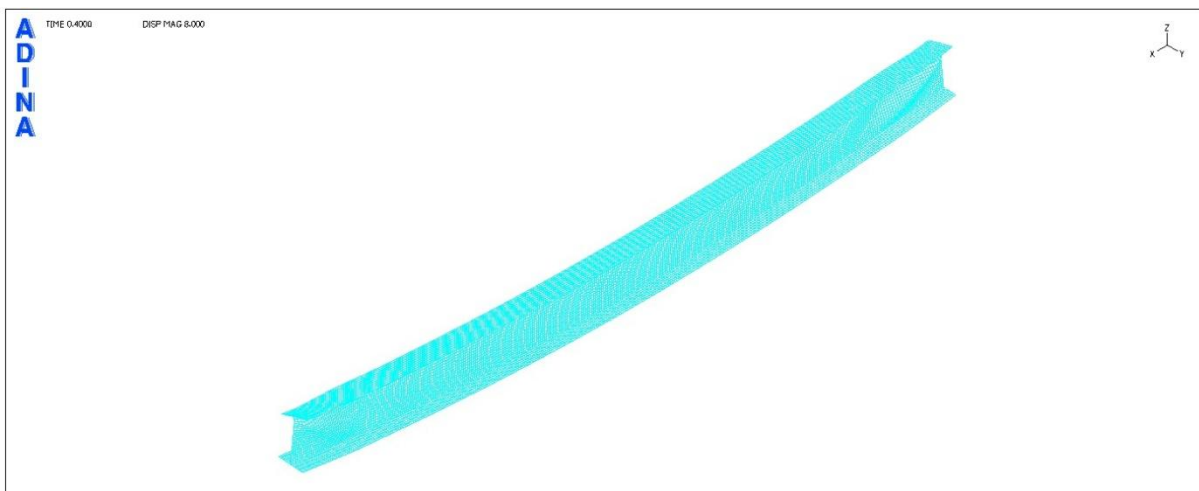
ΣΗΜΕΙΟ Α



Σχήμα 6.71

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Α

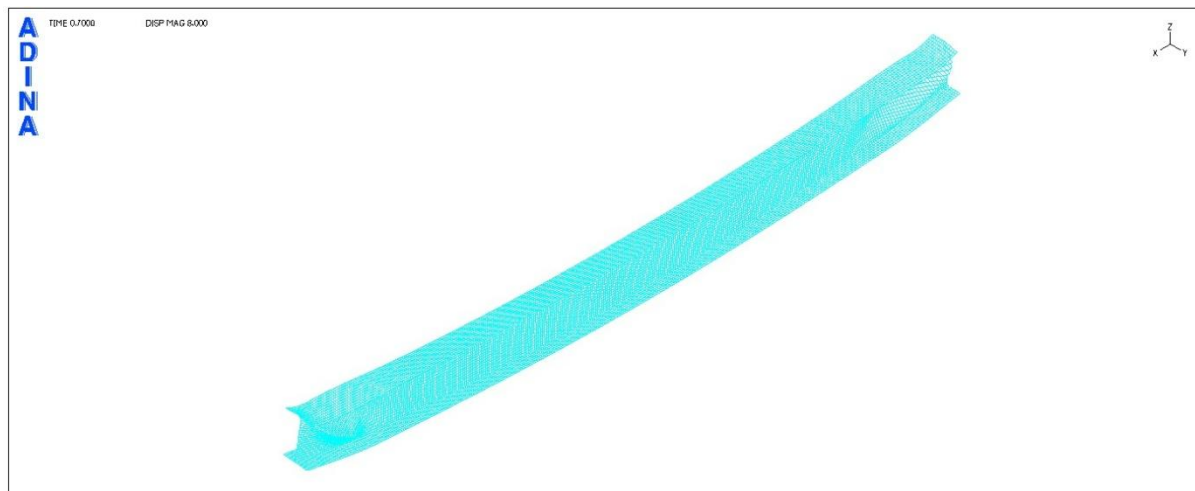
ΣΗΜΕΙΟ Β



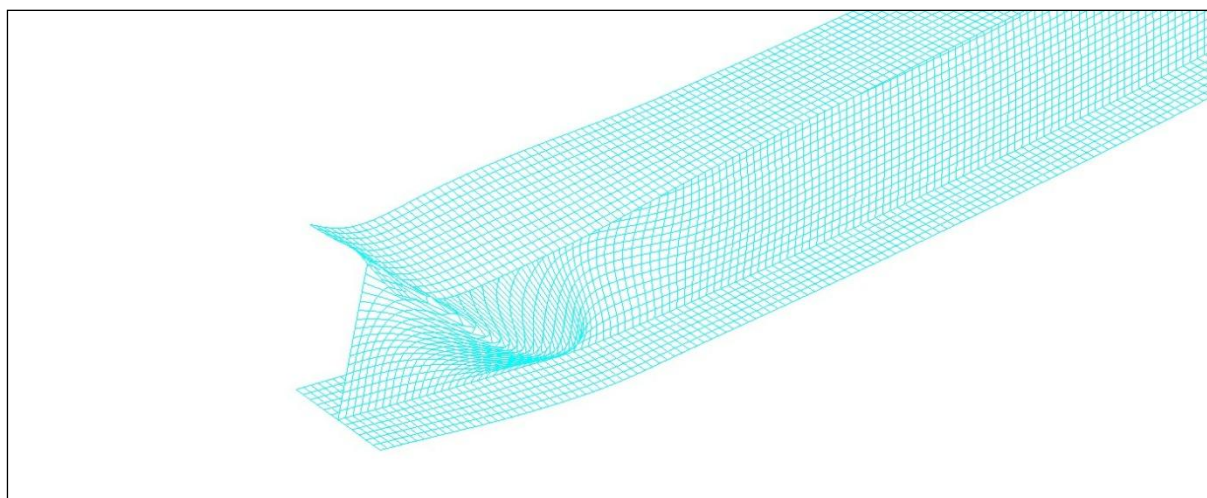
Σχήμα 6.72

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β

ΣΗΜΕΙΟ Γ



Σχήμα 6.73
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ



Σχήμα 6.74
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (λεπτομέρεια)

6.3.3 Σύγκριση δρόμων ισορροπίας για διαφορετικά πάχη διατομών κατηγορίας 4

Στην παράγραφο αυτή θα εξετασθούν διατομές με μικρότερο πάχος πελμάτων προκειμένου να διαπιστωθεί εάν εκδηλώνεται τοπικός λυγισμός πλέον στο μέσο της δοκού, στο άνω θλιβόμενο πέλμα. Οι εξεταζόμενες διατομές είναι και πάλι κατηγορίας 4.

- Εξετάζεται διατομή με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με την προηγούμενη, αλλά με πάχος πελμάτων ίσο με 8mm, δηλαδή:

$$h=500\text{mm}$$

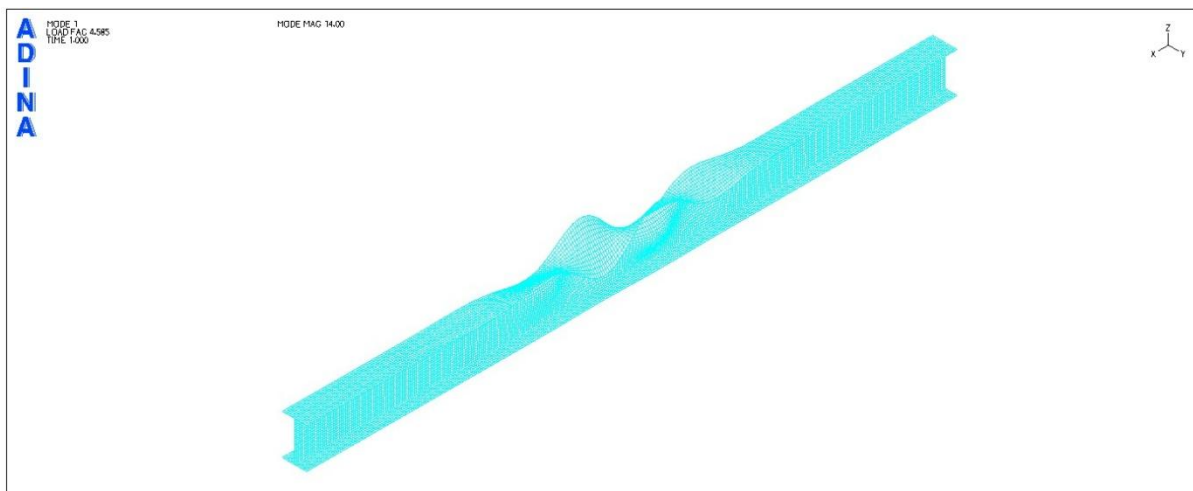
$$b=300\text{mm}$$

$$t_w=4\text{mm}$$

$$t_f=8\text{mm}$$

Το φορτίο που θα αντιστοιχούσε στη διαρροή των ακραίων ινών της διατομής προκύπτει ίσο με $P_y=8 \cdot W_{el} \cdot f_y / L^2 = 38,57 \text{ kN/m}$.

Πραγματοποιώντας γραμμική ανάλυση λυγισμού στο ADINA, από την 1^η κιάλας ιδιομορφή παρατηρείται τοπικός λυγισμός στο μέσο της δοκού, όπως αναμενόταν λόγω της μείωσης του πάχους των πελμάτων. Το αντίστοιχο φορτίο για τον τοπικό λυγισμό προέκυψε ίσο με $P_{cr}=45,85 \text{ kN/m} > P_y=38,57 \text{ kN/m}$.



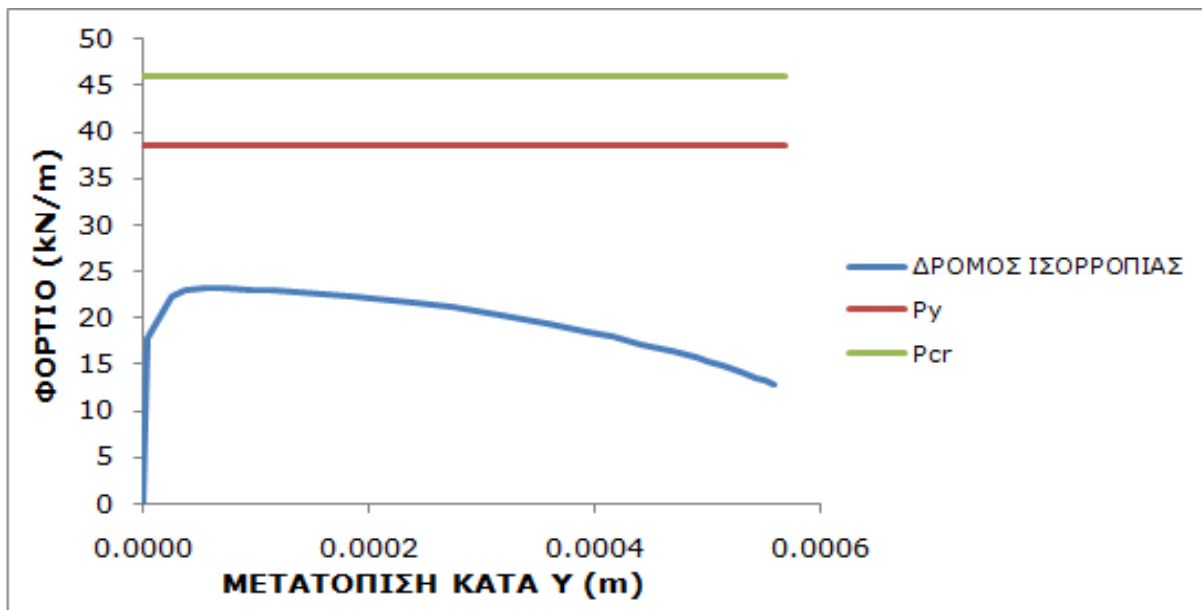
Σχήμα 6.75
1^η ιδιομορφή λυγισμού

Στα επόμενα σχήματα φαίνονται οι δρόμοι ισορροπίας που προέκυψαν από τη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας στο

ADINA. Σημειώνεται ότι εφαρμόστηκε στο φορέα γεωμετρική ατέλεια σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή μεγέθους 0,0005, η οποία δόθηκε κατά γ στον κόμβο ακριβώς κάτω από τη συνένωση άνω πέλματος και κορμού (όπου ο αντίστοιχος κόμβος είναι πλευρικά εξασφαλισμένος). Η τιμή της ατέλειας είναι πολύ μικρή και εφαρμόστηκε γιατί για μεγαλύτερες τιμές ατελειών, όπως αυτές που δίνονταν έως τώρα, υπήρχε πρόβλημα στη σύγκλιση της μεθόδου για την εκτέλεση της μη γραμμικής ανάλυσης.

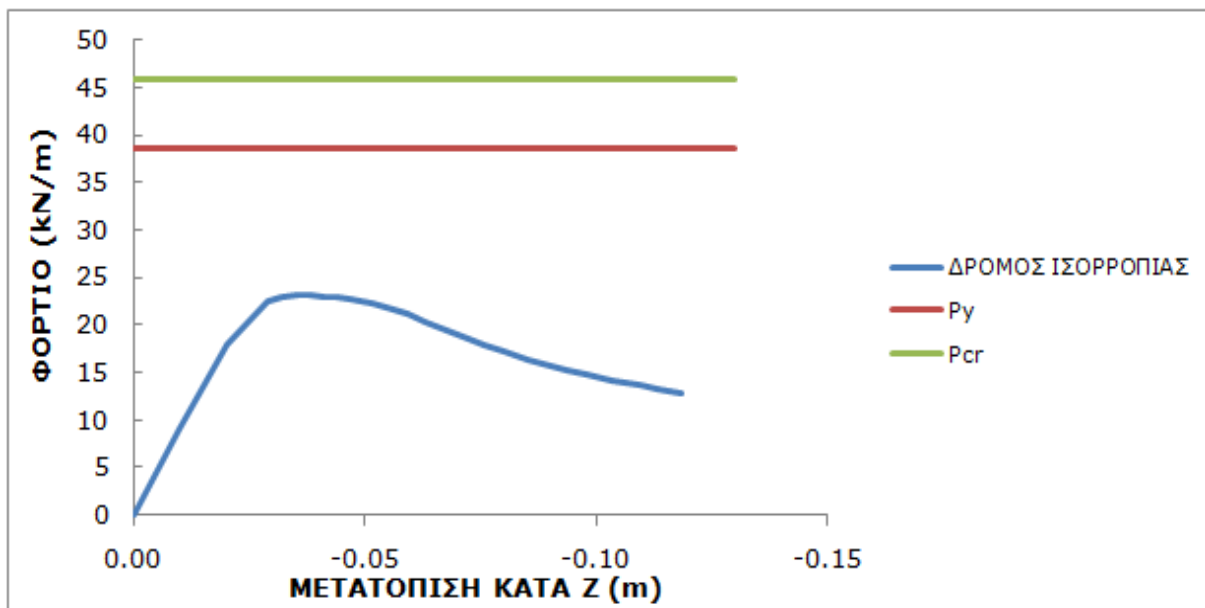
Ίσως αυτή η συμπεριφορά να δικαιολογείται από το γεγονός ότι ο συγκεκριμένος φορέας συνιστά το ενδιάμεσο στάδιο για τη μετάβαση από το διατμητικό λυγισμό των άκρων στον τοπικό λυγισμό λόγω κάμψης του μέσου. Πιο συγκεκριμένα, για την προηγούμενη διατομή πάχους πελμάτων 10mm, ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται καθαρά στα άκρα, ενώ για την επόμενη διατομή που θα εξετασθεί στη συνέχεια, πάχους πελμάτων 6mm, ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται, όπως θα δούμε και είναι αναμενόμενο, στο μέσο εξαιτίας της αποδυνάμωσης των πελμάτων. Η συγκεκριμένη κατάσταση ίσως είναι η μεταβατική φάση όπου ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται στο μέσο της δοκού και για το λόγο αυτό υπάρχει πιθανόν πρόβλημα σύγκλισης στη μη γραμμική ανάλυση. Για επιβεβαίωση, πραγματοποιήθηκε ανάλυση για διατομή με πάχος πελμάτων 9mm, όπου ο τοπικός λυγισμός εμφανίστηκε όντως στα άκρα. Άρα η συγκεκριμένη διατομή είναι η πρώτη από τη συγκεκριμένη σειρά διατομών μεταβαλλόμενου πάχους πελμάτων, για την οποία ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται στο μέσο της δοκού.

Συνεπώς, δίνεται πολύ μικρή τιμή ατέλειας ίση με 0,0005, η εφαρμογή της οποίας στη μη γραμμική ανάλυση δίνει τα ακόλουθα αποτελέσματα:



Σχήμα 6.76

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 6.77

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

- Εξετάζεται διατομή με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με την προηγούμενη, αλλά με πάχος πελμάτων ίσο με 6mm, δηλαδή:

$$h=500\text{mm}$$

$$b=300\text{mm}$$

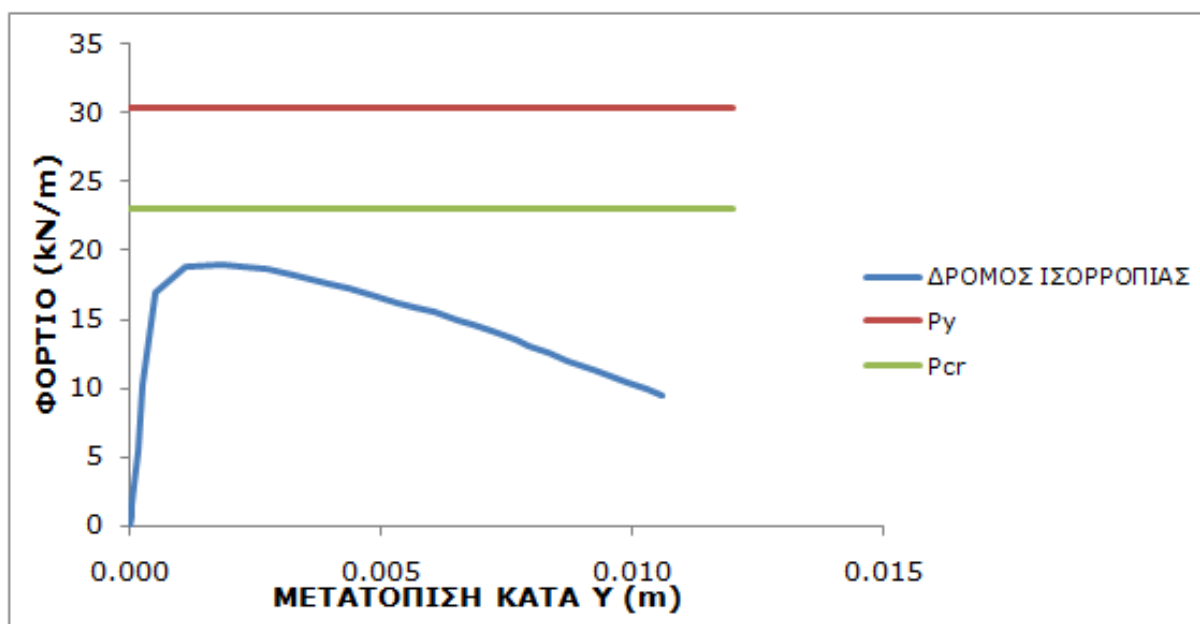
$$t_w=4\text{mm}$$

$$t_f=6\text{mm}$$

Το φορτίο που θα αντιστοιχούσε στη διαρροή των ακραίων ινών της διατομής προκύπτει ίσο με $P_y=8 \cdot W_{el} \cdot f_y / L^2=30,36\text{kN/m}$.

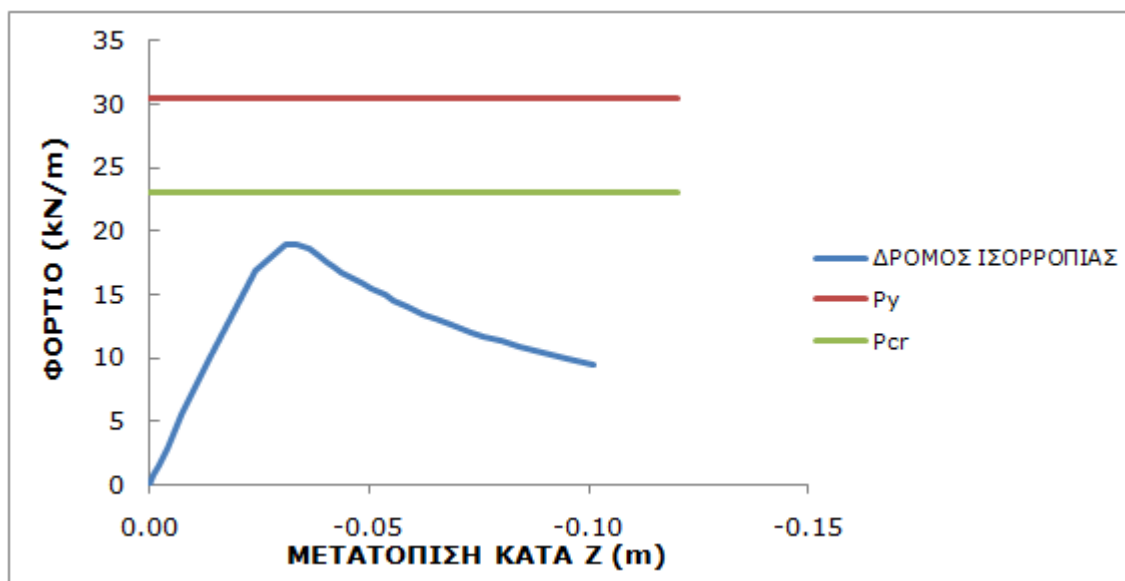
Σύμφωνα με τη γραμμική ανάλυση λυγισμού στο ADINA, εμφανίζεται τοπικός λυγισμός στο μέσο της δοκού για φορτίο της 1^{ης} ιδιομορφής ίσο με $P_{cr}=23,00\text{kN/m} < P_y=30,36\text{kN/m}$. Επομένως, είναι κρίσιμος ο τοπικός λυγισμός ως μορφή αστοχίας.

Στα επόμενα σχήματα φαίνονται οι δρόμοι ισορροπίας που προέκυψαν από τη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας στο ADINA. Σημειώνεται ότι εφαρμόστηκε στο φορέα γεωμετρική ατέλεια μεγέθους 0,01 (αρκετά μεγαλύτερη συγκριτικά με το προηγούμενο παράδειγμα, όπως έχει σχολιαστεί προηγουμένως)



Σχήμα 6.78

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 6.79

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

- Εξετάζεται διατομή με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με την προηγούμενη, αλλά με συνολικό ύψος 700mm αντί των 500mm, δηλαδή:

$$h=700\text{mm}$$

$$b=300\text{mm}$$

$$t_w=4\text{mm}$$

$$t_f=6\text{mm}$$

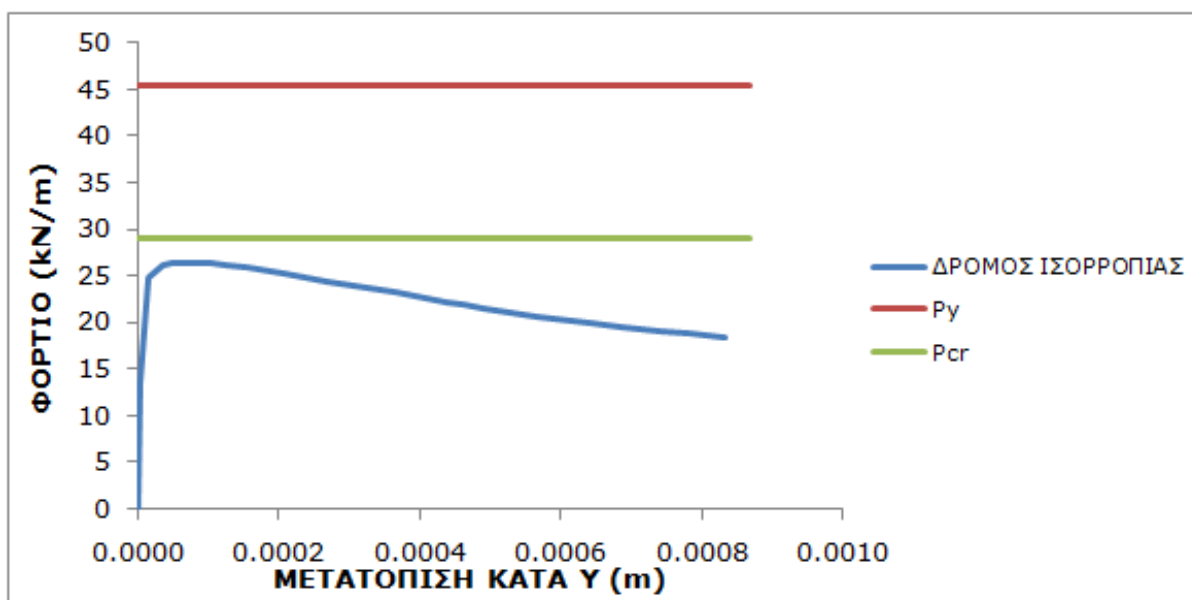
Το φορτίο που θα αντιστοιχούσε στη διαρροή των ακραίων ινών της διατομής προκύπτει ίσο με $P_y=8 \cdot W_{el} \cdot f_y / L^2=45,49\text{kN/m}$.

Σύμφωνα με τη γραμμική ανάλυση λυγισμού στο ADINA, εμφανίζεται τοπικός λυγισμός στο μέσο της δοκού για φορτίο ίσο με $P_{cr}=29,10\text{kN/m} < P_y=45,49\text{kN/m}$. Επομένως, είναι και πάλι κρίσιμος ο τοπικός λυγισμός ως μορφή αστοχίας.

Στα επόμενα σχήματα φαίνονται οι δρόμοι ισορροπίας που προέκυψαν από τη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας στο ADINA. Σημειώνεται ότι εφαρμόστηκε στο φορέα γεωμετρική ατέλεια μεγέθους 0,0005. Ο λόγος ήταν αυτός που έχει ήδη αναφερθεί, καθώς για μεγαλύτερες τιμές ατέλειας υπήρχε πρόβλημα με τη σύγκλιση της μεθόδου και δεν προέκυπτε σωστή η παραμορφωμένη κατάσταση. Έχει γίνει μία μικρή προσπάθεια να δικαιολογηθεί το ζήτημα αυτό προηγουμένως, με την αιτιολογία ότι όταν ο φορέας βρίσκεται στα όρια εμφάνισης τοπικού λυγισμού στα άκρα και τοπικού λυγισμού στο μέσο, ενδείκνυται η

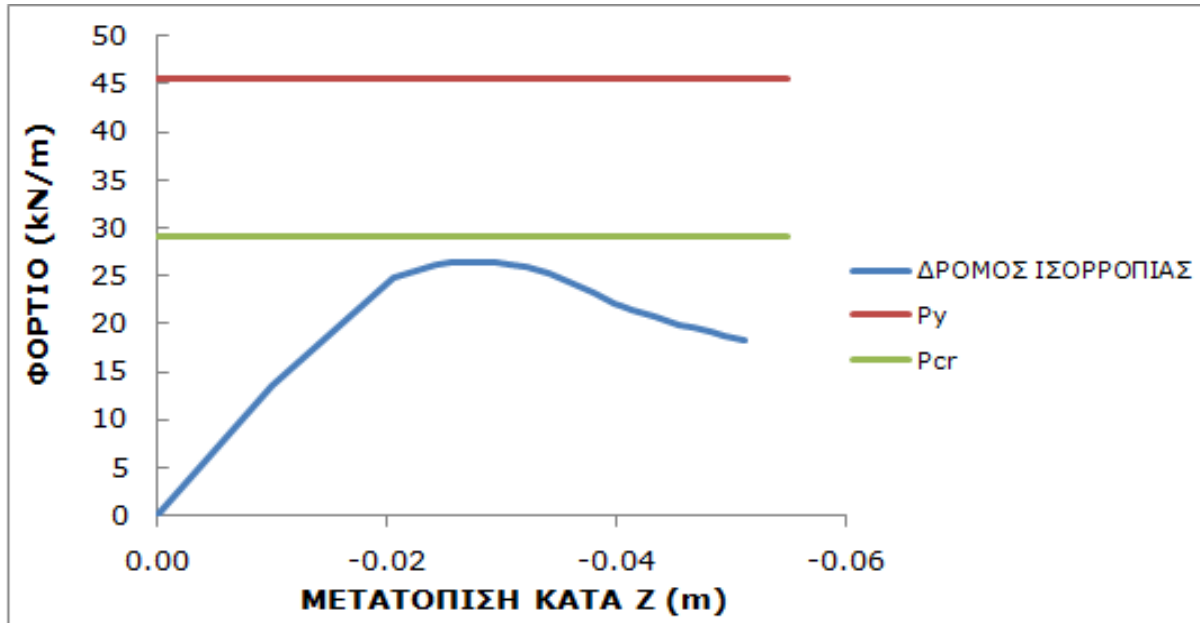
εφαρμογή στοιχειώδους αρχικής ατέλειας. Πράγματι, για να επιβεβαιωθεί η παραπάνω σκέψη, έγινε γραμμική ανάλυση για διατομή με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, αλλά με πάχος πελμάτων $t_f=7\text{mm}$, όπου διαπιστώθηκε η εμφάνιση τοπικού λυγισμού στα άκρα του φορέα.

Ας σημειωθεί, επίσης, ότι για τη διατομή με γεωμετρικά χαρακτηριστικά: $h=500\text{mm}$, $b=300\text{mm}$, $t_w=4\text{mm}$, $t_f=7\text{mm}$, εμφανίζεται τοπικός λυγισμός στο μέσο της δοκού. Αντίθετα, για τη διατομή με γεωμετρικά χαρακτηριστικά: $h=700\text{mm}$, $b=300\text{mm}$, $t_w=4\text{mm}$, $t_f=7\text{mm}$, εμφανίζεται τοπικός λυγισμός στα άκρα της. Το αυξημένο ύψος του κορμού της 2^{ης} περίπτωσης, σε συνδυασμό με το μικρό πάχος του, τον καθιστά πιο επιρρεπή στην εμφάνιση τοπικών παραμορφώσεων, σε σχέση με το μικρότερου ύψους κορμό.



Σχήμα 6.80

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 6.81

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

6.4 Ανακεφαλαίωση

Αξίζει να επισημανθεί ότι σε μια αμφιέρειστη δοκό διατομής κατηγορίας 4, πλευρικά εξασφαλισμένη, δε γνωρίζουμε εκ των προτέρων εάν θα εμφανιστεί τοπικός λυγισμός στο μέσο της δοκού, συγκεκριμένα στο θλιβόμενο άνω πέλμα εξαιτίας των αυξημένων ορθών τάσεων λόγω κάμψης, ή στα άκρα της δοκού εξαιτίας των αυξημένων διατμητικών τάσεων. Πραγματοποιώντας, αρκετές αριθμητικές αναλύσεις, προέκυψε ως συμπέρασμα ότι η θέση εμφάνισης τοπικού λυγισμού εξαρτάται κυρίως από το πάχος του κορμού και των πελμάτων, σε σχέση φυσικά και με το ύψος και πλάτος της διατομής. Στις περιπτώσεις όπου το πάχος των πελμάτων είναι εμφανώς μεγαλύτερο από το πάχος του κορμού, αναμένεται τοπικός λυγισμός στα άκρα της δοκού. Προκειμένου να εμφανισθεί τοπικός λυγισμός λόγω κάμψης στο μέσο της δοκού, πρέπει να υπάρξει ικανή μείωση του πάχους των πελμάτων. Τα παραπάνω συμπεράσματα συνιστούν μία μόνο ένδειξη για τις περιπτώσεις τοπικού λυγισμού και δεν αποτελούν κανόνα εφαρμογής. Έχουν προκύψει για την εξέταση αμφιέρειστης λεπτότοιχης δοκού πλευρικά εξασφαλισμένης υπό καταναμεμένο φορτίο. Προκειμένου να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα με γενική ισχύ, απαιτείται πολύ μεγάλος αριθμός αναλύσεων και διατύπωση γενικών κανόνων που να εφαρμόζονται σε κάθε δυνατή περίπτωση.

Κεφάλαιο 7

Αλληλεπίδραση μορφών αστοχίας αμφιέρειστης συμπαγούς δοκού

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται αμφιέρειστες δοκοί διατομής διπλού ταυ υπό κατανεμημένο φορτίο των οποίων η αστοχία δεν οφείλεται καθαρά σε ένα εκ των φαινομένων που έχουν περιγραφεί έως τώρα, αλλά στην αλληλεπίδρασή τους. Αυτό συμβαίνει όταν οι τιμές των φορτίων που αντιστοιχούν στους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας παρουσιάζουν πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ τους. Τις περισσότερες φορές, ο φορέας αστοχεί τελικά για μικρότερη τιμή φορτίου από τα πιθανά φορτία αστοχίας.

7.1 Αλληλεπίδραση πλευρικού λυγισμού και τοπικού λυγισμού

Εξετάζεται η περίπτωση αμφιέρειστης δοκού μήκους $L=10m$ η οποία φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στον κεντροβαρικό της άξονα και της οποίας η διατομή έχει τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$h=500mm$$

$$b=300mm$$

$$t_w=4mm$$

$$t_f=6,2mm$$

Πραγματοποιείται κατάταξη της διατομής με βάση τον Ευρωκώδικα 3:

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = 1 \text{ για χάλυβα S235}$$

Έλεγχος κορμού για καθαρή κάμψη:

$$c/t_w = (500 - 2 \cdot 6,2) / 4 = 121,9 < 124\varepsilon = 124 \Rightarrow \text{κατηγορία 3}$$

Έλεγχος πέλματος για καθαρή κάμψη:

$$c/t_f = [(300 - 4) / 2] / 6,2 = 23,87 > 14\varepsilon = 14 \Rightarrow \text{κατηγορία 4}$$

Επομένως η διατομή ανήκει στην κατηγορία 4.

Υπολογίζονται τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της διατομής και παρουσιάζονται οι τιμές τους:

$$I_z = 2790,3cm^4$$

$$I_y = 26542,5 \text{ cm}^4$$

$$I_t = 5,81 \text{ cm}^4$$

$$I_w = 1700,931 \text{ cm}^6$$

Η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού για κατανεμημένο φορτίο στο κέντρο βάρους της δοκού, προκύπτει ίση με:

$$M_{cr} = 172,05 \text{ kNm}$$

Το φορτίο στο οποίο αντιστοιχεί είναι ίσο με $P_{cr} = 8 \cdot M_{cr} / L^2 = 13,76 \text{ kN/m}$.

Η ροπή διαρροής της εξεταζόμενης διατομής για χάλυβα S235 είναι ίση με:

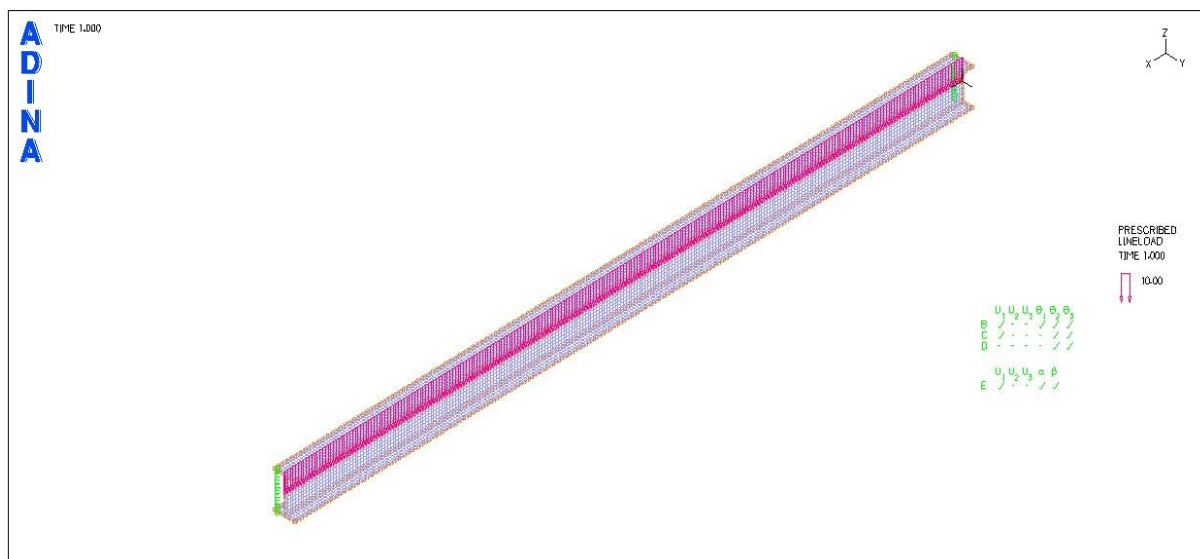
$$M_y = W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 1061,7 \text{ cm}^3 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2 / 1,00$$

$$M_y = 249,5 \text{ kNm} > M_{cr} = 172,05 \text{ kNm}$$

Το αντίστοιχο φορτίο είναι ίσο με $P_y = 19,96 \text{ kN/m}$.

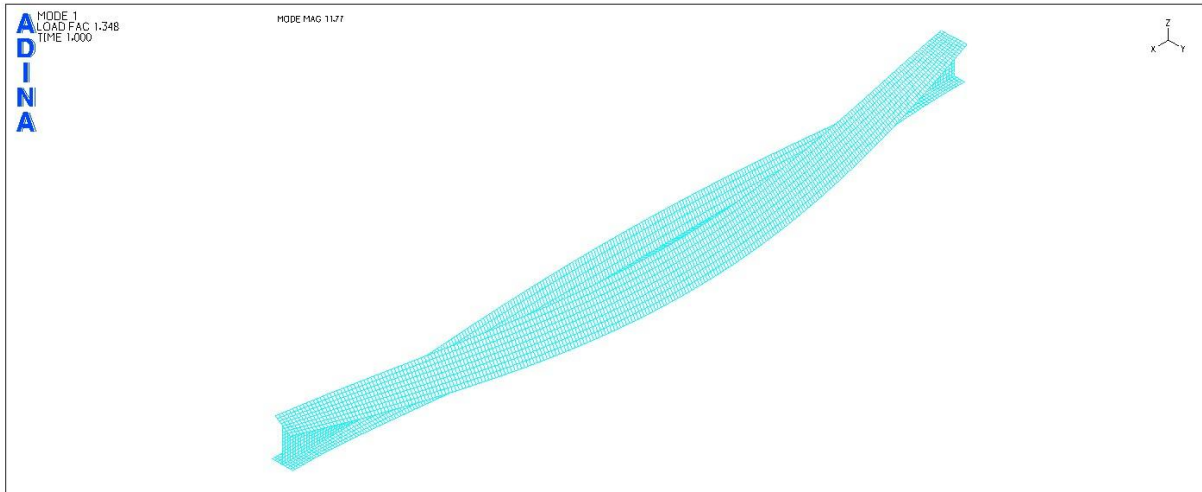
7.1.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Στο φορέα ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 10 kN/m στον κεντροβαρικό άξονα της δοκού.

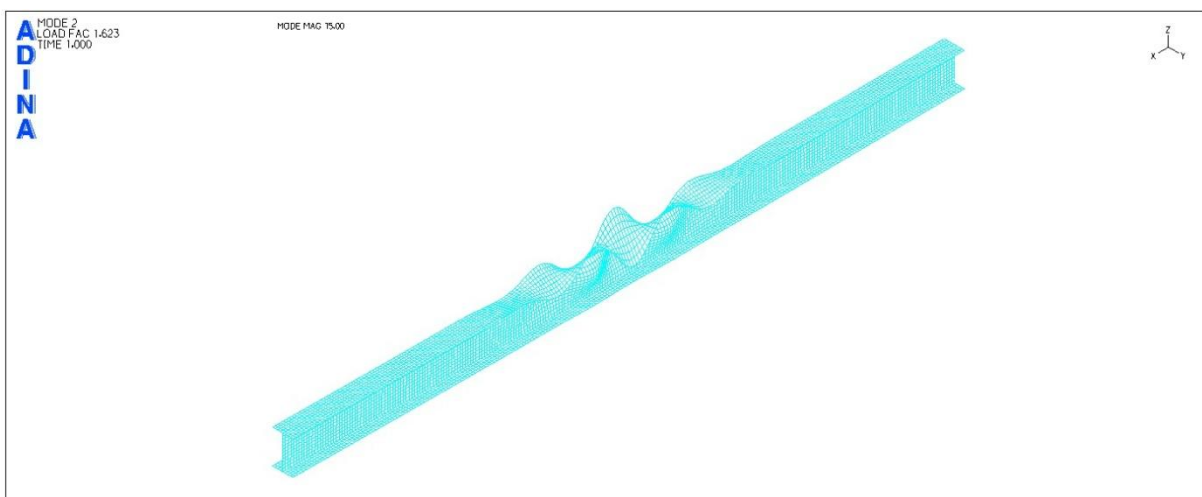


Σχήμα 7.1

Αμφιέριστος φορέας μήκους 10 m με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 10 kN/m στον κεντροβαρικό άξονα



Σχήμα 7.2
1^η ιδιομορφή λυγισμού



Σχήμα 7.3
2^η ιδιομορφή λυγισμού

Παρατηρούμε ότι στην 1^η ιδιομορφή λυγισμού εμφανίζεται πλευρικός λυγισμός και το αντίστοιχο φορτίο είναι ίσο με $P_{cr}=13,48\text{kN/m}$, ενώ στη 2^η ιδιομορφή λυγισμού εκδηλώνεται τοπικός λυγισμός στο άνω θλιβόμενο πέλμα και στο άνω τμήμα του κορμού, στο μέσο της αμφιέριστης δοκού με αντίστοιχο φορτίο ίσο με $P_{cr}=16,23\text{kN/m}$.

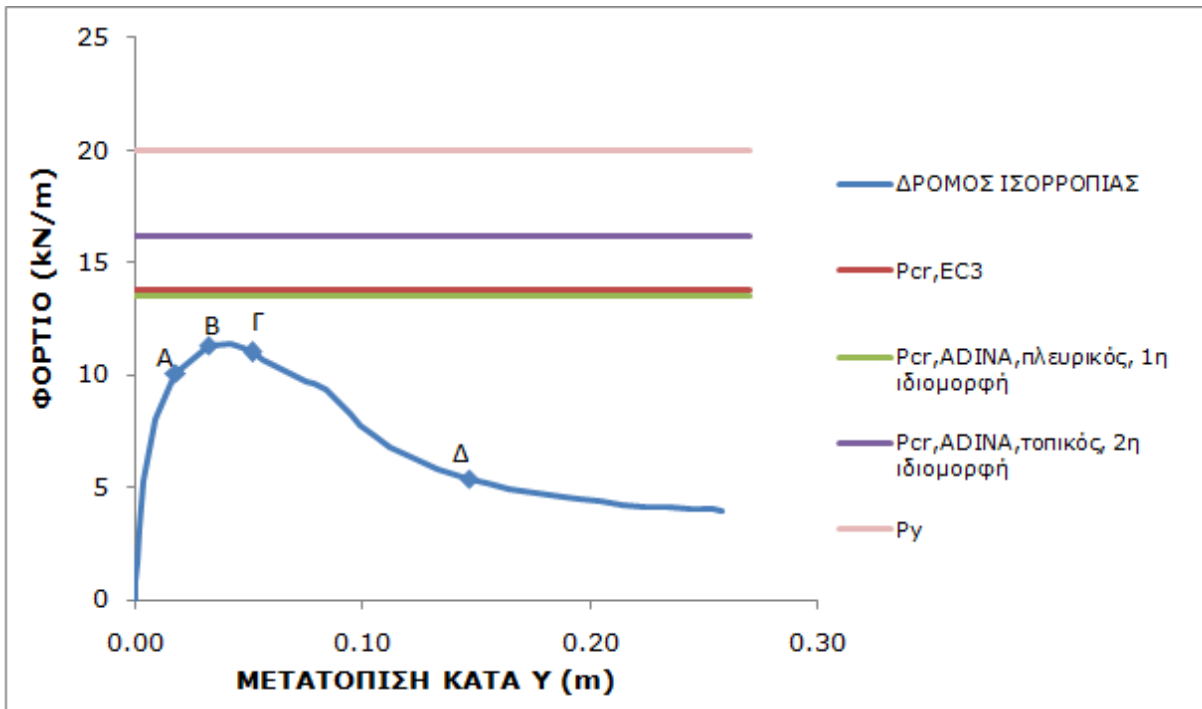
Η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών φορτίων είναι μικρή και αναμένεται να υπάρχει αλληλεπίδραση πλευρικού και τοπικού λυγισμού, η οποία θα προκαλέσει την αστοχία του φορέα.

7.1.2 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Θεωρείται διγραμμικό υλικό S235 χωρίς κράτυνση.

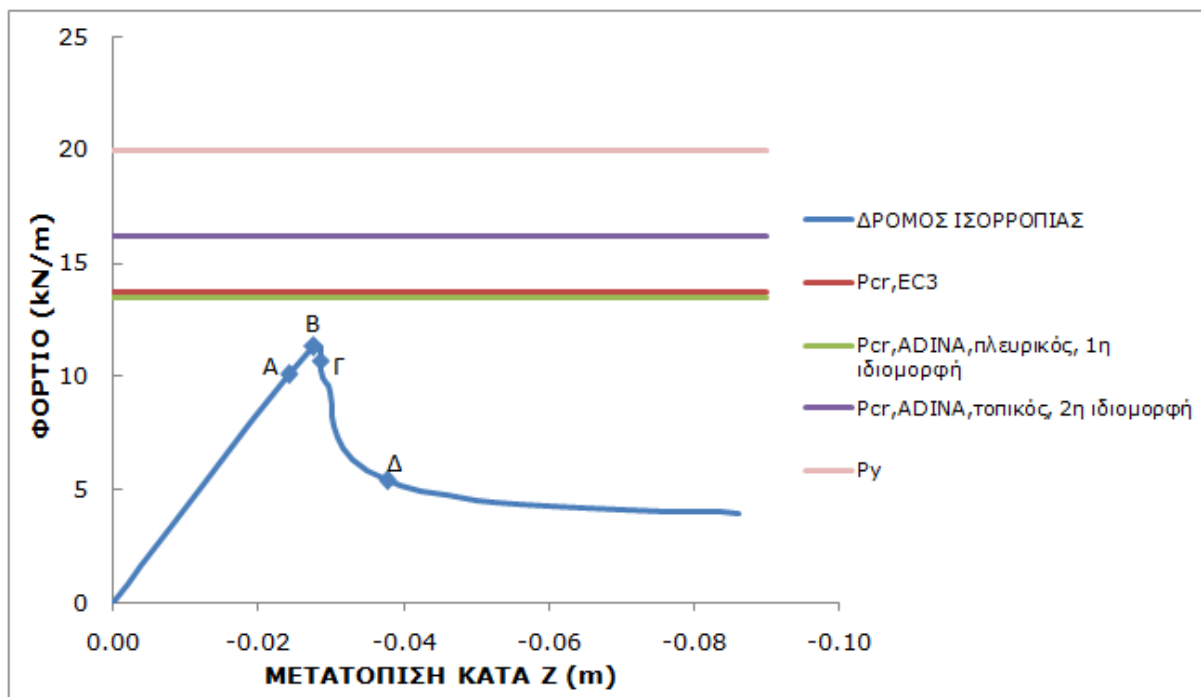
Η μη γραμμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο collapse analysis όπου θεωρήθηκε ως σημείο αναφοράς ο κόμβος της μεσαίας διατομής στο σημείο συνένωσης κορμού και κάτω πέλματος.

Δίνεται στο φορέα αρχική γεωμετρική ατέλεια 2cm κατά τη διεύθυνση γ στον κόμβο συνένωσης άνω πέλματος και κορμού στη μεσαία διατομή της δοκού. Η ατέλεια δίνεται με το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής.



Σχήμα 7.4

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 7.5

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

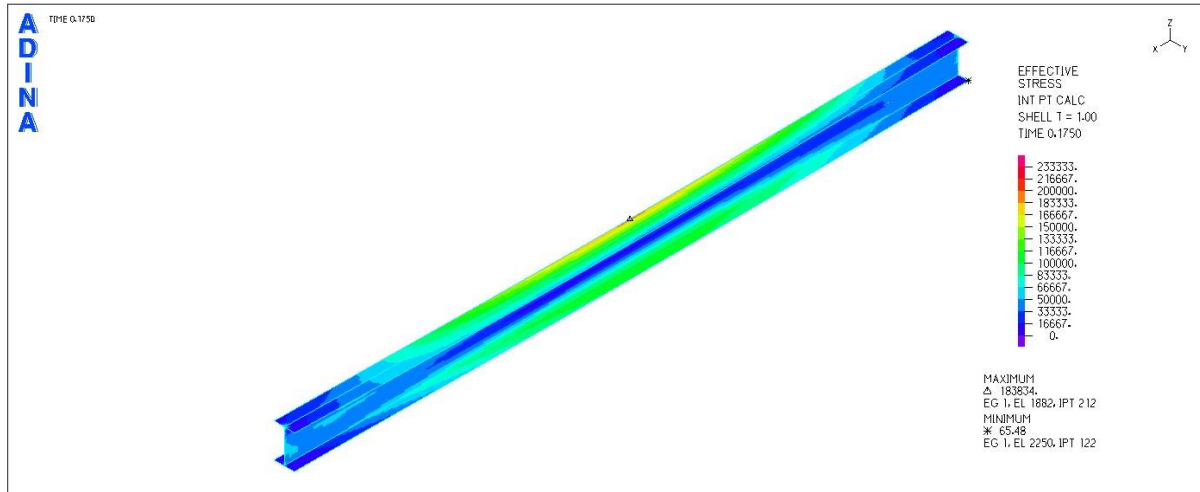
Η αστοχία του φορέα έρχεται ως επακόλουθο της αλληλεπίδρασης πλευρικού και τοπικού λυγισμού και προκύπτει για τιμή φορτίου ίση με 11,3kN/m.

Ακολουθούν εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων για τα σημεία που έχουν σημειωθεί στους δρόμους ισορροπίας, οι οποίες φανερώνουν την αλληλεπίδραση πλευρικού και τοπικού λυγισμού.

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ VON MISES

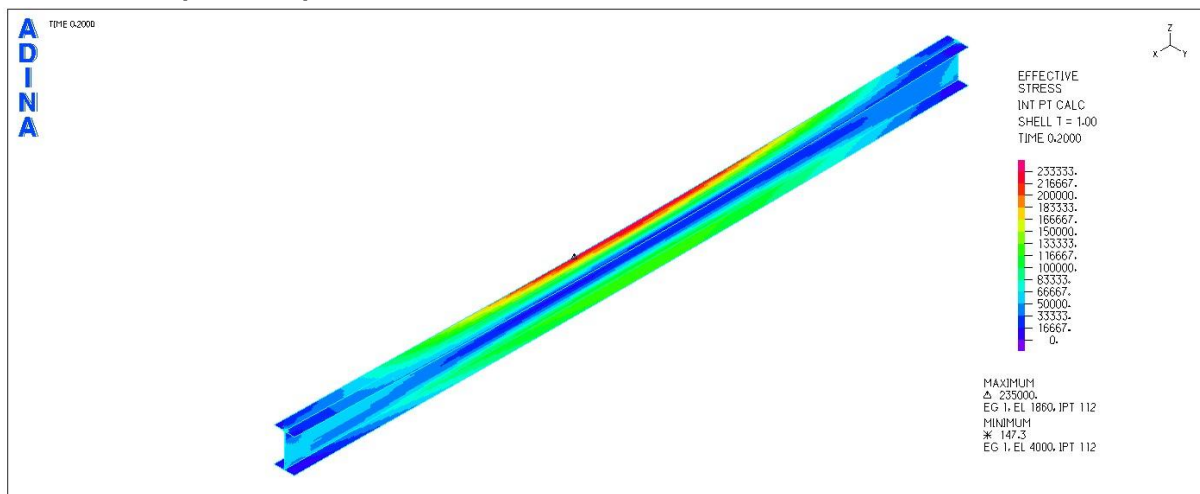
ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,175)



Σχήμα 7.6

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο A

ΣΗΜΕΙΟ B (t=0,20)

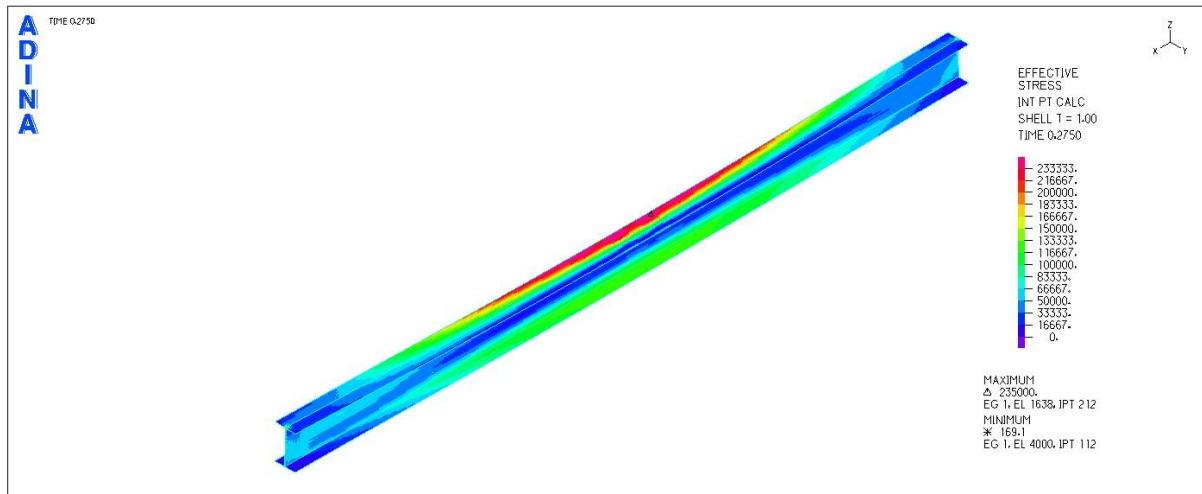


Σχήμα 7.7

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο B

Μόλις αποκτήσουν κάποια σημεία του άνω πέλματος που παρουσιάζει τη μέγιστη εκτροπή, τάση von Mises ίση με την τάση διαρροής, αρχίζει ο καθοδικός κλάδος του δρόμου ισορροπίας.

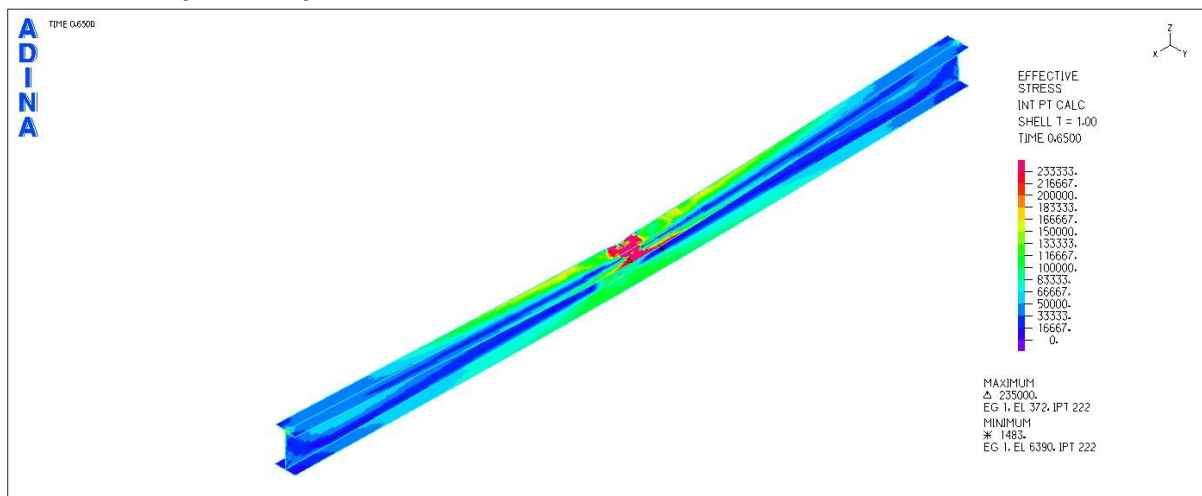
ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,275)



Σχήμα 7.8

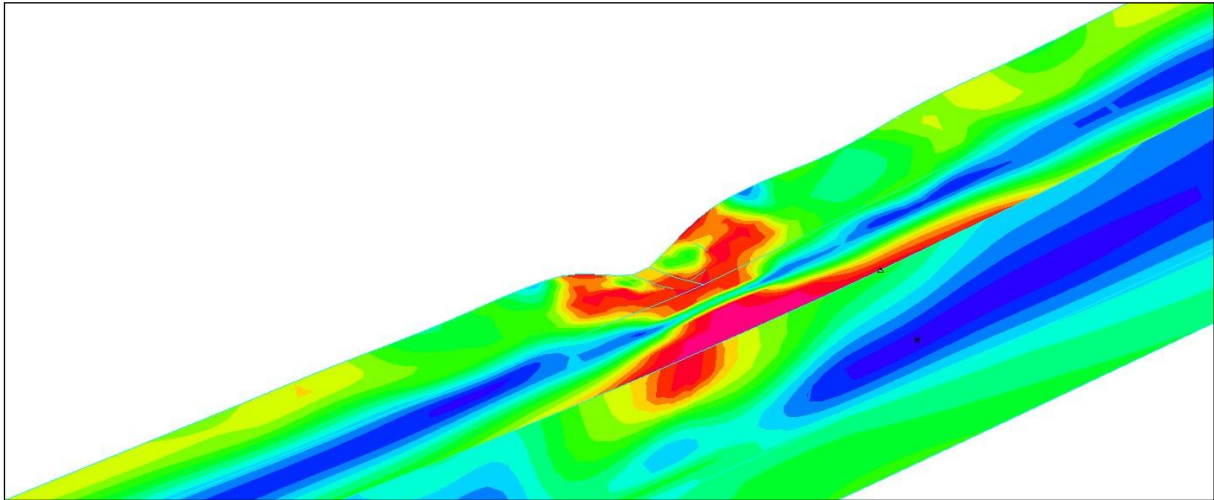
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

ΣΗΜΕΙΟ Δ (t=0,65)



Σχήμα 7.9

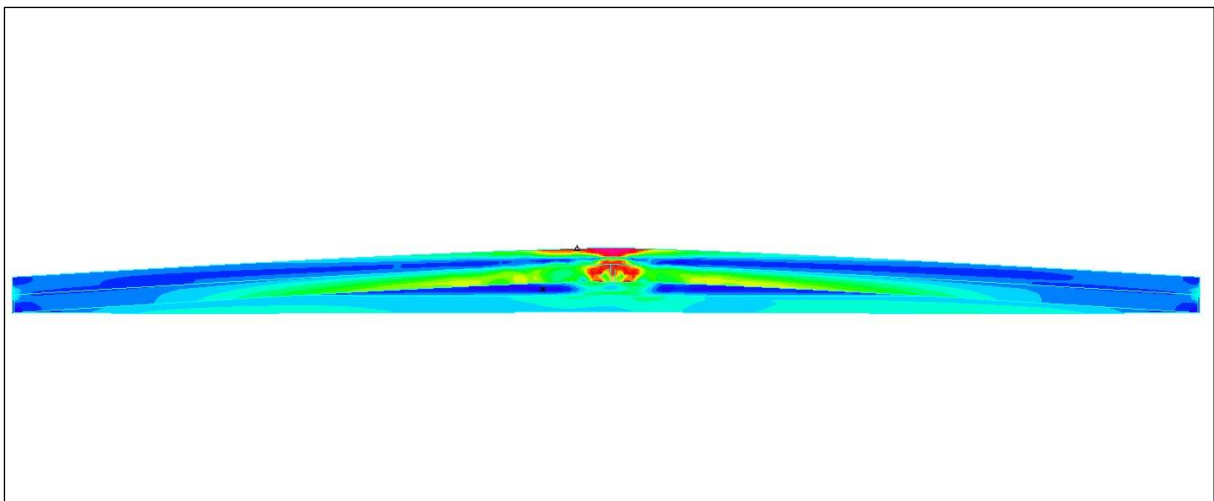
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ



Σχήμα 7.10

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (λεπτομέρεια)

Στο σχήμα 7.10 φαίνονται οι αυξημένες τάσεις von Mises στην περιοχή όπου εκδηλώνεται πλευρικός λυγισμός, αλλά και τοπικός στο θλιβόμενο άνω πέλμα.

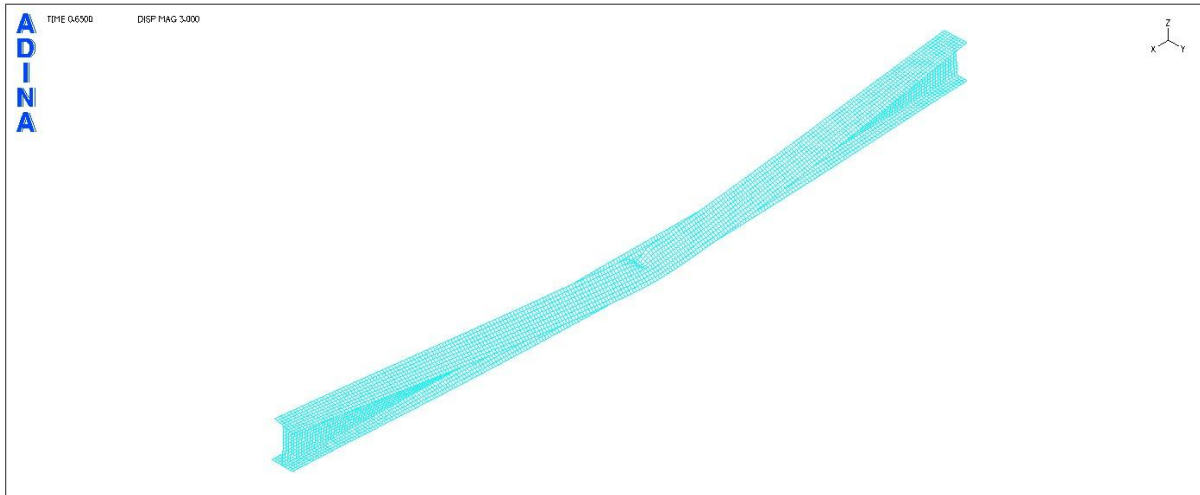


Σχήμα 7.11

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (κάτοψη)

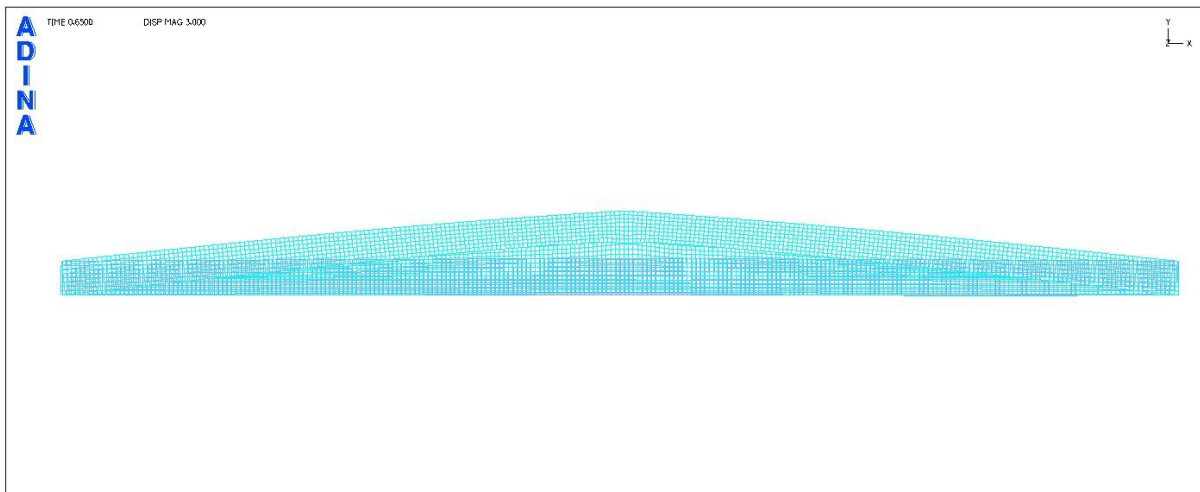
ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

ΣΗΜΕΙΟ Δ



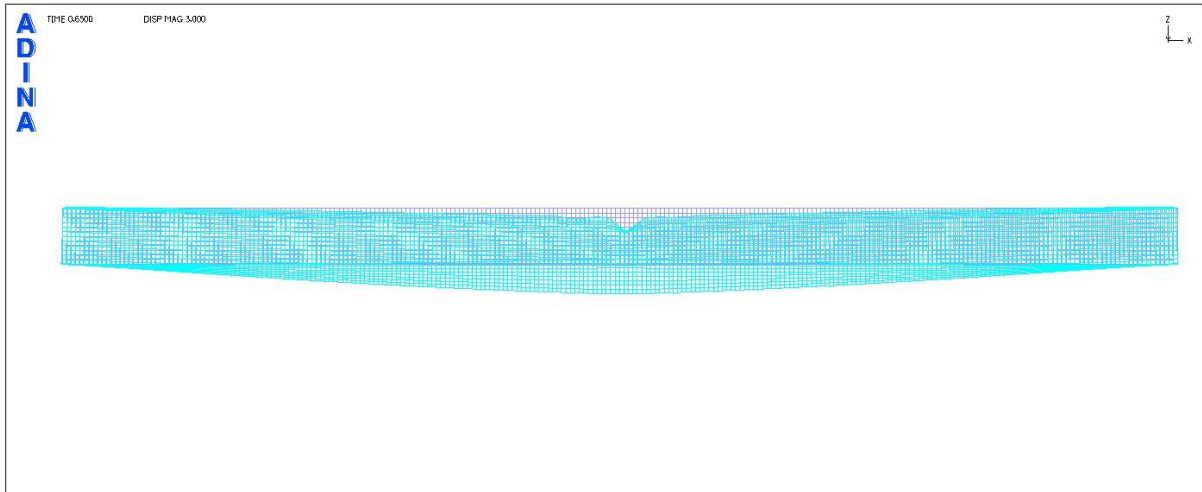
Σχήμα 7.12

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (προοπτικό)



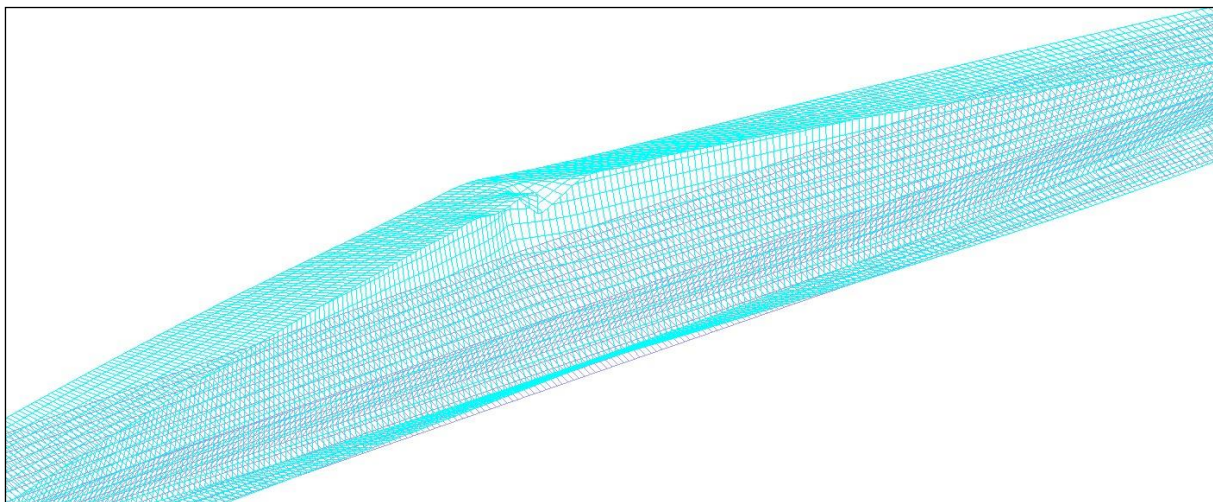
Σχήμα 7.13

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (κάτοψη)



Σχήμα 7.14

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (όψη)



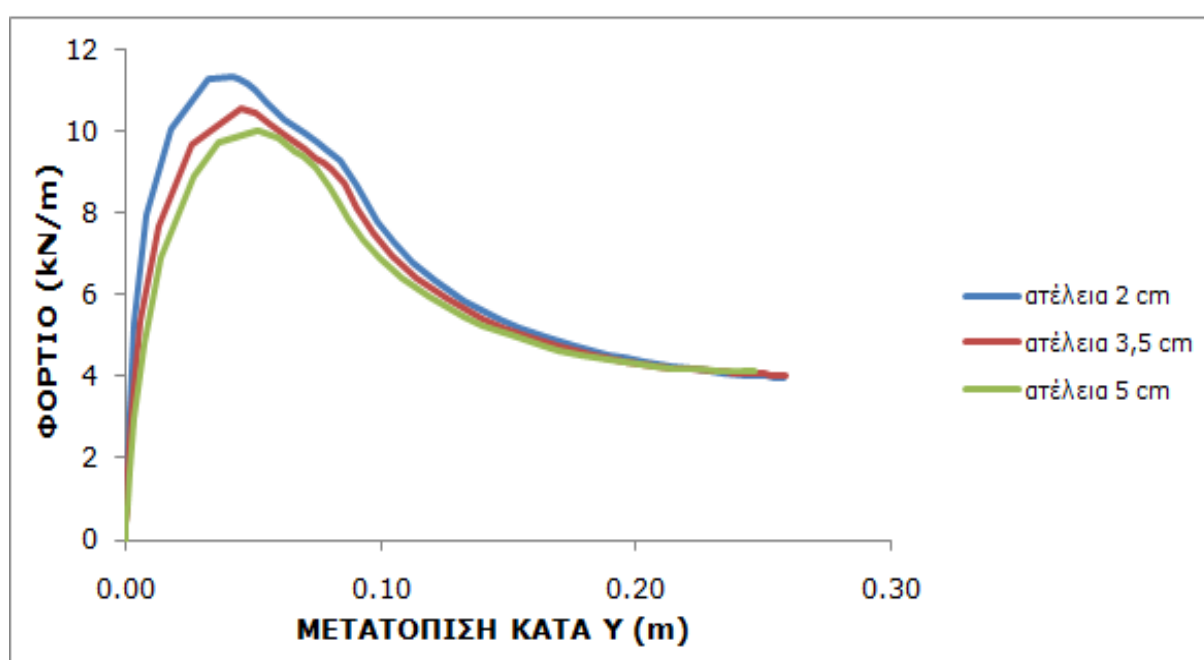
Σχήμα 7.15

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (λεπτομέρεια)

Με βάση τις παραπάνω εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων, συμπεραίνουμε ότι ο φορέας υφίσταται πλευρικό λυγισμό, αλλά ταυτόχρονα το θλιβόμενο άνω πέλαμα στην περιοχή του μέσου λυγίζει τοπικά. Η αστοχία του φορέα επιταχύνεται από την αλληλεπίδραση των δύο φαινομένων.

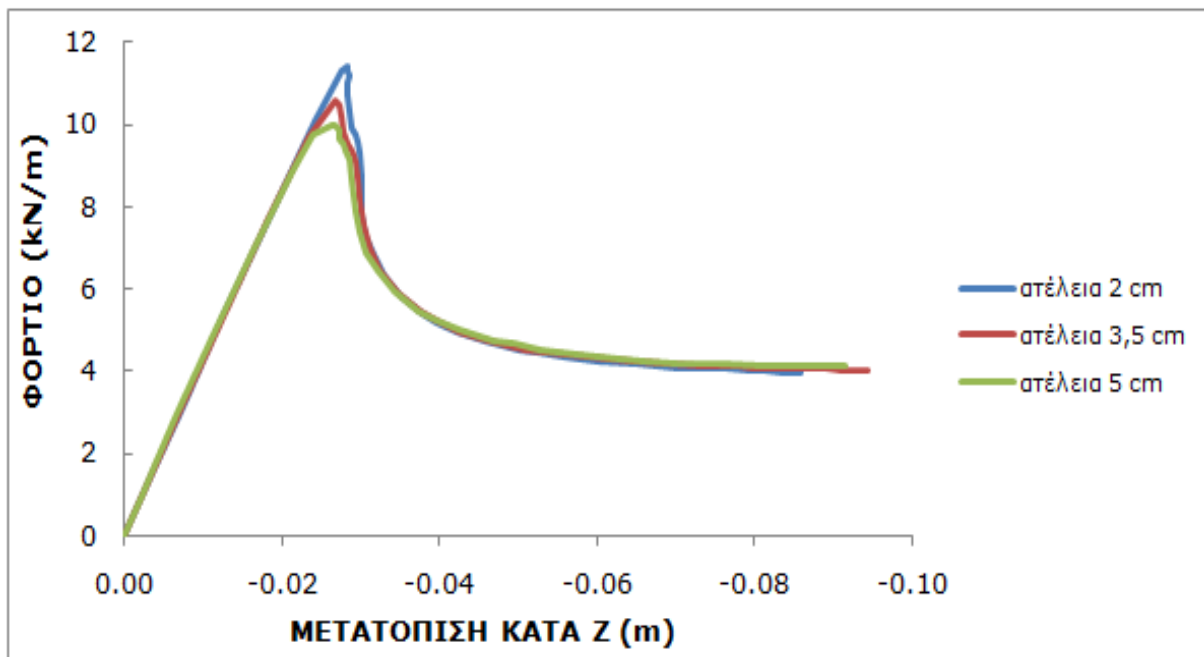
7.1.3 Επιρροή της ατέλειας στη συμπεριφορά του φορέα

Στην παράγραφο αυτή εξετάζονται ακόμα 2 τιμές ατελειών εκτός αυτής που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί ώστε να φανεί η σημασία της ατέλειας στη συμπεριφορά του φορέα. Η προηγούμενη μη γραμμική ανάλυση έχει πραγματοποιηθεί για τιμή ατέλειας ίση με 2cm κατά το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής στο σημείο συνένωσης κορμού και άνω πέλματος. Οι επόμενες αναλύσεις έγιναν για τιμές ατελειών 3,5cm και 5cm. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα και αναφέρονται σε αναλύσεις μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας.



Σχήμα 7.16

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης για διάφορες τιμές ατέλειας



Σχήμα 7.17

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης για διάφορες τιμές ατέλειας

Συμπεραίνουμε ότι το μέγεθος της ατέλειας επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά του φορέα, καθώς η αύξηση της ατέλειας μειώνει το φορτίο αντοχής του φορέα.

7.2 Αλληλεπίδραση πλευρικού λυγισμού και διαρροής

Εξετάζεται η περίπτωση αμφιέρειστης δοκού μήκους $L=10\text{m}$ η οποία φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στον κεντροβαρικό της άξονα και της οποίας η διατομή έχει τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$h=600\text{mm}$$

$$b=300\text{mm}$$

$$t_w=13\text{mm}$$

$$t_f=26\text{mm}$$

Πραγματοποιείται κατάταξη της διατομής με βάση τον Ευρωκώδικα 3:

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = 1 \text{ για χάλυβα S235}$$

Έλεγχος κορμού για καθαρή κάμψη:

$$c/t_w = (600 - 2 \cdot 26) / 13 = 42,15 < 72\varepsilon = 72 \Rightarrow \text{κατηγορία 1}$$

Έλεγχος πέλματος για καθαρή κάμψη:

$$c/t_f = [(300 - 13) / 2] / 26 = 5,52 < 9\varepsilon = 9 \Rightarrow \text{κατηγορία 1}$$

Επομένως η διατομή ανήκει στην κατηγορία 1.

Υπολογίζονται τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της διατομής και παρουσιάζονται οι τιμές τους:

$$I_z = 11710,0\text{cm}^4$$

$$I_y = 146411,6\text{cm}^4$$

$$I_t = 391,65\text{cm}^4$$

$$I_w = 9645437\text{cm}^6$$

$$W_{pl} = 5453,19\text{cm}^3$$

Η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού για κατανεμημένο φορτίο στο κέντρο βάρους της δοκού, προκύπτει ίση με:

$$M_{cr} = 1267,11\text{kNm}$$

Το φορτίο στο οποίο αντιστοιχεί είναι ίσο με $P_{cr} = 8 \cdot M_{cr} / L^2 = 101,37\text{kN/m}$.

Η ροπή πλαστικοποίησης της εξεταζόμενης διατομής για χάλυβα S235 είναι ίση με:

$$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 5453,19\text{cm}^3 \cdot 23,5\text{kN/cm}^2 / 1,00$$

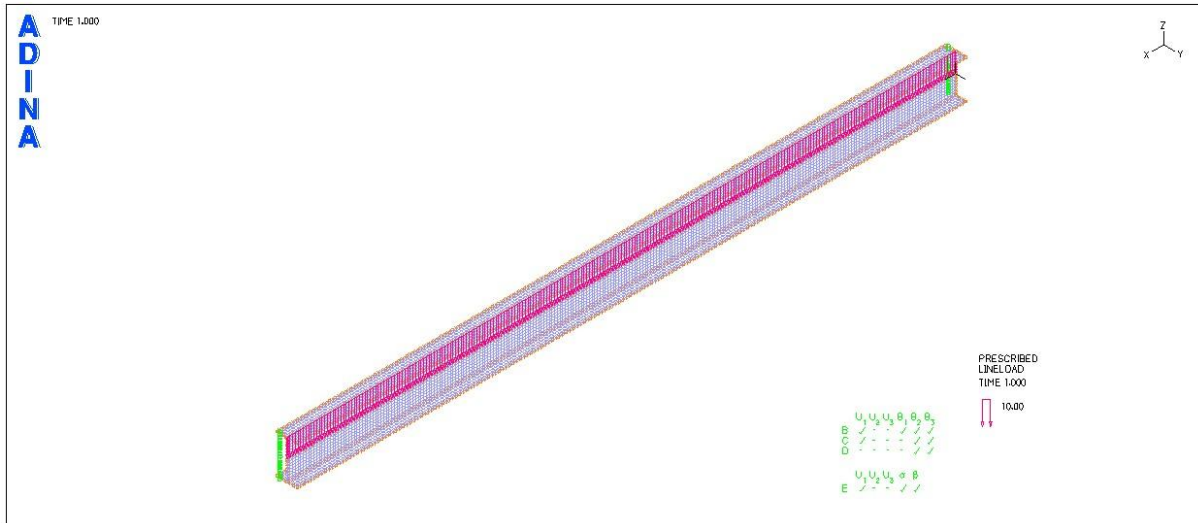
$$M_{pl} = 1281,50\text{kNm}$$

Το αντίστοιχο φορτίο είναι ίσο με $P_{pl} = 8 \cdot M_{pl} / L^2 = 102,52\text{kN/m}$, τιμή σχεδόν ίση με το φορτίο πλευρικού λυγισμού.

Θα πραγματοποιηθούν γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις στο ADINA ώστε να εξετασθεί η συμπεριφορά της δοκού κατά το λυγισμό και μετά από αυτόν.

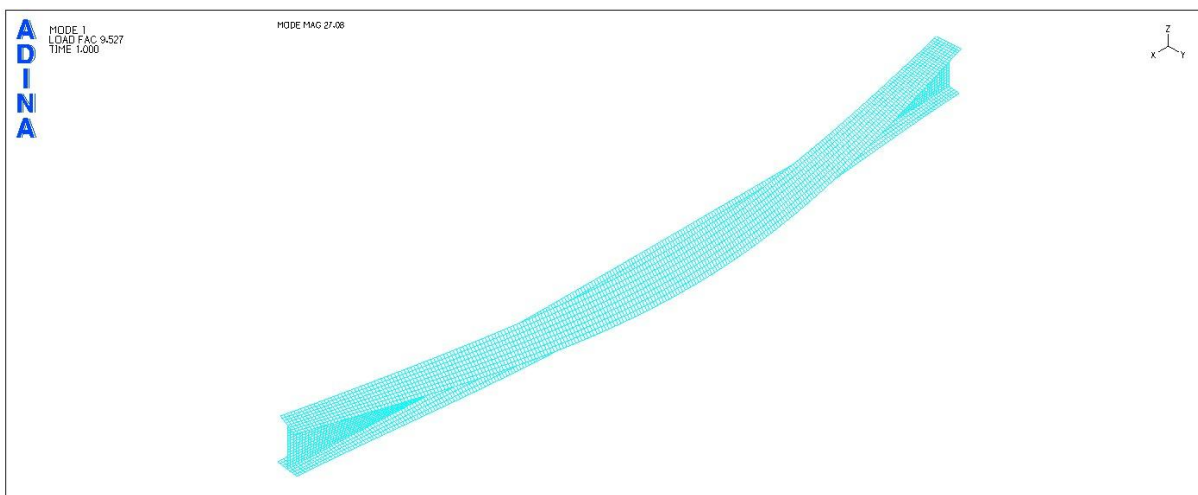
7.2.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Στο φορέα ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 10kN/m στον κεντροβαρικό άξονα της δοκού.



Σχήμα 7.18

Αμφιέρειστος φορέας μήκους 10m με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 10kN/m στον κεντροβαρικό άξονα



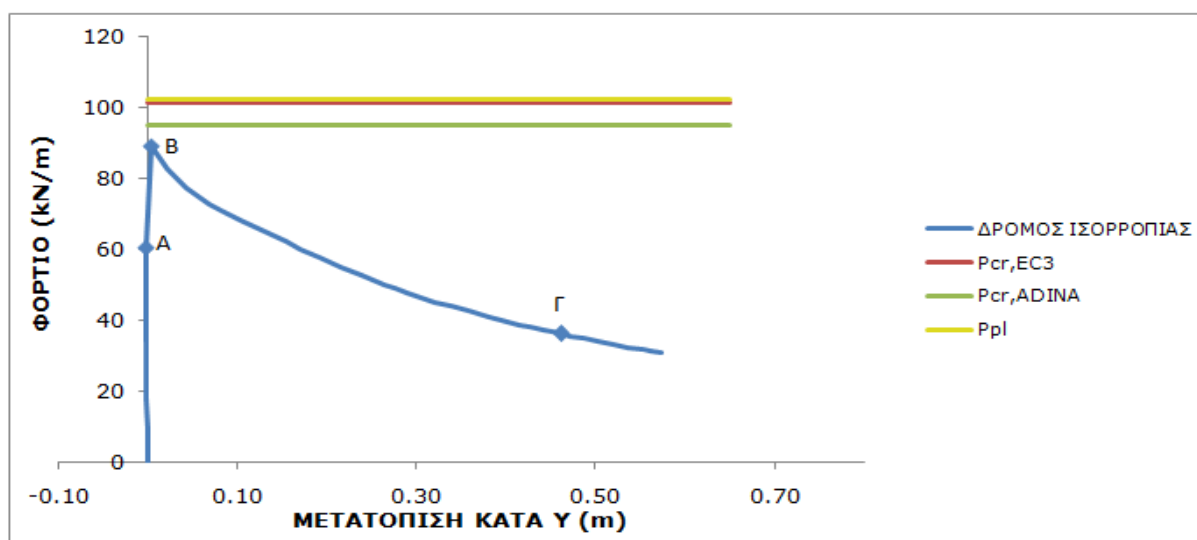
Σχήμα 7.19

1^η ιδιομορφή λυγισμού

Το κρίσιμο φορτίο πλευρικού λυγισμού από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού με το ADINA προέκυψε ίσο με $P_{cr}=95,27\text{kN/m}$.

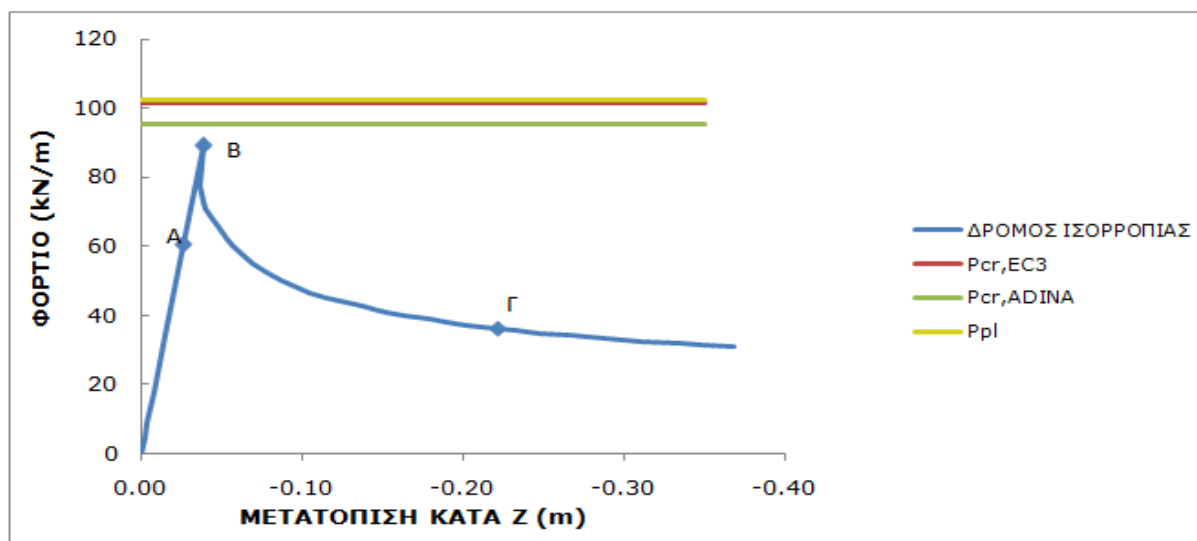
7.2.2 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

Θεωρείται διγραμμικό υλικό S235 χωρίς κράτυνση. Δίνεται στο φορέα αρχική γεωμετρική ατέλεια 2cm κατά τη διεύθυνση y στον κόμβο συνένωσης άνω πέλματος και κορμού στη μεσαία διατομή της δοκού. Η ατέλεια δίνεται με το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής.



Σχήμα 7.20

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- y μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



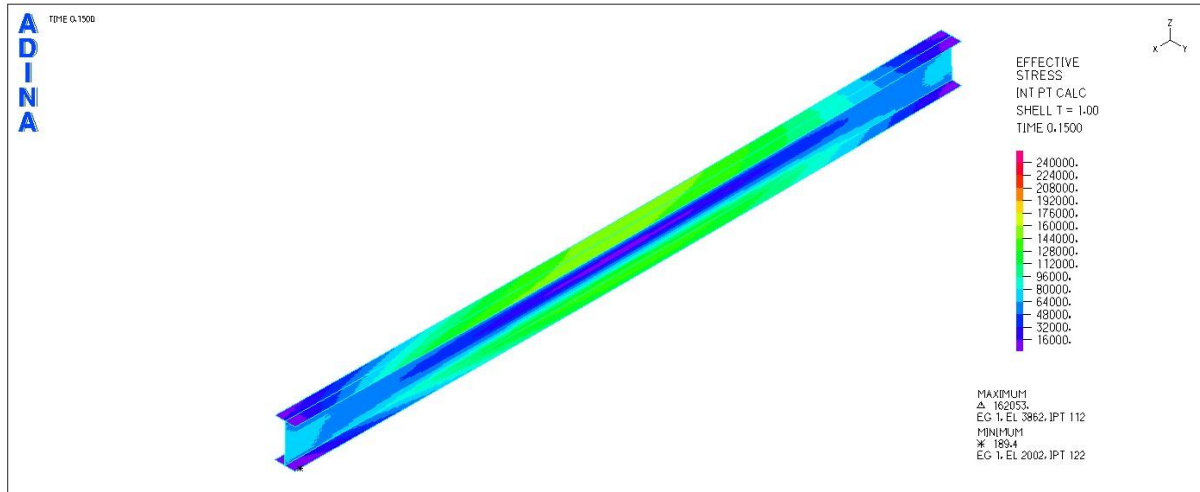
Σχήμα 7.21

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

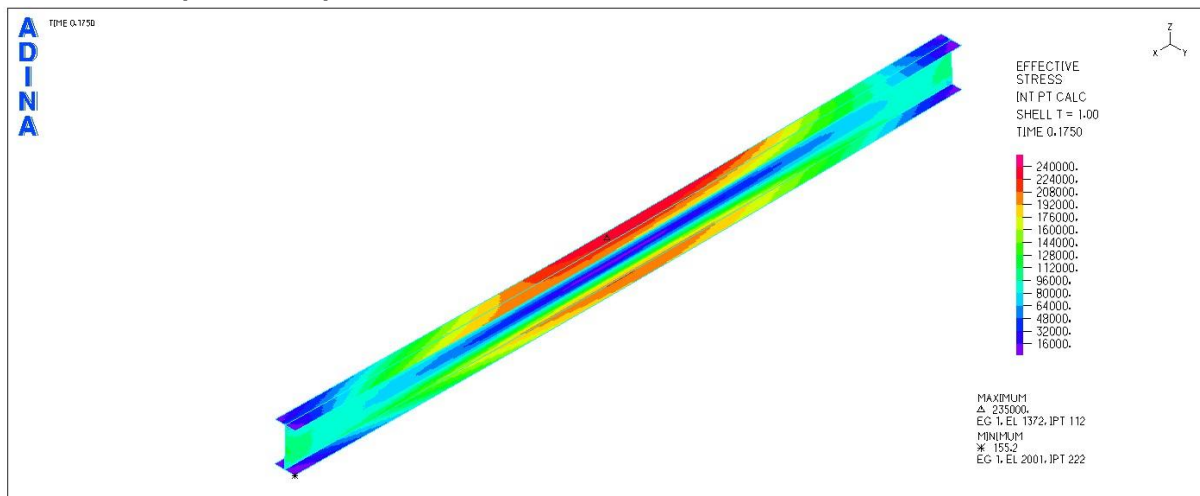
ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ VON MISES

ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,15)



Σχήμα 7.22
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο A

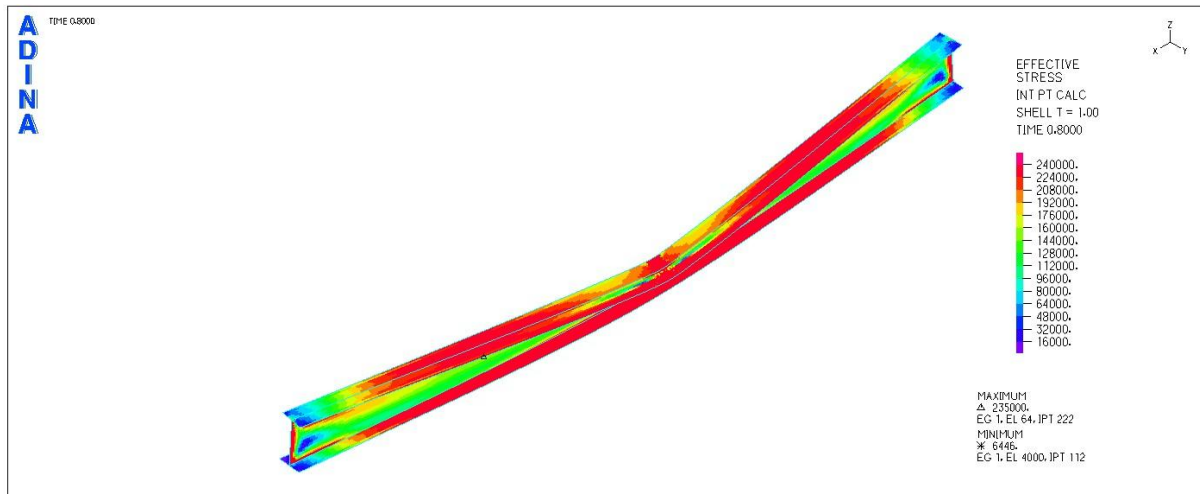
ΣΗΜΕΙΟ B (t=0,175)



Σχήμα 7.23
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο B

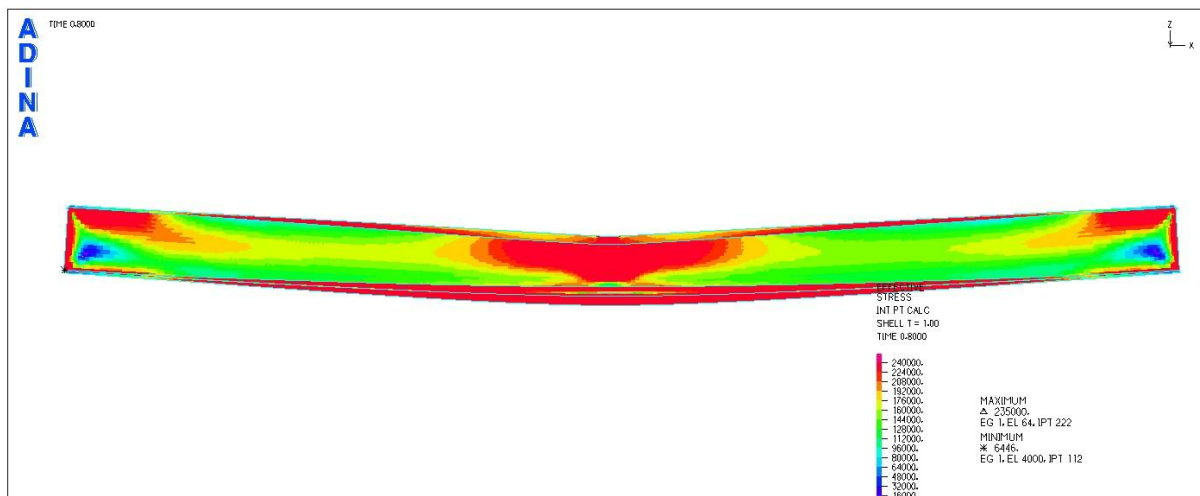
Στο σημείο B τα πρώτα σημεία του άνω πέλματος στο μέσο της δοκού αποκτούν τάση von Mises ίση με 235MPa και από αυτό το σημείο ξεκινάει ο καθοδικός κλάδος του δρόμου ισορροπίας.

ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,80)



Σχήμα 7.24

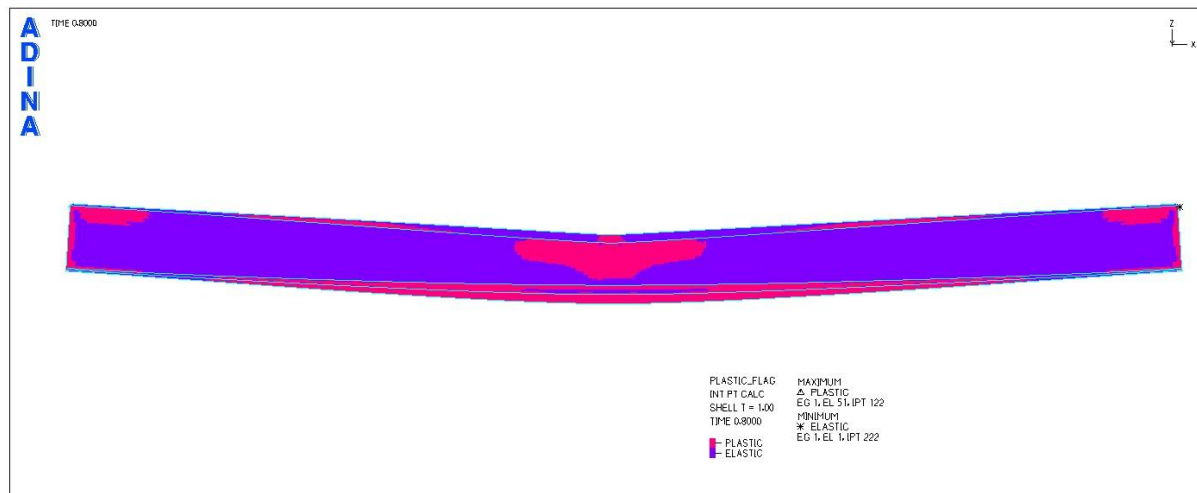
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)



Σχήμα 7.25

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος της μεσαίας διατομής αποτελείται από σημεία που έχουν αποκτήσει τάση von Mises ίση με 235MPa.



Σχήμα 7.26

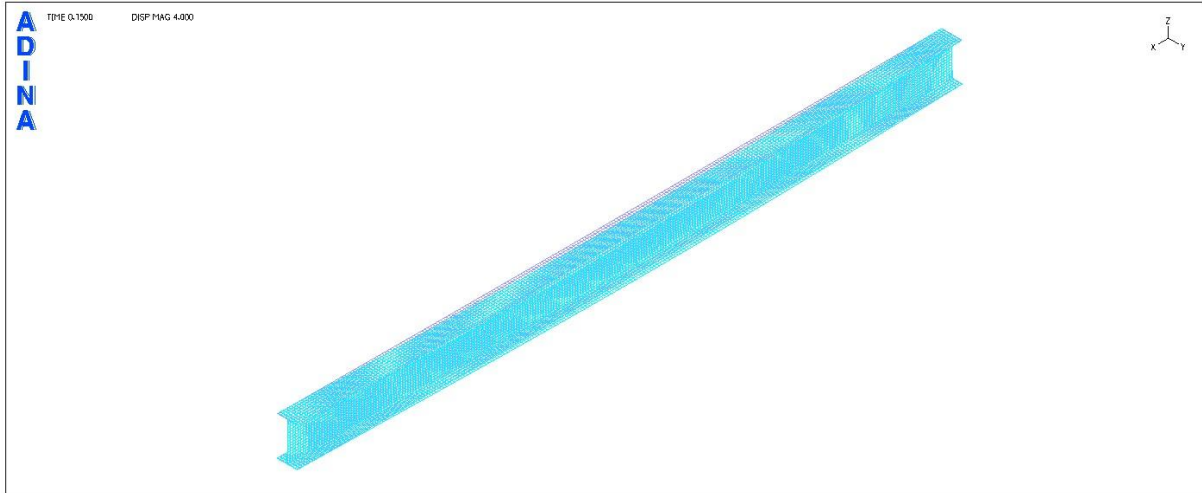
Εικόνα διαρροής αρκετών ινών της μεσαίας διατομής

Παρατηρούμε ότι μεγάλο μέρος της μεσαίας διατομής της δοκού έχει πλαστικοποιηθεί, ενώ παράλληλα η δοκός εκτρέπεται πλευρικά.

Αξίζει να επισημανθεί ότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα όπου έχουμε αλληλεπίδραση πλευρικού λυγισμού και διαρροής, οι δρόμοι ισορροπίας είναι πιο απότομοι σε σύγκριση με τα προηγούμενα παραδείγματα που έχουν εξετασθεί. Μόλις το φορτίο φθάσει στη μέγιστη δυνατή τιμή του, ο δρόμος ισορροπίας ξεκινάει απότομα τον καθοδικό κλάδο του, που δηλώνει την απουσία μεταλυγισμικής αντοχής του φορέα. Αυτό έρχεται σε άμεση συμφωνία με τον τρόπο κατά τον οποίο το πρόγραμμα ADINA αντιλαμβάνεται την αστοχία σε φορέα με ελαστοπλαστικό υλικό: όταν αποκτήσουν τα πρώτα σημεία τάση von Mises ίση με το όριο διαρροής και η δοκός υφίσταται κάποια μορφή λυγισμού, θεωρείται ότι ο αμφιέριστος φορέας εισέρχεται στη φάση αστοχίας του, γεγονός το οποίο εκδηλώνεται με την εμφάνιση καθοδικού κλάδου στο δρόμο ισορροπίας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα όπου οι τιμές του φορτίου πλευρικού λυγισμού και φορτίου πλαστικοποίησης είναι πολύ κοντινές, μόλις τα σημεία του άνω πέλματος της μεσαίας διατομής, που υφίστανται και τη μέγιστη πλευρική εκτροπή, αποκτήσουν τάση von Mises ίση με το όριο διαρροής, αυτόματα ο φορέας χάνει τη μεταλυγισμική του αντοχή και ξεκινάει ο καθοδικός κλάδος του δρόμου ισορροπίας.

ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

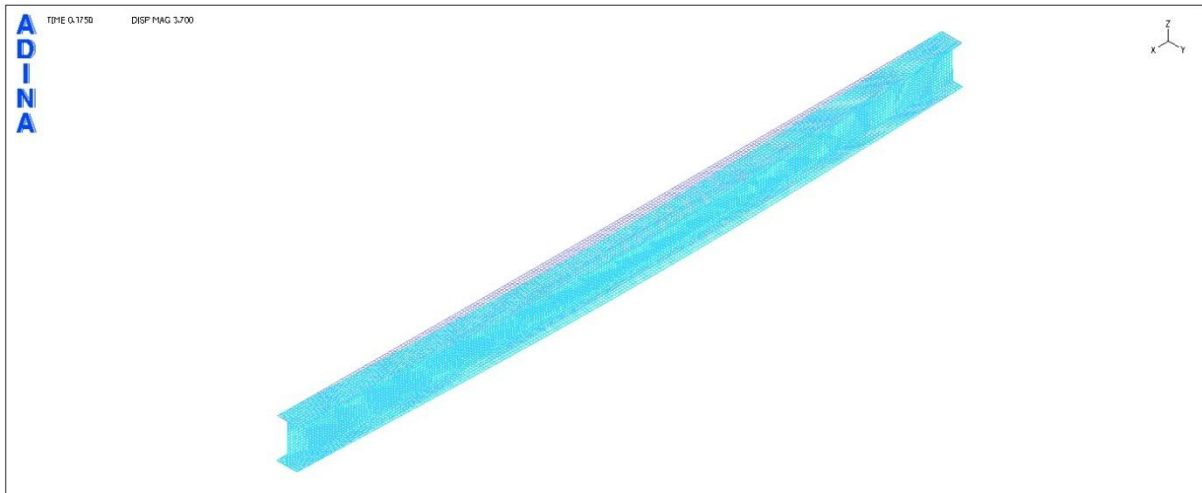
ΣΗΜΕΙΟ Α



Σχήμα 7.27

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Α

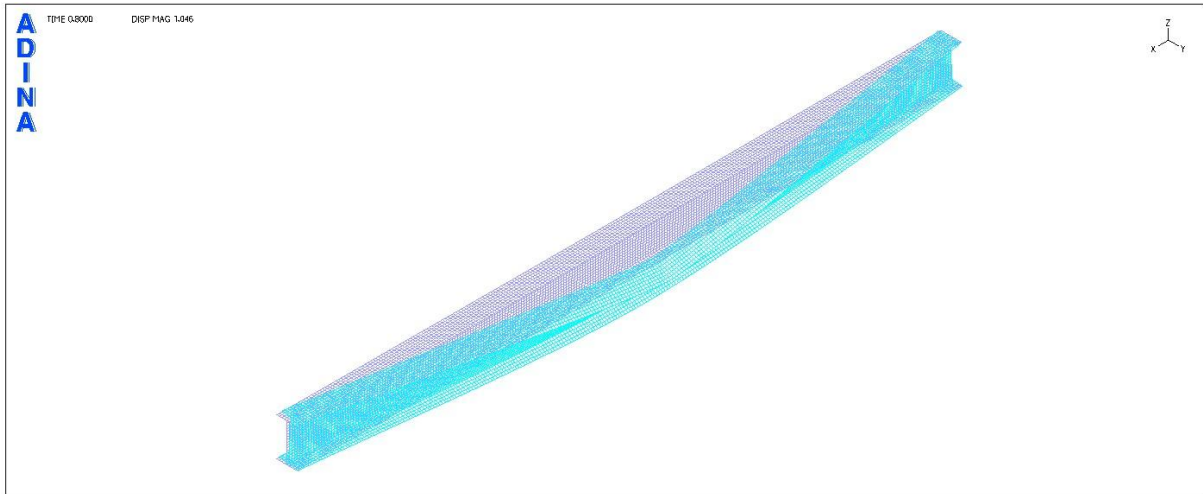
ΣΗΜΕΙΟ Β



Σχήμα 7.28

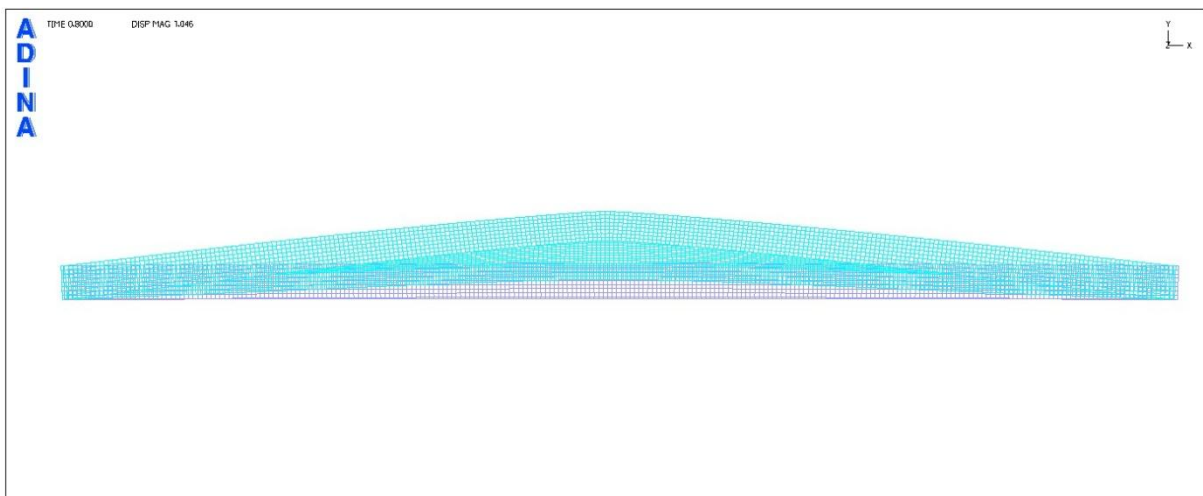
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β

ΣΗΜΕΙΟ Γ



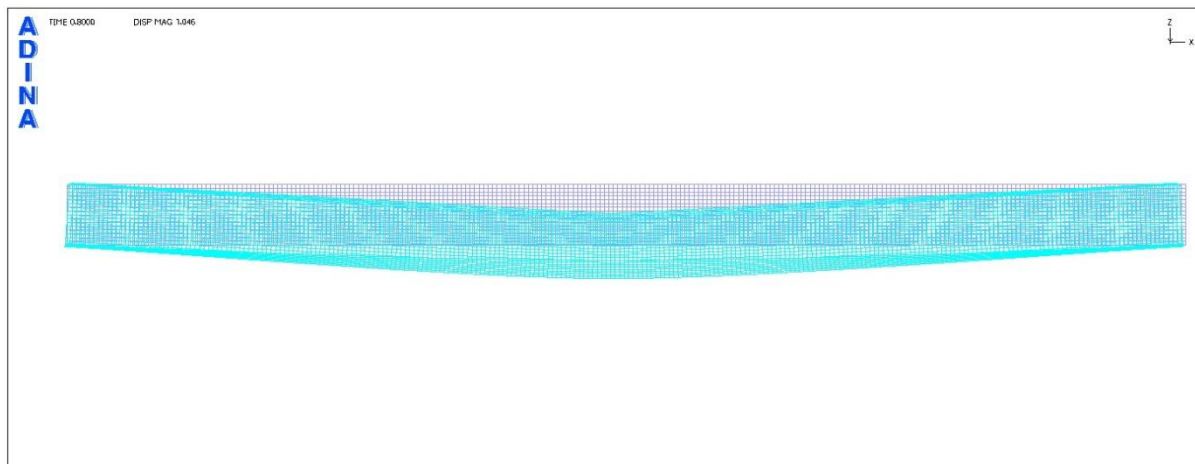
Σχήμα 7.29

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)



Σχήμα 7.30

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (κάτοψη)

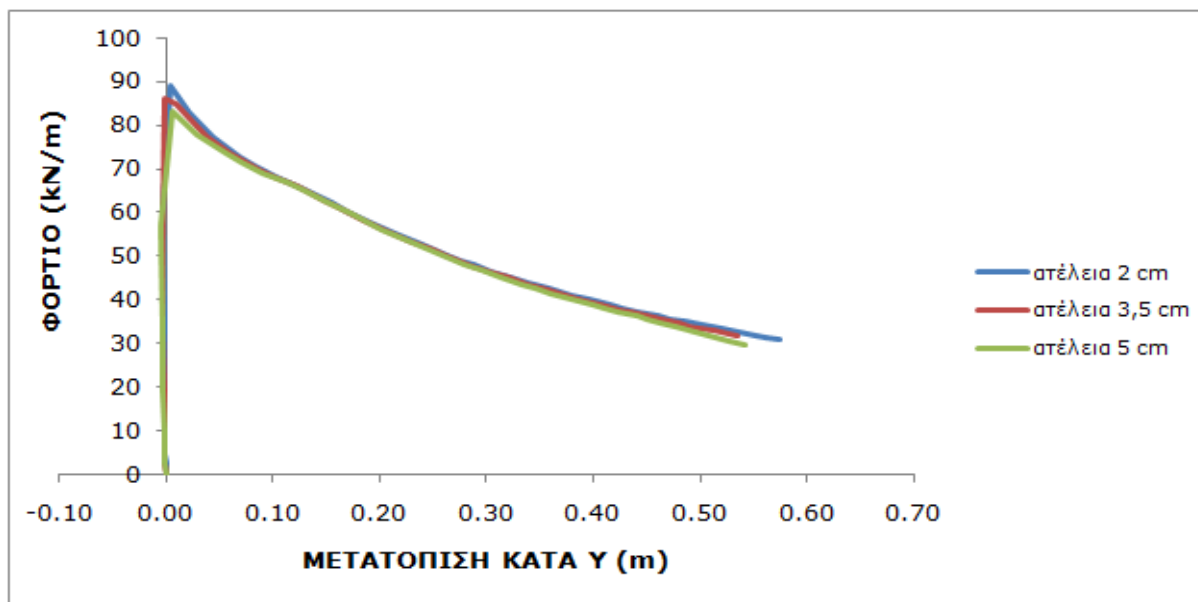


Σχήμα 7.31

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

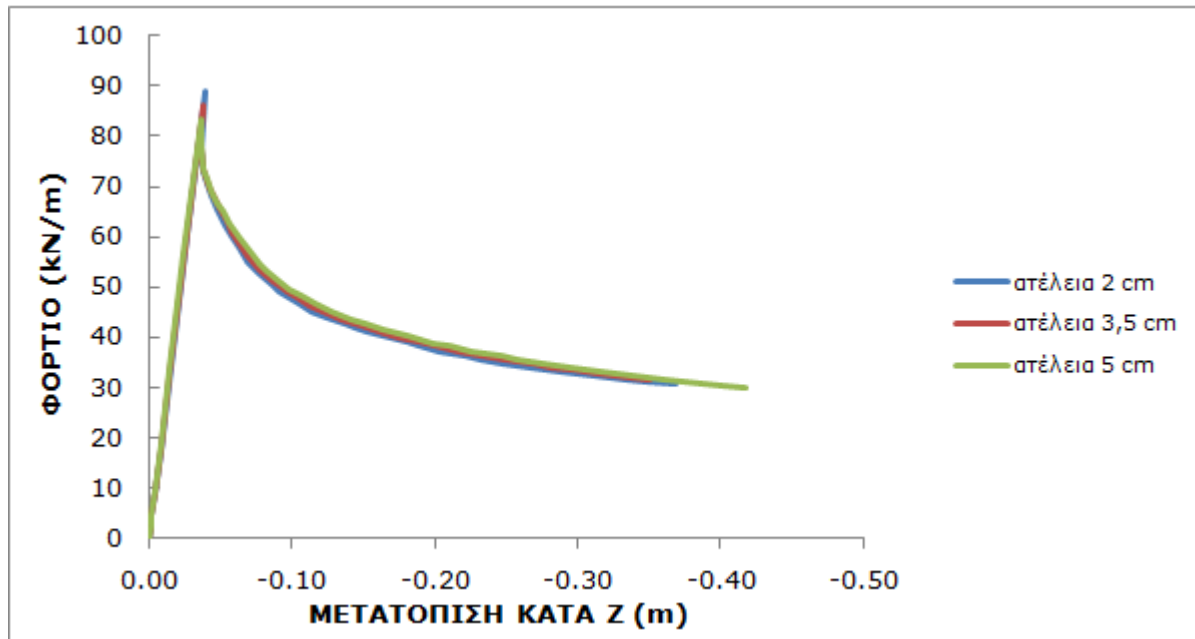
Από τις παραπάνω εικόνες παραμορφώσεων, γίνεται φανερό ότι ο φορέας εκτρέπεται πλευρικά, αλλά συγχρόνως το μέσο του ανοίγματος υφίσταται σημαντική κατακόρυφη μετατόπιση. Είναι σημαντική, λοιπόν, η αλληλεπίδραση πλευρικού λυγισμού και διαρροής.

7.2.3 Επιρροή της ατέλειας στη συμπεριφορά του φορέα



Σχήμα 7.32

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης για διάφορες τιμές ατέλειας



Σχήμα 7.33

Δρόμοι ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης για διάφορες τιμές ατέλειας

Παρατηρούμε ότι η επιρροή της ατέλειας δεν είναι σημαντική στην περίπτωση αυτή, καθώς δε μεταβάλλεται σε αξιόλογο βαθμό η συμπεριφορά του φορέα, σε αντίθεση με το προηγούμενο παράδειγμα, όπου η επιρροή της ατέλειας ήταν σαφώς μεγαλύτερη.

Κεφάλαιο 8

Ανάλυση των κυψελωτών δοκών με βάση τον Ευρωκώδικα 3

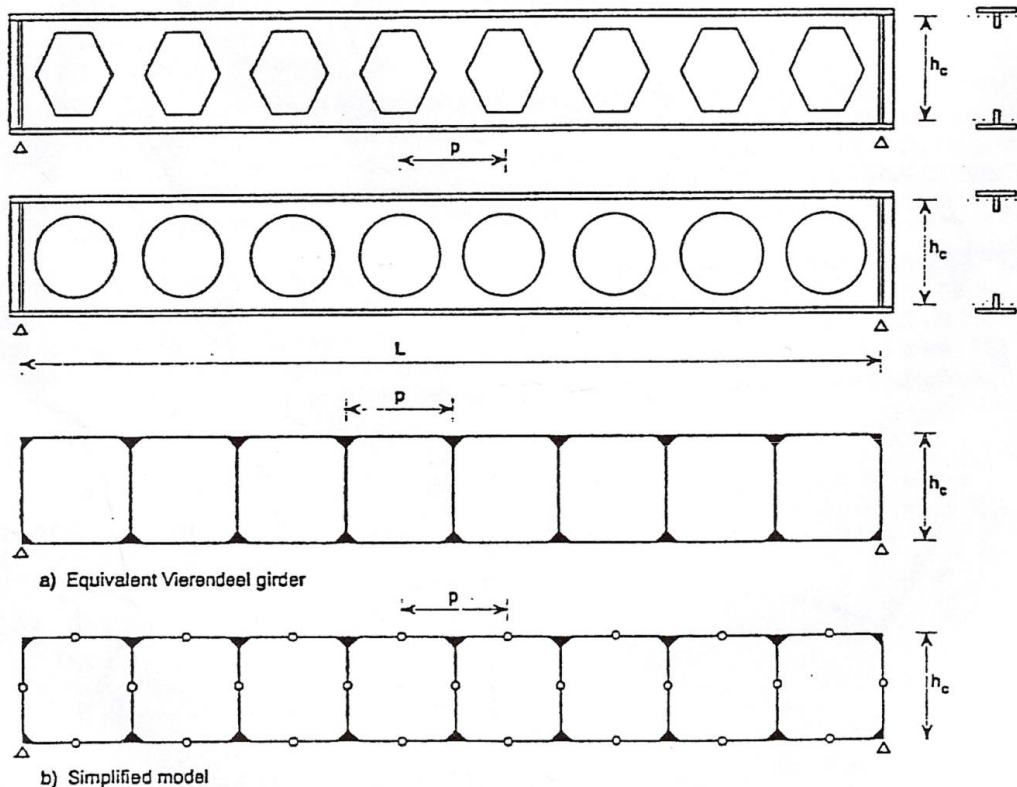
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση που χρησιμοποιείται για τις κυψελωτές δοκούς με βάση το παράρτημα N του Ευρωκώδικα 3 (ENV 1993-1-1:1992/A2:1998). Σε αυτό γίνεται αναλυτική αναφορά σε δοκούς με πολλαπλά ανοίγματα στον κορμό τους πολυγωνικής ή κυκλικής μορφής, καθώς και σε δοκούς με μεμονωμένα ανοίγματα στον κορμό τους. Η παρούσα εργασία ασχολείται με δοκούς με πολλαπλές κυκλικές οπές κατά μήκος τους. Για το λόγο αυτό θα γίνει παρουσίαση του τρόπου με τον οποίο ο Ευρωκώδικας 3 προσομοιώνει και αντιμετωπίζει δοκούς με πολλαπλά ανοίγματα σε όλο το μήκος τους.

8.1 Μέθοδος ανάλυσης

Μία δοκός με πολλαπλά ανοίγματα στον κορμό της αναλύεται ως μία ισοδύναμη δοκός Vierendeel, όπως φαίνεται στο σχήμα 8.1. Η δοκός Vierendeel είναι ένας φορέας που, ανεξάρτητα από τον τρόπο στηρίξεώς του, συντίθεται από μια σειρά ορθογωνικών πλαισίων. Τα πλαίσια αυτά αποτελούνται από ευθύγραμμες ράβδους και παράλληλους μεταξύ τους ορθοστάτες. Γίνεται η υπόθεση ότι τα φορτία δρουν κατά μήκος των γραμμών δράσης των ορθοστατών. Το μοντέλο μπορεί να απλοποιηθεί εάν υποθέσουμε σημεία μηδενικής ροπής (αρθρώσεις) στο μέσο κάθε ανοίγματος και στο μέσο του ύψους κάθε ορθοστάτη (δηλαδή συμπαγούς τμήματος του κορμού).

Η καμπτική ροπή που αναπτύσσεται από τα εξωτερικά φορτία, αναλαμβάνεται από ένα ζεύγος αξονικών δυνάμεων των πελμάτων. Η κατακόρυφη τέμνουσα δύναμη μοιράζεται ομοιόμορφα και στα δύο απλά ταυ στις θέσεις μηδενικής ροπής. Η δύναμη αυτή προκαλεί μία επιπρόσθετη καμπτική ροπή, η οποία αντιστοιχεί στο μέρος της συνολικής κάμψης που δεν αναλαμβάνεται από το ζεύγος δυνάμεων. Η οριζόντια εγκάρσια δύναμη που εμφανίζεται στους ορθοστάτες αντιστοιχεί στη διαφορά των αξονικών δυνάμεων των διατομών σε κάθε άνοιγμα. Επομένως και οι ορθοστάτες

καταπονούνται από μία καμπτική ροπή που προέρχεται από την οριζόντια εγκάρσια δύναμη.



Σχήμα 8.1.a
Μοντέλο ανάλυσης δοκού Vierendeel

8.2 Μορφές αστοχίας κυψελωτών δοκών

Σύμφωνα με το παράρτημα N του Ευρωκώδικα 3, μία κυψελωτή δοκός θα πρέπει να ελεγχθεί ως προς την αστοχία ως εξής:

1) Αστοχία των άνω και κάτω απλών ταυ στη θέση των οπών εξαιτίας συνδυασμού:

- Της διατμητικής δύναμης V_{Sd}
- Των ροπών Vierendeel $M_{V,Sd}$ λόγω της δύναμης διάτμησης V_{Sd}
- Των αξονικών δυνάμεων $N_{M,Sd}$ λόγω της καμπτικής ροπής M_{Sd}

2) Αστοχία των ορθοστατών εξαιτίας συνδυασμού:

- Των ροπών Vierendeel $M_{V,Sd}$ λόγω της δύναμης διάτμησης V_{Sd}
- Της διάτμησης Vierendeel $V_{V,Sd}$ λόγω της δύναμης διάτμησης V_{Sd}
- Των αξονικών δυνάμεων $N_{F,Sd}$ λόγω εξωτερικών δυνάμεων F_{Sd}

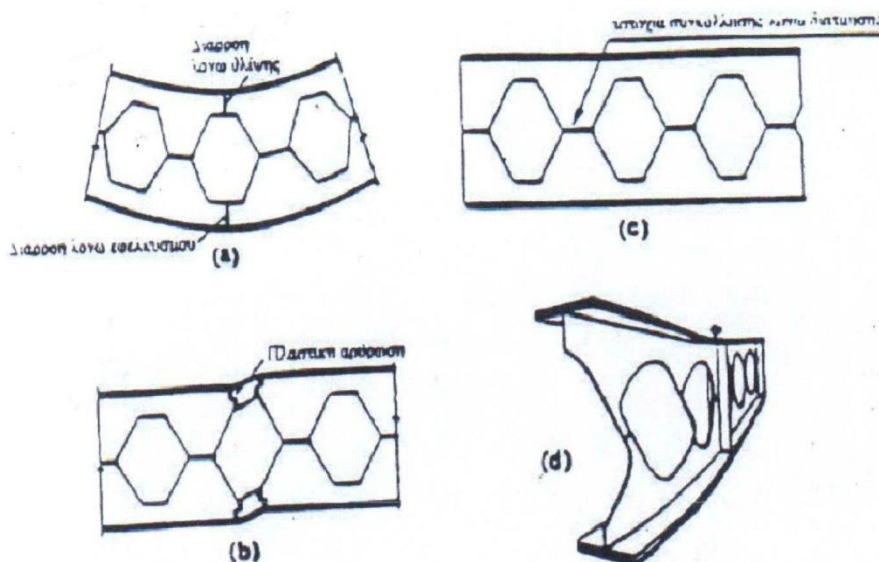
3) Αστοχία της δοκού εξαιτίας στρεπτοκαμπτικού λυγισμού

4) Τοπική αστοχία λόγω εγκάρσιων φορτίων

Ορισμένες μορφές αστοχίας δε συμβαίνουν στις συμπαγείς δοκούς, καθώς συνιστούν το αποτέλεσμα του διαφορετικού τρόπου με τον οποίο η διατμητική δύναμη μεταφέρεται διαμέσου του διάτρητου κορμού.

Η παρουσία των ανοιγμάτων εισάγει μία νέα μορφή αστοχίας για τις διάτρητες διατομές: το μηχανισμό **Vierendeel**, εξαιτίας του σχηματισμού τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων στα απλά ταυ πάνω και κάτω από τα ανοίγματα, υπό τη δράση Vierendeel. Στα σημεία αυτά οι ροπές Vierendeel εξαιτίας των δυνάμεων διάτμησης που ενεργούν στα μέσα των ανοιγμάτων, εμφανίζουν τη μέγιστη τιμή τους.

Δημιουργούνται πλαστικές αρθρώσεις στα άκρα των οπών, με αποτέλεσμα τα αντίστοιχα ανοίγματα του προσομοιώματος Vierendeel να παραμορφώνονται με τη μορφή παραλληλογράμμου και να αστοχούν.



- a: Πλαστικοποίηση στο μέσο της δοκού
- b: Αστοχία λόγω σχηματισμού μηχανισμού Vierendeel γύρω από τις οπές
- c: Αστοχία συγκόλλησης λόγω διάτμησης
- d: Λυγισμός του κορμού

Σχήμα 8.1.β

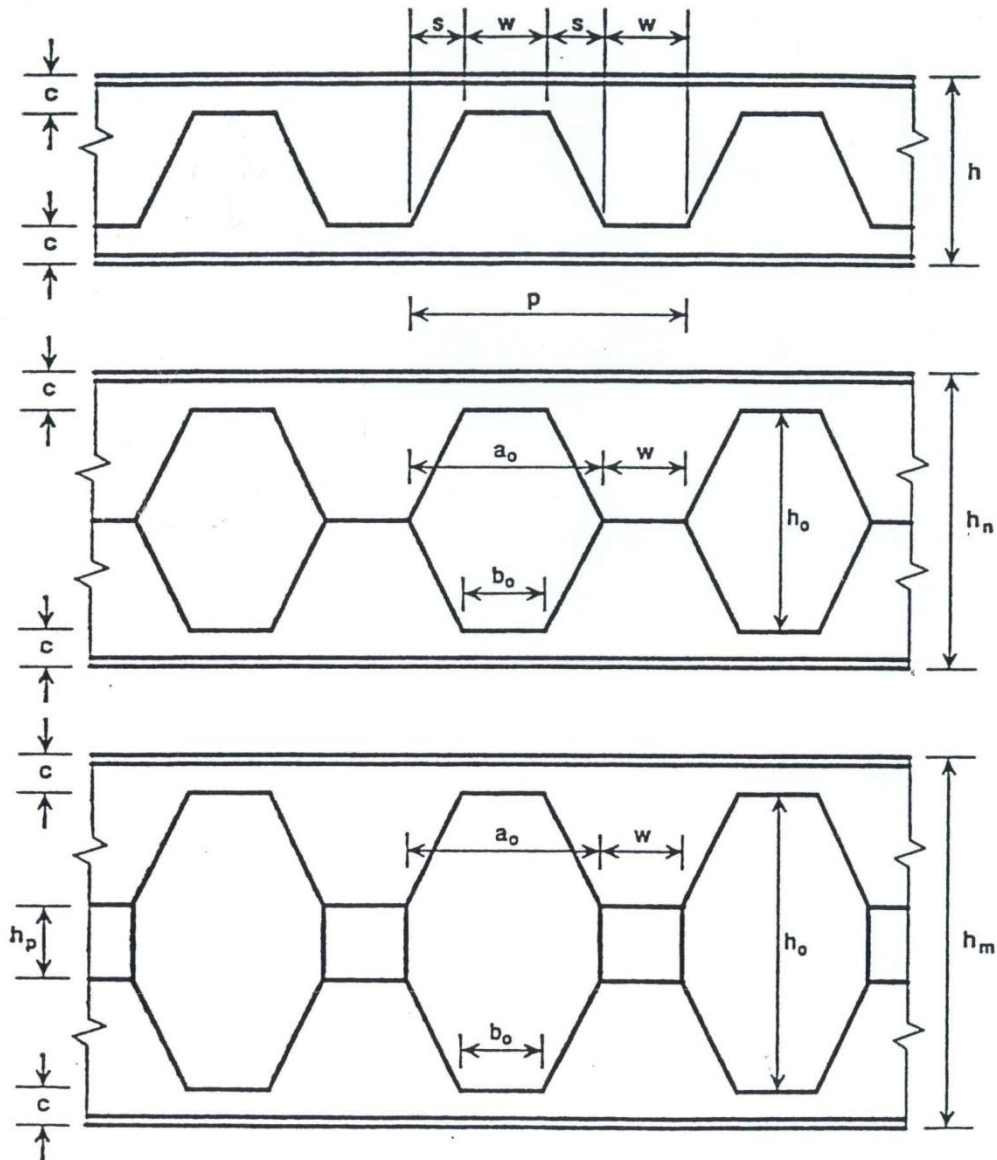
Μορφές αστοχίας κυφελωτών δοκών

Ο μηχανισμός Vierendeel είναι περισσότερο πιθανό να συμβεί σε περιπτώσεις κυφελωτών δοκών που συνδυάζουν μικρό άνοιγμα και μικρό ύψος διατομής.

Συνεπώς, η παρουσία των οπών εισάγει τους εξής πρόσθετους μηχανισμούς αστοχίας των κυφελωτών δοκών: σχηματισμός μηχανισμού Vierendeel, αστοχία των συμπαγών τμημάτων του κορμού λόγω εγκάρσιας διάτμησης, λυγισμός ή διαρροή των συμπαγών τμημάτων του κορμού.

8.3 Αντοχή δοκών με πολυγωνικά ανοίγματα στον κορμό τους

Γεωμετρικοί περιορισμοί:



Σχήμα 8.2

Δοκός με πολλαπλά πολυγωνικά ανοίγματα στον κορμό της

$$p = 2 \cdot (w + s)$$

$$a_0 = w + 2s$$

$$b_0 = w$$

$$h_n = 2 \cdot (h - c)$$

$$h_m = 2 \cdot (h - c) + h_p$$

Ισχύουν οι ακόλουθοι περιορισμοί:

(8.1)

$$\begin{aligned}
h_0 &\leq 0,75 \cdot d_w \\
d_1 &\geq 0,10 \cdot d_w \\
d_2 &= d_1 \\
a_0 &\leq h_0 \\
b_0 &= w \\
0,25 \cdot a_0 &\leq w \leq 0,50 \cdot a_0
\end{aligned} \tag{8.2}$$

Αντοχή των άνω και κάτω απλών ταυ

Τα εντατικά μεγέθη V_{Sd} και M_{Sd} στο μέσο του μήκους του κάθε ανοίγματος στον κορμό προκαλούν την εξής ένταση σε καθεμία από τις άνω και κάτω διατομές μορφής ταυ (απλά ταυ):

- Διατμητική δύναμη ίση με $V_{T,sd} = \frac{V_{Sd}}{2}$
- Αξονική δύναμη λόγω της καμπτικής ροπής M_{Sd} ίση με $N_{M,sd} = \frac{M_{Sd}}{h_c}$
όπου h_c : η απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους των διατομών μορφής ταυ στο μέσο κάθε οπής

Πρέπει να ικανοποιούνται τα κριτήρια:

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

$$N_{M,sd} \leq N_{Rd} = \frac{A_m \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

όπου A_v η επιφάνεια διάτμησης και A_m η επιφάνεια διατομής του απλού ταυ

Όσον αφορά στις ροπές Vierendeel, για τις δοκούς με **πολυγωνικές οπές** ισχύουν τα εξής:

Σε κάθε πολυγωνική οπή, η συνολική ροπή Vierendeel $\Sigma M_{V,sd}$ πρέπει να ικανοποιεί το κριτήριο: $\Sigma M_{V,sd} \leq \Sigma M_{V,Rd}$ όπου:

$\Sigma M_{V,Rd}$ η ολική αντίσταση στις ροπές Vierendeel στο άνοιγμα

Ισχύουν:

$$\Sigma M_{V,sd} = L_T \cdot V_{Sd} \tag{8.3}$$

$$\Sigma M_{V,Rd} = M_{1c,Rd} + M_{1t,Rd} + M_{2c,Rd} + M_{2t,Rd} \tag{8.4}$$

όπου:

$M_{1c,Rd}$ η ροπή αντοχής του άνω απλού ταυ σε θλίψη

$M_{1t,Rd}$ η ροπή αντοχής του άνω απλού ταυ σε εφελκυσμό

$M_{2c,Rd}$ η ροπή αντοχής του κάτω απλού ταυ σε θλίψη

$M_{2t,Rd}$ η ροπή αντοχής του κάτω απλού ταυ σε εφελκυσμό

Όταν υπάρχουν πολυγωνικά ανοίγματα στον κορμό, όπου τα άνω και κάτω απλά ταυ είναι ίσα, ισχύει προφανώς:

$$M_{1c,Rd} = M_{1t,Rd} = M_{2c,Rd} = M_{2t,Rd} = M_{b,Rd}$$

όπου $M_{b,Rd} = W_{T,pl} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$

όπου $W_{T,pl}$: η πλαστική ροπή αντίστασης της διατομής ταυ

Εάν $V_{T,Sd} < 0,5 \cdot V_{T,Rd}$, δεν απαιτείται να γίνει απομείωση της αντοχής σε κάμψη λόγω της παρουσίας της τέμνουσας δύναμης.

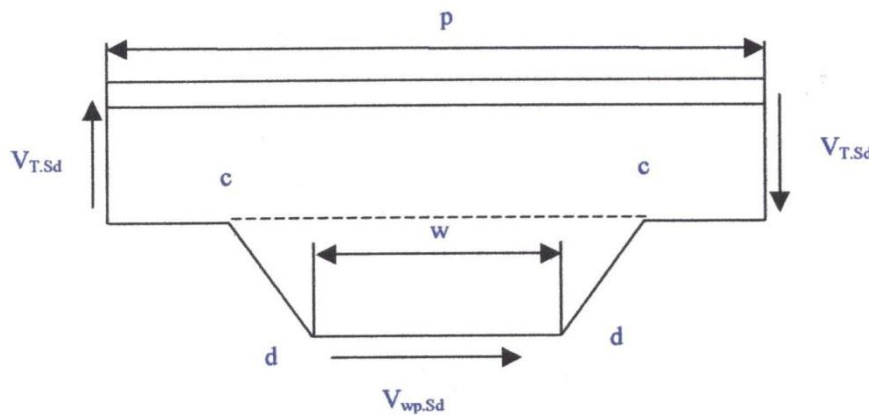
Εάν $V_{T,Sd} \geq 0,5 \cdot V_{T,Rd}$, η ροπή αντοχής για ένα απλό ταυ χωρίς ενίσχυση δίνεται από τη σχέση 8.5 και για ένα απλό ταυ με ενίσχυση δίνεται από τη σχέση 8.6.

$$M_{NV,Rd} = M_{VR,d} \cdot \left[1 - \left(\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \right)^2 \right] \tag{8.5}$$

$$M_{NV,Rd} = M_{V,Rd} \cdot \left[1 - \left(\frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} \right) \right] \tag{8.6}$$

Αντοχή των συμπαγών τμημάτων του κορμού

- Έλεγχος σε διάτμηση



Σχήμα 8.3

Λεπτομέρεια μηχανισμού Vierendeel

Με βάση το προσομοίωμα δοκού Vierendeel, η τέμνουσα $V_{wp,Sd}$ στο μέσο του συμπαγούς τμήματος του κορμού είναι ίση με:

$$V_{wp,Sd} = 2 \cdot V_{T,Sd} \cdot \frac{p}{h_c} \tag{8.7}$$

Η διατμητική αντοχή του κορμού είναι ίση με:

$$V_{wp,Rd} = \frac{w \cdot t_w \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (8.8)$$

Προφανώς πρέπει να ισχύει: $V_{wp,Sd} < V_{wp,Rd}$

- Έλεγχος σε διαρροή ή λυγισμό

Εφόσον ισχύει $h_0 \leq 60 \cdot \varepsilon \cdot t_w$ (όπου $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$), η καμπτική ροπή $M_{wp,Sd}$ στη

δυσμενέστερη θέση (τομή cc του σχήματος) πρέπει να ικανοποιεί το κριτήριο:

$$M_{wp,Sd} \leq (C_1 \cdot a - C_2 \cdot a^2 - C_3) \cdot M_{el,Rd} \quad \text{και} \quad M_{wp,Sd} \leq 0,6 \cdot M_{el,Rd} \quad (8.9)$$

όπου:

$$C_1 = 5,097 + 0,1464\beta - 0,00174\beta^2$$

$$C_2 = 1,441 + 0,0625\beta - 0,000683\beta^2$$

$$C_3 = 3,645 + 0,0853\beta - 0,00108\beta^2$$

$$a = p/h_0$$

$$\beta = h_0/t_w$$

$$\text{Ισχύουν: } M_{wp,Sd} = V_{wp,Sd} \cdot h_0/2$$

$$\text{και } M_{el,Rd} = W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό

Η αντοχή σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της διατομής στο μέσο του πολυγωνικού ανοίγματος.

Αντοχή του κορμού σε εγκάρσιες δυνάμεις

Ένας μη ενισχυμένος κορμός υπό εγκάρσιες δυνάμεις που εφαρμόζονται μέσω του πέλματος, εμφανίζει μία από τις ακόλουθες μορφές αστοχίας:

- Σύνθλιψη του κορμού κοντά στο πέλμα, συνοδευόμενη από πλαστική παραμόρφωση του πέλματος
- Ρυτίδωση του κορμού υπό μορφή περιορισμένου λυγισμού
- Κύρτωση του κορμού στο μεγαλύτερο τμήμα του ύψους του μέλους

Η αντοχή υπολογίζεται με βάση τον Ευρωκώδικα 3, αρκεί να εξασφαλιστεί ότι η δύναμη δεν ασκείται μέσα στο μήκος a_z της ζώνης επιρροής του ανοίγματος στον κορμό.

$$a_z = a_0 + 2a_p$$

-Εάν $d_w/t_w \leq 90\varepsilon$, για ορθογωνικό άνοιγμα: $a_p = h_0$

-Εάν $d_w/t_w > 90\varepsilon$, για ορθογωνικό άνοιγμα: $a_p = \left(\frac{d_w/t_w}{90\varepsilon}\right)h_0$ και $a_p \leq d_w$

α) Έλεγχος έναντι σύνθλιψης του κορμού

$$R_{y,Rd} = (s_s + s_y) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{Y_{M1}} \quad (8.10)$$

Υπολογίζεται το μήκος της άκαμπτης στήριξης:

$$s_s = t_w + 2t_f + 2r(2 - \sqrt{2}) \quad (8.11)$$

όπου r : η ακτίνα συναρμογής κορμού-πέλματος

$$s_y = 2t_f \cdot \sqrt{\frac{b_f}{t_w}} \cdot \sqrt{\frac{f_{yf}}{f_{yw}}} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{f,Ed}}{f_{yf}}\right)^2} \quad (8.12)$$

όπου $\sigma_{f,Ed}$ η διαμήκης τάση στο πέλμα

Όταν βρισκόμαστε σε ακραία στήριξη:

$$R_{y,Rd} = \left(s_s + \frac{1}{2}s_y\right) \cdot t_w \cdot \frac{f_{yw}}{Y_{M1}}$$

Έλεγχος επάρκειας: $V_{Sd} \leq R_{y,Rd}$

β) Έλεγχος έναντι ρυτίδωσης

$$R_{a,Rd} = 0,5 \cdot t_w^2 \cdot \sqrt{E \cdot f_{yw}} \left[\sqrt{\frac{t_f}{t_w}} + 3 \cdot \left(\frac{t_w}{t_f}\right) \cdot \left(\frac{s_s}{d}\right) \right] / Y_{M1} \quad (8.13)$$

όπου d : το ευθύγραμμο μήκος του κορμού της διατομής

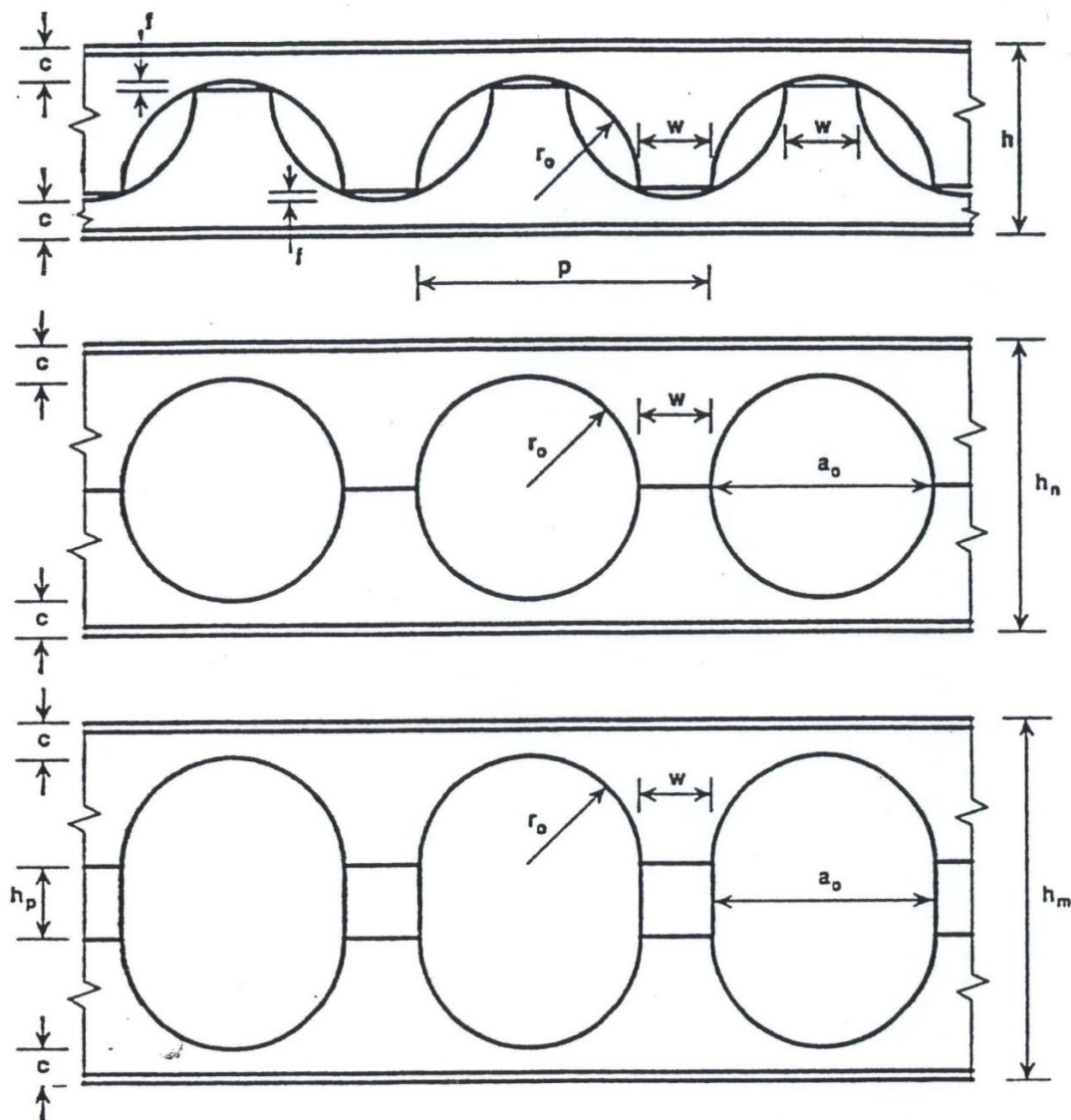
Έλεγχος επάρκειας: $V_{Sd} \leq R_{a,Rd}$

γ) Έλεγχος έναντι κύρτωσης του κορμού

Πραγματοποιείται σύμφωνα με τις αντίστοιχες σχέσεις του Ευρωκώδικα 3.

8.4 Αντοχή δοκών με κυκλικά ανοίγματα στον κορμό τους

Γεωμετρικοί περιορισμοί:



Σχήμα 8.4

Δοκός με πολλαπλά κυκλικά ανοίγματα στον κορμό της

$$p = w + 2 \cdot r_0$$

$$f = r_0 - \sqrt{r_0^2 - (w/2)^2}$$

$$c = (h - r_0 - f) / 2$$

$$h_n = 2 \cdot (r_0 + c)$$

$$h_m = 2 \cdot (r_0 + c) + h_p$$

$$a_0 = 2 \cdot r_0$$

(8.14)

Ισχύουν οι ακόλουθοι περιορισμοί:

$$h_0 \leq 0,80 \cdot d_w$$

$$d_1 \geq 0,10 \cdot d_w$$

$$d_2 = d_1$$

$$a_0 \leq h_0$$

$$0,25 \cdot a_0 \leq w \leq 0,50 \cdot a_0$$

(8.15)

Αντοχή των απλών ταυ στις τομές aa (μέσο ανοιγμάτων)

Τα εντατικά μεγέθη V_{sd} και M_{sd} στο μέσο του μήκους του κάθε ανοίγματος στον κορμό προκαλούν την εξής ένταση σε καθεμία από τις άνω και κάτω διατομές μορφής ταυ:

- Διατμητική δύναμη ίση με $V_{T,sd} = \frac{V_{sd}}{2}$
- Αξονική δύναμη λόγω της καμπτικής ροπής M_{sd} ίση με $N_{M,sd} = \frac{M_{sd}}{h_c}$
όπου h_c : η απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους των διατομών μορφής ταυ στο μέσο κάθε οπής

Πρέπει να ικανοποιούνται τα κριτήρια:

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

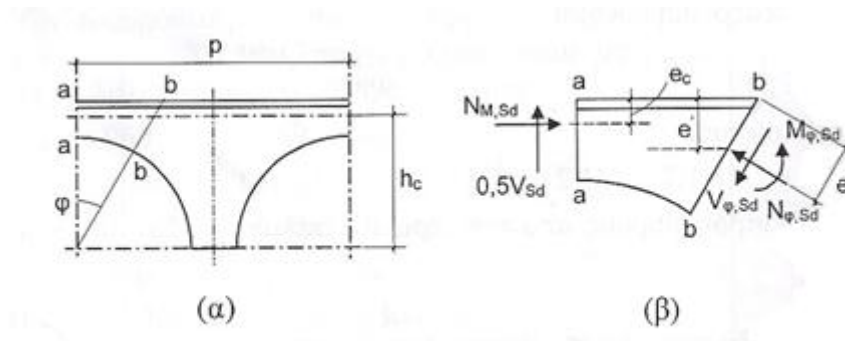
$$N_{M,sd} \leq N_{Rd} = \frac{A_m \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

όπου A_v η επιφάνεια διάτμησης και A_m η επιφάνεια διατομής του απλού ταυ

Αντοχή των απλών ταυ στις τομές bb (υπό γωνία φ)

Επειδή δεν είναι φανερό ποια από τις τομές bb είναι δυσμενέστερη, γίνεται έλεγχος με τη διαδικασία δοκιμών και επαναλήψεων.

Η ανάλυση γίνεται με βάση το προσομοίωμα δοκού Vierendeel, κατά το οποίο στη διατομή aa η ροπή είναι μηδενική.



Σχήμα 8.5
Εσωτερικές δυνάμεις και ροπές στις κρίσιμες διατομές

Ξεκινώντας από μια τιμή γωνίας φ γίνονται οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

Εμβαδόν τομής bb:

$$A_b = \frac{b_f \cdot t_f}{\cos\varphi} + \left(\frac{d_w}{2\cos\varphi} - r_0 \right) \cdot t_w \quad (8.16)$$

Θέση κέντρου βάρους διατομής bb:

$$e' = \frac{b_f \cdot t_f^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot d_w - r_0 \cdot \cos\varphi \right) \left(\frac{1}{2} \cdot d_w - r_0 \cdot \cos\varphi + 2 \cdot t_f \right) \cdot t_w}{2 \cdot b_f \cdot t_f + 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot d_w - r_0 \cdot \cos\varphi \right) \cdot t_w} \quad (8.17)$$

Ροπή αδράνειας διατομής

$$I_b = \frac{1}{12} \cdot b_f \cdot \left(\frac{t_f}{\cos\varphi} \right)^3 + \frac{b_f \cdot t_f}{\cos\varphi} \cdot \left(e - \frac{t_f}{2\cos\varphi} \right)^2 + \frac{1}{12} \cdot t_w \cdot \left(\frac{d_w}{2\cos\varphi} - r_0 \right)^3 + \left(\frac{d_w}{2\cos\varphi} - r_0 \right) \cdot t_w \cdot \left(\frac{d_w}{4\cos\varphi} - \frac{r_0}{2} + \frac{t_f}{\cos\varphi} - e \right)^2 \quad (8.18)$$

Ελαστική ροπή αντιστάσεως

$$W_{b,el} = \frac{I_b}{\frac{d_w}{2\cos\varphi} - r_0 + \frac{t_f}{\cos\varphi} - e} \quad (8.19)$$

Ελαστική αντοχή σχεδιασμού σε κάμψη:

$$M_{b,el,d} = W_{b,el} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (8.20)$$

Επιφάνεια διάτμησης:

$$A_v = \left(\frac{h_n}{2 \cos \varphi} - r_0 \right) \cdot t_w \quad (8.21)$$

Αντοχή σε διάτμηση:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (8.22)$$

Αντοχή σχεδιασμού σε αξονική δύναμη:

$$N_{\varphi,Rd} = \frac{A_b \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (8.23)$$

Τα εντατικά μεγέθη της διατομής bb προσδιορίζονται από την ισορροπία του στοιχείου του σχήματος 8.5.β

$$\begin{aligned} V_{\varphi,Sd} &= 0,5 \cdot V_{Sd} \cdot \cos \varphi + N_{M,Sd} \cdot \sin \varphi \\ N_{\varphi,Sd} &= N_{M,Sd} \cdot \cos \varphi - 0,50 \cdot V_{Sd} \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (8.24)$$

$$M_{\varphi,Sd} = N_{M,Sd} \cdot (e' - e_c) + 0,50 \cdot V_{Sd} \cdot \left(\frac{h_n}{2} - e' \right) \cdot \tan \varphi$$

Εάν $V_{\varphi,Sd} < 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$, δεν απαιτείται να γίνει απομείωση της αντοχής σε κάμψη λόγω της παρουσίας της τέμνουσας δύναμης.

Εάν $V_{T,Sd} \geq 0,5 \cdot V_{pl,Rd}$, εφαρμόζεται η σχέση:

$$M_{\varphi,Rd} = (1 - \rho) \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad (8.25)$$

$$\text{όπου } \rho = \left(\frac{2V_{\varphi,Sd}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$$

Έλεγχος επάρκειας:

$$\frac{N_{\phi,Sd}}{N_{\phi,Rd}} + \frac{M_{\phi,Sd}}{M_{\phi,Rd}} \leq 1 \quad (8.26)$$

Αντοχή των συμπαγών τμημάτων του κορμού

- Έλεγχος σε διάτμηση

$$V_{wp,Sd} = 2 \cdot V_{T,Sd} \cdot \frac{p}{h_c}$$

Η διατμητική αντοχή του κορμού είναι ίση με:

$$V_{wp,Rd} = \frac{w \cdot t_w \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

Πρέπει να ισχύει: $V_{wp,Sd} < V_{wp,Rd}$

- Έλεγχος σε διαρροή ή λυγισμό

Εφόσον ισχύει $h_0 \leq 60 \cdot \varepsilon \cdot t_w$ (όπου $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$), η καμπτική ροπή $M_{wp,Sd}$ στη δυσμενέστερη θέση (τομή cc του σχήματος) πρέπει να ικανοποιεί το κριτήριο:

$$M_{wp,Sd} \leq (C_1 \cdot a - C_2 \cdot a^2 - C_3) \cdot M_{el,Rd} \quad \text{και} \quad M_{wp,Sd} \leq 0,6 \cdot M_{el,Rd}$$

όπου:

$$C_1 = 5,097 + 0,1464\beta - 0,00174\beta^2$$

$$C_2 = 1,441 + 0,0625\beta - 0,000683\beta^2$$

$$C_3 = 3,645 + 0,0853\beta - 0,00108\beta^2$$

$$a = p/h_0$$

$$\beta = h_0/t_w$$

$$\text{Ισχύουν: } M_{wp,Sd} = V_{wp,Sd} \cdot (0,90r_0) \quad (8.27)$$

$$\text{και } M_{el,Rd} = W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M0}$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό

Η αντοχή σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της διατομής στο μέσο του κυκλικού ανοίγματος.

Αντοχή του κορμού σε εγκάρσιες δυνάμεις

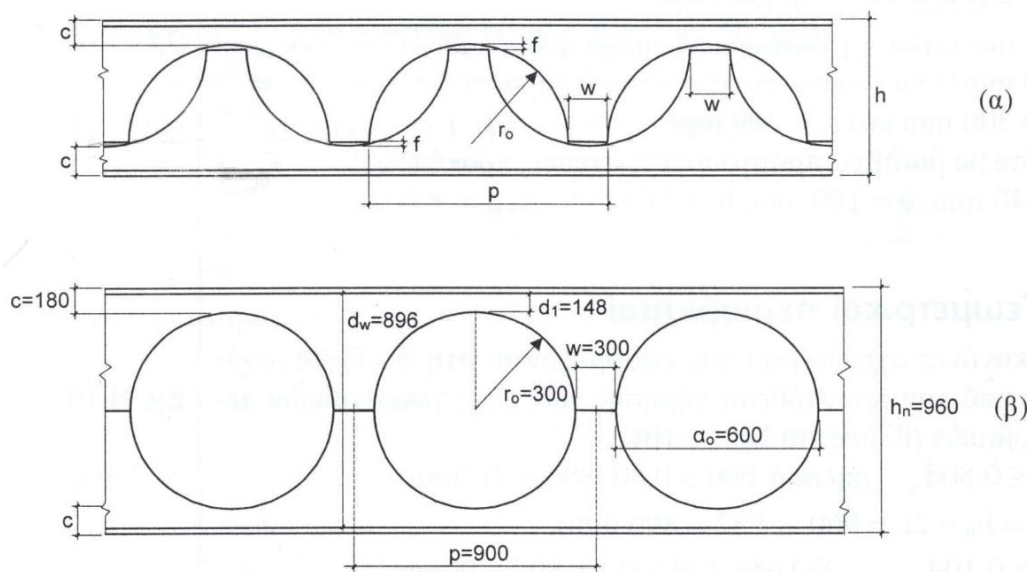
Ελέγχεται σύμφωνα με τον τρόπο που παρουσιάστηκε για τις δοκούς με πολυγωνικά ανοίγματα.

Έλεγχος στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

Το βέλος κάμψης μίας δοκού με πολλαπλά ανοίγματα στον κορμό της πρέπει να καθορίζεται από τη συνολική καμπτική και διατμητική παραμόρφωση της συμπαγούς δοκού, αυξημένη με την παραμόρφωση της κυψελωτής δοκού λόγω της παρουσίας των ανοιγμάτων.

8.5 Παράδειγμα δοκού με πολλαπλά κυκλικά ανοίγματα στον κορμό της

Αμφιέριστη δοκός, πλευρικά προστατευμένη, από χάλυβα S235, ανοίγματος 20m, έχει κατασκευαστεί ως κυψελωτή, με κυκλικά ανοίγματα στον κορμό της. Η δοκός έχει διαμορφωθεί από αρχική διατομή HEB700 και υπόκειται σε μόνιμα φορτία $g=4,1\text{kN/m}$ και κινητά $p=5,0\text{kN/m}$.



Σχήμα 8.6

- α) Τρόπος κοπής αρχικού ελάσματος
- β) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά κυψελωτής δοκού

8.5.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δοκού και γεωμετρικοί περιορισμοί

Επιλέγεται $w=300\text{mm}$ και $r_0=300\text{mm}$.

Επομένως, με βάση τις σχέσεις 8.14 προκύπτουν:

$$f_0=40\text{mm}$$

$$c=180\text{mm}$$

$$h_n=960\text{mm}$$

$$p=900\text{mm}$$

$h_0 \leq 0,80 \cdot d_w$	$\Rightarrow 600\text{mm} \leq 0,80 \cdot 896 = 717\text{mm}$	ΙΣΧΥΕΙ
$d_1 \geq 0,10 \cdot d_w$	$\Rightarrow 148\text{mm} \geq 0,10 \cdot 896 = 90\text{mm}$	ΙΣΧΥΕΙ
$d_2 = d_1$	$\Rightarrow 148\text{mm} = 148\text{mm}$	ΙΣΧΥΕΙ
$a_0 \leq h_0$	$\Rightarrow 600\text{mm} \leq 600\text{mm}$	ΙΣΧΥΕΙ
$0,25 \cdot a_0 \leq w \leq 0,50 \cdot a_0$	$\Rightarrow 0,25 \cdot 600 = 150\text{mm} \leq 300 \leq 0,50 \cdot 600 = 300\text{mm}$	ΙΣΧΥΕΙ

8.5.2 Εντατικά μεγέθη σχεδιασμού

Στο φορέα ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο

$$q_{Sd} = 1,35 \cdot 4,1 + 1,5 \cdot 5,0 = 13,0 \text{ kN/m}$$

$$\text{Η ροπή σχεδιασμού είναι ίση με } M_{Sd} = \frac{1}{8} \cdot 13,0 \cdot 20,0^2 = 650 \text{ kNm}$$

$$\text{Η τέμνουσα σχεδιασμού είναι ίση με } V_{Sd} = \frac{1}{2} \cdot 13,0 \cdot 20,0 = 130 \text{ kN}$$

8.5.3 Αντοχή απλών ταυ στις τομές αα (Σχήμα 8.5.α)

Το εμβαδόν του απλού ταυ στη διατομή αα είναι ίσο με

$$A_m = 30 \cdot 3,2 + 14,8 \cdot 1,7 = 121,2 \text{ cm}^2.$$

Η επιφάνεια διάτμησης κάθε απλού ταυ είναι ίση με

$$A_v = c \cdot t_w = 18,0 \cdot 1,7 = 30,6 \text{ cm}^2.$$

Η απόσταση του κέντρου βάρους του απλού ταυ από την ανώτερη ίνα του

$$\text{πέλματος είναι ίση με } e_c = \frac{30 \cdot 3,2^2 / 2 + 14,8 \cdot 1,7 \cdot (3,2 + 14,8 / 2)}{30 \cdot 3,2 + 14,8 \cdot 1,7} = 3,47 \text{ cm}$$

Η απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους των δύο απλών ταυ της διατομής αα είναι ίση με $h_c = h_n - 2 \cdot e_c = 96 - 2 \cdot 3,47 = 89,1 \text{ cm}$.

A) Αντοχή σε διάτμηση

Ελέγχεται το πλησιέστερο στη στήριξη άνοιγμα που είναι δυσμενέστερο.

$$V_{Sd} \cong 130 \text{ kN}, M_{Sd} \cong 0.$$

Η τέμνουσα δύναμη που αντιστοιχεί σε κάθε απλό ταυ είναι ίση με

$$V_{T,Sd} = 1/2 \cdot 130 = 65 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{30,6 \cdot 23,5}{\sqrt{3} \cdot 1} = 415,17 \text{ kN} > 65 \text{ kN}$$

B) Αντοχή σε αξονική δύναμη

Ελέγχεται το μέσο του ανοίγματος της δοκού όπου έχουμε τη μέγιστη τιμή της ροπής.

$$V_{Sd} = 0, M_{Sd} = 650 \text{ kNm}$$

Η αξονική δύναμη που αντιστοιχεί σε κάθε απλό ταυ είναι ίση με

$$N_{M,Sd} = \frac{M_{Sd}}{h_c} = \frac{650}{0,891} = 729,52 \text{ kN}$$

$$N_{Rd} = \frac{A_m \cdot f_y}{\gamma_M} = \frac{121,2 \cdot 23,5}{1,0} = 2848,2 \text{ kN} > 729,52 \text{ kN}$$

8.5.4 Αντοχή απλών ταυ στις τομές bb (Σχήμα 8.5.β)

Επειδή δεν είναι αμέσως φανερό ποια από τις τομές bb είναι δυσμενέστερη, ακολουθείται διαδικασία δοκιμών και επαναλήψεων για πιθανές τιμές της γωνίας φ.

Αρχικά γίνεται έλεγχος για φ=25°.

Η ανάλυση γίνεται με βάση το προσομοίωμα δοκού Vierendeel, κατά το οποίο στη διατομή αα υποτίθεται μηδενισμός της ροπής.

Εμβαδό τομής bb

$$A_b = \frac{30 \cdot 3,2}{0,906} + \left(\frac{89,6}{2 \cdot 0,906} - 30 \right) \cdot 1,7 = 139,0 \text{cm}^2$$

Θέση κέντρου βάρους διατομής bb

$$e' = \frac{30 \cdot 3,2^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot 89,6 - 30 \cdot 0,906 \right) \left(\frac{1}{2} \cdot 89,6 - 30 \cdot 0,906 + 2 \cdot 3,2 \right)}{2 \cdot 30 \cdot 3,2 + 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 89,6 - 30 \cdot 0,906 \right) \cdot 1,7} = 4,08 \text{cm}$$

Με εφαρμογή των σχέσεων 8.18-8.23 προκύπτουν:

$$I_b = 4469 \text{cm}^4$$

$$W_{b,el} = 241,97 \text{cm}^3$$

$$M_{b,el,Rd} = 56,86 \text{kNm}$$

(Θεωρείται επί το δυσμενέστερο ως αντοχή σε κάμψη η ελαστική αντοχή σχεδιασμού).

$$A_v = 39,1 \text{cm}^2$$

$$V_{pl,Rd} = 529,63 \text{kN}$$

$$N_{\phi,Rd} = 3265,5 \text{kN}$$

Έλεγχος στο ακραίο άνοιγμα

$$V_{Sd} \cong 130 \text{kN}, M_{Sd} \cong 0 \text{ άρα και } N_{M,Sd} \cong 0$$

Σύμφωνα με τις εξισώσεις 8.24 προκύπτουν τα εξής εντατικά μεγέθη:

$$V_{\phi,Sd} = 58,91 \text{kN}$$

$N_{\phi,Sd} = -27,47 \text{kN}$ (το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι η διατομή εφελκύεται, αντίθετα από το σχήμα 8.5.β)

$$M_{\phi,Sd} = 1331,41 \text{kNm}$$

Επειδή $V_{\phi,Sd} = 58,91 \text{kN} < 0,50 \cdot 529,63 = 264,82 \text{kN}$, δεν απαιτείται μείωση της αντοχής της ροπής λόγω τέμνουσας.

Ο έλεγχος επάρκειας γίνεται: $\frac{27,47}{3265,5} + \frac{1331,41}{5686} = 0,243 < 1$

Επομένως η διατομή είναι επαρκής.

Έλεγχος στο μέσο του ανοίγματος της δοκού

$V_{Sd}=0$, $M_{Sd}=650\text{kNm} \Rightarrow N_{M,Sd}=729,52\text{kN}$ (όπως έχει υπολογιστεί στην παράγραφο 8.5.3)

Προκύπτουν τα εντατικά μεγέθη:

$$V_{\varphi,Sd}=308,44\text{kN}$$

$$N_{\varphi,Sd}=661,45\text{kN}$$

$$M_{\varphi,Sd}=441,30\text{kNm}$$

Επειδή $V_{\varphi,Sd}=308,44\text{kN} > 0,50 \cdot 529,63 = 264,82\text{kN}$, πραγματοποιείται μείωση της αντοχής της ροπής λόγω τέμνουσας.

Συγκεκριμένα,

$$M_{\varphi,Sd} = \frac{W_{el,Rd} \cdot f_y'}{Y_{M0}} = \frac{W_{el,Rd} \cdot (1 - \rho) \cdot f_y}{Y_{M0}}$$

$$\text{όπου } \rho = \left(\frac{2 \cdot V_{\varphi,Sd}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 = \left(\frac{2 \cdot 308,44}{529,63} - 1 \right)^2 = 0,027$$

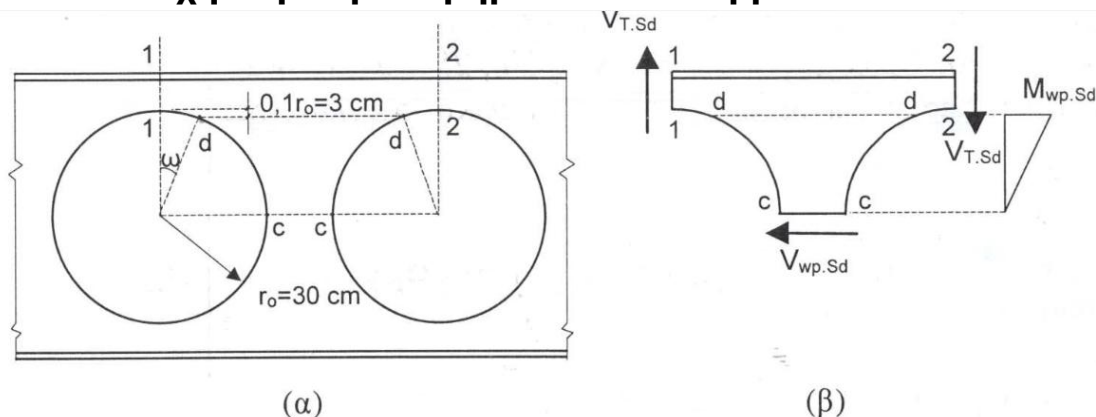
$$\text{Επομένως, } M_{\varphi,Sd} = \frac{241,97 \cdot 22,87}{1,00} = 5532,8\text{kNm}$$

Ο έλεγχος επάρκειας γίνεται: $\frac{661,45}{3265,5} + \frac{441,30}{5532,8} = 0,282 < 1$

Επομένως η διατομή είναι επαρκής.

Ο παραπάνω έλεγχος επαναλαμβάνεται και για άλλες γωνίες φ , καθώς δεν είναι γνωστό ποια γωνία φ αντιστοιχεί στη δυσμενέστερη διατομή. Έχουν πραγματοποιηθεί σε φύλλο Excel έλεγχοι για όλες τις τιμές γωνιών και το παραπάνω κριτήριο ικανοποιείται σε κάθε περίπτωση.

8.5.5 Αντοχή συμπαγών τμημάτων του κορμού



Σχήμα 8.7

- α) Κρίσιμες διατομές ελέγχου των πλήρων τμημάτων του κορμού
 β) Δρώσες δυνάμεις σε τμήμα της κυφελωτής δοκού κατά το προσομοίωμα δοκού Vierendeel

A) Έλεγχος σε διάτμηση (τομή cc)

$$V_{wp,Sd} = 2 \cdot 65 \cdot \frac{90}{89,1} = 131,31 \text{ kN}$$

$$V_{wp,Rd} = \frac{30 \cdot 1,7 \cdot 23,5}{\sqrt{3} \cdot 1,00} = 691,95 \text{ kN} > 131,31 \text{ kN}$$

Επομένως η τέμνουσα είναι αποδεκτή.

B) Έλεγχος σε διαρροή ή λυγισμό (τομή dd)

Ικανοποιείται το κριτήριο για την εφαρμογή της σχέσης 8.9, αφού $h_0 = 60 < 60 \cdot 1,0 \cdot 1,7 = 102$

Είναι:

$$a = p/h_0 = 900/600 = 1,5$$

$$\beta = h_0/t_w = 600/1,7 = 35,3$$

$$\text{Επομένως, } C_1 = 8,099, C_2 = 2,796, C_3 = 5,310$$

Κρίσιμη διατομή για την αστοχία είναι η διατομή dd που φαίνεται στο σχήμα 8.7.α. Η διατομή αυτή απέχει απόσταση $0,10r_0 = 30 \text{ mm}$ από το ανώτερο σημείο του ανοίγματος ($\cos\omega = 0,90$).

$$(dd) = p - 2 \cdot r_0 \cdot \sin\omega = 638 \text{ mm}$$

$$M_{el,Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_M} = \frac{1}{6} \cdot 1,7 \cdot 63,8^2 \cdot 23,5 / 1,00 = 27102 \text{ kNcm} = 271,02 \text{ kNm}$$

Αντοχή σχεδιασμού έναντι λυγισμού:

$$M_{Rd} = (8,099 \cdot 1,5 - 2,796 \cdot 1,50^2 - 5,310) \cdot 271,02 = 148,38 \text{ kNm}$$

$M_{wp,Sd} = V_{wp,Sd} \cdot (0,90r_0) = 131,31 \cdot 0,90 \cdot 0,30 = 35,45 \text{ kNm} < M_{Rd}$
 Άρα ο κορμός είναι επαρκής έναντι λυγισμού.

8.5.6 Αντοχή του κορμού στις στηρίξεις

α) Το κέντρο του πρώτου κυκλικού ανοίγματος του κορμού διαμορφώνεται σε απόσταση 1,0m από τη θεωρητική στήριξη. Η απόσταση, επομένως, του ακραίου σημείου του ανοίγματος από τη στήριξη είναι ίση με $100 - 30 = 70 \text{ cm}$ και επομένως η περιοχή της στήριξης βρίσκεται εκτός της ζώνης επιρροής του ανοίγματος αυτού. Πράγματι επειδή $d_w/t_w = 89,6/1,7 = 52,71 < 90\varepsilon = 90$, είναι $d = 60 \text{ cm} < 70 \text{ cm}$.

β) Έλεγχος έναντι σύνθλιψης του κορμού
 Με βάση τις σχέσεις 8.10-8.12 υπολογίζουμε:

$$s_s = 1,7 + 2 \cdot 3,2 + 2 \cdot 2,7 \cdot (2 - \sqrt{2}) = 11,26 \text{ cm}$$

$$s_y = 2 \cdot 3,2 \cdot \sqrt{\frac{30}{1,7}} = 26,89 \text{ cm}$$

$$R_{y,Rd} = (11,26 + \frac{1}{2} \cdot 26,89) \cdot 1,7 \cdot \frac{23,5}{1,0} = 987 \text{ kN} > V_{Sd} = 130 \text{ kN}$$

γ) Έλεγχος έναντι ρυτίδωσης

$$R_{a,Rd} = 0,5 \cdot 1,7^2 \cdot \sqrt{21000 \cdot 23,5} \left[\sqrt{\frac{3,2}{1,7}} + 3 \cdot \left(\frac{1,7}{3,2}\right) \cdot \left(\frac{11,26}{84,2}\right) \right] / 1,0 =$$

$$= 2159,3 \text{ kN} > 130 \text{ kN}$$

δ) Έλεγχος σε κύρτωση δεν απαιτείται επειδή: $d/t_w = 84,2/1,7 = 49,5 < 69$

Κεφάλαιο 9

Σύγκριση κανονιστικών διατάξεων και αριθμητικών αναλύσεων για την αστοχία δοκών με κυκλικές οπές

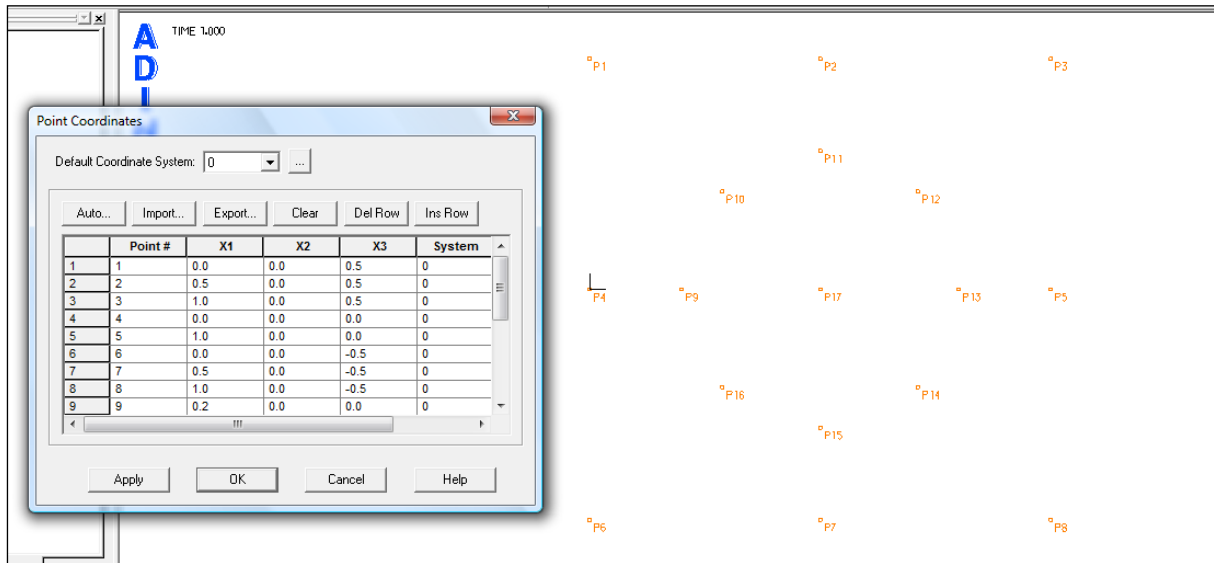
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA για τη δοκό με κυκλικές οπές που μελετήθηκε με βάση τον Ευρωκώδικα 3 στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στόχος είναι να γίνει φανερό ότι με τη μεταβολή κάποιων γεωμετρικών χαρακτηριστικών της δοκού και την τοποθέτηση ή μη εξασφαλίσεων, αλλάζει η μορφή αστοχίας. Διερευνήθηκε ποια μορφή αστοχίας είναι κρίσιμη σε κάθε περίπτωση και πραγματοποιήθηκαν οι αντίστοιχες μη γραμμικές αναλύσεις στο ADINA για να επιβεβαιωθεί η αναμενόμενη αστοχία.

9.1 Προσομοίωση δοκού με κυκλικές οπές στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA

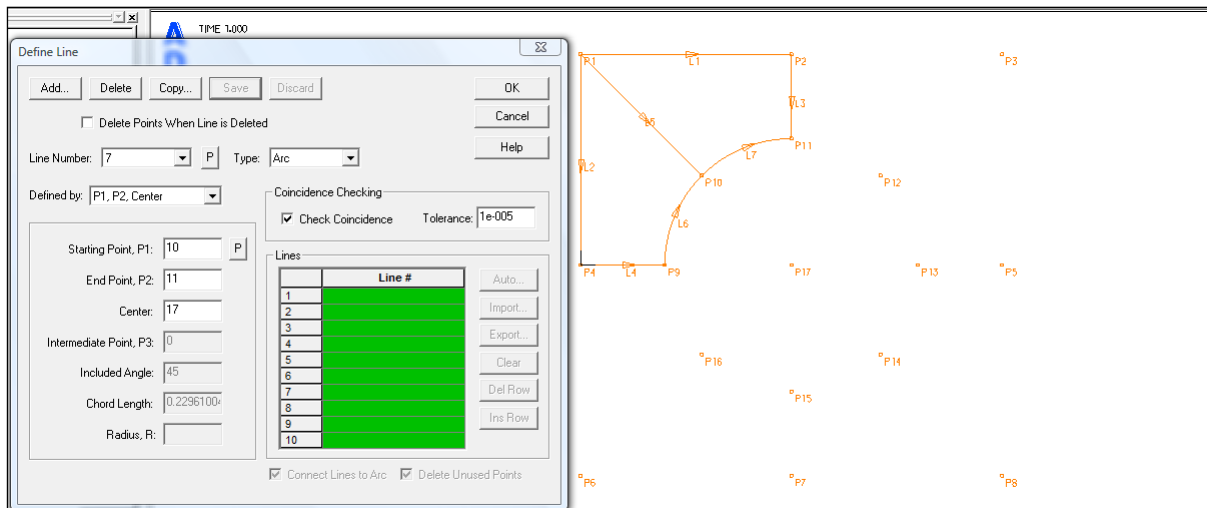
Η προσομοίωση δοκών με κυκλικές οπές στο ADINA μπορεί να γίνει με 2 διαφορετικές μεθόδους οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στην παράγραφο αυτή.

9.1.1 Πρώτη μέθοδος

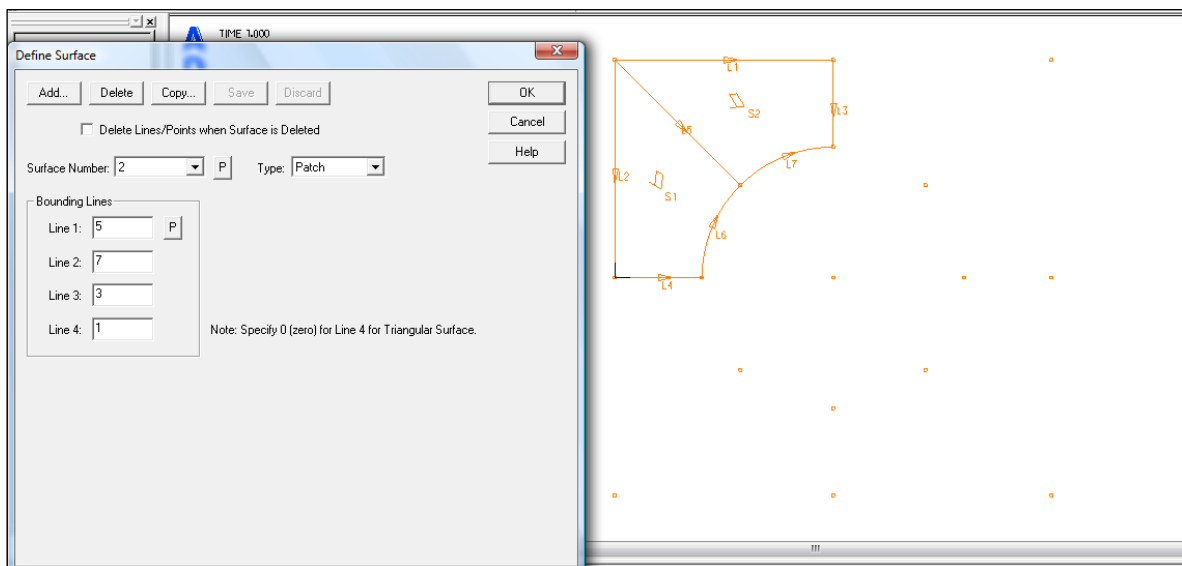
Αρχικά παρουσιάζεται η μέθοδος η οποία βασίζεται στη σταδιακή δημιουργία επιμέρους επιφανειών γύρω από την κυκλική οπή. Εφόσον ορισθούν τα απαραίτητα σημεία που φαίνονται στο σχήμα 9.1, σχηματίζονται οι γραμμές που τα συνδέουν και στη συνέχεια οι 8 επιφάνειες γύρω από την οπή.



Σχήμα 9.1
Ορισμός απαραίτητων σημείων

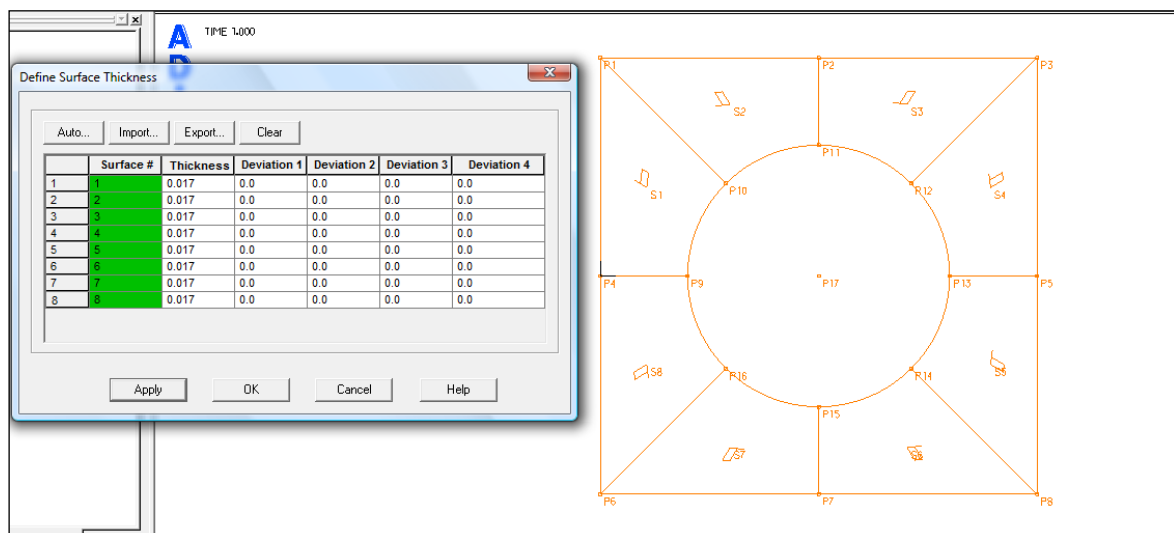


Σχήμα 9.2
Ορισμός γραμμών



Σχήμα 9.3
Ορισμός επιφανειών

Στη συνέχεια, αφού οριστούν όλες οι επιφάνειες, κατά τα γνωστά ορίζεται και το πάχος τους και με αυτόν τον τρόπο ολοκληρώνεται η απαραίτητη γεωμετρία για να ξεκινήσει η διαδικασία της διακριτοποίησης για κάθε επιφάνεια που περιβάλλει την οπή. Επειδή φυσικά οι εξεταζόμενες δοκοί διαθέτουν οπές σε όλο το μήκος τους, η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσες είναι και οι οπές κατά μήκος του κορμού της δοκού.

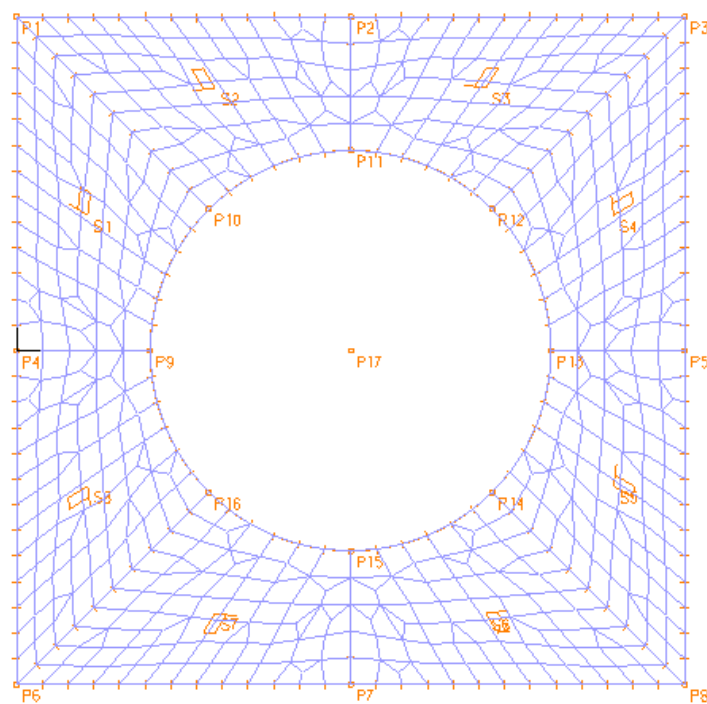


Σχήμα 9.4
Ολοκλήρωση της γεωμετρίας του μοντέλου

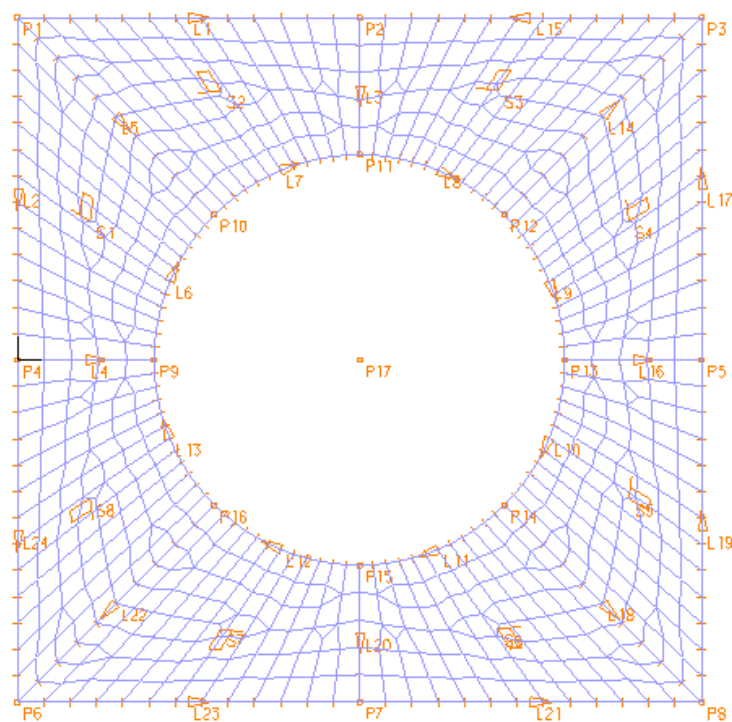
Εφόσον, ολοκληρωθεί η εργασία αυτή, είναι έτοιμος πλέον ο κορμός της δοκού και απομένει ο ορισμός των επιφανειών των πελμάτων προκειμένου να είναι πλήρης η γεωμετρία του φορέα μας.

Η διαίρεση σε πεπερασμένα στοιχεία γίνεται για κάθε επιφάνεια ορίζοντας ένα element group τύπου shell και επιλέγοντας το μήκος ή τον αριθμό των στοιχείων στα οποία επιθυμούμε να χωρίσουμε την επιφάνεια. Είναι πιθανό να πυκνώσουμε τα πεπερασμένα στοιχεία γύρω από την οπή, αυξάνοντας τη διαίρεση που πραγματοποιείται μόνο για τις γραμμές τύπου arc της κάθε επιφάνειας.

Το αποτέλεσμα της διακριτοποίησης είναι απολύτως συμμετρικό ως προς κάθε άξονα συμμετρίας του σχήματος, όπως φαίνεται και από τα σχήματα 9.5 και 9.6.



Σχήμα 9.5
Διακριτοποίηση μοντέλου



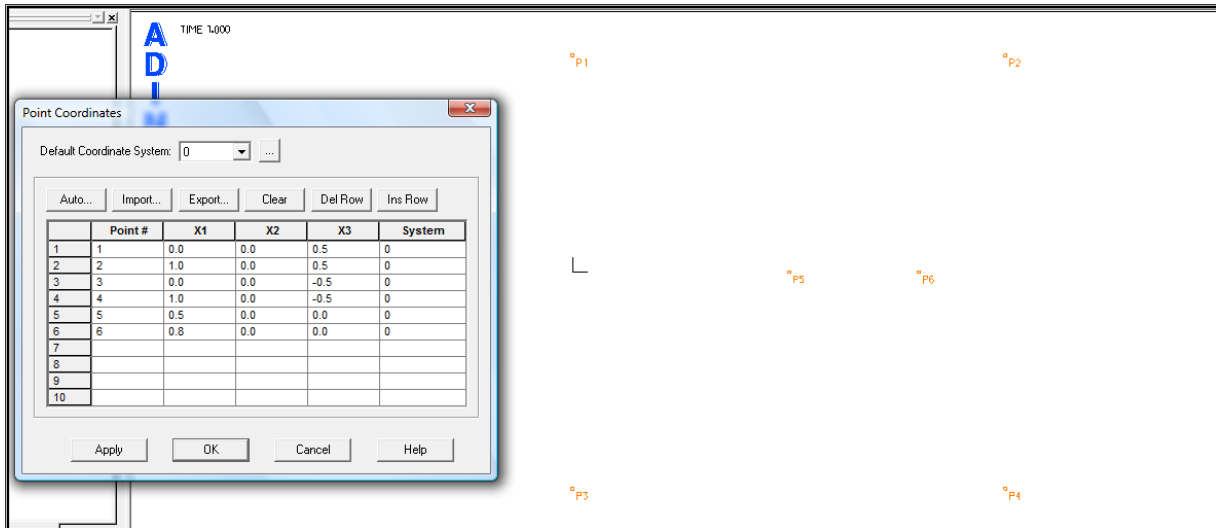
Σχήμα 9.6

Πύκνωση πεπερασμένων στοιχείων γύρω από την κυκλική οπή

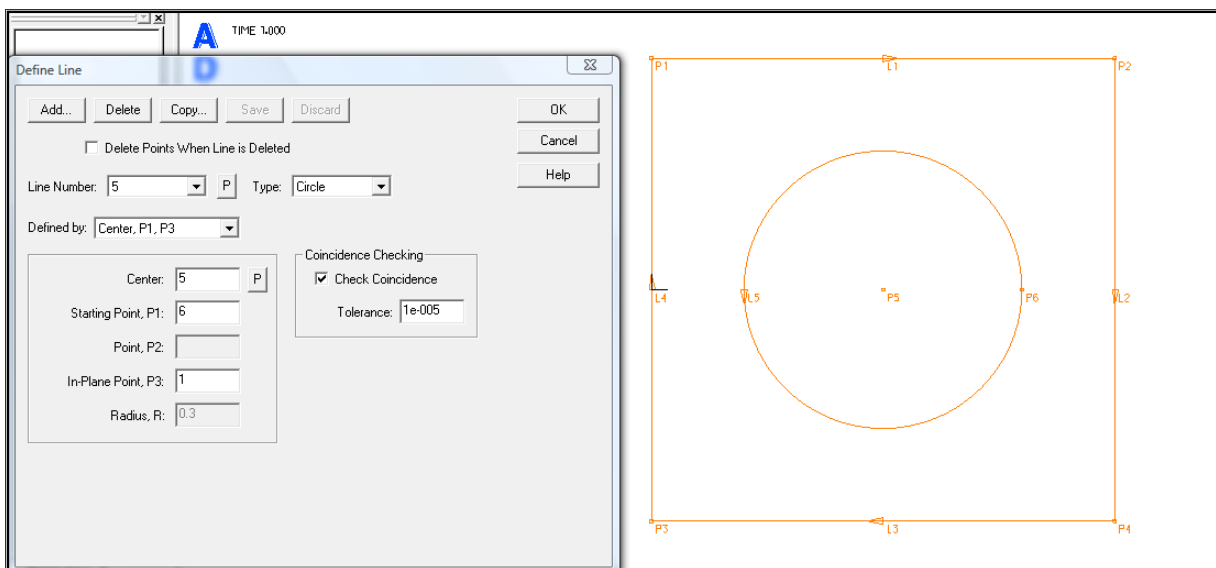
9.1.2 Δεύτερη μέθοδος

Σε αυτήν την παράγραφο εξετάζεται ένας δεύτερος τρόπος σχηματισμού των οπών στο ADINA, ο οποίος βασίζεται στη δημιουργία ενός ενιαίου σώματος (sheet body), αποτελούμενου αφενός από μία εξωτερική συνδυασμένη γραμμή που περιβάλλει ολόκληρη την επιφάνεια γύρω από την οπή και αφετέρου από την εσωτερική κυκλική οπή.

Η διαδικασία αυτή φαίνεται απλούστερη, καθώς απαιτεί τον ορισμό λιγότερων σημείων και άρα είναι πιο εύχρηστη σε περιπτώσεις όπου απαιτείται μεγάλος αριθμός κυκλικών οπών. Το αποτέλεσμα της διακριτοποίησης μπορεί να μην είναι απολύτως συμμετρικό, αλλά οι τιμές που προκύπτουν από τις αναλύσεις προσεγγίζουν με εξαιρετική ακρίβεια ή και συμπίπτουν με αυτές της 1^{ης} μεθόδου.

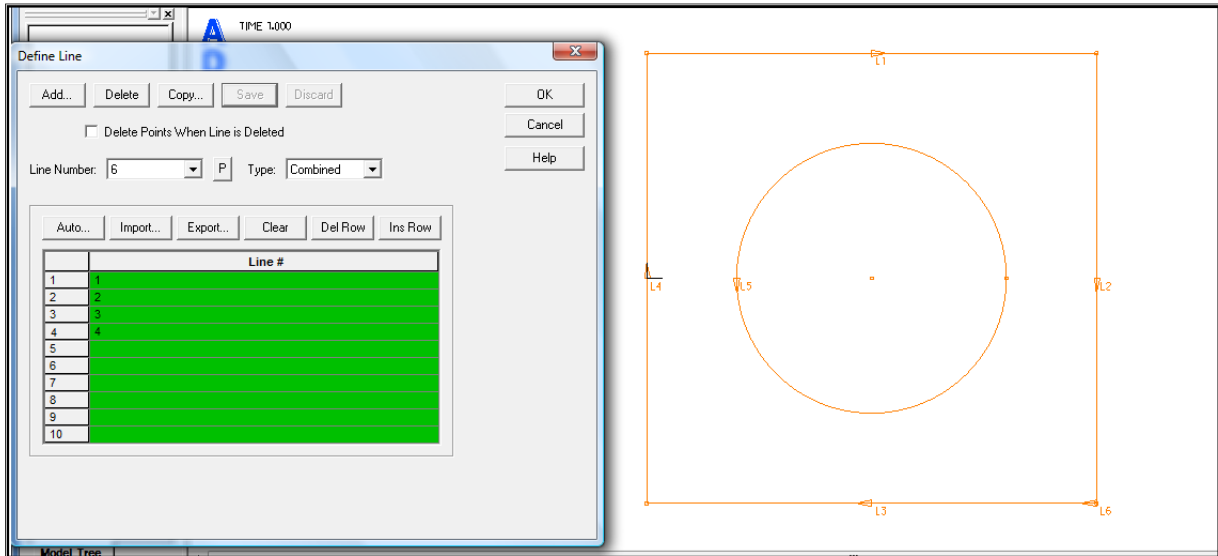


Σχήμα 9.7
Ορισμός σημείων



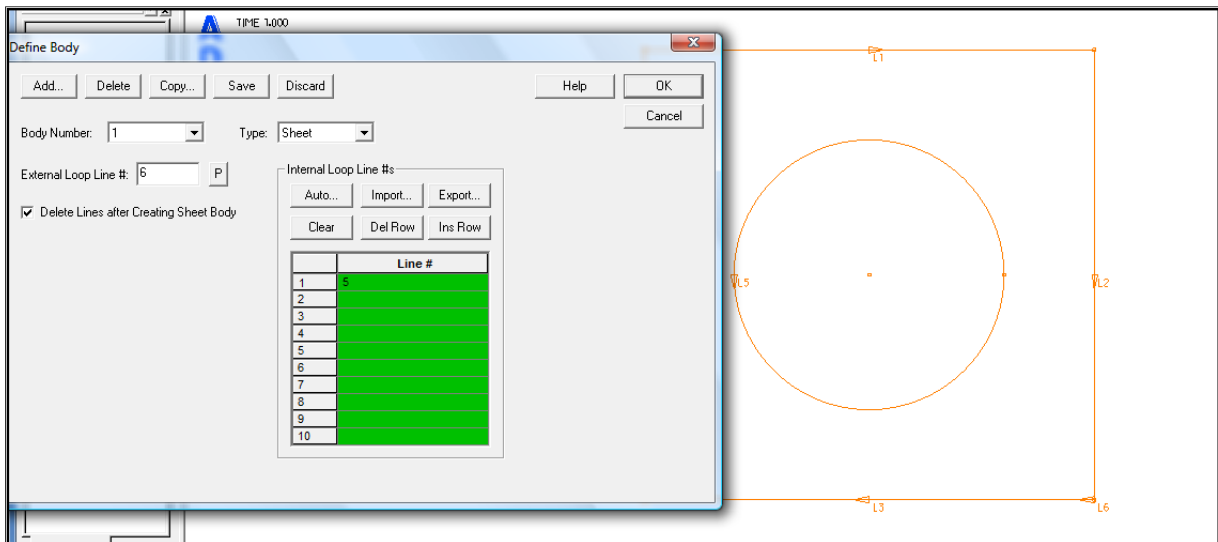
Σχήμα 9.8
Ορισμός γραμμών

Σκοπός είναι μετά το σχηματισμό των γραμμών να δημιουργηθεί μία συνδυασμένη γραμμή (combined line) η οποία θα περιλαμβάνει τις 4 εξωτερικές ευθείες γραμμές. Η γραμμή αυτή είναι προσανατολισμένη και γι'αυτό πρέπει να δίνεται προσοχή στη σειρά πληκτρολόγησης των γραμμών που την αποτελούν.

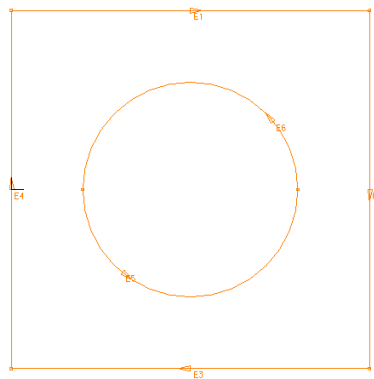


Σχήμα 9.9
Ορισμός συνδυσμένης γραμμής

Επόμενο βήμα είναι ο ορισμός "body" τύπου sheet όπου ως "external loop" θεωρείται η συνδυσμένη γραμμή που δημιουργήθηκε και ως "internal loop" η κυκλική γραμμή.



(a)



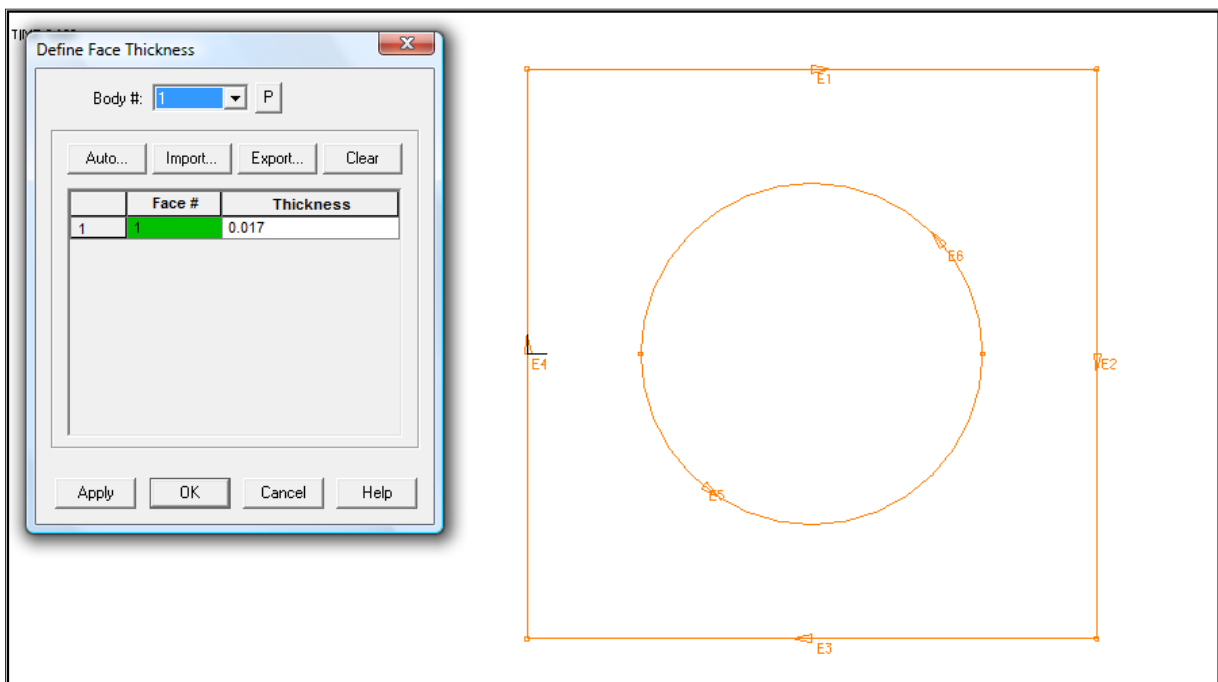
(β)

Σχήμα 9.10

Δημιουργία body

Αυτόματα οι γραμμές αντικαθίστανται από "edges" (ακμές) όπως φαίνεται και στο σχήμα 9.10β.

Ο σχηματισμός των "bodies" έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία της αντίστοιχης επιφάνειας ("face" όπως καλείται η επιφάνεια που αντιστοιχεί σε κάθε "body"). Επομένως, ορίζεται κανονικά το πάχος της όπως γίνεται και με τις κλασικές επιφάνειες.



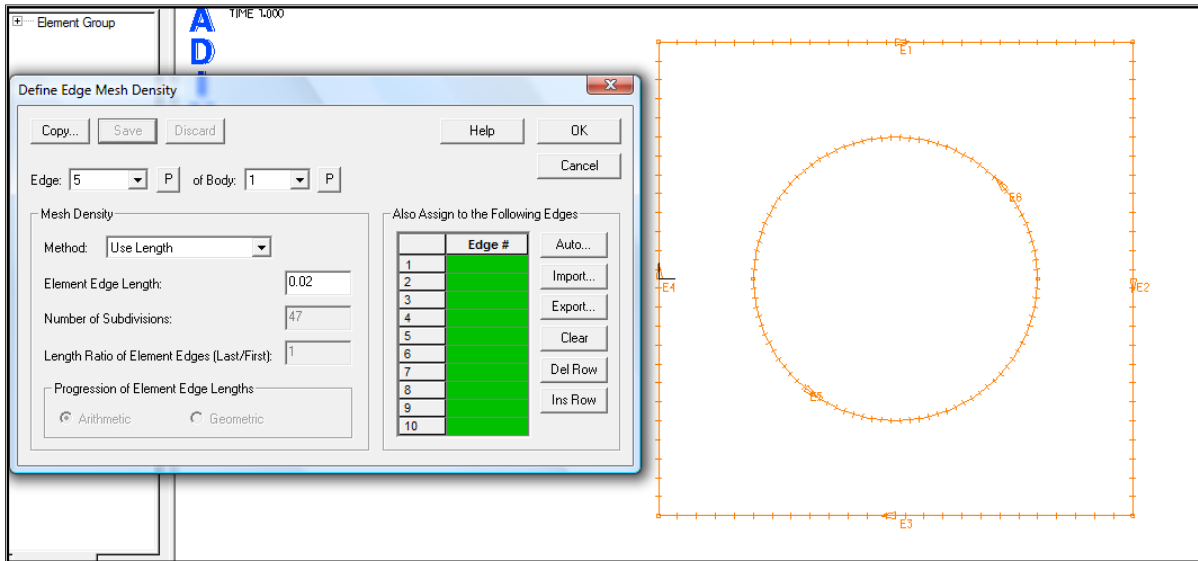
Σχήμα 9.11

Ολοκλήρωση της γεωμετρίας του μοντέλου

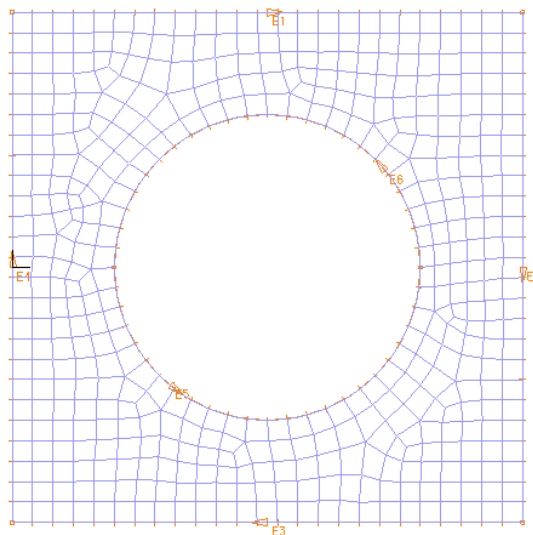
Εφόσον επαναληφθεί η ίδια διαδικασία για τη δημιουργία όσων οπών χρειάζονται και συνεπώς την ολοκλήρωση του κορμού της δοκού, απομένει η διαίρεση σε πεπερασμένα στοιχεία των αντίστοιχων επιφανειών.

Αφού δημιουργηθεί ένα element group τύπου shell, η διαίρεση μπορεί να γίνει από την εντολή Meshing->Mesh Density->Face ή Body ή Edge.

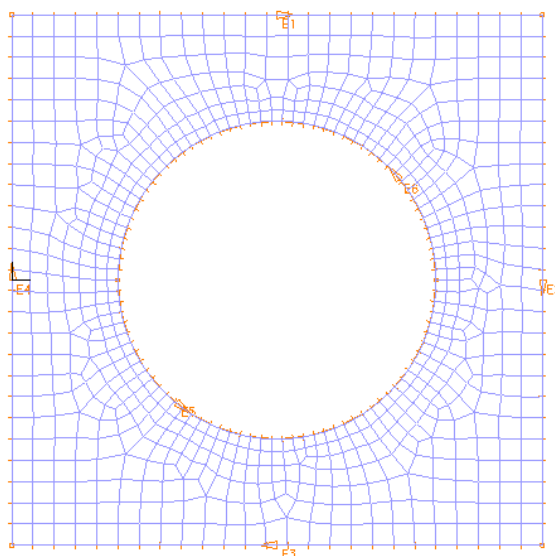
Επιθυμητή είναι η διαίρεση της κυκλικής περιφέρειας σε μικρότερο αριθμό στοιχείων (γί'αυτό προτιμάται ο ορισμός του μήκους ή του αριθμού των διαιρέσεων μέσω των edges).



Σχήμα 9.12
Διαίρεση των ακμών



Σχήμα 9.13
Διακριτοποίηση μοντέλου



Σχήμα 9.14

Πύκνωση πεπερασμένων στοιχείων γύρω από την κυκλική οπή

9.2 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για πλευρικό λυγισμό δοκού μήκους 20m με κυκλικές οπές

Το παράδειγμα που έχει παρουσιασθεί στην παράγραφο 8.5 του προηγούμενου κεφαλαίου προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα ADINA και επιλύθηκε σε γραμμική ανάλυση λυγισμού και σε μη γραμμικές αναλύσεις. Χρησιμοποιήθηκαν και οι 2 τρόποι προσομοίωσης που παρουσιάζονται παραπάνω για να γίνει κατανοητή η εφαρμογή τους και να συγκριθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτούς.

Προηγουμένως, θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τον αντίστοιχο συμπαγή φορέα ώστε να γίνει σύγκριση με την ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί για την κυψελωτή δοκό.

9.2.1 Γεωμετρικά-αδρανειακά χαρακτηριστικά και αντοχή της αντίστοιχης συμπαγούς δοκού

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιασθούν τα χαρακτηριστικά και η αντοχή αμφιέριστης συμπαγούς δοκού μήκους 20m με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με την κυψελωτή δοκό που εξετάστηκε στην παράγραφο 8.5.

Ισχύουν: $h=960\text{mm}$ (το τελικό ύψος της κυψελωτής δοκού)

$$b=300\text{mm}$$

$$t_w=17\text{mm}$$

$$t_f=32\text{mm}$$

Αν και η αντίστοιχη κυψελωτή δοκός έχει προέλθει από επεξεργασία πρότυπης διατομής θερμής έλασης, επειδή όπως έχει ήδη αναφερθεί δεν είναι δυνατή στο ADINA η ακριβής προσομοίωση προτύπων διατομών λόγω αδυναμίας εισαγωγής στο πρόγραμμα της ακτίνας συναρμογής, θα αμεληθεί η ακτίνα συναρμογής και η επιρροή της στον υπολογισμό των αδρανειακών χαρακτηριστικών της διατομής, προκειμένου να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα.

Πραγματοποιείται κατάταξη της διατομής με βάση τον Ευρωκώδικα 3:

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = 1 \text{ για χάλυβα S235}$$

Έλεγχος κορμού για καθαρή κάμψη:

$$c/t_w = (960 - 2 \cdot 32) / 17 = 52,71 < 72\varepsilon = 72 \Rightarrow \text{κατηγορία 1}$$

Έλεγχος πέλματος για καθαρή κάμψη:

$$c/t_f = [(300 - 17) / 2] / 32 = 4,42 < 9\varepsilon = 9 \Rightarrow \text{κατηγορία 1}$$

Επομένως όλη η διατομή ανήκει στην κατηγορία 1.

Ροπή αδράνειας περί τον άξονα z:

$$I_z = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 3,2 \cdot 30^3 + \frac{1}{12} \cdot 1,7^3 \cdot 89,6 = 14438,7\text{cm}^4$$

Ροπή αδράνειας περί τον άξονα y:

$$I_y = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 30 \cdot 3,2^3 + 2 \cdot 30 \cdot 3,2 \cdot (44,8 + 1,6)^2 + \frac{1}{12} \cdot 89,6^3 \cdot 1,7 = 515436,3\text{cm}^4$$

Σταθερά στρέψης:

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot 30 \cdot 3,2^3 + 89,6 \cdot 1,7^3) = 802,09\text{cm}^4$$

Σταθερά στρέβλωσης:

$$I_w = \frac{1}{4} \cdot 14436,7 \cdot (89,6 + 3,2)^2 = 31081602\text{cm}^6$$

Πλαστική ροπή αντίστασης:

$$W_{pl} = 2 \cdot \left[30 \cdot 3,2 \cdot \left(\frac{89,6}{2} + \frac{3,2}{2} \right) + \frac{89,6}{2} \cdot 1,7 \cdot \frac{89,6}{4} \right] = 12320,77\text{cm}^3$$

Η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού με βάση την εξίσωση του Ευρωκώδικα 3 για καταμεμημένο φορτίο στο άνω πέλμα της δοκού, προκύπτει ίση με:

$$M_{cr}=713,55\text{kNm}$$

Το φορτίο στο οποίο αντιστοιχεί είναι ίσο με $P_{cr}=8 \cdot M_{cr}/L^2=14,27\text{kN/m}$.

Η ροπή πλαστικοποίησης της εξεταζόμενης διατομής για χάλυβα S235 είναι ίση με:

$$M_{pl}=W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 12320,77\text{cm}^3 \cdot 23,5\text{kN/cm}^2 / 1,00$$

$$M_{pl}=2895,38\text{kNm} > M_{cr}=713,55\text{kNm}$$

Το αντίστοιχο φορτίο για την πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής είναι ίσο με $P_{pl}=8 \cdot M_{pl}/L^2=8 \cdot 2895,38/20^2=57,91\text{kN/m}$.

Προφανώς κρίσιμη μορφή αστοχίας είναι ο πλευρικός λυγισμός της αμφιέρειστης δοκού.

Με βάση τον έλεγχο έναντι πλευρικού λυγισμού έχουμε:

$$\text{Η λυγηρότητα είναι ίση με: } \bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{12320,77 \cdot 23,5}{71355}} = 2,01 > 0,20$$

Για την καμπύλη πλευρικού λυγισμού d έχουμε $a_{LT}=0,76$ και επομένως:

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + 0,76(2,01 - 0,20) + 2,01^2 \right] = 3,21$$

Άρα ο μειωτικός συντελεστής πλευρικού λυγισμού είναι ίσος με:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{3,21 + \sqrt{3,21^2 - 2,01^2}} = 0,18 < 1$$

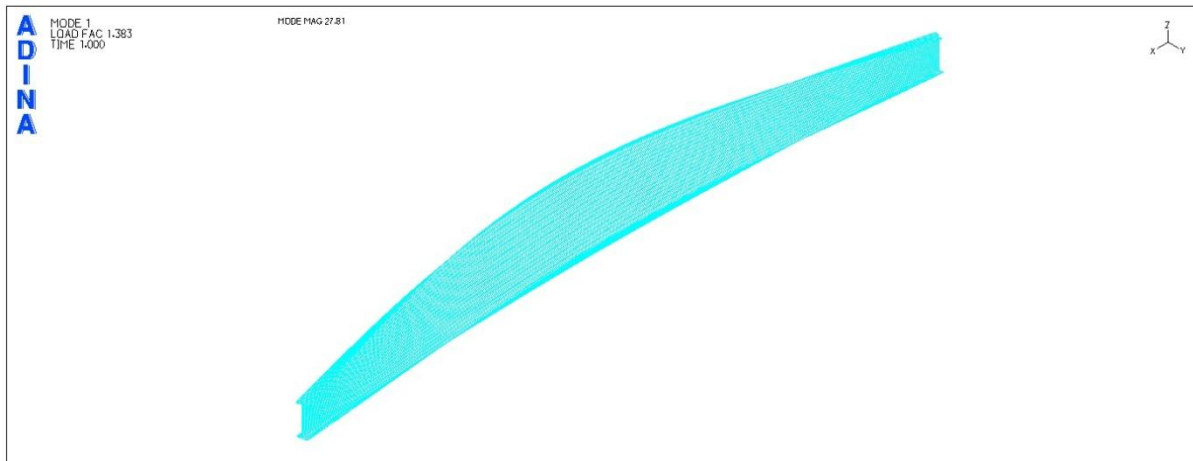
και η ροπή αντοχής είναι ίση με:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,18 \cdot 12320,77 \cdot \frac{23,5}{1,00} \text{kNcm} = 50723\text{kNcm} = 507,23\text{kNm}$$

Το αντίστοιχο φορτίο αντοχής είναι ίσο με $P_{b,Rd}=10,14 \text{ kN/m}$.

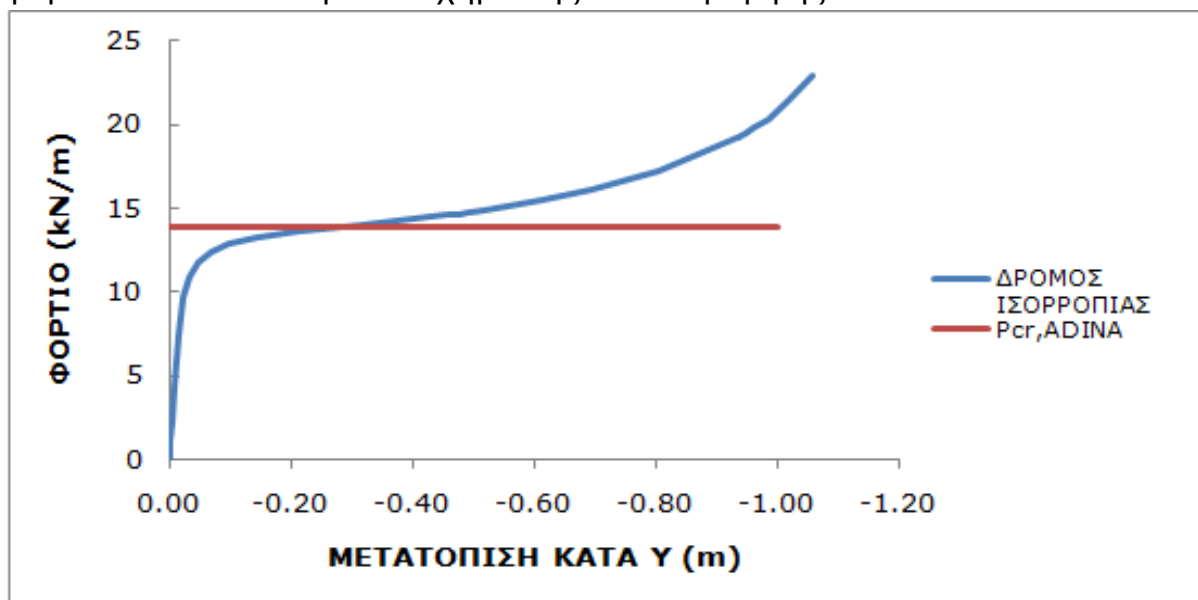
9.2.2 Γραμμική ανάλυση λυγισμού και μη γραμμικές αναλύσεις στο ADINA για την αντίστοιχη συμπαγή δοκό

Πραγματοποιώντας γραμμική ανάλυση λυγισμού στο πρόγραμμα ADINA, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού προκύπτει ίσο με $P_{cr}=13,83\text{kN/m}$.

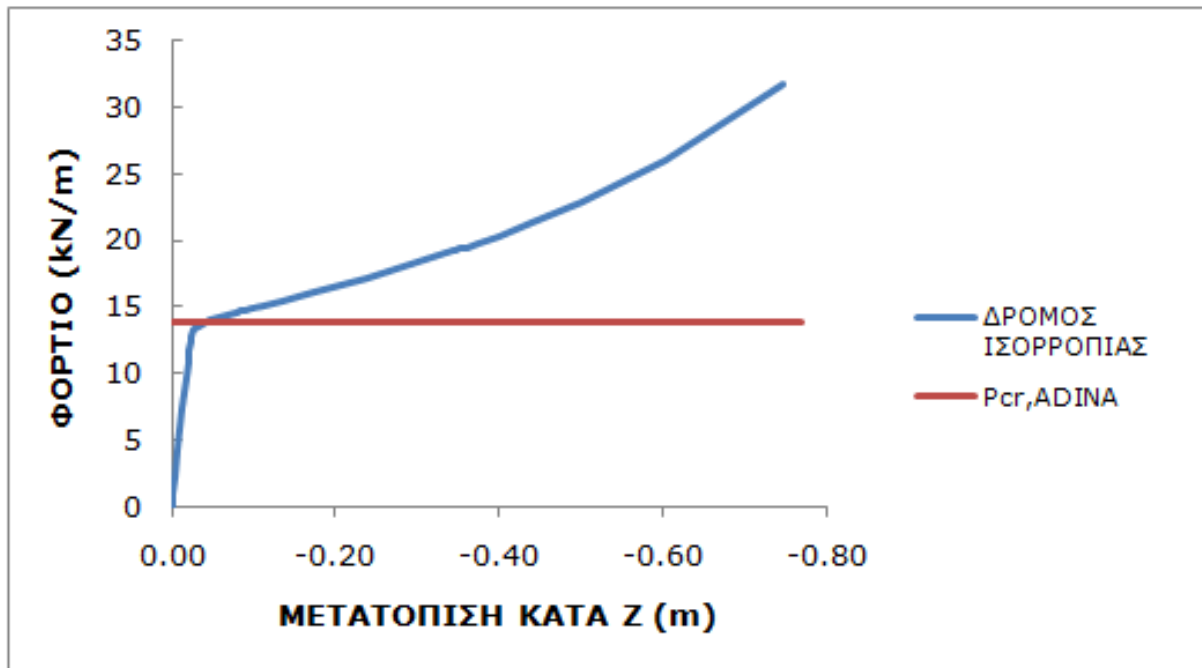


Σχήμα 9.15
1^η ιδιομορφή λυγισμού συμπαγούς φορέα

Οι δρόμοι ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, καθώς και για μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας δίνονται στα σχήματα 9.16-9.17 και 9.18-9.19 αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση έχει δοθεί στο φορέα ατέλεια 5cm με το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής.

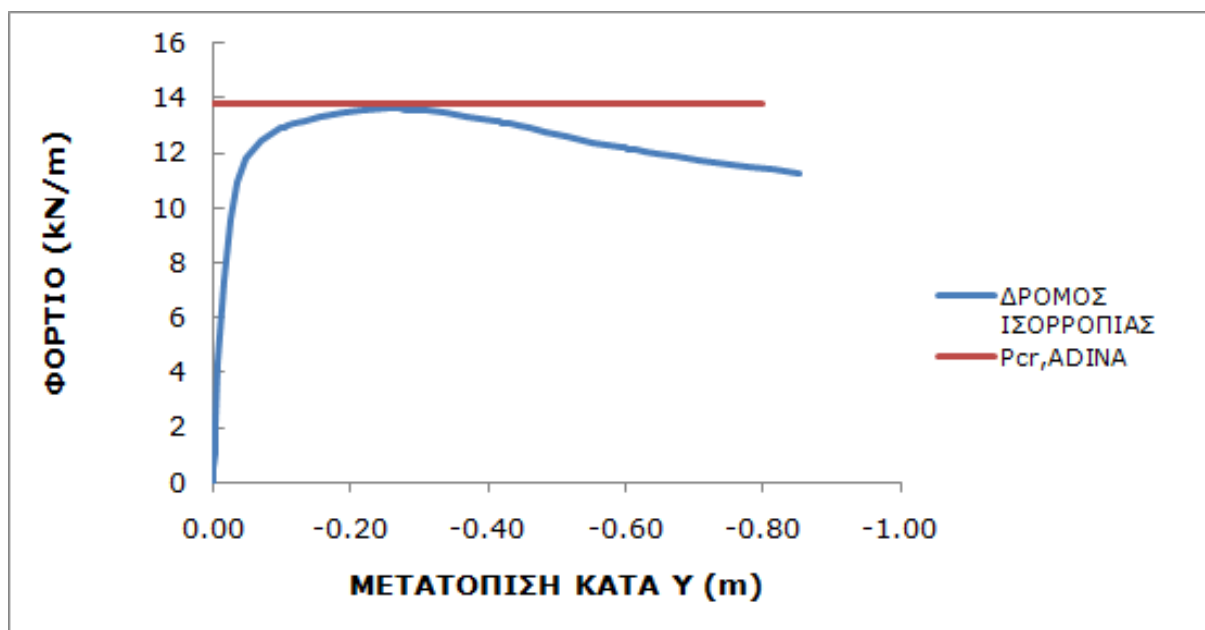


Σχήμα 9.16
Δρόμος ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας



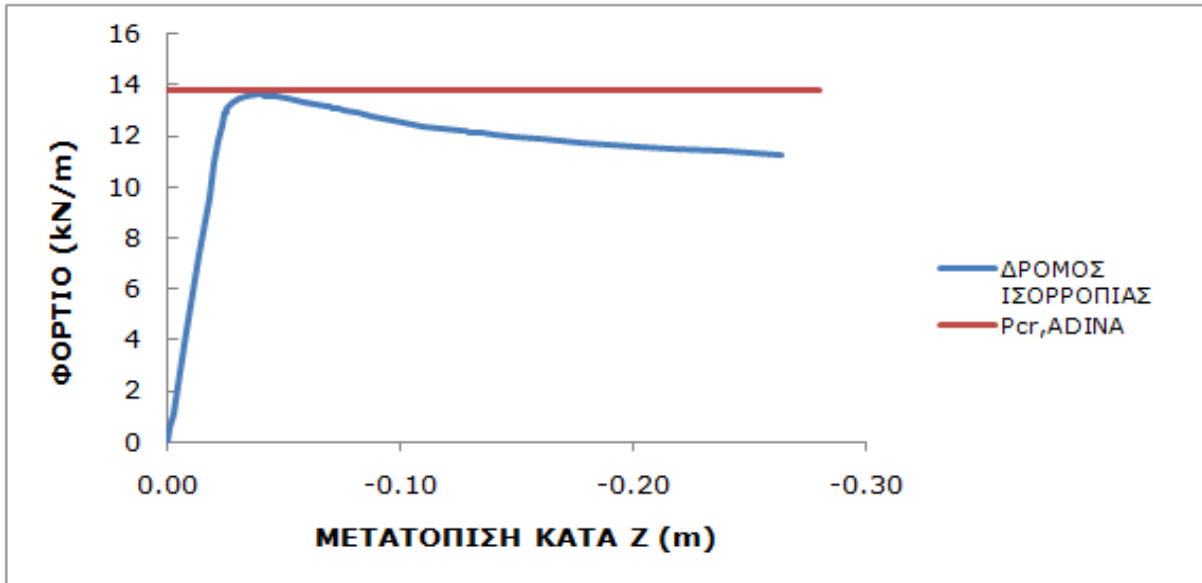
Σχήμα 9.17

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας



Σχήμα 9.18

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια για μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας

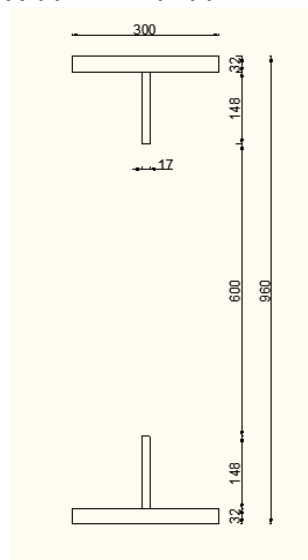


Σχήμα 9.19

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς για μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας

9.2.3 Έλεγχος κυψελωτής δοκού σε πλευρικό λυγισμό

Σύμφωνα με το παράρτημα N του Ευρωκώδικα 3, ο έλεγχος μιας κυψελωτής δοκού σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό γίνεται με βάση τις ιδιότητες της διατομής στο μέσο του κυκλικού ή πολυγωνικού ανοίγματος. Ακολουθώντας αυτήν την επισήμανση, υπολογίζουμε τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της αντίστοιχης διατομής:



Σχήμα 9.20

Τομή στο μέσο του κυκλικού ανοίγματος

Ροπή αδράνειας περί τον άξονα z:

$$I_z = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 3,2 \cdot 30^3 + 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 14,8 \cdot 1,7^3 = 14412,1 \text{cm}^4$$

Ροπή αδράνειας περί τον άξονα y:

$$I_y = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 30 \cdot 3,2^3 + 2 \cdot 30 \cdot 3,2 \cdot (44,8 + 1,6)^2 + 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot 14,8^3 \cdot 1,7 + 2 \cdot 14,8 \cdot 1,7 \cdot (30 + 7,4)^2 = 484836,3 \text{cm}^4$$

Σταθερά στρέψης:

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot 30 \cdot 3,2^3 + 2 \cdot 14,8 \cdot 1,7^3) = 703,84 \text{cm}^4$$

Σταθερά στρέβλωσης:

$$I_w = \frac{1}{4} \cdot 14412,1 \cdot (89,6 + 3,2)^2 = 31028715,1 \text{cm}^6$$

Πλαστική ροπή αντίστασης:

$$W_{pl} = 2 \cdot \left[30 \cdot 3,2 \cdot \left(\frac{89,6}{2} + \frac{3,2}{2} \right) + 14,8 \cdot 1,7 \cdot \left(30 + \frac{14,8}{2} \right) \right] = 10790,77 \text{cm}^3$$

Η κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού με βάση τον Ευρωκώδικα 3, για καταναμεμημένο φορτίο στο άνω πέλμα της δοκού, προκύπτει ίση με:

$$M_{cr} = 669,64 \text{kNm}$$

Το φορτίο στο οποίο αντιστοιχεί είναι ίσο με $P_{cr} = 8 \cdot M_{cr} / L^2 = 13,39 \text{ kN/m}$.

Σημειώνεται ότι η αντίστοιχη κρίσιμη ελαστική ροπή πλευρικού λυγισμού και το φορτίο λυγισμού για τη συμπαγή δοκό με τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά έχουν προκύψει:

$M_{cr} = 713,55 \text{ kNm}$ και $P_{cr} = 14,27 \text{ kN/m}$ αντίστοιχα.

Η ροπή πλαστικοποίησης της εξεταζόμενης διατομής για χάλυβα S235 είναι ίση με:

$$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 10790,77 \text{cm}^3 \cdot 23,5 \text{kN/cm}^2 / 1,00$$

$$M_{pl} = 2535,83 \text{kNm} > M_{cr} = 669,64 \text{kNm}$$

Το αντίστοιχο φορτίο για την πλήρη πλαστικοποίηση της διατομής είναι ίσο με $P_{pl} = 8 \cdot M_{pl} / L^2 = 50,72 \text{ kN/m}$.

Για την αντίστοιχη συμπαγή δοκό έχει υπολογιστεί : $M_{pl} = 2895,38 \text{kNm}$ και $P_{pl} = 57,91 \text{ kN/m}$.

Η ανηγμένη λυγηρότητα πλευρικού λυγισμού είναι ίση με:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{10790,77 \cdot 23,5}{66964}} = 1,95 > 0,20$$

Για την καμπύλη πλευρικού λυγισμού d έχουμε $a_{LT}=0,76$ και επομένως:

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + 0,76(1,95 - 0,20) + 1,95^2 \right] = 3,07$$

Άρα ο μειωτικός συντελεστής πλευρικού λυγισμού είναι ίσος με:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{3,07 + \sqrt{3,07^2 - 1,95^2}} = 0,18 < 1$$

και η ροπή αντοχής είναι ίση με:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,18 \cdot 10790,77 \cdot \frac{23,5}{1,00} \text{ kNcm} = 46605 \text{ kNcm} = 466,05 \text{ kNm}$$

Το αντίστοιχο φορτίο αντοχής είναι ίσο με $P_{b,Rd}=9,32 \text{ kN/m}$.

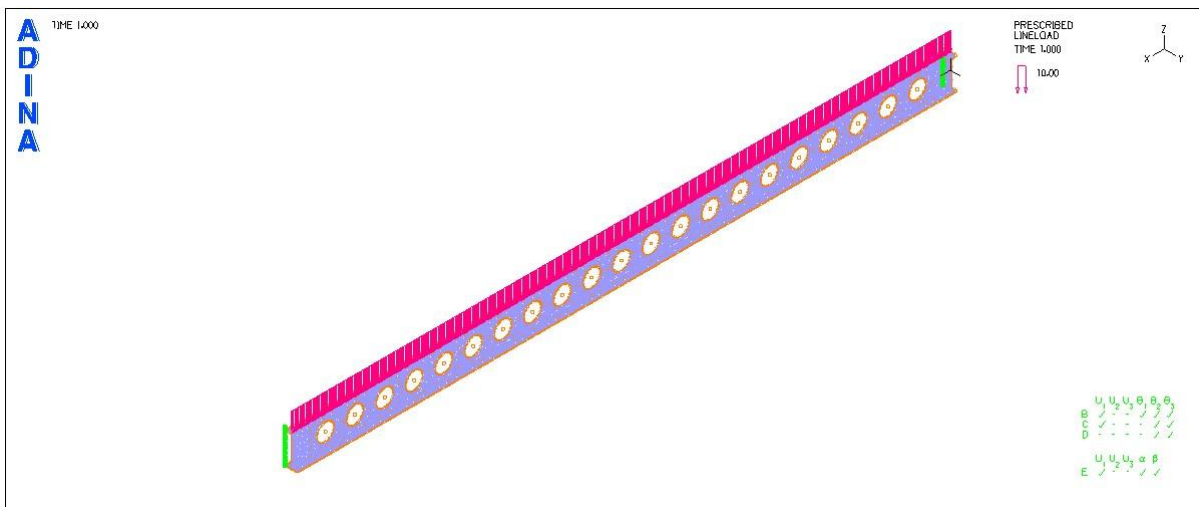
Προκειμένου να υπάρξει ένδειξη για τη **μορφή αστοχίας** του φορέα, θα πρέπει να θεωρηθεί φόρτιση της δοκού για φορτίο ίσο με το φορτίο λυγισμού και να πραγματοποιηθούν όλοι οι απαιτούμενοι έλεγχοι για την αντοχή των κυψελωτών δοκών. Εάν οι τιμές των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών δεν υπερβαίνουν τις αντίστοιχες τιμές αντοχής, αυτόματα προκύπτει ότι κρίσιμη μορφή αστοχίας είναι ο πλευρικός λυγισμός του φορέα.

Ωστόσο, έχει πραγματοποιηθεί ήδη έλεγχος επάρκειας της κυψελωτής δοκού στην παράγραφο 8.5 του προηγούμενου κεφαλαίου για φορτίο ίσο με $q_{sd}=13,0 \text{ kN/m}$, τιμή η οποία σχεδόν συμπίπτει με την τιμή του φορτίου πλευρικού λυγισμού ($P_{cr}=13,39 \text{ kN/m}$). Δεδομένου μάλιστα ότι υπήρχε μεγάλη απόσταση των αναπτυσσόμενων εντάσεων από τις αντοχές σχεδιασμού για όλους τους πιθανούς τρόπους αστοχίας, συνεπάγεται ότι κρίσιμη μορφή αστοχίας είναι ο πλευρικός λυγισμός της κυψελωτής δοκού.

9.2.4 Προσομοίωση κυψελωτής δοκού στο ADINA

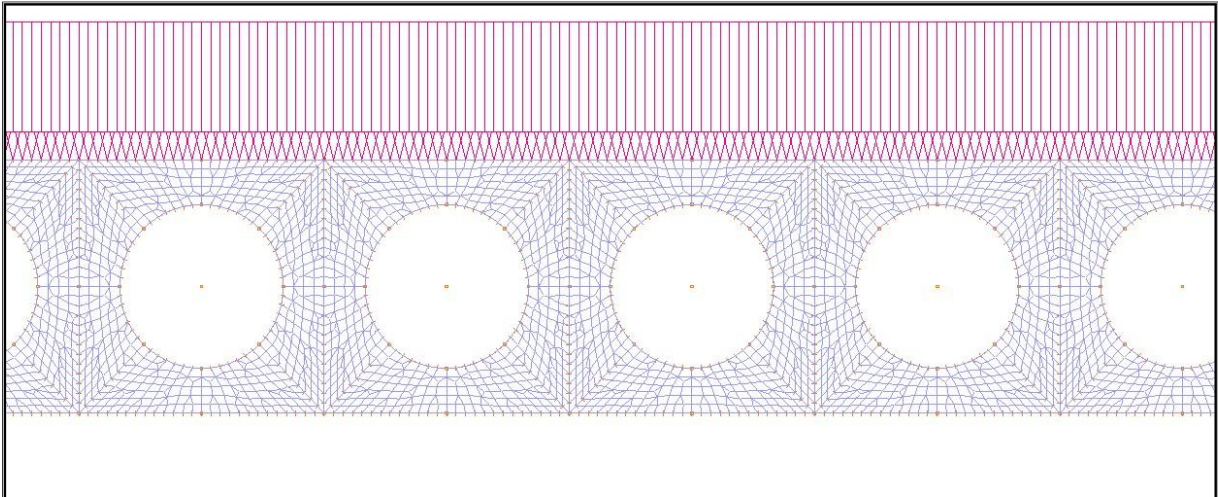
Η αμφιέριστη δοκός μήκους 20m που επιλύθηκε είναι κυψελωτή με 21 κυκλικές οπές διαμέτρου 60cm οι οποίες απέχουν 30cm μεταξύ τους και στα δύο άκρα της έχει συμπαγές τμήμα μήκους 70cm μέχρι την πρώτη οπή. Η σημασία της ενίσχυσης αυτής στα άκρα της δοκού είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς στα σημεία αυτά η τέμνουσα είναι μέγιστη και δεν ενδείκνυται σε καμία περίπτωση η διάνοιξη των οπών ξεκινώντας από τα άκρα της δοκού, γεγονός που θα προκαλούσε αστοχία του φορέα.

Στο σχήμα 9.21 φαίνεται η εικόνα του φορέα που επιλύθηκε και στα σχήματα 9.22 και 9.23 φαίνονται λεπτομέρειες της διακριτοποίησης με βάση τους τρόπους που έχουν παρουσιασθεί. Όπως έχει ήδη επισημανθεί, η διαδικασία για τη δημιουργία των οπών με sheet bodies, αν και πιο εύχρηστη και λιγότερο χρονοβόρα, δε δίνει απολύτως συμμετρική εικόνα διακριτοποίησης σε κάθε μία εκ των επιφανειών γύρω από τις οπές. Ωστόσο, όπως θα αποδειχθεί στη συνέχεια, η λεπτομέρεια αυτή είναι αμελητέα για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, αφού δίνει απειροελάχιστες διαφορές σε σύγκριση με την πρώτη μέθοδο.

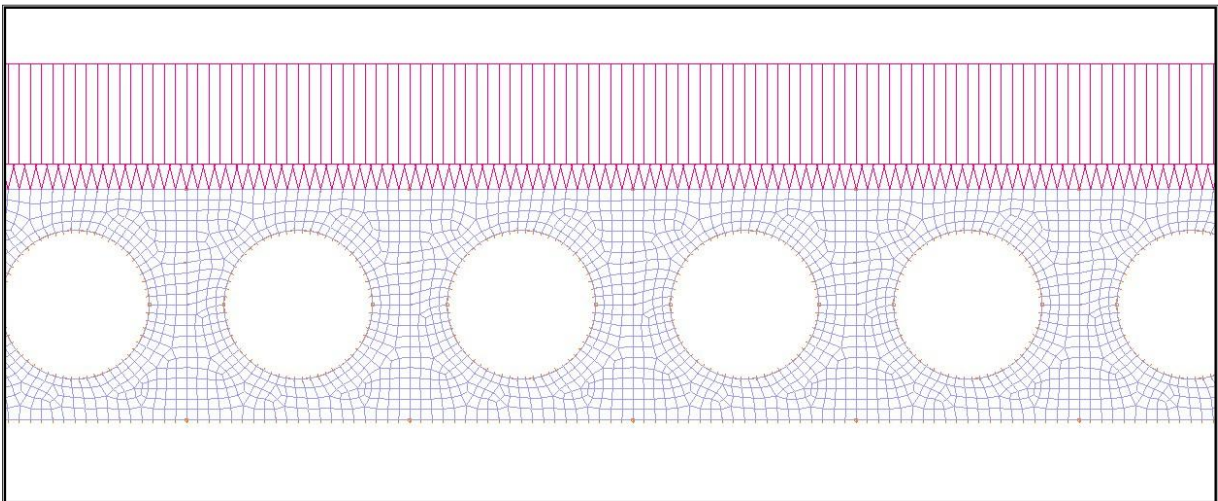


Σχήμα 9.21

Αμφιέριστος φορέας μήκους 20m με ομοιόμορφα κατανομημένο φορτίο 10kN/m στο άνω πέλμα



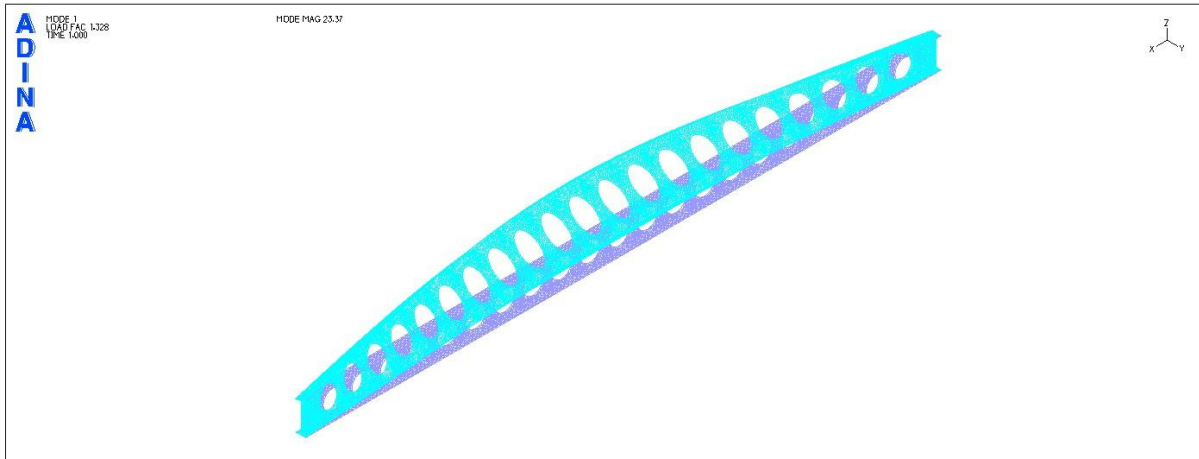
Σχήμα 9.22
Λεπτομέρεια διακριτοποίησης φορέα με βάση την 1^η μέθοδο της παραγράφου 9.1



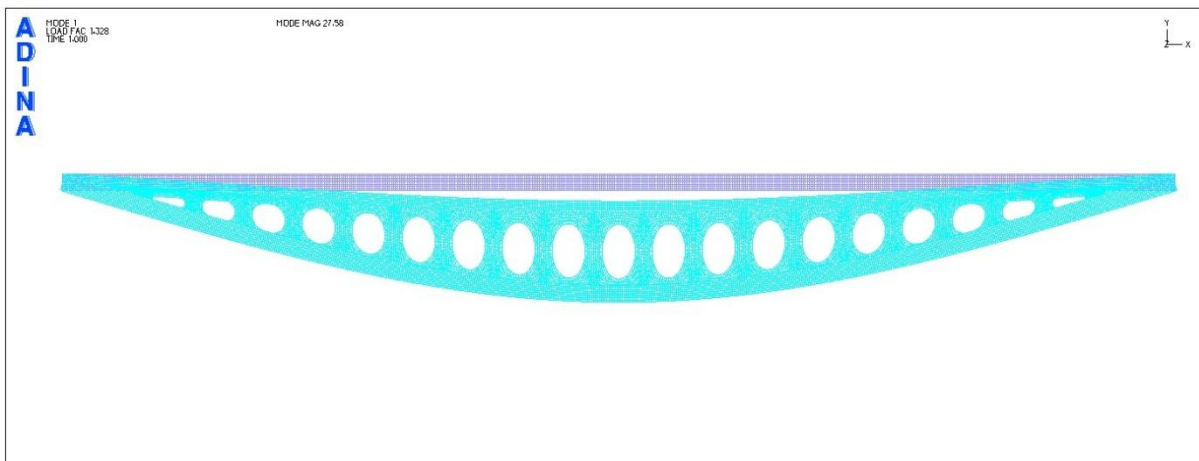
Σχήμα 9.23
Λεπτομέρεια διακριτοποίησης φορέα με βάση τη 2^η μέθοδο της παραγράφου 9.1

9.2.5 Γραμμική ανάλυση λυγισμού της κυψελωτής δοκού στο ADINA

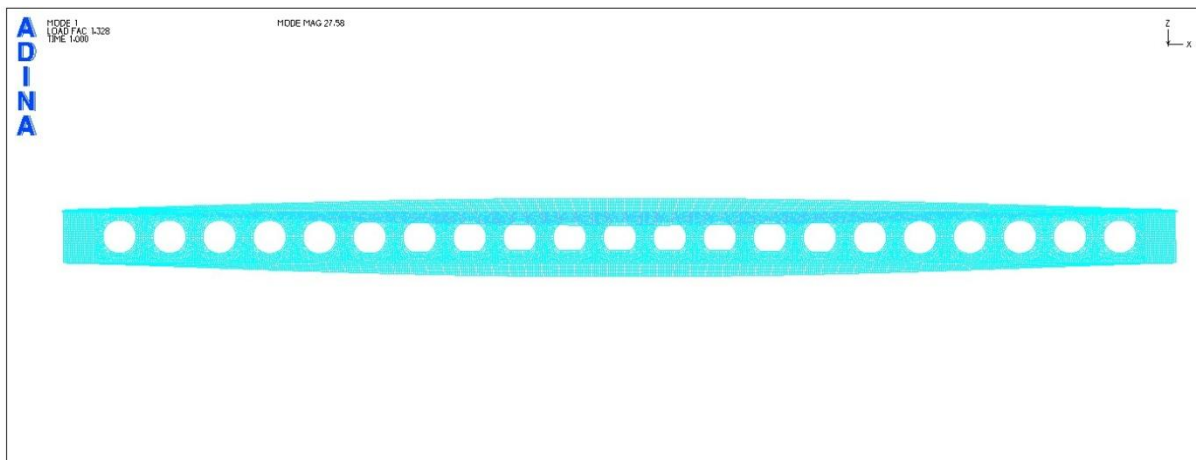
Στα επόμενα σχήματα φαίνονται οι 4 πρώτες ιδιομορφές λυγισμού της αμφιέριστης κυψελωτής δοκού. Οι ιδιομορφές είναι προφανώς πανομοιότυπες για τις 2 μεθόδους, τα δε φορτία λυγισμού που διαφέρουν ελάχιστα, παρουσιάζονται στον πίνακα 9.1.



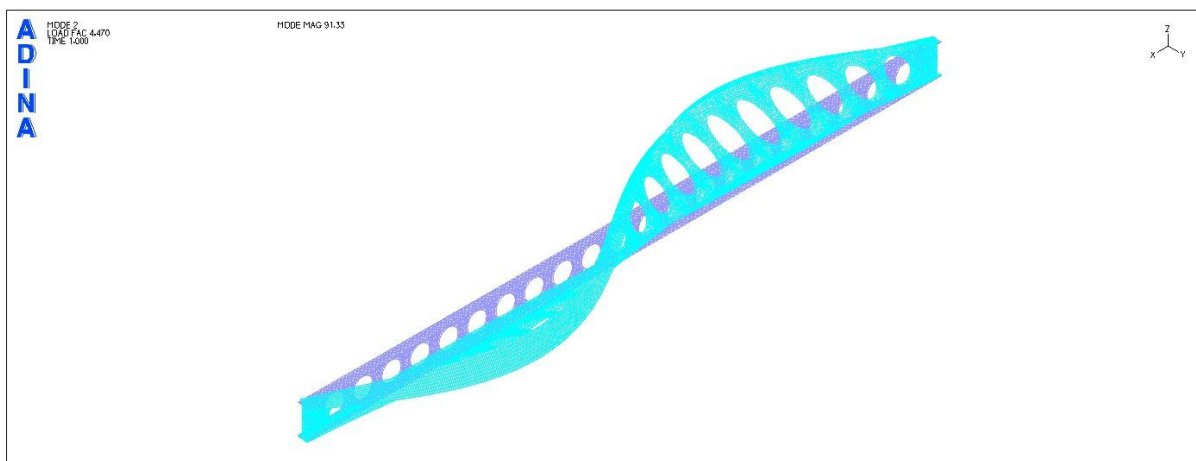
Σχήμα 9.24
1^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



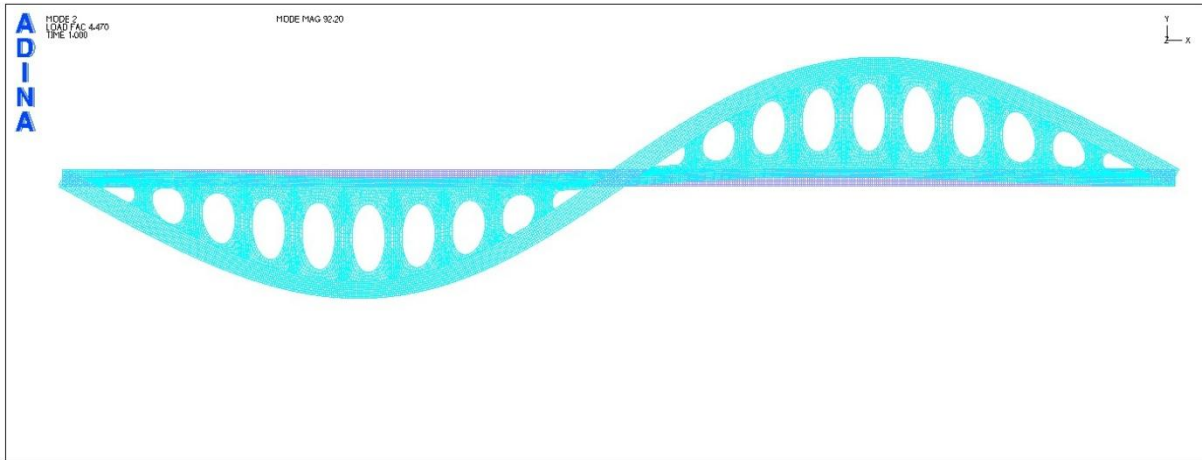
Σχήμα 9.25
1^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



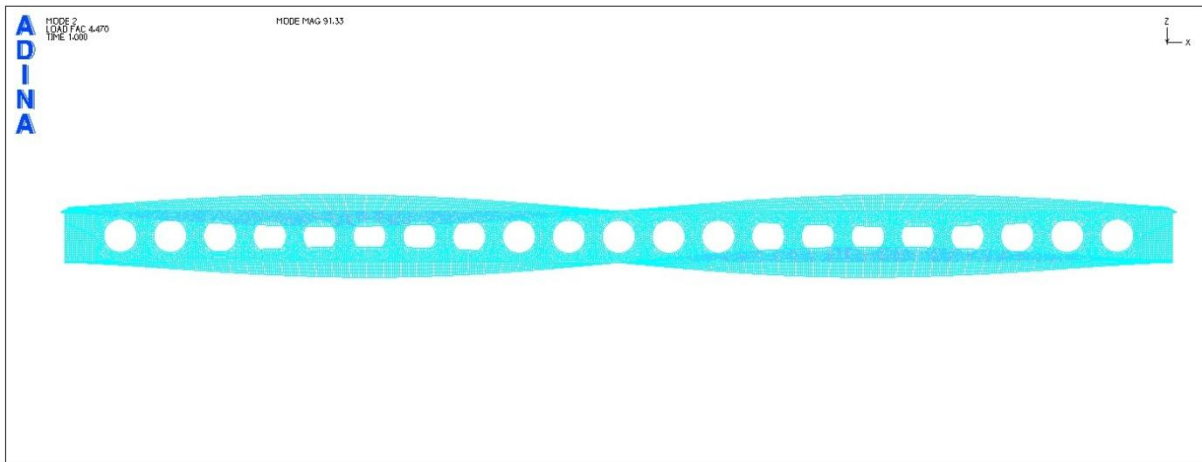
Σχήμα 9.26
1^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)



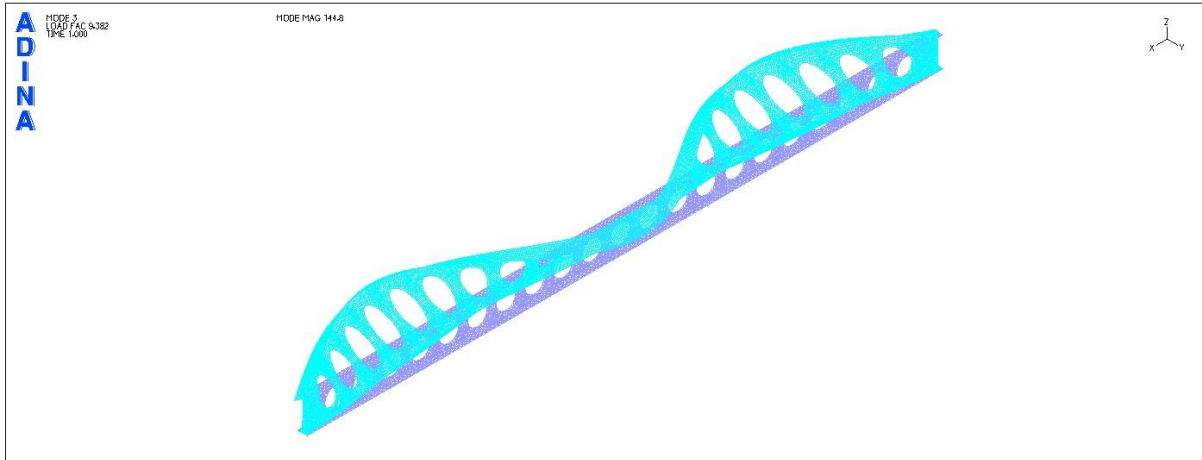
Σχήμα 9.27
2^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



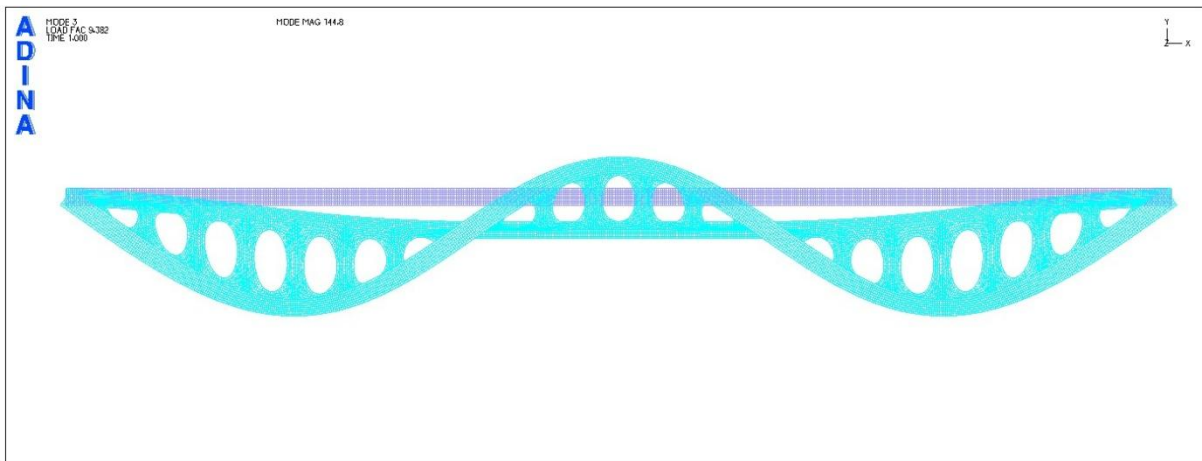
Σχήμα 9.28
2^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



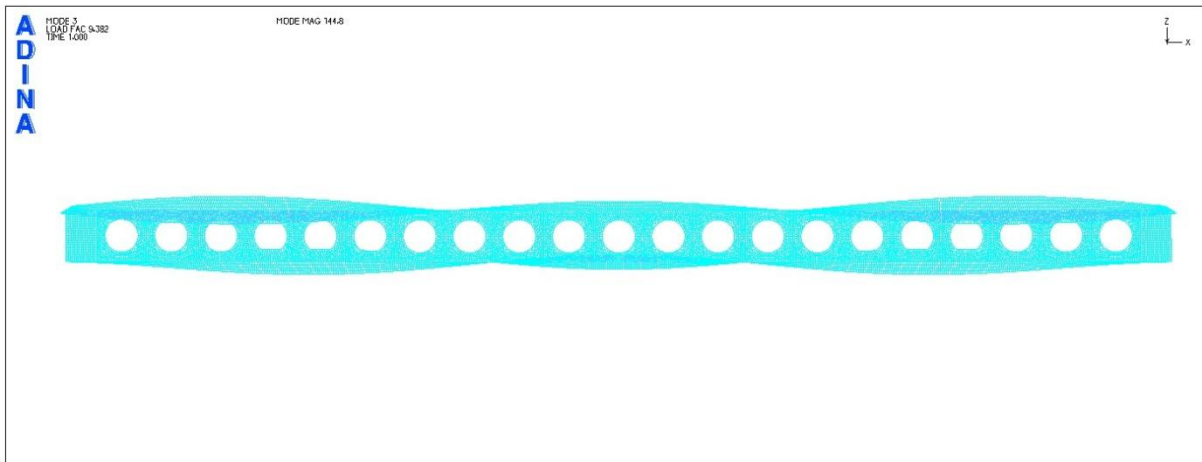
Σχήμα 9.29
2^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)



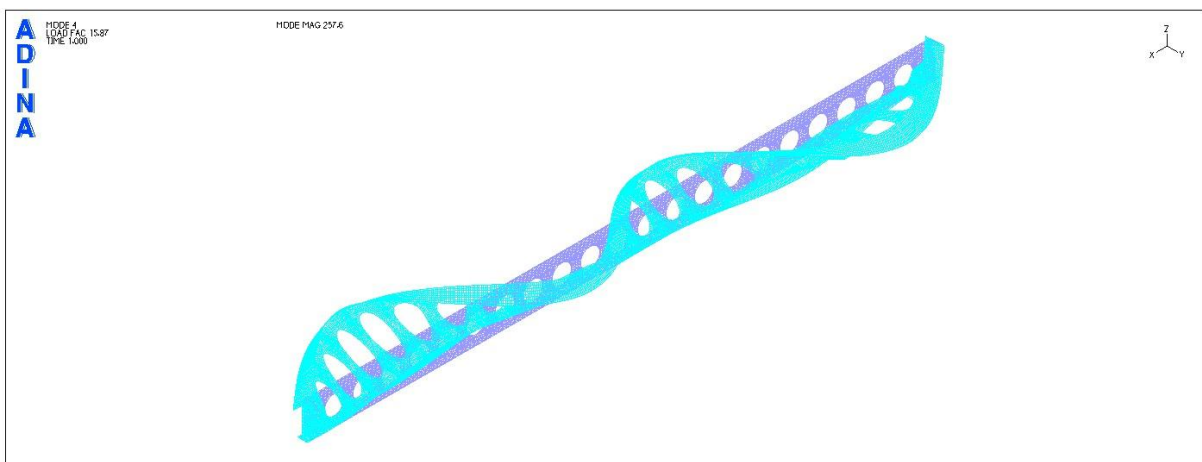
Σχήμα 9.30
3^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



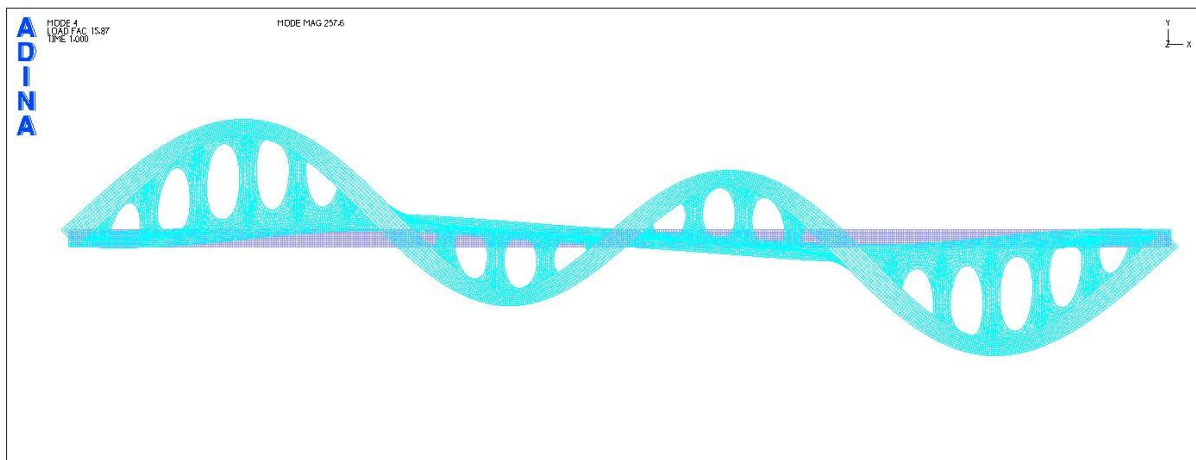
Σχήμα 9.31
3^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



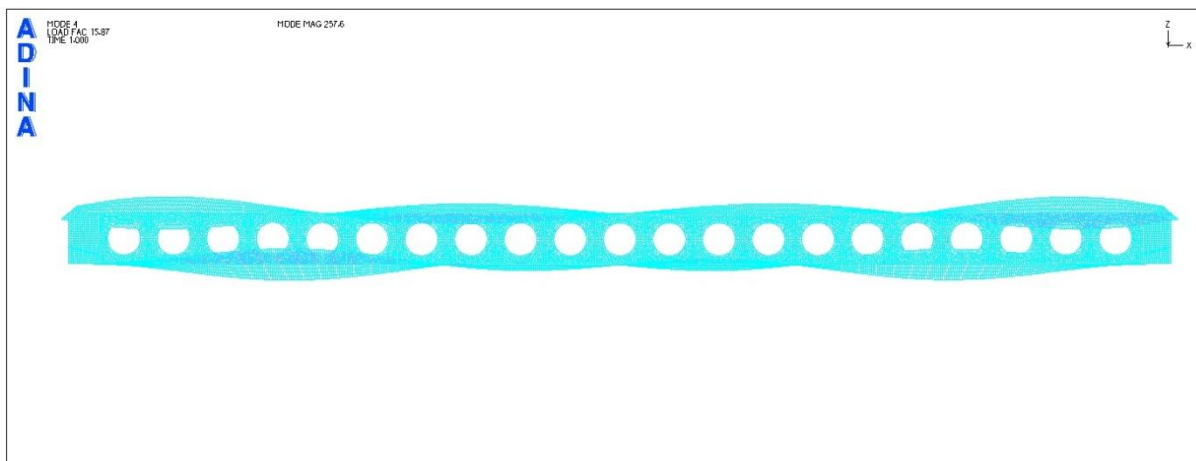
Σχήμα 9.32
3^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)



Σχήμα 9.33
4^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 9.34
4^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



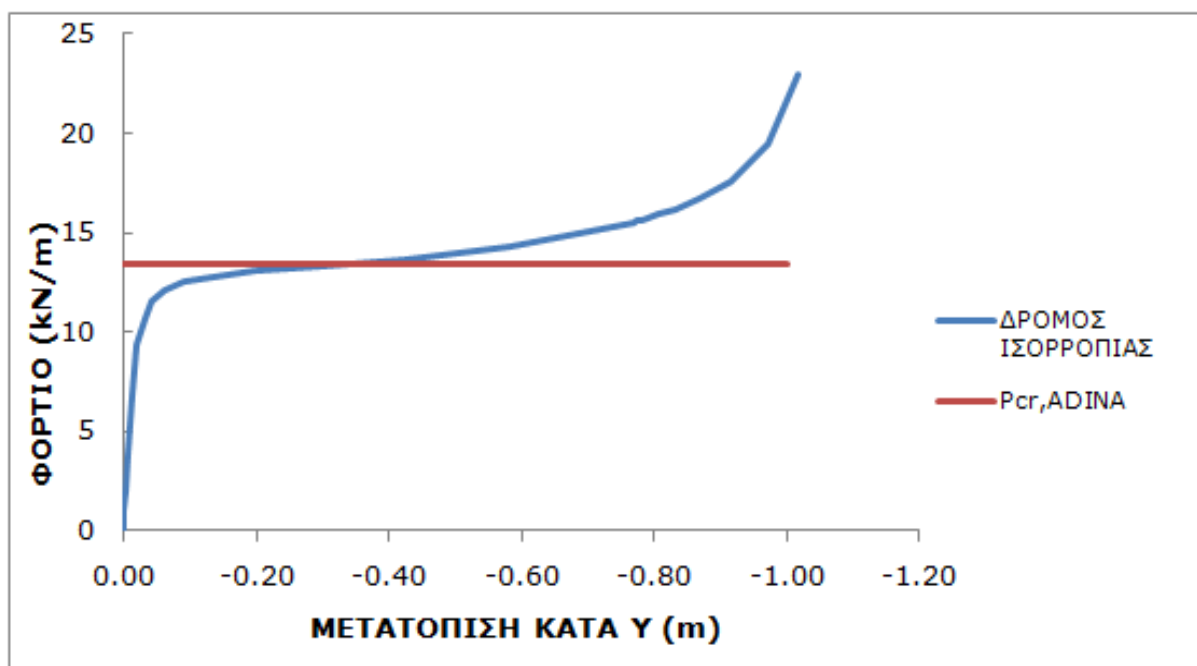
Σχήμα 9.35
4^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)

Φορτίο λυγισμού (kN/m)		
	1 ^η μέθοδος προσομοίωσης	2 ^η μέθοδος προσομοίωσης
1 ^η ιδιομορφή λυγισμού	13,28	13,32
2 ^η ιδιομορφή λυγισμού	44,70	44,78
3 ^η ιδιομορφή λυγισμού	93,82	93,91
4 ^η ιδιομορφή λυγισμού	158,70	158,80

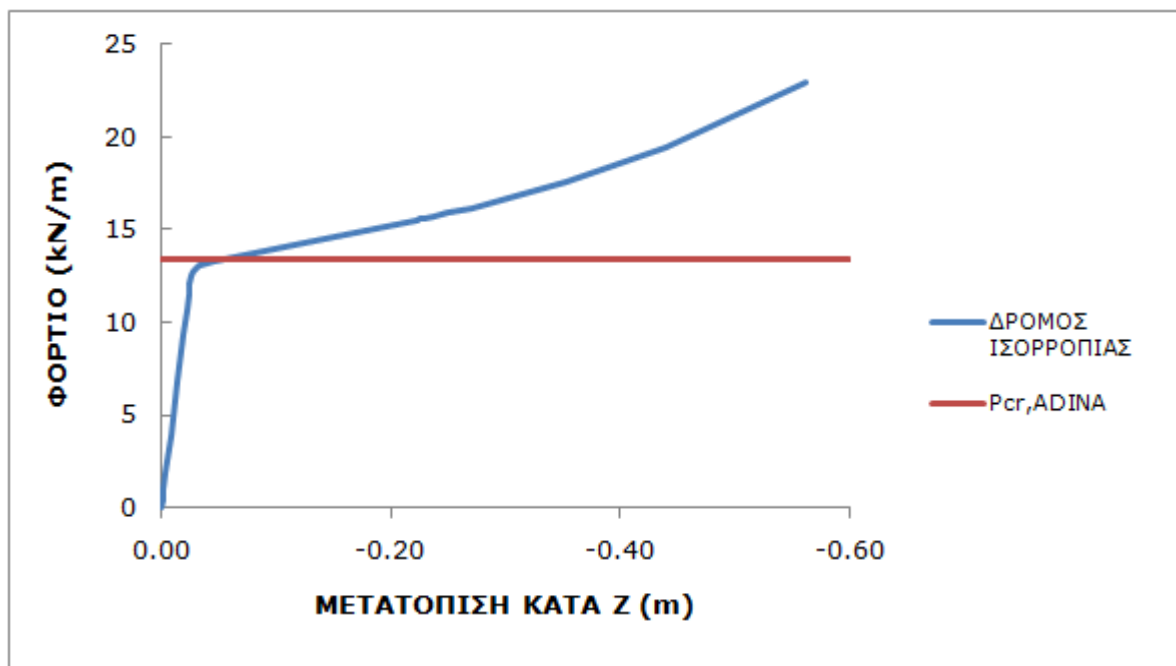
Πίνακας 9.1
Φορτία λυγισμού για κάθε ιδιομορφή

9.2.6 Μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας του φορέα

Πραγματοποιείται μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με τη μέθοδο Arc-Length (collapse analysis) όπου θεωρείται ως σημείο αναφοράς ο κόμβος της μεσαίας διατομής στο σημείο συνένωσης κορμού και κάτω πέλματος. Δίνεται αρχική ατέλεια ίση με 5cm κατά τη διεύθυνση γ, σύμφωνη με την πρώτη ιδιομορφή της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού. Η ατέλεια δίνεται στο σημείο συνένωσης κορμού και άνω πέλματος της μεσαίας διατομής της δοκού.



Σχήμα 9.36
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



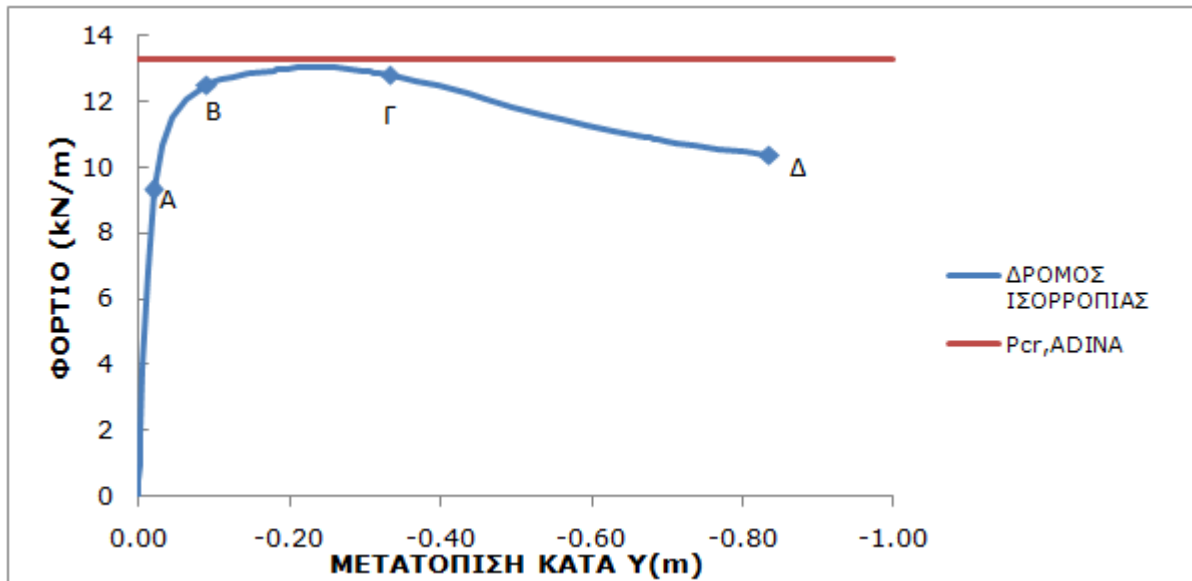
Σχήμα 9.37

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

Παρατηρούμε ότι για τιμή φορτίου σχεδόν ίση με αυτή του φορτίου λυγισμού έχουμε σημαντική μείωση της κλίσης του διαγράμματος. Η τιμή αυτή είναι λίγο μικρότερη από την τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού, όπως έχει υπολογιστεί από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού, λόγω της ύπαρξης της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας.

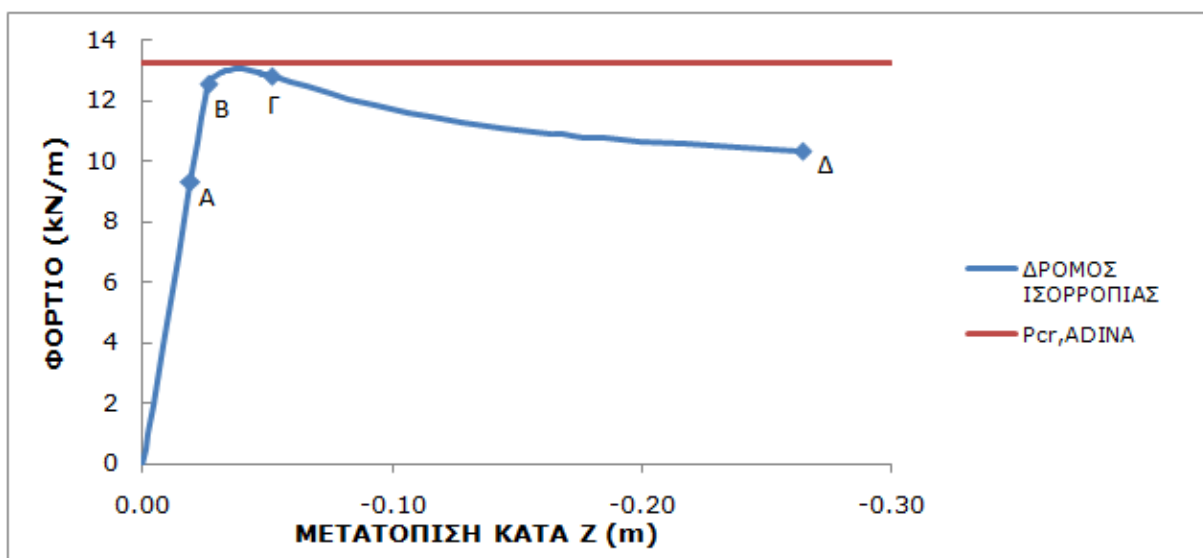
9.2.7 Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας του φορέα

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί συνδυασμένη ανάλυση μη γραμμικότητας υλικού και γεωμετρίας προκειμένου να λάβουμε ακριβή αποτελέσματα για την πραγματική συμπεριφορά του φορέα και να έχουμε σαφή εικόνα της μεταλυγισμικής του συμπεριφοράς. Για το λόγο αυτό γίνεται πάλι η προηγούμενη μη γραμμική ανάλυση αλλά με υλικό ελαστικό-τελείως πλαστικό αυτήν τη φορά. Χρησιμοποιείται χάλυβας S235 χωρίς κράτυνση και δίνεται πάλι ατέλεια μεγέθους 5cm με το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής. Η μη γραμμική ανάλυση γίνεται με τη μέθοδο Arc-Length.



Σχήμα 9.38

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



Σχήμα 9.39

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

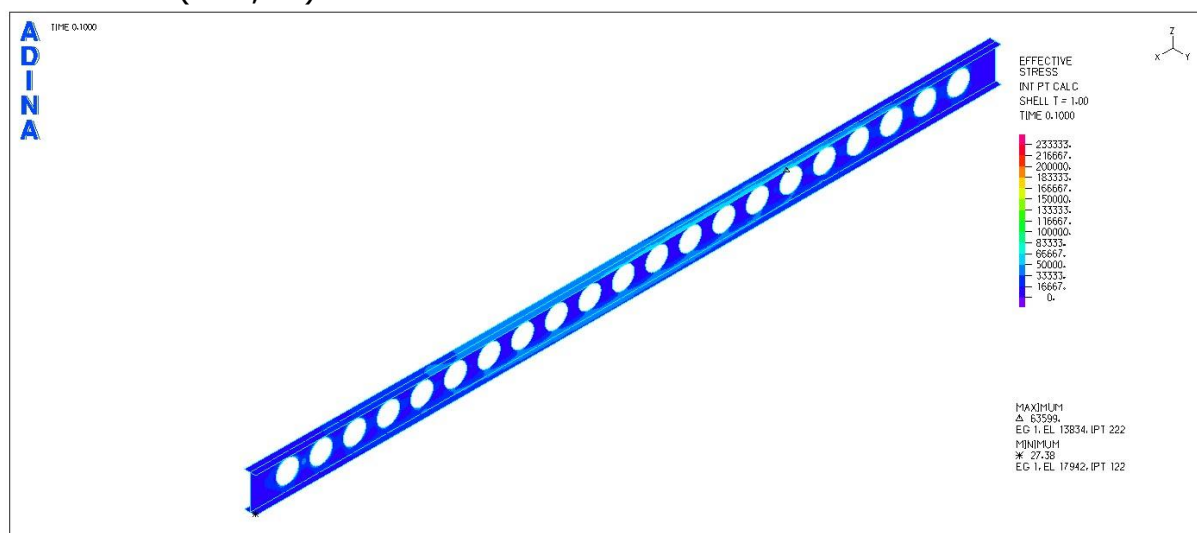
Παρατηρούμε ότι οι δρόμοι ισορροπίας για μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας παρουσιάζουν καθοδικό κλάδο μετά το λυγισμό της δοκού. Η τιμή του φορτίου που αντιστοιχεί σε λυγισμό είναι λίγο μικρότερη από το κρίσιμο φορτίο λυγισμού που έχει βρεθεί, εξαιτίας της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας όπως επισημάνθηκε και προηγουμένως. Η μη γραμμικότητα του υλικού δεν επιτρέπει στη δοκό μεταλυγισμική αντοχή, αλλά αντιθέτως επιταχύνει την αστοχία του φορέα.

Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται εικόνες των τάσεων και των παραμορφώσεων της δοκού για τα 4 χαρακτηριστικά σημεία που σημειώνονται στους δρόμους ισορροπίας.

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ VON MISES

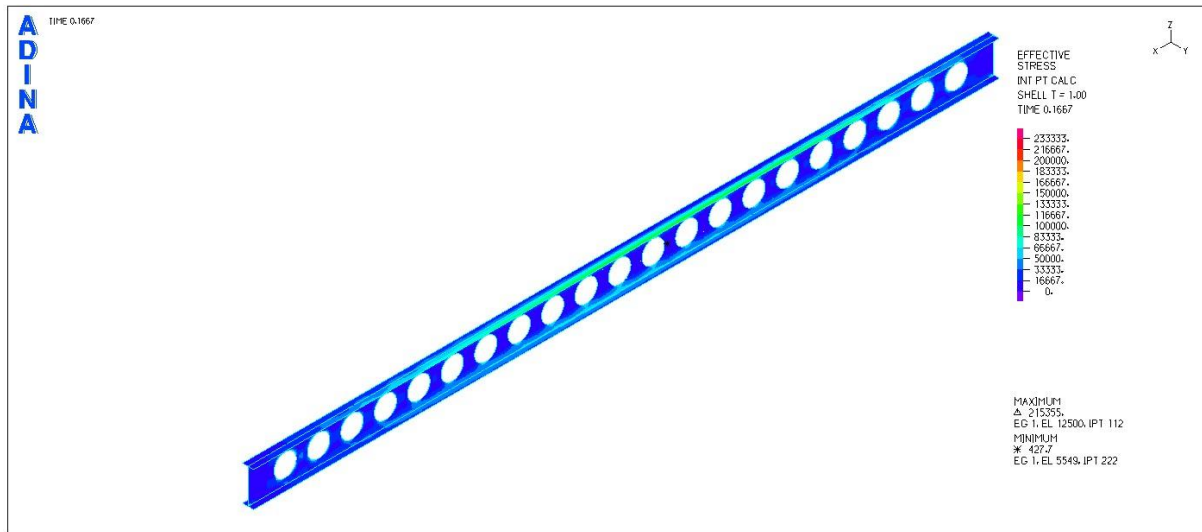
ΣΗΜΕΙΟ Α (t=0,10)



Σχήμα 9.40

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Α (προοπτικό)

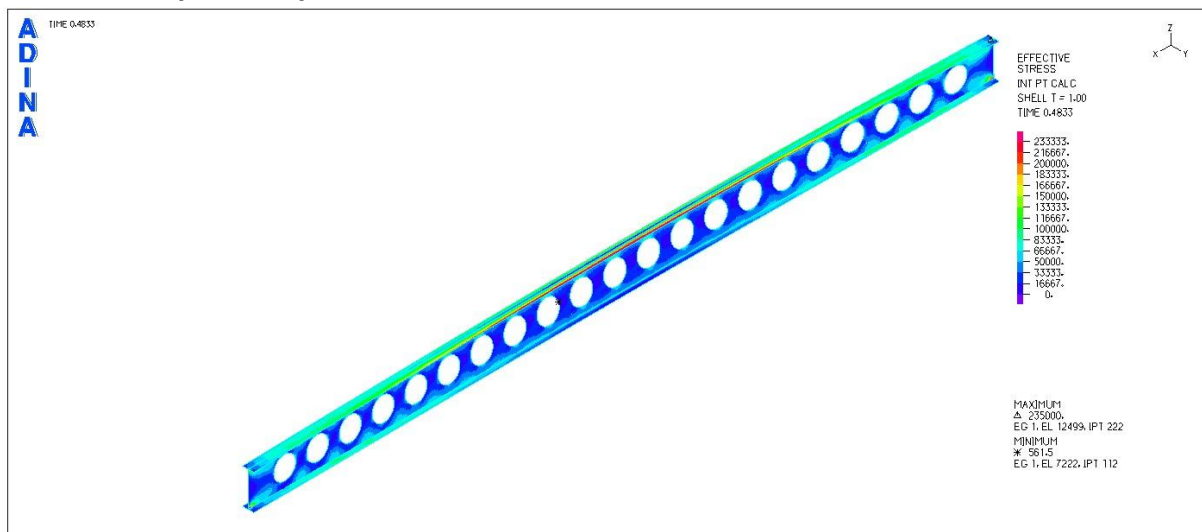
ΣΗΜΕΙΟ Β (t=0,17)



Σχήμα 9.41

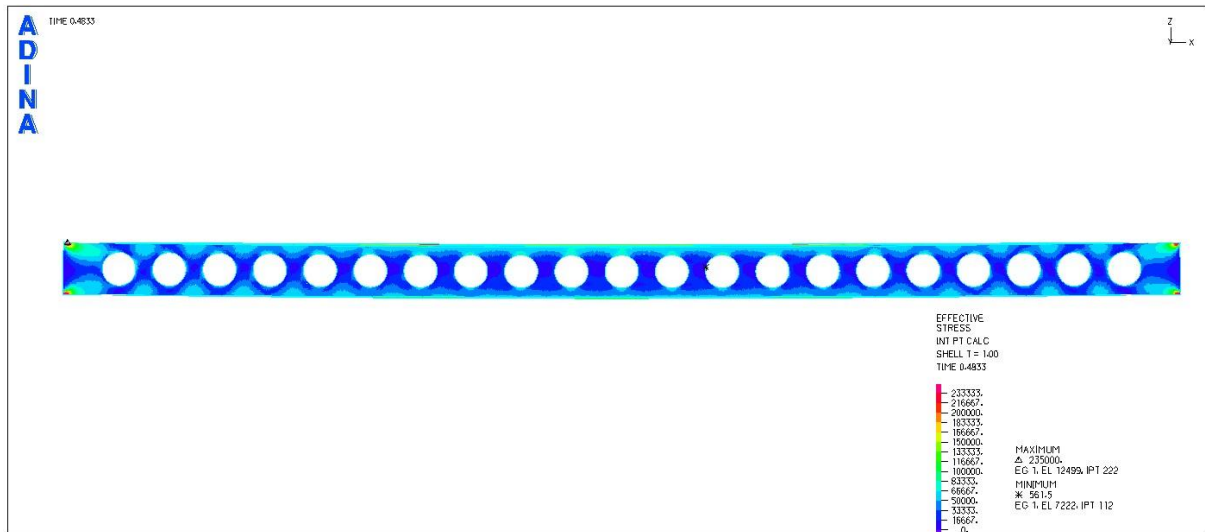
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Β (προοπτικό)

ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,48)



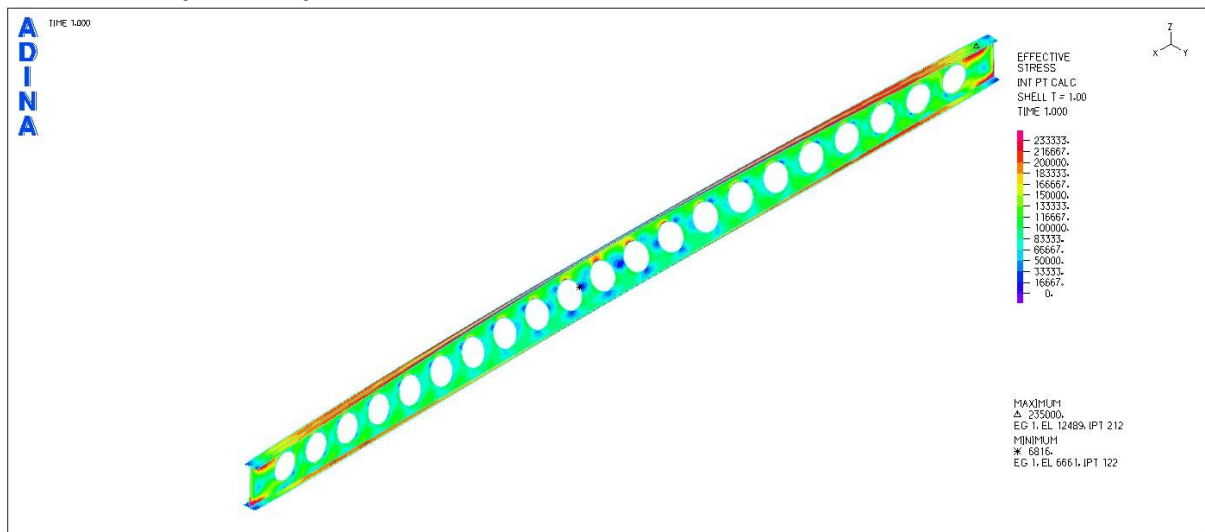
Σχήμα 9.42

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)

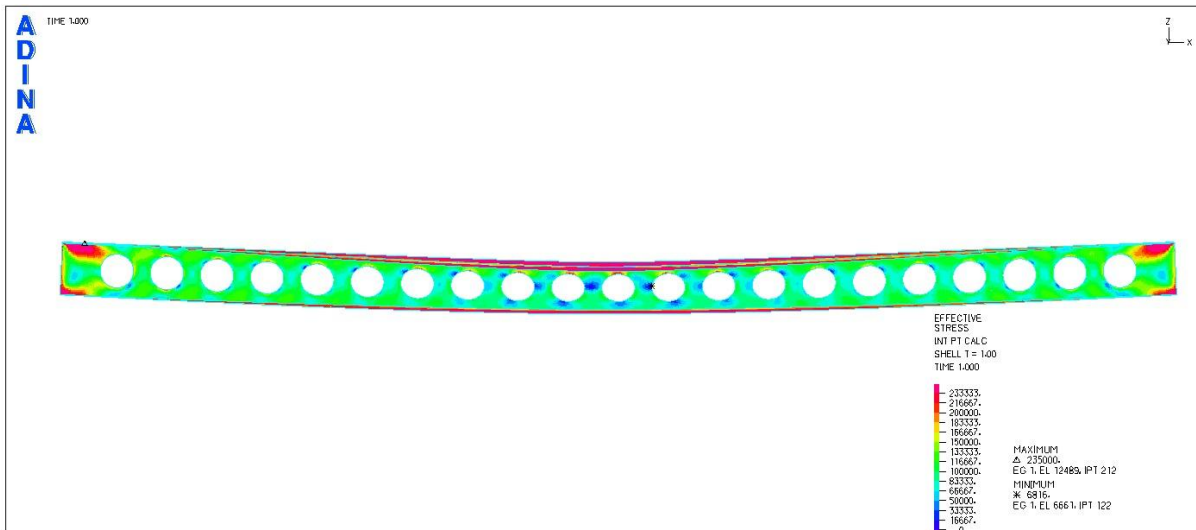


Σχήμα 9.43
 Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

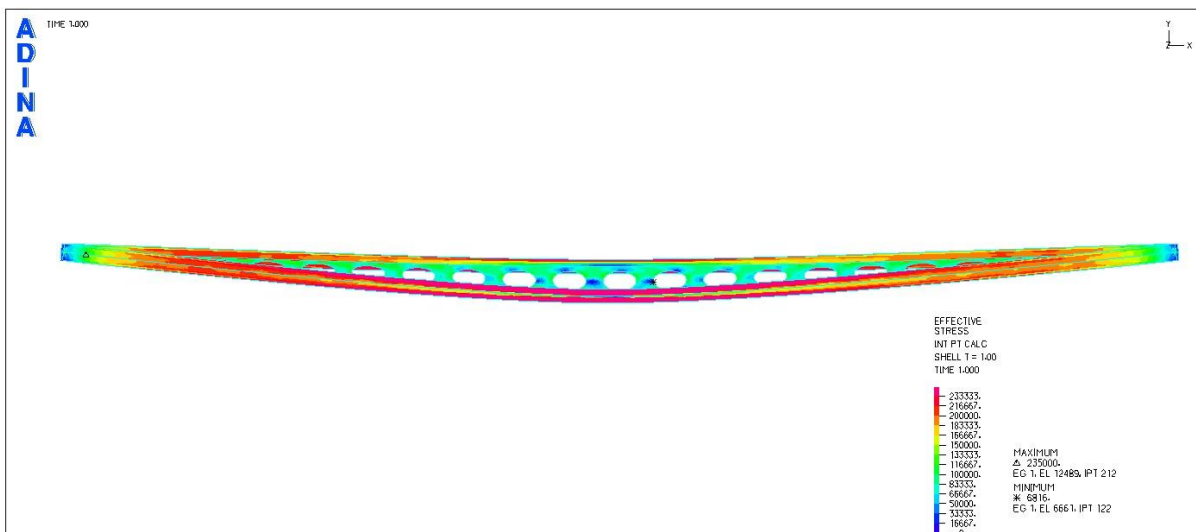
ΣΗΜΕΙΟ Δ (t=1,00)



Σχήμα 9.44
 Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (προοπτικό)



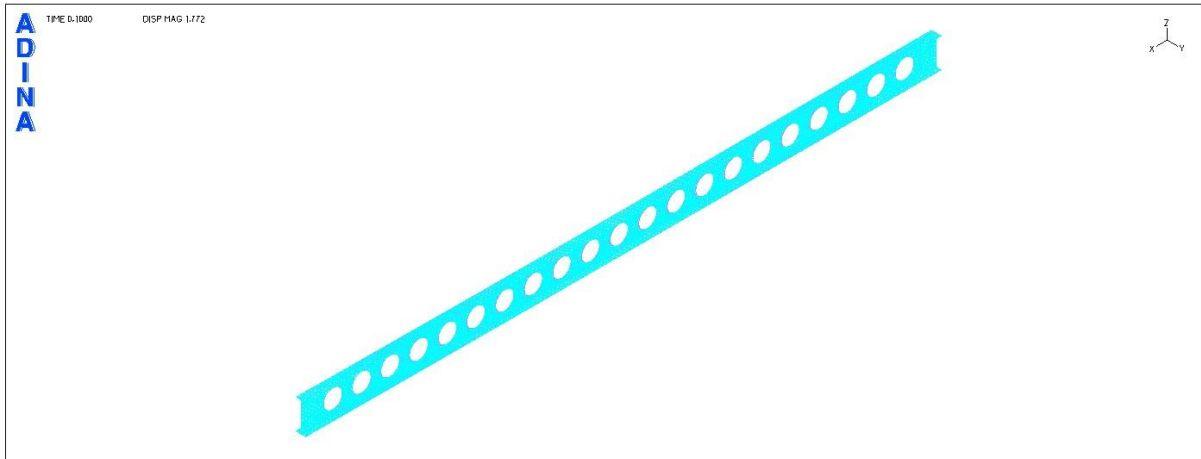
Σχήμα 9.45
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (όψη)



Σχήμα 9.46
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (κάτοψη)

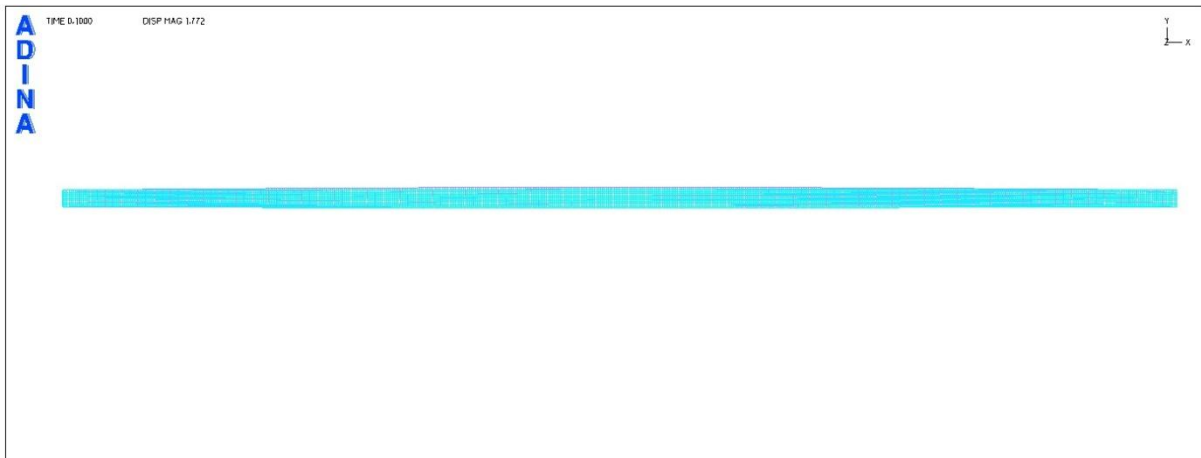
ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΣΗΜΕΙΟ A ($t=0,10$)



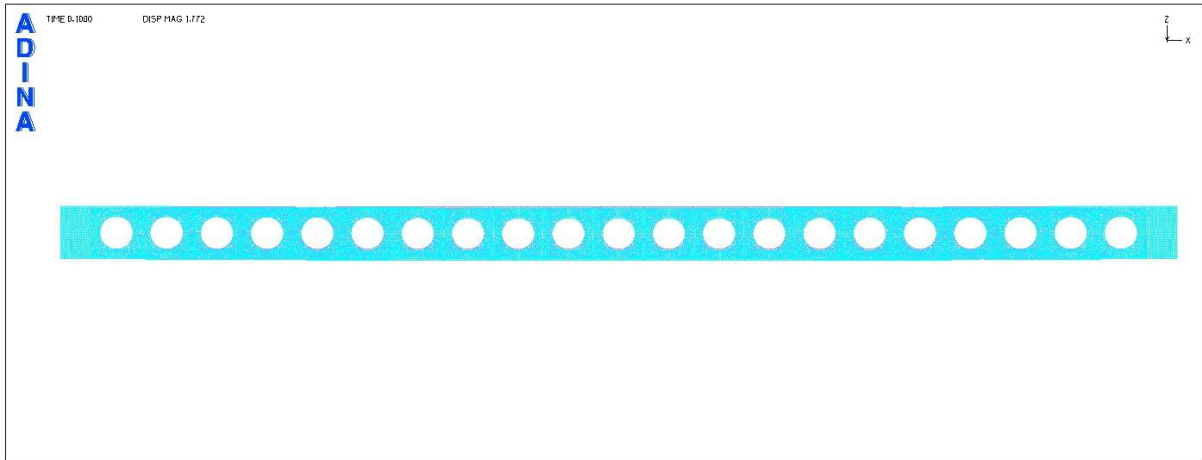
Σχήμα 9.47

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο A (προοπτικό)



Σχήμα 9.48

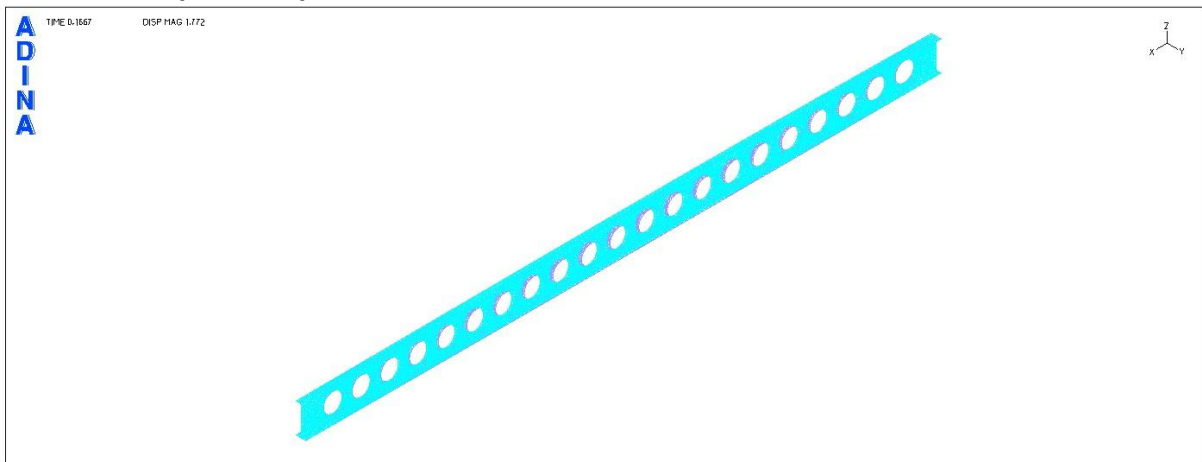
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο A (κάτοψη)



Σχήμα 9.49

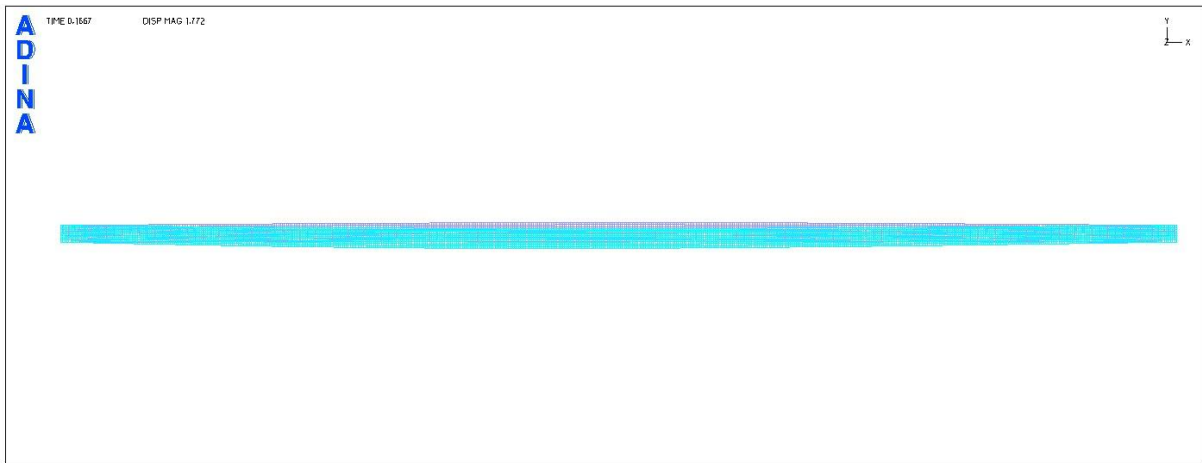
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο A (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ B (t=0,17)

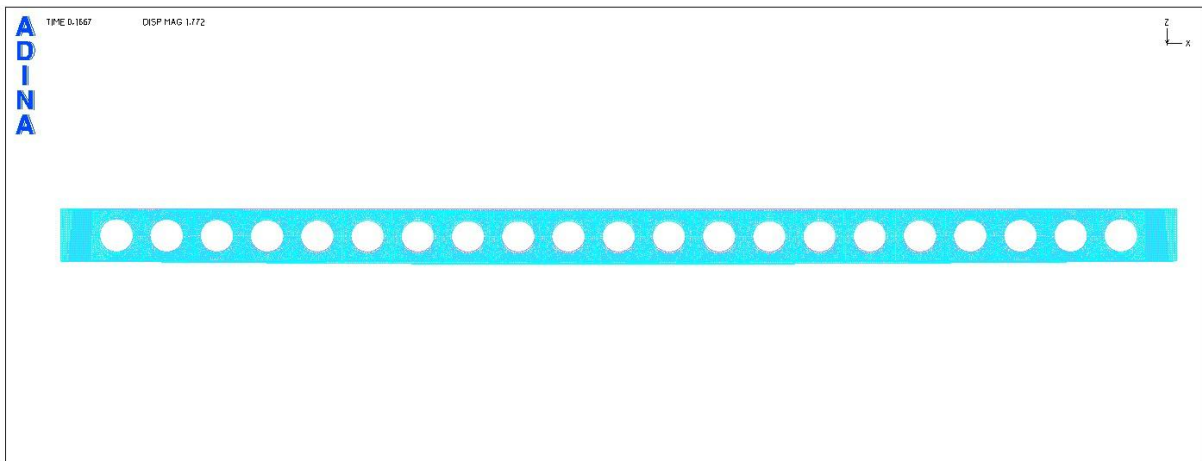


Σχήμα 9.50

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο B (προοπτικό)

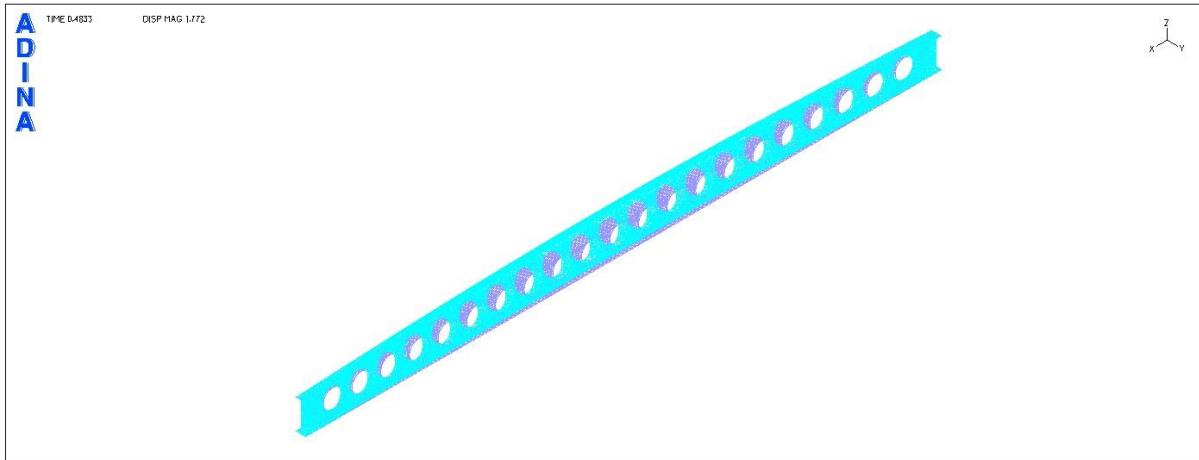


Σχήμα 9.51
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο B (κάτοψη)



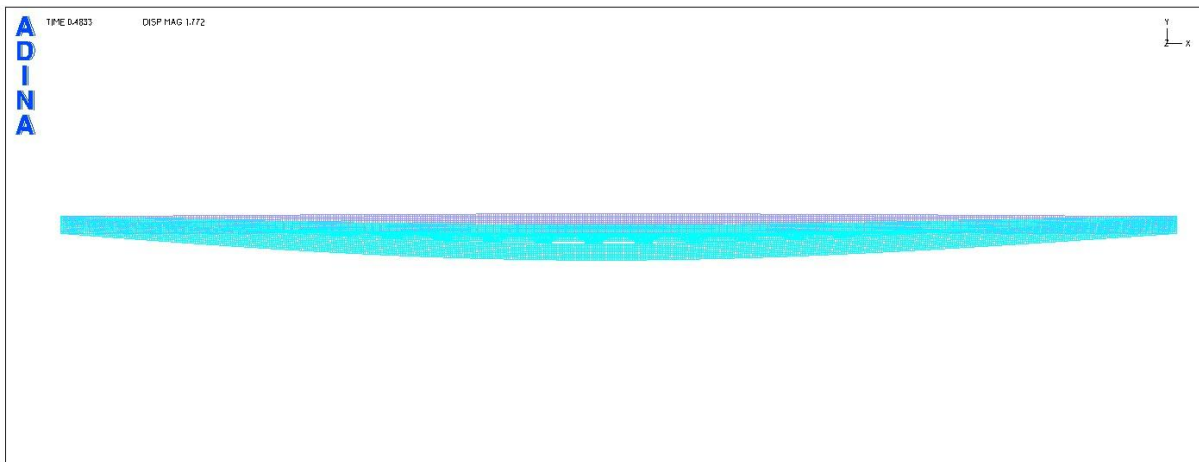
Σχήμα 9.52
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο B (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,48)



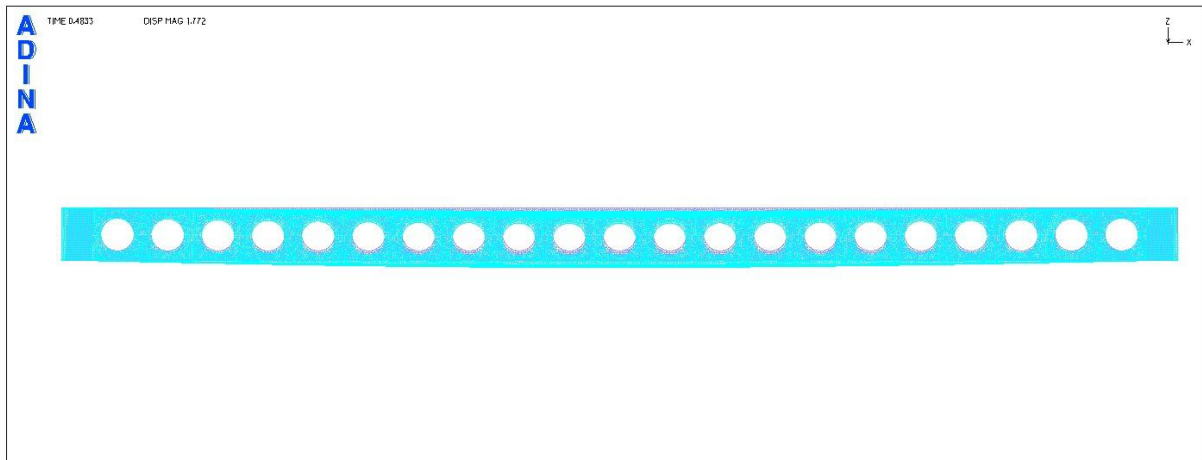
Σχήμα 9.53

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)



Σχήμα 9.54

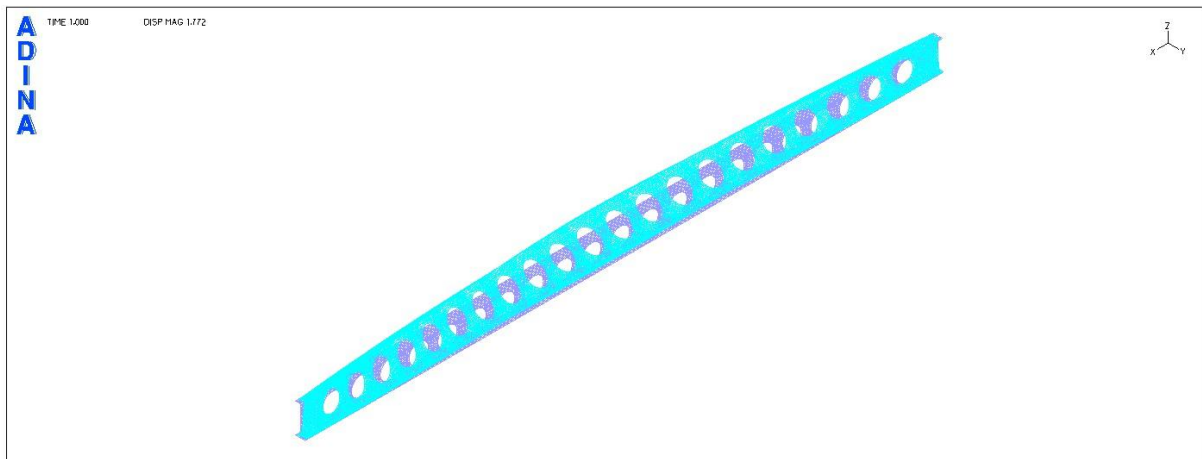
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (κάτοψη)



Σχήμα 9.55

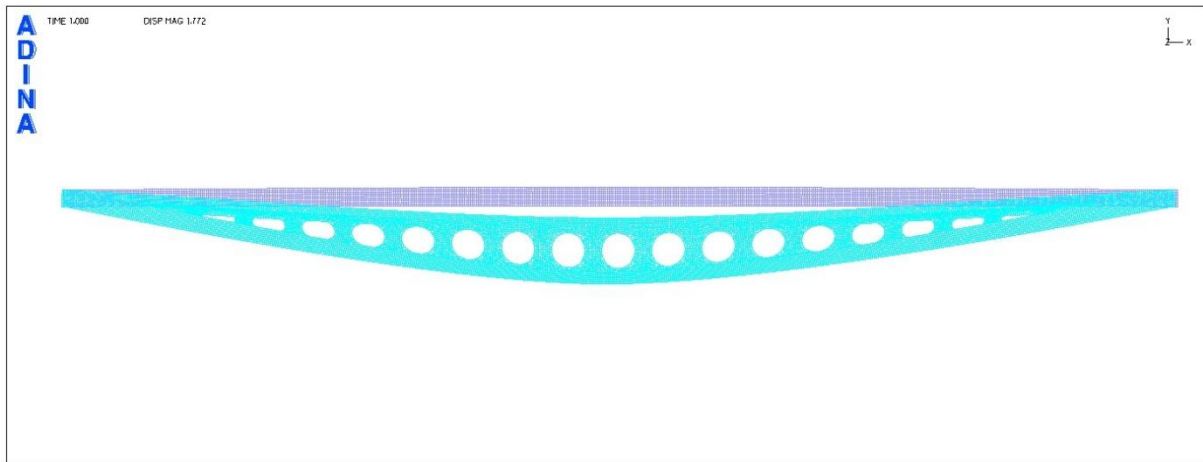
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ Δ (t=1,00)



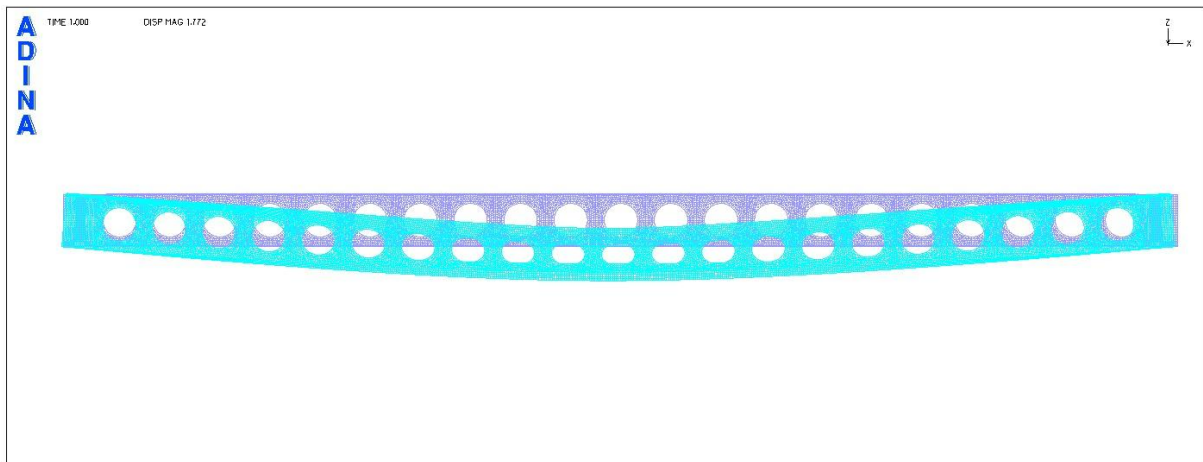
Σχήμα 9.56

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (προοπτικό)



Σχήμα 9.57

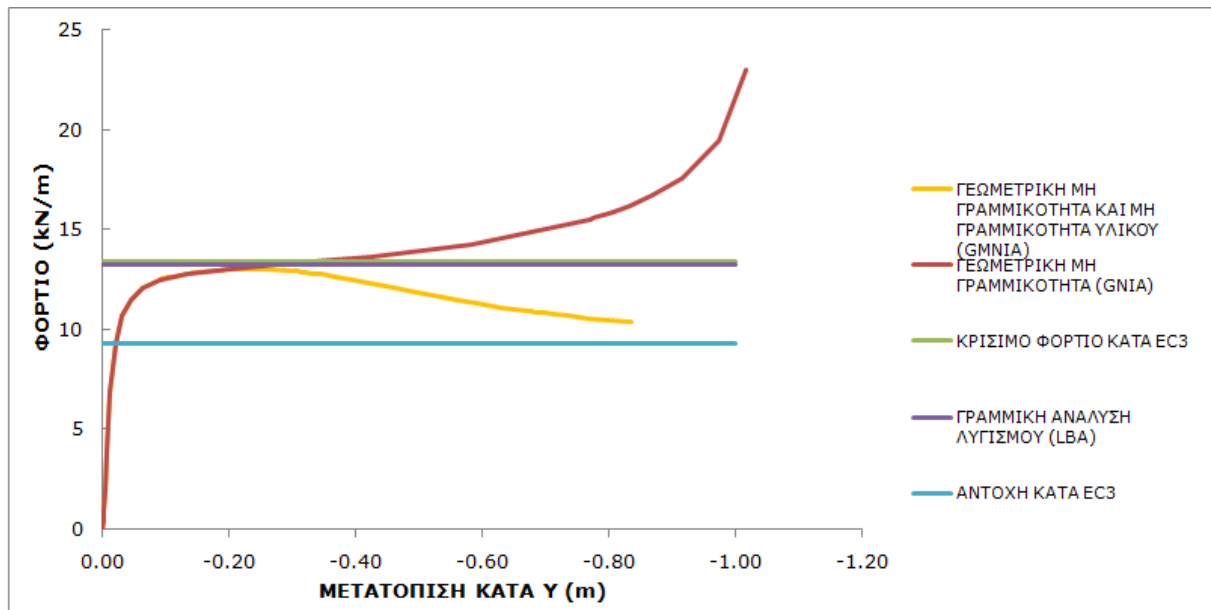
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (κάτοψη)



Σχήμα 9.58

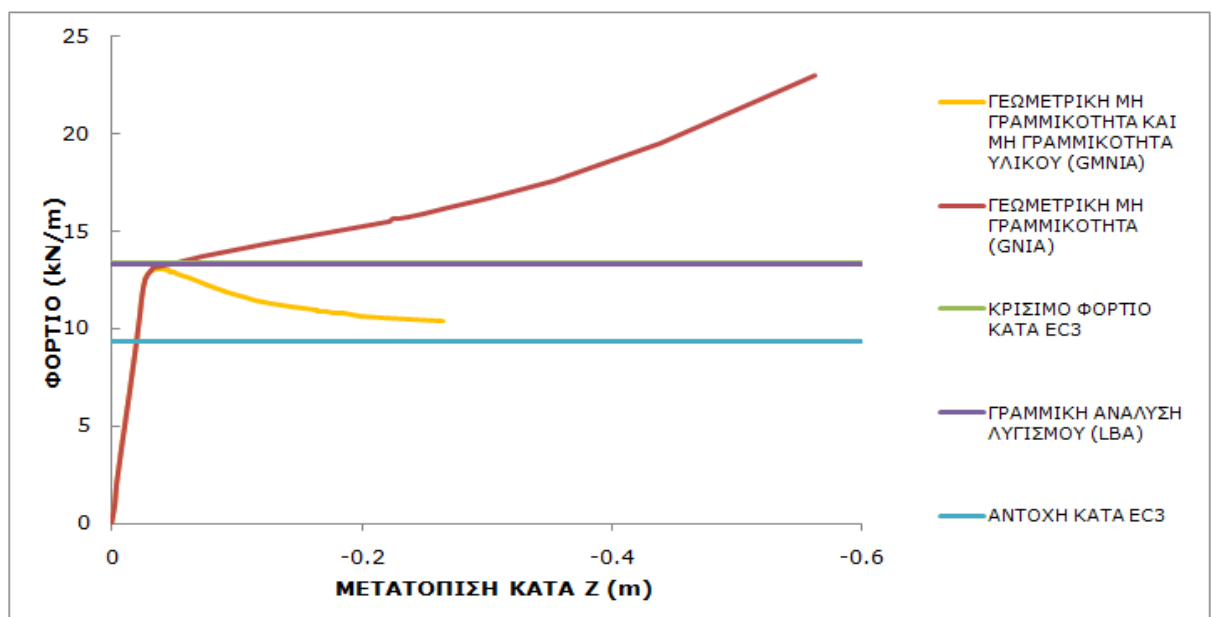
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (όψη)

9.2.8 Συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας για όλες τις αναλύσεις της κυψελωτής δοκού



Σχήμα 9.59

Δρόμοι ισορροπίας για τα 2 είδη μη γραμμικότητας που εξετάσθηκαν

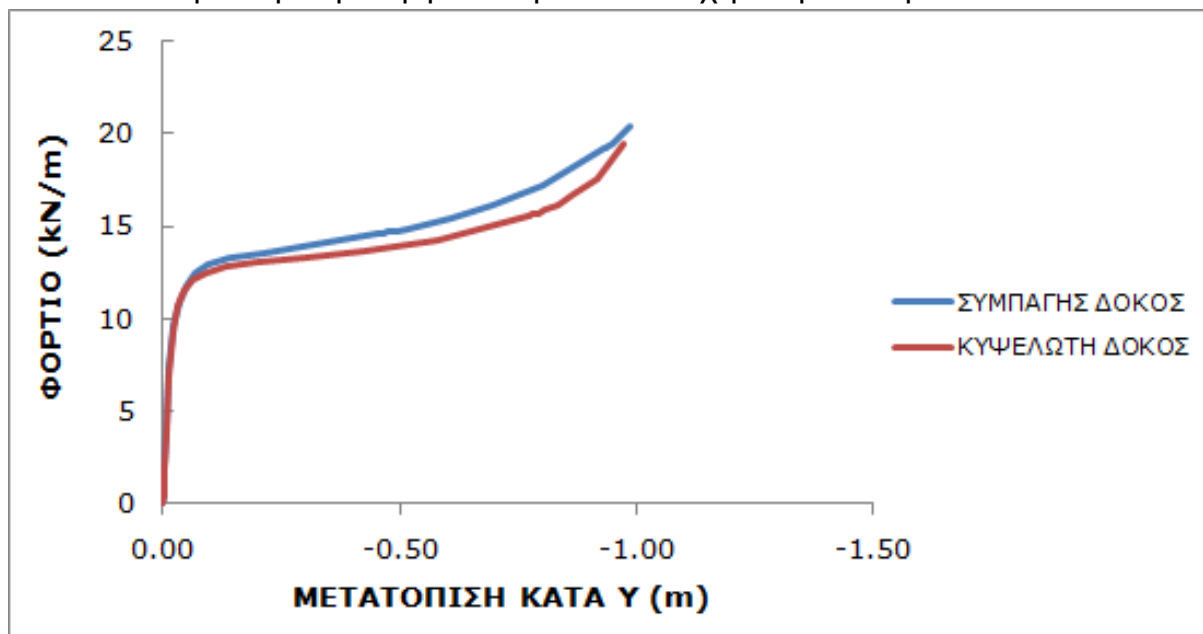


Σχήμα 9.60

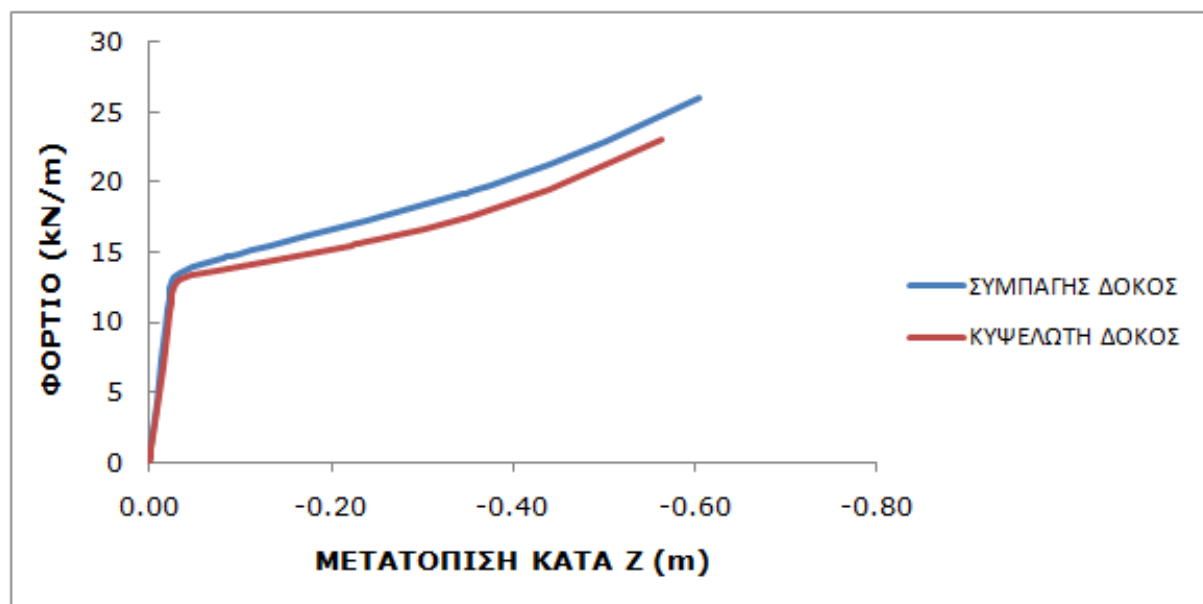
Δρόμοι ισορροπίας για τα 2 είδη μη γραμμικότητας που εξετάσθηκαν

9.2.9 Συγκριτική παρουσίαση των δρόμων ισορροπίας για τις μη γραμμικές αναλύσεις συμπαγούς και κυψελωτής δοκού

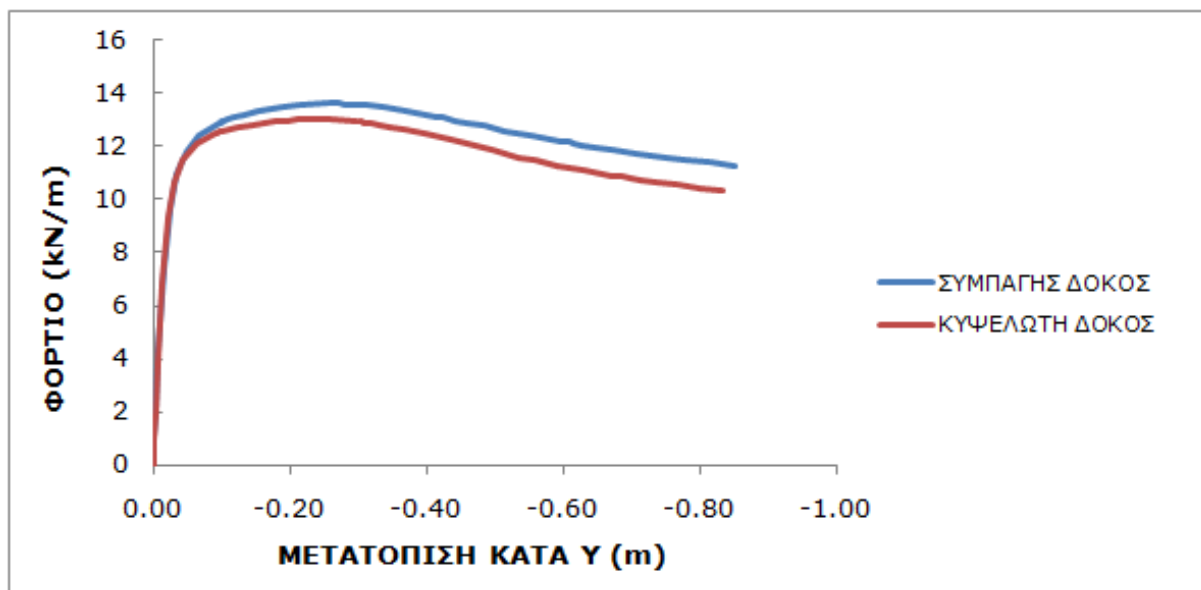
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα οι δρόμοι ισορροπίας που έχουν προκύψει από τις μη γραμμικές αναλύσεις στο ADINA για τη συμπαγή και την αντίστοιχη κυψελωτή δοκό.



Σχήμα 9.61
Δρόμοι ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας

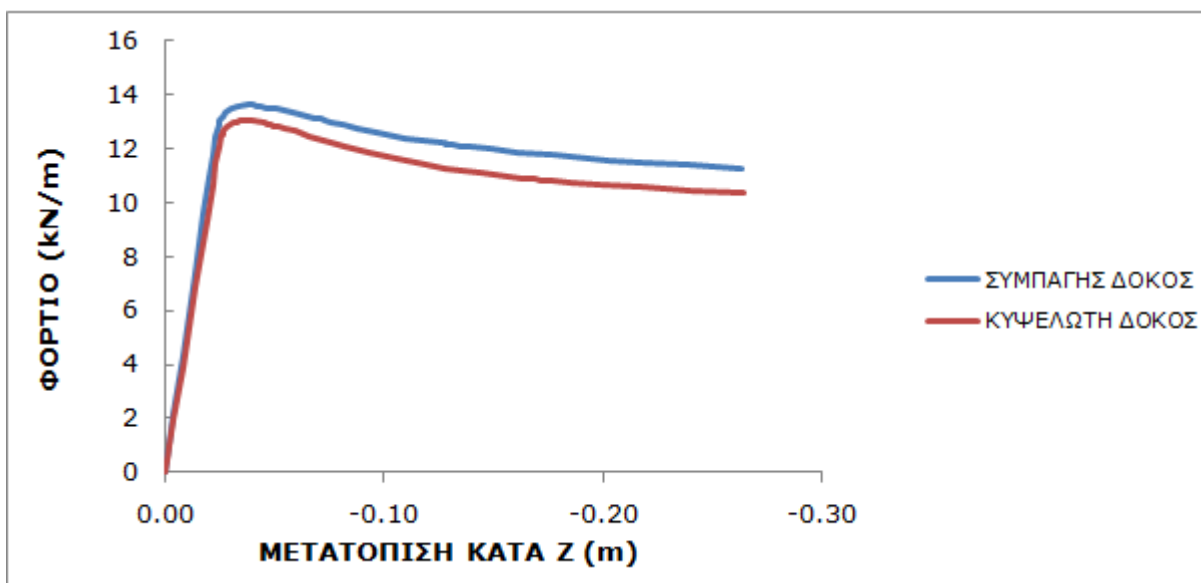


Σχήμα 9.62
Δρόμοι ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας



Σχήμα 9.63

Δρόμοι ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας



Σχήμα 9.64

Δρόμοι ισορροπίας για μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας

Παρατηρούμε ότι η επιρροή των οπών στον πλευρικό λυγισμό της δοκού δεν είναι ιδιαίτερης σημασίας, καθώς τόσο το κρίσιμο φορτίο όσο και η μεταλυγισμική συμπεριφορά της δοκού επηρεάζονται ελάχιστα από την παρουσία των κυκλικών οπών, σε σύγκριση με την αντίστοιχη συμπαγή δοκό.

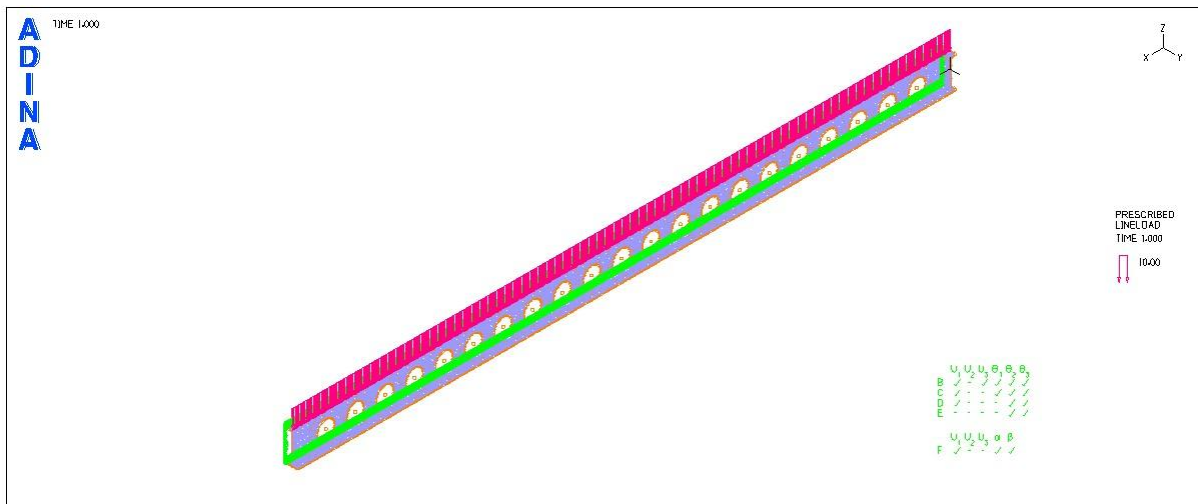
9.3 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για την πλευρικά εξασφαλισμένη δοκό μήκους 20m με κυκλικές οπές

Στην εξεταζόμενη κυψελωτή δοκό μήκους 20m, εάν τοποθετηθούν πλευρικές εξασφαλίσεις σε όλο το μήκος της εμποδίζεται ο πλευρικός λυγισμός. Αναμενόμενες μορφές αστοχίας είναι συνεπώς: αστοχία των απλών ταυ στις κρίσιμες τομές, αστοχία των συμπαγών τμημάτων του κορμού, αστοχία του κορμού στις στηρίξεις, τοπικός λυγισμός.

Η γραμμική ανάλυση λυγισμού με το ADINA θα δώσει την τιμή του φορτίου για το οποίο πραγματοποιείται τοπικός λυγισμός της δοκού και θα γίνουν οι έλεγχοι επάρκειας για την τιμή αυτή, ώστε να αποδειχθεί η μορφή αστοχίας της δοκού.

9.3.1 Γραμμική ανάλυση λυγισμού της κυψελωτής δοκού 20m με πλευρικές εξασφαλίσεις στο ADINA

Πραγματοποιείται στο ADINA γραμμική ανάλυση λυγισμού του φορέα έχοντας τοποθετήσει πλευρικές εξασφαλίσεις καθ'όλο το μήκος της κυψελωτής δοκού στα σημεία συνένωσης κορμού-άνω πέλματος και κορμού-κάτω πέλματος.

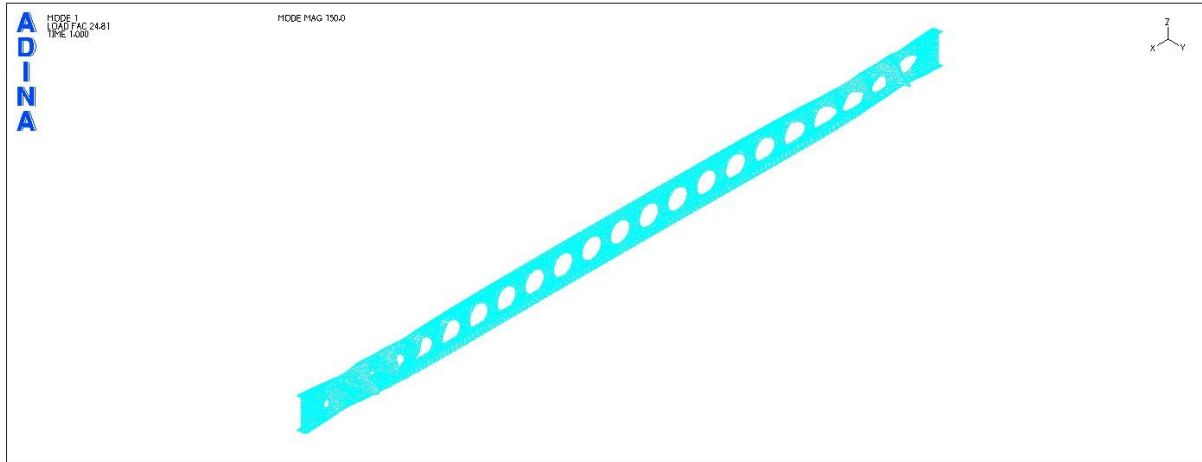


Σχήμα 9.65

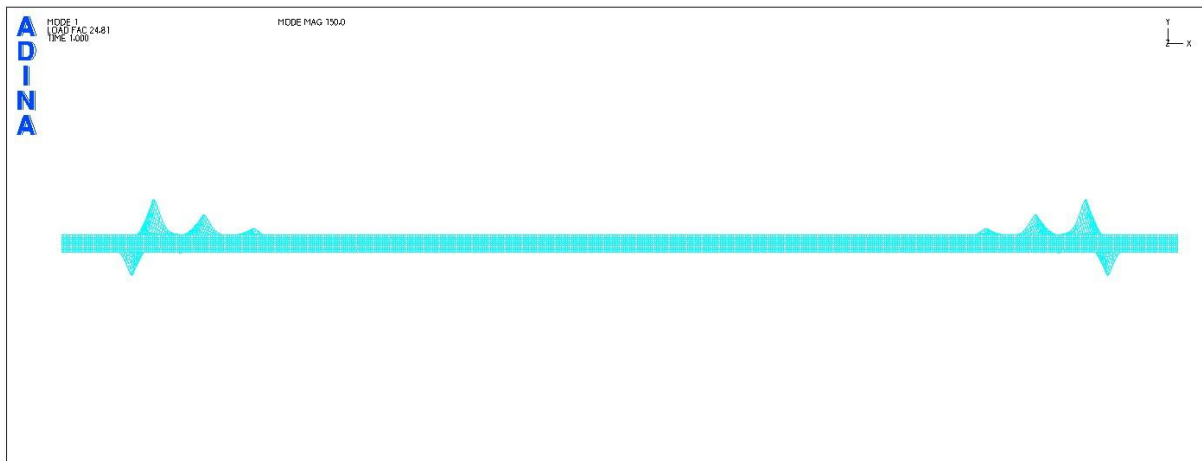
Αμφιέριστη κυψελωτή δοκός μήκους 20m με πλευρικές εξασφαλίσεις στην οποία ασκείται ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο 10kN/m στο άνω πέλμα

Η ανάλυση γίνεται τόσο για τον 1^ο όσο και για το 2^ο τρόπο προσομοίωσης που έχουν παρουσιασθεί στην παράγραφο 9.1. Παρακάτω φαίνονται οι 4 πρώτες ιδιομορφές λυγισμού και για τις 2 περιπτώσεις.

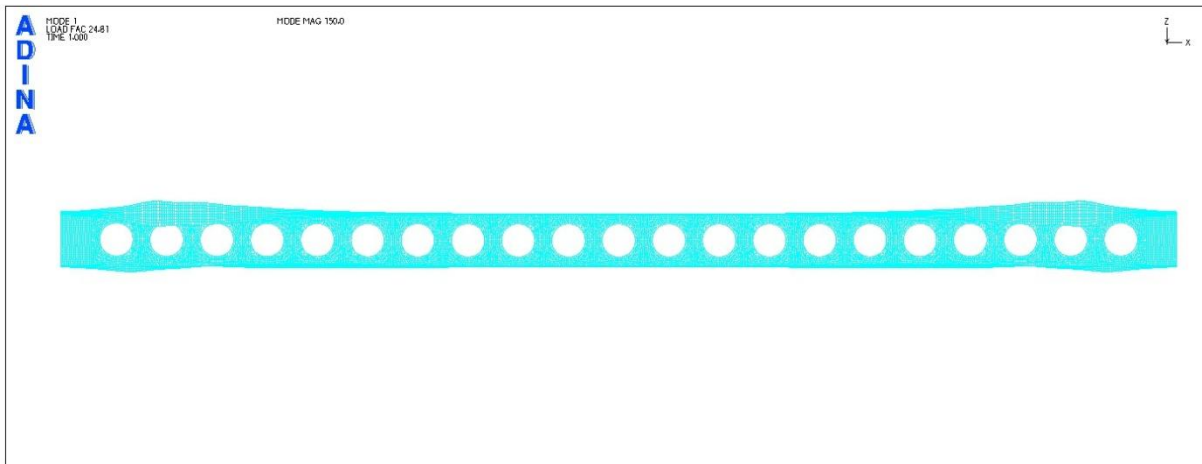
1^η μέθοδος προσομοίωσης



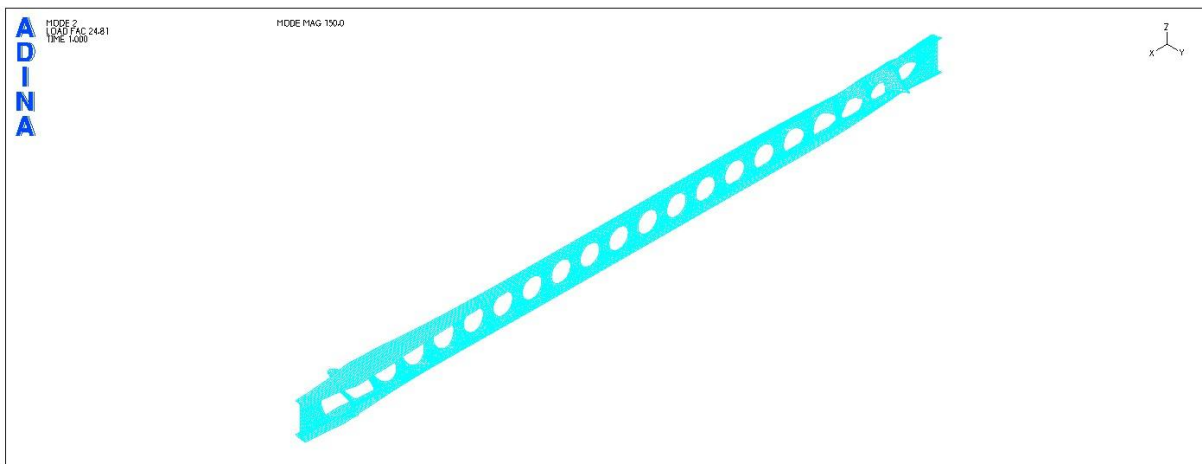
Σχήμα 9.66
1^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



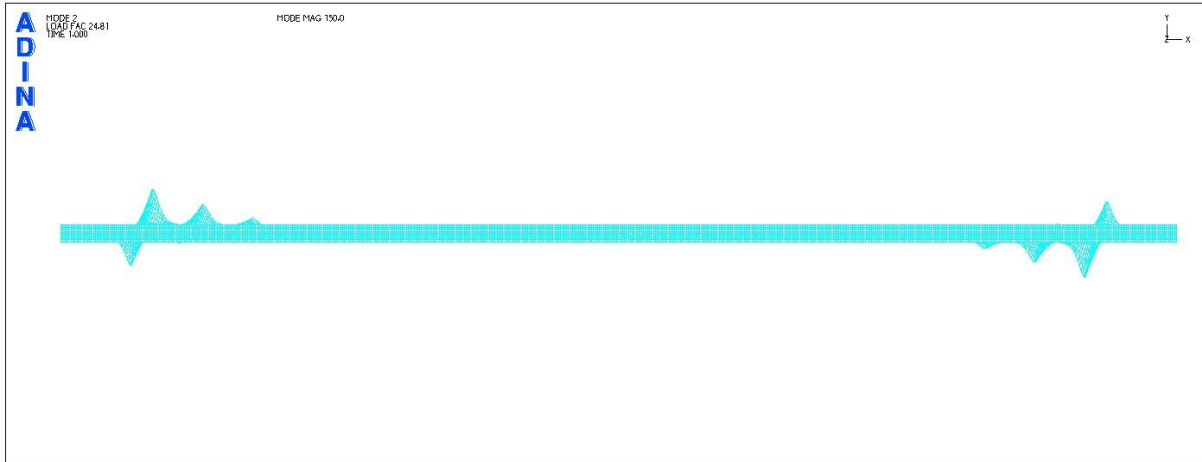
Σχήμα 9.67
1^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



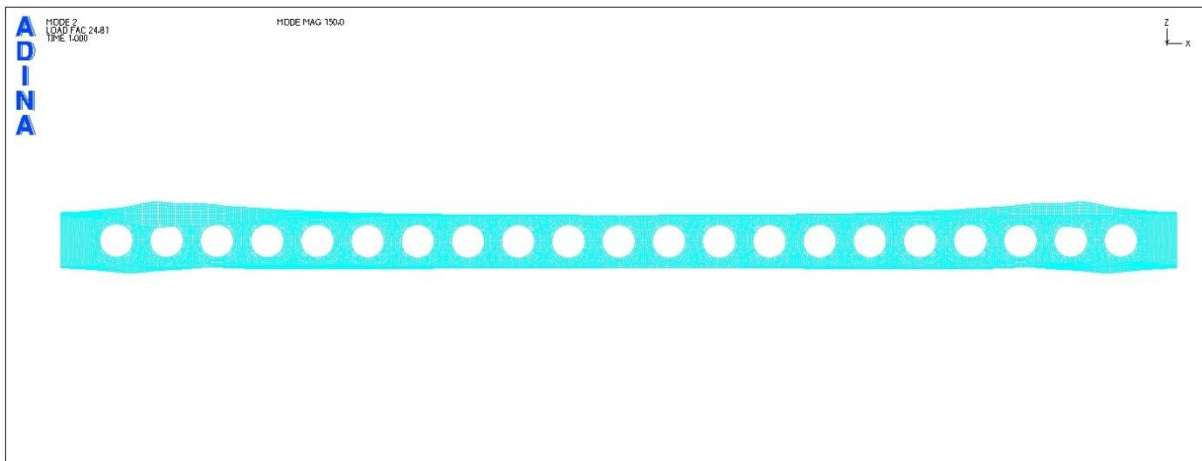
Σχήμα 9.68
1^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)



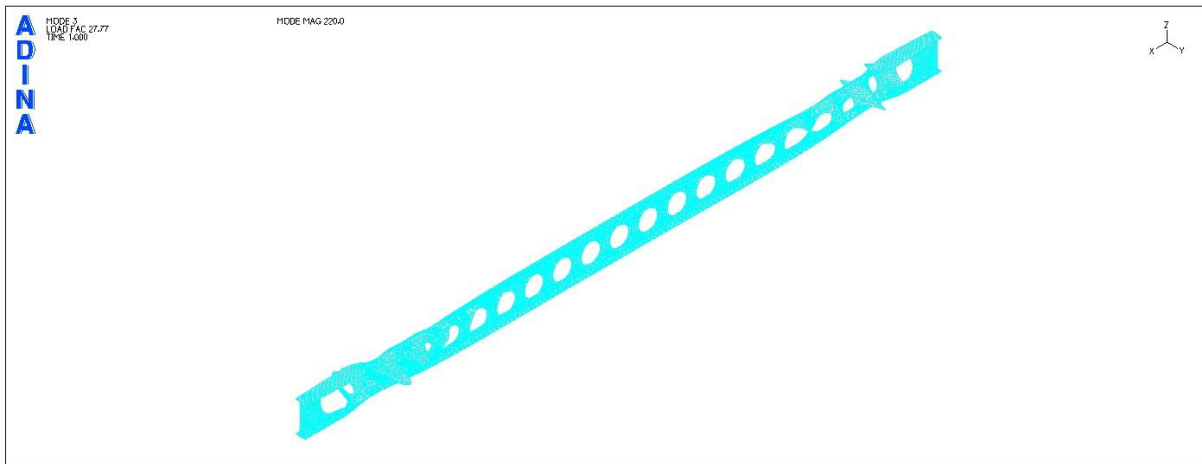
Σχήμα 9.69
2^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 9.70
2^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



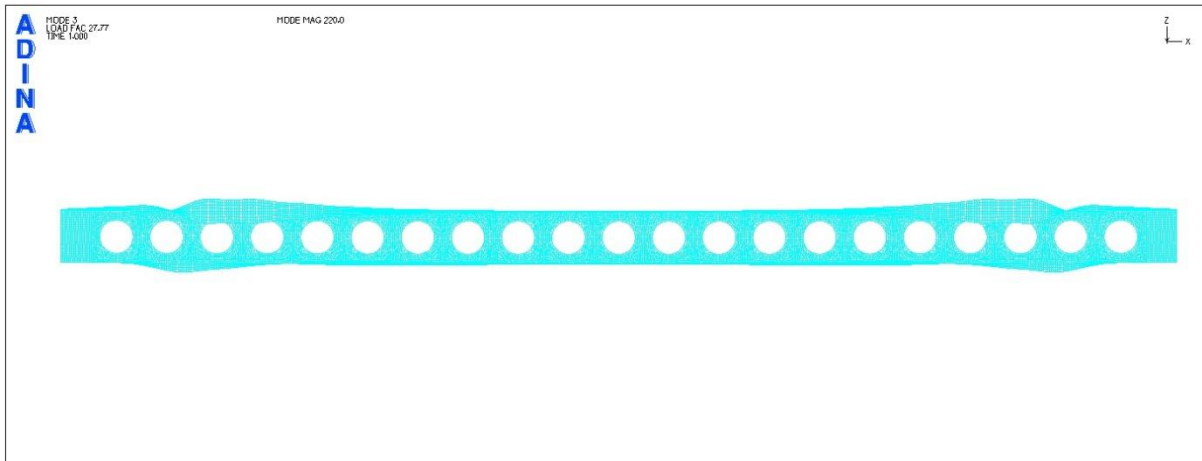
Σχήμα 9.71
2^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)



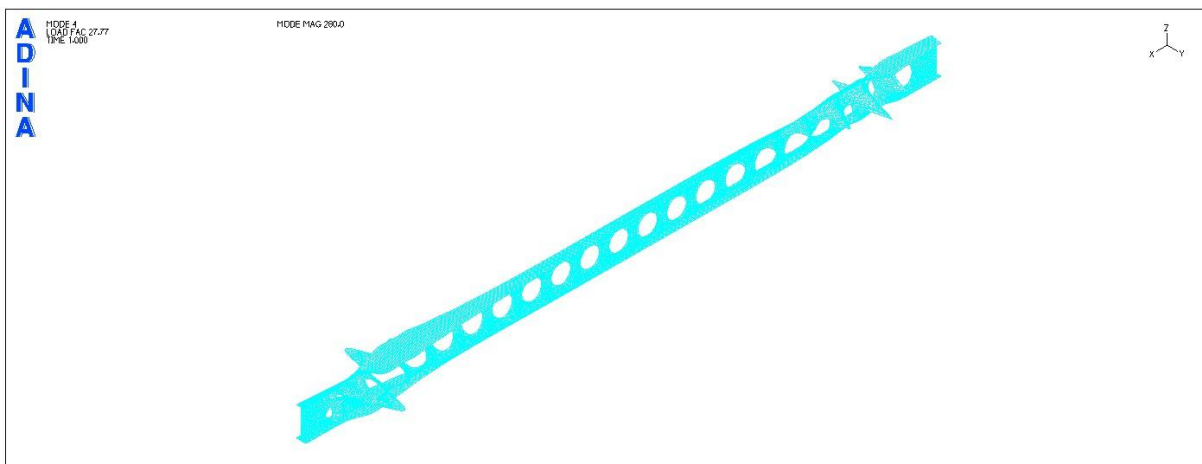
Σχήμα 9.72
3^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 9.73
3^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



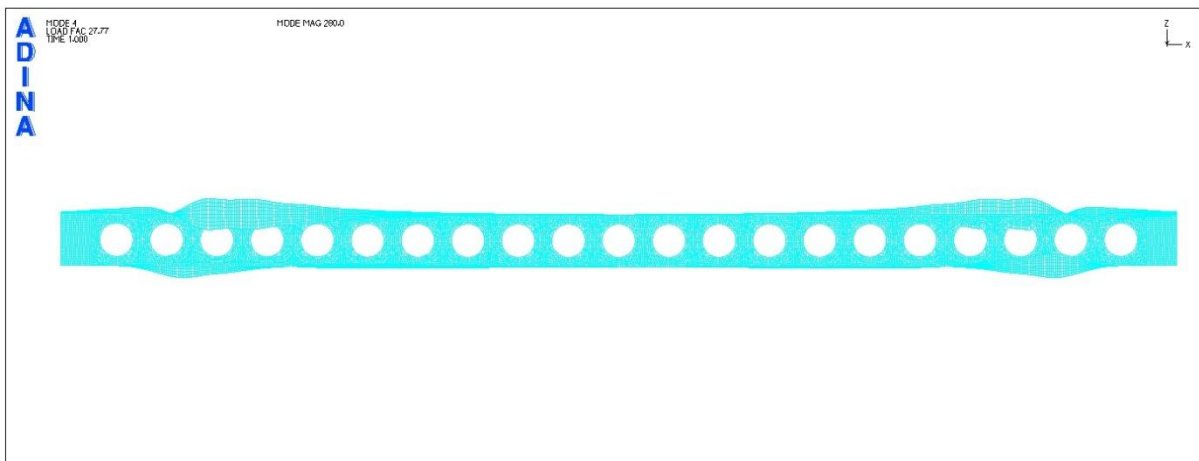
Σχήμα 9.74
3^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)



Σχήμα 9.75
4^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 9.76
4^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



Σχήμα 9.77
4^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)

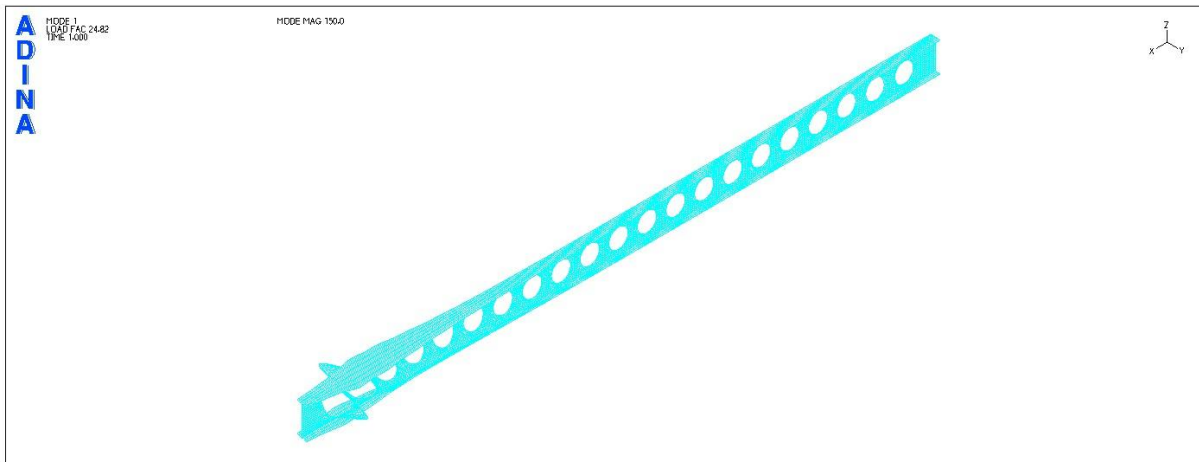
	P_{cr} (kN/m)
1 ^η ιδιομορφή λυγισμού	248,1
2 ^η ιδιομορφή λυγισμού	248,1
3 ^η ιδιομορφή λυγισμού	277,7
4 ^η ιδιομορφή λυγισμού	277,7

Πίνακας 9.2
Φορτία λυγισμού για κάθε ιδιομορφή

Παρατηρούμε ότι το φορτίο λυγισμού είναι κοινό ανά 2 ιδιομορφές. Από τις εικόνες τοπικού λυγισμού φαίνεται ότι η 1^η και η 3^η ιδιομορφή είναι συμμετρικές, ενώ η 2^η και η 4^η αντισυμμετρικές.

Μία ακόμα παρατήρηση είναι ότι ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται στα άκρα της δοκού και όχι στο μέσο της, πρόκειται για τοπικό λυγισμό του κορμού λόγω διάτμησης. Όπως έχει παρουσιασθεί στο 6^ο κεφάλαιο, ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται στα άκρα της αμφιέριστης δοκού όπου έχουμε μέγιστη τέμνουσα, όταν το πάχος του κορμού είναι αρκετά μικρό και μάλιστα εμφανώς μικρότερο από το πάχος των πελμάτων. Για να εμφανισθεί τοπικός λυγισμός στο μέσο της αμφιέριστης δοκού (ο οποίος τότε θα οφείλεται στη ροπή κάμψης και όχι στην τέμνουσα), πρέπει να μειωθεί αρκετά το πάχος των πελμάτων, ενώ η διαφορά του από το πάχος του κορμού να είναι αρκετά μικρή. Το φαινόμενο της εμφάνισης τοπικού λυγισμού στα άκρα της δοκού εμφανίζεται προφανώς εντονότερο στην περίπτωση κυψελωτών δοκών, όπου η τέμνουσα πρέπει να αναληφθεί από αρκετά μειωμένη μάζα κορμού. Πρόκειται για λυγισμό των συμπαγών τμημάτων του κορμού που έχει αναφερθεί ως μορφή αστοχίας για τις κυψελωτές δοκούς.

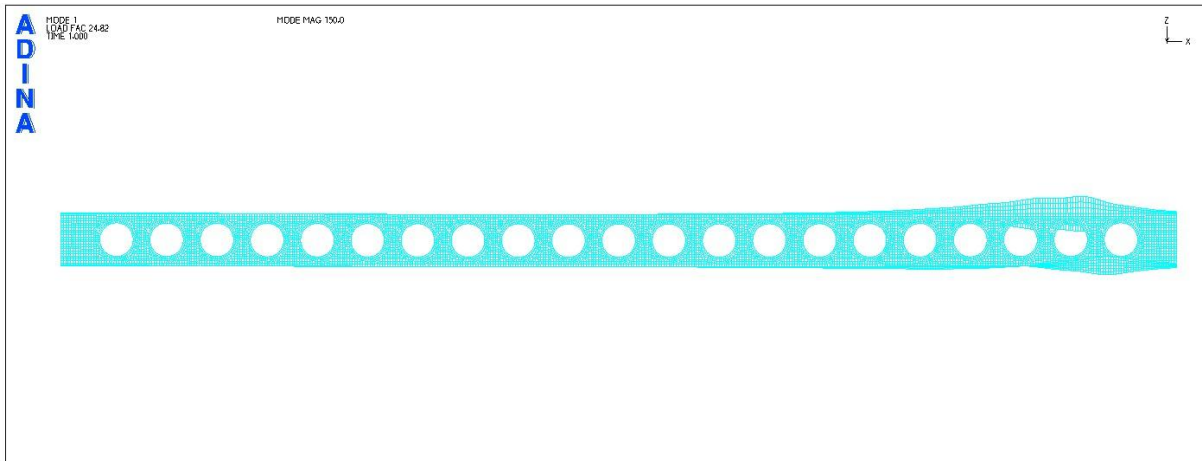
2^η μέθοδος προσομοίωσης



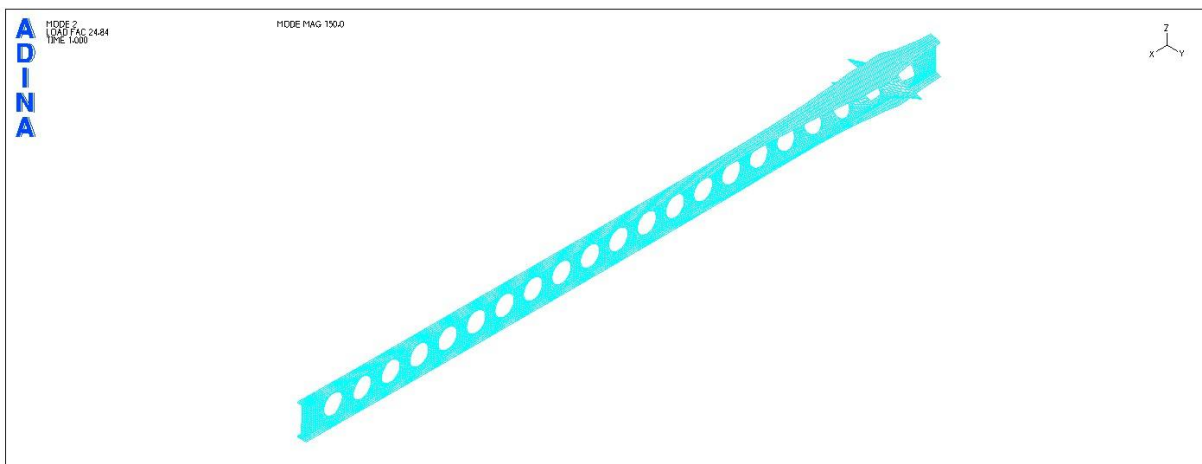
Σχήμα 9.78
1^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 9.79
1^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



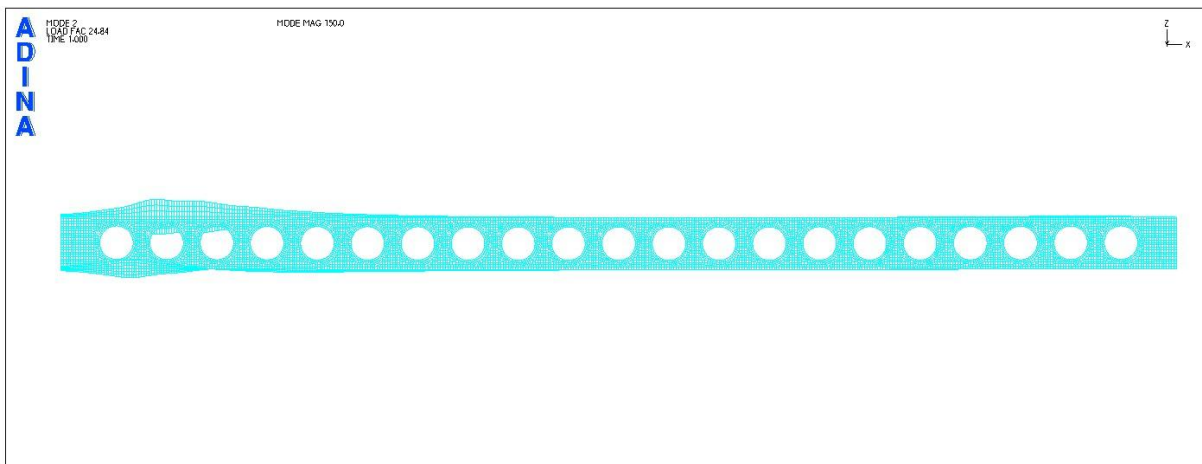
Σχήμα 9.80
1^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)



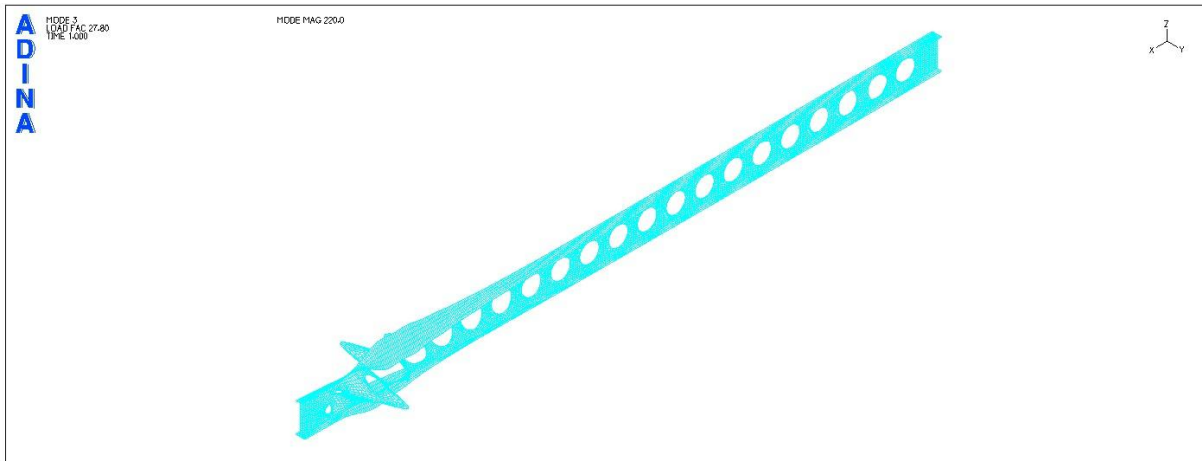
Σχήμα 9.81
2^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 9.82
2^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



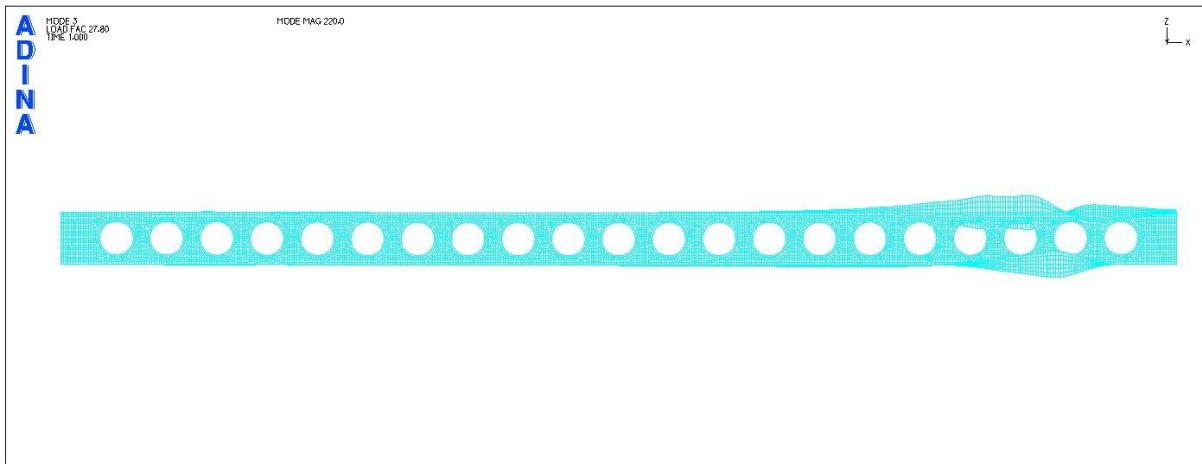
Σχήμα 9.83
2^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)



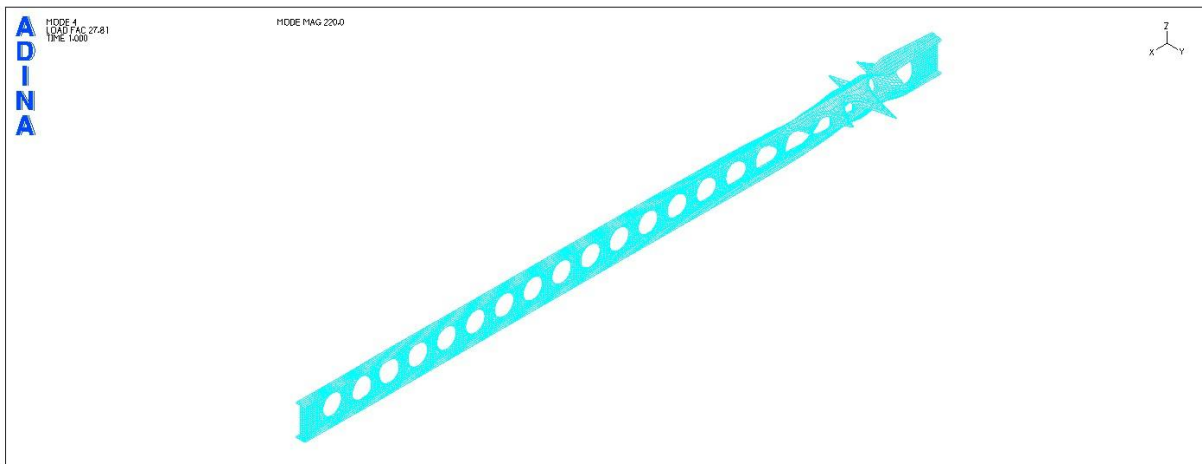
Σχήμα 9.84
3^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



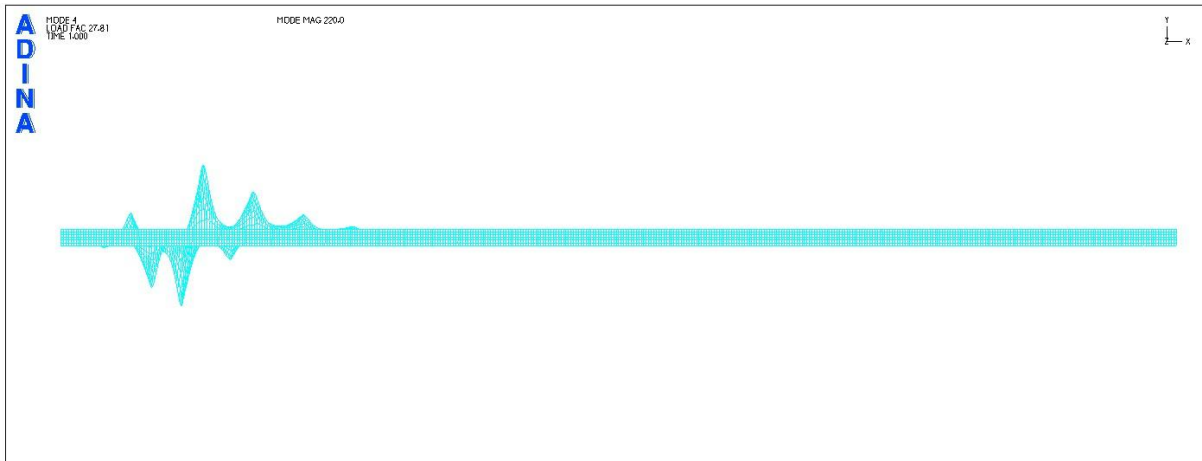
Σχήμα 9.85
3^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



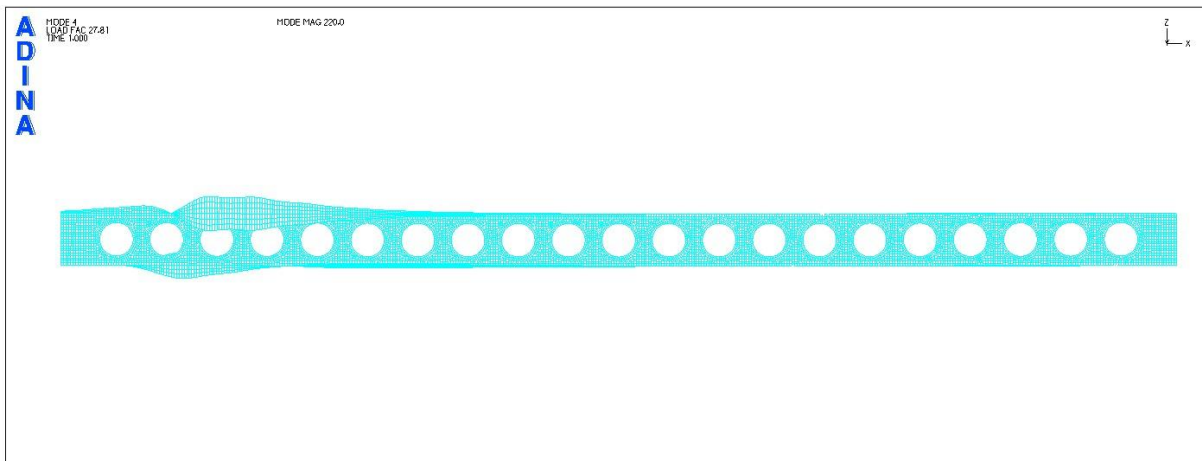
Σχήμα 9.86
3^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)



Σχήμα 9.87
4^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 9.88
4^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



Σχήμα 9.89
4^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)

	P_{cr} (kN/m)
1 ^η ιδιομορφή λυγισμού	248,2
2 ^η ιδιομορφή λυγισμού	248,4
3 ^η ιδιομορφή λυγισμού	278,0
4 ^η ιδιομορφή λυγισμού	278,1

Πίνακας 9.3
Φορτία λυγισμού για κάθε ιδιομορφή

Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρούμε ότι σε κάθε ιδιομορφή παρατηρείται τοπικός λυγισμός ενός άκρου εναλλάξ. Πιο συγκεκριμένα, η 2^η ιδιομορφή λυγισμού είναι συμμετρική της 1^{ης} και η 4^η ιδιομορφή λυγισμού αντισυμμετρική της 3^{ης}.

Οι τιμές των φορτίων λυγισμού για κάθε ιδιομορφή ταυτίζονται σχεδόν με τις τιμές της 1^{ης} μεθόδου προσομοίωσης.

Επειδή, ωστόσο, τα αποτελέσματα των ιδιομορφών για την 1^η μέθοδο προσομοίωσης είναι περισσότερο αναμενόμενα, αφού ο τοπικός λυγισμός θα εμφανιστεί ταυτόχρονα και στα 2 άκρα λόγω συμμετρίας του φορέα, στα επόμενα παραδείγματα αυτού του κεφαλαίου ο τοπικός λυγισμός θα εξετασθεί με το μοντέλο της 1^{ης} μεθόδου προσομοίωσης.

9.3.2 Μορφή αστοχίας της κυψελωτής δοκού 20m με πλευρικές εξασφαλίσεις

Η τιμή του φορτίου τοπικού λυγισμού που προέκυψε από το ADINA ($P_{cr}=248,1$ kN/m) είναι αρκετά μεγάλη, γεγονός που προϋποθέτει ότι θα έχει ήδη επέλθει αστοχία του φορέα για αρκετά μικρότερη τιμή του φορτίου. Η αστοχία αναμένεται να οφείλεται σε έναν από τους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας κυψελωτής δοκού που έχουν ήδη αρκετές φορές αναφερθεί. Πράγματι, πραγματοποιώντας τους ελέγχους επάρκειας για την κυψελωτή δοκό για φορτίο ίσο με το φορτίο τοπικού λυγισμού, όλες οι τιμές των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών υπερβαίνουν την αντίστοιχη αντοχή σχεδιασμού.

Το φορτίο που αντιστοιχεί στη ροπή πλήρους πλαστικοποίησης του φορέα έχει υπολογιστεί ίσο με $P_{pl}=50,72$ kN/m. Όπως είναι φανερό, η τιμή αυτή αντιστοιχεί στην αντοχή των απλών ταυ σε αξονική δύναμη στην τομή αα της μεσαίας οπής, που συμπίπτει με το μέσο ακριβώς της δοκού.

Πράγματι, η αντοχή κάθε απλού ταυ στην τομή αα της μεσαίας οπής της δοκού έχει υπολογιστεί στην παράγραφο 8.5 του προηγούμενου κεφαλαίου:

$$N_{Rd} = \frac{A_m \cdot f_y}{\gamma_M} = \frac{121,2 \cdot 23,5}{1,0} = 2848,2 \text{ kN}$$

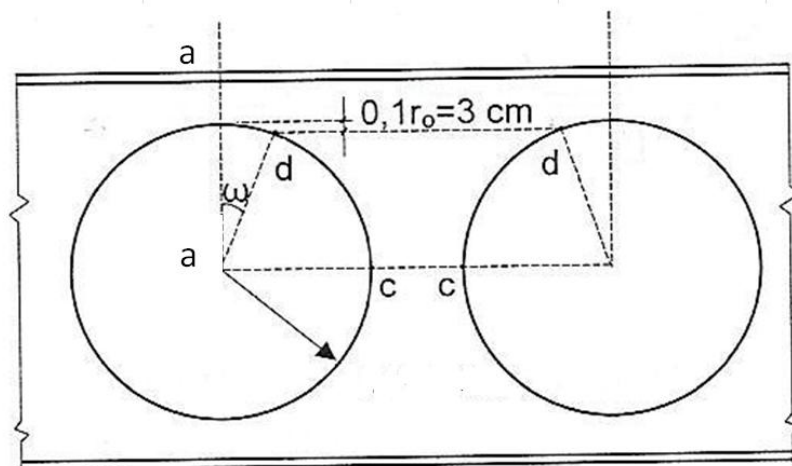
Εξισώνοντας την αντοχή με την αξονική δύναμη σε κάθε απλό ταυ έχουμε:

$$N_{Sd} = 2848,2 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow \frac{M_{Sd}}{h_c} = 2848,2 \text{ kN} \Rightarrow M_{Sd} = 2848,2 \text{ kN} \cdot 0,891 \text{ m} = 2537,75 \text{ kNm}$$

$$\Rightarrow \frac{q_{Sd} \cdot L^2}{8} = 2537,75 \text{ kNm} \Rightarrow q_{Sd} = 50,75 \text{ kN/m}$$

Εκτελούνται όλοι οι υπόλοιποι έλεγχοι για την τιμή αυτή φορτίου, λαμβάνοντας τις τιμές των αντοχών που έχουν ήδη υπολογιστεί στην παράγραφο 8.5:



Σχήμα 9.90
Τομές ελέγχου

Αντοχή απλών ταυ στις τομές αα

- Αντοχή σε διάτμηση

Ελέγχεται το πλησιέστερο στη στήριξη άνοιγμα που είναι δυσμενέστερο.

$$V_{Sd} \cong 507,5 \text{ kN}, M_{Sd} \cong 0.$$

Η τέμνουσα δύναμη που αντιστοιχεί σε κάθε απλό ταυ είναι ίση με

$$V_{T,Sd} = 1/2 \cdot 507,2 = 253,6 \text{ kN}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{30,6 \cdot 23,5}{\sqrt{3} \cdot 1} = 415,17 \text{ kN} > 253,6 \text{ kN}$$

Αντοχή απλών ταυ στις τομές bb

Ενδεικτικά παρουσιάζεται ο έλεγχος για $\varphi=30^\circ$.

Υπολογίζονται οι παρακάτω τιμές αντοχής για τη διατομή bb που αντιστοιχεί σε γωνία $\varphi=30^\circ$:

$$N_{\varphi,Rd}=3473,14\text{kN}$$

$$V_{pl,Rd}=586,45\text{kN}$$

$$M_{\varphi,Rd}=6978,32\text{kNcm}$$

- **Έλεγχος στο ακραίο άνοιγμα**

$$V_{Sd}\cong 507,5\text{kN}, M_{Sd}\cong 0 \text{ άρα και } N_{M,Sd}=\cong 0$$

Σύμφωνα με τις εξισώσεις 8.24 προκύπτουν τα εξής εντατικά μεγέθη:

$$V_{\varphi,Sd}=219,75\text{kN}$$

$$N_{\varphi,Sd}=-126,88\text{kN}$$

$$M_{\varphi,Sd}=6394,56\text{kNcm}$$

Επειδή $V_{\varphi,Sd}=219,75\text{kN}<0,50\cdot 586,45=293,23\text{kN}$, δεν απαιτείται μείωση της αντοχής της ροπής λόγω τέμνουσας.

$$\text{Ο έλεγχος επάρκειας γίνεται: } \frac{126,88}{3473,14} + \frac{6394,56}{6978,32} = 0,95 < 1$$

Επομένως η διατομή είναι επαρκής.

Έχουν πραγματοποιηθεί σε φύλλο Excel έλεγχοι για όλες τις τιμές γωνιών και το παραπάνω κριτήριο ικανοποιείται σε κάθε περίπτωση.

- **Έλεγχος στο μέσο του ανοίγματος της δοκού**

$$V_{Sd}=0, M_{Sd}=2537,5\text{kNm} \Rightarrow N_{M,Sd} = \frac{M_{Sd}}{h_c} = \frac{2537,5\text{kNm}}{0,891\text{m}} = 2849,13\text{kN}$$

Προκύπτουν τα εξής εντατικά μεγέθη:

$$V_{\varphi,Sd}=1424,57\text{kN}$$

$$N_{\varphi,Sd}=2467,42\text{kN}$$

$$M_{\varphi,Sd}=2515,79\text{kNcm}$$

Προκύπτει $V_{\varphi,Sd}=1424,57\text{kN}> V_{pl,Rd}=586,45\text{kN}$, όπως άλλωστε αναμενόταν εφόσον η τέμνουσα στην τομή bb έχει προέλθει από ισορροπία στοιχείου, όπου εμπεριέχεται η αξονική δύναμη λόγω καμπτικής ροπής M_{Sd} , η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση έχει αποκτήσει τιμή ίση με τη ροπή πλαστικοποίησης.

Οι επόμενοι έλεγχοι γίνονται μόνο για να διαπιστωθεί ότι η αστοχία της δοκού προέρχεται πράγματι από πλαστικοποίηση της μεσαίας διατομής της.

Αντοχή συμπαγών τμημάτων του κορμού

- **Έλεγχος σε διάτμηση (τομή cc)**

Ο έλεγχος γίνεται για την περιοχή στη στήριξη της δοκού όπου η τέμνουσα είναι μέγιστη.

Σύμφωνα με τις σχέσεις 8.7, 8.8 έχουμε:

$$V_{wp,Sd} = 2 \cdot 253,75 \cdot \frac{90}{89,1} = 512,63\text{kN}$$

$$V_{wp,Rd} = \frac{30 \cdot 1,7 \cdot 23,5}{\sqrt{3} \cdot 1,00} = 691,95\text{kN} > 512,63\text{kN}$$

Επομένως ο κορμός είναι επαρκής έναντι διάτμησης.

- **Έλεγχος σε διαρροή ή λυγισμό (τομή dd)**

Δρώσα ροπή στη διατομή dd:

$$M_{wp,Sd} = V_{wp,Sd} \cdot (0,90r_0) = 512,63 \cdot 0,90 \cdot 0,30 = 138,41\text{kNm}$$

Από την παράγραφο 8.5 έχει υπολογιστεί:

Αντοχή σχεδιασμού έναντι λυγισμού:

$$M_{Rd} = 148,38\text{kNm} > M_{wp,Sd} = 138,41\text{kNm}$$

Άρα ο κορμός είναι επαρκής έναντι λυγισμού.

- **Αντοχή του κορμού στις στηρίξεις**

$$R_{y,Rd} = 987\text{kN} > V_{Sd} = 507,5\text{kN}$$

$$R_{a,Rd} = 2159,3\text{kN} > 507,5\text{kN}$$

Επομένως, ο φορέας αστοχεί λόγω πλαστικοποίησης της μεσαίας διατομής του. Στην κυψελωτή δοκό η αστοχία αυτή ερμηνεύεται ως εξής:

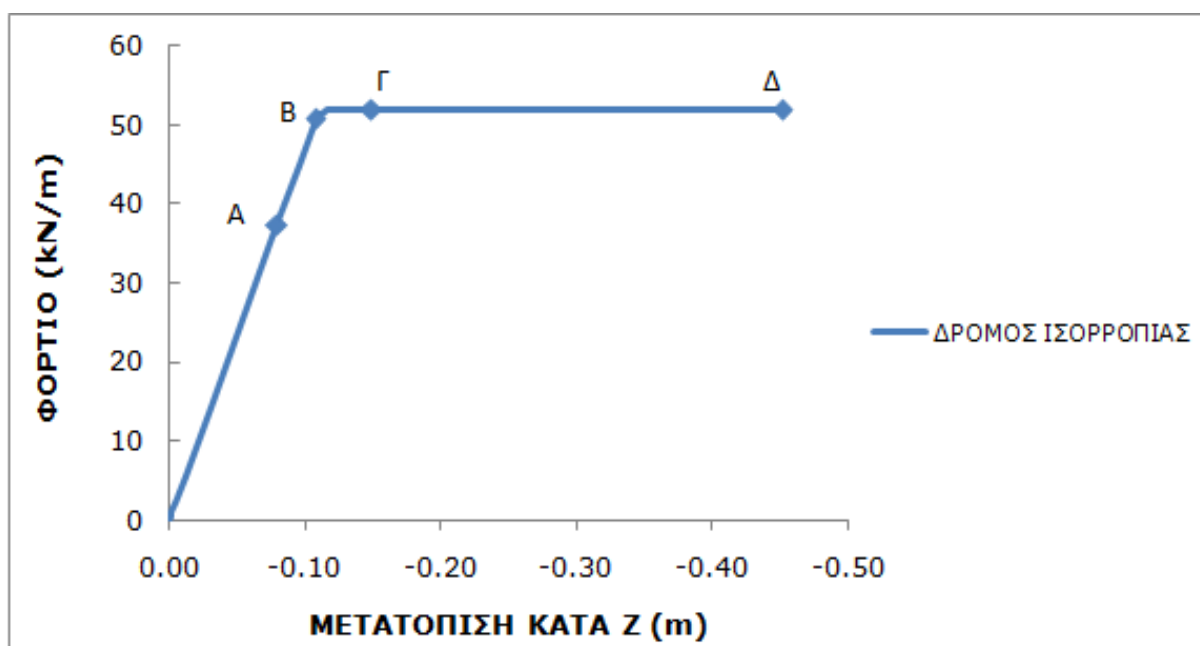
-Αστοχία των απλών ταυ στο μέσο του ανοίγματος σε κατακόρυφη τομή, εξαιτίας της υπέρβασης της αντοχής τους να αναλάβουν τις αξονικές δυνάμεις λόγω καμπτικής ροπής

-Αστοχία πιθανόν των απλών ταυ στο μέσο του ανοίγματος σε τομή υπό γωνία φ , εξαιτίας της υπέρβασης αντοχής της διατομής.

Τα παραπάνω φαινόμενα συνιστούν τα αποτελέσματα της πλήρους πλαστικοποίησης της μεσαίας διατομής.

9.3.3 Μη γραμμική ανάλυση υλικού της κυψελωτής δοκού 20m με πλευρικές εξασφαλίσεις στο ADINA

Έχοντας διερευνήσει τη μορφή αστοχίας της πλευρικά εξασφαλισμένης κυψελωτής δοκού και έχοντας ανακαλύψει ότι οφείλεται στην πλαστικοποίηση, πραγματοποιούμε μη γραμμική ανάλυση υλικού στο πρόγραμμα ADINA. Θεωρείται διγραμμικό υλικό S235 χωρίς κράτυνση.



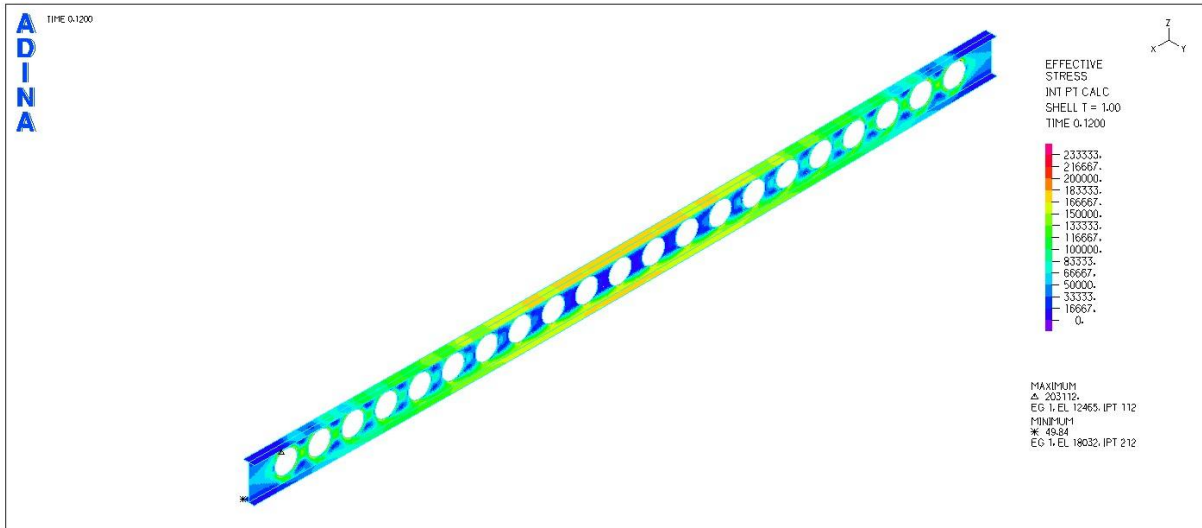
Σχήμα 9.91

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ VON MISES

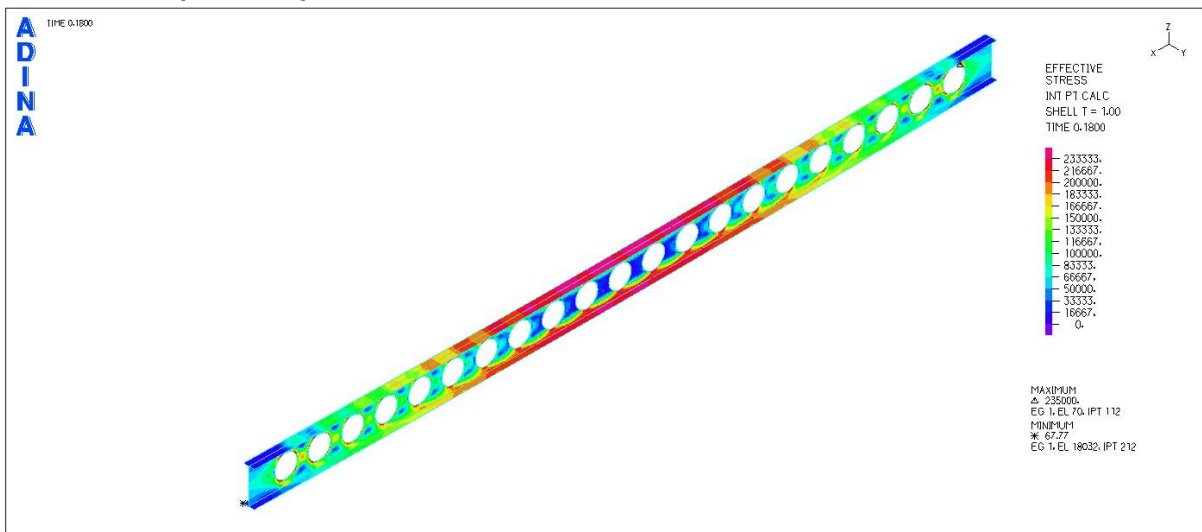
ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,12)



Σχήμα 9.92

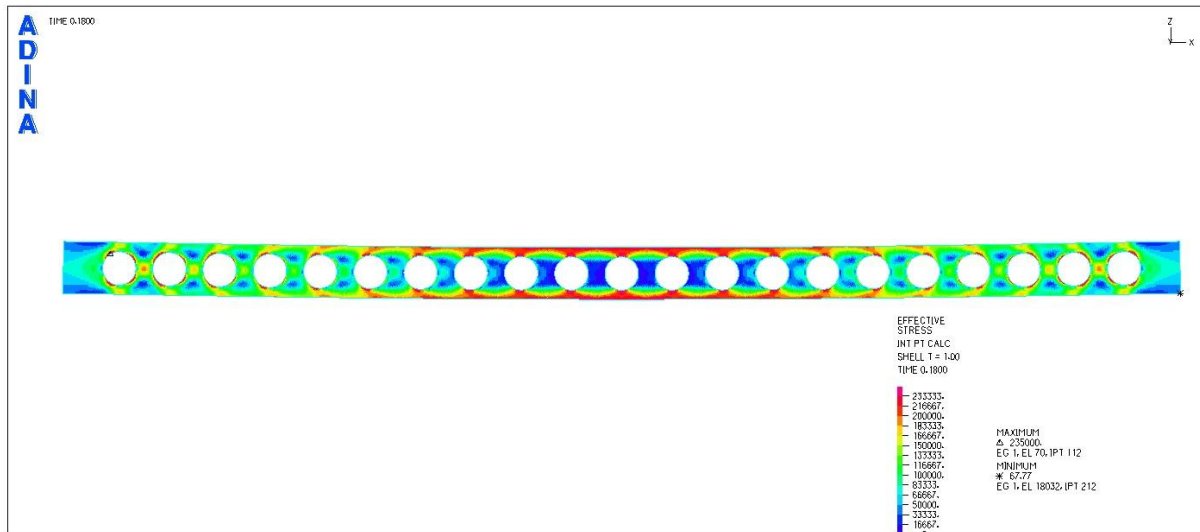
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο A

ΣΗΜΕΙΟ B (t=0,18)



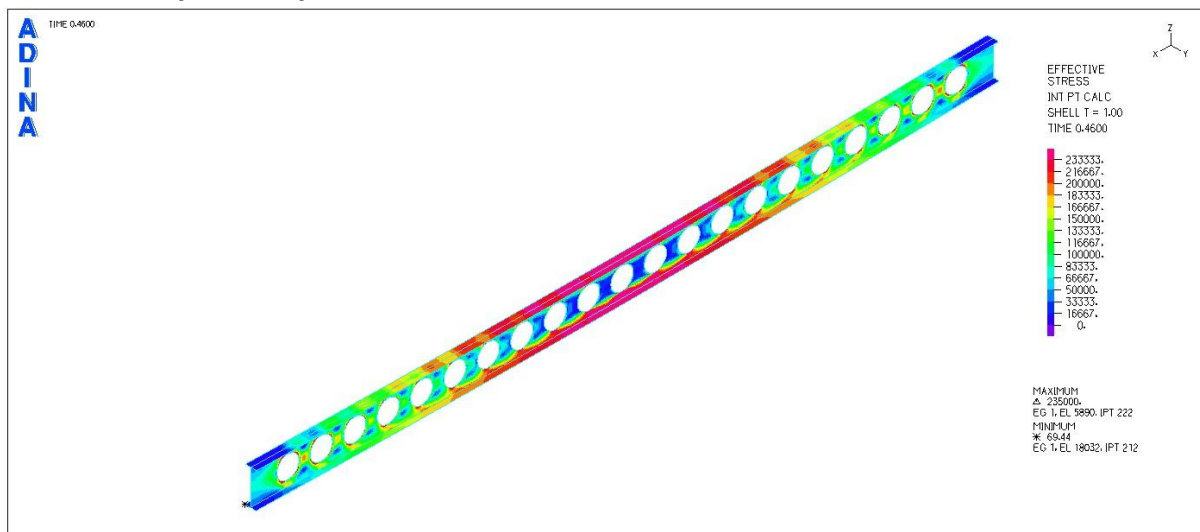
Σχήμα 9.93

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο B (προοπτικό)

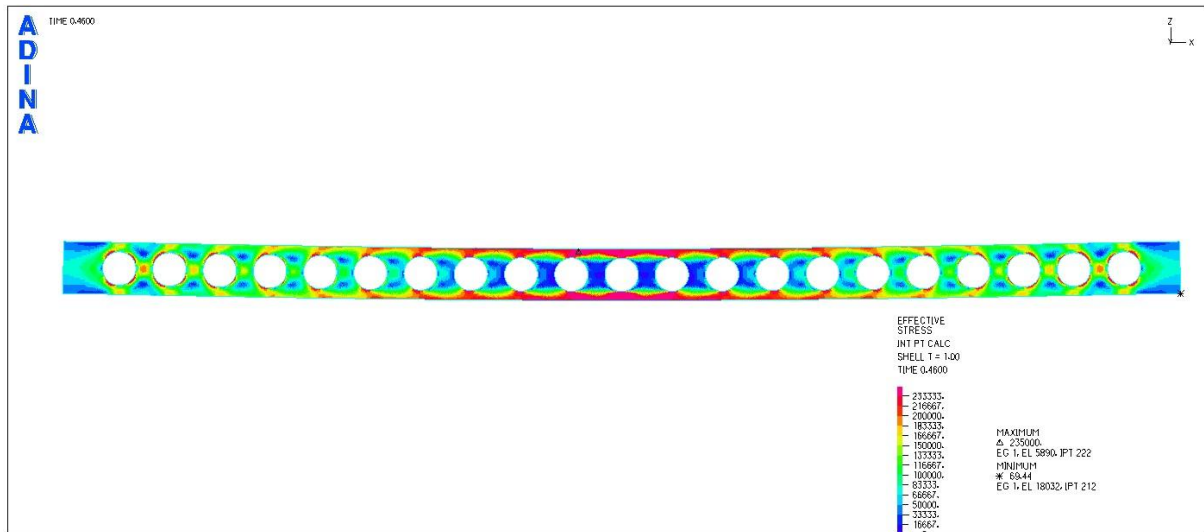


Σχήμα 9.94
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Β (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,46)

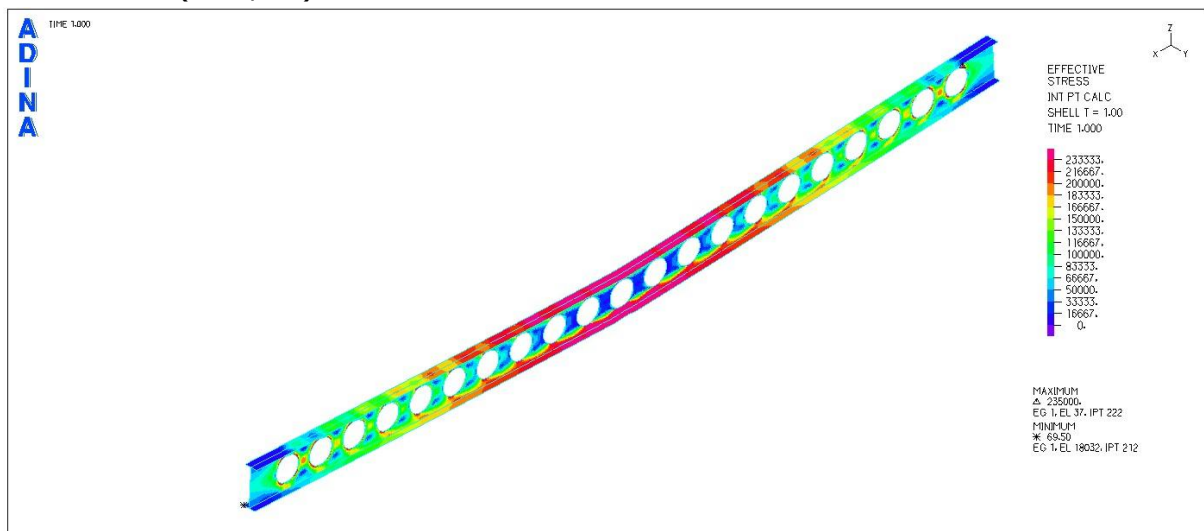


Σχήμα 9.95
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)

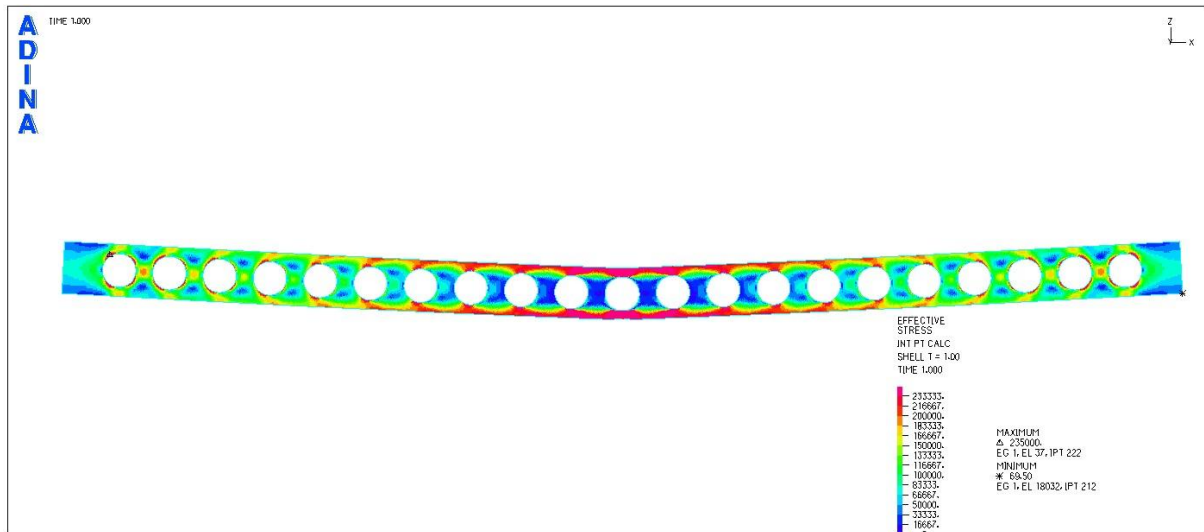


Σχήμα 9.96
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ Δ (t=1,00)



Σχήμα 9.97
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (προοπτικό)



Σχήμα 9.98

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (όψη)

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ:

Στο σημείο Α όλες οι τάσεις von Mises είναι κάτω από το όριο διαρροής, όπως αναμενόταν αφού βρισκόμαστε στον ελαστικό κλάδο του δρόμου ισορροπίας.

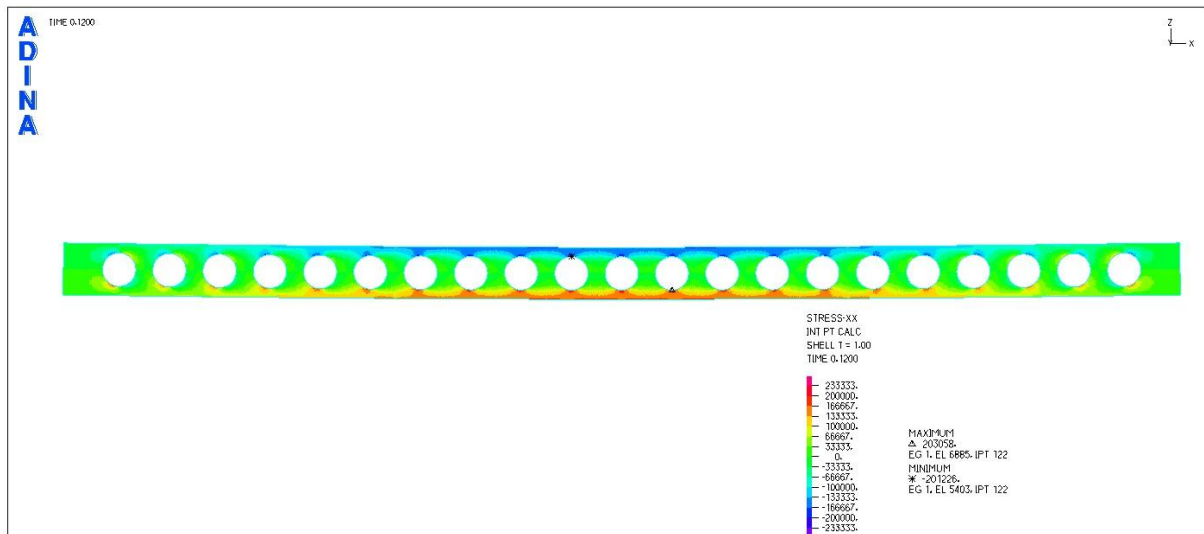
Στο σημείο Β έχει αρχίσει η διαρροή του μέσου του ανοίγματος και των απλών του στην περιοχή αυτή, καθώς και των σημείων γύρω από τις κυκλικές οπές στις κρίσιμες διατομές bb.

Στο σημείο Γ η διαρροή έχει επεκταθεί σε μεγαλύτερο μέρος των απλών του στην περιοχή του μέσου του ανοίγματος.

Στο σημείο Δ έχουν διαρρεύσει αρκετές ίνες γύρω από το μέσο, ενώ η μεσαία διατομή έχει πλαστικοποιηθεί πλήρως, γεγονός που σηματοδοτεί την αστοχία του φορέα.

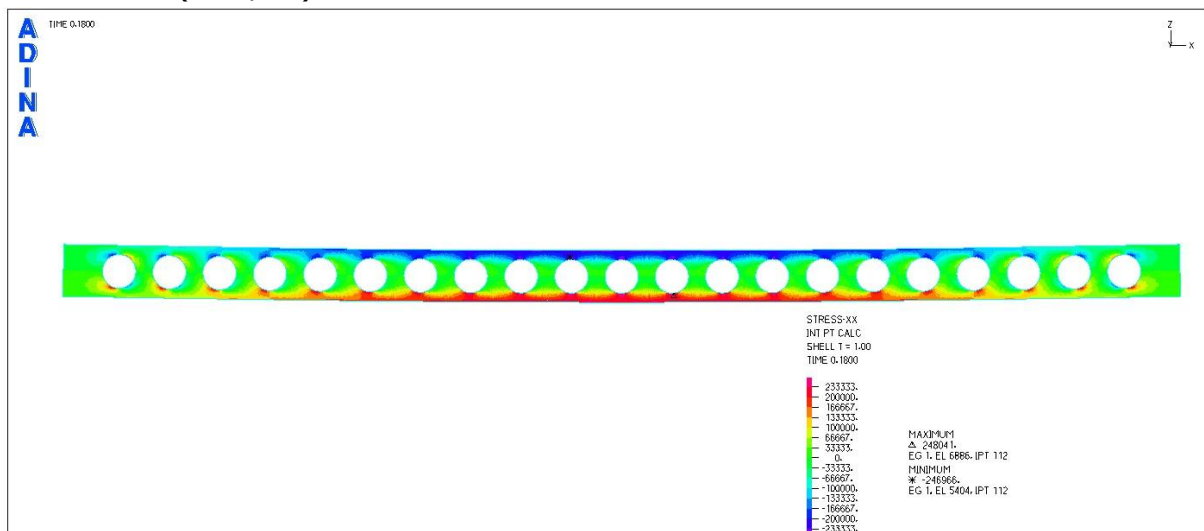
ΕΙΚΟΝΕΣ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,12)



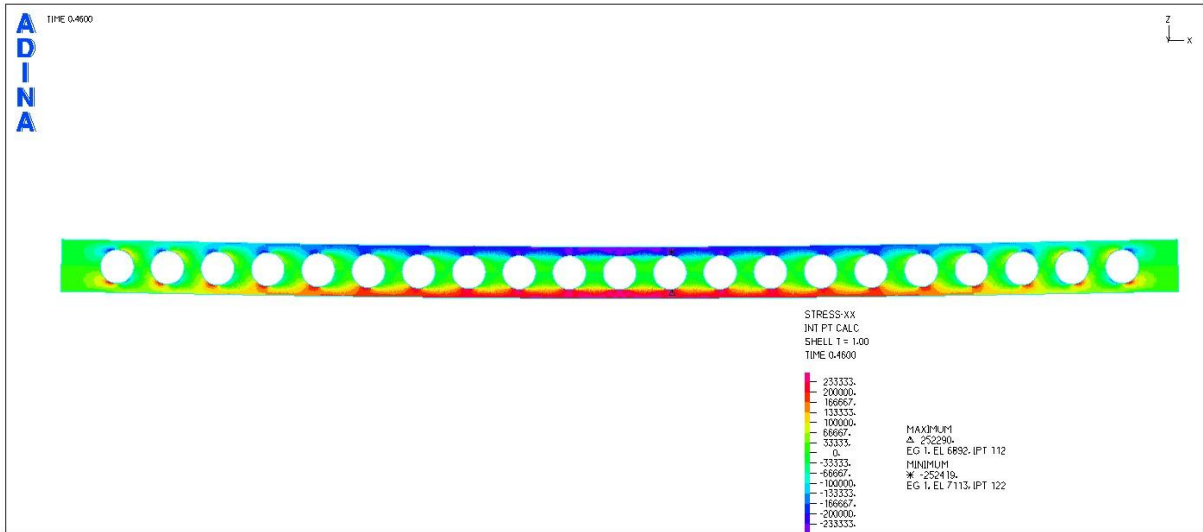
Σχήμα 9.99
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο A

ΣΗΜΕΙΟ B (t=0,18)



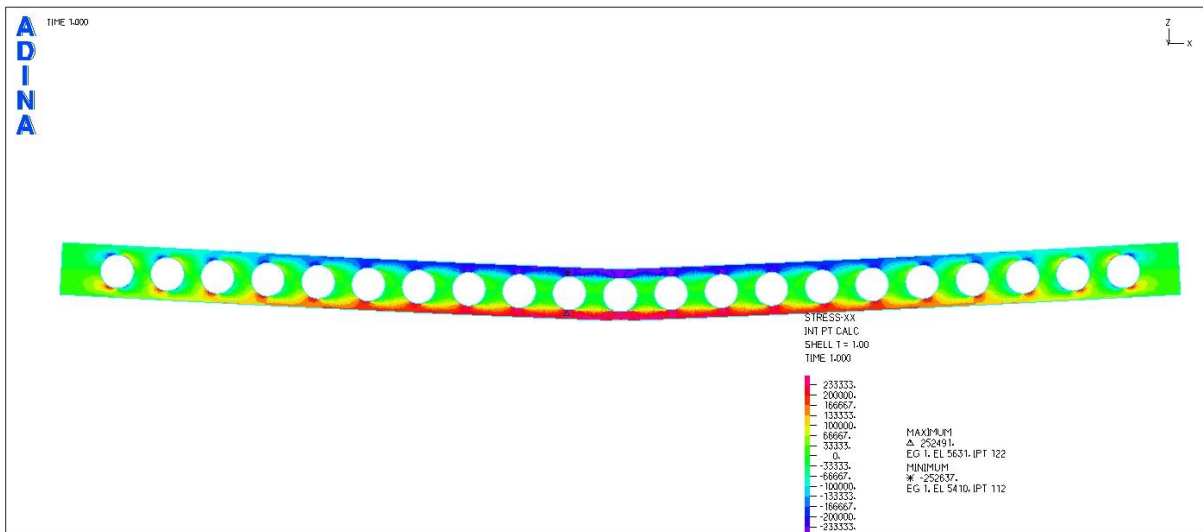
Σχήμα 9.100
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο B

ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,46)



Σχήμα 9.101
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

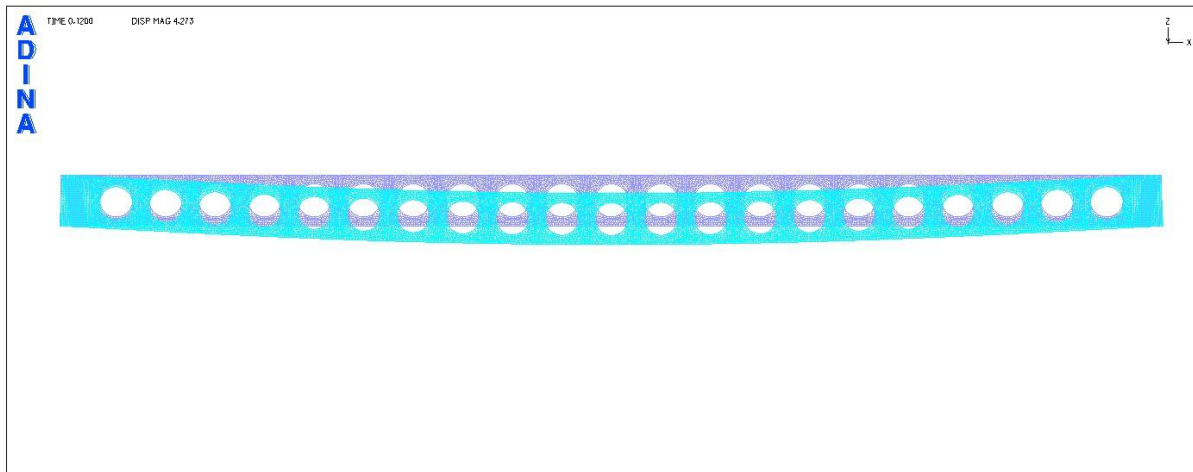
ΣΗΜΕΙΟ Δ (t=1,00)



Σχήμα 9.102
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ

ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

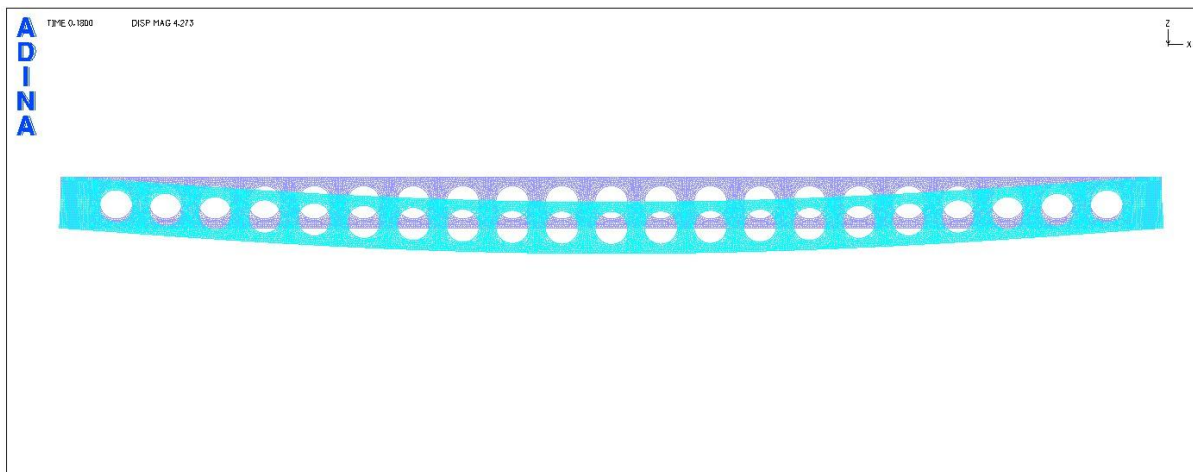
ΣΗΜΕΙΟ A



Σχήμα 9.103

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο A

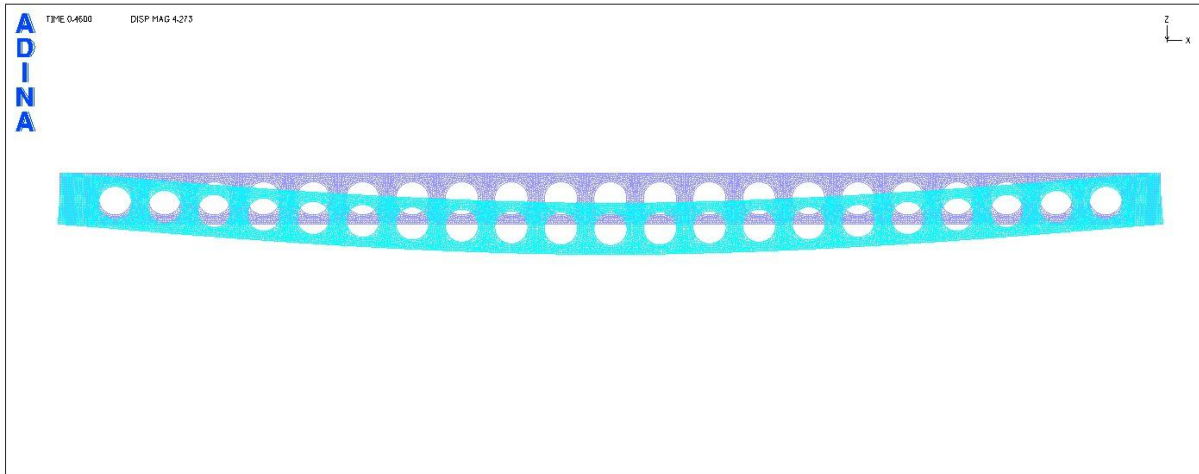
ΣΗΜΕΙΟ B



Σχήμα 9.104

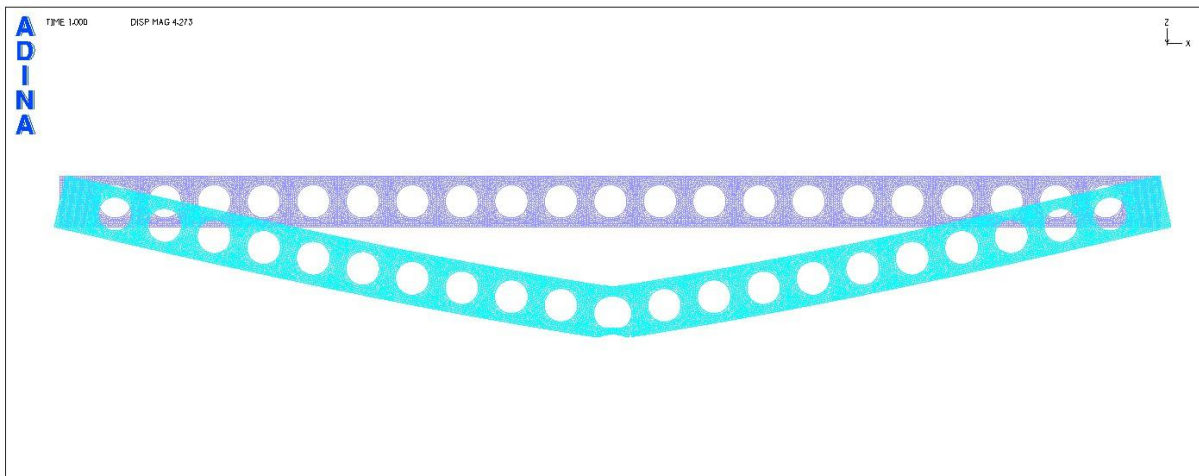
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο B

ΣΗΜΕΙΟ Γ

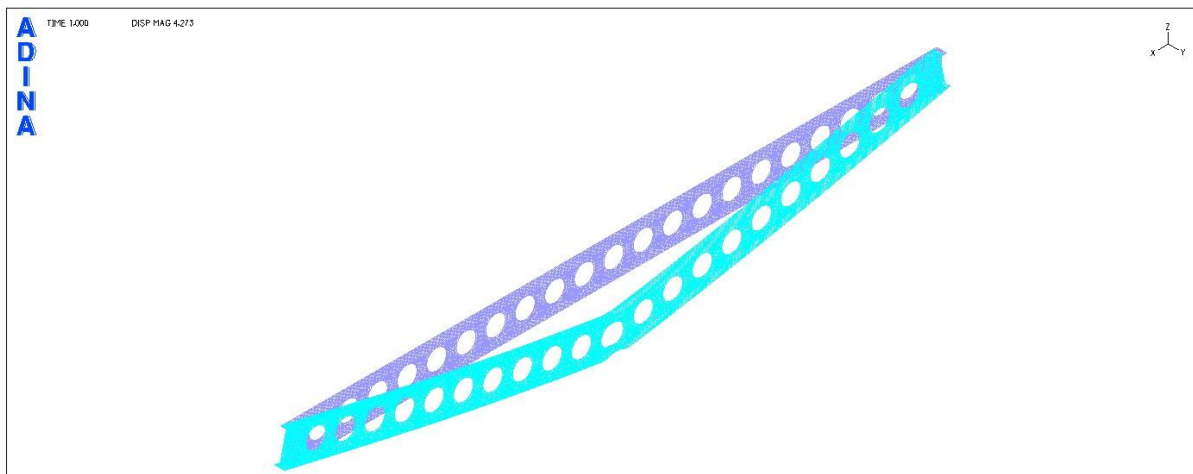


Σχήμα 9.105
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

ΣΗΜΕΙΟ Δ



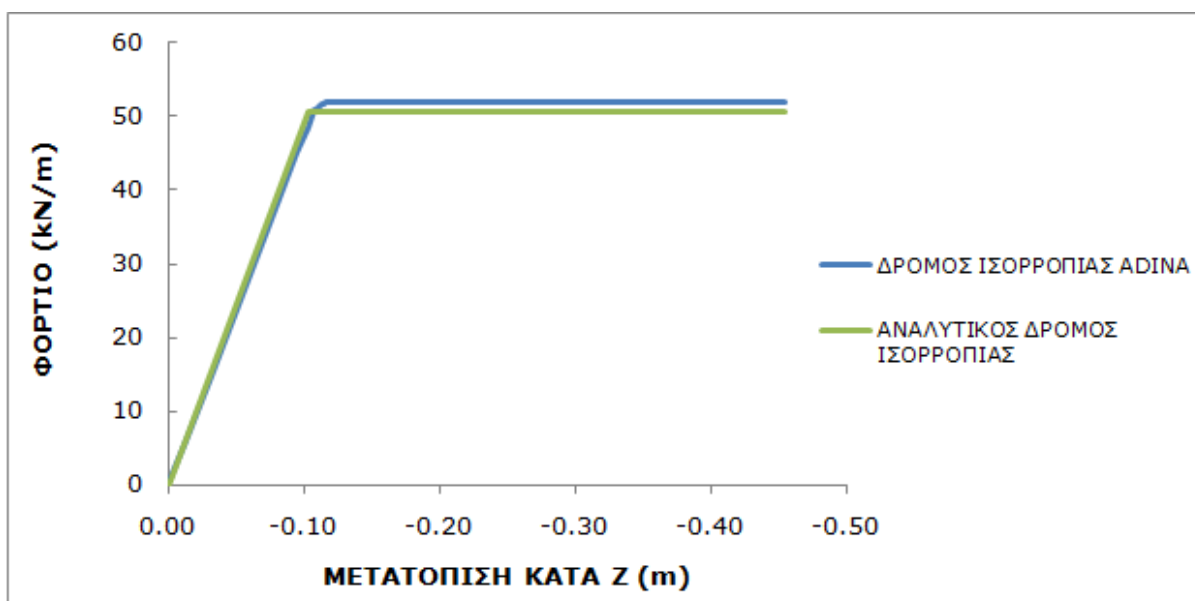
Σχήμα 9.106
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (όψη)



Σχήμα 9.107

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (προοπτικό)

Στο σχήμα 9.108 φαίνονται συγκριτικά σε κοινό διάγραμμα ο δρόμος ισορροπίας του ADINA και ο αναλυτικός δρόμος ισορροπίας που αντιστοιχεί στην πλαστικοποίηση της αμφιέριστης δοκού.



Σχήμα 9.108

Σύγκριση δρόμου ισορροπίας ADINA και αναλυτικού δρόμου ισορροπίας

9.4 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για τοπικό λυγισμό της δοκού μήκους 20m με κυκλικές οπές

Θα εξετασθούν δύο παραδείγματα τοπικού λυγισμού της εξεταζόμενης κυψελωτής δοκού με μείωση του πάχους του κορμού και των πελμάτων της.

9.4.1 Αστοχία της κυψελωτής δοκού λόγω τοπικού λυγισμού στα άκρα της

Προκειμένου να είναι ο τοπικός λυγισμός κρίσιμη μορφή αστοχίας για την εξεταζόμενη δοκό, θα θεωρηθεί η παραπάνω δοκός με αρκετά μειωμένο πάχος κορμού και πελμάτων, ενώ θα τοποθετηθεί και πλευρική εξασφάλιση καθ' όλο το μήκος της στη συνένωση άνω πέλματος-κορμού.

Ορίζονται τα νέα πάχη ως εξής:

$$t_w=7\text{mm}$$

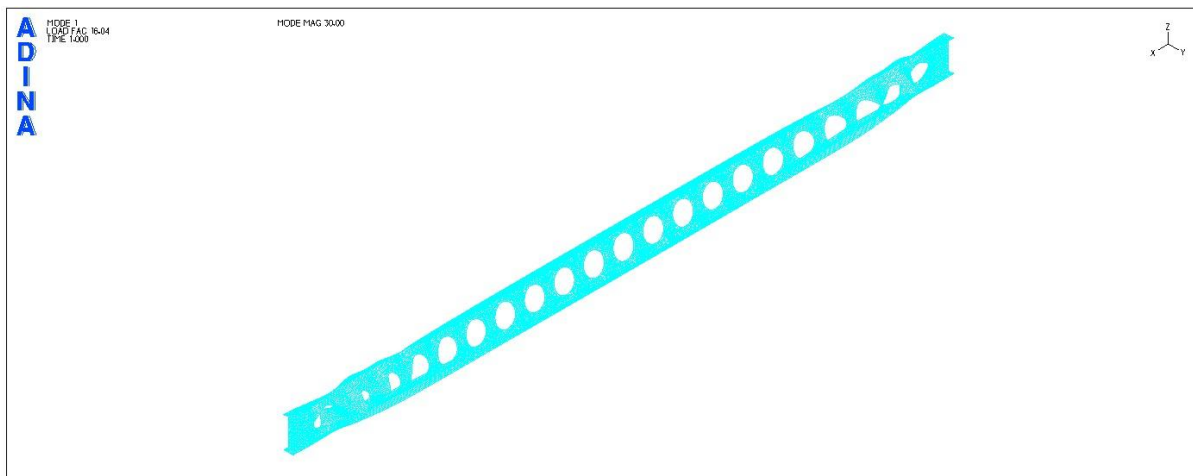
$$t_f=10\text{mm}$$

Το ολικό ύψος της δοκού παραμένει $h=960\text{mm}$, επομένως ο κορμός του απλού ταυ έχει ύψος ίσο με $h_{\text{ταυ}}=(h/2-r_0-t_f)=(960/2-300-10)\text{mm}=170\text{mm}$.

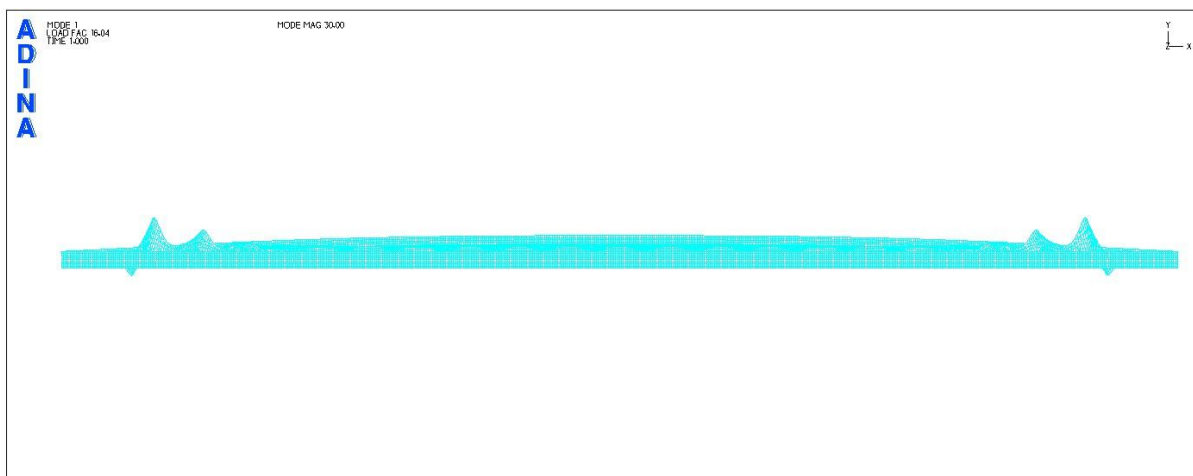
Οι παραπάνω παραδοχές αποτελούν απλουστεύσεις, καθώς γνωρίζουμε ότι οι κυψελωτές δοκοί προέρχονται με κατάλληλη διεργασία από πρότυπες διατομές, συνεπώς πρέπει τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά να είναι συμβατά με χαρακτηριστικά προτύπων διατομών. Ωστόσο, όλοι οι φορείς που έχουν μέχρι τώρα εξετασθεί αντιστοιχούν σε συγκολλητές διατομές τυχαίων διαστάσεων, καθώς στο πρόγραμμα ADINA η κύρια μέθοδος μελέτης είναι η προσομοίωση συγκολλητών διατομών.

Πραγματοποιώντας κατάταξη του κορμού της νέας διατομής, προκύπτει ότι ανήκει στην κατηγορία 4, τόσο για τις τομές bb, όσο και για τις τομές aa. Επομένως, θα γίνει χρήση των ελαστικών ιδιοτήτων για τη διατομή.

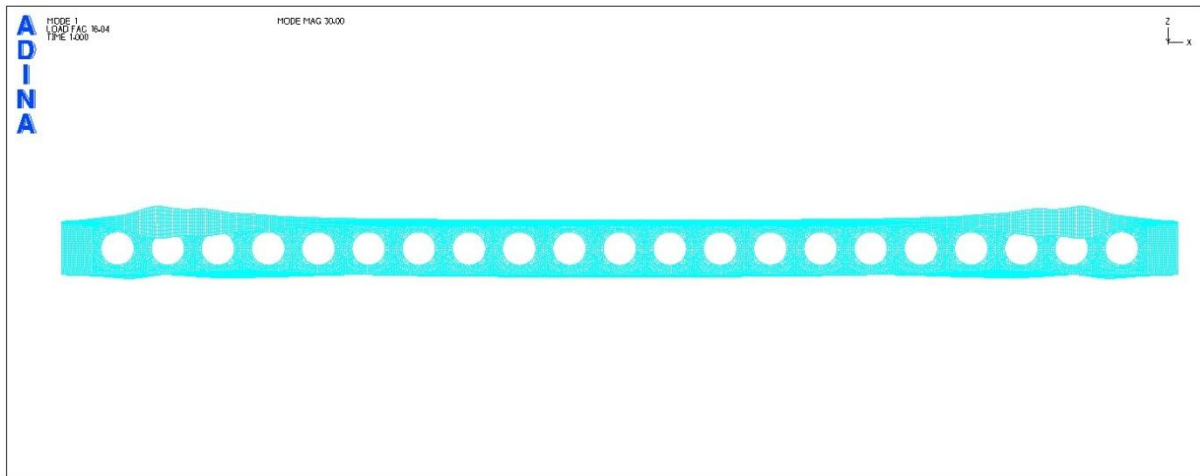
Πραγματοποιείται στο ADINA γραμμική ανάλυση λυγισμού και τα αποτελέσματα φαίνονται στα επόμενα σχήματα.



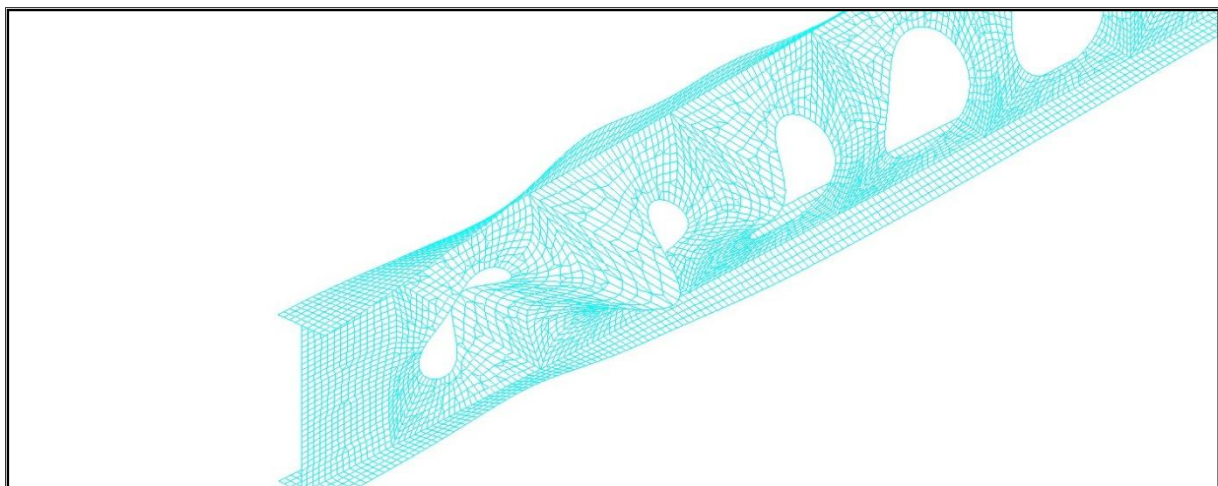
Σχήμα 9.109
1^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 9.110
1^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



Σχήμα 9.111
1^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)



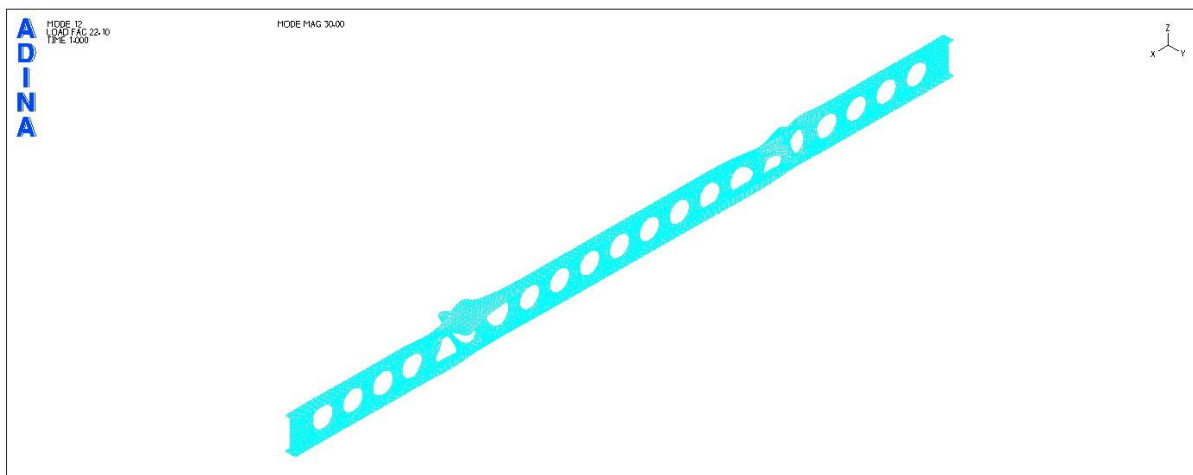
Σχήμα 9.112
1^η ιδιομορφή λυγισμού (λεπτομέρεια τοπικού λυγισμού)

Το κρίσιμο φορτίο για τον τοπικό λυγισμό προέκυψε ίσο με **$P_{cr}=16,04kN/m$** .

Ο τοπικός λυγισμός εξακολουθεί να εμφανίζεται στα άκρα της δοκού για τις πρώτες ιδιομορφές (εξασθενημένη η συμβολή του κορμού στην παραλαβή της τέμνουσας).

Καθώς προχωράμε σε επόμενες ιδιομορφές, ο τοπικός λυγισμός προχωράει σταδιακά στο εσωτερικό της δοκού. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η 12^η

ιδιομορφή, όπου φαίνεται η μετακίνηση του τοπικού λυγισμού από τα άκρα σε απόσταση περί το $\frac{1}{4}$ του μήκους της δοκού.



Σχήμα 9.113
12^η ιδιομορφή λυγισμού

Έχοντας μειώσει το πάχος κορμού και πελμάτων, αλλάζουν τα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά των διατομών του φορέα, και συνεπώς οι τιμές της αντοχής των απλών ταυ, των συμπαγών τμημάτων του κορμού και του κορμού στις στηρίξεις. Οι τιμές αυτές υπολογίζονται σε φύλλο Excel που έχει δημιουργηθεί για αυτόν ακριβώς το σκοπό.

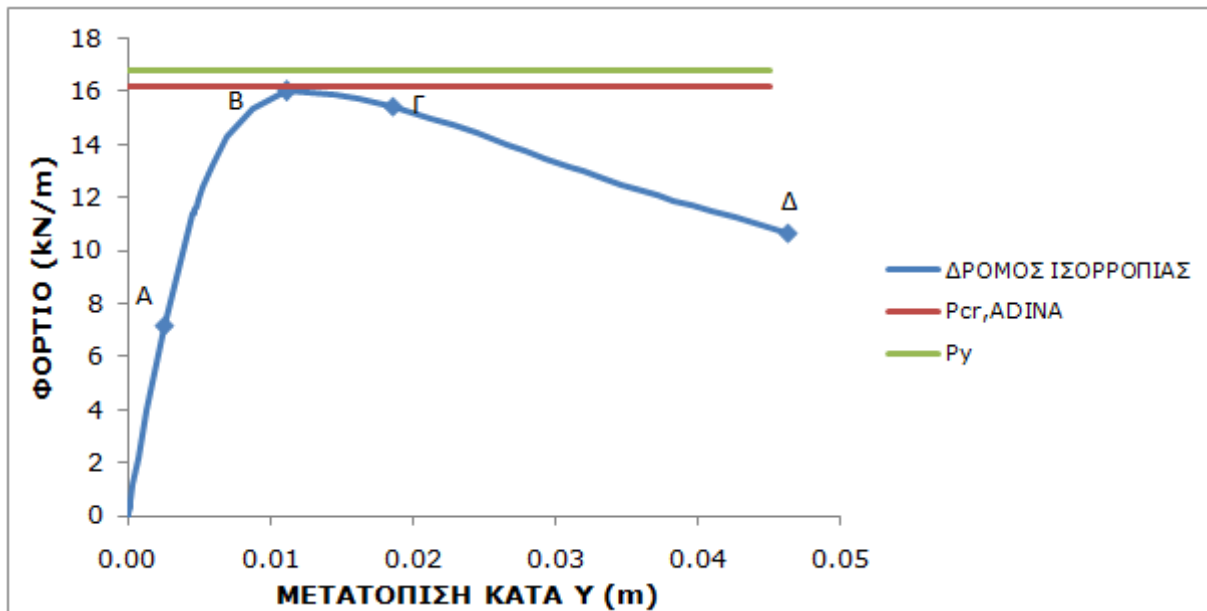
Φορτίζοντας το φορέα με φορτίο ίσο με το φορτίο τοπικού λυγισμού από τη γραμμική ανάλυση στο ADINA ($P=16,04\text{kN/m}$) και εκτελώντας στο φύλλο Excel όλους τους απαραίτητους ελέγχους επάρκειας για κυψελωτές δοκούς, προκύπτει ότι ικανοποιούνται όλα τα κριτήρια και δεν επέρχεται αστοχία του φορέα. Μόνη εξαίρεση συνιστά η μη τήρηση της ανίσωσης $h_0 \leq 60 \cdot \epsilon \cdot t_w$ που απαιτείται για τον έλεγχο επάρκειας των συμπαγών τμημάτων του κορμού σε διαρροή και λυγισμό, εξαιτίας του αρκετά μικρού πάχους κορμού που επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Γίνεται φανερό ότι λόγω αυτού του γεγονότος αναμένεται τοπική αστοχία του κορμού στις περιοχές μεγάλης έντασης (ανάλογα με το πού εκδηλώνεται ο τοπικός λυγισμός στην 1^η ιδιομορφή της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού).

Συνεπώς, κρίσιμη μορφή αστοχίας για το νέο φορέα είναι ο τοπικός λυγισμός. Σημειώνεται ότι το κατανεμημένο φορτίο που αντιστοιχεί στη διαρροή των ακραίων ινών της εξεταζόμενης διατομής προκύπτει ίσο με **$P_y=16,77\text{kN/m}$** .

Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας του φορέα

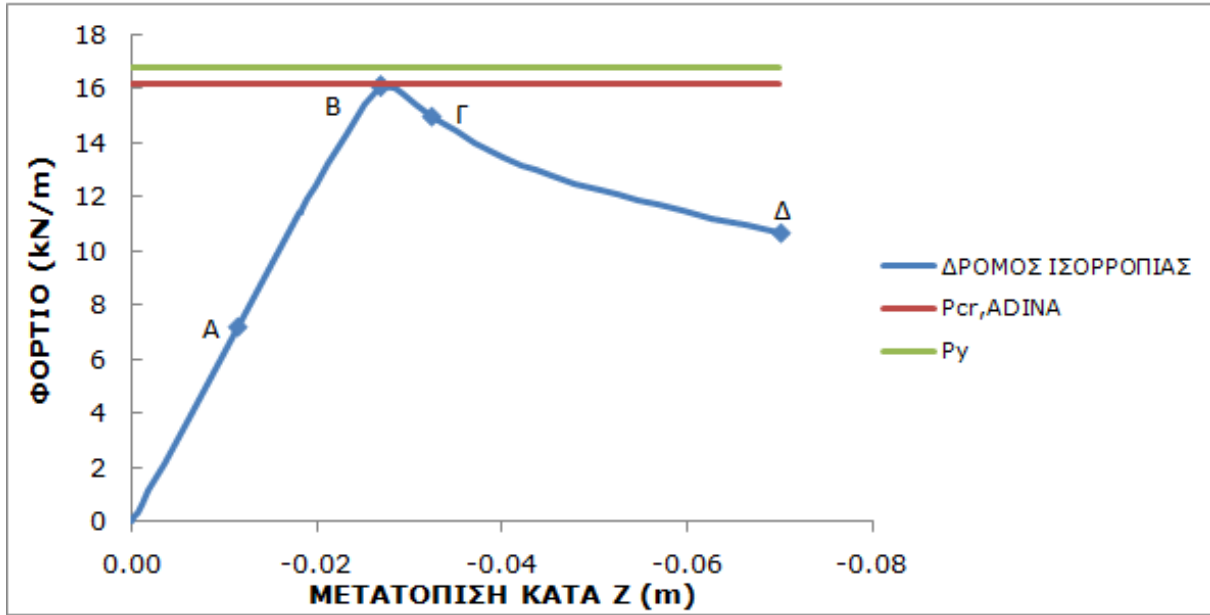
Πραγματοποιείται μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας στο ADINA με τη μέθοδο Arc-Length (collapse analysis) όπου θεωρείται ως σημείο αναφοράς ο κόμβος της μεσαίας διατομής στο σημείο συνένωσης κορμού και κάτω πέλματος. Δίνεται αρχική ατέλεια ίση με 1cm κατά τη διεύθυνση γ και σύμφωνη με την πρώτη ιδιομορφή της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού. Η ατέλεια δίνεται σε κόμβο κοντά στο άκρο της δοκού όπου παρουσιαζόταν έντονος τοπικός λυγισμός. Χρησιμοποιείται διγραμμικό υλικό S235 χωρίς κράτυνση.

Στα επόμενα σχήματα φαίνονται οι δρόμοι ισορροπίας που προέκυψαν από τη μη γραμμική ανάλυση.



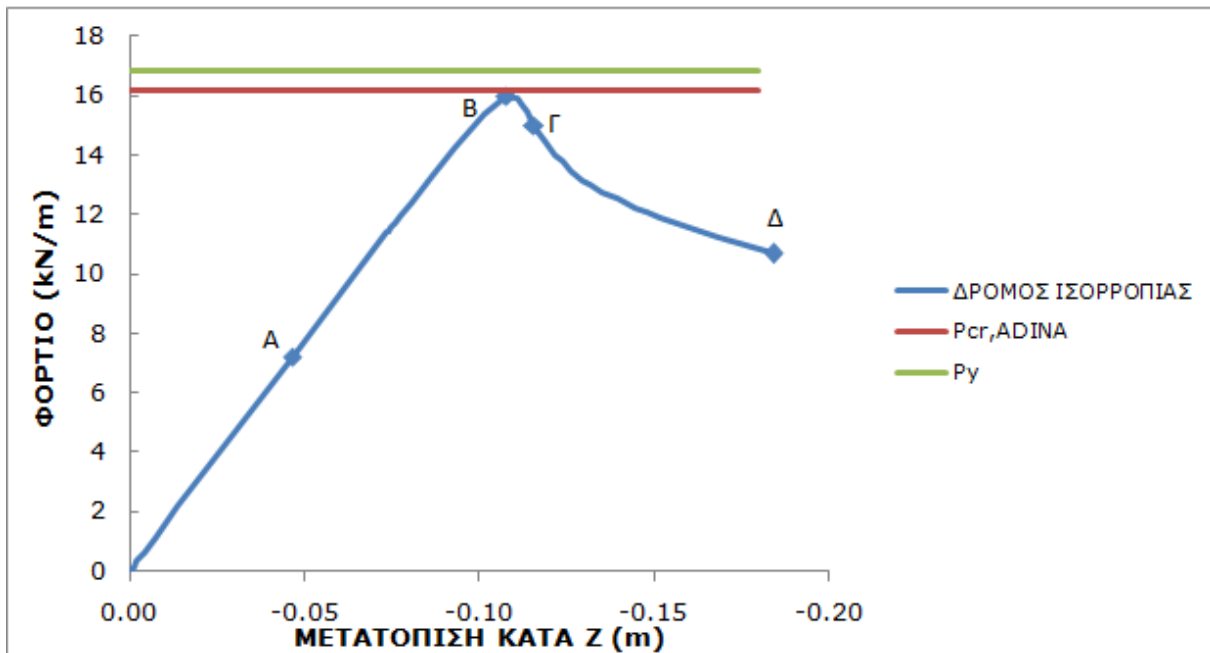
Σχήμα 9.114

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 9.115

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



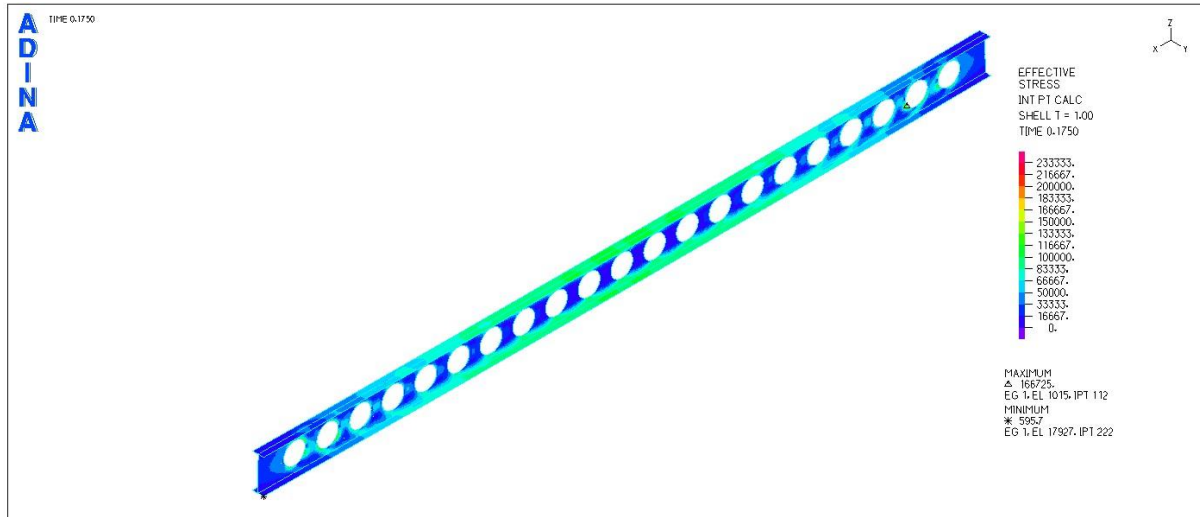
Σχήμα 9.116

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ VON MISES

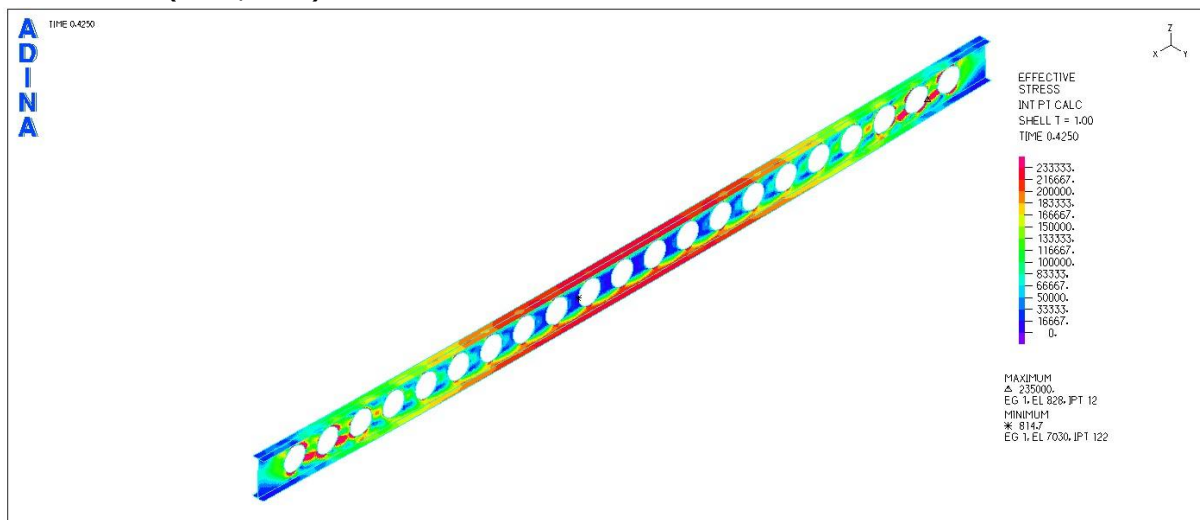
ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,175)



Σχήμα 9.117

Εικόνα τάσεων von Misesγια το χαρακτηριστικό σημείο A

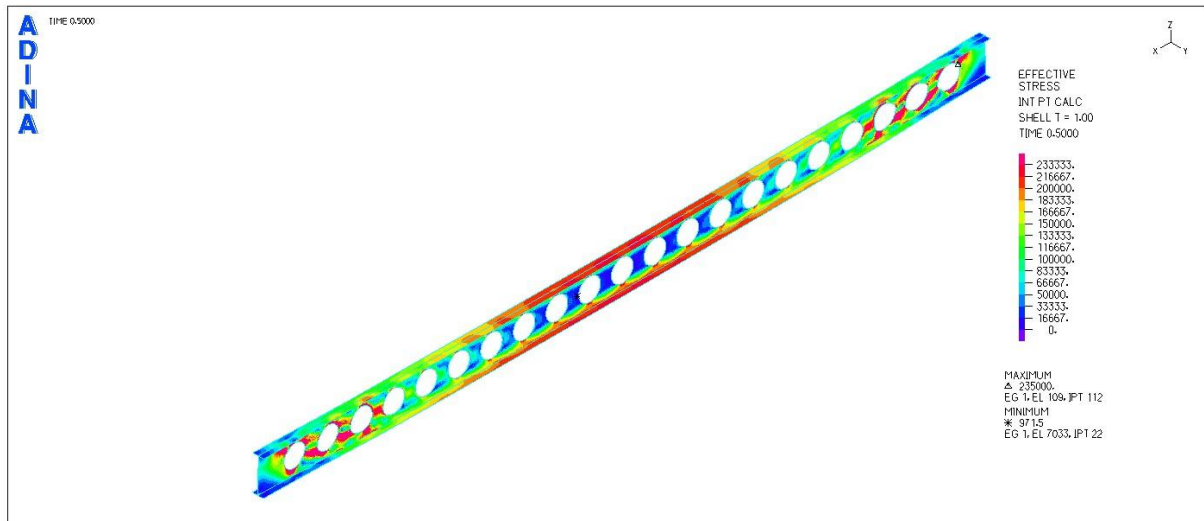
ΣΗΜΕΙΟ B(t=0,425)



Σχήμα 9.118

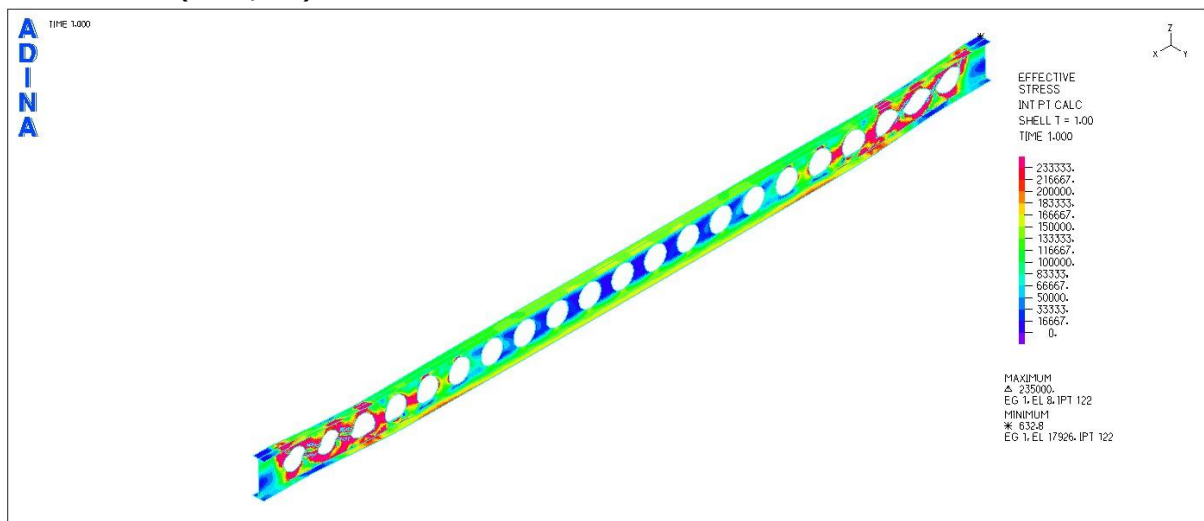
Εικόνα τάσεων von Misesγια το χαρακτηριστικό σημείο B

ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,50)

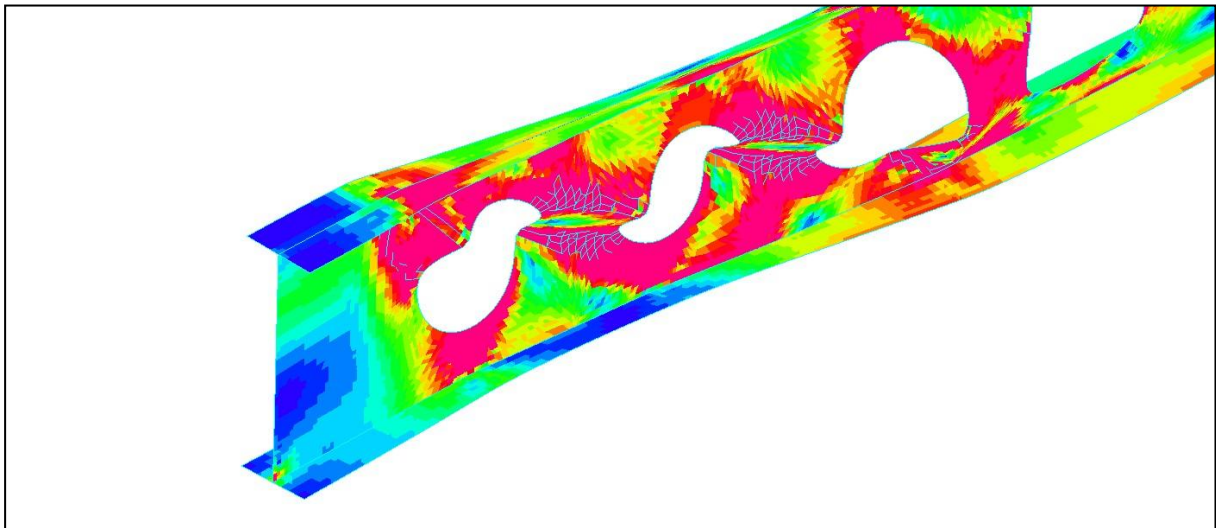


Σχήμα 9.119
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

ΣΗΜΕΙΟ Δ (t=1,00)



Σχήμα 9.120
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ



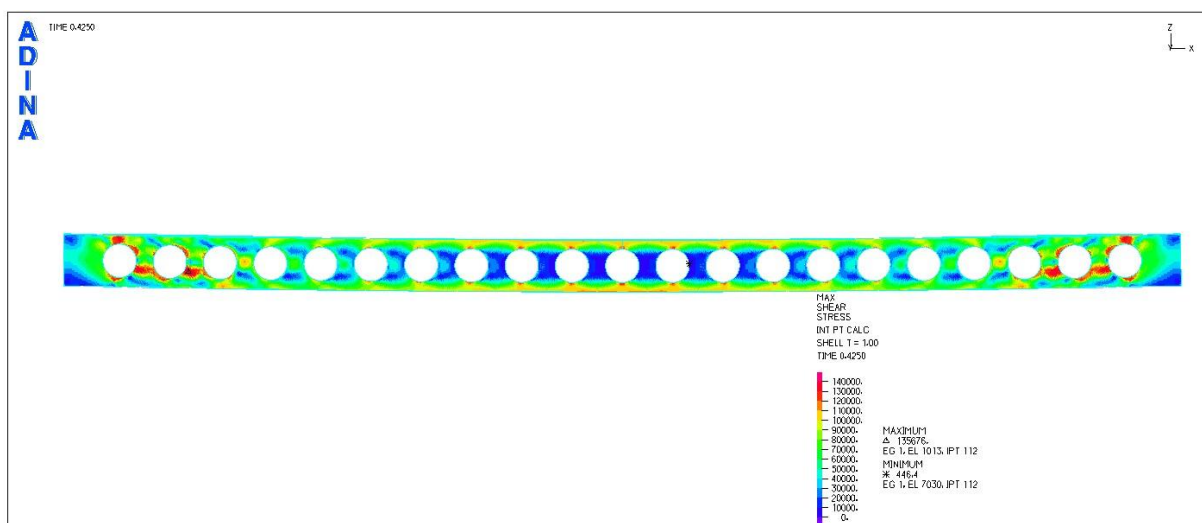
Σχήμα 9.121

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (λεπτομέρεια)

Παρατηρείται τοπικός λυγισμός στα άκρα όπου φαίνεται καθαρά και ο λυγισμός των συμπαγών τμημάτων του κορμού στην περιοχή αυτή (ο λυγισμός των συμπαγών τμημάτων του κορμού εντοπίζεται στα άκρα λόγω της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας που έχει δοθεί σύμφωνη με την 1^η ιδιομορφή).

ΕΙΚΟΝΕΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

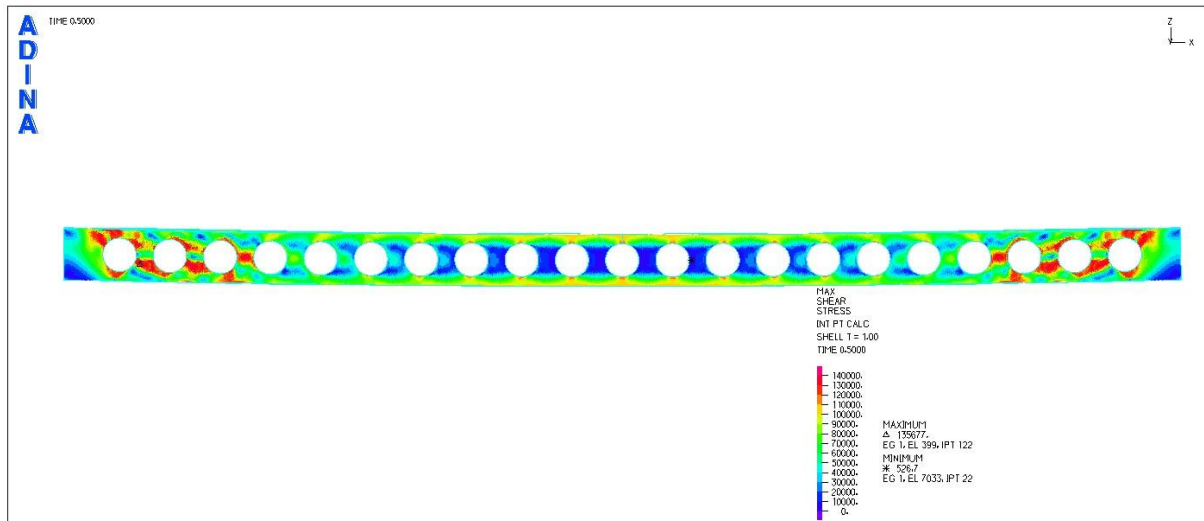
ΣΗΜΕΙΟ Β



Σχήμα 9.122

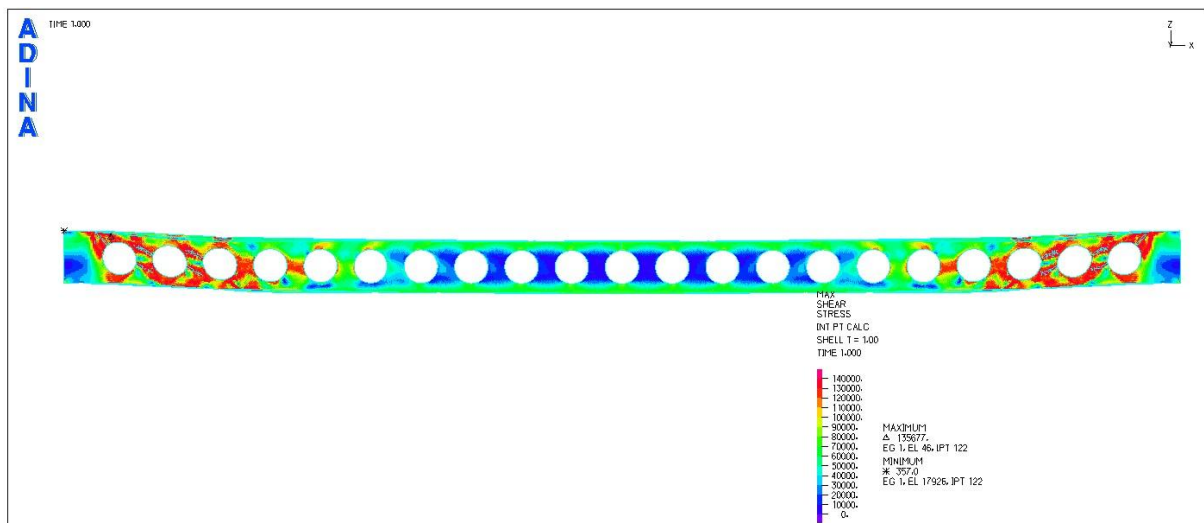
Εικόνα διατμητικών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β

ΣΗΜΕΙΟ Γ



Σχήμα 9.123
Εικόνα διατμητικών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

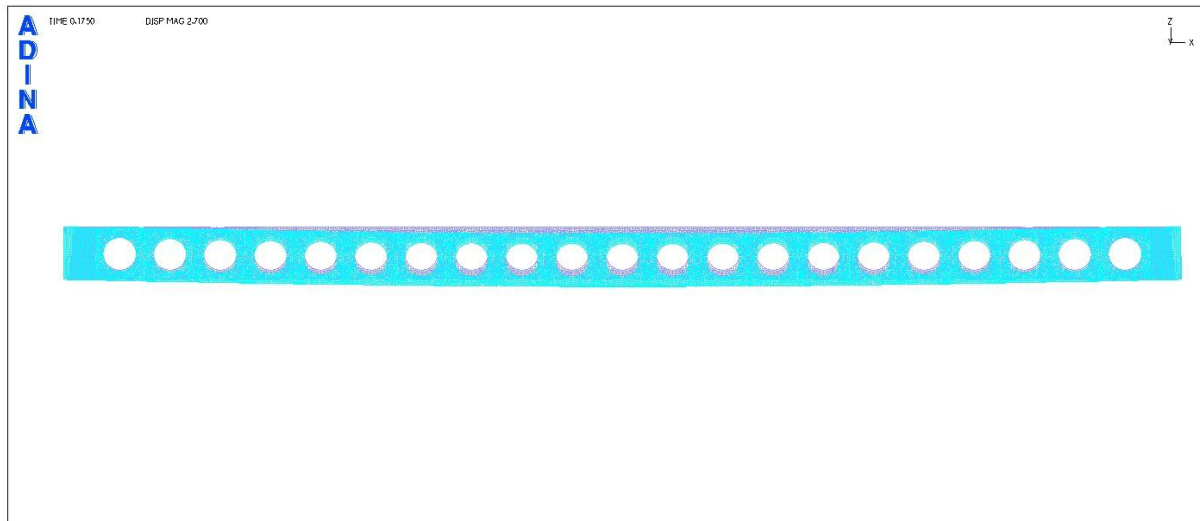
ΣΗΜΕΙΟ Δ



Σχήμα 9.124
Εικόνα διατμητικών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ

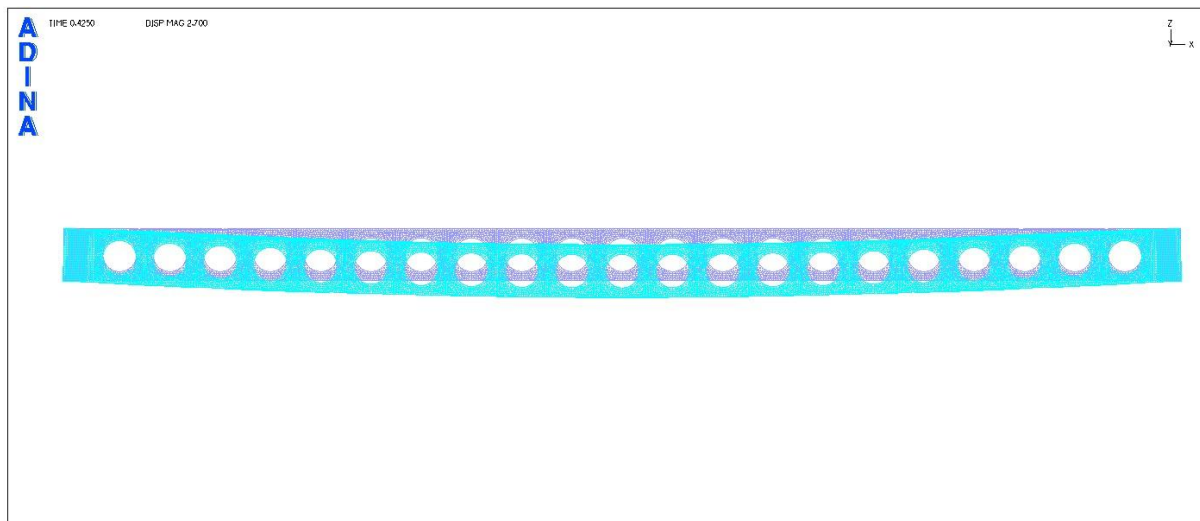
ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΣΗΜΕΙΟ Α



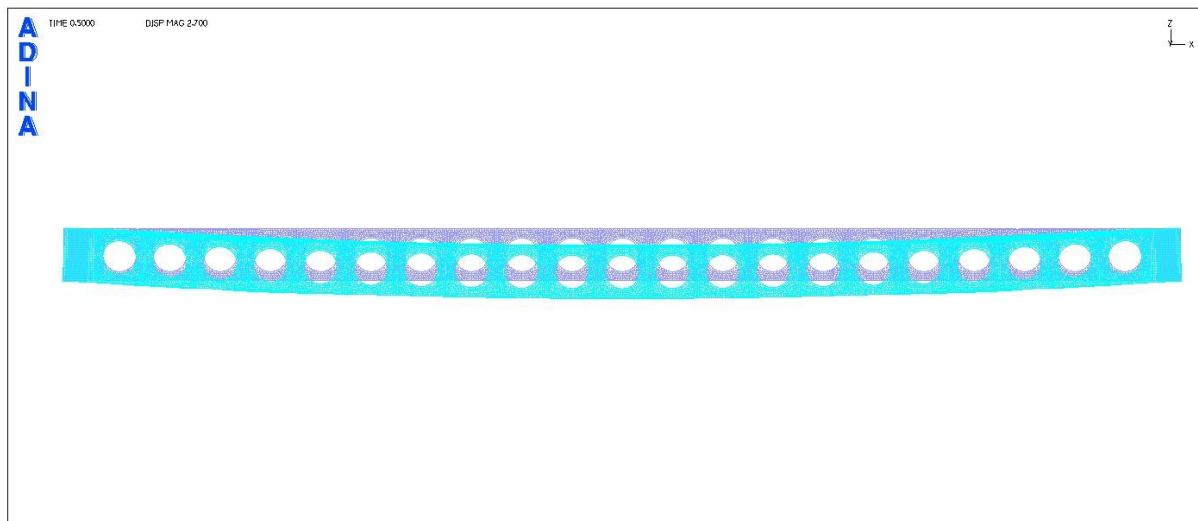
Σχήμα 9.125
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Α

ΣΗΜΕΙΟ Β



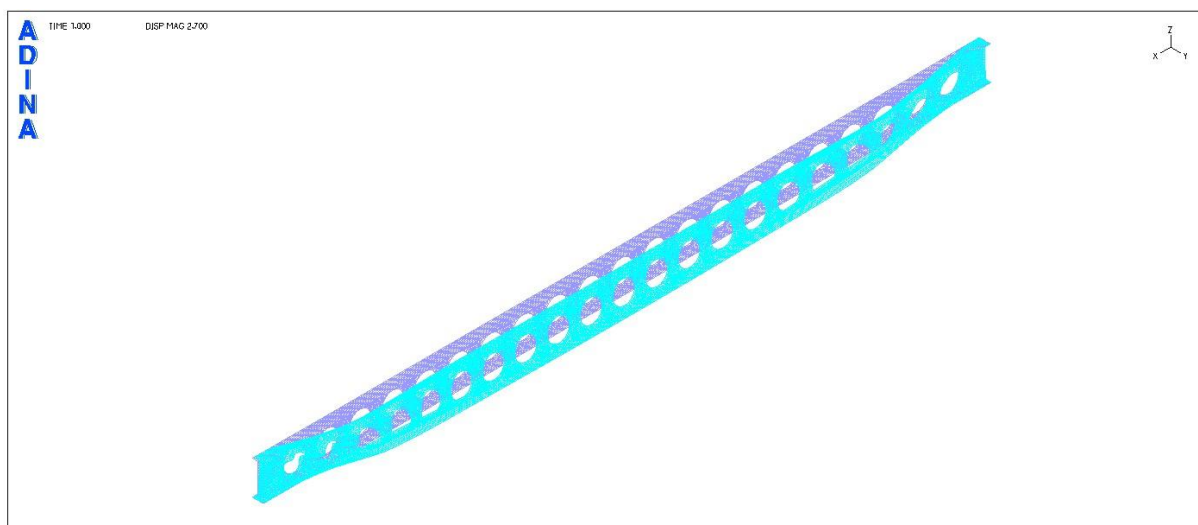
Σχήμα 9.126
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β

ΣΗΜΕΙΟ Γ

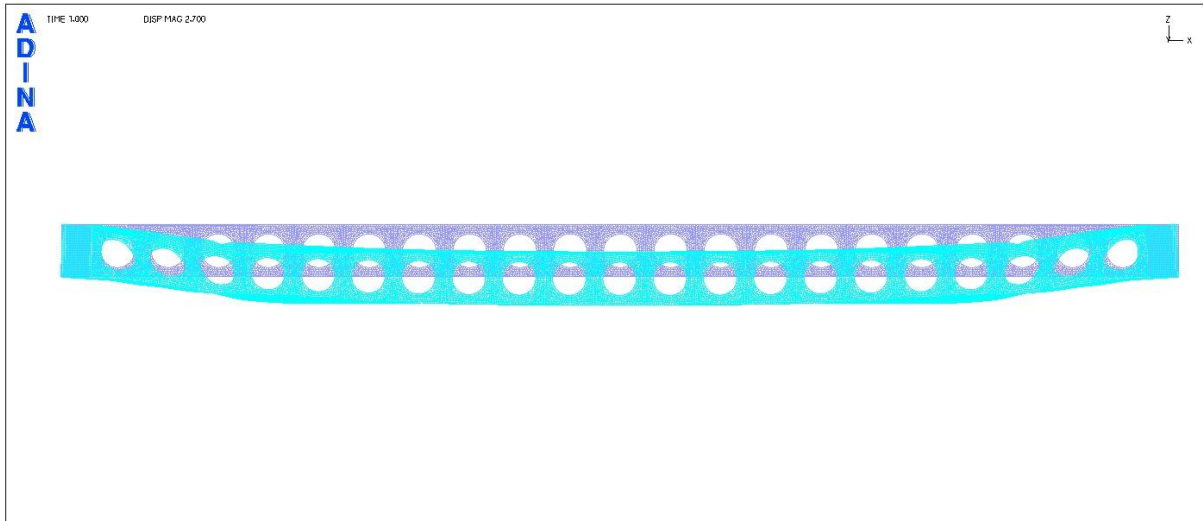


Σχήμα 9.127
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

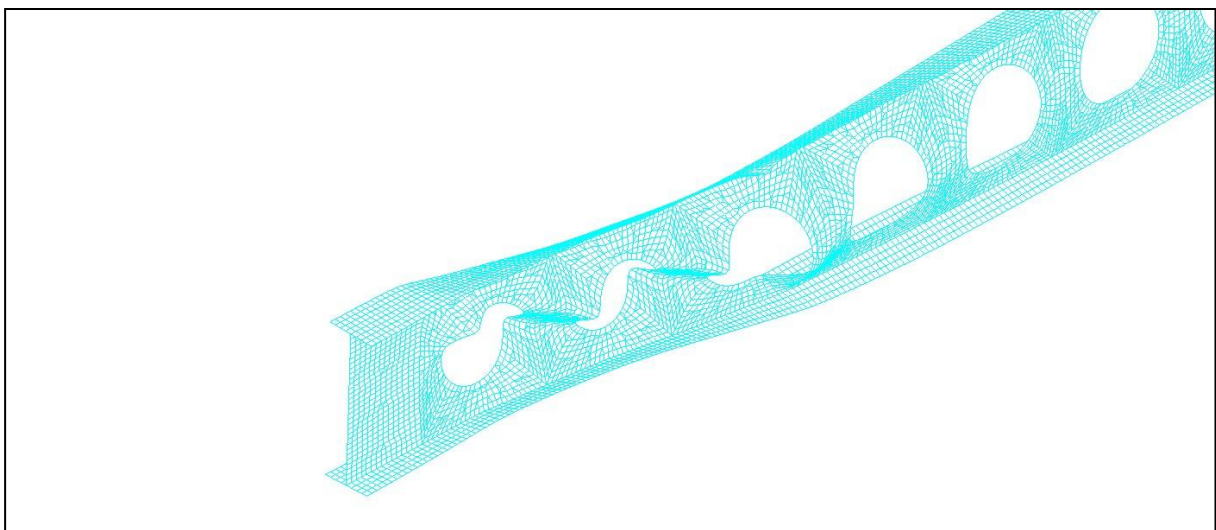
ΣΗΜΕΙΟ Δ



Σχήμα 9.128
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (προοπτικό)



Σχήμα 9.129
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (όψη)



Σχήμα 9.130
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Δ (λεπτομέρεια)

9.4.2 Αστοχία της κυψελωτής δοκού λόγω αλληλεπίδρασης διαρροής και τοπικού λυγισμού στο μέσο της

Έως τώρα, ο τοπικός λυγισμός για τις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού προέκυπτε στα άκρα της δοκού. Όπως έχει διερευνηθεί στο κεφάλαιο 6, ένας αποτελεσματικός τρόπος προκειμένου να λάβουμε εικόνα τοπικού λυγισμού στο μέσο μιας αμφιέριστης δοκού είναι να μειωθεί αρκετά και το πάχος των πελμάτων. Συνέπεια θα είναι η αποδυνάμωση των πελμάτων στην παραλαβή της κάμψης και άρα η εμφάνιση τοπικού λυγισμού στο άνω θλιβόμενο πέλμα λόγω κάμψης.

Για το λόγο αυτό επιλέγονται τα εξής πάχη:

$$t_w = 7,5 \text{ mm}$$

$$t_f = 8,2 \text{ mm}$$

Το ολικό ύψος της δοκού λαμβάνεται και πάλι ίσο με $h = 960 \text{ mm}$, επομένως ο κορμός του απλού ταυ έχει ύψος ίσο με $h_{\text{ταυ}} = (h/2 - r_0 - t_f) = (960/2 - 300 - 8,2) \text{ mm} = 171,8 \text{ mm}$.

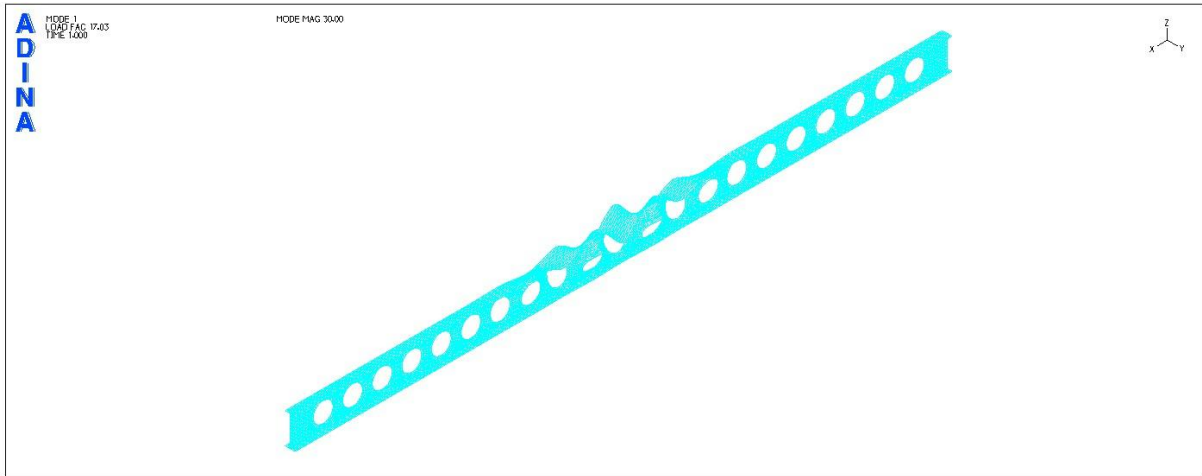
Ο κορμός κατατάσσεται στην 4^η κατηγορία σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα.

Στο φύλλο Excel που έχει δημιουργηθεί για τη μελέτη των κυψελωτών δοκών υπολογίζονται τα νέα γεωμετρικά και αδρανειακά χαρακτηριστικά των διατομών του φορέα, καθώς και οι τιμές της αντοχής των απλών ταυ, των συμπαγών τμημάτων του κορμού και του κορμού στις στηρίξεις.

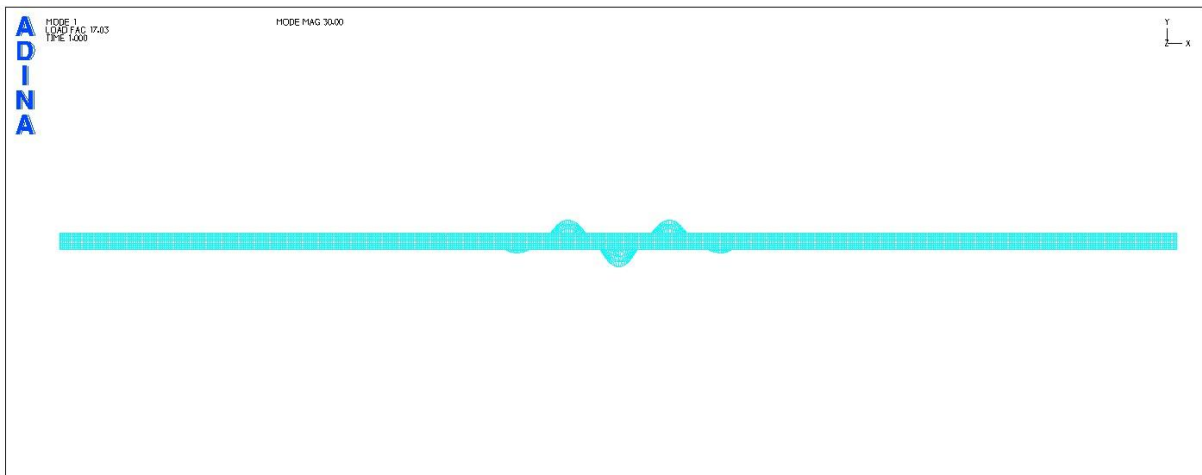
Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το κατανεμημένο φορτίο που αντιστοιχεί στη διαρροή των ακραίων ινών της μεσαίας διατομής του φορέα και συνεπώς στην υπέρβαση για την περιοχή αυτή της αντοχής σε αξονική δύναμη των κατακορύφων απλών ταυ, αλλά και στην υπέρβαση της αντοχής σε διάτμηση των απλών ταυ υπό γωνία, είναι ίσο με **$P_y = 14,73 \text{ kN/m}$** . Η αστοχία των απλών ταυ στα άκρα της δοκού, επέρχεται για αρκετά μεγαλύτερη τιμή φορτίου.

Προφανώς δεν τηρείται και πάλι η ανίσωση $h_0 \leq 60 \cdot \epsilon \cdot t_w$ που απαιτείται για τον έλεγχο επάρκειας των συμπαγών τμημάτων του κορμού σε διαρροή και λυγισμό, εξαιτίας του αρκετά μικρού πάχους κορμού.

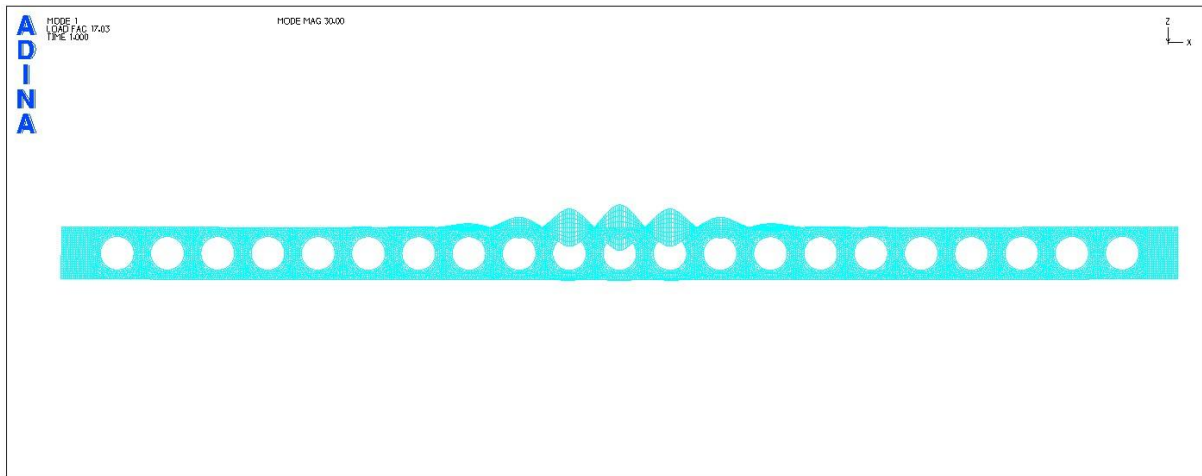
Πραγματοποιείται στο ADINA γραμμική ανάλυση λυγισμού για τον πλευρικά εξασφαλισμένο φορέα και τα αποτελέσματα φαίνονται στα επόμενα σχήματα.



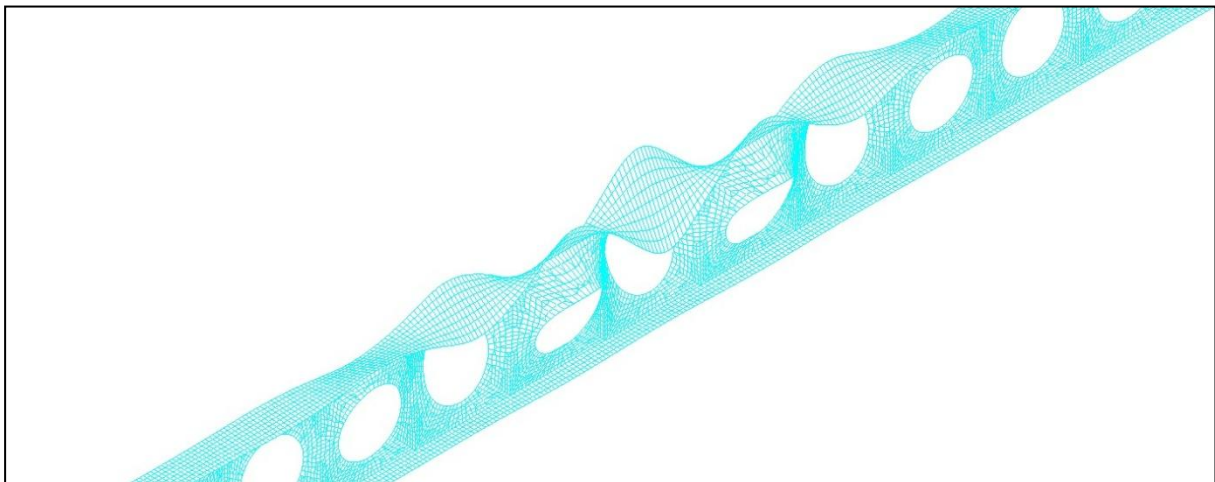
Σχήμα 9.131
1^η ιδιομορφή λυγισμού (προοπτικό)



Σχήμα 9.132
1^η ιδιομορφή λυγισμού (κάτοψη)



Σχήμα 9.133
1^η ιδιομορφή λυγισμού (όψη)



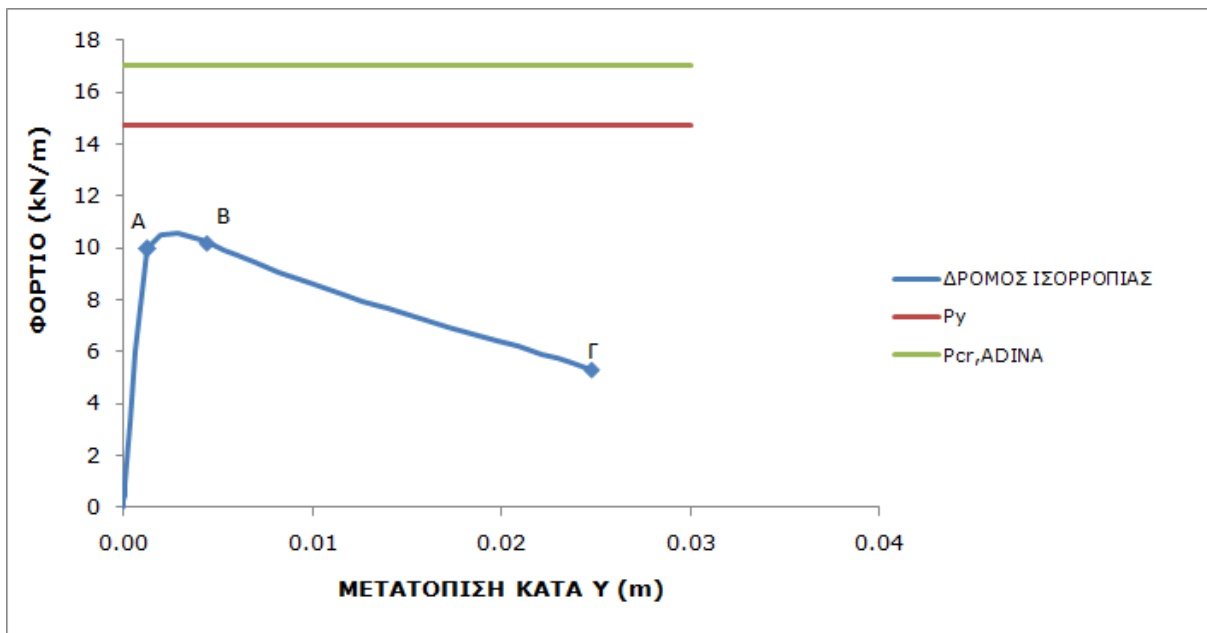
Σχήμα 9.134
1^η ιδιομορφή λυγισμού (λεπτομέρεια)

Παρατηρούμε ότι εκδηλώνεται τοπικός λυγισμός στο μέσο της δοκού ήδη από την 1^η ιδιομορφή λυγισμού. Η εμφάνιση του γίνεται προφανώς στο θλιβόμενο άνω πέλμα και στο άνω τμήμα του κορμού. Τα συμπαγή τμήματα του κορμού που αστοχούν βρίσκονται τώρα στην περιοχή της μεσαίας διατομής και όχι στα άκρα της δοκού. Το αντίστοιχο φορτίο τοπικού λυγισμού προκύπτει ίσο με **$P_{cr}=17,03\text{kN/m}$** , λίγο μεγαλύτερο από το φορτίο που αντιστοιχεί στη ροπή διαρροής των ακραίων ινών της

μεσαίας διατομής, $P_y=14,73\text{kN/m}$. Αναμένεται αλληλεπίδραση διαρροής και τοπικού λυγισμού για το φορέα.

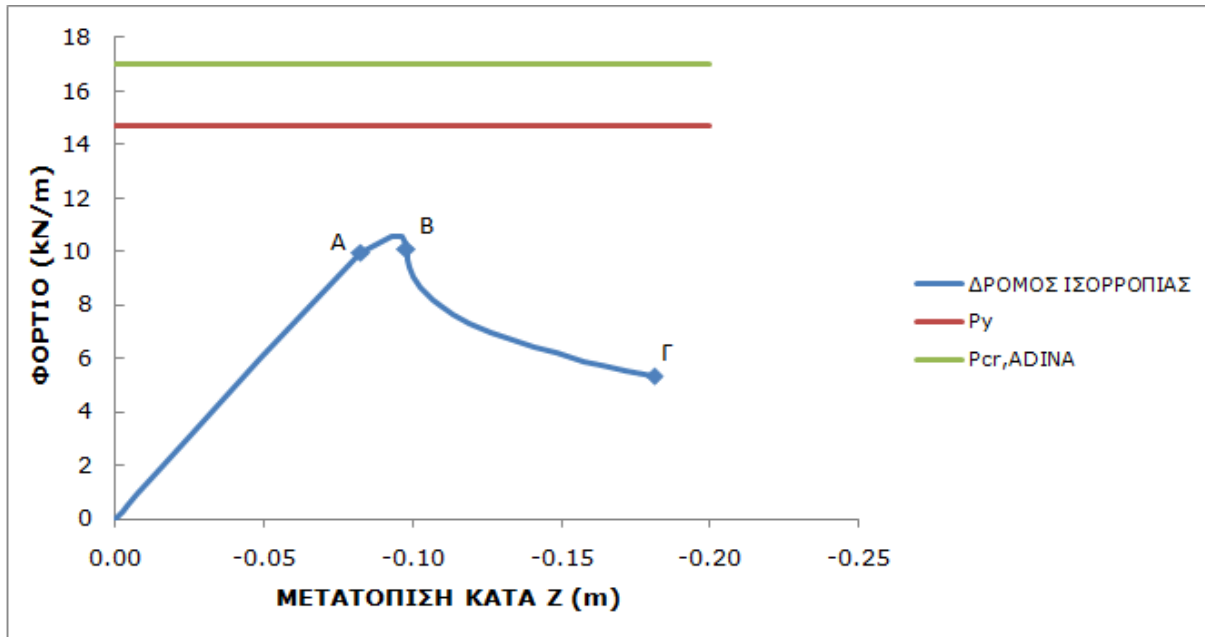
Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας του φορέα

Με τη χρήση της μεθόδου Arc-Length πραγματοποιείται στο ADINA μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας, η οποία θα επιτρέψει να φανεί η αλληλεπίδραση των δύο μορφών αστοχίας. Θεωρείται ως σημείο αναφοράς ο κόμβος της μεσαίας διατομής στο σημείο συνένωσης κορμού και κάτω πέλματος. Δίνεται αρχική ατέλεια ίση με 1cm κατά τη διεύθυνση y και σύμφωνα με την πρώτη ιδιομορφή της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού. Η ατέλεια δίνεται σε κόμβο λίγο κάτω από τη συναρμογή άνω πέλματος και κορμού της μεσαίας διατομής, η οποία είναι δεσμευμένη κατά y . Χρησιμοποιείται διγραμμικό υλικό S235 χωρίς κράτυνση. Στα επόμενα σχήματα φαίνονται οι δρόμοι ισορροπίας που προέκυψαν από τη μη γραμμική ανάλυση.



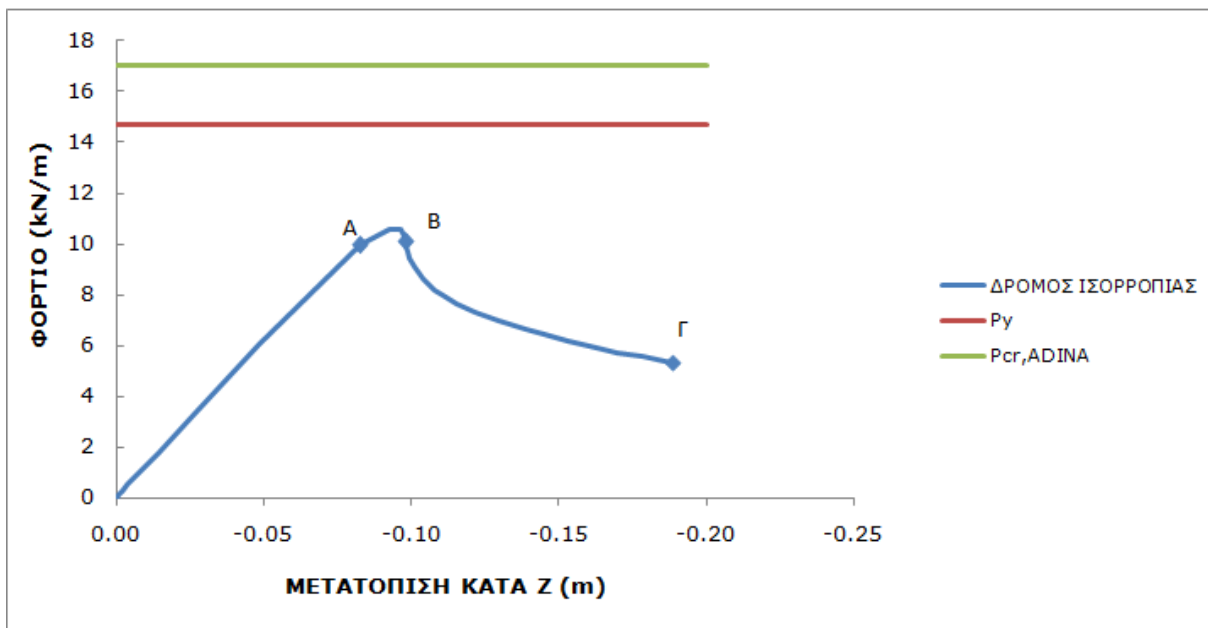
Σχήμα 9.135

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- y μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 9.136

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε η ατέλεια



Σχήμα 9.137

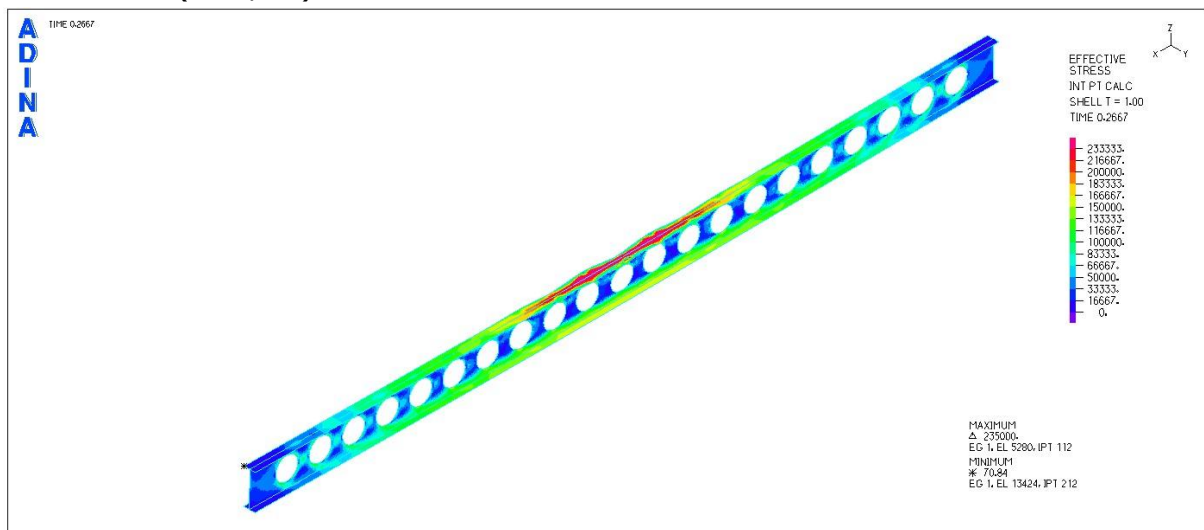
Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

Χαρακτηριστικό είναι ότι η φέρουσα ικανότητα του φορέα μειώνεται αρκετά τόσο εξαιτίας της αλληλεπίδρασης διαρροής και τοπικού λυγισμού, όσο και λόγω της μεγάλης αρχικής γεωμετρικής ατέλειας. Ο φορέας αστοχεί επομένως για φορτίο μικρότερο από το φορτίο που αντιστοιχεί στη ροπή διαρροής. Το φορτίο αστοχίας προκύπτει από τους δρόμους ισορροπίας ίσο με $q=10,6 \text{ kN/m}$.

Επιπρόσθετα φαίνεται και η μεγάλη επιρροή της διαρροής, σε αντίθεση με το προηγούμενο παράδειγμα, καθώς έχουμε αρκετά μικρότερη εγκάρσια εκτροπή του κόμβου της ατέλειας.

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

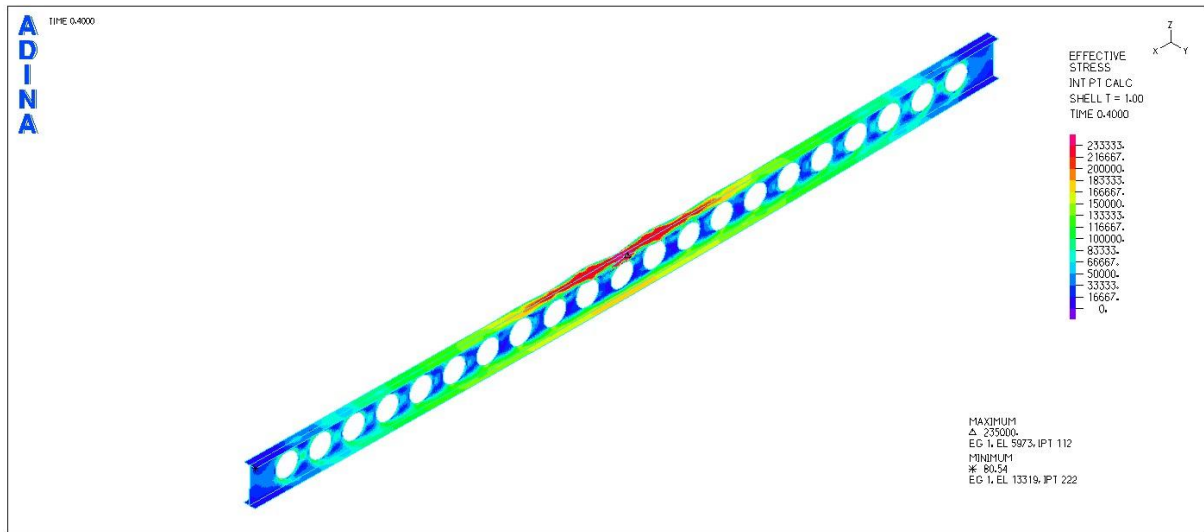
ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ VON MISES ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,27)



Σχήμα 9.138

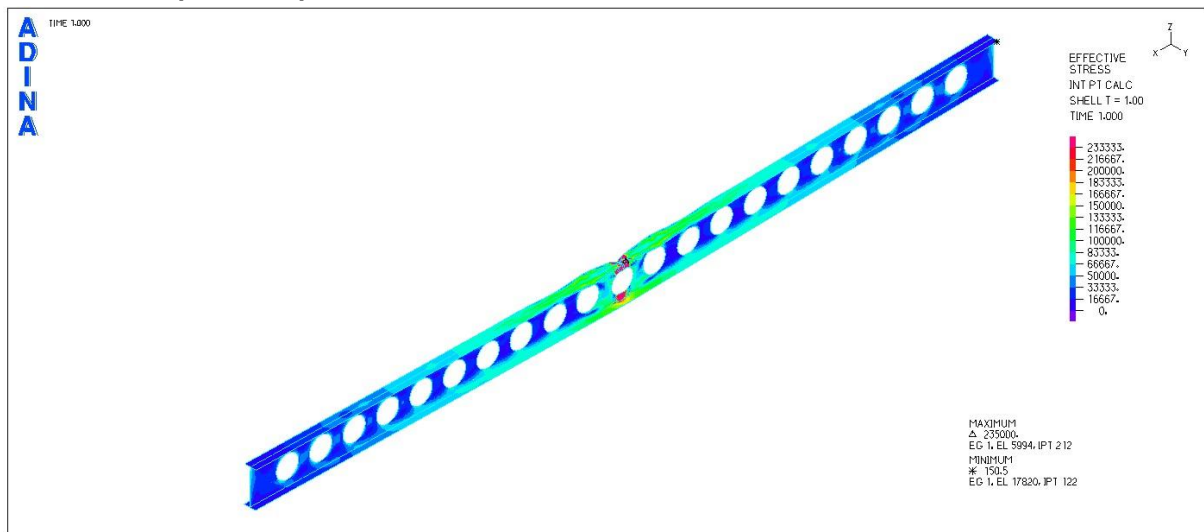
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο A

ΣΗΜΕΙΟ Β (t=0,40)

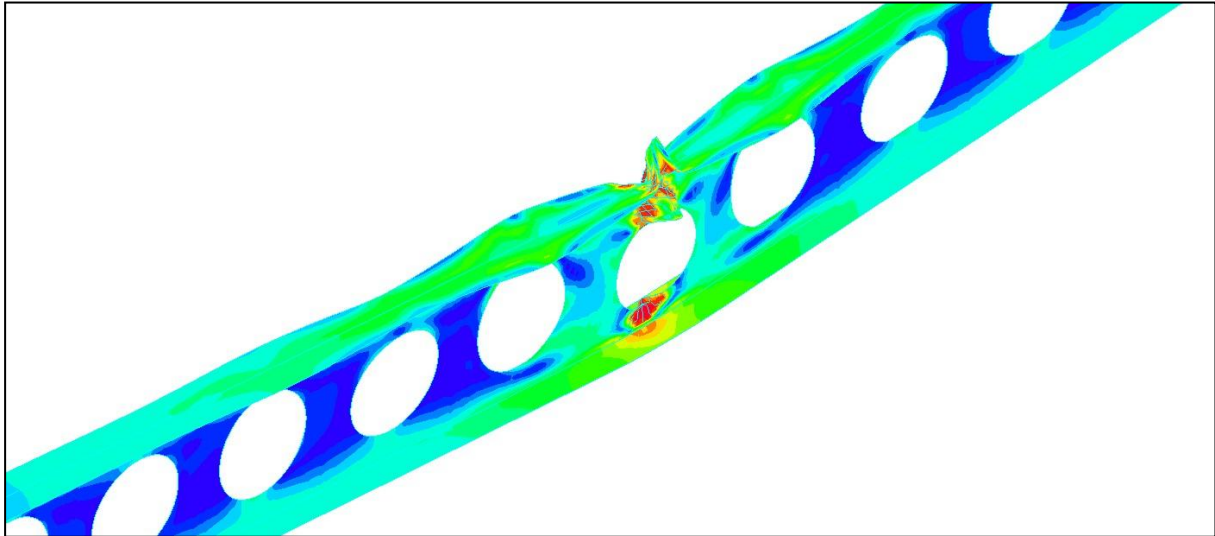


Σχήμα 9.139
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Β

ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=1,00)



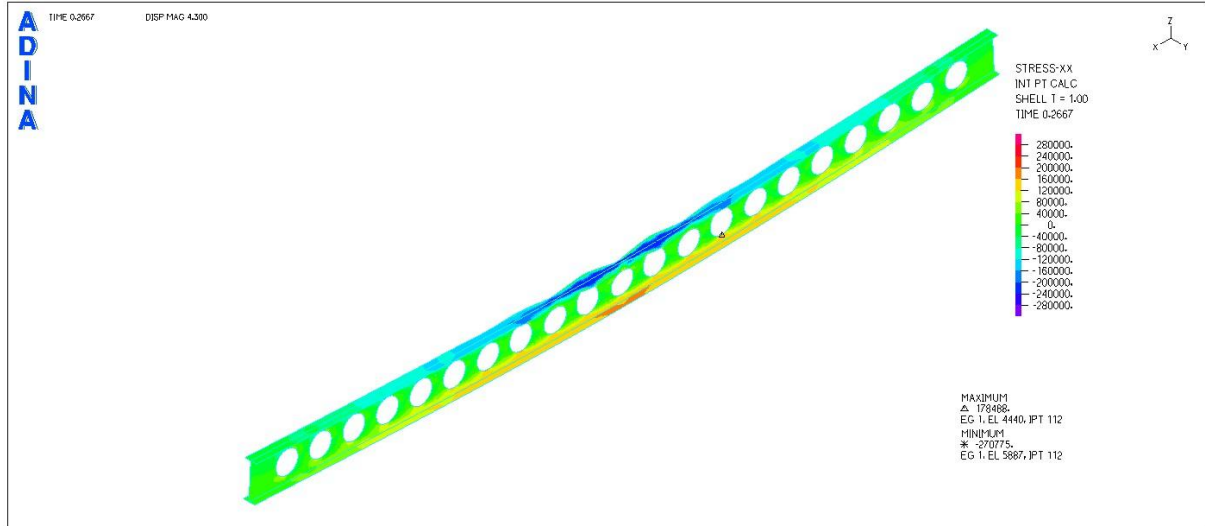
Σχήμα 9.140
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ



Σχήμα 9.141

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (λεπτομέρεια)

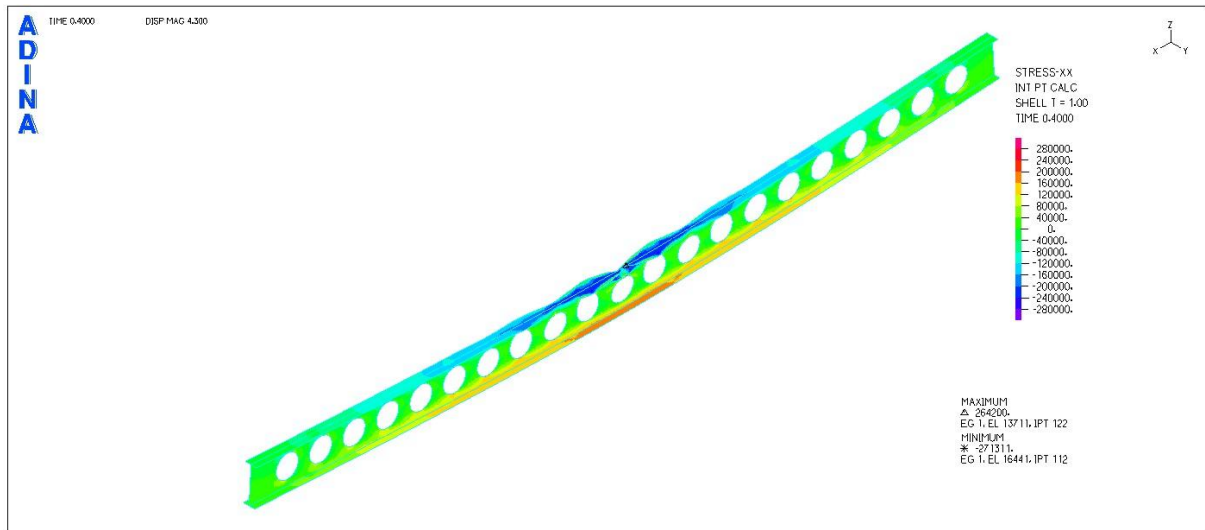
ΕΙΚΟΝΕΣ ΟΡΘΩΝ ΤΑΣΕΩΝ
ΣΗΜΕΙΟ A



Σχήμα 9.142

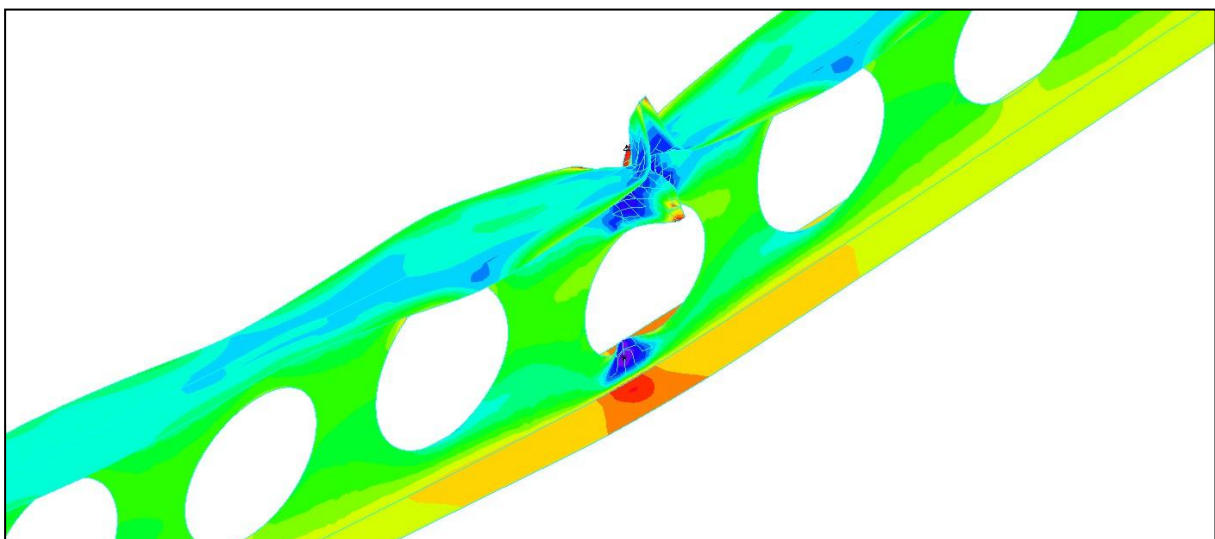
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο A

ΣΗΜΕΙΟ Β



Σχήμα 9.143
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β

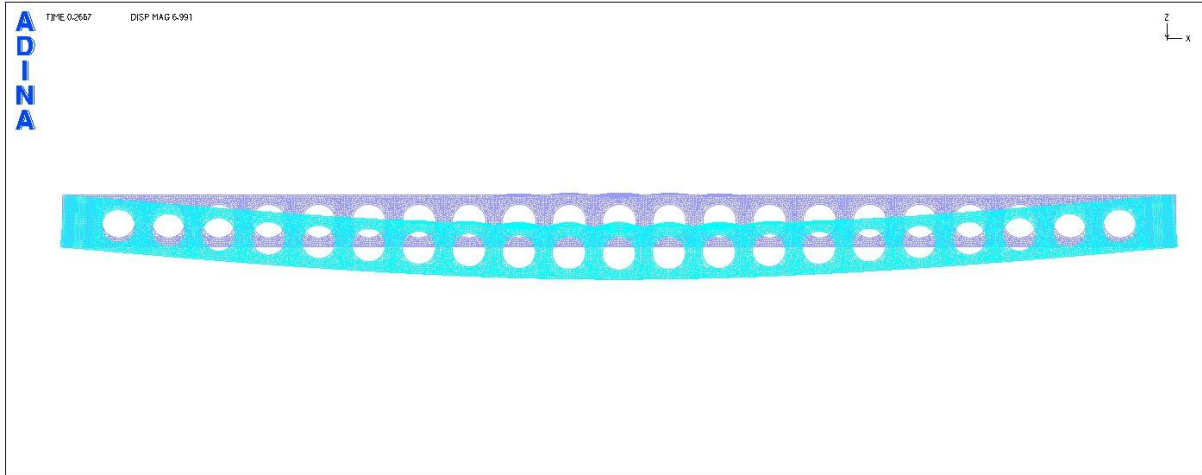
ΣΗΜΕΙΟ Γ



Σχήμα 9.144
Εικόνα ορθών τάσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (λεπτομέρεια)

ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

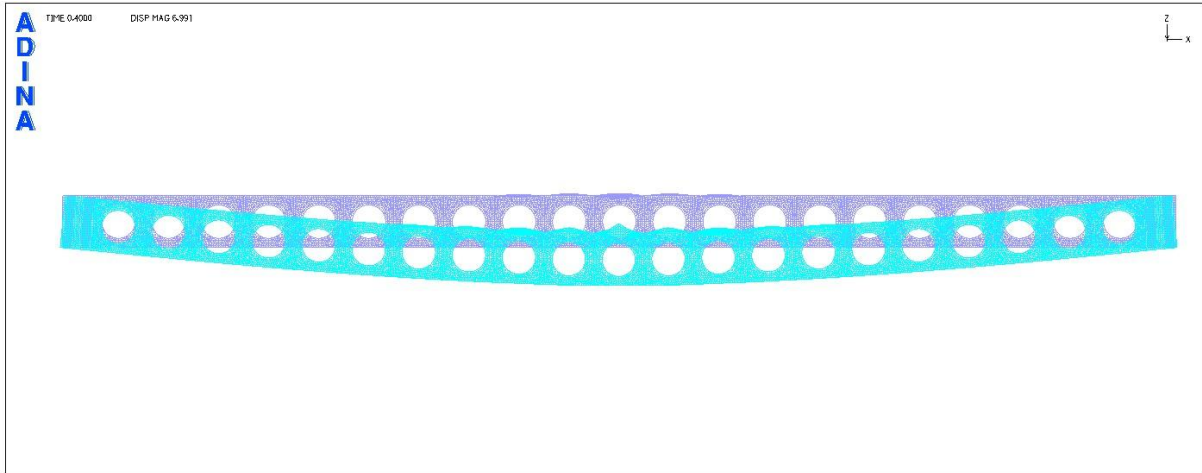
ΣΗΜΕΙΟ Α



Σχήμα 9.145

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Α

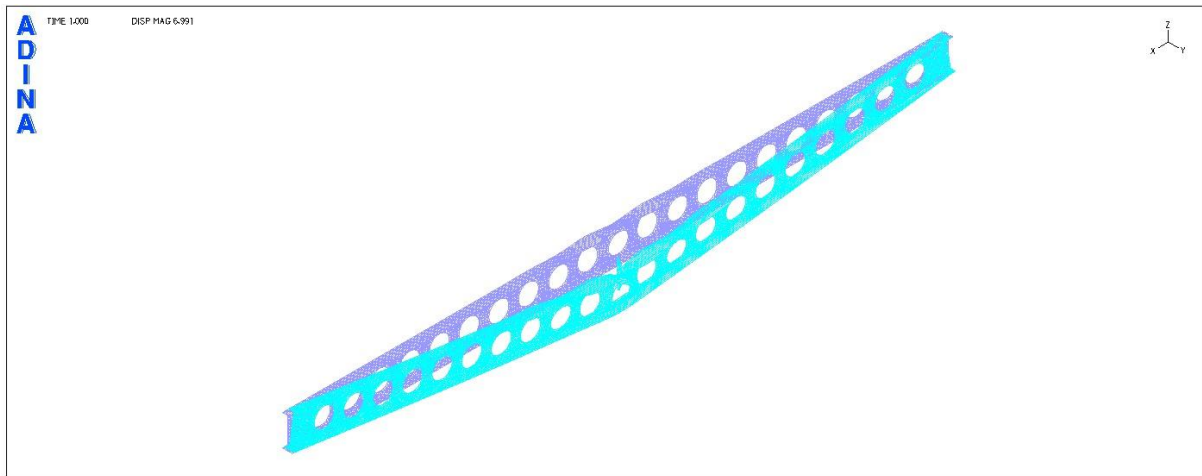
ΣΗΜΕΙΟ Β



Σχήμα 9.146

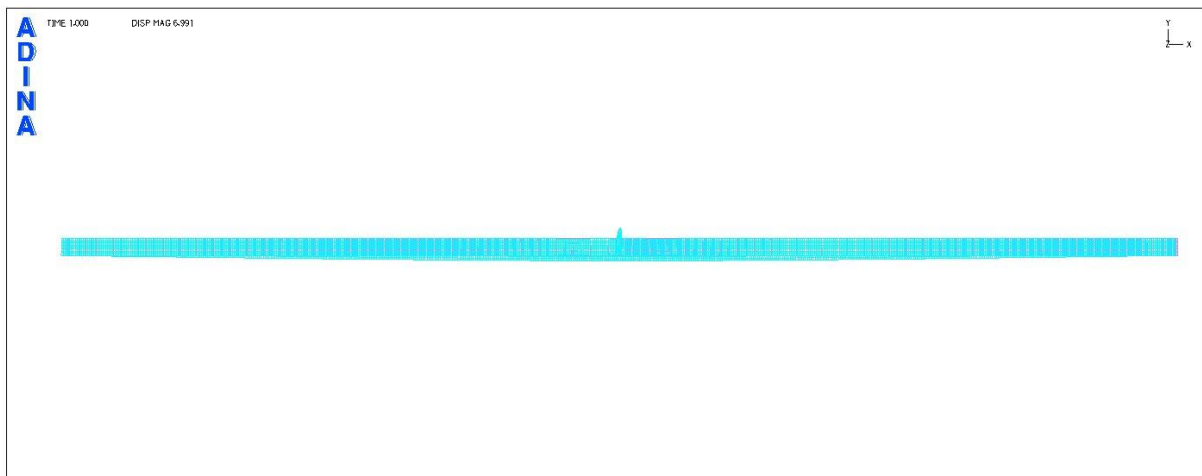
Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Β

ΣΗΜΕΙΟ Γ



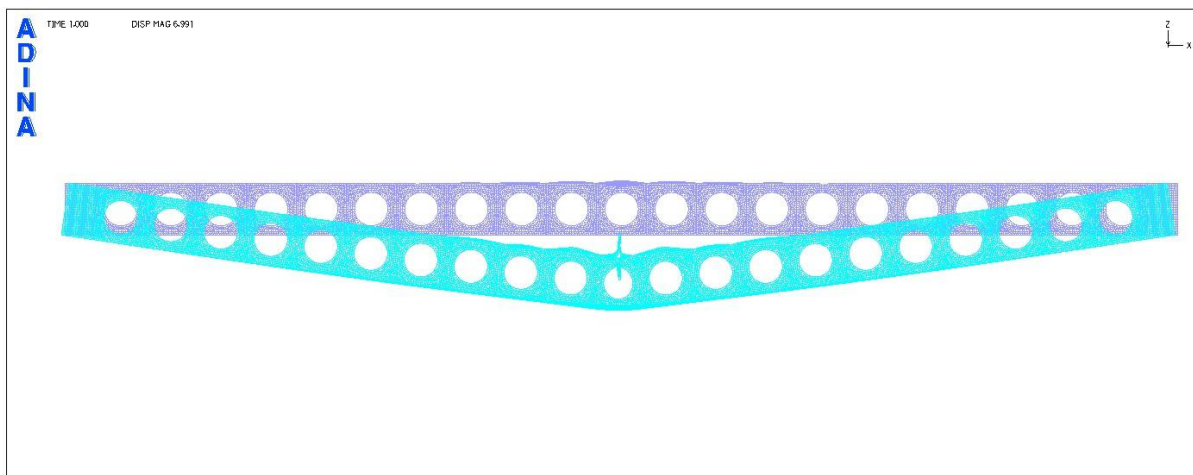
Σχήμα 9.147

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)



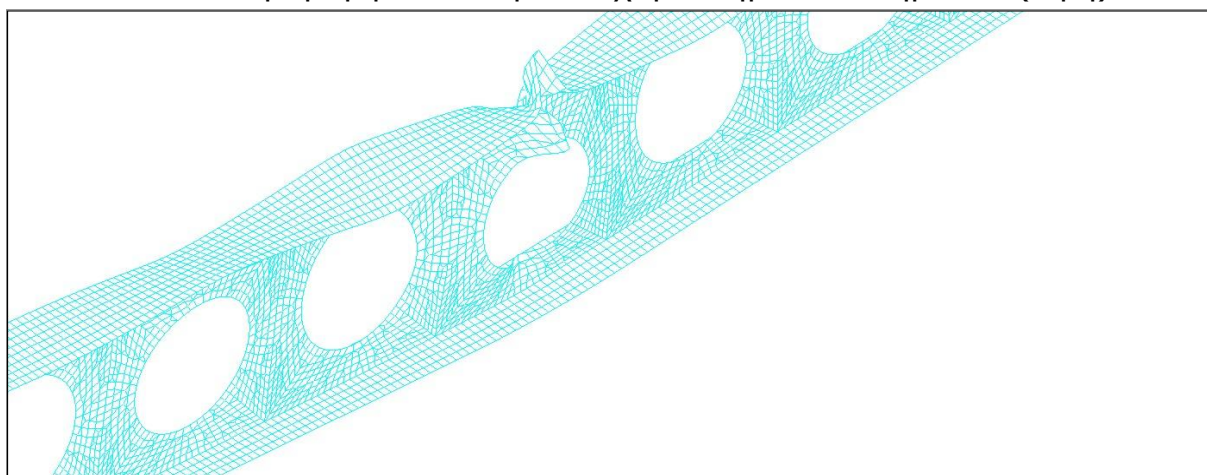
Σχήμα 9.148

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (κάτοψη)



Σχήμα 9.149

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)



Σχήμα 9.150

Εικόνα παραμορφώσεων για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (λεπτομέρεια)

Σε όλες τις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε την αλληλεπίδραση διαρροής και τοπικού λυγισμού στο μέσο της δοκού. Η αστοχία του φορέα επιταχύνεται εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των δύο φαινομένων.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ:

Στην παράγραφο 9.4 εξετάσθηκε αρκετά μεγάλη μείωση του πάχους του κορμού και των πελμάτων, ώστε να επιβεβαιωθεί η αναμενόμενη αστοχία των δοκών λόγω τοπικού λυγισμού. Πρέπει, όμως, να σημειωθεί ότι στην πράξη δεν επιλέγεται η κατασκευή κυφελωτών δοκών από πρότυπες διατομές μικρού πάχους. Η παρουσία των οπών στον κορμό μειώνει τη διατμητική αντοχή των δοκών, συνεπώς είναι επιθυμητό να διαθέτουν επαρκώς ικανό πάχος κορμού.

Κεφάλαιο 10

Αριθμητικές αναλύσεις δοκών με κυκλικές οπές

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA για δοκούς με κυκλικές οπές. Έγιναν αναλύσεις για διάφορα μήκη δοκών, διάφορα πάχη κορμού και πελμάτων και διάφορες διαμέτρους οπών.

Εξετάζεται επίσης η απομείωση της φέρουσας ικανότητας των κυψελωτών δοκών σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συμπαγείς δοκούς.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι ενδέχεται η μορφή της αστοχίας να αλλάζει με αλλαγή της διαμέτρου.

10.1 Αμφιέριστη κυψελωτή δοκός μήκους 8,1m

Πραγματοποιήθηκαν γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις στο ADINA για δοκό μήκους 8,1m με 8 κυκλικές οπές κατά μήκος του κορμού της. Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικοί συνδυασμοί πάχους κορμού και πελμάτων και διαφορετικές τιμές διαμέτρου των κυκλικών οπών.

10.1.1 Αποτελέσματα αναλύσεων για πλευρικό λυγισμό κυψελωτής δοκού

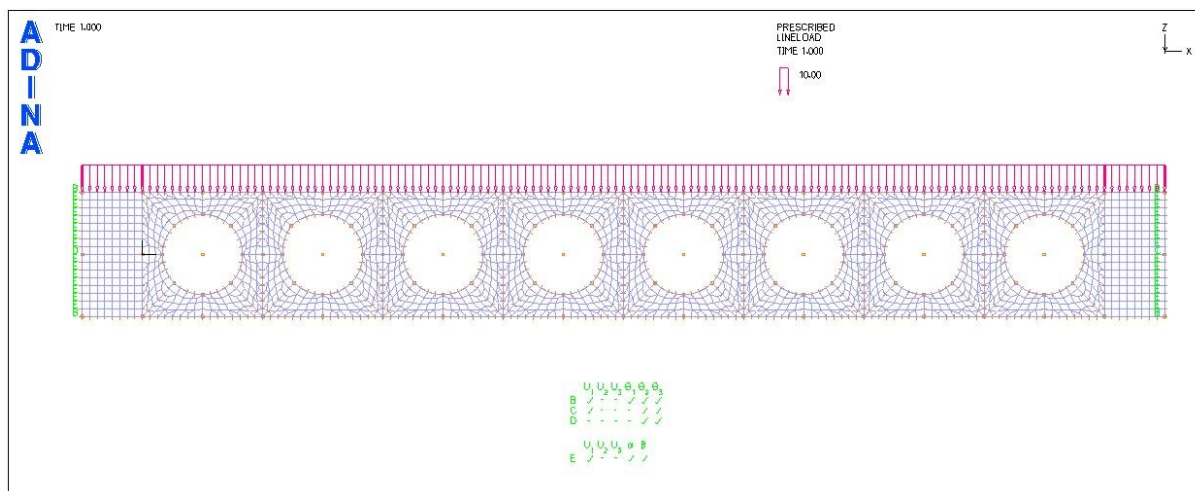
Η εξεταζόμενη διατομή έχει τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$h=960\text{mm}$$

$$b=300\text{mm}$$

$$t_w=17\text{mm}$$

$$t_f=32\text{mm}$$



Σχήμα 10.1
Γεωμετρία αρχικού φορέα στο ADINA

Το αρχικό μοντέλο αποτελείται από οπές διαμέτρου 60cm που απέχουν μεταξύ τους 30cm, ενώ οι ακραίες οπές απέχουν από τις στηρίξεις απόσταση ίση με 60cm. Η τιμή αυτή της διαμέτρου ικανοποιεί τους περιορισμούς του Ευρωκώδικα και στη συνέχεια εξετάζονται τιμές διαμέτρου των οπών μεταξύ 0,10m και 0,80m κάνοντας τους απαραίτητους ελέγχους προκειμένου να διαπιστωθεί ποιες από τις τιμές αυτές βρίσκονται εντός των ορίων του Ευρωκώδικα. Οι δοκιμές γίνονται κρατώντας σταθερό το κέντρο των κυκλικών οπών, όπως ακριβώς φαίνεται στο σχήμα 10.1 για τις κυκλικές οπές διαμέτρου 60cm και αυξομειώνοντας την τιμή της διαμέτρου.

Υπενθυμίζεται ότι οι γεωμετρικοί περιορισμοί για τις δοκούς με κυκλικές οπές είναι οι ακόλουθοι:

$$h_0 \leq 0,80 \cdot d_w$$

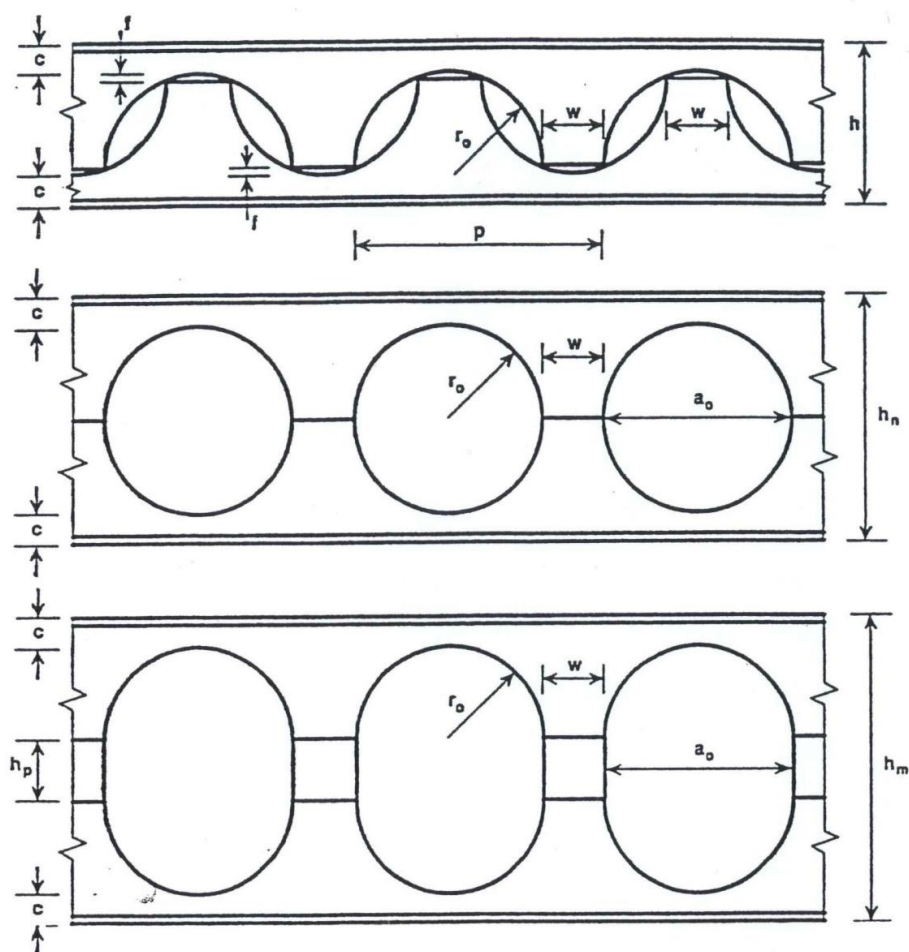
$$d_1 \geq 0,10 \cdot d_w$$

$$d_2 = d_1$$

$$a_0 \leq h_0$$

$$0,25 \cdot a_0 \leq w \leq 0,50 \cdot a_0$$

με βάση τη γεωμετρία του σχήματος 10.2.



Σχήμα 10.2

Δοκός με πολλαπλά κυκλικά ανοίγματα στον κορμό της

Το δεύτερο μέλος της ανίσωσης του 5^{ου} περιορισμού αναφέρεται σε κατασκευαστικούς λόγους, προκειμένου να ακολουθηθεί η τυποποιημένη διαδικασία κατασκευής των δοκών με κυκλικές οπές που φαίνεται και στο σχήμα 10.2. Θα παρατηρηθεί ότι η τήρησή του ισχύει μόνο για διαμέτρους 60cm και 70cm. Επίσης, η απόσταση f που παριστάνεται στο σχήμα 10.2 υπενθυμίζεται ότι δίνεται από τη σχέση: $f = r_0 - \sqrt{r_0^2 - (w/2)^2}$, η οποία αναφέρεται και πάλι στη διαδικασία κοπής της αρχική δοκού και της κατασκευής της κυψελωτής δοκού. Επομένως, για μικρές τιμές διαμέτρων και μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των οπών, προφανώς δεν μπορεί να ισχύσει. Συγκεκριμένα, οι τιμές των διαμέτρων με βάση τη γεωμετρία του φορέα μας, που μπορούν να υλοποιηθούν με βάση την ύπαρξη της παραπάνω σχέσης είναι οι $D=50$ και εξής.

Ωστόσο, στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού δε μας αφορά η διαδικασία κατασκευής, καθώς οι αναλύσεις που πραγματοποιούνται στο ADINA σκοπό έχουν να δείξουν την απομείωση της αντοχής της δοκού με τη σταδιακή αύξηση της διαμέτρου. Εξάλλου, είναι εφικτή η διάνοιξη οπών με ειδικές διατάξεις διάτρησης σε θέσεις και διαστάσεις που αποφασίζονται από τον εκάστοτε μελετητή. Παρουσιάζεται ενδεικτικά στο σχήμα 10.3 μία εικόνα έργου όπου φαίνεται ότι είναι δυνατή η κατασκευή δοκού με κυκλικές οπές, όπου το μεταξύ τους κενό είναι μεγαλύτερο από όσο ορίζεται με βάση τον παραπάνω περιορισμό.



Σχήμα 10.3
Κυψελωτή δοκός στην George IV Bridge, Edinburgh

Συνεπώς, τα όρια στις τιμές των διαμέτρων που θα μας απασχολήσουν, αφορούν στην ικανοποίηση όλων των υπόλοιπων περιορισμών, με εξαίρεση αυτόν που αναφέρθηκε, και πρόκειται για τη μη υπέρβαση τιμών που είναι επικίνδυνες για την αστοχία του φορέα.

Το όριο αυτό είναι η διάμετρος των **70cm**, καθώς η επόμενη τιμή των 80cm δεν ικανοποιεί τους παραπάνω γεωμετρικούς περιορισμούς.

Η διατομή της συμπαγούς δοκού που εξετάζεται είναι κατηγορίας 1.

Όσον αφορά στις δοκούς με τις οπές, η κατάταξη του κορμού των απλών ταυ εξαρτάται από τη διάμετρο της οπής. Για την περίπτωση όπου έχουμε διάμετρο $D=60\text{cm}$, ο κορμός των απλών ταυ στις τομές αα είναι κατηγορίας 1, ενώ στις τομές bb εξαρτάται από την τιμή της γωνίας φ . Για παράδειγμα, είναι κατηγορίας 2 για $\varphi=25^\circ$ και κατηγορίας 3 για $\varphi=30^\circ$.

Στον πίνακα 10.1 φαίνονται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού του ADINA, καθώς και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού με βάση τον Ευρωκώδικα που αντιστοιχούν σε κάθε δοκό διαφορετικής διαμέτρου οπών. Το κατανεμημένο φορτίο ασκείται στο άνω πέλμα των δοκών. Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για κάθε δοκό με διαφορετική διάμετρο οπών υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τα αδρανειακά χαρακτηριστικά της αντίστοιχης διάτρητης διατομής.

Σημειώνεται ότι για κάθε τιμή διαμέτρου, παρουσιάζεται πλευρικός λυγισμός της δοκού από την 1^η ιδιομορφή.

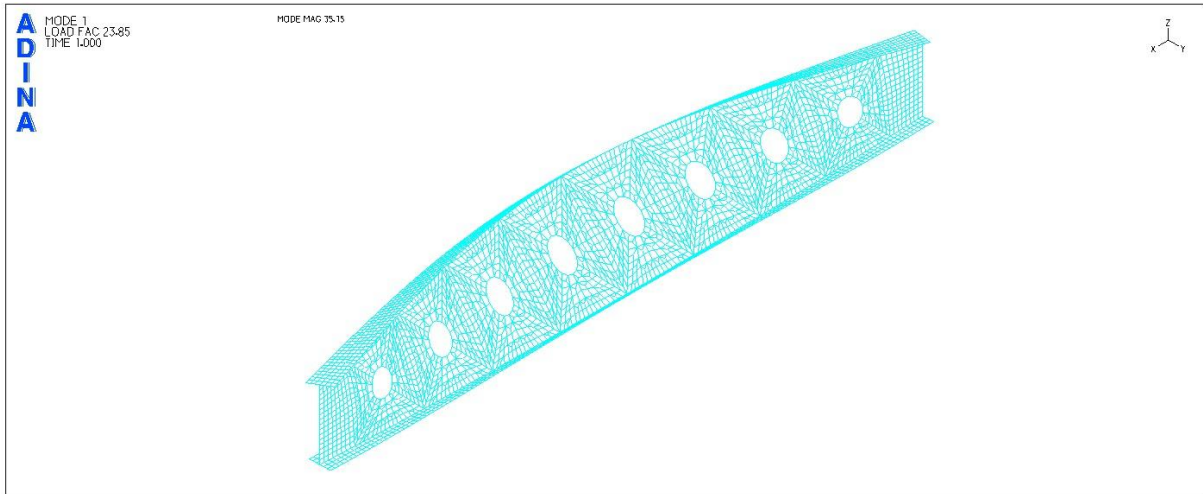
Ενδεικτικά δίνονται για ορισμένες τιμές διαμέτρων οι εικόνες πλευρικού λυγισμού για την 1^η ιδιομορφή από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού στο ADINA.

Διάμετρος οπών (mm)	$P_{cr,ADINA}$ (kN/m)	$P_{cr,EC3}$ (kN/m)
Συμπαγής δοκός	243,2	262,4
100	241,3	260,9
200	240,4	259,4
300	238,5	257,9
400	236,1	256,4
500	233,2	254,9
600	228,9	253,3
700	223,1	251,8
800	212,3	250,3

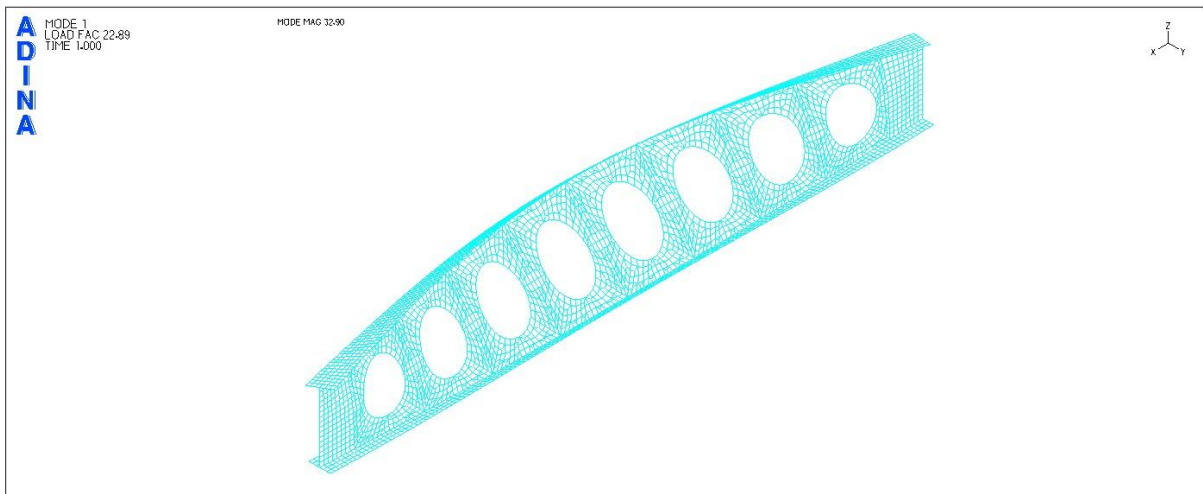
Πίνακας 10.1

Κρίσιμα φορτία λυγισμού για δοκούς με διάφορες διαμέτρους οπών

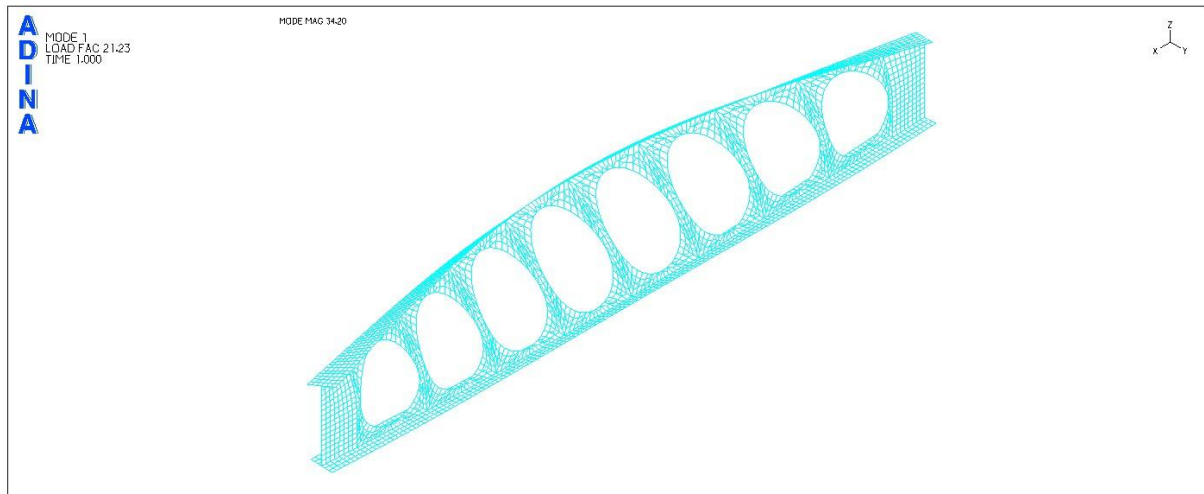
Παρατηρούμε μικρή μεταβολή του κρίσιμου φορτίου πλευρικού λυγισμού με την αλλαγή των διαμέτρων.



Σχήμα 10.4
1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 8.1m με διάμετρο κυκλικών οπών D=30cm

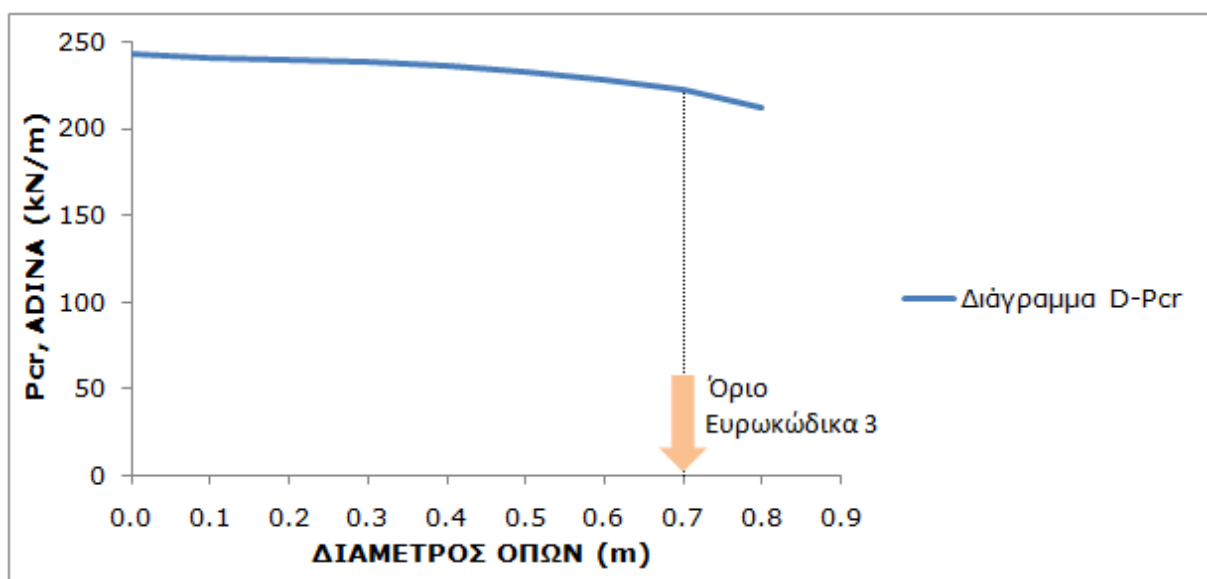


Σχήμα 10.5
1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 8.1m με διάμετρο κυκλικών οπών D=60cm



Σχήμα 10.6

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 8.1m με διάμετρο κυκλικών οπών $D=80\text{cm}$



Σχήμα 10.7

Διάγραμμα κρίσιμου φορτίου πλευρικού λυγισμού κατά ADINA συναρτήσει της διαμέτρου των κυκλικών οπών

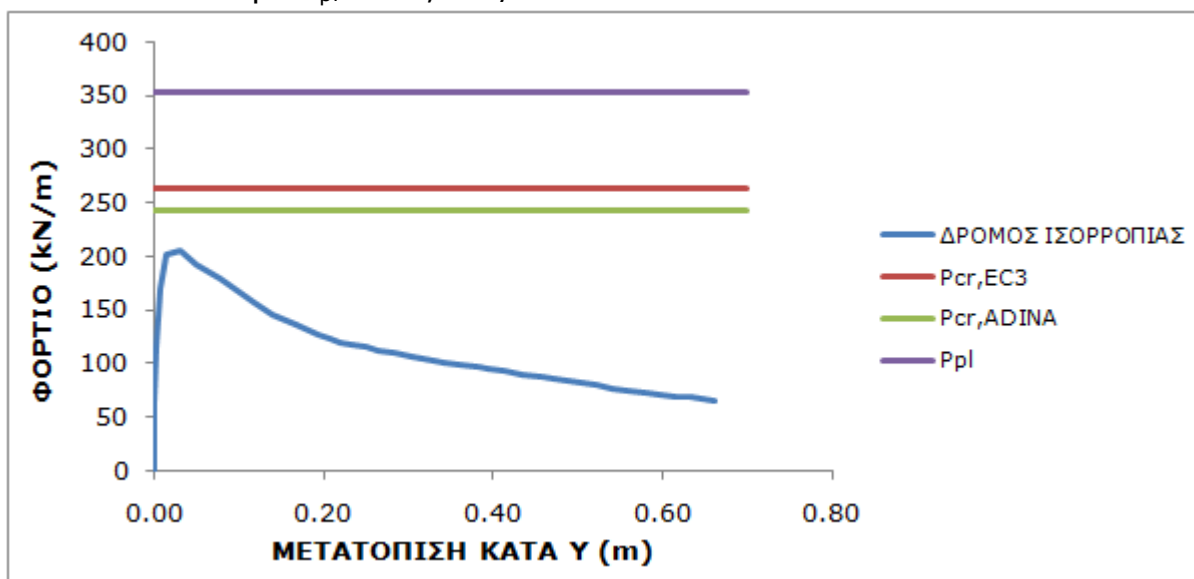
Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας

Πραγματοποιείται μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας για τη συμπαγή δοκό και για την κυψελωτή δοκό με διάμετρο οπών $D=0,7\text{m}$, που συνιστά το όριο του Ευρωκώδικα.

Η ανάλυση γίνεται κατά τα γνωστά για διγραμμικό υλικό S235 χωρίς κράτυνση και δίνεται ατέλεια μεγέθους 2cm σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή.

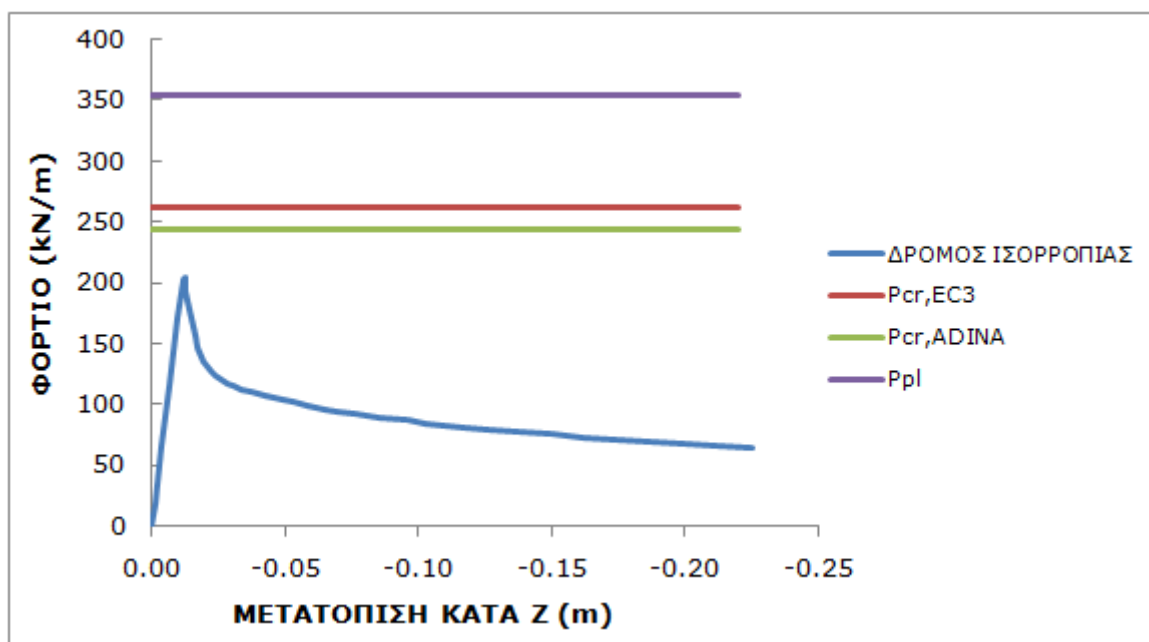
ΣΥΜΠΑΓΗΣ ΔΟΚΟΣ

Το φορτίο που αντιστοιχεί στη ροπή πλαστικοποίησης της συμπαγούς δοκού είναι ίσο με $P_{pl}=353,0\text{kN/m}$.



Σχήμα 10.8

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



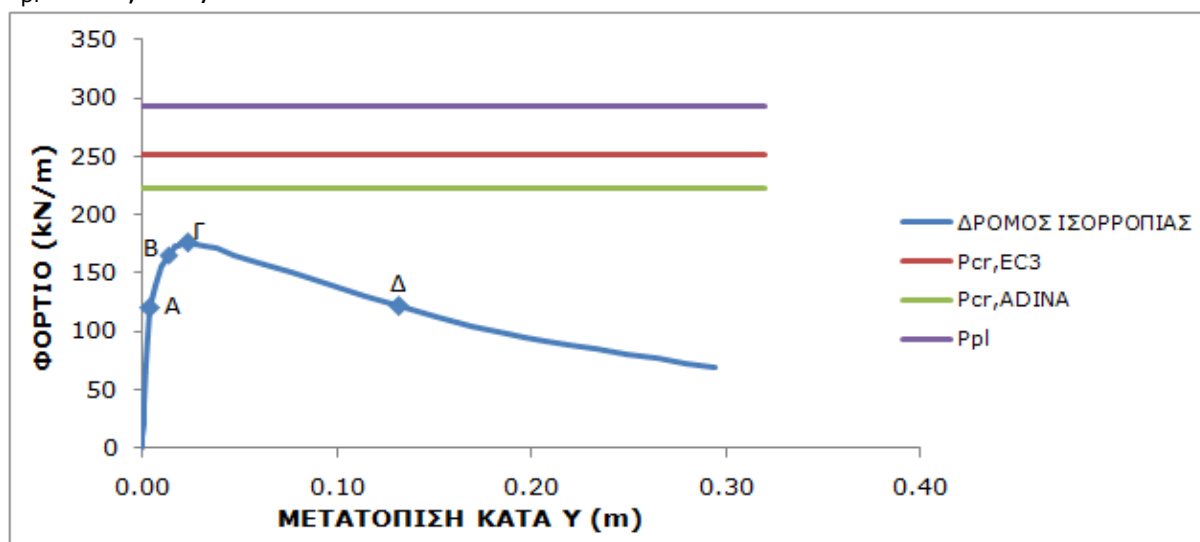
Σχήμα 10.9

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

Κρίσιμη μορφή αστοχίας για το συμπαγή φορέα είναι ο πλευρικός λυγισμός.

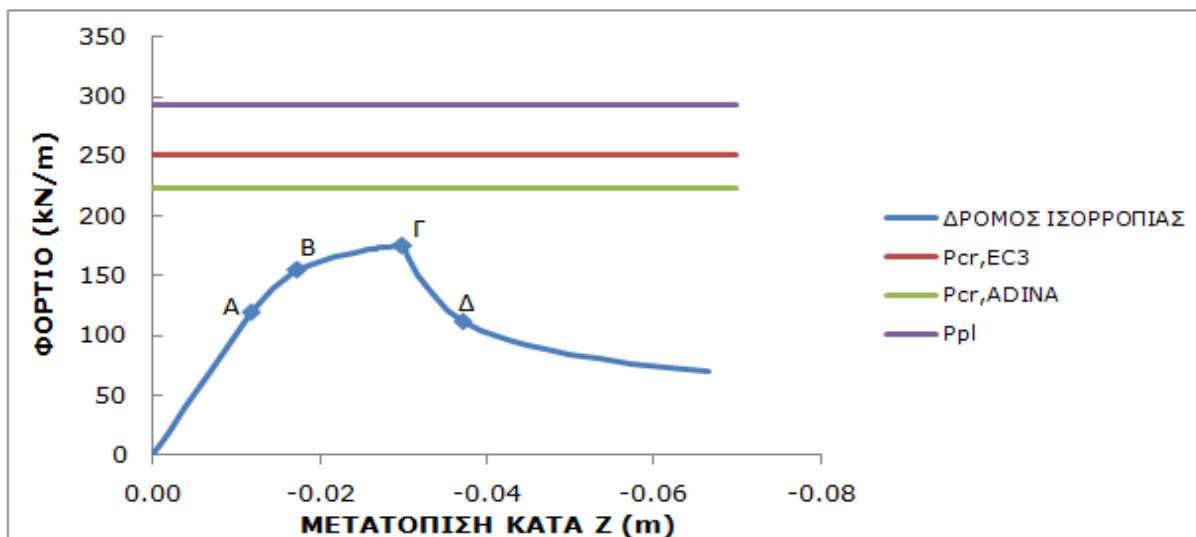
ΔΟΚΟΣ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΟΠΕΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ D=70cm

Η δοκός αποτελείται από άρτιο αριθμό οπών, συνεπώς το μέσο της δοκού είναι συμπαγές. Ωστόσο, η ροπή πλαστικοποίησης θα υπολογιστεί για τη διατομή σε θέση οπής υπέρ της ασφαλείας, δεδομένου ότι σε κοντινή απόσταση από τη μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή, έχουμε κυκλικό άνοιγμα. Με αυτό το συλλογισμό, το φορτίο πλαστικοποίησης προκύπτει ίσο με $P_{pl}=293,4\text{kN/m}$.



Σχήμα 10.10

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



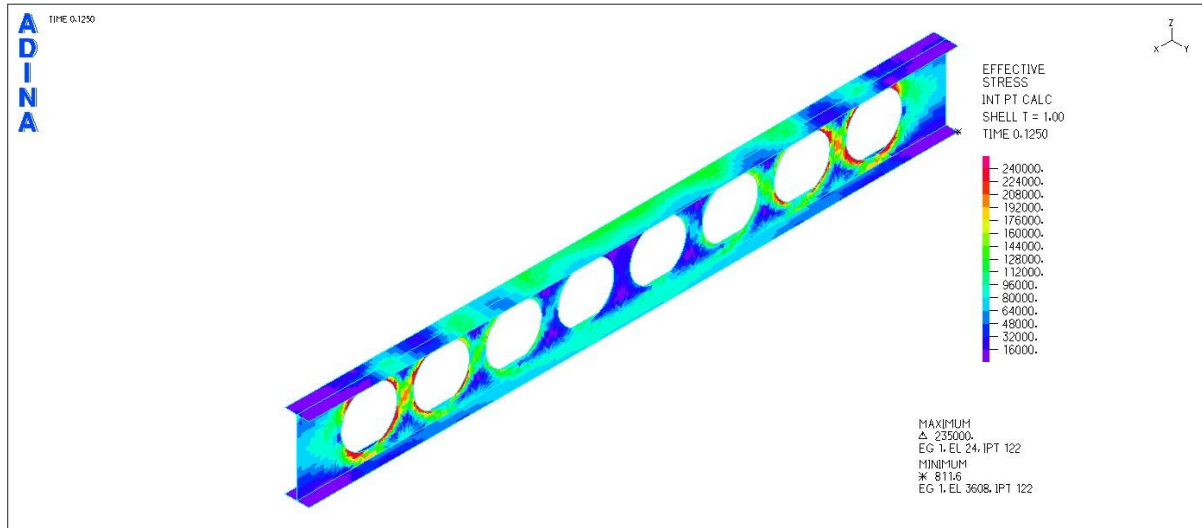
Σχήμα 10.11

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ 4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ VON MISES

ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,125)

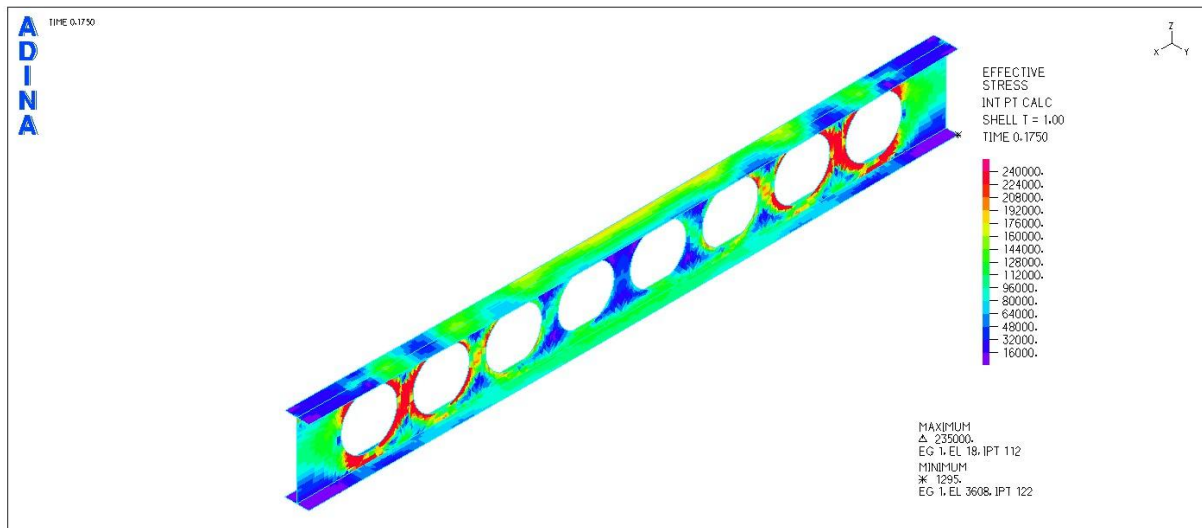


Σχήμα 10.12

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο A

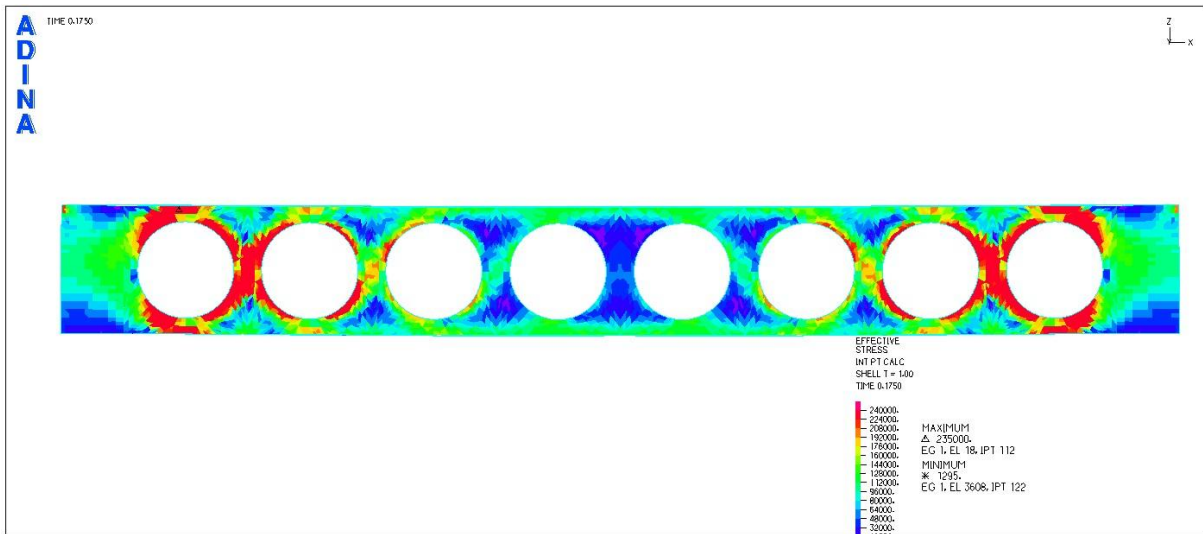
Το σημείο A αποτελεί το πρώτο σημείο του δρόμου ισορροπίας όπου εμφανίζονται τάσεις von Mises ίσες με f_y σε σημεία γύρω από τις οπές στα άκρα της δοκού και σε σημεία των συμπαγών τμημάτων του κορμού στα άκρα της δοκού.

ΣΗΜΕΙΟ B (t=0,175)



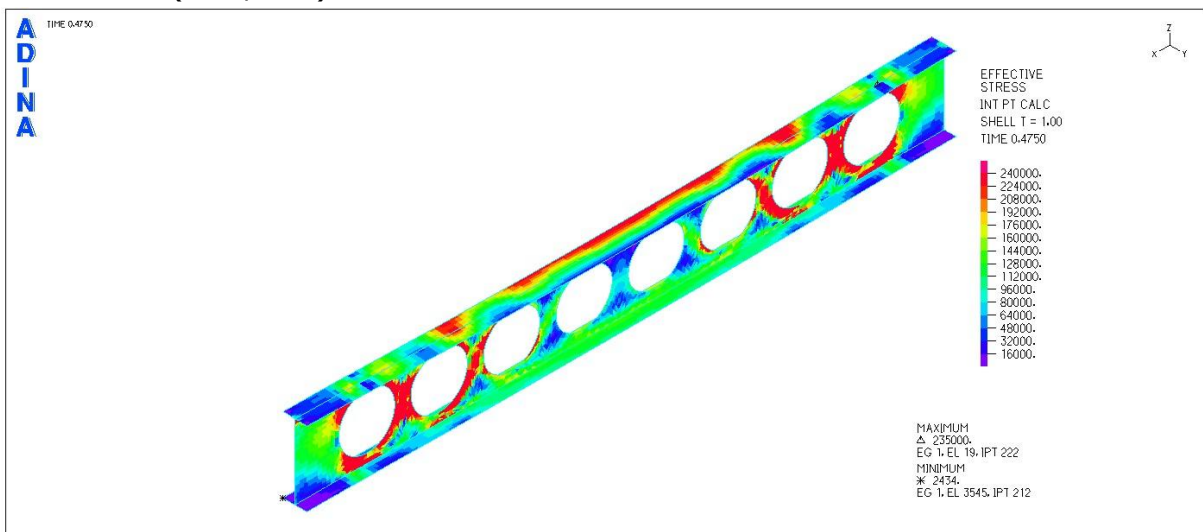
Σχήμα 10.13

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο B (προοπτικό)

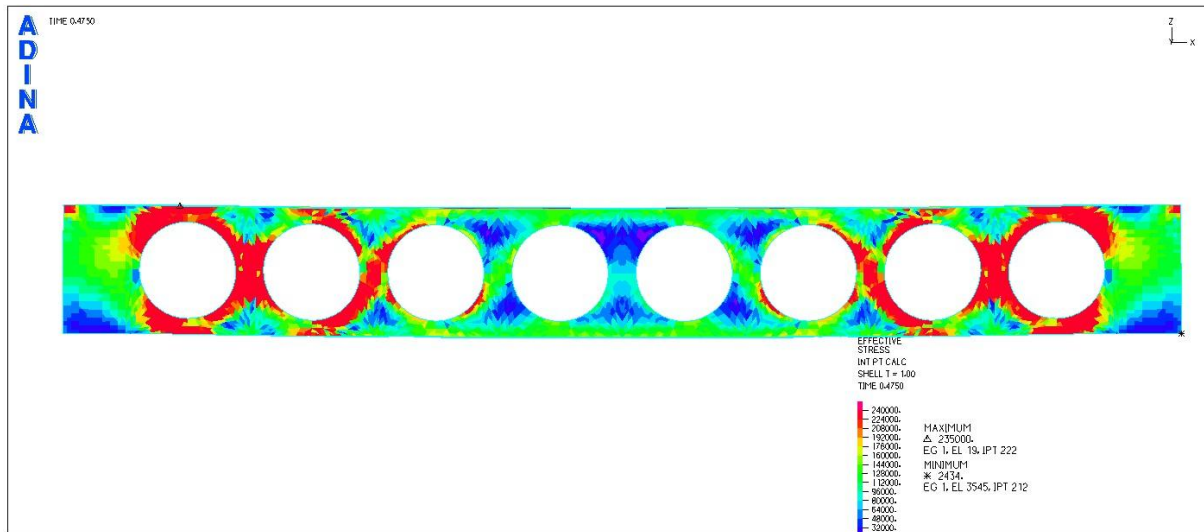


Σχήμα 10.14
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Β (όψη)

ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,475)



Σχήμα 10.15
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)



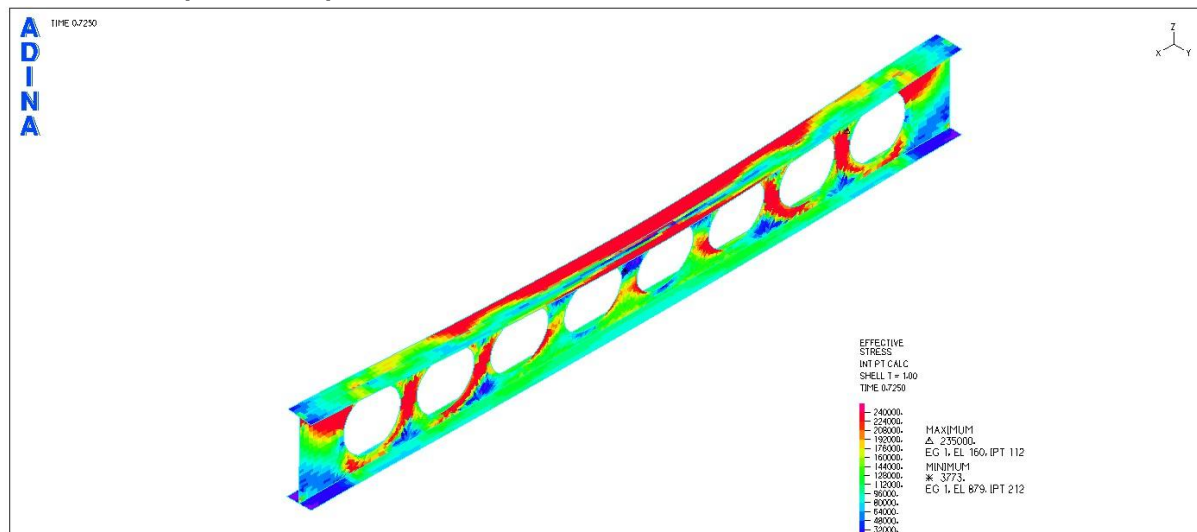
Σχήμα 10.16

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

Στο σημείο Γ, το οποίο ταυτίζεται με την έναρξη του καθοδικού κλάδου του δρόμου ισορροπίας, οι τάσεις von Mises στα άκρα της δοκού, για τα σημεία γύρω από τις οπές, καθώς και για τα συμπαγή τμήματα του κορμού μεταξύ των οπών, έχουν φθάσει την τιμή 235 MPa. Επομένως, η αστοχία του φορέα οφείλεται τελικά σε συνδυασμό διαρροής των συμπαγών τμημάτων του κορμού και σχηματισμού μηχανισμού Vierendeel.

Το παραπάνω συμπέρασμα έρχεται σε συμφωνία με τον έλεγχο επάρκειας της δοκού που έχει πραγματοποιηθεί σε φύλλο Excel. Πραγματοποιώντας όλους τους απαραίτητους ελέγχους για φόρτιση της δοκού ίση με το κρίσιμο φορτίου πλευρικού λυγισμού κατά ADINA ($P_{cr,ADINA}=223,1\text{kN/m}$), προκύπτει ότι έχει επέλθει ήδη διαρροή και υπέρβαση της αντοχής σε εγκάρσια τέμνουσα για τα συμπαγή τμήματα του κορμού στα άκρα, καθώς και υπέρβαση της αντοχής των τομών bb στα άκρα της δοκού.

ΣΗΜΕΙΟ Δ (t=0,725)



Σχήμα 10.17

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Δ

Αξίζει να επισημανθεί ότι κρίσιμη μορφή αστοχίας για την εξεταζόμενη συμπαγή δοκό είναι ο πλευρικός λυγισμός, ενώ για την εξεταζόμενη κυψελωτή δοκό διαμέτρου οπών $D=70\text{cm}$, η αστοχία προκύπτει ως αποτέλεσμα της διαρροής των συμπαγών τμημάτων του κορμού στα άκρα και του σχηματισμού μηχανισμού Vierendeel. Αυτές οι μορφές αστοχίας είναι χαρακτηριστικές για τις κυψελωτές δοκούς, και μάλιστα συνιστούν συνήθεις μορφές αστοχίας για μικρά μήκη κυψελωτών δοκών.

10.1.2 Αποτελέσματα αναλύσεων για συνδυασμό πλευρικού και τοπικού λυγισμού κυψελωτής δοκού I

Η εξεταζόμενη διατομή έχει τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$h=960\text{mm}$$

$$b=300\text{mm}$$

$$t_w=7\text{mm}$$

$$t_f=15\text{mm}$$

Όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, πραγματοποιώντας τους ελέγχους για τους γεωμετρικούς περιορισμούς, το άνω επιτρεπόμενο όριο για τις τιμές των διαμέτρων είναι η τιμή των 70cm .

Η συμπαγής δοκός με την εξεταζόμενη διατομή είναι κατηγορίας 4.

Στον πίνακα 10.2 φαίνονται το κρίσιμο φορτίο λυγισμού σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού του ADINA, καθώς και το

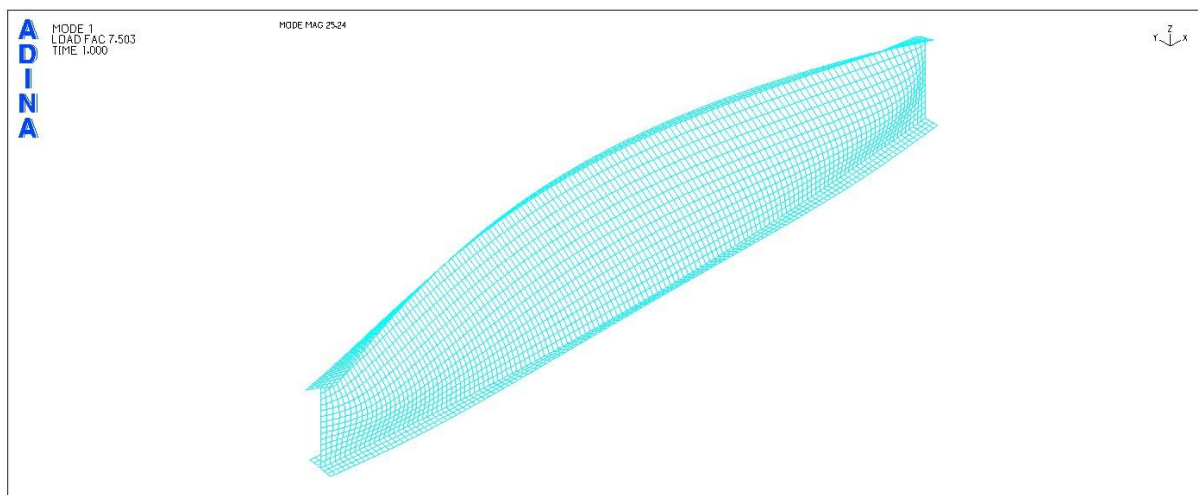
κρίσιμο φορτίο λυγισμού με βάση τον Ευρωκώδικα, που αντιστοιχούν σε κάθε δοκό διαφορετικής διαμέτρου οπών. Το κατανεμημένο φορτίο ασκείται στο άνω πέλαμα των δοκών.

Διάμετρος οπών (mm)	$P_{cr,ADINA}$ (kN/m)	$P_{cr,EC3}$ (kN/m)
Συμπαγής δοκός	75,0	96,8
100	74,5	96,6
200	73,1	96,5
300	69,5	96,4
400	64,5	96,3
500	58,8	96,2
600	50,9	96,0
700	39,5	95,9
800	25,5	95,8

Πίνακας 10.2

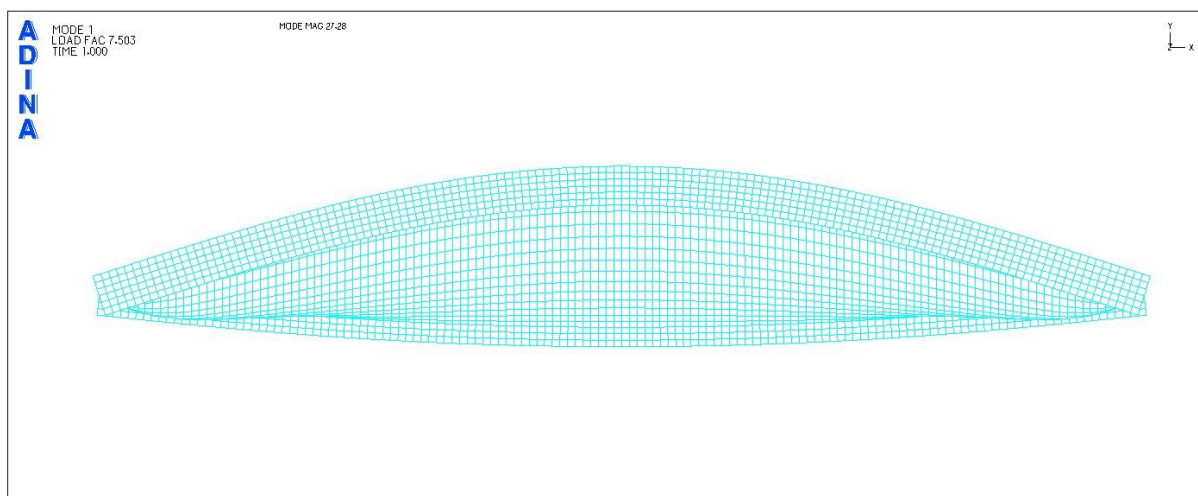
Κρίσιμα φορτία λυγισμού για δοκούς με διάφορες διαμέτρους οπών

Παρατηρείται πολύ μεγάλη διαφορά μεταξύ των κρίσιμων φορτίων λυγισμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα και σύμφωνα με την ανάλυση του ADINA, διότι σε όλες τις περιπτώσεις γραμικών αναλύσεων με το πρόγραμμα παρουσιάζεται από την 1^η ιδιομορφή αλληλεπίδραση πλευρικού και τοπικού λυγισμού στον κορμό της δοκού, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στις εικόνες 10.18-10.23 οι οποίες αναφέρονται σε ενδεικτικές διαμέτρους οπών. Επομένως προκύπτει μεγάλη απόκλιση από το κρίσιμο φορτίο πλευρικού λυγισμού που υπολογίζεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα. Η επίδραση του τοπικού λυγισμού στο μικρού πάχους κορμό της δοκού είναι αρκετά έντονη και όσο αυξάνεται η τιμή της διαμέτρου, γίνεται ακόμα εντονότερη.



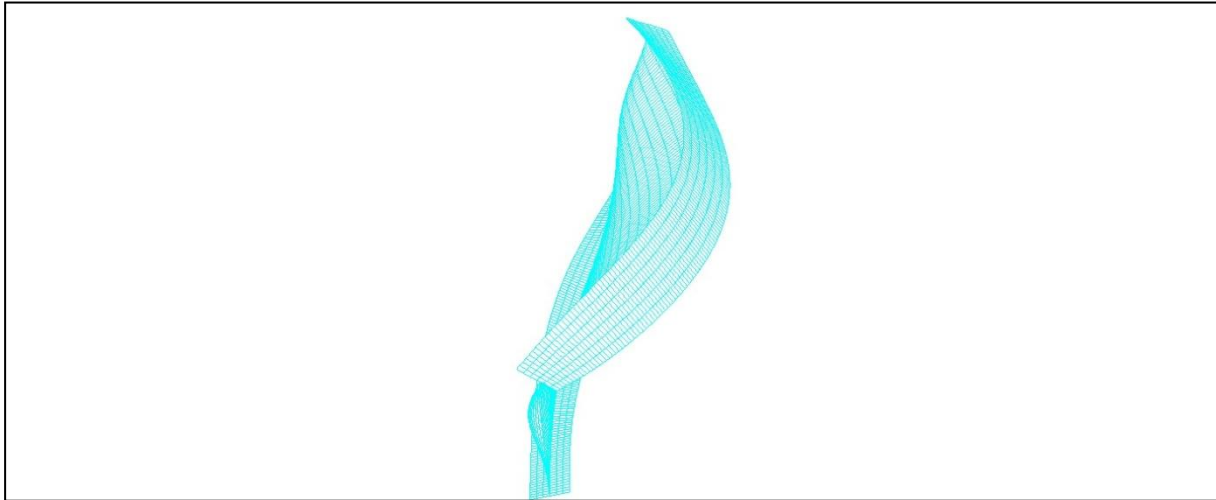
Σχήμα 10.18

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη συμπαγή δοκό μήκους 8.1m (προοπτικό)



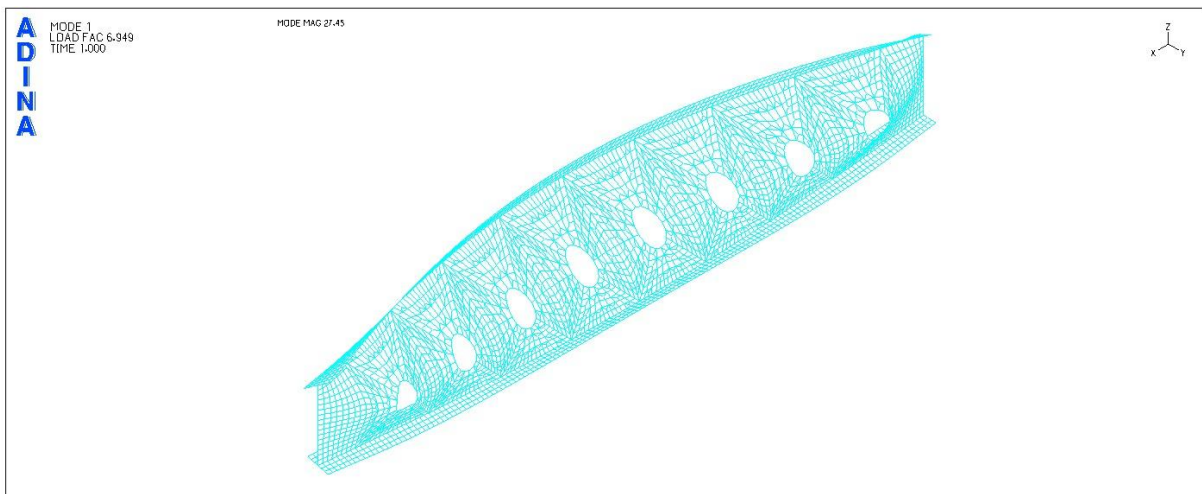
Σχήμα 10.19

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη συμπαγή δοκό μήκους 8.1m (κάτοψη)



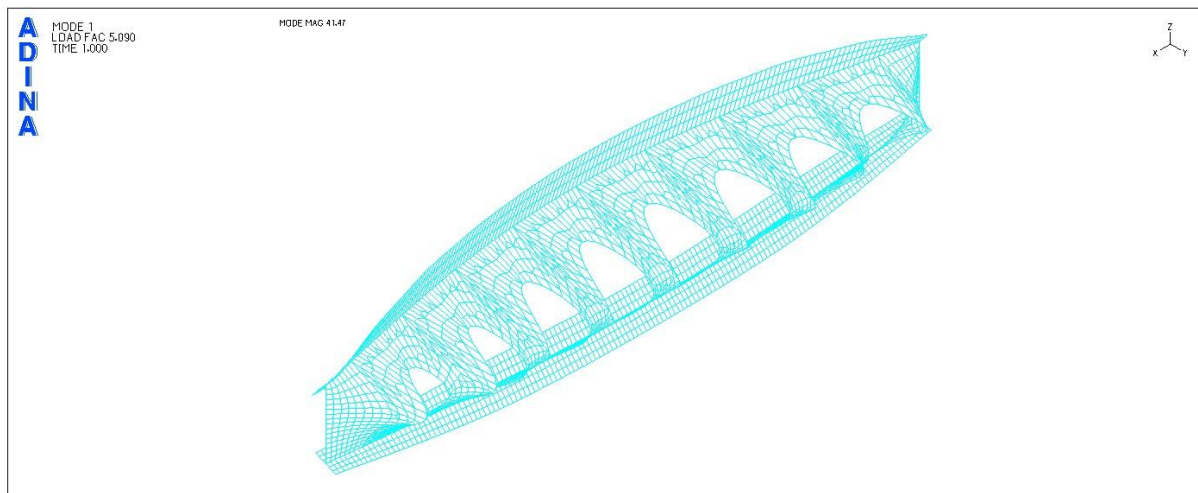
Σχήμα 10.20

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη συμπαγή δοκό μήκους 8.1m (λεπτομέρεια όπου φαίνεται ο τοπικός λυγισμός του κορμού)



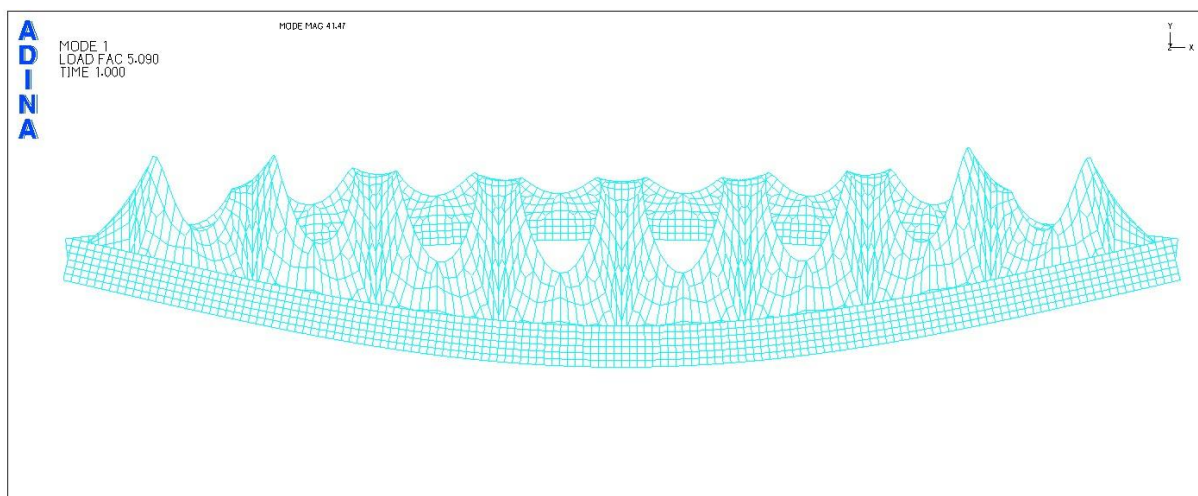
Σχήμα 10.21

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 8.1m με διάμετρο κυκλικών οπών $D=30\text{cm}$



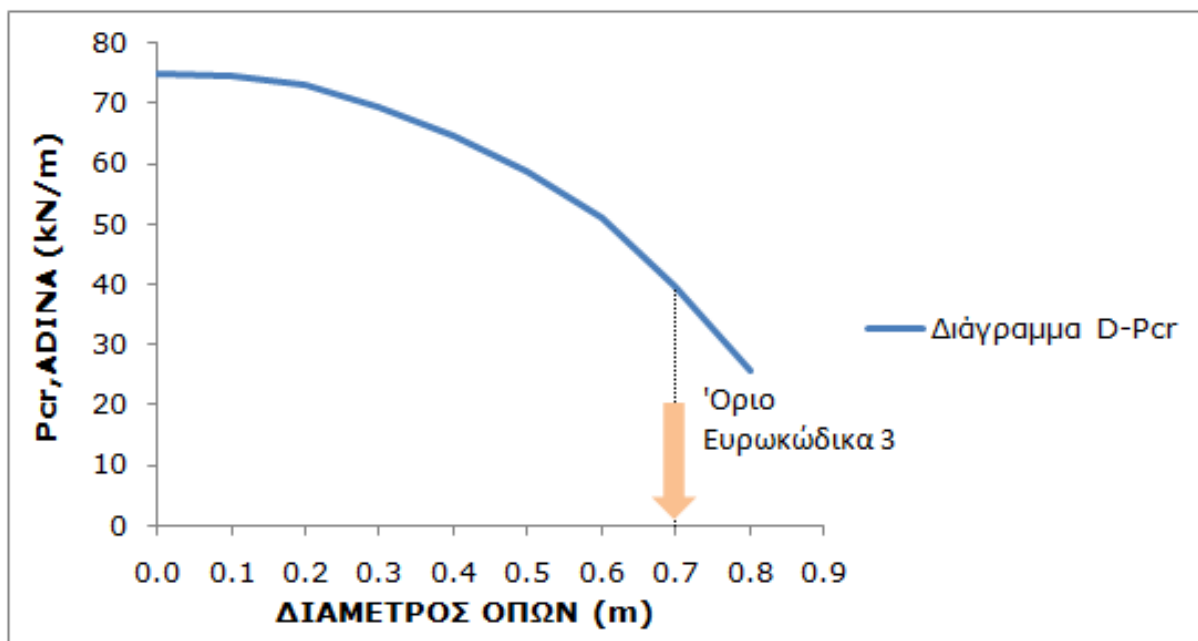
Σχήμα 10.22

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 8.1m με διάμετρο κυκλικών οπών D=60cm (προοπτικό)



Σχήμα 10.23

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 8.1m με διάμετρο κυκλικών οπών D=60cm (κάτοψη)



Σχήμα 10.24

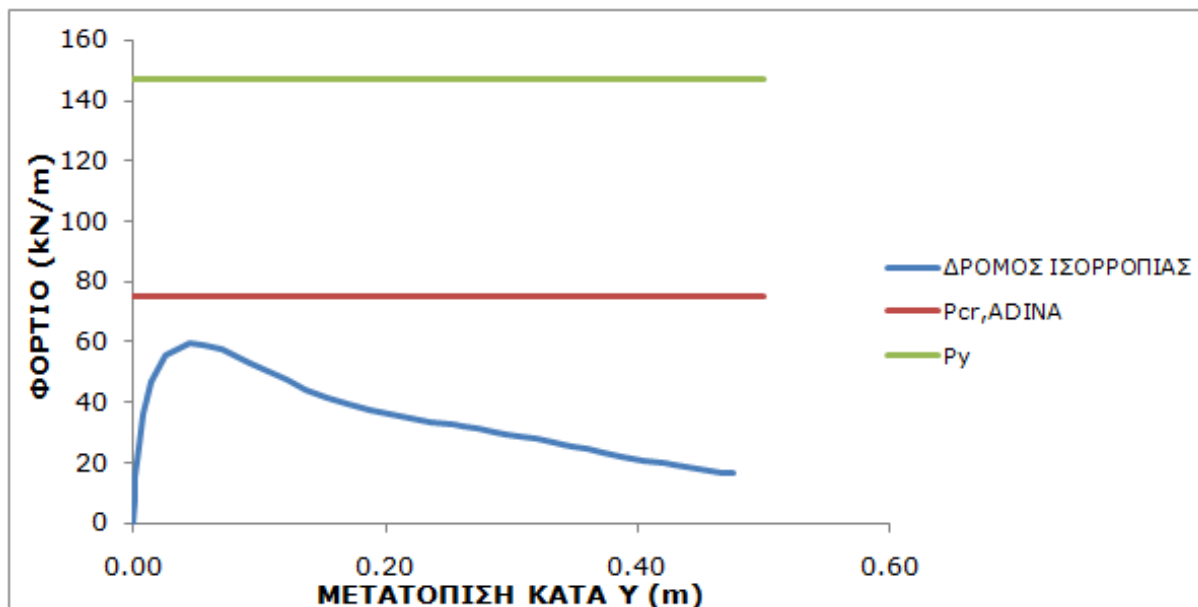
Διάγραμμα κρίσιμου φορτίου κατά ADINA συναρτήσει της διαμέτρου των κυκλικών οπών

Για την προηγούμενη εξεταζόμενη διατομή μεγαλύτερου πάχους κορμού και πελμάτων, όπου στη γραμμική ανάλυση λυγισμού παρουσιαζόταν καθαρά πλευρικός λυγισμός, η επιρροή της διαμέτρου των οπών στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού ήταν μικρή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου μειώθηκαν αρκετά τα πάχη κορμού και πελμάτων και εμφανίζεται τοπικός λυγισμός, σε συνδυασμό με πλευρικό, η επιρροή της διαμέτρου στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι σημαντική.

Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας

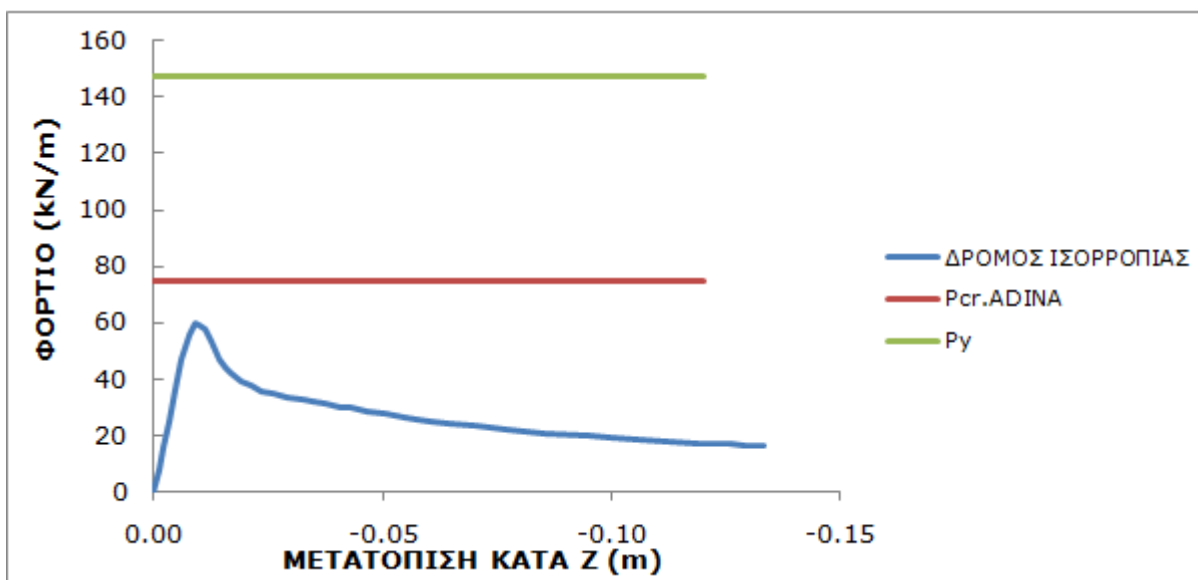
ΣΥΜΠΑΓΗΣ ΔΟΚΟΣ

Το φορτίο που αντιστοιχεί στη διαρροή των ακραίων ινών της συμπαγούς δοκού προκύπτει ίσο με $P_y=147,9\text{kN/m}$.



Σχήμα 10.25

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



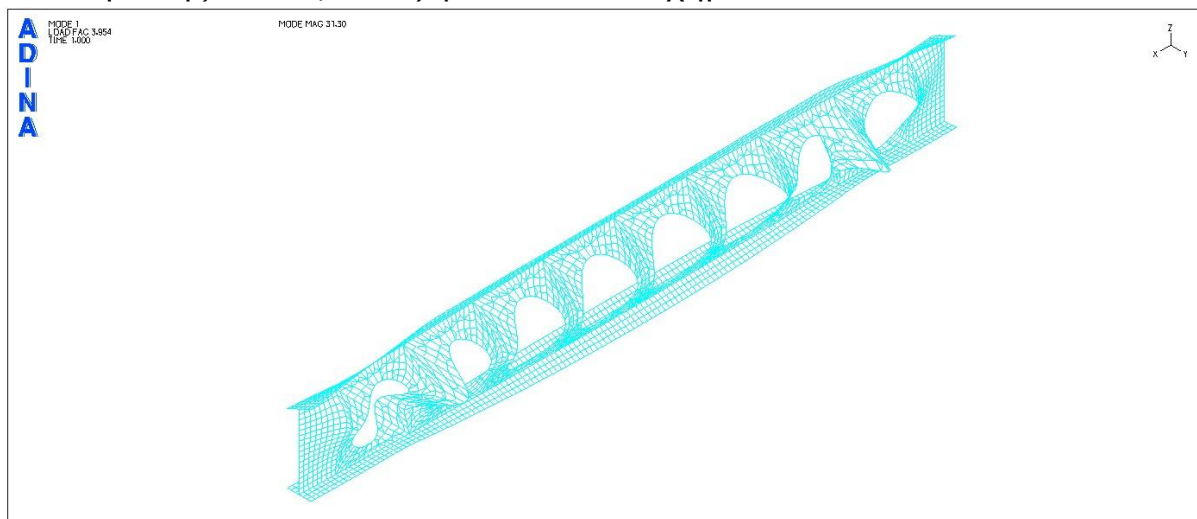
Σχήμα 10.26

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

ΔΟΚΟΣ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΟΠΕΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ D=70cm

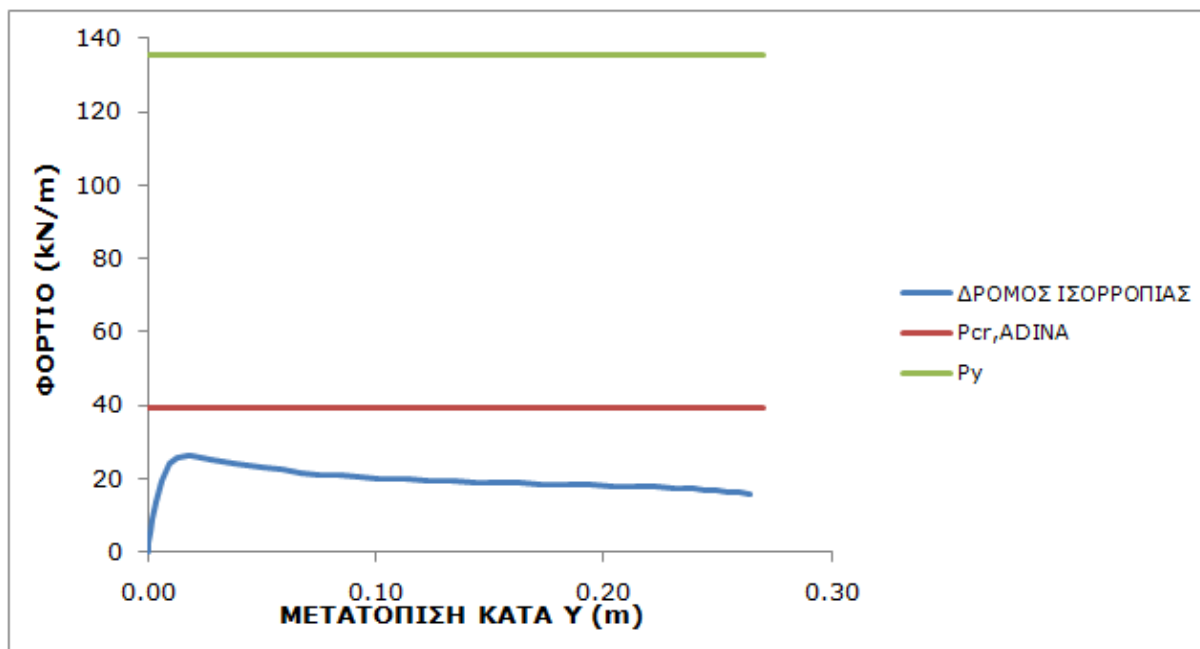
Το φορτίο που αντιστοιχεί στη ροπή διαρροής M_y προκύπτει ίσο με $P_y=136\text{kN/m}$.

Στη γραμμική ανάλυση λυγισμού, εμφανίζεται έντονος τοπικός λυγισμός στα άκρα της δοκού, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.27.



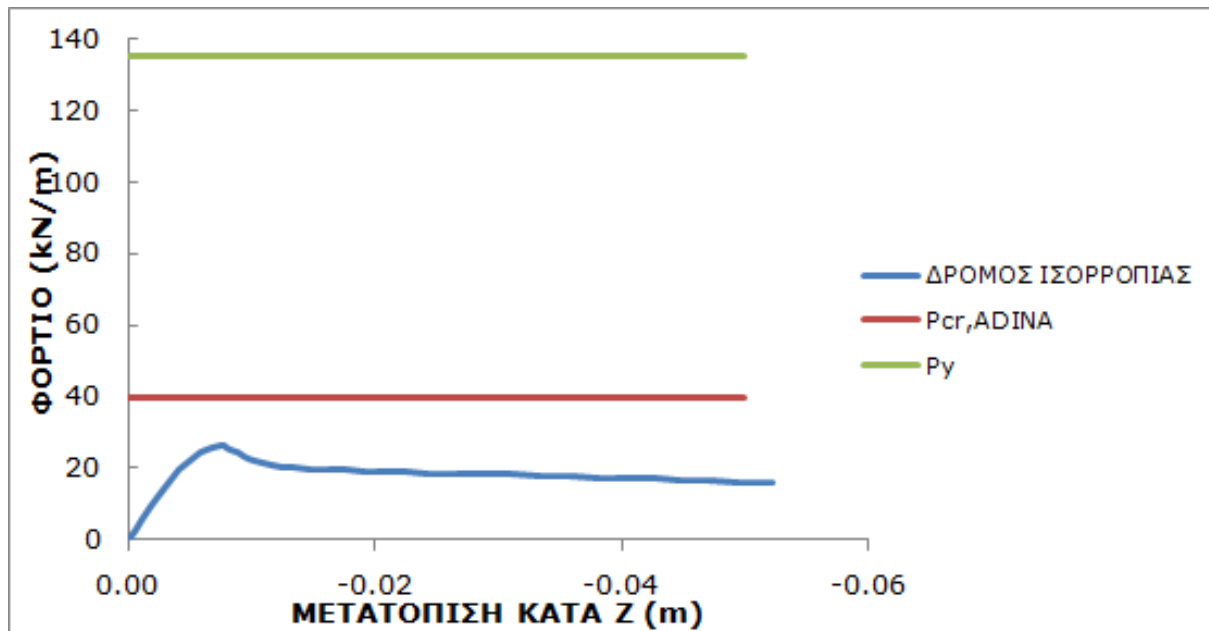
Σχήμα 10.27

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 8.1m με διάμετρο κυκλικών οπών D=70cm



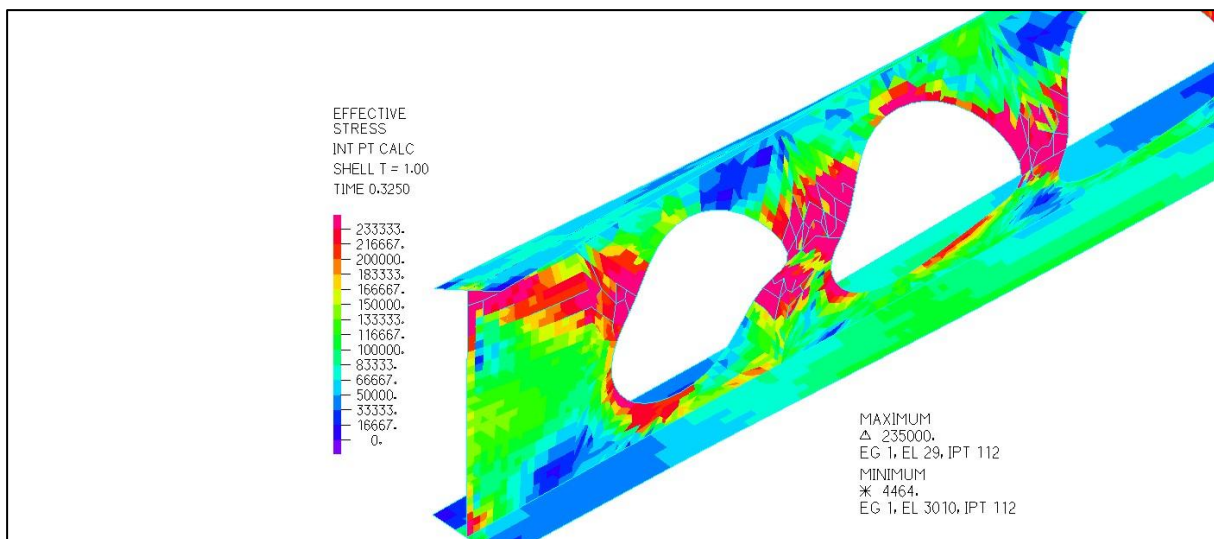
Σχήμα 10.28

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



Σχήμα 10.29

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



Σχήμα 10.30

Εικόνα τάσεων von Mises κατά την αστοχία της δοκού

Παρατηρούνται ιδιαιτέρως αυξημένες τάσεις στα συμπαγή τμήματα του κορμού στα άκρα της δοκού. Ο φορέας αστοχεί λόγω του λυγισμού του κορμού, ο οποίος έχει μικρό πάχος. Από την 1^η ιδιομορφή λυγισμού φαινόταν ο εντοπισμένος στα άκρα λυγισμός του κορμού.

10.1.3 Αποτελέσματα αναλύσεων για συνδυασμό πλευρικού και τοπικού λυγισμού κυψελωτής δοκού ΙΙ

Η εξεταζόμενη διατομή έχει τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$h=960\text{mm}$

$b=300\text{mm}$

$t_w=6\text{mm}$

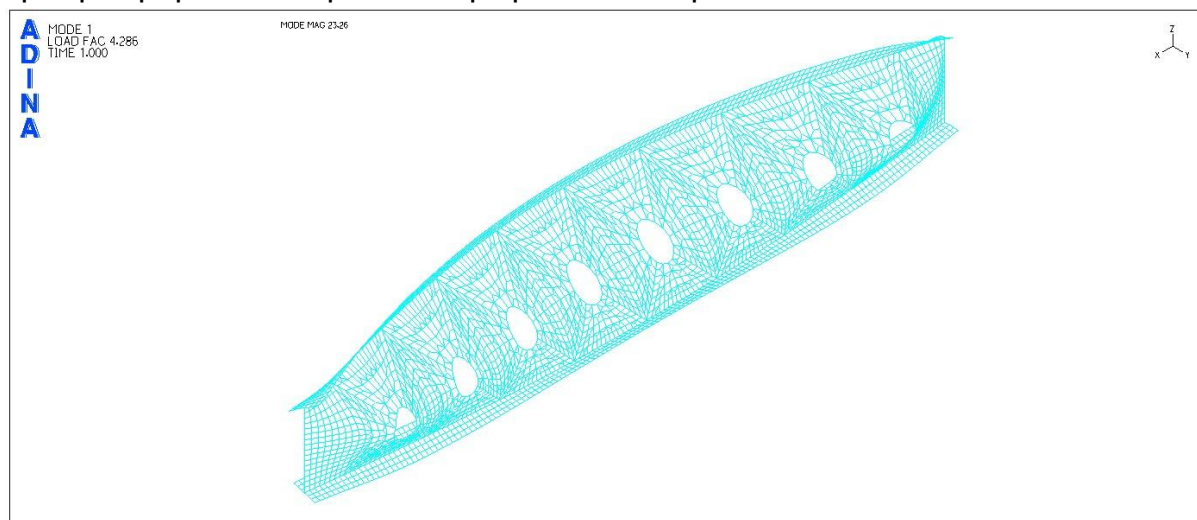
$t_f=10\text{mm}$

Διάμετρος οπών (mm)	$P_{cr,ADINA}$ (kN/m)	$P_{cr,EC3}$ (kN/m)
Συμπαγής δοκός	47,0	62,3
100	46,6	62,3
200	45,6	62,2
300	42,9	62,1
400	39,3	62,0
500	34,9	62,0
600	29,6	61,9
700	23,1	61,8
800	15,5	61,7

Πίνακας 10.3

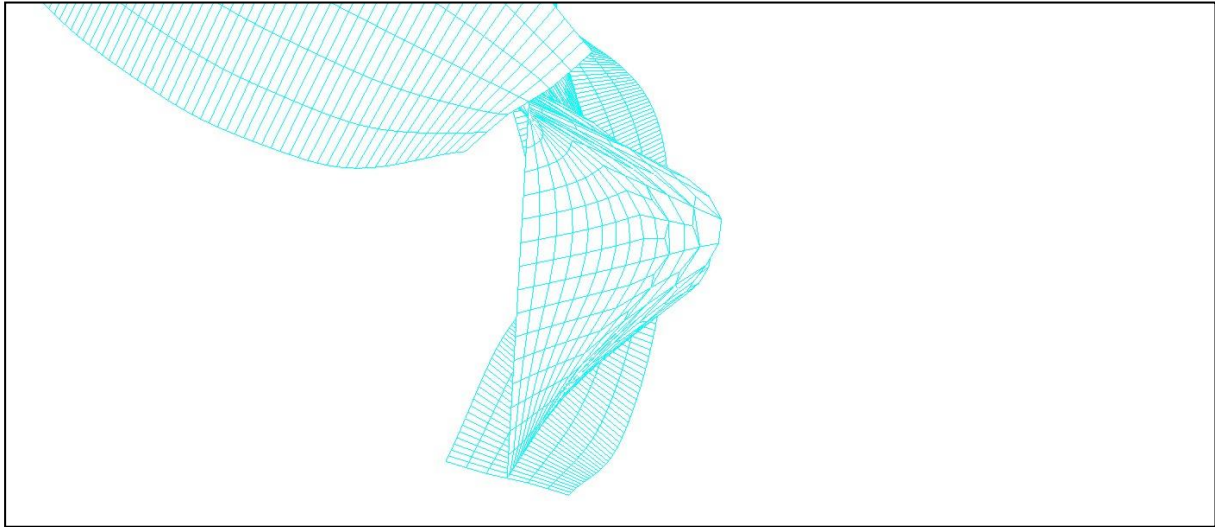
Κρίσιμα φορτία λυγισμού για δοκούς με διάφορες διαμέτρους οπών

Όπως και για την προηγούμενη διατομή, το αποτέλεσμα της γραμμικής ανάλυσης με το ADINA είναι η αλληλεπίδραση πλευρικού και τοπικού λυγισμού στον κορμό της δοκού που είναι ιδιαίτερα λεπτός, γεγονός το οποίο δικαιολογεί τη μεγάλη απόκλιση των φορτίων λυγισμού από τα κρίσιμα φορτία πλευρικού λυγισμού του Ευρωκώδικα.



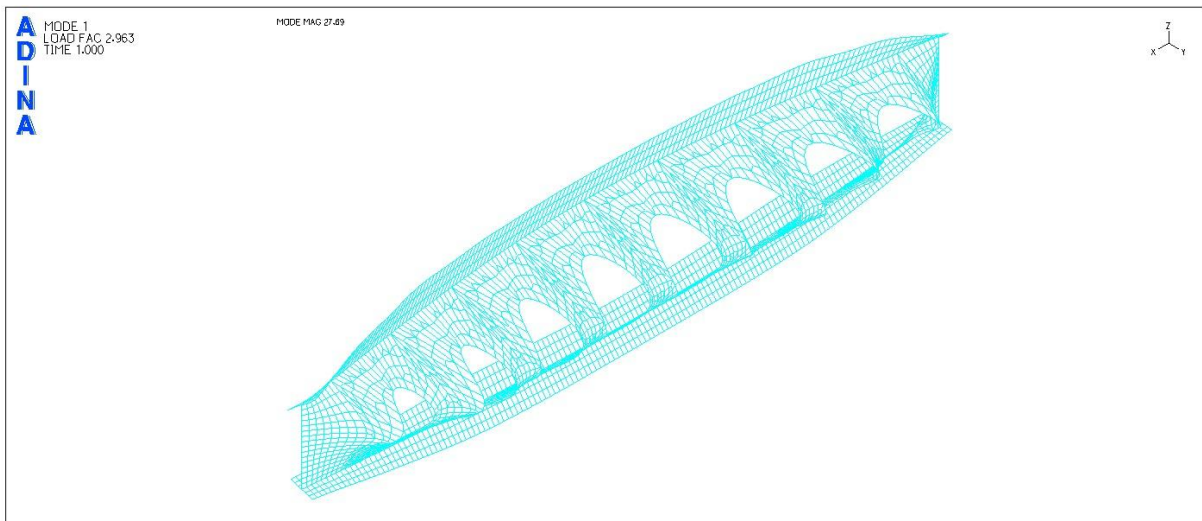
Σχήμα 10.31

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 8.1m με διάμετρο κυκλικών οπών $D=30\text{cm}$



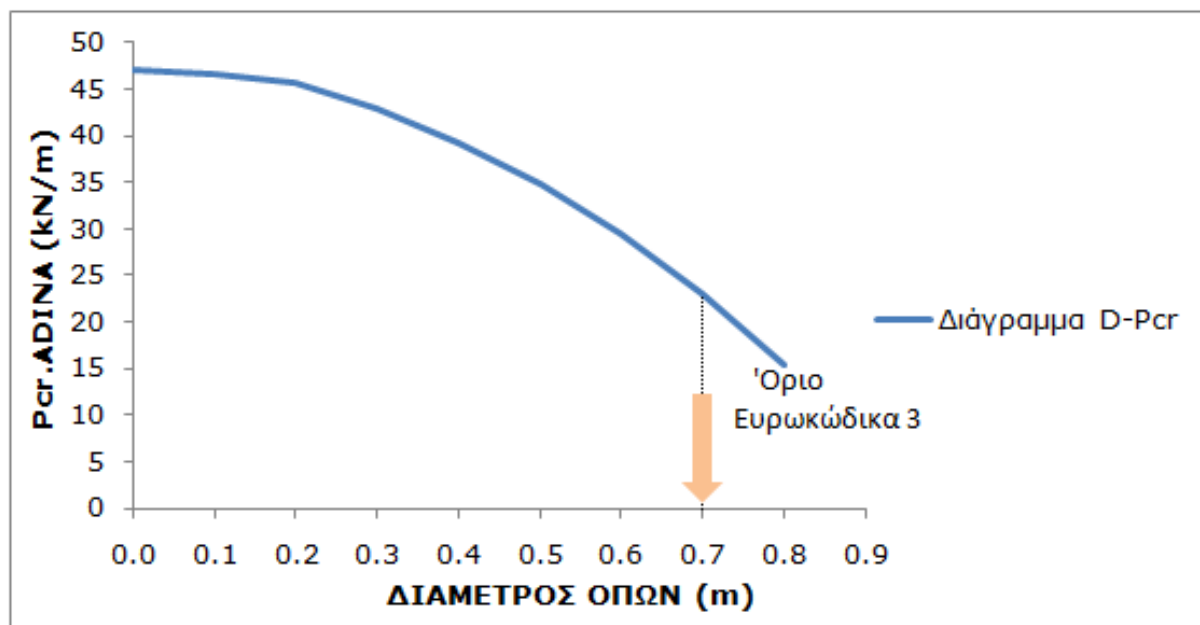
Σχήμα 10.32

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 8.1m με διάμετρο κυκλικών οπών $D=30\text{cm}$ (λεπτομέρεια λυγισμού των συμπαγών τμημάτων του κορμού)



Σχήμα 10.33

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 8.1m με διάμετρο κυκλικών οπών $D=60\text{cm}$



Σχήμα 10.34

Διάγραμμα κρίσιμου φορτίου κατά ADINA συναρτήσει της διαμέτρου των κυκλικών οπών

10.2 Αμφιέρειστη κυψελωτή δοκός μήκους 13,7m

Πραγματοποιήθηκαν γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις στο ADINA για δοκό μήκους 13,7m με 14 κυκλικές οπές κατά μήκος του κορμού της.

Το αρχικό μοντέλο αποτελείται από οπές διαμέτρου 60cm που απέχουν μεταξύ τους 30cm, ενώ οι ακραίες οπές απέχουν από τις στηρίξεις απόσταση ίση με 70cm. Η τιμή αυτή της διαμέτρου ικανοποιεί τους περιορισμούς του Ευρωκώδικα και στη συνέχεια εξετάζονται τιμές διαμέτρου των οπών μεταξύ 0,10m και 0,80m, κρατώντας σταθερό το κέντρο των κυκλικών οπών και αυξομειώνοντας την τιμή της διαμέτρου. Ακολουθείται, δηλαδή η ίδια διαδικασία με αυτήν της προηγούμενης παραγράφου και ισχύουν τα ίδια όρια για τις τιμές των διαμέτρων όπως έχουν αναλυτικά αναφερθεί προηγουμένως.

10.2.1 Αποτελέσματα αναλύσεων για πλευρικό λυγισμό κυψελωτής δοκού

Η εξεταζόμενη διατομή έχει τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$h=960\text{mm}$$

$$b=300\text{mm}$$

$$t_w=17\text{mm}$$

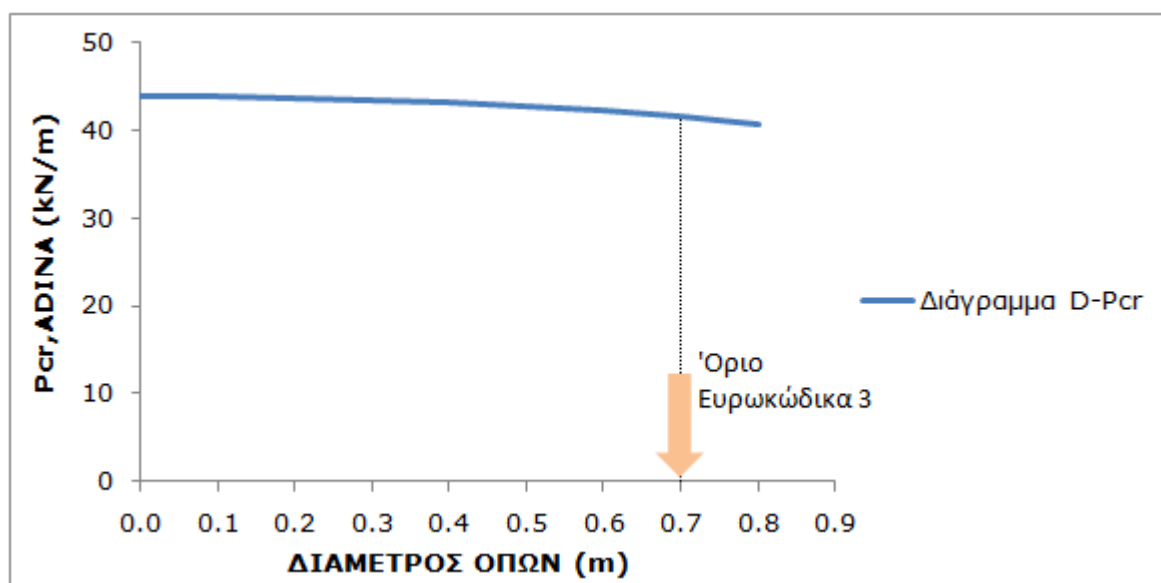
$$t_f=32\text{mm}$$

Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 10.1.1, η εξεταζόμενη διατομή για τη συμπαγή δοκό είναι κατηγορίας 1. Επίσης και για τις τομές σε των κυφελωτών δοκών, ο κορμός είναι κατηγορίας 1.

Διάμετρος οπών (mm)	$P_{cr,ADINA}$ (kN/m)	$P_{cr,EC3}$ (kN/m)
Συμπαγής δοκός	43,9	46,0
100	43,8	45,6
200	43,7	45,2
300	43,5	44,8
400	43,1	44,5
500	42,8	44,0
600	42,2	43,6
700	41,6	43,2
800	40,7	42,8

Πίνακας 10.4

Κρίσιμα φορτία λυγισμού για δοκούς με διάφορες διαμέτρους οπών



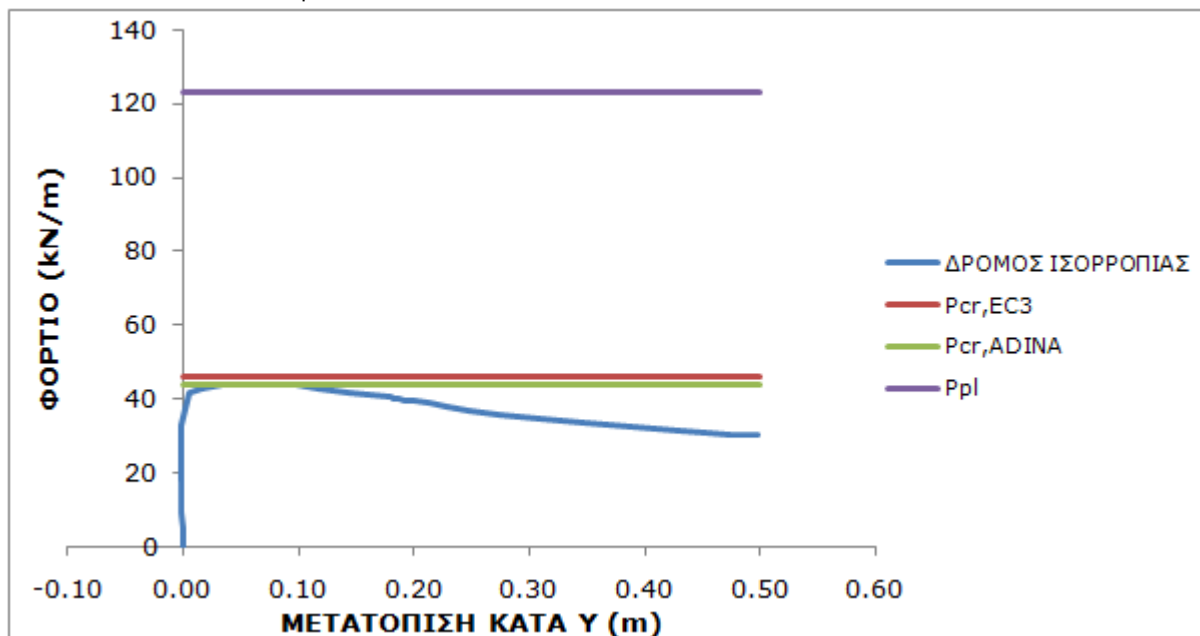
Σχήμα 10.35

Διάγραμμα κρίσιμου φορτίου κατά ADINA συναρτήσει της διαμέτρου των κυκλικών οπών

Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας

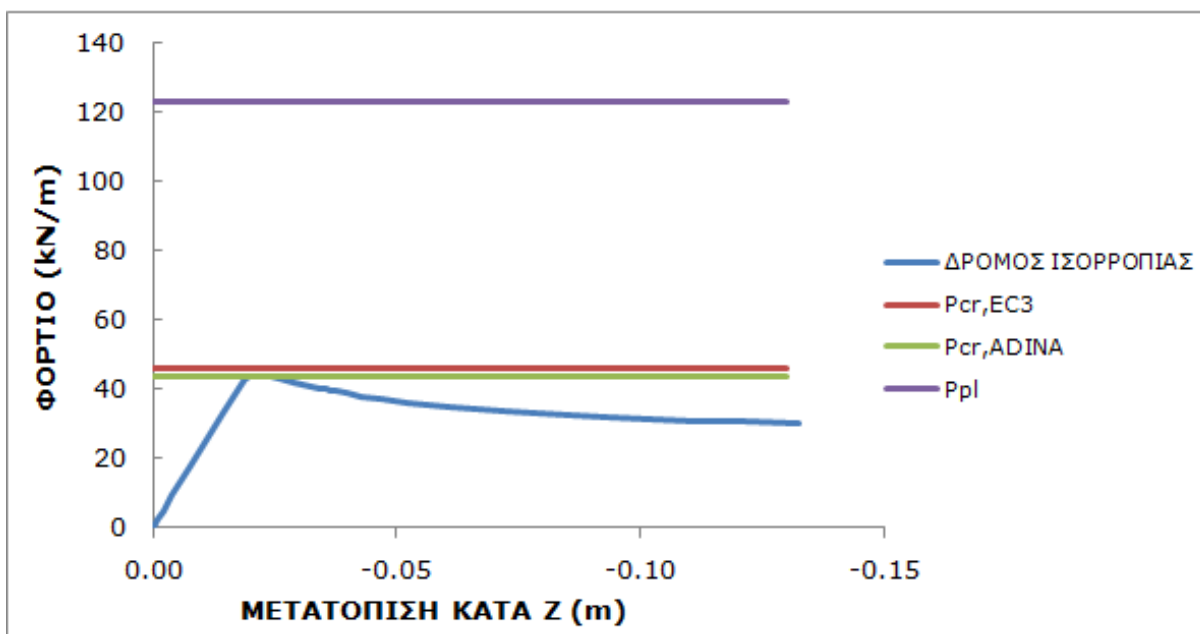
ΣΥΜΠΑΓΗΣ ΔΟΚΟΣ

Το φορτίο που αντιστοιχεί στην πλαστικοποίηση της συμπαγούς δοκού προκύπτει ίσο με $P_{pl}=123,4\text{kN/m}$.



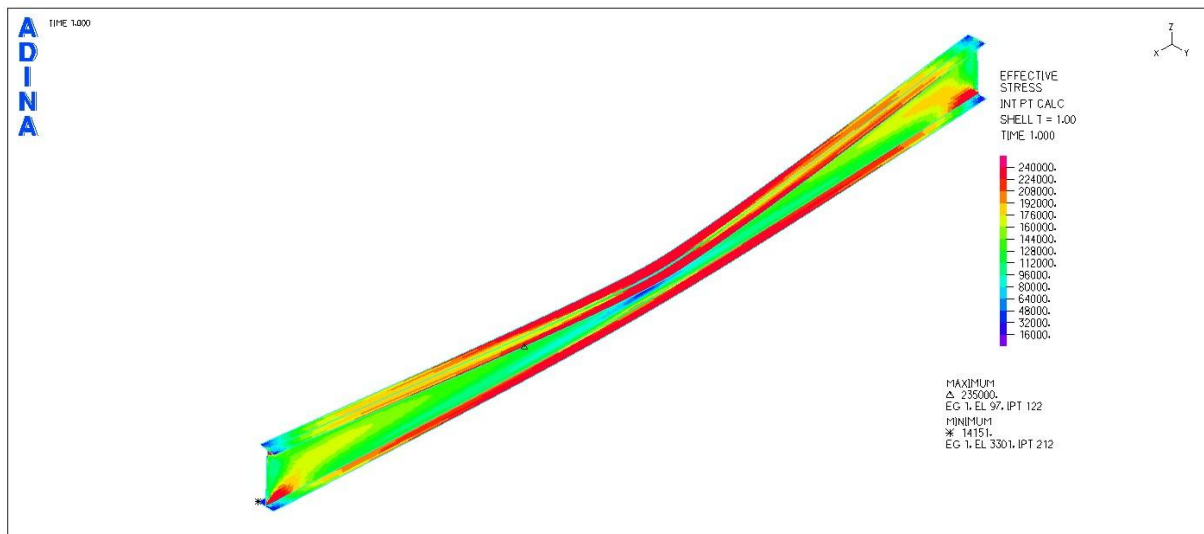
Σχήμα 10.36

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



Σχήμα 10.37

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

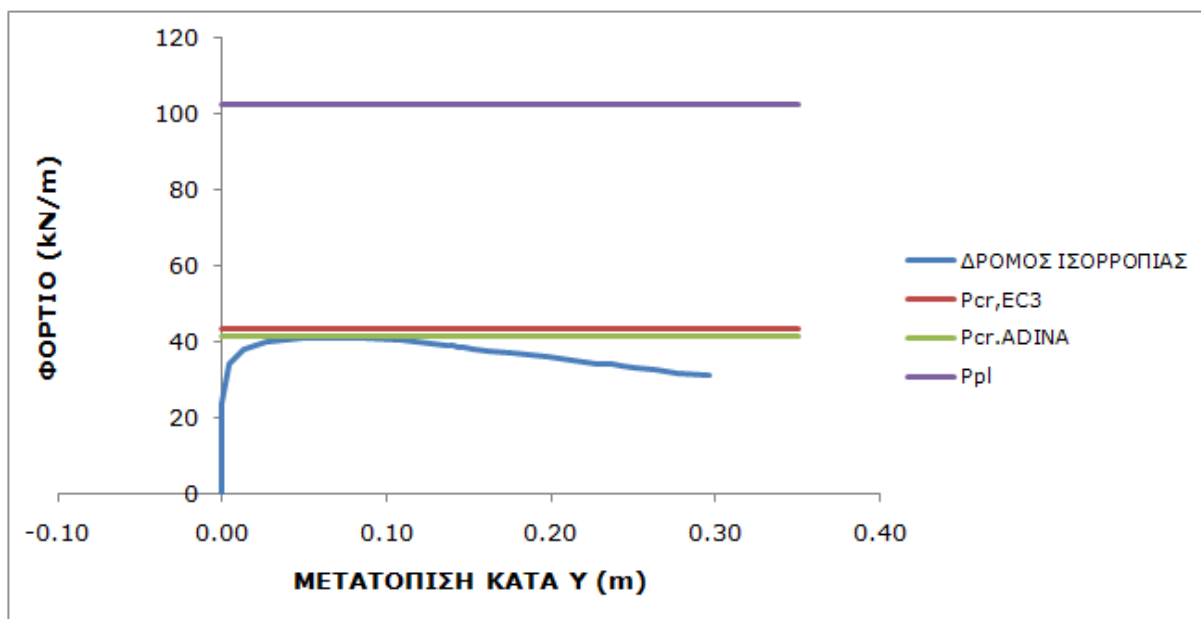


Σχήμα 10.38

Εικόνα τάσεων von Mises που αντιστοιχεί στο τέλος του δρόμου ισορροπίας

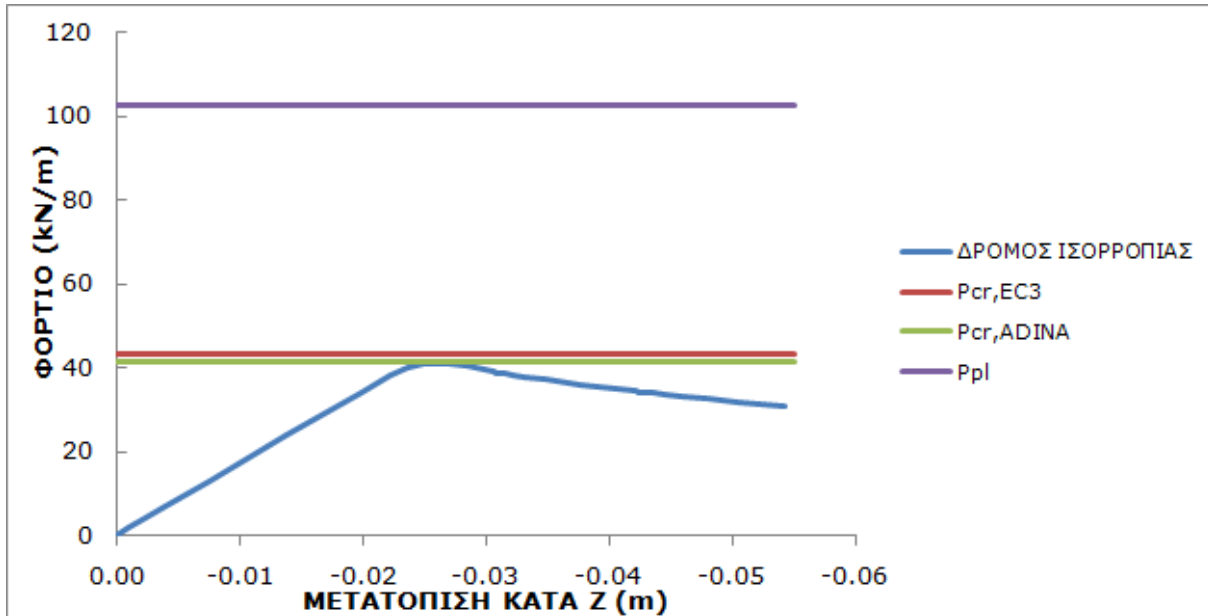
ΔΟΚΟΣ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΟΠΕΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ D=70cm

Το φορτίο που αντιστοιχεί στην πλαστικοποίηση της κυψελωτής δοκού προκύπτει ίσο με $P_{pl}=102,6\text{kN/m}$.



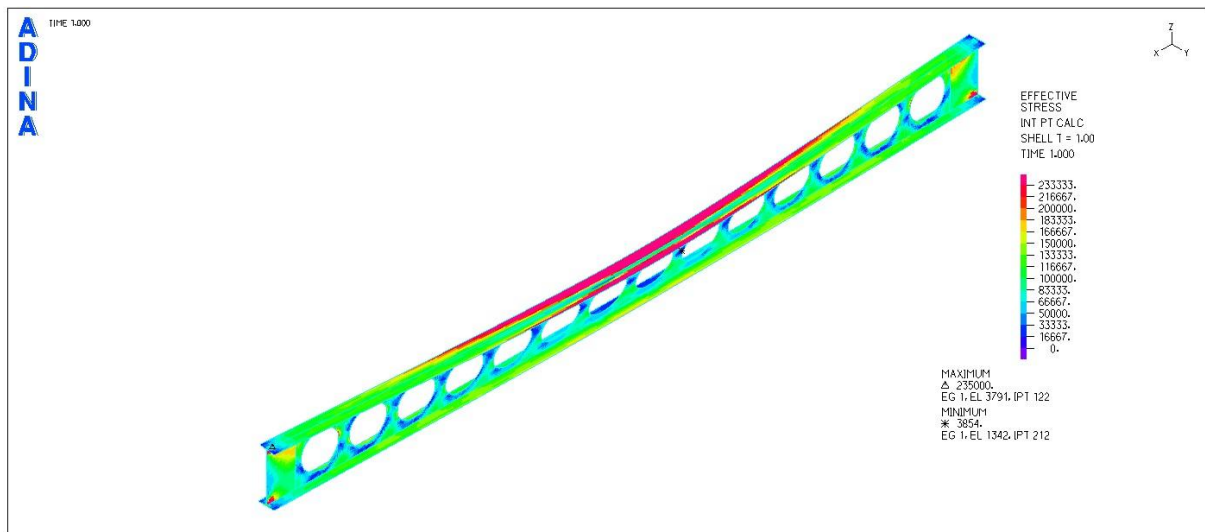
Σχήμα 10.39

Δρόμος ισορροπίας φορτίου- γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



Σχήμα 10.40

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς



Σχήμα 10.41

Εικόνα τάσεων von Mises που αντιστοιχεί στο τέλος του δρόμου ισορροπίας

Παρατηρούμε ότι τόσο η συμπαγής δοκός, όσο και η κυψελωτή, αστοχούν λόγω πλευρικού λυγισμού. Πράγματι, εκτελώντας σε φύλο Excel όλους τους ελέγχους επάρκειας της κυψελωτής δοκού με διάμετρο οπών $D=70\text{cm}$ για φορτίο ίσο με το κρίσιμο φορτίο πλευρικού λυγισμού, προκύπτει ότι τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη δεν υπερβαίνουν για κανέναν έλεγχο τις αντίστοιχες τιμές αντοχών.

10.2.2 Αποτελέσματα αναλύσεων για τοπικό λυγισμό κυψελωτής δοκού

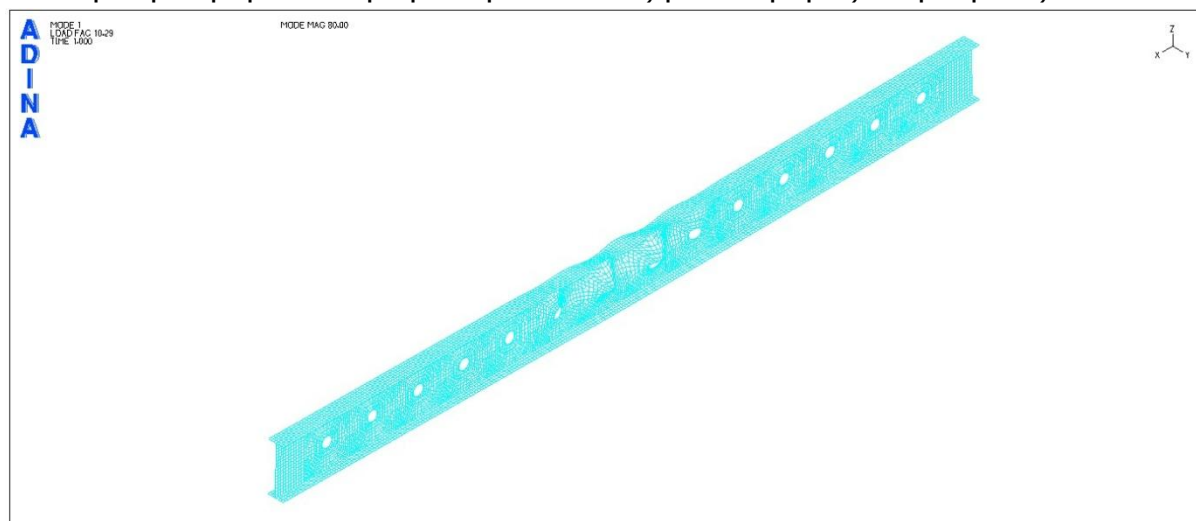
Εξετάζεται η δοκός της παραγράφου 10.2.1, αλλά τοποθετούνται πλευρικές εξασφαλίσεις κατά μήκος της, στα σημεία συνένωσης κορμού-άνω πέλματος και κορμού-κάτω πέλματος.

Εμφανίζεται, όπως αναμενόταν, τοπικός λυγισμός της δοκού. Είναι ωστόσο χαρακτηριστικό ότι ο τοπικός λυγισμός εμφανίζεται στο μέσο της δοκού για τη συμπαγή δοκό και τις δοκούς με διαμέτρους οπών $D=10\text{cm}$ και $D=20\text{cm}$, ενώ για τις υπόλοιπες τιμές διαμέτρων εκδηλώνεται στα άκρα.

Διάμετρος οπών (mm)	$P_{cr,ADINA}$ (kN/m)
Συμπαγής δοκός	1096,0
100	1081,0
200	1029,0
300	877,1
400	70,9
500	53,9
600	39,5
700	28,1
800	18,0

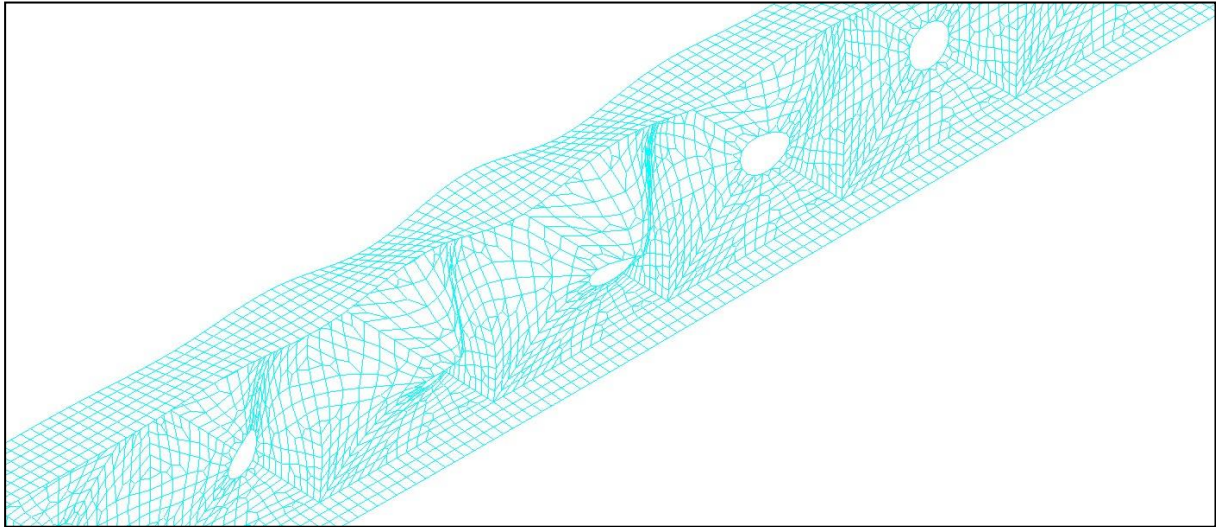
Πίνακας 10.5

Κρίσιμα φορτία λυγισμού για δοκούς με διάφορες διαμέτρους οπών



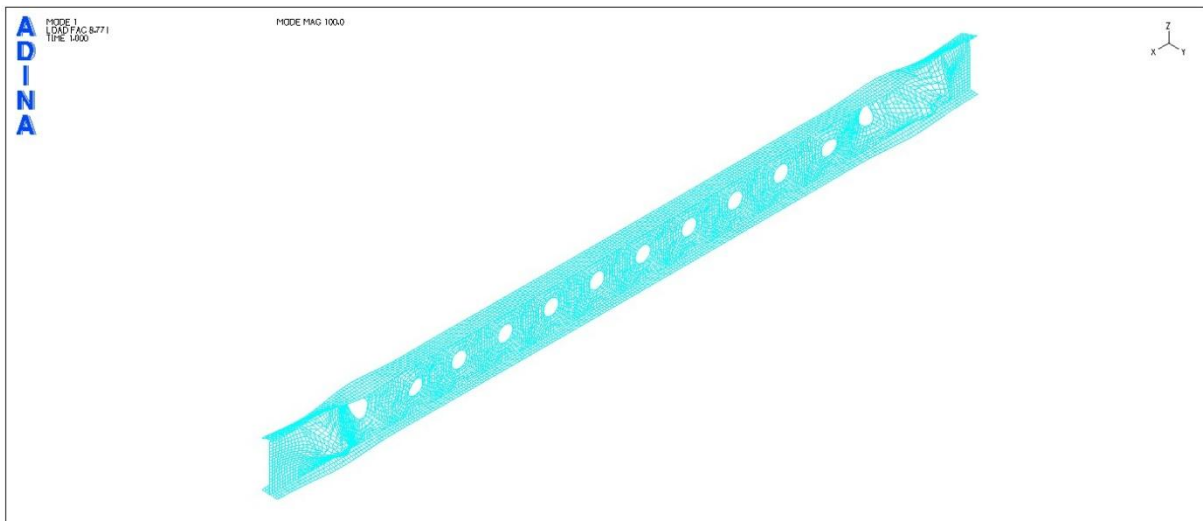
Σχήμα 10.42

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 13.7m με διάμετρο κυκλικών οπών $D=20\text{cm}$



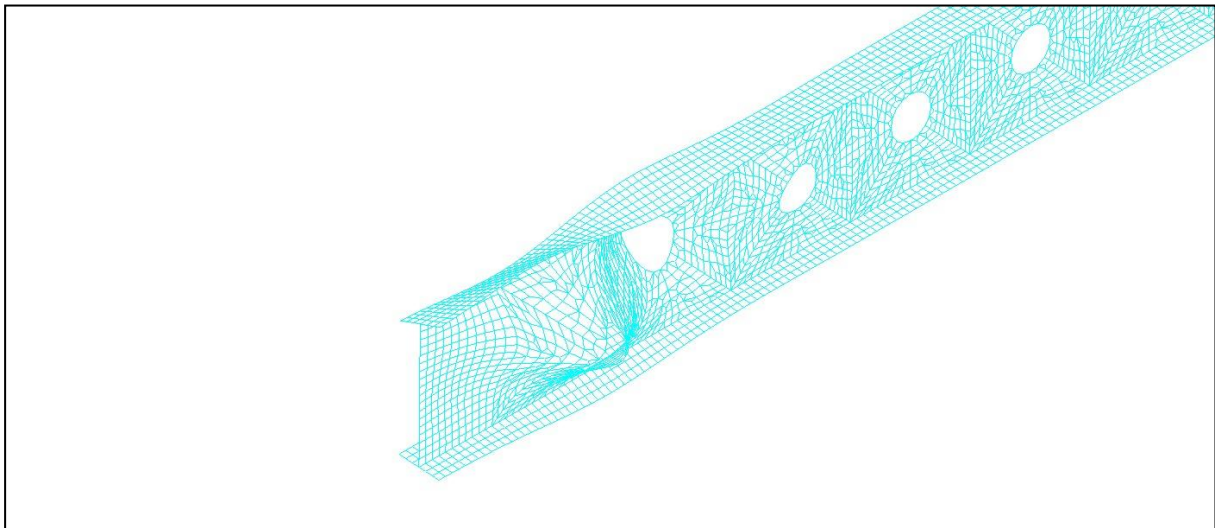
Σχήμα 10.43

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 13.7m με διάμετρο κυκλικών οπών D=20cm (λεπτομέρεια)



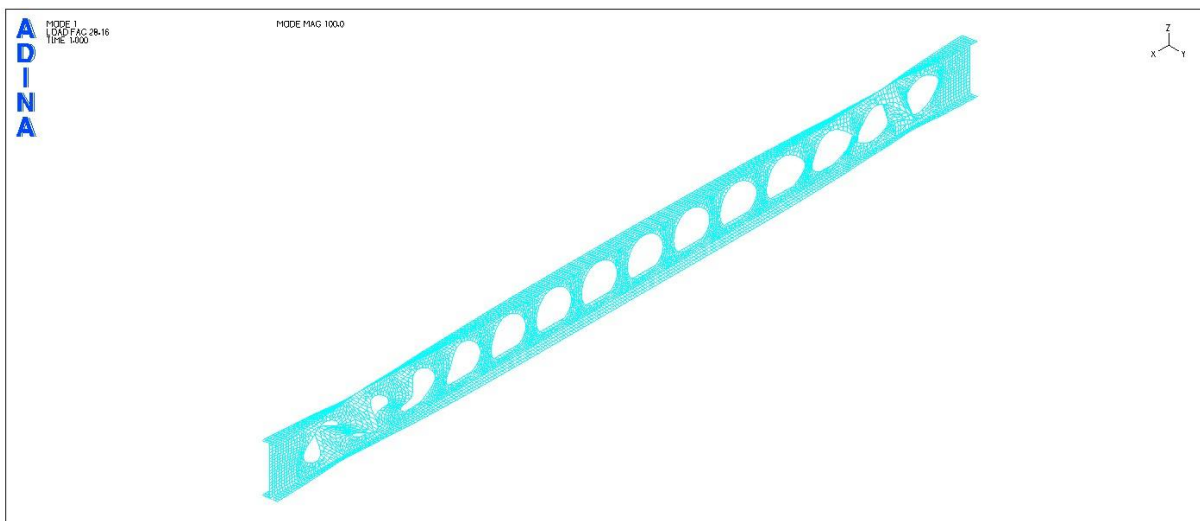
Σχήμα 10.44

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 13.7m με διάμετρο κυκλικών οπών D=30cm



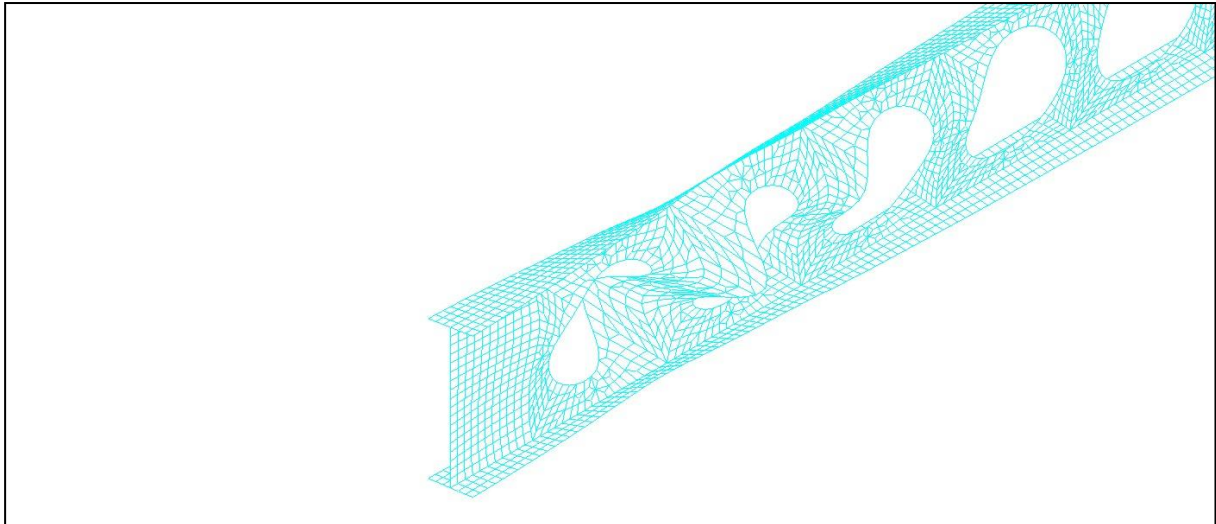
Σχήμα 10.45

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 13.7m με διάμετρο κυκλικών οπών $D=30\text{cm}$ (λεπτομέρεια)



Σχήμα 10.46

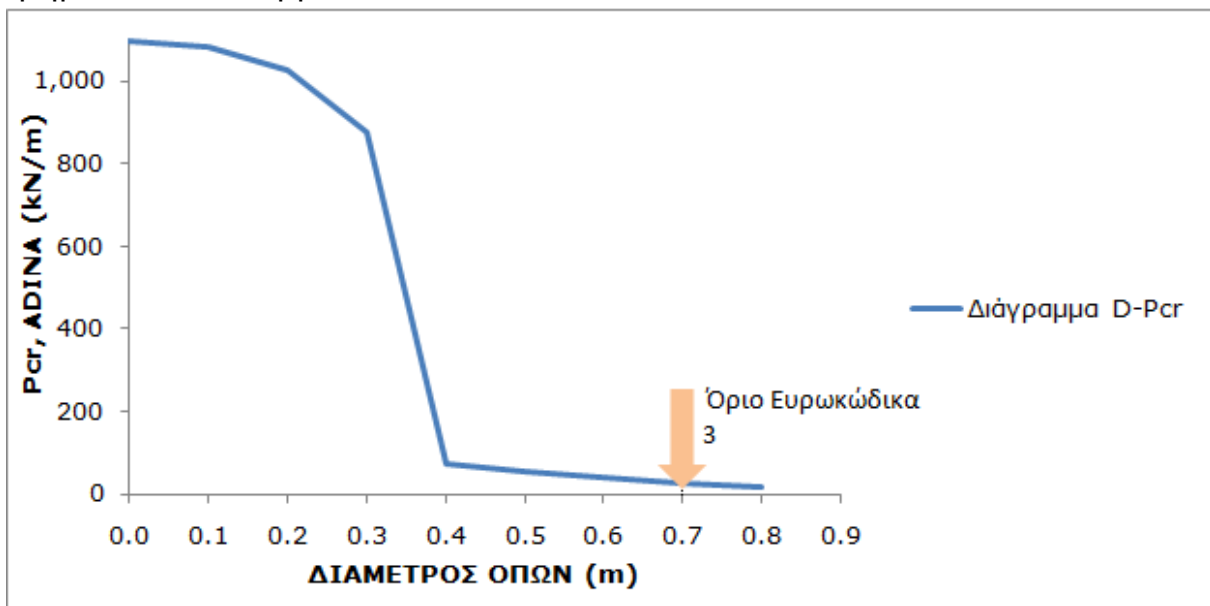
1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 13.7m με διάμετρο κυκλικών οπών $D=70\text{cm}$



Σχήμα 10.47

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 13.7m με διάμετρο κυκλικών οπών D=70cm (λεπτομέρεια)

Για μεγάλες τιμές διαμέτρου, φαίνεται καθαρά ο λυγισμός των συμπαγών τμημάτων του κορμού.



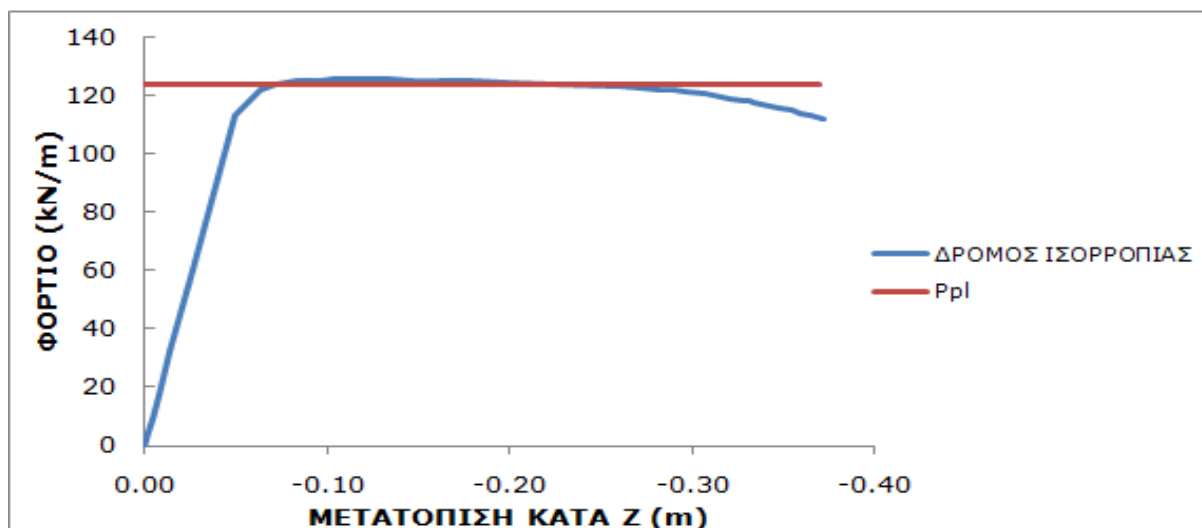
Σχήμα 10.48

Διάγραμμα κρίσιμου φορτίου κατά ADINA συναρτήσει της διαμέτρου των κυκλικών οπών

Φαίνεται καθαρά ότι η κρίσιμη μορφή αστοχίας δεν είναι κοινή για όλες τις περιπτώσεις. Για τη συμπαγή δοκό και για τις δοκούς με οπές διαμέτρου 10cm, 20cm και 30cm, η αστοχία οφείλεται στην πλαστικοποίηση. Παρακάτω φαίνεται η μη γραμμική ανάλυση για τη συμπαγή δοκό, στην οποία επιβεβαιώνεται η αστοχία λόγω διαρροής.

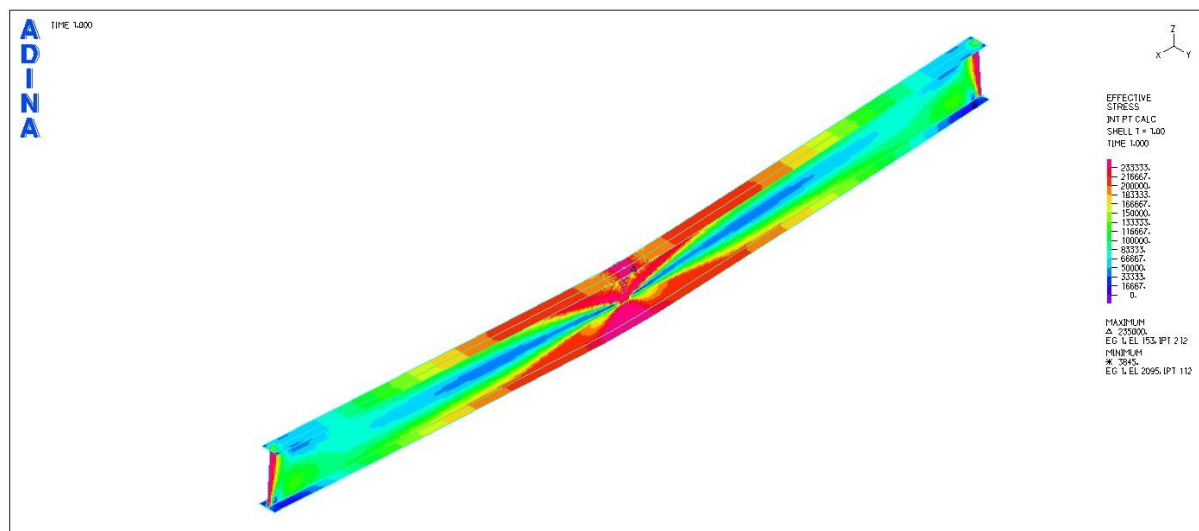
Η αστοχία για τις υπόλοιπες δοκούς προκύπτει από τους συνδυασμούς αστοχίας για τις κυψελωτές δοκούς. Θα πραγματοποιηθεί μη γραμμική ανάλυση για τη δοκό διαμέτρου οπών $D=70\text{cm}$, ώστε να ευρεθεί η μορφή αστοχίας.

Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας ΣΥΜΠΑΓΗΣ ΔΟΚΟΣ



Σχήμα 10.49

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

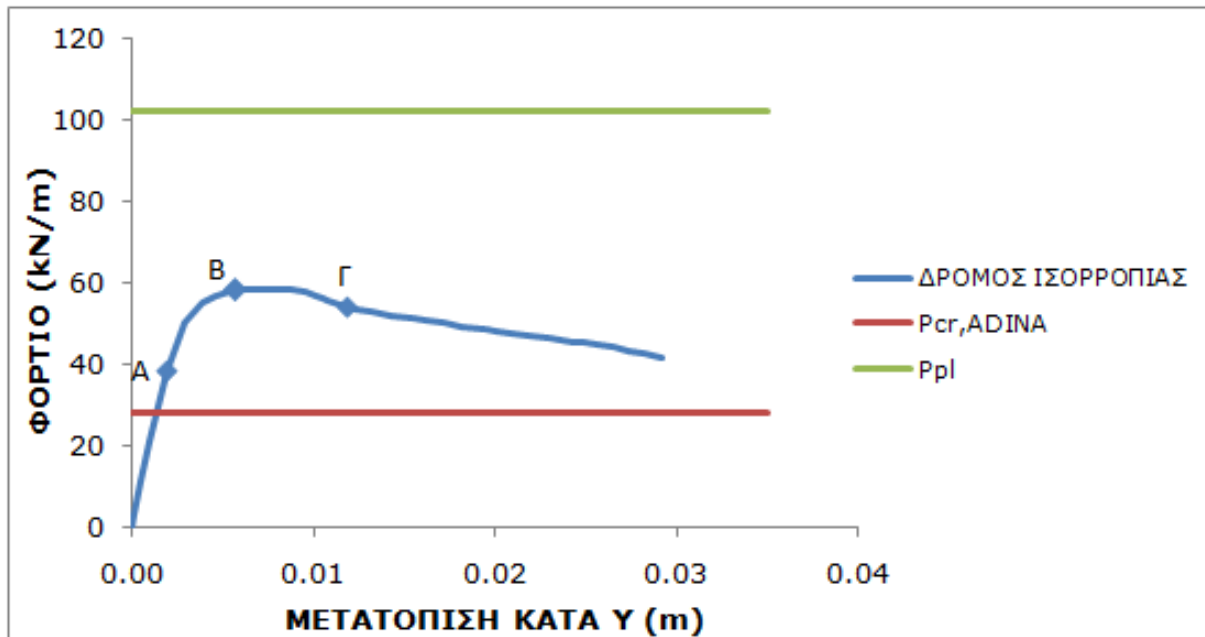


Σχήμα 10.50

Εικόνα τάσεων von Mises που αντιστοιχεί στο τέλος του δρόμου ισορροπίας

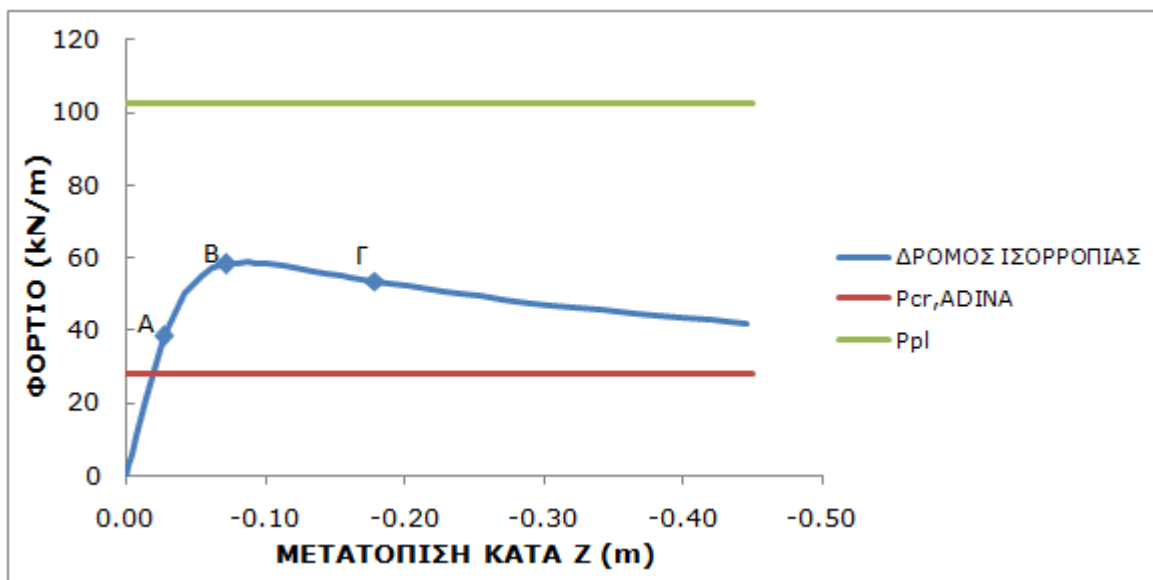
Η συμπαγής δοκός αστοχεί λόγω πλαστικοποίησης της μεσαίας διατομής της.

ΔΟΚΟΣ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΟΠΕΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ D=70cm



Σχήμα 10.51.α

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



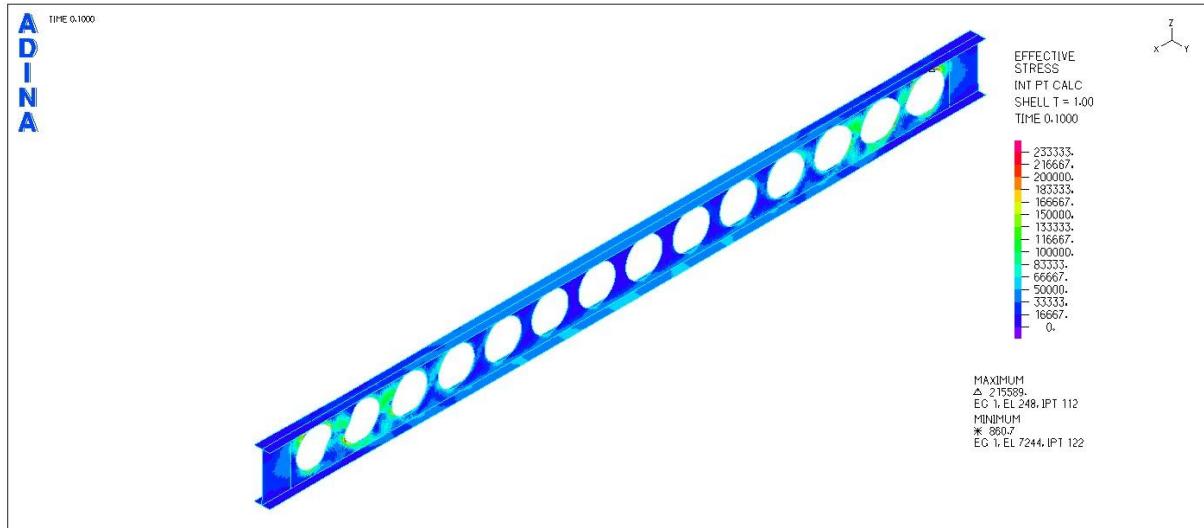
Σχήμα 10.51.β

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΑ 3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΥ ΔΡΟΜΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

ΕΙΚΟΝΕΣ ΤΑΣΕΩΝ VON MISES

ΣΗΜΕΙΟ A (t=0,10)

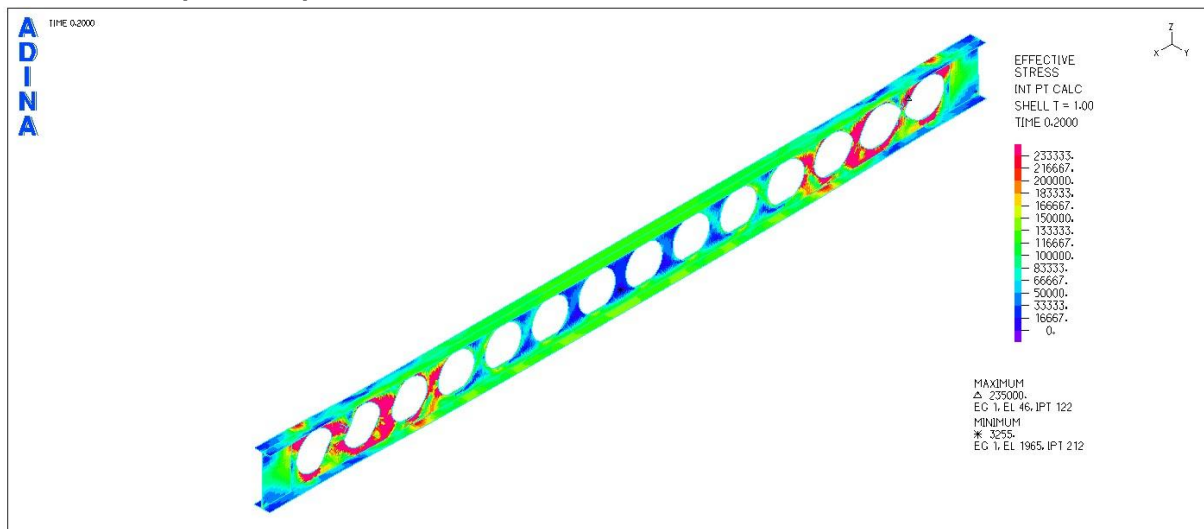


Σχήμα 10.52

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο A

Παρατηρούμε ότι έχει αρχίσει να εκδηλώνεται λυγισμός του κορμού στα άκρα της δοκού. Οι τάσεις von Mises δεν έχουν εξισωθεί με την f_y .

ΣΗΜΕΙΟ B (t=0,20)



Σχήμα 10.53

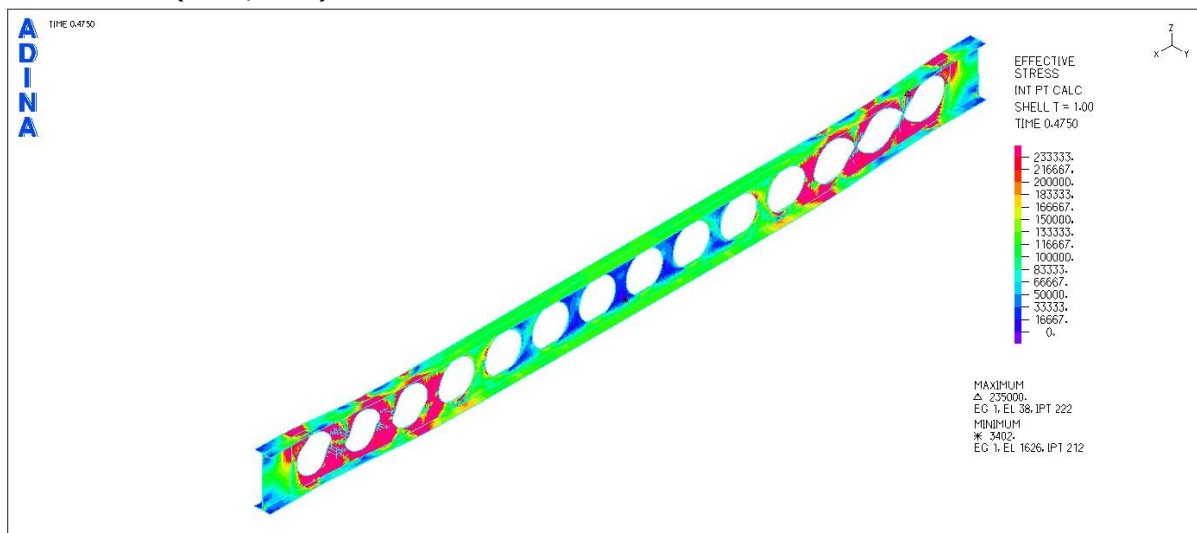
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο B

Οι τάσεις von Mises στο συμπαγές τμήμα του κορμού μεταξύ των οπών, καθώς και στα σημεία γύρω από τις οπές (τομές bb), στα άκρα της δοκού,

είναι ιδιαίτερα αυξημένες και σε αρκετά σημεία έχουν γίνει ίσες με την τάση διαρροής.

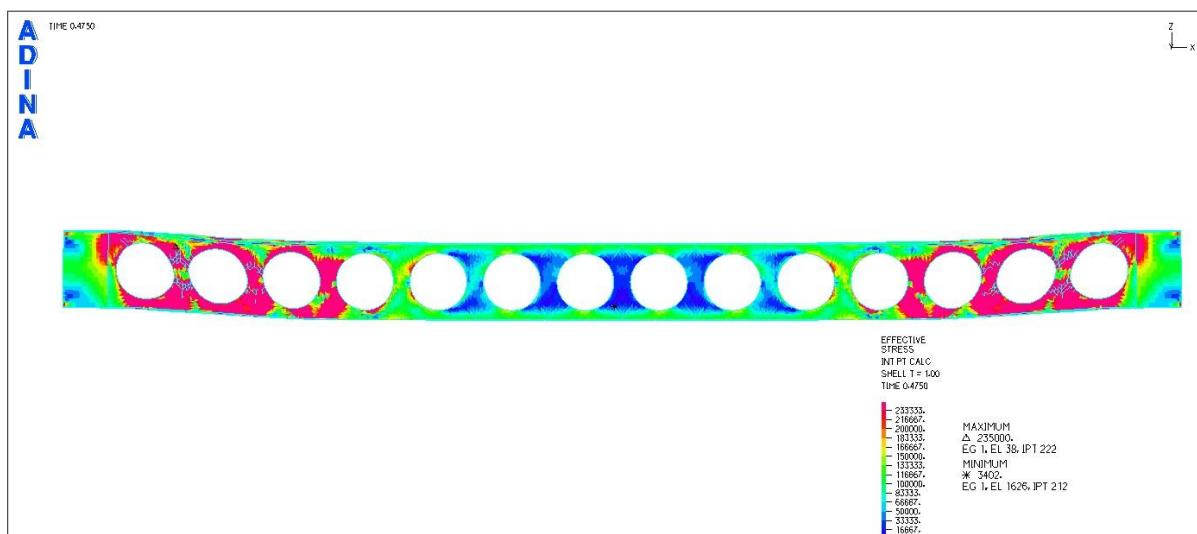
Στο σημείο Β ξεκινάει ο καθοδικός κλάδος του δρόμου ισορροπίας.

ΣΗΜΕΙΟ Γ (t=0,475)



Σχήμα 10.54

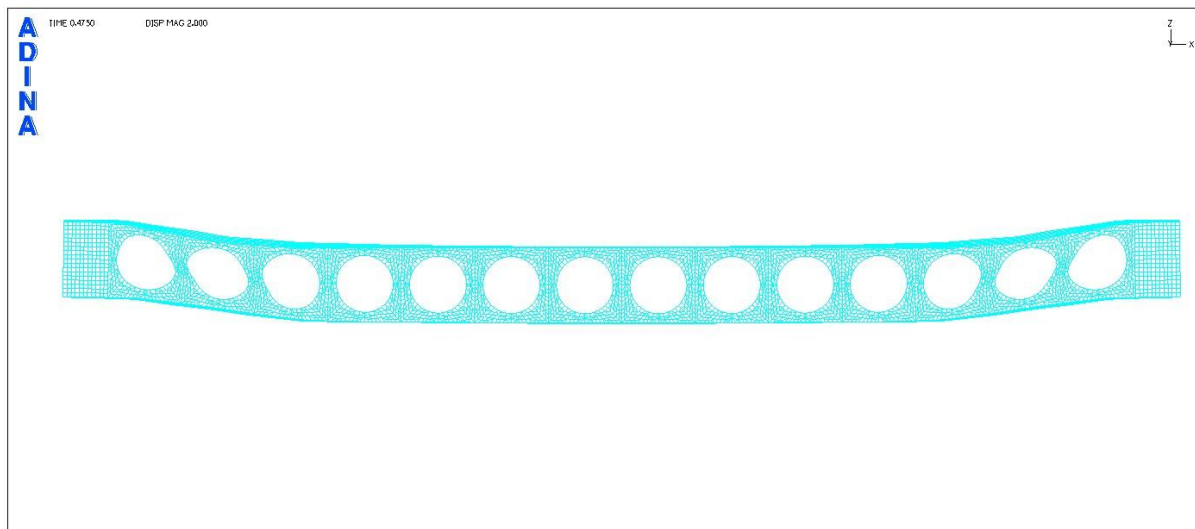
Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (προοπτικό)



Σχήμα 10.55

Εικόνα τάσεων von Mises για το χαρακτηριστικό σημείο Γ (όψη)

Οι τάσεις von Mises έχουν εξισωθεί με την τάση διαρροής για τα σημεία των συμπαγών τμημάτων του κορμού στα άκρα, αλλά και για τις τομές bb των ακραίων οπών. Η αστοχία του φορέα οφείλεται, συνεπώς, στην αλληλεπίδραση διαρροής-λυγισμού των συμπαγών τμημάτων του κορμού και στο σχηματισμό μηχανισμού Vierendeel.



Σχήμα 10.56

Εικόνα παραμόρφωσης για το χαρακτηριστικό σημείο Γ

Στην εικόνα 10.56 φαίνεται ο λυγισμός του κορμού στα άκρα, αλλά και η παραμόρφωση των τμημάτων γύρω από τις οπές, η οποία προσομοιώνει το σχηματισμό **μηχανισμού Vierendeel**.

Πράγματι, με βάση τις κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 για τον έλεγχο επάρκειας δοκών με κυκλικές οπές, προκύπτει για τη συγκεκριμένη δοκό: Για φορτίο ίσο με 48kN/m (μεταξύ των σημείων A και B του δρόμου ισορροπίας), αρχίζει η διαρροή για τις ακραίες ίνες των τομών bb γύρω από τις οπές. Για την τιμή του φορτίου αστοχίας που προκύπτει με βάση το δρόμο ισορροπίας, δηλαδή για $P_{cr}=58,2\text{kN/m}$, εκτελώντας τους ελέγχους επάρκειας, προκύπτει υπέρβαση της αντοχής τόσο των τομών bb στα άκρα της δοκού, όσο και της αντοχής σε διαρροή και λυγισμό του κορμού στα άκρα της δοκού. Οι υπόλοιποι έλεγχοι επάρκειας ικανοποιούνται για την τιμή αυτή του φορτίου. Συνεπώς, η δοκός αστοχεί μέσω του λυγισμού του κορμού της στις θέσεις μέγιστης τέμνουσας και μέσω της πλαστικοποίησης των διατομών γύρω από τις οπές στις ίδιες θέσεις.

10.3 Αμφιέριστη κυψελωτή δοκός μήκους 20m

Πραγματοποιήθηκαν γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις στο ADINA για δοκό μήκους 20m με 21 κυκλικές οπές κατά μήκος του κορμού της.

Το αρχικό μοντέλο αποτελείται από οπές διαμέτρου 60cm που απέχουν μεταξύ τους 30cm, ενώ οι ακραίες οπές απέχουν από τις στηρίξεις απόσταση ίση με 70cm. Η τιμή αυτή της διαμέτρου ικανοποιεί τους περιορισμούς του Ευρωκώδικα και στη συνέχεια εξετάζονται τιμές διαμέτρου των οπών μεταξύ 0,10m και 0,80m, κρατώντας σταθερό το κέντρο των κυκλικών οπών και αυξομειώνοντας την τιμή της διαμέτρου. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία που έχει γίνει και στις προηγούμενες παραγράφους.

10.3.1 Αποτελέσματα αναλύσεων για πλευρικό λυγισμό κυψελωτής δοκού

Η εξεταζόμενη διατομή έχει τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$h=960\text{mm}$$

$$b=300\text{mm}$$

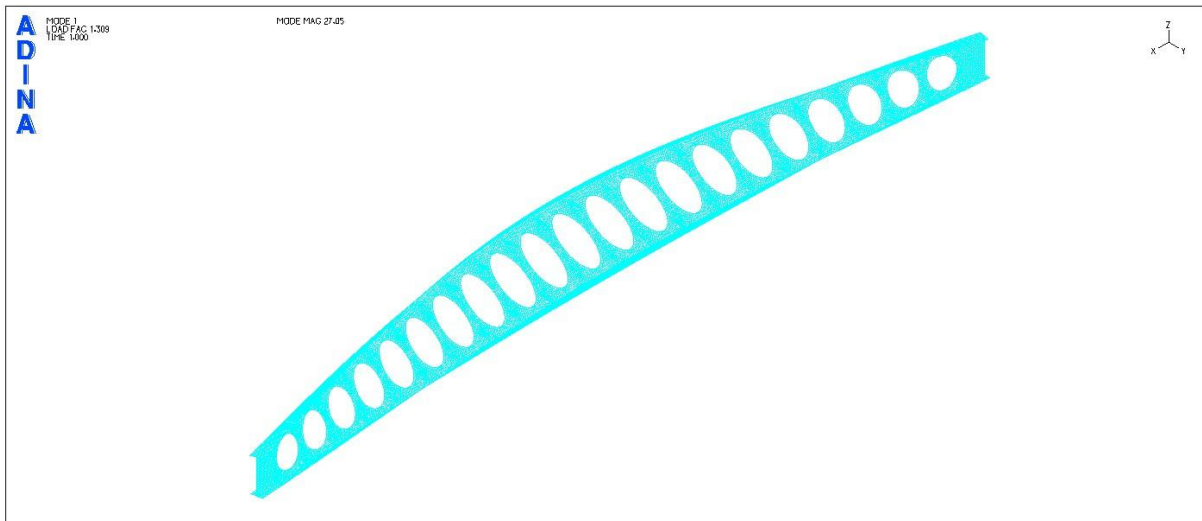
$$t_w=17\text{mm}$$

$$t_f=32\text{mm}$$

Διάμετρος οπών (mm)	$P_{cr,ADINA}$ (kN/m)	$P_{cr,EC3}$ (kN/m)
Συμπαγής δοκός	13,83	14,27
100	13,82	14,13
200	13,78	13,98
300	13,71	13,84
400	13,56	13,69
500	13,43	13,54
600	13,28	13,39
700	13,09	13,24
800	12,86	13,09

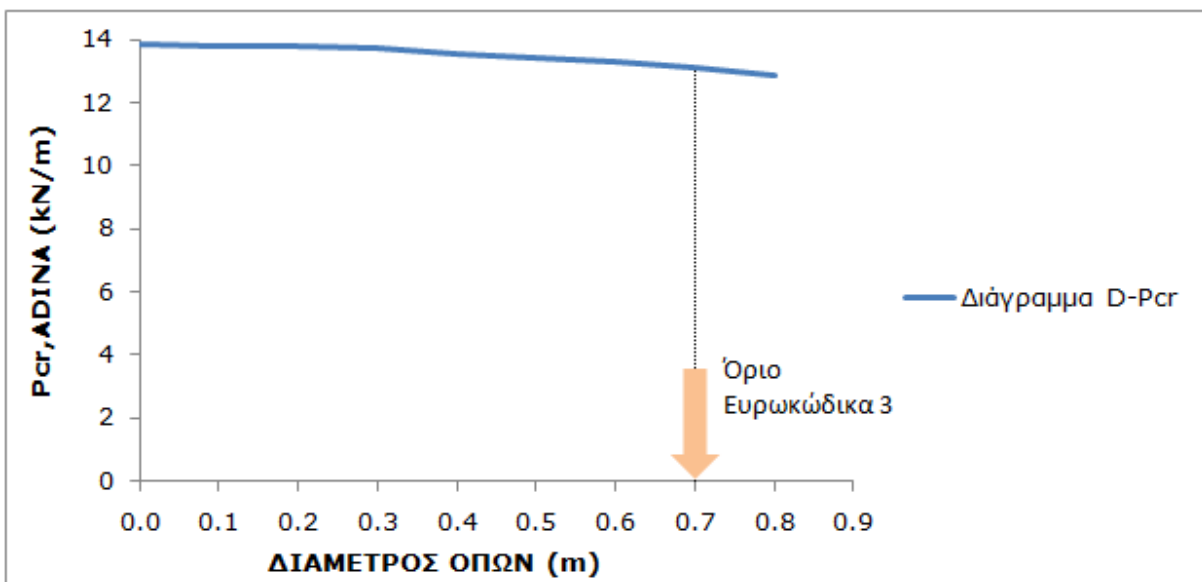
Πίνακας 10.6

Κρίσιμα φορτία λυγισμού για δοκούς με διάφορες διαμέτρους οπών



Σχήμα 10.57

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 20m με διάμετρο κυκλικών οπών $D=70\text{cm}$

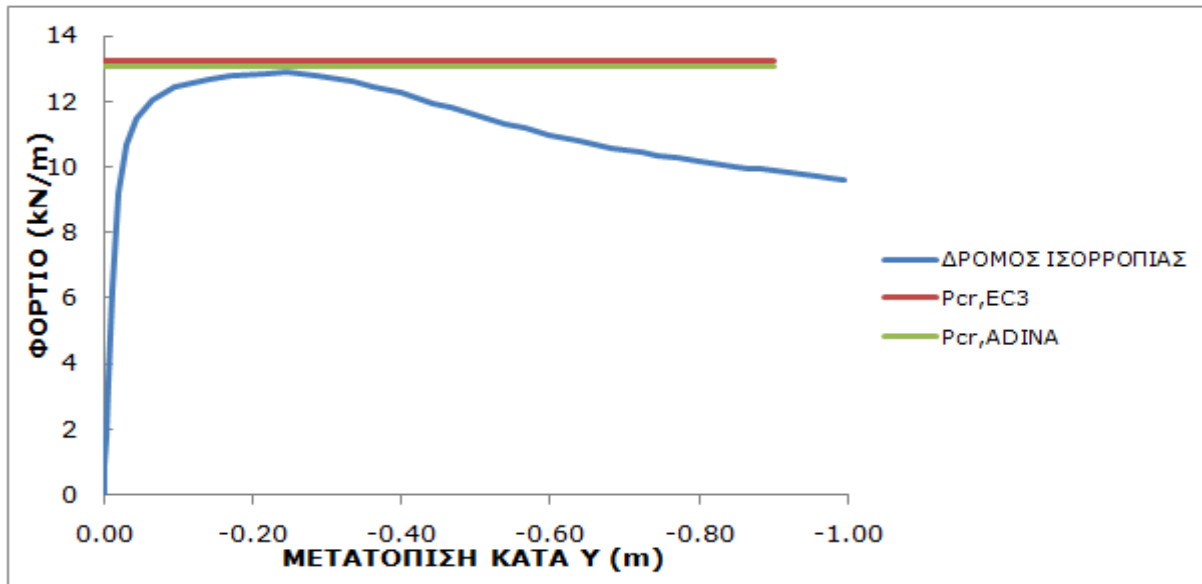


Σχήμα 10.58

Διάγραμμα κρίσιμου φορτίου κατά ADINA συναρτήσεως της διαμέτρου των κυκλικών οπών

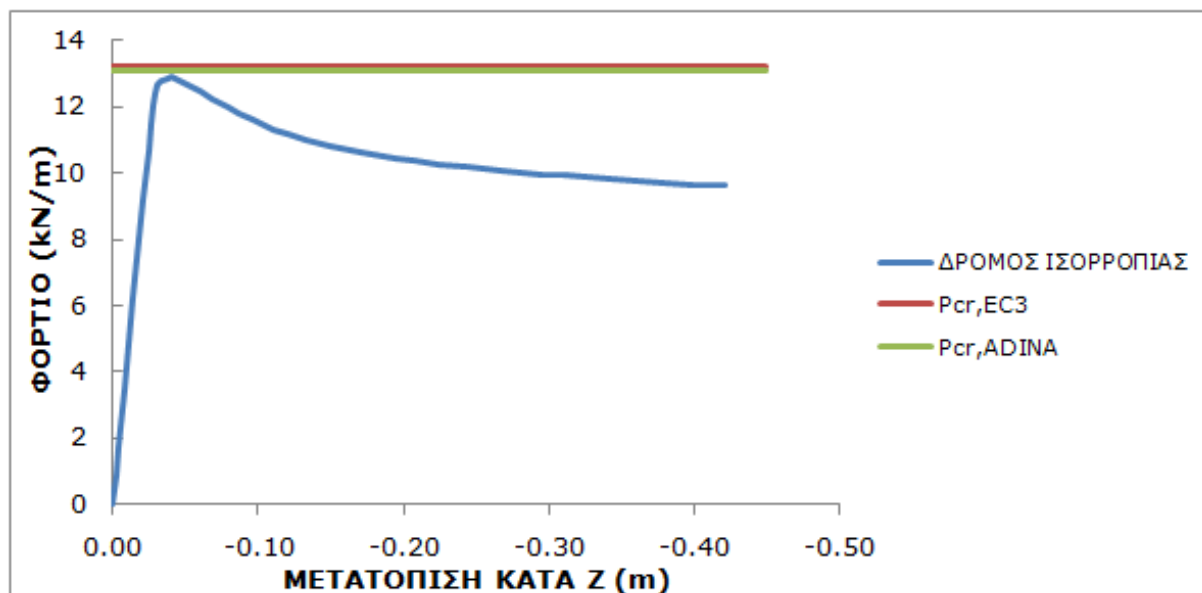
Μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας

ΔΟΚΟΣ ΜΕ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΟΠΕΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ D=70cm



Σχήμα 10.59

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-γ μετατόπισης του κόμβου όπου δόθηκε ατέλεια



Σχήμα 10.60

Δρόμος ισορροπίας φορτίου-z μετατόπισης του κόμβου αναφοράς

Η κυψελωτή δοκός υφίσταται πλευρικό λυγισμό και αστοχεί για τιμή φορτίου λίγο μικρότερη από την τιμή του κρίσιμου φορτίου πλευρικού λυγισμού.

Η αντίστοιχη μη γραμμική ανάλυση για τη συμπαγή δοκό έχει παρουσιαστεί στην παράγραφο 9.2.2.

10.3.2 Αποτελέσματα αναλύσεων για τοπικό λυγισμό κυψελωτής δοκού

Η εξεταζόμενη διατομή έχει τα ακόλουθα γεωμετρικά χαρακτηριστικά:

$$h=960\text{mm}$$

$$b=300\text{mm}$$

$$t_w=7\text{mm}$$

$$t_f=10\text{mm}$$

Οι δοκοί εξασφαλίζονται πλευρικά, στα σημεία συνένωσης άνω πέλματος-κορμού.

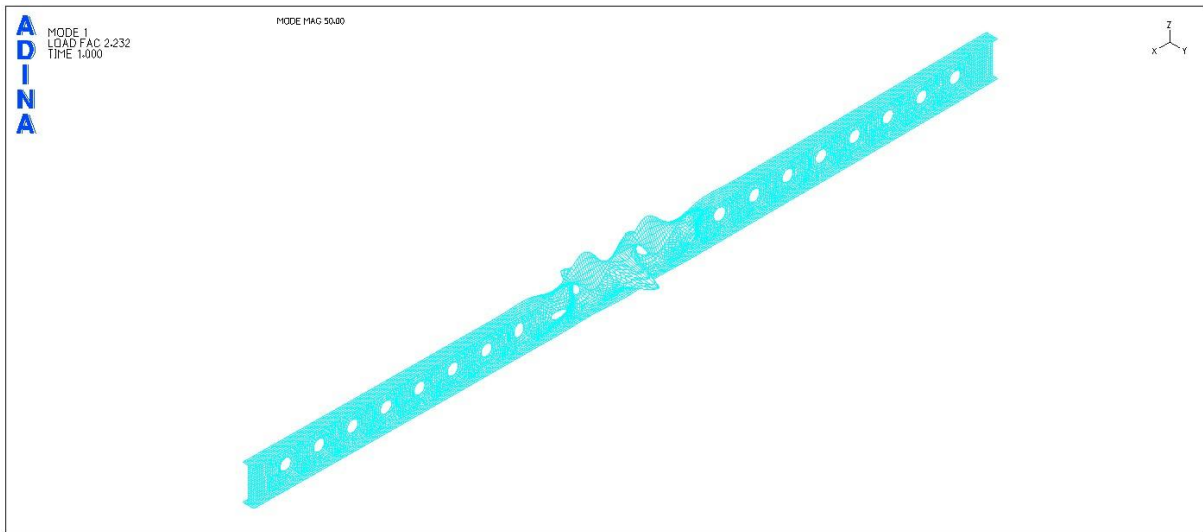
Διάμετρος οπών (mm)	$P_{cr,ADINA}$ (kN/m)
Συμπαγής δοκός	24,30
100	24,23
200	23,56
300	22,32
400	21,28
500	21,16
600	16,04
700	11,43
800	7,30

Πίνακας 10.7

Κρίσιμα φορτία λυγισμού για δοκούς με διάφορες διαμέτρους οπών

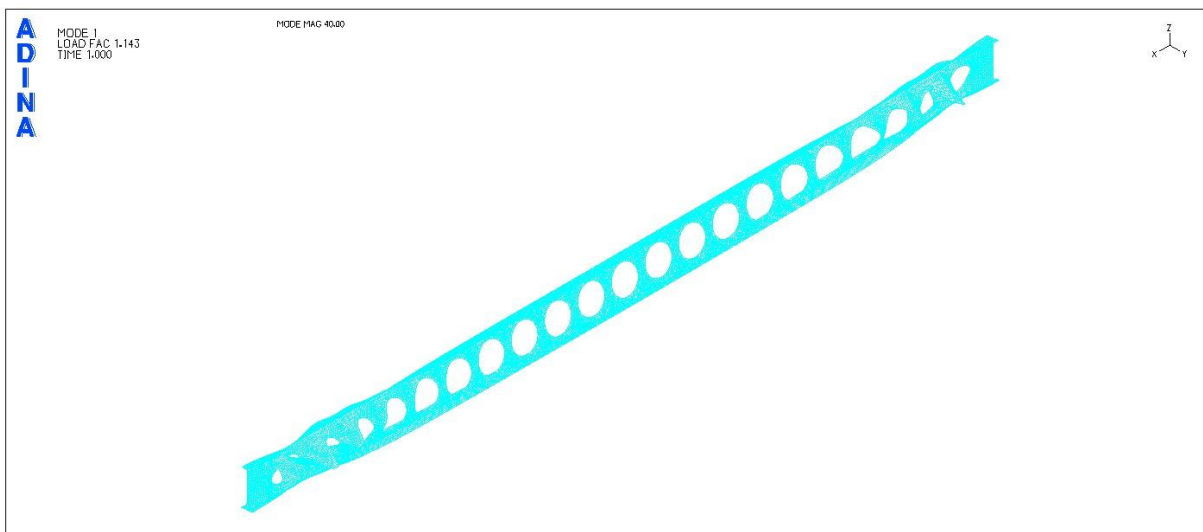
Αξίζει να επισημανθεί ότι για τη συμπαγή δοκό και για τις κυψελωτές δοκούς με διαμέτρους οπών 10cm, 20cm, 30cm και 40cm, ο τοπικός λυγισμός εκδηλώνεται στο μέσο της δοκού. Η διαφορά των κυψελωτών δοκών με τη συμπαγή είναι ότι στις πρώτες, ο τοπικός λυγισμός εκδηλώνεται τόσο στο άνω θλιβόμενο πέλμα λόγω κάμψης, όσο και στον κορμό λόγω της παρουσίας των οπών και του μικρού πάχους. Στη συμπαγή δοκό, ο τοπικός λυγισμός περιορίζεται στο άνω θλιβόμενο πέλμα και στο άνω θλιβόμενο τμήμα του κορμού.

Για τις υπόλοιπες τιμές διαμέτρων, εμφανίζεται τοπικός λυγισμός στα άκρα της δοκού. Πρόκειται για το λυγισμό των συμπαγών τμημάτων του κορμού στις θέσεις μέγιστης τέμνουσας.



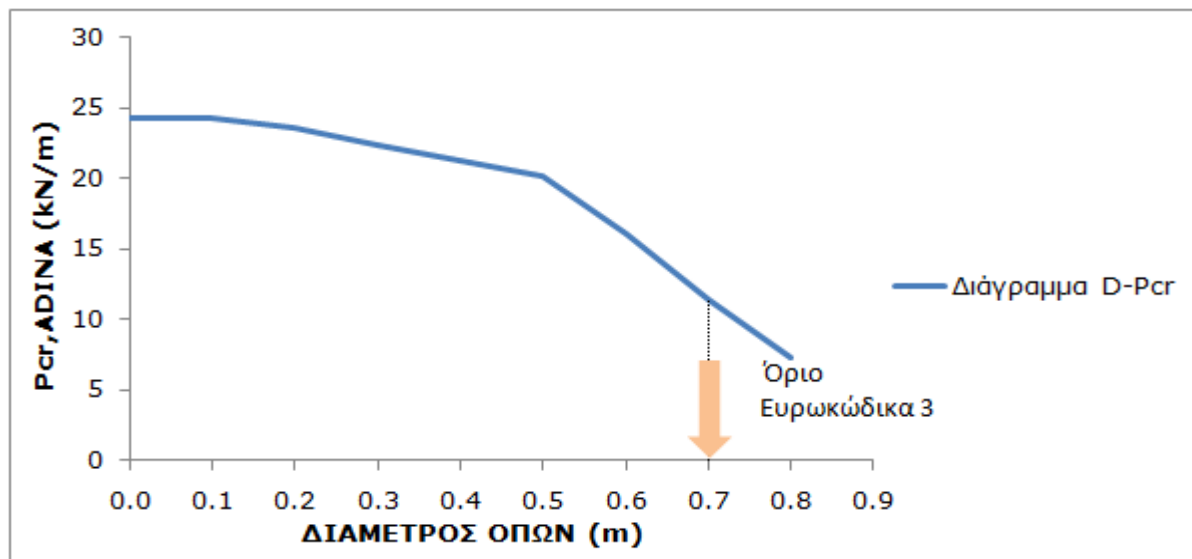
Σχήμα 10.61

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 20m με διάμετρο κυκλικών οπών $D=30\text{cm}$



Σχήμα 10.62

1^η ιδιομορφή λυγισμού για τη δοκό μήκους 20m με διάμετρο κυκλικών οπών $D=70\text{cm}$



Σχήμα 10.63

Διάγραμμα κρίσιμου φορτίου κατά ADINA συναρτήσει της διαμέτρου των κυκλικών οπών

Συμπεραίνουμε ότι οι τιμές του κρίσιμου φορτίου λυγισμού για διαφορετικές τιμές διαμέτρων δεν παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση για την περίπτωση όπου στη γραμμική ανάλυση λυγισμού εμφανίζεται πλευρικός λυγισμός. Αντίθετα, όταν στη γραμμική ανάλυση λυγισμού εμφανίζεται τοπικός λυγισμός, η επιρροή της τιμής της διαμέτρου στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι σημαντική.

Κεφάλαιο 11

Γενικά Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο συνοψίζονται οι παρατηρήσεις των προηγούμενων κεφαλαίων με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για την εργασία που πραγματοποιήθηκε.

Όσον αφορά στη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA, σημαντικό ζήτημα αποτέλεσε η διερεύνηση της επιλογής των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών για την προσομοίωση αμφιέριστης δοκού. Επειδή στον τύπο του Ευρωκώδικα 3 για τον υπολογισμό της ελαστικής κρίσιμης ροπής πλευρικού λυγισμού χρησιμοποιείται η τιμή $k_w=1$ που αντιστοιχεί σε ελεύθερη στρέβλωση του άκρου, θεωρήθηκε πιο αξιόπιστη η δέσμευση των κόμβων μόνο του κορμού και όχι ολόκληρης της διατομής. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση που δεσμεύεται η αξονική μετακίνηση μόνο στο ένα άκρο της δοκού, δηλαδή στην περίπτωση άρθρωσης και κύλισης, οι δρόμοι ισορροπίας έχουν καθοδικό κλάδο μόλις το φορτίο φθάσει περίπου την τιμή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Αυτό συνιστά το ζητούμενο, καθώς όταν η τάση von Mises κάποιων σημείων φθάσει το όριο διαρροής, καταλύεται η μεταλυγισμική αντοχή του φορέα και επέρχεται η αστοχία του λόγω της αλληλεπίδρασης πλευρικού λυγισμού και διαρροής. Με την επιλογή αρθρώσεων και στα 2 άκρα, οι φορείς συνεχίζουν να διαθέτουν κάποια μεταλυγισμική αντοχή ακόμα και με την παρουσία διαρροής, όπως φαίνεται και στους αντίστοιχους δρόμους ισορροπίας που παρουσιάστηκαν.

Σε όλες, επομένως, τις αριθμητικές αναλύσεις στο ADINA, το μέσο της μίας ακραίας διατομής δεσμεύεται ως προς τις μετατοπίσεις x, y, z και ως προς τη διαμήκη στροφή x , το μέσο της άλλης ακραίας διατομής ως προς τις μετατοπίσεις y, z και ως προς τη στροφή x , ενώ για τους υπόλοιπους κόμβους του κορμού και των 2 ακραίων διατομών παγιώνονται οι μετατοπίσεις y, z . Η απόκλιση της τιμής της κρίσιμης ροπής πλευρικού λυγισμού που προκύπτει από το ADINA και της αντίστοιχης τιμής με βάση τον Ευρωκώδικα είναι πολύ μικρή.

Στην περίπτωση κατά την οποία η αστοχία του αμφιέριστου φορέα προέρχεται από τη δημιουργία πλαστικού μηχανισμού κατάρρευσης,

διαπιστώθηκε μέσω των αναλύσεων ότι η παρουσία της κράτυνσης δεν έχει σημαντική επιρροή στη μη γραμμική συμπεριφορά του φορέα και στη μορφή του δρόμου ισορροπίας.

Σχετικά με τις αναλύσεις που έγιναν για φορείς στους οποίους εμφανίζεται πλευρικός λυγισμός, προέκυψαν αρκετά συμπεράσματα. Αρχικά, όπως αναμενόταν, οι δοκοί με μεγαλύτερο μήκος έχουν μικρότερο φορτίο λυγισμού και μεγαλύτερη πλευρική εκτροπή από τις δοκούς μικρού μήκους. Αντίθετα, οι δοκοί μικρού μήκους έχουν γενικά μεγαλύτερη δυσκαμψία και πιο δύσκολα εκτρέπονται πλευρικά. Ο δρόμος ισορροπίας για τους φορείς που υφίστανται πλευρικό λυγισμό, έχει καθοδικό κλάδο για τιμή φορτίου κοντά στην τιμή του φορτίου λυγισμού, γεγονός που αποδεικνύει την αλληλεπίδραση πλευρικού λυγισμού και διαρροής. Η διαφορά του φορτίου στο οποίο εμφανίζεται ο καθοδικός κλάδος του δρόμου ισορροπίας από το κρίσιμο φορτίο λυγισμού οφείλεται στην παρουσία της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας που δίνεται στο φορέα.

Σημαντική επιρροή έχει η θέση εφαρμογής του φορτίου στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού και στη συμπεριφορά του αμφιέριστου φορέα. Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού μειώνεται καθώς το φορτίο μετακινείται από το κάτω εφελκόμενο στο άνω θλιβόμενο πέλμα. Αυτή η μείωση είναι αναμενόμενη, καθώς το φορτίο στο άνω πέλμα δημιουργεί μία ροπή ανατροπής, η οποία ενισχύει την πλευρική εκτροπή της δοκού. Αντίθετα, όταν το φορτίο ασκείται στο κάτω πέλμα της δοκού, δημιουργείται μία ροπή επαναφοράς (ή ευστάθειας), η οποία οδηγεί σε αύξηση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Εξετάσθηκε, επίσης, η επιρροή του μεγέθους της αρχικής γεωμετρικής ατέλειας στο φορτίο αντοχής του φορέα και διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της ατέλειας προκαλεί αστοχία του φορέα για μικρότερη τιμή φορτίου.

Αξίζει, τέλος, να αναφερθεί ότι το είδος της ανάλυσης που πραγματοποιείται είναι καθοριστικό για την κατανόηση της πραγματικής συμπεριφοράς του φορέα. Συγκεκριμένα, στη μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, οι φορείς παρουσιάζουν μεταλυγισμική αντοχή. Αυτό δε συμβαίνει εάν πραγματοποιηθεί μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας, κατά την οποία η αστοχία του φορέα οφείλεται στην αλληλεπίδραση πλευρικού λυγισμού και διαρροής. Είναι, επομένως, απαραίτητο να λαμβάνουμε υπόψη τόσο τη μη γραμμικότητα υλικού όσο και τη μη γραμμικότητα γεωμετρίας, ώστε να εκτιμηθεί η πραγματική συμπεριφορά της κατασκευής και η μέγιστη φέρουσα ικανότητά της.

Η μελέτη της συμπεριφοράς πλευρικά εξασφαλισμένων δοκών διατομής κατηγορίας 4 που εμφανίζουν τοπικό λυγισμό, αποτέλεσε αφορμή για την εξής ενδιαφέρουσα διερεύνηση: πότε ο τοπικός λυγισμός

εμφανίζεται στο μέσο μιας αμφιέριστης δοκού, δηλαδή προκαλείται λόγω της μεγάλης κάμψης στο μέσο, και τότε εμφανίζεται στα άκρα, δηλαδή πρόκειται για διατμητικό λυγισμό. Πραγματοποιώντας ένα σημαντικό αριθμό αναλύσεων, προέκυψε ότι η θέση της εμφάνισης του τοπικού λυγισμού εξαρτάται από το πάχος του κορμού και των πελμάτων. Σε περιπτώσεις στις οποίες ο κορμός έχει αρκετά μικρότερο πάχος σε σχέση με τα πέλματα, προέκυψε τοπικός λυγισμός στα άκρα των αμφιέριστων δοκών λόγω της μεγάλης διάτμησης. Προκειμένου να εμφανισθεί τοπικός λυγισμός λόγω κάμψης στο μέσο της δοκού, συγκεκριμένα στο θλιβόμενο άνω πέλμα και στο θλιβόμενο τμήμα του κορμού, πρέπει να υπάρξει ικανή μείωση του πάχους των πελμάτων. Τα παραπάνω φυσικά εξαρτώνται και από το ύψος και πλάτος της εκάστοτε εξεταζόμενης διατομής. Είναι, δηλαδή, πιθανό σε ίδιου μήκους δοκούς από διατομές ίδιου πλάτους και πάχους κορμού και πελμάτων, αλλά διαφορετικού ύψους, να εμφανιστεί διατμητικός λυγισμός για την υψηλότερη διατομή, ενώ τοπικός λυγισμός λόγω κάμψης για τη μικρότερου ύψους διατομή.

Η μελέτη της αλληλεπίδρασης μορφών αστοχίας οδήγησε στο συμπέρασμα ότι προκαλεί επιτάχυνση της αστοχίας του φορέα, ενώ η επιρροή της γεωμετρικής ατέλειας εξαρτάται από το εκάστοτε εξεταζόμενο μοντέλο.

Όσον αφορά στη μελέτη της συμπεριφοράς αμφιέριστων δοκών με κυκλικές οπές στον κορμό τους, οι αριθμητικές αναλύσεις έδειξαν ότι η παρουσία των οπών δε διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον πλευρικό λυγισμό των δοκών. Η μείωση του κρίσιμου φορτίου πλευρικού λυγισμού των κυψελωτών δοκών είναι μικρή σε σύγκριση με το κρίσιμο φορτίο των συμπαγών δοκών ίσου ύψους και ίδιων διαστάσεων. Η μεταλυγισμική συμπεριφορά των κυψελωτών δοκών παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με την αντίστοιχη συμπεριφορά των συμπαγών δοκών.

Δε συμβαίνει, όμως, το ίδιο στις περιπτώσεις κυψελωτών δοκών με μειωμένο πάχος κορμού. Ο τοπικός λυγισμός στον αποδυναμωμένο, λόγω της παρουσίας των οπών και του μειωμένου πάχους, κορμό εμφανίζεται για αρκετά μικρότερη τιμή φορτίου συγκριτικά με την εμφάνιση τοπικού λυγισμού στην αντίστοιχη λεπτότοιχη συμπαγή δοκό, διαφορά η οποία αυξάνεται μάλιστα όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος των κυκλικών οπών. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο τοπικός λυγισμός ενδέχεται να εμφανίζεται στα άκρα της κυψελωτής δοκού, ενώ για την αντίστοιχη συμπαγή δοκό ίδιων γεωμετρικών χαρακτηριστικών, να εμφανίζεται στο μέσο της αμφιέριστης δοκού, στο θλιβόμενο άνω πέλμα. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς η παρουσία των οπών μειώνει σημαντικά τη

διατμητική αντοχή των κυψελωτών δοκών και τις καθιστά επιρρεπείς στην εμφάνιση διατμητικού λυγισμού. Για το λόγο αυτό προφανώς πάντα επιλέγεται η κατασκευή κυψελωτών δοκών από πρότυπες διατομές που έχουν αυξημένο πάχος κορμού, ώστε να αποφεύγεται η εκδήλωση τοπικού λυγισμού.

Αξίζει, τέλος, να επισημανθεί ότι η παρουσία των οπών εισάγει νέους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας για τις κυψελωτές δοκούς. Ορισμένες από αυτές τις μορφές αστοχίας δε συμβαίνουν στις συμπαγείς δοκούς, καθώς συνιστούν το αποτέλεσμα του διαφορετικού τρόπου με τον οποίο η διατμητική δύναμη μεταφέρεται διαμέσου του διάτρητου κορμού. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της αστοχίας λόγω δημιουργίας μηχανισμού *Vierendeel*, η οποία οφείλεται στην παρουσία μεγάλης διάτμησης. Επίσης, ενδέχεται να αστοχήσουν τα συμπαγή τμήματα του κορμού λόγω εγκάρσιας διάτμησης ή λόγω λυγισμού. Είναι, τέλος, σημαντικό να γίνεται ξεχωριστός έλεγχος στις περιοχές των στηρίξεων και στις θέσεις επιβολής συγκεντρωμένων φορτίων προκειμένου να εξετασθεί η αποφυγή ρυτίδωσης και σύνθλιψης του κορμού στις αντίστοιχες περιοχές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης: "Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα", εκδ. Κλειδάριθμος, 2008
2. Ι. Βάγιας, "Σιδηρές Κατασκευές-Ανάλυση και Διαστασιολόγηση", εκδ.Κλειδάριθμος, 2009
3. Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης: "Σιδηρές Κατασκευές-Παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3", εκδ. Κλειδάριθμος, 2008
4. Αντωνίου Ν. Κουνάδη: "Μη Γραμμική Θεωρία Ελαστικής Ευστάθειας με στοιχεία από τη Θεωρία Καταστροφών", εκδ. Συμεών (Β' Έκδοση – Αθήνα 2004)
5. Ιωάννης Ερμόπουλος: "Σιδηρές και Σύμμικτες Γέφυρες", εκδ.Κλειδάριθμος, 2008
6. Χάρης Γαντές: Σημειώσεις διαλέξεων "Μη γραμμικής συμπεριφοράς μεταλλικών κατασκευών", 2007
7. Γεωργίου Θ. Μιχάλτσου: " Ελαφρές Μεταλλικές Κατασκευές- Θεωρία και Εφαρμογές", εκδ. Συμεών, 2009
8. Κωνσταντίνου Βαρκαράκη: "Επίλυση και σχεδιασμός των γραμμικών φορέων με τη θεωρία πλαστικότητας" (Αθήνα 1988-Ανατύπωση)
9. Λεωνίδας Θ. Σταυρίδης: "Στατική των δομικών φορέων, Μέρος Α", εκδ.Κλειδάριθμος, 2006
10. Klaus-Jürgen Bathe: "Finite Element Procedures", Prentice Hall
11. D. Bushnell: "Computerized Buckling Analysis of shells", Kluwer Academic Publishers
12. ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 3, Κατασκευές Από Χάλυβα, (ENV 1993)
13. Adina Systems 8.5 Online Manuals, ADINA R&D, Inc (February 2008)
14. Άρθρο "Failure Modes for Castellated Beams" by D. Kerdal and D. A. Nethercott/ J. Construct, Steel Research 4
15. Άρθρο "Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings" by the Department of Civil and Structural Engineering, the Hong Kong Polytechnic University/ J. Construct, Steel Research 57
16. <http://www.asdwestok.co.uk>
17. <http://www.grunbauer.nl>

