



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΕΚΚΕΝΤΡΗ ΘΛΙΨΗ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΙΧΑΗΛ Δ. ΜΑΥΡΟΓΙΑΝΝΗ

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Κωνσταντίνος Ε. Καλοχαιρέτης, Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΜΠ

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση ετούτης της διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Κλείνει ένας κύκλος το άνοιγμα του οποίου το επιθυμούσα καθ' όλα τα σχολικά μου χρόνια, οπότε τώρα εκπληρώνεται ένας στόχος ζωής.

Η διπλωματική εργασία είναι η πρώτη μεγάλη πρόκληση του φοιτητή για δημιουργία και παραγωγή γνώσης και, τρόπον τινά, αντικατοπτρίζει τη δουλειά των προηγούμενων ετών. Ως τέτοιο δημιούργημα, δεν είναι κάτι τυποποιημένο, αλλά εξαρτάται και φέρει τη σφραγίδα των ανθρώπων που το διεξάγουν και καθοδηγούν.

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Χάρη Γαντέ για την καθοριστική συμβολή του και την πολύ ενδιαφέρουσα συνεργασία μας σε πολλά επίπεδα. Πάντοτε διαθέσιμος, παρά τις πολλές του υποχρεώσεις, με δεχόταν με χαρά και υπομονή για την επίλυση διαφόρων θεμάτων. Με την ουσιαστική του επιτήρηση δεν επέτρεπε στην πορεία της εργασίας να εκτροχιαστεί αλλά ταυτόχρονα, μου άφηνε το ζωτικό περιθώριο να δημιουργήσω και να πάρω πρωτοβουλίες, δηλώνοντας έτσι την τιμητική του προς εμένα εμπιστοσύνη. Από τις συζητήσεις μας, εκτός από τις χρήσιμες ιδέες για τη συνέχιση της εργασίας, εισέπραττα μία ξεχωριστή φιλοσοφία και στάση απέναντι στα πράγματα.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω τον συνεπιβλέποντα στην εργασία μου και υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ, κ. Κωνσταντίνο Καλοχαιρέτη. Αφιέρωσε πολλές ώρες με χαρακτηριστική ηρεμία και υπομονή σε ένα εύρος θεμάτων που προέκυπταν από την ύφανση της εργασίας και με καθοδήγησε κατά τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Adina.

Ευχαριστώ τον υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ, κ. Κωνσταντίνο Αδαμάκο, ο οποίος μεταξύ των άλλων πολύ χρήσιμων συμβουλών που μου έδωσε κατά καιρούς, μου υπέδειξε μία κίνηση- κλειδί στο πρόγραμμα Adina, που με απάλλαξε από ανυπολόγιστης διάρκειας περιττή προσπάθεια.

Τέλος, ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Γ. Ιωαννίδη και τον Λέκτορα κ. Τ. Αβραάμ για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής εργασίας.

Αφιερώνεται στην οικογένειά μου και στους Προμηθείς Πυρφόρους που συνάντησα στη ζωή μου.

Μιχαήλ Μαυρογιάννης



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΕΚΚΕΝΤΡΗ ΘΛΙΨΗ

Διπλωματική εργασία
του Μιχαήλ Μαυρογιάννη

Επιβλέπων: Χάρης Ι. Γαντές, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ
Συνεπιβλέπων: Κωνσταντίνος Ε. Καλοχαιρέτης, Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΜΠ

Περίληψη

Τα σύνθετα υποστυλώματα συχνά αποτελούν συμφέρουσα κατασκευαστική λύση διότι συνδυάζουν υψηλά μεγέθη δυσκαμψίας και αντοχής με χρήση μικρότερης ποσότητας υλικού, σε σχέση με αντίστοιχα συμπαγή μέλη. Το τίμημα της μη ολόσωμης φύσης τους είναι η ευαισθησία στις διατμητικές παραμορφώσεις, ο κίνδυνος τοπικού λυγισμού και η αλληλεπίδραση μορφών αστοχίας καθώς λειτουργούν ως σύνθετοι υπερστατικοί φορείς. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η συμπεριφορά σύνθετων υποστυλωμάτων με ράβδους δικτύωσης υπό έκκεντρη θλίψη.

Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στα εν λόγω υποστυλώματα με αναφορά των σχέσεων του Ευρωκώδικα 3 (EC3). Ακολουθώντας, παράγεται και προτείνεται ελαστική γραμμή για την περιγραφή της συμπεριφοράς τους, η οποία απουσιάζει από τον EC3.

Στο 2^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η πιο τεκμηριωμένη μέχρι στιγμής πειραματική διερεύνηση σύνθετων υποστυλωμάτων από τη βιβλιογραφία, που διεξήγαγαν οι Klöppel και Ramm. Στα πλαίσια αυτής, δοκιμάζονται υπό έκκεντρη θλίψη 43 υποστυλώματα που ανήκουν σε 11 ευρύτερες κατηγορίες και καταγράφεται το οριακό φορτίο, ο τρόπος αστοχίας και σε ορισμένες περιπτώσεις ο δρόμος ισορροπίας τους.

Για τα υποστυλώματα αυτά, στο 3^ο Κεφάλαιο, κατασκευάζονται προσομοιώματα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA και διεξάγονται αναλύσεις με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA) και ατέλειες σύμφωνα με τον EC3, με σκοπό να αναπαραχθούν οι συνθήκες του πειράματος. Διαπιστώνεται ο κυρίαρχος μηχανισμός αστοχίας κατά τον οποίο λυγίζει το εκάστοτε κρίσιμο φάτνωμα.

Στο 4^ο Κεφάλαιο συγκρίνονται τα οριακά φορτία που προέκυψαν από το πείραμα, τις αριθμητικές αναλύσεις με το Adina και τις σχέσεις του EC3 με και χωρίς επέκταση πλαστικοποίησης στη διατομή του κρίσιμου φατνώματος. Αξιολογούνται οι αποκλίσεις μεταξύ των φορτίων των μεθόδων αυτών, η ποιοτική επιρροή των παραμενουσών τάσεων λόγω συγκολλήσεων και ο ρόλος της φοράς της τοπικής ατέλειας στη μορφή αστοχίας. Εν συνεχεία, για τις περιπτώσεις υποστυλωμάτων με διαθέσιμο δρόμο ισορροπίας, αναζητούνται μεγέθη ατελειών ώστε ο αριθμητικός και ο προτεινόμενος αναλυτικός δρόμος ισορροπίας να προσεγγίσουν τον πειραματικό. Η διαδικασία αυτή αναδεικνύει τις διαφορές μεταξύ των παραπάνω προσεγγίσεων με κυρίαρχο το ρόλο των ατελειών και των παραμενουσών τάσεων.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
Division of Structural Engineering
Laboratory of Steel Structures

NUMERICAL AND ANALYTICAL INVESTIGATION OF BUILT- UP COLUMNS SUBJECTED TO ECCENTRIC COMPRESSIVE LOAD

**Diploma Thesis
of Michail Mavrogiannis**

Supervisor: Dr. Charis Gantes, Associate Professor NTUA
Co- Supervisor: Konstantinos E. Kalochairetis, PhD Candidate

ABSTRACT

Built-up columns often seem to offer an optimum structural solution, since they offer high stiffness and strength combined with less material use. However, by not being homogenous, they are more susceptible to shear deformation and they may suffer from local buckling phenomena or interaction of failure types, as they behave as hyperstatic structures. This thesis examines the behavior of built-up columns connected with lacing bars under eccentric compressive load.

In the 1st chapter the above columns are introduced and the relevant equations of Eurocode 3 (EC3) are presented. Proceeding, a new elastic line, not included in EC3, is derived and proposed in order to delineate such columns' behavior.

In the 2nd chapter the most substantiated experimental research so far, conducted by Klöppel and Ramm, is presented. In this research, 43 columns of 11 general categories are tested and their ultimate load, failure mechanism and, in some cases, their equilibrium path are provided.

In the 3rd chapter, numerical models of all the above columns are built using the finite element program ADINA. Analyses with material and geometry nonlinearity (GMNIA) are conducted taking into account EC3- prescribed imperfections, in order for the experimental conditions to be reproduced. The prominent failure mechanism is observed, according to which the eventual critical panel buckles to failure.

The 4th chapter contains a comparison between the ultimate loading values that are derived from the experiment, the ADINA numerical analyses and the EC3 equations, with or without consideration of full-section failure. An evaluation of the ultimate load deviations, the qualitative effect of the residual stresses and the relationship between the local imperfection's orientation and the failure type takes place. Additionally, as regards the columns with available equilibrium path, a quantitative research on imperfections is conducted so that both the numerical and the analytical paths coincide with the experimental ones. The latter process points out the differences between the above views on the column behavior and the utmost importance of imperfections and residual stresses.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στα Σύνθετα Υποστυλώματα	1
1.2 Κανονισμοί	4
1.2.1 Διαχρονικές Προσεγγίσεις και Κανονισμοί	4
1.2.2 Γεωμετρικές Ιδιότητες	5
1.2.3 Δυσκαμψίες	5
1.2.4 Κρίσιμα Φορτία Λυγισμού	7
1.2.5 Οριακά Φορτία και Ατέλειες	7
1.3 Αναλυτική Προσέγγιση του Δρόμου Ισορροπίας	8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Περιγραφή Πειραμάτων από τη βιβλιογραφία

2.1 Περιγραφή Πειραματικών Διατάξεων	13
2.2 Πραγματοποίηση Πειραμάτων	17
2.3 Χρήση των Πειραμάτων στην παρούσα Διπλωματική εργασία	21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Προσομοίωση και Αναλύσεις Υποστυλωμάτων

3.1 Προσομοίωση Υποστυλωμάτων	23
3.1.1 Προσομοίωση των κύριων μελών (πελμάτων)	23
3.1.2 Προσομοίωση των ράβδων δικτύωσης	25
3.1.3 Συνοριακές Συνθήκες και Προσομοίωση των άκρων του Υποστυλώματος	26
3.1.4 Υλικά	27
3.2 Αναλύσεις πειραμάτων	29
3.3 Σειρά 1AoR	30
3.3.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)	30
3.3.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)	32
3.3.2.1 Υποστύλωμα #3, (εκκ. 4.20cm)	32
3.3.2.2 Υποστύλωμα #1, (εκκ. 0.54cm)	38
3.3.2.3 Υποστύλωμα #2, (εκκ. 1.63cm)	38
3.3.2.4 Υποστύλωμα #4, (εκκ. 8.40cm)	39
3.4 Σειρά 1AmR	39
3.4.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)	39
3.4.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)	41
3.4.2.1 Υποστύλωμα #3, (εκκ. 4.15cm)	41
3.4.2.2 Υποστύλωμα #1, (εκκ. 0.50cm)	46
3.4.2.3 Υποστύλωμα #2, (εκκ. 1.50cm)	47
3.4.2.4 Υποστύλωμα #4, (εκκ. 8.00cm)	48
3.5 Σειρά 1AoRG	48
3.5.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)	48
3.5.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)	48
3.5.2.1 Υποστύλωμα #2, (εκκ. 4.00cm)	48

3.5.2.2 Υποστύλωμα #1, (εκκ. 1.63cm)	54
3.5.2.3 Υποστύλωμα #3, (εκκ. 8.20cm)	54
3.6 Σειρά 1BoR	55
3.6.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)	55
3.6.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)	56
3.6.2.1 Υποστύλωμα #1, (εκκ. 0.50cm)	56
3.6.2.2 Υποστύλωμα #2, (εκκ. 1.50cm)	61
3.6.2.3 Υποστύλωμα #3, (εκκ. 4.00cm)	61
3.6.2.4 Υποστύλωμα #4, (εκκ. 8.00cm)	62
3.7 Σειρά 1BmR	62
3.7.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)	62
3.7.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)	64
3.7.2.1 Υποστύλωμα #1, (εκκ. 0.50cm)	64
3.7.2.2 Υποστύλωμα #2, (εκκ. 1.63cm)	69
3.7.2.3 Υποστύλωμα #3, (εκκ. 4.00cm)	69
3.7.2.4 Υποστύλωμα #4, (εκκ. 8.00cm)	70
3.8 Σειρά 2AoR	70
3.8.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)	70
3.8.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)	72
3.8.2.1 Υποστύλωμα #2, (εκκ. 1.80cm)	72
3.8.2.2 Υποστύλωμα #1, (εκκ. 0.50cm)	78
3.8.2.3 Υποστύλωμα #3, (εκκ. 4.15cm)	78
3.8.2.4 Υποστύλωμα #4, (εκκ. 8.00cm)	79
3.9 Σειρά 2AmR	80
3.9.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)	80
3.9.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)	81
3.9.2.1 Υποστύλωμα #2, (εκκ. 1.85cm)	81
3.9.2.2 Υποστύλωμα #1, (εκκ. 0.46cm)	86
3.9.2.3 Υποστύλωμα #3, (εκκ. 4.00cm)	87
3.9.2.4 Υποστύλωμα #4, (εκκ. 8.00cm)	87
3.10 Σειρά 2BoR	88
3.10.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)	88
3.10.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)	89
3.10.2.1 Υποστύλωμα #4, (εκκ. 8.00cm)	89
3.10.2.2 Υποστύλωμα #1, (εκκ. 0.50cm)	94
3.10.2.3 Υποστύλωμα #2, (εκκ. 1.60cm)	95
3.10.2.4 Υποστύλωμα #3, (εκκ. 4.00cm)	95
3.11 Σειρά 2BmR	95
3.11.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)	95
3.11.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)	97
3.11.2.1 Υποστύλωμα #4, (εκκ. 8.00cm)	97
3.11.2.2 Υποστύλωμα #1, (εκκ. 0.60cm)	102
3.11.2.3 Υποστύλωμα #2, (εκκ. 1.73cm)	102
3.11.2.4 Υποστύλωμα #3, (εκκ. 4.00cm)	103
3.12 Σειρά 3AoR	103
3.12.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)	103

3.12.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)	104
3.12.2.1 Υποστύλωμα #4, (εκκ. 8.00cm)	104
3.12.2.2 Υποστύλωμα #1, (εκκ. 0.50cm)	110
3.12.2.3 Υποστύλωμα #2, (εκκ. 1.60cm)	110
3.12.2.4 Υποστύλωμα #4, (εκκ. 4.15cm)	110
3.13 Σειρά 3BoR	111
3.13.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)	111
3.13.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)	112
3.13.2.1 Υποστύλωμα #4, (εκκ. 8.00cm)	112
3.13.2.2 Υποστύλωμα #1, (εκκ. 0.50cm)	118
3.13.2.3 Υποστύλωμα #2, (εκκ. 1.60cm)	119
3.13.2.4 Υποστύλωμα #3, (εκκ. 4.00cm)	119

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Συγκρίσεις Αποτελεσμάτων και Διερεύνηση Ατελειών

4.1 Συγκρίσεις και επεξεργασία αποτελεσμάτων	121
4.1.1 Φορτία αστοχίας πειράματος και ανάλυσης GMNIA	121
4.1.2 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με τον EC3	124
4.1.3 Υπολογισμός φορτίων αστοχίας τροποποιώντας τον EC3	126
4.1.4 Επιρροή φοράς της τοπικής ατέλειας	131
4.1.4.1 Υποστύλωμα #3 από τη σειρά 1AoR	132
4.1.4.2 Υποστυλώματα της σειράς 1BoR	133
4.1.4.3 Υποστύλωμα #1 από τη σειρά 2BoR	133
4.1.5 Επιρροή αριθμού συγκολλήσεων	136
4.2 Πρόταση νέων μεγεθών ατελειών για εναρμονισμό με το πείραμα	138
4.2.1 Πειραματικοί δρόμοι ισορροπίας	138
4.2.2 Συσχέτιση δρόμων ισορροπίας και αναλύσεων στο υποστύλωμα #3, 1AoR	138
4.2.2.1 Παραλληλία μεταξύ ελαστικών κλάδων και ίσα οριακά Φορτία	138
4.2.2.2 Τοπική ατέλεια EC3 και ίσα οριακά φορτία	142
4.2.2.3 Εφαρμογή των 2 μεθόδων επιλογής ατελειών στα υπόλοιπα υποστυλώματα της σειράς 1AoR	143
4.2.3 Συσχέτιση Δρόμων Ισορροπίας και Αναλύσεων στο υποστύλωμα #2, 1AoRG	144
4.2.3.1 Παραλληλία μεταξύ ελαστικών κλάδων και ίσα οριακά Φορτία	145
4.2.3.2 Τοπική ατέλεια EC3 και ίσα οριακά φορτία	146
4.2.3.3 Εφαρμογή των 2 μεθόδων επιλογής ατελειών στα υπόλοιπα υποστυλώματα της σειράς 1AoRG	146
4.2.4 Συσχέτιση Δρόμων Ισορροπίας και Αναλύσεων στο υποστύλωμα #2, 2AoR	147
4.2.4.1 Παραλληλία μεταξύ ελαστικών κλάδων και ίσα οριακά Φορτία	148
4.2.4.2 Τοπική ατέλεια Κανονισμού και ίσα οριακά φορτία	149
4.2.4.3 Εφαρμογή των 2 μεθόδων επιλογής ατελειών στα	149

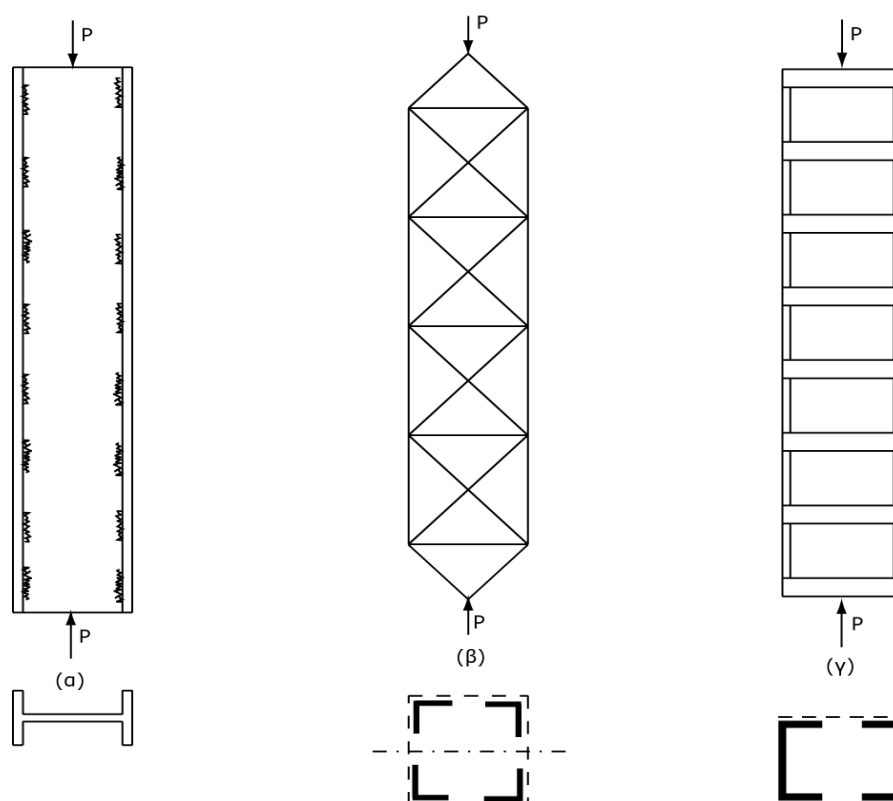
υπόλοιπα υποστυλώματα της σειράς 1AoRG	
4.2.5 Συσχέτιση Δρόμων Ισορροπίας και Αναλύσεων στο υποστυλώμα #2, 2AmR	151
4.2.5.1 Παραλληλία μεταξύ ελαστικών κλάδων	151
4.2.5.2 Εφαρμογή της μεθόδου M1 επιλογής στα υπόλοιπα υποστυλώματα της σειράς 2AmR	152
4.3 Σύγκριση δρόμου ισορροπίας Adina και αναλυτικής μεθόδου (Ενότητας 1.3)	153
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα	
5.1 Οριακά φορτία	155
5.2 Επιρροή φοράς τοπικής ατέλειας	155
5.3 Δρόμοι Ισορροπίας	157
5.4 Συγκολλήσεις και % απόκλιση πειράματος – Adina (EC3)	160
5.5 Πρόταση ελαστικής γραμμής για σύνθετα υποστυλώματα	161
Βιβλιογραφία	165
Παράρτημα	166

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στα Σύνθετα Υποστυλώματα

Η μόρφωση σύνθετων υποστυλωμάτων προκύπτει ως αναγκαιότητα από ειδικές απαιτήσεις της μελέτης που καθιστούν ανεπαρκή ή αντιοικονομική τη χρήση τυποποιημένων διατομών του εμπορίου. Οι διατομές αυτές εμφανίζουν σημαντική διαφορά δυσκαμψίας και αντοχής μεταξύ ισχυρού και ασθενούς άξονα. Συνεπώς, δεν είναι ικανοποιητικές για το ρόλο υποστυλωμάτων που δέχονται ιδιαίτερα αυξημένο αξονικό φορτίο και ροπές μικρές ή σχεδόν ίσες ως προς τους δύο άξονες.



Σχ 1.1 Συμπαγής συγκολλητή διατομή, σύνθετο υποστυλώμα με 4 πέλματα και χιαστί ράβδους δικτύωσης και σύνθετο υποστυλώμα με λεπίδες σύνδεσης

Τέτοιες φορτιστικές απαιτήσεις οδηγούν στη χρήση σύνθετων υποστυλωμάτων τα οποία είναι είτε ολόσωμα, χωρίς ανοίγματα είτε πολυμελή. Τα τελευταία αποτελούνται από δύο ή περισσότερες πρότυπες διατομές τύπου I, H, U, L κ.ά.

συνδεδεμένες μεταξύ τους με ράβδους δικτύωσης, λεπίδες σύνδεσης ή διάτρητες πλάκες, Σχ. 1.1 [8].

Έτσι επιτυγχάνεται αποδοτική αύξηση της διατομής, καθώς μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία κατά τους δύο κύριους άξονες δε συνεπάγεται αρκετά μεγαλύτερο ίδιο βάρος. Επίσης, οι τιμές δυσκαμψίας και αντοχής μεταξύ των δύο αξόνων εξισορροπούνται. Σύνθετα υποστυλώματα προτιμώνται σε έργα όπως γέφυρες, αεροπορικά και ναυπηγικά υπόστεγα με γεφύρωση μεγάλων ανοιγμάτων ή σε βιομηχανικά κτίρια όπου γίνεται χρήση γερανογεφυρών.



Σχ1.2 Σύνθετα υποστυλώματα με χιαστί ράβδους δικτύωσης στην Plum Brook Bridge, NY και υποστυλώματα με δικτύωση τύπου N στη Wayne Street Viaduct, PA

Το τμήμα της μη ολόσωμης φύσης ενός σύνθετου υποστυλώματος είναι η υπολογίσιμη επιρροή των διατμητικών παραμορφώσεων, με άμεσο επακόλουθο την πτώση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού.

Το έναυσμα για τη θεωρητική και πειραματική διερεύνηση του ρόλου της διάτμησης έδωσαν πολυάριθμες αστοχίες θλιβόμενων σύνθετων υποστυλωμάτων εδώ και έναν αιώνα περίπου.

Ένα άλλο πιθανό ενδεχόμενο αστοχίας είναι ο τοπικός λυγισμός των πελμάτων, Σχ.1.5 [8], προτού εκδηλωθεί αστοχία λόγω καθολικού λυγισμού.



Σχ1.3 Σύνθετα υποστυλώματα με χιαστί ράβδους και ορθοστάτες στο Chatham Historic Dockyard στο Kent της Αγγλίας



Σχ1.4 Σύνθετα υποστυλώματα με κύρια μέλη διατομής Η, με χιαστί και ορθοστάτες



Σχ. 1.5 Τοπικός λυγισμός σε κύρια μέλη διατομής U , σύνθετου υποστυλώματος με λεπίδες σύνδεσης

1.2 Κανονισμοί

1.2.1 Αναλυτικές Προσεγγίσεις και Κανονισμοί

Σε αντίθεση προς τα μέλη συμπαγούς διατομής, στα σύνθετα υποστυλώματα τα έργα των διατμητικών παραμορφώσεων είναι σημαντικά και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό, καθώς επιφέρουν πτώση της δυσκαμψίας αλλά και της αντοχής. Ο Engesser [9] ήταν ο πρώτος που επιχείρησε να μελετήσει την επιρροή των διατμητικών παραμορφώσεων. Οι Timoshenko και Gere [9] αναφέρουν αυτή την προσέγγιση, η οποία έτυχε αποδοχής από πλήθος άλλων μελετητών, όπως οι Nanni [9], Ziegler [9] και Bazant [9] και επίσης χρησιμοποιείται από τον ισχύοντα κατασκευαστικό κανονισμό, τον Ευρωκώδικα 3. Ακολούθησαν χρονικά και άλλες διερευνήσεις της διατμητικής επιρροής σε προβλήματα εύρεσης του κρίσιμου ελαστικού φορτίου λυγισμού μελών με διαφόρων τύπων συντοριακές συνθήκες.

Οι Banerjee [9] και Williams [9] εξήγησαν τις περιπτώσεις συντοριακών συνθηκών όπου η μέθοδος Engesser [9] παρουσιάζει αδυναμίες. Στη συνέχεια ο Gjelsvic [9] εισήγαγε μία μέθοδο για τον υπολογισμό της επιρροής των ακραίων πλακών στήριξης στη συμπεριφορά μελών ευαίσθητων σε διατμητικές παραμορφώσεις. Η μέθοδος αυτή επεκτάθηκε από τον Paul [9] και επιβεβαιώθηκε από πειραματικά αποτελέσματα. Οι Wang et al [9] με τη σειρά τους πρότειναν τη χρήση ενός μητρώου 8×8 για την ακριβή γνώση της ευστάθειας ενός μέλους με ακραία αλλά και ενδιάμεσα φορτία. Αργότερα, οι Hashemi et al [9] διαπίστωσαν ότι η μέθοδος Engesser [9] δίνει αποτελέσματα υπέρ της ασφαλείας. Ο Razdolsky [9] προκειμένου να μελετήσει το λυγισμό σύνθετων υποστυλωμάτων τα αντιμετώπισε ως στατικά αόριστους φορείς. Τέλος, οι Koiter [9], Bazant [9], Cedolin [9], Temple [9] και Elmahby [9] ασχολήθηκαν με την αλληλεπίδραση καθολικού και τοπικού λυγισμού.

Στον ευρωπαϊκό χώρο, η μελέτη και η υλοποίηση χαλύβδινων κατασκευών διέπεται από ένα σύνολο κανονισμών και προδιαγραφών, των ευρωπαϊκών προτύπων EN (Euronorm). Προς το παρόν, τα κείμενα αυτά δεν έχουν οριστικοποιηθεί συνολικά οπότε συνιστούν δοκιμαστικά πρότυπα ENV. Την κυρίως μελέτη πραγματεύεται η σειρά του Ευρωκώδικα 3, EN 1993 [5]. Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται αποτελέσματα υπολογισμών σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3, (EC3), για τα θλιβόμενα μέλη πολυμελούς διατομής.

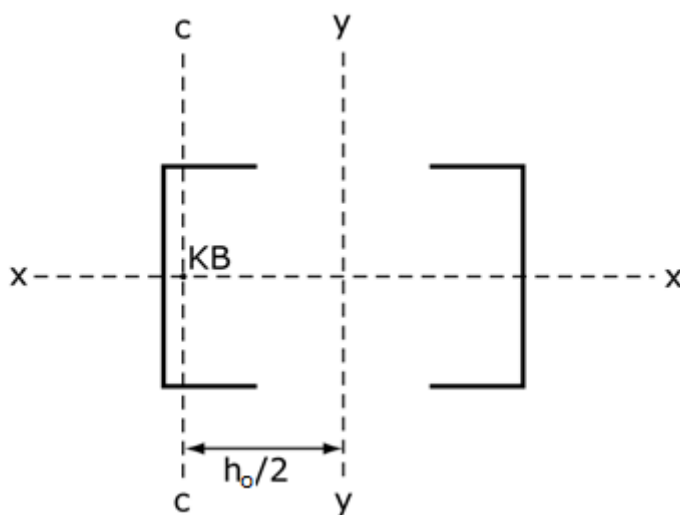
Στα επόμενα κεφάλαια χρησιμοποιούνται αποτελέσματα θεωρητικών υπολογισμών για διάφορα είδη φόρτισης των σύνθετων υποστυλωμάτων. Προτού γίνει αναφορά σε συγκεκριμένους μαθηματικούς τύπους, θα πρέπει να οριστούν τα γεωμετρικά στοιχεία ενός σύνθετου υποστυλώματος.

1.2.2 Γεωμετρικές Ιδιότητες

Ένα σύνθετο υποστυλόμετρο έχει εμβαδό A , ίσο με το διπλάσιο του εμβαδού κάθε πέλματος (κύριου μέλους) και ροπή αδρανείας περί τον ισχυρό άξονα y , I_y [2]:

$$I_y = 2I_{ch,c} + h_0^2 \frac{A}{4} \quad (1.1)$$

όπου $I_{ch,c}$ είναι η ασθενής ροπή αδρανείας καθενός κύριου πέλματος και h_0 είναι ο μοχλοβραχίονας των πελμάτων, δηλαδή η απόσταση μεταξύ των κέντρων βάρους τους. Ο EC3 παραλείπει τον όρο $2I_{ch,c}$, όμως οι θεωρητικοί υπολογισμοί που γίνονται στην παρούσα εργασία τον λαμβάνουν υπόψη. Με E συμβολίζεται το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, παντού ίσο με 21GPa.



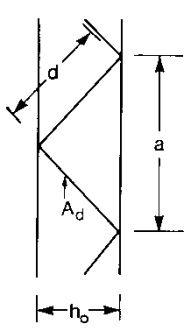
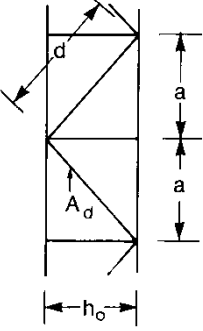
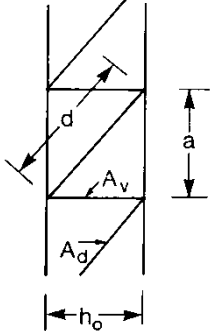
Σχ. 1.6 Σύνθετη Διατομή

1.2.3 Δυσκαμψίες

Σύμφωνα με τον EC3, Σχ. 1.7, ένα σύνθετο υποστυλόμετρο με ράβδους δικτύωσης χωρίς ορθοστάτες, όπως στο πείραμα, έχει δυσκαμψία:

$$S_v = "GA_s" = \frac{EA_d ah_0^2}{d^3} \quad (1.2)$$

Όπου A_d το εμβαδόν των διαγωνίων ράβδων που υπάρχουν σε μία διατομή (δηλαδή δύο ράβδων), a το ύψος φατνώματος, d το μήκος της διαγώνιας ράβδου.

Σύστημα			
S_v	$\frac{nEA_d ah_0^2}{2d^3}$	$\frac{nEA_d ah_0^2}{d^3}$	$\frac{nEA_d ah_0^2}{d^3 \left[1 + \frac{A_d h_0^3}{A_v d^3} \right]}$
n είναι ο αριθμός των επιπέδων των δικτυωμάτων			
A_d και A_v αναφέρονται στην επιφάνεια διατομής των ράβδων δικτύωσης			

Σχ. 1.7 [5] Δυστημσία σύνθετων υποστυλωμάτων με ράβδους δικτύωσης διαφορετικής διάταξης

Ένα σύνθετο υποστυλωμα με ράβδους δικτύωσης κοινού σημείο συμβολής και ορθοστάτες έχει δυστημσία σύμφωνα με τον EC3:

$$S_v = "GA_s" = \frac{2EA_d ah_0^2}{d^3} \quad (1.3)$$

όπου a το ύψος φατνώματος για τη συγκεκριμένη δικτύωση.

Οι σχέσεις (1.2) και (1.3) αποτελούν προσέγγιση και έχουν εξαχθεί θεωρώντας μεμονωμένο φάτνωμα υποστυλώματος με τις διαγώνιες ράβδους, με ή χωρίς ορθοστάτες ως ισοστατικό φορέα, δηλαδή με αρθρώσεις στα άκρα όλων των ράβδων. Αυτό καταλύει τη συνέχεια ροπής που έχουν τα πέλματα καθ' ύψος, τα οποία στα τμήματα που αποτέμνονται στο φάτνωμα θεωρούνται άκαμπτα, ώστε η διατμητική ενδοτικότητα να προκύπτει μόνο από τις παραμορφώσεις των ενδιάμεσων ράβδων. Έτσι άλλωστε δουλεύουν και οι διατομές διπλού ταυ με τις οποίες μπορούν να προσομοιαστούν οι διατομές του σύνθετου υποστυλώματος.

Ένα πραγματικό υποστυλωμα όταν έχει ορθοστάτες είναι πιο δύσκαμπτο διατμητικά από ένα χωρίς ορθοστάτες. Από τις σχέσεις (1.3) και (1.4) όμως, προκύπτει πως τα δύο υποστυλώματα έχουν την ίδια δυστημσία, καθώς το δεύτερο έχει μεν το συντελεστή 2, όμως το φάτνωμά του, a , είναι το μισό του πρώτου.

Για να μπορεί να εφαρμοστεί η σχέση της δυσστησίας, θα πρέπει το υποστυλωμα να διαθέτει τουλάχιστον 4 φατνώματα ώστε το κάθε ένα να θεωρείται με καλή προσέγγιση στοιχειώδης δομική μονάδα και να τείνει να παίζει το ρόλο μόλις διατομής.

Εάν τεθούν συνοριακές συνθήκες προβόλου στο υποστυλωμα, η οριζόντια δυσκαμψία του στο ελεύθερο άκρο, λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή των διατμητικών παραμορφώσεων, είναι σύμφωνα με τη στατική:

$$K_s = \frac{\frac{3EI_y}{L^3} \frac{GA_s}{L}}{\frac{3EI_y}{L^3} + \frac{GA_s}{L}} \quad (1.4)$$

Η δυστένεια του υποστυλώματος είναι:

$$K_N = \frac{EA}{L} \quad (1.5)$$

1.2.4 Κρίσιμα Φορτία Λυγισμού

Σύμφωνα με τον EC3, το κρίσιμο ελαστικό φορτίο για δοκό με αμελητέες διατμητικές παραμορφώσεις λαμβάνεται από τον τύπο του Euler:

$$P_e = \frac{\pi^2 EI_y}{L^2} \quad (1.6)$$

Ενώ αν ληφθούν υπόψη οι διατμητικές παραμορφώσεις [4] είναι:

$$P_{cr} = \frac{P_e}{1 + \frac{P_e}{GA_s}} \quad (1.7)$$

Το κρίσιμο φορτίο τοπικού λυγισμού πέλματος του σύνθετου υποστυλώματος είναι σύμφωνα με τον EC3:

$$P_L = \frac{\pi^2 EI_{ch,c}}{a^2} \quad (1.8)$$

όπου a το μήκος φατνώματος και $I_{ch,c}$ η ροπή αδρανείας του πέλματος ως προς τον ασθενή του άξονα.

1.2.5 Οριακά Φορτία και ατέλειες

Το φορτίο διαρροής πρώτης ίνας στο κρίσιμο φάτνωμα υποστυλώματος δίνεται από τον τύπο του EC3:

$$\frac{P}{2} + \frac{P(e_0 + e)}{h_0 \left(1 - \frac{P}{P_{cr}}\right)} = x_{ch} \frac{A}{2} f_y \quad (1.9)$$

όπου e_0 είναι το πλάτος της καθολικής ατέλειας, e είναι η φορτιστική εκκεντρότητα, x_{ch} ο μειωτικός συντελεστής του EC3 για την πρώτη διαρροή ίνας

καμπτόμενης δοκού με καθολική ατέλεια που περιλαμβάνει γεωμετρική ατέλεια και ενσωματώνει επίσης παραμένουσες τάσεις λόγω κατασκευής του μέλους. Τέλος, όπου f_y είναι η τάση διαρροής του χάλυβα της κατασκευής.

Επομένως, η τοπική ατέλεια του πέλματος του υποστυλώματος αντιπροσωπεύει την επιρροή γεωμετρικής ατέλειας και παραμενουσών τάσεων εκ κατασκευής και δίνεται από τον EC3 ως εξής:

$$e_{ch,0} = W_{ch,el,c} a \frac{(\bar{\lambda}_{ch,c} - 0.2)}{\frac{A}{2}} \quad (1.10)$$

όπου $W_{ch,el,c}$ η ελαστική μέγιστη ροπή αντίστασης της διατομής του πέλματος κατά τον ασθενή του άξονα, a συντελεστής ατελειών και $\bar{\lambda}_{ch,c}$ η ανηγμένη λυγνρότητα του κρίσιμου μήκους του φατνώματος κατά τον ασθενή του άξονα.

Η καθολική ατέλεια προδιαγράφεται από τον EC3 ως το πεντακοσίοστο του μήκους του μέλους:

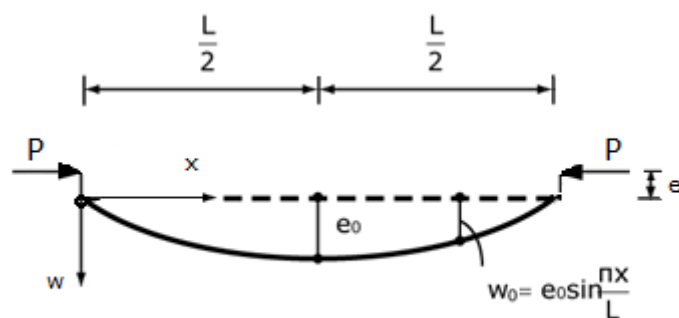
$$e_0 = \frac{L}{500} \quad (1.11)$$

Εάν στην Εξ. 1.9 αντικατασταθεί ο όρος $x_{ch} A f_y$ από την πλήρη θλιπτική αντοχή (με επέκταση πλαστικοποίησης στη διατομή) ενός πέλματος με μήκος όσο το μήκος φατνώματος, με αμφιέριστη στήριξη και ατέλεια όσο η προδιαγραφόμενη από τον EC3 τοπική, $P_{ch,R}^{full}$, προκύπτει μία καλύτερη προσέγγιση του φορτίου κατάρρευσης [10], Εξ. 1.10:

$$\frac{P}{2} + \frac{P(e_0 + e)}{h_0 \left(1 - \frac{P}{P_{cr}}\right)} = P_{ch,R}^{full} \quad (1.12)$$

1.3 Αναλυτική Προσέγγιση του δρόμου Ισορροπίας

Για το μηχανικό είναι πολύ σημαντικό να μπορεί να προβλέπει όσο περισσότερα στοιχεία του δρόμου ισορροπίας μπορεί με όσο το δυνατόν λιγότερες υπολογιστικές απαιτήσεις, ιδανικά χωρίς τη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Ειδικότερα, έχει μεγάλη σημασία η πρόβλεψη του φορτίου αστοχίας και οι μετακινήσεις σε κατάσταση λειτουργικότητας. Στον EC3 δεν υπάρχει κάποια σχέση που να περιγράφει την ελαστική γραμμή σύνθετου υποστυλώματος. Έτσι, προς την κατεύθυνση αυτή, εξετάζεται η αναλυτική πλευρά της συμπεριφοράς σύνθετων αμφιαρθρωτών υποστυλωμάτων με ράβδους δικτύωσης.



Σχήμα 1.8 Κεντροβαρική γραμμή αμφιέρειστου υποστυλώματος με καθολική ατέλεια που υπόκειται σε έκκεντρη θλίψη

Θεωρείται σύνθετο αμφιέρειστο υποστύλωμα μήκους L που φορτίζεται έκκεντρα κατά e από αξονική δύναμη P . Φέρει καθολική ατέλεια ημιτονοειδούς μορφής και πλάτους e_0 . Το υποστύλωμα παρουσιάζει ελαστική γραμμή:

$$w_t = w_0 + w \quad (1.13)$$

Όπου w_0 είναι η καθολική ατέλεια ημιτονοειδούς σχήματος και πλάτους e_0 με:

$$w_0 = e_0 \sin \left(\frac{n\pi x}{L} \right) \quad (1.14)$$

και w είναι η παραμόρφωση εκτός της ατέλειας, η οποία έχει καμπτική και διατμητική συνιστώσα:

$$w = w_b + w_s \quad (1.15)$$

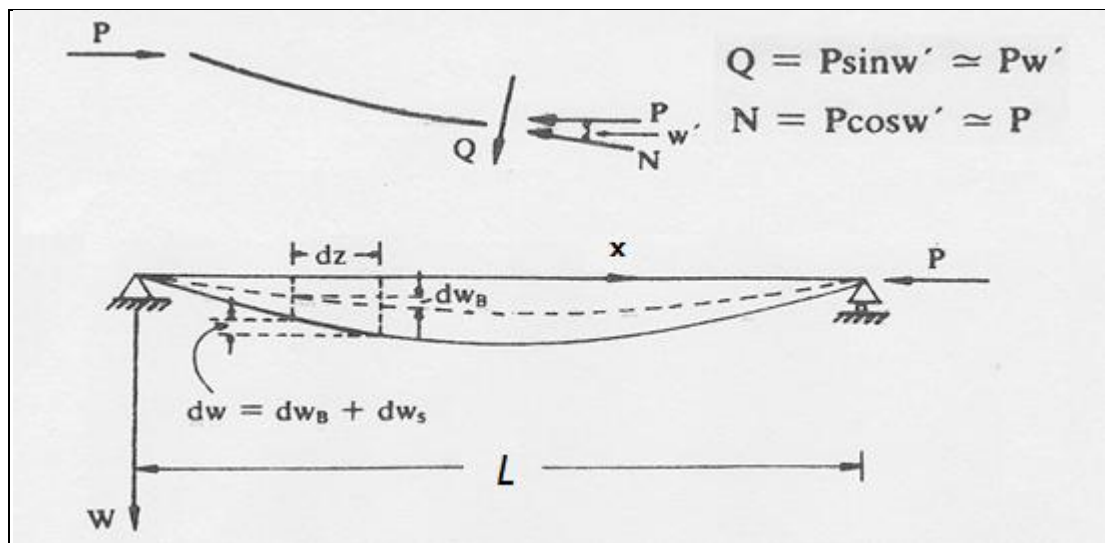
Αν η εξίσωση (1.15) παραγωγιστεί δύο φορές ως προς τη μετατόπιση x προκύπτει:

$$\ddot{w} = \ddot{w}_b + \ddot{w}_s \quad (1.16)$$

Σε μία καμπτόμενη δοκό ισχύει ότι:

$$M(x) = -EI_y \ddot{w}_b \quad (1.17)$$

όπου $M(x)$ η ροπή κάμψης ως συνάρτηση της θέσης της διατομής, E το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα και I_y η ροπή αδρανείας. Στην προκειμένη περίπτωση, I_y είναι η ισχυρή ροπή αδρανείας του σύνθετου υποστυλώματος από την Εξ. 1.1.



Σχήμα 1.9 Τέμνουσα και Αξονική προκύπτουσες από ισορροπία και ελαστική γραμμή με συνιστώσα λόγω κάμψης και διάτμησης

Από την ισορροπία προκύπτει ότι:

$$M(x) = Pw_t + Pe \quad (1.18)$$

κι επομένως από το συνδυασμό των (1.17) και (1.18):

$$\ddot{w}_b = -\frac{Pw_t + Pe}{EI_y} \quad (1.19)$$

Αν Q είναι η τέμνουσα δύναμη και GA_s η ισοδύναμη δυστμησία, τότε από τη μηχανική και εν συνεχεία από την ισορροπία προκύπτει:

$$\ddot{w}_s = \frac{\dot{Q}}{GA_s} = \frac{P\ddot{w}_t}{GA_s} \quad (1.20)$$

Από το συνδυασμό των σχέσεων (1.13), (1.14), (1.16), (1.19) και (1.20) δημιουργείται η διαφορική εξίσωση προς λύση:

$$\ddot{w} + k^2 w = Z \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) - k^2 e \quad (1.21)$$

Όπου k^2 είναι:

$$\frac{P}{EI_y \left(1 - \frac{P}{GA_s}\right)} \quad (1.22)$$

Και Z είναι ο όρος:

$$-\left(\frac{P}{GA_s} e_0 \frac{\pi^2}{L^2} + \frac{P}{EI_y} e_0\right) / \left(1 - \frac{P}{GA_s}\right) \quad (1.23)$$

Ακολουθώντας τη θεωρία επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων με την εύρεση της λύσης της ομογενούς και την επιβολή των συνοριακών συνθηκών $w(0)=w(L)=0$, ευρίσκεται ότι η ελαστική γραμμή του σύνθετου υποστυλώματος (χωρίς την παραμόρφωση της ατέλειας) είναι:

$$w = \frac{e(1 - \cos kL)}{\sin kL} \sin kx + e \cos kx + \frac{Z}{k^2 - \left(\frac{\pi}{L}\right)^2} \sin \frac{\pi x}{L} - e \quad (1.24)$$

Και συνεπώς:

$$w_t = w + w_0 = \frac{e(1 - \cos kL)}{\sin kL} \sin kx + e \cos kx + \frac{Z}{k^2 - \left(\frac{\pi}{L}\right)^2} \sin \frac{\pi x}{L} - e + e_0 \sin \left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (1.25)$$

Σημείωση: Η ελαστική γραμμή (1.25) δεν περιέχει βέλος τοπικής ατέλειας. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση βελών στο μέσο ύψος, στα υποστυλώματα των σειρών 1AoR, 1AoRG, 2AoR και 2AoRG, στα οποία στο μέσο ύψος η τοπική ατέλεια έχει μέγεθος μηδέν, διότι εκεί υπάρχει σημείο εξασφάλισης λόγω του ορθοστάτη ή συμβολής ράβδων. Εν γένει μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα σημεία μηδενικής τοπικής παραμόρφωσης καθ' ύψος.

Κεφάλαιο 2

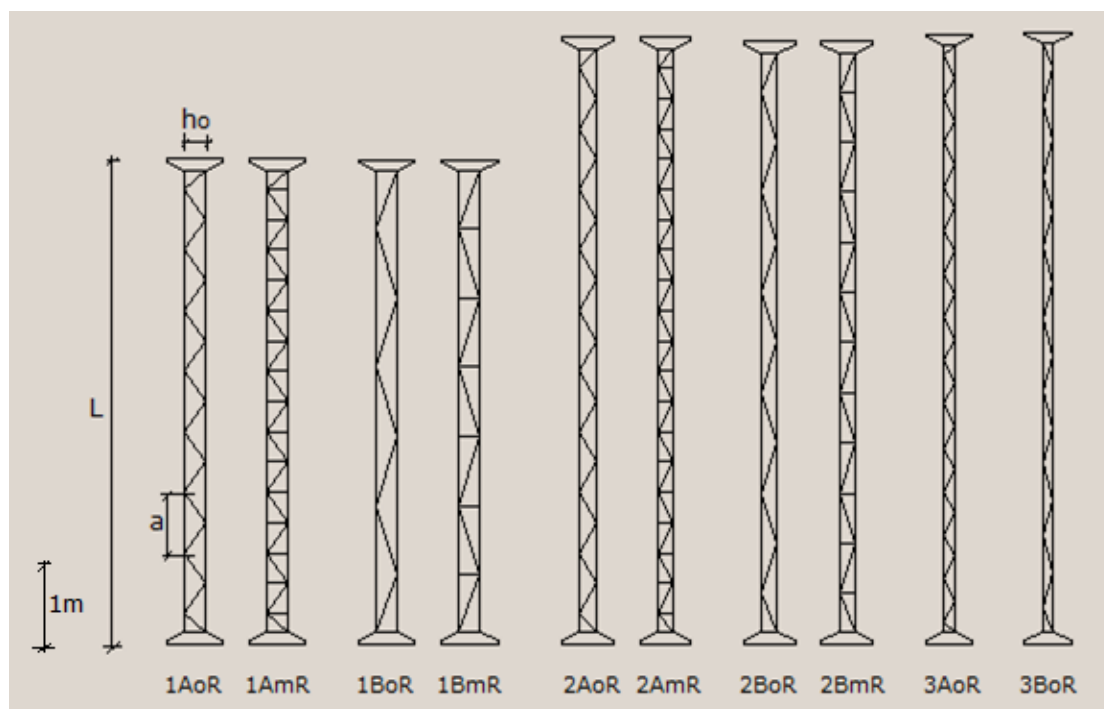
Περιγραφή Πειραμάτων από τη βιβλιογραφία

2.1 Περιγραφή πειραματικών διατάξεων

Η απουσία πειραματικών προσπαθειών σχετικών με σύνθετα υποστυλώματα με ράβδους δικτύωσης είναι φανερή στη βιβλιογραφία. Η πειραματική διερεύνηση των Klöppel K. και Ramm W. [7] είναι η πιο πρόσφατη και επαρκώς τεκμηριωμένη. Ασχολείται με τη συμπεριφορά σύνθετων αμφιαρθρωτών υποστυλωμάτων με ράβδους δικτύωσης υπό στατική θλιπτική φόρτιση με εκκεντρότητα στα δυο άκρα, προκαλούσα παραμόρφωση μονής καμπυλότητας. Για κάθε υποστυλώμα που περιλαμβάνεται στην πειραματική μελέτη δίνονται η τάση διαρροής του χάλυβα και το φορτίο αστοχίας του. Για ορισμένα υποστυλώματα διατίθεται και ο δρόμος ισορροπίας βασισμένος σε μετρήσεις μετατόπισης στο μέσο του ύψους.

Τα υποστυλώματα συντίθενται από δύο διατομές τύπου UPN 140 [3] (πέλματα) τοποθετημένες σε κεντροβαρική απόσταση 12.5cm έως 24.0cm, συνδεδεμένες μεταξύ τους με ράβδους δικτύωσης διατομής L 20.3 ή 25.4. Οι ράβδοι δικτύωσης έχουν συγκολληθεί επί των πελμάτων. Τα δοκίμια διαθέτουν από 4 μέχρι 20 φατνώματα, με ή χωρίς ορθοστάτες, με ύψη που κυμαίνονται από 32 έως 146 cm. Τα ολικά ύψη των δοκιμίων κυμαίνονται από 5.1 μέχρι 6.5 m. Οι εκκεντρότητες φόρτισης ποικίλλουν από τα 0.46cm έως τα 8.4cm ενώ η μέση τάση διαρροής του χάλυβα μετρήθηκε στα 300 MPa.

Συγκεκριμένα διεξάγονται 43 πειράματα που χωρίζονται σε σειρές η κάθε μια εκ των οποίων αποτελείται από υποστυλώματα ίδιας γεωμετρίας αλλά διαφορετικής εκκεντρότητας. Η ονοματολογία των σειρών δηλώνει τα ιδιαίτερα κατασκευαστικά στοιχεία τους και η γεωμετρία τους φαίνεται στο Σχ. 2.1. Ο αριθμός που εμφανίζεται πρώτος στο όνομα της σειράς σχετίζεται με το μοχλοβραχίονα των κύριων μελών, το κεφαλαίο γράμμα που ακολουθεί σχετίζεται με τη διατομή της δικτύωσης και τα ακόλουθα γράμματα με την ύπαρξη (mR=mit Riegeln) ή όχι ορθοστατών (oR=ohne Riegeln). Για παράδειγμα, η σειρά 1AoR αντιστοιχεί στον πρώτο μοχλοβραχίονα (24cm), έχει διατομή δικτύωσης A (L 25.4) και δε διαθέτει ορθοστάτες, ενώ η σειρά 3BmR έχει τον τρίτο μοχλοβραχίονα (12.5cm), δικτύωση B είδους (L20.3) και διαθέτει ορθοστάτες. Η σειρά 1AoRG βασίζεται στη γεωμετρία της 1AoR και διαφέρει από αυτή στο γεγονός ότι οι συγκολλήσεις των ράβδων δικτύωσης επί των πελμάτων έγιναν με τη μέθοδο της ανόπτησης έτσι ώστε οι παραμένουσες τάσεις λόγω συγκολλήσεων να είναι περιορισμένες. Τα χαρακτηριστικά της κάθε σειράς συνοψίζονται στον Πίνακα 2.2.



Σχ 2.1 Γεωμετρία υποστυλωμάτων ανά ομάδα

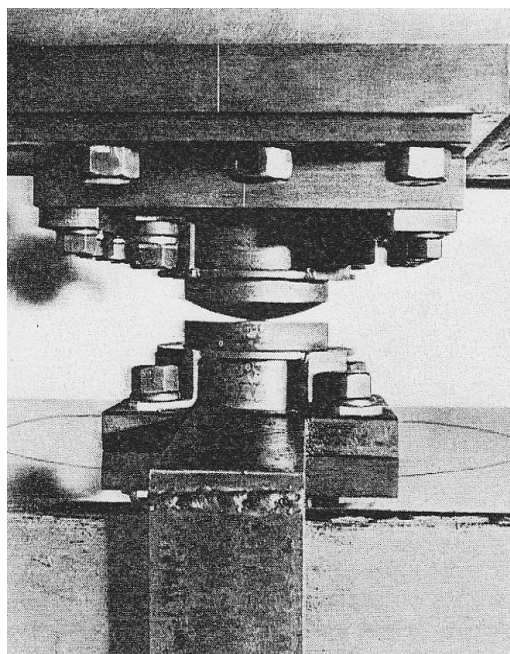
Σειρά	Ύψος L (m)	Μοχλ h ₀ (m)	Φάτν a(m)	Διατ Ράβ. L	Εκκεντρότητες, e (cm)				Τάση Διαρ. f _y (kN/cm ²)			
					1	2	3	4	1	2	3	4
1AoR	5.12	0.24	0.64	25.4	0.54	1.63	4.20	8.40	29.3	28.5	31.3	30.8
1AmR	5.12	0.24	0.32	25.4	0.50	1.50	4.15	8.00	30.0	29.0	28.8	31.0
1AoRG	5.12	0.24	0.64	25.4	1.63	4.00	8.20	-	26.5	26.5	27.2	-
1BoR	5.11	0.24	1.46	20.3	0.50	1.50	4.00	8.00	27.3	25.9	26.5	26.9
1BmR	5.11	0.24	0.73	20.3	0.50	1.63	4.00	8.00	25.0	24.6	24.8	24.7
2AoR	6.4	0.18	0.64	25.4	0.50	1.80	4.15	8.00	38.7	34.3	33.2	32.4
2AmR	6.4	0.18	0.32	25.4	0.46	1.85	4.00	8.00	33.1	34.3	33.2	35.1
2BoR	6.36	0.18	1.06	20.3	0.50	1.60	4.00	8.00	24.8	26.1	26.9	27.9
2BmR	6.36	0.18	0.53	20.3	0.60	1.73	4.00	8.00	27.9	27.4	26.5	27.1
3AoR	6.44	0.125	0.46	25.4	0.50	1.60	4.15	8.00	26.9	27.2	26.8	27.1
3BoR	6.46	0.125	0.76	20.3	0.50	1.60	4.00	8.00	25.5	27.0	25.2	26.7

Πίνακας 2.2 Συγκεντρωτικά στοιχεία υποστυλωμάτων πειράματος

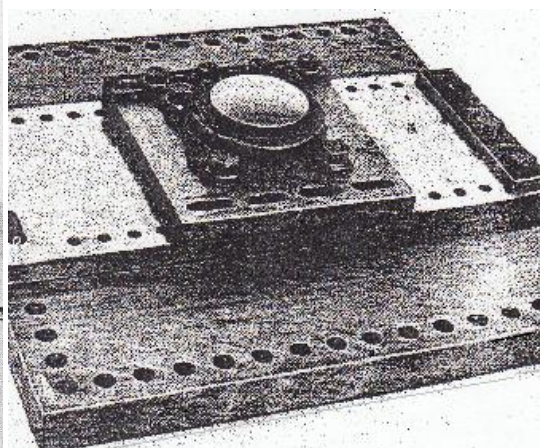
Από τον Πίνακα 2.2 γίνεται φανερό πως σε ότι αφορά το υλικό παρέχεται σε κάθε περίπτωση μόνο το όριο διαρροής που προήλθε από δοκιμές εφελκυσμού. Παρ' όλα αυτά η απουσία του ακριβούς νόμου του υλικού αποτελεί αρνητικό στοιχείο. Επίσης δεν παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τα μεγέθη των ατελειών που εμφανίζονται στο κάθε δοκίμιο και που ο ρόλος τους αναμένεται να είναι σημαντικός στην στατική απόκριση τους.

Η υλοποίηση της άρθρωσης στα άκρα των αμφιαρθρωτών υποστυλωμάτων επιτεύχθηκε με τη χρήση της διάταξης που φαίνεται στα Σχ. 2.3 (α) και (β). Έτσι η πλάκα στο πέρας του κάθε δοκιμίου (Σχ. 2.4) στηρίζεται επάνω στη σφαιρική

διάταξη η οποία επιτρέπει τη στροφή περί τον άξονα σύνθετης λειτουργίας αλλά απαγορεύει οποιαδήποτε μετακίνηση. Βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης άρθρωσης σε σχέση με άλλες ήδη χρησιμοποιηθείσες σε πειραματικές προσπάθειες είναι η επίτευξη ελαχιστοποίησης των τριβών. Με τη σειρά της η σφαιρική διάταξη στηρίζεται μέσω της πλάκας έδρασης στο έδαφος.

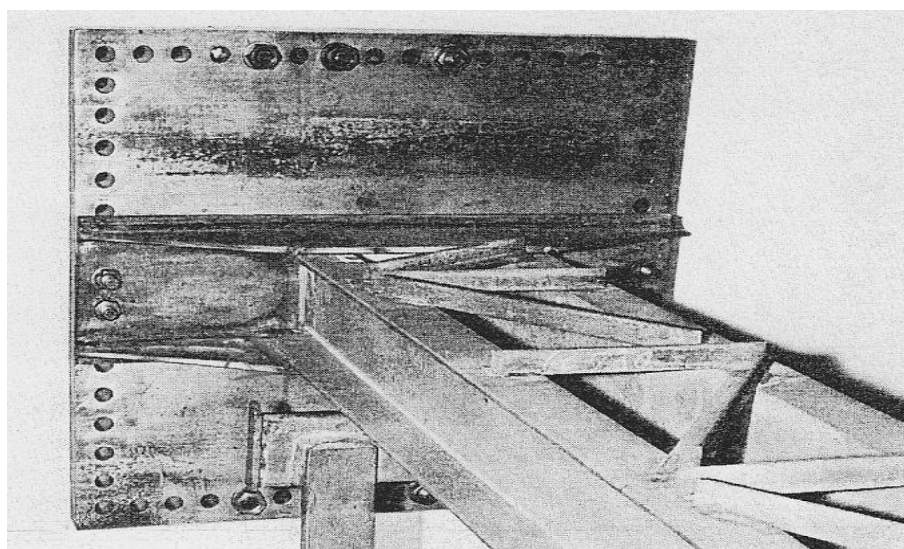


(α)



(β)

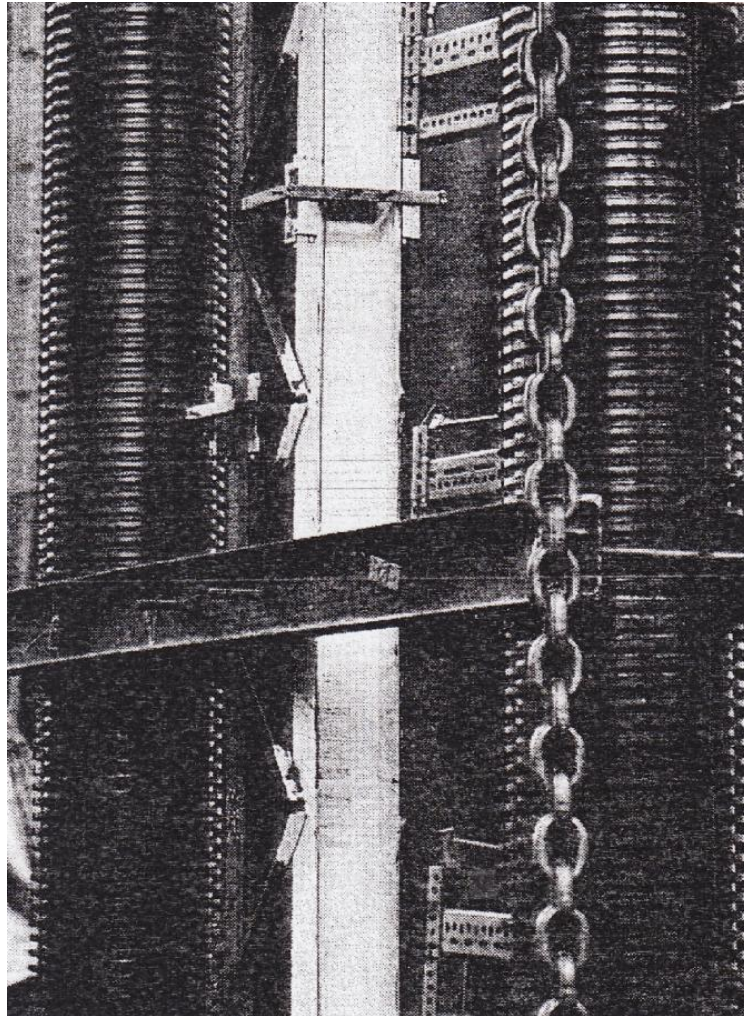
Σχ. 2.3 (α) Διάταξη της υλοποίησης της άρθρωσης στα άκρα, (β) διάταξη άρθρωσης επί της πλάκας έδρασης



Σχ. 2.4 Έδραση του δοκιμίου επί της πλάκας που έρχεται σε επαφή με τη διάταξη της άρθρωσης.

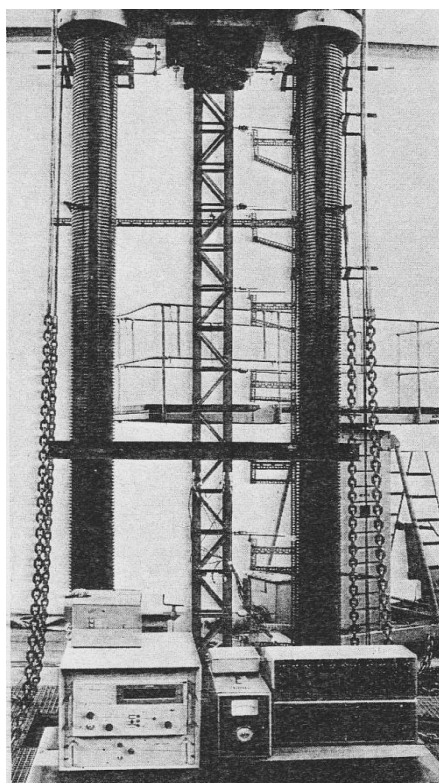
Η επιθυμητή λειτουργία και τελικά αστοχία των δοκιμών είναι αυτή που σχετίζεται με τη σύνθετη λειτουργία. Για αυτό το λόγο, προς αποφυγή ανεπιθύμητης εκτός

επιπέδου αστοχίας τοποθετήθηκαν εκατέρωθεν του δοκιμίου και στο μέσο του ύψους αυτού, οριζόντιες δοκοί.



Σχ. 2.5 Πλευρική στήριξη υποστυλώματος στην πειραματική διάταξη για αποτροπή αστοχίας εκτός επιπέδου.

Η όψη του δοκιμίου 2AmR, 4 πριν την έναρξη της φόρτισης φαίνεται στο Σχ. 2.5. Μετρητικά όργανα τοποθετήθηκαν σε διάφορα σημεία επί των πελμάτων αλλά και των διαγωνίων, που σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η αστοχία τους, πριν την αστοχία ολόκληρου του μέλους.



Σχ. 2.6 Όψη του υποστυλώματος #4, 2AmR, στη μηχανή φόρτισης (το ¼ του υποστυλώματος βρίσκεται κάτω από το πάτωμα)

2.2 Πραγματοποίηση πειραμάτων

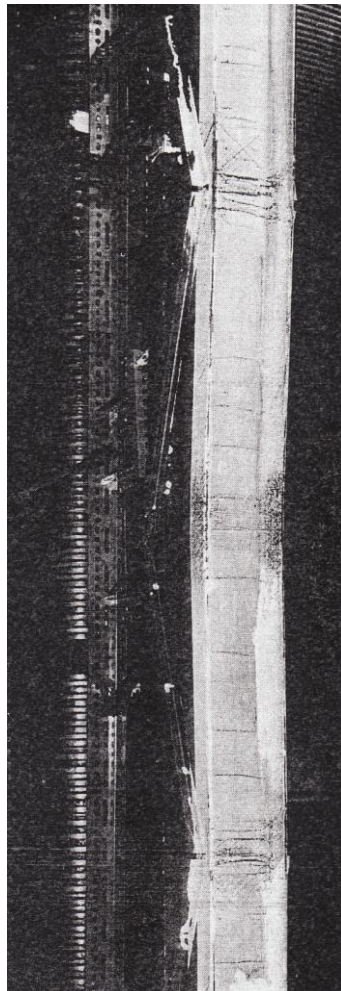
Αρχικά επιβλήθηκε μία προφόρτιση στα δοκίμια ώστε να μπορούν να γίνουν παρατηρήσεις επί της απόκρισης αυτών. Η προφόρτιση ήταν αρκετά μικρότερη από το αναμενόμενο φορτίο αστοχίας ώστε να μην υπάρχουν θέματα διαρροής και η απόκριση να μπορεί να θεωρηθεί ελαστική. Έπειτα το φορτίο επιβλήθηκε με μεγάλα βήματα $\Delta P=98-147\text{kN}$, τα οποία όμως για λόγους ακρίβειας μειώθηκαν σταδιακά σε μεγέθη της τάξης του 9.8kN καθώς πλησιάζε το δοκίμιο στην αστοχία του. Στον Πίνακα 2.7 συνοψίζονται τα πειραματικά φορτία αστοχίας των υποστυλωμάτων.

Σειρά	Φορτίο Αστοχίας (kN)			
	1	2	3	4
1AoR	882	862	755	608
1AmR	902	862	715	558
1AoRG	843	706	558	-
1BoR	862	764	657	480
1BmR	853	755	637	500
2AoR	921	823	666	509
2AmR	902	823	637	490
2BoR	804	666	549	382
2BmR	794	657	529	421
3AoR	588	490	362	304
3BoR	568	470	362	284

Πίνακας 2.7 Φορτία αστοχίας υποστυλωμάτων

Πλαστικοποίηση παρατηρήθηκε σε όλα τα δοκίμια λίγο πριν την αστοχία τους. Σε όλα τα υποστυλώματα, εκτός αυτών που είχαν πολύ μικρού μήκους φατνώματα, παρατηρήθηκε λυγισμός στο μεσαίο φάτνωμα λίγο πριν την επίτευξη του φορτίου αστοχίας. Στο Σχ. 2.8 παρατηρείται λυγισμός στο μεσαίο φάτνωμα του υποστυλώματος #1, 2BoR. Ο λυγισμός του μεσαίου φατνώματος έγινε πολύ σύντομα πριν την πλήρη αστοχία του υποστυλώματος δημιουργώντας το εξής ερώτημα στους ερευνητές: ο λυγισμός του σύνθετου υποστυλώματος οδήγησε σε αυτό το δευτερεύοντα λυγισμό του μεσαίου φατνώματος ή ο λυγισμός του μεσαίου φατνώματος οδήγησε σε καθολική αστοχία του σύνθετου μέλους;

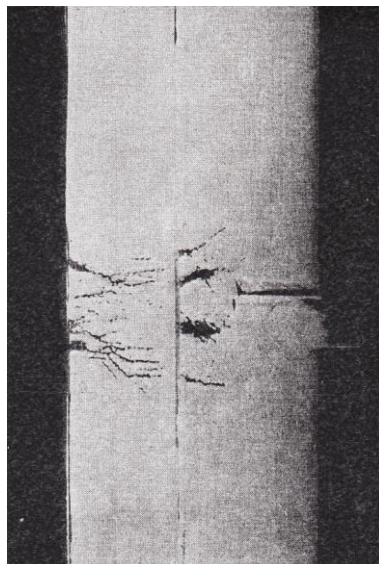
Στο Σχ. 2.8 φαίνεται η αστοχία του μεσαίου φατνώματος και η πλαστικοποίηση στο μέσο αυτού. Όπως διακρίνει κανείς, το πέλμα είναι καθ' ύψος βαμμένο, προκειμένου η αστοχία λόγω πλαστικοποίησης ή λυγισμού να γίνεται εύκολα αντιληπτή. Πρόωρη πλαστικοποίηση αρκετά πριν από το φορτίο αστοχίας παρατηρήθηκε από τους ερευνητές και στα σημεία των κόμβων σύνδεσης διαγωνίων ράβδων με τα πέλματα. Αρχικά αποδόθηκε στο γεγονός ότι ορισμένα είδη δικτύωσης με ορθοστάτες μπορούν να οδηγήσουν σε ροπές κατά μήκος των πελμάτων στην περιοχή των κόμβων και συνεπώς σε πλαστικοποίηση του υλικού.



Σχ. 2.8 Διαρροή στο μεσαίο φάτνωμα στην αστοχία.

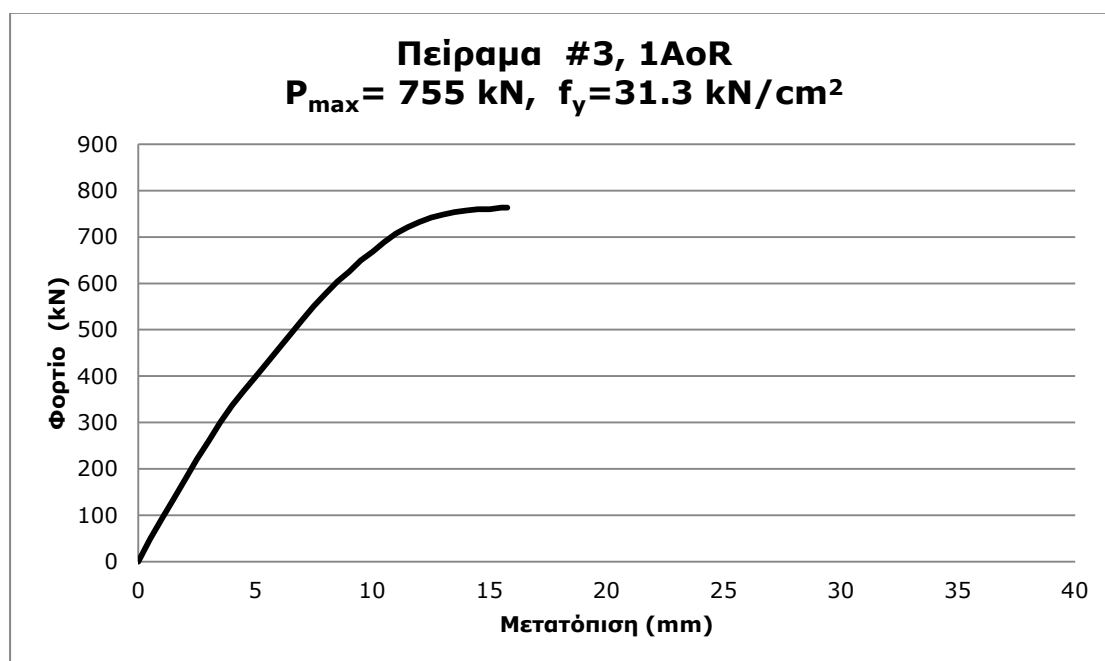
Παρόλα αυτά αυτή η προσέγγιση δεν θεωρήθηκε αποδεκτή καθώς παρόμοια συμπεριφορά παρουσίασαν και δοκίμια στα οποία η δικτύωση δεν περιελάμβανε ορθοστάτες. Όπως προαναφέρθηκε η σύνδεση αυτή πραγματοποιήθηκε με

συγκόλληση και ως γνωστόν κάτι τέτοιο οδηγεί στην ύπαρξη παραμενουσών τάσεων στην περιμετρική περιοχή, που μπορούν να είναι η αιτία για πρόωρη αστοχία υλικού. Σε αυτό το συμπέρασμα κατέληξαν οι ερευνητές και αποφάσισαν την πραγματοποίηση της σειράς 1AoRG, στην οποία οι συγκολλήσεις έγιναν με τη μέθοδο της ανόπτησης.



Σχ. 2.9 Λεπτομέρεια από την πρόωρη διαρροή στην περιοχή των κόμβων σύνδεσης πελμάτων και ράβδων δικτύωσης.

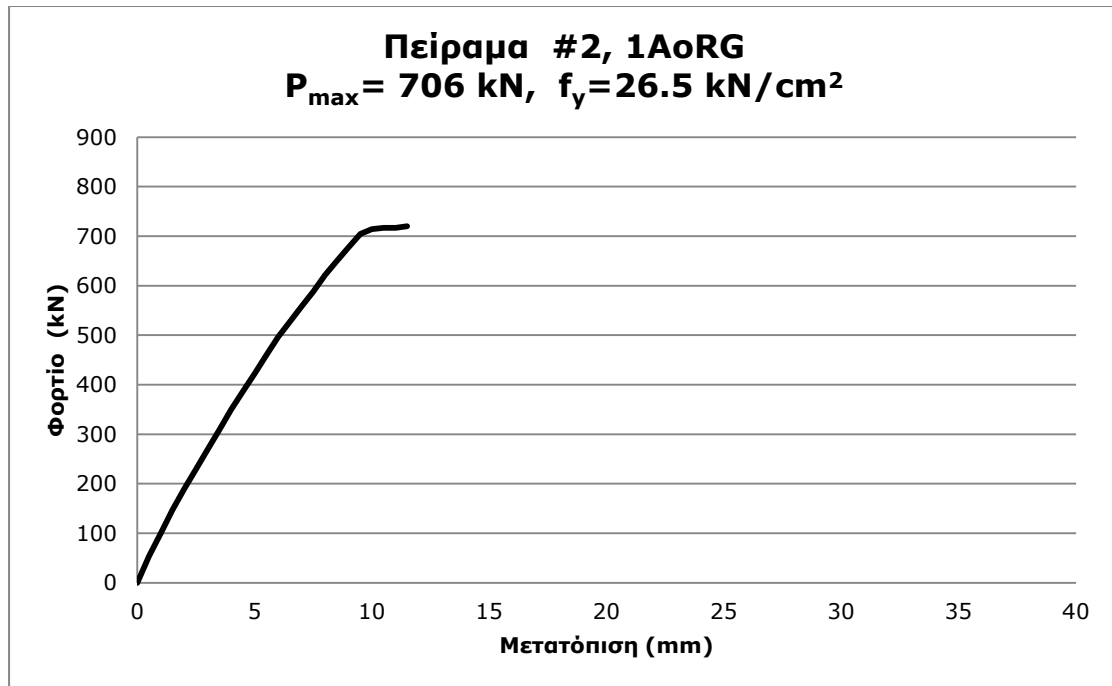
Οι δρόμοι ισορροπίας για τέσσερα εκ των συνολικά 43 εξετασθέντων δοκιμίων, απεικονίζουν τη μετατόπιση στο μέσο του ύψους του υποστυλώματος συναρτήσει του θλιπτικού φορτίου. Οι διαθέσιμοι δρόμοι ισορροπίας αφορούν στα υποστυλώματα #3 από 1AoR, #2 από 1AoRG, #2 από 2AoR και #2 από 2AmR (Σχ.2.6- 2.9).



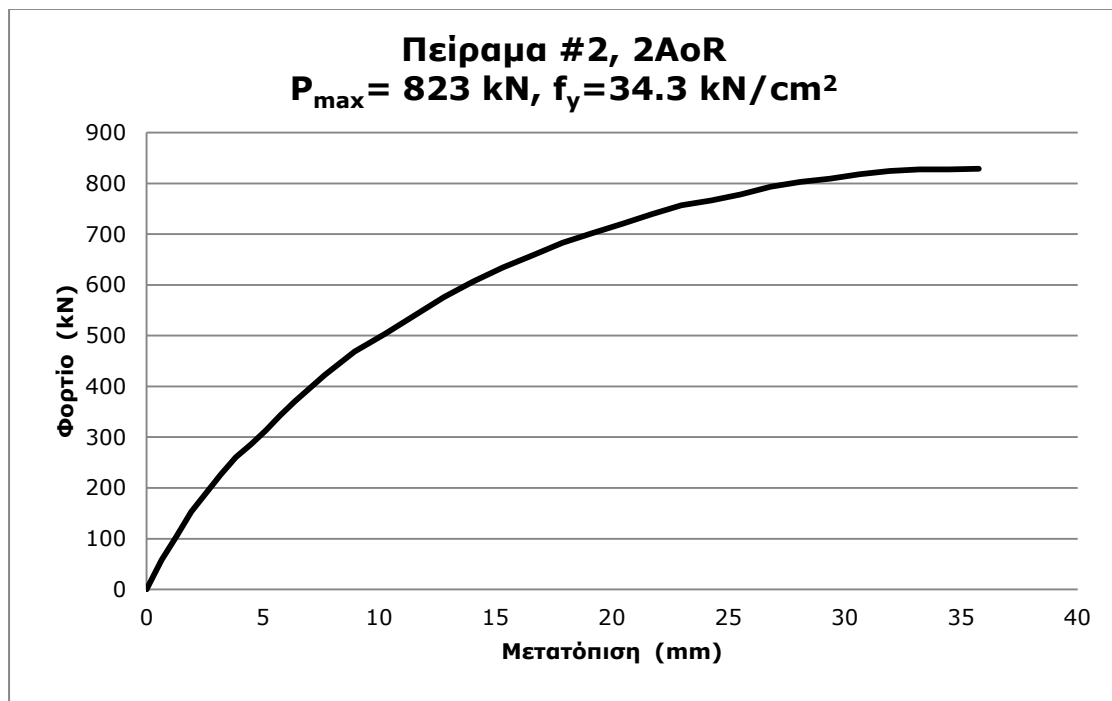
Διάγραμμα 2.6 Πειραματικός Δρόμος Ισορροπίας, #3, 1AoR

Η ποσοτική σύγκριση των δρόμων ισορροπίας μεταξύ τους δεν έχει νόημα ακόμα και για τις περιπτώσεις 1AoR και 1AoRG που έχουν την ίδια γεωμετρία, καθώς το ακριβές όριο διαρροής είναι διαφορετικό.

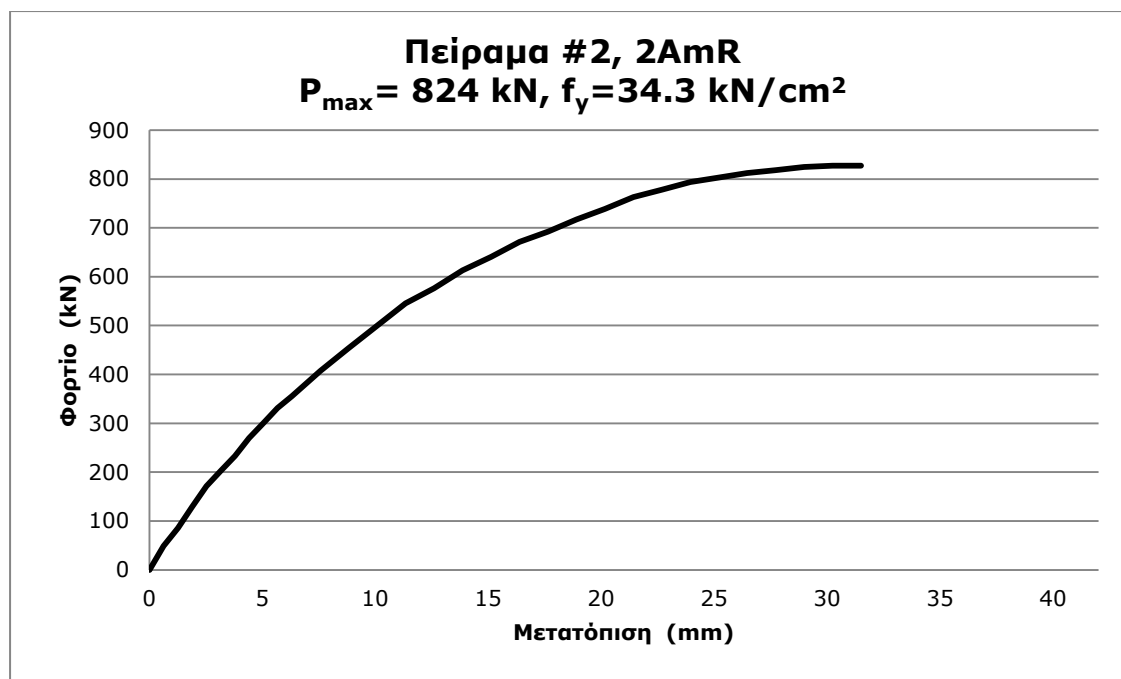
Παρόλα αυτά, σε όλους τους δρόμους ισορροπίας είναι εμφανής η μη γραμμική συμπεριφορά και σε αυξημένο φορτίο η πτώση της δυσκαμψίας μέχρι μηδενισμού της.



Διάγραμμα 2.7 Πειραματικός Δρόμος Ισορροπίας, #2, 1AoRG



Διάγραμμα 2.8 Πειραματικός Δρόμος Ισορροπίας, #2, 2AoR



Διάγραμμα 2.9 Πειραματικός Δρόμος Ισορροπίας, #2, 2AmR

2.3 Χρήση των πειραμάτων στην παρούσα διπλωματική εργασία

Η πειραματική προσπάθεια που παρουσιάστηκε εν συντομία στον παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον εξαιτίας της μεθοδικότητας με την οποία εκτελέστηκε και το μεγάλο πλήθος δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει χρήση όλων των δοκιμών προκειμένου να διερευνηθεί το κατά πόσο είναι εφικτή η προσέγγιση της απόκρισης τους με χρήση αριθμητικών προσομοιωμάτων. Έπειτα θα διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα των αναλυτικών διαδικασιών συμπεριλαμβανομένων εκείνων που εμπεριέχονται στον Ευρωκώδικα 3.

Όπως προαναφέρθηκε βασικό μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι απουσιάζουν οι ακριβείς νόμοι του υλικού του κάθε δοκιμίου και η συμπεριφορά του υλικού θα πρέπει να βασιστεί μόνο στο παρεχόμενο όριο διαρροής, θεωρώντας πως θα συμπεριφερθεί ελαστικά- τελείως πλαστικά. Επιπρόσθετο πρόβλημα αποτελεί και η έλλειψη μετρήσεων ατελειών που αναμένεται να παίξουν σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά των δοκιμών.

Κεφάλαιο 3

Προσομοίωση και αναλύσεις υποστυλωμάτων

3.1 Προσομοίωση υποστυλωμάτων

3.1.1 Προσομοίωση των κύριων μελών (πελμάτων)

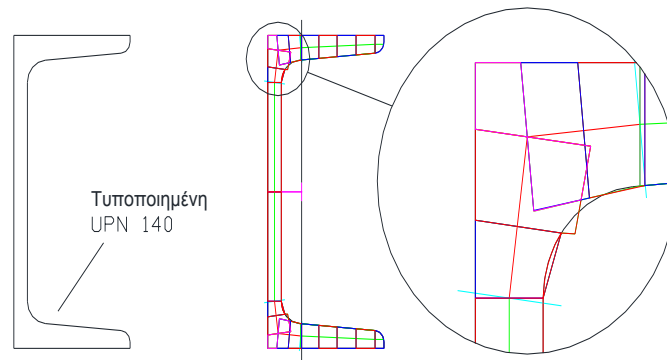
Η πειραματική διαδικασία για τα 43 σύνθετα υποστυλώματα προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis) [6].

Για τα πέλματα του σύνθετου υποστυλώματος (διατομής UPN 140) χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία κελύφους (shell elements) διότι τα πέλματα και ο κορμός της διατομής UPN έχουν σημαντικά μικρότερο πάχος σε σχέση με τις άλλες δύο διαστάσεις τους. Προτιμήθηκαν τα στοιχεία κελύφους επειδή προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια και δίνουν τη δυνατότητα παρατήρησης του πού γίνεται πλαστικοποίηση, πώς επεκτείνεται καθώς και του ενδεχόμενου τοπικού λυγισμού [1].

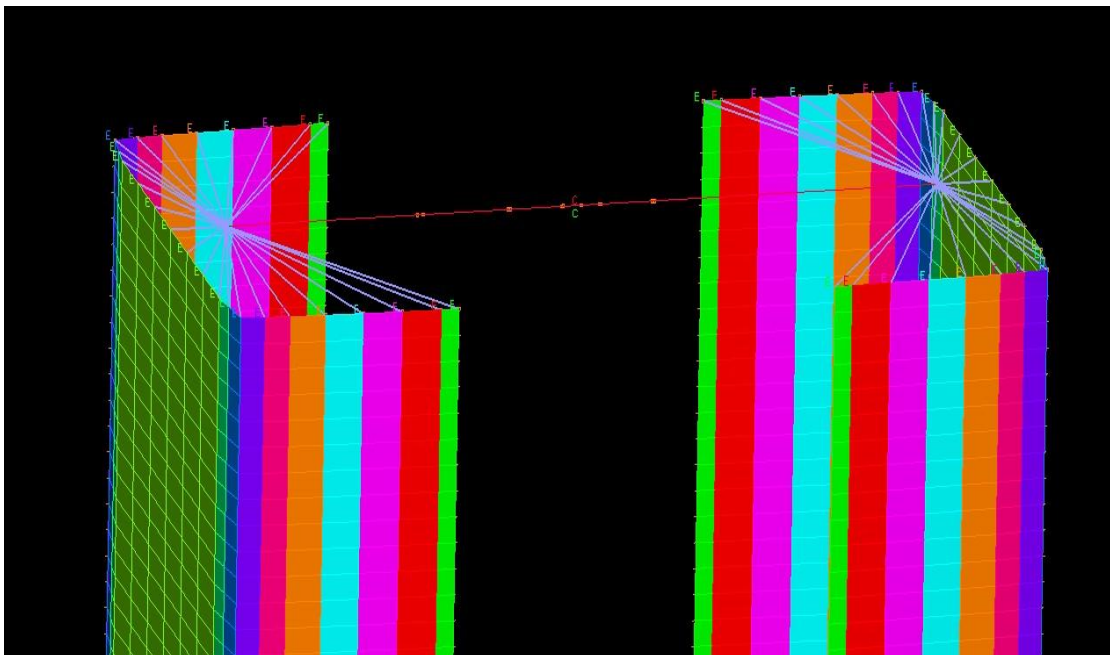
Στο πρόγραμμα Adina, η διαστασιολόγηση ενός στοιχείου κελύφους γίνεται αρχικά με τη χάραξη της κεντροβαρικής γραμμής του κι έπειτα με τον ορισμό του πάχους του. Για την εισαγωγή των γεωμετρικών στοιχείων της διατομής UPN 140, η τυποποιημένη διατομή με χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος Autocad χωρίστηκε σε τμήματα σχεδόν ίδιου πάχους και στη συνέχεια επιλέχθηκαν οι κεντροβαρικές γραμμές αυτών των τμημάτων ώστε να συναρμολόγουν τα άκρα τους (Σχ. 3.1). Επιτεύχθηκε έτσι καλύτερη γεωμετρική προσέγγιση της διατομής αφού πλέον είναι πιο κοντά στην πραγματική διατομή UPN του εμπορίου, με τις μεταβολές πλάτους και τις καμπύλες συναρμογής αντί γωνιών. Τη διατομή ορίζουν 20 ευθύγραμμα τμήματα με διαφορετικά πάχη κελύφους (Σχ. 3.2), τα οποία ορίζουν με τη σειρά τους 21 σημεία (Σχ. 3.3). Στον Πίνακα 3.4 φαίνονται τα πάχη κελύφους των 10 ευθύγραμμων τμημάτων της άνω μισής συμμετρικής διατομής.

Ενδεικτικά της ακρίβειας προσομοίωσης είναι τα αποτελέσματα στατικών φορτίσεων στα μοντέλα των σύνθετων υποστυλωμάτων με σκοπό να ελεγχθεί το πόσο ικανοποιητικά έχουν προσομοιωθεί οι διατομές. Στην οριζόντια φόρτιση του υποστυλώματος ως προβόλου, η απόκλιση του βέλους του Adina σε σχέση με το θεωρητικά (βλ. Παράρτημα) υπολογισμένο είναι -0.75% (για τη σειρά 1AoR), οπότε έτσι επαληθεύεται η ροπή αδρανείας. Στην κατακόρυφη φόρτιση του

υποστυλώματος, η απόκλιση βελών είναι 0.02% οπότε επαληθεύεται και το εμβαδό της διατομής.

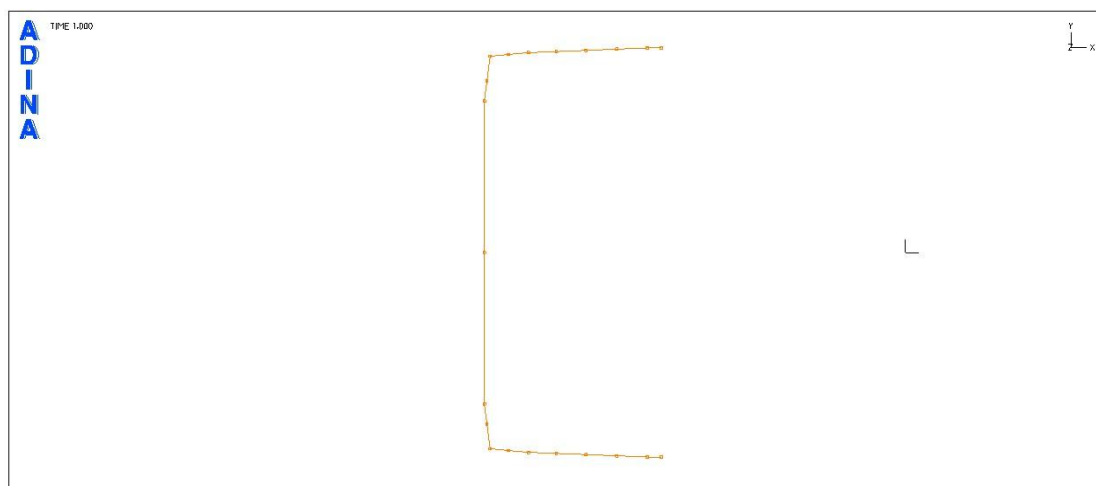


Σχ. 3.1 Προσέγγιση της κεντροβαρικής γραμμής και των παχών της τυποποιημένης διατομής στο Autocad



Σχ. 3.2 Οι διατομές του σύνθετου υποστυλώματος χωρισμένες σε τμήματα διαφορετικού πάχους

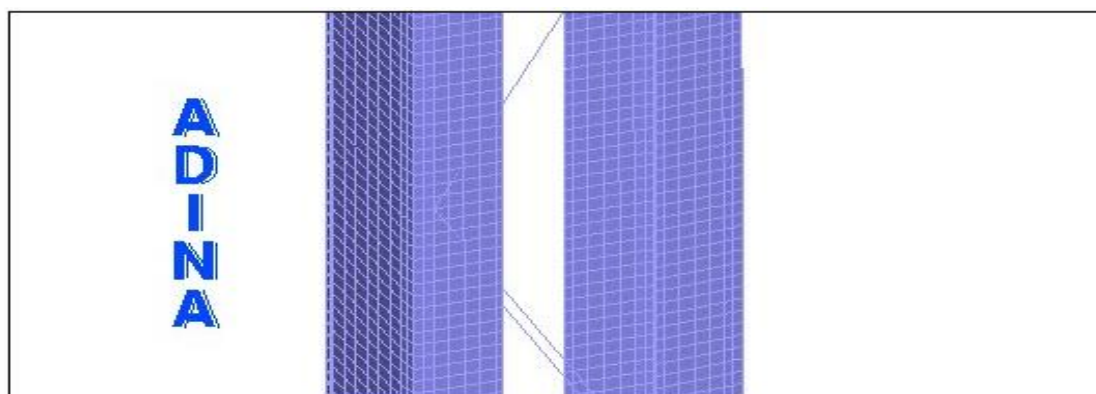
Σχετικά με την πυκνότητα του δικτύου (Σχ. 3.5), έγιναν κατάλληλες μελέτες σύγκλισης οπότε στις ευαίσθητες περιοχές ορίστηκε πυκνότερο δίκτυο. Για παράδειγμα, στα πέλματα των διατομών UPN τα στοιχεία κελύφους έχουν διαστάσεις περίπου 1cm x 1cm, ανεξαρτήτως πάχους, ενώ στον κορμό, 3cm x 1cm. Επίσης, κοντά στις άνω και κάτω στηρίξεις τέθηκε πυκνότερο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων.



Σχ. 3.3 Σημεία ορισμού της διατομής στο Adina- τα μεταξύ τους τμήματα έχουν διαφορετικά πάχη κελύφους

Ευθύγραμμο τμ.	Πάχος (m)	Ευθύγραμμο τμ.	Πάχος (m)
1	0.00694	6	0.011564
2	0.008353	7	0.012647
3	0.009137	8	0.011171
4	0.009904	9	0.007627
5	0.010636	10	0.007

Πίνακας 3.4 Πάχη κελύφους για τα 10 ευθύγραμμα τμήματα της άνω συμμετρικής διατομής με αριστερόστροφη διαγραφή



Σχ. 3.5 Η πυκνότητα των στοιχείων κελύφους σε μοντέλο υποστυλώματος

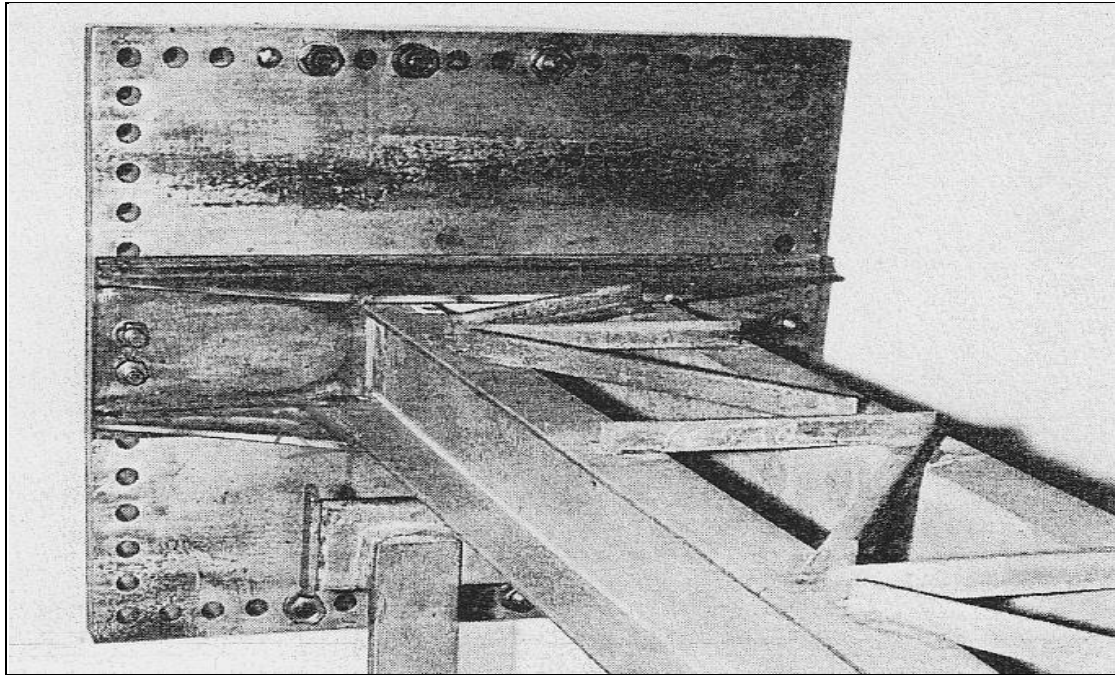
3.1.2 Προσομοίωση των ράβδων δικτύωσης

Για την προσομοίωση κάθε ράβδου χρησιμοποιήθηκε ένα μόνο στοιχείο δοκού (beam element). Στα πειράματα δεν παρατηρήθηκε λυγισμός των ράβδων οπότε δεν απαιτήθηκε χωρισμός τους σε περισσότερα από ένα στοιχεία δοκού. Στα άκρα των ράβδων τέθηκαν ελευθερώσεις ροπών περί τον διαμήκη άξονα των ράβδων και τον άξονα τον κάθετο στο επίπεδο της δικτύωσης. Έτσι, προσεγγίζεται ικανοποιητικά η μικρή δυνατότητα ανάληψης ροπών που παρουσιάζει η συγκολλητή σύνδεση ράβδου- κύριου μέλους. Οι ράβδοι (ορθοστάτες και διαγώνιες) προσομοιώνονται ως μέλη δοκού με τετραγωνική διατομή, ισοδύναμη με τη διατομή τύπου L που έχουν στην πραγματικότητα. Συντρέχουν σημειακά

στον κεντροβαρικό κόμβο των πελμάτων, παρόλο που στην πραγματικότητα συγκολλούνται στο πέλμα των κυρίων μελών σε κάποιο μήκος.

3.1.3 Συνοριακές Συνθήκες και Προσομοίωση των άκρων του υποστυλώματος

Στην πειραματική διάταξη, παρατηρούνται στα άκρα των υποστυλωμάτων συγκολλημένες οριζόντιες πλάκες. Επίσης, κατακόρυφα επίπεδα ελάσματα είναι συγκολλημένα με τις πλάκες αυτές αλλά και με τα πέλματα των διατομών UPN, για ύψος περίπου 20 εκατοστών, (Σχ. 3.6).

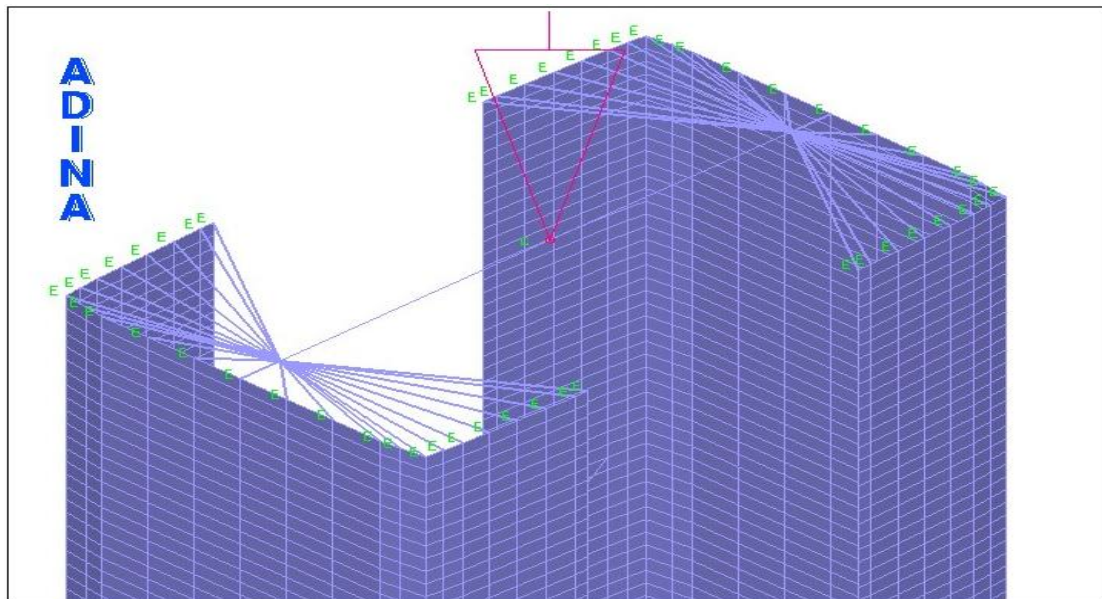


Σχ. 3.6 Πειραματική διάταξη για την μεταβίβαση φορτίων στο άκρο του υποστυλώματος

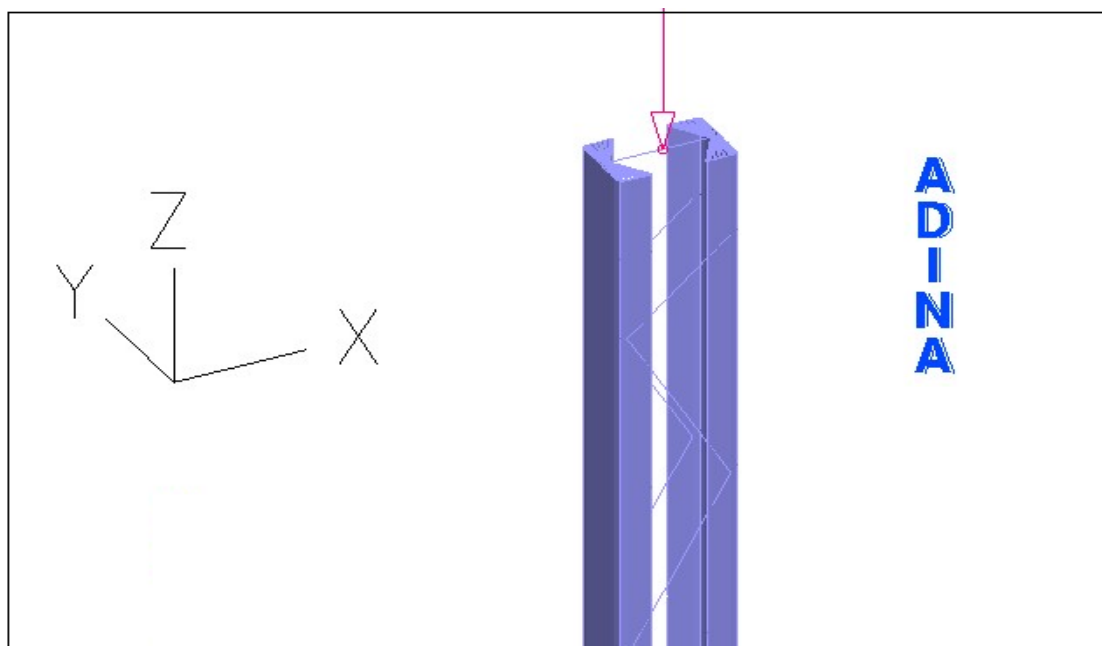
Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, στα άκρα των υποστυλωμάτων, χρησιμοποιείται η επιλογή των άκαμπτων συνδέσμων (rigid links) μεταξύ του σημείου κέντρου βάρους κάθε διατομής UPN και των 20 γραμμών (lines) της διατομής. Στη συνέχεια, μία πρακτικά άκαμπτη ράβδος στοιχείων δοκού και διαστάσεων 0.5x.05 m διέρχεται από τα κέντρα βάρους των δύο διατομών και ενώνει με σύνδεση ροπής τους δύο άκαμπτους συνδέσμους (Σχ. 3.7). Έτσι μπορεί να επιτευχθεί η προσομοίωση των συνοριακών συνθηκών του πειράματος καθώς και η άσκηση του θλιπτικού φορτίου με την κατάλληλη εκκεντρότητα σε κάθε περίπτωση.

Οι συνοριακές συνθήκες των άκρων του υποστυλώματος εφαρμόζονται σημειακά, στο μέσον της άκαμπτης συνδετικής ράβδου, το οποίο ταυτίζεται με το κέντρο βάρους της σύνθετης διατομής. Χρησιμοποιούνται πακτώσεις στις στατικές αναλύσεις, αρθρώσεις (Σχ. 3.9) και κυλίσεις. Στην περίπτωση των δύο τελευταίων, έχει δεσμευτεί ο βαθμός ελευθερίας της στροφής περί τον άξονα x (Σχ. 3.8), ώστε να μην υπάρχει εκτός επιπέδου λειτουργία, δεδομένου ότι το επίπεδο σύνθετης λειτουργίας του υποστυλώματος είναι το xz . Τίθενται επίσης περιορισμοί μετακίνησης κατά τον άξονα y στο μέσον του ύψους του υποστυλώματος για να αποτραπεί λυγισμός περί αυτόν καθώς αποτελεί τον ασθενή άξονα του σύνθετου

υποστυλώματος. Και στα πειράματα υπήρξαν ανάλογες πλευρικές εξασφαλίσεις του φορέα, (Σχ. 2.1).



Σχ. 3.7 Άκαμπτοι σύνδεσμοι και άκαμπτη συνδετική ράβδος

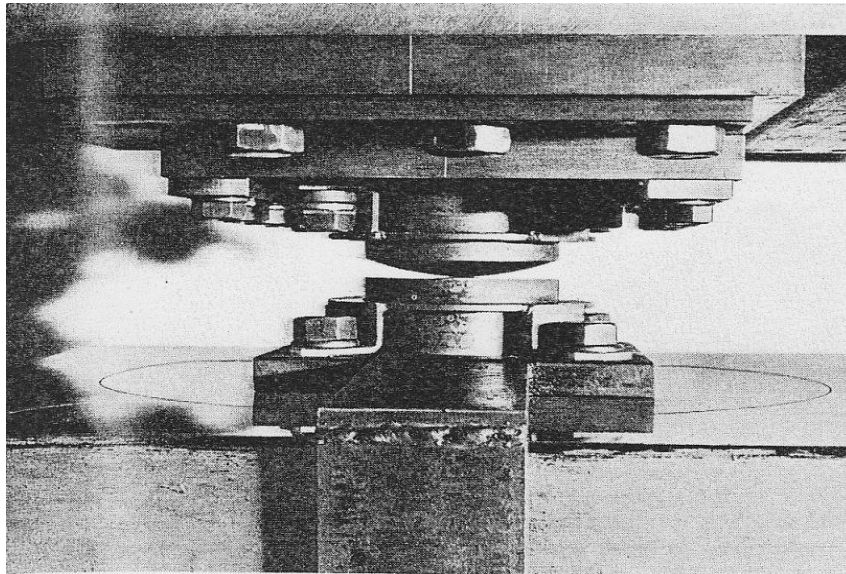


Σχ. 3.8 Μοντέλο στο περιβάλλον του Adina με τους άξονές του

3.1.4 Υλικά

Στις αναλύσεις χρησιμοποιούνται δύο υλικά κατά περίπτωση. Το υλικό «1» είναι ελαστικό- τελείως πλαστικό, με μέτρο ελαστικότητας 21 GPa και τάση διαρροής ίση με εκείνη που μετρήθηκε στο πείραμα για κάθε υποσύλωμα. Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται στη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας (GMNIA) και θεωρείται ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά το πραγματικό υλικό των πειραμάτων.

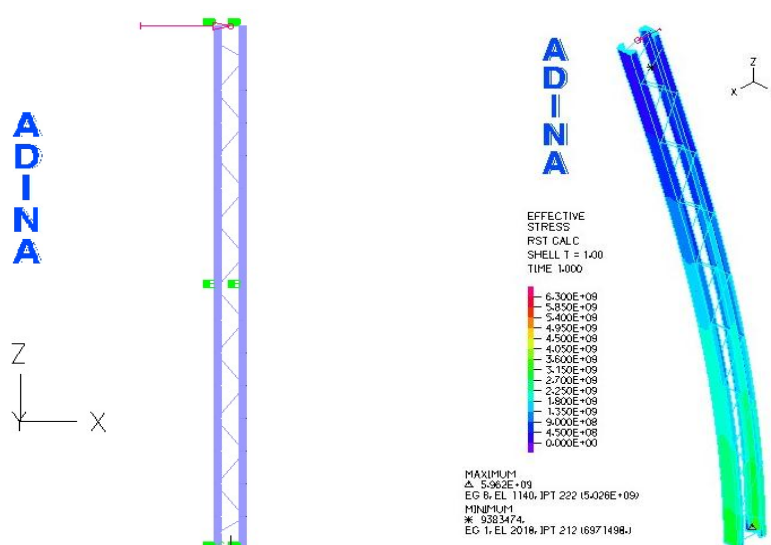
Εξάλλου δε δίνονται άλλα στοιχεία εκείνου του υλικού, όπως, παραδείγματος χάριν, η κλίση του κλάδου κρύτυνσης. Το υλικό «2» είναι ελαστικό με κλίση 21GPa. Είναι το υλικό των στατικών αναλύσεων, της ανάλυσης γραμμικοποιημένου λυγισμού (LB) και της ανάλυσης με μη γραμμικότητα γεωμετρίας (GNIA).



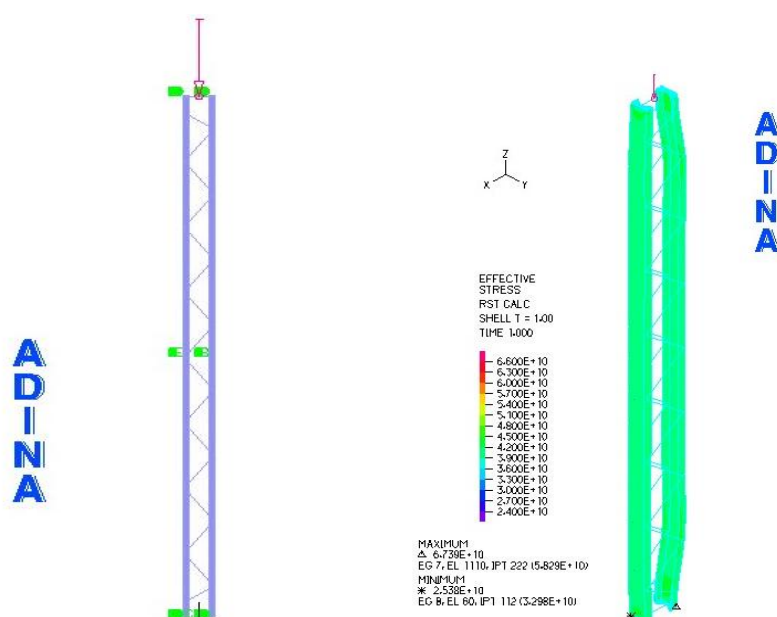
Σχ. 3.9 Πειραματική διάταξη για την υλοποίηση της άρθρωσης στο άκρο

3.2 Αναλύσεις Πειραμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Adina όλα τα μοντέλα των υποστυλωμάτων που απαντώνται στο πείραμα. Αρχικά, για κάθε σειρά υποστυλωμάτων διεξάγονται στατικές αναλύσεις ώστε να επαληθευτεί εάν έχουν προσομοιωθεί σωστά τα shell elements στο μοντέλο συνολικά, ως προς το εμβαδό και τη ροπή αδρανείας του. Πιο συγκεκριμένα, για το υποστυλόμενο κάθε σειράς (ανεξαρτήτως εκκεντρότητας) με συνοριακές συνθήκες προβόλου, τίθεται στο άκρο του προβόλου τη μία φορά οριζόντιο και την άλλη αξονικό φορτίο. Οι προκύπτουσες ακραίες μετακινήσεις συγκρίνονται με τις θεωρητικά αναμενόμενες από τις Εξ. 1.4 και 1.5. Κατά μέσο όρο, οι αποκλίσεις στην οριζόντια δυσκαμψία είναι της τάξης του $\pm 0.5\%$ και στην αξονική $\pm 0.2\%$. Στα Σχ. 3.10 και 3.11 φαίνεται ένα τυπικό παράδειγμα έντασης και παραμόρφωσης τέτοιων φορτίσεων για το υποστυλόμενο της σειράς 1ΑοR.



Σχ. 3.10 Στατική Οριζόντια φόρτιση, ένταση και παραμόρφωση



Σχ. 3.11 Στατική Κατακόρυφη φόρτιση, ένταση και παραμόρφωση

Ακολουθώντας, γίνονται αναλύσεις γραμμικοποιημένου λυγισμού, (LBA), με κατακόρυφη κεντρική θλιπτική φόρτιση ώστε να εξαχθούν η πρώτη καθολική και η κατάλληλη τοπική ιδιομορφή για χρήση τους σε μη γραμμικές αναλύσεις. Παρουσιάζονται τα σχήματα των ιδιομορφών αυτών και οι αποκλίσεις των φορτίων τους ως προς τα αντίστοιχα θεωρητικά των Εξ. 1.6 και 1.8. Στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Adina επιλέγεται μέθοδος ανάλυσης «Κλασική» (Classical), 4000 επαναλήψεις ανά ιδιοζεύγος (iterations per eigenpair), και θλιπτικό φορτίο ίσο με το 2% του αντίστοιχου ελαστικού φορτίου λυγισμού Euler, (Εξ. 1.6 και 1.8), ώστε η ανάλυση να συγκλίνει.

Στη συνέχεια, για ένα αντιπροσωπευτικό υποστύλωμα κάθε σειράς παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας ενός σημείου στο μέσο ύψος του, όπως προέκυψαν από ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας και υλικού (GMNIA) και ανάλυση με μη γραμμικότητα γεωμετρίας (GNIA). Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται και το ελαστικό κρίσιμο φορτίο λυγισμού, σύμφωνα με τον EC3, (Εξ. 1.6). Για το συγκεκριμένο υποστύλωμα παρατίθενται εικόνες έντασης και παραμόρφωσης σε 4 χαρακτηριστικά σημεία των δρόμων ισορροπίας GMNIA: στην ελαστική περιοχή, στην πρώτη διαρροή, στο μέγιστο φορτίο και στο μεταλυγισμικό κλάδο. Εάν διατίθεται πειραματικός δρόμος ισορροπίας, απεικονίζεται σε ξεχωριστό διάγραμμα με τους δρόμους από την ανάλυση GMNIA του Adina και την αναλυτική μέθοδο του Κεφαλαίου 1, (Εξ. 1.24).

Ακολουθούν για όλα τα υποστυλώματα της ομάδας συγκριτικοί πίνακες με τα φορτία αστοχίας του πειράματος, της ανάλυσης GMNIA του Adina και του EC3 καθώς και τις αποκλίσεις μεταξύ αυτών. Ορίζονται οι % αποκλίσεις $A1 = [(P_{\text{πειρ}} - P_{\text{Ad}}) / P_{\text{πειρ}}]$, $A2 = [(P_{\text{πειρ}} - P_{\text{EC3}}) / P_{\text{πειρ}}]$, $A3 = [(P_{\text{Ad}} - P_{\text{EC3}}) / P_{\text{Ad}}]$. Για κάθε υποστύλωμα παρακάτω θα δίνονται αυτές οι αποκλίσεις.

Σε όλες τις αναλύσεις, η τοπική ατέλεια τίθεται στο πέλμα που κρίνεται ως δυσμενέστερο (πλέον θλιβόμενο) από τη φορά της καθολικής ατέλειας. Η φορά της τοπικής ατέλειας, τώρα, είναι τέτοια ώστε το κρίσιμο φάτνωμα να λυγίζει ομόφορα προς την καθολική ατέλεια. Λόγω του δεδομένου προσανατολισμού των πελμάτων UPN (αντικριστά, πέλμα με πέλμα), πάντοτε το κρίσιμο φάτνωμα λυγίζει προς την ισχυρή του πλευρά, δηλαδή πλαστικοποιείται ο κορμός του.

Σε όλες τις αναλύσεις GMNIA με το πρόγραμμα Adina, (αναλύσεις collapse), τίθεται αρχική μετατόπιση στο μέσο ύψος ίση με $5 \cdot 10^{-6} \text{m}$ κατά x, φοράς εξαρτόμενης από την καθολική ατέλεια. Η παράμετρος «Alpha» τίθεται 1, όπως και η μέγιστη επιτρεπτή μετατόπιση του σημείου αναφοράς. Η ανάλυση διεξάγεται σε 100 ή 200 βήματα κατά περίπτωση και συνεχίζεται πέραν του οριακού φορτίου.

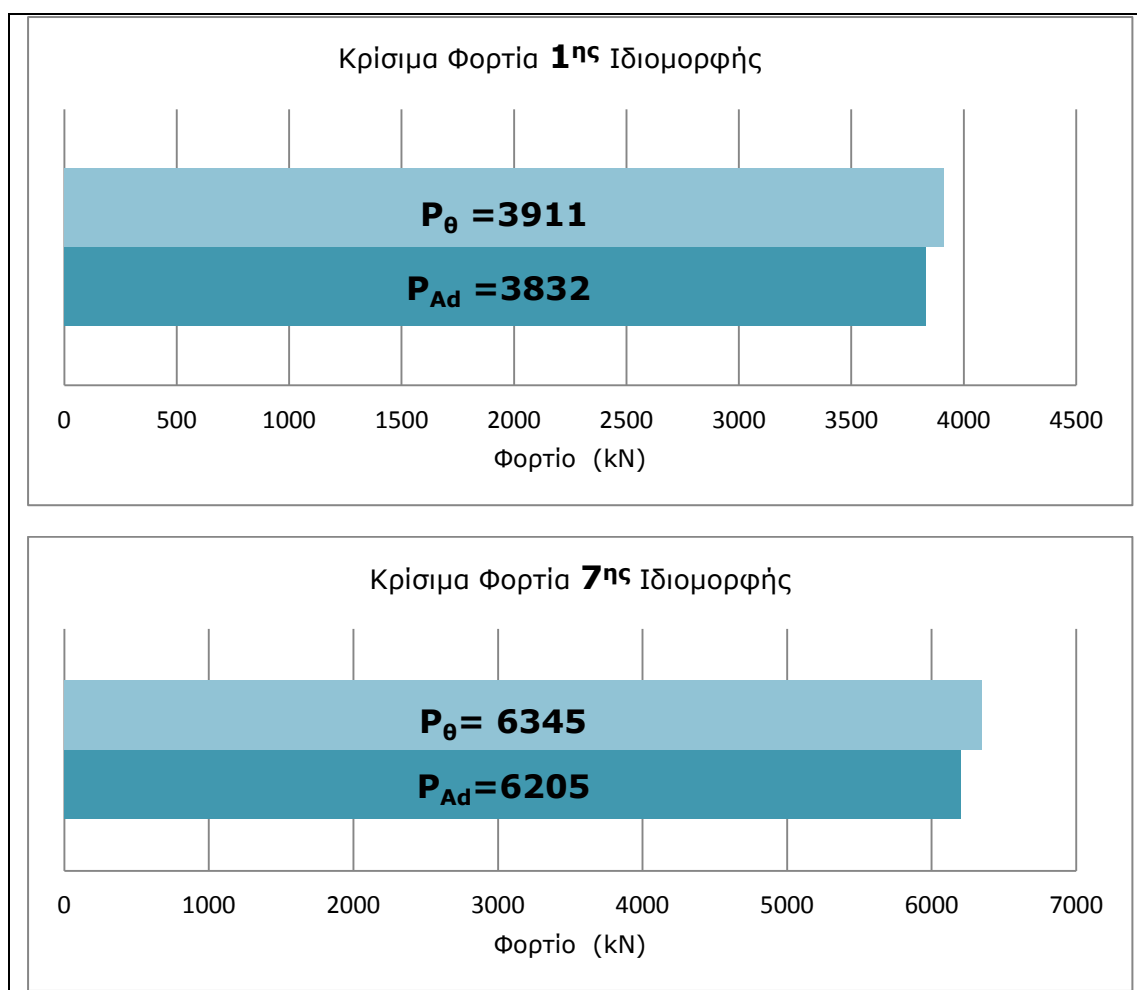
3.3 Σειρά 1AοR

3.3.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)

Στο Σχ. 3.12 φαίνονται η καθολική και η πρώτη τοπική ιδιομορφή (λυγισμός Euler του πέλματος μεταξύ κατάλληλων σημείων). Ο Πίνακας 3.13 περιέχει τα φορτία των ιδιομορφών αυτών συγκρινόμενα με τα θεωρητικώς υπολογισμένα (Εξ. 1.6, 1.8). Η % απόκλιση μεταξύ θεωρητικού φορτίου λυγισμού και φορτίου από την ανάλυση LBA του Adina, $([P_{\text{Ad}} - P_{\theta}] / P_{\text{Ad}})$, είναι για τις δύο ιδιομορφές -2.1% και -2.3% αντίστοιχα.



Σχ. 3.12 Πρώτη καθολική και πρώτη τοπική ιδιομορφή, 1^η και 7^η αντίστοιχα



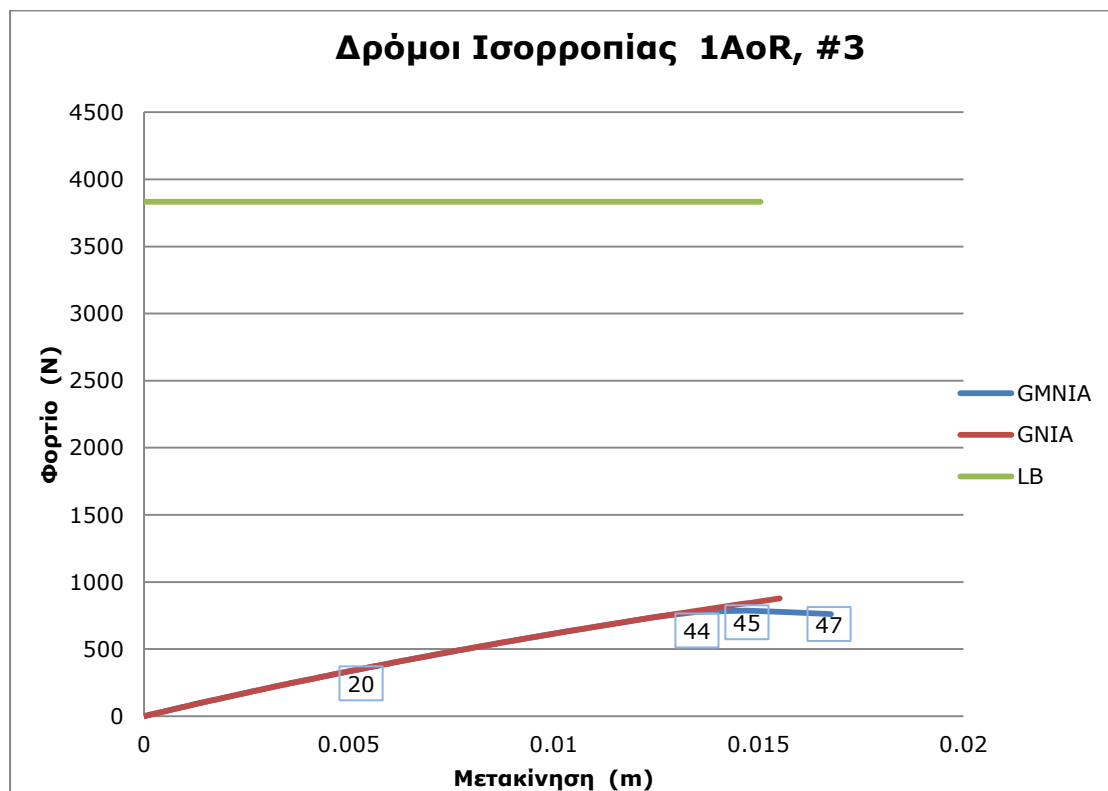
Πίνακας 3.13 Κρίσιμα Φορτία Ιδιομορφών, θεωρητικά και από το Adina

3.3.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)

Στη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας τίθενται γεωμετρικές ατέλειες πρώτης και έβδομης ιδιομορφής μεγέθους που ορίζεται σύμφωνα με τον EC3. Ο συνδυασμός εκκεντρότητας και προσανατολισμού ατελειών είναι ο δυσμενέστερος δυνατός. Συγκεκριμένα, η εκκεντρότητα και η καθολική ατέλεια ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το πέλμα στο οποίο εισήχθη η τοπική ατέλεια να είναι το πλέον θλιβόμενο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ξεκινώντας από το 3^ο υποστύλωμα της σειράς.

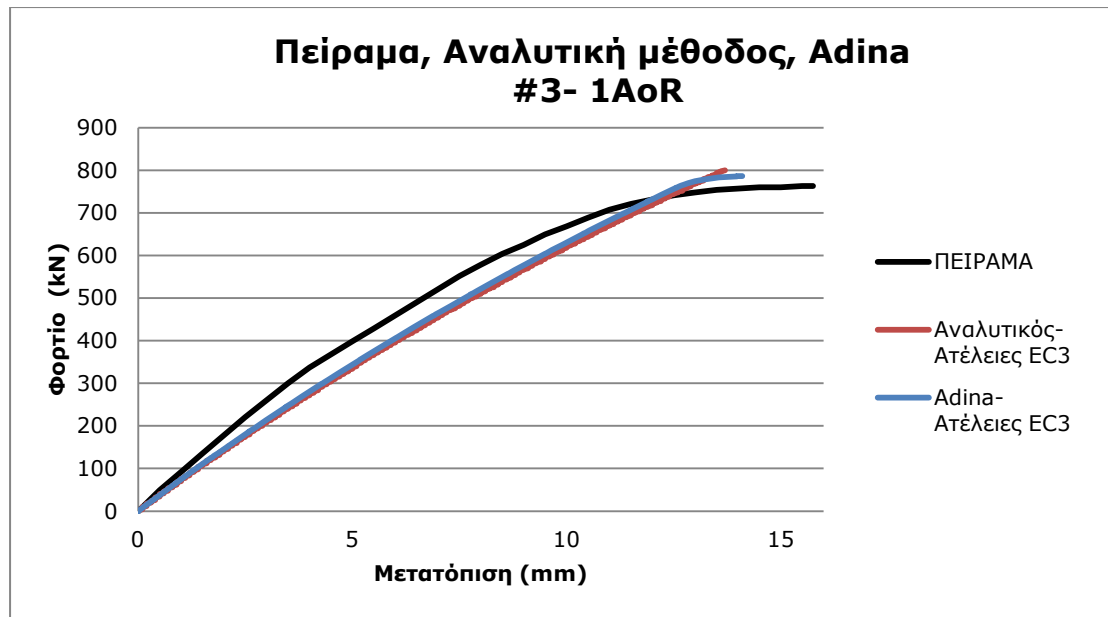
3.3.2.1 Υποστύλωμα #3 (εκκ. 4.2cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 31.28 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01024 m και της έβδομης $8.81 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Για το υποστύλωμα #3 διεξάγεται, εκτός από ανάλυση GMNIA, και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, GNIA.

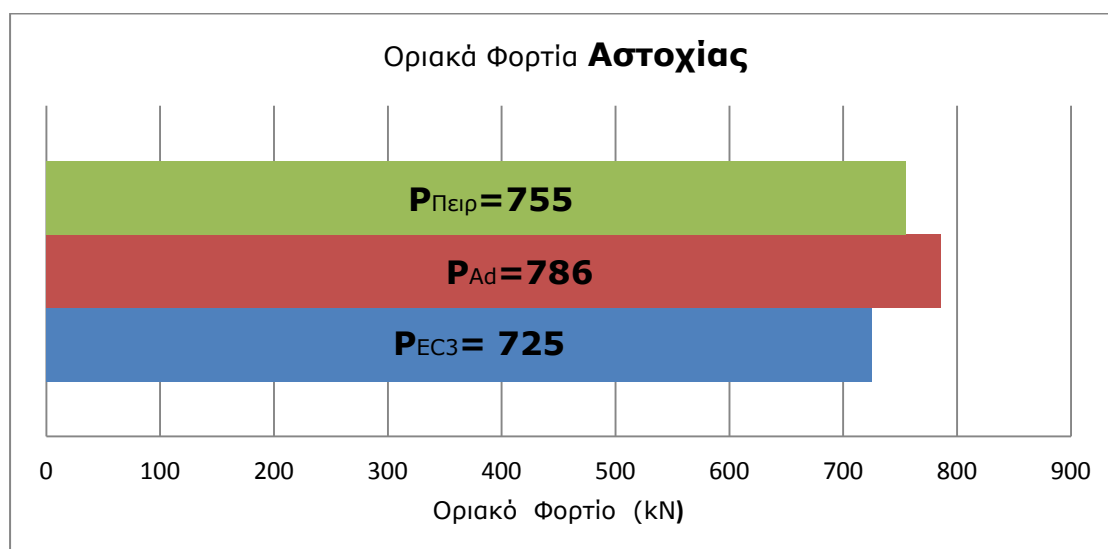


Σχ. 3.14 Δρόμοι Ισορροπίας για αναλύσεις GMNIA, GNIA και ύψος κρίσιμου φορτίου

Για το υποστύλωμα #3 υπάρχει και πειραματικός δρόμος ισορροπίας. Στο Σχ. 3.15 απεικονίζονται ο πειραματικός αυτός δρόμος, ο αναλυτικός σύμφωνα με τη μέθοδο του Κεφ. 1 (Εξ. 1.24) και ο δρόμος του Adina. Οι δύο τελευταίες αναλύσεις έγιναν με ατέλειες κατά EC3. Είναι εμφανής η ταύτιση της αναλυτικής μεθόδου με το Adina. Διαφέρουν στο ότι η αναλυτική μέθοδος δεν αποδίδει κοντά στο οριακό φορτίο την πλαστικοποίηση (πτώση κλίσης, πλατώ διαρροής), καθώς λαμβάνει υπόψη ελαστικό υλικό. Οι % αποκλίσεις για το υποστύλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=-4.1\%$, $A2=4.0\%$, $A3=7.8\%$.

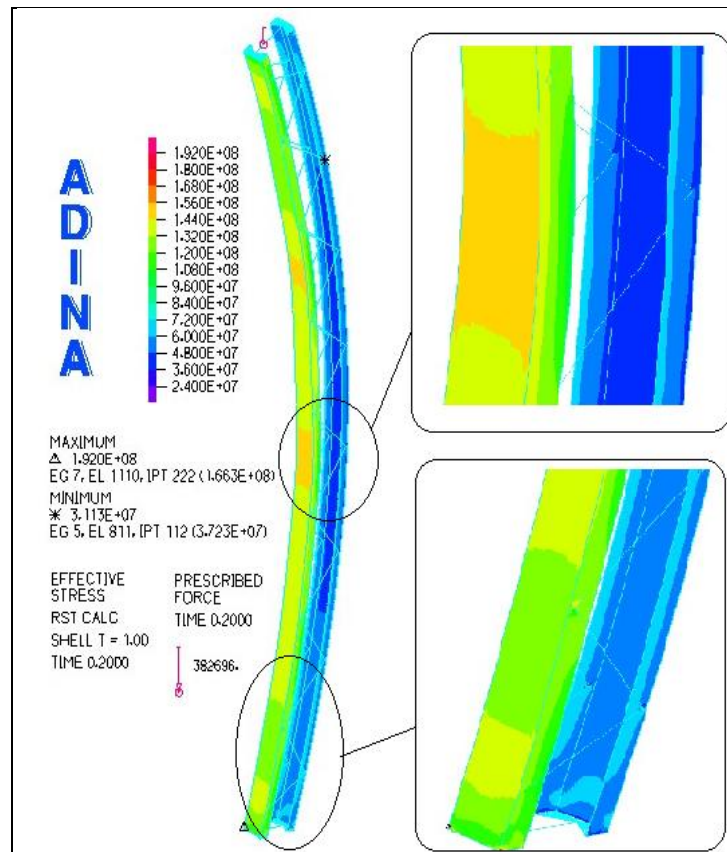
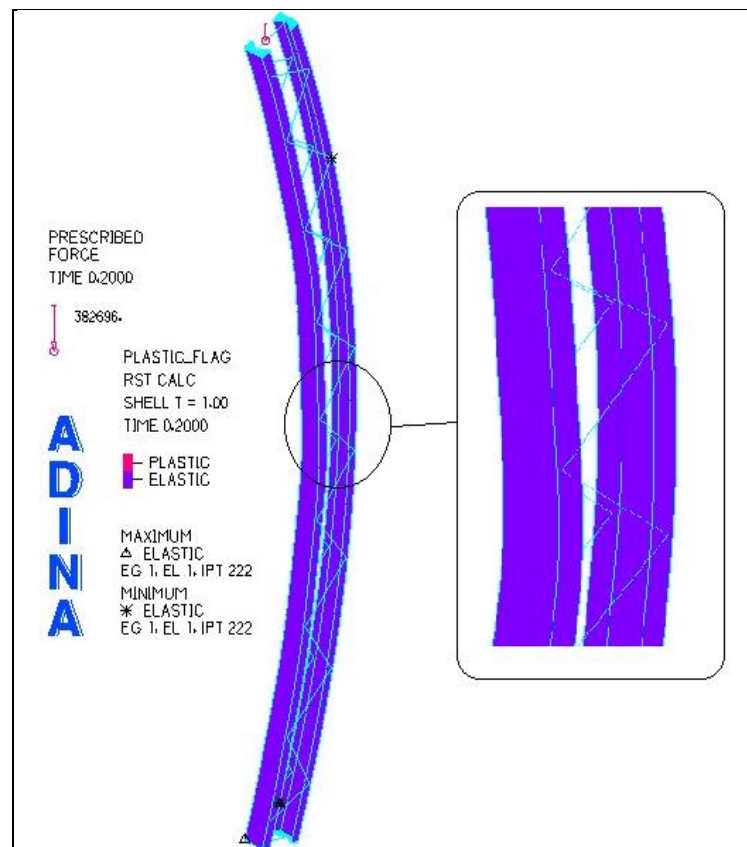


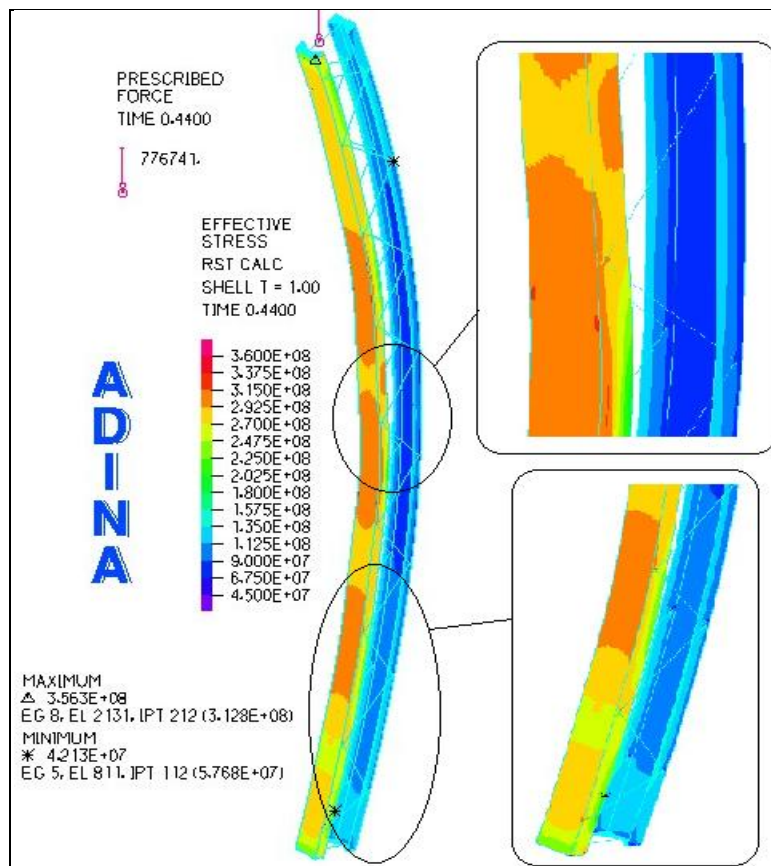
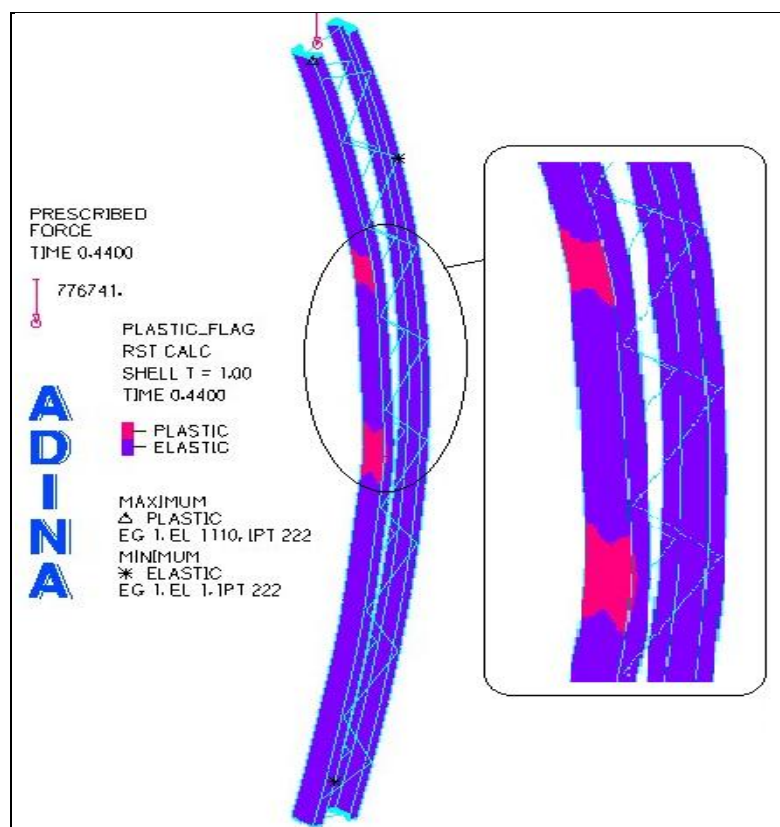
Σχ. 3.15 Δρόμοι Ισορροπίας από το Πείραμα, την Αναλυτική μέθοδο (Κεφ. 5) και το Adina

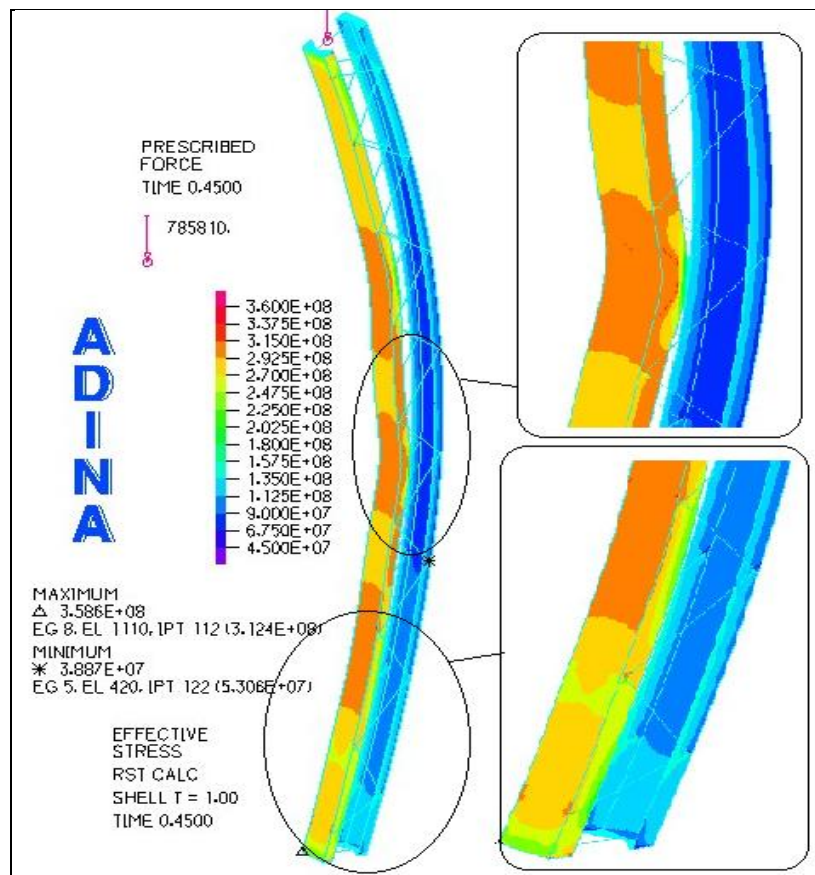


Πίνακας 3.16 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #3, 1AoR

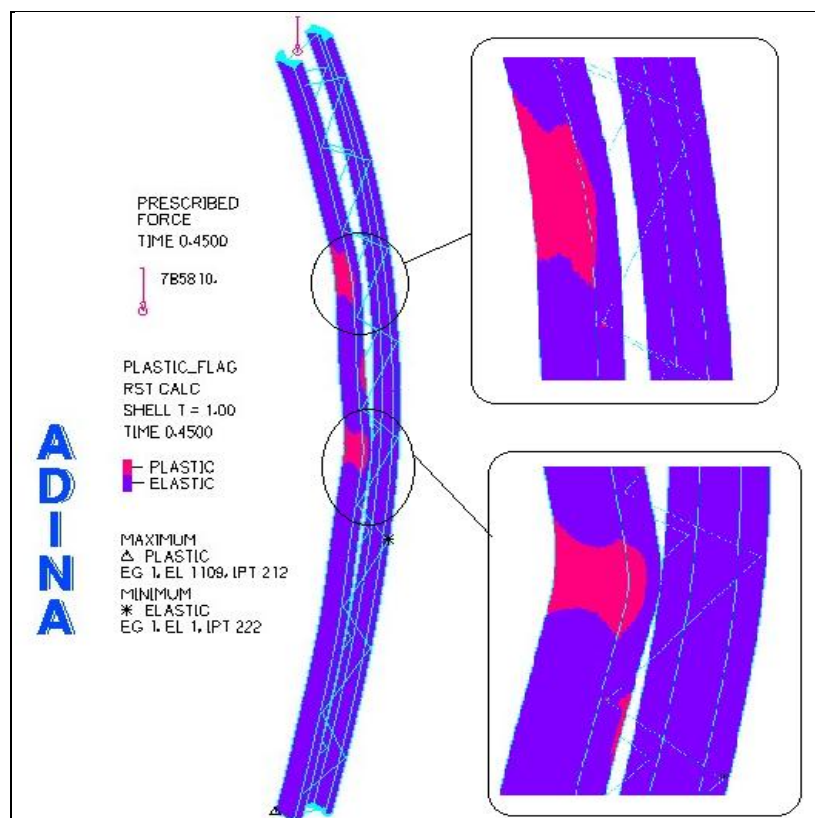
Στο δρόμο ισορροπίας της ανάλυσης GMNIA σημειώνονται 4 χαρακτηριστικά σημεία των οποίων οι εντατικές και παραμορφωσιακές καταστάσεις φαίνονται στα Σχ. 3.17 έως 3.24.

Σχ. 3.17 Τάσεις von Mises- Βήμα 20^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)Σχ. 3.18 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 20^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)

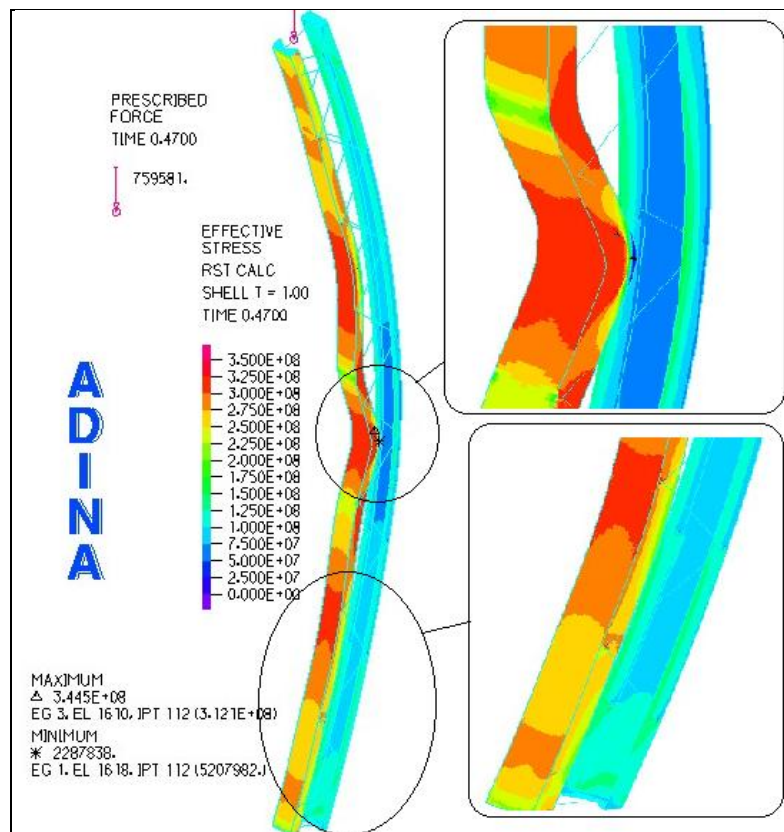
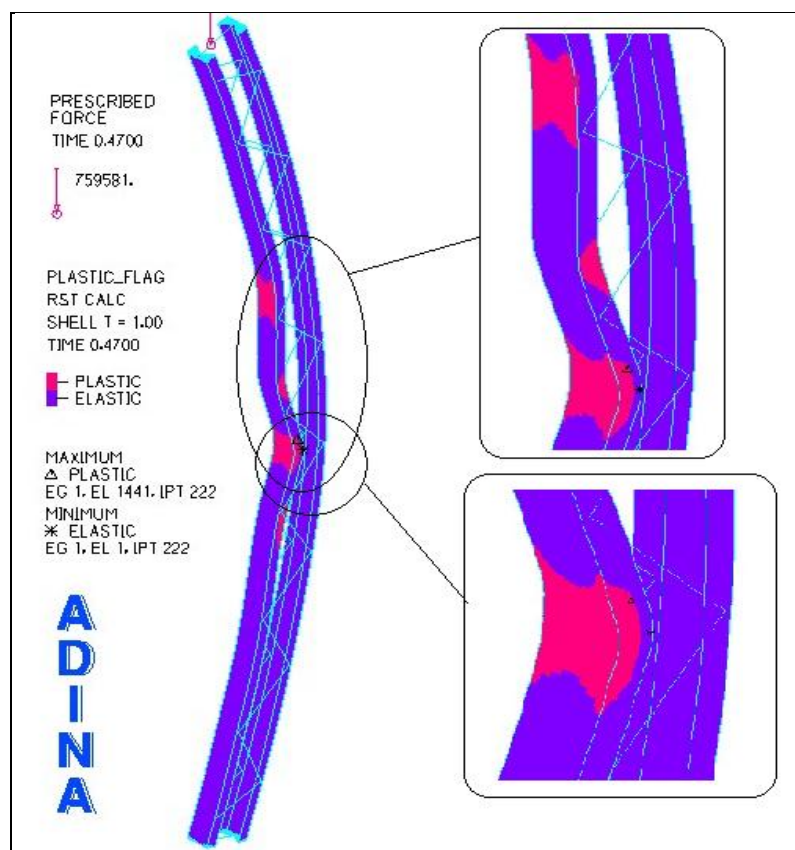
Σχ. 3.19 Τάσεις von Mises- Βήμα 44^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)Σχ. 3.20 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 44^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)



Σχ. 3.21 Τάσεις von Mises- Βήμα 45° ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)

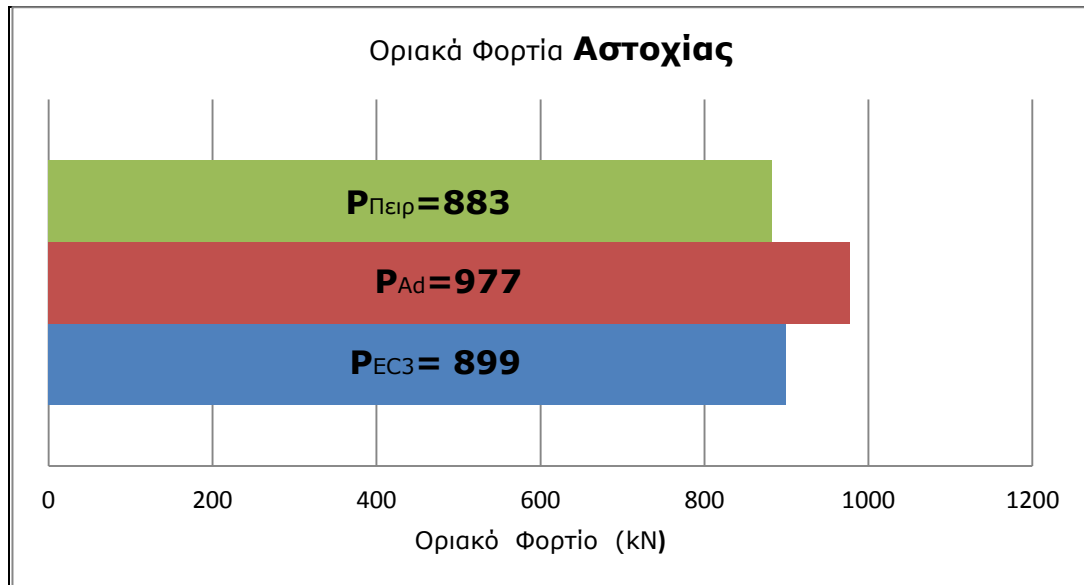


Σχ. 3.22 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 45° ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)

Σχ. 3.23 Τάσεις von Mises- Βήμα 47^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)Σχ. 3.24 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 47^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)

3.3.2.2 Υποστυλώμα #1 (εκκ. 0.54cm)

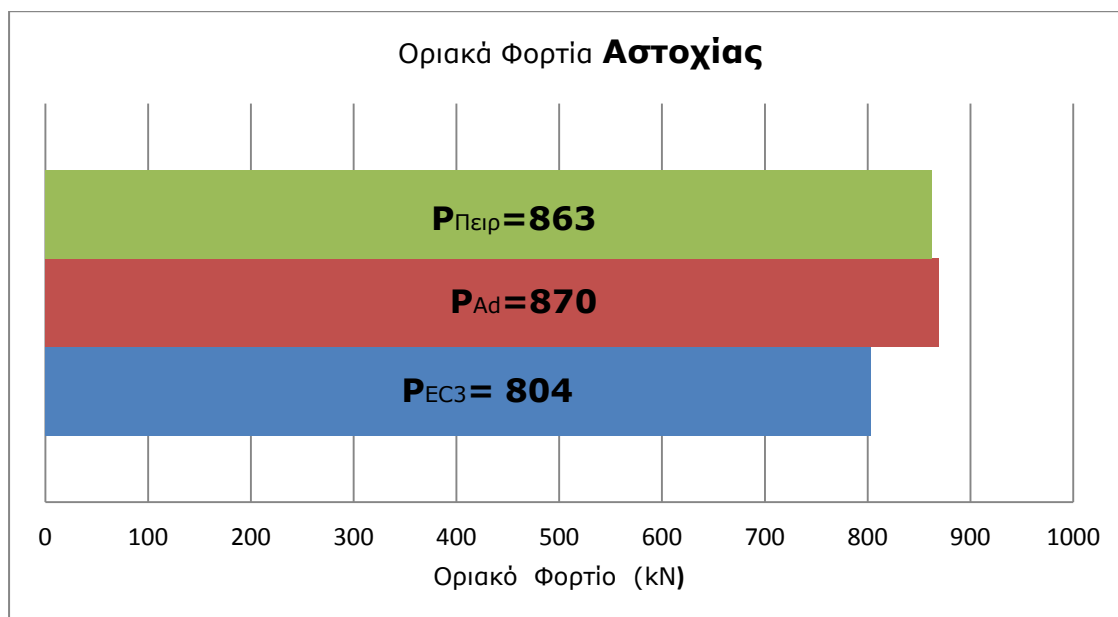
Σύμφωνα με τις καταγραφές του πειράματος, η τάση διαρροής του υποστυλώματος είναι 29.32 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01024 m και της έβδομης $8.299 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=-10.8\%$, $A2=-1.9\%$, $A3=8.0\%$.



Πίνακας 3.25 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #1, 1AoR

3.3.2.3 Υποστυλώμα #2 (εκκ. 1.63cm)

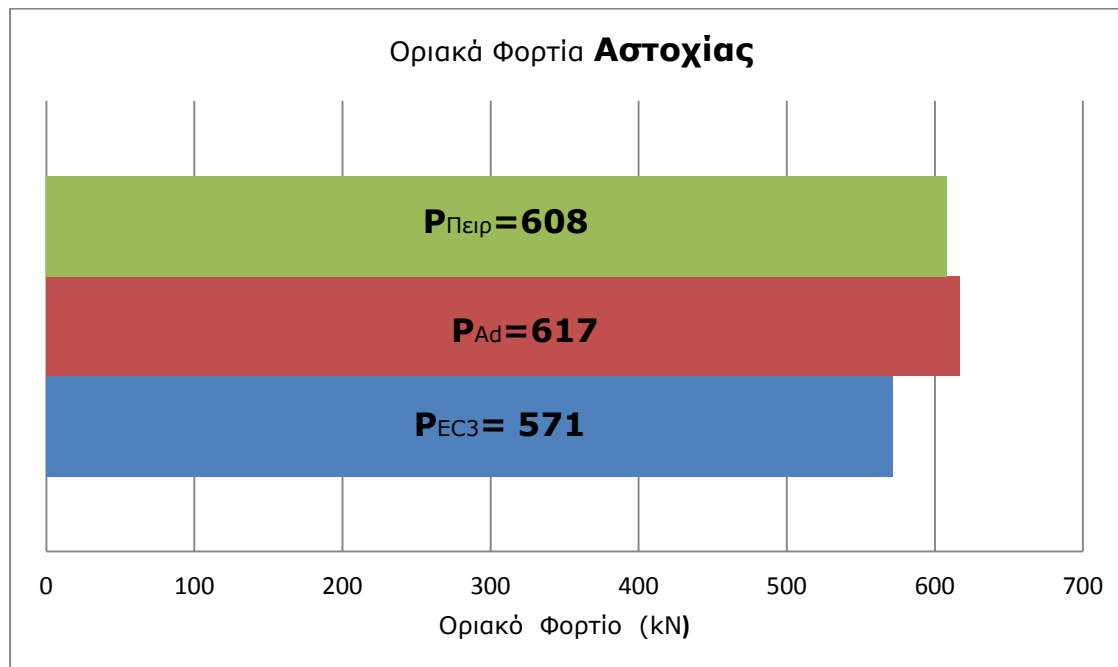
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 29.32 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01024 m και της έβδομης $8.09 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=-0.8\%$, $A2=6.9\%$, $A3=7.6\%$.



Πίνακας 3.26 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #2, 1AoR

3.3.2.4 Υποστύλωμα #4 (εκκ. 8.4cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 30.79 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01024 m και της έβδομης $8.68 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστύλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=-1.5\%$, $A2=6.0\%$, $A3=7.4\%$.



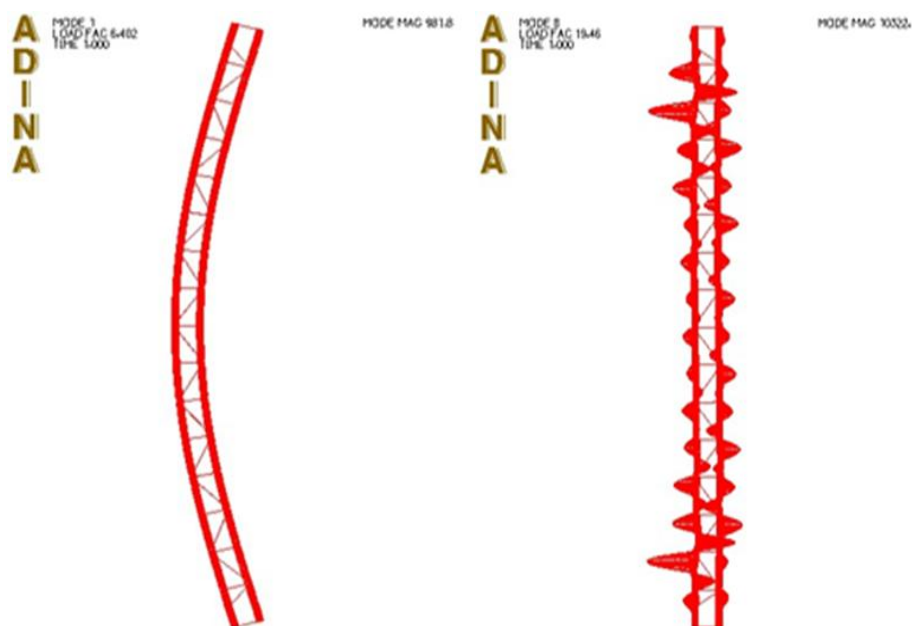
Πίνακας 3.27 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #4, 1AoR

3.4 Σειρά 1AmR

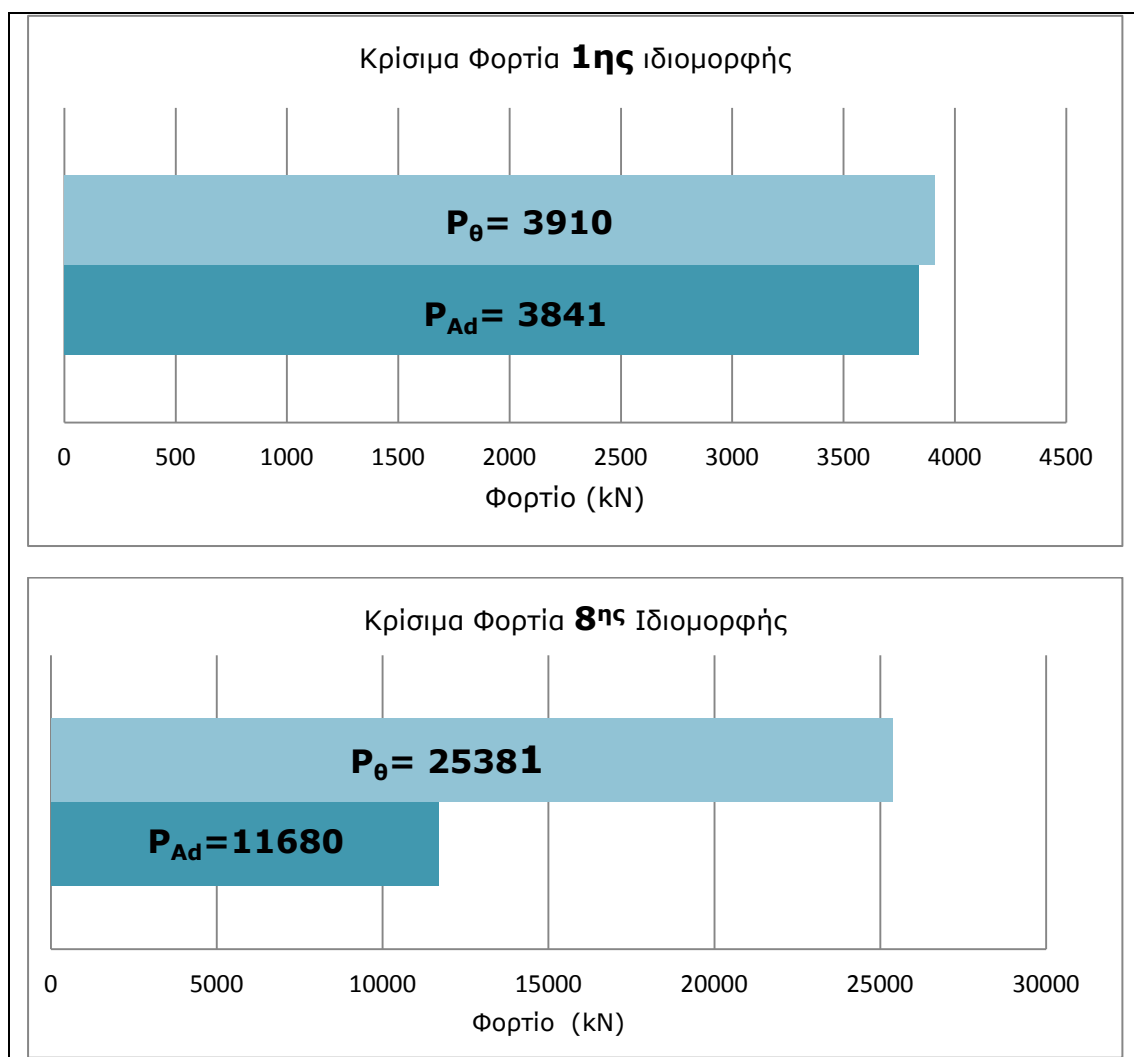
3.4.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)

Στο Σχ. 3.28 φαίνονται η καθολική και η πρώτη τοπική ιδιομορφή (λυγισμός Euler του πέλματος μεταξύ κατάλληλων σημείων). Ο Πίνακας 3.29 περιέχει τα φορτία των ιδιομορφών αυτών συγκρινόμενα με τα θεωρητικώς υπολογισμένα (Εξ. 1.6, 1.8). Η % απόκλιση μεταξύ θεωρητικού φορτίου λυγισμού και φορτίου από την ανάλυση LBA του Adina, $([P_{\text{Ad}} - P_{\text{θ}}]/P_{\text{Ad}})$, είναι για τις δύο ιδιομορφές -1.8% και -117.3% αντίστοιχα.

Στο παρόν υποστύλωμα όμως, δεν επιτυγχάνεται σύγκλιση της ανάλυσης για τοπική ιδιομορφή μεταξύ των φατνωμάτων διότι, εξαιτίας του πολύ μικρού ύψους φατνώματος (0.32 m), το αναμενόμενο φορτίο είναι πολύ μεγάλο. Αυτό σημαίνει ότι ενδεχομένως να μην είναι κρίσιμη μια τέτοιου είδους παραμόρφωση δεδομένης της γεωμετρίας του υποστυλώματος. Αντί της αναμενόμενης τοπικής ιδιομορφής, (λυγισμός Euler μεταξύ των ορθοστατών), χρησιμοποιείται μία «πλακοειδούς» μορφής με διδιάστατη παραμόρφωση, μεγέθους προβλεπόμενου από τον Ευρωκώδικα. Όπως αποδεικνύουν αναλύσεις χωρίς αυτή την ιδιομορφή, τα αποτελέσματα δε μεταβάλλονται σχεδόν καθόλου.



Σχ. 3.28 Πρώτη καθολική και πρώτη τοπική ιδιομορφή, 1^η και 8^η αντίστοιχα



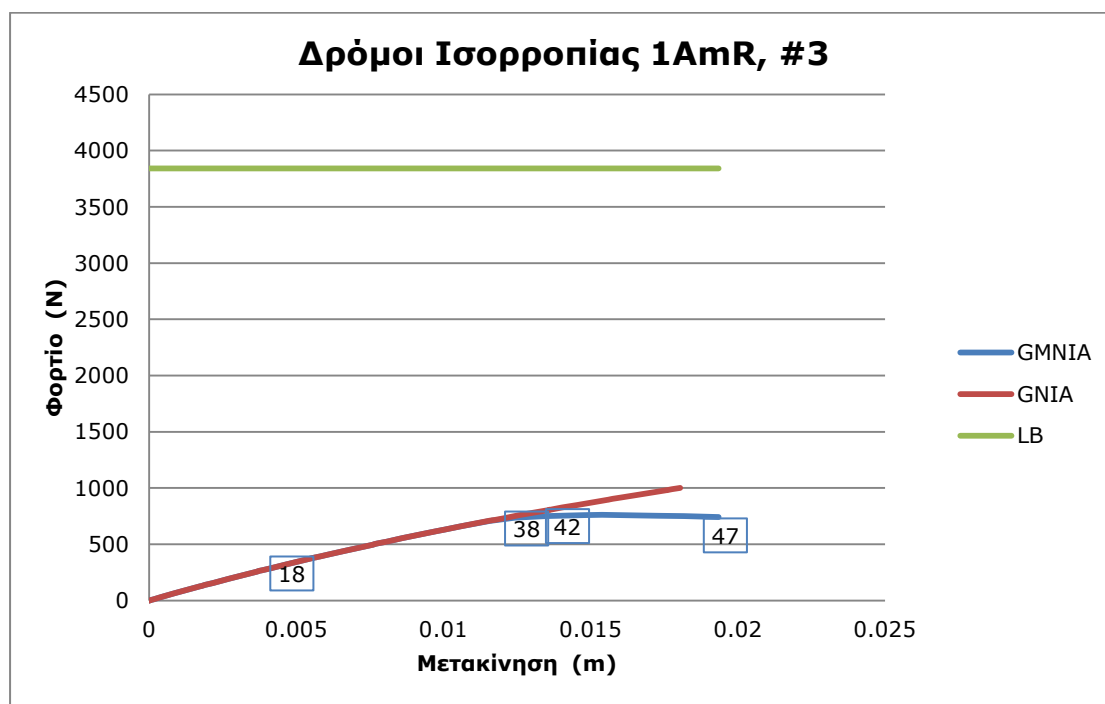
Πίνακας 3.29 Κρίσιμα Φορτία Ιδιομορφών, θεωρητικά και από το Adina

3.4.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)

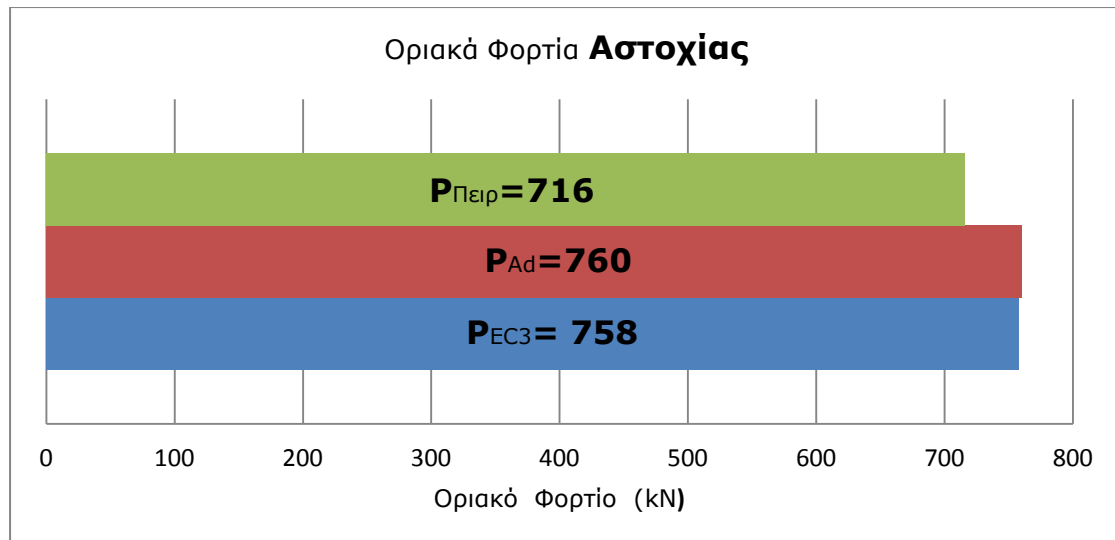
Στη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας τίθενται γεωμετρικές ατέλειες πρώτης και όγδοης ιδιομορφής μεγέθους που ορίζεται σύμφωνα με τον EC-3. Ο συνδυασμός εκκεντρότητας και προσανατολισμού ατελειών είναι ο δυσμενέστερος δυνατός. Συγκεκριμένα, η εκκεντρότητα και η καθολική ατέλεια ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το πέλμα στο οποίο εισήχθη η τοπική ατέλεια να είναι το πλέον θλιβόμενο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ξεκινώντας από το 3^ο υποστύλωμα της σειράς.

3.4.2.1 Υποστύλωμα #3 (εκκ. 4.15cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 28.83 kN/cm². Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01024m και της ενδέκατης 5.42·10⁻⁵m. Για το υποστύλωμα #3 διεξάγεται, εκτός από ανάλυση GMNIA, και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, GNIA. Οι % αποκλίσεις για το υποστύλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: A1=-6.2%, A2=-5.9%, A3=0.3%.

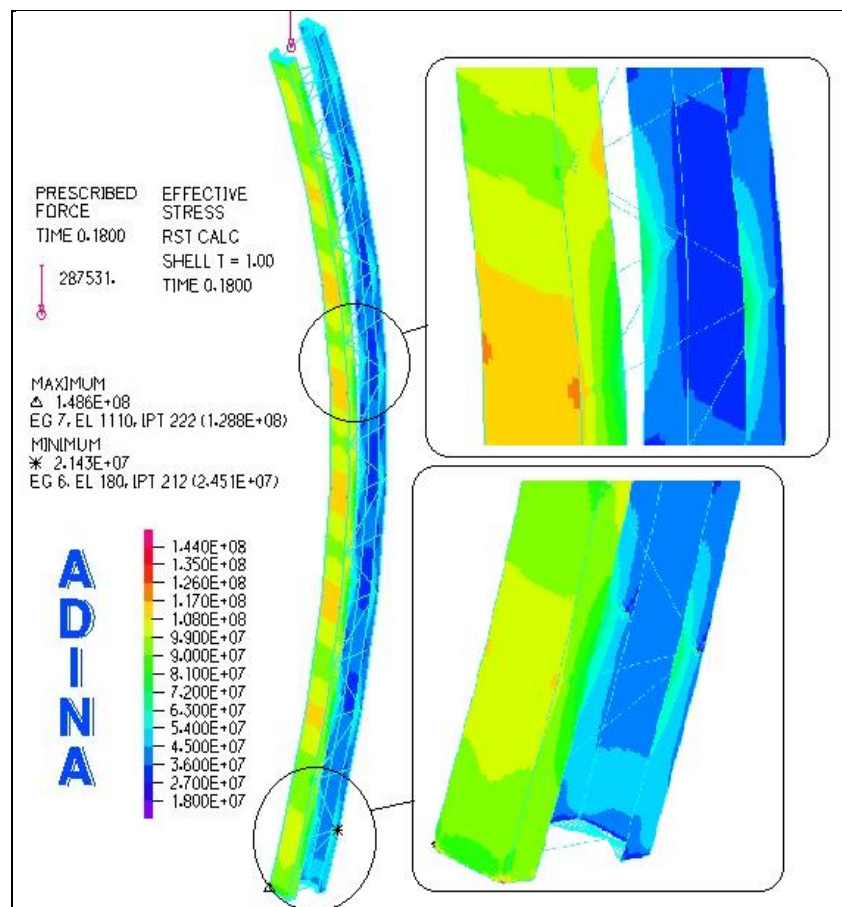


Σχ. 3.30 Δρόμοι Ισορροπίας για αναλύσεις GMNIA, GNIA και ύψος κρίσιμου φορτίου

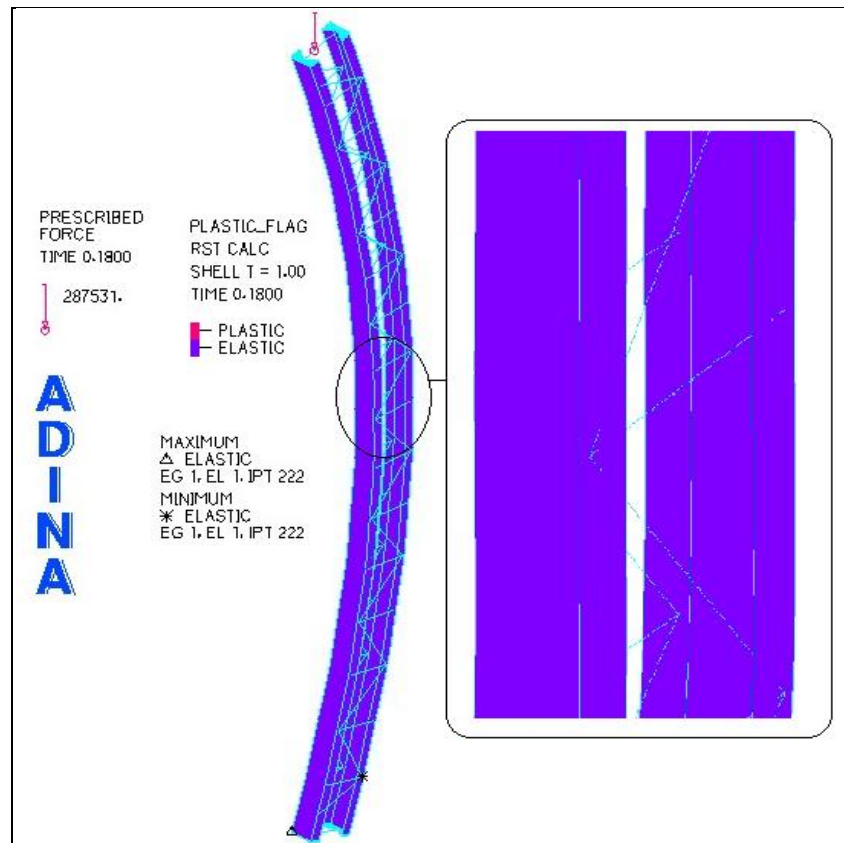
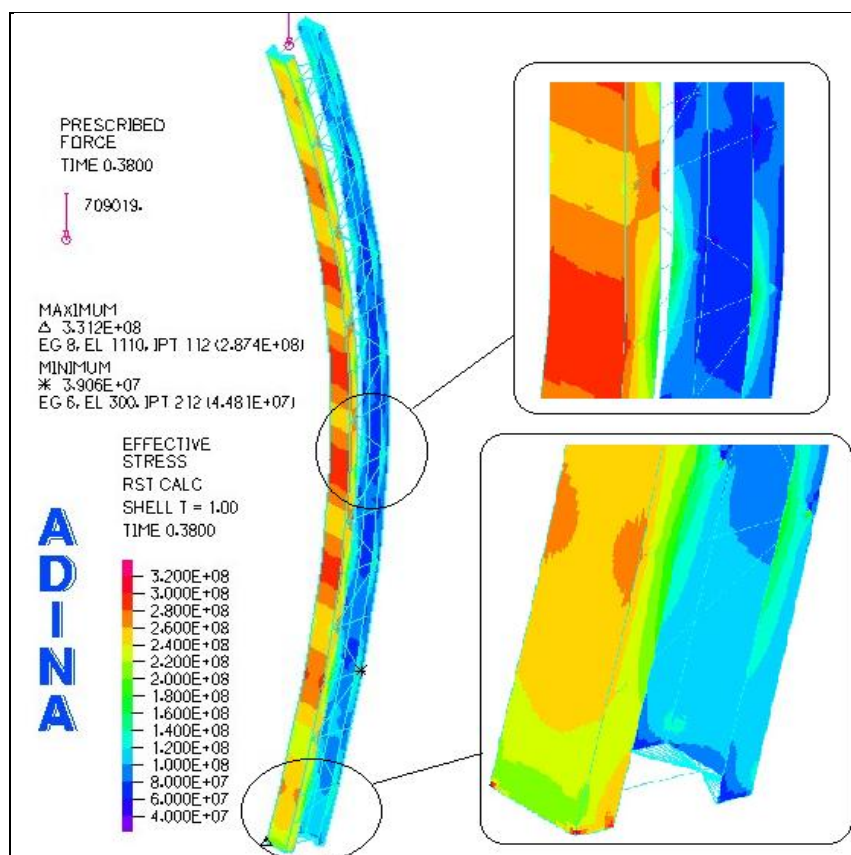


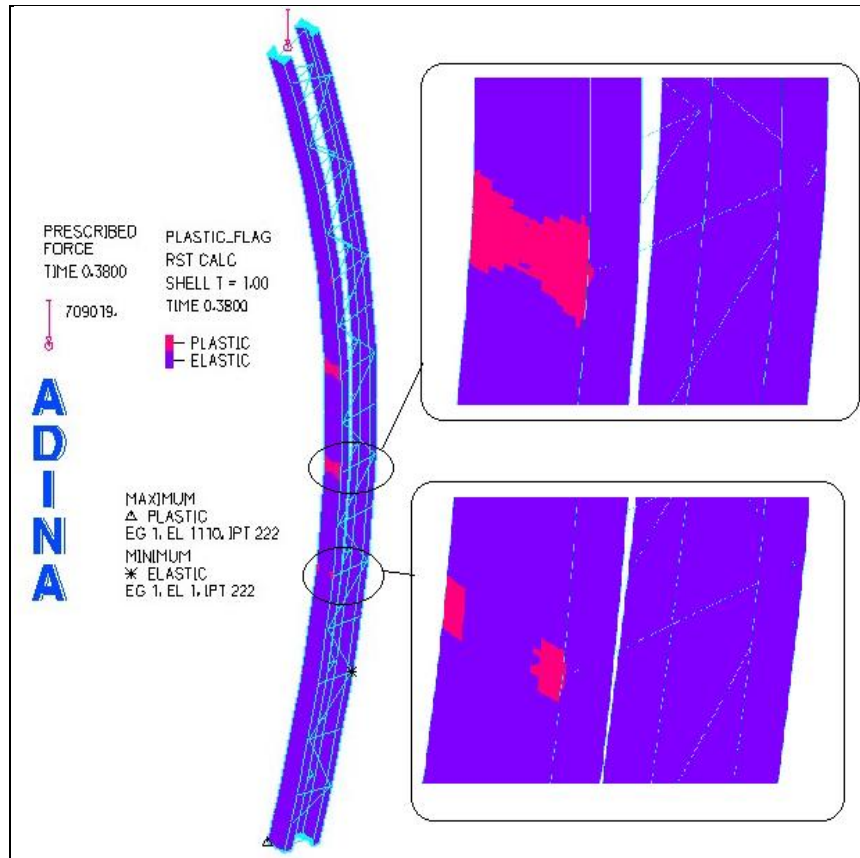
Πίνακας 3.31 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #3, 1AmR

Στο δρόμο ισορροπίας της ανάλυσης GMNIA σημειώνονται 4 χαρακτηριστικά σημεία των οποίων οι εντατικές και παραμορφωσιακές καταστάσεις φαίνονται στα Σχ. 3.32 έως 3.39.

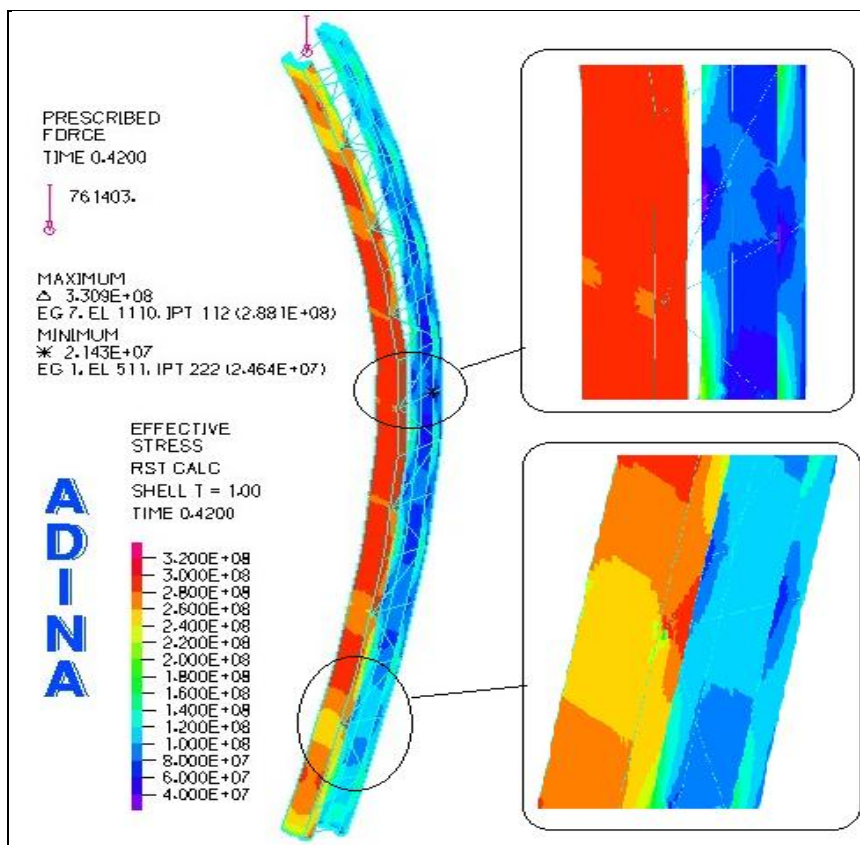


Σχ. 3.32 Τάσεις von Mises- Βήμα 18^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)

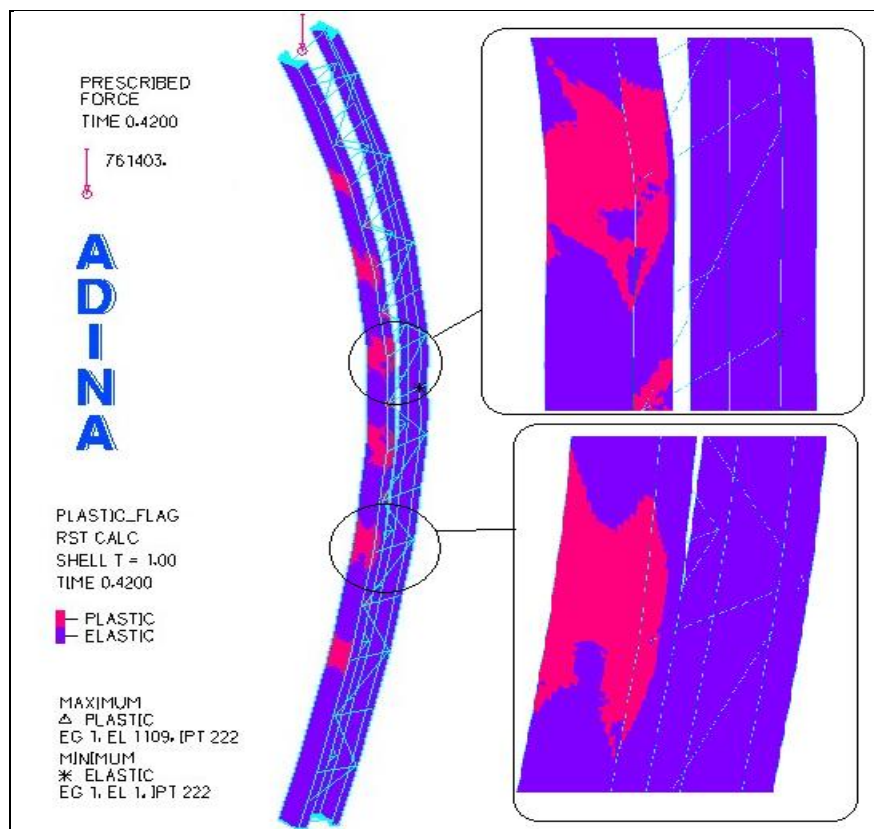
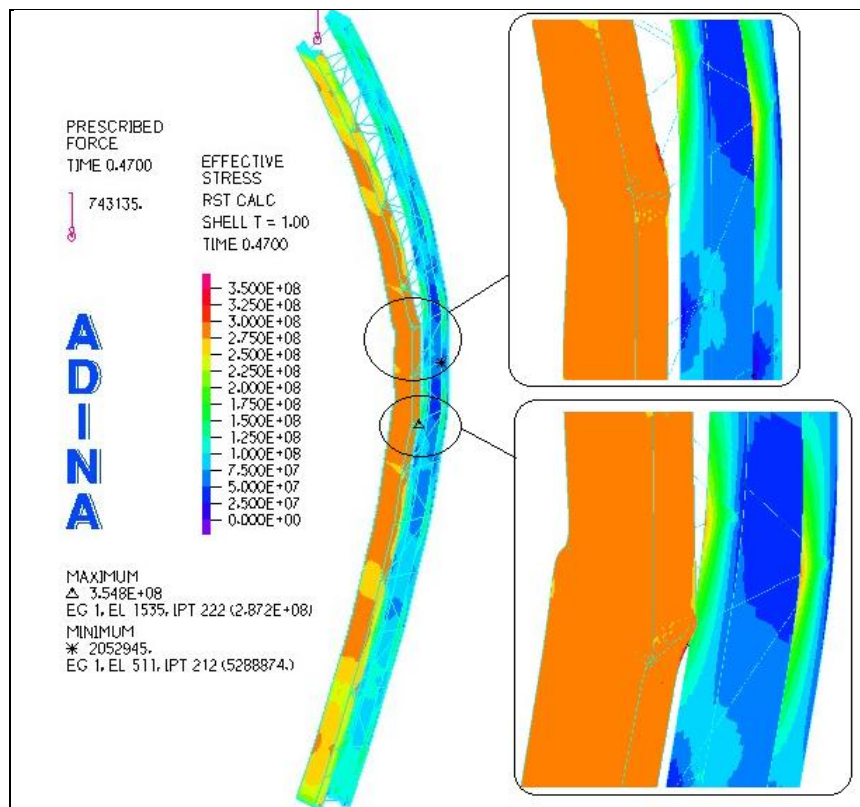
Σχ. 3.33 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 18^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)Σχ. 3.34 Τάσεις von Mises- Βήμα 38^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)

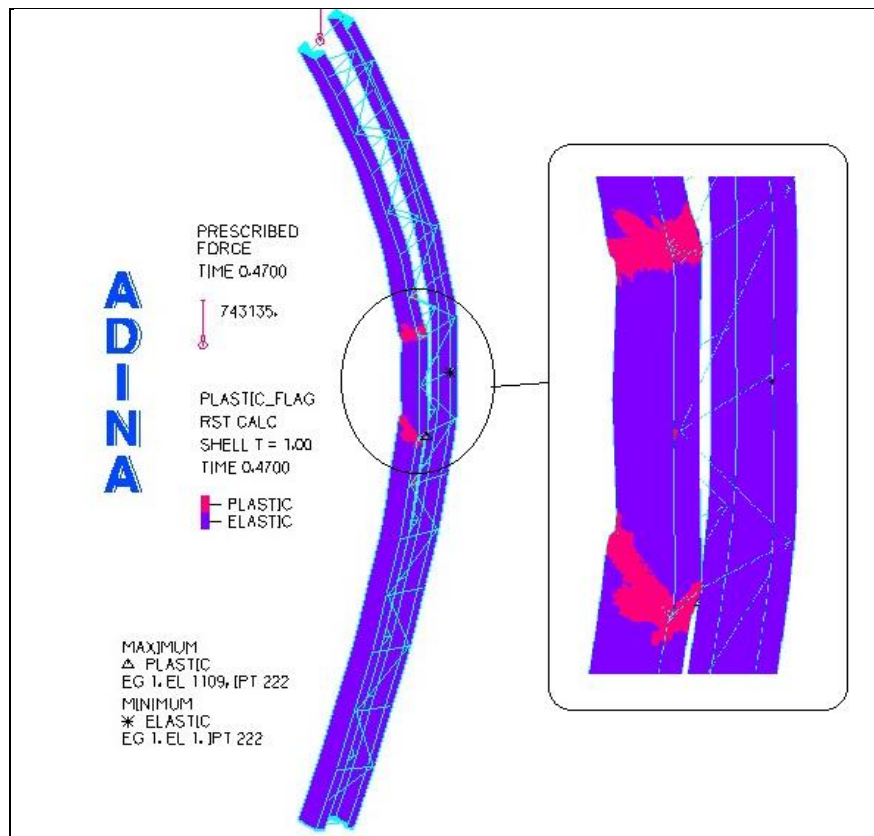


Σχ. 3.35 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 38^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)



Σχ. 3.36 Τάσεις von Mises- Βήμα 42^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)

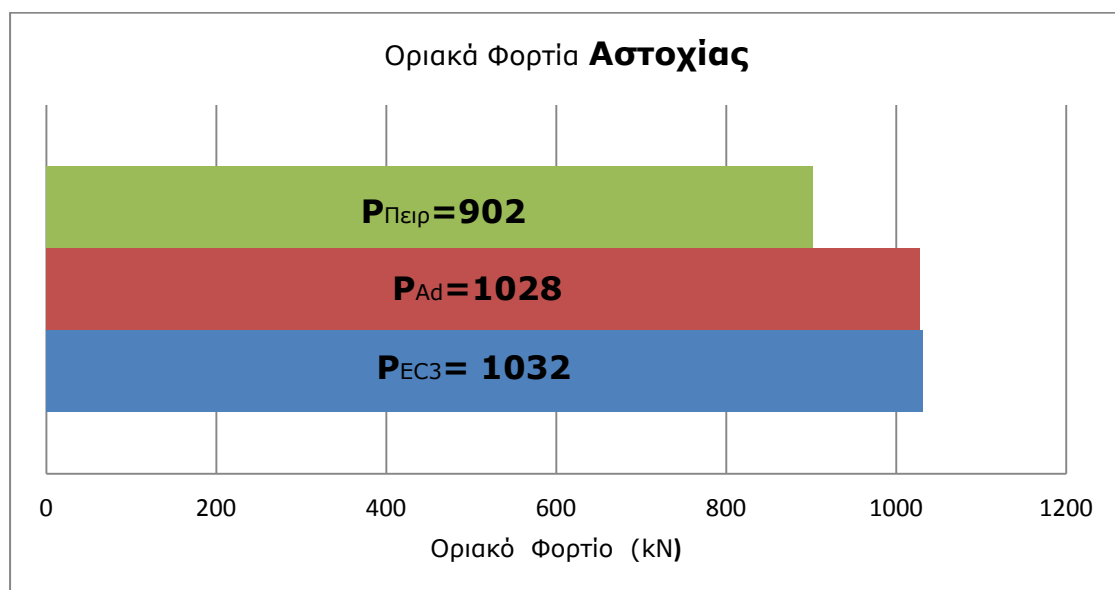
Σχ. 3.37 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 42^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)Σχ. 3.38 Τάσεις von Mises- Βήμα 47^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)



Σχ. 3.39 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 47^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)

3.4.2.2 Υποστυλώμα #1 (εκκ. 0.5cm)

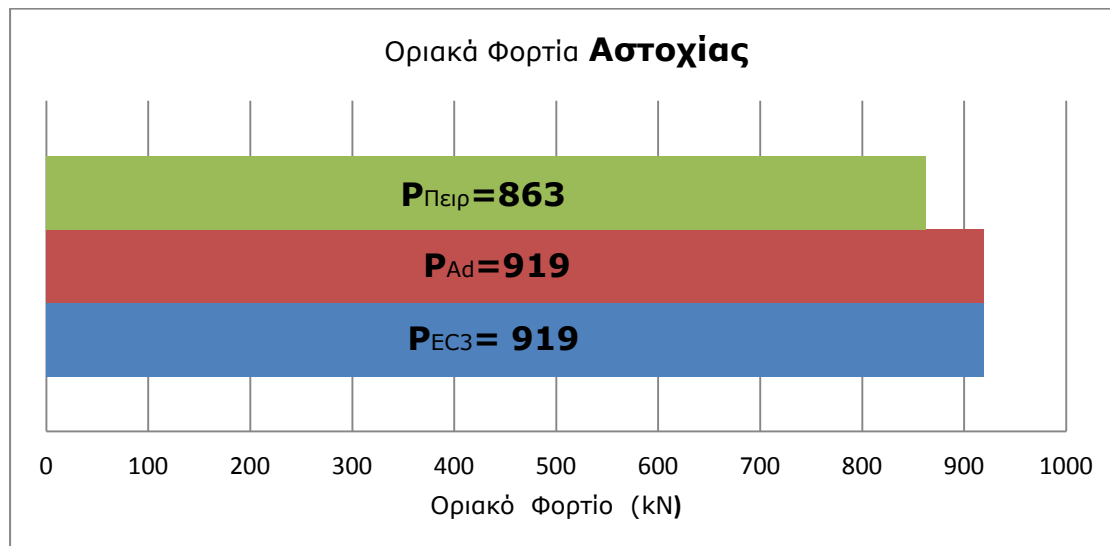
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 30.00 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01024m και της ενδέκατης $6.94 \cdot 10^{-5}\text{m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=-13.9\%$, $A2=-14.4\%$, $A3=-0.3\%$.



Πίνακας 3.40 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #1, 1AmR

3.4.2.3 Υποστύλωμα #2 (εκκ. 1.5cm)

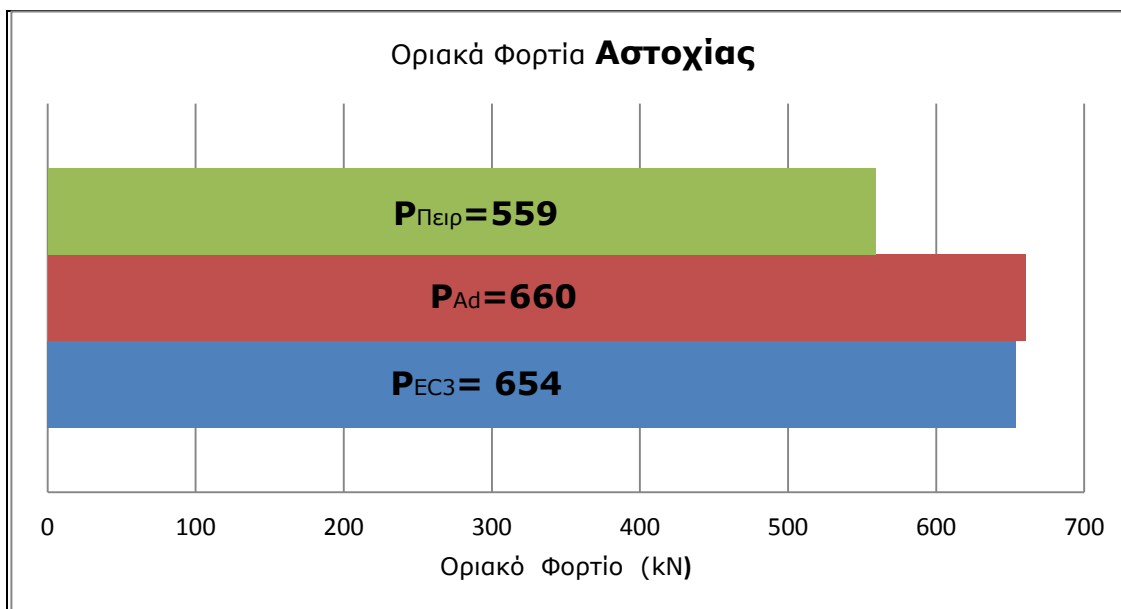
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 29.03 kN/cm². Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01024m και της ενδέκατης 5.67·10⁻⁵m. Οι % αποκλίσεις για το υποστύλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: A1=-6.5%, A2=-6.5%, A3=0.0%.



Πίνακας 3.41 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #2, 1AmR

3.4.2.4 Υποστύλωμα #4 (εκκ. 8.0cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 30.99 kN/cm². Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01024m και της ενδέκατης 8.22·10⁻⁵m. Οι % αποκλίσεις για το υποστύλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: A1=-18.1%, A2=-17.0%, A3=1.0%.



Πίνακας 3.42 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #4, 1AmR

3.5 Σειρά 1AoRG

3.5.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)

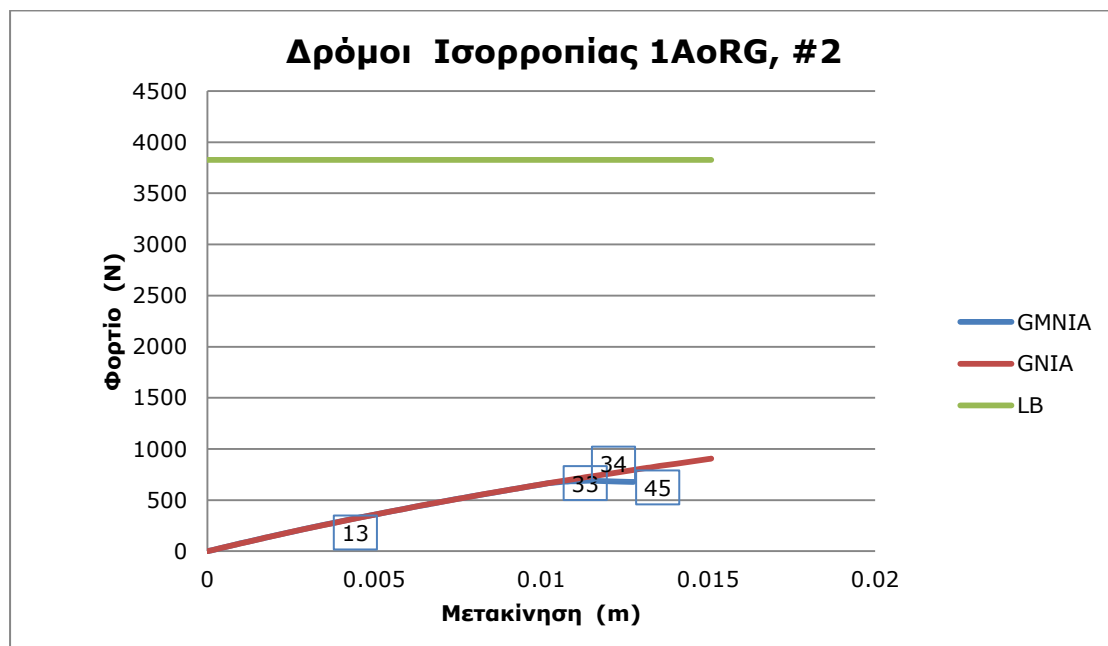
Τα αποτελέσματα είναι ίδια με της σειράς 1AoR (ενότητα 3.3.1).

3.5.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)

Στη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας τίθενται γεωμετρικές ατέλειες πρώτης και έβδομης ιδιομορφής μεγέθους που ορίζεται σύμφωνα με τον EC-3. Ο συνδυασμός εκκεντρότητας και προσανατολισμού ατελειών είναι ο δυσμενέστερος δυνατός. Συγκεκριμένα, η εκκεντρότητα και η καθολική ατέλεια ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το πέλμα στο οποίο εισήχθη η τοπική ατέλεια να είναι το πλέον θλιβόμενο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ξεκινώντας από το 2^ο υποστύλωμα της σειράς.

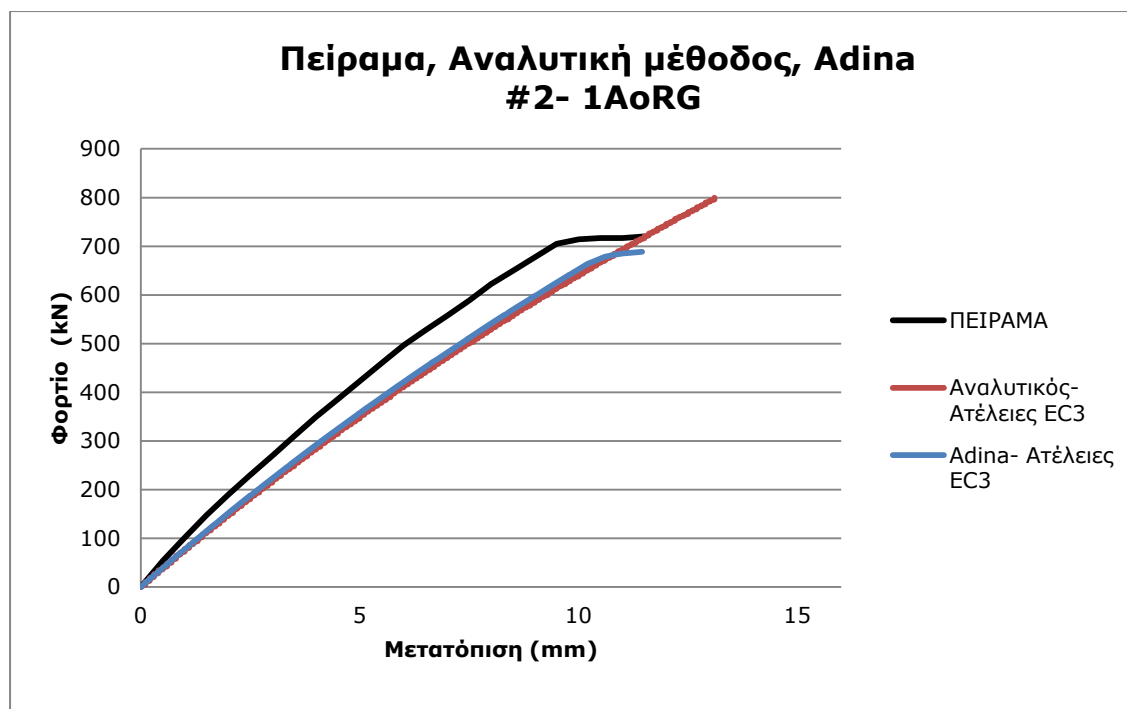
3.5.2.1 Υποστύλωμα #2 (εκκ. 4.0cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 26.47 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01024 m και της έβδομης $7.53 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Για το υποστύλωμα #2 διεξάγεται, εκτός από ανάλυση GMNIA, και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, GNIA.



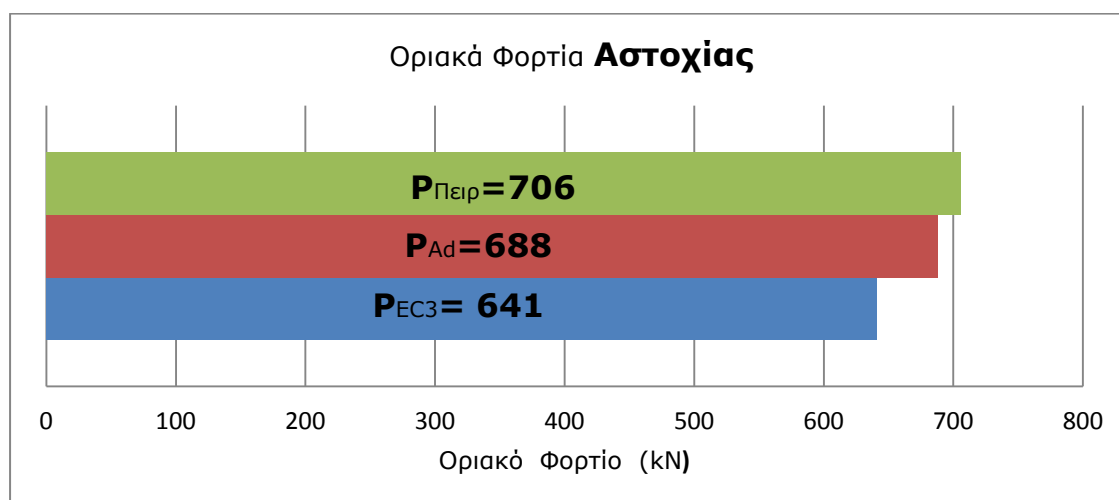
Σχ. 3.43 Δρόμοι Ισορροπίας για αναλύσεις GMNIA, GNIA και ύψος κρίσιμου φορτίου

Για το υποστύλωμα #2 υπάρχει και πειραματικός δρόμος ισορροπίας. Στο Σχ. 3.44 απεικονίζονται ο πειραματικός αυτός δρόμος, ο αναλυτικός σύμφωνα με τη μέθοδο του Κεφ. 1 (Εξ. 1.24) και ο δρόμος του Adina. Οι δύο τελευταίες αναλύσεις έγιναν με ατέλειες κατά EC3. Είναι εμφανής η ταύτιση της αναλυτικής μεθόδου με το Adina. Διαφέρουν στο ότι η αναλυτική μέθοδος δεν αποδίδει κοντά στο οριακό φορτίο την πλαστικοποίηση (πτώση κλίσης, πλατώ διαρροής), καθώς λαμβάνει υπόψη ελαστικό υλικό.



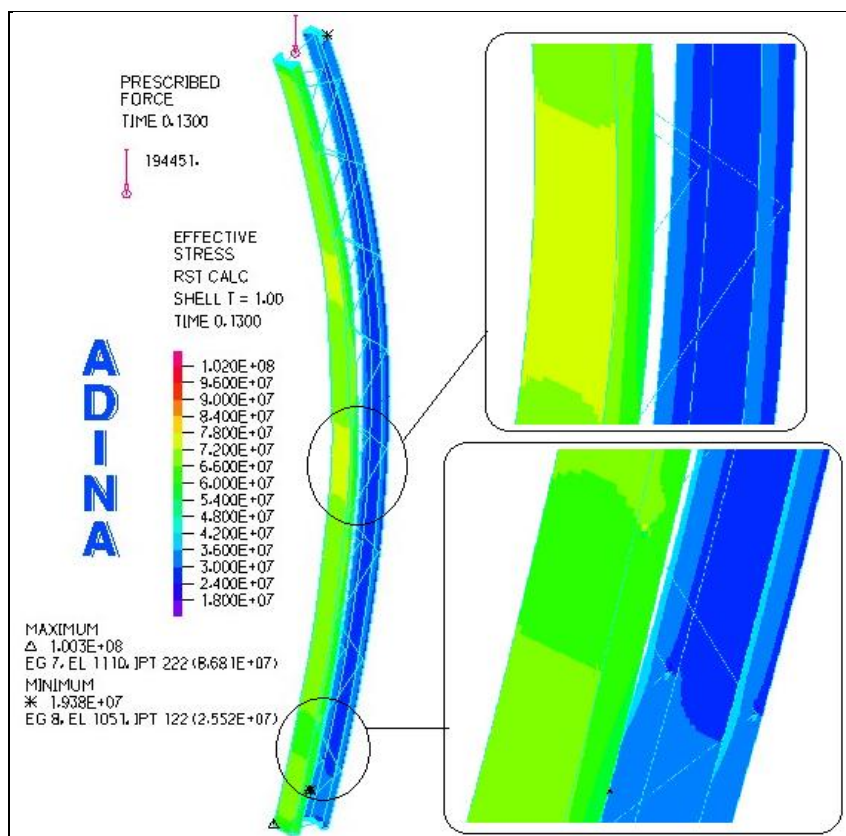
Σχ. 3.44 Δρόμοι Ισορροπίας από το Πείραμα, την Αναλυτική μέθοδο (Κεφ. 5) και το Adina

Οι % αποκλίσεις για το υποστυλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=2.6\%$, $A2=9.2\%$, $A3=6.8\%$.

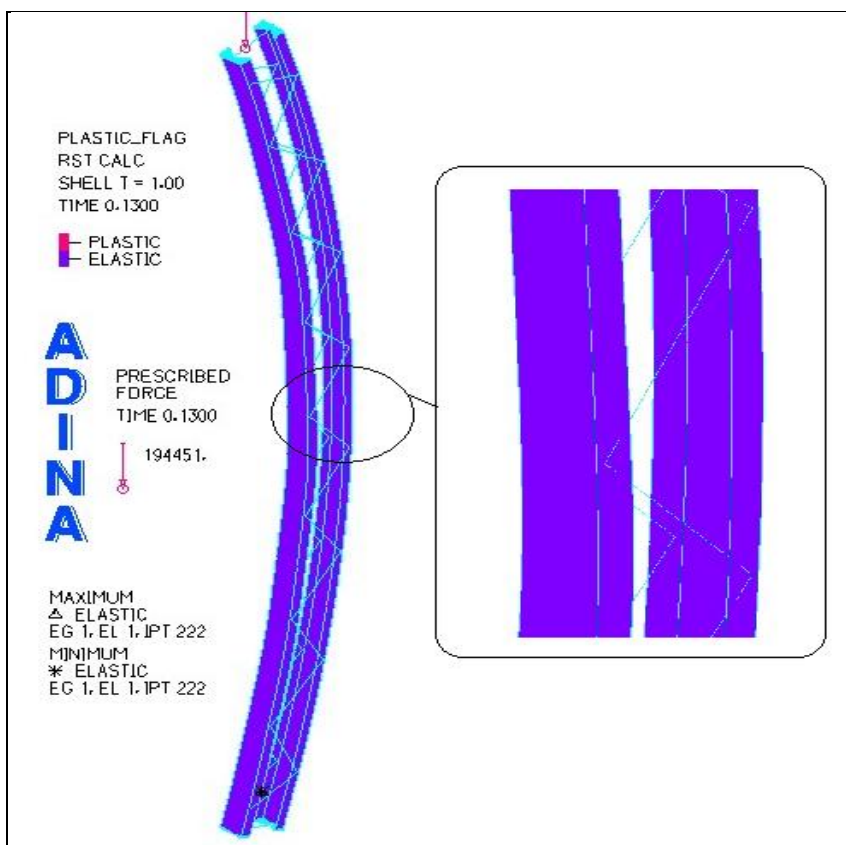


Πίνακας 3.45 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #2, 1AoRG

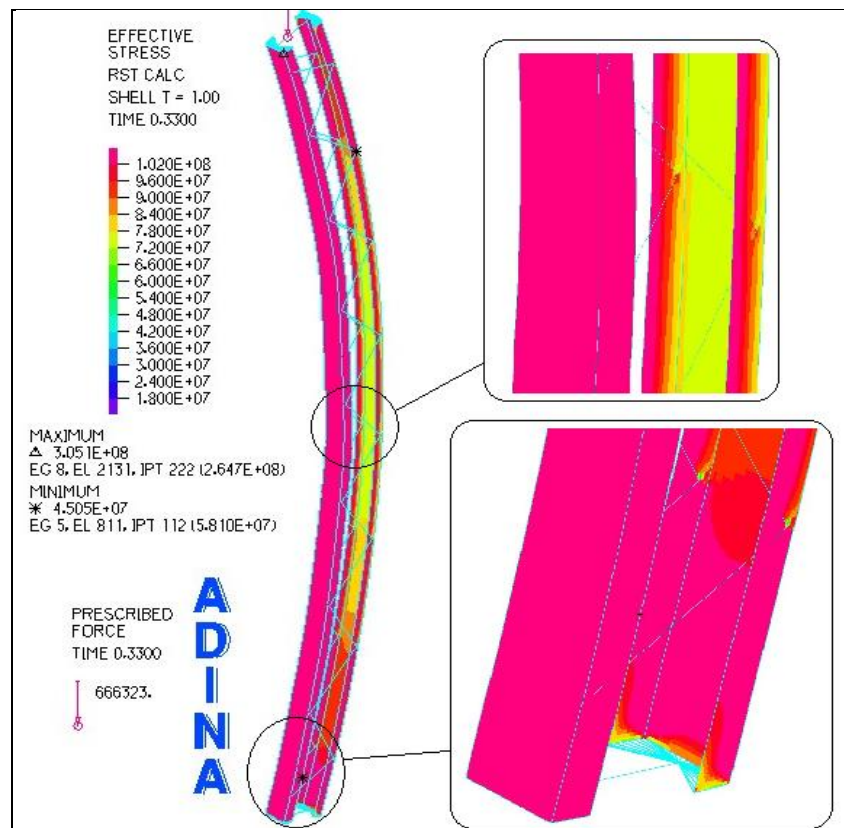
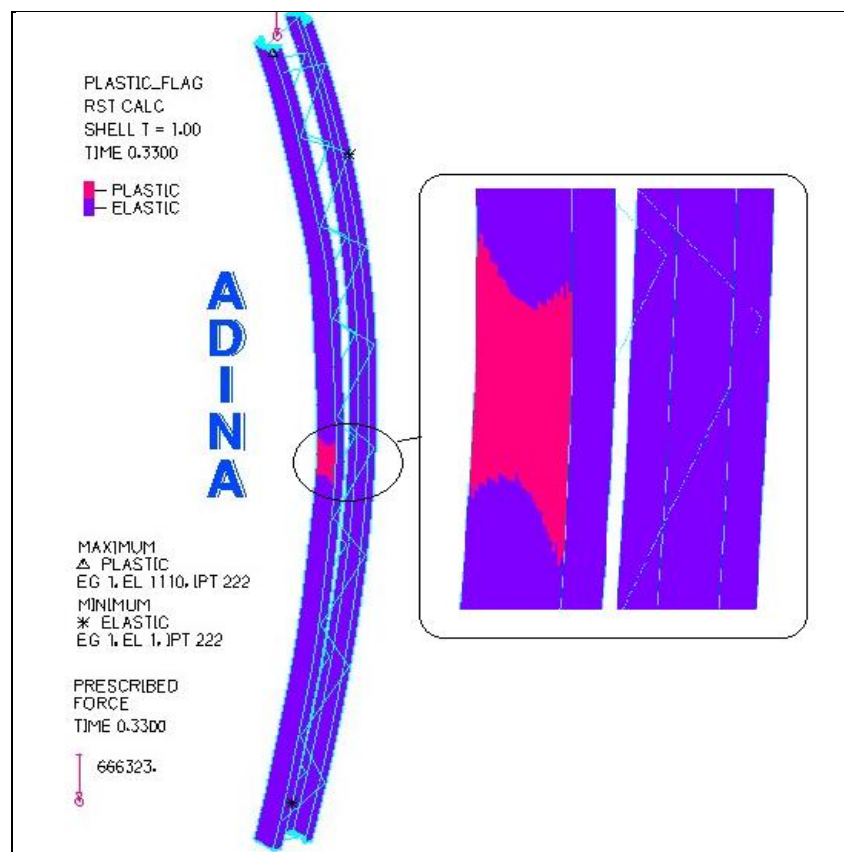
Στο δρόμο ισορροπίας της ανάλυσης GMNIA σημειώνονται 4 χαρακτηριστικά σημεία των οποίων οι εντατικές και παραμορφωσιακές καταστάσεις φαίνονται στα Σχ. 3.46 έως 3.53.

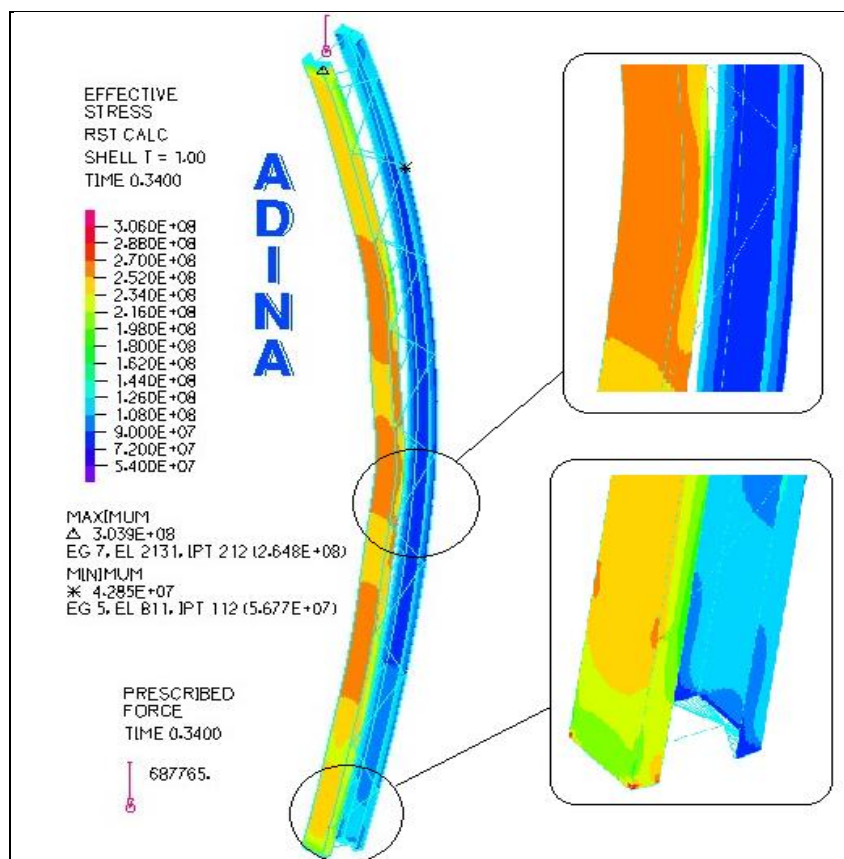
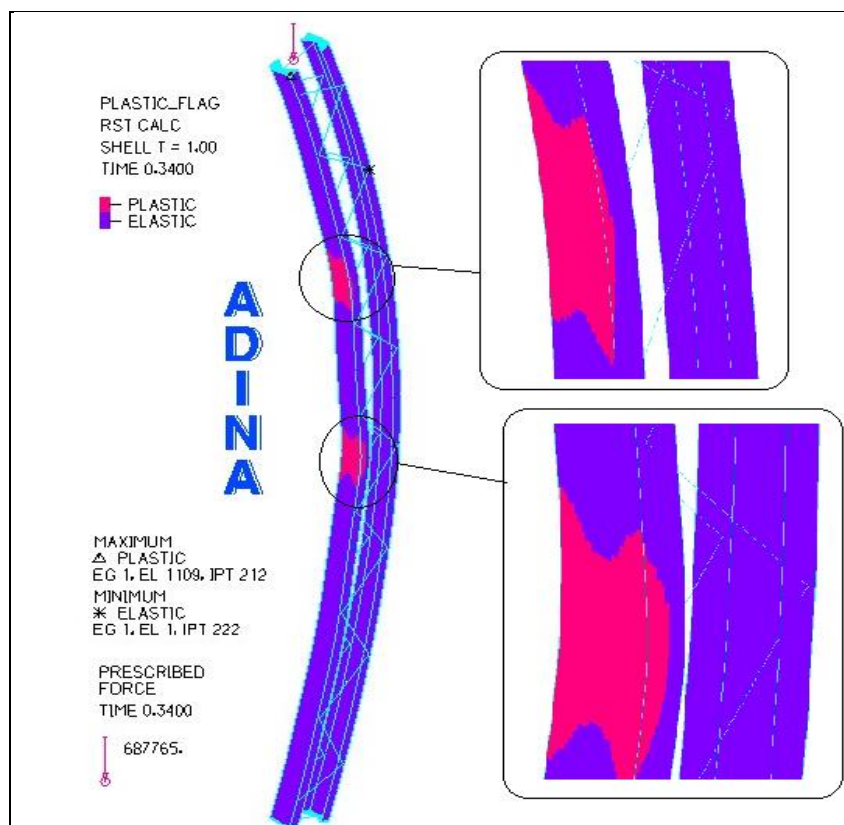


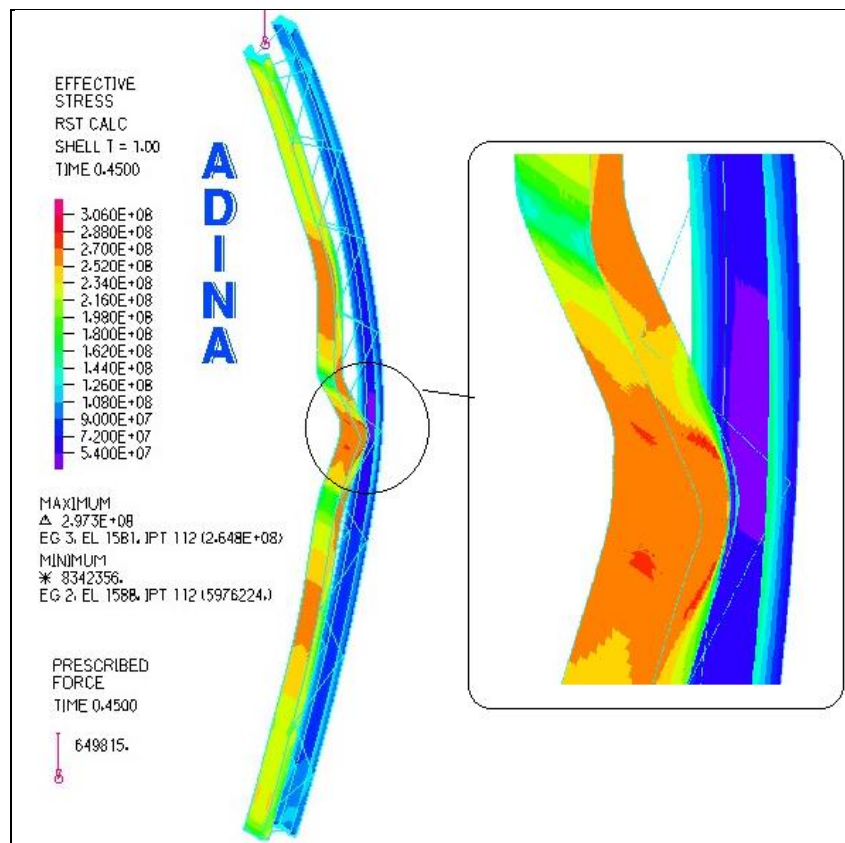
Σχ. 3.46 Τάσεις von Mises- Βήμα 13^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)



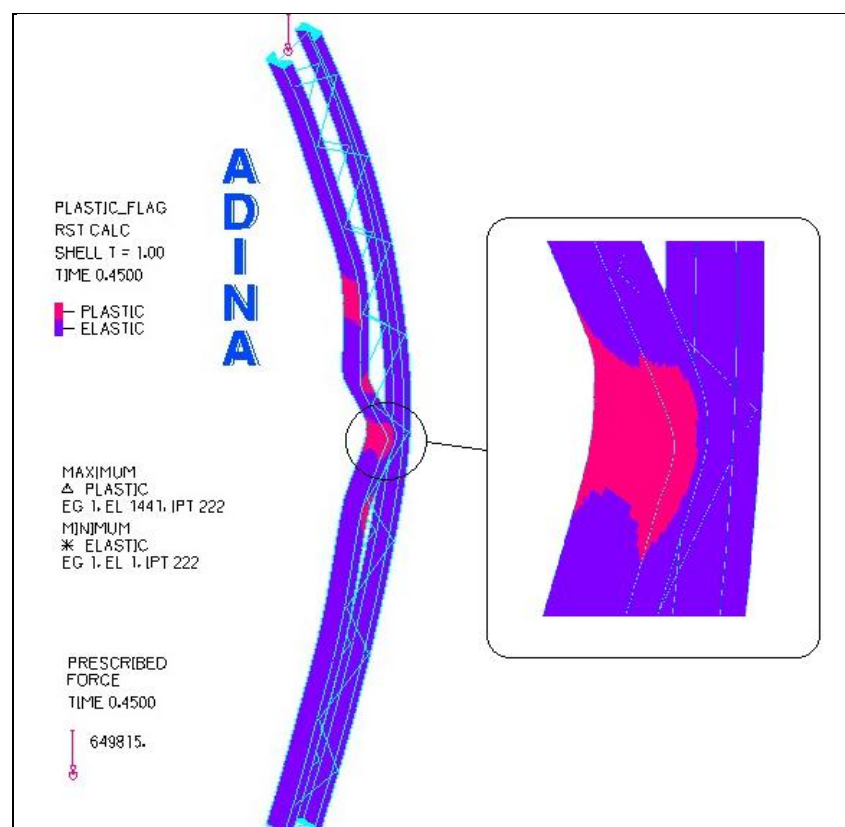
Σχ. 3.47 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 13^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)

Σχ. 3.48 Τάσεις von Mises- Βήμα 33^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)Σχ. 3.49 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 33^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)

Σχ. 3.50 Τάσεις von Mises- Βήμα 34^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)Σχ. 3.51 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 34^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)



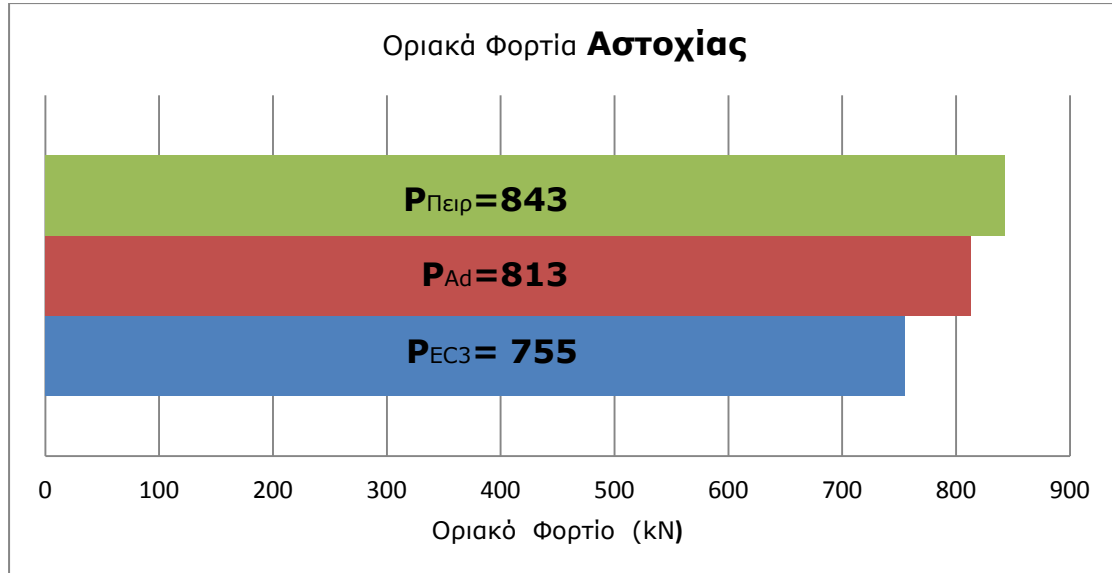
Σχ. 3.52 Τάσεις von Mises- Βήμα 45° ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)



Σχ. 3.53 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 45° ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)

3.5.2.2 Υποστυλώμα #1 (εκκ. 1.63cm)

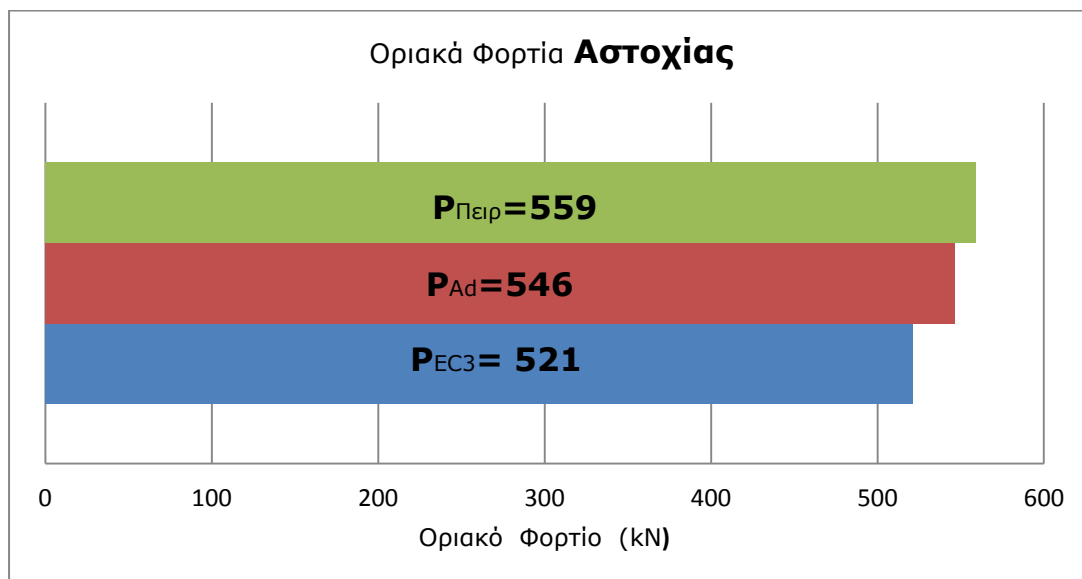
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 26.47 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01024 m και της έβδομης $7.53 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=3.6\%$, $A2=10.5\%$, $A3=7.1\%$.



Πίνακας 3.54 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #1, 1AoRG

3.5.2.3 Υποστυλώμα #3 (εκκ. 8.2cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 27.16 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01024 m και της έβδομης $7.72 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=2.3\%$, $A2=6.7\%$, $A3=4.6\%$.



Πίνακας 3.55 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #3, 1AoRG

3.6 Σειρά 1BoR

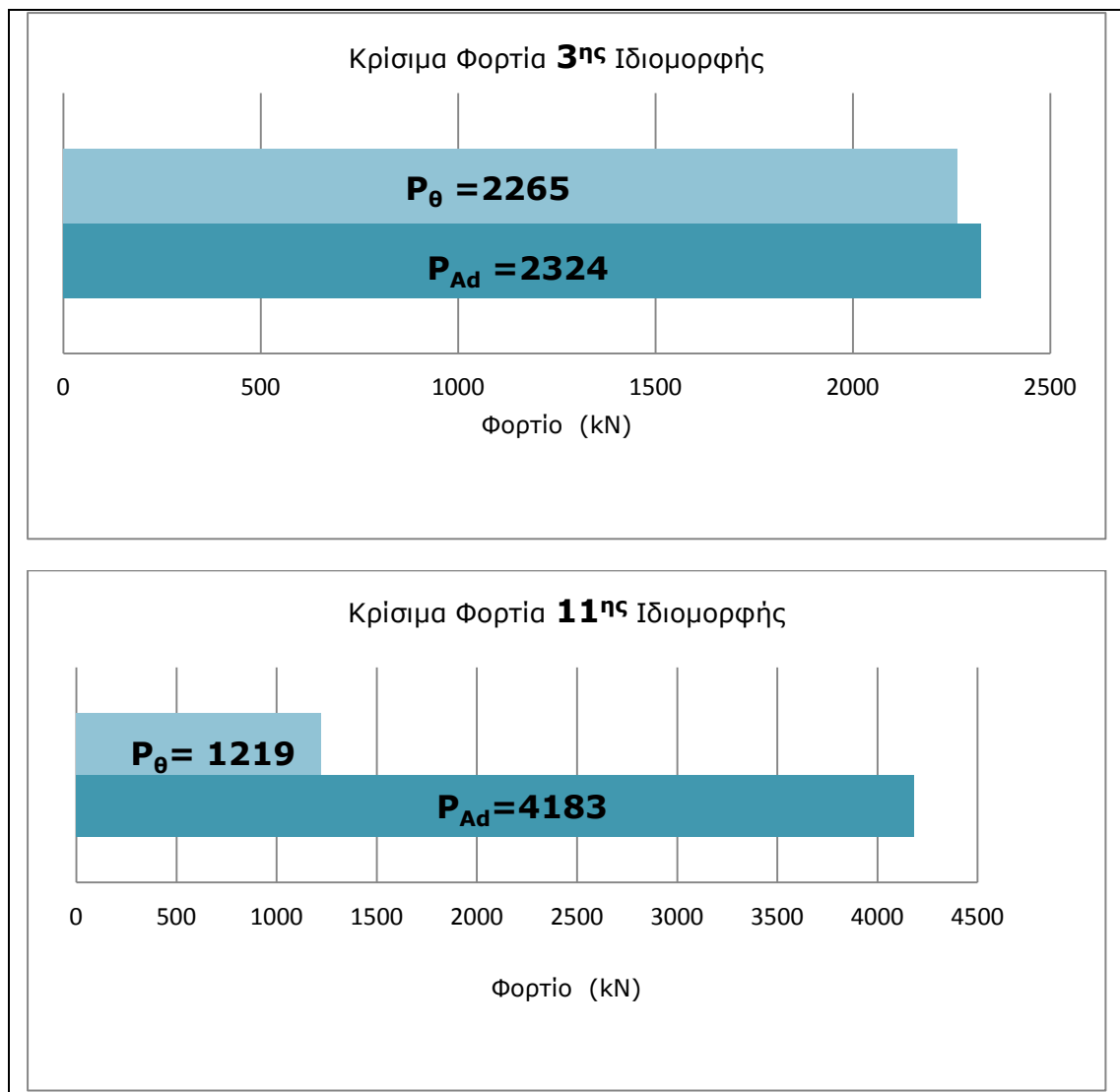
3.6.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)

Στο Σχ. 3.56 φαίνονται η καθολική και η πρώτη τοπική ιδιομορφή (λυγισμός Euler του πέλματος μεταξύ κατάλληλων σημείων). Ο Πίνακας 3.57 περιέχει τα φορτία των ιδιομορφών αυτών συγκρινόμενα με τα θεωρητικώς υπολογισμένα (Εξ. 1.6, 1.8). Η % απόκλιση μεταξύ θεωρητικού φορτίου λυγισμού και φορτίου από την ανάλυση LBA του Adina, $([P_{Ad}-P_{\theta}]/P_{Ad})$, είναι για τις δύο ιδιομορφές 2.5% και 70.8% αντίστοιχα.

Τα υποστυλώματα της σειράς 1BoR δεν ενδείκνυνται από γεωμετρικής άποψης. Η κακή τους γεωμετρία αντανακλάται στην αδυναμία πρόβλεψης της συμπεριφοράς τους μέσα από τις θεωρητικές σχέσεις. Οι τελευταίες, για να ισχύουν, πρέπει να αναφέρονται σε υποστυλώμα με τουλάχιστον 4 φατνώματα. Τα υποστυλώματα 1BoR έχουν 3.5. Άμεση συνέπεια είναι η ανυπαρξία καθολικής ιδιομορφής, καθώς μόνο η τρίτη ιδιομορφή την προσεγγίζει- αρκετά στρεβλά. Επίσης, δε βρέθηκε τοπική ιδιομορφή με λυγισμό μεταξύ των ράβδων δικτύωσης. Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.56, τα πέλματα έχουν δύο σημεία καμψής μεταξύ των σημείων συμβολής των ράβδων οπότε η 11^η ιδιομορφή παρουσιάζεται σε πολύ πιο αυξημένο από το αναμενόμενο φορτίο.



Σχ. 3.56 Πρώτη καθολική και πρώτη τοπική ιδιομορφή, 3^η και 11^η αντίστοιχα



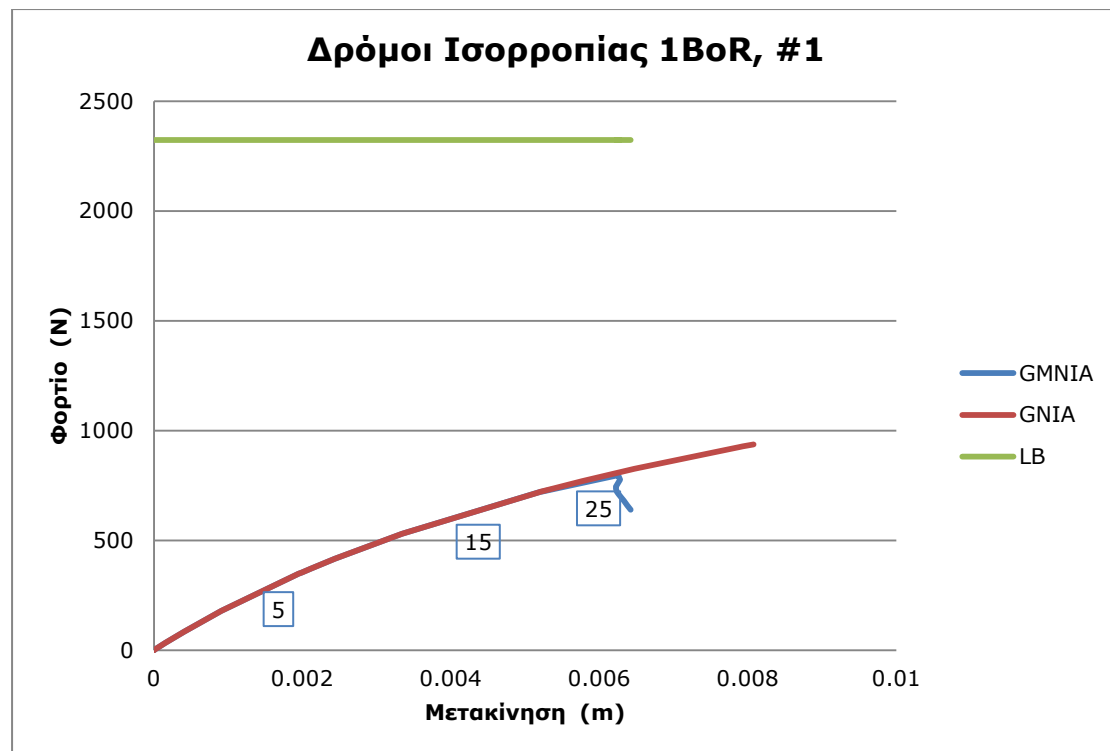
Πίνακας 3.57 Κρίσιμα Φορτία Ιδιομορφών, θεωρητικά και από το Adina

3.6.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)

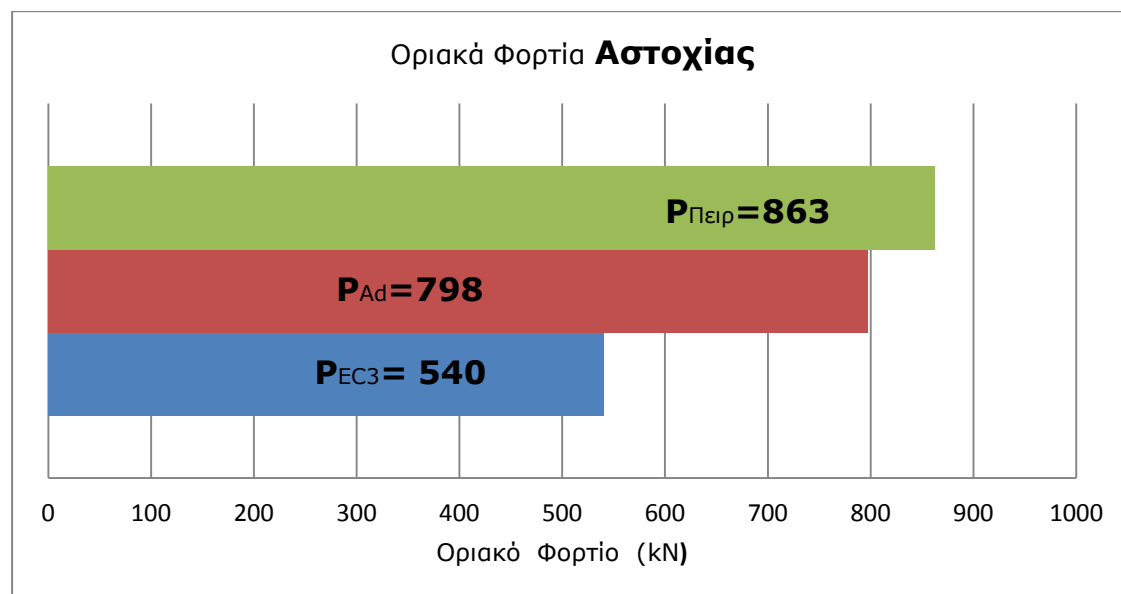
Στη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας τίθενται γεωμετρικές ατέλειες πρώτης και ενδέκατης ιδιομορφής μεγέθους που ορίζεται σύμφωνα με τον EC-3. Ο συνδυασμός εκκεντρότητας και προσανατολισμού ατελειών είναι ο δυσμενέστερος δυνατός. Συγκεκριμένα, η εκκεντρότητα και η καθολική ατέλεια ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το πέλμα στο οποίο εισήχθη η τοπική ατέλεια να είναι το πλέον θλιβόμενο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ξεκινώντας από το 1^ο υποστύλωμα της σειράς.

3.6.2.1 Υποστύλωμα #1 (εκκ. 0.5cm)

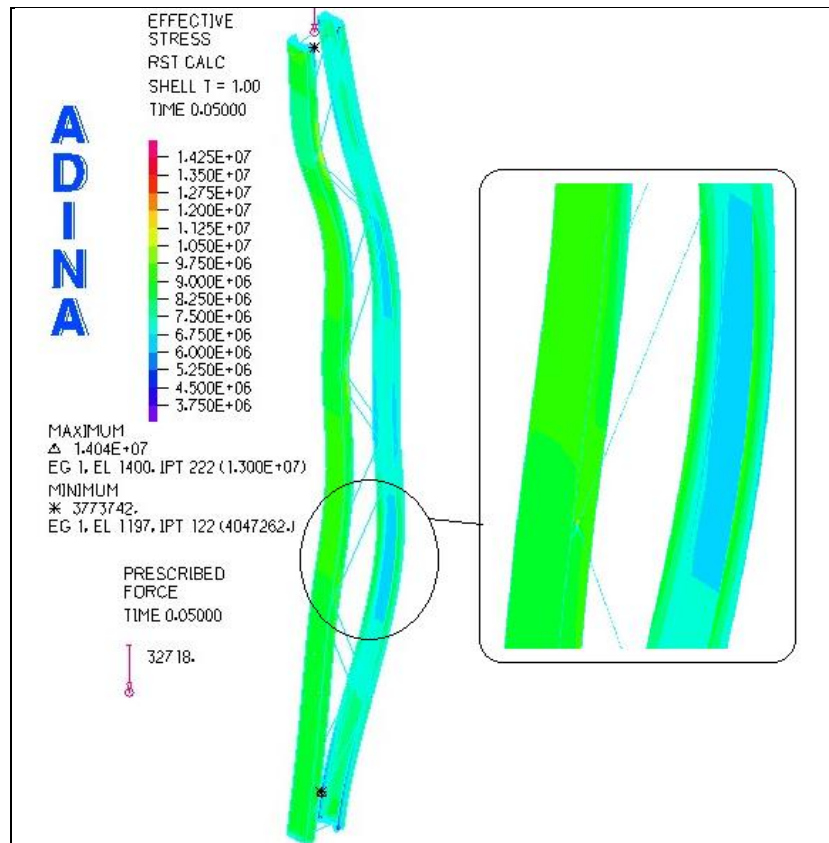
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 27.26 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01022 m και της έβδομης $9.84 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Για το υποστύλωμα #1 διεξάγεται, εκτός από ανάλυση GMNIA, και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, GNIA.



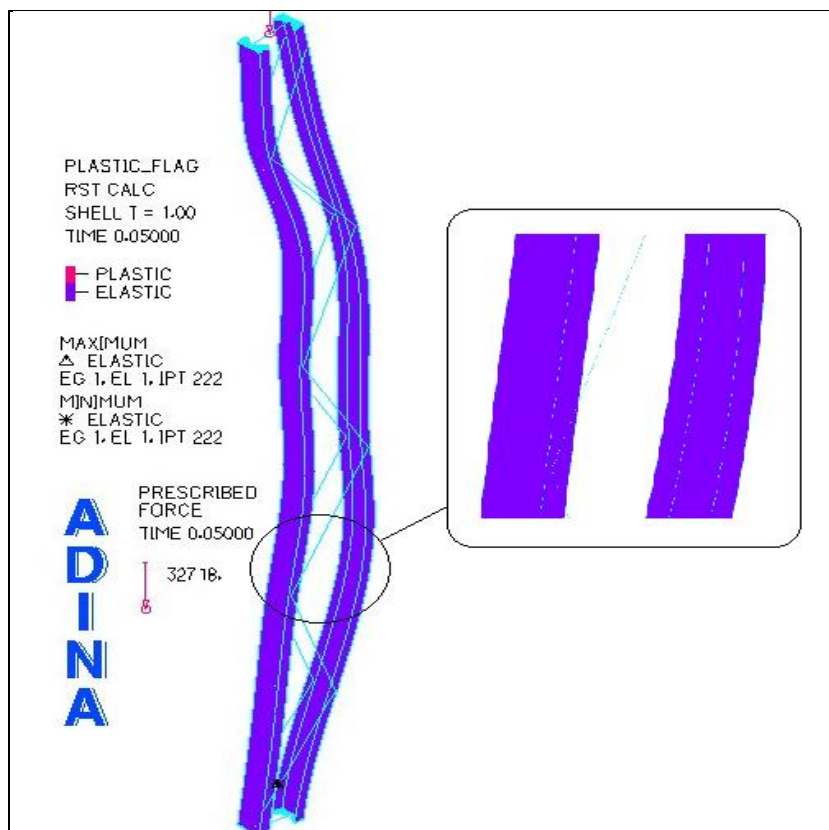
Οι % αποκλίσεις για το υποστύλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=7.6\%$, $A2=37.4\%$, $A3=32.3\%$.



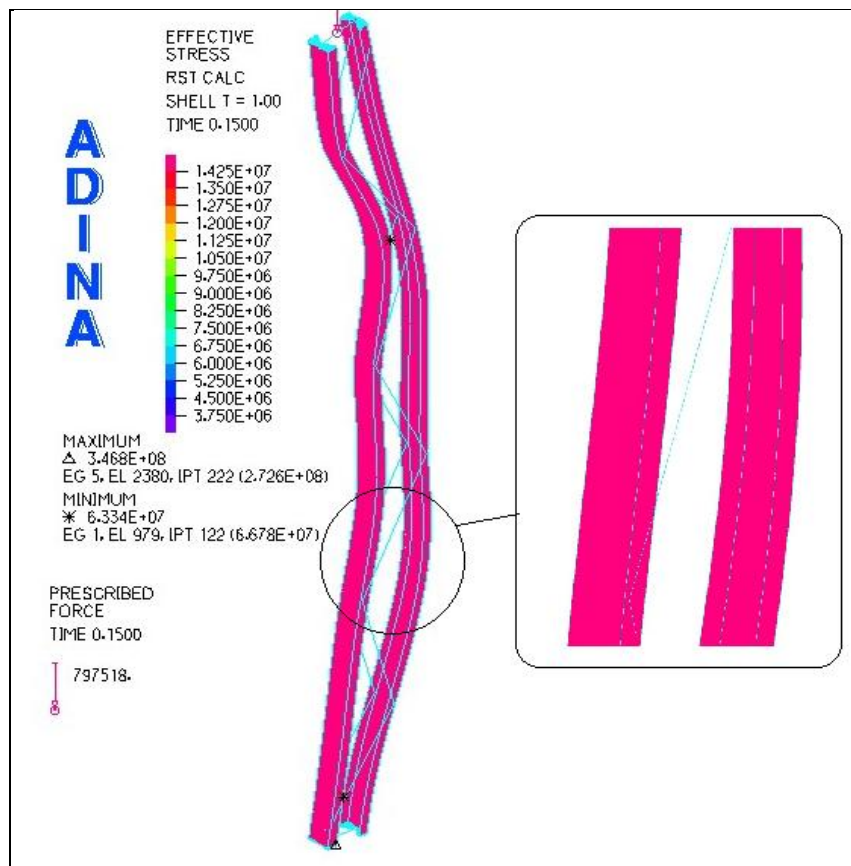
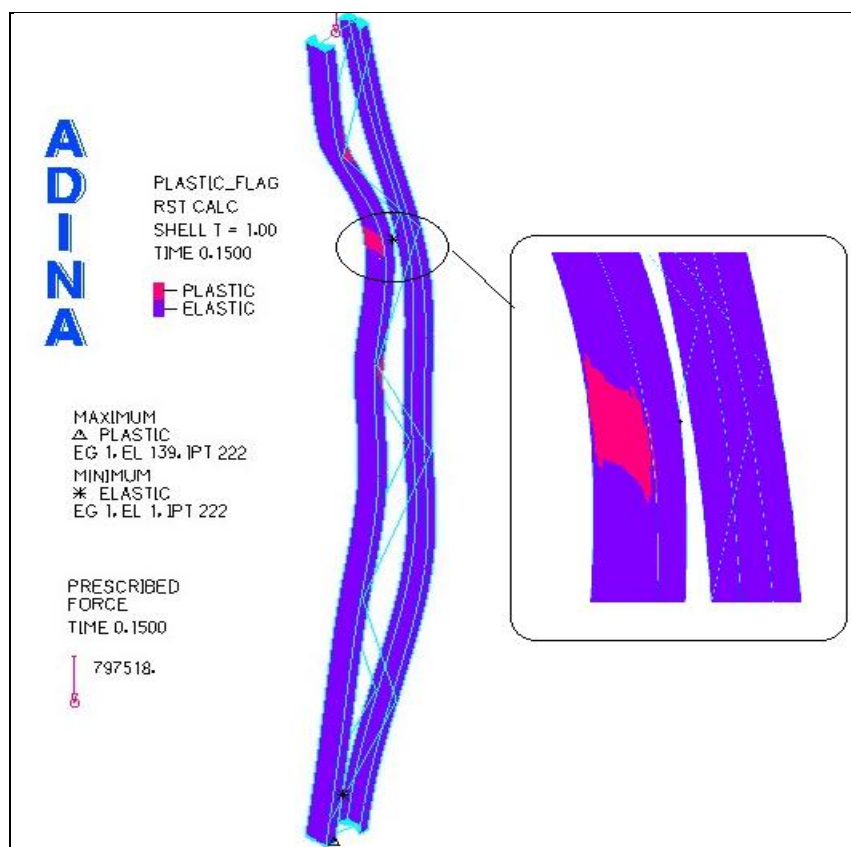
Στο δρόμο ισορροπίας της ανάλυσης GMNIA σημειώνονται 4 χαρακτηριστικά σημεία των οποίων οι εντατικές και παραμορφωσιακές καταστάσεις φαίνονται στα Σχ. 3.60 έως 3.65.

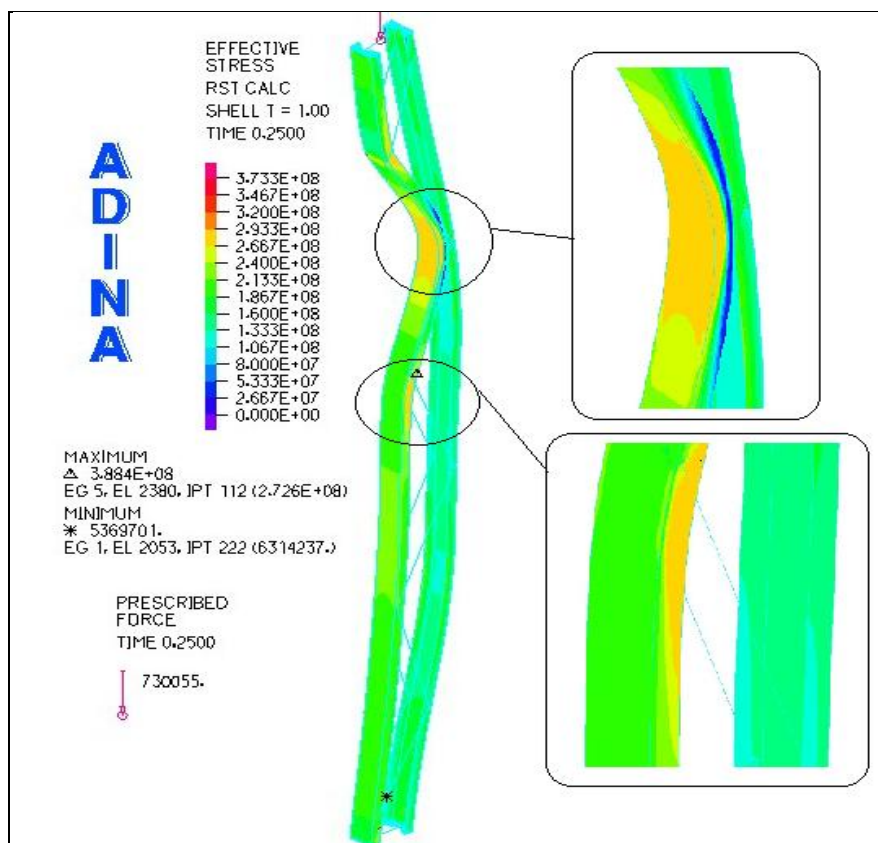


Σχ. 3.60 Τάσεις von Mises- Βήμα 5^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)

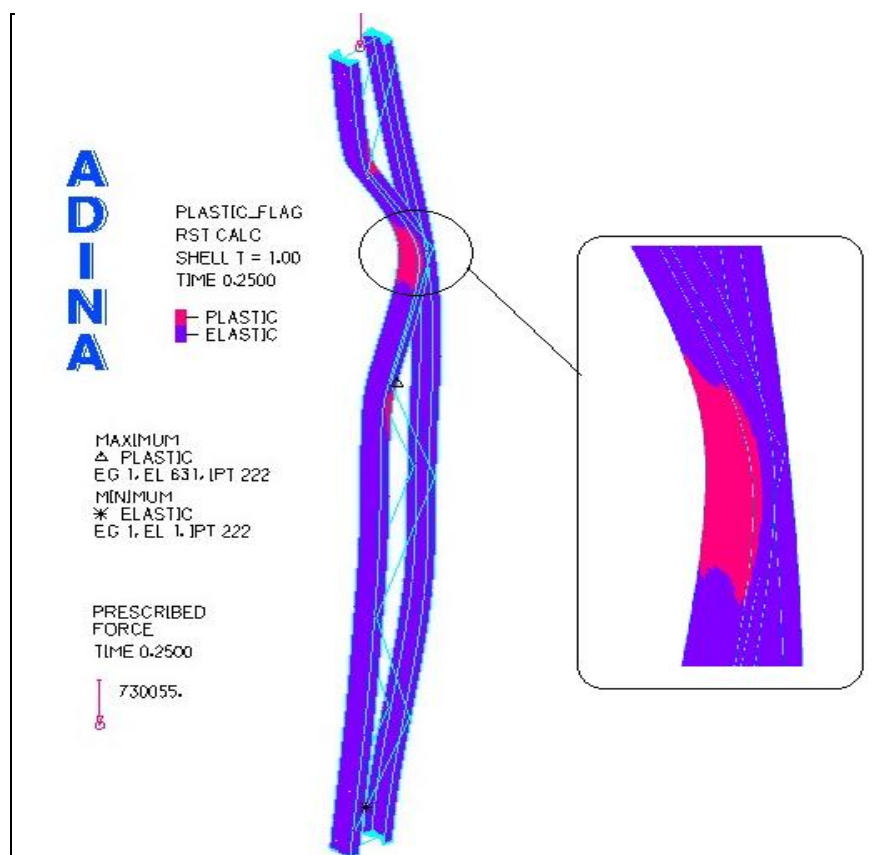


Σχ. 3.61 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 5^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)

Σχ. 3.62 Τάσεις von Mises- Βήμα 15^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή-μέγιστο φορτίο)Σχ. 3.63 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 15^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή- μέγιστο φορτίο)



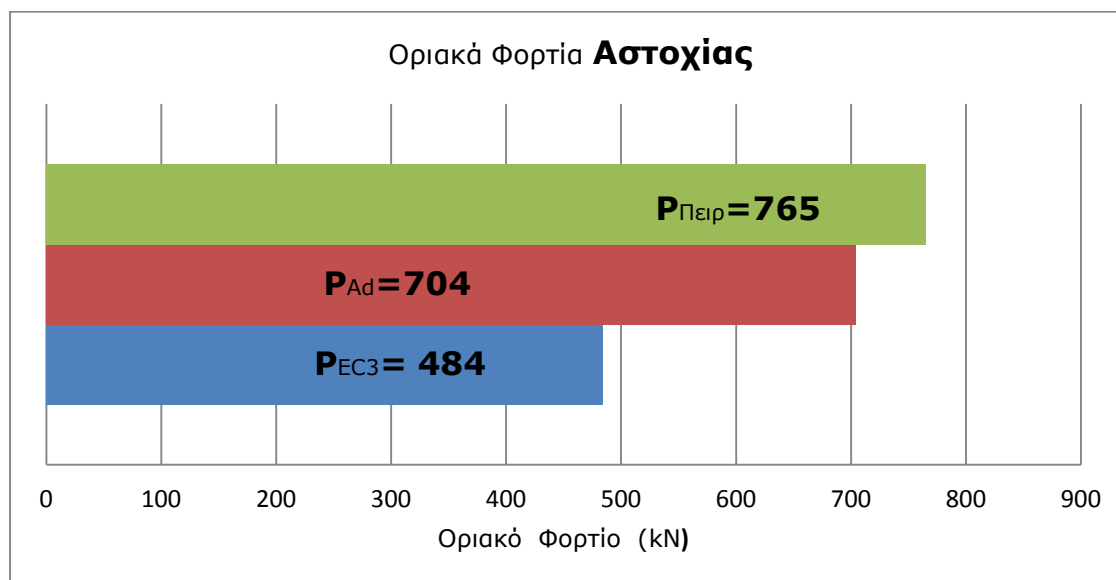
Σχ. 3.64 Τάσεις von Mises- Βήμα 25^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)



Σχ. 3.65 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 25^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)

3.6.2.2 Υποστύλωμα #2 (εκκ. 1.5cm)

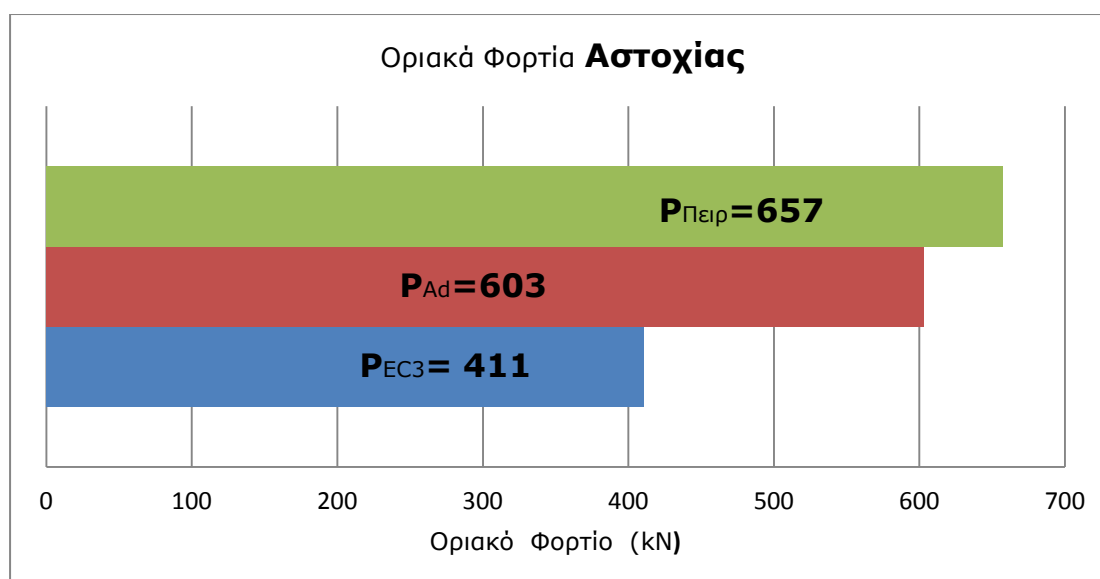
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 25.89 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01022 m και της έβδομης $9.40 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστύλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=8.0\%$, $A2=36.7\%$, $A3=31.2\%$.



Πίνακας 3.66 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #2, 1BoR

3.6.2.3 Υποστύλωμα #3 (εκκ. 4.0cm)

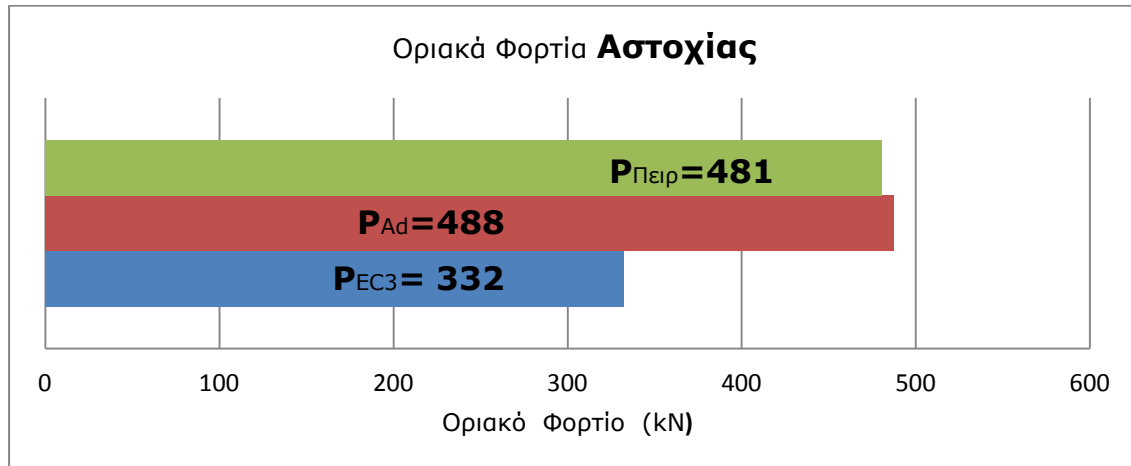
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 26.48 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01022 m και της έβδομης $9.59 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστύλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=8.2\%$, $A2=37.5\%$, $A3=31.9\%$.



Πίνακας 3.67 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #3, 1BoR

3.6.2.4 Υποστυλώμα #4 (εκκ. 8.0cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 26.87 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01022 m και της έβδομης $9.71 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=-1.5\%$, $A2=30.8\%$, $A3=31.8\%$.



Πίνακας 3.68 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #4, 1BoR

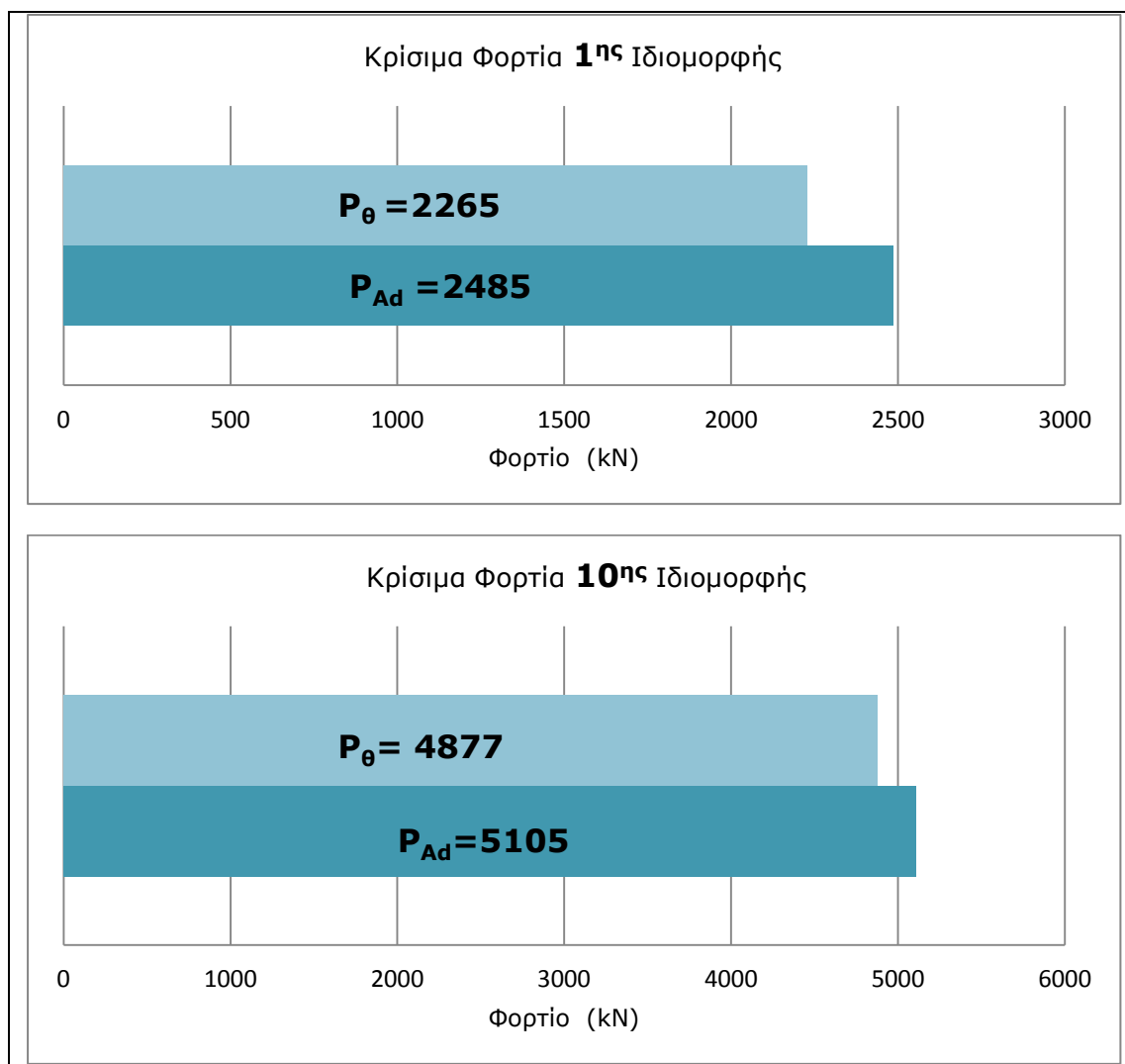
3.7 Σειρά 1BmR

3.7.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)

Στο Σχ. 3.69 φαίνονται η καθολική και η πρώτη τοπική ιδιομορφή (λυγισμός Euler του πέλματος μεταξύ κατάλληλων σημείων). Ο Πίνακας 3.70 περιέχει τα φορτία των ιδιομορφών αυτών συγκρινόμενα με τα θεωρητικώς υπολογισμένα (Εξ. 1.6, 1.8). Η % απόκλιση μεταξύ θεωρητικού φορτίου λυγισμού και φορτίου από την ανάλυση LBA του Adina, $([P_{Ad}-P_{\theta}]/P_{Ad})$, είναι για τις δύο ιδιομορφές 8.9% και 4.5% αντίστοιχα.



Σχ. 3.69 Πρώτη καθολική και πρώτη τοπική ιδιομορφή, 1^η και 10^η αντίστοιχα



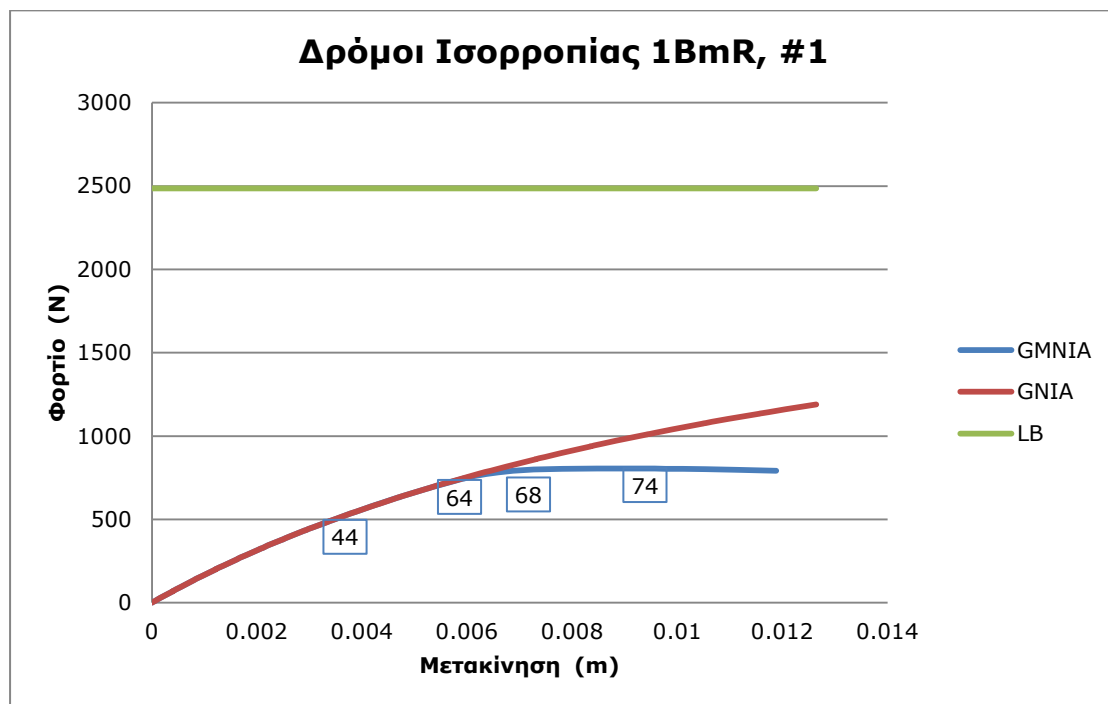
Πίνακας 3.70 Κρίσιμα Φορτία Ιδιομορφών, θεωρητικά και από το Adina

3.7.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)

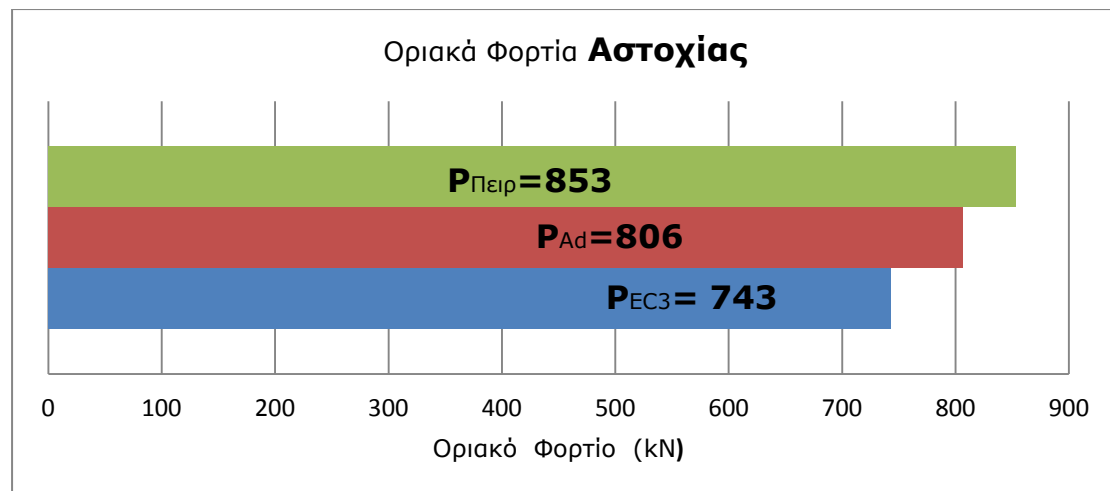
Στη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας τίθενται γεωμετρικές ατέλειες πρώτης και δέκατης ιδιομορφής μεγέθους που ορίζεται σύμφωνα με τον EC-3. Ο συνδυασμός εκκεντρότητας και προσανατολισμού ατελειών είναι ο δυσμενέστερος δυνατός. Συγκεκριμένα, η εκκεντρότητα και η καθολική ατέλεια ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το πέλμα στο οποίο εισήχθη η τοπική ατέλεια να είναι το πλέον θλιβόμενο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ξεκινώντας από το 1^ο υποστύλωμα της σειράς.

3.7.2.1 Υποστύλωμα #1 (εκκ. 0.5cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 25.00 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01022 m και της δέκατης $9.12 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Για το υποστύλωμα #1 διεξάγεται, εκτός από ανάλυση GMNIA, και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, GNIA. Οι % αποκλίσεις για το υποστύλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=5.5\%$, $A2=12.9\%$, $A3=7.9\%$.

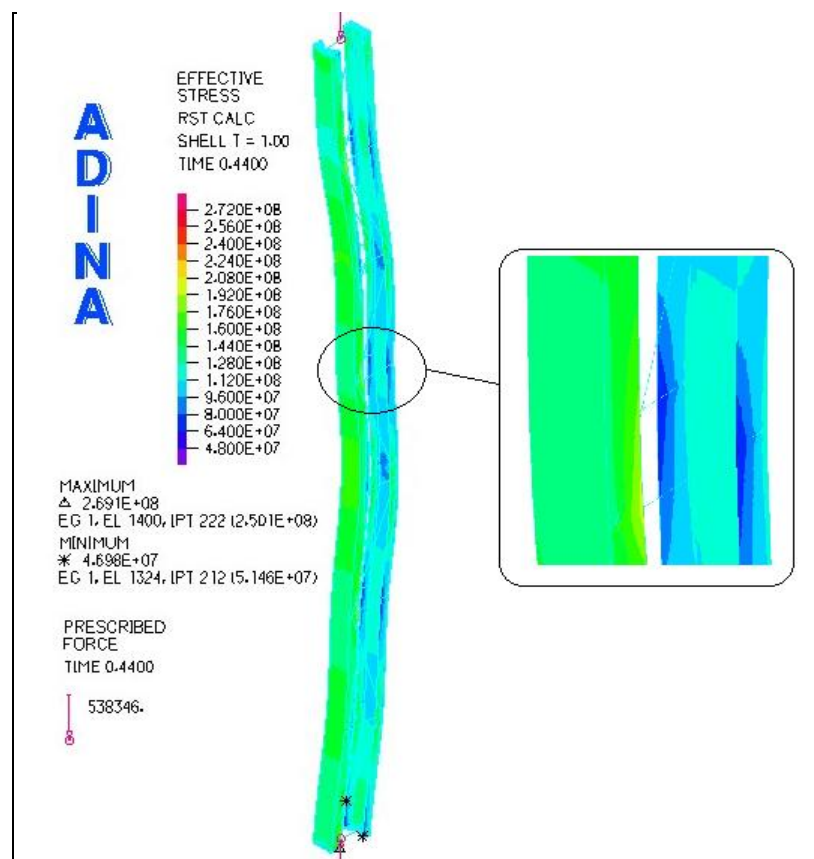


Σχ. 3.71 Δρόμοι Ισορροπίας για αναλύσεις GMNIA, GNIA και ύψος κρίσιμου φορτίου

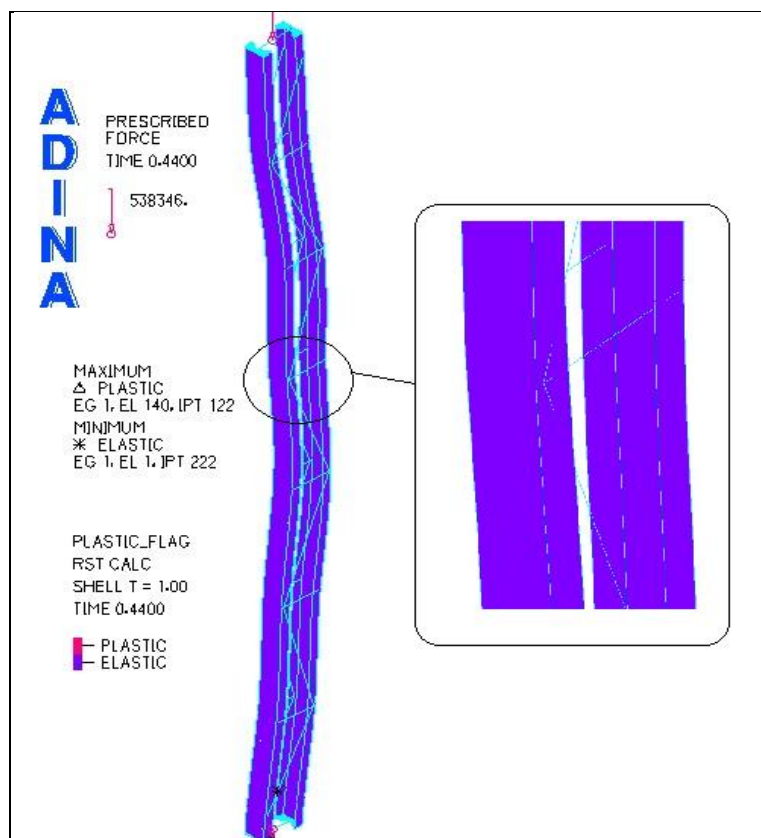


Πίνακας 3.72 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #1, 1BmR

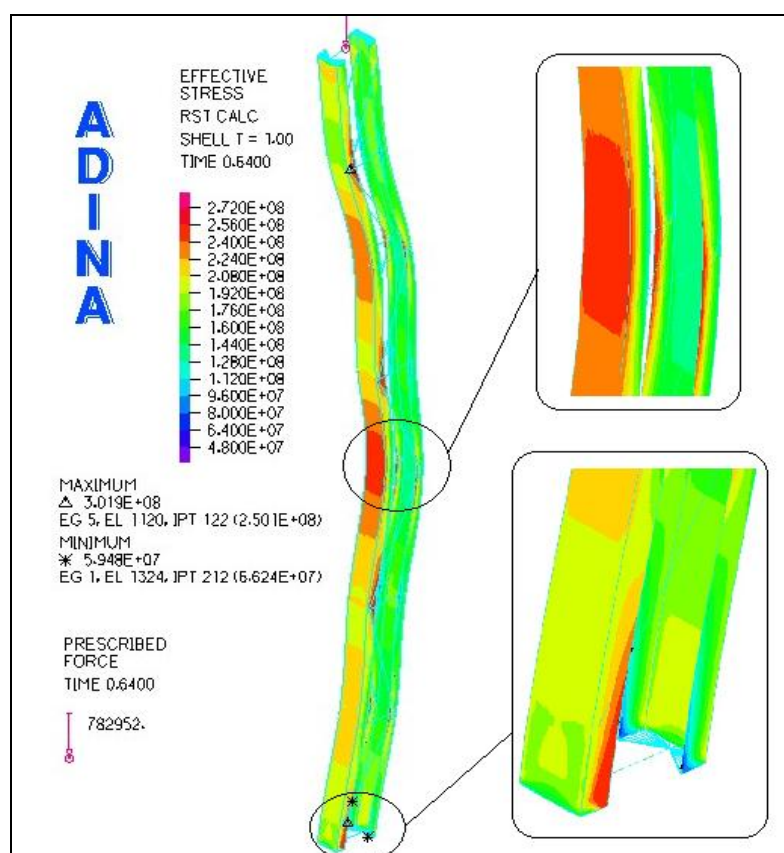
Στο δρόμο ισορροπίας της ανάλυσης GMNIA σημειώνονται 4 χαρακτηριστικά σημεία των οποίων οι εντατικές και παραμορφωσιακές καταστάσεις φαίνονται στα Σχ. 3.73 έως 3.80.



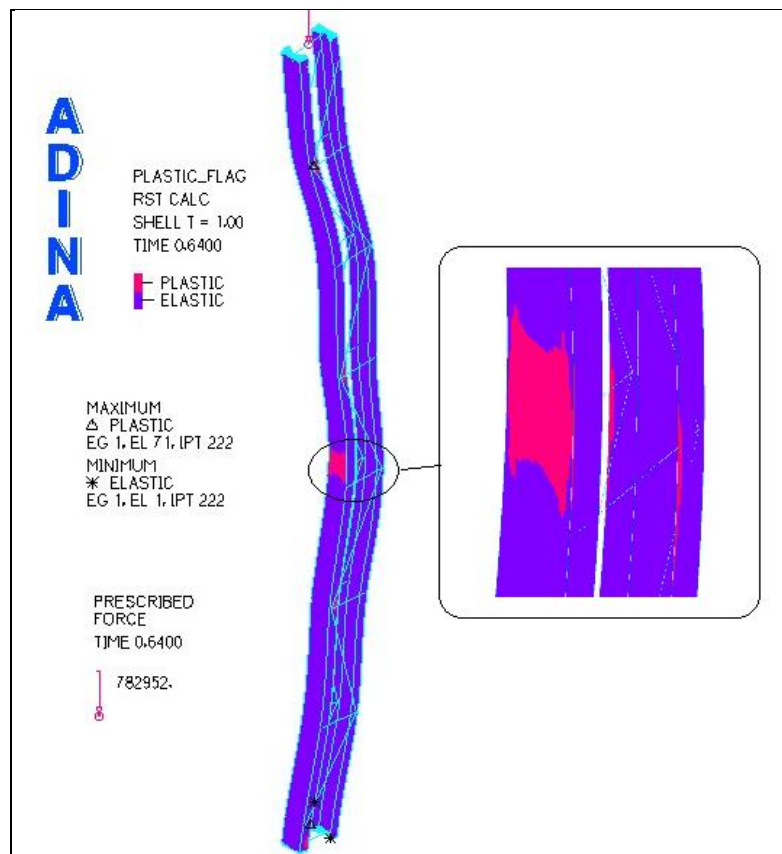
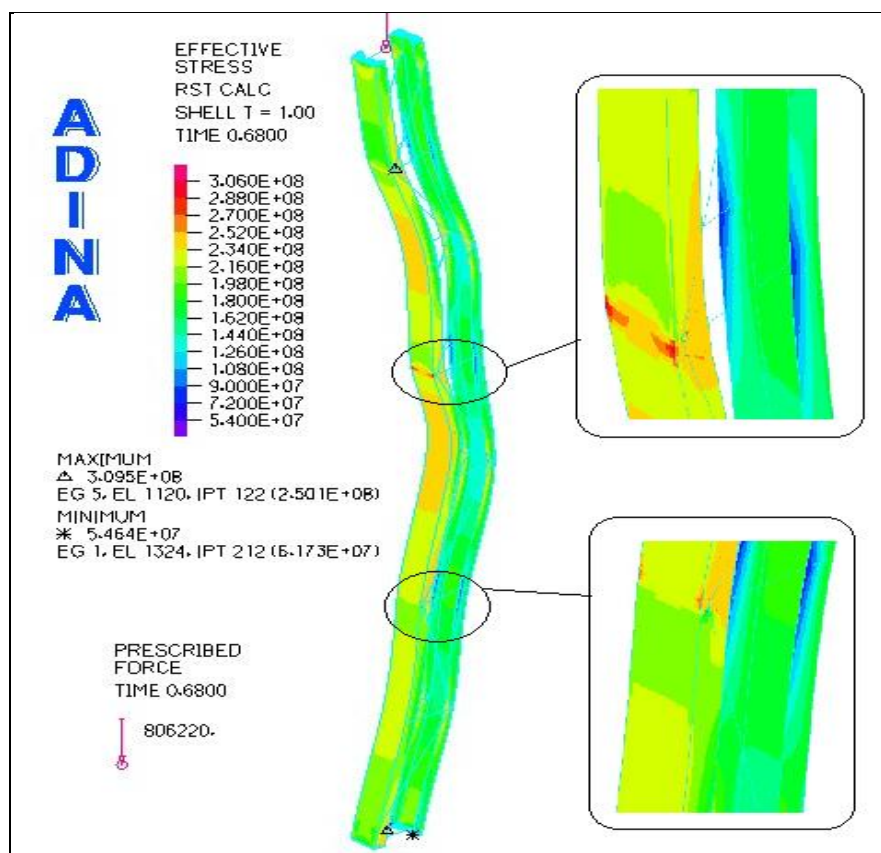
Σχ. 3.73 Τάσεις von Mises- Βήμα 44^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)

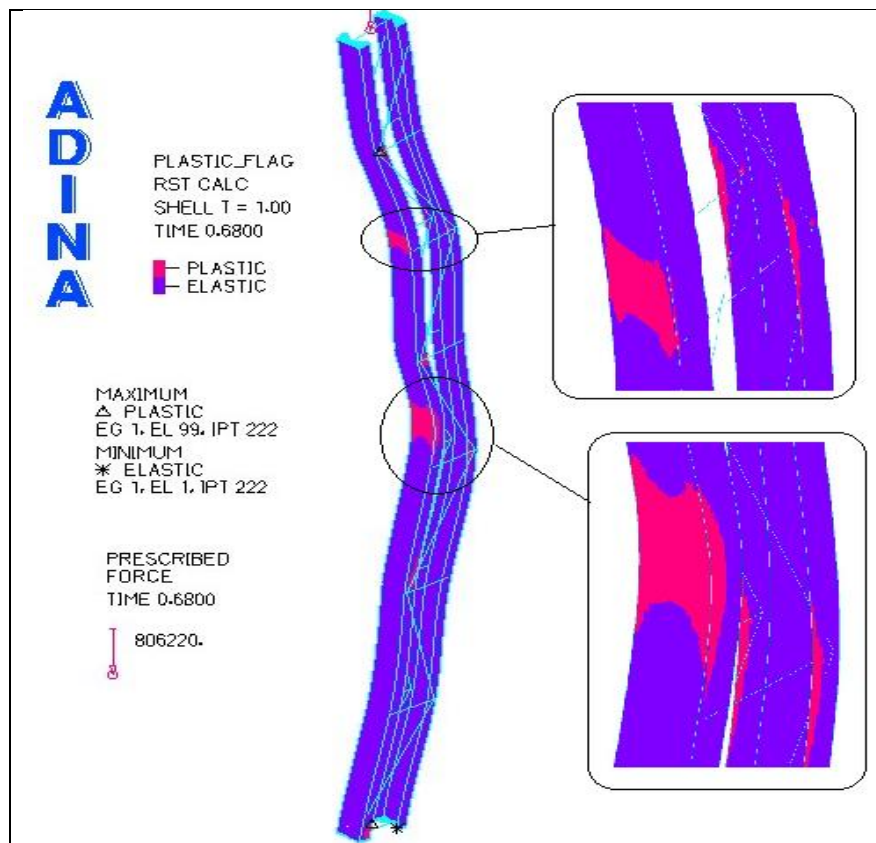


Σχ. 3.74 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 44^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)

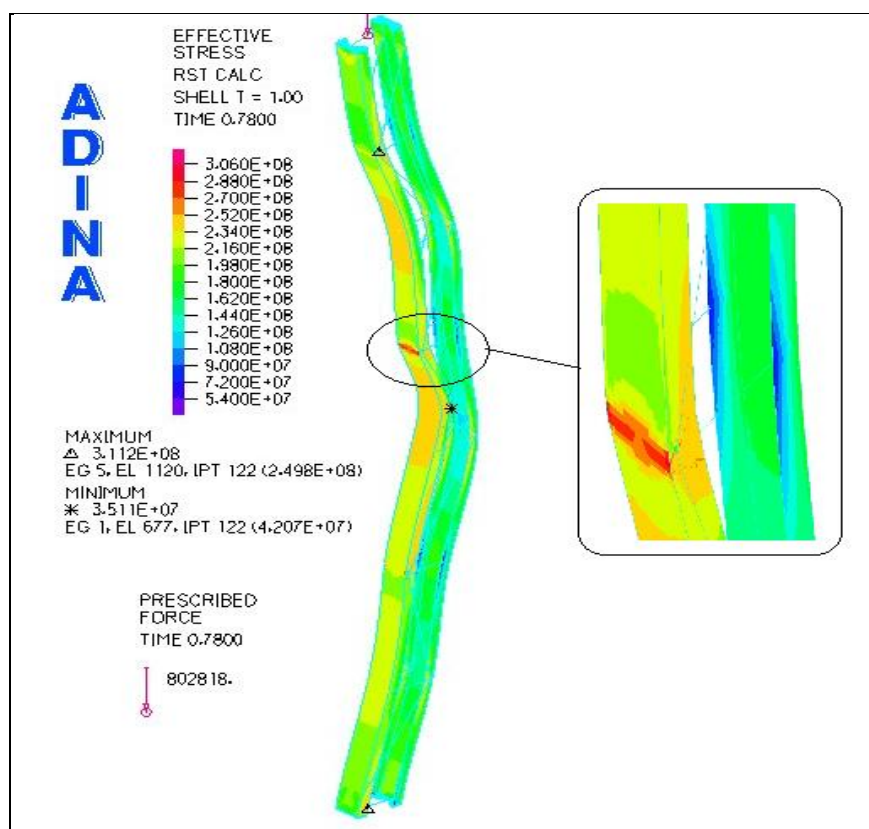


Σχ. 3.75 Τάσεις von Mises- Βήμα 64^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)

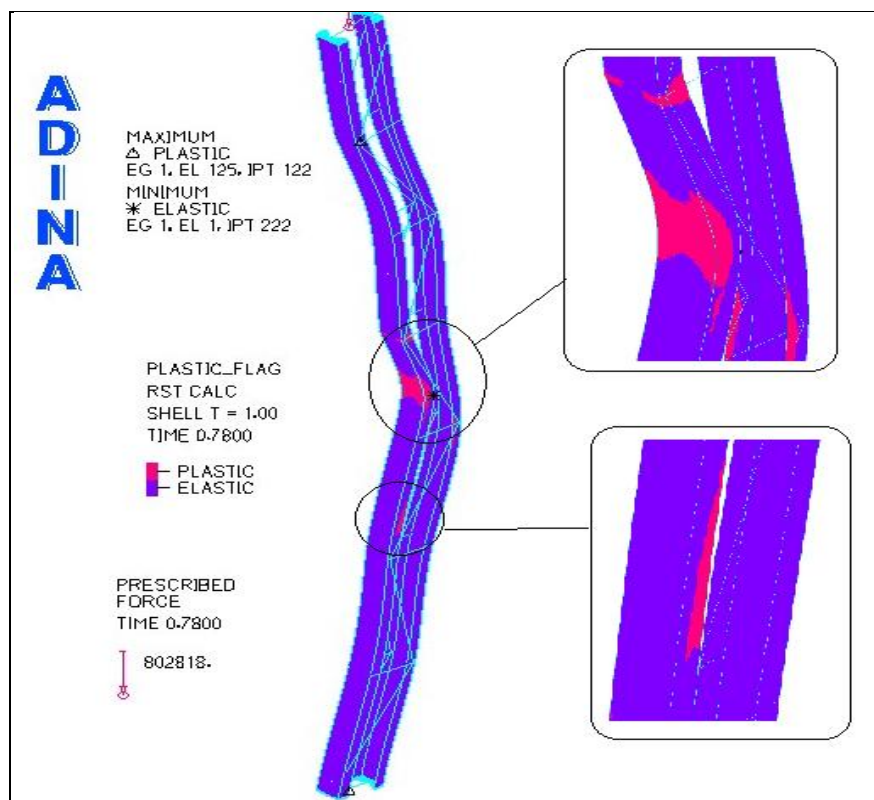
Σχ. 3.76 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 64^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)Σχ. 3.77 Τάσεις von Mises- Βήμα 68^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)



Σχ. 3.78 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 68° ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)



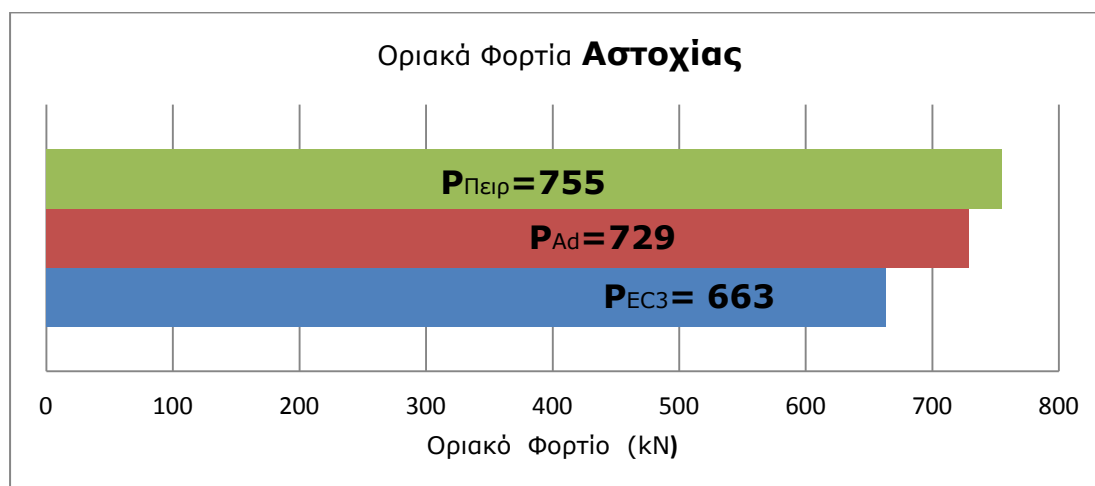
Σχ. 3.79 Τάσεις von Mises- Βήμα 74° ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)



Σχ. 3.80 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 74° ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)

3.7.2.2 Υποστύλωμα #2 (εκκ. 1.63cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 24.61 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01022 m και της δέκατης $8.99 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστύλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=3.5\%$, $A2=12.1\%$, $A3=9.0\%$.

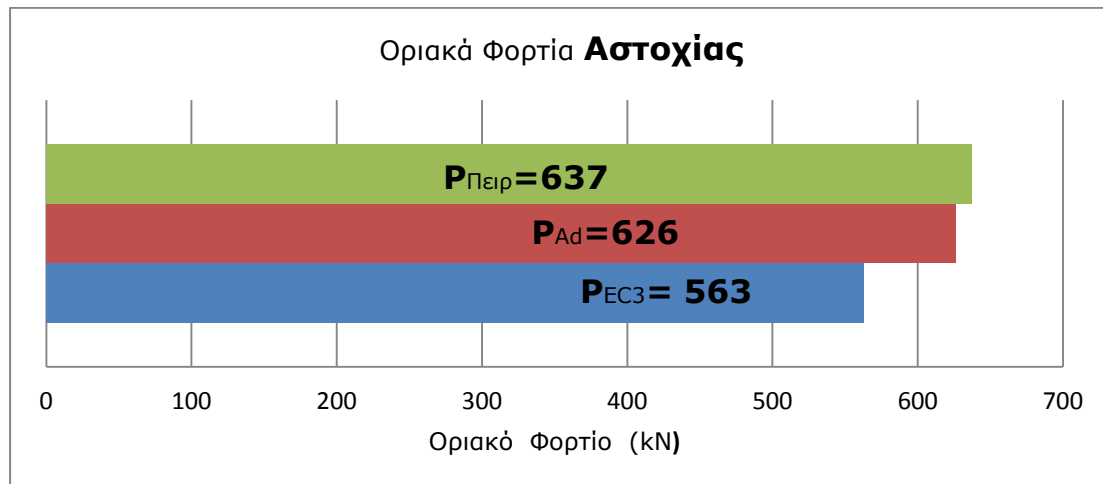


Πίνακας 3.81 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #2, 1BmR

3.7.2.3 Υποστύλωμα #3 (εκκ. 4.0cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 24.81 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01022 m και της δέκατης $9.06 \cdot 10^{-4} \text{ m}$.

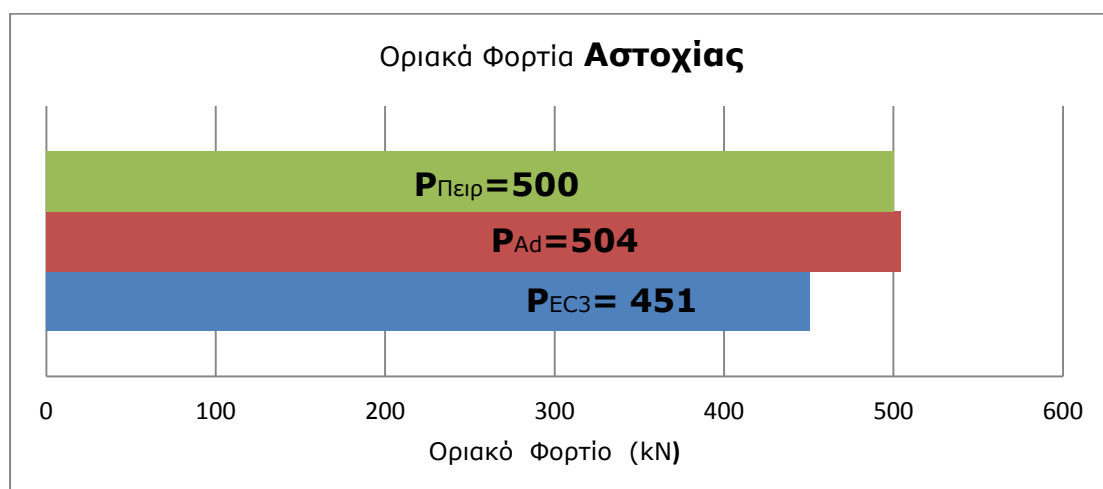
Οι % αποκλίσεις για το υποστυλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A_1=1.8\%$, $A_2=11.7\%$, $A_3=10.0\%$.



Πίνακας 3.82 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #3, 1BmR

3.7.2.4 Υποστυλωμα #4 (εκκ. 8.0cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 24.71 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01022 m και της δέκατης $9.02 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A_1=-0.8\%$, $A_2=9.9\%$, $A_3=10.6\%$.



Πίνακας 3.83 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #4, 1BmR

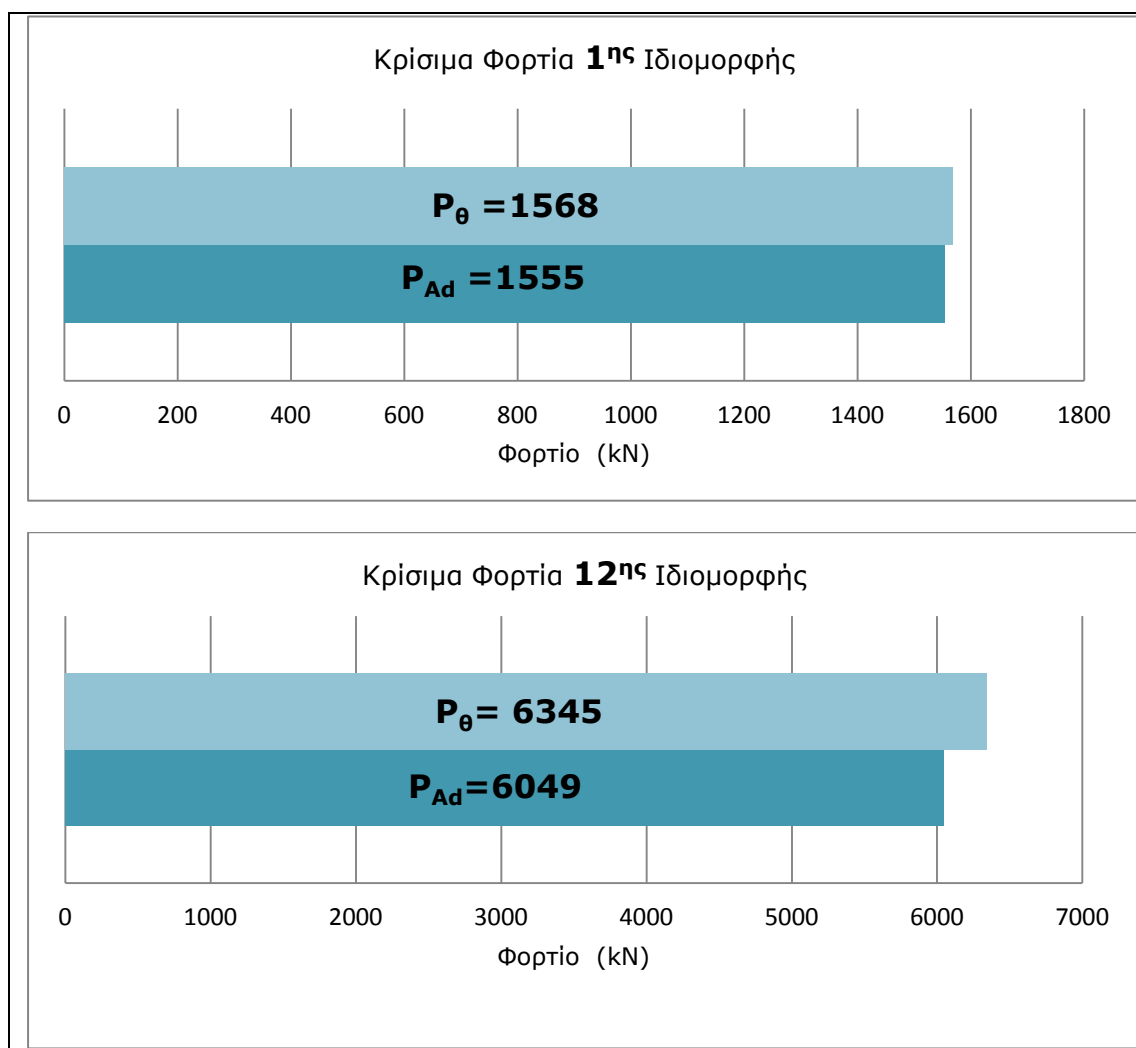
3.8 Σειρά 2ΑοR

3.8.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)

Στο Σχ. 3.84 φαίνονται η καθολική και η πρώτη τοπική ιδιομορφή (λυγισμός Euler του πέλματος μεταξύ κατάλληλων σημείων). Ο Πίνακας 3.85 περιέχει τα φορτία των ιδιομορφών αυτών συγκρινόμενα με τα θεωρητικώς υπολογισμένα (Εξ. 1.6, 1.8). Η % απόκλιση μεταξύ θεωρητικού φορτίου λυγισμού και φορτίου από την ανάλυση LBA του Adina, $([P_{\text{Ad}} - P_{\text{θ}}]/P_{\text{Ad}})$, είναι για τις δύο ιδιομορφές -0.8% και -4.9% αντίστοιχα.



Σχ. 3.84 Πρώτη καθολική και πρώτη τοπική ιδιομορφή, 1^η και 12^η αντίστοιχα



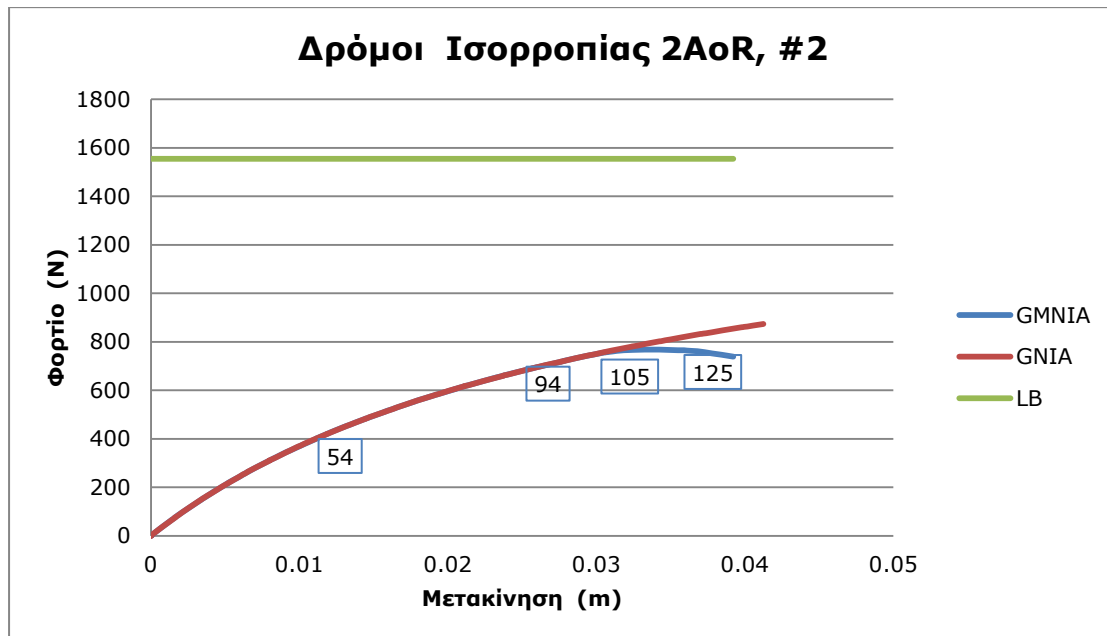
Πίνακας 3.85 Κρίσιμα Φορτία Ιδιομορφών, θεωρητικά και από το Adina

3.8.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)

Στη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας τίθενται γεωμετρικές ατέλειες πρώτης και δωδέκατης ιδιομορφής μεγέθους που ορίζεται σύμφωνα με τον EC-3. Ο συνδυασμός εκκεντρότητας και προσανατολισμού ατελειών είναι ο δυσμενέστερος δυνατός. Συγκεκριμένα, η εκκεντρότητα και η καθολική ατέλεια ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το πέλμα στο οποίο εισήχθη η τοπική ατέλεια να είναι το πλέον θλιβόμενο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ξεκινώντας από το 2^ο υποστύλωμα της σειράς.

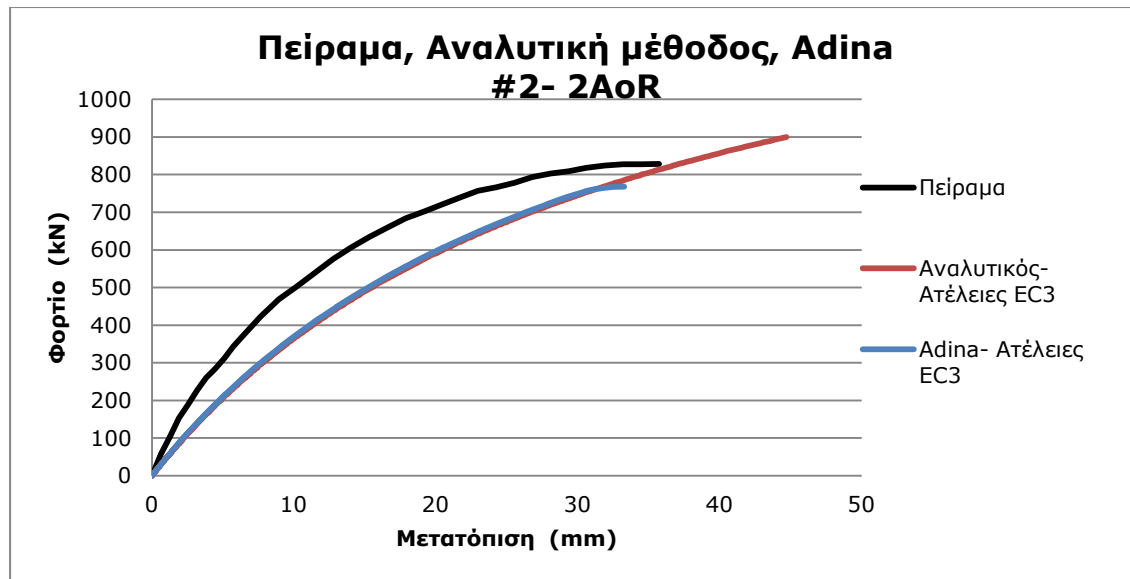
3.8.2.1 Υποστύλωμα #2 (εκκ. 1.8cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 34.32 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.0128 m και της δωδέκατης $0.956 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Για το υποστύλωμα #2 διεξάγεται, εκτός από ανάλυση GMNIA, και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, GNIA.



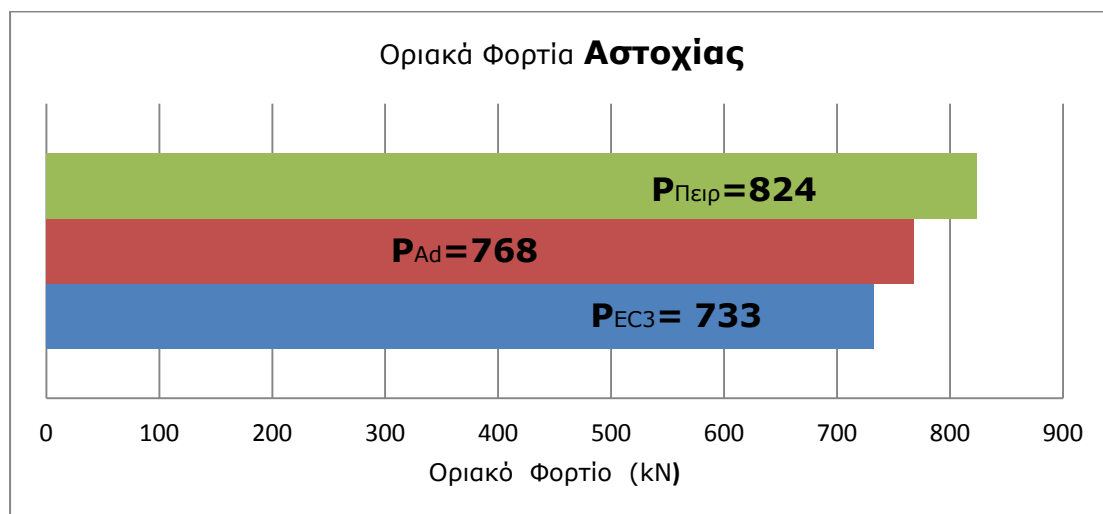
Σχ. 3.86 Δρόμοι Ισορροπίας για αναλύσεις GMNIA, GNIA και ύψος κρίσιμου φορτίου

Για το υποστύλωμα #2 υπάρχει και πειραματικός δρόμος ισορροπίας. Στο Σχ. 3.87 απεικονίζονται ο πειραματικός αυτός δρόμος, ο αναλυτικός σύμφωνα με τη μέθοδο του Κεφ. 1 (Εξ. 1.24) και ο δρόμος του Adina. Οι δύο τελευταίες αναλύσεις έγιναν με ατέλειες κατά EC3. Είναι εμφανής η ταύτιση της αναλυτικής μεθόδου με το Adina. Διαφέρουν στο ότι η αναλυτική μέθοδος δεν αποδίδει κοντά στο οριακό φορτίο την πλαστικοποίηση (πτώση κλίσης, πλατώ διαρροής), καθώς λαμβάνει υπόψη ελαστικό υλικό.



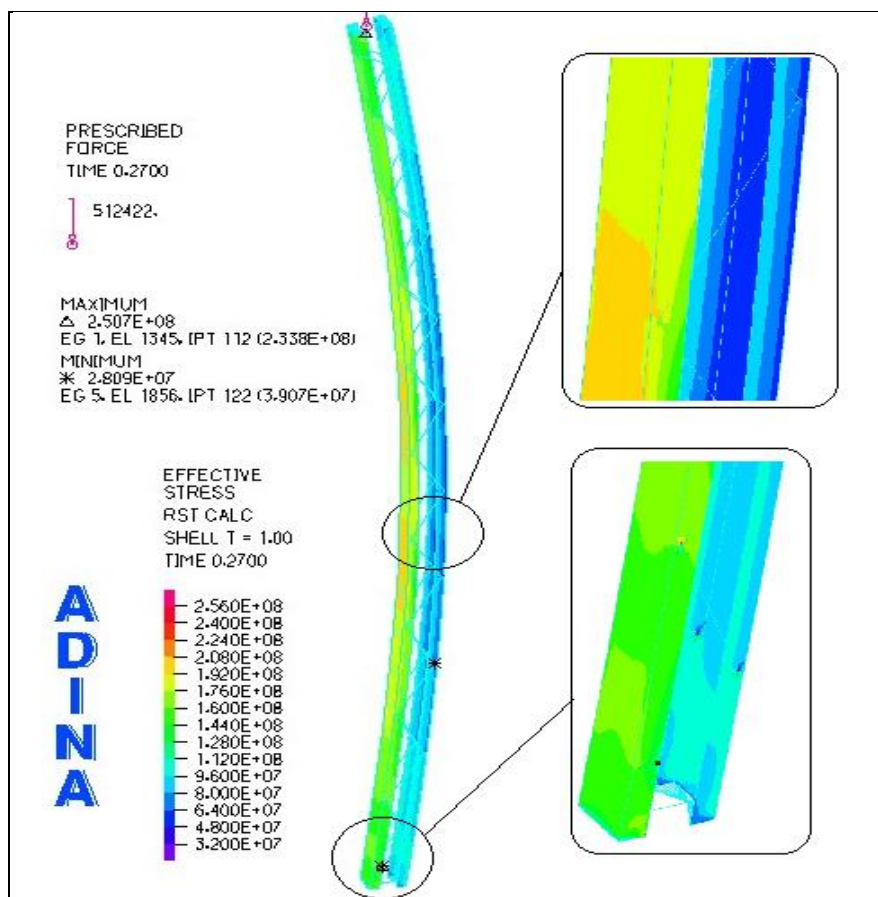
Σχ. 3.87 Δρόμοι Ισορροπίας από το Πείραμα, την Αναλυτική μέθοδο (Κεφ. 5) και το Adina

Οι % αποκλίσεις για το υποστυλόμε αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=6.8\%$, $A2=11.0\%$, $A3=4.6\%$.

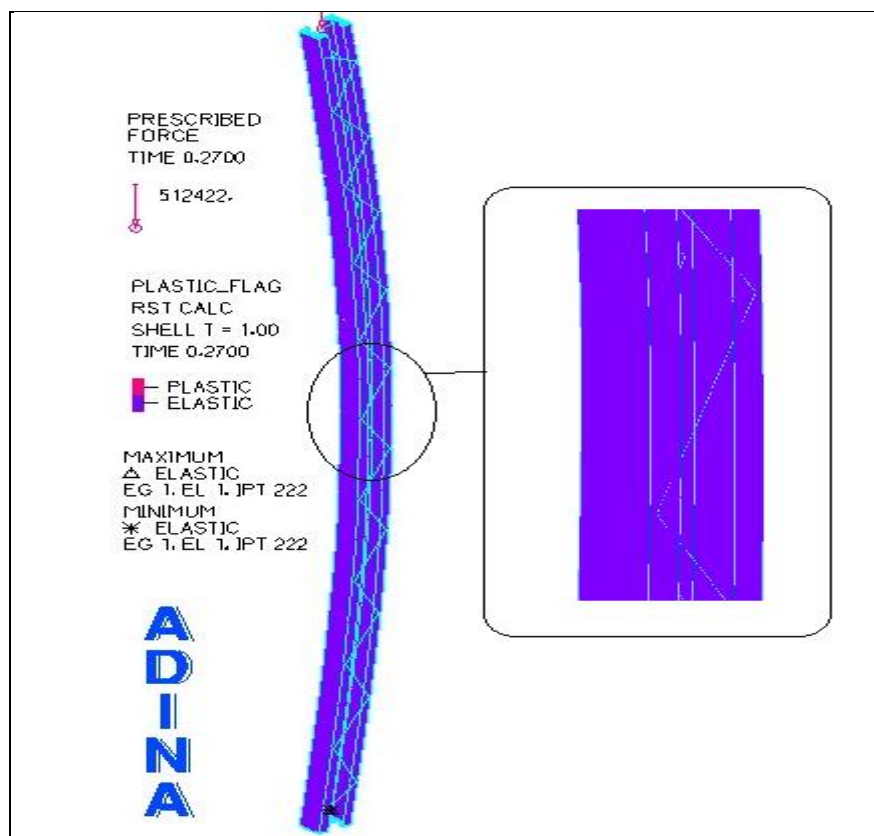


Πίνακας 3.88 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #2, 2ΑοR

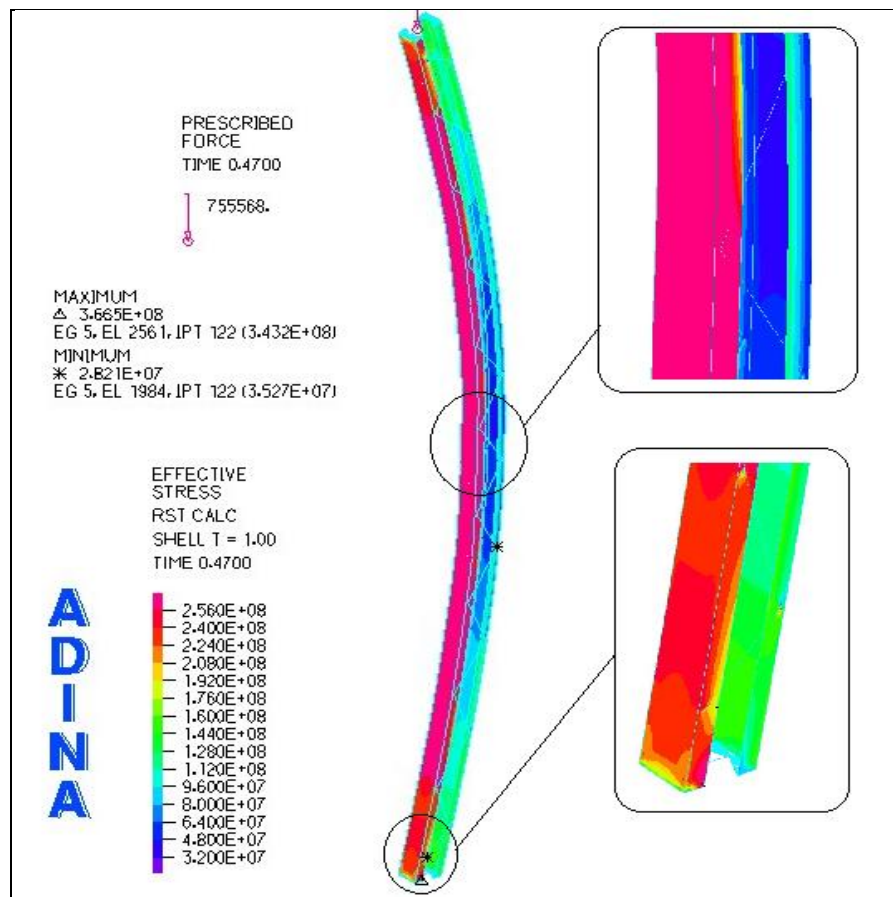
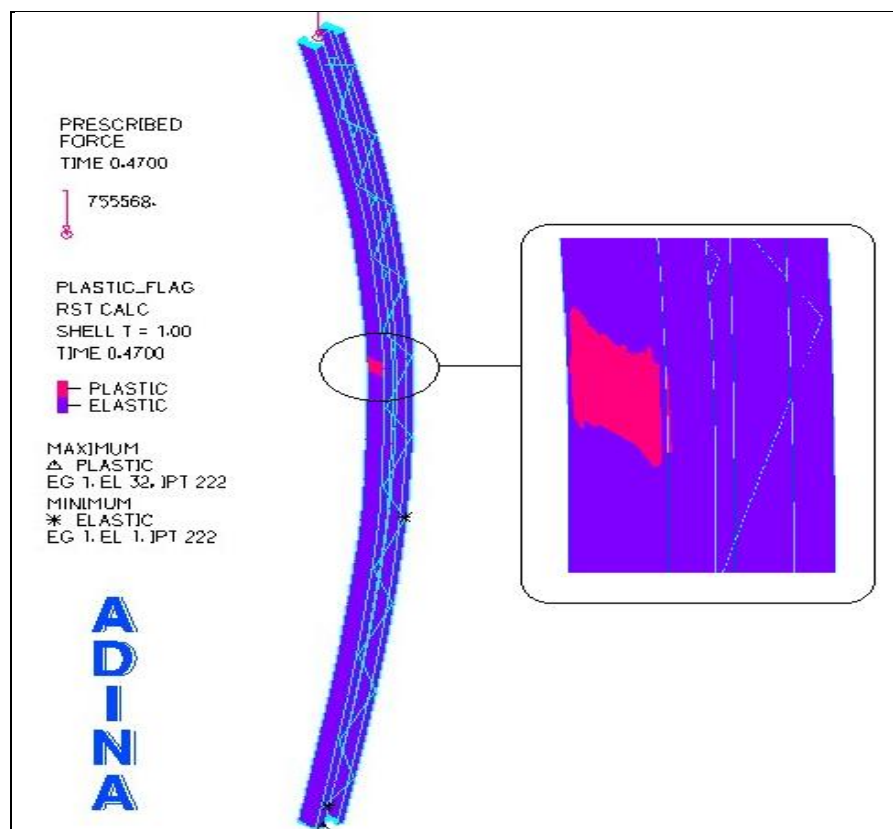
Στο δρόμο ισορροπίας της ανάλυσης GMNIA σημειώνονται 4 χαρακτηριστικά σημεία των οποίων οι εντατικές και παραμορφωσιακές καταστάσεις φαίνονται στα Σχ. 3.89 έως 3.96.

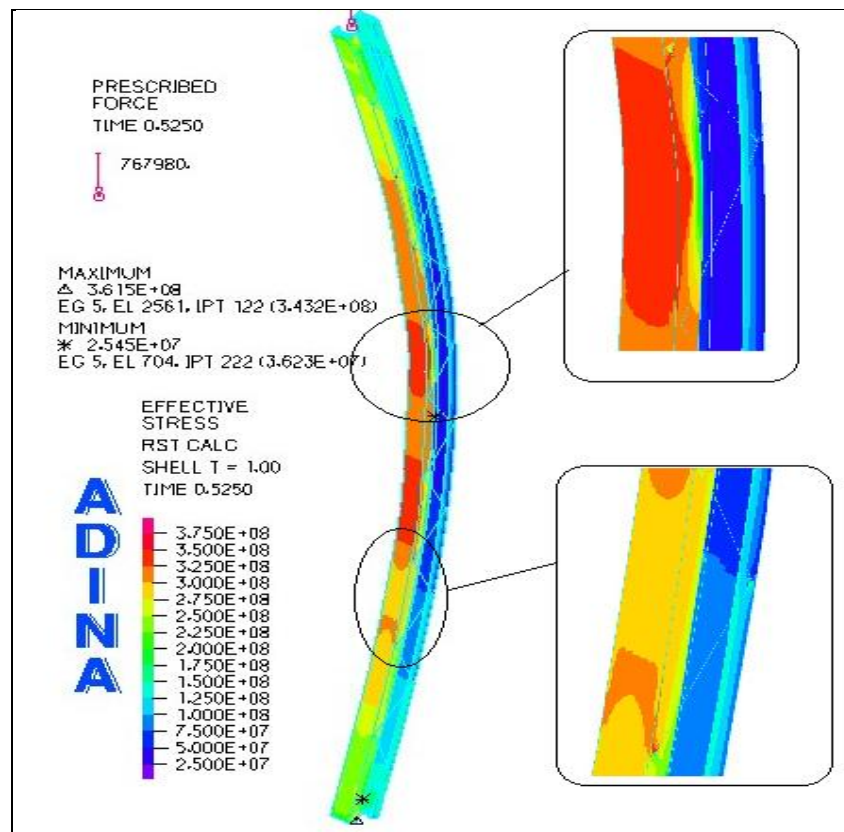


Σχ. 3.89 Τάσεις von Mises- Βήμα 54^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)

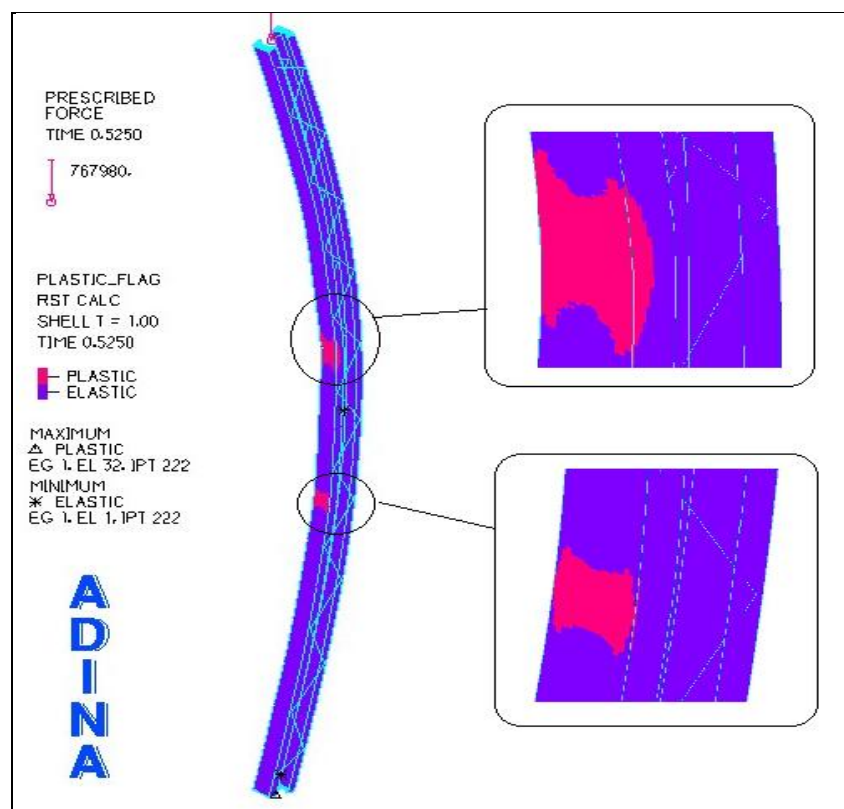


Σχ. 3.90 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 54^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)

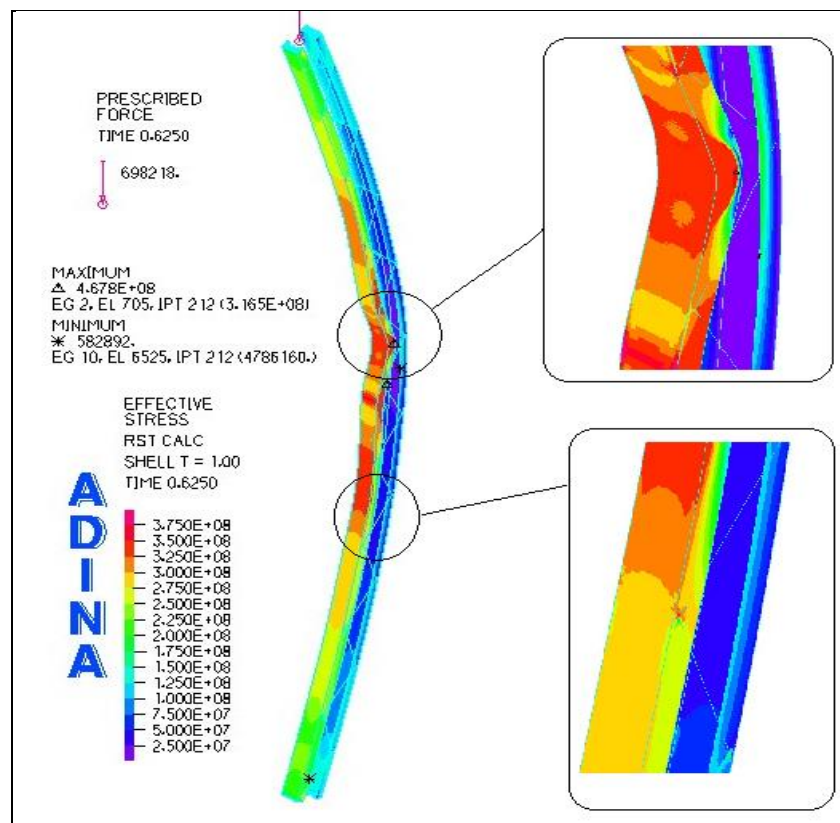
Σχ. 3.91 Τάσεις von Mises- Βήμα 94^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)Σχ. 3.92 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 94^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)



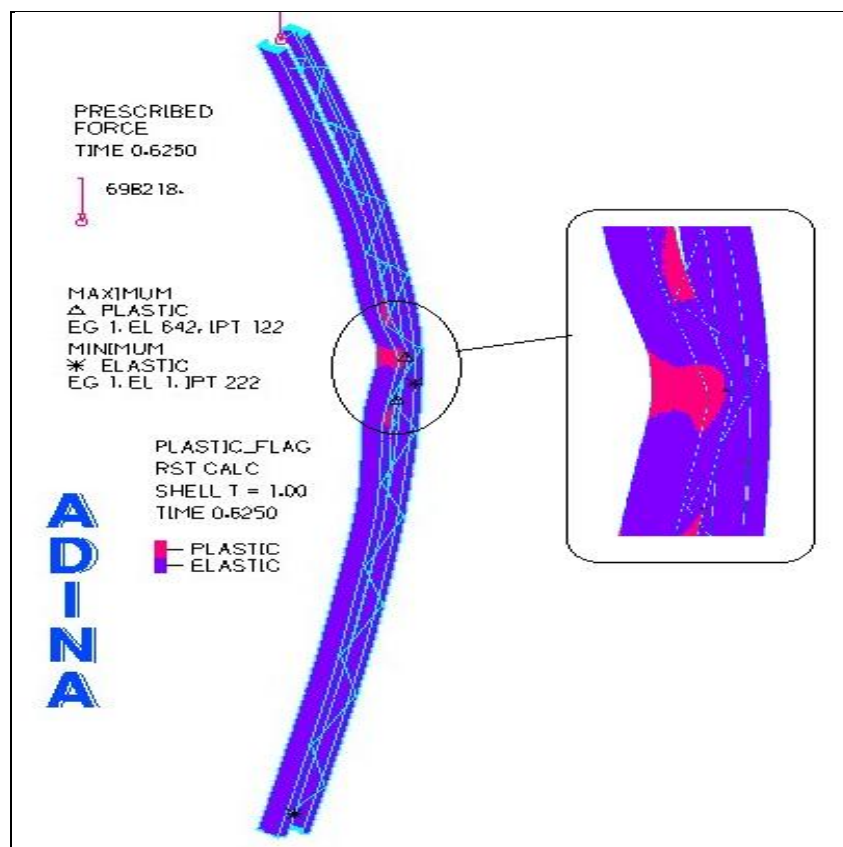
Σχ. 3.93 Τάσεις von Mises- Βήμα 105° ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)



Σχ. 3.94 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 105° ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)



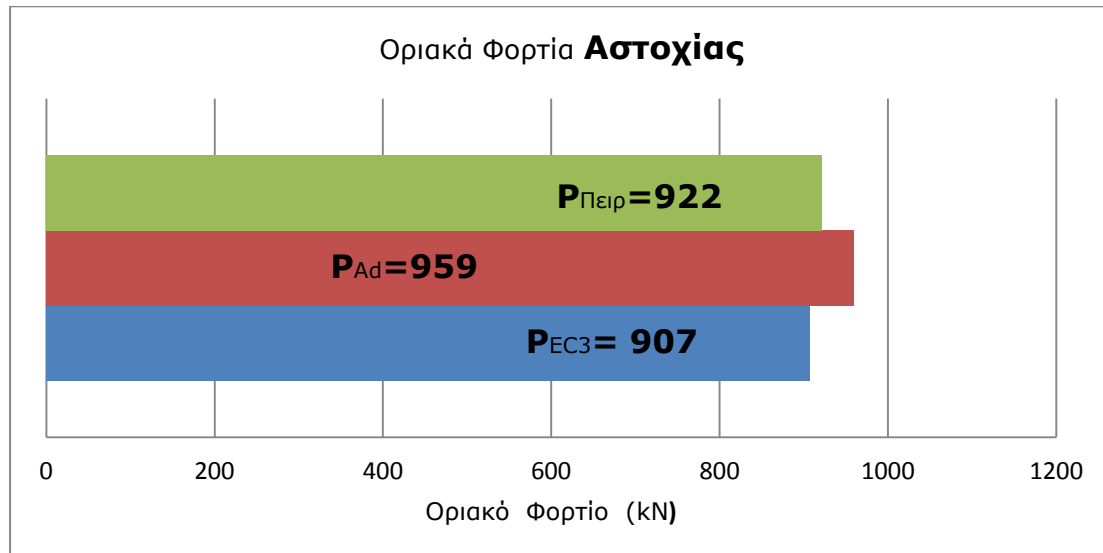
Σχ. 3.95 Τάσεις von Mises- Βήμα 125° ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)



Σχ. 3.96 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 125° ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)

3.8.2.2 Υποστυλώμα #1 (εκκ. 0.5cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 38.73 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.0128 m και της δωδέκατης $1.06 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=-4.1\%$, $A2=1.6\%$, $A3=5.4\%$.

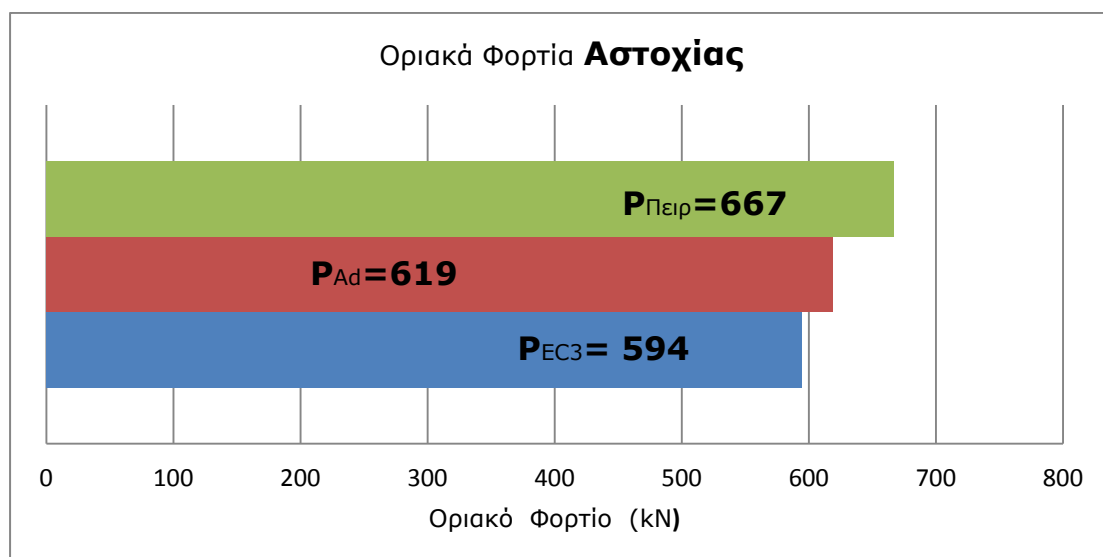


Πίνακας 3.97 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #1, 2AoR

3.8.2.3 Υποστυλώμα #3 (εκκ. 4.15cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 33.24 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.0128 m και της δωδέκατης $0.9296 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

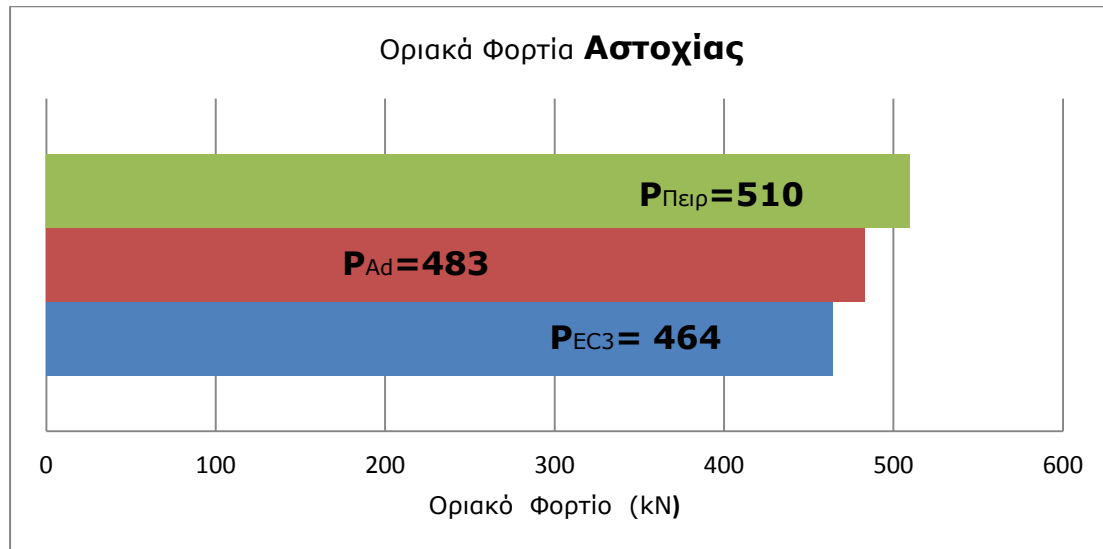
Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=7.1\%$, $A2=10.9\%$, $A3=4.0\%$.



Πίνακας 3.98 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #3, 2AoR

3.8.2.4 Υποστύλωμα #4 (εκκ. 8.0cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 32.6 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.0128 m και της δωδέκατης $0.9077 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστύλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=5.2\%$, $A2=8.9\%$, $A3=3.9\%$.



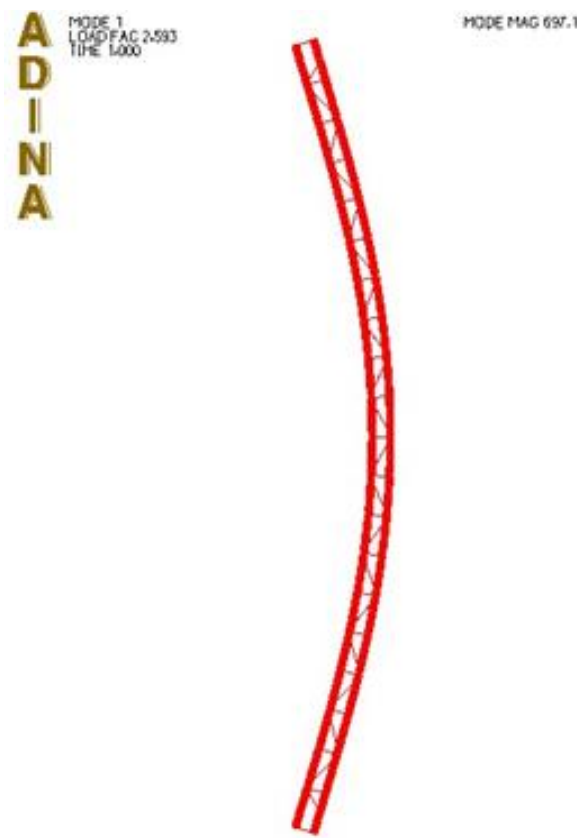
Πίνακας 3.99 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #4, 2ΑοR

3.9 Σειρά 2AmR

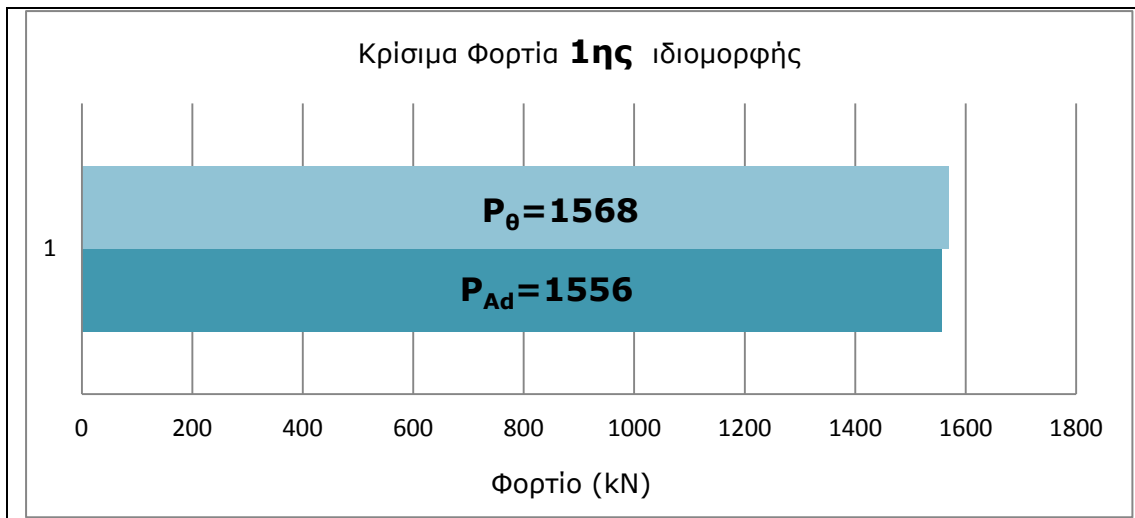
3.9.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)

Στο Σχ. 3.100 φαίνεται η καθολική ιδιομορφή. Ο Πίνακας 3.101 περιέχει το φορτίο της ιδιομορφής αυτής συγκρινόμενο με το θεωρητικώς υπολογισμένο (Εξ. 1.6, 1.8). Η % απόκλιση μεταξύ θεωρητικού φορτίου λυγισμού και φορτίου από την ανάλυση LBA του Adina, $([P_{Ad}-P_{\theta}]/P_{Ad})$, είναι -0.8%.

Όπως και στο υποστύλωμα της σειράς 1AmR, έτσι και εδώ, το μήκος τοπικού λυγισμού είναι μόλις 0.32m με αποτέλεσμα να μην επιτευχθεί σύγκλιση της ανάλυσης σε αυτή την ιδιομορφή. Επομένως οι αναλύσεις GMNIA έγιναν χωρίς τοπική ατέλεια.



Σχ. 3.100 Πρώτη καθολική ιδιομορφή, 1^η



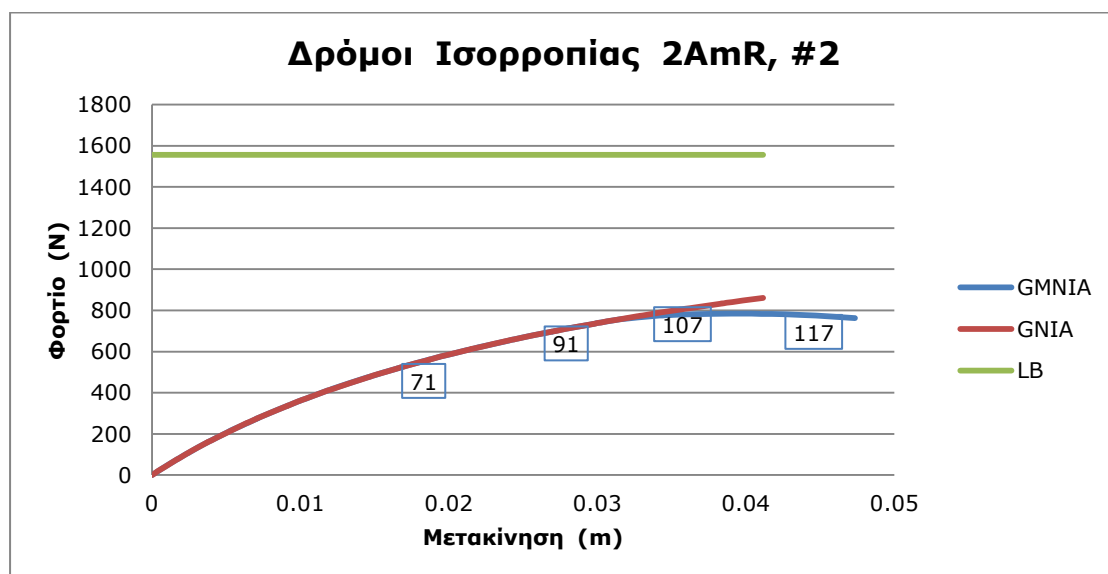
Πίνακας 3.101 Κρίσιμα Φορτία Ιδιομορφών, θεωρητικά και από το Adina

3.9.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)

Στη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας τίθεται γεωμετρική ατέλεια πρώτης ιδιομορφής μεγέθους που ορίζεται σύμφωνα με τον EC-3. Ο συνδυασμός εκκεντρότητας και προσανατολισμού ατελειών είναι ο δυσμενέστερος δυνατός. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ξεκινώντας από το 2^ο υποστύλωμα της σειράς.

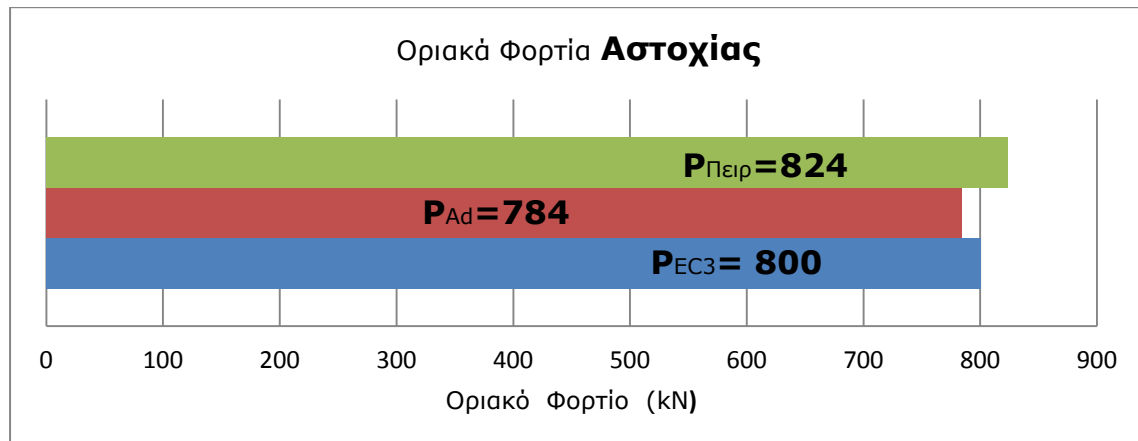
3.9.2.1 Υποστύλωμα #2 (εκκ. 1.85cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 34.32kN/cm². Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.0128m. Για το υποστύλωμα #2 διεξάγεται, εκτός από ανάλυση GMNIA, και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, GNIA.



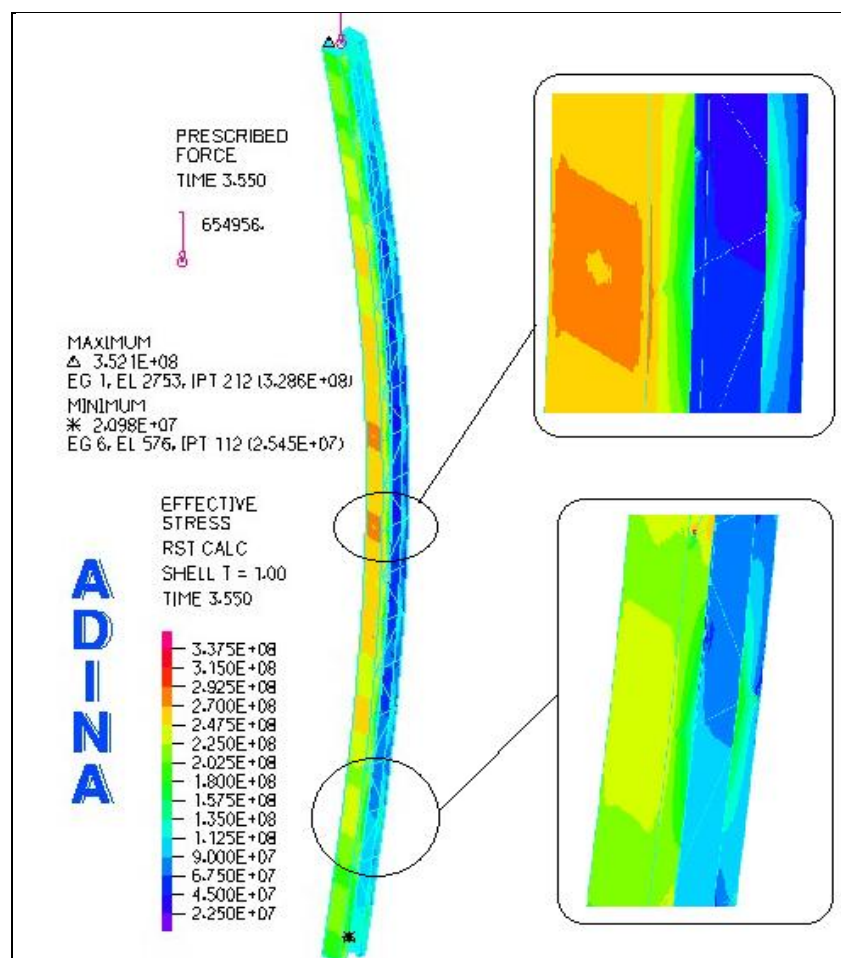
Σχ. 3.102 Δρόμοι Ισορροπίας για αναλύσεις GMNIA, GNIA και ύψος κρίσιμου φορτίου

Οι % αποκλίσεις για το υποστυλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=4.8\%$, $A2=2.9\%$, $A3=-2.0\%$.

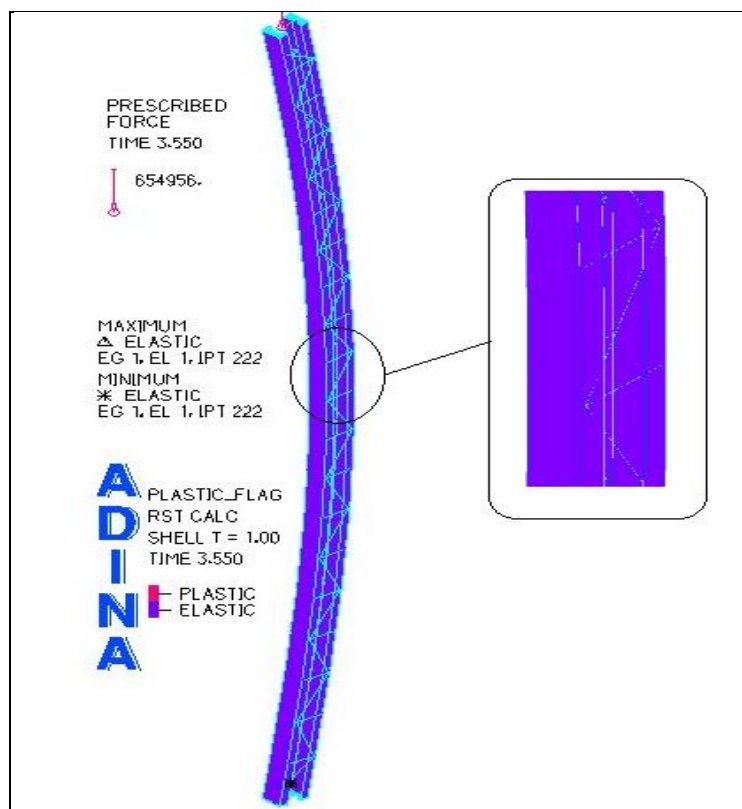
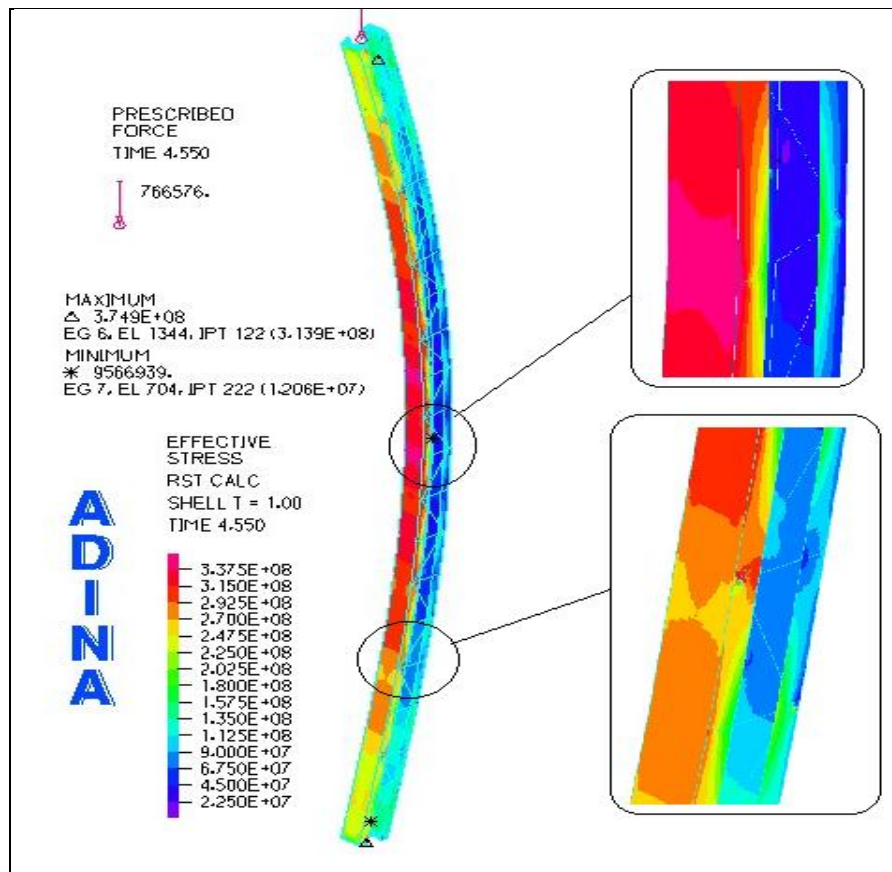


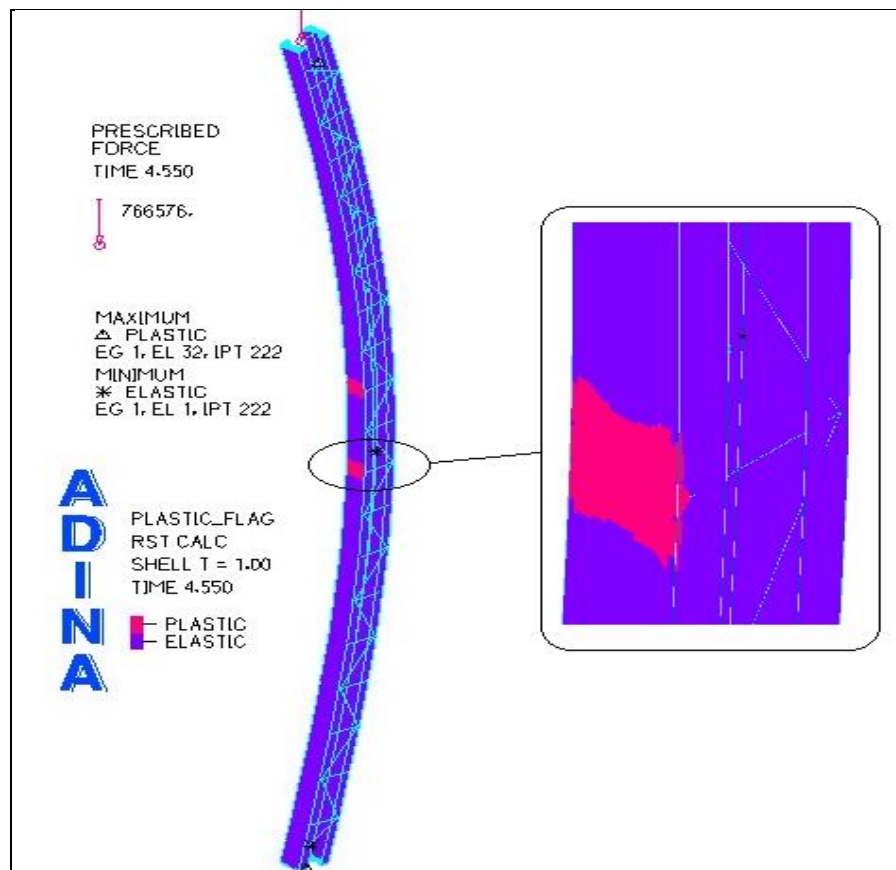
Πίνακας 3.103 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #2, 2AmR

Στο δρόμο ισορροπίας της ανάλυσης GMNIA σημειώνονται 4 χαρακτηριστικά σημεία των οποίων οι εντατικές και παραμορφωσιακές καταστάσεις φαίνονται στα Σχ. 3.104 έως 3.111.

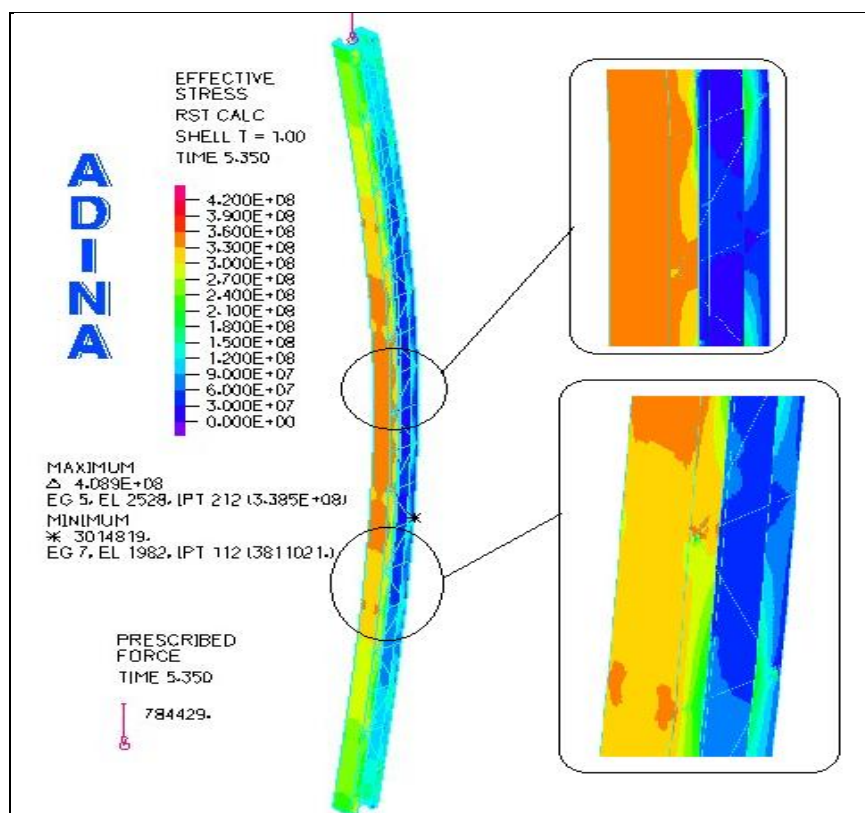


Σχ. 3.104 Τάσεις von Mises- Βήμα 71^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)

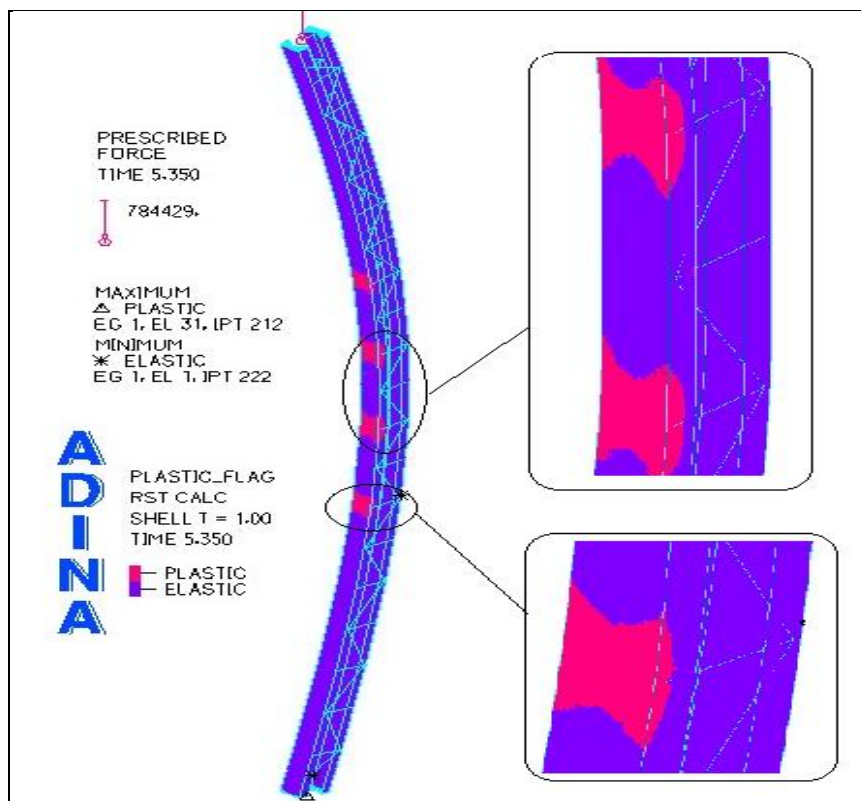
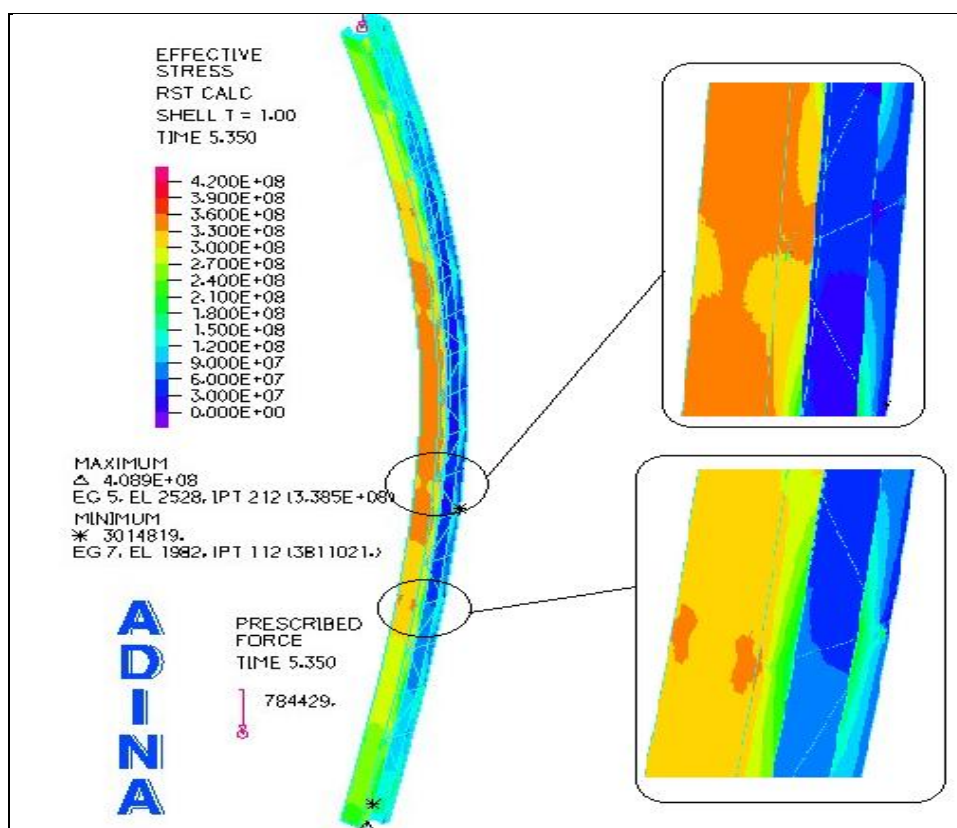
Σχ. 3.105 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 71^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)Σχ. 3.106 Τάσεις von Mises- Βήμα 91^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)

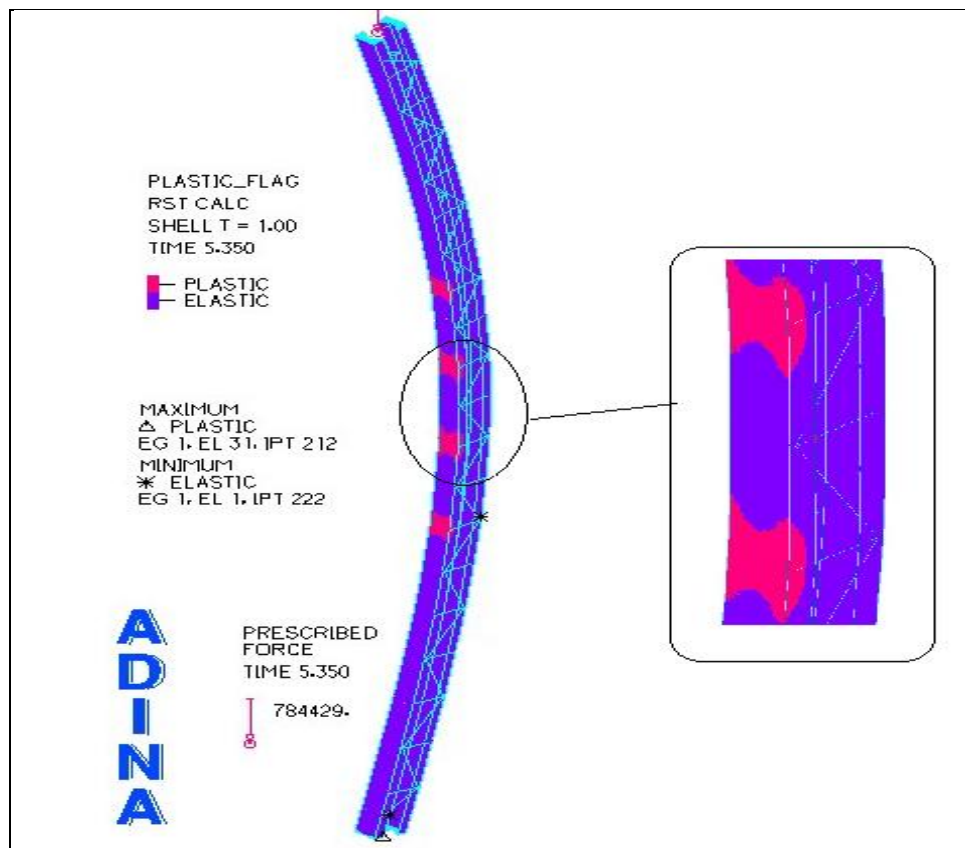


Σχ. 3.107 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 91^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)



Σχ. 3.108 Τάσεις von Mises- Βήμα 107^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)

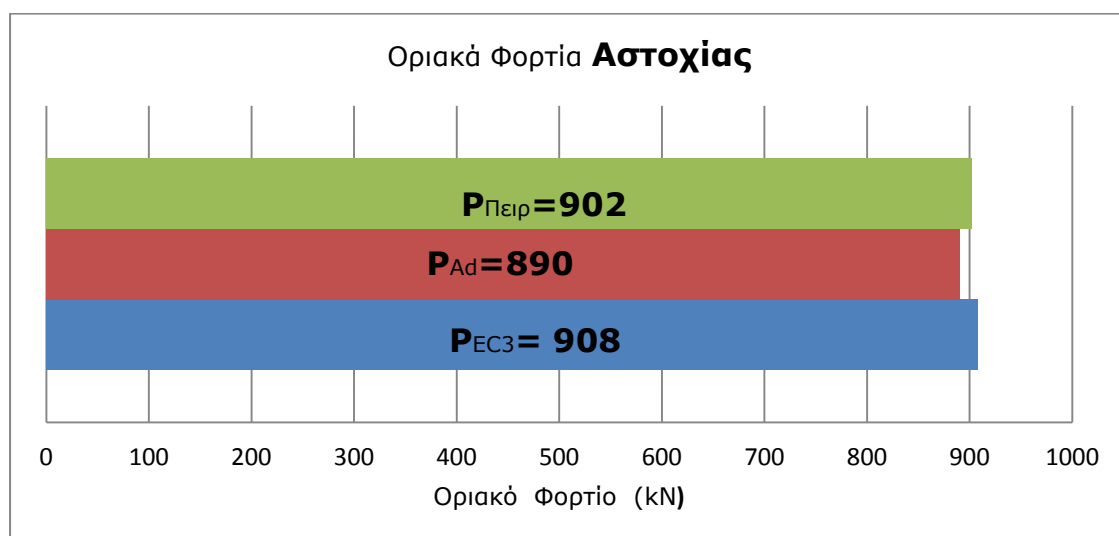
Σχ. 3.109 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 107^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)Σχ. 3.110 Τάσεις von Mises- Βήμα 117^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)



Σχ. 3.111 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 117^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)

3.9.2.2 Υποστυλώμα #1 (εκκ. 0.46cm)

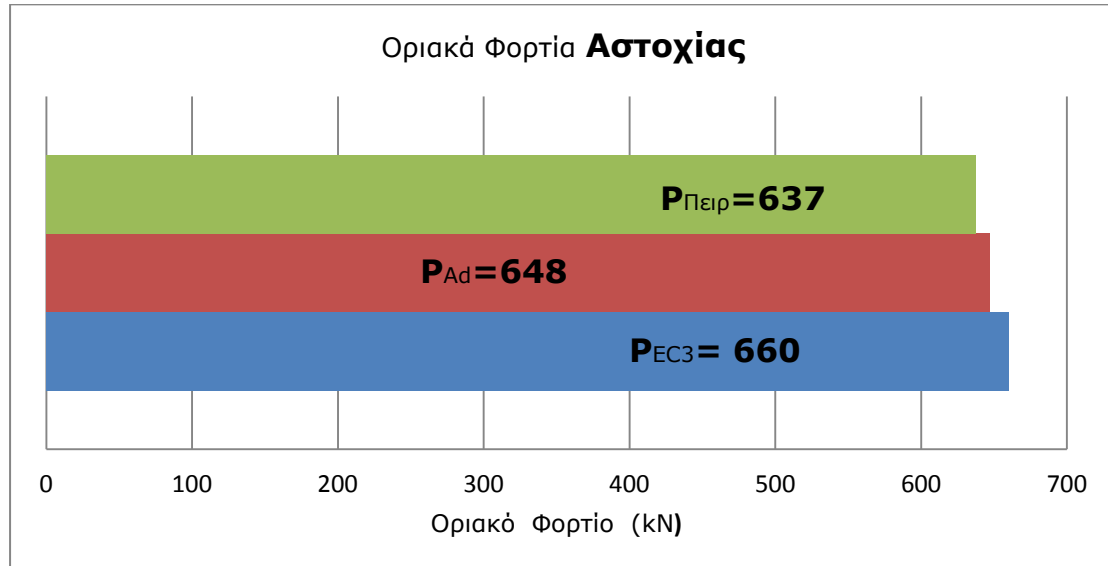
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 33.14 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.0128 m . Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=1.3\%$, $A2=-0.6\%$, $A3=-2.0\%$.



Πίνακας 3.112 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #1, 2AmR

3.9.2.3 Υποστυλώμα #3 (εκκ. 4.0cm)

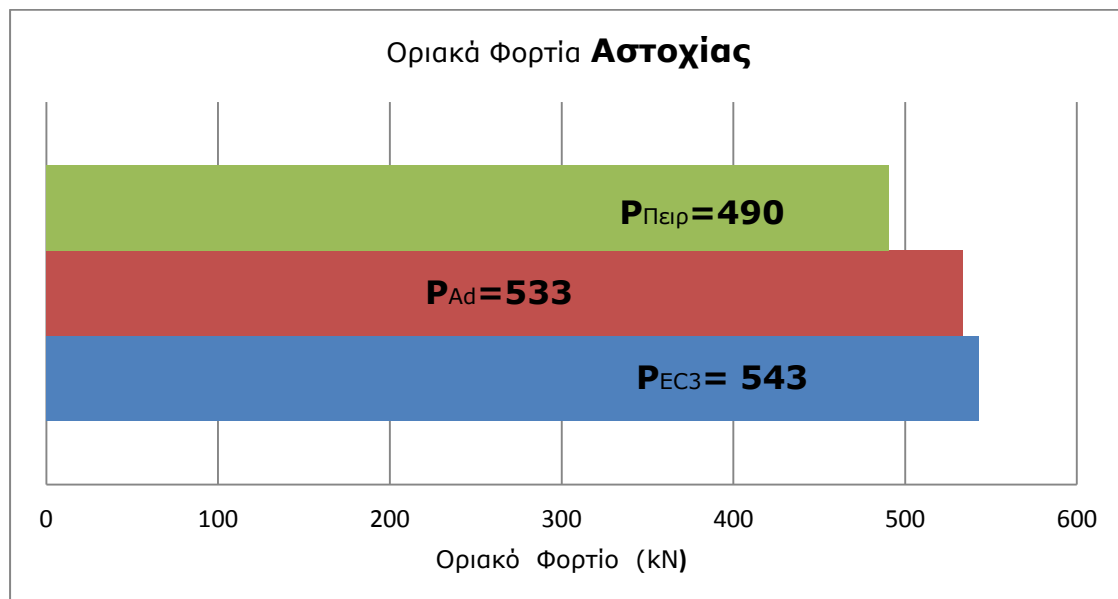
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 33.24 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.0128 m . Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1 = -1.6\%$, $A2 = -3.6\%$, $A3 = -2.0\%$.



Πίνακας 3.113 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #3, 2AmR

3.9.2.4 Υποστυλώμα #4 (εκκ. 8.0cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 35.10 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.0128 m . Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1 = -8.8\%$, $A2 = -10.8\%$, $A3 = -1.8\%$.

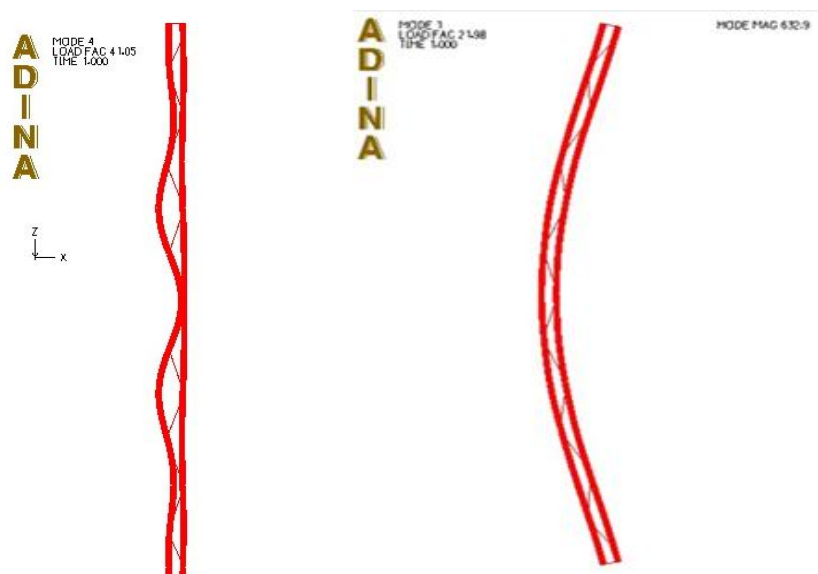


Πίνακας 3.114 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #4, 2AmR

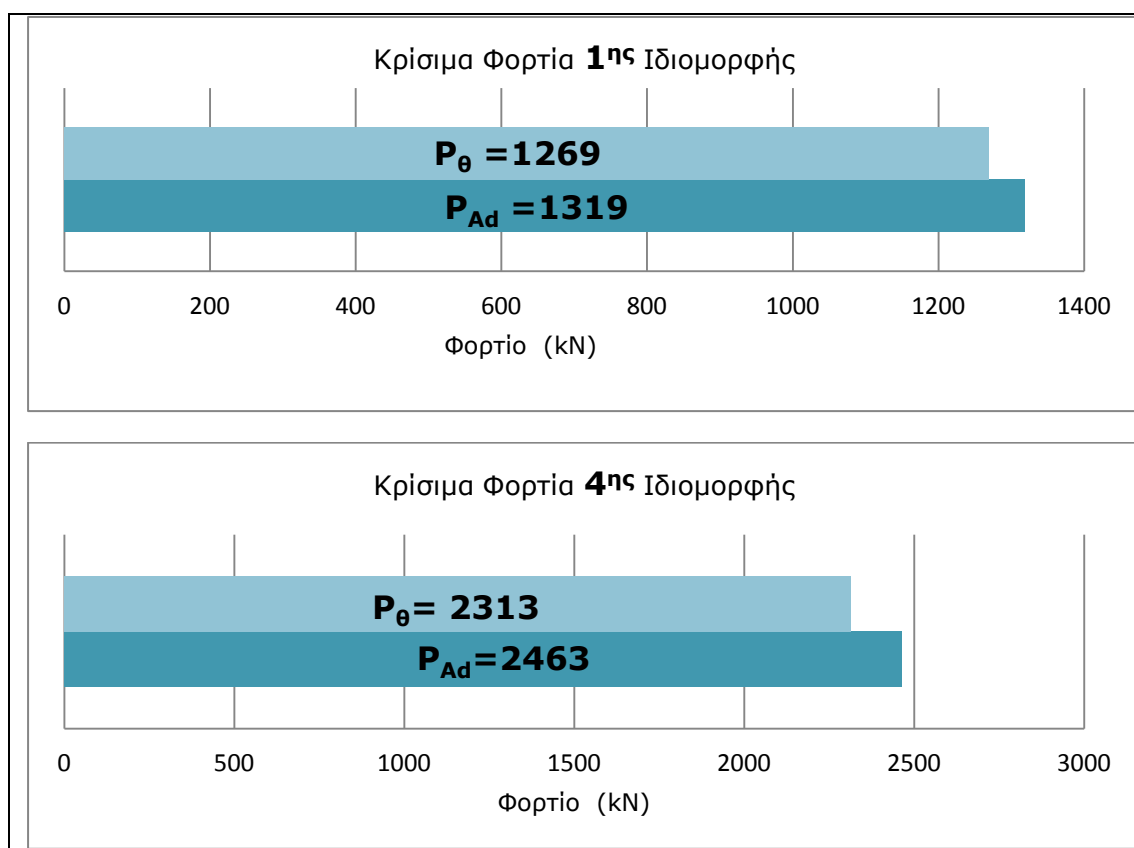
3.10 Σειρά 2BoR

3.10.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)

Στο Σχ. 3.115 φαίνονται η καθολική και η πρώτη τοπική ιδιομορφή (λυγισμός Euler του πέλματος μεταξύ κατάλληλων σημείων).



Σχ. 3.115 Πρώτη καθολική και πρώτη τοπική ιδιομορφή, 1^η και 4^η αντίστοιχα



Πίνακας 3.116 Κρίσιμα Φορτία Ιδιομορφών, θεωρητικά και από το Adina

Ο Πίνακας 3.116 περιέχει τα φορτία των ιδιομορφών αυτών συγκρινόμενα με τα θεωρητικώς υπολογισμένα (Εξ. 1.6, 1.8).

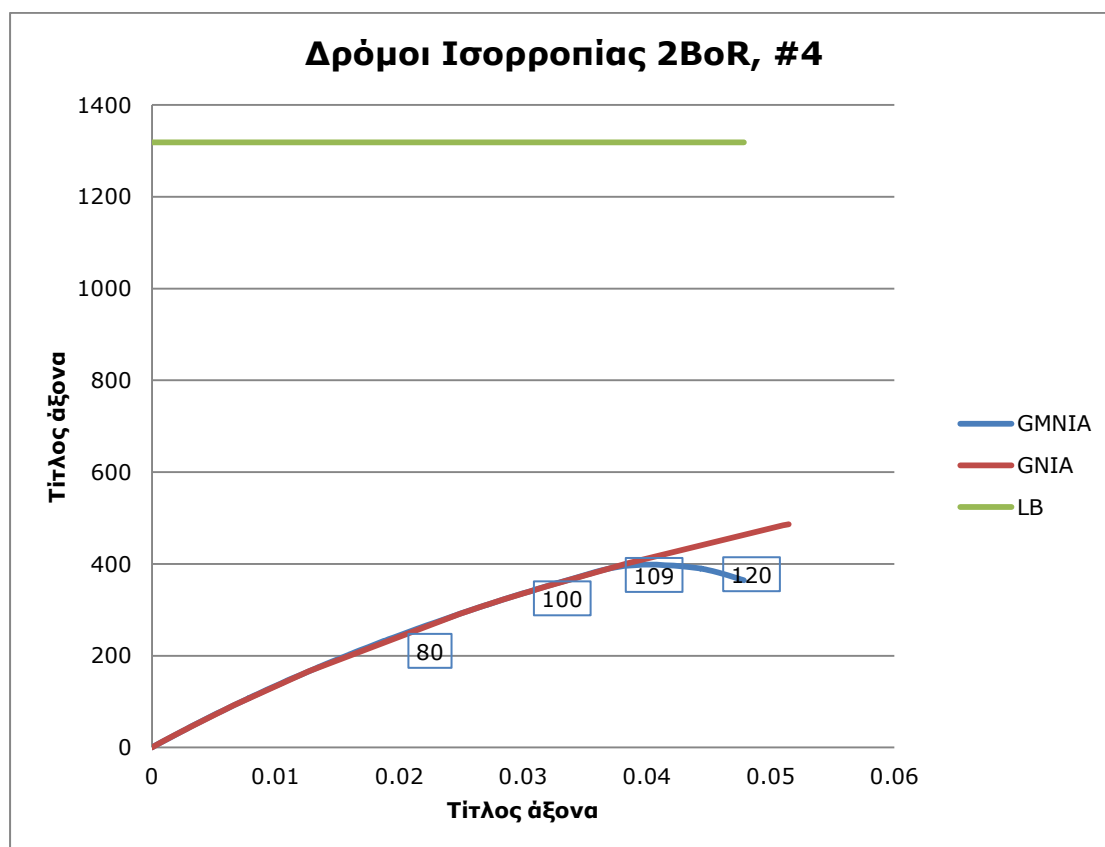
Η % απόκλιση μεταξύ θεωρητικού φορτίου λυγισμού και φορτίου από την ανάλυση LBA του Adina, $([P_{Ad}-P_{\theta}]/P_{Ad})$, είναι για τις δύο ιδιομορφές 3.8% και 6.1% αντίστοιχα.

3.10.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)

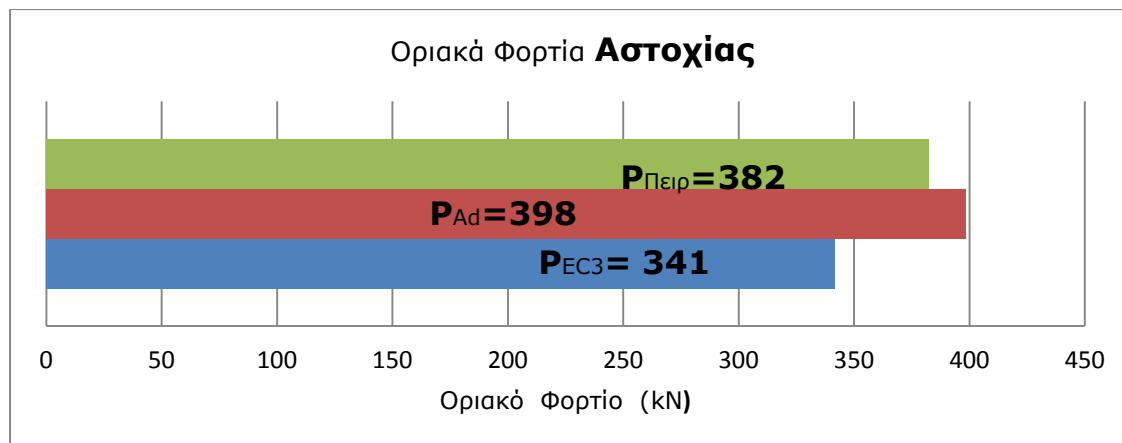
Στη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας τίθενται γεωμετρικές ατέλειες πρώτης και τέταρτης ιδιομορφής μεγέθους που ορίζεται σύμφωνα με τον EC-3. Ο συνδυασμός εκκεντρότητας και προσανατολισμού ατελειών είναι ο δυσμενέστερος δυνατός. Συγκεκριμένα, η εκκεντρότητα και η καθολική ατέλεια ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το πέλμα στο οποίο εισήχθη η τοπική ατέλεια να είναι το πλέον θλιβόμενο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ξεκινώντας από το 4^ο υποστύλωμα της σειράς.

3.10.2.1 Υποστύλωμα #4 (εκκ. 8.0cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 27.85kN/cm². Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01272m και της τέταρτης 1.775·10⁻³m. Για το υποστύλωμα #4 διεξαγεται, εκτός από ανάλυση GMNIA, και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, GNIA. Οι % αποκλίσεις για το υποστύλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: A1=-4.2%, A2=10.7%, A3=14.3%.

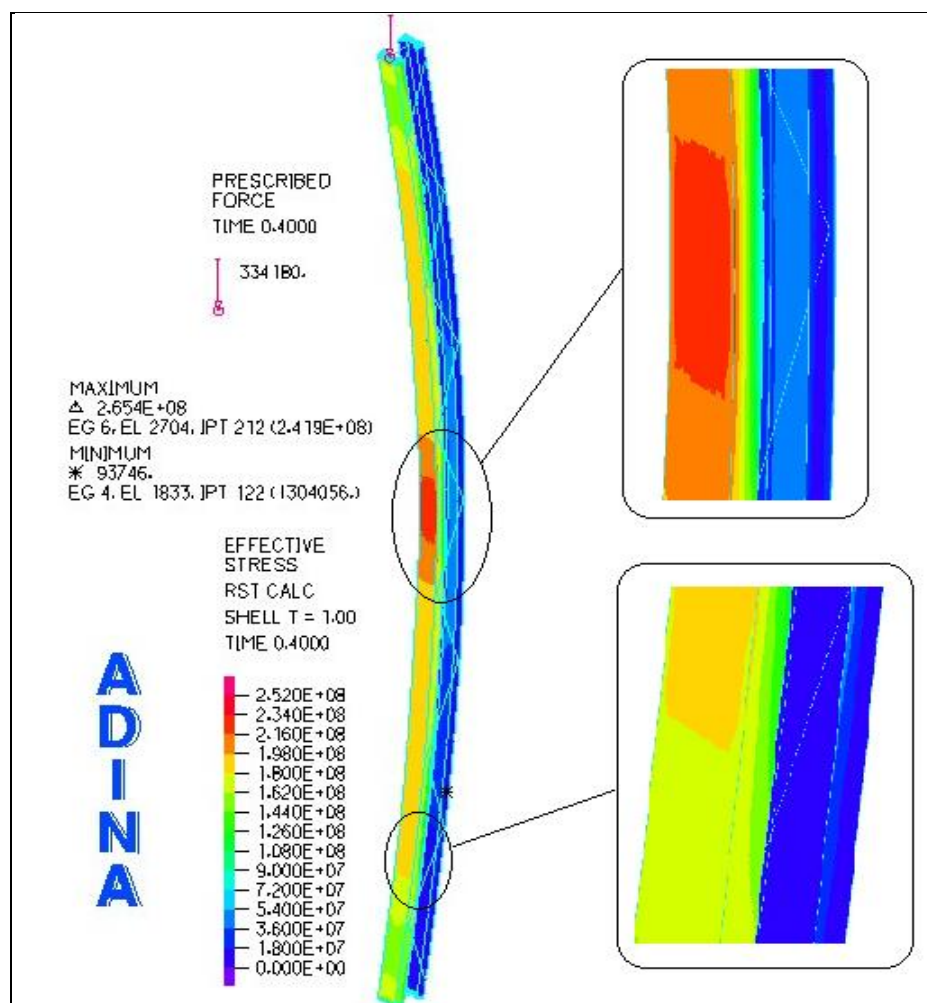


Σχ. 3.117 Δρόμοι Ισορροπίας για αναλύσεις GMNIA, GNIA και ύψος κρίσιμου φορτίου

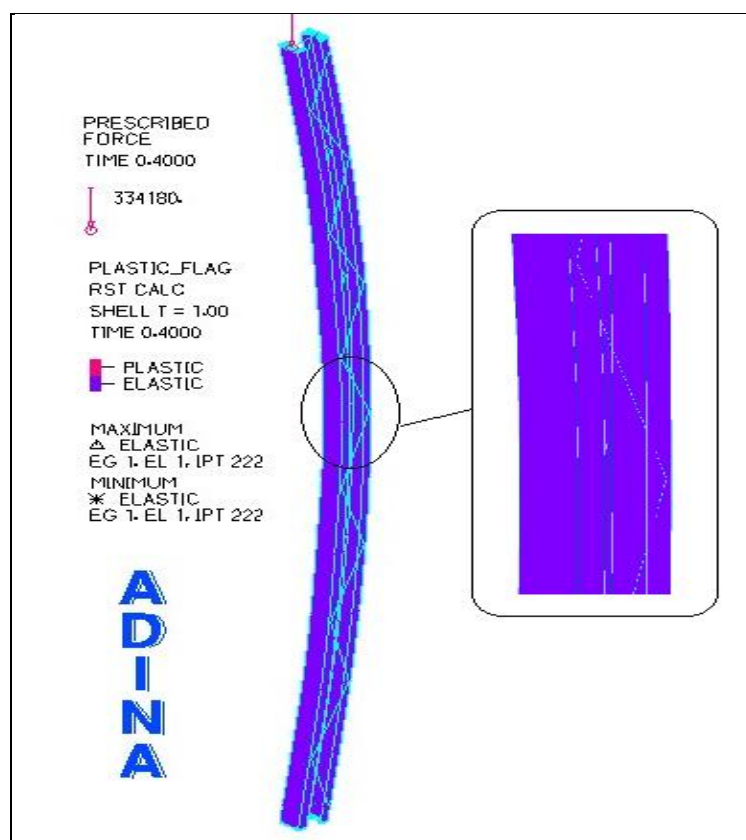


Πίνακας 3.118 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #4, 2BoR

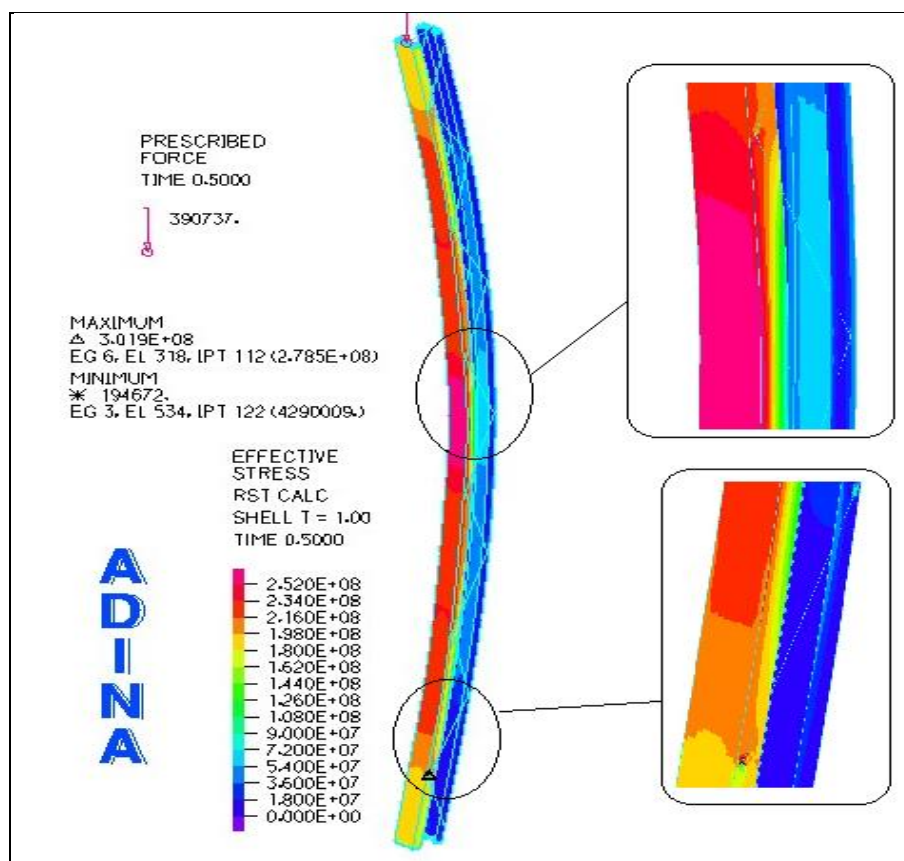
Στο δρόμο ισορροπίας της ανάλυσης GMNIA σημειώνονται 4 χαρακτηριστικά σημεία των οποίων οι εντατικές και παραμορφωσιακές καταστάσεις φαίνονται στα Σχ. 3.119 έως 3.126.



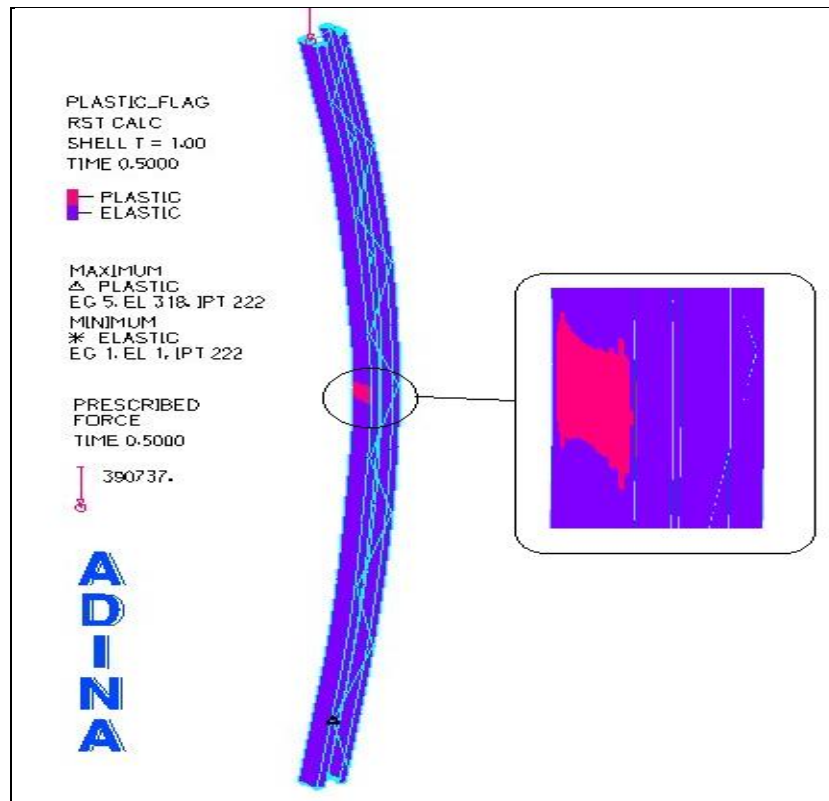
Σχ. 3.119 Τάσεις von Mises- Βήμα 80° ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)



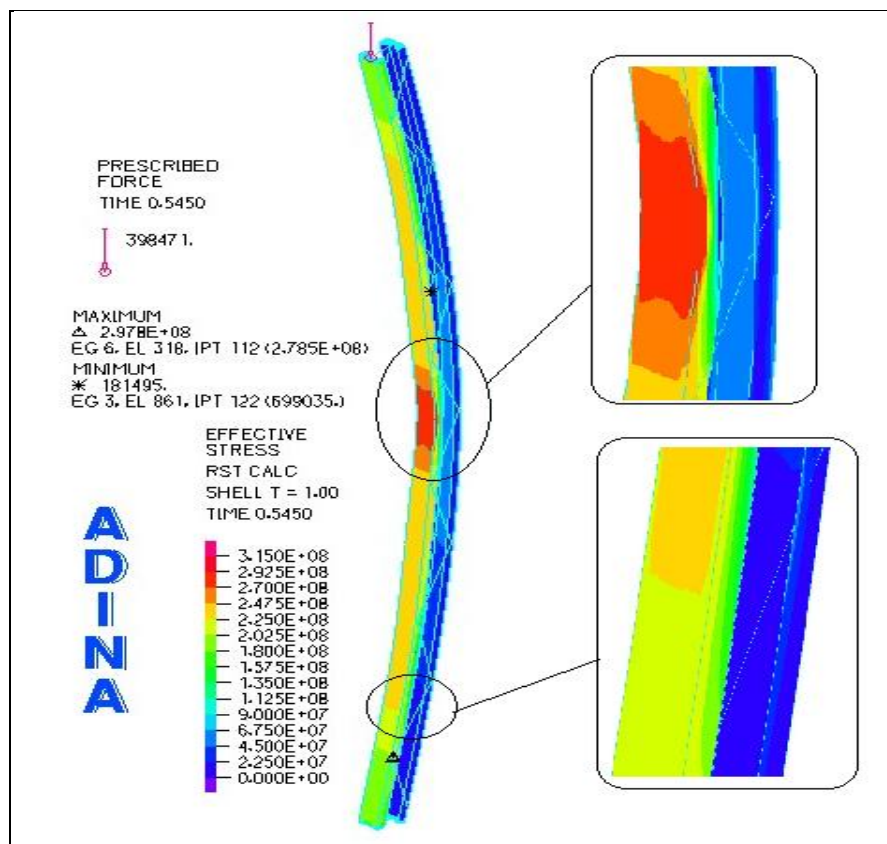
Σχ. 3.120 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 80° ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)



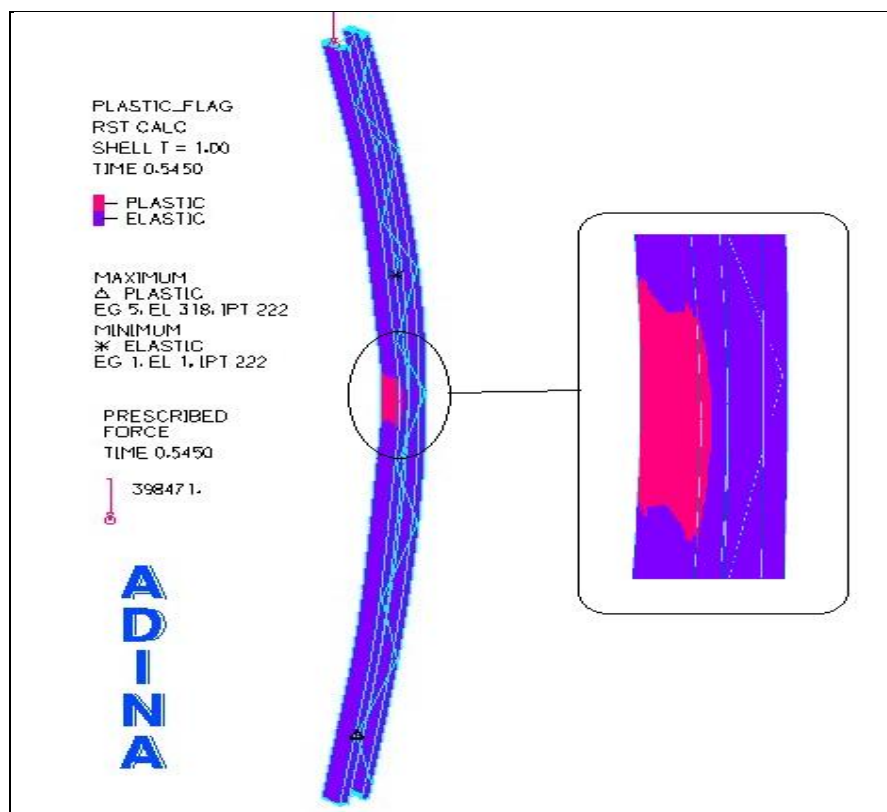
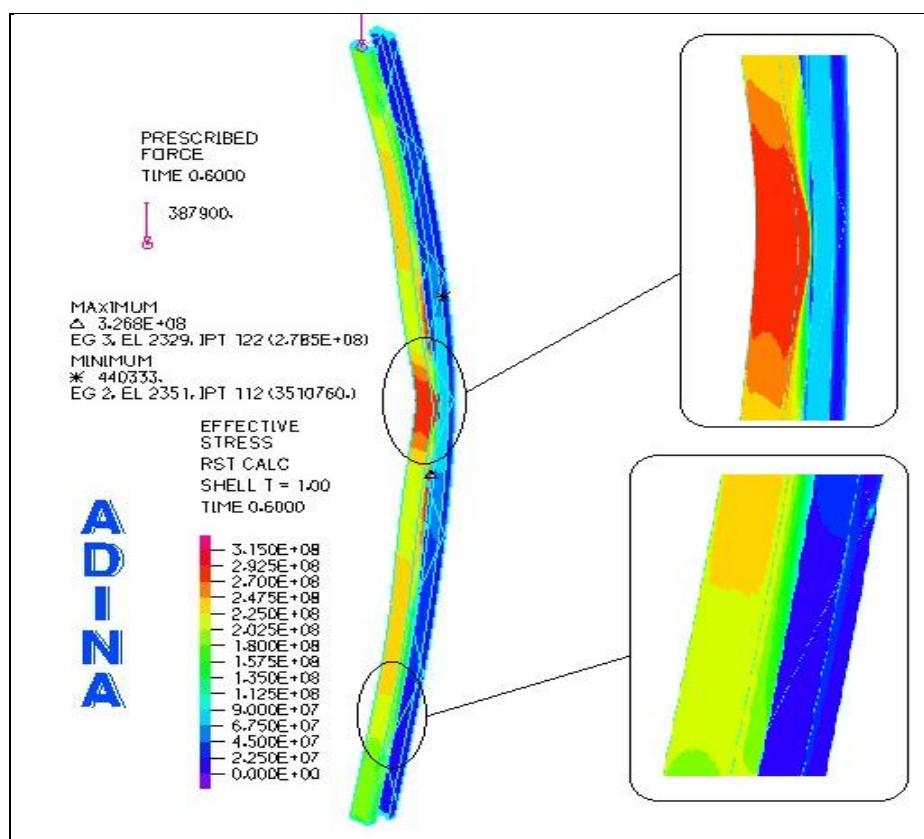
Σχ. 3.121 Τάσεις von Mises- Βήμα 100° ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)

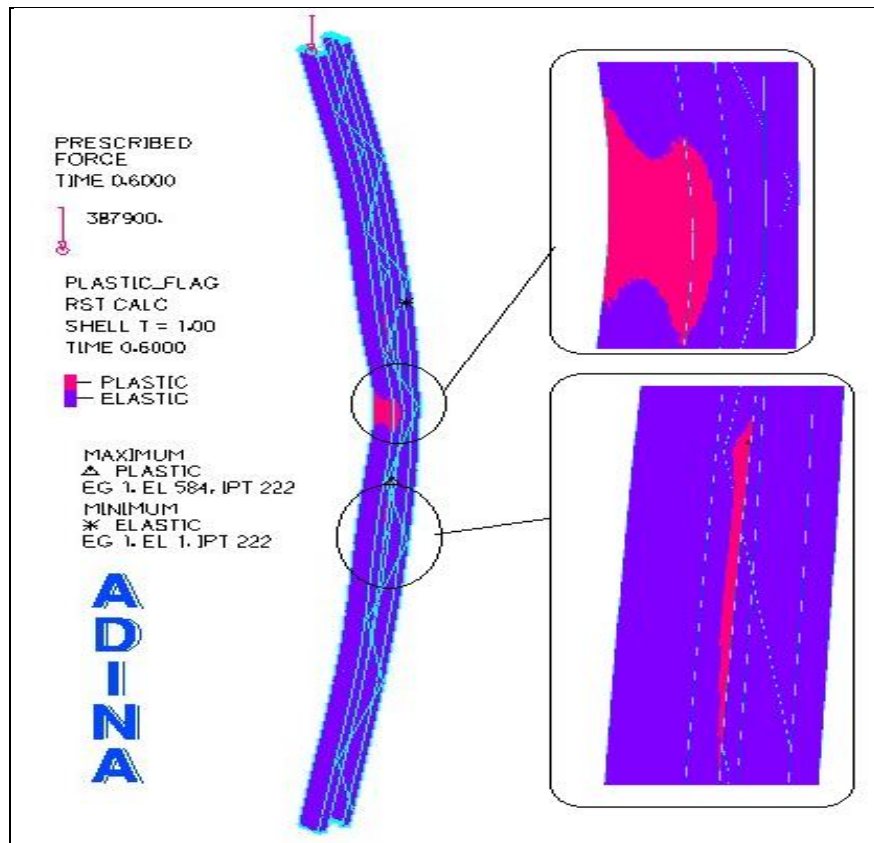


Σχ. 3.122 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 100^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)



Σχ. 3.123 Τάσεις von Mises- Βήμα 109^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)

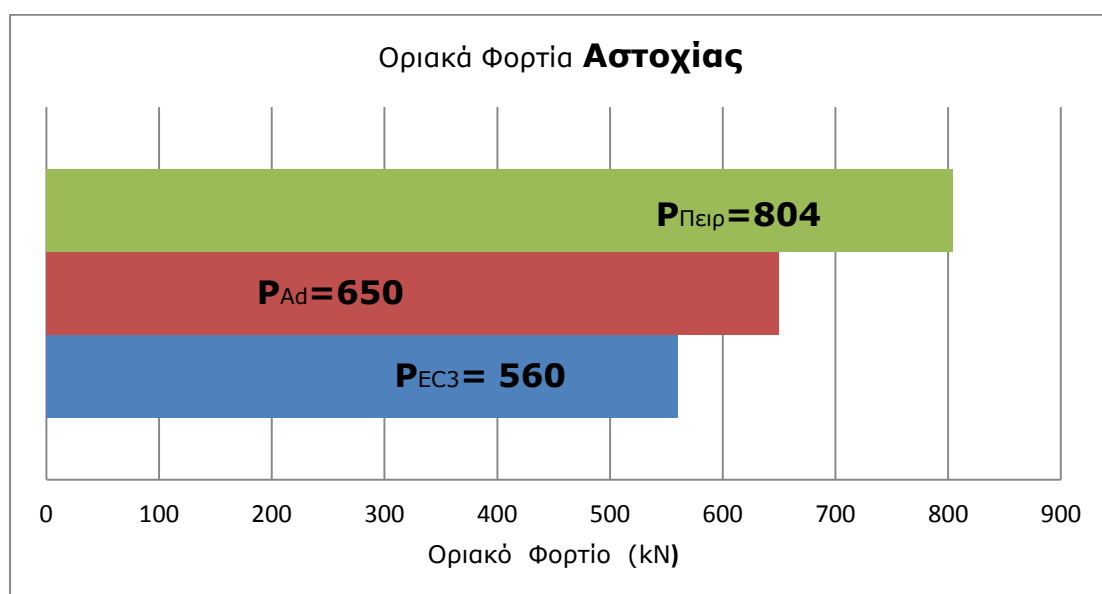
Σχ. 3.124 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 109^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)Σχ. 3.125 Τάσεις von Mises- Βήμα 120^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)



Σχ. 3.126 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 120° ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)

3.10.2.2 Υποστυλώμα #1 (εκκ. 0.5cm)

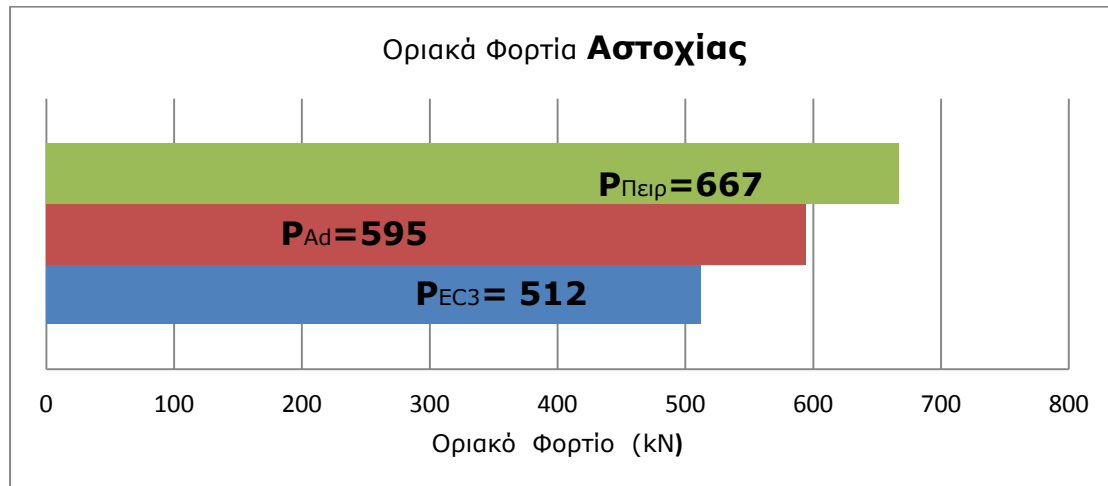
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 24.81 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01272 m και της τέταρτης $1.635 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=19.2\%$, $A2=30.3\%$, $A3=13.8\%$.



Πίνακας 3.127 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #1, 2BoR

3.10.2.3 Υποστυλώμα #2 (εκκ. 1.6cm)

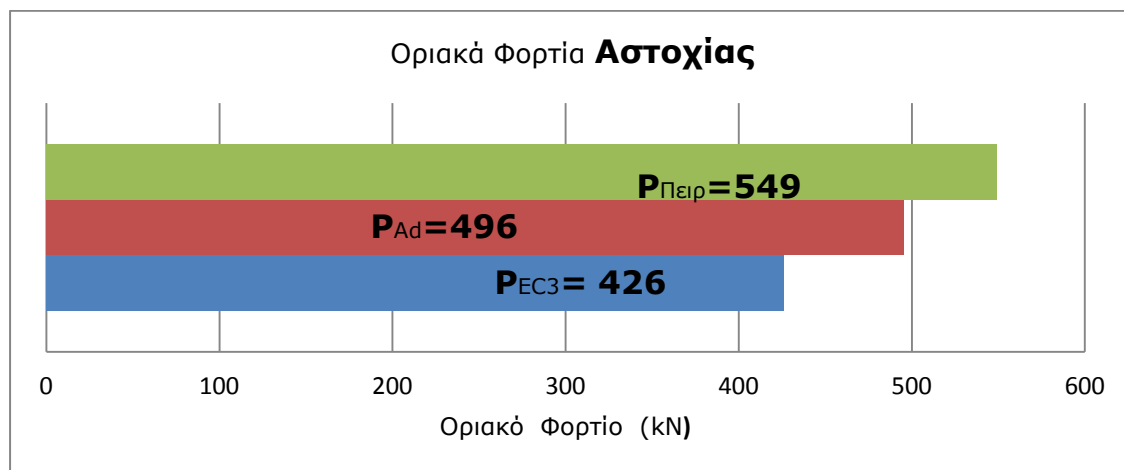
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 26.08 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01272 m και της τέταρτης $1.695 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=10.8\%$, $A2=23.3\%$, $A3=13.9\%$.



Πίνακας 3.128 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #2, 2BoR

3.10.2.4 Υποστυλώμα #3 (εκκ. 4.0cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 26.87 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος πρώτης ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01272 m και της τέταρτης $1.731 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=9.7\%$, $A2=22.4\%$, $A3=14.0\%$.



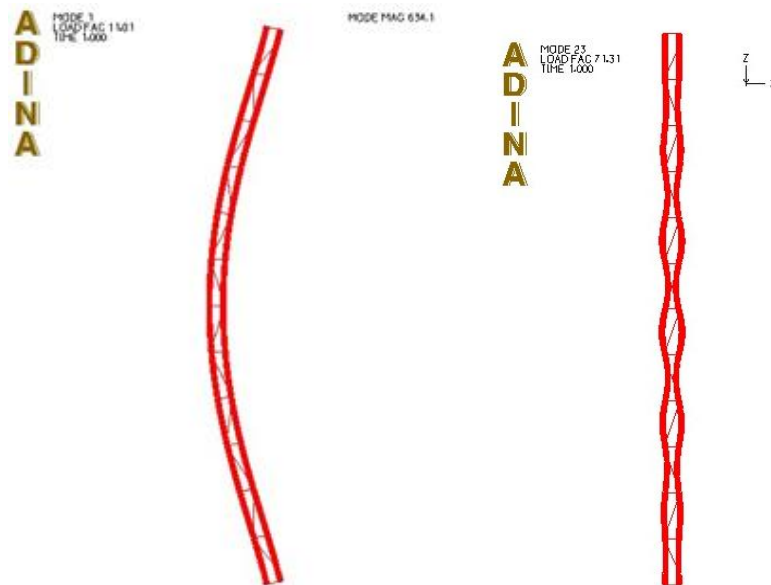
Πίνακας 3.129 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #3, 2BoR

3.11 Σειρά 2BmR

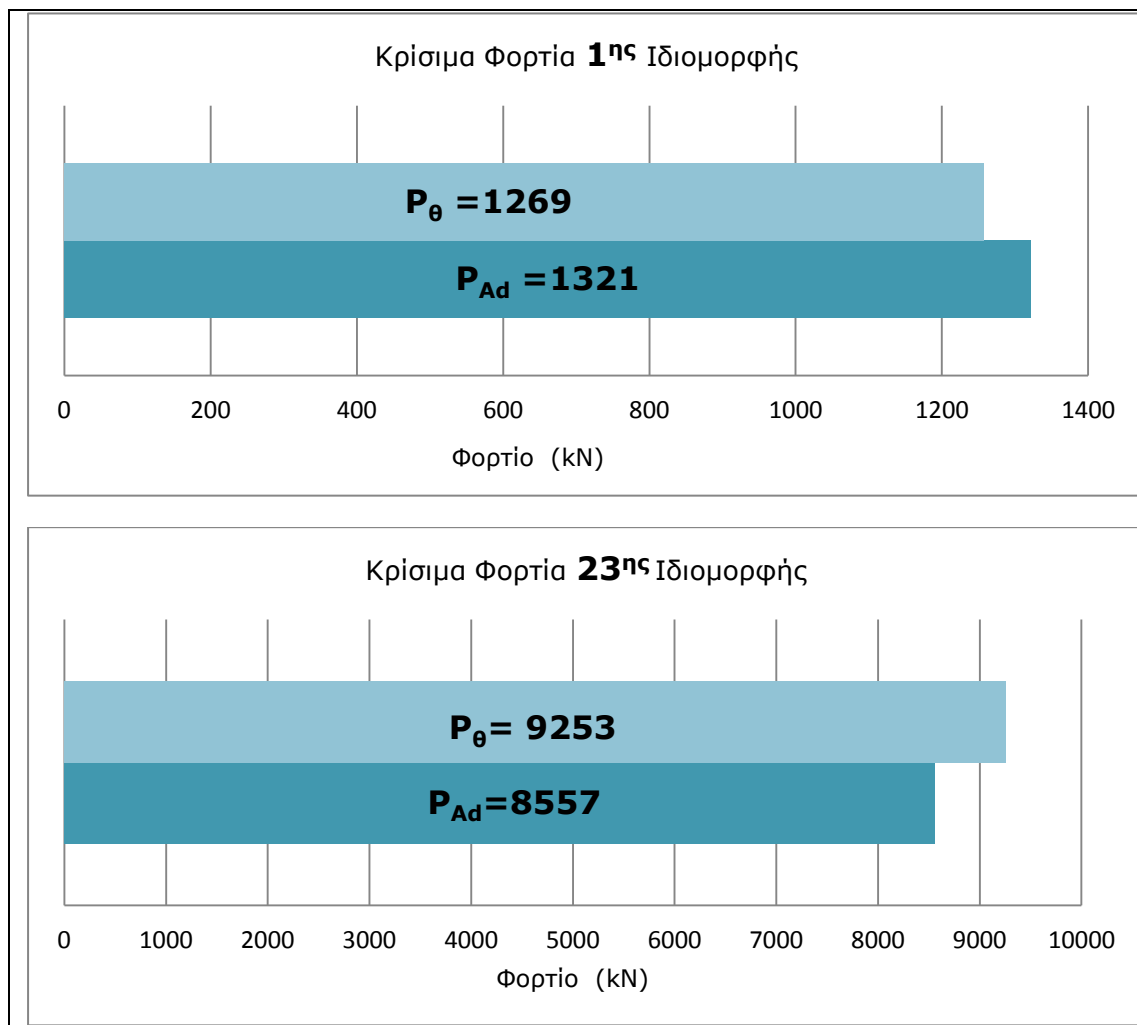
3.11.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)

Στο Σχ. 3.130 φαίνονται η καθολική και η πρώτη τοπική ιδιομορφή (λυγισμός Euler του πέλματος μεταξύ κατάλληλων σημείων). Ο Πίνακας 3.131 περιέχει τα φορτία των ιδιομορφών αυτών συγκρινόμενα με τα θεωρητικώς υπολογισμένα (Εξ.

1.6, 1.8). Η % απόκλιση μεταξύ θεωρητικού φορτίου λυγισμού και φορτίου από την ανάλυση LBA του Adina, $([P_{Ad}-P_{\theta}]/P_{Ad})$, είναι για τις δύο ιδιομορφές 4.0% και -8.1% αντίστοιχα.



Σχ. 3.130 Πρώτη καθολική και πρώτη τοπική ιδιομορφή, 1^η και 23^η αντίστοιχα



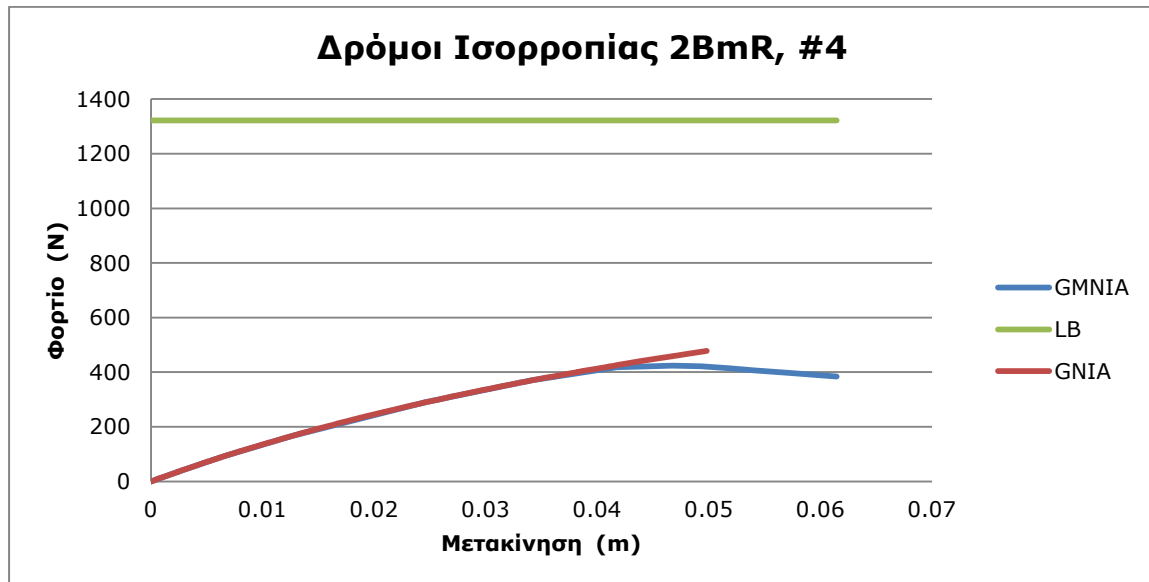
Πίνακας 3.131 Κρίσιμα Φορτία Ιδιομορφών, θεωρητικά και από το Adina

3.11.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)

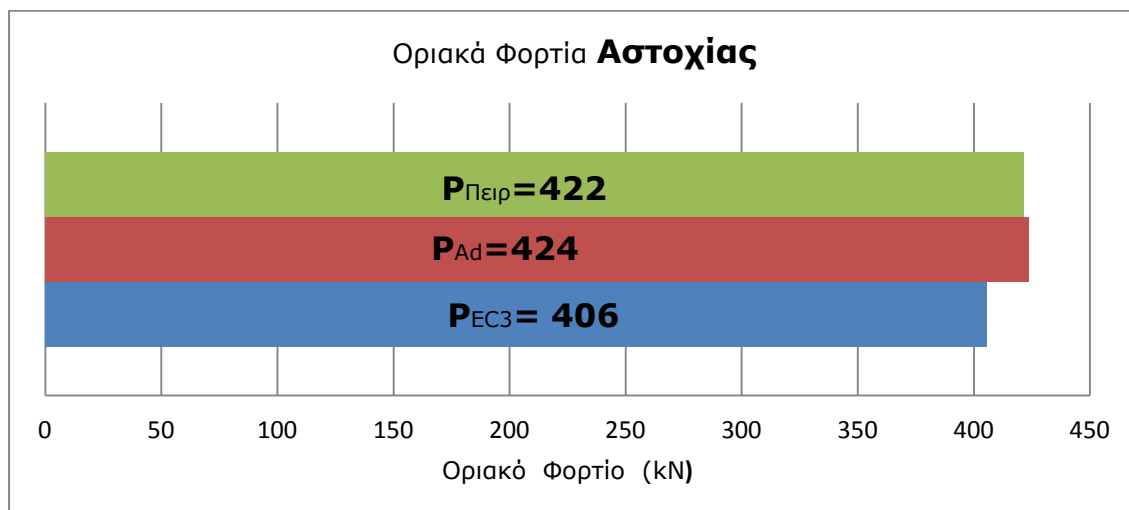
Στη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας τίθενται γεωμετρικές ατέλειες πρώτης και εικοστής τρίτης ιδιομορφής μεγέθους που ορίζεται σύμφωνα με τον EC-3. Ο συνδυασμός εκκεντρότητας και προσανατολισμού ατελειών είναι ο δυσμενέστερος δυνατός. Συγκεκριμένα, η εκκεντρότητα και η καθολική ατέλεια ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το πέλμα στο οποίο εισήχθη η τοπική ατέλεια να είναι το πλέον θλιβόμενο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ξεκινώντας από το 4^ο υποστύλωμα της σειράς.

3.11.2.1 Υποστύλωμα #4 (εκκ. 8.0cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 27.85 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος 1^{ης} ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01272 m και της 23^{ης} $5.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Για το υποστύλωμα #4 διεξάγεται, εκτός από ανάλυση GMNIA, και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, GNIA.

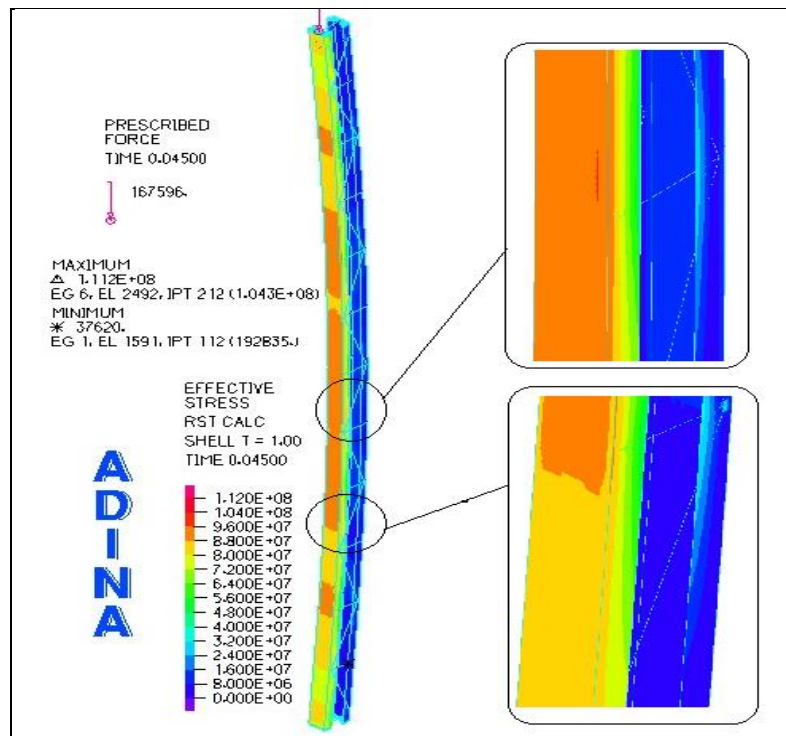


Σχ. 3.132 Δρόμοι Ισορροπίας για αναλύσεις GMNIA, GNIA και ύψος κρίσιμου φορτίου

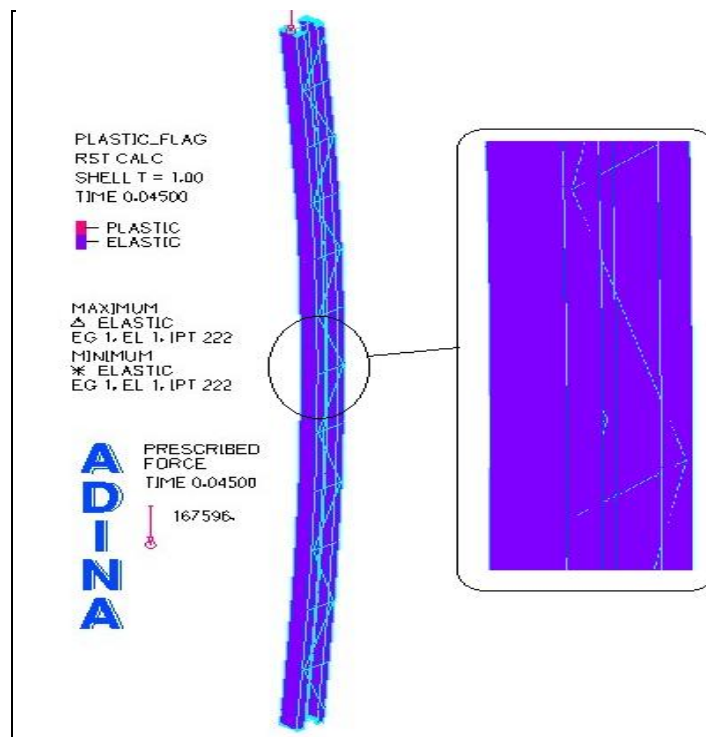


Πίνακας 3.133 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #4, 2BmR

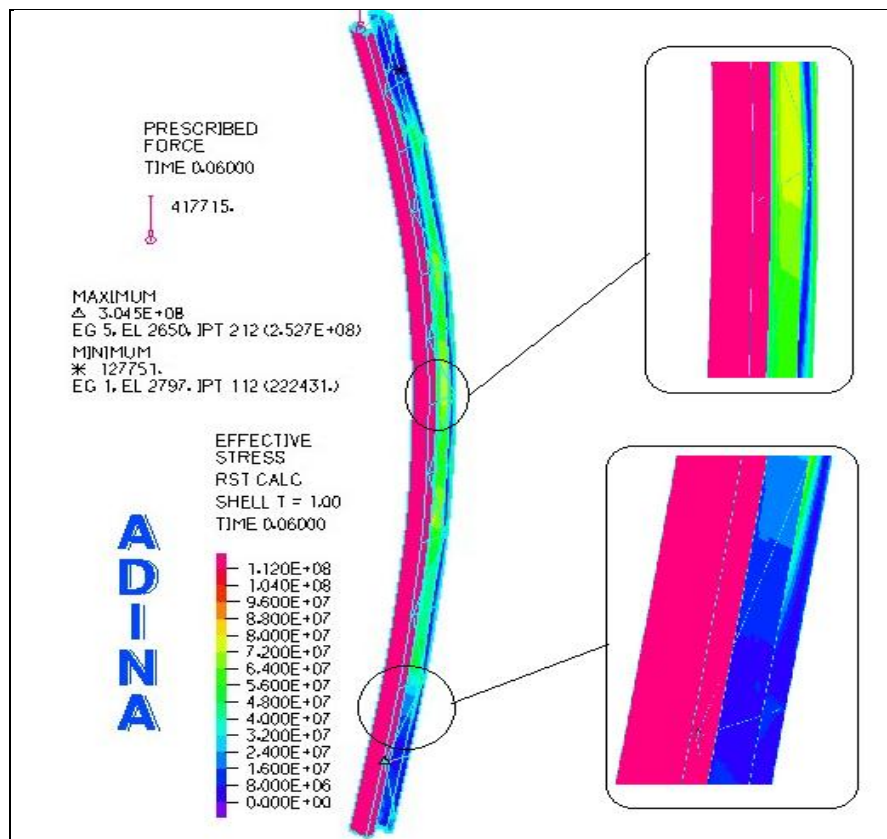
Οι % αποκλίσεις για το υποστυλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=-0.5\%$, $A2=3.8\%$, $A3=4.3\%$. Στο δρόμο ισορροπίας της ανάλυσης GMNIA σημειώνονται 4 χαρακτηριστικά σημεία των οποίων οι εντατικές και παραμορφωσιακές καταστάσεις φαίνονται στα Σχ. 3.134 έως 3.141.



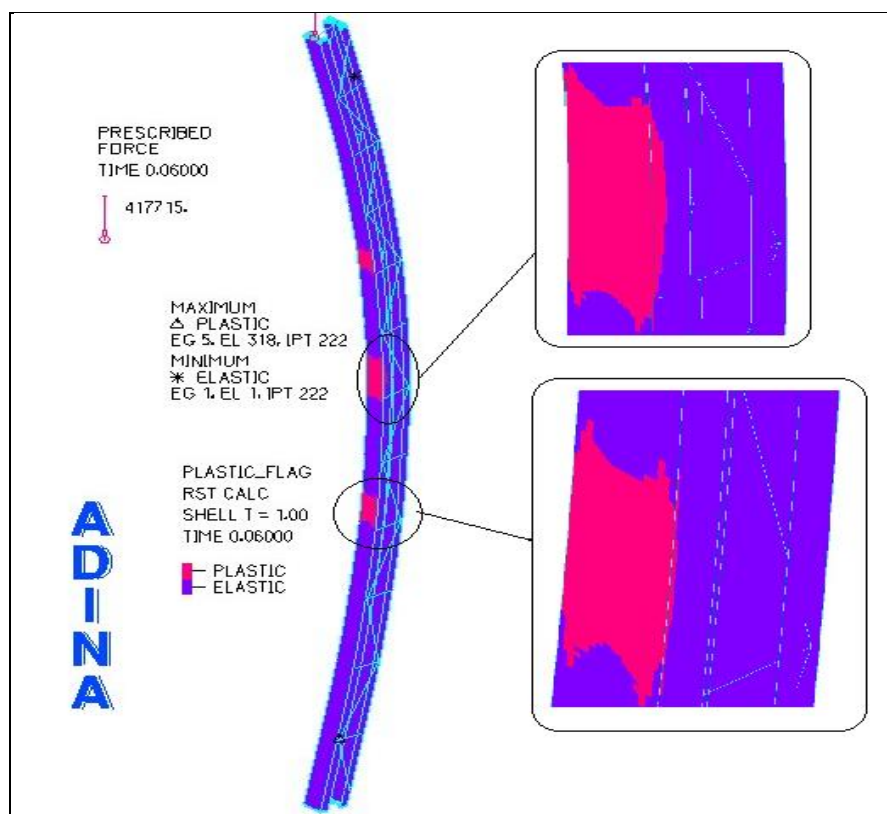
Σχ. 3.134 Τάσεις von Mises- Βήμα 14^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)



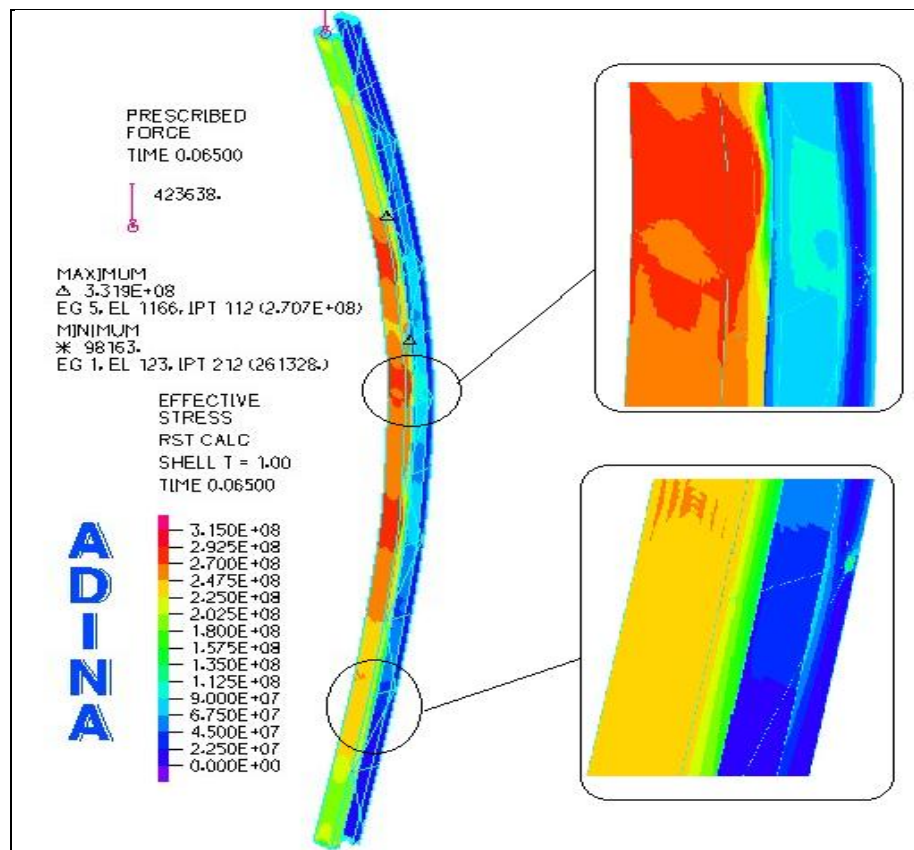
Σχ. 3.135 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 14^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)



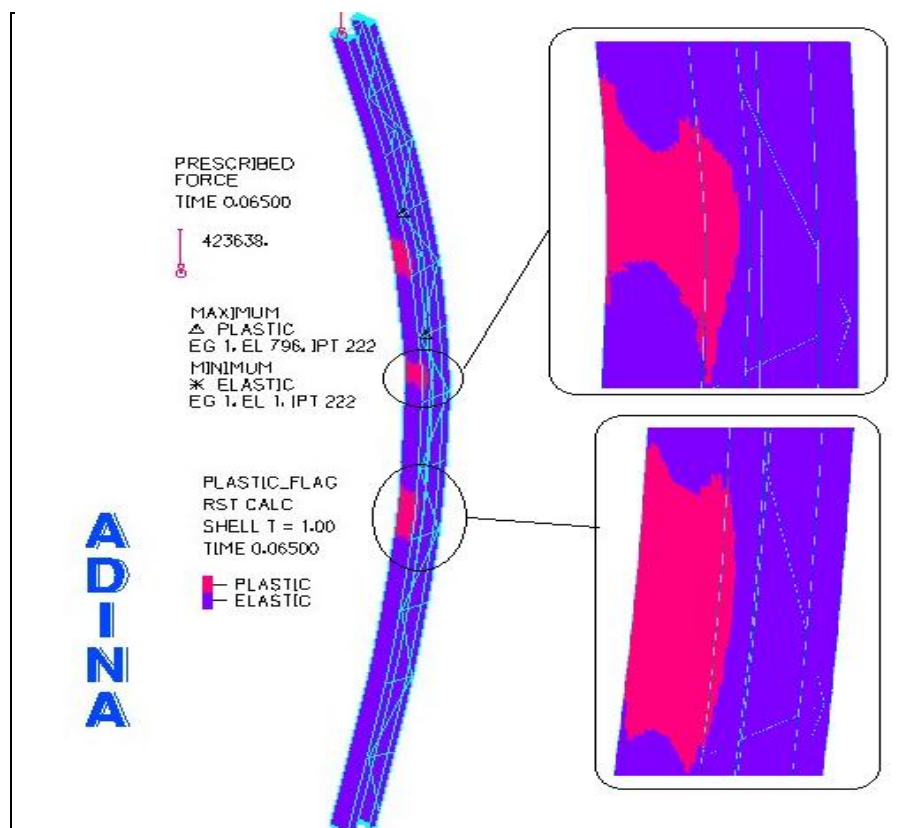
Σχ. 3.136 Τάσεις von Mises- Βήμα 18° ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)



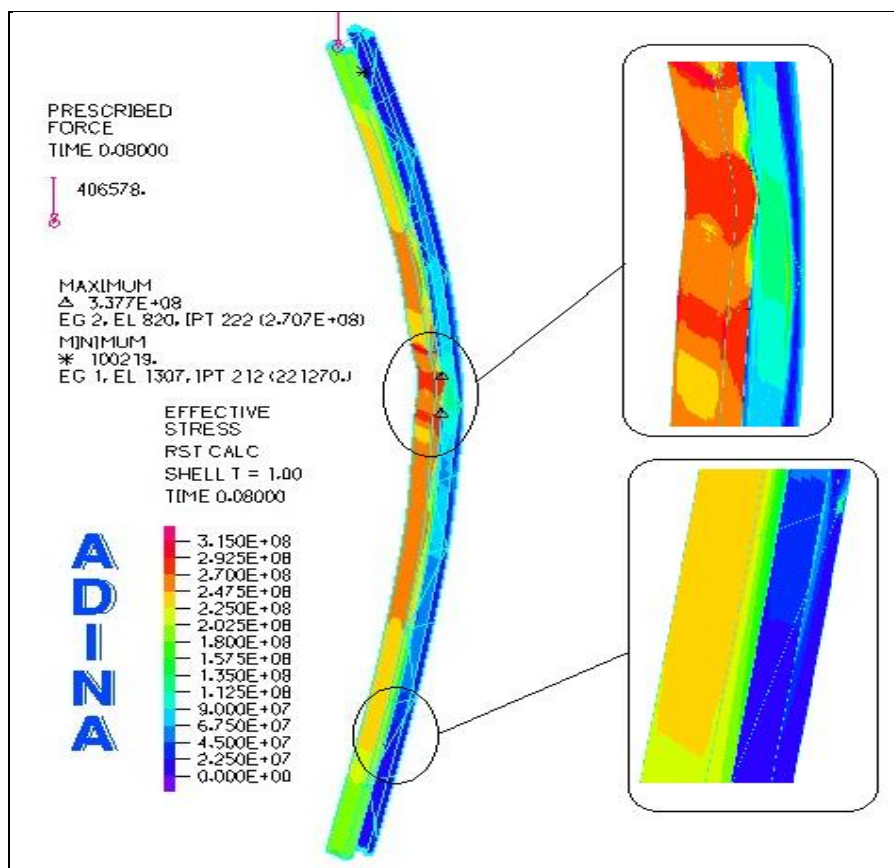
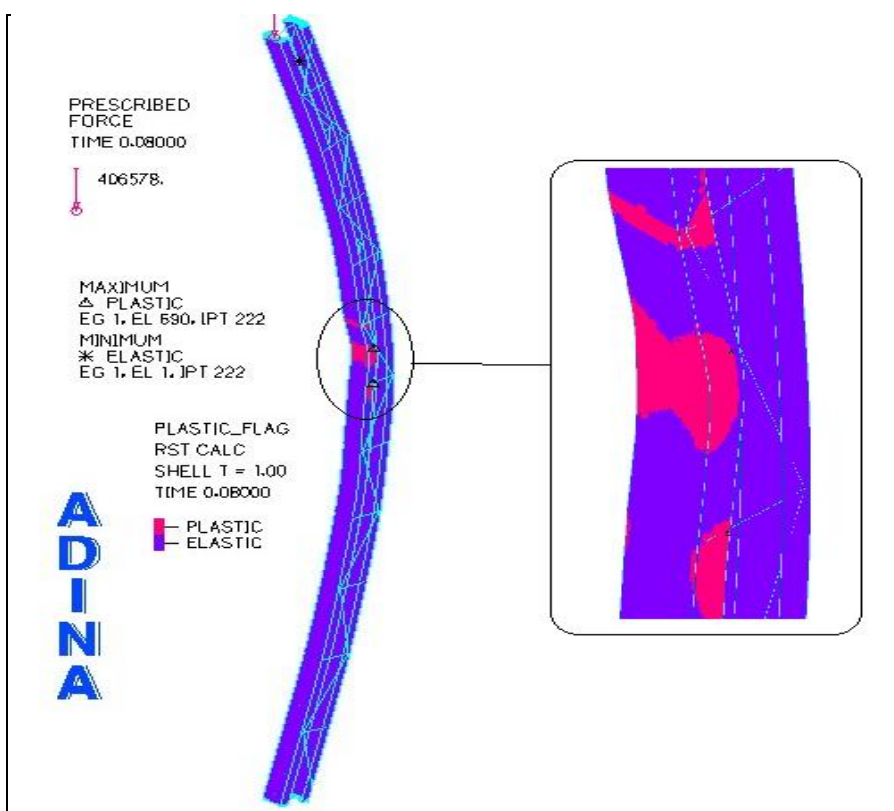
Σχ. 3.137 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 18° ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)



Σχ. 3.138 Τάσεις von Mises- Βήμα 20^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)

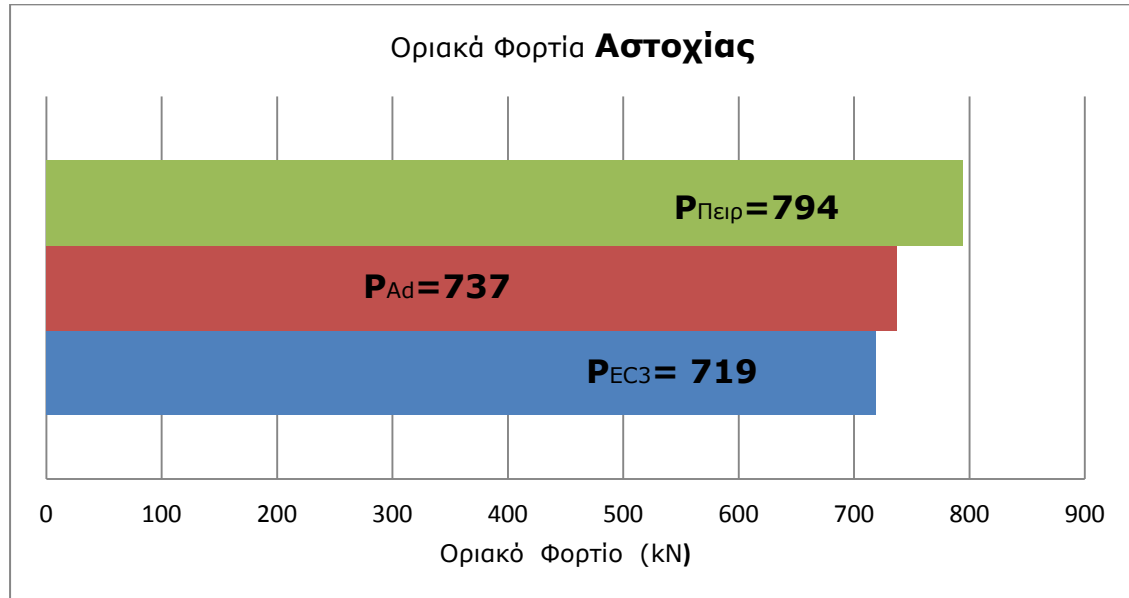


Σχ. 3.139 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 20^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)

Σχ. 3.140 Τάσεις von Mises- Βήμα 24^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)Σχ. 3.141 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 24^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)

3.11.2.2 Υποστυλώμα #1 (εκκ. 0.6cm)

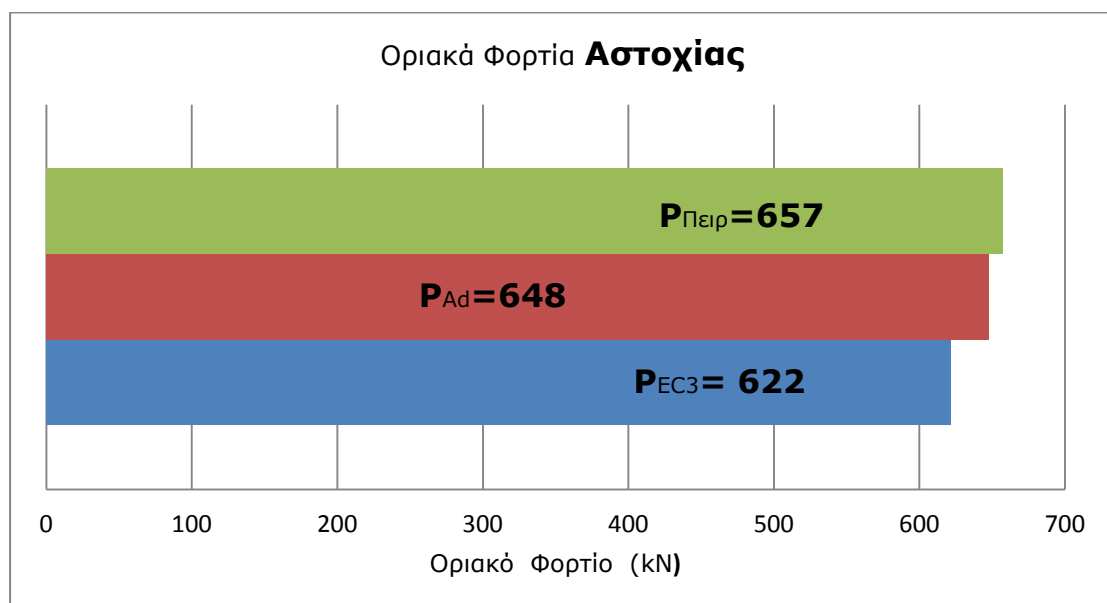
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 24.81 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος 1^{ης} ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01272 m και της 23^{ης} $5.33 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=7.2\%$, $A2=9.5\%$, $A3=2.5\%$.



Πίνακας 3.142 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #1, 2BmR

3.11.2.3 Υποστυλώμα #2 (εκκ. 1.73cm)

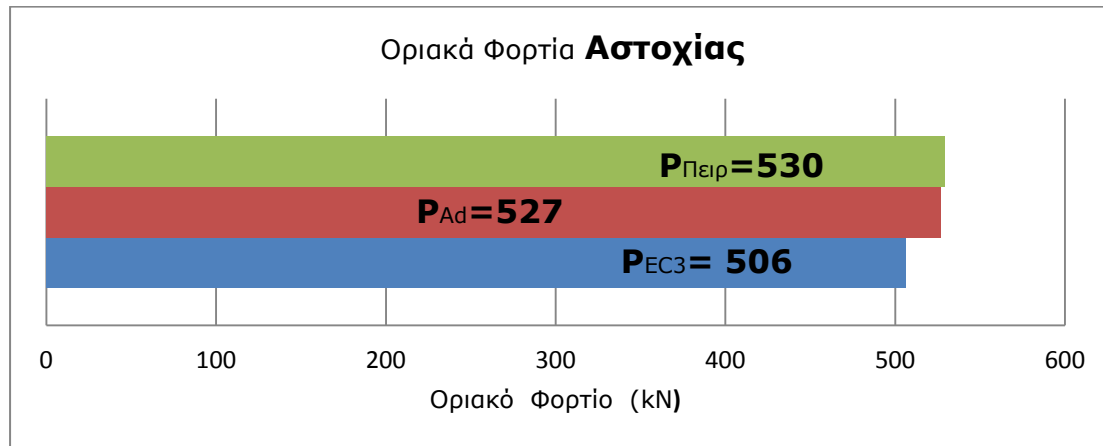
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 26.08 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος 1^{ης} ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01272 m και της 23^{ης} $5.22 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=1.4\%$, $A2=5.3\%$, $A3=4.0\%$.



Πίνακας 3.143 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #2, 2BmR

3.11.2.4 Υποστυλώμα #3 (εκκ. 4.0cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 26.87 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος 1^{ης} ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01272 m και της 23^{ης} $5.02 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=0.6\%$, $A2=4.4\%$, $A3=3.9\%$.

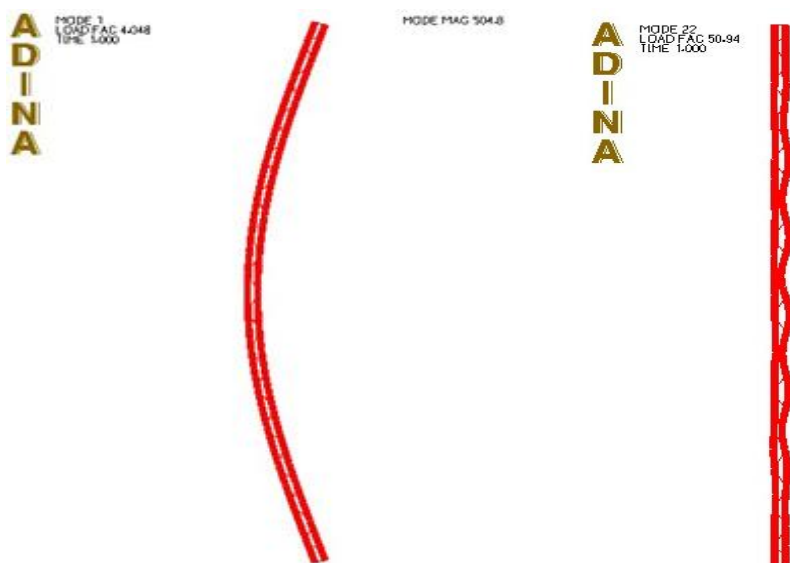


Πίνακας 3.144 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #3, 2BmR

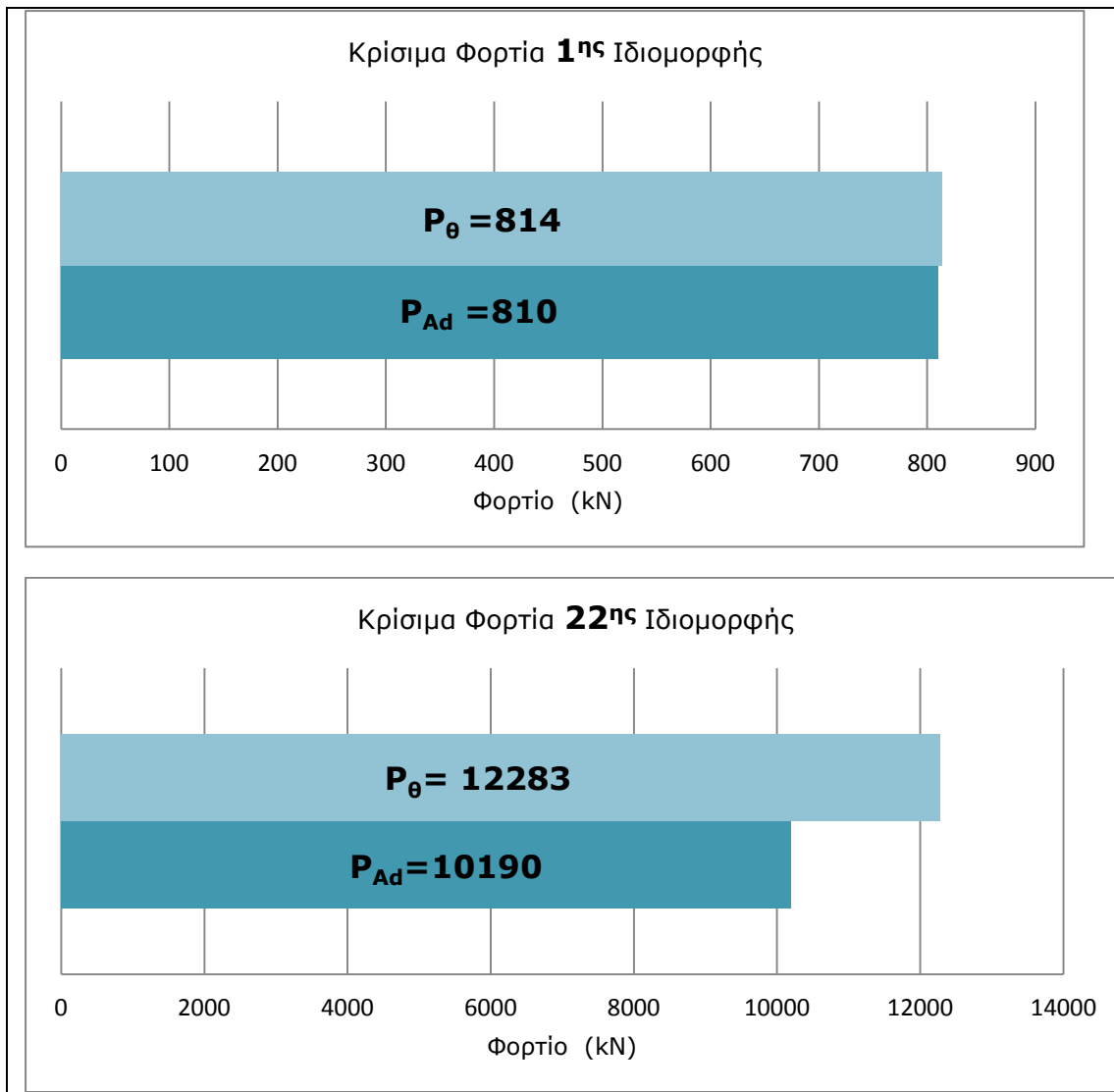
3.12 Σειρά 3ΑοR

3.12.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)

Στο Σχ. 3.145 φαίνονται η καθολική και η πρώτη τοπική ιδιομορφή (λυγισμός Euler του πέλματος μεταξύ κατάλληλων σημείων). Ο Πίνακας 3.146 περιέχει τα φορτία των ιδιομορφών αυτών συγκρινόμενα με τα θεωρητικώς υπολογισμένα (Εξ. 1.6, 1.8). Η % απόκλιση μεταξύ θεωρητικού φορτίου λυγισμού και φορτίου από την ανάλυση LBA του Adina, $([P_{\text{Ad}} - P_{\text{θ}}]/P_{\text{Ad}})$, είναι για τις δύο ιδιομορφές -0.5% και -20.5% αντίστοιχα.



Σχ. 3.145 Πρώτη καθολική και πρώτη τοπική ιδιομορφή, 1^η και 22^η αντίστοιχα



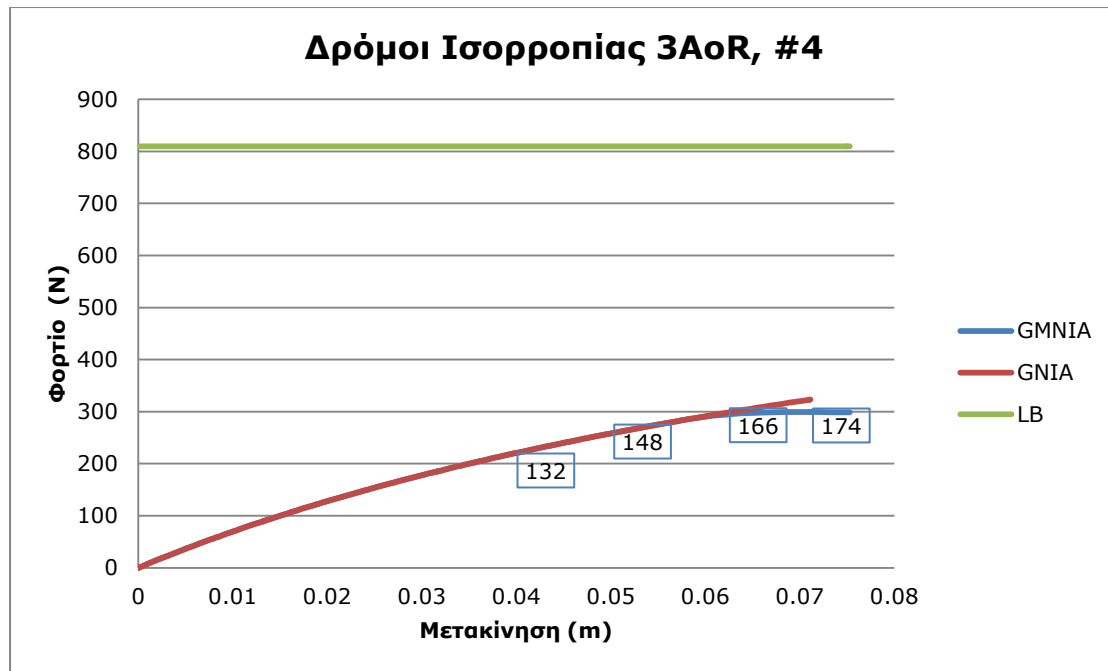
Πίνακας 3.146 Κρίσιμα Φορτία Ιδιομορφών, θεωρητικά και από το Adina

3.12.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)

Στη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας τίθενται γεωμετρικές ατέλειες πρώτης και εικοστής δεύτερης ιδιομορφής μεγέθους που ορίζεται σύμφωνα με τον EC-3. Ο συνδυασμός εκκεντρότητας και προσανατολισμού ατελειών είναι ο δυσμενέστερος δυνατός. Συγκεκριμένα, η εκκεντρότητα και η καθολική ατέλεια ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το πέλμα στο οποίο εισήχθη η τοπική ατέλεια να είναι το πλέον θλιβόμενο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ξεκινώντας από το 4^ο υποστύλωμα της σειράς.

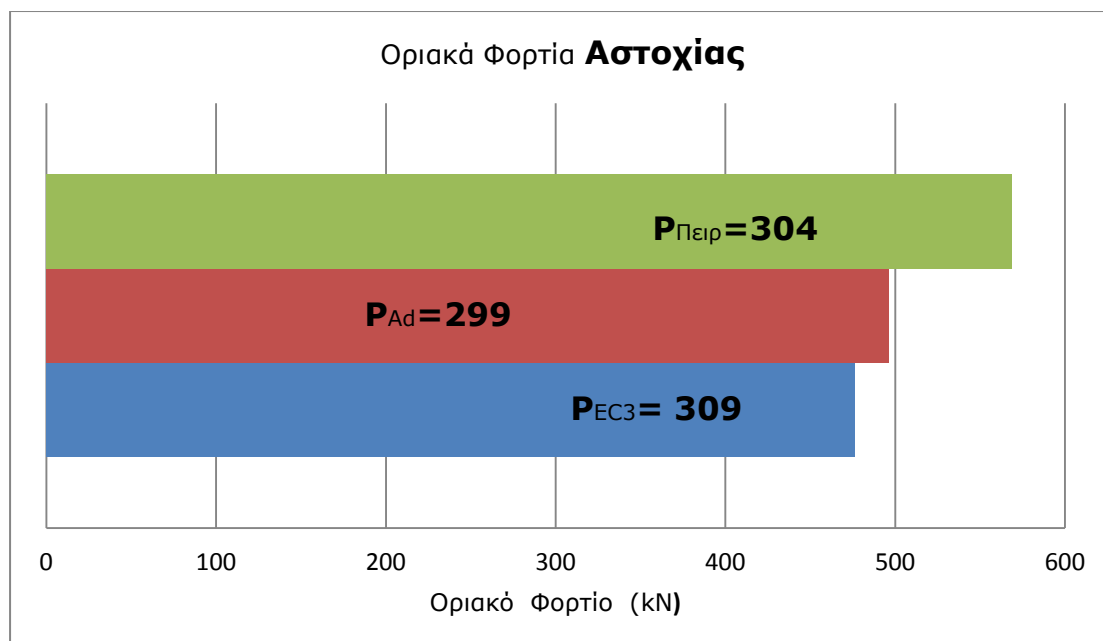
3.12.2.1 Υποστύλωμα #4 (εκκ. 8.0cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 27.07 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος 1^{ης} ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01288 m και της 22^{ης} $3.54 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Για το υποστύλωμα #4 διεξάγεται, εκτός από ανάλυση GMNIA, και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, GNIA.



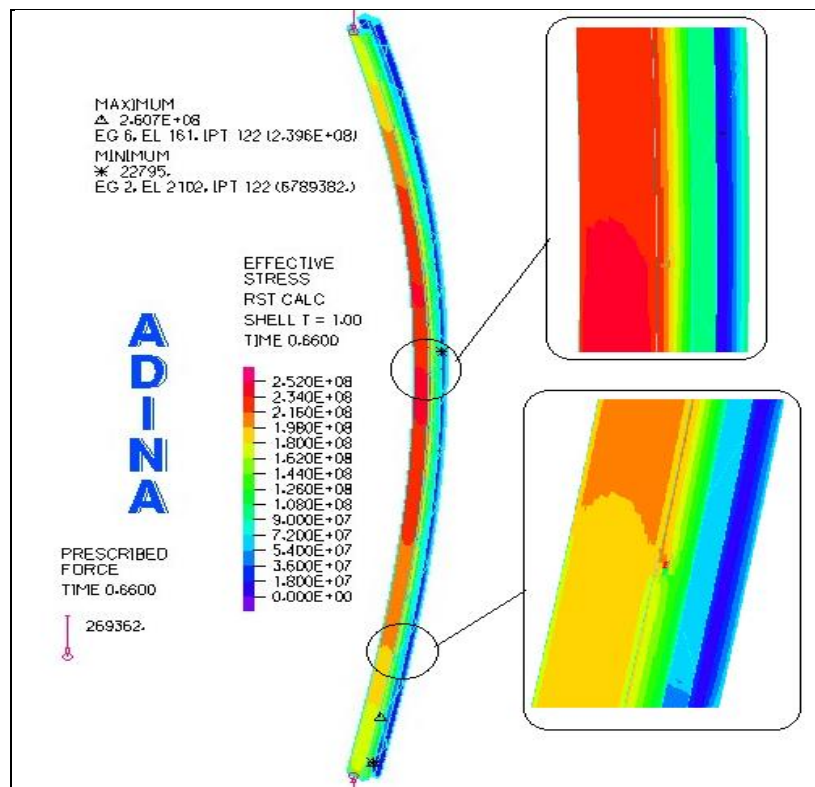
Σχ. 3.147 Δρόμοι Ισορροπίας για αναλύσεις GMNIA, GNIA και ύψος κρίσιμου φορτίου

Οι % αποκλίσεις για το υποστυλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=1.6\%$, $A2=-1.6\%$, $A3=-3.2\%$.

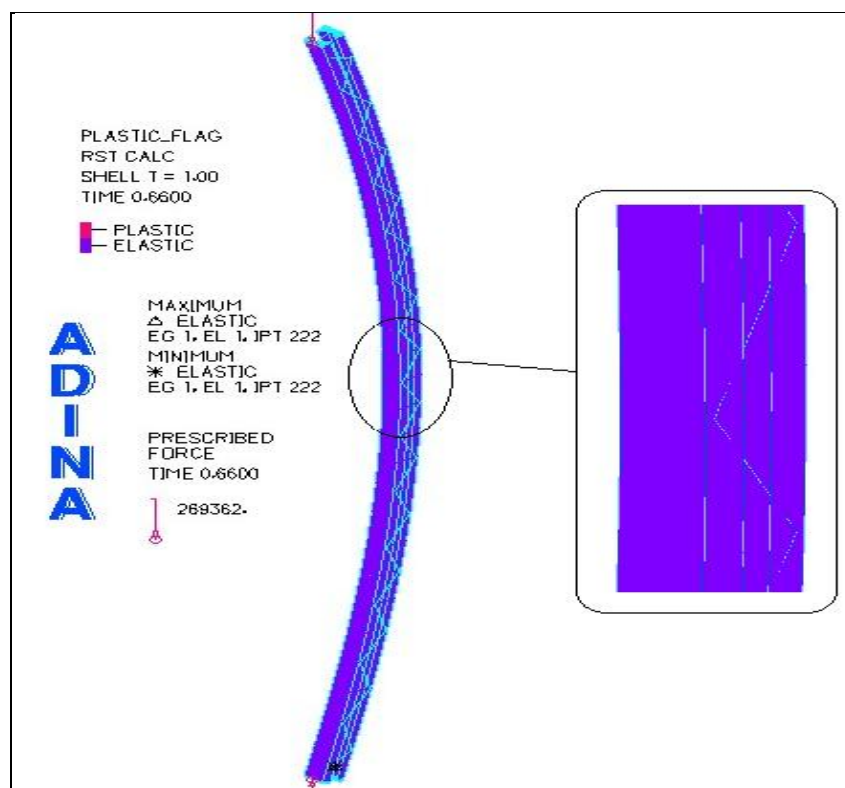


Πίνακας 3.148 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #4, 3AoR

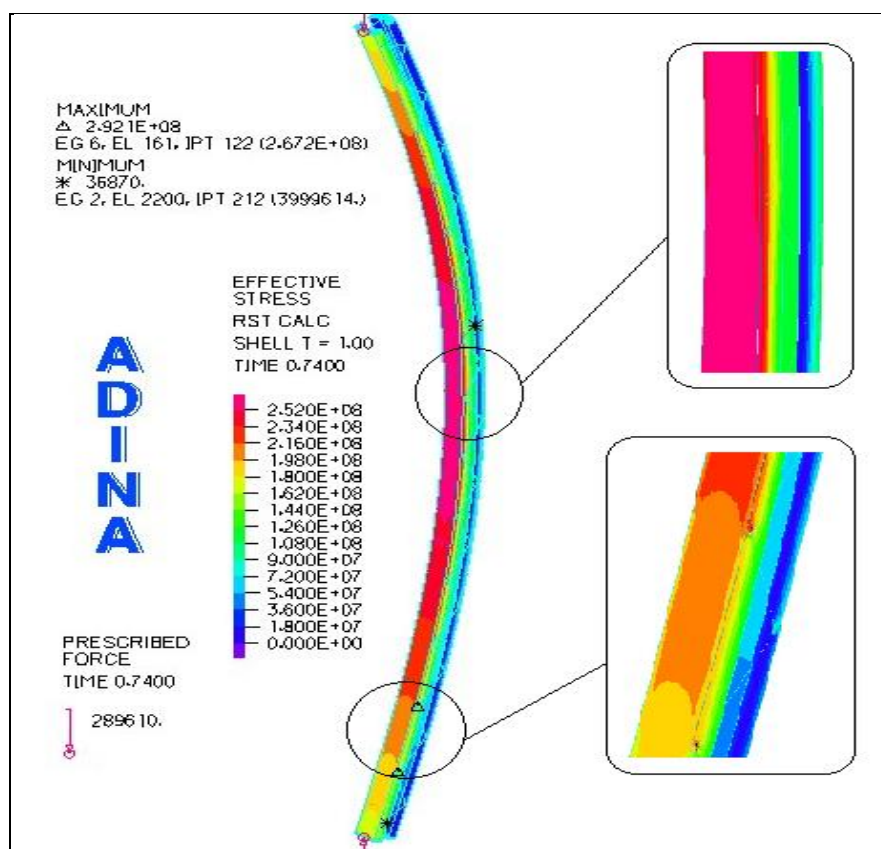
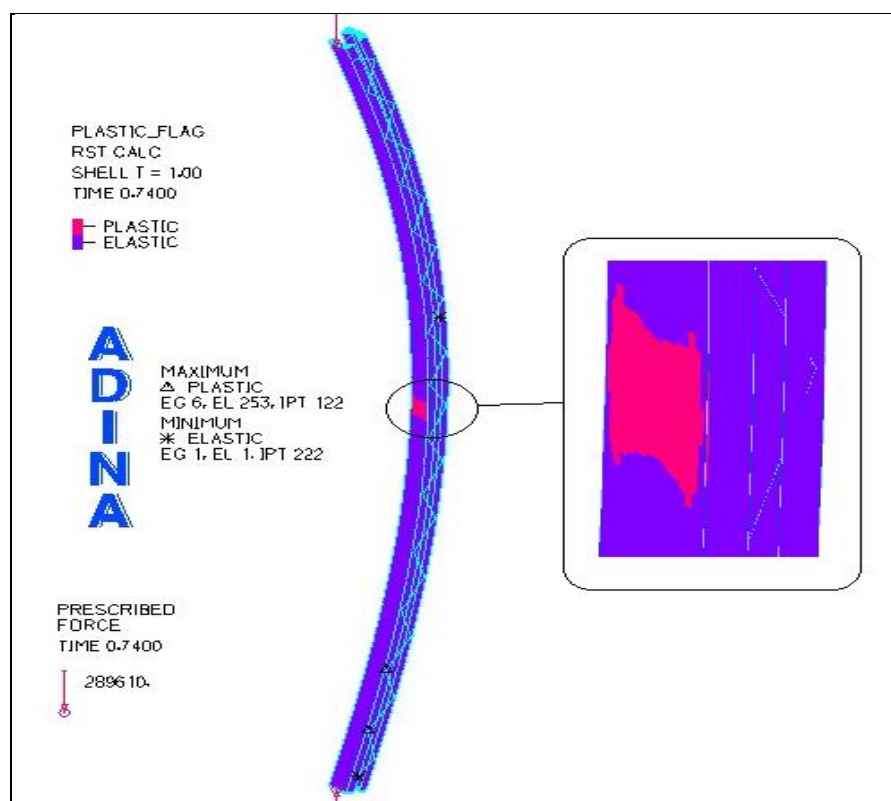
Στο δρόμο ισορροπίας της ανάλυσης GMNIA σημειώνονται 4 χαρακτηριστικά σημεία των οποίων οι εντατικές και παραμορφωσιακές καταστάσεις φαίνονται στα Σχ. 3.149 έως 3.156.

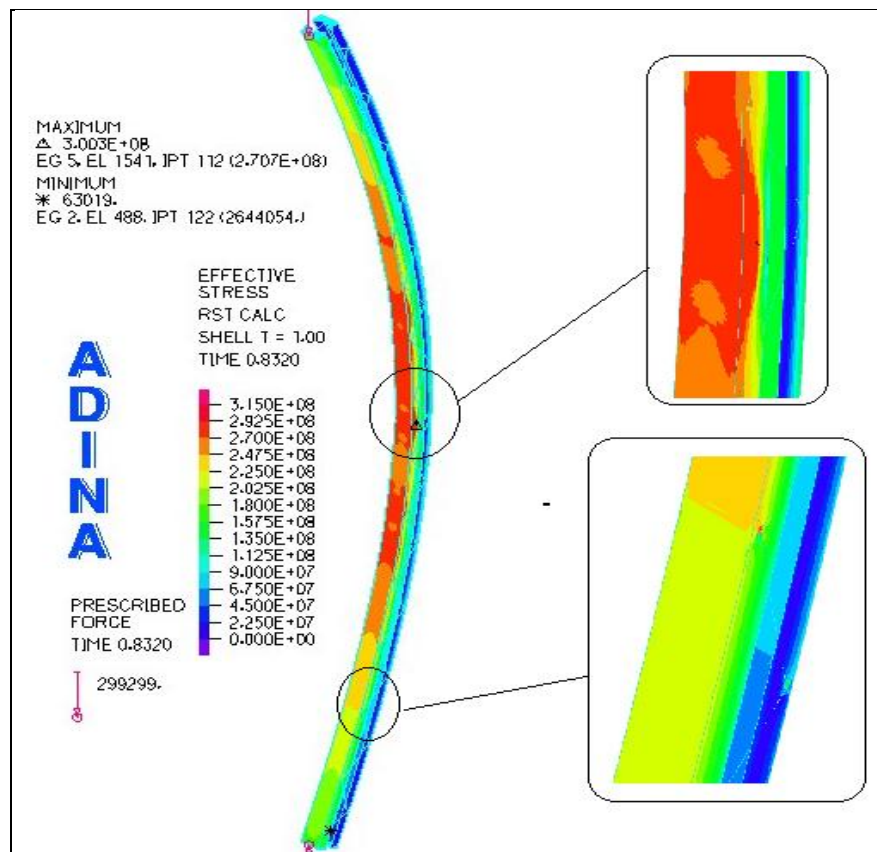


Σχ. 3.149 Τάσεις von Mises- Βήμα 132^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)

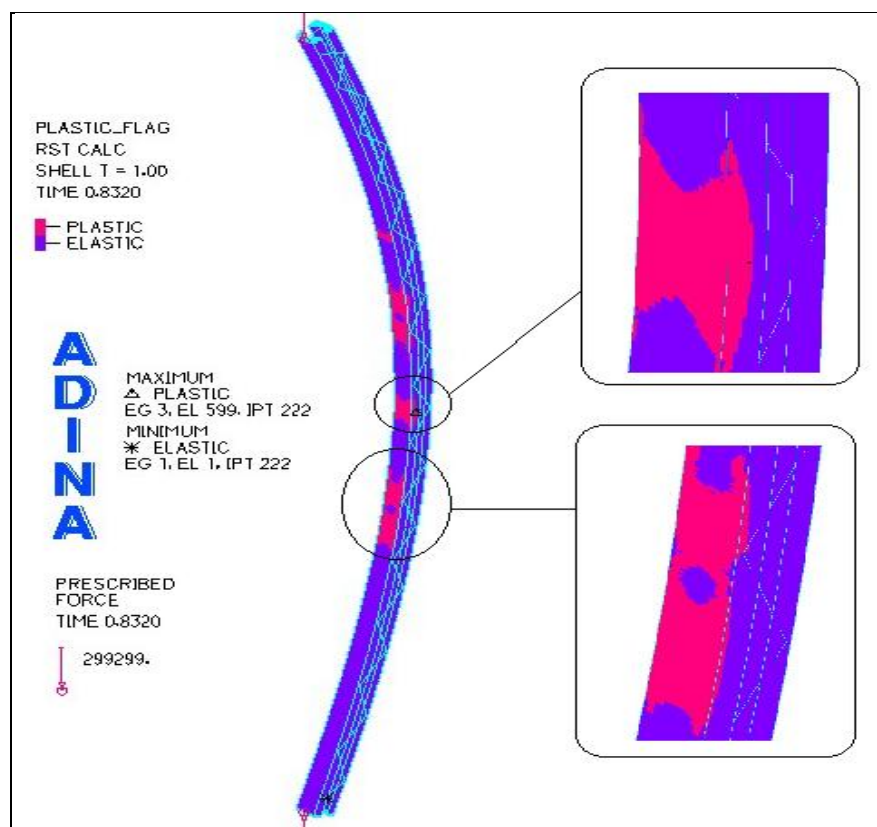


Σχ. 3.150 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 132^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)

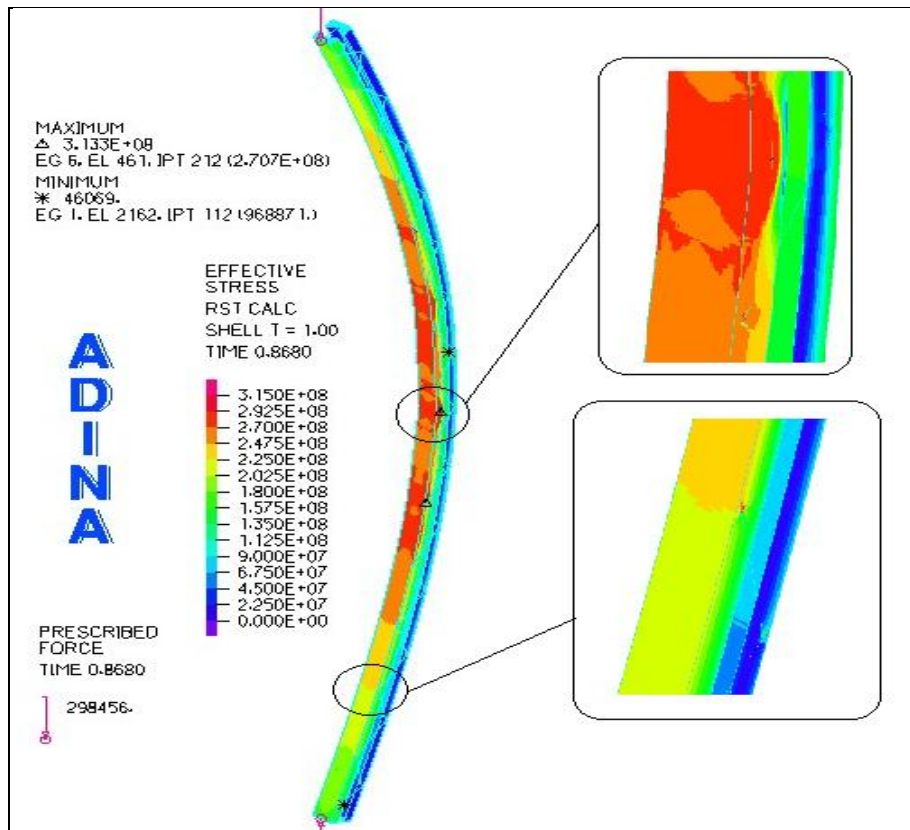
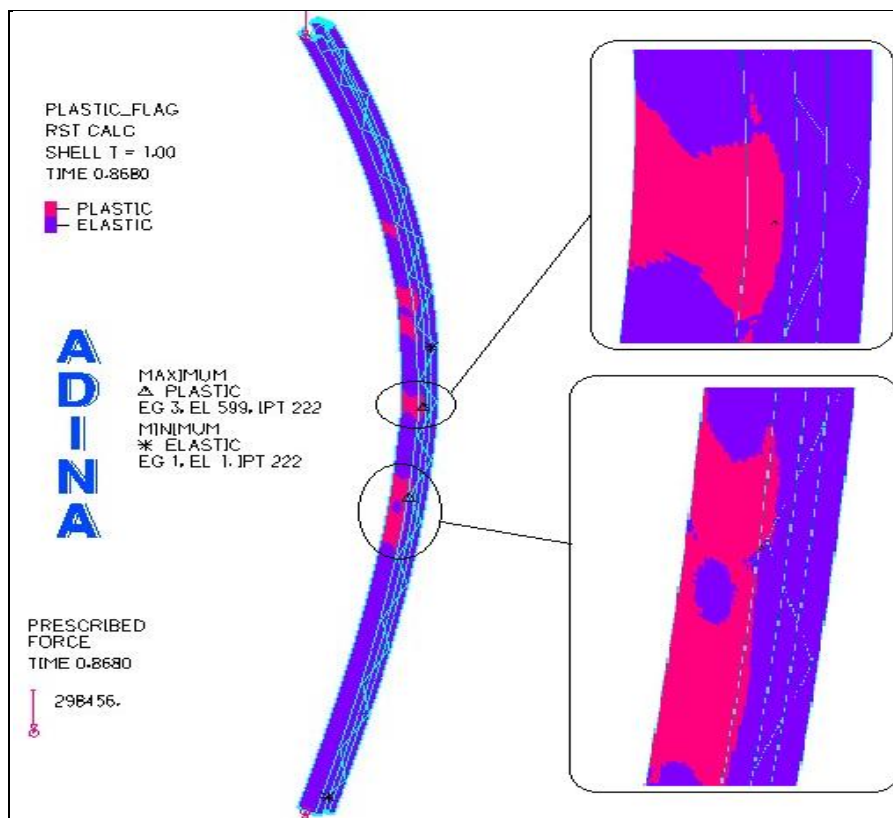
Σχ. 3.151 Τάσεις von Mises- Βήμα 148^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)Σχ. 3.152 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 148^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)



Σχ. 3.153 Τάσεις von Mises- Βήμα 166^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)

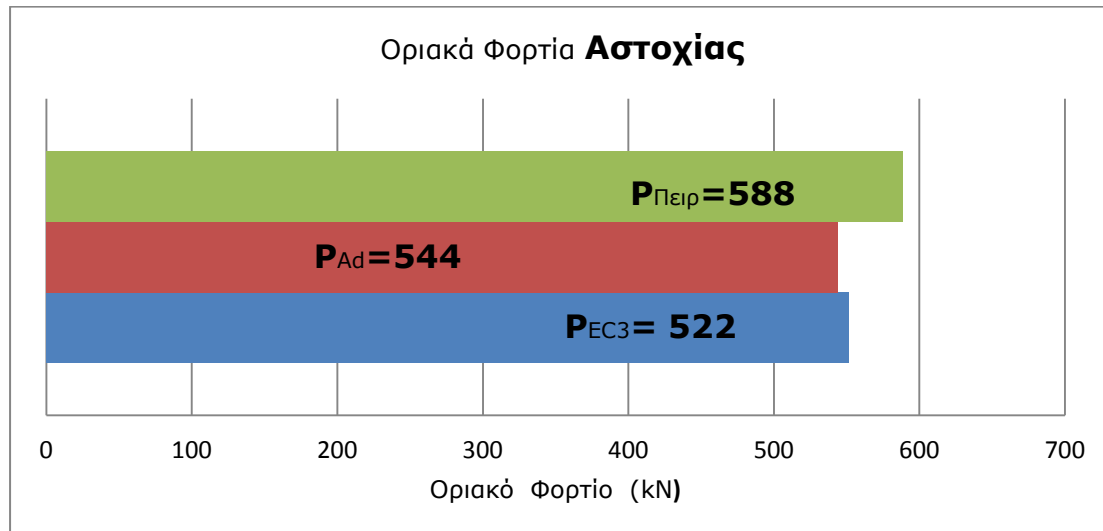


Σχ. 3.154 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 166^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)

Σχ. 3.155 Τάσεις von Mises- Βήμα 174^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)Σχ. 3.156 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 174^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)

3.12.2.2 Υποστυλώμα #1 (εκκ. 0.5cm)

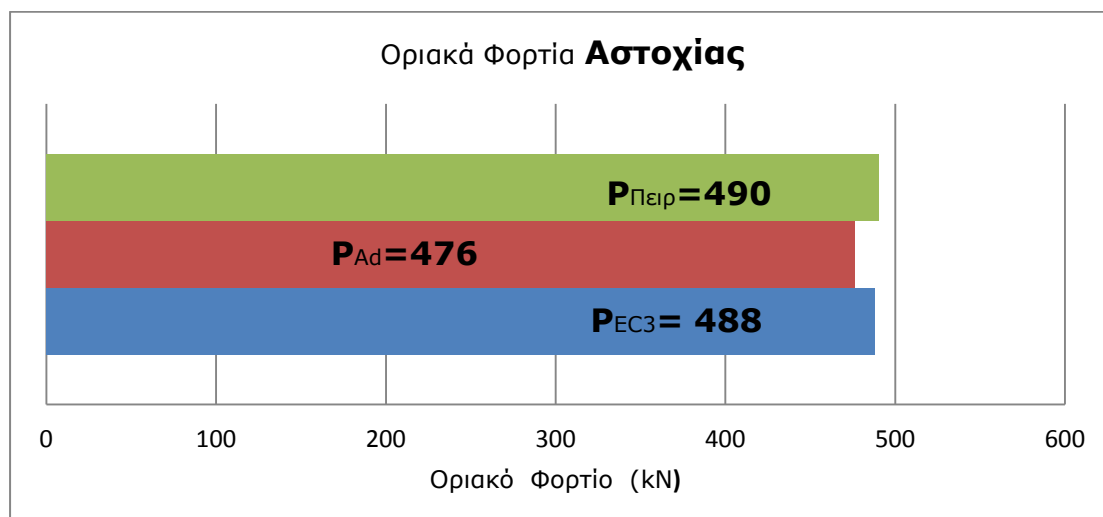
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 26.87 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος 1^{ης} ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01288 m και της 22^{ης} $3.50 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=7.5\%$, $A2=6.3\%$, $A3=-1.4\%$.



Πίνακας 3.157 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #1, 3AoR

3.12.2.3 Υποστυλώμα #2 (εκκ. 1.6cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 27.16 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος 1^{ης} ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01288 m και της 22^{ης} $3.56 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=2.9\%$, $A2=0.4\%$, $A3=-2.5\%$.

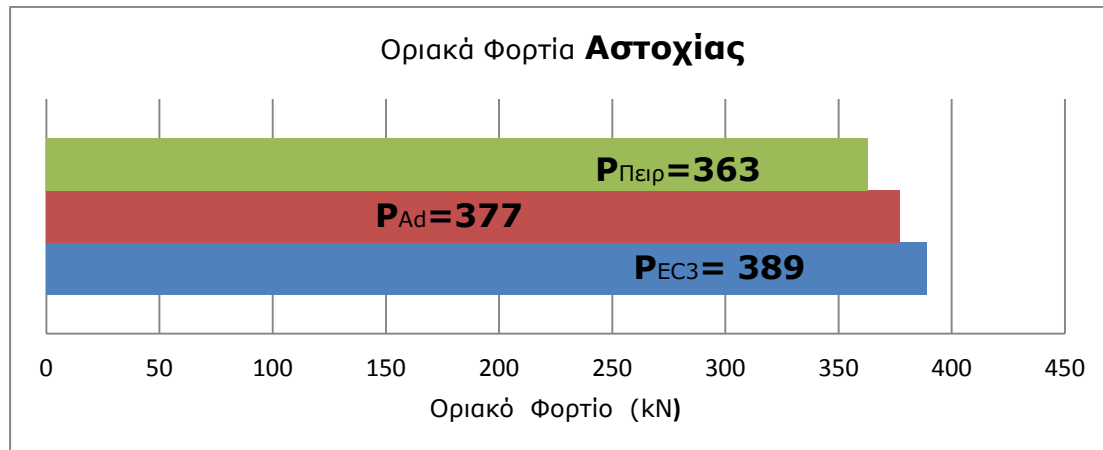


Πίνακας 3.158 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #2, 3AoR

3.12.2.4 Υποστυλώμα #3 (εκκ. 4.15cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 26.77 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος 1^{ης} ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01288 m και της 22^{ης} $3.48 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι %

αποκλίσεις για το υποστύλωμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=-3.9\%$, $A2=-7.2\%$, $A3=-3.2\%$.

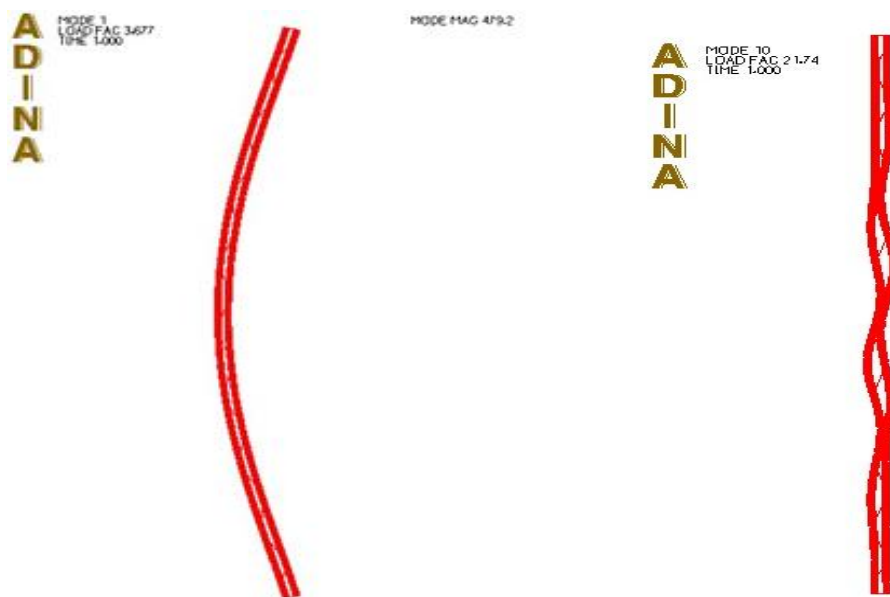


Πίνακας 3.159 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #3, 3AoR

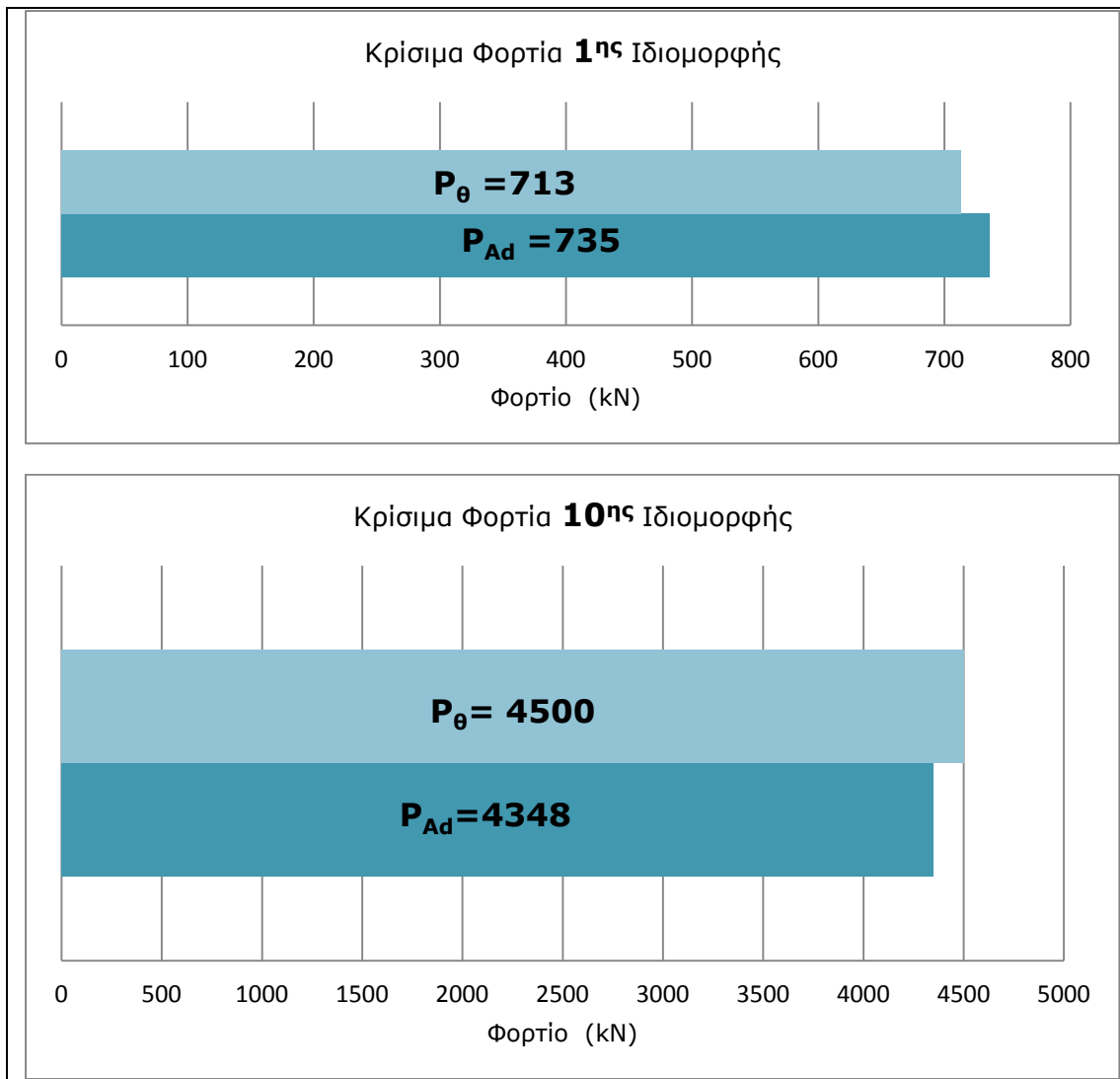
3.13 Σειρά 3BoR

3.13.1 Γραμμικοποιημένη Ανάλυση Λυγισμού (LBA)

Στο Σχ. 3.160 φαίνονται η καθολική και η πρώτη τοπική ιδιομορφή (λυγισμός Euler του πέλματος μεταξύ κατάλληλων σημείων). Ο Πίνακας 3.161 περιέχει τα φορτία των ιδιομορφών αυτών συγκρινόμενα με τα θεωρητικώς υπολογισμένα (Εξ. 1.6, 1.8). Η % απόκλιση μεταξύ θεωρητικού φορτίου λυγισμού και φορτίου από την ανάλυση LBA του Adina, $([P_{\text{Ad}} - P_{\text{θ}}]/P_{\text{Ad}})$, είναι για τις δύο ιδιομορφές 3.1% και -3.5% αντίστοιχα.



Σχ. 3.160 Πρώτη καθολική και πρώτη τοπική ιδιομορφή, 1^η και 10^η αντίστοιχα



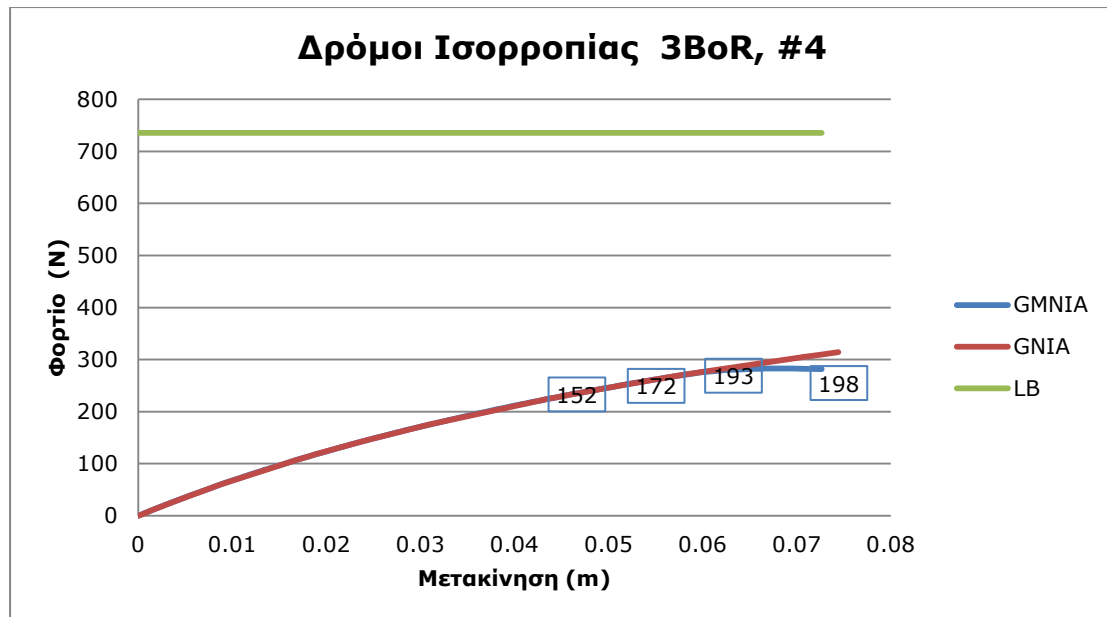
Πίνακας 3.161 Κρίσιμα Φορτία Ιδιομορφών, θεωρητικά και από το Adina

3.13.2 Ανάλυση με μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας (GMNIA)

Στη μη γραμμική ανάλυση υλικού και γεωμετρίας τίθενται γεωμετρικές ατέλειες πρώτης και δέκατης ιδιομορφής μεγέθους που ορίζεται σύμφωνα με τον EC-3. Ο συνδυασμός εκκεντρότητας και προσανατολισμού ατελειών είναι ο δυσμενέστερος δυνατός. Συγκεκριμένα, η εκκεντρότητα και η καθολική ατέλεια ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το πέλμα στο οποίο εισήχθη η τοπική ατέλεια να είναι το πλέον θλιβόμενο. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων ξεκινώντας από το 4^ο υποστύλωμα της σειράς.

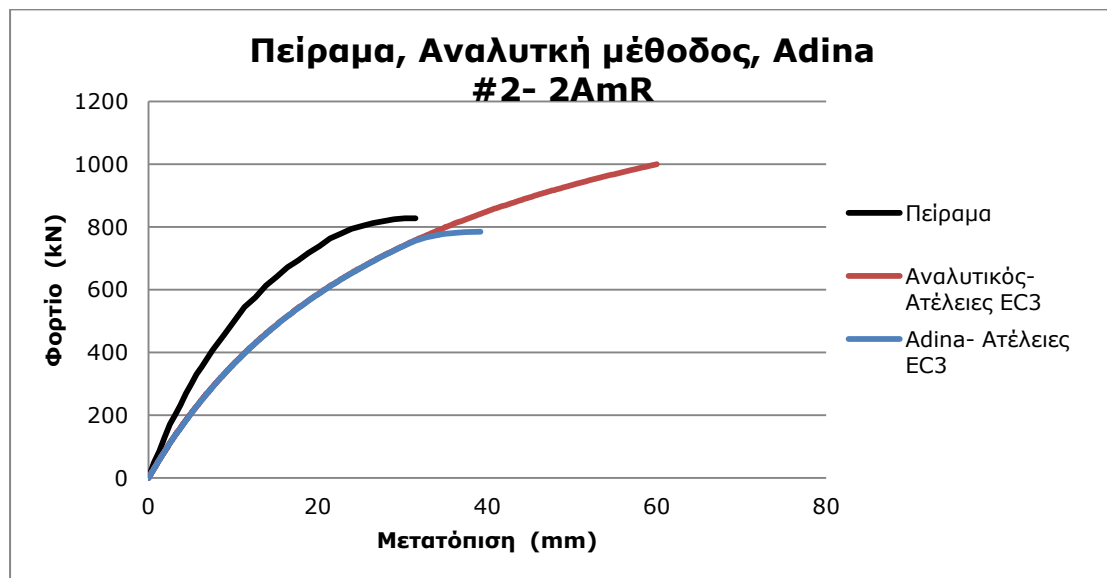
3.13.2.1 Υποστύλωμα #4 (εκκ. 8.0cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 26.97 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος 1^{ης} ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01292 m και της 10^{ης} $1.034 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Για το υποστύλωμα #4 διεξάγεται, εκτός από ανάλυση GMNIA, και μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, GNIA.



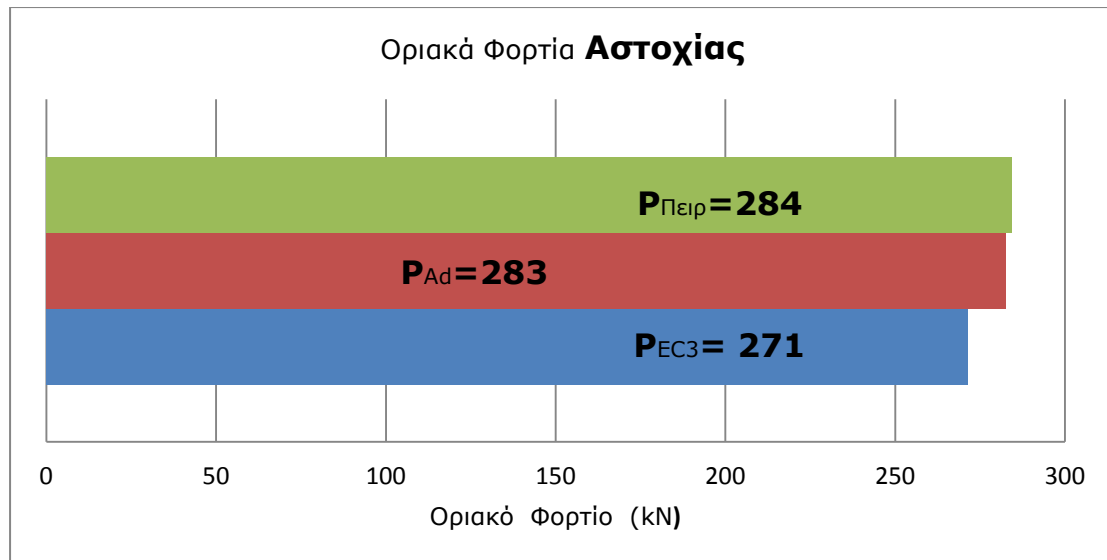
Σχ. 3.162 Δρόμοι Ισορροπίας για αναλύσεις GMNIA, GNIA και ύψος κρίσιμου φορτίου

Για το υποστυλώμα #2 υπάρχει και πειραματικός δρόμος ισορροπίας. Στον παρακάτω Πίνακα απεικονίζονται ο πειραματικός αυτός δρόμος, ο αναλυτικός σύμφωνα με τη μέθοδο του Κεφ. 5 (Εξ.5.12) και ο δρόμος του Adina. Οι δύο τελευταίες αναλύσεις έγιναν με ατέλειες κατά EC3. Είναι εμφανής η ταύτιση της αναλυτικής μεθόδου με το Adina. Διαφέρουν στο ότι η αναλυτική μέθοδος δεν αποδίδει κοντά στο οριακό φορτίο την πλαστικοποίηση (πτώση κλίσης, πλατώ διαρροής), καθώς λαμβάνει υπόψη ελαστικό υλικό.



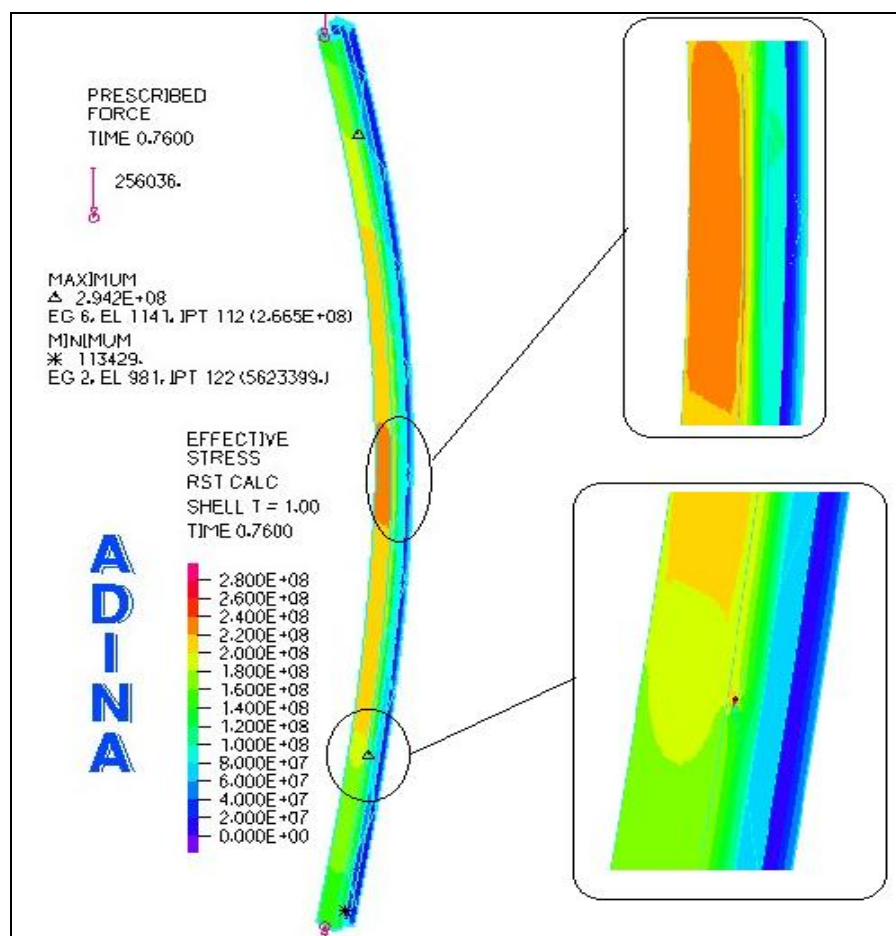
Σχ. 3.163 Δρόμοι Ισορροπίας από το Πείραμα, την Αναλυτική μέθοδο (Κεφ. 5) και το Adina

Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: A1=0.6%, A2=4.6%, A3=4.1%.

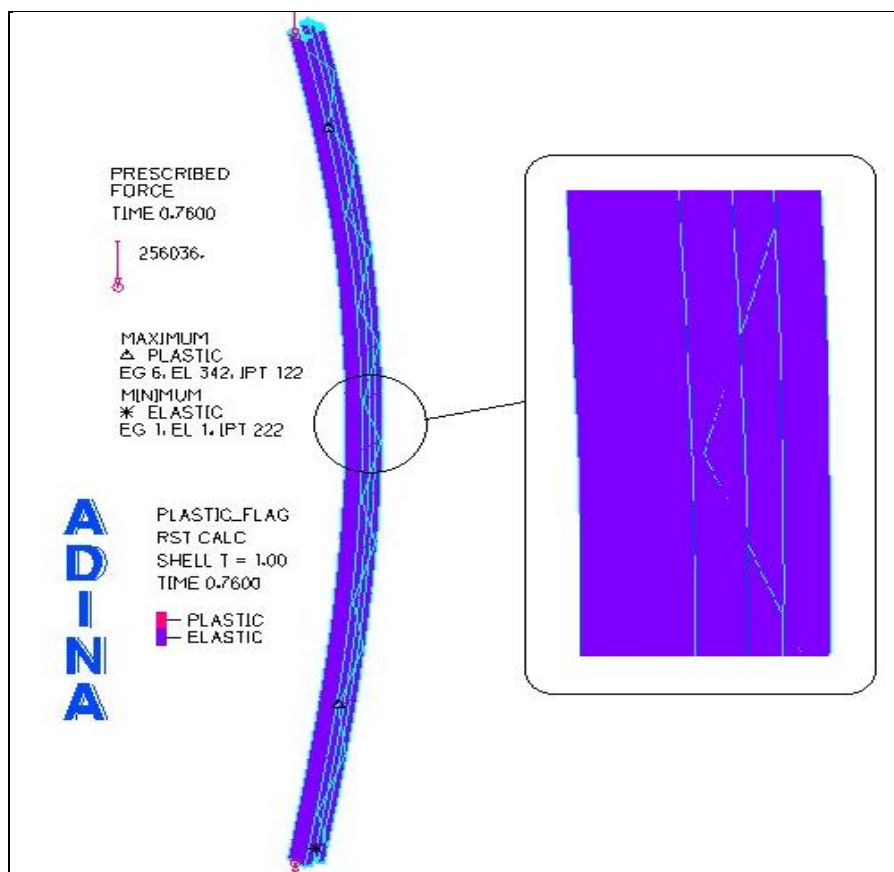
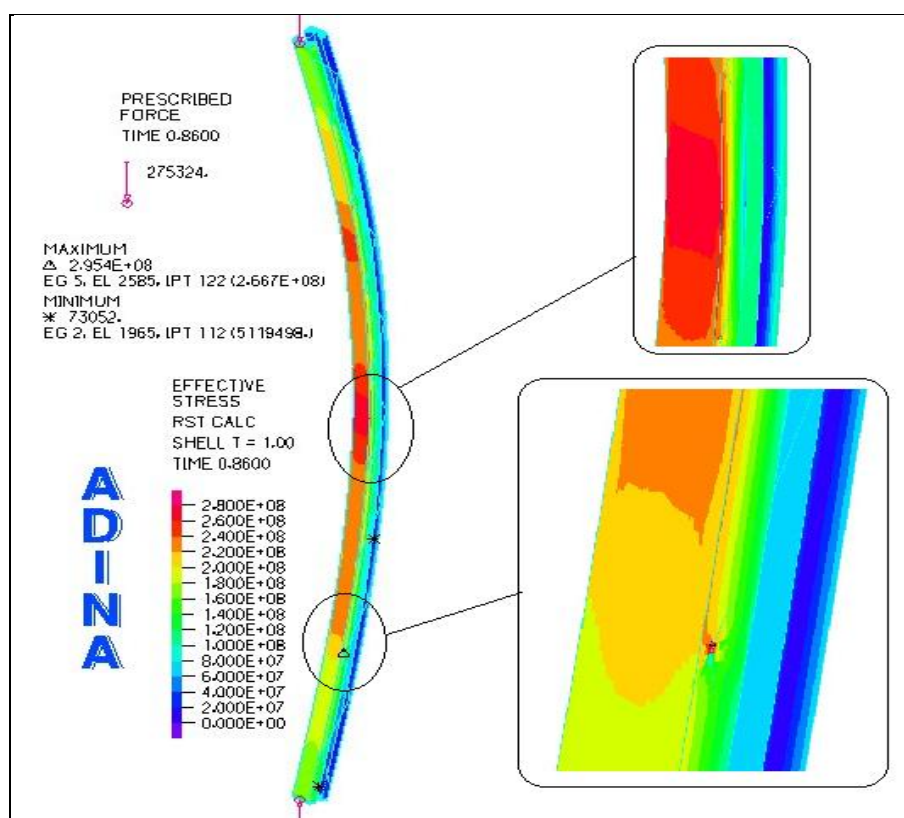


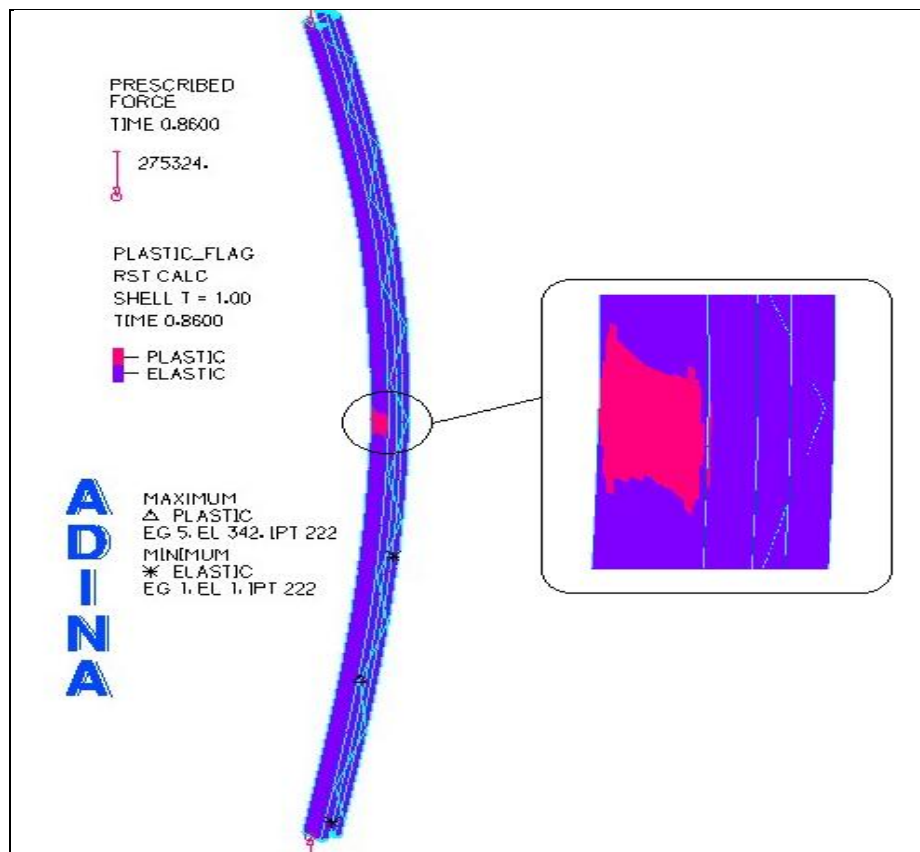
Πίνακας 3.164 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #4, 3BoR

Στο δρόμο ισορροπίας της ανάλυσης GMNIA σημειώνονται 4 χαρακτηριστικά σημεία των οποίων οι εντατικές και παραμορφωσιακές καταστάσεις φαίνονται στα Σχ. 3.165 έως 3.172.

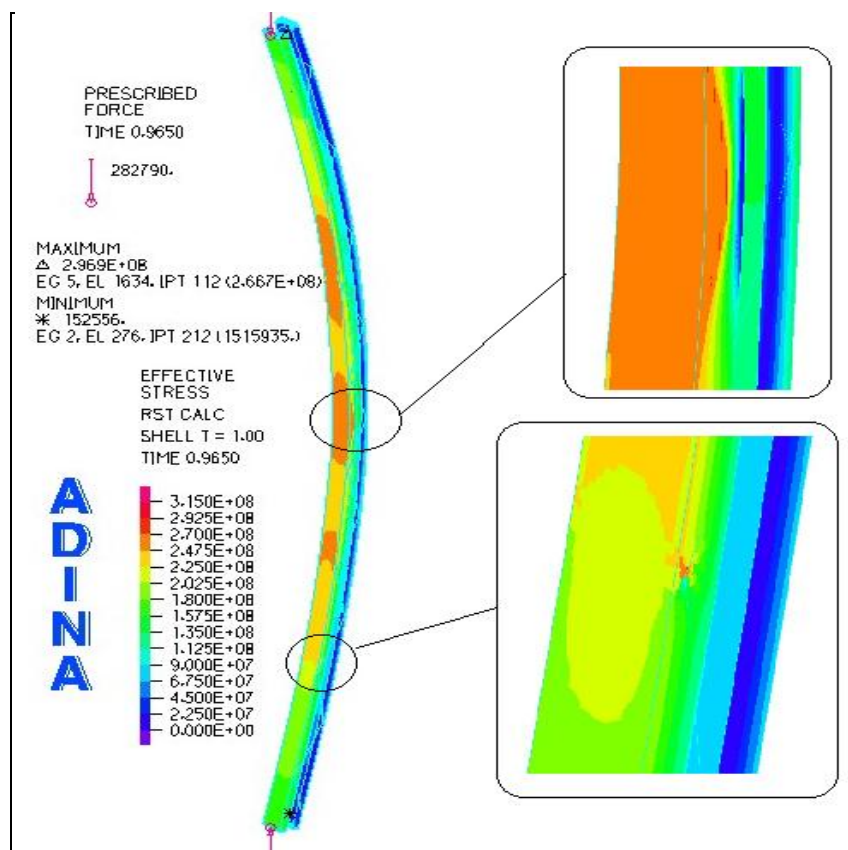


Σχ. 3.165 Τάσεις von Mises- Βήμα 152^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)

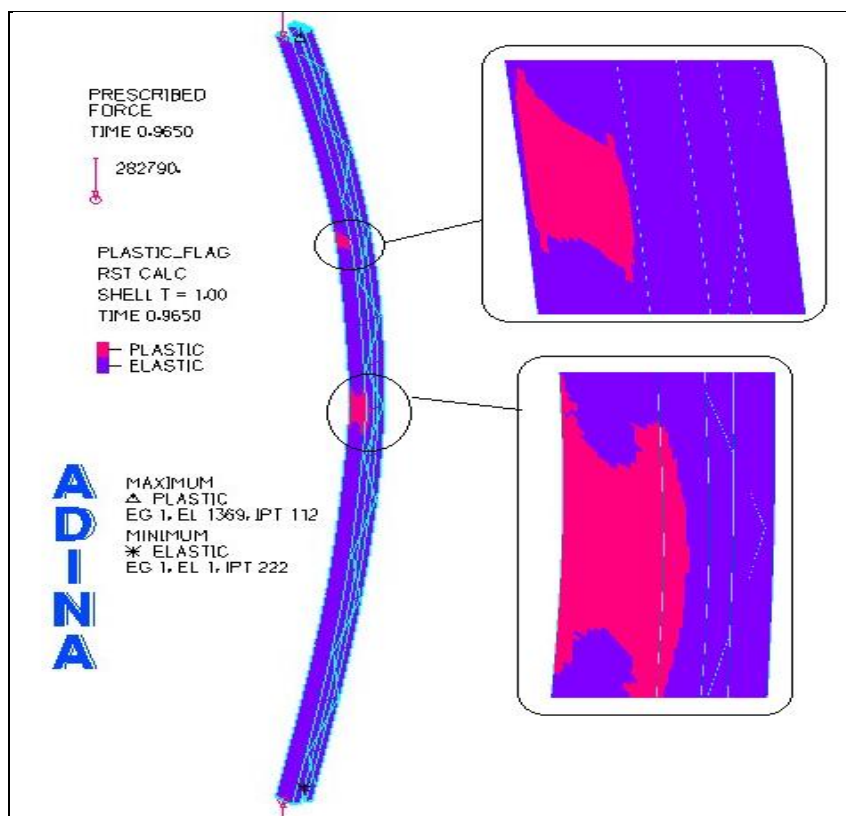
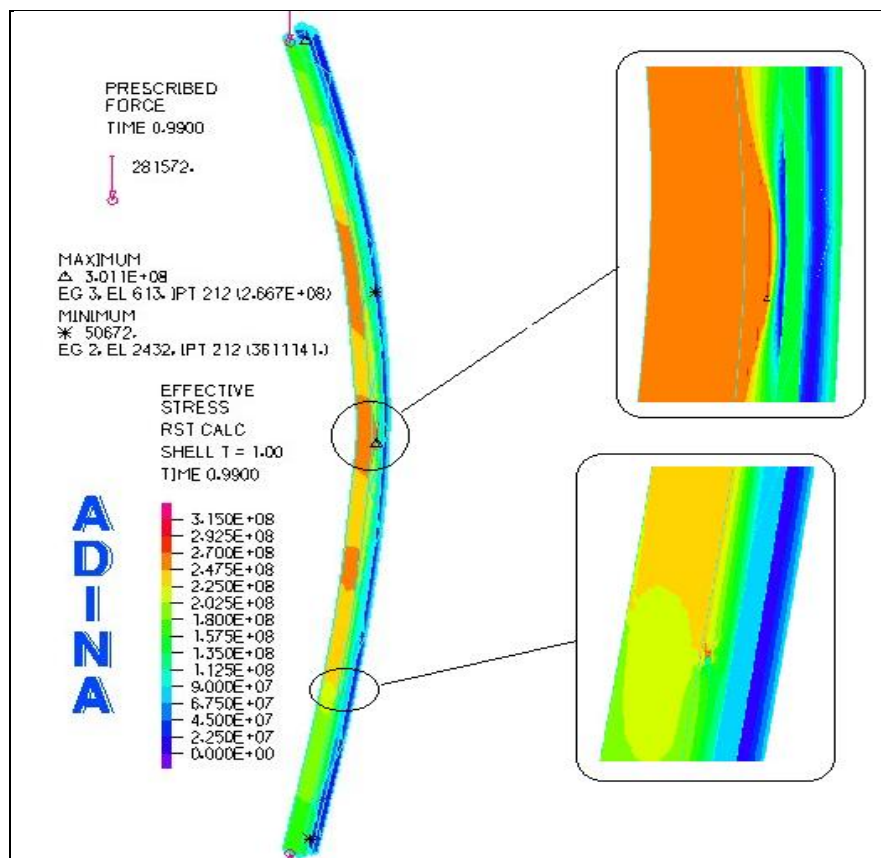
Σχ. 3.166 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 152^ο ανάλυσης GMNIA (ελαστικότητα)Σχ. 3.167 Τάσεις von Mises- Βήμα 172^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)

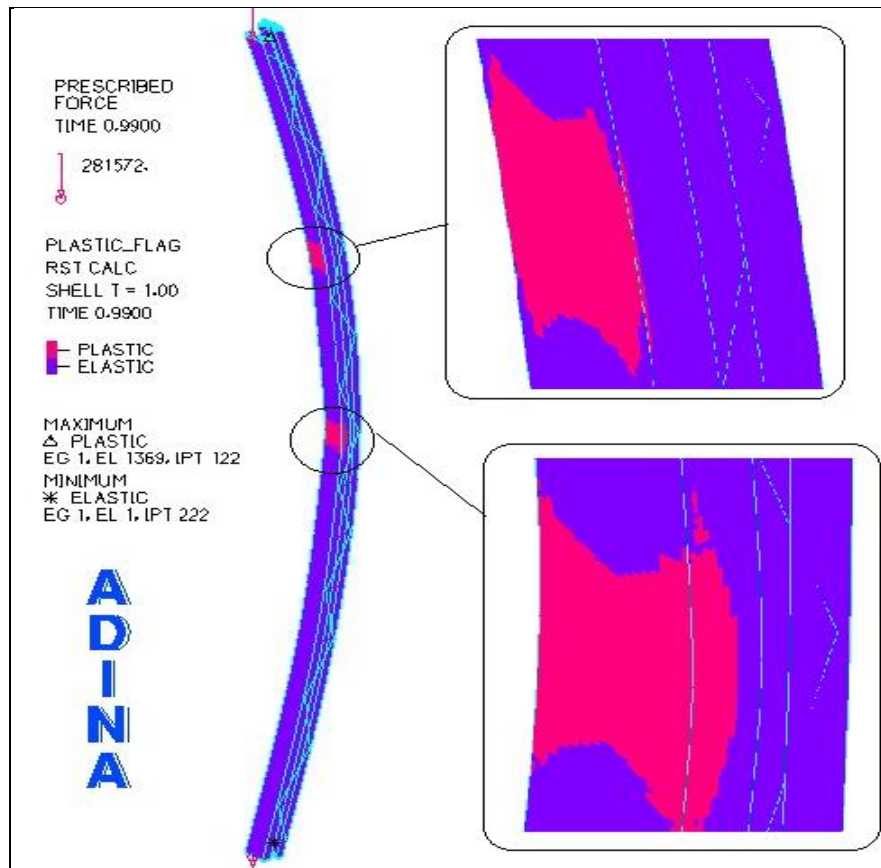


Σχ. 3.168 Κριτήριο Αστοχίας- Βήμα 172^ο ανάλυσης GMNIA (πρώτη διαρροή)



Σχ. 3.169 Τάσεις von Mises- Βήμα 193^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)

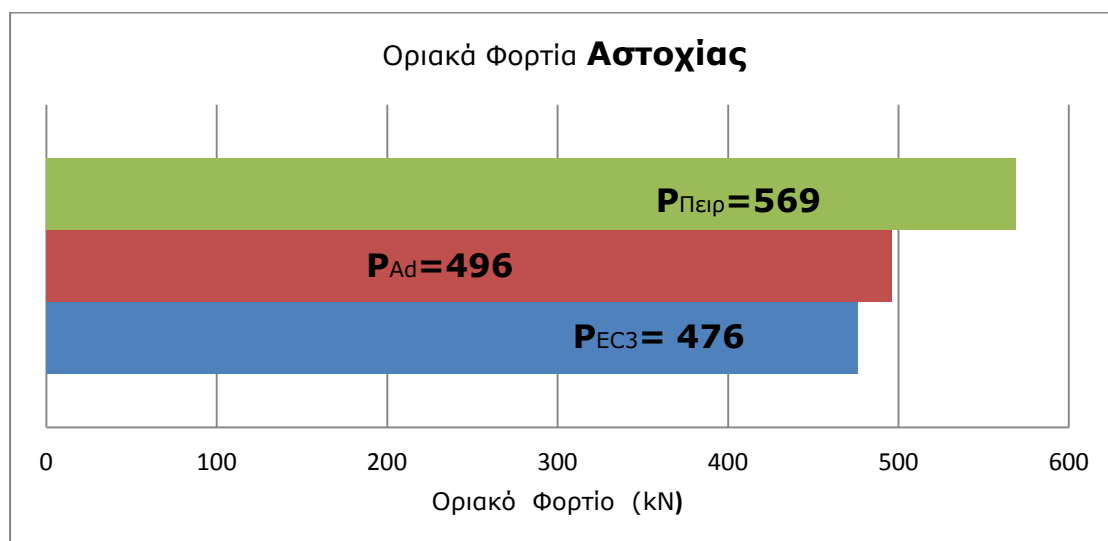
Σχ. 3.170 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 193^ο ανάλυσης GMNIA (μέγιστο φορτίο)Σχ. 3.171 Τάσεις von Mises- Βήμα 198^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)



Σχ. 3.172 Κριτήριο Αστοχίας - Βήμα 198^ο ανάλυσης GMNIA (καθοδικός κλάδος)

3.13.2.2 Υποστυλώμα #1 (εκκ. 0.5cm)

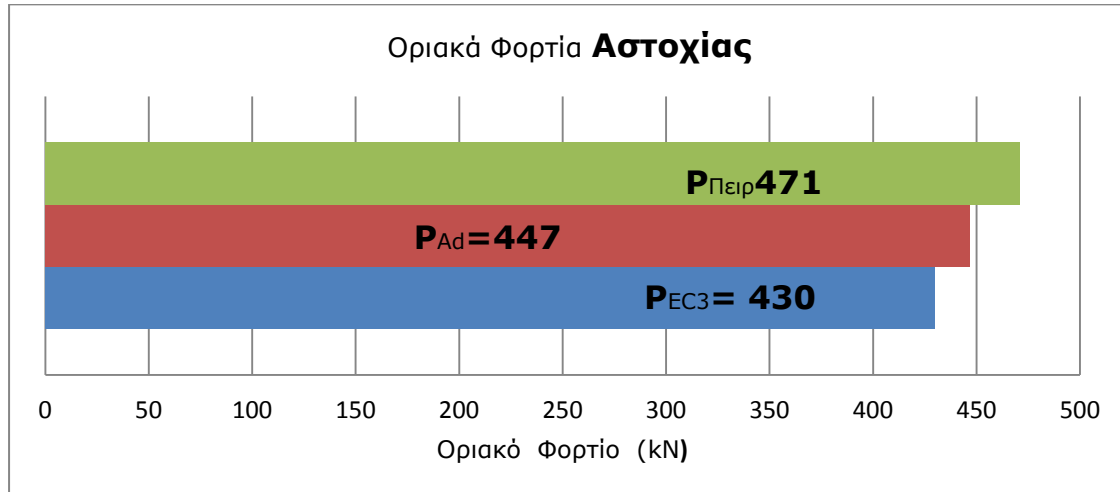
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 25.49 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος 1^{ης} ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01292 m και της 10^{ης} $9.95 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=12.8\%$, $A2=16.2\%$, $A3=4.0\%$.



Πίνακας 3.173 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #1, 3BoR

3.13.2.3 Υποστυλώμα #2 (εκκ. 1.6cm)

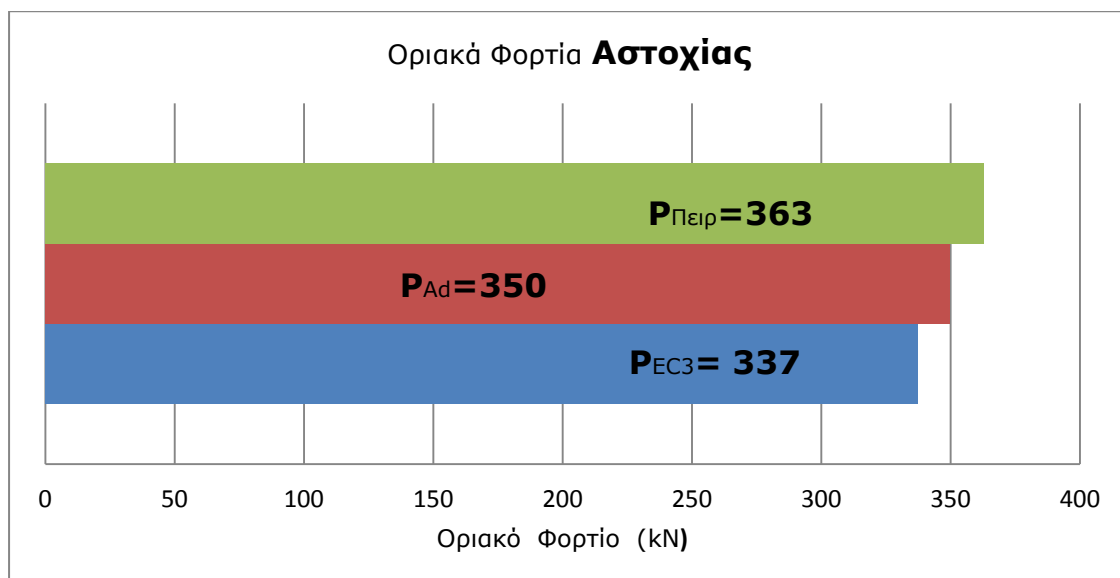
Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 26.96 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος 1^{ης} ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01292 m και της 10^{ης} $1.044 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=5.1\%$, $A2=8.7\%$, $A3=3.8\%$.



Πίνακας 3.174 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #2, 3BoR

3.13.2.4 Υποστυλώμα #3 (εκκ. 4.0cm)

Η τάση διαρροής του υποστυλώματος μετρήθηκε 25.20 kN/cm^2 . Η ατέλεια σχήματος 1^{ης} ιδιομορφής έχει μέγεθος 0.01292 m και της 10^{ης} $9.85 \cdot 10^{-4} \text{ m}$. Οι % αποκλίσεις για το υποστυλώμα αυτό, όπως ορίστηκαν στην Ενότητα 3.2, λαμβάνουν τις τιμές: $A1=3.6\%$, $A2=7.0\%$, $A3=3.6\%$.



Πίνακας 3.175 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με το πείραμα, το Adina και τον EC3, #3, 3BoR

Κεφάλαιο 4

Συγκρίσεις Αποτελεσμάτων και Διερεύνηση Ατελειών

4.1 Συγκρίσεις και επεξεργασία αποτελεσμάτων

4.1.1 Φορτία αστοχίας πειράματος και ανάλυσης GMNIA

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνολικά τα οριακά φορτία των υποστυλωμάτων από τις διάφορες μεθόδους με τις οποίες προέκυψαν και επιχειρείται σύγκρισή τους.

Στους Πίνακες 4.1 και 4.2, στην πράσινη στήλη εμφανίζεται ο μέσος όρος των απολύτων τιμών των % αποκλίσεων μεταξύ πειράματος και ανάλυσης GMNIA στο πρόγραμμα Adina στα πλαίσια κάθε σειράς υποστυλωμάτων. Ο μέσος όρος των απολύτων τιμών των % αποκλίσεων για όλα συνολικά τα υποστυλώματα είναι 5.55% και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση είναι 4.54%. Το ποσοστό 5.55% είναι αρκετά μικρό ώστε η προσομοίωση των κατασκευών στο Adina να κρίνεται πολύ ικανοποιητική, παρά τις παραδοχές της μοντελοποίησης και τις αβεβαιότητες του πειράματος.

Στο μέσον όρο των % αποκλίσεων συνεισφέρουν επιβαρυντικά τα υποστυλώματα της σειράς 1AmR. Στην ανάλυση LBA αυτών των υποστυλωμάτων δεν επετεύχθη σύγκλιση για την τοπική ιδιομορφή τύπου Euler των πελμάτων μεταξύ των σημείων τομής των ράβδων. Οπότε χρησιμοποιείται μία τοπική ιδιομορφή πλακοειδούς σχήματος, κατώτερου φορτίου λυγισμού, αλλά με το ίδιο μέγεθος με το προδιαγραφόμενο από τον EC3. Παρόλα αυτά, δεν επιτυγχάνεται ακρίβεια στην επίλυση καθώς είτε θέτοντας αυτή την τοπική ατέλεια είτε όχι, η σειρά 1AmR δίνει μέση απόκλιση περίπου ίδια και ίση με 11.20%.

Αμελώντας λοιπόν τη σειρά 1AmR, ο μέσος όρος των απολύτων τιμών των % αποκλίσεων όλων των υποστυλωμάτων είναι 4.96% και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση 4.04%.

Σειρά Υποτυλωμ.	α/α	Φορτίο Αστοχίας (N)		(Πείρ- Ad.) / Πείρ Απόκλιση %	Μέσος όρος Αποκλ. Σειράς	Τυπική Απόκλ. Αποκλ.
		Πείραμα	Adina			
1AoR	1	882,599	977,486	-10.75%	4.26%	4.55%
	2	862,985	869,635	-0.77%		
	3	755,112	785,810	-4.07%		
	4	608,012	616,921	-1.47%		
1AmR χωρίς τοπική ατέλεια	1	902,211	1,028,270	-13.97%	11.26%	5.84%
	2	862,985	919,096	-6.50%		
	3	715,885	761,404	-6.36%		
	4	558,979	660,815	-18.22%		
1AmR με τοπική, πλακοειδούς μορφής	1	902,211	1,028,292	-13.97%	11.20%	5.87%
	2	862,985	918,972	-6.49%		
	3	715,885	760,267	-6.20%		
	4	558,979	660,477	-18.16%		
1AoRG όχι παραμ. τάσεις	1	843,371	812,965	3.61%	2.82%	0.70%
	2	706,079	687,765	2.59%		
	3	558,979	546,346	2.26%		
1BoR	1	862,985	797,518	7.59%	6.32%	3.24%
	2	764,918	703,930	7.97%		
	3	657,045	602,894	8.24%		
	4	480,526	487,598	-1.47%		
1BmR	1	853,178	806,220	5.50%	2.90%	2.05%
	2	755,112	728,761	3.49%		
	3	637,432	625,896	1.81%		
	4	500,139	504,213	-0.81%		

Πίνακας 4.1 Φορτία αστοχίας υποσυλωμάτων των σειρών 1AoR έως 1BmR σύμφωνα με το Πείραμα και την αριθμητική διερεύνηση με το Adina, αποκλίσεις και στατιστικά στοιχεία αποκλίσεων.

Σειρά Υποτυλωμ.	α/α	Φορτίο Αστοχίας (N)		(Πείρ-Adina)/Πείρ Απόκλιση %	Μέσος όρος Αποκλ. Σειράς	Τυπική Απόκλιση Αποκλ.
		Πείραμα	Adina			
2AoR	1	921,825	959,238	-4.06%	5.80%	1.43%
	2	823,758	767,980	6.77%		
	3	666,852	619,243	7.14%		
	4	509,945	483,266	5.23%		
2AmR χωρίς τοπική ατέλεια	1	902,211	890,275	1.32%	4.12%	3.49%
	2	823,758	784,429	4.77%		
	3	637,432	647,517	-1.58%		
	4	490,332	533,433	-8.79%		
2BoR	1	804,145	649,875	19.18%	10.99%	6.19%
	2	666,852	594,591	10.84%		
	3	549,172	495,672	9.74%		
	4	382,459	398,471	-4.19%		
2BmR	1	794,338	737,124	7.20%	2.41%	3.23%
	2	657,045	647,828	1.40%		
	3	529,559	526,619	0.56%		
	4	421,685	423,638	-0.46%		
3AoR	1	588,399	544,093	7.53%	3.95%	2.57%
	2	490,332	476,274	2.87%		
	3	362,846	376,878	-3.87%		
	4	304,006	299,299	1.55%		
3BoR	1	568,785	496,198	12.76%	5.49%	5.20%
	2	470,719	446,734	5.10%		
	3	362,846	349,932	3.56%		
	4	284,392	282,790	0.56%		

Πίνακας 4.1 Φορτία αστοχίας υποστυλωμάτων των σειρών 2AoR έως 3BoR σύμφωνα με το Πείραμα και την αριθμητική διερεύνηση με το Adina, αποκλίσεις και στατιστικά στοιχεία αποκλίσεων.

4.1.2 Φορτία αστοχίας σύμφωνα με τον EC3

Οι Πίνακες 4.3 και 4.4 περιέχουν τις αντοχές των υποστυλωμάτων υπολογισμένες σύμφωνα με τον EC3, (Εξ. 1.9). Ο τύπος αυτός υπολογίζει το φορτίο εκείνο για το οποίο επέρχεται η πρώτη πλαστικοποίηση ίνας διατομής στο φορέα.

Σειρά Υποτυλ.	α/α	Φορτίο Αστοχίας (N)			(Πείρ-Ad.)/ Πείρ Απόκλ. %	(Πείρ-EC3)/ Πείρ Απόκλ. %	(Ad.-EC3)/ Ad. Απόκλ. %
		Πείραμα	Adina	EC3			
1AoR	1	882,599	977,486	899,424	-10.75%	-1.91%	7.99%
	2	862,985	869,635	803,517	-0.77%	6.89%	7.60%
	3	755,112	785,810	724,826	-4.07%	4.01%	7.76%
	4	608,012	616,921	571,498	-1.47%	6.01%	7.36%
1AmR χωρίς τοπική ατέλεια	1	902,211	1,028,270	-	-	-	-
	2	862,985	919,096	-	-	-	-
	3	715,885	761,404	-	-	-	-
	4	558,979	660,815	-	-	-	-
1AmR με τοπική, πλακοειδ. μορφής	1	902,211	1,028,292	1,031,669	-13.97%	-14.35%	-0.33%
	2	862,985	918,972	919,009	-6.49%	-6.49%	0.00%
	3	715,885	760,267	758,017	-6.20%	-5.89%	0.30%
	4	558,979	660,477	654,148	-18.16%	-17.03%	0.96%
1AoRG όχι παραμέν. τάσεις	1	843,371	812,965	755,163	3.61%	10.46%	7.11%
	2	706,079	687,765	641,108	2.59%	9.20%	6.78%
	3	558,979	546,346	521,457	2.26%	6.71%	4.56%
1BoR	1	862,985	797,518	540,060	7.59%	37.42%	32.28%
	2	764,918	703,930	484,303	7.97%	36.69%	31.20%
	3	657,045	602,894	410,828	8.24%	37.47%	31.86%
	4	480,526	487,598	332,488	-1.47%	30.81%	31.81%
1BmR	1	853,178	806,220	742,819	5.50%	12.94%	7.86%
	2	755,112	728,761	663,465	3.49%	12.14%	8.96%
	3	637,432	625,896	562,972	1.81%	11.68%	10.05%
	4	500,139	504,213	450,601	-0.81%	9.90%	10.63%

Πίνακας 4.3 Φορτία αστοχίας υποστυλωμάτων σύμφωνα με το Πείραμα, το πρόγραμμα Adina και τον Ευρωκώδικα και Αποκλίσεις αυτών, για τις σειρές 1AoR έως 1BmR.

Σειρά Υποτυλωμ	α/α	Φορτίο Αστοχίας (N)			(Πείρ-Ad.)Πείρ Απόκλ. %	(Πείρ-EC3)Πείρ Απόκλ. %	(Ad.-EC3)Ad Απόκλ. %
		Πείραμα	Adina	EC3			
2AoR	1	921,825	959,238	907,214	-4.06%	1.58%	5.42%
	2	823,758	767,980	732,916	6.77%	11.03%	4.57%
	3	666,852	619,243	594,247	7.14%	10.89%	4.04%
	4	509,945	483,266	464,461	5.23%	8.92%	3.89%
2AmR χωρίς τοπική ατέλεια	1	902,211	890,275	907,675	1.32%	-0.61%	-1.95%
	2	823,758	784,429	800,207	4.77%	2.86%	-2.01%
	3	637,432	647,517	660,181	-1.58%	-3.57%	-1.96%
	4	490,332	533,433	543,060	-8.79%	-10.75%	-1.80%
2BoR	1	804,145	649,875	560,121	19.18%	30.35%	13.81%
	2	666,852	594,591	511,808	10.84%	23.25%	13.92%
	3	549,172	495,672	426,289	9.74%	22.38%	14.00%
	4	382,459	398,471	341,499	-4.19%	10.71%	14.30%
2BmR	1	794,338	737,124	718,749	7.20%	9.52%	2.49%
	2	657,045	647,828	621,933	1.40%	5.34%	4.00%
	3	529,559	526,619	506,097	0.56%	4.43%	3.90%
	4	421,685	423,638	405,584	-0.46%	3.82%	4.26%
3AoR	1	588,399	544,093	551,623	7.53%	6.25%	-1.38%
	2	490,332	476,274	488,167	2.87%	0.44%	-2.50%
	3	362,846	376,878	389,113	-3.87%	-7.24%	-3.25%
	4	304,006	299,299	308,804	1.55%	-1.58%	-3.18%
3BoR	1	568,785	496,198	476,414	12.76%	16.24%	3.99%
	2	470,719	446,734	429,916	5.10%	8.67%	3.76%
	3	362,846	349,932	337,323	3.56%	7.03%	3.60%
	4	284,392	282,790	271,308	0.56%	4.60%	4.06%

Πίνακας 4.3 Φορτία αστοχίας υποστυλωμάτων σύμφωνα με το Πείραμα, το πρόγραμμα Adina και τον Ευρωκώδικα και Αποκλίσεις αυτών, για τις σειρές 2AoR έως 3BoR.

Ο Πίνακας 4.5 δείχνει τους μέσους όρους και τις τυπικές αποκλίσεις των απολύτων τιμών των % αποκλίσεων των τριών μεθόδων, με και χωρίς να υπολογιστεί η σειρά 1AmR, στην οποία δεν τέθηκε η σωστή τοπική ατέλεια και η σειρά 1BoR η οποία δεν πληροί τα κριτήρια της αναλυτικής λύσης του EC3, (Εξ. 1.9).

Παρατηρείται ότι εν γένει το φορτίο του EC3 είναι μικρότερο από το πειραματικό διότι αφενός ο τύπος του EC3 είναι προσεγγιστικός και αφετέρου φτάνει μέχρι τη στιγμή της πρώτης διαρροής και όχι της «τελικής» πλαστικοποίησης (δεν παρατηρήθηκε πλήρης πλαστικοποίηση διατομής λόγω της συνύπαρξης των φαινομένων δεύτερης τάξης). Εξάιρεση αποτελεί η σειρά 1AmR στην οποία η μέγιστη απόκλιση των φορτίων του EC3 κατά της ασφαλείας φτάνει το 17%.

Στην πλειοψηφία των υποστυλωμάτων, ο EC3 παρουσιάζει χαμηλότερο φορτίο από το πρόγραμμα Adina και αυτό εξηγείται από την συνέχιση της ανάλυσης του Adina μέχρι την κατάρρευση, κατάσταση που απέχει από την πρώτη διαρροή.

 % Αποκλίσεις 	Μέσος Όρος	Τυπική απόκλιση
Με όλες τις σειρές		
Πείραμα-Adina	5.54%	4.54%
Πείραμα-EC3	11.40%	9.97%
Adina-EC3	7.85%	8.63%
Χωρίς τη σειρά 1AmR		
Πείραμα-Adina	5.55%	4.54%
Πείραμα-EC3	11.63%	10.35%
Adina-EC3	8.26%	8.97%
Χωρίς τη σειρά 1BoR		
Πείραμα-Adina	5.46%	4.67%
Πείραμα-EC3	8.91%	6.40%
Adina-EC3	5.39%	3.98%

Πίνακας 4.5 Αποκλίσεις των φορτίων αστοχίας του Πειράματος, του Adina και του EC3 ανά δίο, με και χωρίς τις σειρές 1AmR και 1BoR

4.1.3 Υπολογισμός φορτίων αστοχίας τροποποιώντας τον EC3

Βάζοντας στο δεξί μέλος της εξίσωσης αντοχής του EC3, (Εξ. 1.9), αντί του όρου $x_{ch}A_{fy}$ τη πλήρη θλιπτική αντοχή ενός πέλματος με μήκος όσο το μήκος φατνώματος, με αμφιέρεστη στήριξη και ατέλεια όσο η προδιαγραφόμενη τοπική, προκύπτει μία καλύτερη προσέγγιση του φορτίου κατάρρευσης (Εξ. 1.12).

Όπως παρατηρήθηκε στο Κεφ. 3, εξαιτίας της φοράς της τοπικής ατέλειας όλα τα κρίσιμα φατνώματα αστόχησαν προς την ισχυρή τους πλευρά, δηλαδή την πλευρά του πέλματός τους. Έτσι, στην Εξ. 1.12 τίθεται στο δεύτερο μέλος η αντίστοιχη «ισχυρή» πλήρης αντοχή των φατνωμάτων, υπολογισμένη με τη βοήθεια του προγράμματος Adina.

Οι Πίνακες 4.6 και 4.7 εμφανίζουν τα δύο φορτία του EC3 σε σύγκριση με το φορτίο Adina. Όπως είναι αναμενόμενο, όλες οι αντοχές σύμφωνα με τον τροποποιημένο EC3 (Μέθοδος Β) υπερβαίνουν τις αντοχές του EC3 (Μέθοδος Α). Αν δε ληφθεί υπόψη η σειρά 1BoR, ο μέσος όρος των απολύτων % αποκλίσεων Adina- Μεθόδου Β είναι 1.70% και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση 1.28%, χαρακτηριστικά που δείχνουν ότι η μέθοδος Β παρέχει μία πολύ ικανοποιητική προσέγγιση.

Σειρά Υποτυλωμ.	α/α	Φορτίο Αστοχίας (N)			(B-A)/B Απόκλιση %	(B-Adina)/ Adina Απόκλιση %
		Adina	EC3 Μέθοδος A	Τροποπ. EC3 Μέθοδος B		
1AoR	1	977,486	899,424	969,899	7.27%	-0.78%
	2	869,635	803,517	863,943	6.99%	-0.65%
	3	785,810	724,826	772,752	6.20%	-1.66%
	4	616,921	571,498	616,848	7.35%	-0.01%
1AmR χωρίς τοπική ατέλεια	1	1,028,270	-	-	-	-
	2	919,096	-	-	-	-
	3	761,404	-	-	-	-
	4	660,815	-	-	-	-
1AmR με τοπική, πλακοειδούς μορφής	1	1,028,292	1,031,669	1,031,669	0.00%	0.33%
	2	918,972	919,009	919,009	0.00%	0.00%
	3	760,267	758,017	758,017	0.00%	-0.30%
	4	660,477	654,148	654,148	0.00%	-0.96%
1AoRG όχι παραμέν. τάσεις	1	812,965	755,163	807,970	6.54%	-0.61%
	2	687,765	641,108	685,193	6.43%	-0.37%
	3	546,346	521,457	558,146	6.57%	2.16%
1BoR	1	797,518	540,060	754,978	28.47%	-5.33%
	2	703,930	484,303	622,284	22.17%	-11.60%
	3	602,894	410,828	517,267	20.58%	-14.20%
	4	487,598	332,488	412,652	19.43%	-15.37%
1BmR	1	806,220	742,819	805,770	7.81%	-0.06%
	2	728,761	663,465	717,295	7.50%	-1.57%
	3	625,896	562,972	608,422	7.47%	-2.79%
	4	504,213	450,601	486,793	7.43%	-3.45%

Πίνακας 4.6 Φορτία αστοχίας από το Adina και τις δύο Μεθόδους του EC3 και αποκλίσεις ανά δύο, για τις σειρές 1AoR έως 1BmR

Στη σειρά 1BoR, οι διαφορές τους είναι μεγάλες διότι η γεωμετρία της σειράς αυτής δε εμπίπτει στις θεωρητικές παραδοχές σύμφωνα με τις οποίες είναι δομημένη η σχέση του EC3, (Εξ. 1.9), άρα και του τροποποιημένου EC3 (Εξ. 1.12).

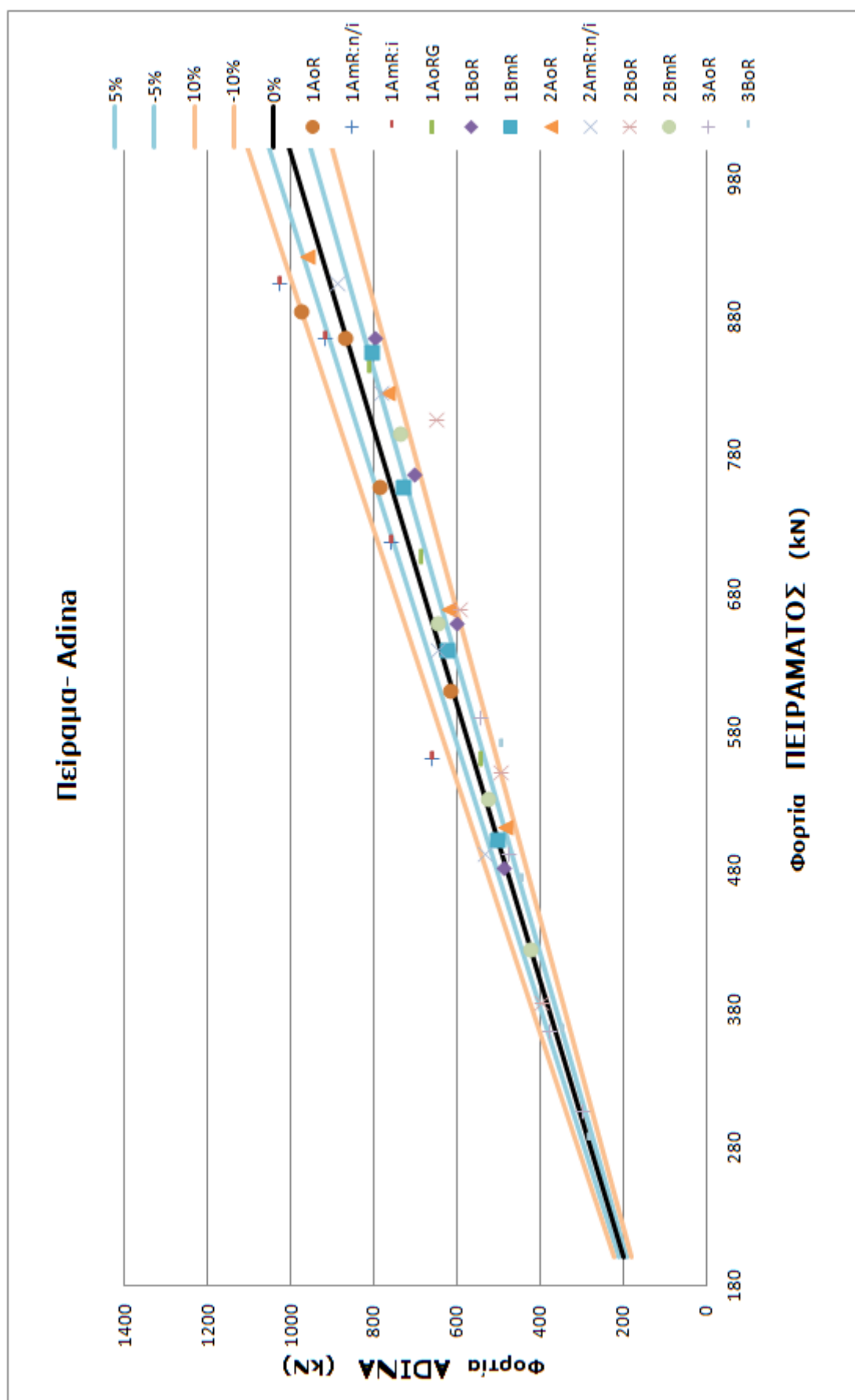
Στις σειρές 1AmR και 2AmR το μήκος φατνώματος είναι 0.32m, σχετικά μικρό για τα υπόλοιπα στοιχεία του φατνώματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η παράμετρος 'x' που απομειώνει τη θλιπτική αντοχή να έχει τιμή πολύ κοντά στη μονάδα. Αυτό δηλώνει ότι το φάτνωμα αστοχεί περισσότερο λόγω ομοιόμορφης διαρροής παρά λυγισμού. Έτσι, οι αποκλίσεις των δύο μεθόδων είναι μηδενικές.

Σειρά Υποτυλωμ.	α/α	Φορτίο Αστοχίας (N)			(B-A)/B Απόκλιση %	(B-Adina)/ Adina Απόκλιση %
		Adina	EC3 Μέθοδος A	Τροποπ. EC3 Μέθοδος B		
2AoR	1	959,238	907,214	971,600	6.63%	1.29%
	2	767,980	732,916	783,693	6.48%	2.05%
	3	619,243	594,247	635,751	6.53%	2.67%
	4	483,266	464,461	497,513	6.64%	2.95%
2AmR χωρίς τοπική ατέλεια	1	890,275	907,675	907,675	0.00%	1.95%
	2	784,429	800,207	800,207	0.00%	2.01%
	3	647,517	660,181	660,181	0.00%	1.96%
	4	533,433	543,060	543,060	0.00%	1.80%
2BoR	1	649,875	560,121	638,991	12.43%	-1.67%
	2	594,591	511,808	584,936	12.50%	-1.62%
	3	495,672	426,289	488,287	12.70%	-1.49%
	4	398,471	341,499	392,901	13.08%	-1.40%
2BmR	1	737,124	718,749	742,638	3.22%	0.75%
	2	647,828	621,933	642,693	3.23%	-0.79%
	3	526,619	506,097	523,024	3.24%	-0.68%
	4	423,638	405,584	420,087	3.45%	-0.84%
3AoR	1	544,093	551,623	559,272	1.37%	2.79%
	2	476,274	488,167	495,823	1.54%	4.10%
	3	376,878	389,113	395,954	1.73%	5.06%
	4	299,299	308,804	314,911	1.94%	5.22%
3BoR	1	496,198	476,414	499,657	4.65%	-0.70%
	2	446,734	429,916	453,761	5.26%	1.57%
	3	349,932	337,323	351,930	5.48%	2.37%
	4	282,790	271,308	290,742	6.68%	2.81%

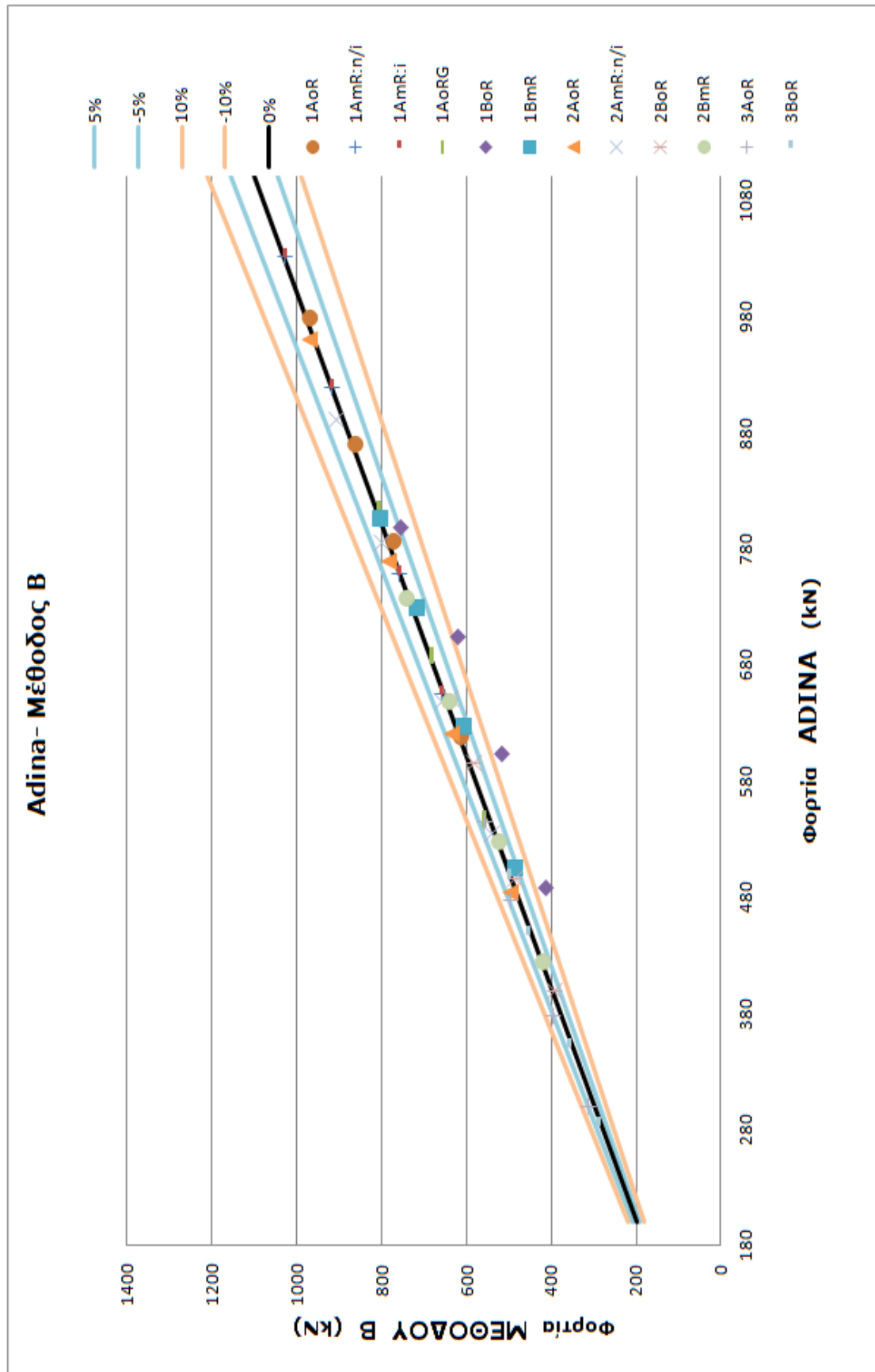
Πίνακας 4.7 Φορτία αστοχίας από το Adina και τις δύο Μεθόδους του EC3 και αποκλίσεις ανά δύο, για τις σειρές 2AoR έως 3BoR

Στα Διαγράμματα 4.8 και 4.9, κάθε σημείο του καρτεσιανού επιπέδου αντιπροσωπεύει ένα υποστυλωμα και έχει για συντεταγμένες δύο φορτία αντοχής, αυτά που συγκρίνονται σε κάθε περίπτωση. Το πρώτο διάγραμμα απεικονίζει την απόκλιση Πειράματος-Adina και το δεύτερο την απόκλιση Adina-Μεθόδου B.

Οι ομάδες των υποστυλωμάτων φαίνονται με ξεχωριστό σύμβολο σημείου. Επίσης, χαράσσονται οι γραμμές της μηδενικής απόκλισης (υπό 45 μοίρες) και των αποκλίσεων $\pm 5\%$ και $\pm 10\%$ των δύο μεγεθών.



Διάγραμμα 4.8 Διαγραμματική απεικόνιση αποκλίσεων Πειράματος-Adina σε σχέση με τα όρια $\pm 5\%$ και $\pm 10\%$

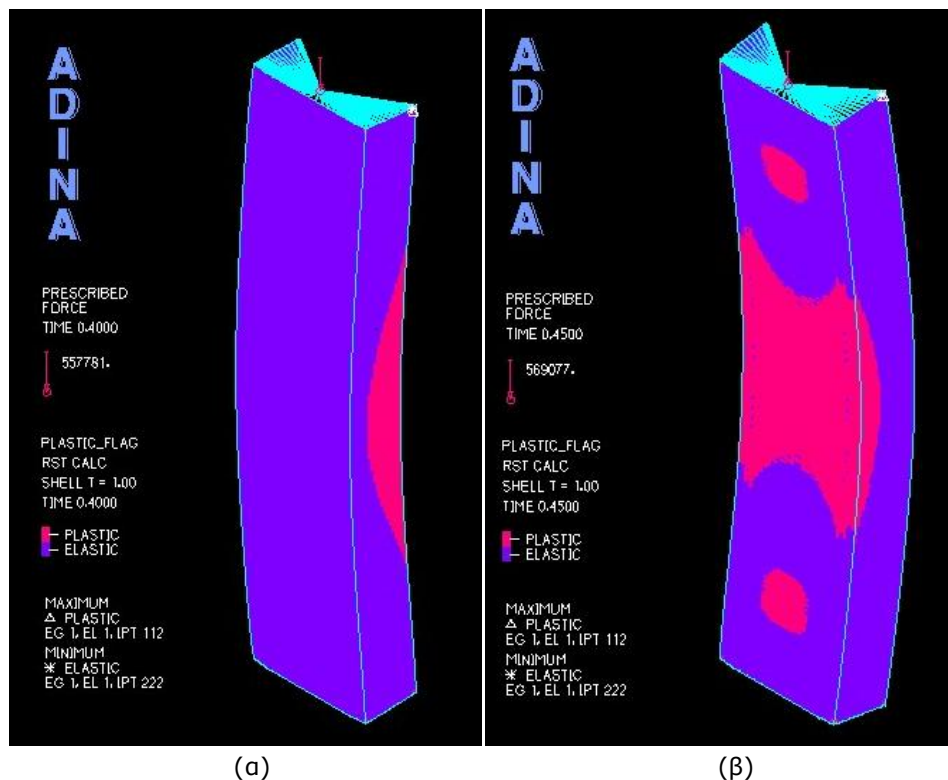


Διάγραμμα 4.9 Διαγραμματική απεικόνιση αποκλίσεων Adina-Μεθόδου Β σε σχέση με τα όρια $\pm 5\%$ και $\pm 10\%$

4.1.4 Επιρροή φοράς της τοπικής ατέλειας

Στη θεωρία ελαστικού λυγισμού Euler, η φορά λυγισμού μέλους ασύμμετρης διατομής (στο επίπεδο λυγισμού) δεν παίζει ρόλο στον καθορισμό του κρίσιμου φορτίου. Όταν όμως υπεισέρχεται και μη γραμμικότητα υλικού, τότε η φορά λυγισμού έχει επίδραση στο οριακό πια φορτίο.

Αυτό αποδεικνύεται πρακτικά από πλήθος αναλύσεων GMNIA με το πρόγραμμα Adina πάνω σε μεμονωμένα φατνώματα υποστυλωμάτων του πειράματος, με αντίστοιχο ύψος, υλικό και τοπική ατέλεια (υποστυλώματος, άρα καθολική φατνώματος). Μία τυπική περίπτωση είναι το φάτνωμα του υποστυλώματος #1, 1AoR (Σχ. 4.10). Όταν λυγίζει προς την πλευρά των πελμάτων (ασθενής πλευρά στο εξής), αστοχεί στα 558 kN. Αντίθετα, όταν λυγίζει προς την πλευρά του κορμού (ισχυρή πλευρά στο εξής) παρουσιάζει οριακό φορτίο 569 kN. Όπως φαίνεται, δεν πλαστικοποιείται κάθε φορά ολόκληρη η διατομή διότι στην αστοχία, εκτός από τη μη γραμμικότητα υλικού, συμμετέχει επίσης και η μη γραμμικότητα γεωμετρίας.



Σχ. 4.10 Αστοχία φατνώματος από το υποστυλωμα #1, 1AoR προς την πλευρά των πελμάτων (α) και προς την πλευρά του κορμού (β)

Έτσι, στο σύνθετο υποστυλωμα, φαίνεται πως η φορά της τοπικής ατέλειας μπορεί να επηρεάσει το φορτίο αστοχίας, τόσο στις αναλύσεις GMNIA με το Adina, όσο και στον υπολογισμό του φορτίου με τον τροποποιημένο EC3 (Μέθοδος Β) καθώς στο δεξί μέλος της Εξ. 1.10 τίθεται η αντοχή του φατνώματος. Για το σχεδιασμό στην πράξη, επιδιώκεται η προσομοίωση των χειρότερων συνθηκών στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (ή στον τύπο του τροποποιημένου EC3). Για την προσομοίωση όμως πειραμάτων, όπως συμβαίνει εδώ, γίνεται προσπάθεια να

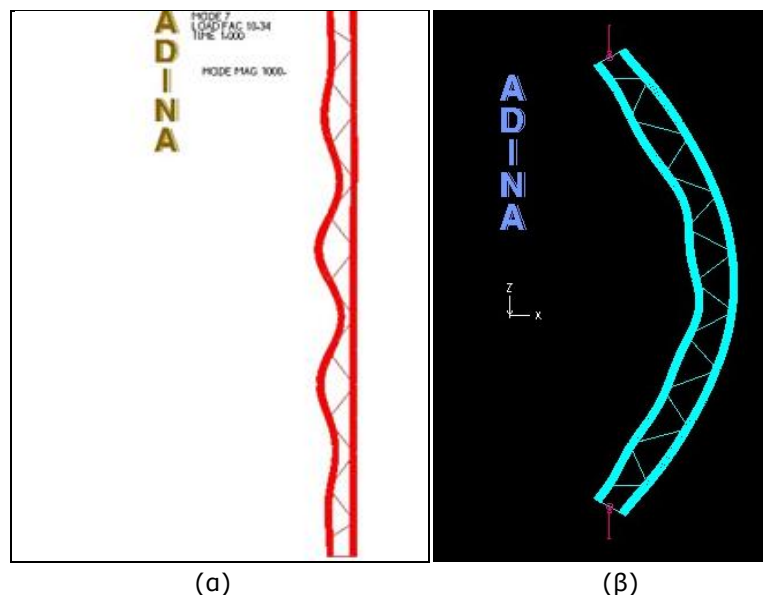
ανιχνευτούν και να αναπαραχθούν στα υπολογιστικά εργαλεία όσο γίνεται πιο πιστά οι συνθήκες του πειράματος.

Στην προσομοίωση των 43 υποστυλωμάτων με το Adina χρησιμοποιήθηκε τοπική ατέλεια σύμφωνα με την αντίστοιχη ιδιομορφή που προέκυψε από ανάλυση LBA. Στις αναλύσεις αυτές παρουσιάστηκε τοπική ιδιομορφή μόνο για το ένα πέλμα, όχι και για τα δύο όπως θα προέβλεπε η στατική δευτέρης τάξης, ίσως διότι τα υποστυλώματα δεν ήταν συμμετρικά ως προς τις ράβδους δικτύωσής τους καθ' ύψος. Το πέλμα λοιπόν με την τοπική ιδιομορφή αυτομάτως χρίστηκε δυσμενέστερο και καθόρισε τη φορά της καθολικής ατέλειας με σκοπό αυτό το πέλμα να θλίβεται περισσότερο. Αυτός ο περιορισμός σε συνδυασμό με τη γεωμετρία κάθε υποστυλώματος δημιουργούν σε κάθε σειρά υποστυλωμάτων ένα ιδιαίτερο συνδυασμό φοράς τοπικής ατέλειας και πέλματος το οποίο τη φέρει. Ενδέχεται ο συνδυασμός αυτός να είναι διαφορετικός από το πείραμα αλλά και από την τροποποιημένη σχέση του EC3 (όπως θα φανεί παρακάτω) δημιουργώντας έτσι ευμενέστερες ή δυσμενέστερες συνθήκες.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες περιπτώσεις σειρών υποστυλωμάτων για τις οποίες δεν είναι προφανές αφενός ποιος είναι ο δυσμενέστερος συνδυασμός και αφετέρου ποια τεχνική προσέγγισης (ανάλυση, θεωρητική σχέση) ταιριάζει με ποια άλλη τεχνική αλλά και με το πείραμα.

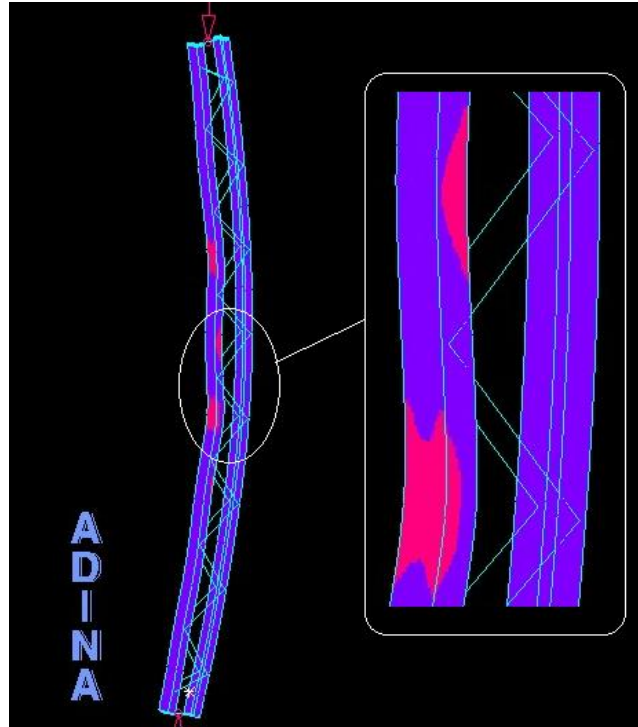
4.1.4.1 Υποστύλωμα #1 από τη σειρά 1AoR

Η ανάλυση LBA δίνει τοπική ατέλεια στο αριστερό πέλμα (Σχ. 4.11 (α)). Λόγω της καθ' ύψος διάταξης των ράβδων δικτύωσης, δεν υπάρχει ένα δυσμενέστερο φάτνωμα αλλά δύο ύποπτα προς αστοχία φαινόμενα περί το μέσον ύψος, ένα αμέσως πιο πάνω και ένα πιο κάτω (Σχ. 4.11 (β)). Το επάνω, αν και εμφανίζεται φορτιστικά ευνοϊκότερο λόγω μικρότερης εκκεντρότητας πρόκειται να λυγίσει προς την ασθενή του πλευρά ενώ το κάτω, είναι μεν στη χειρότερη θέση αλλά προβάλλει την ισχυρή του πλευρά προς λυγισμό.



Σχ. 4.11 Τοπική ιδιομορφή λυγισμού στο υποστύλωμα #1 της σειράς 1AoR (α) και συνδυασμός αρχικής παραμόρφωσης λόγω ατελειών (β)

Επομένως, δεν μπορούμε να αποφανθούμε για το ποιο είναι δυσμενέστερο και θα καθορίσει εν τέλει το φορτίο της αστοχίας. Πράγματι, στην ανάλυση GMNIA με το Adina, τη στιγμή της αστοχίας φαίνεται πως η αστοχία οφείλεται και στα δύο (Σχ. 4.12).



Σχ. 4.12 Κριτήριο αστοχίας για τη στιγμή που επιτυγχάνεται μέγιστο φορτίο στο υποστυλώμα #1, 1AoR

Το πειραματικό φορτίο αστοχίας για το υποστυλώμα #1 είναι 922kN, ενώ το προκύπτον από το Adina είναι 959kN. Ενδεχομένως, εάν ετίθετο τοπική ατέλεια στο δεξιό πέλμα στην ανάλυση του Adina, τα δύο φορτία να ήταν κοντινότερα.

Εάν τεθεί στη σχέση του τροποποιημένου EC3 η ασθενής και η ισχυρή αντοχή του φαντώματος από την ανάλυση στο Adina, το αποτέλεσμα θα είναι 952kN και 970kN αντίστοιχα.

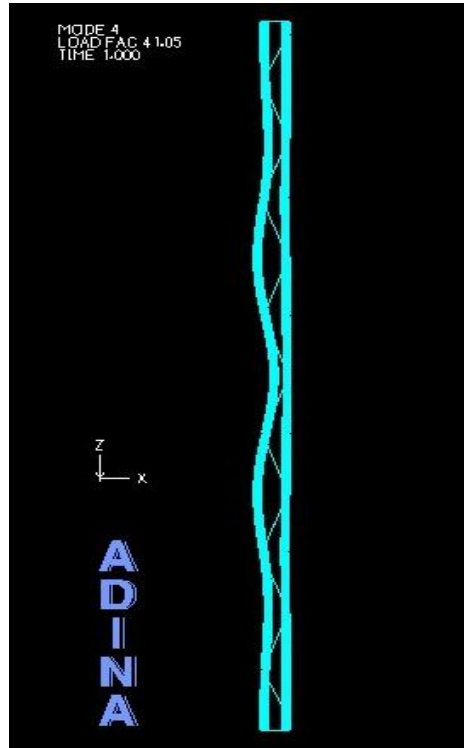
4.1.4.2 Υποστυλώματα της σειράς 1BoR

Όπως φαίνεται στην Ενότητα 3.6.1, οι ιδιομορφές που διατίθενται από την ανάλυση LBA είναι ακανόνιστες και αποκλίνουν από την κλασική καθολική και τοπική ιδιομορφή που αναμένεται. Επομένως, η σημαντική απόκλιση μεταξύ οριακών φορτίων πειράματος και ανάλυσης GMNIA στο Adina (κατά μέσον όρο 7%) αιτιολογείται από το απρόβλεπτο του συνδυασμού μεγέθους και σχήματος των ιδιομορφών που κυριάρχησαν στο πείραμα και που ήταν αδύνατο να προβλεφτούν και να υλοποιηθούν με τις διαθέσιμες ιδιομορφές. Όσο για την απόκλιση μεταξύ φορτίου EC3 (Εξ. 1.10) και πειράματος, εξηγείται από το ότι η μορφή των υποστυλωμάτων δεν εμπίπτει στις θεωρητικές παραδοχές της σχέσης.

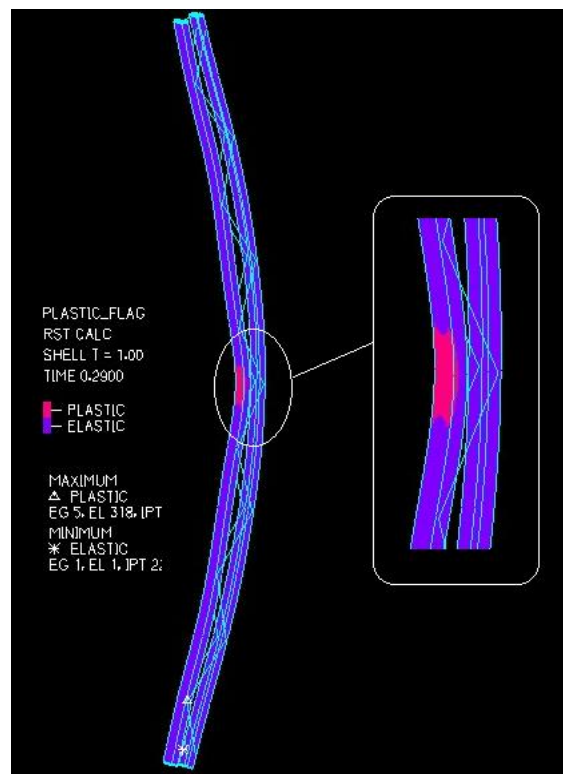
4.1.4.3 Υποστυλώμα #1 από τη σειρά 2BoR

Στη σειρά υποστυλωμάτων 2BoR παρατηρείται σχετικά μεγάλη απόκλιση μεταξύ οριακών φορτίων πειράματος και ανάλυσης GMNIA στο Adina, από 10% μέχρι 19%. Επίσης, η απόκλιση μεταξύ φορτίου Adina και τροποποιημένου EC3 με

αντικατάσταση της ισχυρής και της ασθενούς αντοχής φατνώματος είναι 1.5% και 8.0% αντίστοιχα. Η τοπική ιδιομορφή (Σχ. 4.13) προσδιορίζει ως δυσμενέστερο το φάτνωμα του οποίου το μέσον ταυτίζεται με το μέσον του υποστυλώματος, όπως υποθέτει ο τροποποιημένος EC3 (Εξ. 1.10).

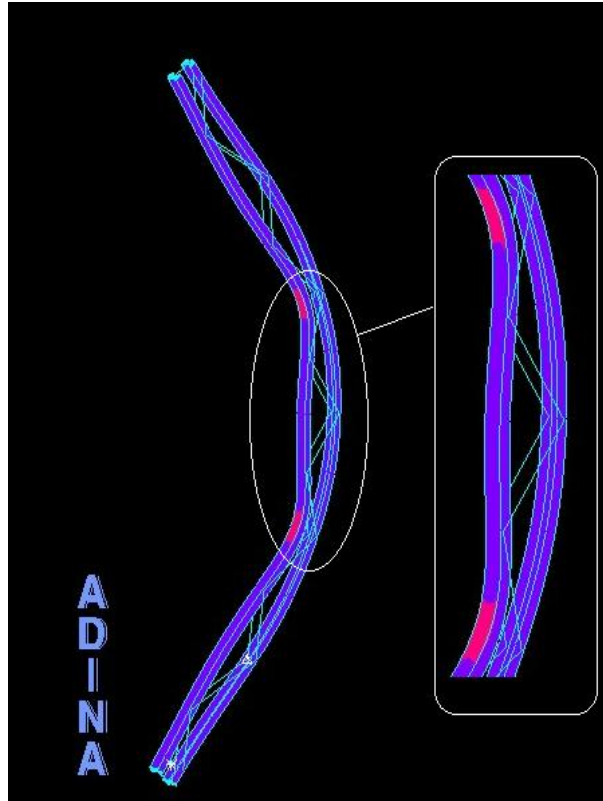


Σχ. 4.13 Τοπική ιδιομορφή υποστυλώματος της σειράς 2BoR



Σχ. 4.14 Αστοχία του υποστυλώματος #1, 2BoR, με φορά τοπικής ατέλειας ώστε να λυγίζει το κρίσιμο φάτνωμα ισχυρά

Στην περίπτωση του υποστυλώματος #1, το πειραματικό οριακό φορτίο είναι 804kN. Το οριακό φορτίο του Adina με φορά τοπικής ετέλειας τέτοια ώστε το κρίσιμο φάτνωμα να λυγίζει με την ισχυρή του πλευρά (Σχ. 4.14) είναι 650kN. Το φορτίο της Μεθόδου Β για ισχυρή πλευρά λυγισμού φατνώματος είναι 639 kN.



Σχ. 4.15 Αστοχία του υποστυλώματος #1, 2BoR, με φορά τοπικής ατέλειας ώστε να λυγίζει το κρίσιμο φάτνωμα ασθενώς

Τίθεται το ερώτημα τι γίνεται εάν η τοπική ατέλεια οριστεί με αντίθετη φορά. Δίνεται η ευκαιρία να ξεκαθαριστεί τουλάχιστον στην παρούσα γεωμετρία υποστυλώματος αν είναι δυσμενέστερος ο ισχυρός λυγισμός φατνώματος σε χειρότερη θέση ή ο ασθενής λυγισμός σε καλύτερη θέση.

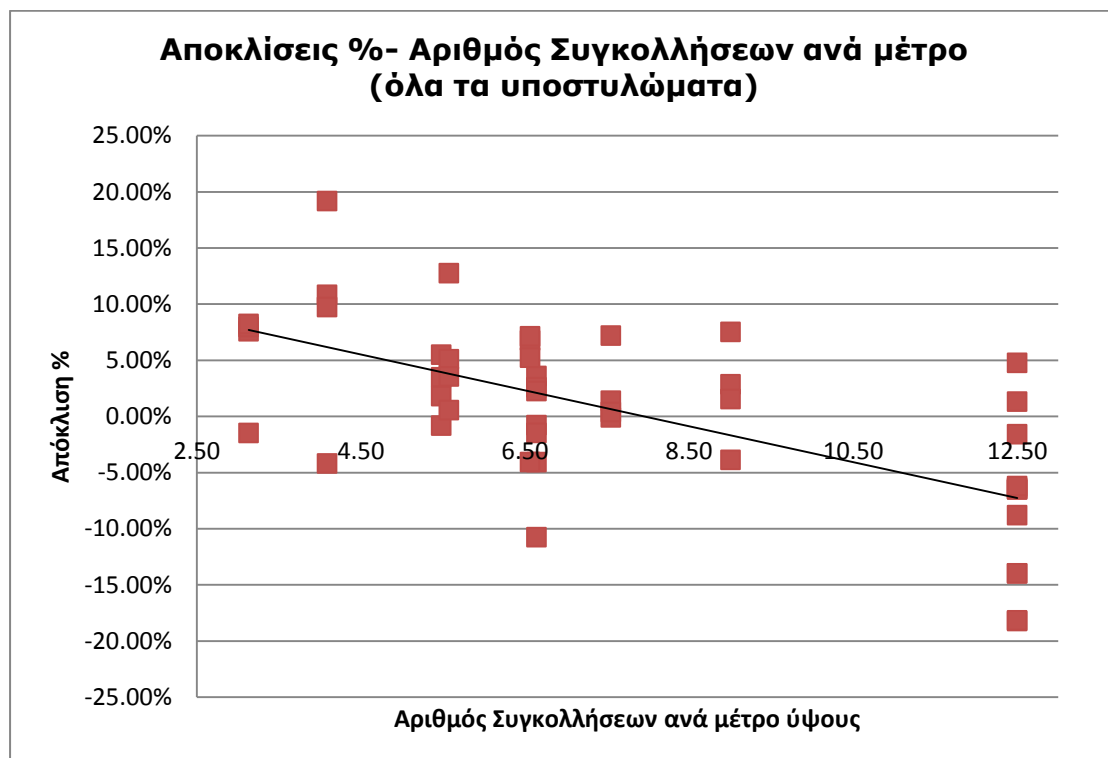
Έτσι, διεξάγεται ανάλυση GMNIA στο Adina με φορά τοπικής ατέλειας αντίθετη από προηγουμένως. Ο μηχανισμός αστοχίας φαίνεται στο Σχ. 4.15. Αποδεικνύεται πως κρισιμότερη είναι η αστοχία με τον ισχυρό μηχανισμό φατνώματος, έστω και σε θέση διαφορετική από αυτή του δυσμενέστερου φατνώματος. Τώρα, το φορτίο Adina είναι 665kN, ελαφρώς μεγαλύτερο από πριν, καθώς φαίνεται ότι ο δεύτερος συνδυασμός τοποθέτησης ατελειών είναι λιγότερο κρίσιμος. Το φορτίο της Μεθόδου είναι 601kN, μικρότερο από πριν, διότι στη σχέση εισήχθη η ασθενής αντοχή φατνώματος. Η πραγματικότητα όμως δεν ακολουθεί την ίδια λογική, για αυτό και το νέο φορτίο Adina είναι μεγαλύτερο αντί μικρότερο όπως αναμενόταν, αφού και ο μηχανισμός αστοχίας είναι μη αναμενόμενος.

Από τα παραπάνω αντιπροσωπευτικά παραδείγματα φαίνεται ότι η τοπική ατέλεια αν και παίζει ρόλο στη διαμόρφωση του οριακού φορτίου, δε δημιουργεί μεγάλες διαφορές όταν αλλάζει η φορά της.

4.1.5 Επιρροή Αριθμού Συγκολλήσεων

Στα πειράματα οι ράβδοι δικτύωσης συγκολλήθηκαν στα άκρα τους με τα πέλματα. Η διαδικασία αυτή προκαλεί παραμένουσες τάσεις οι οποίες δρουν αθροιστικά με τις τάσεις λόγω εξωτερικού επιβαλλόμενου φορτίου και επιφέρουν την αστοχία νωρίτερα, σε μικρότερο φορτίο.

Η επιρροή των παραμενουσών αυτών τάσεων είναι δύσκολο να μελετηθεί με ακρίβεια, παρά μόνο ποιοτικά, καθώς δεν είναι γνωστό ούτε το μέγεθός τους ούτε η κατανομή τους. Μόνο στη σειρά υποστυλωμάτων 1ΑοRG οι συγκολλήσεις έγιναν με τη μέθοδο της ανόπτησης ώστε οι παραμένουσες τάσεις τουλάχιστον λόγω αυτών να είναι αμελητέες.



Διάγραμμα 4.16 Απόκλιση Πειράματος-Adina συναρτήσεως του ανηγμένου αριθμού συγκολλήσεων

Στα επόμενα, θεωρείται ότι κάθε συγκόλληση άκρου ράβδου έχει το ίδιο μήκος και ίδιες γενικά διαστάσεις και ιδιότητες, οπότε θα λογίζεται αριθμητικά «μία» συγκόλληση. Προκειμένου το πλήθος των συγκολλήσεων να γίνει αδιάστατο διαιρείται με το μήκος του υποστυλώματος.

Επειδή στο πρόγραμμα Adina δεν ελήφθησαν υπόψη οι παραμένουσες τάσεις και δεδομένου ότι η προσομοίωση του Adina κρίνεται επιτυχής, η απόκλιση φορτίου Adina-πειράματος φαίνεται πως εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από τον ανηγμένο αριθμό συγκολλήσεων ανά μονάδα μήκους.

Στο Διάγραμμα 4.16 απεικονίζονται οι % αποκλίσεις όλων των υποστυλωμάτων συναρτήσει του ανηγμένου αριθμού συγκολλήσεων. Όσο αυξάνεται ο ανηγμένος αριθμός συγκολλήσεων διακρίνεται κάποια τάση αλγεβρικής πτώσης της % απόκλισης Πειράματος-Adina.

Δηλαδή, όσο περισσότερες συγκολλήσεις εμφανίζονται σε ένα υποστύλωμα ανά μονάδα μήκους, τόσο το φορτίο αστοχίας του Adina τείνει να υπερτερεί του πειραματικού, διότι το πρώτο είναι απαλλαγμένο από την επιβαρυντική δράση των παραμενουσών τάσεων ενώ το δεύτερο όχι, αφού είναι αποτέλεσμα μίας πραγματικής διαδικασίας.

4.2 Πρόταση νέων μεγεθών ατελειών για εναρμονισμό με το πείραμα

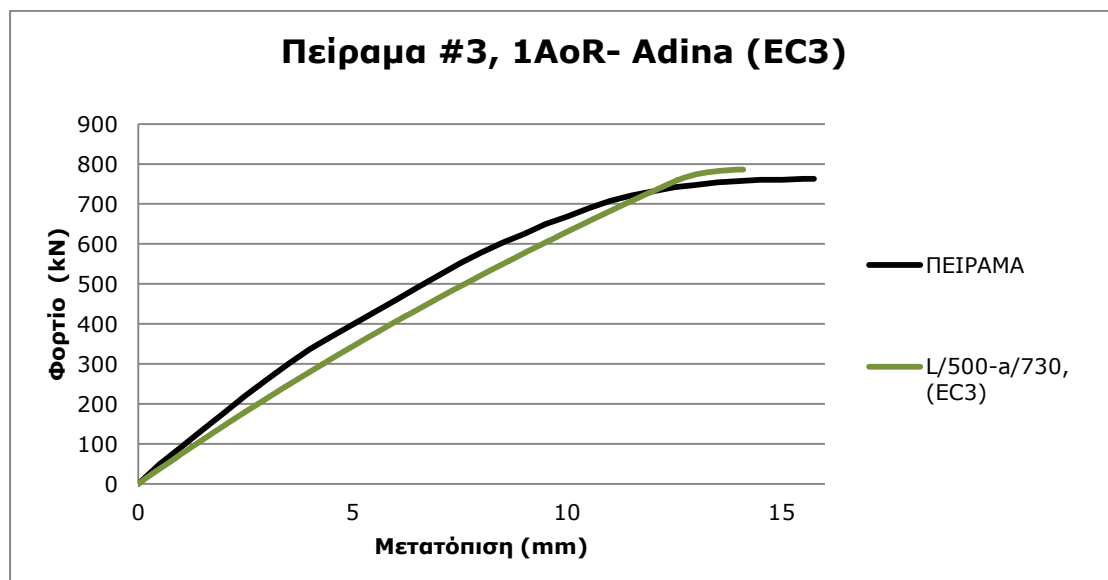
4.2.1 Πειραματικοί Δρόμοι Ισορροπίας

Στην πειραματική διερεύνηση των Kloppel K. και Ramm W. παρουσιάζονται οι πειραματικοί δρόμοι ισορροπίας για 4 υποστυλώματα, (Σχ. 2.6- 2.9), από τα 43 που ελέγχονται συνολικά. Οι δρόμοι ισορροπίας απεικονίζουν τη μετατόπιση στο μέσο του ύψους του υποστυλώματος συναρτήσει του θλιπτικού φορτίου. Δε διευκρινίζεται από το άρθρο σε ποιο σημείο της μεσαίας διατομής αναφέρονται οι δρόμοι ισορροπίας. Αναλύσεις GMNIA που έγιναν στο πρόγραμμα Adina με σημείο αναφοράς τον κεντροβαρικό κόμβο του κύριου μέλους και σημείο επί της ράβδου πολύ κοντά στο μέσο ύψος έδειξαν ταυτοτικούς δρόμους ισορροπίας. Επομένως, στο εξής λαμβάνεται η μετατόπιση του κεντροβαρικού κόμβου του κύριου μέλους στο μέσο ύψος.

4.2.2 Συσχέτιση Δρόμων Ισορροπίας και Αναλύσεων στο υποστυλώμα #3, 1AoR

4.2.2.1 Παραλληλία μεταξύ ελαστικών κλάδων και ίσα οριακά φορτία

Αρχικά συγκρίνονται οι δρόμοι ισορροπίας που προέκυψαν από το πείραμα και την ανάλυση με το Adina θέτοντας ατέλειες κανονιστικού μεγέθους, στο Διάγραμμα 4.21.



Διάγραμμα 4.21 Δρόμοι Ισορροπίας Πειράματος #3 1AoR και Adina με Κανονιστικές Ατέλειες

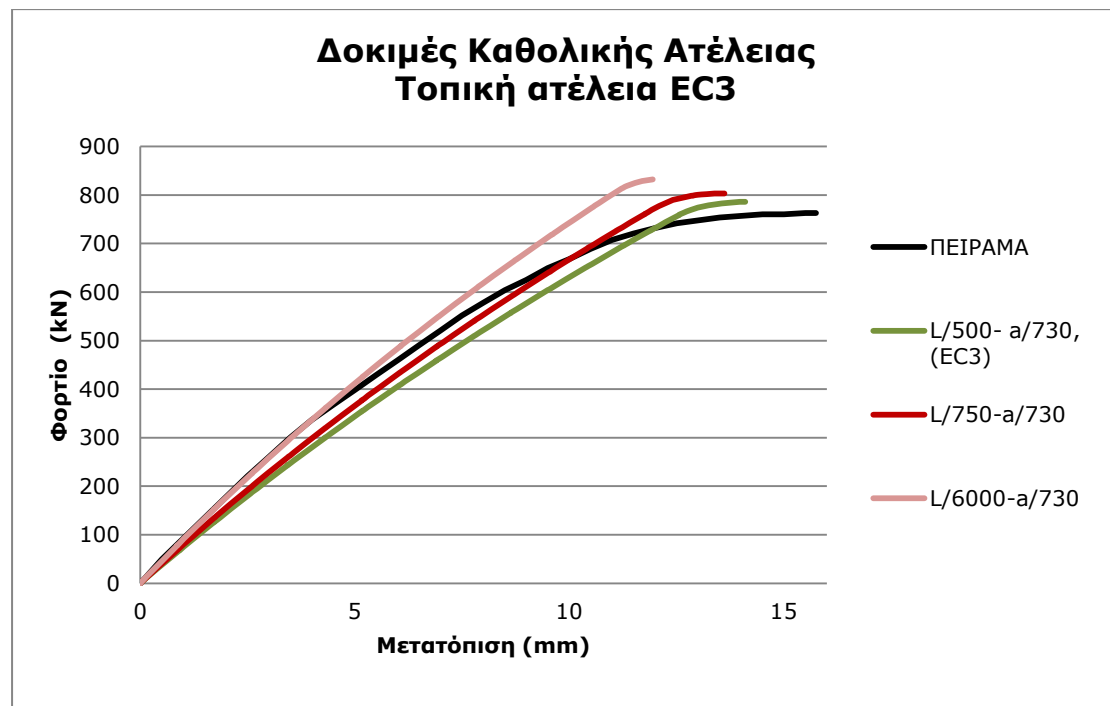
Είναι εμφανές ότι οι δύο δρόμοι ισορροπίας δεν έχουν ίδια κλίση στην περιοχή της ελαστικότητας, παρόλο που τα οριακά τους φορτία διαφέρουν μόνο κατά 4%.

Σύμφωνα με τη θεωρία της Στατικής δεύτερης τάξης, αυτό οφείλεται στις διαφορετικές καθολικές ατέλειες. Έτσι διεξάγονται αναλύσεις στο Adina με διάφορες καθολικές ατέλειες (Σχ. 4.23), και τοπική ατέλεια πάντοτε αυτή που προδιαγράφει ο EC3, (Εξ. 2.10), $a/726.8$ στην περίπτωση του υποστυλώματος #3, 1AoR, (όπου a το μήκος φατνώματος).

Σκοπός είναι να βρεθεί η καθολική ατέλεια για την οποία επέρχεται παραλληλία των ελαστικών κλάδων, οπότε διεξάγονται δοκιμές στο Adina. Τα στοιχεία των δοκιμών φαίνονται στον Πίνακα 4.22.

1AoR # 3	Καθολική Ατέλεια		Τοπική Ατέλεια		Φορτία		
Δοκι- μή	Μέγεθος	Του μήκους L	Μέγεθος	Του μήκους φατν, a	P Adina (kN)	P πειρ (kN)	% Απόκλ. (Pπειρ- Pad)/Pπειρ
(EC3)	0.01024	L/500	8.8056e-4	a/726.8	786	755	-4.13%
c32	0.00682	L/750	8.8056e-4	a/726.8	803	755	-6.36%
c33	0.00512	L/1000	8.8056e-4	a/726.8	812	755	-7.55%
c34	0.00204	L/2500	8.8056e-4	a/726.8	828	755	-9.68%
c35	0.00170	L/3000	8.8056e-4	a/726.8	830	755	-9.92%
c36	0.00128	L/4000	8.8056e-4	a/726.8	832	755	-10.25%
c37	0.00085	L/6000	8.8056e-4	a/726.8	834	755	-10.55%

Πίνακας 4.22 Δοκιμές στο Adina με αλλαγή καθολικής ατέλειας και σύγκριση οριακών φορτίων με το πειραματικό



Διάγραμμα 4.23 Δρόμοι Ισορροπίας υποστυλωμάτων από το Adina με διαφορετικές καθολικές ατέλειες, κανονιστικός και πειραματικός δρόμος ισορροπίας

Φαίνεται πως η αλλαγή της καθολικής ατέλειας επιφέρει τρόπον τινά «στροφή» των δρόμων ισορροπίας περί το κέντρο των αξόνων.

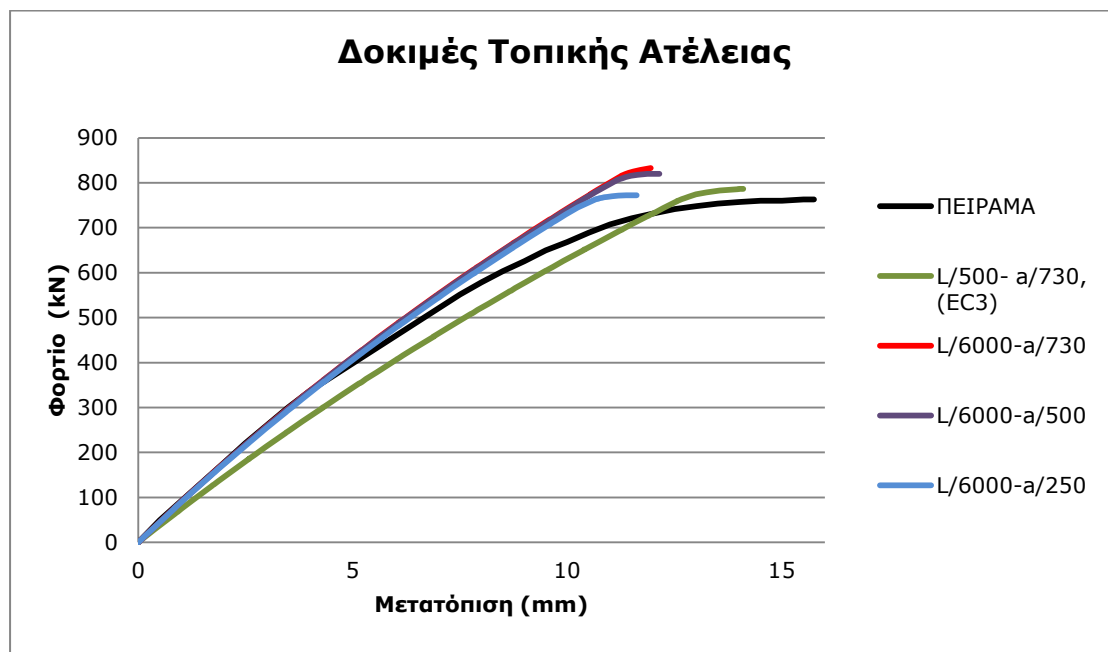
Η κλίση λοιπόν για την οποία οι δύο ελαστικοί κλάδοι είναι παράλληλοι, δεδομένης κανονιστικής τοπικής ατέλειας, είναι $L/6000$, όπου L το ύψος σε μέτρα του υποστυλώματος.

Στο επόμενο βήμα της διερεύνησης, στόχος είναι η επίτευξη παραπλήσιου φορτίου αστοχίας. Έτσι θα μεταβάλλεται η τοπική ατέλεια μέχρι να συμπίσουν οι αντοχές, με καθολική ατέλεια σταθερή και ίση με $L/6000$ επί του μήκους του υποστυλώματος. Τα στοιχεία των δοκιμών τοπικής ατέλειας φαίνονται στον Πίνακα 4.24.

1ΑοR # 3	Καθολική Ατέλεια		Τοπική Ατέλεια		Φορτία		
Δοκιμή	Μέγεθος	Του μήκους L	Μέγεθος	Του μήκους φαντ, a	P Adina (kN)	P πειρ (kN)	% Απόκλ. ($P_{\text{πειρ}} - P_{\text{Adina}}$)/ $P_{\text{πειρ}}$
c37	0.00085	$L/6000$	0.00088	$a/726.8$	834	755	-10.55%
c38	0.00085	$L/6000$	0.00128	$a/500$	820	755	-8.61%
c310	0.00085	$L/6000$	0.00256	$a/250$	772	755	-2.25%

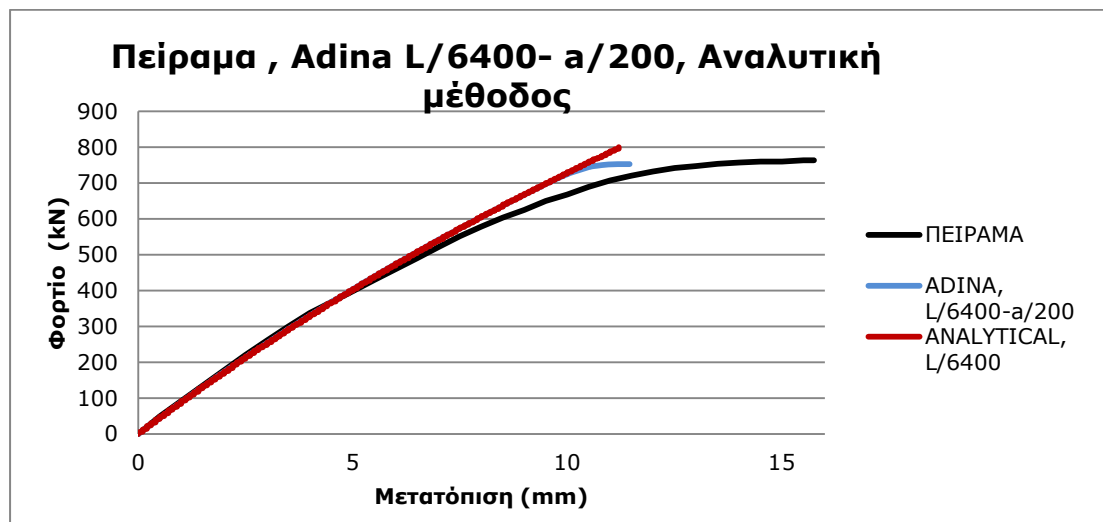
Πίνακας 4.24 Δοκιμές στο Adina με αλλαγή τοπικής ατέλειας και σύγκριση οριακών φορτίων με το πειραματικό

Η επιρροή της τοπικής ατέλειας θα μπορούσε να παρομοιαστεί με παράλληλη μετακίνηση προς τα κάτω του πλατώ διαρροής. Επομένως, χωρίς σημαντικές αλλαγές στο σχήμα του δρόμου ισορροπίας, η τοπική ατέλεια παίζει το ρόλο του ρυθμιστή του οριακού φορτίου, Διάγραμμα 4.25.



Διάγραμμα 4.25 Δρόμοι Ισορροπίας υποστυλωμάτων από το Adina με διαφορετικές τοπικές ατέλειες, κανονιστικός και πειραματικός δρόμος ισορροπίας

Παρατηρείται, βέβαια, μία ελαφρά πτώση της κλίσης του ελαστικού κλάδου με την αύξηση της τοπικής ατέλειας. Τελικά, με λεπτομερή έλεγχο, προκειμένου να υπάρχει ταύτιση των ελαστικών κλάδων καθώς και των οριακών φορτίων, επιλέγονται καθολική και τοπική ατέλεια ίσες με $L/6400$ και $a/200$ αντίστοιχα, Διάγραμμα 4.26.



Διάγραμμα 4.26 Δρόμοι Ισορροπίας Πειράματος και Adina σύμφωνα με τη Μέθοδο 1 και την Αναλυτική μέθοδο

Όπως φάνηκε στα παραπάνω, όσο και αν μεταβληθούν οι καθολικές και τοπικές ατέλειες στην ανάλυση με το Adina, η μορφή του δρόμου ισορροπίας είναι η ίδια. Διαφέρει όμως από τη μορφή του πειραματικού δρόμου ισορροπίας, ο οποίος εμφανίζει αρκετά πριν το οριακό φορτίο μία πτώση κλίσης. Αυτή η μορφή οφείλεται στις παραμένουσες τάσεις λόγω συγκολλήσεων, όπως θα αποδειχθεί στην περίπτωση του υποστυλώματος #2, 1AoRG.

Η καθολική ατέλεια μεγέθους $L/6400$ καθιστά τους ελαστικούς κλάδους παράλληλους. Όσον αφορά την τοπική ατέλεια, η προδιαγραφόμενη από τον EC3 θεωρείται αρκετά αξιόπιστη καθώς έχει προκύψει από πληθώρα πειραμάτων. Όμως με δεδομένη τη δυσκολία προσομοίωσης των παραμενουσών τάσεων σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, η τοπική ατέλεια είναι ο μόνος μηχανισμός ρύθμισης του οριακού φορτίου.

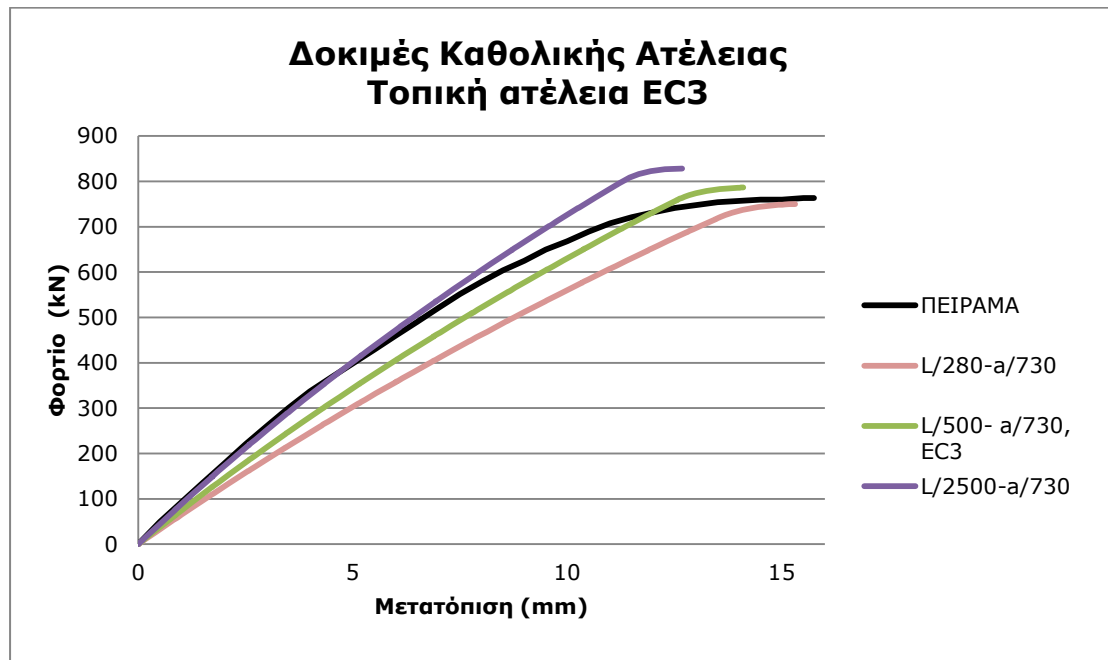
Κατά μία άποψη, η τοπική ατέλεια είναι καθολικό χαρακτηριστικό, διότι διέπει ολόκληρο το φορέα και εξ' αρχής. Το κύριο πέλμα του υποστυλώματος φέρει την τοπική ατέλεια, αν και κυμαινόμενου μεγέθους, σε όλο του το μήκος. Αντίθετα, οι παραμένουσες τάσεις είναι συγκεντρωμένες τοπικά στα σημεία ένωσης των ράβδων με τα κύρια πέλματα. Αν παραβλεφθεί αυτή η διαφορά, μπορεί να θεωρηθεί ότι το μέγεθος της τοπικής ατέλειας $L/200$ ενσωματώνει τις παραμένουσες τάσεις, οι οποίες αν και τοπικά εστιασμένες, ασκούν επιρροή στη συνολική απόκριση του φορέα.

Μία άλλη προσεγγιστική μέθοδος θα μπορούσε να συσχετίσει την πτώση κλίσεως λόγω παραμενουσών τάσεων με αλλαγή της καθολικής ατέλειας σε κάποιο βήμα φόρτισης. Αυτή η λύση είναι αδύνατο να υλοποιηθεί στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Όπως και η προηγούμενη, συγχέει ένα τοπικό και ένα

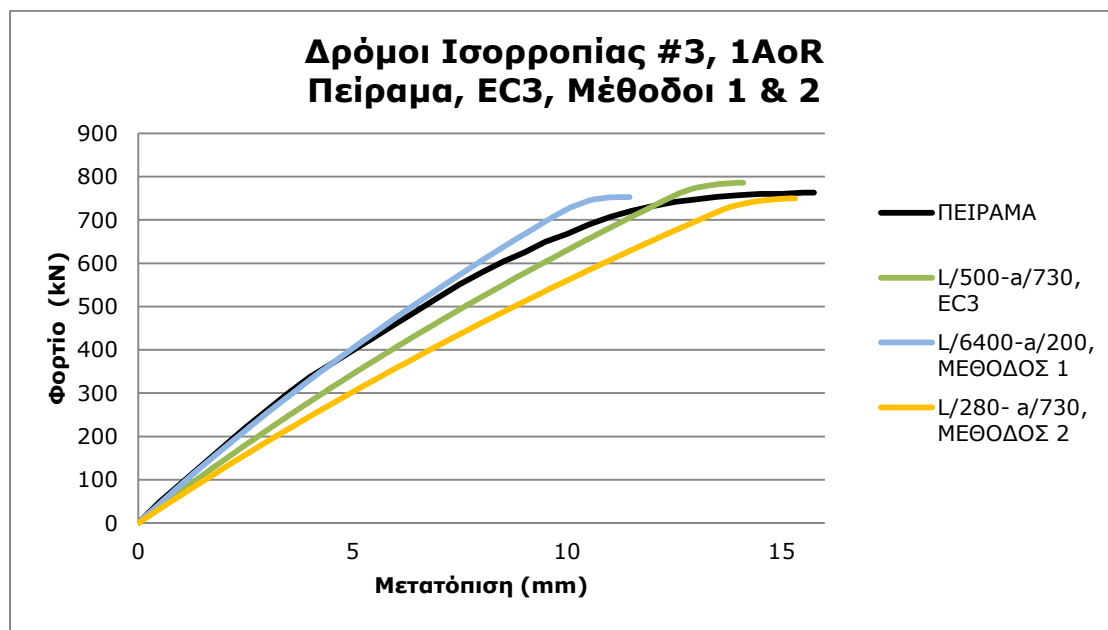
καθολικό φαινόμενο αποδίδοντας στη γεωμετρική μη γραμμικότητα την επιρροή της μη γραμμικότητας υλικού.

4.2.2.2 Τοπική ατέλεια EC3 και ίσα οριακά φορτία

Εδώ εξετάζεται ένας άλλος τρόπος, καθαρά λογιστικός, για την επίτευξη ίσων οριακών φορτίων μεταξύ πειράματος και ανάλυσης Adina. Αναζητείται η καθολική εκείνη ατέλεια η οποία δεδομένης κανονιστικής τοπικής δίνει το σωστό οριακό φορτίο, Διάγραμμα 4.27.



Διάγραμμα 4.27 Δρόμοι Ισορροπίας υποστυλωμάτων από το Adina με διαφορετικές καθολικές ατέλειες, κανονιστικός και πειραματικός δρόμος ισορροπίας

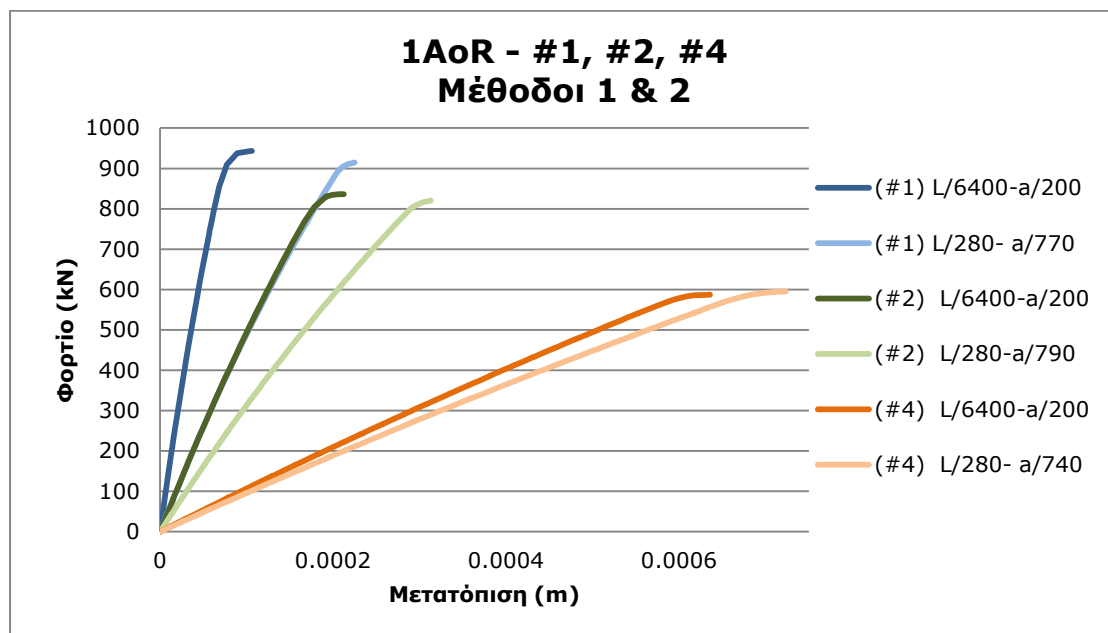


Διάγραμμα 4.28 Δρόμοι Ισορροπίας Πειράματος, Adina με κανονιστικές ατέλειες και Adina με τις Μεθόδους 1 & 2

Μετά από δοκιμές καταλήγουμε στην καθολική ατέλεια $L/280$, με τοπική όπως προβλέπει ο EC3, $a/726.8$ επί του μήκους φαντώματος. Έτσι, στο Διάγραμμα 4.28 απεικονίζονται οι δρόμοι ισορροπίας του πειράματος, του Adina με ατέλειες EC3 και των δύο μεθόδων επιλογής ατελειών στο Adina, ώστε να υπάρχει ίδιο οριακό φορτίο με παραλληλία ή μη των ελαστικών κλάδων.

4.2.2.3 Εφαρμογή των 2 μεθόδων επιλογής ατελειών στα υπόλοιπα υποστυλώματα της σειράς 1AoR

Η μέθοδος που εξασφαλίζει παράλληλους ελαστικούς κλάδους και ίσα οριακά φορτία θα καλείται M1 και η μέθοδος που συγκλίνει μόνο στο οριακό φορτίο με τοπική ατέλεια κανονιστική θα ονομάζεται M2.



Διάγραμμα 4.29 Δρόμοι Ισορροπίας των υπόλοιπων υποστυλωμάτων της ομάδας 1AoR με τις Μεθόδους 1 & 2

Στο Διάγραμμα 4.29 απεικονίζονται οι δρόμοι ισορροπίας του Adina για τα υπόλοιπα υποστυλώματα της σειράς 1AoR σύμφωνα με τις δύο μεθόδους. Επισημαίνεται ότι πειραματικοί δρόμοι ισορροπίας δεν είναι διαθέσιμοι.

Ο Πίνακας 4.30 δείχνει τις αποκλίσεις κάθε μεθόδου από το φορτίο αστοχίας του πειράματος. Στις δύο μεθόδους χρησιμοποιούνται μεγέθη ατελειών ίδια με αυτά που προέκυψαν από την εφαρμογή των μεθόδων στο υποστυλόμετρο #3, ώστε να ελεγχθεί το εύρος εφαρμογής τους. Δηλαδή τα ζεύγη καθολικών- τοπικών ατελειών για τις δύο μεθόδους είναι για τη M1: $L/6400$, $a/200$ και για τη M2: $L/280$, Τοπική EC3.

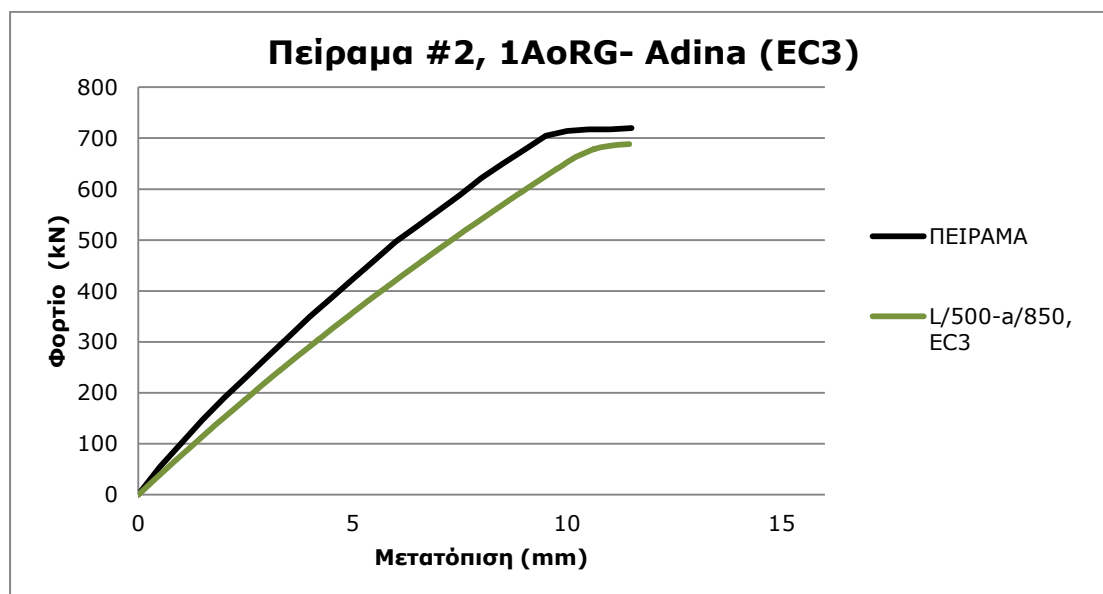
Παρατηρείται ικανοποιητική ακρίβεια ως προς το πειραματικό φορτίο και για τις δύο μεθόδους. Παρόλο που δεν υπάρχουν οι αντίστοιχοι δρόμοι ισορροπίας, μπορεί να υποτεθεί ότι η ατέλεια $L/6400$ πιάνει τη σωστή ελαστική κλίση, (αυτό θα φανεί παρακάτω από τα υπόλοιπα υποστυλώματα).

Υποστύλωμα	ΚΑΘΟΛΙΚΗ	ΤΟΠΙΚΗ	Απόκλιση %, Πείρ- Adina	Μέθοδος
#1	L/6400	a/200	-6.90%	M1
	L/280	a/770	-3.68%	M2
#2	L/6400	a/200	3.10%	M1
	L/280	a/790	4.98%	M2
#3	L/6400	a/200	0.26%	M1
	L/280	a/730	0.68%	M2
#4	L/6400	a/200	3.47%	M1
	L/280	a/740	2.09%	M2
			3.14%	Μέσος Όρος % Αποκλ
Ίδια κλίση- ίδιο Pmax	L/6400	a/200		
Ίδιο Pmax	L/280	EC -a/750		

Πίνακας 4.30 Στοιχεία ατελειών και αποκλίσεις οριακών φορτίων για τα υπόλοιπα υποστυλώματα της ομάδας 1AoR, για τις Μεθόδους 1 & 2

4.2.3 Συσχέτιση Δρόμων Ισορροπίας και Αναλύσεων στο υποστύλωμα #2, 1AoRG

Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με το υποστύλωμα #3 της σειράς 1AoR. Υπενθυμίζεται ότι η σειρά 1AoRG διαθέτει συγκολλήσεις κατασκευασμένες με τη μέθοδο της ανόπτησης ώστε να μην υπάρχουν σχετικές παραμένουσες τάσεις. Παρακάτω φαίνονται οι δρόμοι ισορροπίας του πειράματος και της ανάλυσης με το Adina για κανονιστικές ατέλειες, Διάγραμμα 4.31.



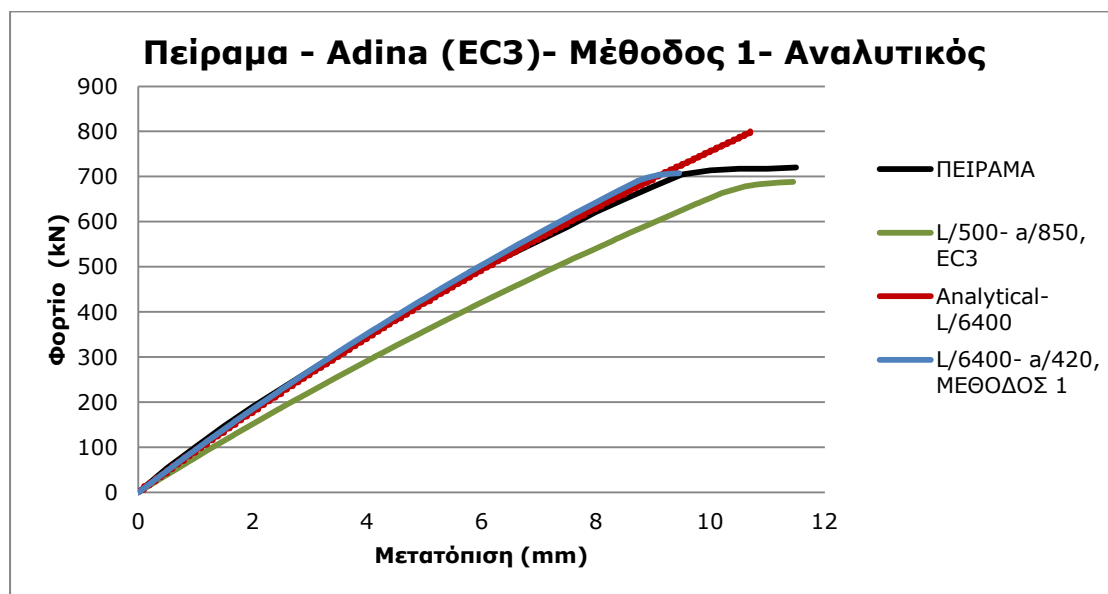
Διάγραμμα 4.31 Δρόμοι Ισορροπίας Πειράματος #2 1AoRG και Adina με Κανονιστικές Ατέλειες

4.2.3.1 Παραλληλία μεταξύ ελαστικών κλάδων και ίσα οριακά φορτία

Παρατηρείται κι εδώ ότι ο δρόμος του Adina παρουσιάζει μικρότερη ελαστική κλίση από τον πειραματικό. Διεξάγονται αριθμητικές δοκιμές μεταβάλλοντας την καθολική ατέλεια ώστε να επιτευχθεί παραλληλία και την τοπική ώστε να συμπεσουν τα οριακά φορτία των δύο δρόμων.

1ΑοRG # 2	Καθολική Ατέλεια		Τοπική Ατέλεια		Φορτία		
Διάγρ.	Μέγεθος	Του μήκους L	Μέγεθος	Του μήκους φατνώμ.	P Adina (kN)	P πειρ (kN)	% Απόκλ. (Pπειρ-Pad)/Pπειρ
c22	0.0008	L/6400	0.00075	a/850	731	706	-3.59%
c23	0.0008	L/6400	0.00151	a/423.5	707	706	-0.18%

Πίνακας 4.32 Δοκιμές στο Adina με αλλαγή τοπικής ατέλειας και σύγκριση οριακών φορτίων με το πειραματικό



Διάγραμμα 4.33 Δρόμοι Ισορροπίας Πειράματος, Adina με κανονιστικές ατέλειες, Adina με τη Μέθοδο 1 και Αναλυτική μέθοδος

Ευρίσκεται ότι αυτό συμβαίνει ικανοποιητικά για καθολική ατέλεια L/6400 και τοπική L/420, όπως δείχνει ο Πίνακας 4.32 και το Διάγραμμα 4.33.

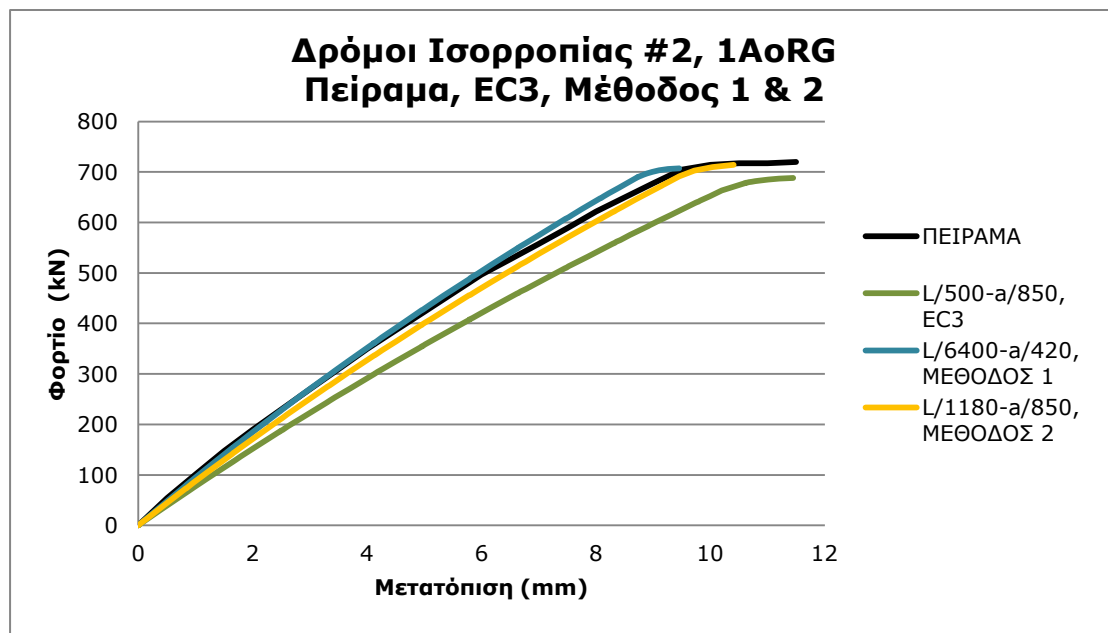
Παρατηρείται ότι τώρα οι δύο δρόμοι έχουν παρόμοια μορφή. Ο πειραματικός παρουσιάζει και πάλι μια πτώση κλίσης σε μικρό φορτίο, πολύ μικρή όμως, ενώ έχει και πλατύτερο πλατώ διαρροής. Με τη M1 και ατέλειες L/6400 και a/420 η διαφορά των οριακών φορτίων είναι 0,18%. Αν τεθεί τοπική ατέλεια ίση με την κανονιστική (a/850), τότε η απόκλιση γίνεται 3,59%, σύμφωνα με τον Πίνακα 4.32, και πάλι μικρή. Οπότε, μπορούμε να πούμε ότι η τοπική ατέλεια που προδιαγράφει ο EC3 είναι επιτυχημένη και η προσαρμογή που της γίνεται στη M1 οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στον παράγοντα των παραμενουσών τάσεων. Δηλαδή ο μόνος λόγος για τον οποίο η κανονιστική τοπική ατέλεια δίνει απόκλιση από το πειραματικό φορτίο είναι οι παραμένουσες τάσεις και όχι λόγος πλημμελούς προσομοίωσης ή άλλος.

Όσον αφορά τώρα στην ελαφρά ενδιάμεση πτώση κλίσης του πειραματικού δρόμου, αυτή μπορεί να οφείλεται στις παραμένουσες τάσεις του υποστυλώματος,

όχι λόγω συγκολλήσεων, αλλά λόγω κατασκευής των μελών του στο εργοστάσιο. Αριθμητικά και μόνο λαμβάνονται υπόψη στο συντελεστή "x" της απομείωσης της θλιπτικής αντοχής του EC3, επομένως στην τοπική ατέλεια, όπως γίνεται σαφές στην Ενότητα 1.2.5. Αυτό παραμένει όμως αριθμητικό φαινόμενο που καθορίζει το ύψος της τελικής αντοχής (τύπος του EC3, Μέθοδος Α) χωρίς να μπορεί να επηρεάσει προς την πλευρά της ακρίβειας το δρόμο ισορροπίας.

4.2.3.2 Τοπική ατέλεια EC3 και ίσα οριακά φορτία

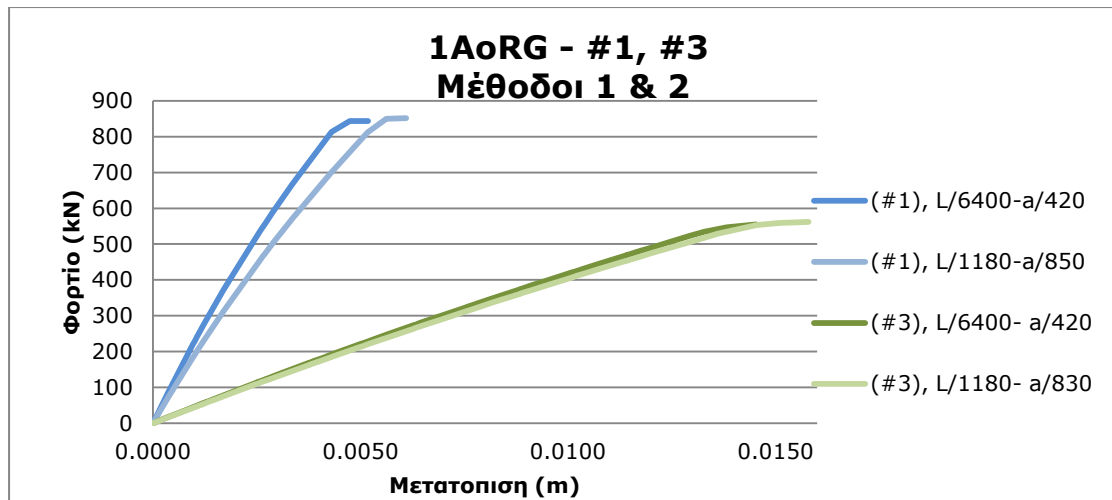
Αναζητείται η καθολική εκείνη ατέλεια η οποία δεδομένης κανονιστικής τοπικής δίνει το σωστό οριακό φορτίο. Μετά από δοκιμές, ένα ικανοποιητικό ζεύγος ατελειών είναι το L/1180-a/850. Στα υποστυλώματα 1AoR η αντίστοιχη καθολική ατέλεια είναι L/280. Είναι προφανές λοιπόν ότι εξαρτάται από τη σχετική μορφή των δρόμων ισορροπίας πειράματος και Adina που επιδιώκουμε να ταυτίσουμε. Στο Διάγραμμα 4.34 απεικονίζονται πειραματικός, κανονιστικός και δρόμοι με τις M1 και M2.



Διάγραμμα 4.34 Δρόμοι Ισορροπίας Πειράματος, Adina με Κανονιστικές ατέλειες και Adina με τις Μεθόδους 1 & 2

4.2.3.3 Εφαρμογή των 2 μεθόδων επιλογής ατελειών στα υπόλοιπα υποστυλώματα της σειράς 1AoRG

Στο Διάγραμμα 4.35 απεικονίζονται οι δρόμοι ισορροπίας του Adina για τα υπόλοιπα υποστυλώματα της σειράς 1AoRG σύμφωνα με τις δύο μεθόδους. Επισημαίνεται ότι πειραματικοί δρόμοι ισορροπίας δεν είναι διαθέσιμοι. Ο Πίνακας 4.36 δείχνει τις αποκλίσεις κάθε μεθόδου από το φορτίο αστοχίας του πειράματος. Στις δύο μεθόδους χρησιμοποιούνται μεγέθη ατελειών ίδια με αυτά που προέκυψαν από την εφαρμογή των μεθόδων στο υποστυλ #2, ώστε να ελεγχθεί το εύρος εφαρμογής τους. Δηλαδή τα ζεύγη καθολικών- τοπικών ατελειών για τις δύο μεθόδους είναι για τη M1: L/6400, a/420 και για τη M2: L/1180, Τοπική EC3. Εναλλακτικά θα μπορούσαν οι αναλύσεις αυτές να γίνουν με τοπική ατέλεια EC3 στη M1 αλλά όπως αποδείχθηκε παραπάνω, οι διαφορές θα ήταν μικρές.



Διάγραμμα 4.35 Δρόμοι Ισορροπίας των υπόλοιπων υποστυλωμάτων της ομάδας 1AoRG με τις Μεθόδους 1 & 2

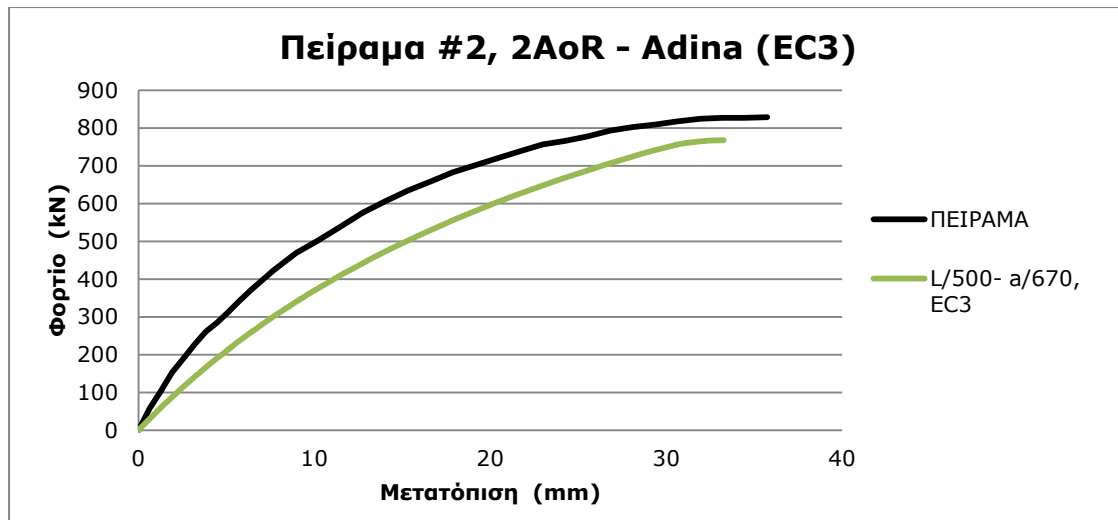
Υποστύλωμα	ΚΑΘΟΛΙΚΗ	ΤΟΠΙΚΗ	Απόκλιση %, Πείρ- Adina	Μέθοδος
#1	L/6400	a/420	-0.05%	M1
	L/1180	a/850	-0.99%	M2
#2	L/6400	a/420	-0.18%	M1
	L/1180	a/850	-1.14%	M2
#3	L/6400	a/420	0.74%	M1
	L/1180	a/830	-0.53%	M2
			0.60%	Μέσος Όρος [% Αποκλ]
Ίδια κλίση- ίδιο Pmax	L/6400	a/420		
Ίδιο Pmax	L/1180	EC - a/800		

Πίνακας 4.36 Στοιχεία ατελειών και αποκλίσεις οριακών φορτίων για τα υπόλοιπα υποστυλώματα της ομάδας 1AoRG, για τις Μεθόδους 1 & 2

Η ακρίβεια είναι πολύ ικανοποιητική και για τις 2 μεθόδους. Παρατηρείται στη M1 ότι η καθολική ατέλεια L/6400 διατηρείται από τη σειρά 1AoR και εξασφαλίζει κι εδώ παραλληλία των ελαστικών κλάδων. Η τοπική ατέλεια είναι διαφορετική από της σειράς 1AoR λόγω της μορφής των δρόμων (απουσία παραμενουσών τάσεων), πάντως θα μπορούσε να είναι και κανονιστικού μεγέθους, χωρίς σημαντικές εκπτώσεις στην ακρίβεια. Στη M2, η καθολική ατέλεια είναι L/1180 αντί L/280 προηγούμενων, επίσης λόγω διαφορετικής μορφής των δρόμων. Αυτό φαίνεται λογικό αν λάβουμε υπόψη ότι η Μέθοδος 2 πρόκειται περί λογιστικής προσέγγισης.

4.2.4 Συσχέτιση Δρόμων Ισορροπίας και Αναλύσεων στο υποστύλωμα #2, 2AoR

Αρχικά συγκρίνονται οι δρόμοι ισορροπίας που προέκυψαν από το πείραμα και την ανάλυση με το Adina θέτοντας ατέλειες κανονιστικού μεγέθους, στο Διάγραμμα 4.37.



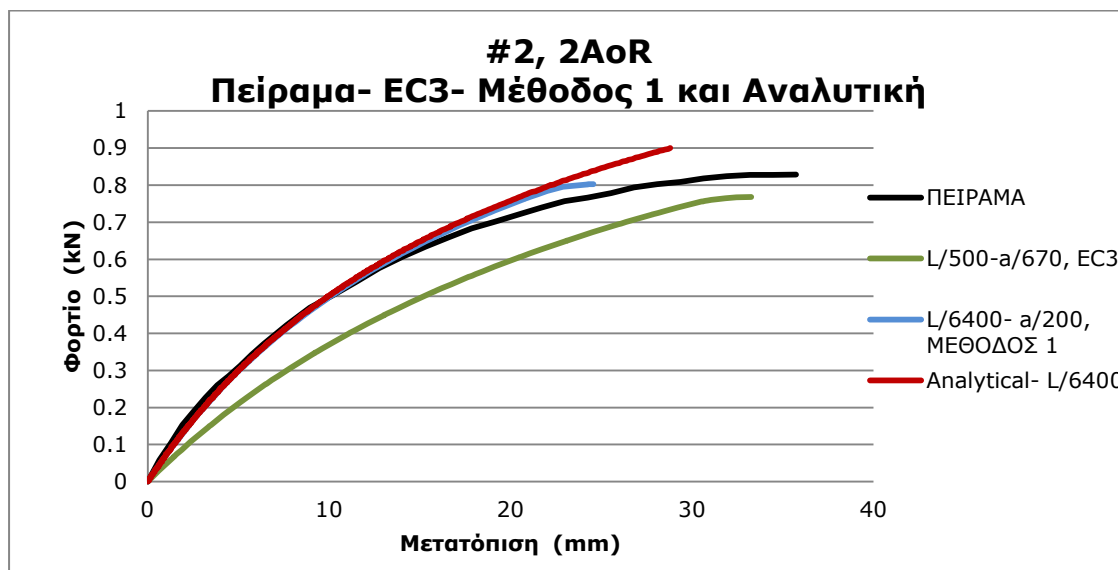
Διάγραμμα 4.37 Δρόμοι Ισορροπίας Πειράματος #2 2AoR και Adina με Κανονιστικές Ατέλειες

4.2.4.1 Παραλληλία μεταξύ ελαστικών κλάδων και ίσα οριακά φορτία

Όπως προηγουμένως, η παραλληλία των δύο δρόμων επιτυγχάνεται για καθολική ατέλεια L/6400, Πίνακας 4.38 και Διάγραμμα 4.39. Σύμφωνα με τη M1, η τοπική ισούται με a/200, όπως στη σειρά 1AoR. Άρα, κατά κάποιο τρόπο η ατέλεια a/200 λαμβάνει υπόψη σε κάθε περίπτωση την επιρροή των παραμενουσών τάσεων.

2AoR # 2	Καθολική Ατέλεια		Τοπική Ατέλεια		Φορτία		
Δοκιμή	Μέγεθος	Του μήκους L	Μέγεθ	Του μήκους φαντ a	P Adina (kN)	P πειρ (kN)	% Απόκλ. (Ρπειρ-Ρad)/Ρπειρ
c24	0.001	L/6400	0.0031	a/206	802	823	2.61%

Πίνακας 4.38 Στοιχεία υποστυλώματος σύμφωνα με τη Μέθοδο 1

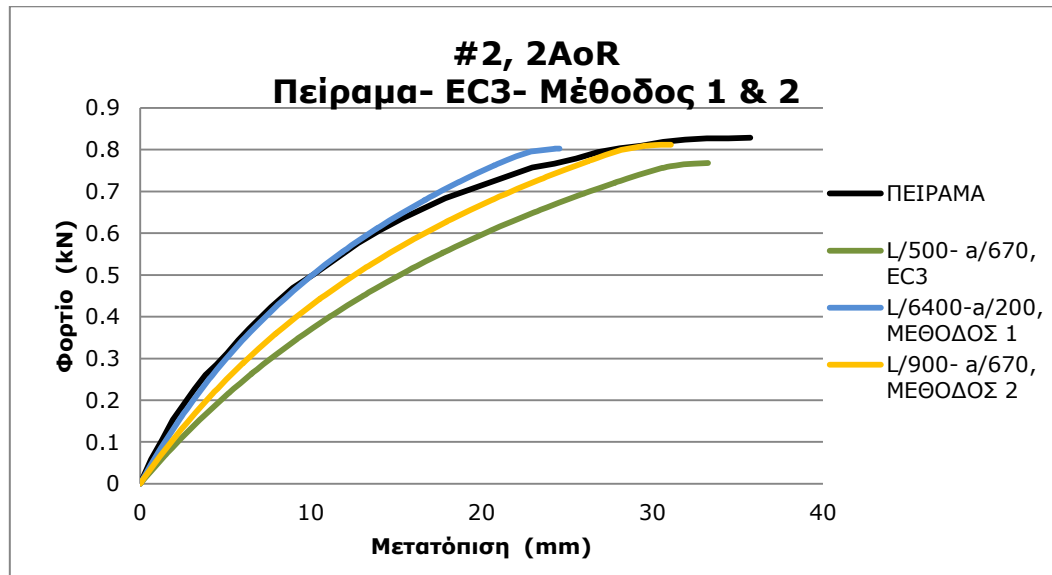


Διάγραμμα 4.39 Δρόμοι Ισορροπίας Πειράματος, Adina με Κανονιστικές ατέλειες και Adina με τη Μέθοδο 1

Ο δρόμος ισορροπίας διαφέρει στη μορφή από των υποστυλωμάτων της σειράς 1ΑοR, είναι πιο ομαλός καθότι πιο εύκαμπτο το υποστύλωμα λόγω μεγαλύτερου μήκους. Έτσι η επιρροή των παραμενουσών τάσεων μοιάζει μικρότερη.

4.2.4.2 Τοπική ατέλεια Κανονισμού και ίσα οριακά φορτία

Αναζητείται η καθολική εκείνη ατέλεια η οποία δεδομένης κανονιστικής τοπικής δίνει το σωστό οριακό φορτίο. Μετά από δοκιμές, ένα ικανοποιητικό ζεύγος ατελειών είναι το L/900-a/670.



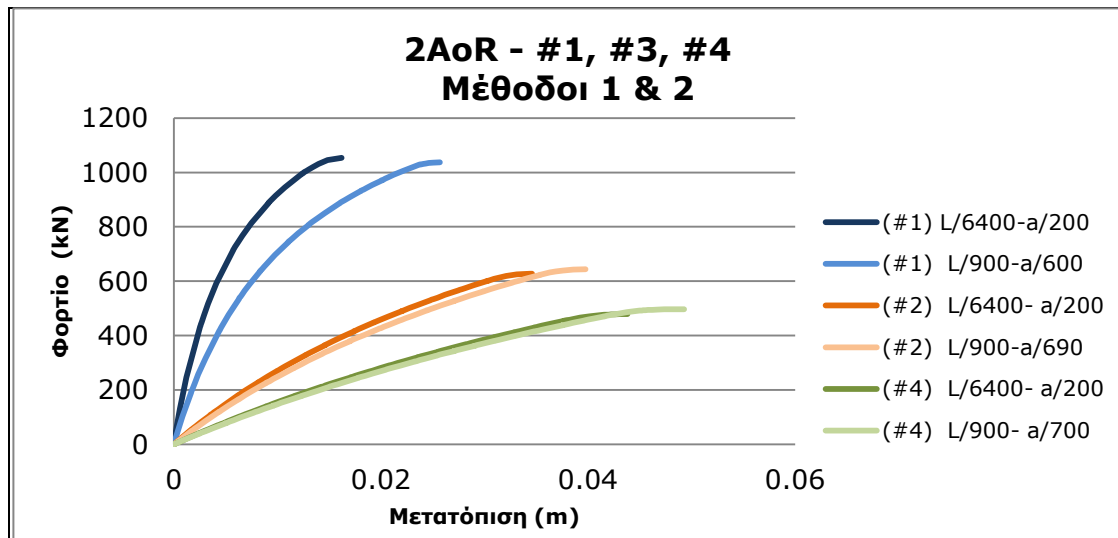
Διάγραμμα 4.40 Δρόμοι Ισορροπίας Πειράματος, Adina με Κανονιστικές ατέλειες και Adina με τις Μεθόδους 1 & 2

2ΑοR # 2	Καθολική Ατέλεια		Τοπική Ατέλεια		Φορτία		
Δοκιμή	Μέγεθος	Του μήκους L	Μέγεθος	Του μήκους φαντν a	P Adina (kN)	P πειρ (kN)	% Απόκλ. (Pπειρ-Pad)/Pπειρ
c23	0.00711	L/900	0.00095	a/669	811	823	1.46%

Πίνακας 4.41 Στοιχεία υποστυλώματος σύμφωνα με τη Μέθοδο 2

4.2.4.3 Εφαρμογή των 2 μεθόδων επιλογής ατελειών στα υπόλοιπα υποστυλώματα της σειράς 1ΑοRG

Στο Διάγραμμα 4.42 απεικονίζονται οι δρόμοι ισορροπίας του Adina για τα υπόλοιπα υποστυλώματα της σειράς 2ΑοR σύμφωνα με τις δύο μεθόδους. Επισημαίνεται ότι πειραματικοί δρόμοι ισορροπίας δεν είναι διαθέσιμοι. Ο Πίνακας 4.43 δείχνει τις αποκλίσεις κάθε μεθόδου από το φορτίο αστοχίας του πειράματος.



Διάγραμμα 4.42 Δρόμοι Ισορροπίας των υπόλοιπων υποστυλωμάτων της ομάδας 2AoR με τις Μεθόδους 1 & 2

Υποστύλωμα	ΚΑΘΟΛΙΚΗ	ΤΟΠΙΚΗ	Απόκλιση %, Πείρ- Adina	Μέθοδος
#1	L/6400	a/200	-14.34%	M1
	L/900	a/600	-12.47%	M2
#2	L/6400	a/200	5.88%	M1
	L/900	a/690	3.43%	M2
#3	L/6400	a/200	2.61%	M1
	L/900	a/670	1.46%	M2
#4	L/6400	a/200	6.07%	M1
	L/900	a/700	2.25%	M2
			6.09%	Μέσος Όρος [% Αποκλ]
Ίδια κλίση- ίδιο Pmax	L/6400	a/200		
Ίδιο Pmax	L/900	EC - a/700		

Πίνακας 4.43 Στοιχεία ατελειών και αποκλίσεις οριακών φορτίων για τα υπόλοιπα υποστυλώματα της ομάδας 2AoR, για τις Μεθόδους 1 & 2

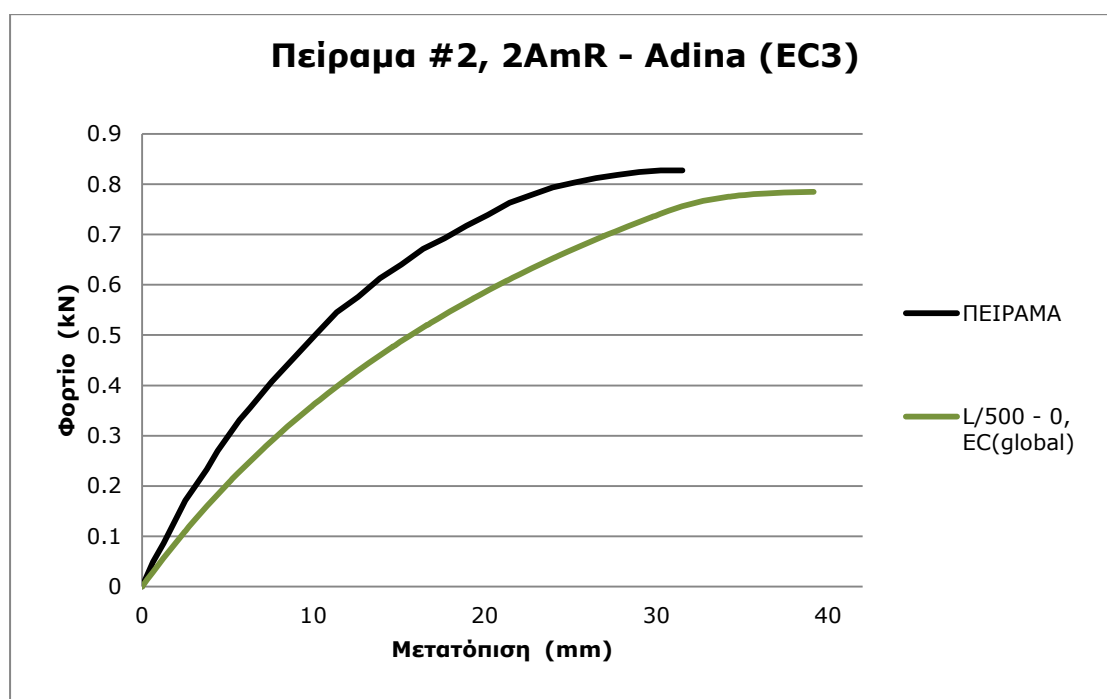
Στις δύο μεθόδους χρησιμοποιούνται μεγέθη ατελειών ίδια με αυτά που προέκυψαν από την εφαρμογή των μεθόδων στο υποστύλωμα #2, ώστε να ελεγχθεί το εύρος εφαρμογής τους. Δηλαδή τα ζεύγη καθολικών- τοπικών ατελειών για τις δύο μεθόδους είναι για τη M1: L/6400, a/200 και για τη M2: L/900, Τοπική EC.

Ενώ το ζεύγος ατελειών της M1 L/6400, a/200 δουλεύει κι εδώ, η καθολική ατέλεια L/900 της M2 δείχνει ότι εξαρτάται από τη γεωμετρία του δρόμου ισορροπίας (αφού πλέον συγκρίνουμε τις ατέλειες των 1AoR και 2AoR που αμφότερα έχουν παραμένουσες τάσεις) και κατ' επέκταση από τη γεωμετρία του ίδιου του υποστυλώματος. Η ακρίβεια είναι ικανοποιητική για τις δύο μεθόδους με εξαίρεση το πρώτο υποστύλωμα της σειράς στο οποίο οι αποκλίσεις εμφανίζονται αυξημένες.

4.2.5 Συσχέτιση Δρόμων Ισορροπίας και Αναλύσεων στο υποστύλωμα #2, 2AmR

Για τη σειρά 2AmR δεν επετεύχθη σύγκλιση στη γραμμική ανάλυση λυγισμού για την τοπική ιδιομορφή, επομένως τίθεται μόνο καθολική ατέλεια. Παρόλο που το φορτίο λυγισμού της τοπικής ιδιομορφής θα ήταν μεγάλο και άρα αυτή η τοπική παραμόρφωση όχι κρίσιμη, αποδεικνύεται σημαντικός ρυθμιστής του φορτίου αστοχίας.

Αρχικά συγκρίνονται οι δρόμοι ισορροπίας που προέκυψαν από το πείραμα και την ανάλυση με το Adina θέτοντας ατέλεια κανονιστικού μεγέθους, στο Διάγραμμα 4.44.



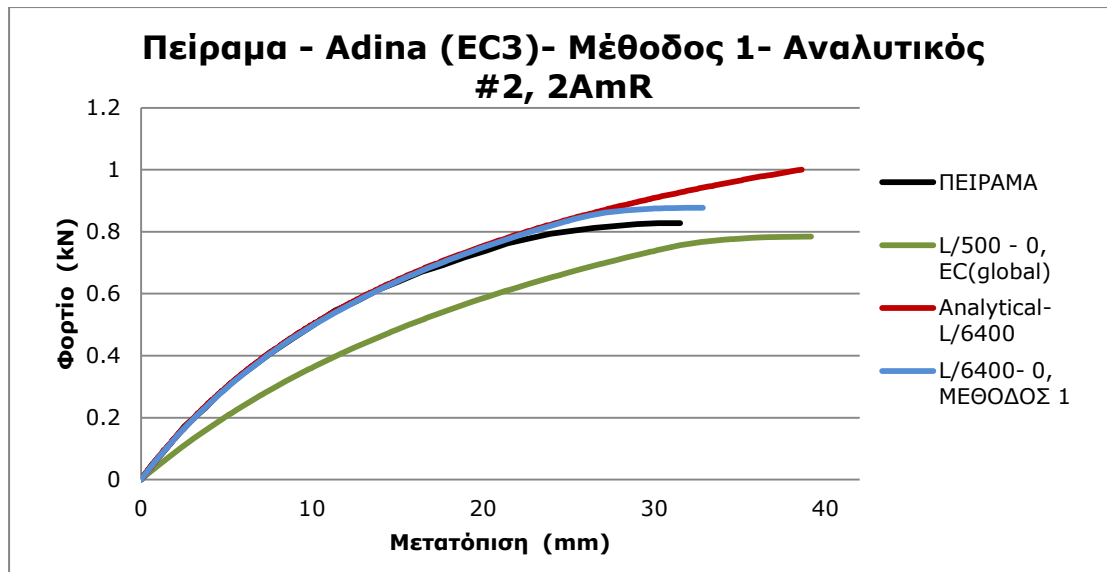
Διάγραμμα 4.44 Δρόμοι Ισορροπίας Πειράματος #2 2AmR και Adina με κανονιστική Καθολική Ατέλεια

4.2.5.1 Παραλληλία μεταξύ ελαστικών κλάδων

Όπως στα προηγούμενα μοντέλα, η παραλληλία των δύο δρόμων επιτυγχάνεται για καθολική ατέλεια L/6400, Πίνακας 4.45 και Διάγραμμα 4.46.

2AmR #2	Καθολική Ατέλεια		Τοπική Ατέλεια		Φορτία		
	Δοκιμή	Μέγεθος	Μέγεθος	Του μήκους φαντν α	P Adina (kN)	P πειρ (kN)	% Απόκλ. (Pπειρ-Pad)/Pπειρ
cm2	0.0128	L/500	-	-	784	823	4.77%
cm22	0.001	L/6400	-	-	877	823	-6.47%

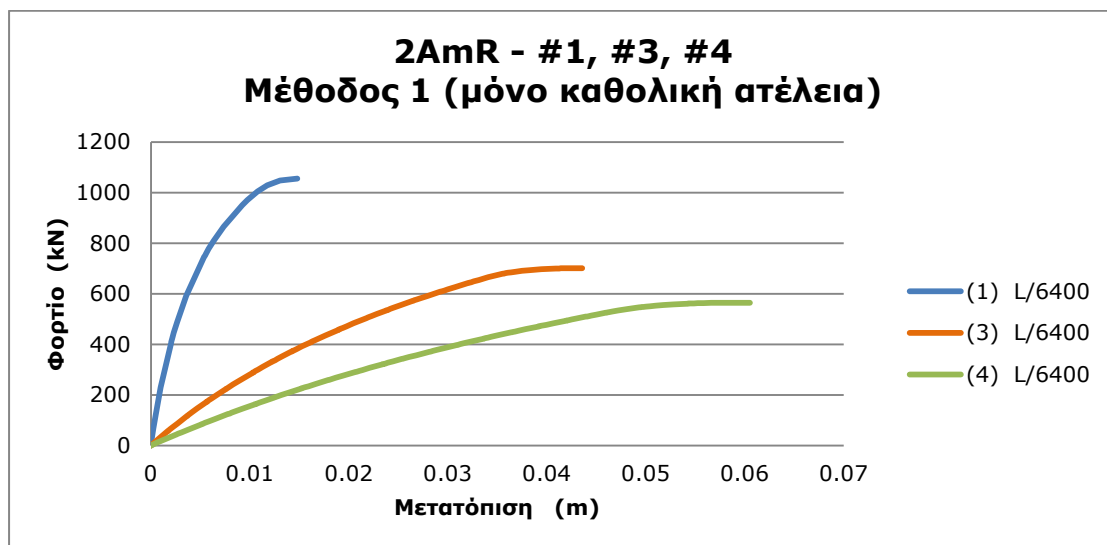
Πίνακας 4.45 Δοκιμές στο Adina με αλλαγή καθολικής ατέλειας και σύγκριση οριακών φορτίων με το πειραματικό



Διάγραμμα 4.46 Δρόμοι Ισορροπίας Πειράματος, Adina με κανονιστικές ατέλειες και Adina με τη Μέθοδο 1

4.2.5.2 Εφαρμογή της μεθόδου M1 επιλογής στα υπόλοιπα υποστυλώματα της σειράς 2AmR

Στο Διάγραμμα 4.47 απεικονίζονται οι δρόμοι ισορροπίας του Adina για τα υπόλοιπα υποστυλώματα της σειράς 2AoR σύμφωνα με τη μέθοδο M1.



Διάγραμμα 4.47 Δρόμοι Ισορροπίας των υπόλοιπων υποστυλωμάτων της ομάδας 2AmR με τη Μέθοδο 1

Επισημαίνεται ότι πειραματικοί δρόμοι ισορροπίας δεν είναι διαθέσιμοι. Ο Πίνακας 4.48 δείχνει τις αποκλίσεις από το φορτίο αστοχίας του πειράματος.

Στην περίπτωση που είχαν χρησιμοποιηθεί τοπικές ατέλειες και οι αποκλίσεις ήταν σημαντικά μικρότερες, θα μπορούσε να υποτεθεί ότι η ατέλεια L/6400 δουλεύει κι εδώ ικανοποιητικά, όπως έδειξαν και οι αναλύσεις σε όλα τα προηγούμενα υποστυλώματα.

Υποστυλώμα	ΚΑΘΟΛΙΚΗ	ΤΟΠΙΚΗ	Απόκλιση %, Πείρ- Adina	Μέθοδος
#1	L/6400	-	-16.91%	M1
	-	-	-	-
#2	L/6400	-	4.77%	M1
	-	-	-	-
#3	L/6400	-	-10.04%	M1
	-	-	-	-
#4	L/6400	-	-15.11%	M1
	-	-	-	-
			11.70%	Μέσος Όρος [% Αποκλ]
Ίδια κλίση- ίδιο Pmax	L/6400	-		
Ίδιο Pmax	-	-		

Πίνακας 4.48 Στοιχεία ατελειών και αποκλίσεις οριακών φορτίων για τα υπόλοιπα υποστυλώματα της ομάδας 2AmR, για τη Μέθοδο 1

4.3 Σύγκριση δρόμου ισορροπίας Adina και αναλυτικής μεθόδου (Ενότητας 1.3)

Από τα Σχ. 26, 33, 39, 46 φαίνεται ότι ο δρόμος ισορροπίας του Adina ταυτίζεται με τον αναλυτικό (Εν. 1.3). Η αναλυτική ελαστική γραμμή δεν τερματίζει κάπου, οπότε μπορεί να λάβει ως άνω όριο είτε την αντοχή του υποστυλώματος από το πείραμα είτε από τη Μέθοδο Β (τροποποιημένος EC3, Εξ. 1.12) είτε τέλος από την απλή σχέση του EC3 (Μέθοδος Α, Εξ. 1.9).

Εάν ακολουθηθεί η τελευταία επιλογή, τότε ο δρόμος ισορροπίας και το άνω όριο του θα έχουν παραχθεί χωρίς τη χρήση στατικού λογισμικού, παρά μόνο με απλές πράξεις. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει μέση απόκλιση από το πειραματικό φορτίο 8.91% υπέρ της ασφαλείας και τυπική απόκλιση 6.40% από αυτή την τιμή, σύμφωνα με τον Πίνακα 4.5. Ο δρόμος ισορροπίας του Adina εμφανίζει ένα αμελητέο πλατώ διαρροής κοντά στο οριακό φορτίο που όμως δεν μπορεί να προβλεφθεί από τον αναλυτικό δρόμο.

Ο αναλυτικός δρόμος ταυτίζεται, σχεδόν, με τον πειραματικό, μέχρι περίπου το 30-40% του φορτίου αντοχής. Οπότε, είναι εύστοχος για να περιγράψει την αρχική ελαστική κατάσταση, προτού γίνει εμφανής η επιρροή των παραμενουσών τάσεων. Ο δρόμος του Adina, άρα και ο αναλυτικός, διαφέρουν από τον πειραματικό ως προς το μεγάλο πλατώ διαρροής του τελευταίου αλλά και την πτώση κλίσης που εμφανίζει από ένα φορτίο και ύστερα λόγω παραμενουσών τάσεων. Αντίθετα, υιοθετώντας τις κανονιστικές ατέλειες, οι υπολογισμοί μπορεί να δώσουν μεγάλη απόκλιση από την πραγματικότητα σε όρους παραμόρφωσης για συγκεκριμένα φορτία.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

5.1 Οριακά φορτία

Για την εξαγωγή του οριακού φορτίου στα 43 υποστυλώματα χρησιμοποιήθηκαν η μέθοδος του EC3- Μέθοδος A (Εξ. 2.9), η ελαφρώς τροποποιημένη EC3- Μέθοδος B [10] (Εξ. 2.12), μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού (GMNIA) και τα στοιχεία των πειραμάτων. Μεταξύ των Μεθόδων A και B αλλάζει η θεωρούμενη αντοχή του μεμονωμένου φατνώματος. Στις αναλύσεις GMNIA (με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Adina) τίθενται ατέλειες κανονιστικού μεγέθους. Ο παρακάτω Πίνακας 5.1 εμφανίζει τους μέσους όρους και τις τυπικές αποκλίσεις των απολύτων αποκλίσεων οριακού φορτίου μεταξύ των μεθόδων, σύμφωνα με τις συγκρίσεις του Κεφ. 4.

% Αποκλίσεις	Μέσος Όρος	Τυπική απόκλιση
Με όλες τις σειρές		
Πείραμα-Adina	5.54%	4.54%
Πείραμα-EC3	11.40%	9.97%
Adina-EC3	7.85%	8.63%
Χωρίς τη σειρά 1BoR		
Adina-τροπ/ος EC3	1.70%	1.28%

Πίνακας 5.1 Στατιστικά στοιχεία αποκλίσεων οριακού φορτίου μεταξύ των μεθόδων

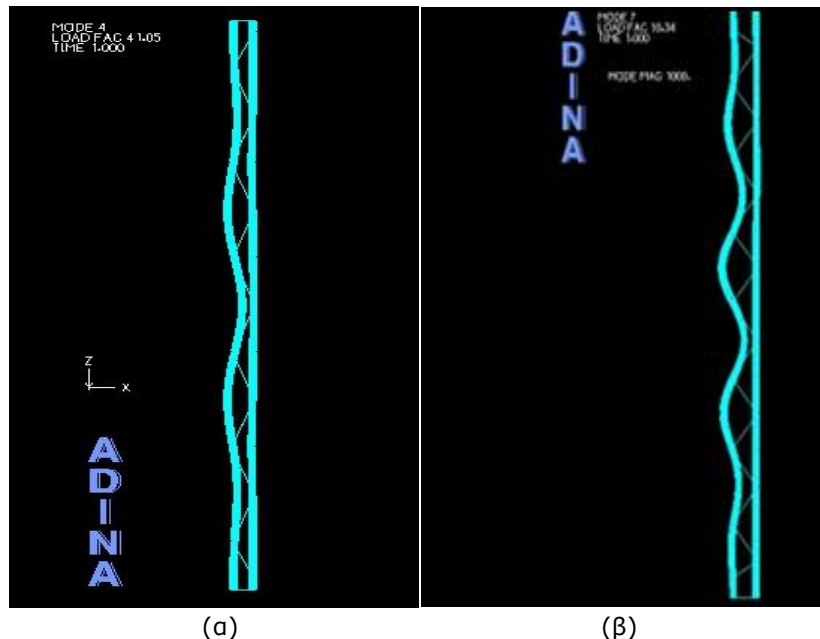
Η απόκλιση 5.54% μεταξύ Πειραματικού οριακού φορτίου και φορτίου Adina δηλώνει ότι η προσομοίωση των πραγματικών υποστυλωμάτων στο πρόγραμμα είναι αρκετά ικανοποιητική. Επομένως, η φιλοσοφία της προσομοίωσης και των παραδοχών που περιγράφεται στο Κεφ. 1 κρίνεται επιτυχημένη.

Γενικά, ο EC3 δίνει φορτία χαμηλότερα από τα πειραματικά οπότε καθίσταται υπέρ της ασφαλείας. Ελαφρώς μεγαλύτερα φορτία από του EC3 δίνει ο τροποποιημένος EC3, που προσεγγίζει περισσότερο το Adina καθώς λαμβάνει υπόψη την επέκταση της πλαστικοποίησης στη διατομή.

5.2 Επιρροή φοράς τοπικής ατέλειας

Όπως φάνηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, ο κυρίαρχος μηχανισμός αστοχίας των υποστυλωμάτων είναι ο λυγισμός του κρίσιμου φατνώματος. Η τοπική ατέλεια του υποστυλώματος γίνεται πλέον καθολική για το συγκεκριμένο φάτνωμα και παίζει ρόλο στον τρόπο και το φορτίο της αστοχίας.

Πιο συγκεκριμένα, λόγω της ασύμμετρης δικτύωσης καθ' ύψος, η συμπεριφορά του υποστυλώματος αλλάζει όταν αλλάξει το πέλμα τοποθέτησης της τοπικής ατέλειας, που καθορίζεται από το αποτέλεσμα της ανάλυσης LBA. Έτσι, μπορεί για παράδειγμα να υπάρχει ένα κρίσιμο φάνωμα που το μέσον του ταυτίζεται με το μέσον του υποστυλώματος ή δύο κρίσιμα φανώματα με το μέγιστο σημείο ατέλειας να απέχει όσο μισό ύψος φανώματος από το μέσον του υποστυλώματος, Σχ. 5.2.



Σχ. 5.2 Περίπτωση ενός κρίσιμου φανώματος στο μέσο ύψος (α) και δύο κρίσιμων φανωμάτων περί το μέσο ύψος (β)

Επίσης σημαντική είναι η φορά της τοπικής ατέλειας, διότι μπορεί να οδηγήσει σε λυγισμό προς την ισχυρή ή την ασθενή φορά του φανώματος με διαφορετικά φορτία σε κάθε περίπτωση. Αυτό συμβαίνει διότι η διατομή του φανώματος είναι ασύμμετρη ως προς τον άξονα λυγισμού της.

Η συμπεριφορά των υποστυλωμάτων στις αναλύσεις GMNIA με το πρόγραμμα Adina ποικίλλει, διότι κάθε φορά αλλάζει ο συνδυασμός των χαρακτηριστικών που διέπουν το πρόβλημα. Είναι εφικτό, ωστόσο, να δοκιμαστούν όλες οι δυνατές περιπτώσεις. Αντίθετα στο πείραμα, είναι άγνωστες οι φορές και τα μεγέθη των ατελειών, στοιχεία που μπορούμε να εικάσουμε μόνο συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων.

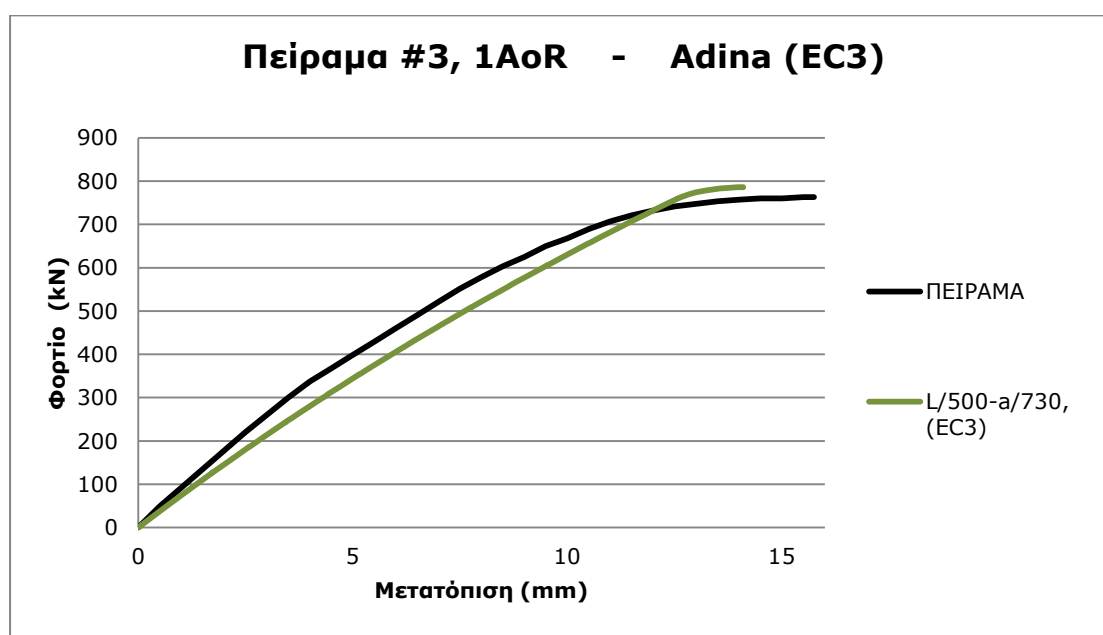
Η αναλυτική λύση που παρέχεται από τον τροποποιημένο EC3, (Εξ. 1.12), προϋποθέτει μηχανισμό αστοχίας του υποστυλώματος κατά τον οποίο το κρίσιμο φάνωμα λυγίζει με γνωστή φορά και το μέσον του ταυτίζεται με το μέσο ύψος. Δεδομένης της διατομής UPN 140, η μέση απόκλιση των οριακών φορτίων υπολογισμένων με την Εξ. 1.12 με διαφορετική φορά λυγισμού είναι 1.90%. Πάντως, οι αριθμητικές αναλύσεις έδειξαν ότι δεν είναι εύκολο να προβλεφτεί ο μηχανισμός αστοχίας καθώς ακολουθεί ενίοτε μη αναμενόμενες οδούς. Οι αποκλίσεις των οριακών φορτίων στο πρόγραμμα Adina μεταξύ μοντέλων με αντίθετες φορέα ατέλειας είναι 2.00%.

Παρόλο λοιπόν που οι παραλλαγές του δεν παίζουν μεγάλο ρόλο ποσοτικά, ο συνδυασμός γεωμετρίας και τοπικής ατέλειας δίνει την ακριβή μορφή αστοχίας.

5.3 Δρόμοι Ισορροπίας

Όσον αφορά τους δρόμους ισορροπίας, διατίθενται μόνο 4 πειραματικοί για υποστυλώματα (1AoR, 1AoRG, 2AoR, 2AmR), για τα οποία εξαγονται επίσης δρόμοι από το Adina και την προτεινόμενη αναλυτική μέθοδο που εισάγεται στο Κεφ. 1 (Εξ. 1.24). Στο υποστυλόμετρο 1AoRG, οι συγκολλήσεις ράβδων-κυρίων μελών έγιναν με ανόπτηση για περιορισμό των παραμενουσών τάσεων. Όλοι οι δρόμοι ισορροπίας αναφέρονται σε σημεία στο μέσο ύψος του υποστυλώματος και έχουν μορφή που εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος της καθολικής και τοπικής ατέλειας και την ύπαρξη ή μη παραμενουσών τάσεων λόγω συγκολλήσεων.

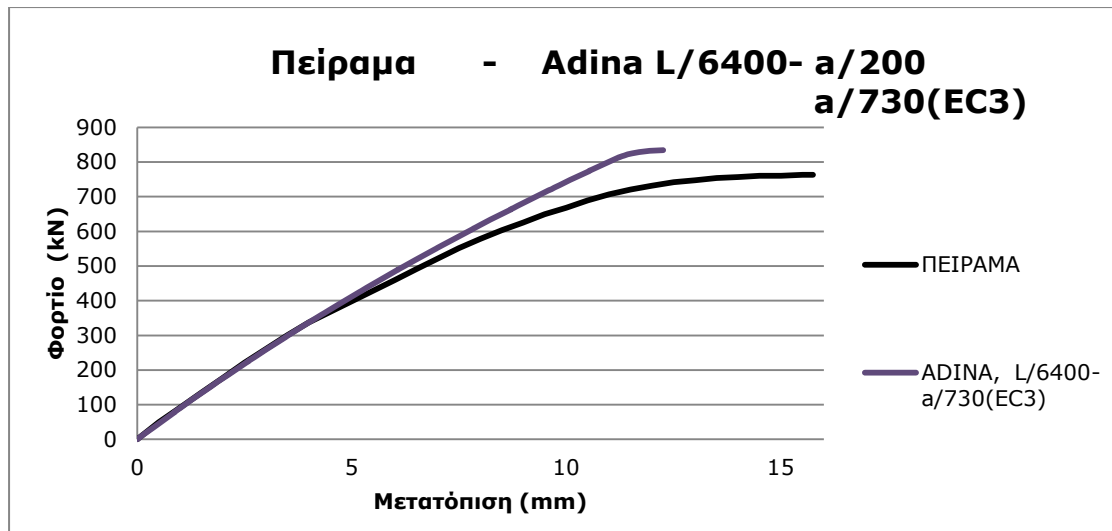
Η πρώτη σύγκριση ενός πειραματικού δρόμου (1AoR) με τον αντίστοιχο του Adina με κανονιστικές ατέλειες δείχνει ότι η απόκριση του δεύτερου είναι πιο εύκαμπτη, Σχ. 5.3. Αυτό συμβαίνει συστηματικά και στους υπόλοιπους τρεις δρόμους ισορροπίας (για τους οποίους υπάρχει και πειραματικός).



Σχ. 5.3 Τυπικό παράδειγμα δρόμων ισορροπίας από το πείραμα και το Adina με ατέλειες EC3

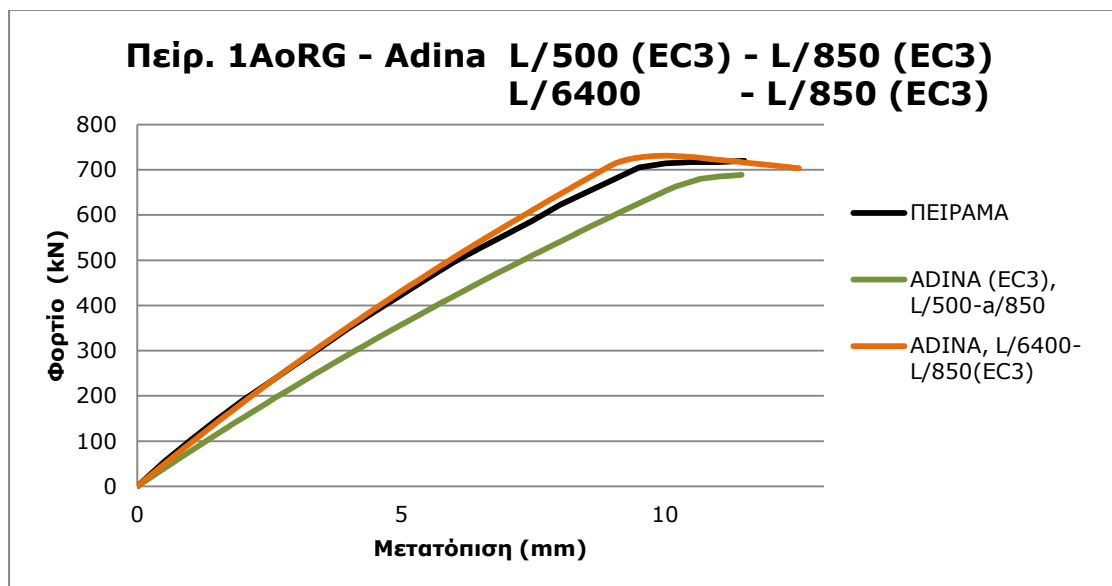
Σύμφωνα με τη θεωρία της Στατικής των μετρίως μεγάλων παραμορφώσεων, η καθολική ατέλεια είναι το πιο καθοριστικό στοιχείο για την αλλαγή της δυσκαμψίας μεταξύ ίδιων κατά τα άλλα υποστυλωμάτων.

Έτσι, αρχικά, επιδιώκεται παραλληλία (ταύτιση) των δύο δρόμων στην περιοχή της ελαστικότητας, η οποία επιτυγχάνεται σε όλες τις περιπτώσεις για καθολική ατέλεια ίση με το $L/6400$, όπου L το ύψος του υποστυλώματος, αντί για $L/500$ που προδιαγράφει ο EC3. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο δρόμος του Adina να παρουσιάζει μεγαλύτερο φορτίο αστοχίας σε σχέση με προηγουμένως, Σχ. 5.4.



Σχ. 5.4 Τυπικό παράδειγμα δρόμων ισορροπίας από το πείραμα και το Adina με ατέλειες: καθολική L/6400 και τοπική μεγαλύτερη της κανονιστικής

Οι δρόμοι ισορροπίας του Σχ. 5.4 είναι παράλληλοι αλλά εμφανώς, πλέον, με διαφορετική μορφή. Το μέγεθος της τοπικής ατέλειας όπως προδιαγράφεται από τον EC3 θεωρείται αρκετά αξιόπιστο καθώς έχει προκύψει από πληθώρα πειραμάτων. Συνεπώς, θα ήταν αναμενόμενο οι δύο δρόμοι να έχουν κοινή γεωμετρία και οριακό φορτίο, πέραν της κοινής κλίσης στην αρχή.

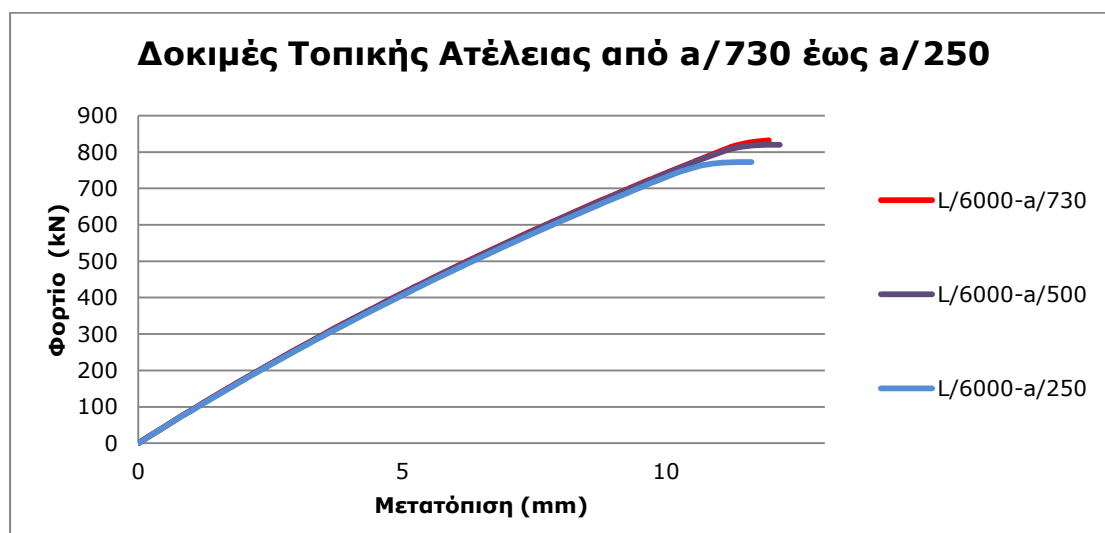


Σχ. 5.5 Περίπτωση 1ΑοRG- «χωρίς» παραμένουσες τάσεις. Ο δρόμος του Adina με ατέλειες L/6400 και τοπική κανονιστική σχεδόν ταυτίζεται με τον πειραματικό

Αυτό όμως δε συμβαίνει, εξαιτίας των παραμενουσών τάσεων που δημιουργεί η διαδικασία των συγκολλήσεων των ράβδων με τα κύρια μέλη. Πράγματι, θέτοντας καθολική ατέλεια L/6400 και κανονιστική τοπική στο υποστύλωμα 1ΑοRG, ο αριθμητικός δρόμος σχεδόν ταυτίζεται με τον πειραματικό, Σχ. 5.5. Η μικρή διαφορά στην ενδιάμεση κλίση ίσως οφείλεται στο ότι δεν εξαλείφονται πλήρως οι παραμένουσες τάσεις με την ανόπτηση. Επίσης, αν και η τοπική ατέλεια του EC3 λαμβάνει ποσοτικά υπόψη τις παραμένουσες τάσεις λόγω κατασκευής των μελών

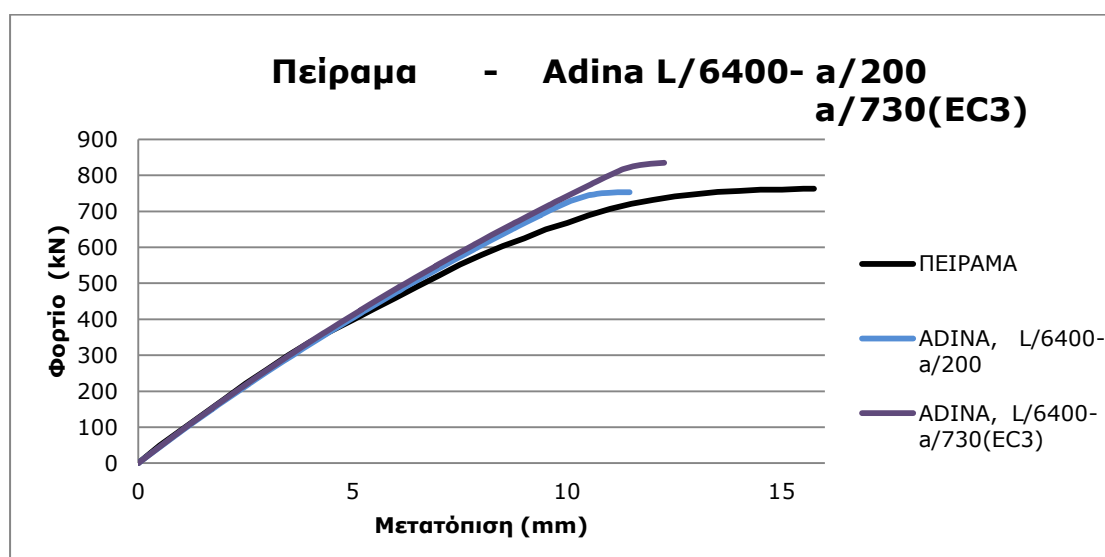
(δηλ. σε όρους τελικού φορτίου), ενδέχεται αυτές να έχουν και ποιοτική επίδραση στη γεωμετρία του δρόμου ισορροπίας, πχ. αλλαγή της κλίσης.

Επομένως, στα υπόλοιπα υποστυλώματα, γίνεται προσπάθεια μέσω μίας τροποποιημένης τοπικής ατέλειας να ληφθεί υπόψη η επιρροή των παραμενουσών τάσεων (εκτός από την περίπτωση 2AmR στην οποία δεν συνέκλινε η ανάλυση Adina για τοπική ιδιομορφή λυγισμού κι επομένως δεν μπορεί να εισαχθεί τοπική ατέλεια σε ανάλυση οριακού φορτίου).



Σχ. 5.6 Πτώση του ύψους εκδήλωσης του πλατώ διαρροής με την αύξηση της τοπικής ατέλειας, σε κατά τα άλλα ίδια υποστυλώματα

Από παραμετρικές αναλύσεις με το Adina σε κατά τα άλλα ίδια υποστυλώματα, παρατηρήθηκε ότι η μεταβολή της τοπικής ατέλειας έχει σχεδόν μοναδικό αποτέλεσμα την αντίστοιχη μεταβολή του ύψους εμφάνισης του πλατώ διαρροής, Σχ. 5.6.



Σχ. 5.7 Τυπικό παράδειγμα δρόμων ισορροπίας από το πείραμα και το Adina με ατέλειες: καθολική L/6400 και τοπική κανονιστική & μεγαλύτερη της κανονιστικής

Επομένως, εισάγεται τοπική ατέλεια μεγαλύτερη της προβλεπόμενης από τον EC3 και επιτυγχάνεται σύμπτωση των οριακών φορτίων, Σχ. 5.7. Η αλλαγή της μορφής του δρόμου ισορροπίας δεν είναι δυνατή με την αύξηση της τοπικής ατέλειας.

Εξαιρώντας τα υποστυλώματα 1AoRG και 2AmR διότι το πρώτο δεν έχει παραμένουσες τάσεις και το δεύτερο δεν έχει τη δυνατότητα τοπικής ατέλειας, στα υποστυλώματα 1AoR και 2AoR επιτυγχάνονται αρχικά παράλληλοι δρόμοι ισορροπίας και ίσα οριακά φορτία για τιμές ατελειών σύμφωνα με τον Πίνακα 5.8.

Περιπτώσεις υποστυλωμάτων	Ατέλειες	
	Καθολική	Τοπική
1AoR/ 2AoR	L/6400	a/200

Σχ. 5.8 Καθολική και τοπική ατέλεια για τη μέγιστη ομοιότητα αριθμητικού και πειραματικού δρόμου ισορροπίας, με ευρεία εφαρμογή

Η τιμή L/6400 όπως αναφέρθηκε προηγουμένως έχει εφαρμογή και στις 4 περιπτώσεις υποστυλωμάτων, ενώ η τιμή a/200 μόνο σε 2 περιπτώσεις, εξαιτίας τεχνικών περιορισμών. Επειδή αυτές οι 2 περιπτώσεις όμως (1AoR και 2AoR) παρουσιάζουν ίδιο μήκος φατνώματος, ίσως θα έπρεπε η αντίστοιχη τοπική ατέλεια να εξεταστεί και σε περισσότερα υποστυλώματα προτού αποτελέσει έστω και ένδειξη για ισχύ γενικής εφαρμογής. Επίσης, ενδεχομένως να μην παίζει ρόλο η απόλυτη τιμή της νέας ατέλειας αλλά η διαφορά της από την κανονιστική, ή γενικά να είναι συνάρτηση και άλλων παραγόντων, όπως του μήκους φατνώματος επί παραδείγματι.

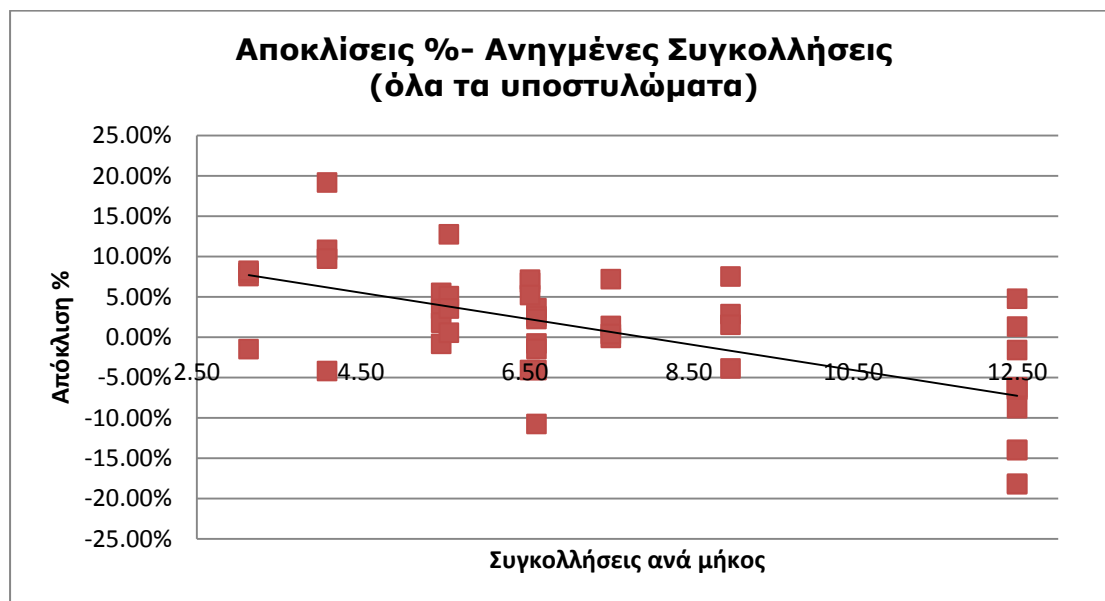
Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ένας λόγος (μεταξύ των άλλων) που οι αποκλίσεις μεταξύ πειραματικών φορτίων αστοχίας και φορτίων Adina είναι μόλις 5.54% παρά τις διαφορές των δύο προσεγγίσεων (ατέλειες κλπ.), είναι ακριβώς αυτές οι διαφορές. Τα υποστυλώματα του πειράματος έχουν μεν μικρότερη καθολική ατέλεια από την ανάλυση Adina σύμφωνα με τον EC3, αλλά έχουν επίσης παραμένουσες τάσεις. Αυτά τα χαρακτηριστικά, σε όρους φορτίου αστοχίας είναι κάπως ισοδύναμα με το ζεύγος: μεγαλύτερη ατέλεια (L/500 σύμφωνα με τον EC3) και απουσία παραμενουσών τάσεων (αφού το Adina δεν τις λαμβάνει υπόψη).

5.4 Συγκολλήσεις και % απόκλιση πειράματος – Adina (EC3)

Κινούμενοι στη λογική της προηγούμενης παραγράφου, μπορεί να υποτεθεί ότι εάν ένας μόνο από τους δύο παράγοντες (παραμένουσες τάσεις/ καθολική ατέλεια) μεταβληθεί σε μία από τις δύο διαδικασίες (πείραμα/ ανάλυση Adina), τότε τα οριακά φορτία των δύο διαδικασιών θα αποκλίνουν. Το μέτρο της μεταβολής ποιοτικά συμβαδίζει με το μέτρο της απόκλισης των φορτίων.

Αυτό φαίνεται εάν συσχετιστεί η % απόκλιση πειράματος- Adina ($[P_{\text{πειρ}} - P_{\text{Ad}}]/P_{\text{πειρ}}$) με τον αριθμό των συγκολλήσεων ανά μονάδα ύψους του υποστυλώματος. Περισσότερες συγκολλήσεις σημαίνουν περισσότερα σημεία με παραμένουσες τάσεις οπότε και εντονότερη ενδιάμεση πτώση κλίσης στο δρόμο ισορροπίας του πειράματος. Με δεδομένο ότι το Adina δε λαμβάνει υπόψη τις τάσεις αυτές, το φορτίο αστοχίας του θα τείνει να υπερτερεί σχετικά του φορτίου πειράματος όσο

αυξάνεται το πλήθος των συγκολλήσεων. Αυτή η ελαφρά τάση στα συγκριτικά αποτελέσματα των οριακών φορτίων φαίνεται στο Σχ. 5.9.



Σχ. 5.9 % Αποκλίσεις πειράματος- Adina συναρτήσεως του ανηγμένου αριθμού συγκολλήσεων σε όλα τα υποστυλώματα και γραμμή τάσης

5.5 Πρόταση ελαστικής γραμμής για σύνθετα υποστυλώματα

Από τον EC3 απουσιάζει η θεώρηση ελαστικής γραμμής για σύνθετα υποστυλώματα. Στο Κεφ. 1.3 περιγράφεται η παραγωγή ελαστικής γραμμής για οποιοδήποτε σημείο με μηδενική τοπική παραμόρφωση, δηλαδή σημείο συμβολής ράβδων δικτύωσης και πέλματος, καθ' ύψος. Η διαδικασία εξαγωγής της ελαστικής γραμμής στηρίζεται στις αρχές της μηχανικής (ισορροπία, συμβιβαστό παραμορφώσεων και νόμο υλικού) και στη θεώρηση του υποστυλώματος ως απλό μέλος με ισοδύναμα χαρακτηριστικά (Εξ. 1.1 & 1.3). Λαμβάνεται υπόψη ημιτονοειδής καθολική ατέλεια. Η «καθαρή» ελαστική γραμμή είναι η 1.24 και η γραμμή που περιέχει το βέλος της αρχικής καθολικής ατέλειας είναι η 1.25:

$$w = \frac{e(1 - \cos kL)}{\sin kL} \sin kx + e \cos kx + \frac{Z}{k^2 - \left(\frac{n}{L}\right)^2} \sin \frac{\pi x}{L} - e \quad (1.24)$$

$$w_t = w = \frac{e(1 - \cos kL)}{\sin kL} \sin kx + e \cos kx + \frac{Z}{k^2 - \left(\frac{n}{L}\right)^2} \sin \frac{\pi x}{L} - e + e_0 \sin \left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (1.25)$$

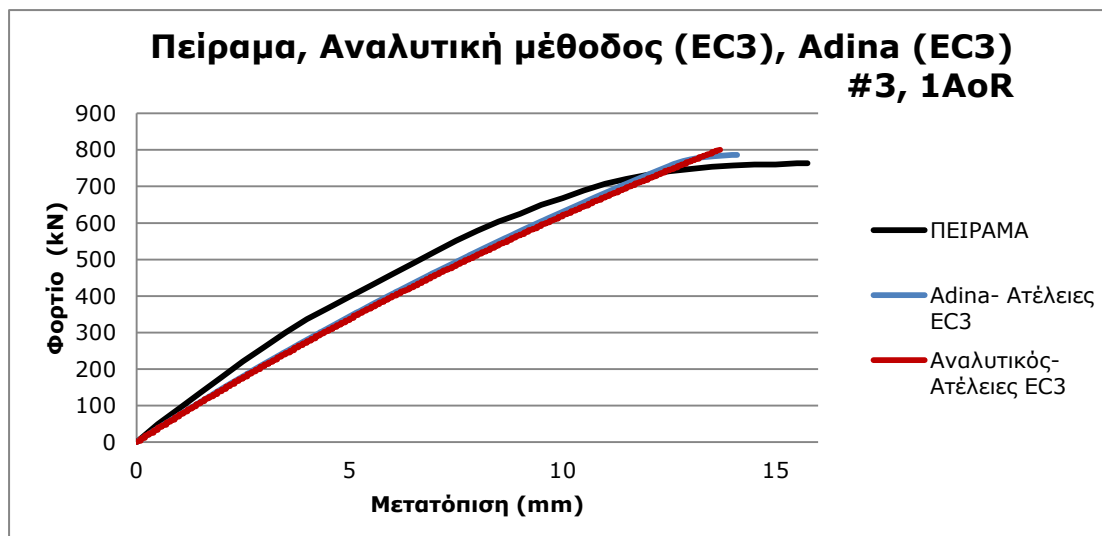
όπου L είναι το ύψος του υποστυλώματος, E το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, I_y η ισχυρή ροπή αδρανείας του σύνθετου υποστυλώματος, e η εκκεντρότητα φόρτισης και e_0 το πλάτος της καθολικής ατέλειας. Επίσης k^2 είναι:

$$\frac{P}{EI_y \left(1 - \frac{P}{GA_s} \right)} \quad (1.22)$$

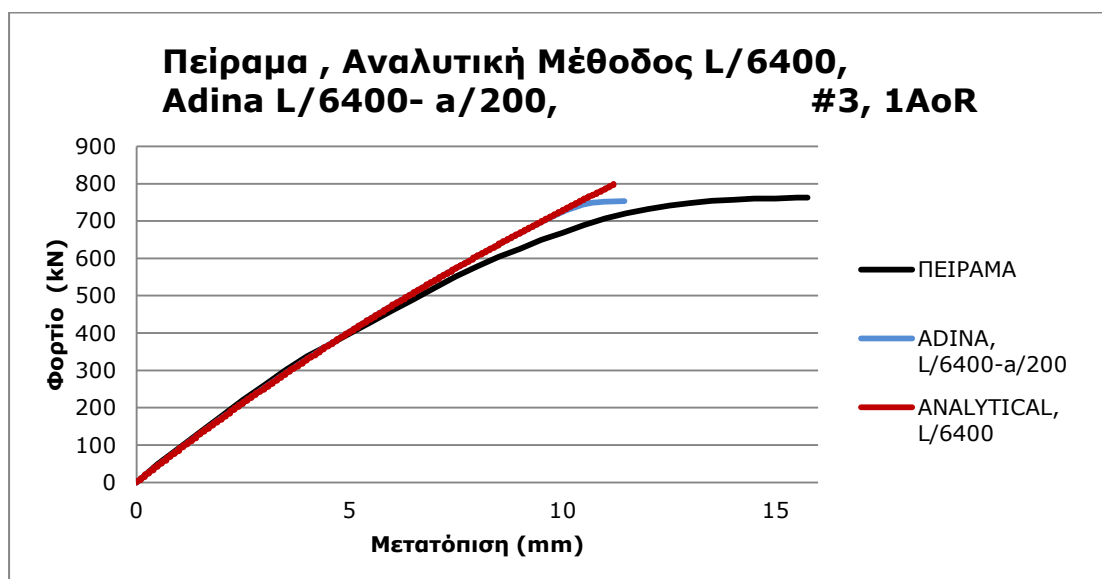
Και Z είναι ο όρος:

$$-\left(\frac{P}{GA_s} e_0 \frac{\pi^2}{L^2} + \frac{P}{EI_y} e_0 \right) / \left(1 - \frac{P}{GA_s} \right) \quad (1.23)$$

Η ελαστική γραμμή εφαρμόζεται σε πολλές περιπτώσεις υποστυλωμάτων και συγκρίνεται με τον αντίστοιχο πειραματικό δρόμο ισορροπίας και το δρόμο του Adina.



Σχ. 5.11 Δρόμος ισορροπίας πειράματος (1AoR) συγκρινόμενος με τους δρόμους Adina και της αναλυτικής μεθόδου για κανονιστικές ατέλειες



Σχ. 5.12 Δρόμος ισορροπίας πειράματος (#3, 1AoR) συγκρινόμενος με τους δρόμους Adina και της αναλυτικής μεθόδου για ατέλειες σύμφωνα με τη Μέθοδο 1 (Κεφ. 4)

Στα Σχήματα 5.11 και 5.12 φαίνονται δύο τυπικές τέτοιες συγκρίσεις. Στην ελαστική γραμμή (αναλυτική μέθοδος) τίθεται καθολική ατέλεια ίση με αυτή που έχει τεθεί στην αντίστοιχη ανάλυση με το Adina.

Στο Σχ. 5.10 τίθενται κανονιστικές ατέλειες στο Adina και στην αναλυτική μέθοδο της ελαστικής γραμμής ενώ στο Σχ. 5.12 τίθενται τέτοιες ατέλειες ώστε να προσεγγιστεί όσο γίνεται καλύτερα ο πειραματικός δρόμος ισορροπίας (Μέθοδος 1, Υποκεφ. 4.2.2.3). Είναι εμφανής η πλήρης ταύτιση των δρόμων Adina και αναλυτικής μεθόδου.

Επομένως, ο μηχανικός στην πράξη μπορεί να λάβει έναν αξιόπιστο δρόμο ισορροπίας μέχρι περίπου το 40% του οριακού φορτίου, όπου αρχίζει η πτώση κλίσεως λόγω παραμενουσών τάσεων, χωρίς τη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Ο αναλυτικός δρόμος, έχοντας κοινά χαρακτηριστικά με τον αριθμητικό, δε λαμβάνει υπόψη τις παραμένουσες τάσεις. Αντίθετα προς τον αριθμητικό δρόμο όμως, δεν τερματίζει σε κάποιο ανώτατο φορτίο. Έτσι, αν χρησιμοποιηθεί ο EC3 (Εξ. 2.9) ή ο τροποποιημένος EC3 (Εξ. 2.12) για να τεθεί ένα άνω όριο, είναι δυνατή η εξαγωγή της συνολικής συμπεριφοράς του υποστυλώματος με όχι πλήρη αλλά ικανοποιητική ακρίβεια. Οι αποκλίσεις με το πείραμα έγκεινται στην ελαφρά πτώση κλίσης σε ενδιάμεσο φορτίο και στο πλατώ διαρροής στη γειτονιά του οριακού φορτίου.

Αυτή η κατά το δυνατό σωστή πρόβλεψη της συμπεριφοράς προϋποθέτει την επιλογή καθολικής ατέλειας σύμφωνα με τη Μέθοδο 1 (Υποκεφ. 4.2.2.3). Διότι, αν και επιτυχημένες οι ατέλειες του EC3 ως προς την πρόβλεψη του οριακού φορτίου, αποτυγχάνουν να καταστήσουν αξιόπιστο το δρόμο ισορροπίας, δηλαδή το μηχανισμό αντιστοιχίας φορτίου- μετατόπισης. Κάτι που έχει μεγάλη σημασία για το σχεδιαστή μηχανικό, τουλάχιστον για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του υποστυλώματος στην κατάσταση λειτουργικότητας.

Παράρτημα

Στους Πίνακες 10.13 έως 10.23 παρουσιάζονται για κάθε σειρά υποστυλωμάτων τα θεωρητικά (Κεφ. 1) και αριθμητικά μεγέθη δυσκαμψίας και αντοχής και οι αποκλίσεις αυτών, όπως επίσης και οι παράμετροι των διαφόρων αναλύσεων.

	Σειρά Πειραμάτων		1AoR			
		Φάκελος	1AoR	1AoR	1AoR	1AoR
		Αρχείο	c1	c2	c3	c4
		Εκκεντρότητα	0.54	1.63	4.2	8.4
ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ Στοιχεία	Δυσκαμψίες	Κ αξονική (N/m)	167,343,750			
		Κ οριζόντ. (N/m)	264,521			
		"GAs" (N)	22,256,640			
	Φορτία	Pe (N)	4,744,318			
		Pcr (N)	3,910,697			
		Pcr,τοπ (N)	6,345,365			
Αποτελέσματα Adina	Στατ. Οριζ. Μετατόν./1=θεωρ. (m)		1.00752			
	Στατ. Κατ. Μετατόν./1=θεωρ. (m)		-0.99978			
	Γραμμική Λυγισμού 1η (N)		3,831,948			
	Γραμμική Λυγισμού ?η (N)		6,204,837			
	COLLAPSE (N)		977,486	869,635	785,810	616,921
ΠΕΙΡΑΜΑ	COLLAPSE (N)		882,599	862,985	755,112	608,012
ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ %	θεωρίας ως προς Adina (K/Pad- K/Pθεω.)/K/Pad	Στατική οριζ. Δυσκ.	-0.752%			
		Στατική κατ. Δυσκ.	0.022%			
		Γραμμική λυγ., 1η	-2.055%			
		Γραμμική λυγ., ?η	-2.265%			
	(Pn-Pad)/Pn	collapse	-10.75%	-0.77%	-4.07%	-1.47%
ΑΤΕΛΕΙΕΣ (Κανονιστικές)	Καθολική	Μέγεθος	0.01024			
		point/node	p. 205			
	Τοπική	Μέγεθος	8.30E-4	8.09E-04	8.81E-4	8.68E-4
		point/node	p. 583			
		ιδιομορφή	7η			

Πίνακας 10.13 Στοιχεία Πειράματος και Αναλύσεων της σειράς 1AoR

	Σειρά Πειραμάτων		1AmR			
		Φάκελος	1AmR	1AmR	1AmR	1AmR
		Αρχείο	c1si	c2si	c3si	c4si
		Εκκεντρότητα	0.5	1.5	4.15	8
ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ Στοιχεία	Δυσκαμφίες	K αξονική (N/m)	167,343,750			
		K οριζόντ. (N/m)	264,521			
		"GAs" (N)	22,256,640			
	Φορτία	Pe (N)	4,744,318			
		Pcr (N)	3,910,697			
		Pcr,τοπ (N)	25,381,460			
Αποτελέσματα Adina	Στατ. Οριζ. Μετατόν./1=θεωρ. (m)		0.9941			
	Στατ. Κατ. Μετατόν./1=θεωρ. (m)		1.00717			
	Γραμμική Λυγισμού 1η (N)		3,841,102			
	Γραμμική Λυγισμού ?η (N)		11,680,000			
	COLLAPSE (N)		1,028,292	918,972	760,267	660,477
ΠΕΙΡΑΜΑ	COLLAPSE (N)		902,211	862,985	715,885	558,979
ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ %	θεωρίας ως προς Adina (K/Pad- K/Pθεω.) / K/Pad	Στατική οριζ. Δυσκ.	0.711%			
		Στατική κατ. Δυσκ.	1.851%			
		Γραμμική λυγ., 1η	1.911%			
		Γραμμική λυγ., ?η	-117.3%	-117.3%	-117.3%	-117.3%
	(Pn-Pad)/Pn	collapse	-13.97%	-6.49%	-6.20%	-18.16%
ΑΤΕΛΕΙΕΣ (Κανονιστικές)	Καθολική	Μέγεθος point/node	0.01024 p. 205			
		Μέγεθος point/node	6.95E-05	5.7E-05	5.4E-05	8.2E-05
	Τοπική	Μέγεθος point/node	n.35320	35320	35320	35320
		ιδιομορφή	8η	8η	8η	8η

Πίνακας 10.14 Στοιχεία Πειράματος και Αναλύσεων της σειράς 1AmR

	Σειρά Πειραμάτων		1AoRG		
		Φάκελος	1AoRG	1AoRG	1AoRG
		Αρχείο	c1	c2	c3
		Εκκεντρότητα	1.63	4	8.2
ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ Στοιχεία	Δυσκαμψίες	K αξονική (N/m)	167,343,750		
		K οριζόντ. (N/m)	264,521		
		"GAs" (N)	22,256,640		
	Φορτία	Pe (N)	4,744,318		
		Pcr (N)	3,910,697		
		Pcr,τοπ (N)	6,345,365		
Αποτελέσματα Adina	Στατ. Οριζ. Μετατόπ./1=θεωρ. (m)		1.00748		
	Στατ. Κατ. Μετατόπ./1=θεωρ. (m)		-0.999734		
	Γραμμική Λυγισμού 1η (N)		3,825,272		
	Γραμμική Λυγισμού ?η (N)		6,196,238		
	COLLAPSE (N)		812,965	687,765	546,346
ΠΕΙΡΑΜΑ	COLLAPSE (N)		843,371	706,079	558,979
ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ %	θεωρίας ως προς Adina (K/Pad-K/Pθεω.)/K/Pad	Στατική οριζ. Δυσκ.	-0.75%		
		Στατική κατ. Δυσκ.	0.03%		
		Γραμμική λυγ., 1η	-2.23%		
		Γραμμική λυγ., ?η	-2.41%		
	(Pη-Pad)/Pη		collapse	3.61%	2.59%
ΑΤΕΛΕΙΕΣ (Κανονιστικές)	Καθολική	Μέγεθος	0.01024		
		point/node	p. 205		
	Τοπική	Μέγεθος	0.00075	0.00075	0.0008
		point/node	p.583		
		ιδιομορφή	7η		

Πίνακας 10.15 Στοιχεία Πειράματος και Αναλύσεων της σειράς 1AoRG

		Σειρά Πειραμάτων		1BoR			
			Φάκελος	1BoR	1BoR	1BoR	1BoR
			Αρχείο	c1	c2	c3	c4
			Εκκεντρότητα	0.5	1.5	4	8
ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ Στοιχεία	Δυσκαμψίες	K αξονική (N/m)	167,671,233				
		K οριζόντ. (N/m)	212,202				
		"GAs" (N)	4,320,040				
	Φορτία	Pe (N)	4,762,905				
		Pcr (N)	2,265,338				
		Pcr,τοπ (N)	1,219,299				
Αποτελέσματα Adina	Στατ. Οριζ. Μετατόπ./1=θεωρ. (m)		0.974904				
	Στατ. Κατ. Μετατόπ./1=θεωρ. (m)		-0.996614				
	Γραμμική Λυγισμού 1η (N)		2,323,592				
	Γραμμική Λυγισμού ?η (N)		4,182,977				
	COLLAPSE (N)		797,518	703,930	602,894	487,598	
ΠΕΙΡΑΜΑ	COLLAPSE (N)		862,985	764,918	657,045	480,526	
ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ %	θεωρίας ως προς Adina (K/Pad-K/Pθεω.)/K/Pad	Στατική οριζ. Δυσκ.	2.51%				
		Στατική κατ. Δυσκ.	0.34%				
		Γραμμική λυγ., 1η	2.51%				
		Γραμμική λυγ., ?η	70.85%				
	(Pη-Pad)/Pη		collapse	7.59%	7.97%	8.24%	-1.47%
ΑΤΕΛΕΙΕΣ (Κανονιστικές)	Καθολική	Μέγεθος	0.01022				
		point/node	n. 5750 (3η)				
	Τοπική	Μέγεθος	9.84E-04	9.40E-04	9.59E-04	9.71E-04	
		point/node	n. 13314				
		ιδιομορφή	11η				

Πίνακας 10.16 Στοιχεία Πειράματος και Αναλύσεων της σειράς 1BoR

	Σειρά Πειραμάτων		1BmR			
		Φάκελος	1BmR	1BmR	1BmR	1BmR
		Αρχείο	c1	c2	c3	c4
		Εκκεντρότητα	0.5	1.63	4	8
ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ Στοιχεία	Δυσκαμφίες	K αξονική (N/m)	167,671,233			
		K οριζόντ. (N/m)	212,202			
		"GAs" (N)	4,320,040			
	Φορτία	Pe (N)	4,762,905			
		Pcr (N)	2,265,338			
		Pcr,τοπ (N)	4,877,195			
Αποτελέσματα Adina	Στατ. Οριζ. Μετατόν./1=θεωρ. (m)		0.9748			
	Στατ. Κατ. Μετατόν./1=θεωρ. (m)		-0.979726			
	Γραμμική Λυγισμού 1η (N)		2,485,208			
	Γραμμική Λυγισμού ?η (N)		5,105,426			
	COLLAPSE (N)		806,220	728,761	625,896	504,213
ΠΕΙΡΑΜΑ	COLLAPSE (N)		853,178	755,112	637,432	500,139
ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ %	θεωρίας ως προς Adina (K/Pad- K/Pθεω.)/K/Pad	Στατική οριζ. Δυσκ.	2.58%			
		Στατική κατ. Δυσκ.	2.03%			
		Γραμμική λυγ., 1η	10.28%			
		Γραμμική λυγ., ?η	4.47%			
	(Pη-Pad)/Pη	collapse	5.50%	3.49%	1.81%	-0.81%
ΑΤΕΛΕΙΕΣ (Κανονιστικές)	Καθολική	Μέγεθος	0.01022			
		point/node	n. 13287 (1η)			
	Τοπική	Μέγεθος	9.12E-04	8.99E-04	9.06E-04	9.02E-04
		point/node	n. 13287			
		ιδιομορφή	10η			

Πίνακας 10.17 Στοιχεία Πειράματος και Αναλύσεων της σειράς 1BmR

	Σειρά Πειραμάτων		2AoR			
		Φάκελος	2AoR	2AoR	2AoR	2AoR
		Αρχείο	c1	c2	c3	c4
		Εκκεντρότητα	0.5	1.8	4.15	8
ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ Στοιχεία	Δυσκαμφίες	K αξονική (N/m)	133,875,000			
		K οριζόντ. (N/m)	79,834			
		"GAs" (N)	16,189,270			
	Φορτία	Pe (N)	1,735,712			
		Pcr (N)	1,567,640			
		Pcr,τοπ (N)	6,345,355			
Αποτελέσματα Adina	Στατ. Οριζ. Μετατόπ./1=θεωρ. (m)		1.00589			
	Στατ. Κατ. Μετατόπ./1=θεωρ. (m)		-0.999632			
	Γραμμική Λυγισμού 1η (N)		1,554,528			
	Γραμμική Λυγισμού ?η (N)		6,048,698			
	COLLAPSE (N)		959,238	767,980	619,243	483,266
ΠΕΙΡΑΜΑ	COLLAPSE (N)		921,825	823,758	666,852	509,945
ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ %	θεωρίας ως προς Adina (K/Pad- K/Pθεω.)/K/Pad	Στατική οριζ. Δυσκ.	-0.589%			
		Στατική κατ. Δυσκ.	0.037%			
		Γραμμική λυγ., 1η	-0.843%			
		Γραμμική λυγ., ?η	-4.904%			
	(Pη-Pad)/Pη	collapse	-4.06%	6.77%	7.14%	5.23%
ΑΤΕΛΕΙΕΣ (Κανονιστικές)	Καθολική	Μέγεθος point/node	0.0128 p. 480			
		Μέγεθος point/node	0.00106	0.00096	0.00093	0.00091
	Τοπική	Μέγεθος point/node	p. 522			
		ιδιομορφή	12η			

Πίνακας 10.18 Στοιχεία Πειράματος και Αναλύσεων της σειράς 2AoR

	Σειρά Πειραμάτων		2AmR			
		Φάκελος	2AmR	2AmR	2AmR	2AmR
		Αρχείο	c1	c2	c3	c4
		Εκκεντρότητα	0.46	1.85	4	8
ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ Στοιχεία	Δυσκαμψίες	K αξονική (N/m)	133,875,000			
		K οριζόντ. (N/m)	79,834			
		"GAs" (N)	16,189,270			
	Φορτία	Pe (N)	1,735,712			
		Pcr (N)	1,567,640			
		Pcr,τοπ (N)	25,381,418			
Αποτελέσματα Adina	Στατ. Οριζ. Μετατόν./1=θεωρ. (m)		1.00571			
	Στατ. Κατ. Μετατόν./1=θεωρ. (m)		-0.970681			
	Γραμμική Λυγισμού 1η (N)		1,555,961			
	Γραμμική Λυγισμού ?η (N)		-			
	COLLAPSE (N)		890,275	784,429	647,517	533,433
ΠΕΙΡΑΜΑ	COLLAPSE (N)		902,211	823,758	637,432	490,332
ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ %	θεωρίας ως προς Adina (K/Pad- K/Pθεω.)/K/Pad	Στατική οριζ. Δυσκ.	-0.57%			
		Στατική κατ. Δυσκ.	2.93%			
		Γραμμική λυγ., 1η	0.39%			
		Γραμμική λυγ., ?η	-			
	(Pn-Pad)/Pn	collapse	1.32%	4.77%	-1.58%	-8.79%
ΑΤΕΛΕΙΕΣ (Κανονιστικές)	Καθολική	Μέγεθος	0.0128			
		point/node	p. 480			
	Τοπική	Μέγεθος	-	-	-	-
		point/node	-			
		ιδιομορφή	-			

Πίνακας 10.19 Στοιχεία Πειράματος και Αναλύσεων της σειράς 2AmR

	Σειρά Πειραμάτων		2BoR			
		Φάκελος	2BoR	2BoR	2BoR	2BoR
		Αρχείο	c1	c2	c3	c4
		Εκκεντρότητα	0.5	1.6	4	8
ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ Στοιχεία	Δυσκαμψίες	K αξονική (N/m)	134,716,981			
		K οριζόντ. (N/m)	75,201			
		"GAs" (N)	4,565,124			
	Φορτία	Pe (N)	1,757,614			
		Pcr (N)	1,269,027			
		Pcr,τοπ (N)	2,313,152			
Αποτελέσματα Adina	Στατ. Οριζ. Μετατόν./1=θεωρ. (m)		0.995366			
	Στατ. Κατ. Μετατόν./1=θεωρ. (m)		-0.998748			
	Γραμμική Λυγισμού 1η (N)		1,318,726			
	Γραμμική Λυγισμού ?η (N)		2,463,146			
	COLLAPSE (N)		649,875	594,591	495,672	398,471
ΠΕΙΡΑΜΑ	COLLAPSE (N)		804,145	666,852	549,172	382,459
ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ %	θεωρίας ως προς Adina (K/Pad- K/Pθεω.)/K/Pad	Στατική οριζ. Δυσκ.	0.46%			
		Στατική κατ. Δυσκ.	0.13%			
		Γραμμική λυγ., 1η	3.77%			
		Γραμμική λυγ., ?η	6.09%			
	(Pn-Pad)/Pn	collapse	19.18%	10.84%	9.74%	-4.19%
ΑΤΕΛΕΙΕΣ (Κανονιστικές)	Καθολική	Μέγεθος	0.01272			
		point/node	p. 351			
	Τοπική	Μέγεθος	0.00164	0.00169	0.00173	0.00178
		point/node	p. 351			
		ιδιομορφή	4η			

Πίνακας 10.20 Στοιχεία Πειράματος και Αναλύσεων της σειράς 2BoR

	Σειρά Πειραμάτων		2BmR			
		Φάκελος	2BmR	2BmR	2BmR	2BmR
		Αρχείο	c1	c2	c3	c4
		Εκκεντρότητα	0.6	1.73	4	8
ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ Στοιχεία	Δυσκαμψίες	K αξονική (N/m)	134,716,981			
		K οριζόντ. (N/m)	75,201			
		"GAs" (N)	4,565,124			
	Φορτία	Pe (N)	1,757,614			
		Pcr (N)	1,269,027			
		Pcr,τοπ (N)	9,252,606			
Αποτελέσματα Adina	Στατ. Οριζ. Μετατόπ./1=θεωρ. (m)		0.9953			
	Στατ. Κατ. Μετατόπ./1=θεωρ. (m)		-0.971891			
	Γραμμική Λυγισμού 1η (N)		1,321,288			
	Γραμμική Λυγισμού ?η (N)		8,556,660			
	COLLAPSE (N)		737,124	647,828	526,619	423,638
ΠΕΙΡΑΜΑ	COLLAPSE (N)		794,338	657,045	529,559	421,685
ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ %	θεωρίας ως προς Adina (K/Pad- K/Pθεω.)/K/Pad	Στατική οριζ. Δυσκ.	0.472%			
		Στατική κατ. Δυσκ.	2.811%			
		Γραμμική λυγ., 1η	4.835%			
		Γραμμική λυγ., ?η	-8.133%			
	(Pη-Pad)/Pη	collapse	7.20%	1.40%	0.56%	-0.46%
ΑΤΕΛΕΙΕΣ (Κανονιστικές)	Καθολική	Μέγεθος	0.01272			
		point/node	p.340			
	Τοπική	Μέγεθος	0.000533	0.00052	0.0005	0.00052
		point/node	n. 17012			
		ιδιομορφή	23η			

Πίνακας 10.21 Στοιχεία Πειράματος και Αναλύσεων της σειράς 2BmR

	Σειρά Πειραμάτων		3AoR			
		Φάκελος	3AoR	3AoR	3AoR	3AoR
		Αρχείο	c1	c2	c3	c4
		Εκκεντρότητα	0.5	1.6	4.15	8
ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ Στοιχεία	Δυσκαμψίες	K αξονική (N/m)	133,043,478			
		K οριζόντ. (N/m)	39,878			
		"GAs" (N)	15,482,511			
	Φορτία	Pe (N)	859,132			
		Pcr (N)	813,965			
		Pcr,τοπ (N)	12,282,879			
Αποτελέσματα Adina	Στατ. Οριζ. Μετατόπ./1=θεωρ. (m)		1.00645			
	Στατ. Κατ. Μετατόπ./1=θεωρ. (m)		-0.999611			
	Γραμμική Λυγισμού 1η (N)		809,675			
	Γραμμική Λυγισμού ?η (N)		10,190,000			
	COLLAPSE (N)		544,093	476,274	376,878	299,299
ΠΕΙΡΑΜΑ	COLLAPSE (N)		588,399	490,332	362,846	304,006
ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ %	θεωρίας ως προς Adina (K/Pad-K/Pθεω.)/K/Pad	Στατική οριζ. Δυσκ.	-0.65%			
		Στατική κατ. Δυσκ.	0.04%			
		Γραμμική λυγ., 1η	-0.53%			
		Γραμμική λυγ., ?η	-20.54%			
	(Pη-Pad)/Pη		collapse	7.53%	2.87%	-3.87%
ΑΤΕΛΕΙΕΣ (Κανονιστικές)	Καθολική	Μέγεθος	0.01288			
		point/node	p. 646			
	Τοπική	Μέγεθος	0.00035	0.00036	0.00035	0.00035
		point/node	n. 15803			
		ιδιομορφή	22 ^η			

Πίνακας 10.22 Στοιχεία Πειράματος και Αναλύσεων της σειράς 3AoR

	Σειρά Πειραμάτων		3BoR			
		Φάκελος	3BoR	3BoR	3BoR	3BoR
		Αρχείο	c1	c2	c3	c4
		Εκκεντρότητα	0.5	1.6	4	8
ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ Στοιχεία	Δυσκαμφίες	K αξονική (N/m)	132,631,579			
		K οριζόντ. (N/m)	39,878			
		"GAs" (N)	4,324,084			
	Φορτία	Pe (N)	853,821			
		Pcr (N)	713,028			
		Pcr,τοπ (N)	4,499,752			
Αποτελέσματα Adina	Στατ. Οριζ. Μετατόν./1=θεωρ. (m)		0.998986			
	Στατ. Κατ. Μετατόν./1=θεωρ. (m)		-0.998959			
	Γραμμική Λυγισμού 1η (N)		735,467			
	Γραμμική Λυγισμού ?η (N)		4,347,790			
	COLLAPSE (N)		496,198	446,734	349,932	282,790
ΠΕΙΡΑΜΑ	COLLAPSE (N)		568,785	470,719	362,846	284,392
ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ %	θεωρίας ως προς Adina (K/Pad- K/Pθεω.) / K/Pa d	Στατική οριζ. Δυσκ.	0.10%			
		Στατική κατ. Δυσκ.	0.10%			
		Γραμμική λυγ., 1η	3.05%			
		Γραμμική λυγ., ?η	-3.50%			
	(Pn-Pad)/Pn		collapse	12.76%	5.10%	3.56% 0.56%
ΑΤΕΛΕΙΕΣ (Κανονιστικές)	Καθολική	Μέγεθος	0.01292			
		point/node	n. 16618			
	Τοπική	Μέγεθος	0.001	0.00104	0.00099	0.00103
		point/node	n. 16517			
		ιδιομορφή	10 ⁿ			

Πίνακας 10.23 Στοιχεία Πειράματος και Αναλύσεων της σειράς 3BoR

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Χ. Γαντζής, Σημειώσεις του μαθήματος 9^{ου} εξαμήνου Ε.Μ.Π. «ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»
- [2] Α. Ν. Κουνάδη, Σιδηρές Κατασκευές, Συμπεριφορά και Ανάλυση, Τόμος ΙΙ, Γ Έκδοση, Συμεών (1999)
- [3] Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης, Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, Κλειδάριθμος (2008)
- [4] Ι. Βάγιας, ΣΙΔΗΡΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ, Κλειδάριθμος (2006)
- [5] ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 3, Σχεδιασμός Μεταλλικών Κατασκευών (ENV 1993)
- [6] ADINA System Online Manuals, ADINA R&D, Inc, September 2008
- [7] Klöppel K., Ramm W., Versuche und Berechnung zur Bestimmung der Traglast mehrteiliger Gitterstabe unter aussermittiger Belastung, Der Stahlbau, Vol. 37, pp. 164- 176; 236- 249, 1968
- [8] Διπλωματική εργασία των Αχιλλέα Χ. Κυρώζη και Ιωάννη Α. Λεμπέση, Αναλυτική, αριθμητική και κανονιστική διερεύνηση σύνθετων υποστυλωμάτων, Αθήνα, 2008
- [9] Kalochairetis K. E., Gantes C. J., Elastic Buckling Load of Multi- Story Frames Consisting of Timoshenko Members, Journal of Constructional Steel Research, submitted for publication, 2011
- [10] Gantes, C.J. and Kalochairetis, K.E., "Nonlinear Analysis of Imperfect Timoshenko Members Under Lateral Loading and its Application to Laced Built-up Columns", 7th National Conference on Steel Structures, Volos, Greece, September 29-30,2011.

