

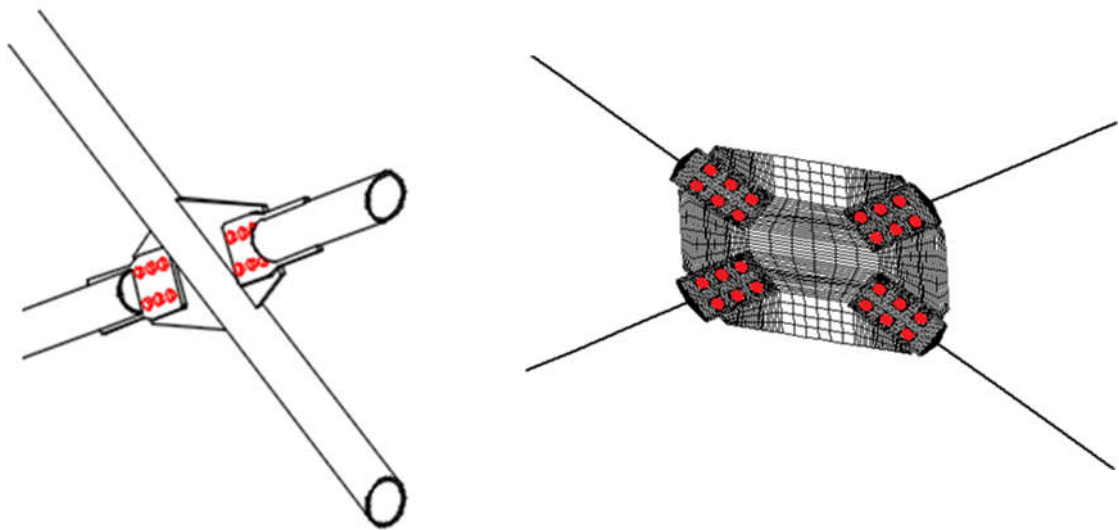


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ
ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ
ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



Μεταπτυχιακή Εργασία

Κωνσταντίνος Παπαβασιλείου

ΕΜΚ ΜΕ 2017/06

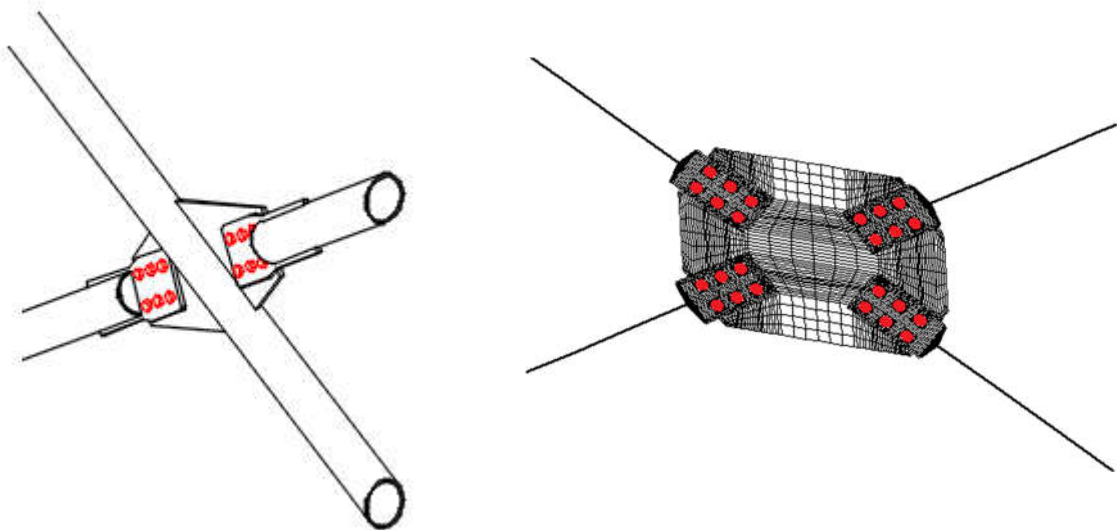
Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ
ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ
ΜΕΣΩ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**



Μεταπτυχιακή Εργασία
Κωνσταντίνος Παπαβασιλείου

ΕΜΚ ΜΕ 2017/06

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Αθήνα, Ιούνιος 2017

Copyright © Κωνσταντίνος Σ. Παπαβασιλείου, 2015
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Konstantinos S. Papavasileiou, 2015
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Κωνσταντίνος Σ. Παπαβασιλείου (2017)
Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας μέσω αναλύσεων
πεπερασμένων στοιχείων
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2017/06
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Konstantinos S. Papavasileiou (2017)
Investigation of non-linear behavior of steel concentric bracings
with finite element analyses
Postgraduate Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2017/06
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Στους δικούς μου ανθρώπους,

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χ. Γαντέ για την επιστημονική καθοδήγηση και τη συνεχή βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Ηλία Θανάσουλα για την πολύτιμη βοήθειά του.

Κωνσταντίνος Παπαβασιλείου

Ιούνιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΜΕ 2017/06

Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

Κωνσταντίνος Σ. Παπαβασιλείου

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι διαγώνιοι, κεντρικοί, σύνδεσμοι δυσκαμψίας, γνωστοί και ως χιαστί, αποτελούν συστήματα που τοποθετούνται στις μεταλλικές κατασκευές με σκοπό να ενισχύσουν την ακαμψία/ευστάθεια του φέροντος οργανισμού. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς ενός τέτοιου συστήματος κεντρικών διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας. Σαν εισαγωγή στο πρόβλημα λοιπόν, παρουσιάζεται, στο 1^ο κεφάλαιο, μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στο θέμα των διαγώνιων συνδέσμων. Στη συνέχεια, στο 2^ο κεφάλαιο της εργασίας εξετάζεται η συμπεριφορά ενός πλαισίου με κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας (υποστυλώματα-δοκός-διαγώνιοι σύνδεσμοι). Πιο συγκεκριμένα, με χρήση του λογισμικού ADINA, προσομοιώνεται το σύστημα με πεπερασμένα στοιχεία δοκού (beam elements) και πραγματοποιούνται μη-γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού. Επιπλέον, μελετάται και η επιρροή του σχήματος (ανάλογα με την ιδιομορφή) της επιβαλλόμενης ατέλειας με δεδομένο το μέγεθός της. Το επόμενο ζήτημα που εξετάζεται είναι αυτό της επιρροής των συνδέσεων των διαγώνιων στην απόκριση του συστήματος. Οι συνδέσεις των διαγώνιων προσομοιώνονται τις περισσότερες φορές, ανάλογα και με την περίπτωση, είτε ως πακτώσεις είτε ως αρθρώσεις. Απλοποιούνται, δηλαδή, ανάλογα με τη συμπεριφορά που αναμένεται να είναι πιο κοντά στην πραγματική απόκριση. Ο επόμενος σκοπός, λοιπόν, είναι η μόρφωση ενός μοντέλου που να λαμβάνει υπόψιν την επιρροή των συνδέσεων για μία δεδομένη διατομή συνδέσμου. Στο 3^ο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται, λοιπόν, η διαδικασία με την οποία σχεδιάστηκαν και διαστασιολογήθηκαν οι συνδέσεις των διαγώνιων συνδέσμων σε ένα τέτοιο μοντέλο και στη συνέχεια, μορφώνεται το αντίστοιχο προσομοίωμα που θα συμπεριλαμβάνει την επιρροή των συνδέσεων των διαγώνιων στην απόκριση του συστήματος (4^ο κεφάλαιο). Το μοντέλο είναι ένα πλαίσιο με κεντρικούς συνδέσμου δυσκαμψίας, αντίστοιχο με αυτό που μοντελοποιήθηκε μόνο με στοιχεία δοκού, με τη διαφορά πως οι συνδέσεις των συνδέσμων δεν είναι αρθρώσεις ή πακτώσεις, αλλά προσομοιώνονται λεπτομερώς. Το σύστημα, δηλαδή, περιλαμβάνει πλέον και τα κομβοελάσματα καθώς και τους προεντεταμένους κοχλίες. Το λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιήθηκε και εδώ είναι το ADINA και για την προσομοίωση των συνδέσεων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία επαφής (contact elements) και στοιχεία κοχλίας (bolt elements). Και σε αυτήν την περίπτωση πραγματοποιούνται μη γραμμικές ανελαστικές αναλύσεις με και χωρίς ατέλεια για να διερευνηθεί η ακριβής συμπεριφορά του συστήματος.



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

POSTGRADUATE THESIS
EMK ME 2017/06

**Investigation of non-linear behavior of steel concentric bracings
with finite element analyses**

Konstantinos S. Papavasileiou

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

ABSTRACT

The diagonal, concentric bracings are systems that are placed on steel structures to enhance their stiffness. The purpose of this master thesis is to investigate the non-linear behavior of such a concentric bracings system. As an introduction to the subject, a brief bibliographic review on the issue of diagonal concentric bracings is presented in Chapter 1. In the second chapter of the thesis, the behavior of a frame with concentric bracings system is being considered (columns-beam-diagonal links). In particular, using the ADINA software, the system is simulated with beam finite elements and nonlinear (geometry and material) analyses are performed. In addition, the effect of the shape (depending on the mode) of the imperfection is considered, given its size. The next issue that it is considered, is the influence of the bracings connections on the system response. The bracings connections are simulated in most of the occasions, depending on the case, either as anchors or as consolidations, meaning that they are simplified, depending on the behavior that expected to be closer to the actual response. The next aim, therefore, is to create a model that takes into account the influence of the connections for a given bracing cross-section. The third chapter of the thesis presents the process by which the connections of the bracings were designed and dimensioned in such a model and subsequently the corresponding model is formed, a model, namely, which will include the influence of the bracings connections in the response of the system (4th Chapter). The model is a frame with concentric bracings system, corresponding to the one modeled only with beam elements, except that the joints are not anchors or consolidations, but are simulated in detail. The system, in other words, now includes the plates of the connections and the prestressed bolts. The software package used is ADINA, as before, and to simulate connections, contact and bolt elements are used. In this case, also, nonlinear inelastic analyses with and without imperfections are performed, so as to investigate the exact behavior of the system.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....	1
1.1	Εισαγωγή.....	1
1.2	Ελαστικός και ανελαστικός λυγισμός θλιβόμενων ράβδων.....	2
1.2.1	Εισαγωγικά στοιχεία.....	2
1.2.2	Αμφιέριστη αξονικά θλιβόμενη ράβδος.....	2
1.2.3	Γραμμικός ελαστικός λυγισμός τέλει ράβδου.....	3
1.2.4	Γραμμικός ελαστικός λυγισμός ατελούς ράβδου.....	4
1.2.5	Μη γραμμικός ελαστικός λυγισμός ατελούς ράβδου.....	5
1.2.6	Γραμμικός ανελαστικός λυγισμός τέλει ράβδου.....	7
1.2.7	Γραμμικός ανελαστικός λυγισμός ατελούς ράβδου.....	8
1.2.8	Μη γραμμικός ανελαστικός λυγισμός ατελούς ράβδου.....	12
1.3	Διαστασιολόγηση διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας.....	13
1.3.1	Υλικά.....	13
1.3.2	Στατικό σύστημα – Πλαίσιο με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα.....	14
1.3.3	Κανόνες σχεδιασμού και διαμόρφωση λεπτομερειών.....	15
1.3.4	Κανόνες σχεδιασμού και διαμόρφωση λεπτομερειών για πλαίσια με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα.....	16
1.4	Διαστασιολόγηση των συνδέσεων των διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας.....	18
1.4.1	Βασικές Αρχές Σχεδιασμού.....	18
1.4.2	Συνδέσεις με κοχλίες.....	19
1.4.3	Διάταξη οπών για κοχλίες και ήλους.....	21
1.4.4	Αντοχή σχεδιασμού μεμονωμένων μέσων σύνδεσης.....	23
1.4.5	Ομάδες μέσων σύνδεσης.....	26
1.4.6	Συνδέσεις ανθεκτικές σε ολίσθηση με κοχλίες κατηγορίας 8.8 ή 10.9.....	26
2	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΟΥ.....	29
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	29
2.2	Γεωμετρία.....	29
2.3	Χαρακτηριστικά υλικού.....	30
2.4	Διατομές.....	31
2.5	Μοντέλο φορέα.....	31
2.6	Υπολογισμός ανηγμένων λυγηροτήτων.....	31

2.7	Υπολογισμός αρχικών ατελειών.....	32
2.8	Ανάλυση LBA (2D).....	33
2.9	Ανάλυση GMNIA.....	34
2.10	Σύγκριση με μεμονωμένη ράβδο.....	36
2.11	Μοντέλο χωρίς ελευθερώσεις της ροπής εκτός επιπέδου στα άκρα των διαγωνίων συνδέσμων.....	37
	2.11.1 Ανάλυση LBA.....	38
	2.11.2 Ανάλυση GMNIA.....	38
2.12	Μοντέλο με ελευθερώσεις της ροπής εκτός επιπέδου στα άκρα των διαγωνίων συνδέσμων.....	43
	2.12.1 Ανάλυση LBA.....	43
	2.12.2 Ανάλυση GMNIA.....	44
2.13	Σύγκριση των μοντέλων προσομοίωσης.....	49
2.14	Συμπεράσματα.....	50
3	ΣΥΝΔΕΞΕΙΣ ΔΙΑΓΩΝΙΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ.....	53
3.1	Εισαγωγή.....	53
3.2	Κανονιστικές οδηγίες.....	53
3.3	Σχεδιασμός και διαστασιολόγηση συγκολλήσεων.....	54
3.4	Σχεδιασμός και Διαστασιολόγηση κοχλιώσεων.....	55
3.5	Σχεδιασμός και Διαστασιολόγηση κομβοελασμάτων.....	56
3.6	Αποτελέσματα για συγκεκριμένο παράδειγμα.....	56
3.7	Σχέδια συνδέσεων.....	57
3.8	Σχέδια μοντέλου.....	59
4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ.....	61
4.1	Εισαγωγή.....	61
4.2	Μεμονωμένη σύνδεση μοντέλου.....	61
4.3	Τρισδιάστατο συνολικό μοντέλο.....	65
4.4	Αρχικός Έλεγχος Μοντέλου.....	67
4.5	Σύγκριση απλού – σύνθετου μοντέλου.....	71
	4.5.1 Σύγκριση αξονικών δυνάμεων.....	71
4.6	Μη γραμμική ανελαστική ανάλυση.....	73
4.7	Μη γραμμική ατελής ανελαστική ανάλυση.....	75
4.8	Επιρροή ατέλειας.....	77

4.9	Συμπεράσματα.....	79
5	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΕΣ – ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ.....	83
5.1	Εισαγωγή.....	83
5.2	Σύγκριση μοντέλου με και χωρίς την επιρροή των συνδέσεων.....	83
5.2.1	Σύγκριση μορφών αστοχίας.....	83
5.2.2	Σύγκριση των αποκρίσεων των δύο μοντέλων.....	84
5.3	Παραμετρικές αναλύσεις προέντασης κοχλιών.....	86
5.4	Συγκριτικές παραμετρικές αναλύσεις ατελειών.....	88
5.4.1	Παραμετρική ανάλυση ατελειών στο μοντέλο με την επιρροή των συνδέσεων	88
5.4.2	Παραμετρική ανάλυση ατελειών στο μοντέλο χωρίς την επιρροή των συνδέσεων.....	91
5.4.3	Σύγκριση ευαισθησίας σε ατέλεια στα δύο μοντέλα (με και χωρίς συνδέσεις)	93
5.5	Συμπεράσματα.....	94
6	ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	99
6.1	Ανασκόπηση εργασίας.....	99
6.2	Συπεράσματα.....	100

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - Αντιμετώπιση προβλημάτων σύγκλισης – ADINA

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

1.1 Εισαγωγή

Οι διαγώνιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας, γνωστοί και ως χιαστί, αποτελούν συστήματα που τοποθετούνται στις μεταλλικές κατασκευές με σκοπό να ενισχύσουν την ακαμψία/ευστάθεια του φέροντος οργανισμού. Οι σύνδεσμοι προσφέρουν δυσκαμψία στο φορέα στην κατεύθυνση του επιπέδου τους και χρησιμοποιούνται για να παραλάβουν οριζόντια φορτία. Φορτία, δηλαδή, που προέρχονται κατά κύριο λόγο από δράσεις όπως ο σεισμός ή ο άνεμος. Πρόκειται για ένα σύστημα δύο τεμνόμενων μεταλλικών ράβδων εκ των οποίων η μία λειτουργεί σε καθαρή θλίψη και η άλλη σε καθαρό εφελκυσμό ανάλογα με την κατεύθυνση της φόρτισης. Στην Εικόνα (1-1) φαίνεται ένα τέτοιο σύστημα κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας.



Εικόνα 1-1: Πρακτικό παράδειγμα κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας

Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς ενός τέτοιου συστήματος κεντρικών διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας (υποστυλώματα-δοκός-διαγώνιοι σύνδεσμοι). Πιο συγκεκριμένα, η εργασία χωρίζεται, πρακτικά, σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος μελετάται ένα τέτοιο φάτνωμα που προσομοιώνεται με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία (beam elements) και

Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

πραγματοποιούνται μη-γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού. Επιπλέον, εξετάζεται και η επιρροή του σχήματος (ανάλογα με την ιδιομορφή) της επιβαλλόμενης ατέλειας. Όσον αφορά τις συνδέσεις των διαγώνιων προσομοιώνονται τις περισσότερες φορές είτε ως πακτώσεις είτε ως αρθρώσεις. Απλοποιούνται, δηλαδή, ανάλογα με τη συμπεριφορά που αναμένεται να είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Στο δεύτερο μέρος γίνεται απόπειρα διερεύνησης της επιρροής των συνδέσεων των διαγώνιων στην απόκριση του συστήματος με τη μόρφωση κατάλληλου προσομοιώματος που περιλαμβάνει γραμμικά, επιφανειακά και πεπερασμένα στοιχεία επαφής.

Σε αυτό το εισαγωγικό κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στο θέμα των διαγώνιων κεντρικών συνδέσεων δυσκαμψίας. Πιο συγκεκριμένα, εξηγούνται κάποια βασικά στοιχεία που αφορούν το λυγισμό θλιβόμενων ράβδων, φαινόμενο που αποτελεί κυρίαρχη μορφή αστοχίας για το σύστημα. Επίσης, έγινε η προσπάθεια να συγκεντρωθούν, και όσο γίνεται να επεξηγηθούν, εκείνα τα κομμάτια από τους ευρωκώδικες (EC3 και EC8) που αφορούν τη διαστασιολόγηση κεντρικών συνδέσεων.

1.2 Ελαστικός και ανελαστικός λυγισμός θλιβόμενων ράβδων

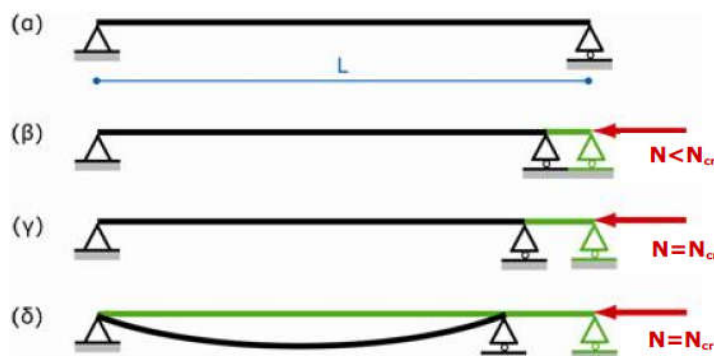
1.2.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Το πρόβλημα του λυγισμού αξονικά θλιβόμενης ράβδου αποτελεί το πλέον χαρακτηριστικό παράδειγμα λυγισμού και χρησιμοποιείται ως εισαγωγή στην έννοια του λυγισμού, λόγω και της ευχερούς παρουσίασης της φυσικής του σημασίας. Παράλληλα, στην απλή του μορφή του ελαστικού λυγισμού τέλειων ευθύγραμμων ράβδων, χαρακτηρίζεται από απλή μαθηματική διατύπωση.

Όταν όμως το πρόβλημα αυτό απαντάται στη φύση ή σε μέλη πραγματικών δομικών έργων, υπεισέρχονται και άλλες παράμετροι, οι πιο κύριες από τις οποίες είναι η μη γραμμικότητα υλικού, οι αρχικές ατέλειες, τόσο γεωμετρικές όσο και λόγω παραμενουσών τάσεων και ανομοιογένειας του υλικού, οι συνοριακές συνθήκες και η ενδεχόμενη επιρροή μεγάλων μετακινήσεων. Οι παράμετροι αυτοί επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση μιας θλιβόμενης ράβδου, και για το λόγο αυτό το φαινομενικά απλό πρόβλημα του λυγισμού υπό αξονική θλίψη έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές για μεγάλο χρονικό διάστημα.

1.2.2 Αμφιέριστη αξονικά θλιβόμενη ράβδος

Στο Σχήμα (1-1)(α) απεικονίζεται μία αμφιέριστη ράβδος μήκους L στην αφόρτιστη κατάστασή της. Στα Σχήματα (1-1)(β, γ, δ) παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ράβδου εάν αυτή καταπονηθεί με αξονικό θλιπτικό φορτίο N . Το τελευταίο από αυτά τα σχήματα παρουσιάζει τη ράβδο στην καμπυλωμένη μορφή της μετά το λυγισμό.



Σχήμα 1-1: Αμφιέριστη ράβδος υπό αξονική θλίψη

Για την επίλυση του προβλήματος του λυγισμού αυτής της ράβδου διατυπώνονται οι εξισώσεις ισορροπίας, καταστατικού νόμου του υλικού και συμβιβαστού των παραμορφώσεων. Δεδομένου ότι η παραμορφωμένη κατάσταση της ράβδου, μετά το λυγισμό, διαφέρει πολύ από την απαραμόρφωτη, είναι απαραίτητο οι εξισώσεις να διατυπωθούν στην παραμορφωμένη κατάσταση. Αναλόγως των παραδοχών που γίνονται για το μέγεθος των παραμορφώσεων, η επίλυση γίνεται με γραμμική ή μη γραμμική θεωρία λυγισμού και τα αποτελέσματα που λαμβάνονται περιλαμβάνουν στη μεν πρώτη περίπτωση τα κρίσιμα φορτία λυγισμού και τις αντίστοιχες ιδιομορφές, στη δε δεύτερη παρέχουν επιπλέον πληροφορίες για τη μεταλυγισμική συμπεριφορά της ράβδου.

1.2.3 Γραμμικός ελαστικός λυγισμός τέλει ράβδου

Καταρχήν, παρουσιάζεται συνοπτικά ο υπολογισμός του ελαστικού κρίσιμου φορτίου λυγισμού μιας απολύτως ευθύγραμμης θλιβόμενης ράβδου με γραμμική θεωρία. Διατυπώνοντας τις εξισώσεις στην παραμορφωμένη κατάσταση και εφαρμόζοντας την απλοποιημένη έκφραση της καμπυλότητας, που αποτελεί ικανοποιητική προσέγγιση για μικρές ως μέτριες παραμορφώσεις, προκύπτει η διαφορική εξίσωση ισορροπίας (Εξ. (1-1)):

$$w'' + k^2 w = 0 \quad (1-1)$$

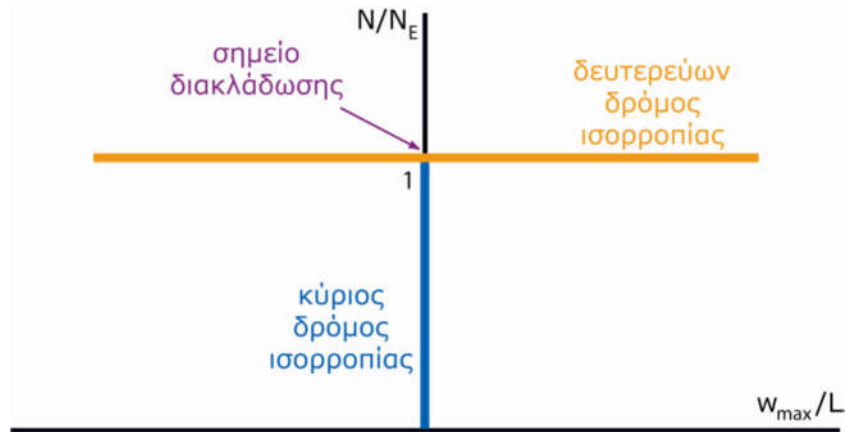
όπου w οι εγκάρσιες μετακινήσεις, $k^2 = N/EI$, I η ροπή αδράνειας της διατομής της ράβδου και E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού της. Διατυπώνοντας τη γενική λύση της διαφορικής εξίσωσης και εφαρμόζοντας τις συνοριακές συνθήκες μηδενικής εγκάρσιας μετακίνησης w στα δύο άκρα, προκύπτουν τα κρίσιμα φορτία λυγισμού (Εξ. (1-2)) και οι αντίστοιχες ιδιομορφές (Εξ. (1-3)):

$$N_{cr,n} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad (1-2)$$

$$w_n(x) = \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (1-3)$$

Στις Εξισώσεις (1-2) και (1-3) το n είναι τυχαίος ακέραιος θετικός αριθμός, του οποίου η τιμή καθορίζει την τάξη του κρίσιμου φορτίου. Για $n=1$ προκύπτει το μικρότερο ελαστικό κρίσιμο φορτίο λυγισμού που είναι γνωστό και ως φορτίο Euler N_E , και η αντίστοιχη πρώτη ιδιομορφή λυγισμού.

Η παραπάνω διαδικασία αποτελεί γραμμική ανάλυση λυγισμού, λόγω της χρήσης της απλοποιημένης έκφρασης για την καμπυλότητα, τέλει ράβδου από ελαστικό υλικό, λόγω της εφαρμογής σταθερού μέτρου ελαστικότητας. Από την ανάλυση αυτή δεν προκύπτουν πληροφορίες για τη συμπεριφορά της ράβδου μετά το λυγισμό, όπως φαίνεται και από το δρόμο ισορροπίας της ράβδου (Σχήμα (1-2)) που συνδέει το επιβαλλόμενο φορτίο N με την εγκάρσια μετατόπιση w_{max} στο μέσον της δοκού ($w_{max} = w(L/2)$).



Σχήμα 1-2: Δρόμοι ισορροπίας απολύτως ευθύγραμμης αξονικά θλιβόμενης ράβδου από γραμμική ανάλυση λυγισμού

1.2.4 Γραμμικός ελαστικός λυγισμός ατελούς ράβδου

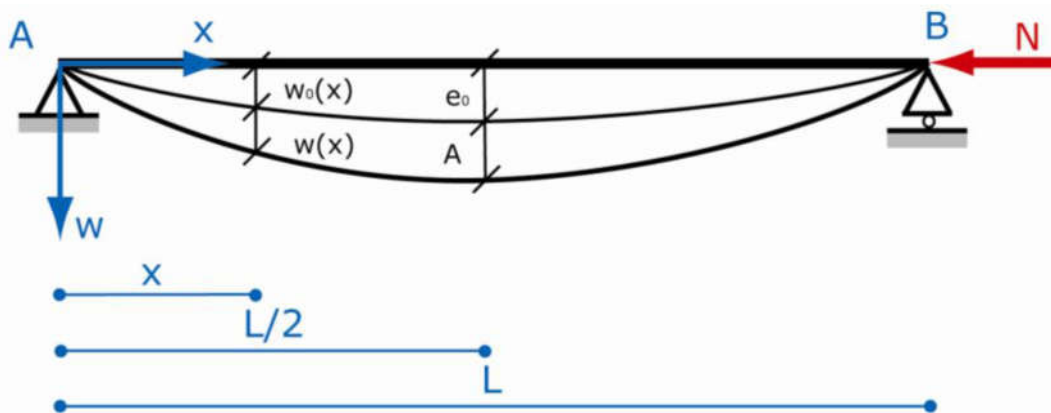
Για να αξιολογηθεί η επίδραση αρχικών ατελειών στη συμπεριφορά της αξονικά θλιβόμενης αμφιέρειστης ράβδου, γίνεται η θεώρηση πως αυτή έχει μια αρχική γεωμετρική απόκλιση από την ευθυγραμμία. Σύμφωνα με τη συνήθη θεώρηση να λαμβάνονται ατέλειες με το σχήμα ιδιομορφών λυγισμού, θεωρείται ατέλεια $w_0(x)$ ημιτονοειδούς μορφής, με μέγιστη τιμή e_0 στο μέσον του ανοίγματος (Σχήμα (1-3)):

$$w_0(x) = e_0 \cdot \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (1-4)$$

Όταν η αρχική ατέλεια έχει το σχήμα μίας ιδιομορφής, ο φορέας διατηρεί αυτή τη μορφή παραμόρφωσης, αυξάνοντας βέβαια το μέγεθός της, όταν φορτιστεί. Επομένως, όταν εφαρμοστεί στη ράβδο αξονική δύναμη N , εμφανίζεται μια πρόσθετη απόκλιση $w(x)$, η οποία μπορεί να γραφτεί ως:

$$w(x) = A \cdot \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (1-5)$$

όπου A είναι η μέγιστη τιμή της επιπρόσθετης απόκλισης στο μέσον του ανοίγματος.



Σχήμα 1-3: Αμφιέρειστη ράβδος με αρχική ατέλεια w_0 και επιπλέον βέλη w λόγω επιβαλλόμενου αξονικού φορτίου N

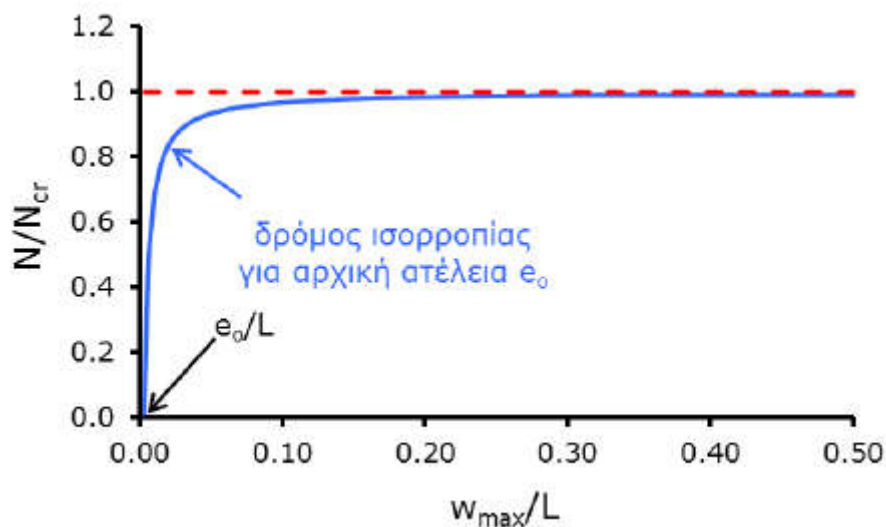
Στην περίπτωση αυτή η διαφορική εξίσωση ισορροπίας της ράβδου αποκτά την ακόλουθη μορφή:

$$w'' + k^2 \cdot (w_0 + w) = 0 \quad (1-6)$$

Μετά από αντικαταστάσεις και αναδιάταξη των όρων, προκύπτει η εξίσωση του αδιαστατοποιημένου δρόμου ισορροπίας της αξονικά θλιβόμενης ράβδου με αρχική ατέλεια:

$$\frac{N}{N_{cr}} = 1 - \frac{e_0}{L} \cdot \frac{1}{(w_{max}/L)} \quad (1-7)$$

Η γραφική παράσταση της Εξ. (1-7) φαίνεται στο Σχήμα (1-4).



Σχήμα 1-4: Δρόμος ισορροπίας ατελούς αξονικά θλιβόμενης ράβδου από γραμμική ανάλυση λυγισμού με αναλυτική θεώρηση

Έτσι προκύπτει ένας ενιαίος δρόμος ισορροπίας, δηλαδή λόγω ατέλειας χάνονται οι έννοιες του κύριου και δευτερεύοντα δρόμου ισορροπίας, επομένως και του σημείου διακλάδωσής τους, καθώς και του κρίσιμου φορτίου. Ο ενιαίος δρόμος ισορροπίας τείνει ασυμπτωτικά στον οριζόντιο δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας που είχε προκύψει από τη γραμμική ανάλυση για τον τέλειο φορέα. Ο λυγισμός εκφράζεται πλέον όχι μέσω αιφνίδιας απώλειας της ευθυγραμμίας της ράβδου, αλλά μέσω μιας σημαντικής μείωσης της δυσκαμψίας καθώς το επιβαλλόμενο φορτίο πλησιάζει το κρίσιμο φορτίο λυγισμού του αντίστοιχου τέλειου φορέα. Η φορά του λυγισμού καθορίζεται από τη φορά της αρχικής ατέλειας.

1.2.5 Μη γραμμικός ελαστικός λυγισμός ατελούς ράβδου

Στη συνέχεια θα αξιολογηθεί η επίδραση των μεγάλων μετακινήσεων στη μεταλυγισμική απόκριση της ράβδου. Η ακριβής σχέση υπολογισμού της καμπυλότητας κ της ράβδου στη θέση x είναι:

$$\kappa = \frac{-\frac{d^2w}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} = -\frac{w''}{\left[1 + (w')^2\right]^{3/2}} \quad (1-8)$$

Με θεώρηση όμως μικρών τιμών των μετακινήσεων, κάτι που ισχύει με ικανοποιητική ακρίβεια στην κατάσταση αμέσως μετά το λυγισμό, η καμπυλότητα κ της ράβδου μπορεί να γραφεί προσεγγιστικά ως:

$$\kappa = -\frac{d^2w}{dx^2} = -w'' \quad (1-9)$$

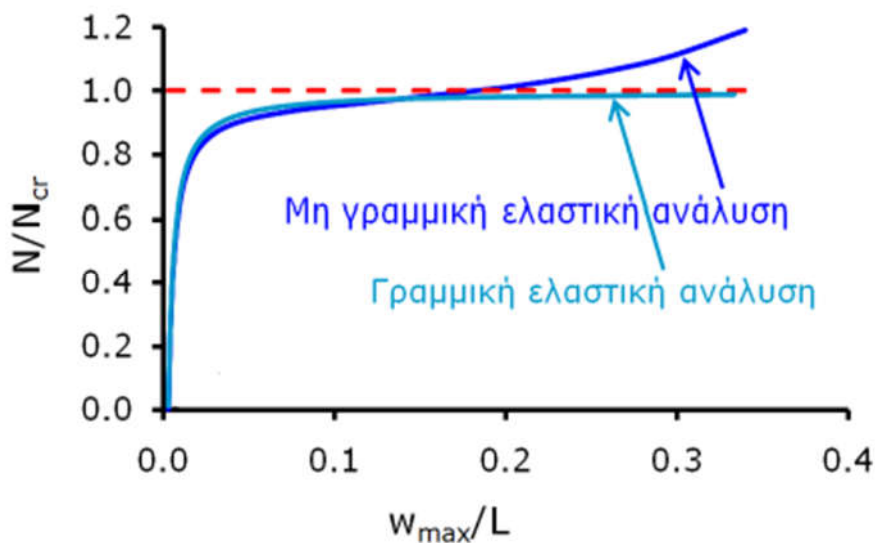
Η Εξίσωση (1-9) οδήγησε στις διαφορικές Εξισώσεις ισορροπίας (1-1) για την τέλεια ράβδο και (1-6) για την ατελή, οι οποίες έχουν απλές αναλυτικές λύσεις. Αντιθέτως, αν χρησιμοποιηθεί η ακριβής έκφραση (Εξ. (1-8)) της καμπυλότητας οδηγούμαστε για μεν την τέλεια ράβδο στην εξίσωση:

$$\frac{w''}{[1+(w')^2]^{3/2}} + k^2 \cdot (w) = 0 \quad (1-10)$$

για δε την ατελή στην:

$$\frac{w''}{[1+(w')^2]^{3/2}} + k^2 \cdot (w_0 + w) = 0 \quad (1-11)$$

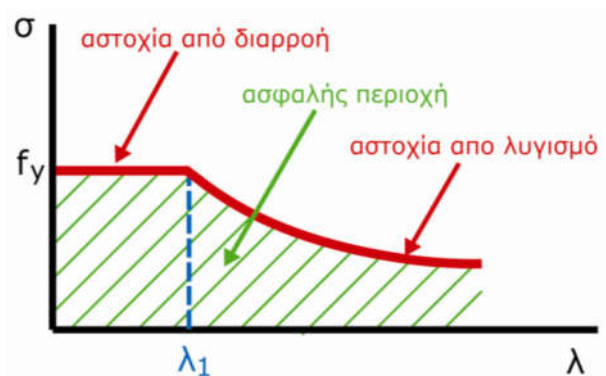
Οι διαφορικές Εξισώσεις (1-10) και (1-11) δεν έχουν αναλυτική λύση και μπορούν να επιλυθούν μόνον αριθμητικά, μέσω κάποιας επαναληπτικής διαδικασίας, για συγκεκριμένες αριθμητικές τιμές των παραμέτρων του προβλήματος. Τα αποτελέσματα μίας τέτοιας ανάλυσης, μιας θλιβόμενης αμφιαρθρωτής ράβδου, με αρχική ατέλεια με το σχήμα της πρώτης ιδιομορφής παρουσιάζονται στο Σχήμα (1-5), συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού. Παρατηρείται ότι οι δύο καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν για τιμές παραμόρφωσης μέχρι περίπου $w_{\max}/L=0.2$, ενώ στη συνέχεια ο δρόμος ισορροπίας της μη γραμμικής ανάλυσης υπερβαίνει το κρίσιμο φορτίο, αναδεικνύοντας τη μεταλυγισμική αντοχή της ελαστικής ράβδου.



Σχήμα 1-5: Συγκριτική απεικόνιση δρόμων ισορροπίας γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης με ατέλειες θλιβόμενης ράβδου βάσει αριθμητικών υπολογισμών

1.2.6 Γραμμικός ανελαστικός λυγισμός τέλει ράβδου

Σε περίπτωση που το υλικό δεν είναι απείρως ελαστικό, όπως θεωρήθηκε μέχρι τώρα, η διαρροή της διατομής είναι μια ακόμα μορφή αστοχίας εκτός του λυγισμού. Για να φανεί καλύτερα το κατά πόσο αυτό επηρεάζει το φορέα, μέσω σύγκρισης της κρίσιμης τάσης λυγισμού και του ορίου διαρροής του υλικού, οροθετήθηκε, για την περίπτωση τέλει ράβδου και γραμμικά ελαστικής-απολύτως πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού, η ασφαλής περιοχή από τις δύο πιθανές μορφές αστοχίας της θλιβόμενης ράβδου, το λυγισμό και τη διαρροή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε όρους λυγηρότητας της ράβδου και επιβαλλόμενης θλιπτικής τάσης στο Σχήμα (1-6).



Σχήμα 1-6: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης λυγισμού και διαρροής σε αξονικά θλιβόμενη ράβδο

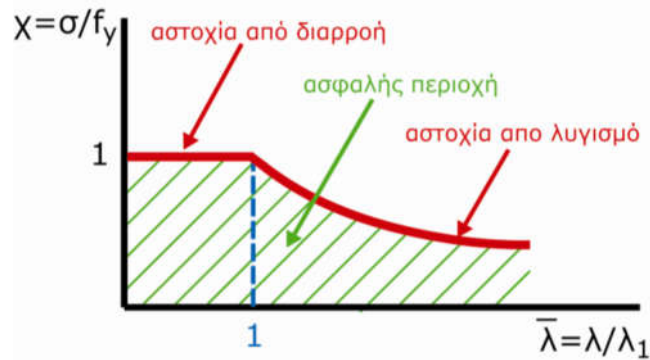
Παρατηρείται ότι για μικρή λυγηρότητα κρίσιμη είναι η διαρροή, ενώ για μεγάλες τιμές της λυγηρότητας ο λυγισμός αποτελεί την κρίσιμη μορφή αστοχίας της ράβδου. Επιπλέον, υπάρχει μια χαρακτηριστική τιμή λυγηρότητας λ_1 για την οποία λυγισμός και διαρροή συμβαίνουν ταυτόχρονα. Η λυγηρότητα αυτή αντιστοιχεί στο σημείο τομής της οριζόντιας ευθείας $\sigma=f_y$ και της καμπύλης Euler και έχει την τιμή:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (1-12)$$

Προκειμένου το διάγραμμα αυτό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλες τις ποιότητες δομικού χάλυβα, παρουσιάζεται στο Σχήμα (1-7) σε αδιαστατοποιημένη μορφή, όπου ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στην ανηγμένη λυγηρότητα και ο κατακόρυφος στο λόγο χ επιβαλλόμενης ορθής τάσης προς όριο διαρροής:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad (1-13)$$

$$\chi = \frac{\sigma}{f_y} \quad (1-14)$$



Σχήμα 1-7: Αδιαστατοποιημένο διάγραμμα αλληλεπίδρασης λυγισμού και διαρροής σε αξονικά θλιβόμενη ράβδο

1.2.7 Γραμμικός ανελαστικός λυγισμός ατελούς ράβδου

Τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα αφορούν θλιβόμενες ράβδους χωρίς ατέλειες. Δεδομένης όμως της σημασίας των αρχικών ατελειών σε προβλήματα λυγισμού, και προκειμένου να προσεγγιστεί ακριβέστερα το πρόβλημα αλληλεπίδρασης λυγισμού και διαρροής θα εξεταστεί στη συνέχεια η αμφιέριστη ράβδος του Σχήματος (1-3) με αρχική ατέλεια ημιτονοειδούς μορφής, δηλαδή με το σχήμα της πρώτης ιδιομορφής.

Αναλυτική προσέγγιση και διατάξεις Ευρωκώδικα 3

Κατά μήκος της παραμορφωμένης ράβδου του Σχήματος (1-3) αναπτύσσονται λόγω εκκεντρότητας της αξονικής δύναμης κάποιες ροπές, συχνά ονομαζόμενες και ροπές δεύτερης τάξης, διότι για τον υπολογισμό τους είναι απαραίτητη η εξέταση της ράβδου στην παραμορφωμένη της γεωμετρία. Στο μέσον της ράβδου η ροπή αυτή είναι ίση προς την αξονική δύναμη N επί το συνολικό βέλος w_{max} . Η αντίστοιχη μέγιστη αναπτυσσόμενη ορθή τάση προκύπτει ως το άθροισμα ενός όρου που οφείλεται στην αξονική δύναμη και ενός που οφείλεται στη ροπή:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{N \frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} e_o}{W_{el}} \quad (1-15)$$

όπου A είναι το εμβαδόν και W_{el} η ελαστική ροπή αντίστασης της διατομής της ράβδου.

Για να προσδιοριστεί η αντοχή της ράβδου γίνεται η θεώρηση ότι αστοχία επέρχεται όταν η αξονική δύναμη αυξηθεί τόσο, ώστε η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση της ράβδου να γίνει ίση με την τάση διαρροής του υλικού της. Η θεώρηση αυτή είναι σχετικά συντηρητική, αφού αγνοείται το περιθώριο διαρροής της υπόλοιπης διατομής, καθώς και η κράτυνση.

$$\sigma = f_y \quad (1-16)$$

Τότε, η επιβαλλόμενη αξονική θλιπτική δύναμη γίνεται ίση με την αντοχή της ράβδου σε θλίψη, η οποία θεωρείται ίση με την αντοχή $A f_y$ της διατομής σε διαρροή επί ένα μειωτικό συντελεστή χ , ο οποίος εμπεριέχει τις συνδυασμένες επιδράσεις του λυγισμού και των αρχικών ατελειών και του οποίου ο υπολογισμός είναι το ζητούμενο:

$$N = \chi \cdot A \cdot f_y \quad (1-17)$$

Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις (1-17), (1-2) και (1-12) και λαμβάνοντας υπόψη ότι ο λόγος I/A ισούται με το τετράγωνο της ακτίνας αδράνειας i , προκύπτει:

$$N_{cr,n} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad (1-18)$$

$$\frac{N}{N_{cr}} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\pi^2 \cdot EI} \cdot L^2 = \frac{\chi \cdot \left(\frac{L}{i}\right)^2}{\pi^2 \cdot \frac{E}{f_y}} = \chi \cdot \frac{\lambda^2}{\lambda_1^2} = \chi \cdot \bar{\lambda}^2 \quad (1-19)$$

Με αντικατάσταση των Εξισώσεων (1-16), (1-17) και (1-19) στην Εξίσωση (1-15) οδηγούμαστε στην ακόλουθη εξίσωση:

$$f_y = \chi \cdot f_y + \frac{\chi \cdot A \cdot f_y \cdot e_o}{1 - \chi \cdot \bar{\lambda}^2 \cdot W_{el}} \Rightarrow 1 = \chi + \frac{\frac{A}{W_{el}} \cdot e_o \cdot \chi}{1 - \chi \cdot \bar{\lambda}^2} \quad (1-20)$$

Παρατηρείται ότι για μια αμφιέρειστη ράβδο με γνωστό μήκος και διατομή καθώς και με γνωστό μέγεθος ημιτονοειδών ατελειών, ο μειωτικός συντελεστής χ μπορεί να υπολογιστεί από τη Εξίσωση (1-20). Για λόγους αδιαστατοποίησης και ομαδοποίησης των αποτελεσμάτων, θέτουμε:

$$\frac{A}{W_{el}} \cdot e_o = \eta \quad (1-21)$$

οπότε η Εξίσωση (1-20) παίρνει τη μορφή:

$$\bar{\lambda}^2 \cdot \chi^2 - (1 + \bar{\lambda}^2 + \eta) \cdot \chi + 1 = 0 \quad (1-22)$$

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία ως εξίσωση Ayrton-Perry και αποτελεί δευτεροβάθμια πολυωνυμική εξίσωση υπολογισμού του μειωτικού συντελεστή χ αμφιέρειστων ράβδων υπό καθαρή αξονική θλίψη συναρτήσει της ανηγμένης λυγηρότητας και της αδιάστατης παραμέτρου η που εξαρτάται από τη διατομή και το μέγεθος των ατελειών. Αφού υπολογιστεί ο συντελεστής χ , η αντοχή της ράβδου προκύπτει ευχερώς από την Εξίσωση (1-17).

Η παράμετρος η ονομάζεται γενικευμένη αρχική ατέλεια και χρησιμοποιείται για να ληφθεί εμμέσως υπόψη κάθε μορφής αρχική ατέλεια, όπως είναι η αρχική έκκεντρη φόρτιση και οι παραμένουσες τάσεις. Λόγω του ότι η επιρροή μερικών αρχικών ατελειών συσχετίζεται με το μήκος του μέλους έχει καθιερωθεί το η να εκφράζεται ως:

$$\eta = a \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \quad (1-23)$$

όπου a είναι ο συντελεστής ατελειών, εξαρτώμενος από το σχήμα της διατομής, τα πάχη των ελασμάτων της και τον άξονα λυγισμού, ενώ 0.2 είναι η μέγιστη τιμή ανηγμένης λυγηρότητας για την οποία η αστοχία οφείλεται αποκλειστικά σε διαρροή.

Τελικώς λοιπόν, λόγω της Εξίσωσης (1-23), η Εξίσωση (1-22) υπολογισμού του μειωτικού συντελεστή χ γράφεται:

$$\bar{\lambda}^2 \cdot \chi^2 - [1 + a \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \cdot \chi + 1 = 0 \quad (1-24)$$

Εάν ορίσουμε ως συντελεστή Φ το μέγεθος:

Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

$$\Phi = 0.5 \cdot [1 + a \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (1-25)$$

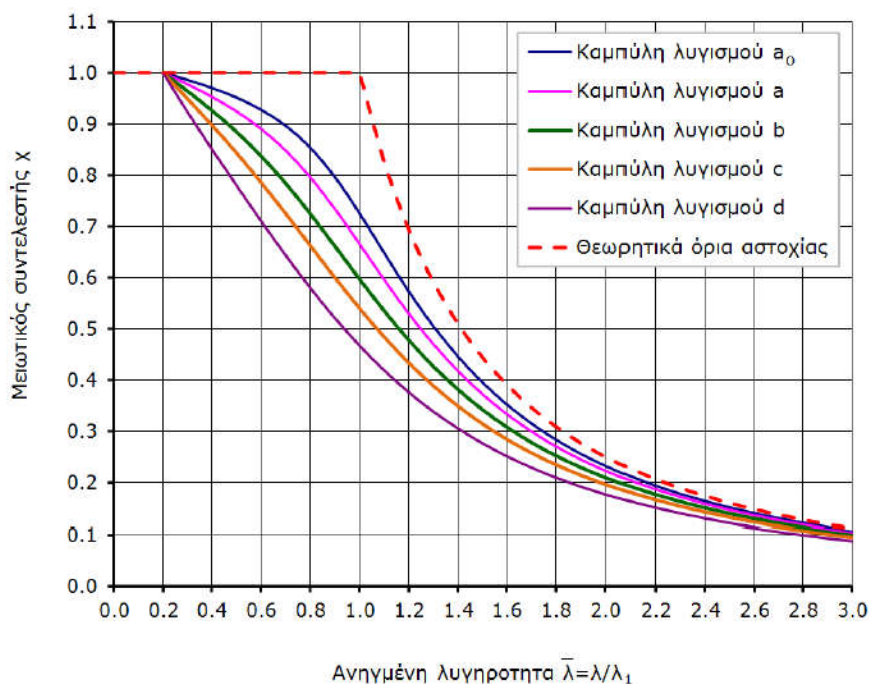
τότε η Εξίσωση (1-24) γίνεται:

$$\bar{\lambda}^2 \cdot \chi^2 - 2 \cdot \Phi \cdot \chi + 1 = 0 \Rightarrow \chi = \frac{1}{(\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2})} \quad (1-26)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις προτείνονται για τον υπολογισμό της αντοχής θλιβόμενων ράβδων από τον Ευρωκώδικα 3, ενώ παρόμοια μορφή έχουν και οι αντίστοιχες διατάξεις άλλων διεθνών κανονισμών. Για διευκόλυνση των μηχανικών έχουν υπολογιστεί τιμές του μειωτικού συντελεστή χ για όλο το εύρος ανηγμένων λυγηροτήτων που απαντώνται στην πράξη και για διάφορες τιμές του συντελεστή ατελειών a , τέτοιων ώστε οι υπολογιζόμενες αντοχές να συμφωνούν ικανοποιητικά με πειραματικά αποτελέσματα. Οι τιμές αυτές του χ είναι διαθέσιμες υπό μορφή πινάκων και διαγραμμάτων, που είναι γνωστά ως καμπύλες λυγισμού. Στο μέρος 1-1 του Ευρωκώδικα 3 (EN1993-1-1) προτείνονται πέντε καμπύλες λυγισμού που αντιστοιχούν στις τιμές συντελεστή ατελειών a του Πίνακα (1-1). Οι καμπύλες αυτές δίνονται σε γραφική μορφή στο Σχήμα (1-8).

Πίνακας 1-1: Συντελεστές ατελειών για καμπύλες λυγισμού Ευρωκώδικα 3

Καμπύλη λυγισμού	a_0	a	b	c	d
Συντελεστής ατελειών a	0.13	0.21	0.34	0.49	0.76

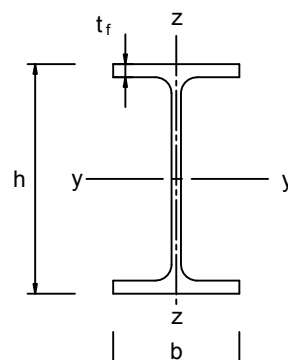
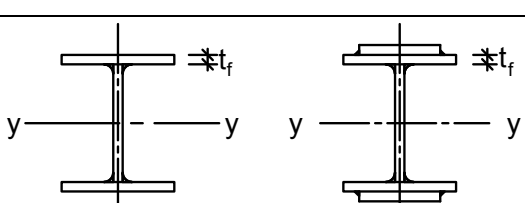
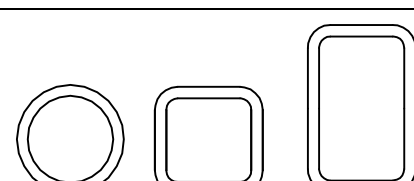


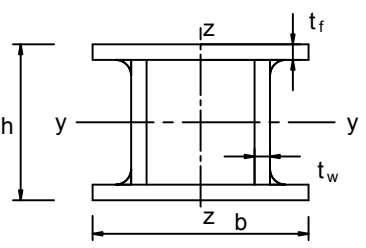
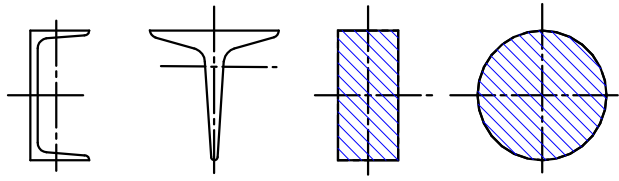
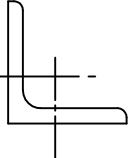
Σχήμα 1-8: Καμπύλες λυγισμού Ευρωκώδικα 3

Για λόγους εποπτείας, στο Σχήμα (1-8) απεικονίζονται με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή τα θεωρητικά όρια της αστοχίας του Σχήματος (1-7), χωρίς δηλαδή να λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των ατελειών. Παρατηρείται ότι για πολύ μικρές τιμές της ανηγμένης λυγηρότητας, οπότε κυριαρχεί η διαρροή, καθώς και για πολύ μεγάλες, οπότε κυριαρχεί ο λυγισμός, οι καμπύλες λυγισμού προσεγγίζουν πολύ καλά τα θεωρητικά όρια αστοχίας. Για ενδιάμεσες τιμές όμως, όπου η αστοχία οφείλεται σε αλληλεπίδραση διαρροής και λυγισμού, φαινόμενο που αναφέρεται και ως ανελαστικός λυγισμός, τα θεωρητικά όρια υπερεκτιμούν την πραγματική αντοχή, και οι καμπύλες λυγισμού είναι αισθητά χαμηλότερα. Η απόκλιση αυτή γίνεται μέγιστη για ανηγμένη λυγηρότητα ίση με 1.

Οι διαφορές μεταξύ των πέντε καμπυλών λυγισμού αποτυπώνουν την διαφορετική ευπάθεια που έχει παρατηρηθεί σε πειραματικές δοκιμές να έχουν διάφορες θλιβόμενες ράβδοι στην αλληλεπίδραση διαρροής και λυγισμού υπό την παρουσία ατελειών. Παράμετροι που επηρεάζουν αυτή την ευπάθεια είναι το είδος και το σχήμα της διατομής, τα πάχη των ελασμάτων της, η ποιότητα του χάλυβα και ο άξονας περί τον οποίο εξετάζεται ο λυγισμός. Η επιλογή της κατάλληλης καμπύλης λυγισμού γίνεται βάσει τον Πίνακα (1-2) του EN1993-1-1, με κριτήριο τη συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα.

Πίνακας 1-2: Επιλογή καμπύλης λυγισμού για έλεγχο αξονικά θλιβόμενων ράβδων σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3

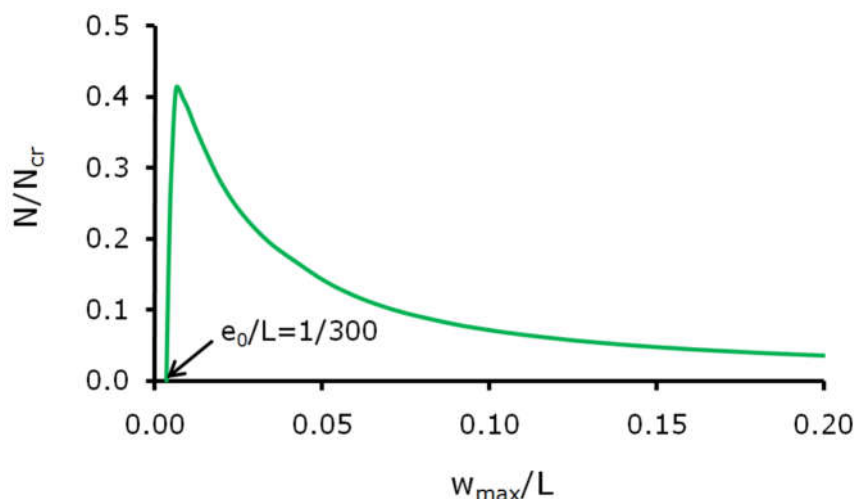
Διατομή		Όρια	Λυγισμός περί τον άξονα	Καμπύλη λυγισμού		
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
Ελαττές διατομές		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	a b	a ₀ a ₀
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y - y z - z	b c	a a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b c	a a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y - y z - z	d d	c c
Συγκολλητές I-διατομές		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	b c	b c	
		$t_f > 40 \text{ mm}$	y - y z - z	c d	c d	
Κοίλες Διατομές		Εν θερμώ έλαση	Κάθε	a	a ₀	
		Ψυχρή έλαση	Κάθε	c	c	

Συγκολλητές κίβωτιοειδείς		Γενικά (εκτός των κατωτέρω)	Κάθε	b	b
		Μεγάλα πάχη ραφής: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	Κάθε	c	c
U-, T- και συμπαγείς			Κάθε	c	c
L-διατομές			Κάθε	b	b

Σημειώνεται ότι οι διαβαθμίσεις στις διάφορες καμπύλες λυγισμού συνδέονται κυρίως με τις παραμένουσες τάσεις, οι οποίες αποτελούν μια πολύ σημαντική μορφή ατέλειας στα χαλύβδινα μέλη. Συγκεκριμένα, η μορφή της διατομής και ο τρόπος κατασκευής της, δηλαδή αν είναι ελατή η συγκολλητή, επηρεάζουν το μέγεθος και την κατανομή των παραμενουσών τάσεων, οι οποίες με τη σειρά τους επηρεάζουν σημαντικά το φορτίο λυγισμού και την αντοχή σε θλίψη. Η επιρροή είναι πολύ εντονότερη για περίπτωση λυγισμού περί τον ασθενή κύριο άξονα αδρανείας της διατομής σε σχέση προς τον ισχυρό. Το πάχος της διατομής, λόγω της διαδικασίας έλασης, επηρεάζει την τιμή της τάσης διαρροής του υλικού. Επισημαίνεται πάντως ότι, κανονιστικά, το σύνολο των ατελειών λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της αντοχής ως μία «ισοδύναμη» αρχική καμπυλότητα, όπως έχει ήδη αναφερθεί κατά τον ορισμό της γενικευμένης αρχικής ατέλειας η.

1.2.8 Μη γραμμικός ανελαστικός λυγισμός ατελούς ράβδου

Για να ληφθούν υπόψη όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν την αστοχία της ράβδου, εκτελούνται τελικώς αναλύσεις τύπου GMNIA, στις οποίες λαμβάνεται υπόψη μη γραμμικότητα τόσο υλικού όσο και γεωμετρίας, καθώς και αρχικές ατέλειες. Ο δρόμος ισορροπίας που προκύπτει παρουσιάζεται στο Σχήμα (1-9). Και πάλι παρατηρείται αρχικά σχετικά γραμμική συμπεριφορά μέχρι ένα οριακό σημείο, ακολουθούμενη από έναν έντονα καθοδικό κλάδο. Επισημαίνεται δηλαδή ότι η αλληλεπίδραση διαρροής και λυγισμού υπό την παρουσία αρχικών ατελειών καταργεί τη μεταλυγισμική αντοχή που χαρακτηρίζει τις ελαστικές θλιβόμενες ράβδους και οδηγεί σε μία συμπεριφορά χαρακτηριζόμενη από οριακό σημείο.



Σχήμα 1-9: Δρόμος ισορροπίας μη γραμμικής ανάλυσης τύπου GMNIA

1.3 Διαστασιολόγηση διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας

1.3.1 Υλικά

Ο δομικός χάλυβας θα πρέπει να συμμορφώνεται με τα πρότυπα στα οποία γίνεται αναφορά στο EN 1993. Η κατανομή των ιδιοτήτων των υλικών, όπως για παράδειγμα το όριο διαρροής και η αντοχή σε κρούση, στον φορέα θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να διαμορφώνονται πλαστικές ζώνες, εκεί όπου προβλέπεται από τον σχεδιασμό. Να σημειωθεί πως οι ζώνες απόδοσης ενέργειας (πλαστικές) αναμένεται να διαρρέουν πριν άλλες ζώνες εγκαταλείψουν την ελαστική περιοχή κατά τη διάρκεια του σεισμού.

Η απαίτηση για τη διαμόρφωση πλαστικών ζωνών μπορεί να ικανοποιηθεί εάν το όριο διαρροής του χάλυβα στις πλαστικές ζώνες και ο σχεδιασμός του φορέα συμμορφώνονται με μια από τις ακόλουθες συνθήκες α), β) ή γ):

α) το πραγματικό μέγιστο όριο διαρροής $f_{y,max}$ του χάλυβα των ζωνών απόδοσης ενέργειας ικανοποιεί την ακόλουθη σχέση $f_{y,max} \leq 1,1 \gamma_{ov} f_y$

όπου

γ_{ov} είναι ο συντελεστής υπεραντοχής που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό, και

f_y είναι το ονομαστικό όριο αντοχής το οποίο καθορίζεται για τον τύπο του χάλυβα.

Όπου για χάλυβες τύπου S235 και με $\gamma_{ov} = 1,25$ η μέθοδος αυτή δίνει μία μέγιστη τιμή του $f_{y,max} = 323 \text{ N/mm}^2$.

β) ο σχεδιασμός του φορέα πραγματοποιείται βάσει ενός μόνο τύπου χάλυβα και ενός ονομαστικού ορίου διαρροής f_y για τους χάλυβες τόσο σε ζώνες απόδοσης ενέργειας όσο και σε ζώνες χωρίς απαιτήσεις πλαστιμότητας (μη πλαστικές). Καθορίζεται μία ανώτερη τιμή $f_{y,max}$ για τον χάλυβα των ζωνών απόδοσης ενέργειας. Η ονομαστική τιμή f_y των χαλύβων που καθορίζεται για ζώνες και συνδέσεις χωρίς απαιτήσεις πλαστιμότητας υπερβαίνει την ανώτερη τιμή του ορίου διαρροής $f_{y,max}$ των ζωνών απόδοσης ενέργειας (Εάν οι όροι στο (3)β του παρόντος υπό-εδαφίου ικανοποιούνται, ο συντελεστής υπεραντοχής γ_{ov} , μπορεί να λαμβάνεται ως 1,00 στους ελέγχους σχεδιασμού των δομικών στοιχείων). Η προηγούμενη συνθήκη αυτή οδηγεί φυσιολογικά στη χρήση χαλύβων του τύπου S355 για μη-πλαστικά

Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

μέλη και μη-πλάστιμες συνδέσεις (σχεδιασμένων βάσει του f_y των χαλύβων S235) και στη χρήση χαλύβων τύπου S235 για πλάστιμα μέλη ή συνδέσεις όπου τα ανώτερα όρια διαρροής των χαλύβων του τύπου S235 περιορίζονται στο $f_{y,max} = 355 \text{ N/mm}^2$.

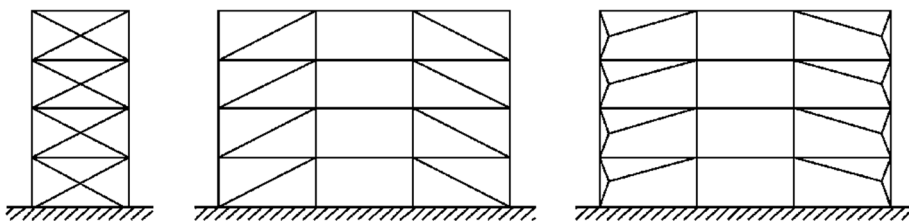
γ) Το πραγματικό όριο διαρροής $f_{y,act}$ του χάλυβα κάθε ζώνης απόδοσης ενέργειας προσδιορίζεται μέσω μετρήσεων και ο συντελεστής υπεραντοχής υπολογίζεται για κάθε ζώνη απόδοσης ενέργειας ως $\gamma_{ov,act} = f_{y,act} / f_y$, με f_y να είναι το ονομαστικό όριο διαρροής του χάλυβα των ζωνών απόδοσης ενέργειας (Εάν οι όροι του (3)ς της παρούσας υποενότητας ικανοποιούνται, ο συντελεστής υπεραντοχής γ_{ov} θα πρέπει να λαμβάνεται ως η μέγιστη τιμή ανάμεσα στις τιμές του $\gamma_{ov,act}$ που υπολογίζονται στους ελέγχους που καθορίζονται στα 6.5 έως 6.8 (EN 1998-1-6)). Η συνθήκη αυτή ισχύει όταν χρησιμοποιούνται γνωστοί τύποι χάλυβα ή για την εκτίμηση υπαρχόντων κτηρίων ή όπου συντηρητικές εκτιμήσεις του ορίου διαρροής στον σχεδιασμό επιβεβαιώνονται από μετρήσεις πριν από την παραγωγή.

Η αντοχή σε κρούση των χαλύβων και των συγκολλήσεων θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις για τη σεισμική δράση στην οριζόντια μόνιμη τιμή της θερμοκρασίας λειτουργικότητας (βλέπε EN 1993-1-10:2004). Επίσης, η απαιτούμενη αντοχή σε κρούση των χαλύβων και των συγκολλήσεων και η χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργικότητας η οποία υιοθετείται σε συνδυασμό με την σεισμική δράση θα πρέπει να ορίζονται στις προδιαγραφές του έργου. Τέλος σε κοχλιωτές συνδέσεις κυρίων αντισεισμικών μελών ενός κτηρίου, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται κοχλίες υψηλής αντοχής ή κοχλίες τύπου 8.8 ή 10.9. Ο έλεγχος των ιδιοτήτων των υλικών θα πρέπει πραγματοποιείται σύμφωνα με το 6.11 (EN1998-1-6).

1.3.2 Στατικό σύστημα – Πλαίσιο με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα

Σε πλαίσια με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα, οι ζώνες απόδοσης ενέργειας θα πρέπει να βρίσκονται κυρίως στις εφελκόμενες διαγώνιους. Οι σύνδεσμοι μπορεί να ανήκουν σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες:

- ενεργοί εφελκόμενοι διαγώνιοι σύνδεσμοι, στους οποίους οι οριζόντιες δυνάμεις μπορούν να παραληφθούν από τις εφελκόμενες διαγώνιους μόνο, αμελώντας τις διαγώνιους σε θλίψη,
- σύνδεσμοι μορφής V, στους οποίους οι οριζόντιες δυνάμεις παραλαμβάνονται τόσο από τις εφελκόμενες όσο και από τις θλιβόμενες διαγώνιους. Το σημείο τομής των διαγώνιων αυτών βρίσκεται σε ένα οριζόντιο μέλος το οποίο θα είναι συνεχές.



Σχήμα 1-10: Πλαίσια με διαγώνιους συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα (ζώνες απόδοσης ενέργειας μόνο σε εφελκόμενες διαγώνιους)

1.3.3 Κανόνες σχεδιασμού και διαμόρφωση λεπτομερειών

1.3.3.1 Κανόνες σχεδιασμού για πλάστιμα στοιχεία σε θλίψη ή κάμψη

Η επαρκής τοπική πλαστιμότητα των μελών τα οποία αποδίδουν ενέργεια υπό θλίψη ή κάμψη θα εξασφαλίζεται με τον περιορισμό του λόγου πλάτους - πάχους b/t σύμφωνα με τις κατηγορίες διατομών οι οποίες ορίζονται στο EN 1993-1-1:2004. Ανάλογα με την κατηγορία πλαστιμότητας και τον συντελεστή q που χρησιμοποιείται κατά τον σχεδιασμό, οι απαιτήσεις οι οποίες αφορούν τις κατηγορίες διατομής των στοιχείων από χάλυβα που αποδίδουν ενέργεια παρουσιάζονται στον Πίνακα (1-3).

Πίνακας 1-3: Απαιτήσεις της κατηγορίας διατομής των πλάστιμων στοιχείων ανάλογα με την Κατηγορία Πλαστιμότητας και τον συντελεστή συμπεριφοράς

Κατηγορία Πλαστιμότητας	Τιμή αναφοράς του συντελεστή συμπεριφοράς q	Απαιτούμενη κατηγορία διατομής
ΚΠΜ	$1,5 < q \leq 2$	κατηγορία 1, 2 ή 3
	$2 < q \leq 4$	κατηγορία 1 ή 2
ΚΠΥ	$q > 4$	κατηγορία 1

1.3.3.2 Κανόνες σχεδιασμού για τμήματα ή στοιχεία σε εφελκυσμό

Για εφελκυσόμενα μέλη ή εφελκυσόμενα τμήματα μελών, θα πρέπει να ικανοποιείται η απαίτηση πλαστιμότητας του EN 1993-1-1:2004, 6.2.3(3).

1.3.3.3 Κανόνες σχεδιασμού για συνδέσεις σε ζώνες απόδοσης ενέργειας

Ο σχεδιασμός των συνδέσεων θα είναι τέτοιος ώστε να περιορίζει την τοπική συγκέντρωση πλαστικών παραμορφώσεων, τις υψηλές τάσεις αποφόρτισης και να αποτρέπει τα ελαττώματα της παραγωγής. Οι μη πλάστιμες συνδέσεις πλάστιμων μελών, οι οποίες πραγματοποιούνται μέσω συγκολλήσεων άκρου πλήρους διείσδυσης θεωρούνται ότι ικανοποιούν το κριτήριο της υπεραντοχής. Για συγκόλληση με παράθεση ή κοχλιωτές μη πλάστιμες συνδέσεις, θα πρέπει να ικανοποιείται η Εξίσωση (1-27):

$$R_d \geq 1,1 \gamma_{ov} R_{fy} \quad (1-27)$$

όπου

R_d είναι η αντοχή της σύνδεσης σύμφωνα με το EN 1993.

R_{fy} είναι η πλαστική αντοχή του συνδεδεμένου πλάστιμου μέλους η οποία βασίζεται στην τάση διαρροής σχεδιασμού του υλικού όπως ορίζεται στο EN 1993.

γ_{ov} είναι ο συντελεστής υπεραντοχής.

Σε διάτμηση θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οι κατηγορίες Β και C των κοχλιωτών συνδέσεων, σύμφωνα με το EN 1993-1-8:2004, 3.4.1 ενώ σε εφελκυσμό η κατηγορία Ε των κοχλιωτών συνδέσεων σύμφωνα με το EN 1993-1-8:2004, 3.4.2. Οι συνδέσεις τέμνουσας με κατάλληλους κοχλίες επιτρέπονται επίσης. Οι επιφάνειες τριβής θα πρέπει να ανήκουν στην κατηγορία Α ή Β όπως ορίζεται στο ENV 1090-1. Για κοχλιωτές συνδέσεις τέμνουσας, η διατμητική αντοχή σχεδιασμού των κοχλιών θα πρέπει να είναι υψηλότερη από 1,2 φορές τη φέρουσα αντοχή σχεδιασμού.

Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσεων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

Η επάρκεια σχεδιασμού θα πρέπει να υποστηρίζεται από στοιχεία από πειράματα· η αντοχή και η πλαστιμότητα των μελών και των συνδέσεων τους υπό ανακυκλική φόρτιση θα πρέπει να υποστηρίζονται από πειραματικά στοιχεία, προκειμένου να συμμορφώνονται με τις ειδικές απαιτήσεις που ορίζονται στα 6.6 έως 6.9 (EN 1998-1-6) για κάθε τύπο φορέα και κατηγορία πλαστιμότητας. Αυτό ισχύει για συνδέσεις πλήρους και μερικής αντοχής που είναι μέσα ή προσκείμενες σε πλαστιμες ζώνες. Τα πειραματικά στοιχεία μπορούν να βασίζονται σε υπάρχοντα δεδομένα. Διαφορετικά, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν δοκιμές.

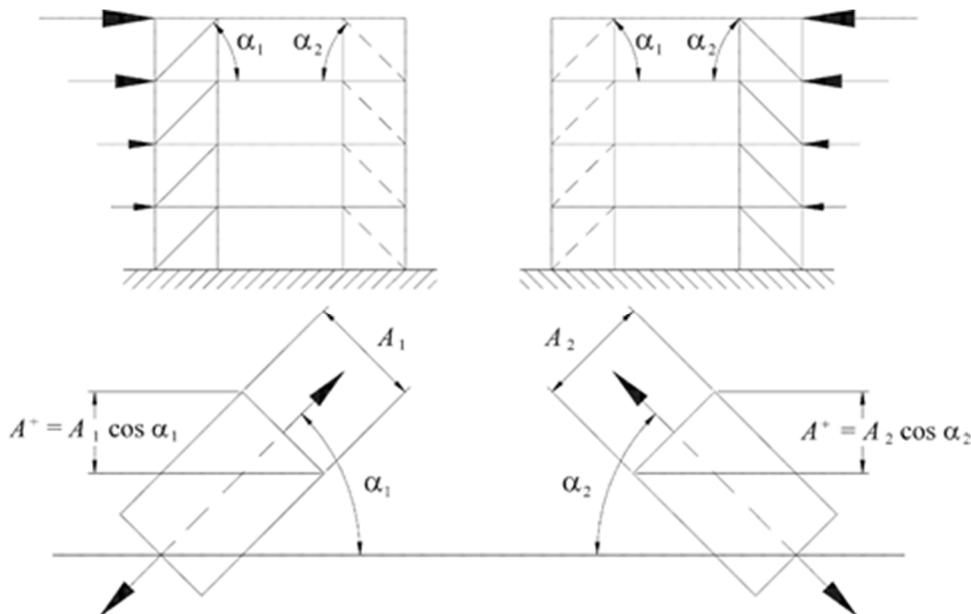
1.3.4 Κανόνες σχεδιασμού και διαμόρφωση λεπτομερειών για πλαίσια με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα

1.3.4.1 Κριτήρια σχεδιασμού

Τα πλαίσια με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα θα σχεδιάζονται έτσι ώστε η διαρροή των εφελκόμενων διαγώνιων να πραγματοποιείται πριν από στην αστοχία των συνδέσεων και πριν από την διαρροή ή τον λυγισμό των δοκών ή των υποστυλωμάτων. Τα διαγώνια στοιχεία των συνδέσεων θα τοποθετούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο φορέας να επιδεικνύει παρεμφερή χαρακτηριστικά καμπτικής παραμόρφωσης σε κάθε όροφο κάτω από τις εναλλασσόμενες κατευθύνσεις καταπόνησης. Προς τούτο, θα πρέπει να ικανοποιείται ο ακόλουθος κανόνας (Εξ. 1-28) για κάθε όροφο:

$$\frac{|A^+ - A^-|}{A^+ + A^-} \leq 0,05 \quad (1-28)$$

όπου A^+ και A^- είναι οι περιοχές των οριζόντιων προβολών των διατομών των εφελκόμενων διαγώνιων, όταν οι οριζόντιες σεισμικές δράσεις έχουν θετική ή αρνητική κατεύθυνση αντίστοιχα (βλέπε Σχήμα 1-11).



Σχήμα 1-11: Παράδειγμα εφαρμογής του 1.2.4.1

1.3.4.2 Ανάλυση

Τα φορτία βαρύτητας θα παραλαμβάνονται μόνο από τις δοκούς και τα υποστυλώματα χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα μέλη των συνδέσμων. Οι διαγώνιοι θα λαμβάνονται υπόψη με τον ακόλουθο τρόπο σε μια ελαστική ανάλυση του φορέα για τη σεισμική δράση:

- στην περίπτωση πλαισίων με διαγώνιους συνδέσμους, θα λαμβάνονται υπόψη μόνο οι εφελκόμενοι διαγώνιοι,
- στην περίπτωση πλαισίων με συνδέσμους σχήματος V, θα λαμβάνονται υπόψη τόσο οι εφελκόμενοι όσο και οι θλιβόμενοι διαγώνιοι.

Το να λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση οποιουδήποτε τύπου συνδέσμων χωρίς εκκεντρότητα τόσο οι εφελκόμενοι όσο και οι θλιβόμενοι διαγώνιοι επιτρέπεται υπό την προϋπόθεση ότι ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες:

- α) χρησιμοποιείται μη-γραμμική στατική (pushover) ανάλυση του συνόλου ή μη γραμμική χρονοϊστορία,
- β) τόσο οι καταστάσεις πριν τον λυγισμό όσο και μετά τον λυγισμό λαμβάνονται υπόψη κατά την προσομοίωση της συμπεριφοράς των διαγώνιων και,
- γ) υπάρχουν κείμενα υποστήριξης που να αιτιολογούν το προσομοίωμα το οποίο χρησιμοποιείται για να αντιπροσωπεύσει την συμπεριφορά των διαγώνιων.

1.3.4.3 Διαγώνια μέλη

Σε πλαίσια με X διαγώνιους συνδέσμους, η αδιάστατη λυγηρότητα $\bar{\lambda}$, όπως ορίζεται στο EN 1993-1-1:2004 θα πρέπει να περιορίζεται σε: $1,3 < \bar{\lambda} \leq 2,0$. Το όριο του 1,3 ορίζεται για να αποφεύγεται η προ του λυγισμού (όταν τόσο οι θλιβόμενοι όσο και οι εφελκόμενοι διαγώνιοι είναι ενεργές) υπερφόρτωση των υποστυλωμάτων πέρα από τα εντατικά μεγέθη που λαμβάνονται από μια ανάλυση στο οριακό στάδιο αστοχίας, όπου λαμβάνεται ως ενεργή μόνο η εφελκόμενη διαγώνιος. Σε πλαίσια με διαγώνιους συνδέσμους στα οποία οι διαγώνιοι δεν είναι τοποθετημένες ως διαγώνιοι σύνδεσμοι X (βλέπε για παράδειγμα το Σχήμα 1-11), η αδιάσταση λυγηρότητα $\bar{\lambda}$ θα πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση με το 2,0. Η αντοχή διαρροής $N_{pl,Rd}$ της συνολικής διατομής των διαγώνιων θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε $N_{pl,Rd} \geq N_{Ed}$.

Οι συνδέσεις των διαγώνιων με οποιοδήποτε άλλο μέλος θα πρέπει να ικανοποιούν τους κανόνες σχεδιασμού του 6.5.5 (EN 1998-1-6). Πλάστιμες ημι-άκαμπτες και/ ή μερικής αντοχής συνδέσεις επιτρέπονται, υπό την προϋπόθεση ότι ικανοποιούνται όλες οι ακόλουθες συνθήκες:

- α) οι συνδέσεις διαθέτουν ικανότητα επιμήκυνσης συμβατή με τις συνολικές παραμορφώσεις,
- β) το αποτέλεσμα των παραμορφώσεων των συνδέσεων στην συνολική σχετική μετακίνηση λαμβάνεται υπόψη χρησιμοποιώντας μη-γραμμική στατική (pushover) ανάλυση του συνόλου ή μη-γραμμική χρονοϊστορία.

1.4 Διαστασιολόγηση των συνδέσεων των διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας

1.4.1 Βασικές Αρχές Σχεδιασμού

1.4.1.1 Παραδοχές

Οι μέθοδοι σχεδιασμού στο παρόν τμήμα του EN 1993 θεωρούν ως δεδομένο ότι οι προδιαγραφές της κατασκευής ταυτίζονται με τις προδιαγραφές εκτέλεσης εργασιών της παραγράφου 2.8 (EN 1993-1-8) καθώς και ότι τα υλικά και οι πρώτες ύλες της κατασκευής ταυτίζονται με εκείνες του EN 1993 ή με τις κατά περίπτωση ισχύουσες προδιαγραφές υλικών και πρώτων υλών.

1.4.1.2 Γενικές απαιτήσεις

Όλοι οι κόμβοι θα πρέπει να έχουν ικανή αντοχή σχεδιασμού ώστε η κατασκευή να είναι σε θέση να ικανοποιεί όλες τις βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού του παρόντος κεφαλαίου και του EN 1993-1-1. Ο Πίνακας (1-4) περιέχει τους επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ_M για τους κόμβους.

Πίνακας 1-4: Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας για κόμβους

Αντοχή μελών και διατομών	γ_{M0} , γ_{M1} και γ_{M2} βλέπε EN 1993-1-1
Αντοχή κοχλιών	γ_{M2}
Αντοχή ήλων	
Αντοχή βλήτρων	
Αντοχή συγκολλήσεων	
Αντοχή ελασμάτων σε σύνθλιψη άντυγας	
Αντοχή σε ολίσθηση - για υβριδικές συνδέσεις ή συνδέσεις καταπονούμενες σε κόπωση - για άλλες περιπτώσεις σχεδιασμού	γ_{M3} γ_{M3}
Αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας κοχλιών με ενέματα	γ_{M4}
Αντοχή κόμβων δικτυωτών δοκών από κοιλοδοκούς	γ_{M5}
Αντοχή βλήτρων στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας	$\gamma_{M6, ser}$
Προένταση κοχλιών υψηλής αντοχής	γ_{M7}
Αντοχή σκυροδέματος	γ_c βλέπε EN 1992

Οι αριθμητικές τιμές για το γ_M μπορούν να καθοριστούν στο Εθνικό Προσάρτημα. Συνιστώμενες τιμές: $\gamma_{M2} = 1,25$, $\gamma_{M3} = 1,25$ για υβριδικές συνδέσεις ή συνδέσεις καταπονούμενες σε κόπωση και $\gamma_{M3} = 1,1$ για άλλες περιπτώσεις σχεδιασμού, $\gamma_{M4} = 1,0$, $\gamma_{M5} = 1,0$, $\gamma_{M6, ser} = 1,0$, $\gamma_{M7} = 1,1$. Οι κόμβοι που καταπονούνται σε κόπωση θα πρέπει να ικανοποιούν και τις απαιτήσεις του EN 1993-1-9.

1.4.1.3 Αντοχή κόμβων

Η αντοχή ενός κόμβου πρέπει να προσδιορίζεται με βάση τις αντοχές των συστατικών μερών του. Για το σχεδιασμό των κόμβων μπορεί να χρησιμοποιηθεί γραμμική ελαστική ή ελαστοπλαστική ανάλυση. Όταν για τη μεταφορά μιας διατμητικής δύναμης χρησιμοποιούνται μέσα σύνδεσης με διαφορετικές δυσκαμψίες, τα μέσα με τη μεγαλύτερη δυσκαμψία πρέπει να σχεδιάζονται για την ανάληψη όλης της δύναμης.

1.4.1.4 Παραδοχές σχεδιασμού

Οι κόμβοι πρέπει να σχεδιάζονται στη βάση μιας λογικής παραδοχής για την κατανομή των εντατικών μεγεθών. Για τον προσδιορισμό της κατανομής πρέπει να χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες παραδοχές:

- (α) υπάρχει ισορροπία μεταξύ των εντατικών μεγεθών που υπολογίζονται στην ανάλυση και των δυνάμεων και ροπών που ασκούνται στους κόμβους,
- (β) κάθε στοιχείο του κόμβου παραλαμβάνει με ασφάλεια τα εντατικά μεγέθη,
- (γ) οι παραμορφώσεις που προκύπτουν από την κατανομή των εντατικών μεγεθών δεν υπερβαίνουν την ικανότητα παραμόρφωσης των μέσων σύνδεσης ή των συγκολλήσεων και των συνδεδόμενων μερών,
- (δ) η κατανομή των εντατικών μεγεθών που υιοθετείται πρέπει να συμφωνεί λογικά με τη σχετική κατανομή δυσκαμψιών στο εσωτερικό του κόμβου,
- (ε) οι παραμορφώσεις που υιοθετούνται από οποιοδήποτε προσομοίωμα σχεδιασμού ελαστοπλαστικής ανάλυσης πρέπει να βασίζονται σε εφικτές στροφές στερεού σώματος και/ή εντός επιπέδου μετακινήσεις και
- (στ) κάθε χρησιμοποιούμενο προσομοίωμα συμμορφώνεται με τα συμπεράσματα πειραματικών αποτελεσμάτων (βλέπε EN 1990)

1.4.1.5 Κόμβοι υποκείμενοι σε διάτμηση και καταπονούμενοι με κρούση, ταλάντωση και/ή αντιστροφή φορτίου

Όταν ένας κόμβος υποκείμενος σε διάτμηση καταπονείται με κρούση ή ισχυρή ταλάντωση πρέπει να χρησιμοποιείται μία από τις ακόλουθες πρακτικές σύνδεσης:

- συγκόλληση
- κοχλίες με μηχανισμούς αποφυγής αποσύνδεσης
- προεντεταμένοι κοχλίες
- κοχλίες με ενέματα
- άλλοι τύποι κοχλιών οι οποίοι αποτρέπουν την μετακίνηση των συνδεδόμενων μερών
- ήλοι.

Όταν δεν επιτρέπεται η ολίσθηση σε έναν κόμβο (επειδή καταπονείται με αντιστροφή του διατμητικού φορτίου ή για οποιοδήποτε άλλο λόγο), πρέπει να χρησιμοποιούνται προεντεταμένοι κοχλίες σε συνδέσεις κατηγορίας B ή C (βλέπε 3.4), εφαρμοσμένοι κοχλίες (βλέπε 3.6.1), ήλοι ή συγκόλληση (EN 1993-1-8). Σε συνδέσμους δυσκαμψίας και/ή συνδέσμους ευστάθειας όμως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοχλίες κατηγορίας A.

1.4.2 Συνδέσεις με κοχλίες

1.4.2.1 Γενικά

Όλοι οι κοχλίες, τα περικόχλια και οι δακτύλιοι πρέπει να ικανοποιούν τα Πρότυπα Αναφοράς: Ομάδα 4 που δίνονται στην 2.8 (EN 1993-1-8). Οι κανόνες του παρόντος Προτύπου ισχύουν για τις κατηγορίες κοχλιών του Πίνακα (1-5). Το όριο διαρροής f_{yb} και η εφελκυστική αντοχή f_{ub} για τις κατηγορίες κοχλιών 4.6, 5.6, 6.8, 8.8 και 10.9 δίνονται στον Πίνακα (1-5). Οι τιμές αυτές πρέπει να επιλέγονται ως χαρακτηριστικές τιμές στο σχεδιασμό.

Πίνακας 1-5: Ονομαστικές τιμές του ορίου διαρροής f_{yb} και της εφελκυστικής αντοχής f_{ub} για κοχλίες

Κατηγορία κοχλία	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	300	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	500	600	800	1000

1.4.2.2 Προεντεταμένοι κοχλίες

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο κοχλιώσεις κατηγορίας 8.8 και 10.9 οι οποίες ικανοποιούν τις απαιτήσεις που δίνονται στην παράγραφο 2.8 Πρότυπα Αναφοράς: Ομάδα 4 για Δομικές Κοχλιώσεις Υψηλής Αντοχής με ελεγχόμενη σύσφιξη, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της 2.8 Πρότυπα Αναφοράς: Ομάδα 7 (EN 1993-1-8).

1.4.2.3 Συνδέσεις διάτμησης

Οι κοχλιωτές συνδέσεις που υπόκεινται σε διάτμηση πρέπει να σχεδιάζονται σύμφωνα με μία από τις ακόλουθες κατηγορίες:

α) Κατηγορία Α: Συνδέσεις άντυνας

Σε αυτή την κατηγορία μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοχλίες κατηγορίας 4.6 μέχρι και 10.9. Δεν απαιτείται προένταση ούτε ειδική επεξεργασία των επιφανειών επαφής. Η μέγιστη διατμητική δύναμη σχεδιασμού δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή σχεδιασμού σε διάτμηση που δίνεται στην 1.3.4, ούτε την αντοχή σχεδιασμού σε σύνθλιψη άντυνας που δίνεται στις 1.3.4 και 1.3.5.

β) Κατηγορία Β: Συνδέσεις ανθεκτικές σε ολίσθηση στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

Σε αυτήν την κατηγορία πρέπει να χρησιμοποιούνται προεντεταμένοι κοχλίες που συμφωνούν με την 1.3.2.2. Δεν επιτρέπεται η εμφάνιση ολίσθησης στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας. Η διατμητική δύναμη σχεδιασμού στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή σε ολίσθηση που δίνεται στην 1.3.6. Η μέγιστη διατμητική δύναμη σχεδιασμού δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή σχεδιασμού σε διάτμηση που δίνεται στην 1.3.4, ούτε την αντοχή σχεδιασμού σε σύνθλιψη άντυνας που δίνεται στις 1.3.4 και 1.3.5.

γ) Κατηγορία C: Συνδέσεις ανθεκτικές σε ολίσθηση στην οριακή κατάσταση αστοχίας

Σε αυτήν την κατηγορία πρέπει να χρησιμοποιούνται προεντεταμένοι κοχλίες που συμφωνούν με την 1.3.2.2. Δεν επιτρέπεται η εμφάνιση ολίσθησης στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Η μέγιστη διατμητική δύναμη σχεδιασμού δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή σε ολίσθηση που δίνεται στην 1.3.6, ούτε την αντοχή σχεδιασμού σε σύνθλιψη άντυνας που δίνεται στις 1.3.4 και 1.3.5. Επιπλέον, για συνδέσεις καταπονούμενες σε εφελκυσμό πρέπει να ελέγχεται η πλαστική αντοχή σχεδιασμού της καθαρής διατομής στην περιοχή των οπών κοχλιών $M_{net,Rd}$ (βλέπε 6.2 του EN 1993-1-1) στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Οι απαιτούμενοι έλεγχοι σχεδιασμού για τις συνδέσεις αυτές συνοψίζονται στον Πίνακα (1-6).

Πίνακας 1-6: Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων

Κατηγορία	Κριτήρια	Παρατηρήσεις
Συνδέσεις διάτμησης		
A άντυγας	$F_{V,Ed} \leq F_{V,Rd}$ $F_{V,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Δεν απαιτείται προένταση. Κατηγορίες κοχλιών από 4.6 μέχρι και 10.9.
B ανθεκτικές σε ολίσθηση στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας	$F_{V,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{V,Ed} \leq F_{V,Rd}$ $F_{V,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Προεντεταμένοι κοχλίες κατηγορίας 8.8 ή 10.9.
C ανθεκτικές σε ολίσθηση στην οριακή κατάσταση αστοχίας	$F_{V,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{V,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $F_{V,Ed} \leq M_{net,Rd}$	Προεντεταμένοι κοχλίες κατηγορίας 8.8 ή 10.9. $M_{net,Rd}$ βλέπε EN 1993-1-1

1.4.3 Διάταξη οπών για κοχλίες και ήλους

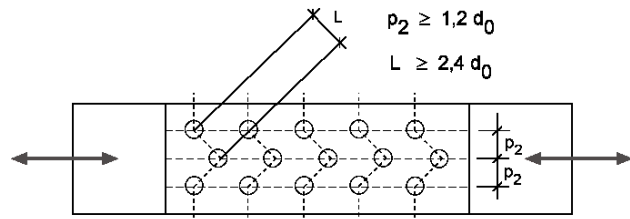
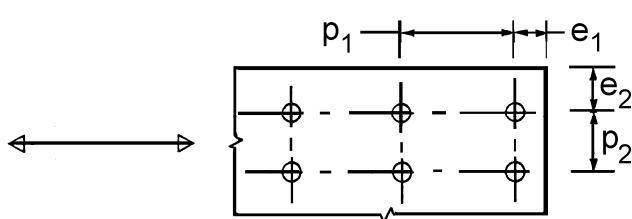
Οι μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις που επιτρέπονται μεταξύ κοχλιών και ήλων και οι αποστάσεις από τα άκρα δίνονται στον Πίνακα (1-7). Για τις μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ κοχλιών και ήλων και τις αποστάσεις από τα άκρα για κατασκευές που καταπονούνται σε κόπωση θα πρέπει να ακολουθείται ο EN 1993-1-9.

Πίνακας 1-7: Μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ κοχλιών και ήλων και από τα άκρα

	Ελάχιστη	Μέγιστη ^{1) 2) 3)}		
		Κατασκευές από χάλυβες που συμφωνούν με το EN 10025 εκτός εκείνων που συμφωνούν με το EN 10025-5	Χάλυβας εκτεθειμένος σε καιρικές συνθήκες ή άλλα διαβρωτικά περιβάλλοντα	Χάλυβας μη εκτεθειμένος
Απόσταση από άκρο e_1	$1,2d_0$	$4t + 40 \text{ mm}$		Η μεγαλύτερη από $8t$ ή 125 mm
Απόσταση από άκρο e_2	$1,2d_0$	$4t + 40 \text{ mm}$		Η μεγαλύτερη από $8t$ ή 125 mm
Απόσταση e_3 σε επιμήκειες οπές	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Απόσταση e_4 σε επιμήκειες οπές	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Βήμα ρ_1	$2,2d_0$	Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm	Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm	Η μικρότερη από $14t_{\min}$ ή 175 mm
Βήμα $\rho_{1,0}$		Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm		
Βήμα $\rho_{1,i}$		Η μικρότερη από $28t$ ή 400 mm		
Βήμα ρ_2 ⁵⁾	$2,4d_0$	Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm	Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm	Η μικρότερη από $14t_{\min}$ ή 175 mm

Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσεων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

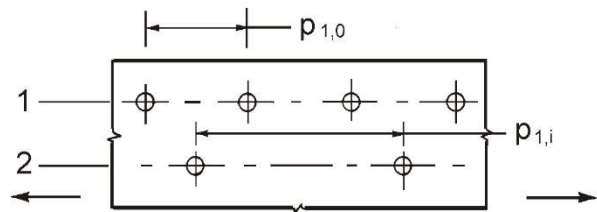
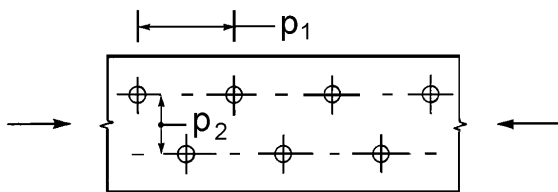
- 1) Η μέγιστη τιμή για τις αποστάσεις μεταξύ κοχλιών και ήλων και τις αποστάσεις από τα άκρα δεν έχει περιορισμό, εκτός από τις ακόλουθες περιπτώσεις:
 - σε θλιβόμενα μέλη προκειμένου να αποφευχθεί ο τοπικός λυγισμός και η διάβρωση των εκτεθειμένων μελών και
 - σε εφελκυσόμενα εκτεθειμένα μέλη προκειμένου να αποφευχθεί η διάβρωση.
- 2) Η αντοχή σε τοπικό λυγισμό του θλιβόμενου ελάσματος μεταξύ των μέσων σύνδεσης πρέπει να υπολογίζεται σύμφωνα με το EN 1993-1-1 χρησιμοποιώντας $0,6 p_1$ ως μήκος λυγισμού. Ο τοπικός λυγισμός μεταξύ των μέσων σύνδεσης δεν χρειάζεται να ελεγχθεί αν ο λόγος p_1/t είναι μικρότερος από 9ε . Η απόσταση από τα πλευρικά άκρα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα όρια που τίθενται από τις απαιτήσεις τοπικού λυγισμού σε ένα προεξέχον στοιχείο των θλιβόμενων μελών, βλέπε EN 1993-1-1. Η απόσταση από τα άλλα άκρα δεν περιορίζεται από την τελευταία απαίτηση.
- 3) t είναι το πάχος του λεπτότερου εξωτερικά συνδεόμενου μέρους.
- 4) Σε μέσα σύνδεσης τοποθετημένα σε λοξή διάταξη η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των γραμμών κοχλίωσης που πρέπει να χρησιμοποιείται είναι $p_2 = 1,2 d_0$ με την προϋπόθεση ότι η απόσταση L μεταξύ δύο οποιωνδήποτε μέσων σύνδεσης είναι μεγαλύτερη από $2,4 d_0$ (βλέπε Σχήμα 1-12β).



Μέσα σύνδεσης σε λοξή διάταξη

α) Σύμβολα για τις αποστάσεις των μέσων σύνδεσης

β) Σύμβολα για τις αποστάσεις σε λοξή διάταξη



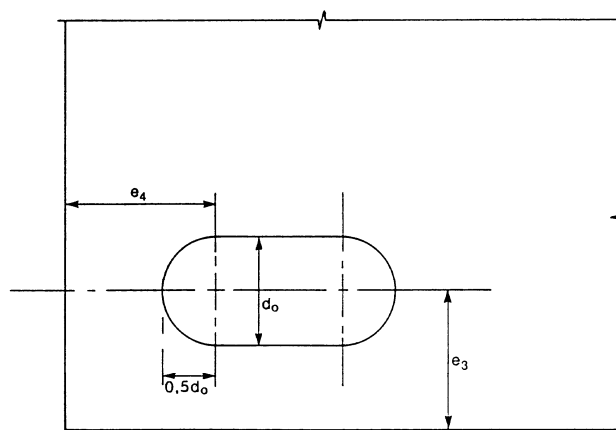
$p_1 \leq 14 t$ και $\leq 200 \text{ mm}$ $p_2 \leq 14 t$ και $\leq 200 \text{ mm}$

$p_{1,0} \leq 14 t$ και $\leq 200 \text{ mm}$ $p_{1,i} \leq 28 t$ και $\leq 400 \text{ mm}$

1 εξωτερική γραμμή 2 εσωτερική γραμμή

γ) Αποστάσεις σε λοξή διάταξη – θλίψη

δ) Αποστάσεις σε εφελκυσόμενα στοιχεία



ε) Αποστάσεις από τα άκρα για επιμήκεις οπές

Σχήμα 1-12: Σύμβολα για τις αποστάσεις από τα άκρα και τις αποστάσεις μεταξύ των μέσων σύνδεσης

1.4.4 Αντοχή σχεδιασμού μεμονωμένων μέσων σύνδεσης

1.4.4.1 Κοχλίες και ήλοι

Η αντοχή σχεδιασμού ενός μεμονωμένου κοχλίου ή ήλου που υπόκειται σε διάτμηση και/ή εφελκυσμό δίνεται στον Πίνακα (1-8). Για προεντεταμένους κοχλίες σύμφωνα με την 1.3.2.2 η δύναμη προέντασης σχεδιασμού, $F_{p,Cd}$, που πρέπει να χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς είναι:

$$F_{p,Cd} = 0,7 f_{ub} A_s / \gamma_{M7} \quad (1-29)$$

Οι αντοχές σχεδιασμού σε εφελκυσμό και σε διάτμηση του σπειρώματος ενός κοχλίου που δίνονται στον Πίνακα (1-8) πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο για κοχλίες που κατασκευάζονται σύμφωνα με την 2.8 Πρότυπα Αναφοράς: Ομάδα 4 (EN 1993-1-8). Για κοχλίες με αποκοπώμενο σπείρωμα, όπως αγκύρια ή ελκυστήρες που κατασκευάζονται από κυκλικές μεταλλικές ράβδους και το σπείρωμα συμφωνεί με το EN1090, πρέπει να χρησιμοποιούνται οι σχετικές τιμές του Πίνακα (1-8). Για κοχλίες με αποκοπώμενο σπείρωμα, το οποίο δεν συμφωνεί με το EN1090 (αν για παράδειγμα κατασκευάζεται από το σιδηροκατασκευαστή και όχι από εξειδικευμένο παραγωγό κοχλιών) οι σχετικές τιμές του Πίνακα (1-8) πρέπει να πολλαπλασιάζονται με ένα συντελεστή 0,85.

Η αντοχή σχεδιασμού σε διάτμηση $F_{v,Rd}$ που δίνεται στον Πίνακα (1-8) πρέπει να χρησιμοποιείται για κοχλίες που τοποθετούνται σε οπές με ονομαστικά διάκενα τα οποία δεν υπερβαίνουν τα όρια για κανονικές οπές όπως καθορίζονται στην 2.8 Πρότυπα Αναφοράς: Ομάδα 7 (EN 1993-1-8).

Κοχλίες M12 και M14 μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οπές με διάκενο 2 mm με την προϋπόθεση ότι η αντοχή σχεδιασμού της ομάδας κοχλιών σε σύνθλιψη άντυγας είναι μεγαλύτερη ή ίση της αντοχής σε διάτμηση. Επιπλέον για τις κατηγορίες κοχλιών 4.8, 5.8, 6.8, 8.8 και 10.9 η αντοχή σχεδιασμού σε διάτμηση $F_{v,Rd}$ πρέπει να μειώνεται από την τιμή που δίνεται στον Πίνακα 1-8 επί ένα συντελεστή 0,85.

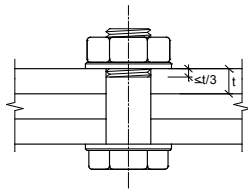
Οι εφαρμοσμένοι κοχλίες πρέπει να σχεδιάζονται με την ίδια μέθοδο όπως οι κοχλίες σε κανονικές οπές. Το σπείρωμα των εφαρμοσμένων κοχλιών δεν πρέπει να τέμνεται από το επίπεδο διάτμησης. Το μήκος του σπειρώματος ενός εφαρμοσμένου κοχλίου που συμμετέχει στη σύνθλιψη της άντυγας δεν πρέπει να

υπερβαίνει το 1/3 του πάχους του ελάσματος, βλέπε Σχήμα (1-13). Στην περίπτωση κοχλιών κατηγορίας 8.8 ή 10.9, πρέπει να χρησιμοποιούνται σκληρημένοι δακτύλιοι για κόμβους απλής επικάλυψης με ένα μόνο κοχλία ή μία μόνο σειρά κοχλιών.

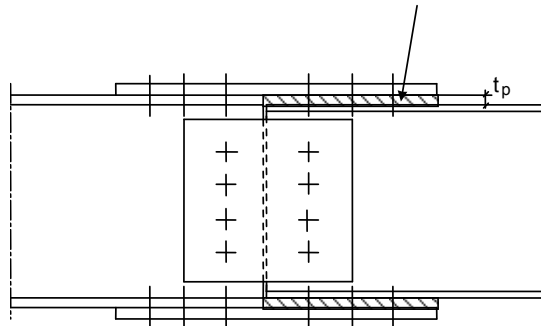
Όταν οι κοχλίες ή οι ήλοι που μεταφέρουν φορτίο από διάτμηση ή σύνθλιψη άντυγας διέρχονται μέσα από υποθέματα συνολικού πάχους t_p μεγαλύτερου από το ένα τρίτο της ονομαστικής τους διαμέτρου d , βλέπε Σχήμα (1-15), η αντοχή σχεδιασμού σε διάτμηση $F_{v,Rd}$ που υπολογίζεται από τον Πίνακα (1-8), πρέπει να πολλαπλασιάζεται επί ένα μειωτικό συντελεστή β_p ίσο με:

$$\beta_p = \frac{9d}{8d + 3t_p} \quad \text{αλλά } \beta_p \leq 1 \quad (1-30)$$

Σε συνδέσεις με δύο επίπεδα διάτμησης με υποθέματα και στις δύο πλευρές της ένωσης, ως πάχος t_p πρέπει να λαμβάνεται το μεγαλύτερο από τα δύο.



Σχήμα 1-13: Τμήμα του κορμού με σπείρωμα στην άντυγα για εφαρμοσμένους κοχλίες



Σχήμα 1-14: Μέσα σύνδεσης διερχόμενα από υποθέματα

Πίνακας 1-8: Αντοχή σχεδιασμού μεμονωμένων μέσων σύνδεσης που υπόκεινται σε διάτμηση και/ή εφελκυσμό

Μηχανισμός αστοχίας	Κοχλίες	Ήλιοι
Αντοχή σε διάτμηση ανά επίπεδο διάτμησης	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$ <p>- όταν το επίπεδο διάτμησης διέρχεται από το σπείρωμα του κοχλία (A είναι η επιφάνεια ενεργού διατομής του κοχλία, A_s):</p> <p>- για κατηγορίες 4.6, 5.6 και 8.8: $\alpha_v = 0,6$</p> <p>- για κατηγορίες 4.8, 5.8, 6.8 και 10.9: $\alpha_v = 0,5$</p> <p>- όταν το επίπεδο διάτμησης διέρχεται από την πλήρη διατομή του κοχλία (A είναι η καθαρή επιφάνεια κοχλία): $\alpha_v = 0,6$</p>	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
Αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας 1), 2), 3)	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}}, \quad \text{όπου } a_b \text{ το μικρότερο από } a_d \text{ ή } \frac{f_{ub}}{f_u} \text{ ή } 1,0$ <p>Κατά τη διεύθυνση μεταφοράς του φορτίου:</p> <p>- για τελευταία σειρά κοχλιών: $a_d = \frac{e_1}{3d_0}$, για εσωτερικούς κοχλίες: $a_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$</p> <p>- για πλευρικά ακραίους κοχλίες: k_1 το μικρότερο από $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ ή $2,5$</p> <p>- για εσωτερικούς κοχλίες: k_1 το μικρότερο από $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ ή $2,5$</p>	
Αντοχή σε εφελκυσμό ²⁾	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$ <p>όπου $k_2 = 0,63$ για κοχλία βυθισμένης κεφαλής, αλλιώς $k_2 = 0,9$.</p>	$F_{t,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
Αντοχή σε διάτρηση	$B_{p,Rd} = 0,6 n d_m t_p f_u / \gamma_{M2}$	Δεν απαιτείται έλεγχος
Ταυτόχρονη διάτμηση και εφελκυσμός	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0$	

Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

- 1) Η αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας $F_{b,Rd}$ κοχλιών
- σε υπερμεγέθεις οπές είναι το 80% της αντοχής σε σύνθλιψη άντυγας κοχλιών σε κανονικές οπές.
 - σε επιμήκειες οπές, όπου ο διαμήκης άξονας της οπής είναι κάθετος στη διεύθυνση μεταφοράς του φορτίου, είναι το 60% της αντοχής σε σύνθλιψη άντυγας κοχλιών σε κανονικές οπές.
- 2) Για κοχλίες βυθισμένης κεφαλής:
- η αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας $F_{b,Rd}$ πρέπει να υπολογίζεται με βάση πάχος ελάσματος t ίσο με το πλάτος του συνδεόμενου ελάσματος μείον το μισό της βύθισης .
 - για τον προσδιορισμό της αντοχής σε εφελκυσμό $F_{t,Rd}$ η γωνία και το ύψος της βύθισης πρέπει να συμφωνούν με την 2.8 Πρότυπα Αναφοράς: Ομάδα 4 (EN 1993-1-8), διαφορετικά η αντοχή σε εφελκυσμό πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα.
- 3) Όταν το φορτίο σε έναν κοχλία δεν είναι παράλληλο προς την ακμή του μέλους, η αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας μπορεί να ελέγχεται χωριστά για τις συνιστώσες του φορτίου που είναι παράλληλες και κάθετες προς την ακμή.

1.4.5 Ομάδες μέσωσών σύνδεσης

Η αντοχή σχεδιασμού ομάδων μέσωσών σύνδεσης μπορεί να ληφθεί ως το άθροισμα των αντοχών σχεδιασμού σε σύνθλιψη άντυγας $F_{b,Rd}$ των μεμονωμένων μέσωσών σύνδεσης, με την προϋπόθεση ότι η αντοχή σχεδιασμού σε διάτμηση $F_{v,Rd}$ κάθε μεμονωμένου μέσου σύνδεσης είναι μεγαλύτερη ή ίση με την αντοχή σχεδιασμού σε σύνθλιψη άντυγας $F_{b,Rd}$. Διαφορετικά, η αντοχή σχεδιασμού της ομάδας πρέπει να λαμβάνεται ίση με το πλήθος των μέσωσών σύνδεσης πολλαπλασιαζόμενο με τη μικρότερη αντοχή σχεδιασμού οποιουδήποτε μέσου σύνδεσης.

1.4.6 Συνδέσεις ανθεκτικές σε ολίσθηση με κοχλίες κατηγορίας 8.8 ή 10.9

1.4.6.1 Αντοχή σχεδιασμού σε ολίσθηση

Η αντοχή σχεδιασμού σε ολίσθηση ενός προεντεταμένου κοχλία κατηγορίας 8.8 ή 10.9 πρέπει να λαμβάνεται ίση με:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C} \quad (1-31)$$

όπου:

- k_s δίνεται στον Πίνακα (1-9)
- n είναι ο αριθμός των επιφανειών τριβής
- μ είναι ο συντελεστής ολίσθησης, ο οποίος μπορεί να προσδιοριστεί είτε μέσω δοκιμών της επιφάνειας τριβής σύμφωνα με την 2.8 Πρότυπα Αναφοράς: Ομάδα 7 (EN 1993-1-8) ή από τις τιμές του Πίνακα (1-10)

Για τις κατηγορίες κοχλιών 8.8 και 10.9 σύμφωνα με την 2.8 Πρότυπα Αναφοράς: Ομάδα 4, με ελεγχόμενη σύσφιξη σύμφωνα με την 2.8 Πρότυπα Αναφοράς: Ομάδα 7 (EN 1993-1-8), η δύναμη προέντασης $F_{p,C}$ στην Εξίσωση (1-31) πρέπει να λαμβάνεται ίση με:

$$F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s \quad (1-32)$$

Πίνακας 1-9: Τιμές του k_s

Περιγραφή	k_s
Κοχλίες σε κανονικές οπές	1,0
Κοχλίες σε υπερμεγέθεις οπές ή σε βραχείες επιμήκεις οπές με το διαμήκη άξονα κάθετο στη διεύθυνση μεταφοράς του φορτίου	0,85
Κοχλίες σε μακρές επιμήκεις οπές με το διαμήκη άξονα κάθετο στη διεύθυνση μεταφοράς του φορτίου	0,7
Κοχλίες σε βραχείες επιμήκεις οπές με το διαμήκη άξονα παράλληλο στη διεύθυνση μεταφοράς του φορτίου	0,76
Κοχλίες σε μακρές επιμήκεις οπές με το διαμήκη άξονα παράλληλο στη διεύθυνση μεταφοράς του φορτίου	0,63

Πίνακας 1-10: Συντελεστής ολίσθησης μ για προεντεταμένους κοχλίες

Κατηγορία επιφανειών τριβής (βλέπε 2.8 Πρότυπα Αναφοράς: Ομάδα 7(EN 1993-1-8))	Συντελεστής ολίσθησης μ
A	0,5
B	0,4
C	0,3
D	0,2

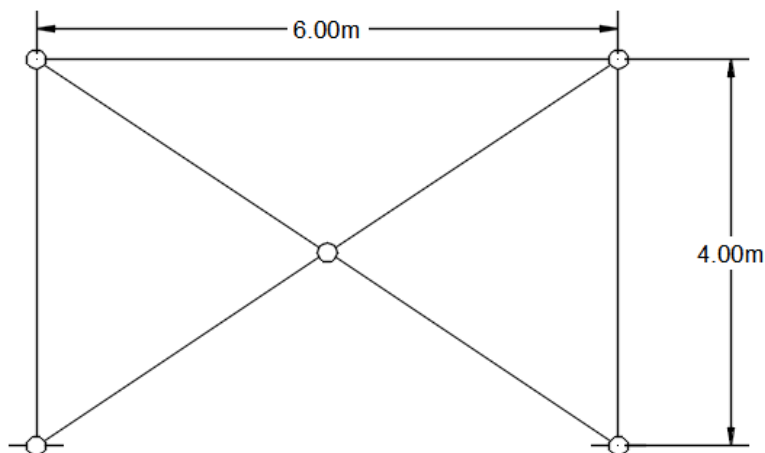
2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΟΥ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό, το δεύτερο, κεφάλαιο της εργασίας εξετάζεται η συμπεριφορά ενός συστήματος κεντρικών διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας (υποστυλώματα-δοκός-διαγώνιοι σύνδεσμοι). Συγκεκριμένα, με χρήση του λογισμικού ADINA, προσομοιώνεται το σύστημα με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία (beam elements) και πραγματοποιούνται μη-γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού. Επιπλέον, εξετάζεται και η επιρροή του σχήματος (ανάλογα με την ιδιομορφή) της επιβαλλόμενης ατέλειας για δεδομένο μέγεθος ατέλειας.

2.2 Γεωμετρία

Ο φορέας που εξετάζεται είναι ένα φάτνωμα (υποστύλωμα-δοκός-υποστύλωμα) με διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας. Όλα τα μέλη είναι μεταλλικά. Το μήκος του φαντώματος είναι 6.00m και το ύψος 4.00m.



Σχήμα 2-1: Γεωμετρία φαντώματος

Στο Σχήμα (2-1) φαίνεται η γεωμετρία του φορέα υπό την προϋπόθεση ότι προσομοιώνεται με στοιχεία δοκού (beam elements).

2.3 Χαρακτηριστικά υλικού

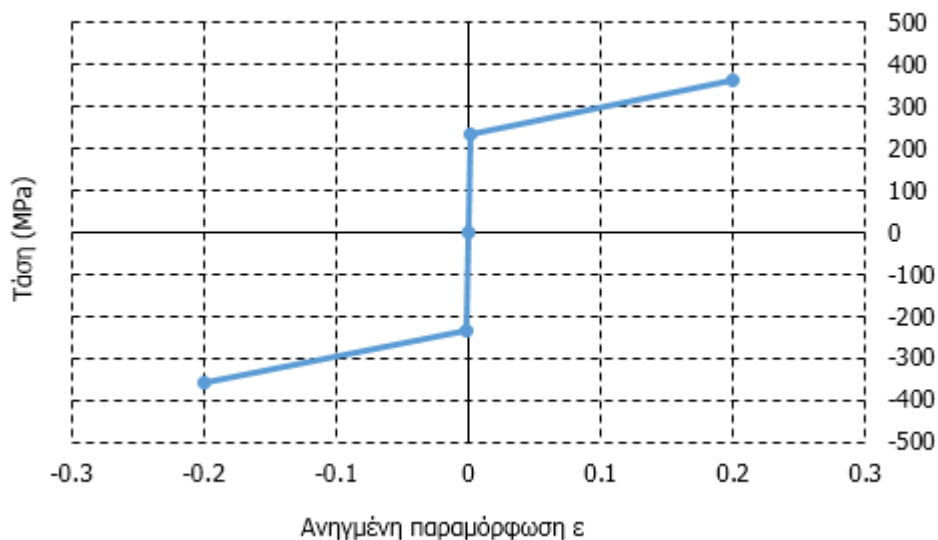
Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι είναι ελαστικός χάλυβας για τη δοκό και τα υποστυλώματα και ελαστοπλαστικός (γραμμικά κρατυνόμενος) χάλυβας για τα διαγώνια μέλη με τα χαρακτηριστικά που φαίνονται παρακάτω (Πίνακας (2-1) και Πίνακας (2-2)).

Πίνακας 2-1: Χαρακτηριστικά ελαστικού υλικού (δοκός-υποσύλωμα)

Συμβατικό όριο διαρροής	355MPa
Μέτρο ελαστικότητας E	210GPa
Λόγος Poisson ν	0.3
Πυκνότητα ρ	7850kg/m ³

Πίνακας 2-2: Χαρακτηριστικά ελαστοπλαστικού υλικού (διαγώνιος σύνδεσμος)

Συμβατικό όριο διαρροής	235MPa
Μέτρο ελαστικότητας E	210GPa
Λόγος Poisson ν	0.3
Πυκνότητα ρ	7850kg/m ³
Μέτρο κράτυνσης E	600MPa



Διάγραμμα 2-1: Νόμος ελαστοπλαστικού χάλυβα

2.4 Διατομές

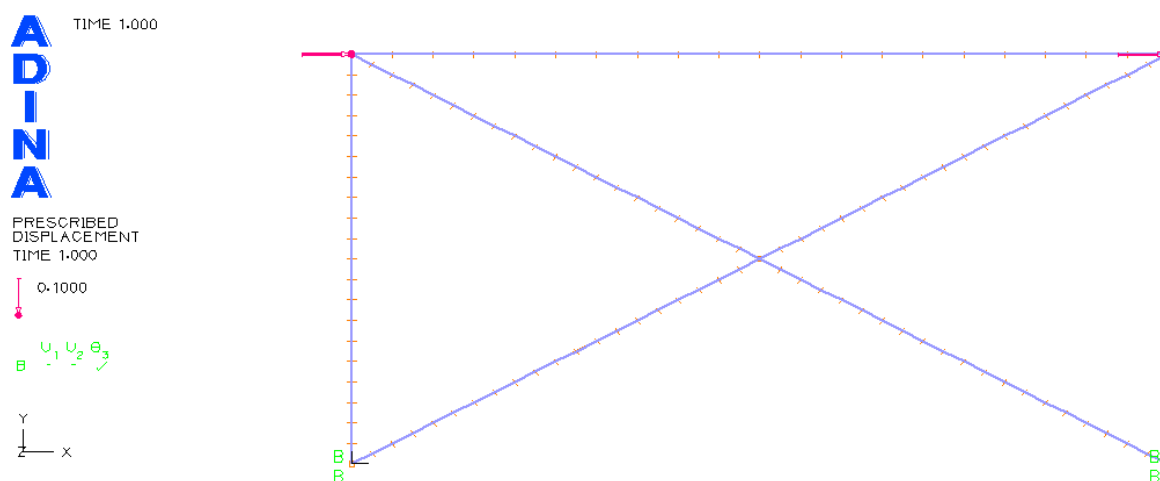
Οι διατομές που χρησιμοποιήθηκαν στο φορέα είναι πρότυπες μεταλλικές και φαίνονται παρακάτω (Πίνακας (2-3)):

Πίνακας 2-3: Διατομές μελών

Δοκός	HEB 260
Υποστύλωμα	HEB 260
Διαγώνιος σύνδεσμος	CHS 0.0889x0.005

2.5 Μοντέλο φορέα

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το υπολογιστικό πακέτο ADINA. Χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία δοκού (beam elements) με τις κατάλληλες ελευθερώσεις. Όλες οι ενδιάμεσες συνδέσεις καθώς και οι στηρίξεις στο έδαφος είναι αρθρώσεις. Στο φορέα επιβάλλονται οριζόντιες μετακινήσεις στις κορυφές των υποστυλωμάτων όπως φαίνονται στο Σχήμα (2-2).



Σχήμα 2-2: Μοντέλο φορέα στο λογισμικό ADINA

2.6 Υπολογισμός ανηγμένων λυγηρότητων

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι ανηγμένες λυγηρότητες για διάφορες CHS διατομές. Οι τιμές της ανηγμένης λυγηρότητας που υπολογίστηκαν κυμαίνονται από 0.2 έως 2.5. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι αυτή που φαίνεται παρακάτω.

Πρώτα υπολογίζεται το ελαστικό κρίσιμο φορτίο λυγισμού (Εξ. (2-1)):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \quad (2-1)$$

Όπου:

Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

το L_{cr} εδώ είναι ίσο με το πραγματικό απόλυτο μήκος του αμφιαρθρωτού μας μέλους και ίσο με 3.6055m.

E το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα (210 GPa)

I ροπή αδρανείας της διατομής

Και στη συνέχεια υπολογίζεται (Εξ. (2-2)) και η ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{P_{cr}}} \quad (2-2)$$

Όπου:

A το εμβαδό της διατομής και f_y η τάση διαρροής του υλικού

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα ανηγμένης λυγηρότητας στον Πίνακα (2-4) για τις διάφορες διατομές.

Πίνακας 2-4: Ανηγμένες λυγηρότητες διατομών

Διατομή χιαστί συνδέσμου	Ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}$
CHS 0.0483x0.005	2.484815146
CHS 0.0603x0.004	1.921790052
CHS 0.0761x0.002	1.463575415
CHS 0.0889x0.005	1.310547602
CHS 0.1016x0.002	1.089104393
CHS 0.1143x0.002	0.96724835
CHS 0.1397x0.0025	0.790689927
CHS 0.2191x0.004	0.503918896
CHS 0.2445x0.005	0.452678238
CHS 0.3239x0.005	0.340157754
CHS 0.508x0.006	0.216046457

2.7 Υπολογισμός αρχικών ατελειών

Η τιμή της αρχικής ατέλειας υπολογίζεται σύμφωνα με τη εξίσωση (2-3):

$$e_o = a(\bar{\lambda} - 0.2) \left(\frac{W_{el}}{A} \right) \quad (2-3)$$

Στον Πίνακα (2-5) παρουσιάζεται η επιβαλλόμενη ατέλεια για τις διάφορες διατομές.

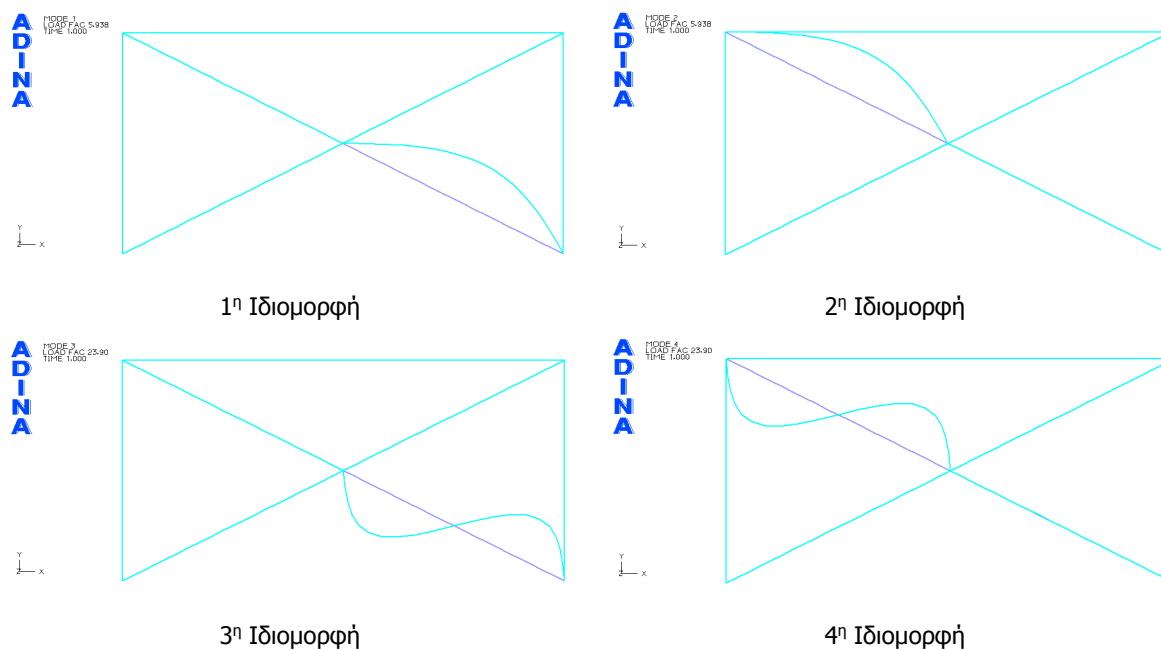
Πίνακας 2-5: Αρχικές ατέλειες διατομών

Διατομή χιαστί συνδέσμου	Αρχική ατέλεια ex (mm)
CHS 0.0483x0.005	6.127834251
CHS 0.0603x0.004	6.183612163
CHS 0.0761x0.002	6.199798032
CHS 0.0889x0.005	5.890959707
CHS 0.1016x0.002	5.900805108
CHS 0.1143x0.002	5.753688678
CHS 0.1397x0.0025	5.409311473
CHS 0.2191x0.004	4.369032549
CHS 0.2445x0.005	4.033675761
CHS 0.3239x0.005	2.991139536
CHS 0.508x0.006	0.601672136

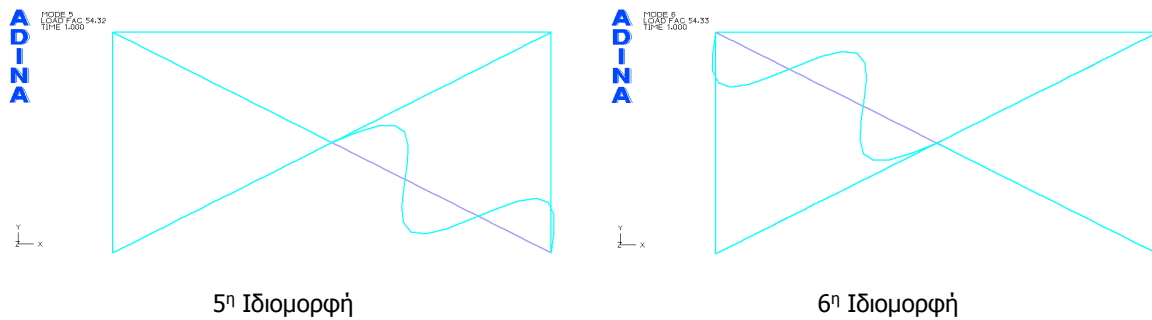
2.8 Ανάλυση LBA (2D)

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού. Στον φορέα ασκήθηκε αρχική μετακίνηση κορυφής σε κάθε υποστύλωμα. Στον Πίνακα (2-6) παρουσιάζονται οι ιδιομορφές του φορέα.

Πίνακας 2-6: Ιδιομορφές 2D φορέα



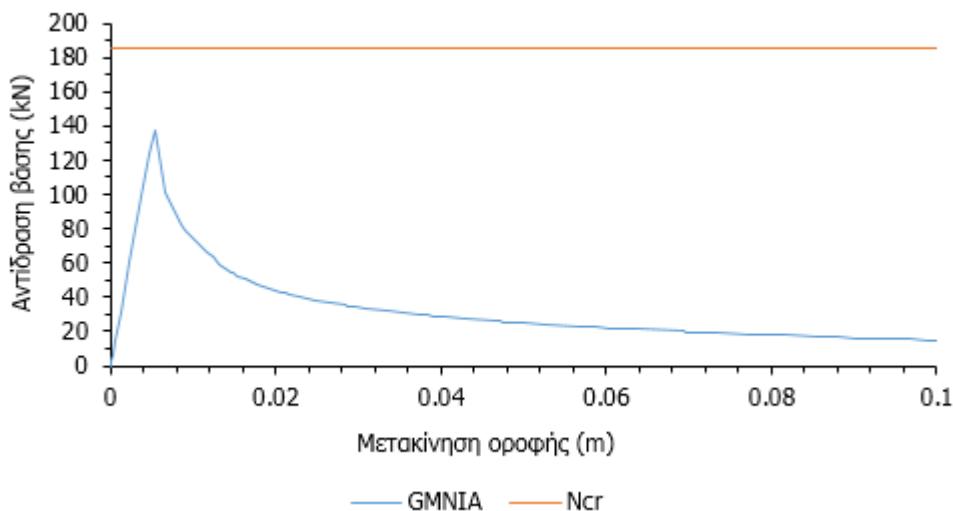
Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων



Παρατηρείται πως οι δύο πρώτες ιδιομορφές του συστήματος αντιστοιχούν στην πρώτη ιδιομορφή θλιβόμενης αμφιαρθρωτής ράβδου και οι επόμενες δύο στη δεύτερη ιδιομορφή θλιβόμενης αμφιαρθρωτής ράβδου.

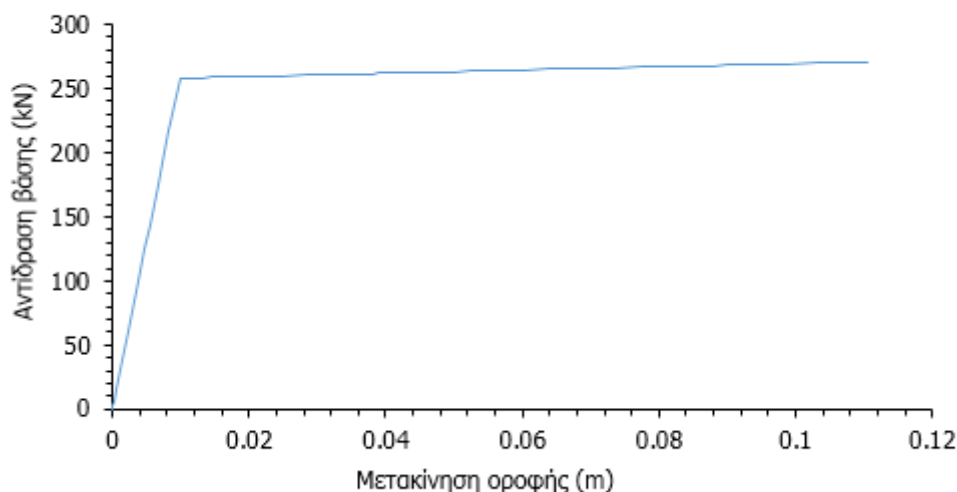
2.9 Ανάλυση GMNIA

Για να μελετηθεί η ακριβής συμπεριφορά του συστήματος πραγματοποιήθηκαν μη-γραμμικές ανελαστικές αναλύσεις με ατέλεια. Η φόρτιση είναι στατική μονοτονική και ασκήθηκε σαν εξωτερική μετακίνηση. Η αρχική ατέλεια δώθηκε στο φορέα κατά το σχήμα της πρώτης ιδιομορφής.



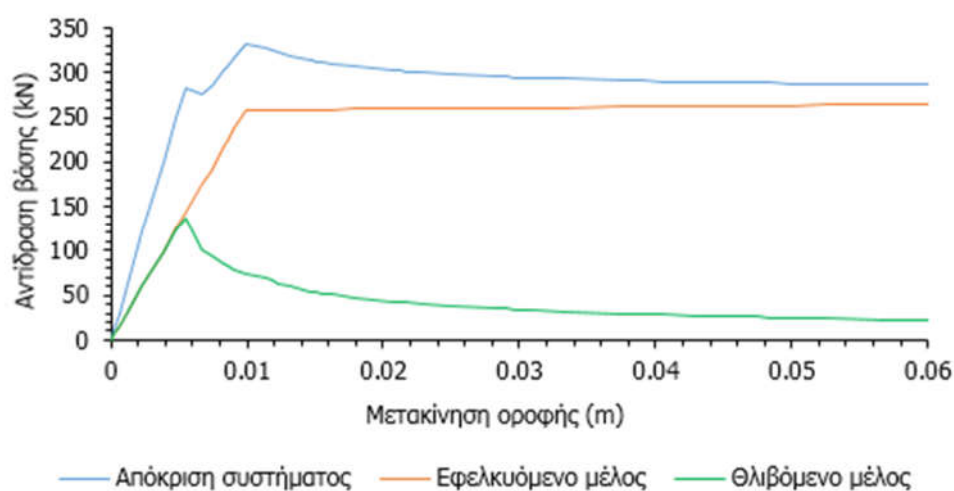
Διάγραμμα 2-2: Συμπεριφορά θλιβόμενου μέλους

Στο Διάγραμμα (2-2) παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους του χιαστί που αντιστοιχεί στην οριζόντια αντίδραση στήριξης. Ο δρόμος ισορροπίας έχει παρόμοια μορφή με αυτούς που αντιστοιχούν σε αμφιαρθρωτές θλιβόμενες ράβδους. Εδώ συγκρίνεται και με το N_{cr} όπου φαίνεται και η διαφορά τους ($\approx 30\%$ διαφορά).



Διάγραμμα 2-3: Συμπεριφορά εφελκόμενου μέλους

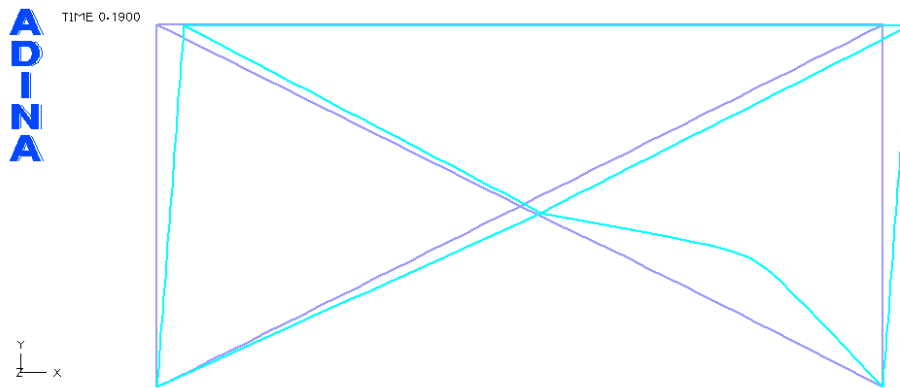
Εδώ παρουσιάζεται (Διάγραμμα (2-3)) ο δρόμος ισορροπίας του εφελκόμενου μέλους του χιαστί που αντιστοιχεί και στην οριζόντια αντίδραση στήριξης. Ο δρόμος ισορροπίας έχει αντίστοιχη μορφή με το νόμο του υλικού.



Διάγραμμα 2-4: Συνολική απόκριση συστήματος

Στο Διάγραμμα (2-4) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας τόσο του θλιβόμενου και του εφελκόμενου μέλους όσο και του συνολικού συστήματος. Παρατηρώντας το δρόμο ισορροπίας φαίνεται πως τη στιγμή του λυγισμού έχουμε μια απώλεια δυσκαμψίας που αποκαθίσταται, εν μέρει, από την εφελκυστική διαγώνιο. Μόλις διαρρεύσει και το εφελκόμενο μέλος ο δρόμος ισορροπίας γίνεται μόνιμα καθοδικός με συνεχώς μειούμενο ρυθμό.

Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

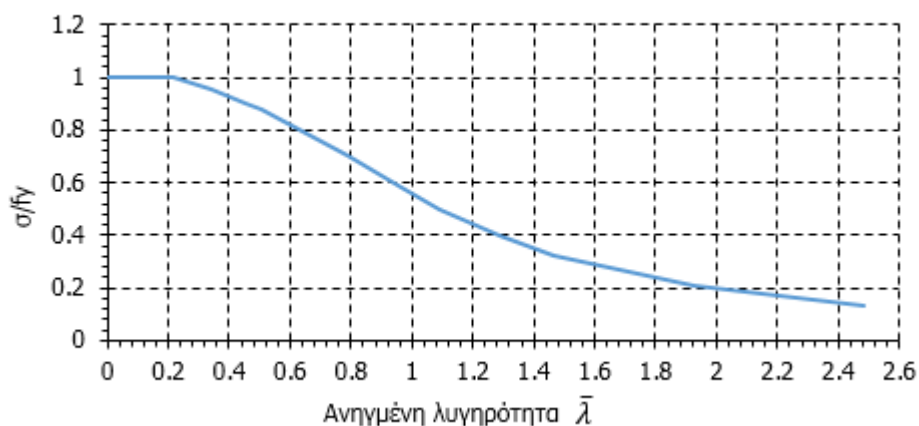


Σχήμα 2-3: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα

Η παραμορφωμένη εικόνα του φορέα στο τέλος της ανάλυσης δείχνει το λυγισμό που υπέστη το θλιβόμενο μέλος των διαγώνιων συνδέσμων (Σχήμα (2-3)).

Η ίδια διαδικασία έγινε για διάφορες διατομές, που αντιστοιχούν σε λυγηρότητες από 0.2-2.5, με σκοπό να μορφωθεί η καμπύλη λυγισμού.

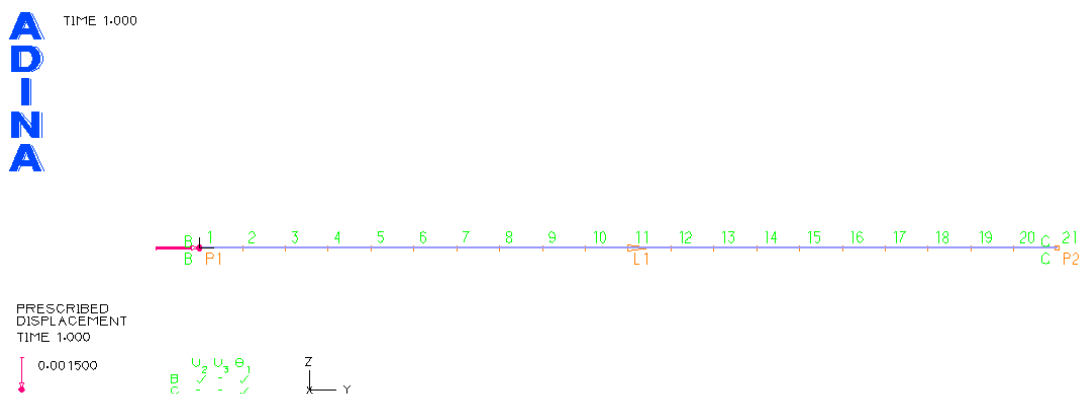
Το σχήμα της καμπύλης λυγισμού δείχνει το ρυθμό με τον οποίο μειώνεται η αντοχή του θλιβόμενου μέλους συναρτήσει της ανηγμένης λυγηρότάς του (Διάγραμμα (2-5)).



Διάγραμμα 2-5: Καμπύλη λυγισμού φορέα

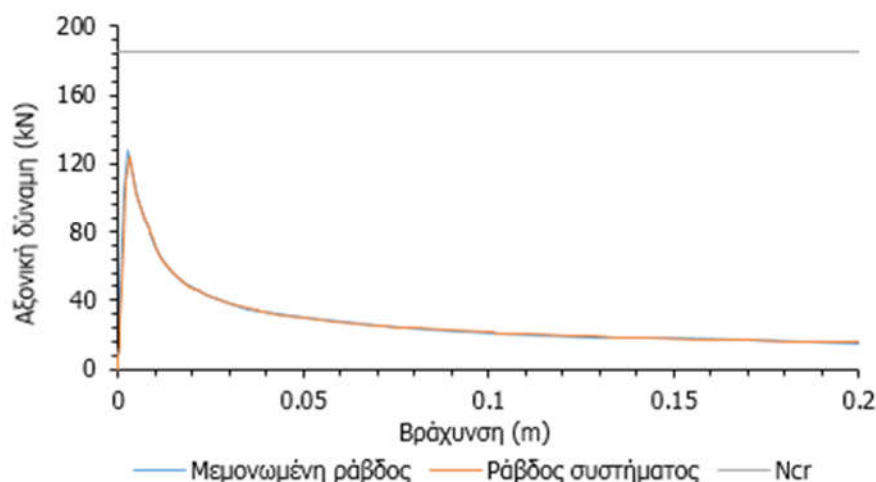
2.10 Σύγκριση με μεμονωμένη ράβδο

Για να ελεγχθούν τα αποτελέσματα του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν μη-γραμμικές ανελαστικές αναλύσεις και για μεμονωμένη αμφιαρθρωτή ράβδο (Σχήμα (2-4)). Τα χαρακτηριστικά της ράβδου είναι ακριβώς ίδια με αυτά του θλιβόμενου μέλους των διαγώνιων συνδέσμων.



Σχήμα 2-4: Μεμονωμένη θλιβόμενη ράβδος ίδιων χαρ/κων με του συστήματος

Η φόρτιση της ράβδου επιβάλλεται ως εξωτερική οριζόντια μετακίνηση μετακίνηση (βράχυνση) στο αριστερό άκρο της.



Διάγραμμα 2-6: Σύγκριση απόκρισης θλιβόμενης ράβδου φορέα με μεμονωμένη ράβδο

Παρατηρείται, από το Διάγραμμα (2-6), πως οι δρόμοι ισορροπίας της μεμονωμένης ράβδου και της θλιβόμενης ράβδου του συστήματος σχεδόν ταυτίζονται γεγονός που δείχνει πως, σε πρώτη φάση, το μοντέλο λειτουργεί σωστά.

2.11 Μοντέλο χωρίς ελευθερώσεις της ροπής εκτός επιπέδου στα άκρα των διαγωνίων συνδέσμων

Για να μελετηθεί η πιθανή επιρροή των πιο σύνθετων τρισδιάστατων ιδιομορφών αναλύθηκε ο φορέας, και εδώ με αναλύσεις τύπου LBA και GMNIA, λαμβάνοντας υπόψιν την τρισδιάστατη συμπεριφορά του συστήματος. Σε αυτήν την πρώτη περίπτωση τα άκρα των διαγωνίων συνδέσμων θεωρούνται

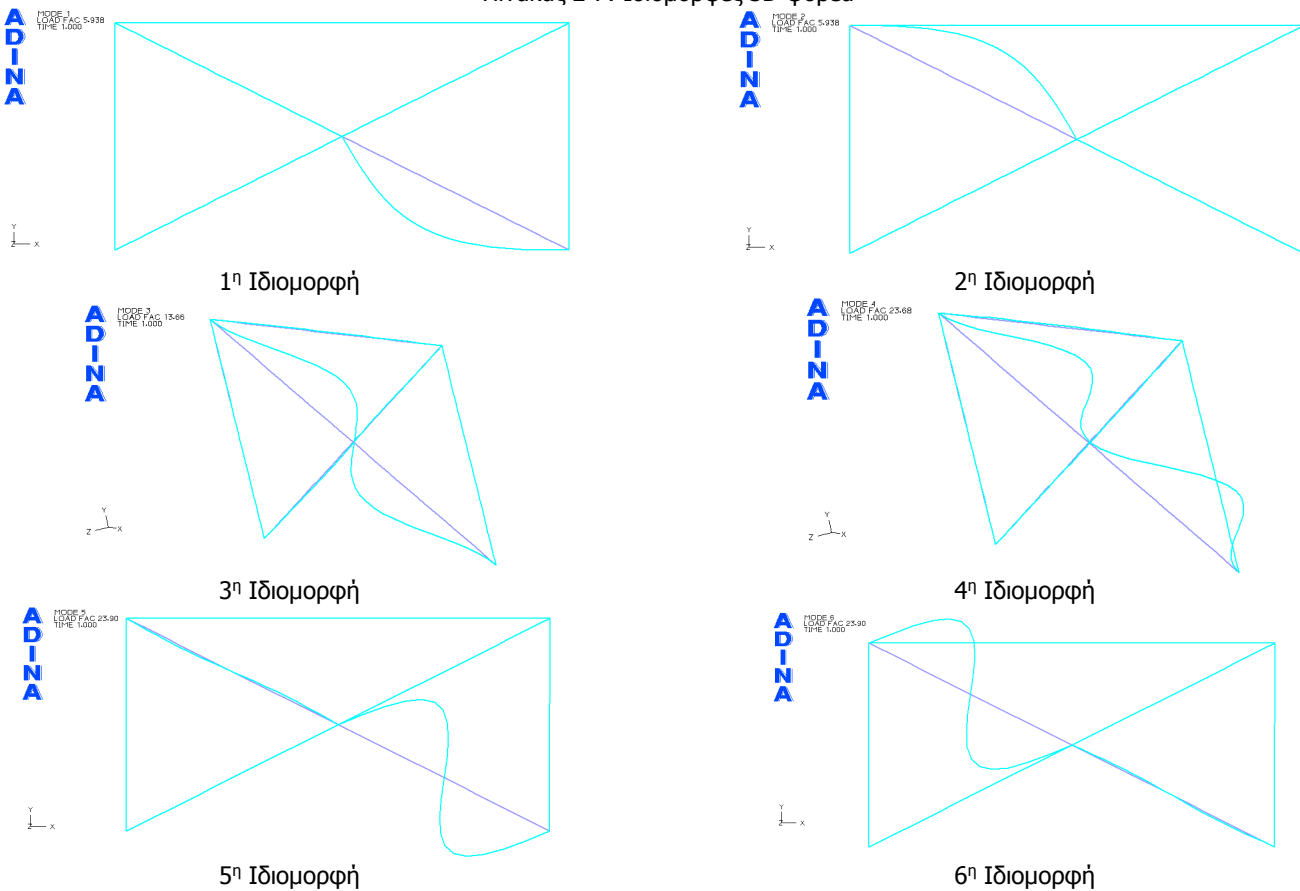
Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

δεσμευμένα ως προς την εκτός επιπέδου στροφή. Παραδοχή που θεωρεί την καμπτική αντοχή των συνδέσεων των διαγωνίων αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή των διαγώνιων μελών. Δηλαδή, δεχόμαστε πως οι συνδέσεις του φορέα δεν αστοχούν σε καμία στιγμή της ανάλυσης.

2.11.1 Ανάλυση LBA

Καταρχήν, πραγματοποιήθηκε γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού. Στον φορέα ασκήθηκε και εδώ αρχική μετακίνηση κορυφής σε κάθε υποσύτλωμα. Στον Πίνακα (2-7) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ιδιομορφές του φορέα.

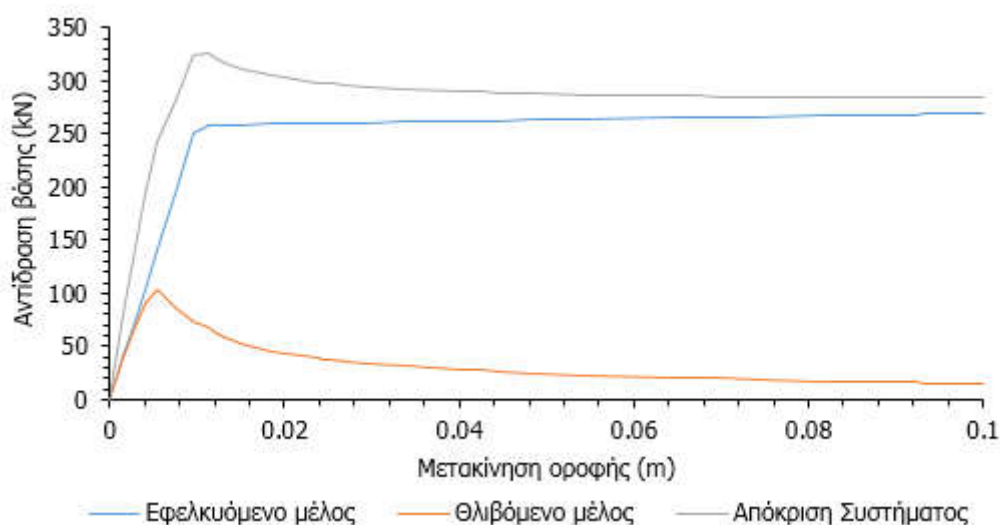
Πίνακας 2-7: Ιδιομορφές 3D φορέα



Παρατηρείται πως οι δύο πρώτες ιδιομορφές του συστήματος αντιστοιχούν στην πρώτη ιδιομορφή θλιβόμενης αμφιαρθρωτής ράβδου. Οι επόμενες δύο αναφέρονται σε πιο σύνθετες ιδιομορφές αμφίπακτης ράβδου με δέσμευση στο μέσο της.

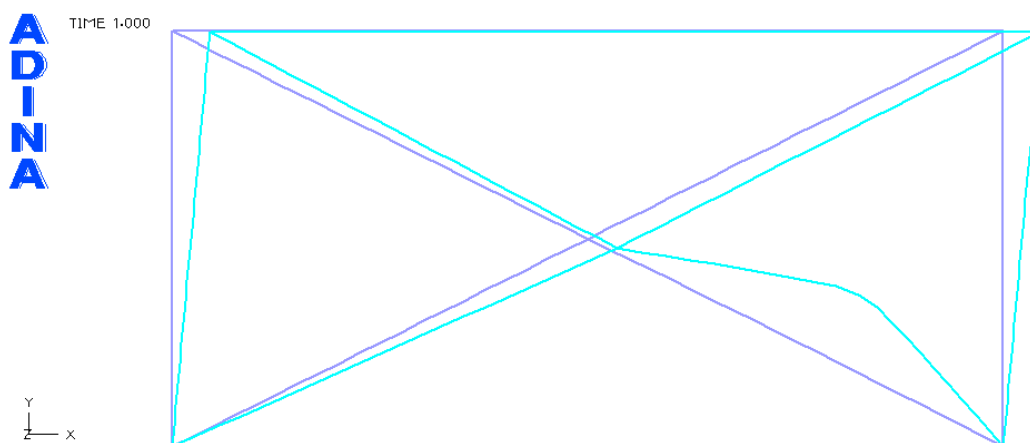
2.11.2 Ανάλυση GMNIA

Καταρχήν, δόθηκε στο φορέα ατέλεια κατά το σχήμα της πρώτης ιδιομορφής. Η φόρτιση παραμένει και εδώ στατική μονοτονική.



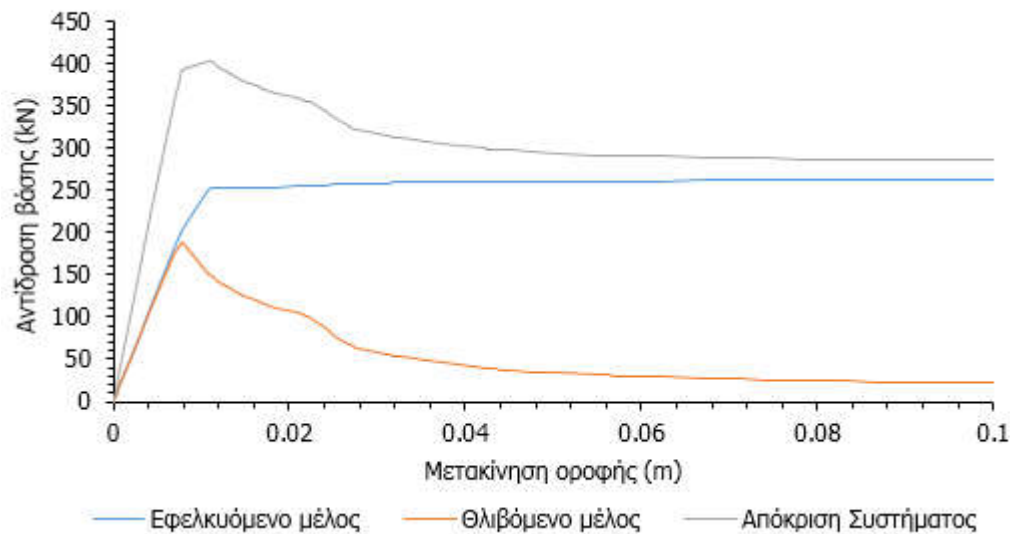
Διάγραμμα 2-7: Δρόμος ισορροπίας φορέα (1^η ιδιομορφή)

Ο δρόμος ισορροπίας του φορέα (Διάγραμμα (2-7)) παρουσιάζει αναμενόμενη μορφή με το λυγισμό της θλιβόμενης διαγωνίου και τη διαρροή της εφελκόμενης να συνεπάγονται απότομα μεγάλες μειώσεις της δυσκαμψίας του συστήματος.



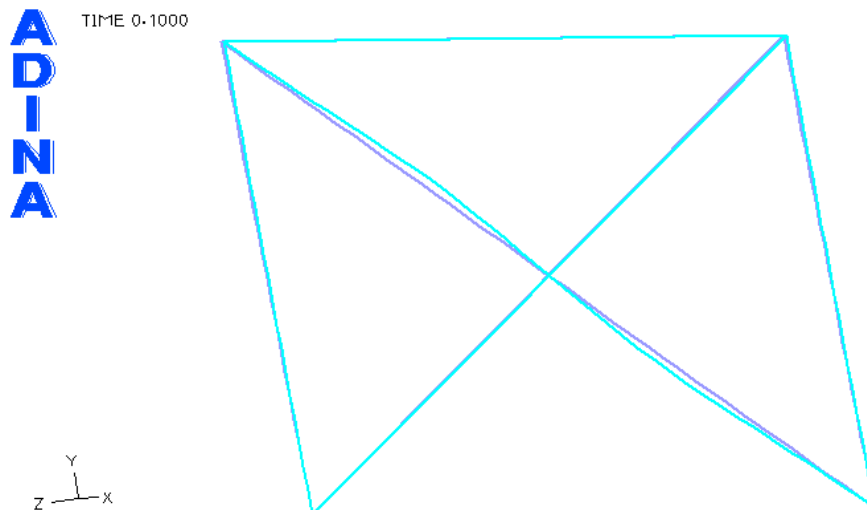
Σχήμα 2-5: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα (1^η ιδιομορφή)

Στη συνέχεια δόθηκε στο φορέα ατέλεια κατά το σχήμα της τρίτης ιδιομορφής.



Διάγραμμα 2-8: Δρόμος ισορροπίας φορέα (3^η ιδιομορφή)

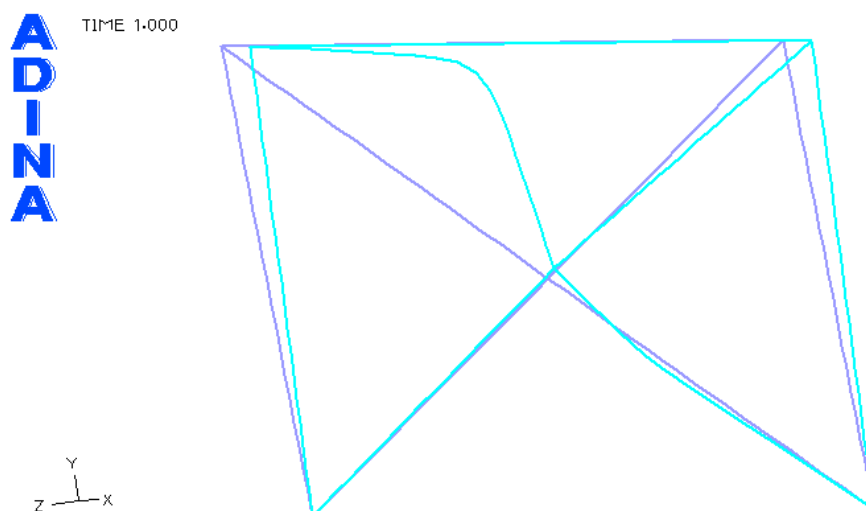
Το οριακό φορτίο, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα (2-8), παρουσιάζει σημαντική αύξηση μιας και ότι ο φορέας εξαναγκάζεται να συμπεριφερθεί με ανώτερη ιδιομορφή σε σχέση με πριν. Παρατηρείται, επιπλέον, πως καθώς ο δρόμος ισορροπίας, της θλιβόμενης διαγωνίου, ακολουθεί ασταθής μεταλυγισμική συμπεριφορά μόλις η αντίδραση στήριξης φτάσει στα επίπεδα (103kN) της αντοχής της 1^{ης} ιδιομορφής έχουμε και νέα, έντονη, απώλεια αντοχής μιας και εκδηλώνεται και λυγισμός της θλιβόμενης διαγωνίου εντός επιπέδου.



Σχήμα 2-6: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα (3^η ιδιομορφή) στο οριακό σημείο

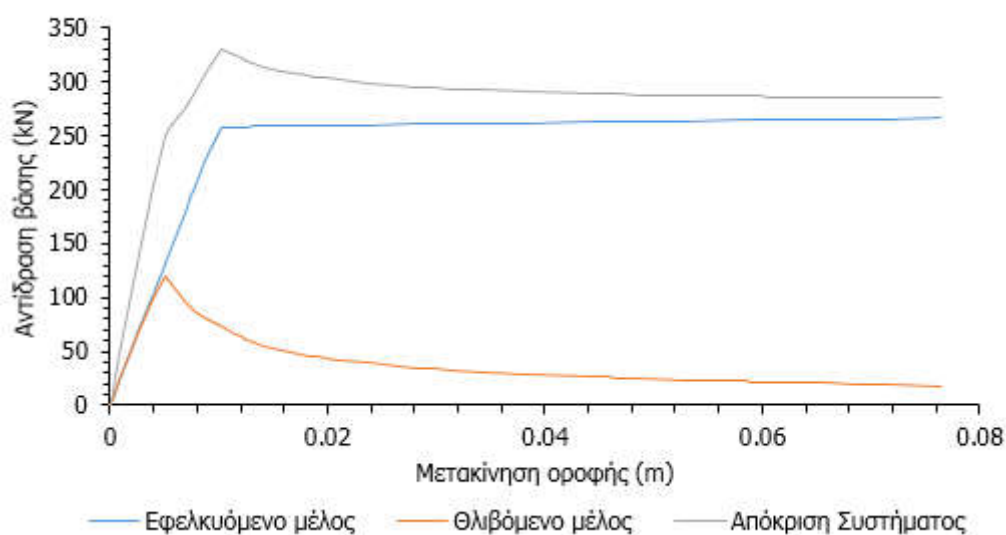
Παρατηρείται πως σε αυτήν την περίπτωση, Σχήμα (2-6), η παραμόρφωση του φορέα ακολουθεί το σχήμα της τρίτης ιδιομορφής (εκτός επιπέδου συμπεριφορά). Στο οριακό σημείο ο φορέας έχει παραμόρφωση σύμφωνα, μόνο, με την 3^η ιδιομορφή. Παρόλα αυτά, στο τέλος της ανάλυσης φαίνεται

πως η παραμόρφωση του φορέα αρχίζει να πλησιάζει προς έναν συνδυασμό 1^{ης} και 3^{ης} ιδιομορφής, με το λυγισμό της θλιβόμενης διαγωνίου (1^η ιδιομορφή) να γίνεται αρκετά έντονος (Σχήμα (2-7)).

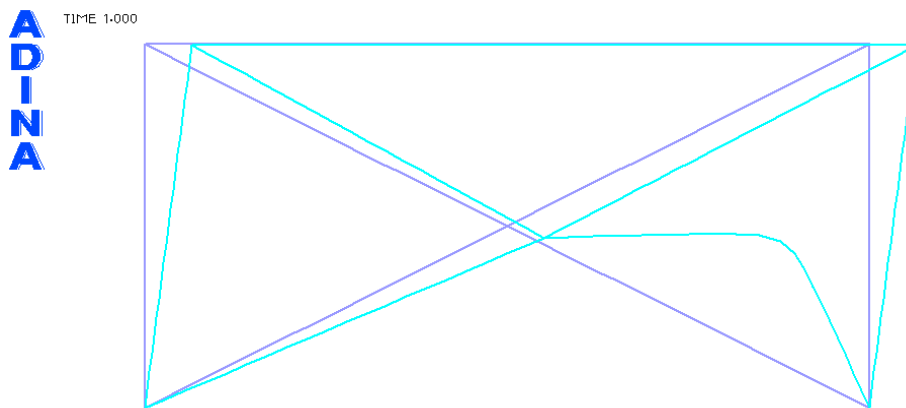


Σχήμα 2-7: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα (3^η ιδιομορφή) στο τέλος της ανάλυσης

Ως τελευταία περίπτωση, επιβλήθηκε στο φορέα συνδιασμένη ατέλεια κατά την πρώτη και τρίτη ιδιομορφή (Διάγραμμα (2-9)).



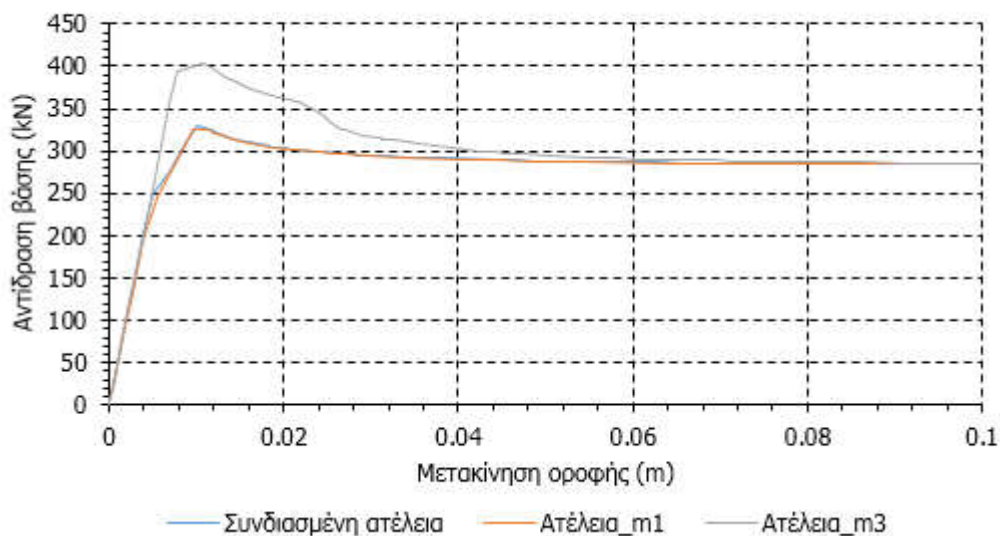
Διάγραμμα 2-9: Δρόμος ισορροπίας φορέα (1^η και 3^η ιδιομορφή)



Σχήμα 2-8: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα (1^η και 3^η ιδιομορφή)

Η παραμόρφωση του φορέα ακολουθεί και εδώ, στο Σχήμα (2-8), της μορφή της πρώτης ιδιομορφής (λυγισμός θλιβόμενου μέλους).

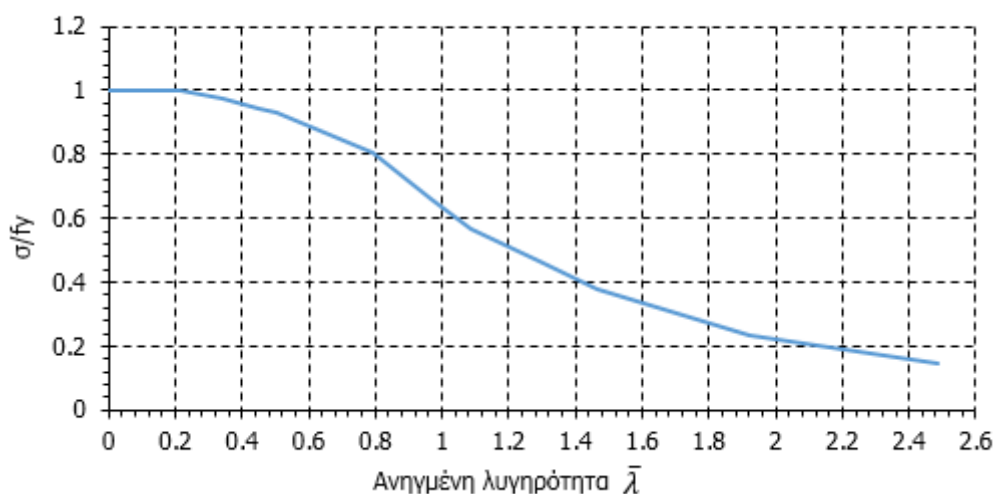
Παρακάτω (Διάγραμμα (2-10)) παρουσιάζονται συγκριτικά οι δρόμοι ισορροπίας για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις επιβολής ατέλειας.



Διάγραμμα 2-10: Σύγκριση δρόμων ισορροπίας

Στην περίπτωση που ασκείται ατέλεια κατά την πρώτη ιδιομορφή και στην περίπτωση που ασκείται ατέλεια και κατά τις δύο ιδιομορφές οι δρόμοι ισορροπίας ταυτίζονται και η συμπεριφορά του φορέα «ελέγχεται» πρακτικά από την πρώτη ιδιομορφή. Στην περίπτωση που η ασκούμενη ατέλεια είναι μόνο κατά την τρίτη ιδιομορφή, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο φορέας παρουσιάζει αύξηση της αντοχής του (εξαναγκασμός σε συμπεριφορά ανώτερης ιδιομορφής).

Για να μορφωθεί η καμπύλη λυγισμού πραγματοποιήθηκαν GMNIA αναλύσεις, και εδώ, για διάφορες διατομές, που αντιστοιχούν σε λυγηρότητες από 0.2-2.5. Η καμπύλη φαίνεται στο Διάγραμμα (2-11).



Διάγραμμα 2-11: Καμπύλη λυγισμού φορέα (συνδυασμένη στέλεια c)

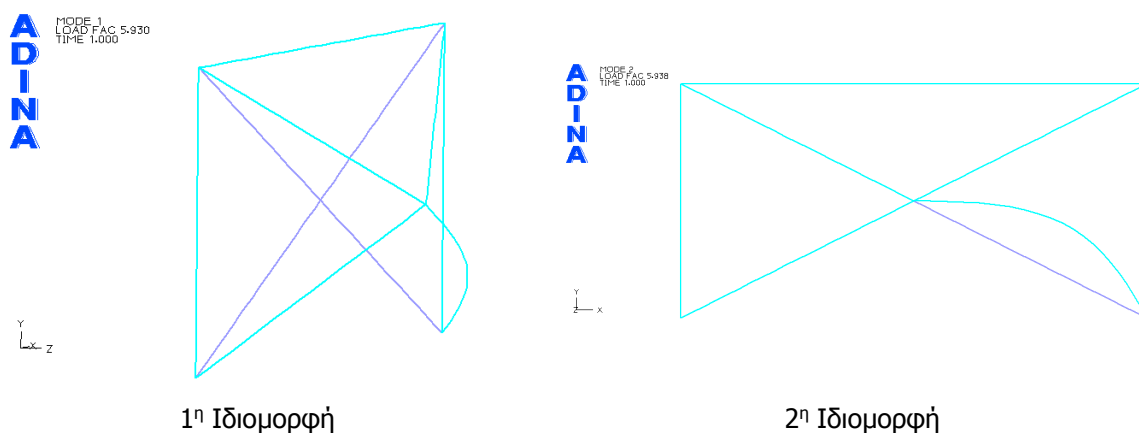
2.12 Μοντέλο με ελευθερώσεις της ροπής εκτός επιπέδου στα άκρα των διαγωνίων συνδέσμων

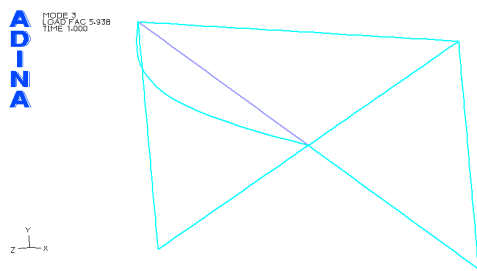
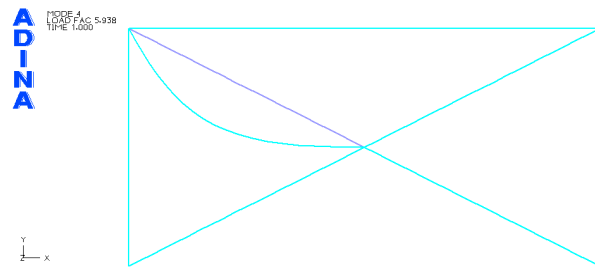
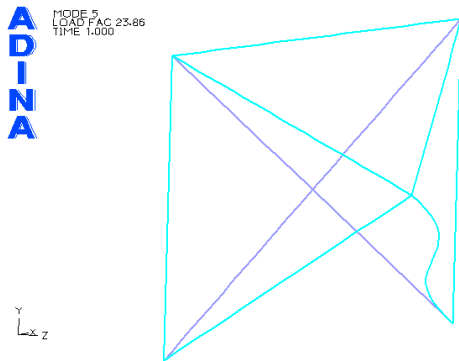
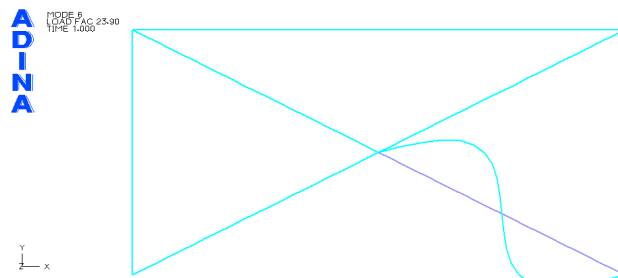
Για να διερευνηθεί ολοκληρωμένα η συμπεριφορά του συστήματος, σε αυτήν την περίπτωση τα άκρα των διαγωνίων συνδέσμων θεωρούνται ελεύθερα ως προς την εκτός επιπέδου στροφή. Παραδοχή που θεωρεί την καμπτική αντοχή των συνδέσεων των διαγωνίων πολύ χαμηλότερη σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή των διαγώνιων μελών. Δηλαδή, δεχόμαστε πως οι συνδέσεις του φορέα θα έχουν αστοχήσει αρκετά νωρίτερα από τα διαγώνια μέλη.

2.12.1 Ανάλυση LBA

Ο φορέας αναλύθηκε πρώτα με γραμμικοποιημένη ανάλυση λυγισμού. Στον φορέα ασκήθηκε και εδώ αρχική μετακίνηση κορυφής σε κάθε υποστύλωμα. Στον Πίνακα (2-8) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ιδιομορφές του φορέα.

Πίνακας 2-8: Ιδιομορφές 3D φορέα



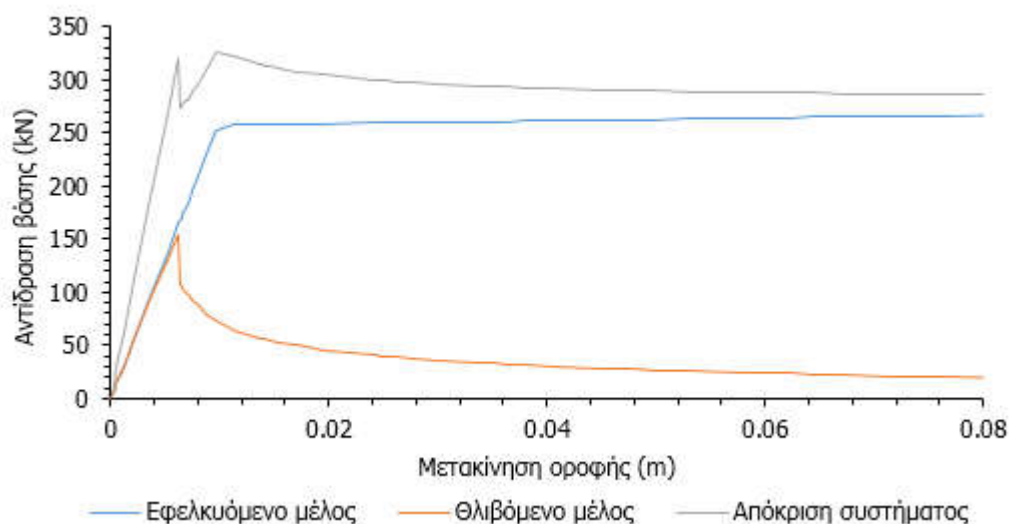
3^η Ιδιομορφή4^η Ιδιομορφή5^η Ιδιομορφή6^η Ιδιομορφή

Σε αυτήν περίπτωση η πρώτη ιδιομορφή είναι ένας συνδιασμός εκτός επιπέδου κίνησης των χιαστί συνδέσμων και λυγισμός του θλιβόμενου μέλους (1^η ιδιομορφή θλιβόμενης αμφιαρθρωτής ράβδου). Η 2^η, η 3^η και η 4^η ιδιομορφή είναι καθαρός λυγισμός αμφιαρθρωτής ράβδου.

2.12.2 Ανάλυση GMNIA

2.12.2.1 Ατέλειες κατά την πρώτη ιδιομορφή

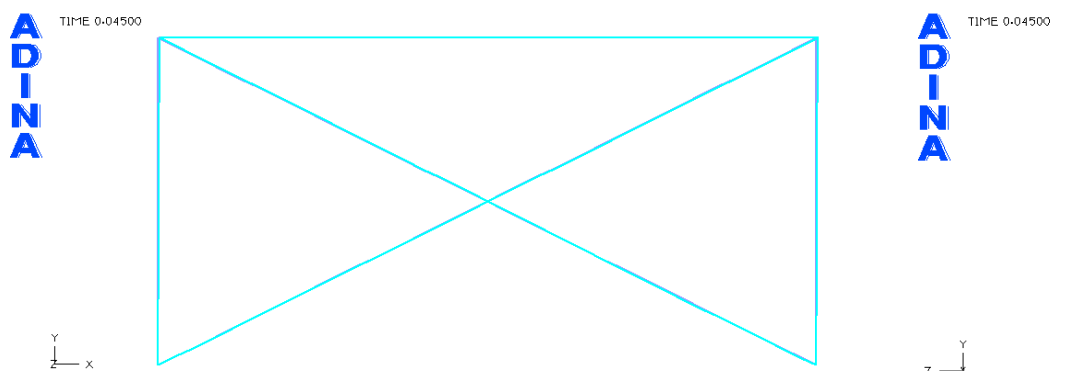
Καταρχήν, δόθηκε στο φορέα ατέλεια κατά το σχήμα της πρώτης ιδιομορφής. Η φόρτιση παραμένει και εδώ στατική μονοτονική. Παρουσιάζονται, πρώτα, οι δρόμοι ισορροπίας του συστήματος για κάθε μέλος ξεχωριστά (θλιβόμενου-εφελκυόμενου) και ο συνολικός δόμος ισορροπίας (Διάγραμμα (2-12)).



Διάγραμμα 2-12: Δρόμος ισορροπίας φορέα (1^η ιδιομορφή)

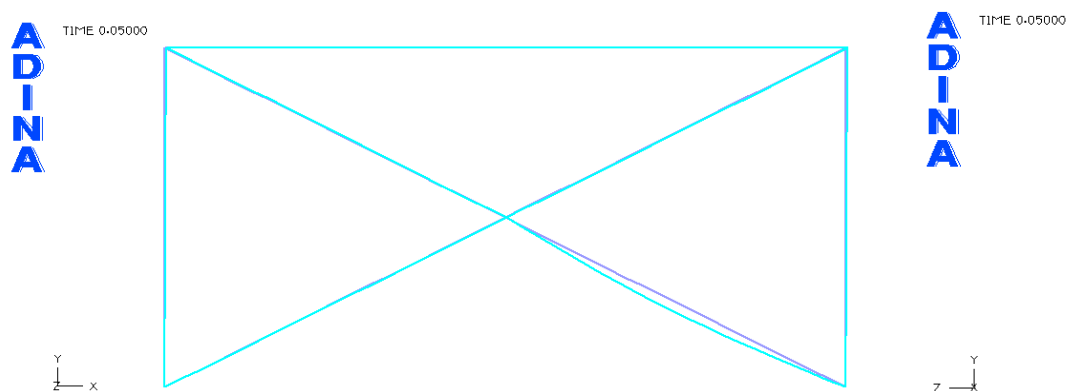
Παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με την προηγούμενη περίπτωση (πακτώσεις στα άκρα) με τη διαφορά ότι παρουσιάζεται μια ξαφνική και έντονη απώλεια αντοχής τη στιγμή που λυγίζει το θλιβόμενο μέλος (πολύ εντονότερη και μεγαλύτερη σε σχέση με πριν).

Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η συμπεριφορά του συστήματος στο σημείο λυγισμού θα μελετηθεί η παραμορφωσιακή του κατάσταση λίγο πριν (Σχήμα (2-9)) και αμέσως μετά (Σχήμα (2-10)) το λυγισμό.



Σχήμα 2-9: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα (1^ο στάδιο)

Καθώς ασκείται το φορτίο, το σύστημα των συνδέσμων εκτρέπεται ολόκληρο εκτός επιπέδου, μετακινούμενο σαν στερεό σώμα.

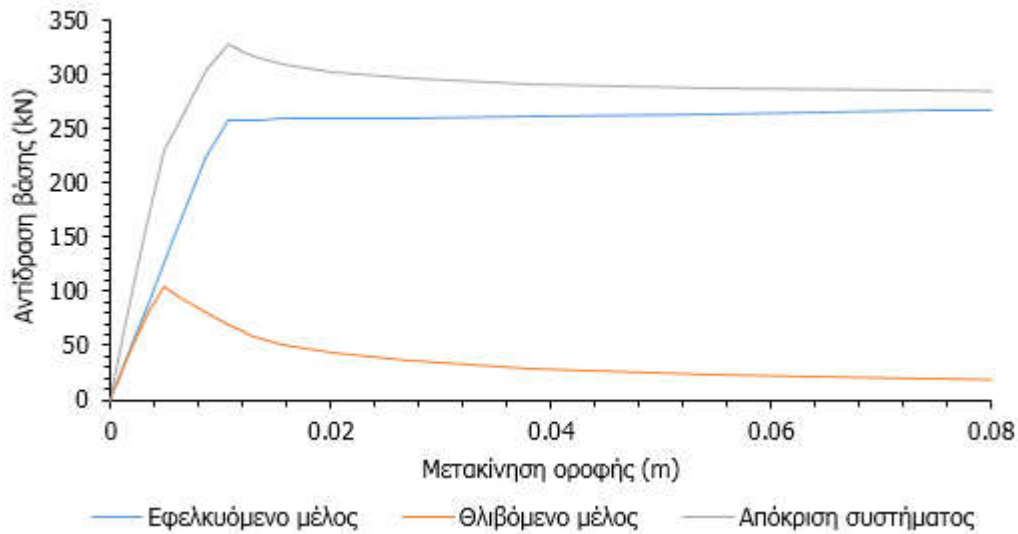


Σχήμα 2-10: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα (2^ο στάδιο)

Καθώς το θλιβόμενο μέλος του συστήματος λυγίζει, ξαφνικά το σύστημα δεν μπορεί να ισορροπήσει εκτός επιπέδου και επιστρέφει, εξαναγκαζόμενο από τις δυνάμεις των διαγωνίων που εφελκύνονται, στο επίπεδο του φατνώματος. Αυτό εξηγεί και το στιγμιαίο πισωγύρισμα του δρόμου ισορροπίας αμέσως μετά το λυγισμό. Το «πισωγύρισμα» του φορέα ανακουφίζει εντατικά τόσο τη θλιβόμενη όσο και την εφελκόμενη διαγώνιο του συστήματος.

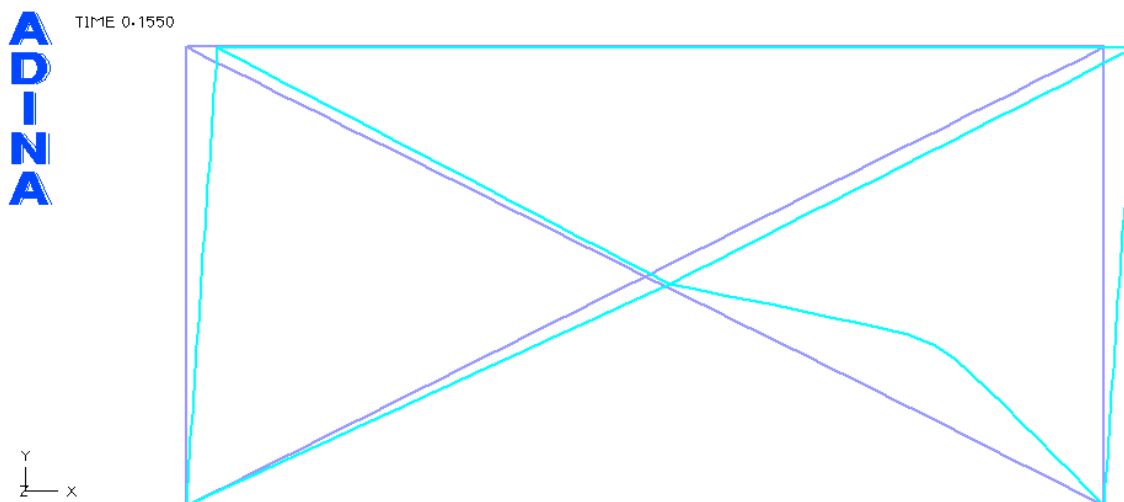
2.12.2.2 Ατέλειες κατά την δεύτερη ιδιομορφή

Όπως και προηγούμενα, για να μελετηθεί ολοκληρωμένα η συμπεριφορά των διαγωνίων, ασκείται και τώρα ατέλεια μόνο κατά τη δεύτερη ιδιομορφή.



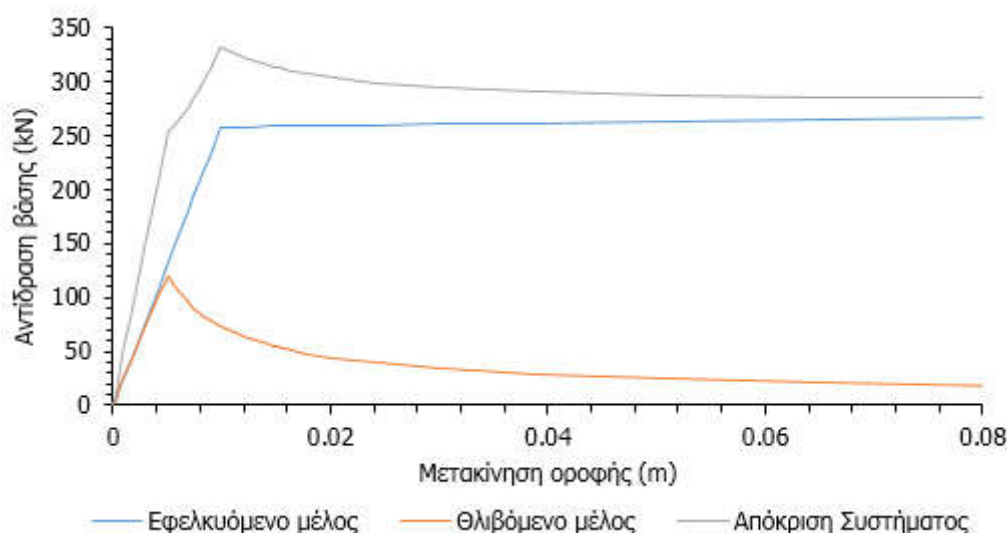
Διάγραμμα 2-13: Δρόμος ισορροπίας φορέα (2^η ιδιομορφή)

Σε αυτή την περίπτωση ο δρόμος ισορροπίας φαίνεται να παρουσιάζει συμπεριφορά καθαρού λυγισμού χωρίς την προηγούμενη εκτροπή εκτός επιπέδου (Διάγραμμα (2-13)).



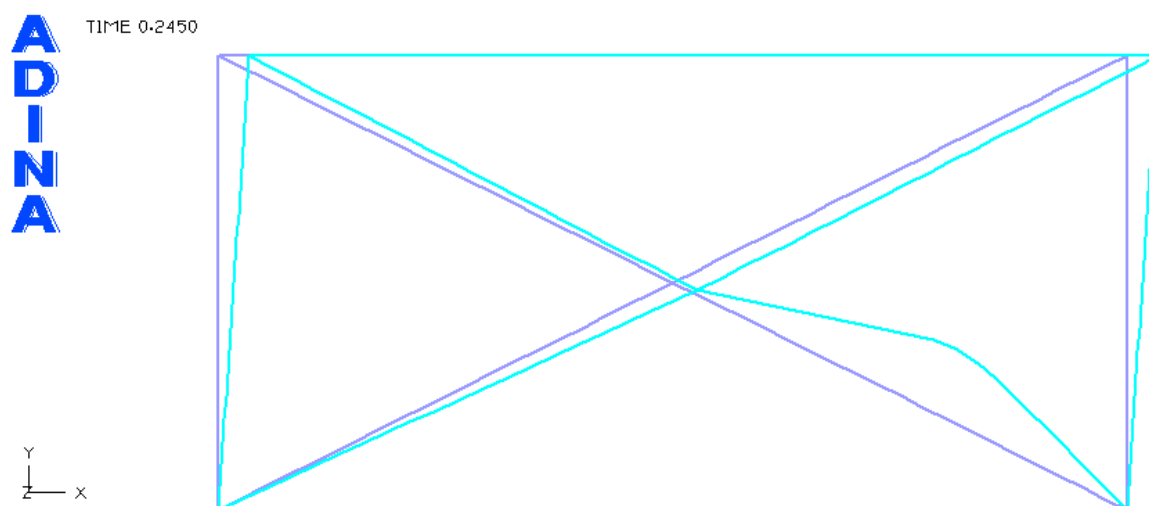
Σχήμα 2-11: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα (2^η ιδιομορφή)

Η παραμόρφωση του φορέα στο Σχήμα (2-11) (εδώ παρουσιάζεται στο τέλος της ανάλυσης) δείχνει, επιβεβαιώνοντας το προηγούμενο συμπέρασμα, πως ο φορέας αστοχεί σε καθαρό λυγισμό σε αυτήν την περίπτωση. Για να γίνει πιο ξεκάθαρο το κατά πόσο επηρεάζει η κάθε ιδιομορφή την τελική απόκριση του συστήματος πραγματοποιούνται αναλύσεις τύπου GMNIA με συνδιασμένη ατέλεια και κατά τις δύο ιδιομορφές (Διάγραμμα (2-14)).



Διάγραμμα 2-14: Δρόμος ισορροπίας φορέα (1^η και 2^η ιδιομορφή)

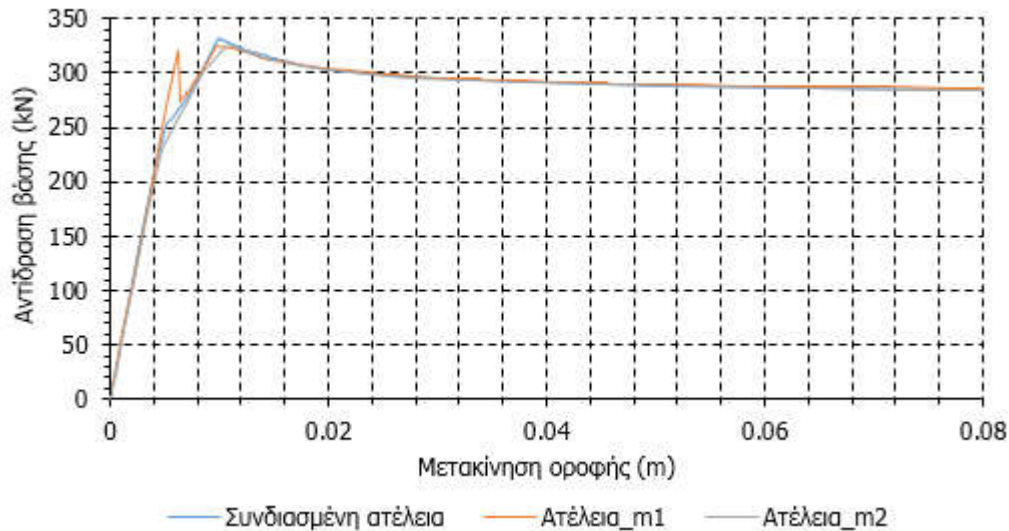
Ο δρόμος ισορροπίας παρουσιάζει παρόμοιο σχήμα με αυτόν της περίπτωσης που ασκείται ατέλεια μόνο κατά τη δεύτερη ιδιομορφή. Η μορφή της αστοχίας που εκδηλώνεται, δηλαδή, είναι λυγισμός του θλιβόμενου μέλους χωρίς εκτροπή εκτός επιπέδου. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την παραμορφωμένη εικόνα του συστήματος όπως αυτή παρουσιάζεται παρακάτω, στο Σχήμα (2-12).



Σχήμα 2-12: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα

2.12.2.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

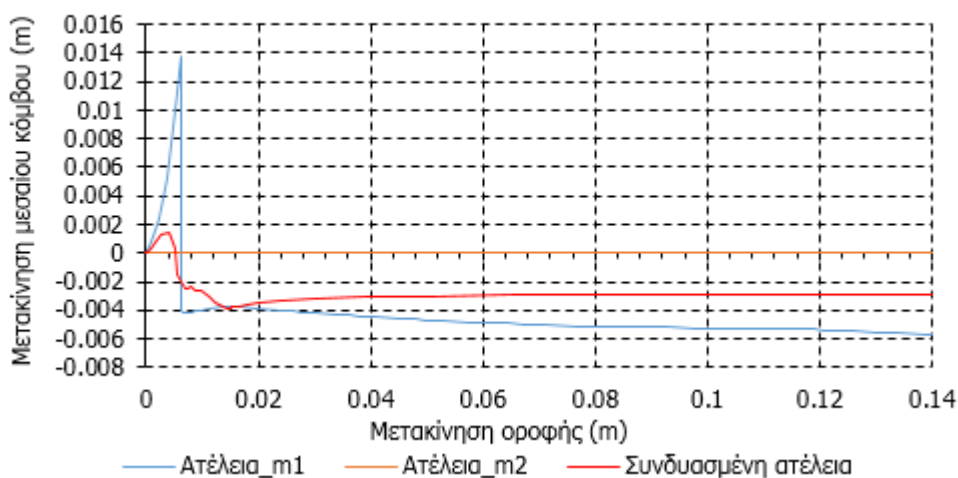
Στο Διάγραμμα (2-15) παρουσιάζονται συγκριτικά οι δρόμοι ισορροπίας για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις επιβολής ατέλειας.



Διάγραμμα 2-15: Δρόμος ισορροπίας φορέα (1^η και 2^η ιδιομορφή)

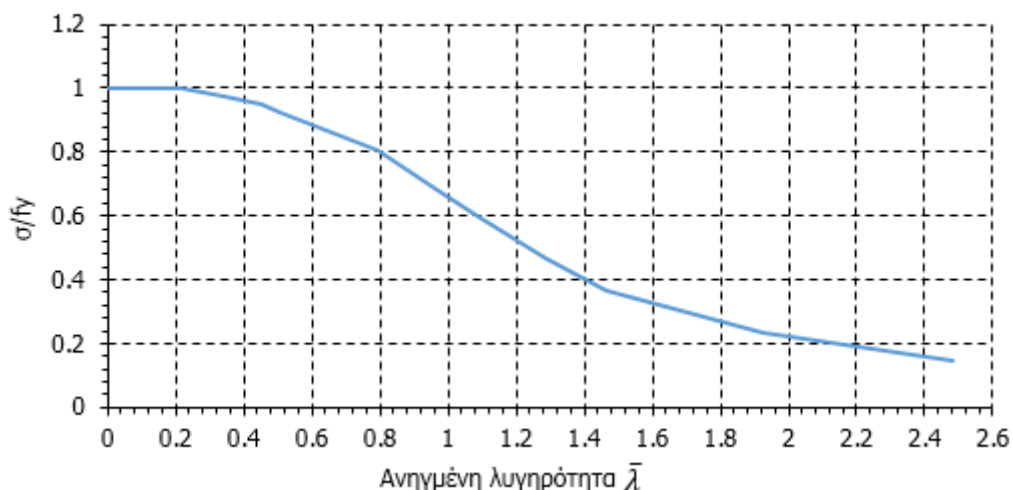
Στην περίπτωση που ασκείται ατέλεια κατά τη δεύτερη ιδιομορφή και στην περίπτωση που ασκείται ατέλεια και κατά τις δύο ιδιομορφές οι δρόμοι ισορροπίας ταυτίζονται και η συμπεριφορά του φορέα «ελέγχεται» πρακτικά από την δεύτερη ιδιομορφή. Στην περίπτωση που η ασκούμενη ατέλεια είναι μόνο κατά την πρώτη ιδιομορφή έχουμε εκτροπή του φορέα εκτός επιπέδου πριν το λυγισμό.

Για να φανεί καλύτερα η συμπεριφορά του συστήματος και εκτός επιπέδου διερευνάται και η εκτός επιπέδου μετατόπιση του μεσαίου κόμβου για όλες τις περιπτώσεις επιβολής ατέλειας. (Διάγραμμα (2-16))



Διάγραμμα 2-16: Σύγκριση μετακίνησης του μεσαίου κόμβου των διαγωνίων εκτός επιπέδου

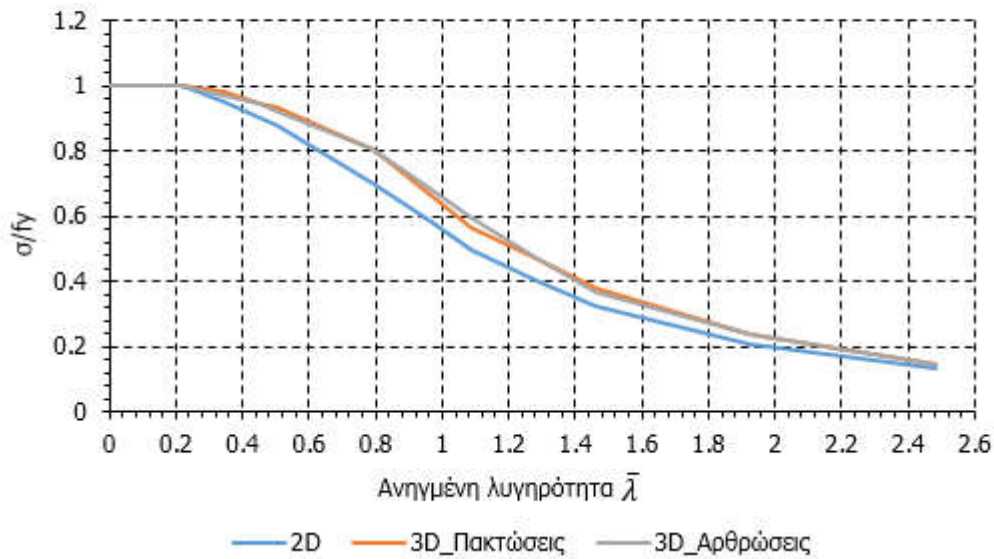
Στις δύο περιπτώσεις όπου ασκείται ατέλεια κατά την 2^η ιδιομορφή, είτε αποκλειστικά είτε συνδυαστικά, δεν υπάρχει πρακτικά καμία εκτροπή εκτός επιπέδου (έως $\approx 1.5\text{mm}$). Στην άλλη περίπτωση (ατέλεια κατά την 1^η ιδιομορφή) η εκτός επιπέδου μετακίνηση του μεσαίου κόμβου φτάνει περίπου τα 1.4cm. Τέλος, και εδώ, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις τύπου GMNIA για διάφορες διατομές για να μορφωθεί η καμπύλη λυγισμού (Διάγραμμα (2-17)).



Διάγραμμα 2-17: Καμπύλη λυγισμού φορέα (συνδυασμένη ατέλεια c)

2.13 Σύγκριση των μοντέλων προσομοίωσης

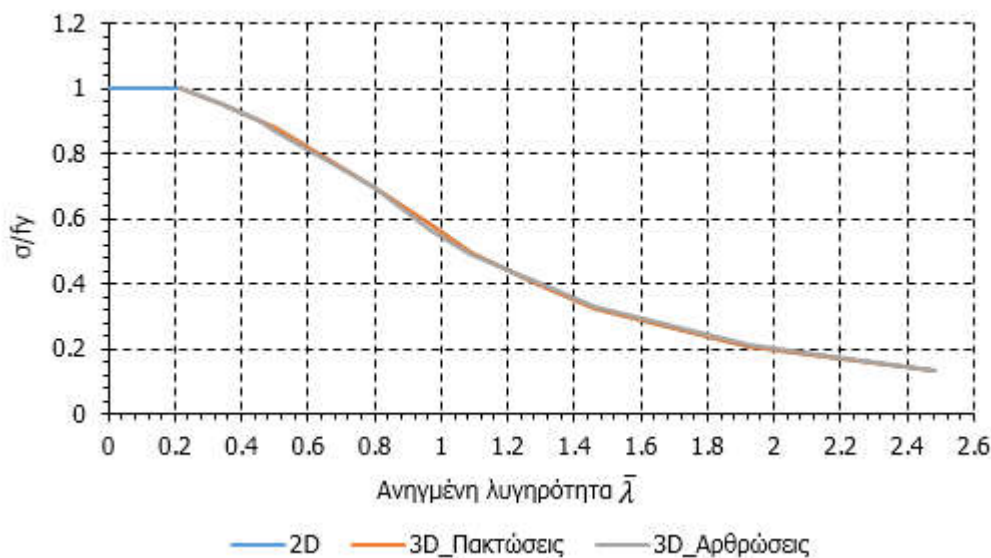
Στην προσπάθεια να εξαχθούν κάποια πιο γενικά συμπεράσματα που να αφορούν τα φατνώματα με διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας συγκρίνονται οι καμπύλες λυγισμού για τις τρεις περιπτώσεις του μοντέλου με ατέλεια μεγέθους c. Στο παρακάτω Διάγραμμα 2-18 συγκρίνονται οι καμπύλες λυγισμού των τριών περιπτώσεων για συνδυασμένη ατέλεια στις περιπτώσεις των τρισδιάστατων μοντέλων (για ανηγμένες λυγηρότητες που κυμαίνονται από 0.2-2.5).



Διάγραμμα 2-18: Καμπύλες λυγισμού φορέα (συνδυασμένη στέλεια c)

Οι καμπύλες που αφορούν τους φορείς που τους επιτρέπεται τρισδιάστατη συμπεριφορά σχεδόν ταυτίζονται (μικροδιαφορές αριθμητικής φύσης). Η καμπύλη που αναφέρεται στο φορέα που συμπεριφέρεται δισδιάστατα παίρνει παντού μικρότερες τιμές. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ τους είναι για τιμές της ανηγμένης λυγηρότητας κοντά στο 0.8 και η μέγιστη διαφορά είναι περίπου 15% (αδιαστατοποιημένο ως προς την μικρότερη τιμή). Για τιμές ανηγμένης λυγηρότητας μικρότερες από 0.2 και οι τρεις καμπύλες ταυτίζονται και είναι οριζόντιες, δηλαδή, για αυτές τις τιμές έχουμε διαρροή υλικού και όχι λυγισμό μέλους.

Στη δεύτερη περίπτωση, Διάγραμμα 2-19, συγκρίνονται οι καμπύλες λυγισμού των τριών περιπτώσεων για μεμονωμένη στέλεια για όλες τις περιπτώσεις (για ανηγμένες λυγηρότητες που κυμαίνονται από 0.2-2.5).



Διάγραμμα 2-19: Καμπύλες λυγισμού φορέα (μεμονωμένη στέλεια c)

Σε αυτήν την περίπτωση όλες οι καμπύλες σχεδόν ταυτίζονται (μικροδιαφορές αριθμητικής φύσης). Η περίπτωση της μεμονωμένης ατέλειας, για τους τρισδιάστατους φορείς, είναι η δυσμενέστερη και επαληθεύει την παρατήρηση πως ο λυγισμός της θλιβόμενης διαγωνίου είναι η ιδιομορφή που καθορίζει τη συμπεριφορά του συστήματος.

2.14 Συμπεράσματα

Σε αυτό, το δεύτερο, κεφάλαιο της εργασίας εξετάζεται η μη-γραμμική συμπεριφορά ενός μεταλλικού φανώματος με διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας. Η προσομοίωση γίνεται στο λογισμικό ADINA και χρησιμοποιούνται γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία (beam elements). Η φόρτιση είναι στατική μονοτονική και επιβάλλεται στις κορυφές των υποστυλωμάτων. Ο φορέας εξετάζεται τόσο σε δισδιάστατη όσο και τρισδιάστατη συμπεριφορά. Στη δεύτερη περίπτωση διακρίνονται δύο περιπτώσεις, αυτήν που στην οποία τα άκρα των διαγωνίων είναι δεσμευμένα ως προς την εκτός επιπέδου στροφή και αυτήν που είναι ελεύθερα. Σε όλες τις περιπτώσεις η ατέλεια που επιβάλλεται είναι, κατά τον ευρωκώδικα, μεγέθους c για την οποία εξάγονται και καμπύλες λυγισμού για κάθε περίπτωση έτσι ώστε να καταστεί εφικτή μια πιο συνολική σύγκριση μεταξύ τους. Οι βασικές παρατηρήσεις και τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν είναι:

1. Όσον αφορά το φορέα με δισδιάστατη συμπεριφορά:
 - Όπως είναι φυσικό, σε κάθε περίπτωση ο λυγισμός της θλιβόμενης διαγωνίου προηγείται της διαρροής της εφελκόμενης. Συγκεκριμένα, ο λυγισμός συντελείται στο 40% της διαρροής για το φορέα, με δισδιάστατη συμπεριφορά. Η αδιαστατοποίηση γίνεται ως προς το φορτίο που λυγίζει το θλιβόμενο μέλος (ατέλεια κατά την ιδιομορφή που αφορά λυγισμό θλιβόμενου μέλους).
 - Στο δισδιάστατο μοντέλο οι ιδιομορφές λυγισμού αντιστοιχούν στις ιδιομορφές θλιβόμενης αμφιαρθρωτής ράβδου.
 - Το οριακό φορτίο που προκύπτει με μη-γραμμική ανάλυση είναι περίπου το 70% του κρίσιμου φορτίου λυγισμού της διαγωνίου για το φορέα με δισδιάστατη συμπεριφορά.
 - Όπως αναμενόταν, λοιπόν, ο λυγισμός της θλιβόμενης διαγωνίου ελέγχει απόλυτα τη συμπεριφορά του φορέα με δισδιάστατη συμπεριφορά κάτι που φαίνεται και από την παραμορφωμένη εικόνα του φορέα στην αστοχία (λυγισμός).
2. Όσον αφορά το φορέα με τρισδιάστατη συμπεριφορά και πακτωμένη τη στροφή εκτός επιπέδου στα άκρα των διαγωνίων:
 - Οι δύο πρώτες ιδιομορφές αφορούν την πρώτη ιδιομορφή λυγισμού αμφιαρθρωτής ράβδου (εντός επιπέδου), ενώ οι δύο επόμενες είναι ιδιομορφές λυγισμού αμφίπακτης ράβδου με δέσμευση στο μέσο της (εκτός επιπέδου).
 - Πραγματοποιώντας μη-γραμμική ανάλυση με ατέλεια κατά την 1^η ιδιομορφή το οριακό φορτίο είναι 103kN (40% της διαρροής), με ατέλεια κατά την 3^η ιδιομορφή το οριακό φορτίο είναι 190kN (75% της διαρροής) και με συνδυασμένη ατέλεια (μειωμένη κατά το ήμισυ) το οριακό φορτίο είναι 120kN (46.5% της διαρροής).
 - Και εδώ, λοιπόν, ο λυγισμός της θλιβόμενης διαγωνίου εντός επιπέδου ελέγχει τη συμπεριφορά του φορέα κάτι που φαίνεται και από την παραμορφωμένη εικόνα του φορέα στην αστοχία με τη συνδυασμένη ατέλεια (λυγισμός). Ο φορέας αστοχεί με την 3^η ιδιομορφή (με μεγαλύτερο οριακό φορτίο) αν του δοθεί ατέλεια μόνον στο σχήμα της 3^{ης} ιδιομορφής.

3. Όσον αφορά το φορέα με τρισδιάστατη συμπεριφορά και ελεύθερη τη στροφή εκτός επιπέδου στα άκρα των διαγωνίων:
- Η πρώτη ιδιομορφή του φορέα είναι εκτός επιπέδου μετακίνηση του συστήματος των διαγωνίων με ταυτόχρονο λυγισμό της θλιβόμενης διαγωνίου (εκτός επιπέδου), ενώ οι τρεις επόμενες είναι ιδιομορφές λυγισμού αμφιαρθρωτής ράβδου.
 - Πραγματοποιώντας μη-γραμμική ανάλυση με ατέλεια κατά την 1^η ιδιομορφή έχουμε οριακό φορτίο 154.3kN (60% της διαρροής), με ατέλεια κατά την 2^η ιδιομορφή έχουμε οριακό φορτίο 105kN (40% της διαρροής) και με συνδυασμένη ατέλεια (μειωμένη κατά το ήμισυ) έχουμε οριακό φορτίο 120.5kN (46.7% της διαρροής).
 - Στην περίπτωση που η ατέλεια ασκείται μόνο κατά την πρώτη ιδιομορφή, η αρχική μετατόπιση του φορέα είναι εκτός επιπέδου εκτροπή του συνολικού συστήματος των διαγωνίων. Για μια δεδομένη μετακίνηση έχουμε λυγισμό της θλιβόμενης διαγωνίου και επιστροφή του συστήματος εντός του επιπέδου του φατνώματος. Από τη στιγμή του λυγισμού και μετά δεν μπορεί να ισορροπήσει σε αυτή τη θέση και οι εφελκόμενοι διαγώνιοι «τραβάνε» το σύστημα πίσω, γεγονός που φαίνεται και από την πρόσκληση, μερική, αποφόρτισή τους.
 - Στις περιπτώσεις που η ατέλεια ασκείται κατά τη 2^η ιδιομορφή και συνδυασμένα (μειωμένη κατά το ήμισυ) η αστοχία του φορέα προκαλείται από λυγισμό της θλιβόμενης διαγωνίου χωρίς μετακίνηση του συστήματος εκτός επιπέδου.
 - Και σε αυτήν την περίπτωση ο λυγισμός αμφιαρθρωτής ράβδου (της θλιβόμενης διαγωνίου) είναι η επικρατούσα μορφή αστοχίας.
4. Τα γενικά συμπεράσματα, που προκύπτουν και από τη σύγκριση των καμπυλών λυγισμού είναι τα εξής:
- Οι καμπύλες λυγισμού που αφορούν τους φορείς που τους επιτρέπεται τρισδιάστατη συμπεριφορά ταυτίζονται σε όλο το φάσμα τιμών της ανηγμένης λυγηρότητας. Η καμπύλη που αναφέρεται στο φορέα που συμπεριφέρεται δισδιάστατα παίρνει παντού μικρότερες τιμές. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ τους είναι για τιμές της ανηγμένης λυγηρότητας κοντά στο 0.8 και η μέγιστη διαφορά είναι περίπου 15% (αδιαστατοποιημένο ως προς την μικρότερη τιμή). Για τιμές ανηγμένης λυγηρότητας μικρότερες από 0.2 και οι τρεις καμπύλες ταυτίζονται και είναι οριζόντιες, δηλαδή, για αυτές τις τιμές έχουμε διαρροή υλικού και όχι λυγισμό μέλους.
 - Η παραπάνω παρατήρηση εξηγείται από το γεγονός ότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση ιδιομορφών για το σύστημα των διαγωνίων συνδέσμων. Επομένως, στην περίπτωση των τρισδιάστατων μοντέλων (με συνδυασμένη ατέλεια) ο φορέας έχει τη μισή ατέλεια από αυτήν του δυσδιάστατου μοντέλου για αυτό και παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκριση.

3 ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΔΙΑΓΩΝΙΩΝ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Το επόμενο ζήτημα που για το οποίο γίνεται απόπειρα διερεύνησης είναι αυτό της επιρροής των συνδέσεων των διαγωνίων στην απόκριση του συστήματος. Οι συνδέσεις των διαγωνίων προσομοιώνονται τις περισσότερες φορές, ανάλογα και με την περίπτωση, είτε ως πακτώσεις είτε ως αρθρώσεις. Απλοποιούνται, δηλαδή, ανάλογα με τη συμπεριφορά που αναμένεται να είναι πιο κοντά στην πραγματική απόκριση. Ο στόχος, λοιπόν, είναι η μόρφωση ενός μοντέλου που να λαμβάνει υπόψη την επιρροή των συνδέσεων για μία δεδομένη διατομή συνδέσμου. Στο παρόν, τρίτο, κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται η διαδικασία με την οποία σχεδιάστηκαν και διαστασιολογήθηκαν οι συνδέσεις των διαγωνίων συνδέσμων στο μοντέλο.

3.2 Κανονιστικές οδηγίες

Παρόλο που ο κανονισμός (EC) είναι, μάλλον, ελλιπής όσον αφορά το σχεδιασμό των κομβοελασμάτων των διαγωνίων δίνει κάποιες βασικές κατευθυντήριες γραμμές που επιτρέπουν διαστασιολόγηση των συνδέσεων. Ενδεικτικά τα αποσπάσματα που αναφέρονται στον EC8:

- Τα πλαίσια με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα θα σχεδιάζονται έτσι ώστε η διαρροή των εφελκόμενων διαγωνίων να πραγματοποιείται πριν από στην αστοχία των συνδέσεων και πριν από την διαρροή ή τον λυγισμό των δοκών ή των υποστυλωμάτων. (EN 1998-1: 2004, §6.7.1.1)
- Η κατανομή των ιδιοτήτων των υλικών, όπως για παράδειγμα το όριο διαρροής και η αντοχή σε κρούση, στον φορέα θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να διαμορφώνονται πλαστικές ζώνες, εκεί όπου προβλέπεται από τον σχεδιασμό. Οι ζώνες απόδοσης ενέργειας (πλάστιμες) αναμένεται να διαρρέουν πριν άλλες ζώνες εγκαταλείψουν την ελαστική περιοχή κατά τη διάρκεια του σεισμού. (EN 1998-1: 2004, §6.2.2)
- Για κοχλιωτές συνδέσεις τέμνουσας, η διατμητική αντοχή σχεδιασμού των κοχλιών θα πρέπει να είναι υψηλότερη από 1,2 φορές τη φέρουσα αντοχή σχεδιασμού. (EN 1998-1: 2004, §6.5.5.5)
- Σε διάτμηση θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οι κατηγορίες *B* και *C* των κοχλιωτών συνδέσεων, σύμφωνα με το EN 1993-1-8:2004, **3.4.1** ενώ σε εφελκισμό η κατηγορία *E* των κοχλιωτών συνδέσεων σύμφωνα με το EN 1993-1-8:2004, **3.4.2**. Οι συνδέσεις τέμνουσας με κατάλληλους

κοχλίες επιτρέπονται επίσης. Οι επιφάνειες τριβής θα πρέπει να ανήκουν στην κατηγορία A ή B όπως ορίζεται στο ENV 1090-1. (EN 1998-1: 2004, §6.5.5.4)

- Σε πλαίσια με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα, οι ζώνες απόδοσης ενέργειας θα πρέπει να βρίσκονται κυρίως στις εφελκόμενες διαγώνιους. Δηλαδή, είναι ενεργοί μόνο οι εφελκόμενοι διαγώνιοι σύνδεσμοι, αμελώντας τις διαγώνιους σε θλίψη. (EN 1998-1: 2004, §6.3.1.3)
- Το να λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση οποιουδήποτε τύπου συνδέσμων χωρίς εκκεντρότητα τόσο οι εφελκόμενοι όσο και οι θλιβόμενοι διαγώνιοι επιτρέπεται υπό την προϋπόθεση ότι ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες:
 - χρησιμοποιείται μη-γραμμική στατική (pushover) ανάλυση του συνόλου ή μη γραμμική χρονοϊστορία,
 - τόσο οι καταστάσεις πριν τον λυγισμό όσο και μετά τον λυγισμό λαμβάνονται υπόψη κατά την προσομοίωση της συμπεριφοράς των διαγωνίων και,
 - υπάρχουν κείμενα υποστήριξης που να αιτιολογούν το προσομοίωμα το οποίο χρησιμοποιείται για να αντιπροσωπεύσει την συμπεριφορά των διαγωνίων. (EN 1998-1: 2004, §6.7.2.3)
- Σε πλαίσια με X διαγώνιους συνδέσμους, η αδιάστατη λυγηρότητα $\bar{\lambda}$, όπως ορίζεται στο EN 1993-1-1:2004 θα πρέπει να περιορίζεται σε: $1,3 < \bar{\lambda} \leq 2,0$. (EN 1998-1: 2004, §6.7.3.1)
- Πλάστιμες ημι-άκαμπτες και/ ή μερικής αντοχής συνδέσεις επιτρέπονται, υπό την προϋπόθεση ότι ικανοποιούνται όλες οι ακόλουθες συνθήκες:
 - οι συνδέσεις διαθέτουν ικανότητα επιμήκυνσης συμβατή με τις συνολικές παραμορφώσεις,
 - το αποτέλεσμα των παραμορφώσεων των συνδέσεων στην συνολική σχετική μετακίνηση λαμβάνεται υπόψη χρησιμοποιώντας μη-γραμμική στατική (pushover) ανάλυση του συνόλου ή μη-γραμμική χρονοϊστορία. (EN 1998-1: 2004, §6.7.3.9)

Και τα αποσπάσματα που αναφέρονται στον EC3:

- Όταν δεν επιτρέπεται η ολίσθηση σε έναν κόμβο (επειδή καταπονείται με αντιστροφή του διατμητικού φορτίου ή για οποιοδήποτε άλλο λόγο), πρέπει να χρησιμοποιούνται προεντεταμένοι κοχλίες σε συνδέσεις κατηγορίας B ή C, εφαρμοσμένοι κοχλίες, ήλοι ή συγκόλληση. (EN 1993-1-8: 2003, §2.6.2)
- Σε συνδέσμους δυσκαμψίας και/ή συνδέσμους ευστάθειας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοχλίες κατηγορίας A. (EN 1993-1-8: 2003, §2.6.2)

3.3 Σχεδιασμός και διαστασιολόγηση συγκολλήσεων

Θα γίνει μία συνοπτική παρουσίαση της μεθοδολογίας που ακολουθείται για τη διαστασιολόγηση των συνδέσεων. Η δύναμη με την οποία θα διαστασιολογηθούν οι συνδέσεις των διαγωνίων προκύπτει ως η ικανοτική εφελκυστική δύναμη διαρροής του κάθε μέλους (Εξ. 1-3).

$$F_{ικαν} = 1.2A_{s,diag} f_y \quad (3-1)$$

Όπου:

$A_{s,diag}$ είναι το εμβαδόν της διατομής των διαγωνίων συνδέσεων, και

f_y η τάση διαρροής του χάλυβα των διαγωνίων συνδέσεων

Η δύναμη που μπορούν να παραλάβουν οι συγκολλήσεις στην άκρη κάθε διαγωνίου μέλους ανέρχεται σε:

$$N_{Ed,f} = 4l_1 a f_{vwd} \quad (3-2)$$

Όπου:

l_1 το μήκος της κάθε συγκόλλησης, και

a το πάχος της κάθε συγκόλλησης

f_{vwd} η αντοχή σχεδιασμού της συγκόλλησης σε διάτμηση

Για να διαστασιολογηθούν οι συγκολλήσεις επιλύεται η Εξίσωση (3-2) ως προς το μήκος των συγκολλήσεων:

$$l_1 = \frac{N_{Ed,f}}{4a f_{vwd}} \quad (3-3)$$

3.4 Σχεδιασμός και Διαστασιολόγηση κοχλιώσεων

Οι κοχλίες που θα χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση που εξετάζεται είναι προεντεταμένοι τύπου C και ποιότητας 8.8. Στον Πίνακα (3-1) δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά της σύνδεσης.

Πίνακας 3-1: Χαρακτηριστικά προεντεταμένης κοχλιώσης

Χαρακτηριστικά μεγέθη	Τιμές
Διαστάσεις κοχλία	M20
k_s	1
f_{ub}	800000kPa
μ	0.5

Επαναλαμβάνοντας, συνοπτικά, κάποια στοιχεία του πρώτου κεφαλαίου, δίνεται η μεθοδολογία διαστασιολόγησης των προεντεταμένων κοχλιών. Η δύναμη προέντασης η οποία πρέπει να ασκηθεί σε κάθε κοχλία είναι (Εξ. (3-4)):

$$F_{p,C} = 0.7f_{ub} A_s \quad (3-4)$$

Επομένως, η συνολική αντοχή της σύνδεσης σε ολίσθηση υπολογίζεται ως εξής (Εξ. (3-5)):

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C} \quad (3-5)$$

Έχοντας, λοιπόν, γνωστή την $F_{ικαν}$ και την $F_{s,Rd}$, προκύπτει ο αριθμός των απαιτούμενων κοχλιών για μια μεμονομένη σύνδεση:

$$n = \frac{F_{ικαν}}{F_{s,Rd}} \quad (3-6)$$

3.5 Σχεδιασμός και Διαστασιολόγηση κομβοελασμάτων

Τα κομβοελάσματα σύνδεσης διαστασιολογούνται σε καθαρό εφελκυσμό λαμβάνοντας υπόψη τη μικρότερη διατομή τους (με τις μεγαλύτερες δυνατές απομειώσεις λόγω οπών). Η δύναμη που μπορεί να αποδώσει κάθε έλασμα υπολογίζεται ως εξής (Εξ. (3-7)):

$$F_{ελ} = [t_{ελ} l_{ελ} - n(d + a)t_{ελ}] f_u \quad (3-7)$$

Εξισώνοντας την απαιτούμενη δύναμη $F_{ικ}$ με τη διατιθέμενη $F_{ελ}$ και λύνοντας ως προς το πάχος του ελάσματος προκύπτει (Εξ. (3-8)):

$$t_{ελ} = \frac{F_{ικ}}{f_u [l_{ελ} - n(d + a)]} \quad (3-8)$$

3.6 Αποτελέσματα για συγκεκριμένο παράδειγμα

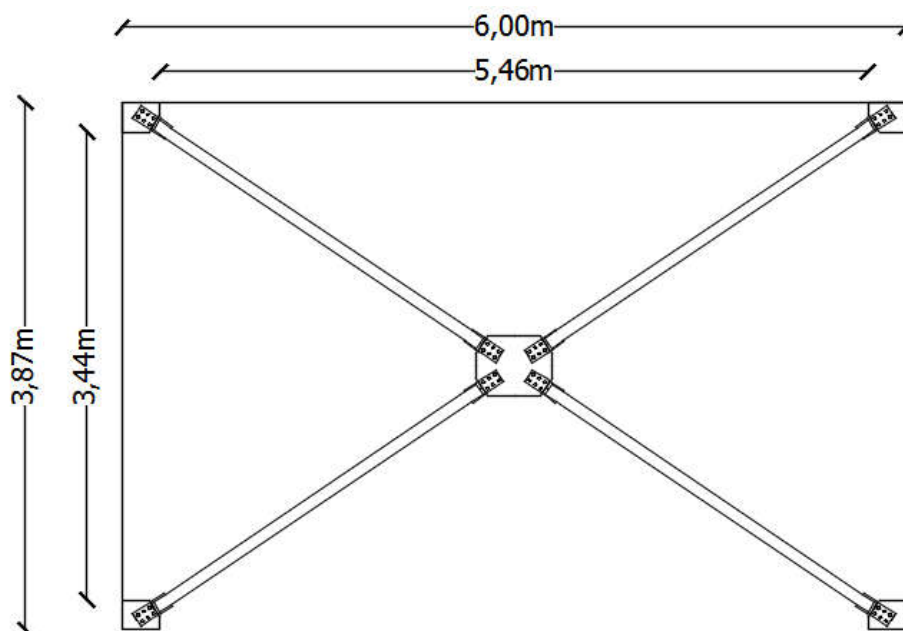
Η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε για έναν διαγώνιο σύνδεσμο διατομής CHS 0.0889x0.005. Τα χαρακτηριστικά της σύνδεσης που αφορούν τους προεντεταμένους κοχλίες και τα κομβοελάσματα φαίνονται στον Πίνακα (3-2).

Πίνακας 3-2: Χαρακτηριστικά μεγέθη της σύνδεσης του διαγώνιου συνδέσμου

Χαρακτηριστικά μεγέθη	Τιμές
Αριθμός κοχλιών	6
Ποιότητα κοχλιών	8.8
Διαστάσεις κοχλία	M20
Δύναμη προέντασης	137.2kN
Μήκος κομβοελάσματος διαγωνίου	0.1747m
Πλάτος κομβοελάσματος διαγωνίου	0.11m
Πάχος κομβοελάσματος διαγωνίου	0.015m

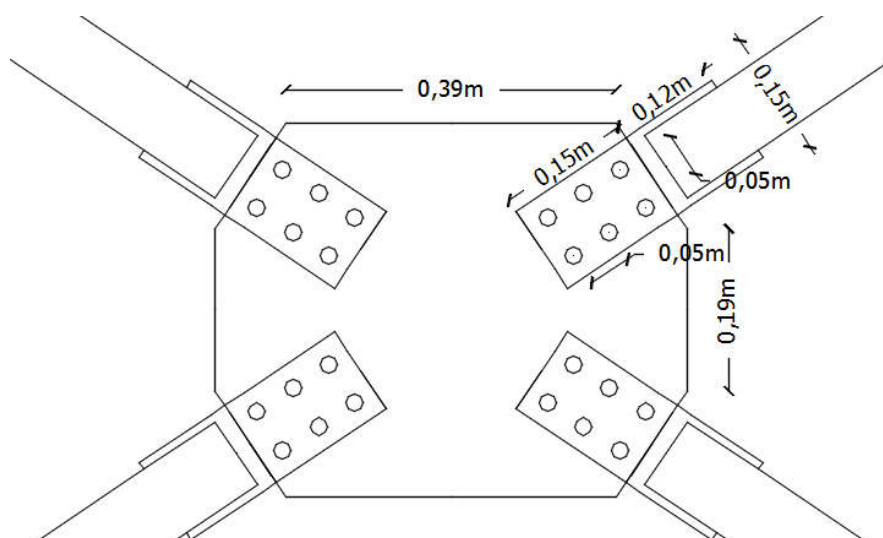
3.7 Σχέδια συνδέσεων

Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά σχέδια και λεπτομέρειες σχεδίων του συστήματος των διαγώνιων συνδέσεων. Στην Εικόνα (3-1) φαίνεται ένα συνολικό σχέδιο του φαντώματος με τις βασικές του διαστάσεις.



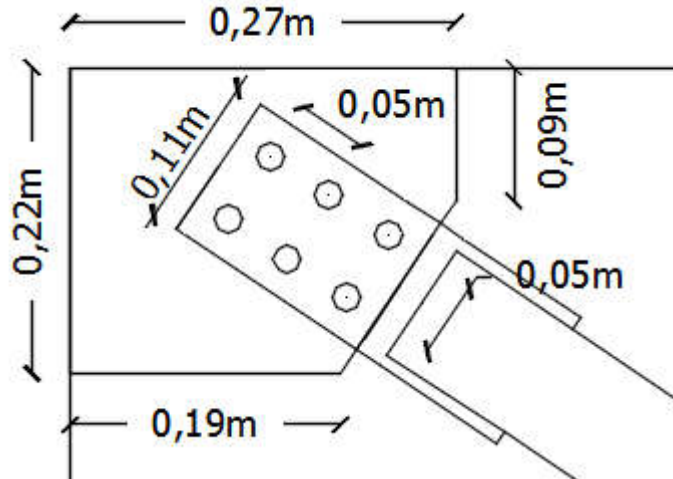
Εικόνα 3-1: Διαγώνιοι σύνδεσμοι με σχεδιαστικές λεπτομέρειες συνδέσεων

Στην Εικόνα (3-2) απεικονίζεται μια σχεδιαστική λεπτομέρεια του μεσαίου κομβοελάσματος του συστήματος των διαγώνιων.



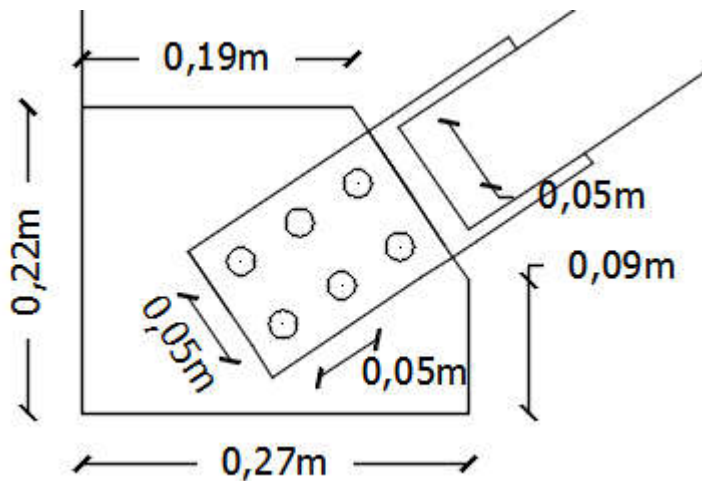
Εικόνα 3-2: Σχεδιαστική λεπτομέρεια μεσαίου κομβοελάσματος

Στην Εικόνα (3-3) απεικονίζεται μια σχεδιαστική λεπτομέρεια του ακραίου κομβοελάσματος του φορέα στην κορυφή των υποστυλωμάτων.



Εικόνα 3-3: Σχεδιαστική λεπτομέρεια άνω ακραίου κομβοελάσματος

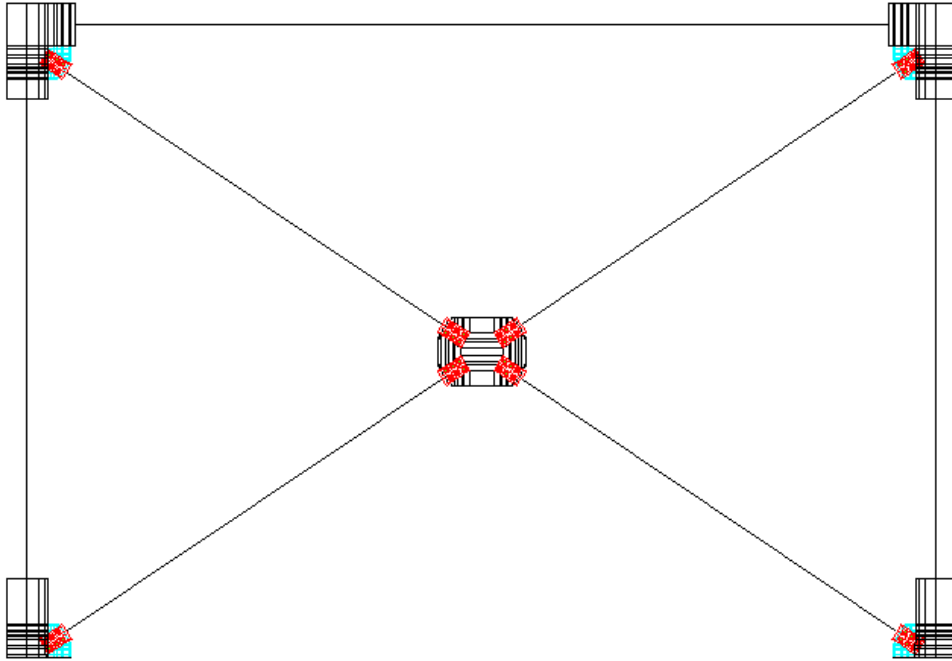
Στην Εικόνα (3-4) απεικονίζεται μια σχεδιαστική λεπτομέρεια του ακραίου κομβοελάσματος του φορέα στη βάση των υποστυλωμάτων.



Εικόνα 3-4: Σχεδιαστική λεπτομέρεια κάτω ακραίου κομβοελάσματος

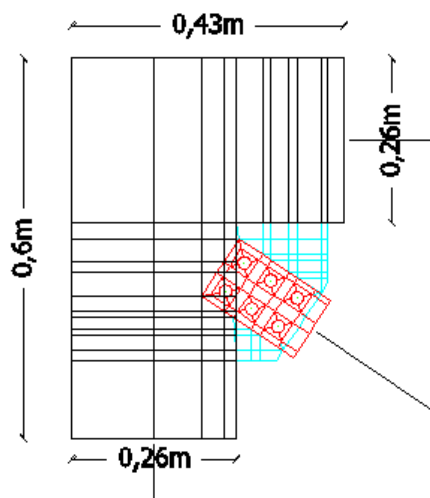
3.8 Σχέδια μοντέλου

Η γεωμετρία του μοντέλου μορφώθηκε στο λογισμικό AutoCAD λόγω της πολυπλοκότητάς της και από εκεί εισήχθη στο ADINA. Στην Εικόνα (3-5) παρουσιάζεται η όψη του συστήματος.

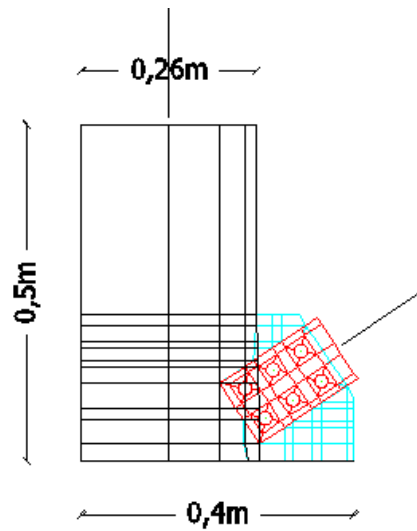


Εικόνα 3-5: Σχεδιαστική λεπτομέρεια κάτω ακραίου κομβοελάσματος

Για να μορφωθούν οι συνδέσεις η δοκός και το υποστύλωμα στη σύνδεση θα προσομοιωθούν με επιφανειακά στοιχεία. Η γεωμετρία των μοντέλων φαίνεται στις Εικόνες (3-6) και (3-7)

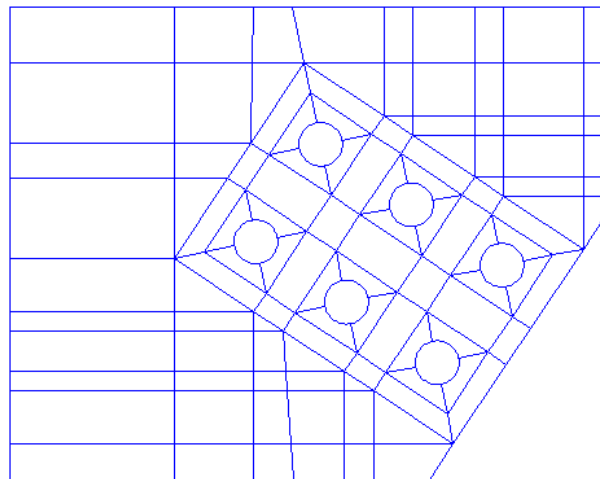


Εικόνα 3-6: Σχεδιαστική λεπτομέρεια άνω ακραίου κόμβου μοντέλου



Εικόνα 3-7: Σχεδιαστική λεπτομέρεια κάτω ακραίου κόμβου μοντέλου

Η μόρφωση της γεωμετρίας των κομβοελασμάτων αποτέλεσε το πιο επίπονο κομμάτι της διαδικασίας προσομοίωσης (Εικόνα (3-8)). Η ύπαρξη των κυκλικών οπών πάνω στα ελάσματα ήταν το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που καθόρισε την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του μοντέλου. Η γεωμετρία του κύκλου της οπής προσομοιώθηκε ως 24 ευθύγραμμα υπομήματα, παραδοχή που θεωρείται επαρκής.



Εικόνα 3-8: Σχεδιαστική λεπτομέρεια κομβοελάσματος

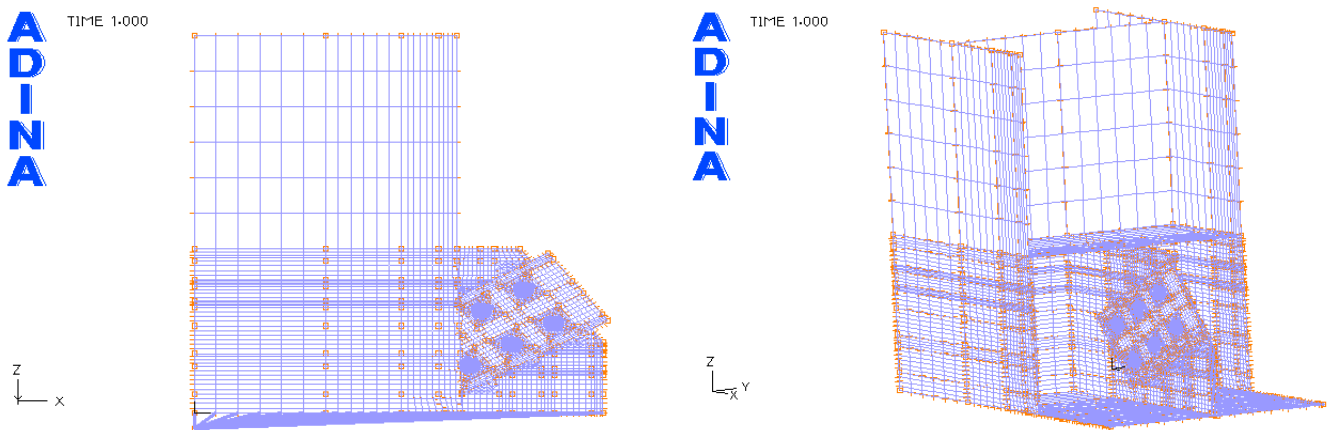
4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΕ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΑΦΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε και στο 3^ο κεφάλαιο, στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι η μόρφωση ενός μοντέλου που θα μπορεί να συμπεριλάβει την επιρροή των συνδέσεων των διαγωνίων στην απόκριση του συστήματος. Στο προηγούμενο, τρίτο, κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάστηκε η διαδικασία με την οποία σχεδιάστηκαν και διαστασιολογήθηκαν οι συνδέσεις των διαγωνίων συνδέσμων. Το μοντέλο είναι ένα φάτνωμα με κεντρικούς συνδέσμου δυσκαμψίας, αντίστοιχο με αυτό που παρουσιάστηκε στο 2^ο κεφάλαιο, με τη διαφορά πως οι συνδέσεις των συνδέσμων δεν είναι αρθρώσεις ή πακτώσεις, αλλά προσομοιώνονται λεπτομερώς όπως σχεδιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το σύστημα, δηλαδή, περιλαμβάνει πλέον και τα κομβοελάσματα καθώς και τους προεντεταμένους κοχλίες. Το λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιήθηκε και εδώ είναι το ADINA και για την προσομοίωση των συνδέσεων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία επαφής (contact elements) και στοιχεία κοχλία (bolt elements). Για να υλοποιηθεί η σύνδεση, επίσης, το ένα μέρος από τα στοιχεία δοκού (με τα οποία μοντελοποιούνται τα υποστυλώματα και η δοκός) αντικαθίστανται από επιφανειακά στοιχεία που αναπαριστούν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια τη γεωμετρία των συνδέσεων.

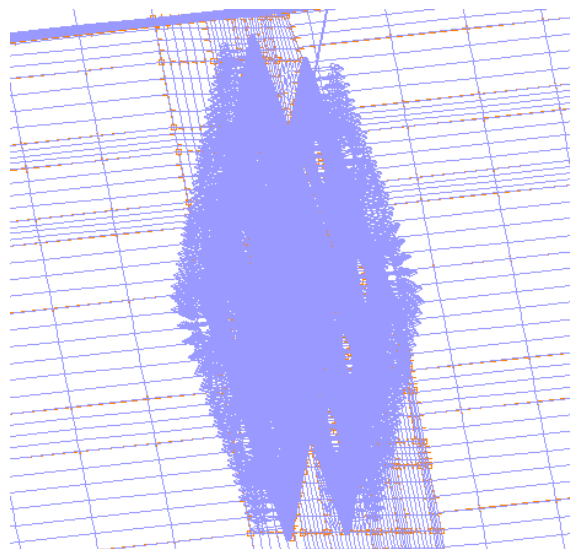
4.2 Μεμονωμένη σύνδεση μοντέλου

Η πολυπλοκότητα του μοντέλου είναι τέτοια που απαιτεί συνεχή έλεγχο και διορθώσεις για να γίνει εφικτή η σύγκλιση του αλγορίθμου των μη γραμμικών αναλύσεων. Για αυτό το λόγο μελετάται, αρχικά, μία μεμονωμένη σύνδεση χιαστί – υποστυλώματος στη βάση του. Τόσο τα κομβοελάσματα, όσο και τα ελάσματα των πελμάτων και του κορμού του υποστυλώματος προσομοιώνονται με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Στο Σχήμα (4-1) φαίνεται το μοντέλο του κόμβου όπου διακρίνεται και η πυκνότητα της διακριτοποίησης (mesh) των στοιχείων. Η διακριτοποίηση έγινε με τέτοιο τρόπο που να διευκολύνει τη σύγκλιση των μη γραμμικών αναλύσεων που θα πραγματοποιηθούν. Όλοι οι κόμβοι της βάσης του μοντέλου είναι πακτωμένοι σε ένα σταθερό σημείο μέσω άκαμπτων στοιχείων (rigid links).



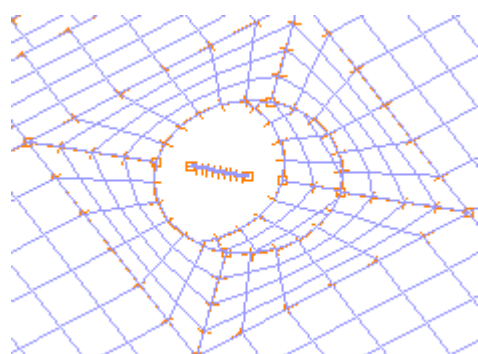
Σχήμα 4-1: Ακραίος κόμβος φορέα με στοιχεία επαφής

Στο Σχήμα (4-2) φαίνεται το ζεύγος των επιφανειών επαφής στη σύνδεση. Αποτελείται από το κομβοέλασμα του διαγώνιου συνδέσμου και από ένα κομμάτι (αυτό που θα έρθει σε επαφή) του κομβοελάσματος του υποστυλώματος.

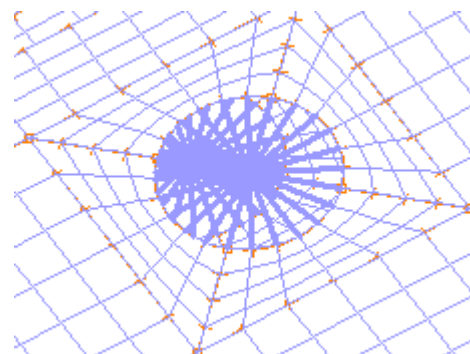


Σχήμα 4-2: Επιφάνειες επαφής (contact surfaces)

Οι κοχλίες προσομοιώθηκαν με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία κοχλία (bolt elements) (Σχήμα (4-3)α) και τα περικόχλια με άκαμπτα στοιχεία (rigid links) (Σχήμα (4-3)β) μεταξύ των ακραίων σημείων του κοχλία και των αντίστοιχων οπών των κομβοελασμάτων. Μετά από επαναλήψεις, επιλέχθηκε αυτός ο τρόπος προσομοίωσης των κοχλιών ως ο μοντελικά απλούστερος που θα μπορούσε να προσδώσει ρεαλιστικά στις συνδέσεις τη δυσκαμψία που προσφέρουν οι προεντεταμένοι κοχλίες. Αν υπήρχε απαίτηση να μελετηθεί και η συμπεριφορά των ίδιων των κοχλιών θα έπρεπε να προσομοιωθούν και τα περικόχλια με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία που θα έρχονταν σε επαφή με τα κομβοελάσματα.



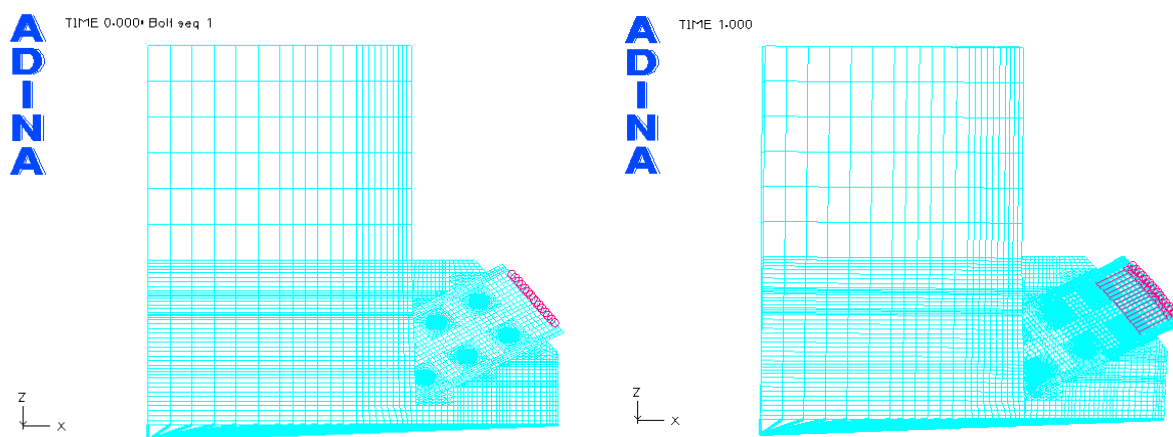
α) Προσομοίωση κορμού κοχλία (bolt elements)



β) Προσομοίωση κεφαλής κοχλία (rigid links)

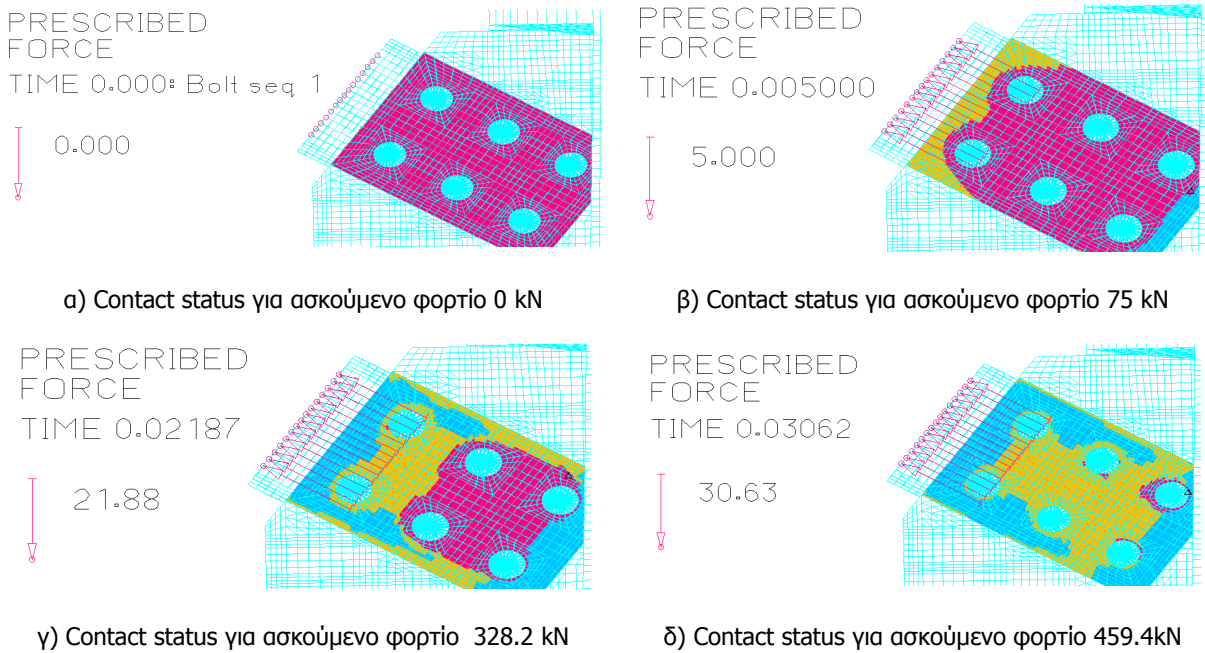
Σχήμα 4-3: Προσομοίωση κοχλία

Η φόρτιση που ασκείται στο μοντέλο (Σχήμα (4-4)) είναι αντίστοιχης κατεύθυνσης και φοράς όπως η δύναμη που θα μεταβίβαζε στον κόμβο ο εφελκυστικός διαγώνιος του συστήματος. Ασκείται, δηλαδή, καταναμημένο φορτίο (εφελκυστικό ως προς τον κόμβο) στην άκρη του κομβοελάσματος. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε δύο μέρη, με επιβολή φορτίου, καθώς η επιβολή μετακίνησης παρουσίασε προβλήματα στη σύγκλιση. Στο πρώτο μέρος επιβάλλεται η προένταση των κοχλιών με σκοπό να «κλείσουν» τα κομβοελάσματα και να αποκτήσει ο φορέας την επιθυμητή δυσκαμψία. Στο δεύτερο μέρος επιβάλλεται το εξωτερικό φορτίο.



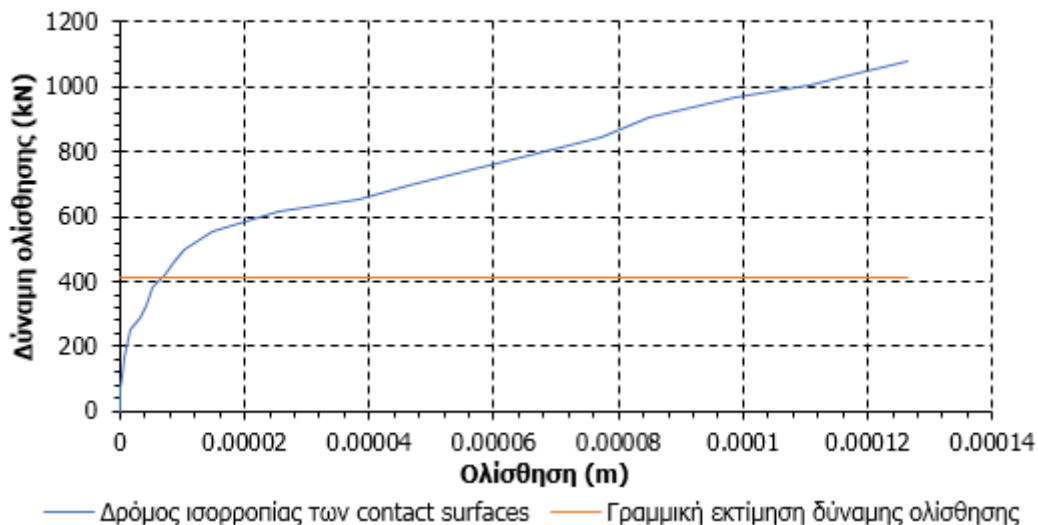
Σχήμα 4-4: Ασκούμενο φορτίο στην απαραμόρφωτη και στην παραμορφωμένη κατάσταση

Ο πρώτος έλεγχος των contact elements στη σύνδεση αφορά το κλείσιμο των κενών μεταξύ των στοιχείων, των δύο κομβοελασμάτων, στο τέλος της προέντασης των κοχλιών. Το Σχήμα (4-5)α δείχνει το contact status μεταξύ των δύο κομβοελασμάτων και φαίνεται πως πράγματι τα κενά μεταξύ των contact surfaces έχουν κλείσει τελείως. Το επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός του εξωτερικού φορτίου για το οποίο η σύνδεση ολισθαίνει (απώλεια δυσκαμψίας) και η σύγκριση του με τη δύναμη ολίσθησης που προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε τη συνολική δύναμη προέντασης με το συντελεστή τριβής των δύο επιφανειών.



Σχήμα 4-5: Contact status σε διάφορα στάδια της ανάλυσης

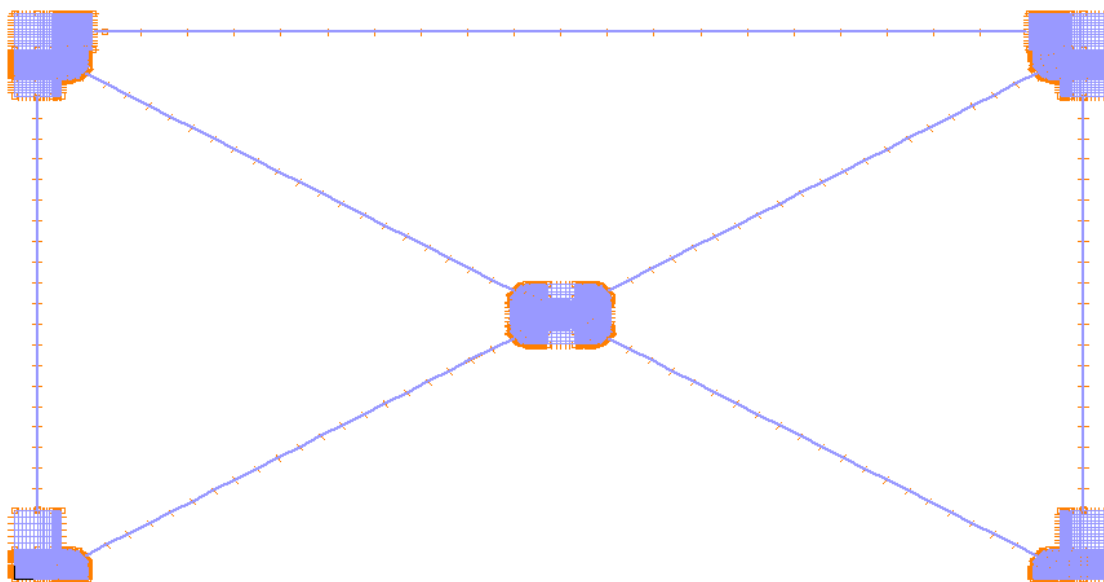
Η δύναμη ολίσθησης από την ανάλυση προσδιορίστηκε στα 459.4kN περίπου, ενώ η δύναμη που προκύπτει ως γινόμενο της προέντασης με το συντελεστή τριβής ανέρχεται στα 412kN. Η απόκλιση μεταξύ των δύο τιμών είναι κατά προσέγγιση 10%, τιμή που θεωρείται επαρκής για το είδος των αναλύσεων που θα εκτελεστούν. Στο Διάγραμμα (4-1) παρουσιάζεται και ο δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης κατά τη σταδιακή άσκηση της φόρτισης. Φαίνεται το πως «μαλακώνει» η σύνδεση με την επιβολή του φορτίου και η απότομη μείωση της δυσκαμψίας της μετά τα 460kN περίπου.



Διάγραμμα 4-1: Δρόμος ισορροπίας των contact surfaces

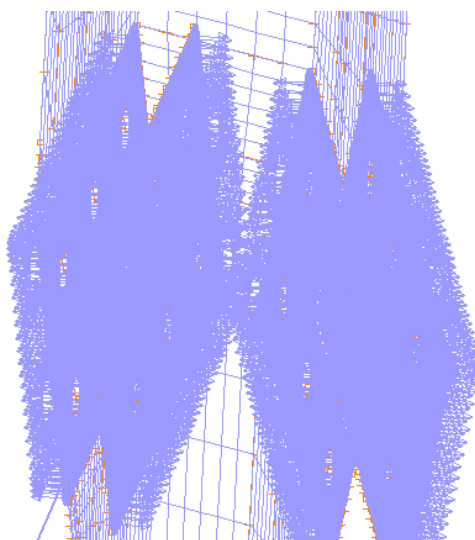
4.3 Τρισδιάστατο συνολικό μοντέλο

Το επόμενο βήμα είναι η μόρφωση του συνολικού μοντέλου με τις συνδέσεις (Σχήμα (4-6)). Όλοι οι κόμβοι του μοντέλου διαμορφώνονται όπως περιγράφηκε στο 4.2. Οι δοκοί, τα υποστυλώματα και τα μέλη των διαγώνιων συνδέσεων προσομοιώθηκαν με στοιχεία δοκού (beam elements). Η διακριτοποίησή τους έγινε με αντίστοιχο τρόπο όπως και στο 2^ο κεφάλαιο.



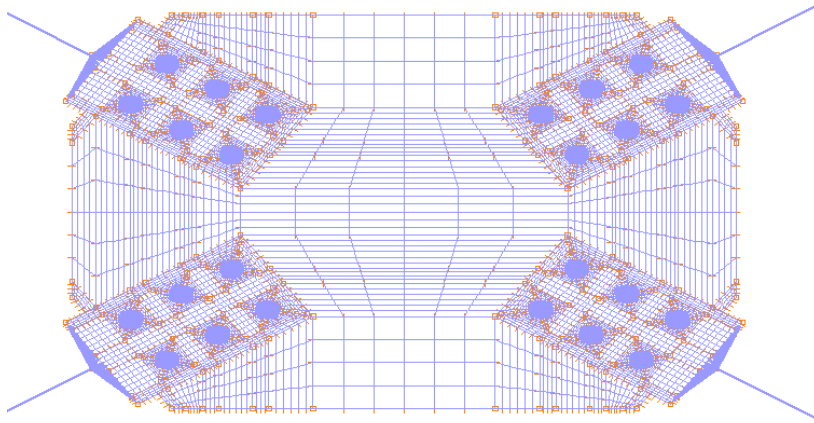
Σχήμα 4-6: Τρισδιάστατο μοντέλο με contact elements

Στο Σχήμα (4-7) φαίνονται τα ζεύγη των επιφανειών επαφής στο μεσαίο κομβοέλασμα. Αποτελούνται από τα κομβοελάσματα των διαγωνίων και μέρη (αυτό που θα έρθει σε επαφή) του μεσαίου κομβοελάσματος.



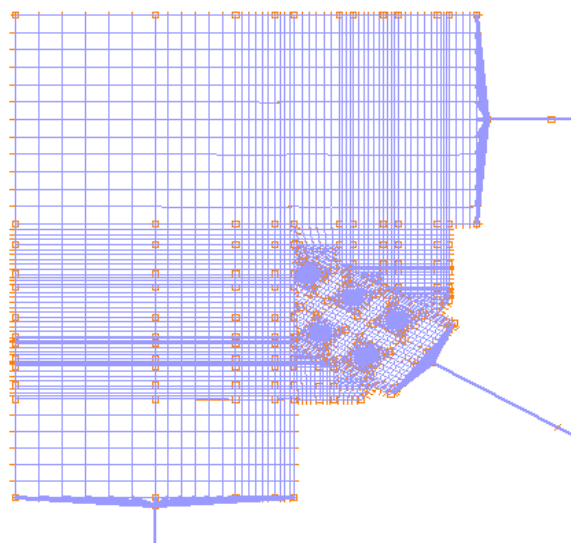
Σχήμα 4-7: Contact elements μοντέλου

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στη διαμόρφωση της μεσαιάς σύνδεσης του συστήματος, εκεί δηλαδή που τέμνονται οι διαγώνιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας. Στο Σχήμα (4-8) φαίνεται η διακριτοποίηση των στοιχείων στον κόμβο. Τα μέλη των διαγώνιων συνδέονται και εδώ με άκαμπτα στοιχεία (rigid links).



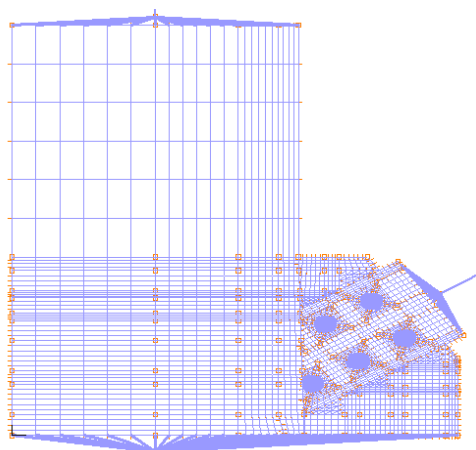
Σχήμα 4-8: Προσομοίωση μεσαιού κομβοέλασμα μοντέλου

Οι κόμβοι στην κορυφή των υποστυλωμάτων διαμορφώθηκαν με αντίστοιχο τρόπο όπως και στη βάση τους. Η διαφορά εδώ είναι πως προσομοιώνεται με επιφανειακά στοιχεία και ένα κομμάτι της δοκού πριν «διακοπεί» και συνεχιστεί με στοιχεία δοκού. Η σύνδεση των επιφανειακών στοιχείων και των στοιχείων δοκού στην αποκατάσταση συνέχειας στις δοκούς και στα υποστυλώματα γίνεται με άκαμπτα στοιχεία (rigid links). Στο Σχήμα (4-9) φαίνεται ο ένας από τους δύο κόμβους κορυφής υποστυλώματος.



Σχήμα 4-9: Προσομοίωση άνω κόμβου μοντέλου

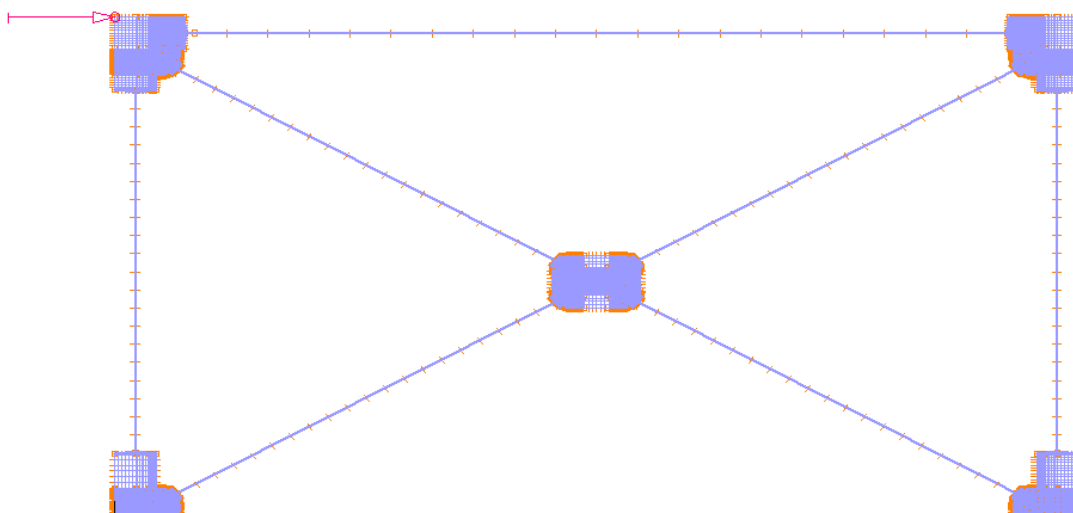
Για λόγους πληρότητας παρουσιάζεται και ένας κόμβος βάσης του υποστυλώματος από το συνολικό μοντέλο (Σχήμα (4-10)). Η σύνδεση των επιφανειακών στοιχείων και των στοιχείων δοκού στην αποκατάσταση συνέχειας στα υποστυλώματα γίνεται και εδώ με άκαμπτα στοιχεία (rigid links). Η σύνδεση στη βάση του υποστυλώματος γίνεται με άκαμπτα στοιχεία σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Η στήριξη που του επιβάλλεται είναι άρθρωση για στροφή ως προς τον άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδο του χιαστί. Το σημείο στήριξης βρίσκεται πάνω στον άξονα του κέντρου βάρους της διατομής του υποστυλώματος.



Σχήμα 4-10: Προσομοίωση κάτω κόμβου μοντέλου

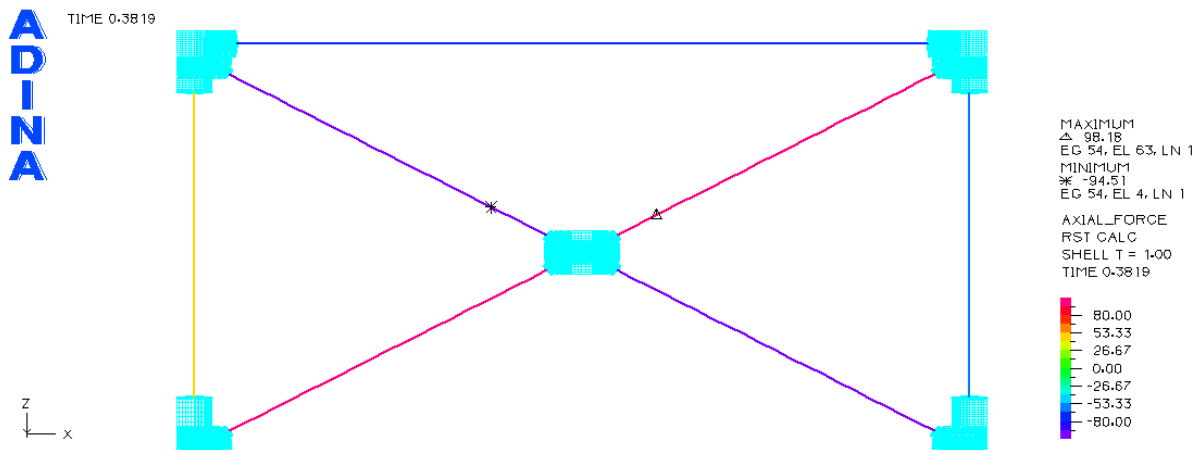
4.4 Αρχικός Έλεγχος Μοντέλου

Για να γίνει ένας αρχικός έλεγχος στο μοντέλο και κυρίως στα contact elements, πραγματοποιήθηκε γραμμική ελαστική ανάλυση. Το φορτίο ασκήθηκε στην κορυφή του υποστυλώματος (Σχήμα (4-11)).



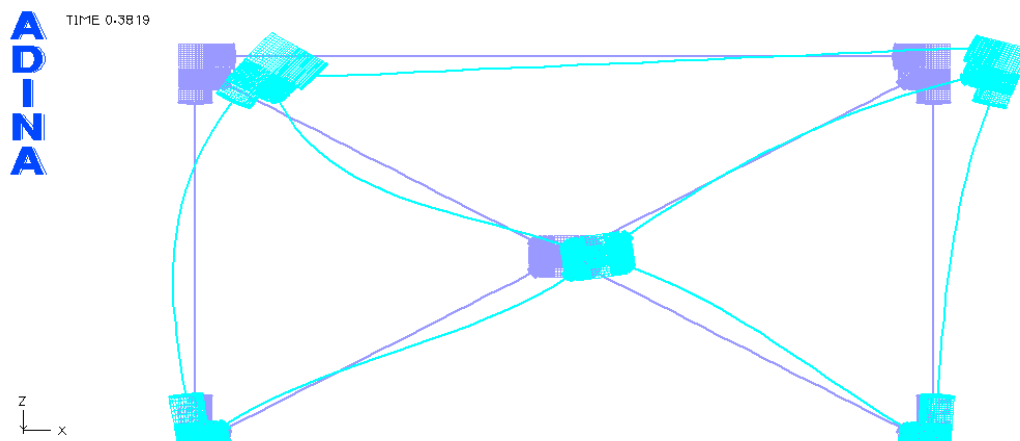
Σχήμα 4-11: Άσκηση φορτίου στο μοντέλο

Οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο φορέα (Σχήμα (4-12)) είναι, σε πρώτη φάση, λογικές όσον αφορά το πρόσημό τους πάνω στους συνδέσμους, γεγονός που δείχνει ότι, καταρχήν, το μοντέλο λειτουργεί.



Σχήμα 4-12: Αξονικές δυνάμεις στα μέλη του φορέα

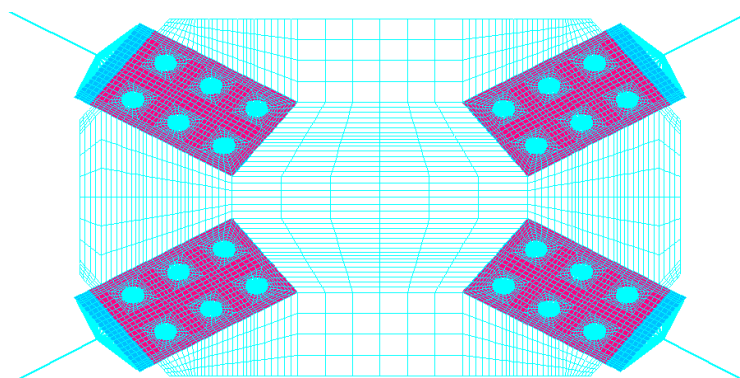
Δεδομένου ότι πραγματοποιείται γραμμική ανάλυση, η παραμόρφωση του φορέα είναι πολύ μικρή για να βγουν συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των χιαστί. Παρόλα αυτά δίνουν μια πρώτη εικόνα της καμπτικής συμπεριφοράς των δοκών και του υποστυλώματος. Στο Σχήμα (4-13) το σχετικό μέγεθος της παραμόρφωσης είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από την πραγματικότητα καθώς έχει μεγεθυνθεί για να είναι ορατή η διαφορά με τον απαραμόρφωτο φορέα.



Σχήμα 4-13: Παραμορφωμένη εικόνα φορέα (παρ/ση 10%)

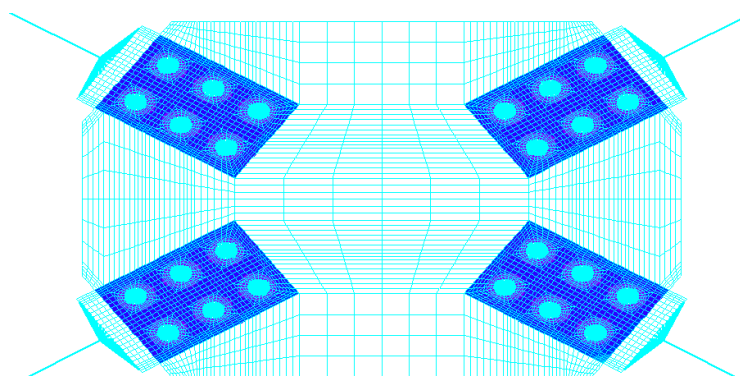
Ο επόμενος έλεγχος αφορά τα contact elements στο τέλος της προέντασης των κοχλιών. Το βασικό απαιτούμενο είναι να έρθουν σε επαφή τα contact surfaces, δηλαδή να μπορέσουν να συγκλίνουν τα contact elements και οι κοχλίες χωρίς να μείνουν κενά μεταξύ τους. Στο Σχήμα (4-14) φαίνεται πως τα

κενά έχουν κλείσει τελείως μεταξύ των ελασμάτων των διαγωνίων και του μεσαίου κομβοελάσματος (closed contact status).

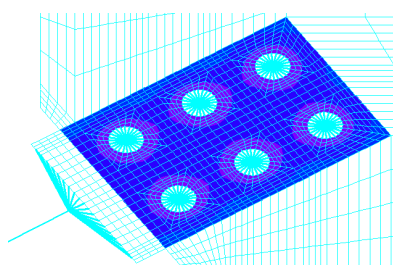


Σχήμα 4-14: Contact status στο τέλος της προέντασης των κοχλιών

Αντίστοιχη εικόνα παρουσιάζουν και τα contact gaps (κενά) μεταξύ των ελασμάτων στο τέλος της προέντασης των κοχλιών (Σχήμα (4-15) και Σχήμα (4-16)). Στην περιοχή γύρω από τους προεντεταμένους κοχλίες τα κενά είναι μικρότερα (αριθμητικές διαφορές – πρακτικά ανύπαρκτα).

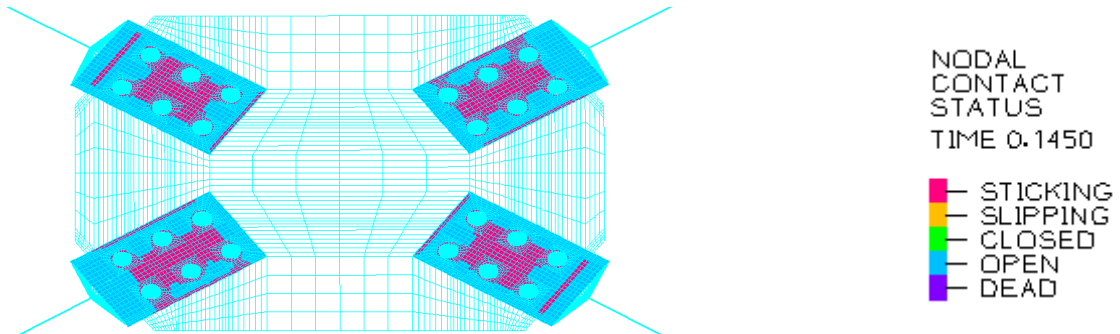


Σχήμα 4-15: Contact gap στο τέλος της προέντασης των κοχλιών

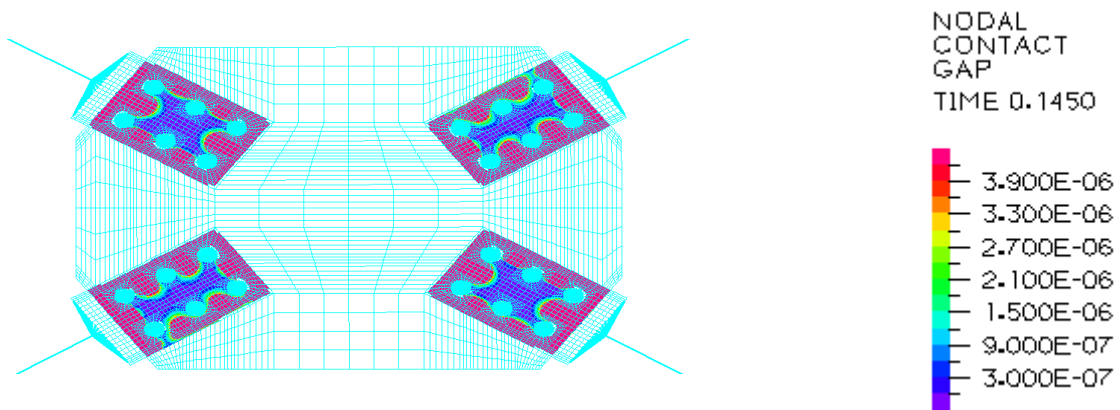


Σχήμα 4-16: Contact gap στο τέλος της προέντασης των κοχλιών (λεπτομέρεια)

Στα Σχήματα (4-17) και (4-18) παρουσιάζεται το contact status και τα contact gaps στο τέλος της ανάλυσης στα contact elements του μεσαίου κομβοελάσματος. Η «ασφαλής» περιοχή ανάμεσα στους κοχλίες διατηρεί τη δυσκαμψία της (τα contact elements παραμένουν σε sticking contact status).

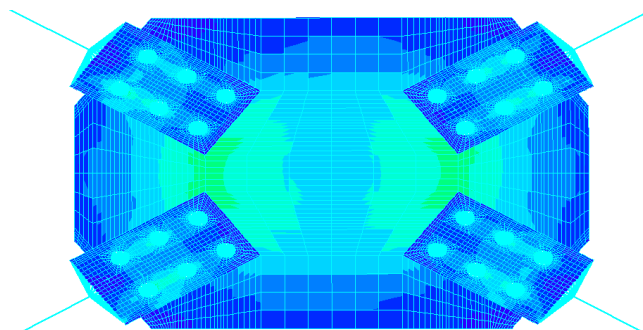


Σχήμα 4-17: Contact status στο τέλος της ανάλυσης



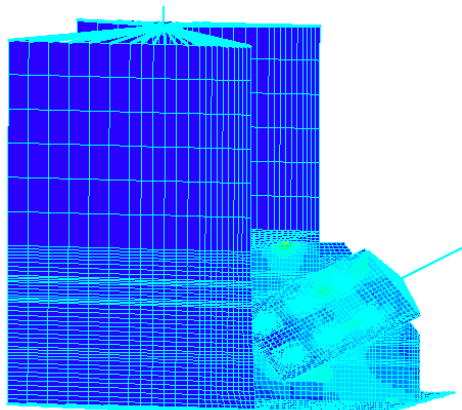
Σχήμα 4-18: Contact gaps στο τέλος της ανάλυσης

Οι τάσεις στο μεσαίο κομβοέλασμα κατανέμονται έτσι ώστε οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις να παρατηρούνται στην περιοχή ανάμεσα στα τέσσερα κομβοελάσματα των διαγώνιων (Σχήμα (4-19)). Οι περιοχές στις άκρες του κομβοελάσματος φαίνεται πως παραμένουν ανενεργές.



Σχήμα 4-19: Κατανομή τάσεων στο μεσαίο κομβοέλασμα στο τέλος της ανάλυσης

Οι τάσεις σε ένα ακραίο κομβοέλασμα έχουν «ροή» από την περιοχή σύνδεσης με τη διαγώνιο προς τα πλησιέστερα ελάσματα στήριξης (Σχήμα (4-20)). Οι περιοχές στις άκρες του κομβοελάσματος της δοκού φαίνεται πως παραμένουν και σε αυτήν την περίπτωση ανενεργές.



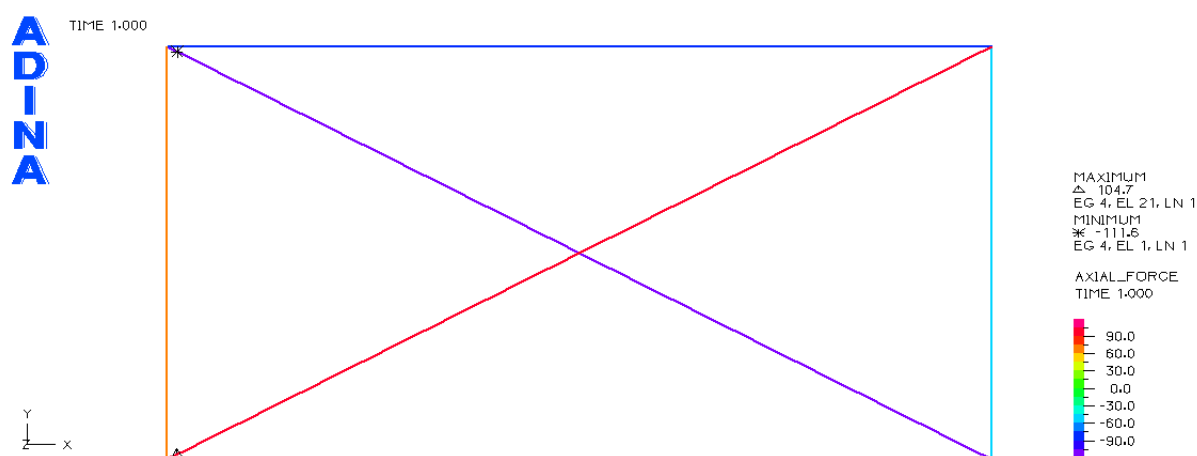
Σχήμα 4-20: Κατανομή τάσεων στον ακραίο κόμβο στο τέλος της ανάλυσης

4.5 Σύγκριση απλού – σύνθετου μοντέλου

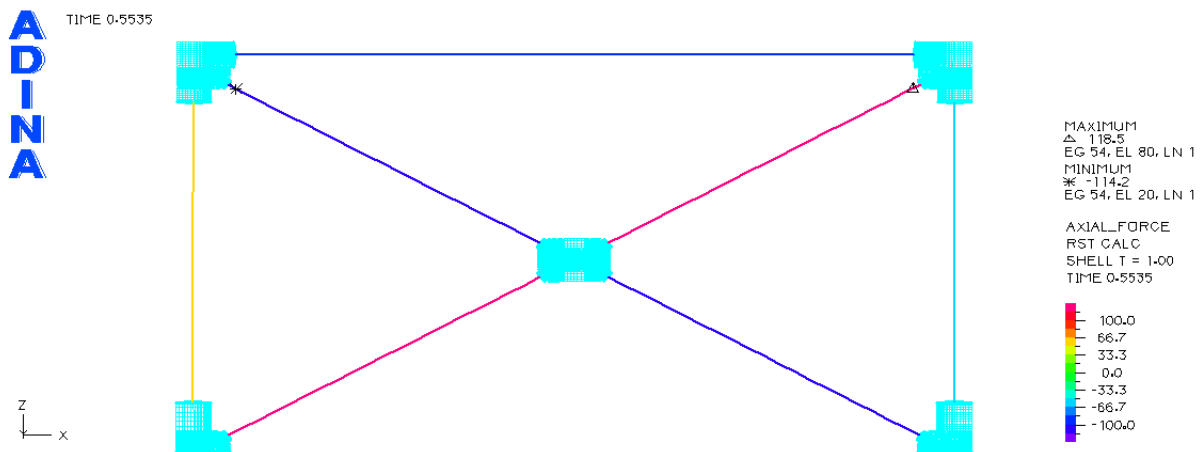
Η πολυπλοκότητα του μοντέλου είναι τέτοια που απαιτεί τον καλύτερο δυνατό έλεγχο πριν την πραγματοποίησή των μη γραμμικών αναλύσεων. Σε συνέχεια των αρχικών ελέγχων που πραγματοποιήθηκαν στην 4.4 συγκρίνονται αποτελέσματα γραμμικών ελαστικών αναλύσεων (με μη γραμμικότητα επαφής στις συνδέσεις) με αντίστοιχα αποτελέσματα γραμμικών ελαστικών αναλύσεων στο μοντέλο του 2^{ου} κεφαλαίου.

4.5.1 Σύγκριση αξονικών δυνάμεων

Αρχικά, γίνεται σύγκριση των αξονικών δυνάμεων των διαγώνιων στις δύο περιπτώσεις για ίδιο επίπεδο φόρτισης, που φτάνει τα 0.5cm οριζόντιας μετακίνησης οροφής (Σχήμα (4-21) και Σχήμα (4-22)).



Σχήμα 4-21: Αξονικές δυνάμεις απλού μοντέλου



Σχήμα 4-22: Αξονικές δυνάμεις σύνθετου μοντέλου

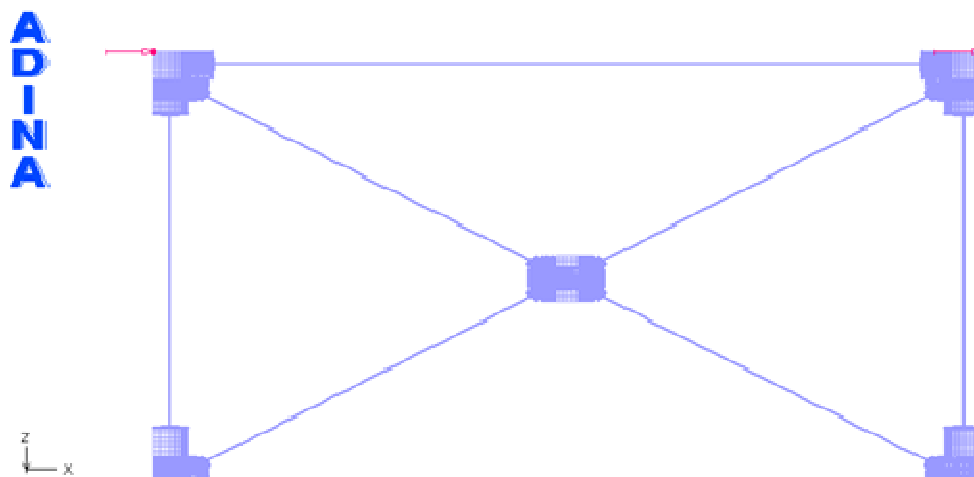
Στον Πίνακα (4-1) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Οι διαφορές ανάμεσα στα δύο μοντέλα κυμαίνονται από 2%-11%, αποκλίσεις που θεωρούνται αρκούτσως μικρές για τα μοντέλα που συγκρίνονται.

Πίνακας 4-1: Αξονικές δυνάμεις διαγώνιων στα μοντέλα

	Απλό μοντέλο	Σύνθετο μοντέλο	Διαφορά (%)
Θλιπτική δύναμη διαγώνιου	111.6 kN	114.2 kN	2.3%
Εφελκυστική δύναμη διαγώνιου	104.7 kN	118.5 kN	13.1%

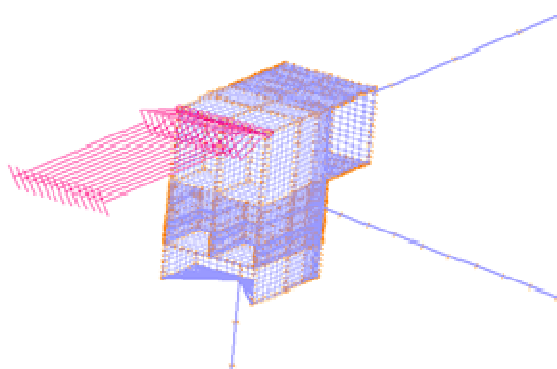
4.6 Μη γραμμική ανελαστική ανάλυση

Οι πρώτες αναλύσεις διερεύνησης που πραγματοποιήθηκαν ήταν τέλειες μη γραμμικές ανελαστικές αναλύσεις (GMNA). Και αυτές πραγματοποιήθηκαν με επιβολή μετακίνησης στις κορυφές των υποστυλωμάτων (Σχήμα (4-23)), λαμβάνοντας ως αποτέλεσμα τις οριζόντιες αντιδράσεις στήριξης.



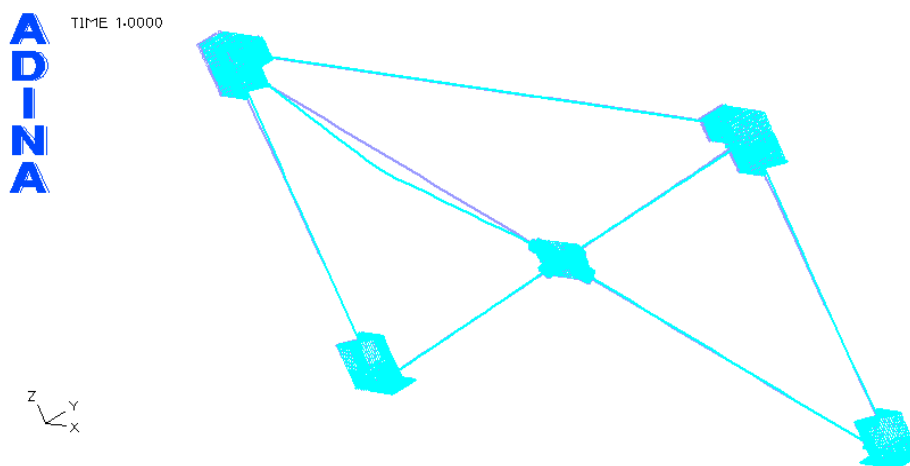
Σχήμα 4-23: Επιβολή φορτίων στο φορέα

Τα φορτία ασκούνται ως κατανεμημένα στους κόμβους των στοιχείων που βρίσκονται στην κορυφή των υποστυλωμάτων (Σχήμα (4-24)).



Σχήμα 4-24: Επιβολή φορτίων στο φορέα

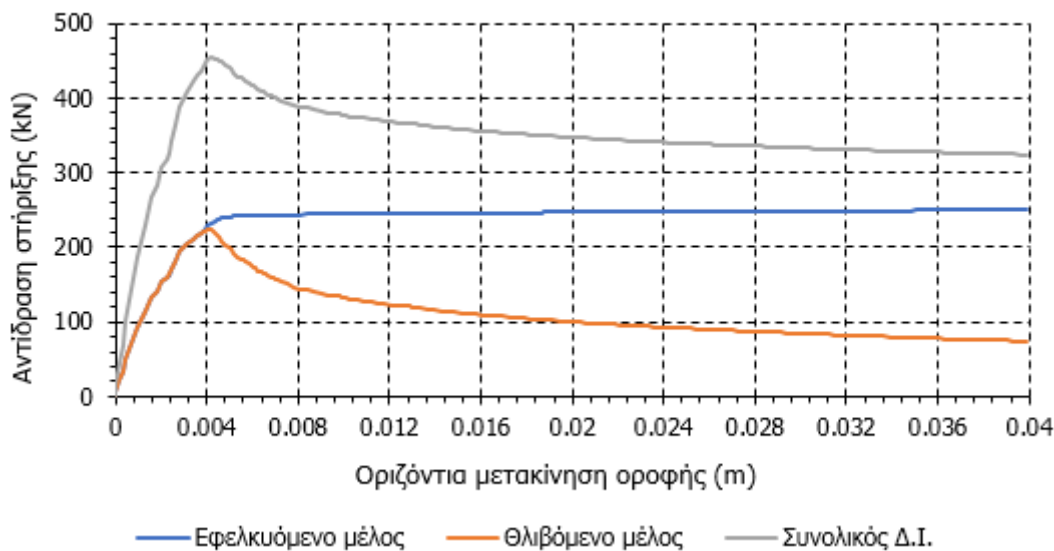
Ο φορέας μελετάται, δηλαδή, στην παραμορφωμένη του γεωμετρία και η απόκριση του υλικού είναι ελαστική – πλαστική όπως περιγράφηκε στο 2ο κεφάλαιο. Σε αυτήν την περίπτωση οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν τέλειες, χωρίς την επιβολή ατελειών. Στο Σχήμα (4-25) φαίνεται η παραμορφωμένη εικόνα του φορέα στο τέλος της ανάλυσης.



Σχήμα 4-25: Παραμόρφωση φορέα από μη γραμμική τέλεια ανελαστική ανάλυση

Η ανάλυση σε αυτήν την περίπτωση ολοκληρώνεται χωρίς να αστοχήσουν οι συνδέσεις όπως φαίνεται και από τους δρόμους ισορροπίας του συστήματος. Ο μηχανισμός αστοχίας του φορέα, που είναι λυγισμός της θλιβόμενης διαγώνιου δυσκαμψίας, εκδηλώνεται εξ ολοκλήρου.

Στο Διάγραμμα (4-2) παρουσιάζονται οι δρόμοι δυσκαμψίας του κάθε μέλους του συστήματος και η συνολική απόκριση.



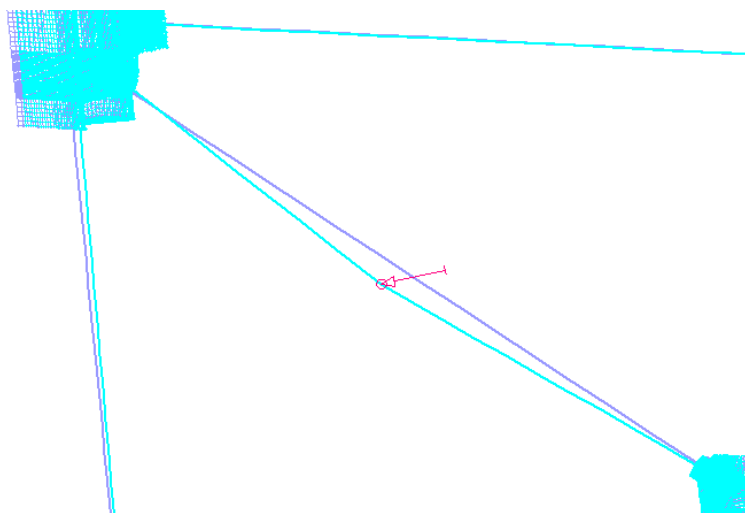
Διάγραμμα 4-2: Δρόμοι ισορροπίας του φορέα (Μη γραμμική τέλεια ανελαστική ανάλυση)

Οι δρόμοι ισορροπίας που αφορούν αυτό το σύστημα φαίνεται πως καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από το λυγισμό της θλιβόμενης διαγώνιου. Ο δρόμος ισορροπίας του εφελκόμενου μέλους είναι ελαστικός – κρατυνόμενα πλαστικός ακολουθώντας τη συμπεριφορά του υλικού.

Ο δρόμος ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους είναι και αυτός ελαστικός μέχρι τα 0.00405m οριζόντιας μετακίνησης περίπου, οπότε και αρχίζει να εκδηλώνεται φαινόμενο του λυγισμού. Για μετακίνηση κοντά στο 0.00475m έχουμε αστοχία της εφελκόμενης διαγωνίου από διαρροή του υλικού. Ο συνολικός δρόμος ισορροπίας είναι ελαστικός ως το σημείο του λυγισμού και από εκεί και πέρα η δυσκαμψία του να εμφανίζει πτωτικό κλάδο με ρυθμό αντίστοιχο του δρόμου ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους. Για το συνολικό δρόμο ισορροπίας ο λυγισμός συντελείται για μετακίνηση οροφής 0.004225m με το οριακό φορτίο να ανέρχεται στα 454.36kN. Το οριακό φορτίο για το θλιβόμενο μέλος ανέρχεται στα 224.115kN. Η διαρροή του εφελκόμενου χιαστί εκδηλώνεται για αντίδραση στήριξης ίση με 243kN περίπου. Η διαφορά τους είναι περίπου 21kN ($\approx 10\%$).

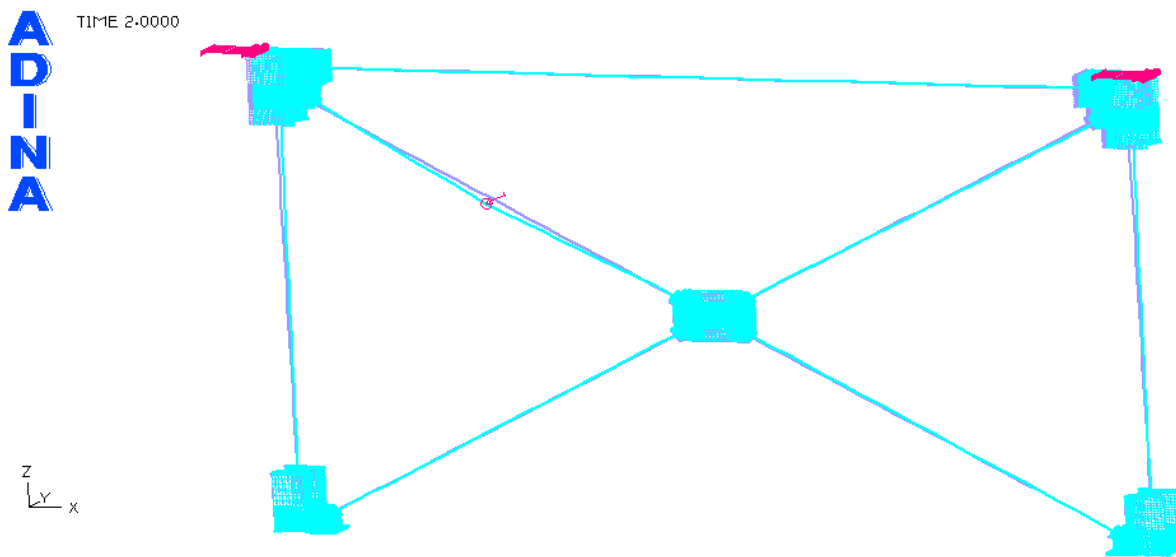
4.7 Μη γραμμική ατελής ανελαστική ανάλυση

Το τελικό στάδιο της διερεύνησης αφορά ατελείς μη γραμμικές ανελαστικές αναλύσεις (GMNIA). Όπως και προηγουμένως, η φόρτιση ασκείται ως επιβολή μετακίνησης στις κορυφές των υποστυλωμάτων, λαμβάνοντας ως αποτέλεσμα τις οριζόντιες αντιδράσεις στήριξης. Σε αντίθεση με πριν, σε αυτές τις αναλύσεις έχουμε επιβολή ατέλειας στο σύστημα. Η ύπαρξη της μη γραμμικότητας επαφής (contact elements) στο σύστημα καθιστά αδύνατη την πραγματοποίηση γραμμικοποιημένων αναλύσεων λυγισμού (lba) με σκοπό την επιβολή ατέλειας ιδιομορφικά, όπως στο 2^ο κεφάλαιο. Για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο η ατέλεια δόθηκε στο σύστημα με έμμεσο τρόπο, μέσω της επιβολής εξωτερικής φόρτισης (Σχήμα (4-26)). Το φορτίο που ασκήθηκε καθορίστηκε με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να επιβάλλει στο μέσον της ράβδου τέτοια μετακίνηση όση και η ατέλεια c στο απλό σύστημα κατά την 1^η ιδιομορφή. Γίνεται, επομένως, η παραδοχή πως θα ασκηθεί ατέλεια μόνο κατά το σχήμα της πρώτης ιδιομορφής. Το μεμονωμένο φορτίο που ασκήθηκε ισούται με 2kN.



Σχήμα 4-26: Επιβολή ατέλειας ως ισοδύναμη φόρτιση

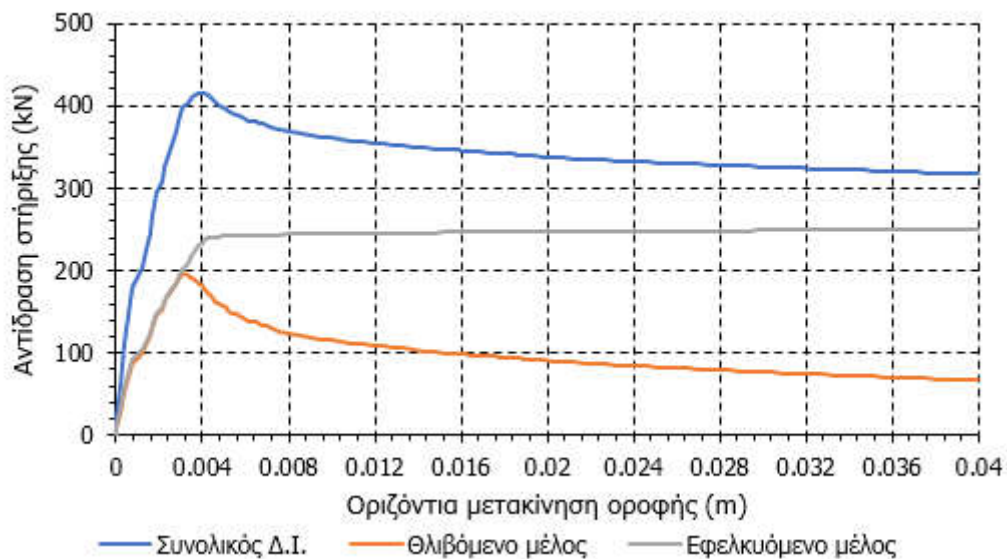
Η ανάλυση εδώ πραγματοποιείται ουσιαστικά σε τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος ασκείται η προένταση των κοχλιών για να λάβει ο φορέας την απαιτούμενη δυσκαμψία. Στη συνέχεια επιβάλλεται το φορτίο που προσομοιώνει την ατέλεια και αφού ολοκληρωθεί αυτό, επιβάλλεται και το οριζόντιο φορτίο στα υποστυλώματα. Στο Σχήμα (4-27) φαίνεται η παραμορφωμένη εικόνα του φορέα στο τέλος της ανάλυσης.



Σχήμα 4-27: Παραμόρφωση φορέα από μη γραμμική ατελής ελαστική ανάλυση

Η ανάλυση και πάλι ολοκληρώνεται χωρίς να αστοχήσουν οι συνδέσεις όπως φαίνεται και από τους δρόμους ισορροπίας του συστήματος. Ο μηχανισμός αστοχίας του φορέα, που είναι λυγισμός της θλιβόμενης διαγωνίου δυσκαμψίας, εκδηλώνεται εξ ολοκλήρου. Ο λυγισμός εμφανίζεται στη ράβδο που ασκείται η ατέλεια, κάτι που ήταν και στόχος της ανάλυσης.

Στο Διάγραμμα (4-3) παρουσιάζονται οι δρόμοι δυσκαμψίας του κάθε μέλους του συστήματος και η συνολική απόκριση με την επιβολή της ατέλειας.



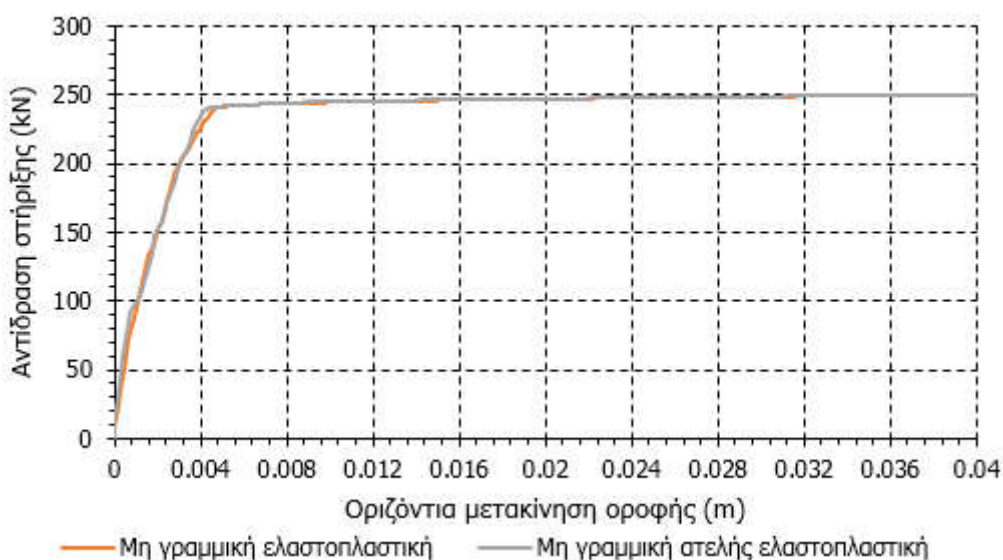
Διάγραμμα 4-3: Δρόμοι ισορροπίας του φορέα (Μη γραμμική ατελής ανελαστική ανάλυση)

Οι δρόμοι ισορροπίας που αφορούν αυτό το σύστημα φαίνεται πως καθορίζονται, όπως αναμενόταν, σε μεγάλο βαθμό από το λυγισμό της θλιβόμενης διαγωνίου. Ο δρόμος ισορροπίας του εφελκόμενου μέλους είναι ελαστικός – κρατυνόμενα πλαστικός ακολουθώντας τη συμπεριφορά του υλικού. Ο δρόμος ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους είναι και αυτός ελαστικός μέχρι τα 0.00308m οριζόντιας μετακίνησης περίπου, οπότε και αρχίζει να εκδηλώνεται φαινόμενο του λυγισμού. Για μετακίνηση κοντά στο 0.0042m έχουμε αστοχία της εφελκόμενης διαγωνίου από διαρροή του υλικού. Ο συνολικός δρόμος ισορροπίας είναι ελαστικός ως το σημείο του λυγισμού και από εκεί και πέρα η δυσκαμψία του να εμφανίζει πτωτικό κλάδο με ρυθμό αντίστοιχο του δρόμου ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους. Για το συνολικό δρόμο ισορροπίας ο λυγισμός συντελείται για μετακίνηση οροφής 0.00396m με το οριακό φορτίο να ανέρχεται στα 415.734kN. Το οριακό φορτίο για το θλιβόμενο μέλος ανέρχεται στα 196.745kN. Η διαρροή του εφελκόμενου χιαστί εκδηλώνεται για αντίδραση στήριξης ίση με 245kN περίπου. Η διαφορά τους είναι περίπου 48.255kN ($\approx 24.5\%$).

4.8 Επιρροή ατέλειας

Για να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της ευαισθησίας του συστήματος στην επιβολή ατελειών (εδώ μεγέθους c) θα συγκριθούν οι δρόμοι ισορροπίας που προκύπτουν από τις μη γραμμικές αναλύσεις τύπου GMNA και GMNIA.

Στο Διάγραμμα (4-4) συγκρίνονται οι δρόμοι ισορροπίας των εφελκόμενων διαγώνιων του συστήματος για τις δύο περιπτώσεις ανάλυσης.

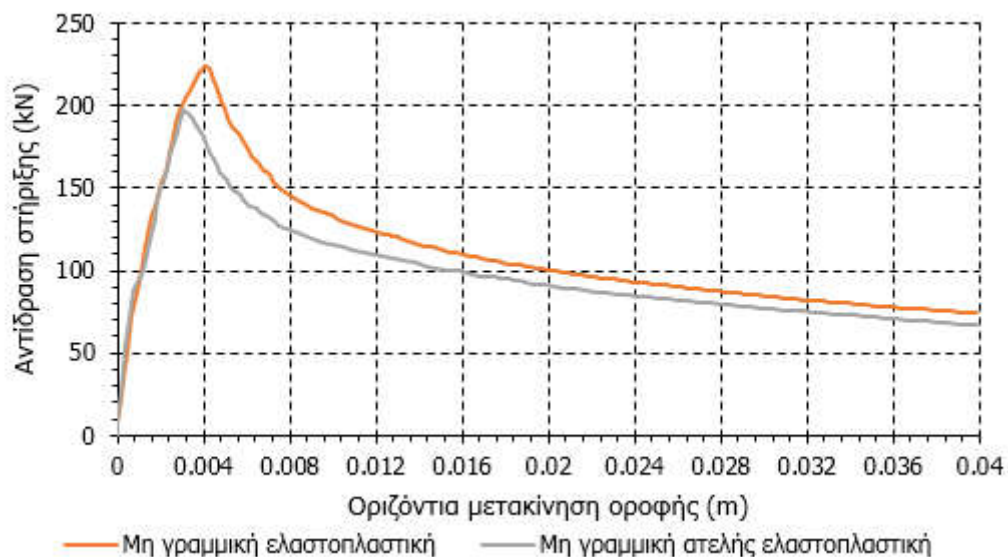


Διάγραμμα 4-4: Σύγκριση των δρόμων ισορροπίας των εφελκόμενων διαγώνιων

Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα (4-4) οι δύο δρόμοι ισορροπίας σχεδόν ταυτίζονται. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι στο μέγεθος της μετακίνησης για την οποία διαρρέει η διαγώνιος. Στην περίπτωση της ανάλυσης χωρίς ατέλεια συντελείται διαρροή για μετακίνηση 0.00475m, ενώ στην άλλη περίπτωση η μετακίνηση διαρροής είναι 0.0042m. Έχουν διαφορά, δηλαδή, της τάξης του 13%. Στην περίπτωση του συστήματος με ατέλεια, λοιπόν, η εφελκόμενος διαγώνιος φτάνει νωρίτερα τη δύναμη διαρροής, γεγονός που εξηγείται από τη νωρίτερη αστοχία της θλιβόμενης διαγωνίου για την Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

αντίστοιχη περίπτωση στο φορέα. Καθώς η θλιβόμενη διαγώνιος λυγίζει, δηλαδή, το σύστημα «ζητάει» από την εφελκόμενη μεγαλύτερη συνεισφορά, γεγονός που την οδηγεί γρηγορότερα στη διαρροή. Επομένως πραγματοποιείται «γρηγορότερη» ανακατανομή δύναμης από τη θλιβόμενη στην εφελκόμενη διαγώνιο.

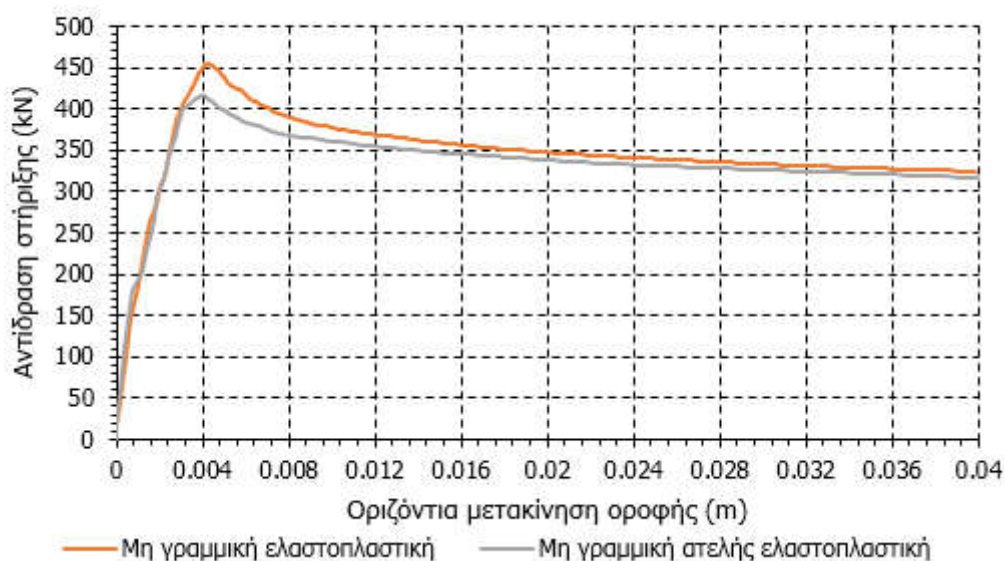
Στη συνέχεια συγκρίνονται οι δρόμοι ισορροπίας των θλιβόμενων διαγωνίων του συστήματος (Διάγραμμα (4-5)) για τις δύο περιπτώσεις ανάλυσης.



Διάγραμμα 4-5: Σύγκριση των δρόμων ισορροπίας των θλιβόμενων διαγωνίων

Στην περίπτωση της τέλει μη γραμμικής ανάλυσης ο λυγισμός συντελείται για μετακίνηση οροφής 0.00405m με το οριακό φορτίο να ανέρχεται στα 224.115kN. Ενώ στην περίπτωση της ατελούς μη γραμμικής ανάλυσης, η μετακίνηση οροφής στο λυγισμό είναι 0.00308m με το αντίστοιχο οριακό φορτίο να ανέρχεται εδώ στα 196.745kN. Άρα έχουν διαφορά 31.5% στην οριζόντια μετακίνηση οροφής και 13.9% στο οριακό φορτίο του φορέα λόγω της επιβολής της ατέλειας.

Τέλος, για να γίνει κατανοητή η επιρροή του κάθε μέλους αλλά και της ατέλειας στη συνολική απόκριση του φορέα, συγκρίνονται οι συνολικοί δρόμοι ισορροπίας του συστήματος (Διάγραμμα (4-6)) για τις δύο περιπτώσεις ανάλυσης.



Διάγραμμα 4-6: Σύγκριση των συνολικών δρόμων ισορροπίας

Στην περίπτωση της τέλει μη γραμμικής ανάλυσης το οριακό σημείο ανέρχεται σε μετακίνηση οροφής 0.004225m με το οριακό φορτίο να ανέρχεται στα 454.36kN. Στην περίπτωση της ατελούς μη γραμμικής ανάλυσης, η μετακίνηση οροφής στο οριακό σημείο είναι 0.00396m με το αντίστοιχο οριακό φορτίο να ανέρχεται εδώ στα 415.734kN. Άρα έχουν διαφορά 6.7% στην οριζόντια μετακίνηση οροφής και 9.3% στο οριακό φορτίο του φορέα λόγω της επιβολής της ατέλειας. Γίνεται αντιληπτό πως η μορφή της συμπεριφοράς της κατασκευής επηρεάζεται από τη μορφή της συμπεριφοράς του θλιβόμενου μέλους εμφανίζοντας ασταθής μεταλυγισμική συμπεριφορά. Πάντως, η συνεισφορά της εφελκόμενης διαγωνίου είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη σε απόλυτο μέγεθος.

4.9 Συμπεράσματα

Σε αυτό, το τέταρτο, κεφάλαιο της εργασίας εξετάστηκε η μη-γραμμική συμπεριφορά ενός μεταλλικού πλαισίου με διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας με τη διαμόρφωση ενός μοντέλου που θα μπορεί να συμπεριλαμβάνει την επιρροή των συνδέσεων των διαγωνίων στην απόκριση του συστήματος. Το μοντέλο είναι ένα πλαίσιο με κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας, αντίστοιχο με αυτό που παρουσιάστηκε στο 2^ο κεφάλαιο, με τη διαφορά πως οι συνδέσεις των συνδέσμων δεν είναι αρθρώσεις ή πακτώσεις αλλά προσομοιώνονται λεπτομερώς όπως σχεδιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το σύστημα, δηλαδή, περιλαμβάνει πλέον και τα κομβοελάσματα καθώς και τους προεντεταμένους κοχλίες. Σε πρώτη φάση, ελέγχθηκε μία μεμονωμένη σύνδεση του πλαισίου και μετά αναλύθηκε το συνολικό μοντέλο. Το λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιήθηκε είναι το ADINA και για την προσομοίωση των συνδέσεων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία επαφής (contact elements) και στοιχεία κοχλίας (bolt elements). Για να υλοποιηθεί η σύνδεση, επίσης, το ένα μέρος από τα στοιχεία δοκού (με τα οποία μοντελοποιούνται τα υποστυλώματα και η δοκός) αντικαθίστανται από επιφανειακά στοιχεία που αναπαριστούν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια τη γεωμετρία των συνδέσεων. Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν γραμμικές ελαστικές, μη γραμμικές ανελαστικές και μη γραμμικές ανελαστικές με ατέλειες. Σε όλες τις περιπτώσεις, η ατέλεια που επιβάλλεται είναι, κατά τον ευρωκώδικα, μεγέθους c. Οι βασικές παρατηρήσεις και τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν είναι:

Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

1. Όσον αφορά τους ελέγχους της μεμονωμένης σύνδεσης και τις αναλύσεις τύπου statics small displacements του συνολικού μοντέλου :
 - Αρχικά ελέγχθηκε μία μεμονωμένη σύνδεση του μοντέλου σε εφελκυστικό φορτίο. Η δύναμη ολίσθησης από την ανάλυση προσδιορίστηκε στα 459.4kN περίπου, ενώ η δύναμη που προκύπτει ως γινόμενο της προέντασης με το συντελεστή τριβής ανέρχεται στα 412kN. Η απόκλιση μεταξύ των δύο τιμών είναι κατά προσέγγιση 10%, τιμή που θεωρείται αρκούντως μικρή.
 - Από τις πρώτες statics – small displacements αναλύσεις προκύπτει πως το μοντέλο δίνει αρχικά λογικά αποτελέσματα. Η κατανομή των αξονικών δυνάμεων πάνω στους διαγώνιους συνδέσμους είναι λογική όσον αφορά τα πρόσημα του.
 - Επίσης, επιτυγχάνεται σύγκλιση των στοιχείων επαφής από την αρχή της ανάλυσης (μηδενικά κενά). Επειδή οι συνδέσεις δεν αστοχούν δημιουργείται μια «ασφαλής» περιοχή ανάμεσα στους κοχλίες που διατηρεί τη δυσκαμψία της ως το τέλος της ανάλυσης (τα contact elements παραμένουν σε sticking contact status).
 - Η κατανομή των τάσεων πάνω στα ελάσματα σύνδεσης είναι τέτοια που οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται στα σημεία σύνδεσης και στις ροές προς τα πλησιέστερα σταθερά σημεία. Τα άκρα των ελασμάτων φαίνεται πως παραμένουν αφόρτιστα.
 - Τα αποτελέσματα των γραμμικών ελαστικών αναλύσεων στο μοντέλο συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του μοντέλου του 2^{ου} κεφαλαίου. Το μέγεθος σύγκρισης είναι οι αναπτυσσόμενες αξονικές δυνάμεις των διαγωνίων για το ίδιο επίπεδο φόρτισης, που φτάνει τα 0.5cm οριζόντιας μετακίνησης οροφής. Όσον αφορά το μοντέλο με τα στοιχεία επαφής αναπτύσσεται δύναμη 114.2kN στη θλιβόμενη διαγώνιο και 118.5kN στην εφελκυσόμενη. Όσον αφορά το μοντέλο με τα στοιχεία δοκού αναπτύσσεται δύναμη 111.6kN στη θλιβόμενη διαγώνιο και 104.7kN στην εφελκυσόμενη. Οι διαφορές, λοιπόν, ανάμεσα στα δύο μοντέλα ανέρχονται στο 2.3% για τη θλιβόμενη διαγώνιο και στο 13.1% για την εφελκυσόμενη. Οι αποκλίσεις θεωρούνται αρκούντως ικανοποιητικές για τα μοντέλα που συγκρίνονται.

2. Όσον αφορά τη μη γραμμικές αναλύσεις στο μοντέλο με τα στοιχεία επαφής:
 - Η μη γραμμική ανελαστική ανάλυση (GMNA) ολοκληρώνεται χωρίς να αστοχήσουν οι συνδέσεις. Ο μηχανισμός αστοχίας του φορέα είναι λυγισμός της θλιβόμενης διαγωνίου δυσκαμψίας. Ο δρόμος ισορροπίας του εφελκυσμένου μέλους είναι ελαστικός – κρατυνόμενα πλαστικός ακολουθώντας τη συμπεριφορά του υλικού. Ο δρόμος ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους είναι και αυτός ελαστικός μέχρι τα 0.00405m οριζόντιας μετακίνησης περίπου, οπότε και αρχίζει να εκδηλώνεται φαινόμενο του λυγισμού. Για μετακίνηση κοντά στο 0.00475m αστοχεί η εφελκυσόμενη διαγώνιος από διαρροή του υλικού. Ο συνολικός δρόμος ισορροπίας είναι ελαστικός ως το σημείο του λυγισμού και από εκεί και πέρα η δυσκαμψία του να εμφανίζει πτωτικό κλάδο με ρυθμό αντίστοιχο του δρόμου ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους. Για το συνολικό δρόμο ισορροπίας το οριακό φορτίο συντελείται για μετακίνηση οροφής 0.004225m και ανέρχεται στα 454.36kN. Το οριακό φορτίο για το θλιβόμενο μέλος ανέρχεται στα 224.115kN. Η διαρροή του εφελκυσμένου χιαστί εκδηλώνεται για αντίδραση στήριξης ίση με 243kN περίπου. Η διαφορά τους είναι περίπου 21kN ($\approx 10\%$).
 - Η μη γραμμική ατελής ανελαστική ανάλυση (GMNIA) ολοκληρώνεται, και αυτή, χωρίς να αστοχήσουν οι συνδέσεις. Ο μηχανισμός αστοχίας του φορέα είναι λυγισμός της

θλιβόμενης διαγωνίου δυσκαμψίας. Οι δρόμοι ισορροπίας που αφορούν αυτό το σύστημα φαίνεται πως καθορίζονται, όπως αναμενόταν, σε μεγάλο βαθμό από το λυγισμό της θλιβόμενης διαγωνίου. Ο δρόμος ισορροπίας του εφελκυσμένου μέλους είναι ελαστικός – κρατυνόμενα πλαστικός ακολουθώντας τη συμπεριφορά του υλικού. Ο δρόμος ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους είναι και αυτός ελαστικός μέχρι τα 0.00308m οριζόντιας μετακίνησης περίπου, οπότε και αρχίζει να εκδηλώνεται φαινόμενο του λυγισμού. Για μετακίνηση κοντά στο 0.0042m συντελείται αστοχία της εφελκυσμένης διαγωνίου από διαρροή του υλικού. Ο συνολικός δρόμος ισορροπίας είναι ελαστικός ως το σημείο του λυγισμού και από εκεί και πέρα η δυσκαμψία του να εμφανίζει πτωτικό κλάδο με ρυθμό αντίστοιχο του δρόμου ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους. Για το συνολικό δρόμο ισορροπίας το οριακό φορτίο συντελείται για μετακίνηση οροφής 0.00396m και ανέρχεται στα 415.734kN. Το οριακό φορτίο για το θλιβόμενο μέλος ανέρχεται στα 196.745kN. Η διαρροή του εφελκυσμένου χιαστί εκδηλώνεται για αντίδραση στήριξης ίση με 245kN περίπου. Η διαφορά τους είναι περίπου 48.255kN ($\approx 24.5\%$).

3. Τα τελικά συμπεράσματα του κεφαλαίου προκύπτουν από τη σύγκριση των δύο μεθόδων ανάλυσης (GMNA και GMNIA):
- Αρχικά μελετώνται οι εφελκυσμένοι διαγώνιοι του συστήματος. Οι δρόμοι ισορροπίας για τις δύο περιπτώσεις σχεδόν ταυτίζονται. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι στο μέγεθος της μετακίνησης για την οποία διαρρέει η διαγώνιος. Στην περίπτωση της ανάλυσης χωρίς ατέλεια συντελείται διαρροή για μετακίνηση 0.00475m, ενώ στην άλλη περίπτωση η μετακίνηση διαρροής είναι 0.0042m. Έχουν διαφορά, δηλαδή, της τάξης του 13%. Στην περίπτωση του συστήματος με ατέλεια, λοιπόν, η εφελκυσμένος διαγώνιος φτάνει νωρίτερα τη δύναμη διαρροής, γεγονός που εξηγείται από τη νωρίτερη αστοχία της θλιβόμενης διαγωνίου για την αντίστοιχη περίπτωση στο φορέα. Καθώς η θλιβόμενη διαγώνιος λυγίζει, δηλαδή, το σύστημα «ζητάει» από την εφελκυσμένη μεγαλύτερη συνεισφορά, γεγονός που την οδηγεί γρηγορότερα στη διαρροή. Επομένως πραγματοποιείται «γρηγορότερη» ανακατανομή δύναμης από τη θλιβόμενη στην εφελκυσμένη διαγώνιο.
 - Όσον αφορά τους θλιβόμενους διαγώνιους, στην περίπτωση της τέλει μη γραμμικής ανάλυσης ο λυγισμός συντελείται για μετακίνηση οροφής 0.00405m με το οριακό φορτίο να ανέρχεται στα 224.115kN. Ενώ στην περίπτωση της ατελούς μη γραμμικής ανάλυσης, η μετακίνηση οροφής στο λυγισμό είναι 0.00308m με το αντίστοιχο οριακό φορτίο να ανέρχεται εδώ στα 196.745kN. Άρα έχουν διαφορά 31.5% στην οριζόντια μετακίνηση οροφής και 13.9% στο οριακό φορτίο του φορέα λόγω της επιβολής της ατέλειας.
 - Στο τελικό στάδιο συγκρίνονται οι συνολικοί δρόμοι ισορροπίας του συστήματος. Στην περίπτωση της τέλει μη γραμμικής ανάλυσης το οριακό φορτίο συντελείται για μετακίνηση οροφής 0.004225m και ανέρχεται στα 454.36kN. Στην περίπτωση της ατελούς μη γραμμικής ανάλυσης, η μετακίνηση οροφής στο οριακό σημείο είναι 0.00396m με το αντίστοιχο οριακό φορτίο να ανέρχεται εδώ στα 415.734kN. Άρα έχουν διαφορά 6.7% στην οριζόντια μετακίνηση οροφής και 9.3% στο οριακό φορτίο του φορέα λόγω της επιβολής της ατέλειας. Γίνεται αντιληπτό πως η μορφή της συμπεριφοράς της κατασκευής επηρεάζεται από τη μορφή της συμπεριφοράς του θλιβόμενου μέλους με ασταθής μεταλυγισμική συμπεριφορά. Πάντως, η συνεισφορά της εφελκυσμένης διαγωνίου είναι σε κάθε περίπτωση ποσοτικά μεγαλύτερη.

5 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΕΣ – ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

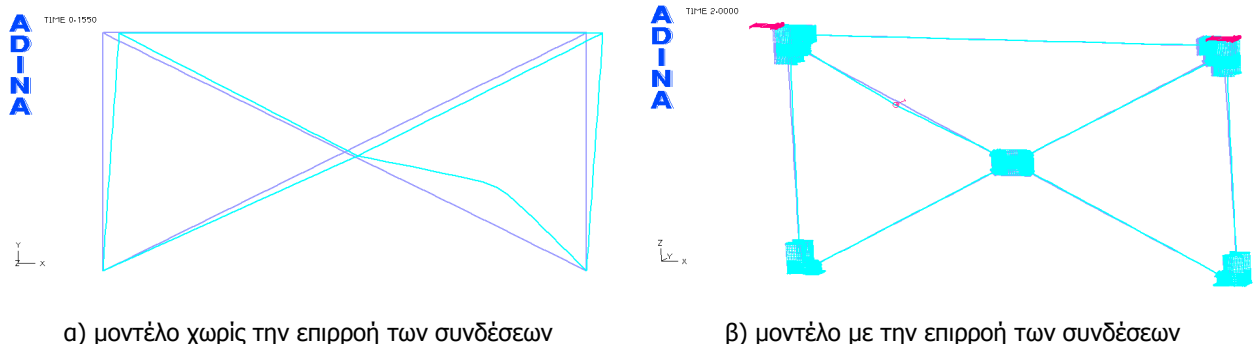
5.1 Εισαγωγή

Για να γίνει καλύτερη διερεύνηση της επιρροής των συνδέσεων στην απόκριση του συστήματος αλλά και της συνολικότερης απόκρισης του πλαισίου με τους κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας πραγματοποιείται μια σειρά συγκριτικών και παραμετρικών αναλύσεων. Ειδικότερα, γίνεται αναλυτική σύγκριση των αποκρίσεων των δύο μοντέλων (με και χωρίς την επιρροή των συνδέσεων), λαμβάνουν χώρα παραμετρικές αναλύσεις ως προς την επίδραση της προέντασης των κοχλιών στην απόκριση του μοντέλου (με τις συνδέσεις) και τέλος συγκρίνεται η ευαισθησία σε ατέλειες των δύο μοντέλων.

5.2 Σύγκριση μοντέλου με και χωρίς την επιρροή των συνδέσεων

5.2.1 Σύγκριση μορφών αστοχίας

Στην πρώτη φάση της σύγκρισης της απόκρισης κάθε μοντέλου, μελετάται η μορφή της παραμόρφωσης του φορέα κατά την αστοχία. Στο Σχήμα (5-1) φαίνεται η παραμόρφωση που έχουν υποστεί τα δύο μοντέλα στην αστοχία.



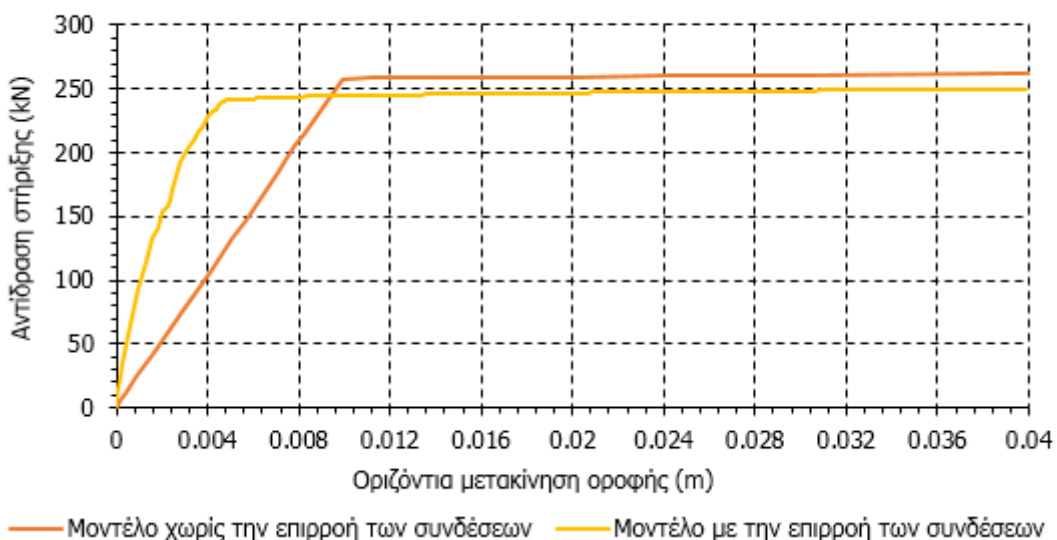
Σχήμα 5-1: Σύγκριση της παραμορφωμένης κατάστασης για τις δύο περιπτώσεις

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα (5-1) και τα δύο μοντέλα αστοχούν με λυγισμό της θλιβόμενης διαγώνιου τους. Στο μοντέλο χωρίς την επιρροή των συνδέσεων η κατεύθυνση του λυγισμού φαίνεται πως δεν παίζει κάποιο ρόλο αφού σε κάθε περίπτωση έχει τη μορφή λυγισμού αμφιαρθρωτής ράβδου. Αντίθετα, στο μοντέλο με την επιρροή των συνδέσεων ο λυγισμός του θλιβόμενου χιαστί συντελείται με εκτός του επιπέδου, του πλαισίου, εκτροπή του μέλους γεγονός που οφείλεται στον τρόπο σύνδεσης των μελών των διαγώνιων.

5.2.2 Σύγκριση των αποκρίσεων των δύο μοντέλων

Η σύγκριση των δρόμων ισορροπίας των δύο μοντέλων αποτελεί, ίσως, το πιο βασικό κομμάτι της διερεύνησης της επιρροής των συνδέσεων στην απόκριση του συστήματος. Αυτή αφορά τόσο το κάθε μέλος του συνδέσμου ξεχωριστά, θλιβόμενο και εφελκόμενο, όσο και το συνολικό δρόμο ισορροπίας του κάθε μοντέλου.

Στο Διάγραμμα (5-1) φαίνονται οι δρόμοι ισορροπίας των εφελκόμενων μελών των συνδέσεων για τα δύο μοντέλα.

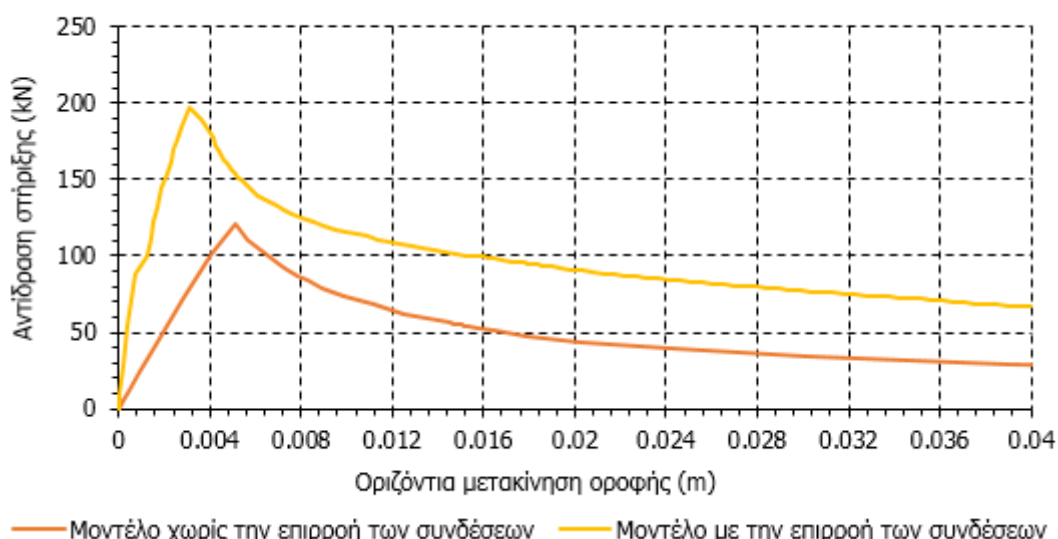


Διάγραμμα 5-1: Σύγκριση των δρόμων ισορροπίας των θλιβόμενων μελών των δύο μοντέλων

Ο δρόμος ισορροπίας του εφελκόμενου μέλους του μοντέλου με τις συνδέσεις διαρρέει για μετακίνηση 0.00428m και αντίδραση στήριξης ίση με 240.138kN. Ο δρόμος ισορροπίας του εφελκόμενου μέλους του μοντέλου χωρίς συνδέσεις διαρρέει για μετακίνηση 0.00999m και αντίδραση στήριξης ίση με 258kN. Έχουν δηλαδή διαφορά 56% στην μετακίνηση διαρροής και 5% στην αντίδραση στήριξης για την οποία αυτή συντελείται. Το εφελκόμενο μέλος του μοντέλου με συνδέσεις διαρρέει για μικρότερη μετακίνηση γιατί ο θλιβόμενος χιαστί σε αυτήν την περίπτωση λυγίζει για μικρότερη μετακίνηση και επομένως γίνεται γρηγορότερα η ανακατανομή από το θλιβόμενο στο εφελκόμενο μέλος. Η διαφορά της αντίδρασης στήριξης οφείλεται στην ελαφρώς διαφορετική γεωμετρία λόγω των συνδέσεων που δημιουργεί μια μικρή διαφορά στη γωνία του συνδέσμου και άρα διαφορετική αντίδραση ($\approx 1^\circ$).

Η αρχική δυσκαμψία του δρόμου ισορροπίας του μοντέλου με τις συνδέσεις είναι περίπου 56107kN/m και του μοντέλου χωρίς συνδέσεις 26060.6kN. Έχουν δηλαδή διαφορά της τάξης του 53%.

Στο Διάγραμμα (5-2) φαίνονται οι δρόμοι ισορροπίας των θλιβόμενων μελών των συνδέσμων για τα δύο μοντέλα.

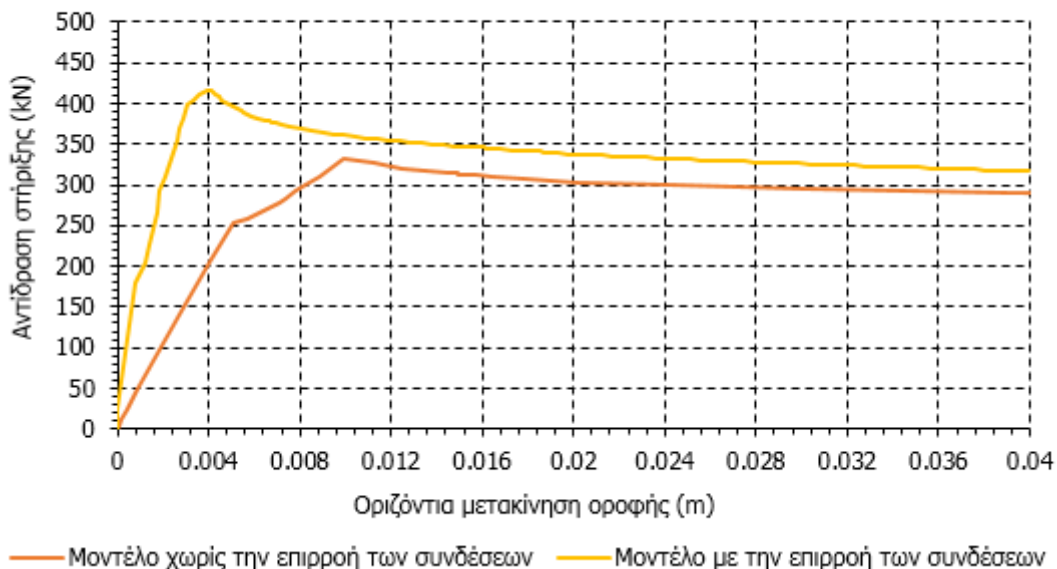


Διάγραμμα 5-2: Σύγκριση των δρόμων ισορροπίας των εφελκυσμένων μελών των δύο μοντέλων

Ο δρόμος ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους του μοντέλου με τις συνδέσεις λυγίζει για μετακίνηση 0.00308m και αντίδραση στήριξης ίση με 196.745kN. Ο δρόμος ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους του μοντέλου χωρίς συνδέσεις διαρρέει για μετακίνηση 0.0051m και αντίδραση στήριξης ίση με 120.479kN. Έχουν δηλαδή διαφορά 39.6% στην μετακίνηση διαρροής και 38.7% στην αντίδραση στήριξης για την οποία αυτή συντελείται.

Η αρχική δυσκαμψία του δρόμου ισορροπίας του μοντέλου με τις συνδέσεις είναι περίπου 63878.2465kN/m και του μοντέλου χωρίς συνδέσεις 24652.75kN. Έχουν δηλαδή διαφορά της τάξης του 61%.

Η τελευταία σύγκριση ανάμεσα στους δρόμους ισορροπίας των δύο μοντέλων αφορά τις συνολικές αποκρίσεις, που μας δίνει και τη συνολική εικόνα της συμπεριφοράς και στις δύο περιπτώσεις. (Διάγραμμα (5-3)).



Διάγραμμα 5-3: Σύγκριση των συνολικών δρόμων ισορροπίας των δύο μοντέλων

Ο συνολικός δρόμος ισορροπίας του μοντέλου με τις συνδέσεις έχει οριακό σημείο για μετακίνηση 0.00396m και αντίδραση στήριξης ίση με 415.734kN. Ο συνολικός δρόμος ισορροπίας του μοντέλου χωρίς συνδέσεις φτάνει το οριακό σημείο για μετακίνηση 0.009939m και αντίδραση στήριξης ίση με 332.64kN. Έχουν δηλαδή διαφορά 60% στην μετακίνηση διαρροής και 20% στην αντίδραση στήριξης για την οποία αυτή συντελείται.

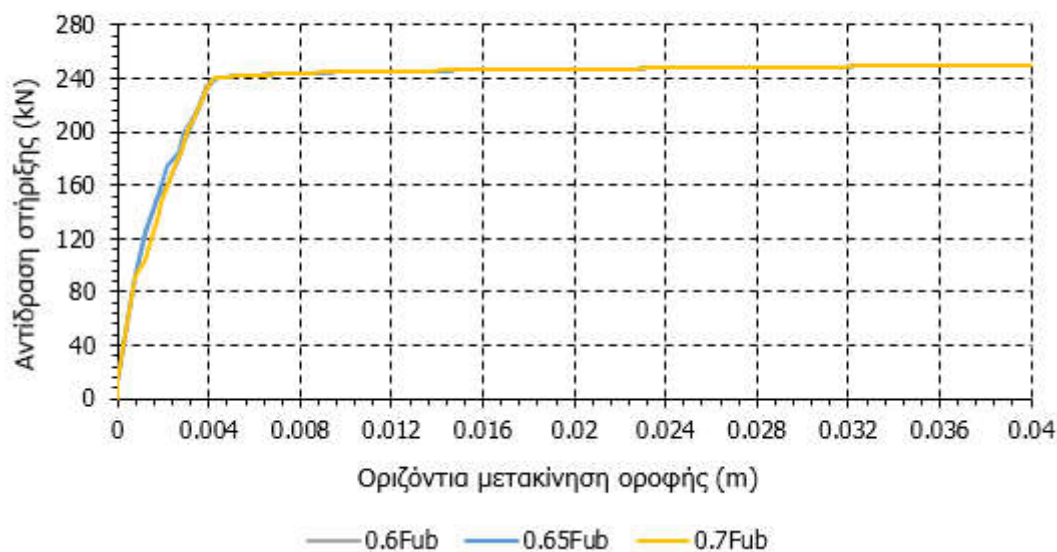
Η αρχική δυσκαμψία του δρόμου ισορροπίας του μοντέλου με τις συνδέσεις είναι περίπου 104983.333kN/m και του μοντέλου χωρίς συνδέσεις 33468.15575kN. Έχουν δηλαδή διαφορά της τάξης του 67.5% (μείωση).

5.3 Παραμετρικές αναλύσεις προέντασης κοχλιών

Το τελευταίο κομμάτι αναλύσεων του κεφαλαίου αφορά αναλύσεις παραμετρικής διερεύνησης. Το πρώτο μέγεθος που επιλέχθηκε για έλεγχο ήταν αυτό της προέντασης των κοχλιών. Ο κανονισμός ορίζει ως απαιτούμενη προένταση για τον κάθε κοχλία το μέγεθος $0.7x F_{ub}$. Οι παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν μη γραμμικές ανελαστικές με στέλεια c (GMNIA), με μειούμενη δύναμη προέντασης. Η απαίτηση να μην αστοχούν οι συνδέσεις πριν τους συνδέσμους οριοθέτησε, παρόλα αυτά, την ελάχιστη δύναμη προέντασης στο $0.6x F_{ub}$. Το συγκεκριμένο προσομοίωμα, ούτως ή άλλως, δεν μπορεί να αποδώσει την απόκριση του συστήματος μετά την πλήρη ολίσθηση των συνδέσεων καθώς δεν μπορεί «καταλάβει» τις δυνάμεις άντυνας που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια.

Δεδομένης της φύσης των αναλύσεων, πάντως, δεν αναμένονται ιδιαίτερες διαφορές σε κάθε περίπτωση μιας και οι συνδέσεις διατηρούν τη δυσκαμψία τους. Αυτές οι αναλύσεις έχουν όμως και το χαρακτήρα περαιτέρω ελέγχου του μοντέλου.

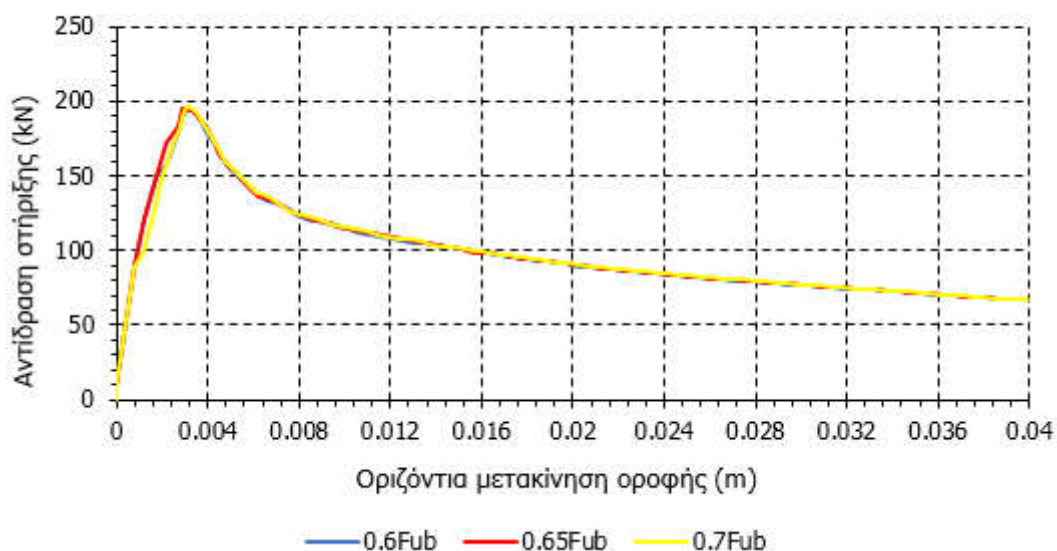
Στο Διάγραμμα (5-4) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας του εφελκυσμένου συνδέσμου για μεταβολή της προέντασης των κοχλιών. Η δύναμη προέντασης παίρνει τιμές $0.6x F_{ub}$, $0.65x F_{ub}$ και $0.7x F_{ub}$.



Διάγραμμα 5-4: Σύγκριση των δρόμων ισορροπίας των εφελκόμενων μελών για μεταβολή της προέντασης

Όπως αναμενόταν δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά στην απόκριση των εφελκόμενων μελών (αριθμητικής φύσης μικροδιαφορές).

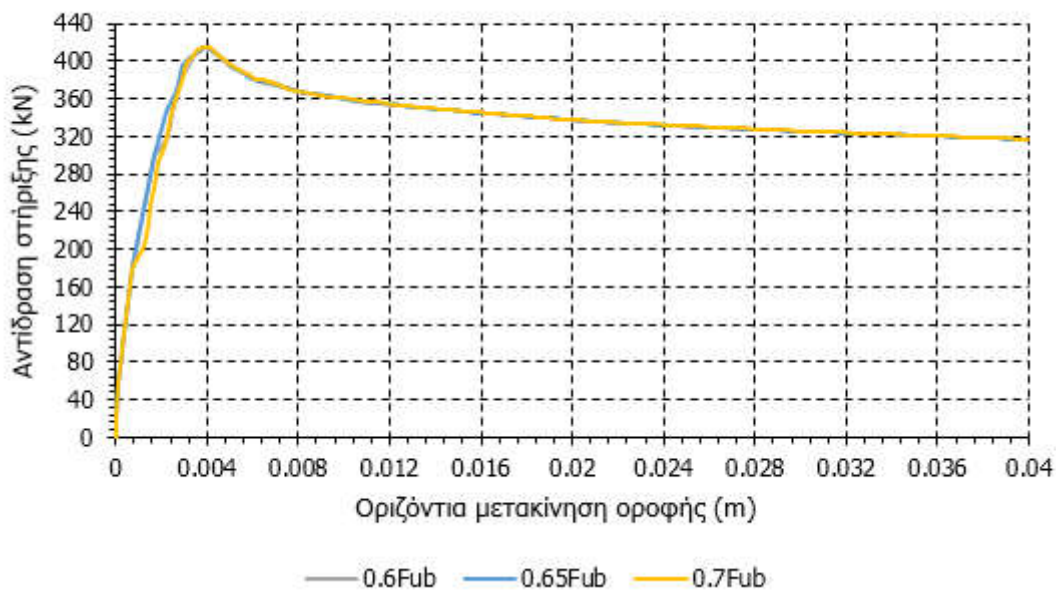
Στο Διάγραμμα (5-5) παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας του θλιβόμενου συνδέσμου για μεταβολή της προέντασης των κοχλιών.



Διάγραμμα 5-5: Σύγκριση των δρόμων ισορροπίας των θλιβόμενων μελών για μεταβολή της προέντασης

Και στην περίπτωση των θλιβόμενων μελών δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά στην απόκριση (αριθμητικής φύσης μικροδιαφορές).

Στο Διάγραμμα (5-6) παρουσιάζονται και οι συνολικοί δρόμοι ισορροπίας για μεταβολή της προέντασης των κοχλιών.



Διάγραμμα 5-6: Σύγκριση των συνολικών δρόμων ισορροπίας για μεταβολή της προέντασης

Παρατηρείται, λοιπόν, τόσο από τη συνολική απόκριση του φορέα όσο και από τις επιμέρους πως δεν υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση στην απόκριση του φορέα για μεταβολή της προέντασης των κοχλιών, πάντα με την προϋπόθεση σε καμία περίπτωση δεν αστοχούν οι συνδέσεις πριν τους συνδέσμους δυσκαμψίας

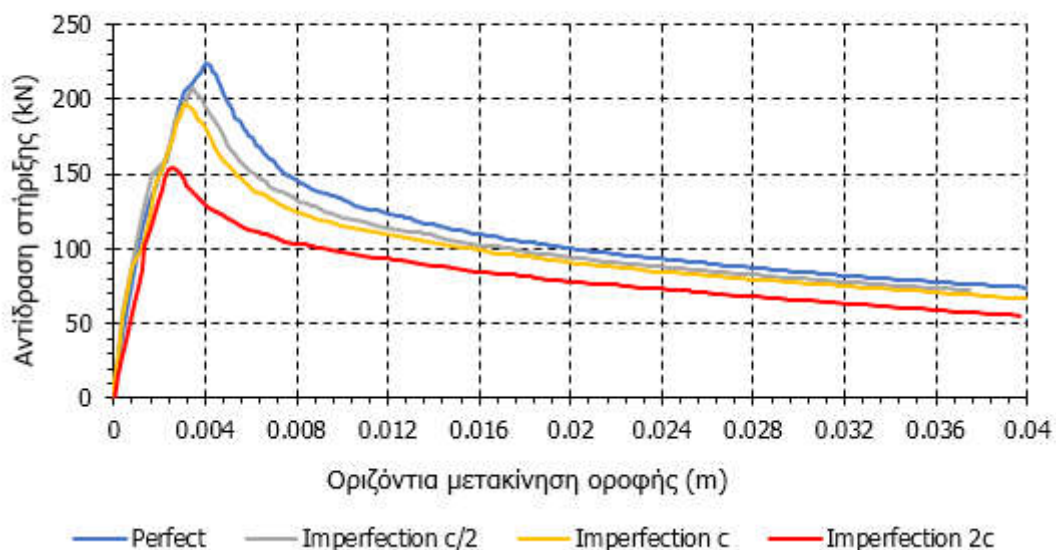
5.4 Συγκριτικές παραμετρικές αναλύσεις ατελειών

5.4.1 Παραμετρική ανάλυση ατελειών στο μοντέλο με την επιρροή των συνδέσεων

Το ζήτημα της επιρροής των ατελειών στο μοντέλο με την επιρροή των συνδέσεων παρουσιάστηκε αρχικά στο προηγούμενο κεφάλαιο με την επιβολή ατέλειας c , κατά τον κανονισμό, στο μοντέλο. Για να γίνει καλύτερα κατανοητή η επιρροή των ατελειών στο σύστημα, η ευαισθησία του δηλαδή σε αυτές, θα πραγματοποιηθούν παραμετρικές αναλύσεις ως προς την επιβαλλόμενη ατέλεια.

Ο φορέας αναλύθηκε χωρίς ατέλεια, με ατέλεια μεγέθους c , $c/2$ και $2*c$. Παρακάτω παρουσιάζονται και οι αντίστοιχοι δρόμοι ισορροπίας για κάθε μέλος του συνδέσμου ξεχωριστά αλλά και οι συνολικοί.

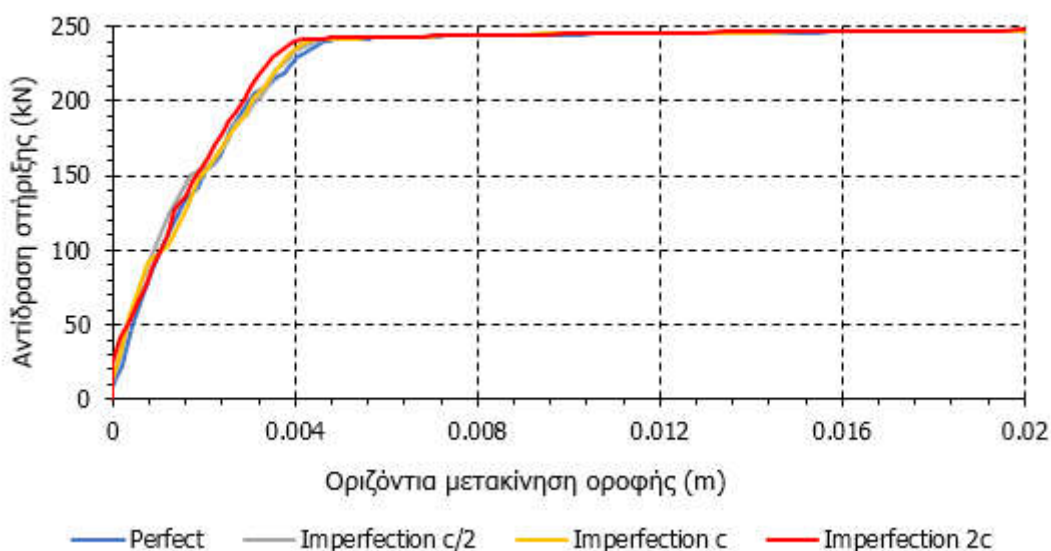
Στο Διάγραμμα (5-7) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δρόμων ισορροπίας της παραμετρικής ανάλυσης ως προς την ατέλεια για το θλιβόμενο μέλος του χιαστί συνδέσμου.



Διάγραμμα 5-7: Σύγκριση των δρόμων ισορροπίας των θλιβόμενων μελών για μεταβολή της ατέλειας

Για τον τέλειο φορέα το η μετακίνηση στο οριακό σημείο είναι 0.00405m και η αντίδραση στήριξης 224.115kN και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.0034m και 207.9kN. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα οριακά σημεία εντοπίζονται για συντεταγμένες (0.00308m, 196.745kN) και (0.00256m, 154.513kN) αντίστοιχα.

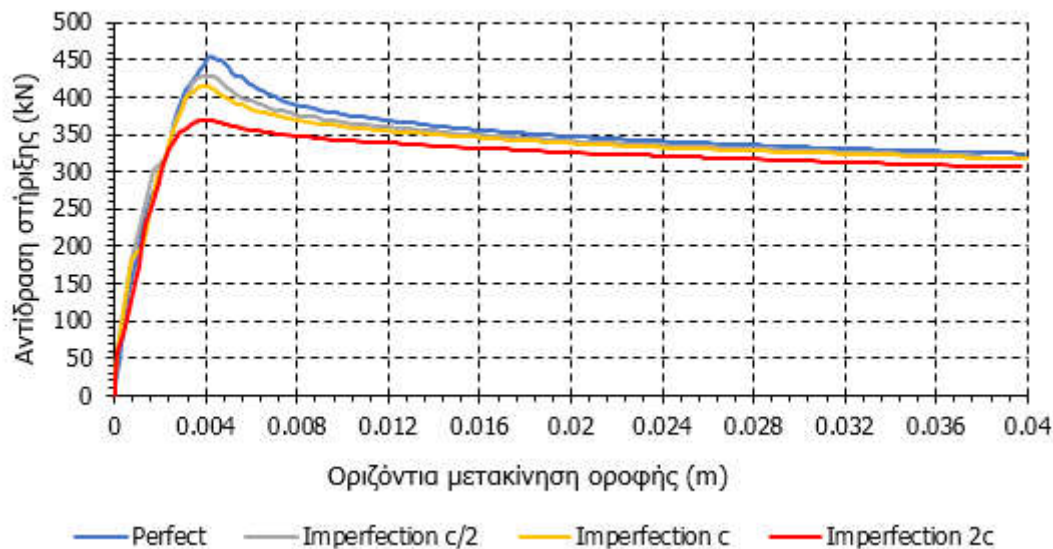
Στο Διάγραμμα (5-8) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δρόμων ισορροπίας της παραμετρικής ανάλυσης ως προς την ατέλεια για το εφελκυσμένο μέλος του χιαστί συνδέσμου.



Διάγραμμα 5-8: Σύγκριση των δρόμων ισορροπίας των εφελκυσμένων μελών για μεταβολή της ατέλειας

Όπως παρατηρείται το φορτίο διαρροής είναι ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις όπως αναμενόταν άλλωστε. Παρόλα αυτά η μετακίνηση για την οποία αυτό επιτυγχάνεται παρουσιάζει διαφορές. Ειδικότερα, για τον τέλειο φορέα το η μετακίνηση στο σημείο διαρροής είναι 0.00475m και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.00448m. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα σημεία διαρροής εντοπίζονται για μετακινήσεις 0.0042m και 0.004m αντίστοιχα. Καθώς μεγαλώνει δηλαδή το μέγεθος της ατέλειας ο εφελκυσμένος διαγώνιος εισέρχεται στη διαρροή για μικρότερη μετακίνηση. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι καθώς αυξάνεται η ατέλεια ο θλιβόμενος χιαστί λυγίζει για μικρότερο φορτίο και μικρότερη μετακίνηση (Διάγραμμα (5-7)) και επομένως ο εφελκυσμένος διαγώνιος τείνει να αναλάβει μεγαλύτερη δύναμη από μικρότερη οριζόντια μετακίνηση οροφής.

Στο Διάγραμμα (5-9) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δρόμων ισορροπίας της παραμετρικής ανάλυσης ως προς την ατέλεια για το συνολικό σύστημα.



Διάγραμμα 5-9: Σύγκριση των συνολικών δρόμων ισορροπίας για μεταβολή της ατέλειας

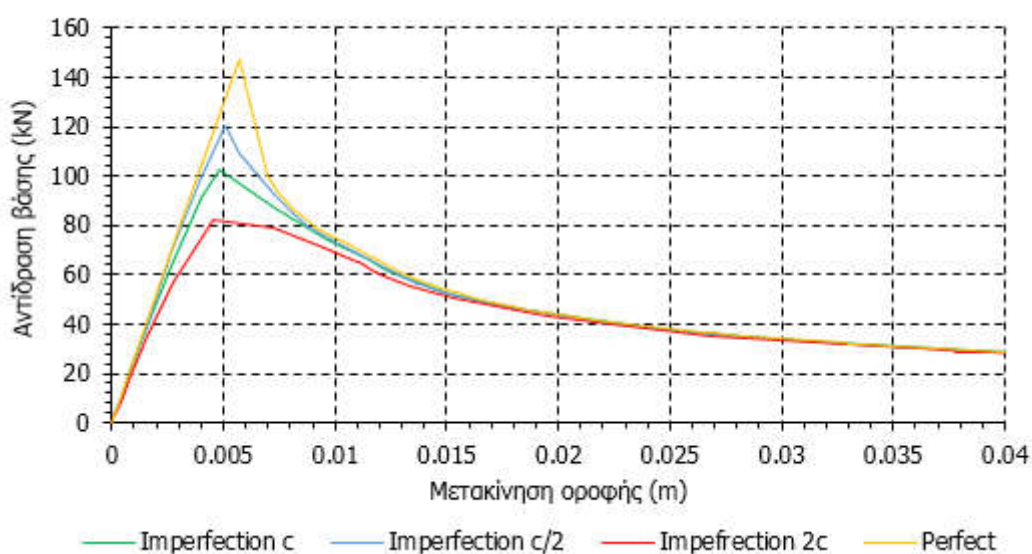
Όπως παρατηρείται από το Διάγραμμα (5-9) η μεταβολή της ατέλειας έχει επίδραση τόσο στην οριακή μετακίνηση οροφής όσο και στο οριακό φορτίο στη συνολική απόκριση του φορέα. Πιο συγκεκριμένα, για τον τέλειο φορέα η μετακίνηση οροφής στο οριακό σημείο είναι 0.004225m και η αντίδραση στήριξης 454.36kN και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.004m και 428.953kN. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα οριακά σημεία εντοπίζονται για συντεταγμένες (0.00396m, 415.734kN) και (0.00394m, 369.929kN) αντίστοιχα.

5.4.2 Παραμετρική ανάλυση ατελειών στο μοντέλο χωρίς την επιρροή των συνδέσεων

Για να μπορέσουν να συγκριθούν τα αποτελέσματα της παραμετρικής ανάλυσης, ως προς την ατέλεια, του μοντέλου με την επιρροή των συνδέσεων με την αντίστοιχη ευαισθησία σε ατέλεια του μοντέλου χωρίς συνδέσεις θα πρέπει να ακολουθηθεί και για το δεύτερο η ίδια διαδικασία αναλύσεων.

Ο φορέας αναλύθηκε χωρίς ατέλεια, με ατέλεια μεγέθους c , $c/2$ και $2*c$. Παρακάτω παρουσιάζονται και οι αντίστοιχοι δρόμοι ισορροπίας για κάθε μέλος του συνδέσμου ξεχωριστά αλλά και οι συνολικοί.

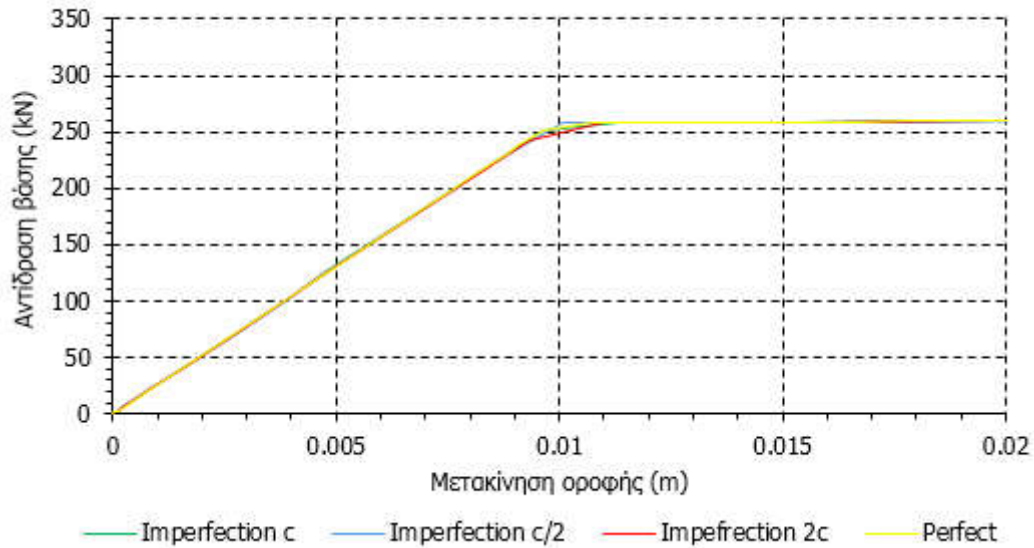
Στο Διάγραμμα (5-10) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δρόμων ισορροπίας της παραμετρικής ανάλυσης ως προς την ατέλεια για το θλιβόμενο μέλος του χιαστί συνδέσμου.



Διάγραμμα 5-10: Σύγκριση των δρόμων ισορροπίας των θλιβόμενων μελών για μεταβολή της ατέλειας

Για τον τέλειο φορέα το η μετακίνηση στο οριακό σημείο είναι 0.00572m και η αντίδραση στήριξης 147.589kN και για τον φορέα με ατέλεια ($c/2$) 0.0051m και 120.408kN. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και ($2c$) τα οριακά σημεία εντοπίζονται για συντεταγμένες (0.0048m, 102.971kN) και (0.00457m, 82.6195kN) αντίστοιχα.

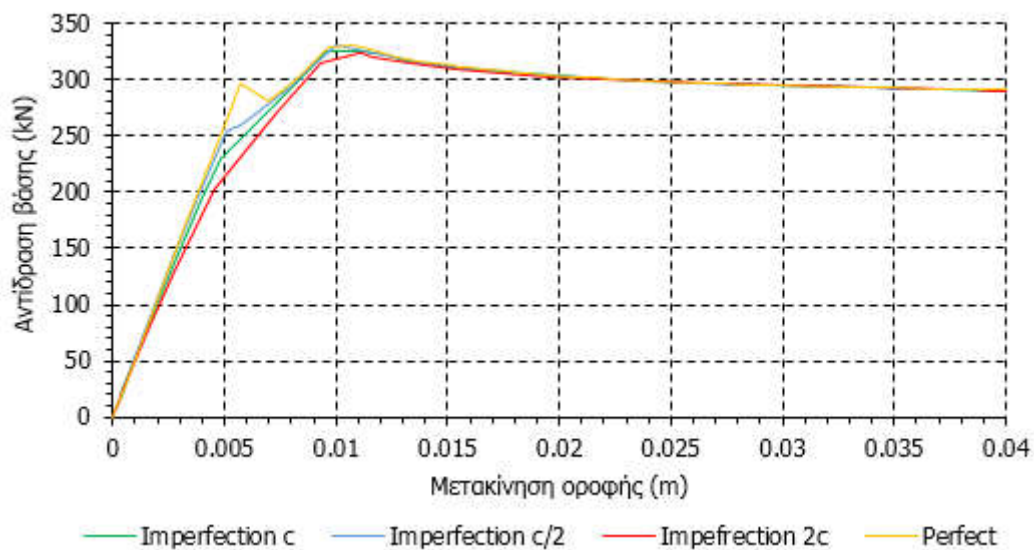
Στο Διάγραμμα (5-11) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δρόμων ισορροπίας της παραμετρικής ανάλυσης ως προς την ατέλεια για το εφελκυσμένο μέλος του χιαστί συνδέσμου.



Διάγραμμα 5-11: Σύγκριση των δρόμων ισορροπίας των εφελκόμενων μελών για μεταβολή της ατέλειας

Όπως παρατηρείται, και εδώ, το φορτίο διαρροής είναι ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις όπως αναμενόταν. Η μετακίνηση, όμως, για την οποία αυτό επιτυγχάνεται διαφέρει. Ειδικότερα, για τον τέλειο φορέα η μετακίνηση στο σημείο διαρροής είναι 0.01071m και για τον φορέα με ατέλεια ($c/2$) 0.01006m. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και ($2c$) τα σημεία διαρροής εντοπίζονται για μετακινήσεις 0.00961693m και 0.009m αντίστοιχα. Καθώς μεγαλώνει δηλαδή το μέγεθος της ατέλειας ο εφελκόμενος διαρρέει για μικρότερη μετακίνηση όπως και στην περίπτωση της 5.4.1.

Στο Διάγραμμα (5-12) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δρόμων ισορροπίας της παραμετρικής ανάλυσης ως προς την ατέλεια για το συνολικό σύστημα.



Διάγραμμα 5-12: Σύγκριση των συνολικών δρόμων ισορροπίας για μεταβολή της ατέλειας

Όπως παρατηρείται από το Διάγραμμα (5-12) η μεταβολή της ατέλειας έχει επίδραση, αν και μικρή, τόσο στην οριακή μετακίνηση οροφής όσο και στο οριακό φορτίο στη συνολική απόκριση του φορέα. Πιο συγκεκριμένα, για τον τέλειο φορέα η μετακίνηση οροφής στο οριακό σημείο είναι 0.010714m και η αντίδραση στήριξης 330.569kN και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.010064m και 329.35kN. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα οριακά σημεία εντοπίζονται για συντεταγμένες (0.01005m, 325.23kN) και (0.00998m, 323.6769kN) αντίστοιχα.

5.4.3 Σύγκριση ευαισθησίας σε ατέλεια στα δύο μοντέλα (με και χωρίς συνδέσεις)

Η επιρροή των ατελειών γίνεται περισσότερο κατανοητή αν διερευνηθούν οι ποσοστιαίες μεταβολές που επιφέρουν στην εκάστοτε απόκριση. Παρακάτω παρουσιάζονται οι μεταβολές στο οριακό φορτίο και στην αντίστοιχη μετακίνηση και για τα δύο μοντέλα (Πίνακας (5-1) και Πίνακας (5-2)). Η αδιαστατοποίηση των μεγεθών έγινε ως προς τα μεγαλύτερα μεγέθη.

Πίνακας 5-1: Αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων για το φορέα χωρίς συνδέσεις

Μέγεθος Ατέλειας	Θλιβόμενο μέλος		Εφελκυσμένο μέλος		Συνολικός φορέας	
	Μεταβολή φορτίου	Μεταβολή μετακίνησης	Μεταβολή φορτίου	Μεταβολή μετακίνησης	Μεταβολή φορτίου	Μεταβολή μετακίνησης
0						
	18.4%	10.8%	0%	6.06%	6.066%	0.368%
c/2						
	14.4815%	5.88%	0%	4.4%	1.2%	0.1%
c						
	19.76%	4.79%	0%	3.2955%	0.5%	0.7%
2c						

Πίνακας 5-2: Αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων για το φορέα με τις συνδέσεις

Μέγεθος Ατέλειας	Θλιβόμενο μέλος		Εφελκυσμένο μέλος		Συνολικός φορέας	
	Μεταβολή φορτίου	Μεταβολή μετακίνησης	Μεταβολή φορτίου	Μεταβολή μετακίνησης	Μεταβολή φορτίου	Μεταβολή μετακίνησης
0						
	7.22%	16%	0%	5.68%	5.59%	5.32%
c/2						
	5.37%	9.4%	0%	6.25%	3%	1%
c						
	21.46%	16.88%	0%	4.76%	11.01%	0.5%
2c						

Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

5.5 Συμπεράσματα

Στο τελευταίο κομμάτι της διερεύνησης της επιρροής των συνδέσεων στην απόκριση του συστήματος αλλά και της συνολικότερης απόκρισης του πλαισίου με τους κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας πραγματοποιήθηκαν μια σειρά συγκριτικών και παραμετρικών αναλύσεων. Ειδικότερα, γίνεται αναλυτική σύγκριση των αποκρίσεων των δύο μοντέλων (με και χωρίς την επιρροή των συνδέσεων), έγιναν παραμετρικές αναλύσεις ως προς την επίδραση της προέντασης των κοχλιών στην απόκριση του μοντέλου (με τις συνδέσεις) και τέλος διερευνήθηκε η ευαισθησία σε ατέλειες των δύο μοντέλων. Καταρχήν, συγκρίνονται τόσο οι παραμορφώσεις που έχουν τα δύο μοντέλα (με ίδιες διατομές συνδέσμων) όσο και οι αντίστοιχοι δρόμοι ισορροπίας. Στη συνέχεια πραγματοποιείται παραμετρική ανάλυση στο μοντέλο με τις συνδέσεις όπου μεταβάλλεται η δύναμη προέντασης των κοχλιών και μελετάται η τυχόν επιρροή της στην απόκριση (0.7xFub, 0.65xFub, 0.6xFub). Η μεταβολή της προέντασης είναι τέτοια πάντως, ούτως ώστε να μην αστοχούν ποτέ οι συνδέσεις πριν τις διαγώνιους. Τέλος, μελετάται και η ευαισθησία του κάθε μοντέλου στην επιβολή ατελειών και στην μεταξύ τους σχέση. Οι βασικές παρατηρήσεις και τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

1. Συγκρίνοντας τα δύο μοντέλα, με και χωρίς την επιρροή των συνδέσεων και με ίδιο μέγεθος ατέλειας :
 - Όπως παρατηρείται και τα δύο μοντέλα αστοχούν με λυγισμό της θλιβόμενης διαγώνιου τους. Στο μοντέλο χωρίς την επιρροή των συνδέσεων η κατεύθυνση του λυγισμού φαίνεται πως δεν παίζει κάποιο ρόλο (λυγισμός αμφιαρθρωτής ράβδου). Αντίθετα, στο μοντέλο με την επιρροή των συνδέσεων ο λυγισμός του θλιβόμενου χιαστί συντελείται με εκτός του επιπέδου του πλαισίου, εκτροπή του μέλους γεγονός που οφείλεται στον τρόπο σύνδεσης των μελών των διαγώνιων.
 - Ο δρόμος ισορροπίας του εφελκυσμένου μέλους του μοντέλου με τις συνδέσεις διαρρέει για μετακίνηση 0.00428m και αντίδραση στήριξης ίση με 240.138kN. Ο δρόμος ισορροπίας του εφελκυσμένου μέλους του μοντέλου χωρίς συνδέσεις διαρρέει για μετακίνηση 0.0099m και αντίδραση στήριξης ίση με 258kN. Έχουν δηλαδή διαφορά 56% στην μετακίνηση διαρροής και 5% στην αντίδραση στήριξης για την οποία αυτή συντελείται. Το εφελκυσμένο μέλος του μοντέλου με συνδέσεις διαρρέει για μικρότερη μετακίνηση γιατί ο θλιβόμενος χιαστί σε αυτήν την περίπτωση λυγίζει για μικρότερη μετακίνηση και επομένως γίνεται γρηγορότερα η ανακατανομή από το θλιβόμενο στο εφελκυσμένο μέλος. Η διαφορά της αντίδρασης στήριξης οφείλεται στην ελαφρώς διαφορετική γεωμετρία λόγω των συνδέσεων που δημιουργεί μια μικρή διαφορά στη γωνία του συνδέσμου και άρα διαφορετική αντίδραση ($\approx 1^\circ$).
 - Ο δρόμος ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους του μοντέλου με τις συνδέσεις λυγίζει για μετακίνηση 0.00308m και αντίδραση στήριξης ίση με 196.745kN. Ο δρόμος ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους του μοντέλου χωρίς συνδέσεις λυγίζει για μετακίνηση 0.0051m και αντίδραση στήριξης ίση με 120.479kN. Έχουν δηλαδή διαφορά 39.6% στην οριακή μετακίνηση και 38.7% στην αντίδραση στήριξης για την οποία αυτή συντελείται.
 - Ο συνολικός δρόμος ισορροπίας του μοντέλου με τις συνδέσεις έχει οριακό σημείο για μετακίνηση 0.00396m και αντίδραση στήριξης ίση με 415.734kN. Ο συνολικός δρόμος ισορροπίας του μοντέλου χωρίς συνδέσεις φτάνει το οριακό σημείο για μετακίνηση 0.009939m και αντίδραση στήριξης ίση με 332.64kN. Έχουν δηλαδή διαφορά 60% στην μετακίνηση διαρροής και 20% στην οριακή αντίδραση στήριξης.

- Η αρχική δυσκαμψία του δρόμου ισορροπίας του μοντέλου με τις συνδέσεις είναι περίπου 104983.333kN/m και του μοντέλου χωρίς συνδέσεις 33468.15575kN. Έχουν δηλαδή διαφορά της τάξης του 67.5%.
2. Από τις παραμετρικές αναλύσεις ως προς την προένταση των κοχλιών σύνδεσης στο μοντέλο με τις συνδέσεις συμπεραίνεται πως:
- Η αστοχία του φορέα εξακολουθεί να προκαλείται όπως και πριν, με λυγισμό της θλιβόμενης διαγώνιου και διαρροή, στη συνέχεια, της εφελκυσμένης διαγώνιου.
 - Παρατηρείται, πως, τόσο από τη συνολική απόκριση του φορέα όσο και από τις επιμέρους, δεν υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση στην απόκριση του φορέα για μεταβολή της προέντασης των κοχλιών, πάντα με την προϋπόθεση πως σε καμία περίπτωση δεν αστοχούν οι συνδέσεις πριν τους συνδέσμους δυσκαμψίας
 - Τα αποτελέσματα αυτά είναι λογικά, γιατί παρόλο που μειώνεται η προένταση, οι συνδέσεις διατηρούν τη δυσκαμψία τους. Δεν παρατηρείτε, δηλαδή, συνολική ολίσθηση. Επομένως, η καθολική δυσκαμψία του φορέα δεν αλλάζει (οι συνδέσεις έχουν διαστασιολογηθεί με την ικανοτική δύναμη διαρροής της διαγώνιου). Το συγκεκριμένο προσομοίωμα δεν μπορεί να αποδώσει την απόκριση του συστήματος μετά την πλήρη ολίσθηση των συνδέσεων καθώς δεν μπορεί «καταλάβει» τις δυνάμεις άντυνας που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια.
3. Όσον αφορά τις παραμετρικές αναλύσεις ευαισθησίας σε επιβολή ατελειών στο μοντέλο με τις συνδέσεις:
- Για τον τέλειο φορέα, το θλιβόμενο μέλος έχει μετακίνηση στο οριακό σημείο 0.00405m και αντίδραση στήριξης 224.115kN και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.0034m και 207.9kN. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα οριακά σημεία εντοπίζονται για συντεταγμένες (0.00308m, 196.745kN) και (0.00256m, 154.513kN) αντίστοιχα.
 - Το φορτίο διαρροής, για το εφελκυσμένο μέλος, είναι ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις όπως αναμενόταν. Η μετακίνηση, όμως, για την οποία αυτό επιτυγχάνεται παρουσιάζει διαφορές. Ειδικότερα, για τον τέλειο φορέα το η μετακίνηση στο σημείο διαρροής είναι 0.00475m και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.00448m. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα σημεία διαρροής εντοπίζονται για μετακινήσεις 0.0042m και 0.004m αντίστοιχα. Καθώς μεγαλώνει δηλαδή το μέγεθος της ατέλειας ο εφελκυσμένος διαγώνιος εισέρχεται στη διαρροή για μικρότερη μετακίνηση. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι καθώς αυξάνεται η ατέλεια ο θλιβόμενος χιαστί λυγίζει για μικρότερο φορτίο και μικρότερη μετακίνηση και επομένως ο εφελκυσμένος διαγώνιος τείνει να αναλάβει μεγαλύτερη δύναμη από μικρότερη μετακίνηση.
 - Η μεταβολή της ατέλειας έχει επίδραση τόσο στην οριακή μετακίνηση οροφής όσο και στο οριακό φορτίο στη συνολική απόκριση του φορέα. Πιο συγκεκριμένα, για τον τέλειο φορέα η μετακίνηση οροφής στο οριακό σημείο είναι 0.004225m και η αντίδραση στήριξης 454.36kN και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.004m και 428.953kN. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα οριακά σημεία εντοπίζονται για συντεταγμένες (0.00396m, 415.734kN) και (0.00394m, 369.929kN) αντίστοιχα.

4. Όσον αφορά τις παραμετρικές αναλύσεις ευαισθησίας σε επιβολή ατελειών στο μοντέλο χωρίς τις συνδέσεις:
- Για τον τέλειο φορέα, το θλιβόμενο μέλος έχει μετακίνηση στο οριακό σημείο 0.00572m και αντίδραση στήριξης 147.589kN και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.0051m και 120.408kN. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα οριακά σημεία εντοπίζονται για συντεταγμένες (0.0048m, 102.971kN) και (0.00457m, 82.6195kN) αντίστοιχα.
 - Και εδώ, το φορτίο διαρροής είναι ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις για το εφελκούμενο μέλος. Η μετακίνηση, όμως, για την οποία αυτό επιτυγχάνεται διαφέρει. Ειδικότερα, για τον τέλειο φορέα η μετακίνηση στο σημείο διαρροής είναι 0.01071m και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.01006m. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα σημεία διαρροής εντοπίζονται για μετακινήσεις 0.00961693m και 0.009m αντίστοιχα. Καθώς μεγαλώνει δηλαδή το μέγεθος της ατέλειας ο εφελκούμενος διαρρέει, και εδώ, για μικρότερη μετακίνηση.
 - Για το συνολικό μοντέλο, η μεταβολή της ατέλειας έχει επίδραση τόσο στην οριακή μετακίνηση οροφής όσο και στο οριακό φορτίο του φορέα. Πιο συγκεκριμένα, για τον τέλειο φορέα η μετακίνηση οροφής στο οριακό σημείο είναι 0.010714m και η αντίδραση στήριξης 330.569kN και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.010064m και 329.35kN. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα οριακά σημεία εντοπίζονται για συντεταγμένες (0.01005m, 325.23kN) και (0.00998m, 323.6769kN) αντίστοιχα.
5. Όσον αφορά τις συγκριτικές αναλύσεις ευαισθησίας σε ατέλεια (0, c/2, c, 2c) ανάμεσα στα δύο μοντέλα προκύπτουν τα εξής (οι μεταβολές μετρούνται ως μειώσεις από μικρότερη ατέλεια προς την μεγαλύτερη):
- Για το θλιβόμενο μέλος του φορέα χωρίς συνδέσεις οι μεταβολές στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 10.8%, 5.88% και 4.79%. Οι αντίστοιχες μεταβολές του οριακού φορτίου είναι 18.4%, 14.48% και 19.76%.
 - Για το συνολικό φορέα χωρίς συνδέσεις οι μεταβολές στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 0.368%, 0.1% και 0.7%. Οι αντίστοιχες μεταβολές του οριακού φορτίου είναι 6.066%, 1.2% και 0.5%.
 - Για το θλιβόμενο μέλος του φορέα με τις συνδέσεις οι μεταβολές στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 16%, 9.4% και 16.88%. Οι αντίστοιχες μεταβολές του οριακού φορτίου είναι 7.22%, 5.37% και 21.46%.
 - Για το συνολικό φορέα με τις συνδέσεις οι μεταβολές στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 5.32%, 1% και 0.5%. Οι αντίστοιχες μεταβολές του οριακού φορτίου είναι 5.6%, 3% και 11.01%.
 - Για το θλιβόμενο μέλος του φορέα χωρίς συνδέσεις η μέγιστη μεταβολή στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 10.8% και η μέγιστη μεταβολή στο οριακό φορτίο είναι 19.76%. Συνολικά, για το φορέα χωρίς συνδέσεις η μέγιστη μεταβολή στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 0.7% και η μέγιστη μεταβολή στο οριακό φορτίο είναι 6%.
 - Για το θλιβόμενο μέλος του φορέα με τις συνδέσεις η μέγιστη μεταβολή στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 16.88% και η μέγιστη μεταβολή στο οριακό φορτίο είναι 21.46%. Συνολικά, για το φορέα χωρίς συνδέσεις η μέγιστη μεταβολή στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 5.32% και η μέγιστη μεταβολή στο οριακό φορτίο είναι 11.01%.

- Για το φορέα χωρίς τις συνδέσεις η μέγιστη μεταβολή στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι το 6.48% της μέγιστης μεταβολής της μετακίνησης του θλιβόμενου μέλους του φορέα. Αντίστοιχα, η μέγιστη μεταβολή του οριακού φορτίου είναι το 30% της μέγιστης μεταβολής του φορτίου του θλιβόμενου μέλους του φορέα.
- Για το φορέα με τις συνδέσεις η μέγιστη μεταβολή στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι το 31.51% της μέγιστης μεταβολής της μετακίνησης του θλιβόμενου μέλους του φορέα. Αντίστοιχα, η μέγιστη μεταβολή του οριακού φορτίου είναι το 51.72% της μέγιστης μεταβολής του φορτίου του θλιβόμενου μέλους του φορέα.
- Η επιρροή των ατελειών είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη στο μοντέλο με τις συνδέσεις, τόσο στη μετακίνηση όσο και στο φορτίο. Η μέγιστη μεταβολή στην μετακίνηση είναι πενταπλάσια σε σχέση με το μοντέλο χωρίς συνδέσεις και η μέγιστη μεταβολή στο φορτίο είναι, αντίστοιχα, μεγαλύτερη κατά 70%.
- Τα παραπάνω συμπεράσματα εξηγούνται, εν μέρει, από την επιρροή του θλιβόμενου μέλους στη συνολική απόκριση του φορέα με τις συνδέσεις. Επιρροή, που όπως αναφέρθηκε, είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν που έχει στο μοντέλο χωρίς συνδέσεις.

Περιεχόμενα

5	<u>EQUATION CHAPTER 3 SECTION 1</u>	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΕΣ – ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	83
5.1	Εισαγωγή		83
5.2	Σύγκριση μοντέλου με και χωρίς την επιρροή των συνδέσεων.....		83
5.2.1	Σύγκριση μορφών αστοχίας.....		83
5.2.2	Σύγκριση των αποκρίσεων των δύο μοντέλων		84
5.3	Παραμετρικές αναλύσεις προέντασης κοχλιών		86
5.4	Συγκριτικές παραμετρικές αναλύσεις ατελειών.....		88
5.4.1	Παραμετρική ανάλυση ατελειών στο μοντέλο με την επιρροή των συνδέσεων		88
5.4.2	Παραμετρική ανάλυση ατελειών στο μοντέλο χωρίς την επιρροή των συνδέσεων. 91		
5.4.3	Σύγκριση ευαισθησίας σε ατέλεια στα δύο μοντέλα (με και χωρίς συνδέσεις)		93
5.5	Συμπεράσματα.....		94

6 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Ανασκόπηση εργασίας

Οι διαγώνιοι, κεντρικοί, σύνδεσμοι δυσκαμψίας, γνωστοί και ως χιαστί, αποτελούν συστήματα που τοποθετούνται στις μεταλλικές κατασκευές με σκοπό να ενισχύσουν την ακαμψία/ευστάθεια του φέροντος οργανισμού. Οι σύνδεσμοι προσφέρουν δυσκαμψία στο φορέα στην κατεύθυνση του επιπέδου τους και χρησιμοποιούνται για να παραλάβουν οριζόντια φορτία. Φορτία, δηλαδή, που προέρχονται κατά κύριο λόγο από δράσεις όπως ο σεισμός ή ο άνεμος. Πρόκειται για ένα σύστημα δύο τεμνόμενων μεταλλικών ράβδων εκ των οποίων η μία λειτουργεί σε καθαρή θλίψη και η άλλη σε καθαρό εφελκυσμό ανάλογα με την κατεύθυνση της φόρτισης.

Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς ενός τέτοιου συστήματος κεντρικών διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας (υποστυλώματα-δοκός-διαγώνιοι σύνδεσμοι). Πιο συγκεκριμένα, η εργασία χωρίζεται, πρακτικά, σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος μελετάται ένα τέτοιο φάτνωμα που προσομοιώνεται με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία (beam elements) και πραγματοποιούνται μη-γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού. Επιπλέον, εξετάζεται και η επιρροή του σχήματος (ανάλογα με την ιδιομορφή) της επιβαλλόμενης ατέλειας. Όσον αφορά τις συνδέσεις των διαγώνιων προσομοιώνονται τις περισσότερες φορές είτε ως πακτώσεις είτε ως αρθρώσεις. Απλοποιούνται, δηλαδή, ανάλογα με τη συμπεριφορά που αναμένεται να είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Στο δεύτερο μέρος γίνεται απόπειρα διερεύνησης της επιρροής των συνδέσεων των διαγώνιων στην απόκριση του συστήματος με τη μόρφωση κατάλληλου προσομοιώματος που περιλαμβάνει γραμμικά, επιφανειακά και πεπερασμένα στοιχεία επαφής.

Σαν εισαγωγή στο πρόβλημα λοιπόν, παρουσιάζεται, στο 1^ο κεφάλαιο, μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στο θέμα των διαγώνιων κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας. Πιο συγκεκριμένα, εξηγούνται κάποια βασικά στοιχεία που αφορούν το λυγισμό θλιβόμενων ράβδων, φαινόμενο που αποτελεί κυρίαρχη μορφή αστοχίας για το σύστημα. Επίσης, έγινε η προσπάθεια να συγκεντρωθούν, και όσο γίνεται να επεξηγηθούν, εκείνα τα κομμάτια από τους ευρωκώδικες (EC3 και EC8) που αφορούν τη διαστασιολόγηση κεντρικών συνδέσμων.

Στο 2^ο κεφάλαιο της εργασίας εξετάζεται η συμπεριφορά ενός συστήματος κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας (υποστυλώματα-δοκός-διαγώνιοι σύνδεσμοι). Συγκεκριμένα, με χρήση του λογισμικού ADINA, προσομοιώνεται το σύστημα με γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία (beam elements) και

Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

πραγματοποιούνται μη-γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού. Επιπλέον, εξετάζεται και η επιρροή του σχήματος (ανάλογα με την ιδιομορφή) της επιβαλλόμενης ατέλειας για δεδομένο μέγεθος ατέλειας.

Το επόμενο ζήτημα που για το οποίο γίνεται απόπειρα διερεύνησης είναι αυτό της επιρροής των συνδέσεων των διαγωνίων στην απόκριση του συστήματος. Οι συνδέσεις των διαγωνίων προσομοιώνονται τις περισσότερες φορές, ανάλογα και με την περίπτωση, είτε ως πακτώσεις είτε ως αρθρώσεις. Απλοποιούνται, δηλαδή, ανάλογα με τη συμπεριφορά που αναμένεται να είναι πιο κοντά στην πραγματική απόκριση. Ο στόχος, λοιπόν, είναι η μόρφωση ενός μοντέλου που να λαμβάνει υπόψιν την επιρροή των συνδέσεων για μία δεδομένη διατομή συνδέσμου. Στο 3^ο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται η διαδικασία με την οποία σχεδιάστηκαν και διαστασιολογήθηκαν οι συνδέσεις των διαγώνιων συνδέσμων σε ένα τέτοιο μοντέλο.

Στη συνέχεια, μορφώνεται το προσομοίωμα που θα μπορεί να συμπεριλάβει την επιρροή των συνδέσεων των διαγωνίων στην απόκριση του συστήματος (4^ο κεφάλαιο). Το μοντέλο είναι ένα πλαίσιο με κεντρικούς συνδέσμου δυσκαμψίας, αντίστοιχο με αυτό που παρουσιάζεται στο 2^ο κεφάλαιο, με τη διαφορά πως οι συνδέσεις των συνδέσμων δεν είναι αρθρώσεις ή πακτώσεις, αλλά προσομοιώνονται λεπτομερώς όπως σχεδιάστηκαν στο 3^ο κεφάλαιο. Το σύστημα, δηλαδή, περιλαμβάνει πλέον και τα κομβοελάσματα καθώς και τους προεντεταμένους κοχλίες. Το λογισμικό πακέτο που χρησιμοποιήθηκε και εδώ είναι το ADINA και για την προσομοίωση των συνδέσεων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία επαφής (contact elements) και στοιχεία κοχλίας (bolt elements). Για να υλοποιηθεί η σύνδεση, επίσης, το ένα μέρος από τα στοιχεία δοκού (με τα οποία μοντελοποιούνται τα υποστυλώματα και η δοκός) αντικαθίστανται από επιφανειακά στοιχεία που αναπαριστούν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια τη γεωμετρία των συνδέσεων.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας, για να γίνει καλύτερη διερεύνηση της επιρροής των συνδέσεων στην απόκριση του συστήματος αλλά και της συνολικότερης απόκρισης του πλαισίου με τους κεντρικούς συνδέσμους πραγματοποιείται μια σειρά συγκριτικών και παραμετρικών αναλύσεων. Ειδικότερα, γίνεται αναλυτική σύγκριση των αποκρίσεων των δύο μοντέλων (με και χωρίς την επιρροή των συνδέσεων), λαμβάνουν χώρα παραμετρικές αναλύσεις ως προς την επίδραση της προέντασης των κοχλίων στην απόκριση του μοντέλου (με τις συνδέσεις) και τέλος συγκρίνεται η ευαισθησία σε ατέλειες των δύο μοντέλων.

6.2 Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη, τελευταία, παράγραφο της εργασίας δίνονται συγκεντρωτικά τα βασικά συμπεράσματα και οι βασικές παρατηρήσεις που αφορούν τη διερεύνηση της μη γραμμικής συμπεριφοράς ενός πλαισίου με κεντρικούς συνδέσμους δυσκαμψίας όπως αυτή περιγράφηκε προηγουμένως. Αρχικά, τα συμπεράσματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το αν αφορούν το μοντέλο με την επιρροή των συνδέσεων ή όχι. Τέλος, με βάση και τις τελικές συγκριτικές-παραμετρικές αναλύσεις, παρουσιάζονται κάποια γενικά συμπεράσματα σχετικά με τη μη γραμμική συμπεριφορά του πλαισίου κεντρικών συνδέσμων δυσκαμψίας που μελετάται.

Τα βασικά συμπεράσματα και οι βασικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τη μελέτη του μοντέλου χωρίς την επιρροή των συνδέσεων είναι τα εξής:

1. Όσον αφορά το φορέα με δισδιάστατη συμπεριφορά:
 - Όπως είναι φυσικό, σε κάθε περίπτωση ο λυγισμός της θλιβόμενης διαγωνίου προηγείται της διαρροής της εφελκυσόμενης. Συγκεκριμένα, ο λυγισμός συντελείται στο 40% της διαρροής για το φορέα, με δισδιάστατη συμπεριφορά. Η αδιαστατοποίηση

- γίνεται ως προς το φορτίο που λυγίζει το θλιβόμενο μέλος (ατέλεια κατά την ιδιομορφή που αφορά λυγισμό θλιβόμενου μέλους).
- Στο δισδιάστατο μοντέλο οι ιδιομορφές λυγισμού αντιστοιχούν στις ιδιομορφές θλιβόμενης αμφιαρθρωτής ράβδου.
 - Το οριακό φορτίο που προκύπτει με μη-γραμμική ανάλυση είναι περίπου το 70% του κρίσιμου φορτίο λυγισμού της διαγωνίου για το φορέα με δισδιάστατη συμπεριφορά.
 - Όπως αναμενόταν, λοιπόν, ο λυγισμός της θλιβόμενης διαγωνίου ελέγχει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά του δισδιάστατου φορέα, κάτι που φαίνεται και από την παραμορφωμένη εικόνα του στην αστοχία (λυγισμός).
2. Όσον αφορά το φορέα με τρισδιάστατη συμπεριφορά και πακτωμένη τη στροφή εκτός επιπέδου στα άκρα των διαγωνίων:
- Οι δύο πρώτες ιδιομορφές αφορούν την πρώτη ιδιομορφή λυγισμού αμφιαρθρωτής ράβδου (εντός επιπέδου), ενώ οι δύο επόμενες είναι ιδιομορφές λυγισμού αμφίπακτης ράβδου με δέσμευση στο μέσο της (εκτός επιπέδου).
 - Πραγματοποιώντας μη-γραμμική ανάλυση με ατέλεια κατά την 1^η ιδιομορφή το οριακό φορτίο είναι 103kN (40% της διαρροής), με ατέλεια κατά την 3^η ιδιομορφή το οριακό φορτίο είναι 190kN (75% της διαρροής) και με συνδυασμένη ατέλεια (μειωμένη κατά το ήμισυ) το οριακό φορτίο είναι 120kN (46.5% της διαρροής).
 - Και εδώ, λοιπόν, ο λυγισμός της θλιβόμενης διαγωνίου εντός επιπέδου ελέγχει τη συμπεριφορά του φορέα κάτι που φαίνεται και από την παραμορφωμένη εικόνα του φορέα στην αστοχία με τη συνδυασμένη ατέλεια (λυγισμός). Ο φορέας αστοχεί με την 3^η ιδιομορφή (με μεγαλύτερο οριακό φορτίο) αν του δοθεί ατέλεια μόνον στο σχήμα της 3^{ης} ιδιομορφής.
3. Όσον αφορά το φορέα με τρισδιάστατη συμπεριφορά και ελεύθερη τη στροφή εκτός επιπέδου στα άκρα των διαγωνίων:
- Η πρώτη ιδιομορφή του φορέα είναι εκτός επιπέδου μετακίνηση του συστήματος των διαγωνίων με ταυτόχρονο λυγισμό της θλιβόμενης διαγωνίου (εκτός επιπέδου), ενώ οι τρεις επόμενες είναι ιδιομορφές λυγισμού αμφιαρθρωτής ράβδου.
 - Πραγματοποιώντας μη-γραμμική ανάλυση με ατέλεια κατά την 1^η ιδιομορφή έχουμε οριακό φορτίο 154.3kN (60% της διαρροής), με ατέλεια κατά την 2^η ιδιομορφή έχουμε οριακό φορτίο 105kN (40% της διαρροής) και με συνδυασμένη ατέλεια (μειωμένη κατά το ήμισυ) έχουμε οριακό φορτίο 120.5kN (46.7% της διαρροής).
 - Στην περίπτωση που η ατέλεια ασκείται μόνο κατά την πρώτη ιδιομορφή, η αρχική μετατόπιση του φορέα είναι εκτός επιπέδου εκτροπή του συνολικού συστήματος των διαγωνίων. Για μια δεδομένη μετακίνηση έχουμε λυγισμό της θλιβόμενης διαγωνίου και επιστροφή του συστήματος εντός του επιπέδου του φανώματος. Από τη στιγμή του λυγισμού και μετά δεν μπορεί να ισορροπήσει σε αυτή τη θέση και οι εφελκυσόμενοι διαγώνιοι «τραβάνε» το σύστημα πίσω, γεγονός που φαίνεται και από την πρόσκληρη, μερική, αποφόρτισή τους.
 - Στις περιπτώσεις που η ατέλεια ασκείται κατά τη 2^η ιδιομορφή και συνδυασμένα (μειωμένη κατά το ήμισυ) η αστοχία του φορέα προκαλείται από λυγισμό της θλιβόμενης διαγωνίου χωρίς μετακίνηση του συστήματος εκτός επιπέδου.
 - Και σε αυτήν την περίπτωση ο λυγισμός αμφιαρθρωτής ράβδου (της θλιβόμενης διαγωνίου) είναι η επικρατούσα μορφή αστοχίας.

4. Τα γενικά συμπεράσματα, που προκύπτουν και από τη σύγκριση των καμπυλών λυγισμού είναι τα εξής:
- Οι καμπύλες λυγισμού που αφορούν τους φορείς που τους επιτρέπεται τρισδιάστατη συμπεριφορά ταυτίζονται σε όλο το φάσμα τιμών της ανηγμένης λυγηρότητας. Η καμπύλη που αναφέρεται στο φορέα που συμπεριφέρεται δισδιάστατα παίρνει παντού μικρότερες τιμές. Η μέγιστη διαφορά μεταξύ τους είναι για τιμές της ανηγμένης λυγηρότητας κοντά στο 0.8 και η μέγιστη διαφορά είναι περίπου 15% (αδιαστατοποιημένο ως προς την μικρότερη τιμή). Για τιμές ανηγμένης λυγηρότητας μικρότερες από 0.2 και οι τρεις καμπύλες ταυτίζονται και είναι οριζόντιες, δηλαδή, για αυτές τις τιμές έχουμε διαρροή υλικού και όχι λυγισμό μέλους.
 - Η παραπάνω παρατήρηση εξηγείται από το γεγονός ότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση ιδιομορφών για το σύστημα των διαγωνίων συνδέσμων. Επομένως, στην περίπτωση των τρισδιάστατων μοντέλων (με συνδυασμένη ατέλεια) ο φορέας έχει τη μισή ατέλεια από αυτήν του δυσδιάστατου μοντέλου για αυτό και παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκριση.

Τα βασικά συμπεράσματα και οι βασικές παρατηρήσεις που προκύπτουν από τη μελέτη του μοντέλου με την επιρροή των συνδέσεων είναι τα εξής:

1. Όσον αφορά τη μη γραμμικές αναλύσεις στο μοντέλο με τα στοιχεία επαφής:
- Η μη γραμμική ανελαστική ανάλυση (GMNA) ολοκληρώνεται χωρίς να αστοχήσουν οι συνδέσεις. Ο δρόμος ισορροπίας του εφελκυσμένου μέλους είναι ελαστικός – κρατυνόμενα πλαστικός ακολουθώντας τη συμπεριφορά του υλικού. Ο δρόμος ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους είναι και αυτός ελαστικός μέχρι τα 0.00405m οριζόντιας μετακίνησης περίπου, οπότε και αρχίζει να εκδηλώνεται φαινόμενο του λυγισμού. Για μετακίνηση κοντά στο 0.00475m αστοχεί η εφελκυσμένη διαγωνίος από διαρροή του υλικού. Ο συνολικός δρόμος ισορροπίας είναι ελαστικός ως το σημείο του λυγισμού και από εκεί και πέρα η δυσκαμψία του να εμφανίζει πτωτικό κλάδο με ρυθμό αντίστοιχο του δρόμου ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους. Για το συνολικό δρόμο ισορροπίας το οριακό φορτίο συντελείται για μετακίνηση οροφής 0.004225m και ανέρχεται στα 454.36kN. Το οριακό φορτίο για το θλιβόμενο μέλος ανέρχεται στα 224.115kN. Η διαρροή του εφελκυσμένου χιαστί εκδηλώνεται για αντίδραση στήριξης ίση με 243kN περίπου. Η διαφορά τους είναι περίπου 21kN ($\approx 10\%$).
 - Η μη γραμμική ατελής ανελαστική ανάλυση (GMNIA) ολοκληρώνεται, και αυτή, χωρίς να αστοχήσουν οι συνδέσεις. Οι δρόμοι ισορροπίας που αφορούν αυτό το σύστημα φαίνεται πως καθορίζονται, όπως αναμενόταν, σε μεγάλο βαθμό από το λυγισμό της θλιβόμενης διαγωνίου. Ο δρόμος ισορροπίας του εφελκυσμένου μέλους είναι ελαστικός – κρατυνόμενα πλαστικός ακολουθώντας τη συμπεριφορά του υλικού. Ο δρόμος ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους είναι και αυτός ελαστικός μέχρι τα 0.00308m οριζόντιας μετακίνησης περίπου, οπότε και αρχίζει να εκδηλώνεται φαινόμενο του λυγισμού. Για μετακίνηση κοντά στο 0.0042m συντελείται αστοχία της εφελκυσμένης διαγωνίου από διαρροή του υλικού. Ο συνολικός δρόμος ισορροπίας είναι ελαστικός ως το σημείο του λυγισμού και από εκεί και πέρα η δυσκαμψία του να εμφανίζει πτωτικό κλάδο με ρυθμό αντίστοιχο του δρόμου ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους. Για το συνολικό δρόμο ισορροπίας το οριακό φορτίο συντελείται για μετακίνηση οροφής 0.00396m και ανέρχεται στα 415.734kN. Το οριακό φορτίο για το θλιβόμενο μέλος ανέρχεται στα 196.745kN. Η διαρροή του εφελκυσμένου χιαστί εκδηλώνεται για αντίδραση στήριξης ίση με 245kN περίπου. Η διαφορά τους είναι περίπου 48.255kN ($\approx 24.5\%$).

2. Τα τελικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τη σύγκριση των δύο μεθόδων ανάλυσης (GMNA και GMNIA):
- Αρχικά μελετώνται οι εφελκόμενοι διαγώνιοι του συστήματος. Οι δρόμοι ισορροπίας για τις δύο περιπτώσεις σχεδόν ταυτίζονται. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται είναι στο μέγεθος της μετακίνησης για την οποία διαρρέει η διαγώνιος. Στην περίπτωση της ανάλυσης χωρίς ατέλεια συντελείται διαρροή για μετακίνηση 0.00475m, ενώ στην άλλη περίπτωση η μετακίνηση διαρροής είναι 0.0042m. Έχουν διαφορά, δηλαδή, της τάξης του 13%. Στην περίπτωση του συστήματος με ατέλεια, λοιπόν, η εφελκόμενος διαγώνιος φτάνει νωρίτερα τη δύναμη διαρροής, γεγονός που εξηγείται από τη νωρίτερη αστοχία της θλιβόμενης διαγωνίου για την αντίστοιχη περίπτωση στο φορέα. Καθώς η θλιβόμενη διαγώνιος λυγίζει, δηλαδή, το σύστημα «ζητάει» από την εφελκόμενη μεγαλύτερη συνεισφορά, γεγονός που την οδηγεί γρηγορότερα στη διαρροή. Επομένως πραγματοποιείται «γρηγορότερη» ανακατανομή δύναμης από τη θλιβόμενη στην εφελκόμενη διαγώνιο.
 - Όσον αφορά τους θλιβόμενους διαγωνίους, στην περίπτωση της τέλει μη γραμμικής ανάλυσης ο λυγισμός συντελείται για μετακίνηση οροφής 0.00405m με το οριακό φορτίο να ανέρχεται στα 224.115kN. Ενώ στην περίπτωση της ατελούς μη γραμμικής ανάλυσης, η μετακίνηση οροφής στο λυγισμό είναι 0.00308m με το αντίστοιχο οριακό φορτίο να ανέρχεται εδώ στα 196.745kN. Άρα έχουν διαφορά 31.5% στην οριζόντια μετακίνηση οροφής και 13.9% στο οριακό φορτίο του φορέα λόγω της επιβολής της ατέλειας.
 - Στο τελικό στάδιο συγκρίνονται οι συνολικοί δρόμοι ισορροπίας του συστήματος. Στην περίπτωση της τέλει μη γραμμικής ανάλυσης το οριακό φορτίο συντελείται για μετακίνηση οροφής 0.004225m και ανέρχεται στα 454.36kN. Στην περίπτωση της ατελούς μη γραμμικής ανάλυσης, η μετακίνηση οροφής στο οριακό σημείο είναι 0.00396m με το αντίστοιχο οριακό φορτίο να ανέρχεται εδώ στα 415.734kN. Άρα έχουν διαφορά 6.7% στην οριζόντια μετακίνηση οροφής και 9.3% στο οριακό φορτίο του φορέα λόγω της επιβολής της ατέλειας. Γίνεται αντιληπτό πως η μορφή της συμπεριφοράς της κατασκευής επηρεάζεται από τη μορφή της συμπεριφοράς του θλιβόμενου μέλους με ασταθής μεταλυγισμική συμπεριφορά. Πάντως, η συνεισφορά της εφελκόμενης διαγωνίου είναι σε κάθε περίπτωση ποσοτικά μεγαλύτερη.

Τα συνολικά, γενικά, συμπεράσματα που προκύπτουν από τις συγκριτικές- παραμετρικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, είναι τα εξής:

1. Συγκρίνοντας τα δύο μοντέλα, με και χωρίς την επιρροή των συνδέσεων και με ίδιο μέγεθος ατέλειας :
 - Όπως παρατηρείται και τα δύο μοντέλα αστοχούν με λυγισμό της θλιβόμενης διαγωνίου τους. Στο μοντέλο χωρίς την επιρροή των συνδέσεων η κατεύθυνση του λυγισμού φαίνεται πως δεν παίζει κάποιο ρόλο (λυγισμός αμφιαρθρωτής ράβδου). Αντίθετα, στο μοντέλο με την επιρροή των συνδέσεων ο λυγισμός του θλιβόμενου χιαστί συντελείται με εκτός του επιπέδου του πλαισίου, εκτροπή του μέλους γεγονός που οφείλεται στον τρόπο σύνδεσης των μελών των διαγωνίων.
 - Ο δρόμος ισορροπίας του εφελκόμενου μέλους του μοντέλου με τις συνδέσεις διαρρέει για μετακίνηση 0.00428m και αντίδραση στήριξης ίση με 240.138kN. Ο δρόμος ισορροπίας του εφελκόμενου μέλους του μοντέλου χωρίς συνδέσεις διαρρέει

Διερεύνηση μη γραμμικής συμπεριφοράς κεντρικών συνδέσεων δυσκαμψίας μεταλλικών φορέων μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων

για μετακίνηση 0.0099m και αντίδραση στήριξης ίση με 258kN. Έχουν δηλαδή διαφορά 56% στην μετακίνηση διαρροής και 5% στην αντίδραση στήριξης για την οποία αυτή συντελείται. Το εφελκόμενο μέλος του μοντέλου με συνδέσεις διαρρέει για μικρότερη μετακίνηση γιατί ο θλιβόμενος χιαστί σε αυτήν την περίπτωση λυγίζει για μικρότερη μετακίνηση και επομένως γίνεται γρηγορότερα η ανακατανομή από το θλιβόμενο στο εφελκόμενο μέλος. Η διαφορά της αντίδρασης στήριξης οφείλεται στην ελαφρώς διαφορετική γεωμετρία λόγω των συνδέσεων που δημιουργεί μια μικρή διαφορά στη γωνία του συνδέσμου και άρα διαφορετική αντίδραση ($\approx 1^\circ$).

- Ο δρόμος ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους του μοντέλου με τις συνδέσεις λυγίζει για μετακίνηση 0.00308m και αντίδραση στήριξης ίση με 196.745kN. Ο δρόμος ισορροπίας του θλιβόμενου μέλους του μοντέλου χωρίς συνδέσεις λυγίζει για μετακίνηση 0.0051m και αντίδραση στήριξης ίση με 120.479kN. Έχουν δηλαδή διαφορά 39.6% στην οριακή μετακίνηση και 38.7% στην αντίδραση στήριξης για την οποία αυτή συντελείται.
- Ο συνολικός δρόμος ισορροπίας του μοντέλου με τις συνδέσεις έχει οριακό σημείο για μετακίνηση 0.00396m και αντίδραση στήριξης ίση με 415.734kN. Ο συνολικός δρόμος ισορροπίας του μοντέλου χωρίς συνδέσεις φτάνει το οριακό σημείο για μετακίνηση 0.009939m και αντίδραση στήριξης ίση με 332.64kN. Έχουν δηλαδή διαφορά 60% στην μετακίνηση διαρροής και 20% στην οριακή αντίδραση στήριξης.
- Η αρχική δυσκαμψία του δρόμου ισορροπίας του μοντέλου με τις συνδέσεις είναι περίπου 104983.333kN/m και του μοντέλου χωρίς συνδέσεις 33468.15575kN. Έχουν δηλαδή διαφορά της τάξης του 67.5%.

2. Από τις παραμετρικές αναλύσεις ως προς την προένταση των κοχλιών σύνδεσης στο μοντέλο με τις συνδέσεις συμπεραίνεται πως:

- Η αστοχία του φορέα εξακολουθεί να προκαλείται όπως και πριν, με λυγισμό της θλιβόμενης διαγωνίου και διαρροή, στη συνέχεια, της εφελκόμενης διαγωνίου.
- Παρατηρείται, πως, τόσο από τη συνολική απόκριση του φορέα όσο και από τις επιμέρους, δεν υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση στην απόκριση του φορέα για μεταβολή της προέντασης των κοχλιών, πάντα με την προϋπόθεση πως σε καμία περίπτωση δεν αστοχούν οι συνδέσεις πριν τους συνδέσμους δυσκαμψίας
- Τα αποτελέσματα αυτά είναι λογικά, γιατί παρόλο που μειώνεται η προένταση, οι συνδέσεις διατηρούν τη δυσκαμψία τους. Δεν παρατηρείτε, δηλαδή, συνολική ολίσθηση. Επομένως, η καθολική δυσκαμψία του φορέα δεν αλλάζει (οι συνδέσεις έχουν διαστασιοποιηθεί με την ικανοτική δύναμη διαρροής της διαγωνίου). Το συγκεκριμένο προσομοίωμα δεν μπορεί να αποδώσει την απόκριση του συστήματος μετά την πλήρη ολίσθηση των συνδέσεων καθώς δεν μπορεί «καταλάβει» τις δυνάμεις άντυγας που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια.

3. Όσον αφορά τις παραμετρικές αναλύσεις ευαισθησίας σε επιβολή ατελειών στο μοντέλο με τις συνδέσεις:

- Για τον τέλειο φορέα, το θλιβόμενο μέλος έχει μετακίνηση στο οριακό σημείο 0.00405m και αντίδραση στήριξης 224.115kN και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.0034m και 207.9kN. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα οριακά σημεία εντοπίζονται για συντεταγμένες (0.00308m, 196.745kN) και (0.00256m, 154.513kN) αντίστοιχα.
- Το φορτίο διαρροής, για το εφελκόμενο μέλος, είναι ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις όπως αναμενόταν. Η μετακίνηση, όμως, για την οποία αυτό επιτυγχάνεται παρουσιάζει

διαφορές. Ειδικότερα, για τον τέλειο φορέα το η μετακίνηση στο σημείο διαρροής είναι 0.00475m και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.00448m. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα σημεία διαρροής εντοπίζονται για μετακινήσεις 0.0042m και 0.004m αντίστοιχα. Καθώς μεγαλώνει δηλαδή το μέγεθος της ατέλειας ο εφελκούμενος διαγώνιος εισέρχεται στη διαρροή για μικρότερη μετακίνηση. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι καθώς αυξάνεται η ατέλεια ο θλιβόμενος χιαστί λυγίζει για μικρότερο φορτίο και μικρότερη μετακίνηση και επομένως ο εφελκούμενος διαγώνιος τείνει να αναλλάξει μεγαλύτερη δύναμη από μικρότερη μετακίνηση.

- Η μεταβολή της ατέλειας έχει επίδραση τόσο στην οριακή μετακίνηση οροφής όσο και στο οριακό φορτίο στη συνολική απόκριση του φορέα. Πιο συγκεκριμένα, για τον τέλειο φορέα η μετακίνηση οροφής στο οριακό σημείο είναι 0.004225m και η αντίδραση στήριξης 454.36kN και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.004m και 428.953kN. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα οριακά σημεία εντοπίζονται για συντεταγμένες (0.00396m, 415.734kN) και (0.00394m, 369.929kN) αντίστοιχα.

4. Όσον αφορά τις παραμετρικές αναλύσεις ευαισθησίας σε επιβολή ατελειών στο μοντέλο χωρίς τις συνδέσεις:

- Για τον τέλειο φορέα, το θλιβόμενο μέλος έχει μετακίνηση στο οριακό σημείο 0.00572m και αντίδραση στήριξης 147.589kN και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.0051m και 120.408kN. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα οριακά σημεία εντοπίζονται για συντεταγμένες (0.0048m, 102.971kN) και (0.00457m, 82.6195kN) αντίστοιχα.
- Και εδώ, το φορτίο διαρροής είναι ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις για το εφελκούμενο μέλος. Η μετακίνηση, όμως, για την οποία αυτό επιτυγχάνεται διαφέρει. Ειδικότερα, για τον τέλειο φορέα η μετακίνηση στο σημείο διαρροής είναι 0.01071m και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.01006m. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα σημεία διαρροής εντοπίζονται για μετακινήσεις 0.00961693m και 0.009m αντίστοιχα. Καθώς μεγαλώνει δηλαδή το μέγεθος της ατέλειας ο εφελκούμενος διαρρέει, και εδώ, για μικρότερη μετακίνηση.
- Για το συνολικό μοντέλο, η μεταβολή της ατέλειας έχει επίδραση τόσο στην οριακή μετακίνηση οροφής όσο και στο οριακό φορτίο του φορέα. Πιο συγκεκριμένα, για τον τέλειο φορέα η μετακίνηση οροφής στο οριακό σημείο είναι 0.010714m και η αντίδραση στήριξης 330.569kN και για τον φορέα με ατέλεια (c/2) 0.010064m και 329.35kN. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις με ατέλεια (c) και (2c) τα οριακά σημεία εντοπίζονται για συντεταγμένες (0.01005m, 325.23kN) και (0.00998m, 323.6769kN) αντίστοιχα.

5. Όσον αφορά τις συγκριτικές αναλύσεις ευαισθησίας σε ατέλεια (0, c/2, c, 2c) ανάμεσα στα δύο μοντέλα προκύπτουν τα εξής (οι μεταβολές μετρώνται ως μειώσεις από μικρότερη ατέλεια προς την μεγαλύτερη):

- Για το θλιβόμενο μέλος του φορέα χωρίς συνδέσεις οι μεταβολές στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 10.8%, 5.88% και 4.79%. Οι αντίστοιχες μεταβολές του οριακού φορτίου είναι 18.4%, 14.48% και 19.76%.
- Για το συνολικό φορέα χωρίς συνδέσεις οι μεταβολές στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 0.368%, 0.1% και 0.7%. Οι αντίστοιχες μεταβολές του οριακού φορτίου είναι 6.066%, 1.2% και 0.5%.

- Για το θλιβόμενο μέλος του φορέα με τις συνδέσεις οι μεταβολές στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 16%, 9.4% και 16.88%. Οι αντίστοιχες μεταβολές του οριακού φορτίου είναι 7.22%, 5.37% και 21.46%.
- Για το συνολικό φορέα με τις συνδέσεις οι μεταβολές στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 5.32%, 1% και 0.5%. Οι αντίστοιχες μεταβολές του οριακού φορτίου είναι 5.6%, 3% και 11.01%.
- Για το θλιβόμενο μέλος του φορέα χωρίς συνδέσεις η μέγιστη μεταβολή στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 10.8% και η μέγιστη μεταβολή στο οριακό φορτίο είναι 19.76%. Συνολικά, για το φορέα χωρίς συνδέσεις η μέγιστη μεταβολή στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 0.7% και η μέγιστη μεταβολή στο οριακό φορτίο είναι 6%.
- Για το θλιβόμενο μέλος του φορέα με τις συνδέσεις η μέγιστη μεταβολή στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 16.88% και η μέγιστη μεταβολή στο οριακό φορτίο είναι 21.46%. Συνολικά, για το φορέα χωρίς συνδέσεις η μέγιστη μεταβολή στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι 5.32% και η μέγιστη μεταβολή στο οριακό φορτίο είναι 11.01%.
- Για το φορέα χωρίς τις συνδέσεις η μέγιστη μεταβολή στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι το 6.48% της μέγιστης μεταβολής της μετακίνησης του θλιβόμενου μέλους του φορέα. Αντίστοιχα, η μέγιστη μεταβολή του οριακού φορτίο είναι το 30% της μέγιστης μεταβολής του φορτίου του θλιβόμενου μέλους του φορέα.
- Για το φορέα με τις συνδέσεις η μέγιστη μεταβολή στην μετακίνηση οριακού σημείου είναι το 31.51% της μέγιστης μεταβολής της μετακίνησης του θλιβόμενου μέλους του φορέα. Αντίστοιχα, η μέγιστη μεταβολή του οριακού φορτίο είναι το 51.72% της μέγιστης μεταβολής του φορτίου του θλιβόμενου μέλους του φορέα.
- Η επιρροή των ατελειών είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη στο μοντέλο με τις συνδέσεις, τόσο στη μετακίνηση όσο και στο φορτίο. Η μέγιστη μεταβολή στην μετακίνηση είναι πενταπλάσια σε σχέση με το μοντέλο χωρίς συνδέσεις και η μέγιστη μεταβολή στο φορτίο είναι, αντίστοιχα, μεγαλύτερη κατά 70%.
- Τα παραπάνω συμπεράσματα εξηγούνται, εν μέρει, από την επιρροή του θλιβόμενου μέλους στη συνολική απόκριση του φορέα με τις συνδέσεις. Επιρροή, που όπως αναφέρθηκε, είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν που έχει στο μοντέλο χωρίς συνδέσεις.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Αντιμετώπιση προβλημάτων σύγκλισης - ADINA (Contact elements, Bolt elements)

Η φύση κάποιων προβλημάτων αναγκάζει, κατά περιπτώσεις, τη μοντελοποίηση να συμπεριλάβει πολύπλοκες και ιδιαίτερες γεωμετρίες. Στην περίπτωση, τώρα, που το μοντέλο περιλαμβάνει και στοιχεία επαφής και κοχλία (contact elements, bolt elements), όλα αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ευαισθησίας του μοντέλου, όσον αφορά τη σύγκλιση του αλγορίθμου επίλυσης. Εδώ παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά «τεχνάσματα» υποβοήθησης του αλγορίθμου σε σύγκλιση.

Contact elements

Το πρώτο υποβοήθημα σύγκλισης, των contact elements, που παρουσιάζεται είναι η αλλαγή της μεταβλητής Compliance Factor από την default τιμή της, που είναι μηδέν (Model/Contact/Contact Group). Δίνοντας τιμή σε αυτή την μεταβλητή επιτρέπουμε, επί της ουσίας, την «εισχώρηση» του ενός ελάσματος επαφής στο άλλο, κάτι που διευκολύνει αρκετά τη σύγκλιση του αλγορίθμου. Η «εισχώρηση» που επιτρέπεται είναι ίση με τη μεταβλητή αυτή επί την κατακόρυφη τάση που αναπτύσει το έλασμα επαφής. Πρόκειται, βέβαια, καθαρά για αριθμητικό τέχνασμα, για αυτό και οι τιμές που δίνονται είναι της τάξης 10^{-12} ή και ακόμα μικρότερες. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να ελεγχθεί (από τα αποτελέσματα της ανάλυσης) πως η τελική διείσδυση του ενός ελάσματος στο άλλο είναι όντως τόσο μικρή που δεν έχει φυσικό νόημα. ($<10^{-5}$ m τάξη μεγέθους).

The image shows the 'Define Contact Group' dialog box in ADINA. The 'Group Number' is set to 1 and the 'Type' is '2-D Contact'. The 'Basic' tab is selected. The 'Description' is 'NONE'. The 'Algorithm' is 'Default'. The 'Contact Displacement Formulation' is 'Default'. The 'Default Coulomb Friction Coefficient' is 0. The 'Compliance Factor' is 0, which is highlighted with a red box. The 'Contact Surface Action' section has 'Single Side' selected. The 'Penetration Depth' is 0. The 'Contact Surface Offset' section has 'Constant' selected. The 'Offset Distance from Defined Surface' is 0. The 'Tied Contact' section has 'Option' set to 'Not Tied' and 'Tolerance' set to 0. There are also checkboxes for 'Use Continuous Contact-Segment Normal', 'Output Nodal Contact Forces', and 'Output Contact Tractions', all of which are checked.

Bolt elements

Το δεύτερο υποβοήθημα σύγκλισης αφορά τα bolt elements και είναι η αλλαγή της μεταβλητής During Bolt Force Iterations από την default τιμή της, που είναι 1.0^{-6} (Model/Bolt/Bolt Options). Μειώνοντας την τιμή αυτή, σε 1.0^{-5} ή 1.0^{-4} , επιτρέπουμε να επέλθει πιο εύκολα σύγκλιση στα πρώτα βήματα της προέντασης των κοχλιών. Στα επόμενα βήματα όλοι οι συντελεστές διορθώνονται και δεν επηρεάζονται τα τελικά αποτελέσματα (για τις τιμές που αναφέρθηκαν).

Γενικές Επιλογές

Ένα γενικό υποβοήθημα σύγκλισης είναι η αλλαγή της μεταβλητής Matrix Stabilization από την default επιλογή, που είναι No (Control/Miscellaneous Options). Αλλάζοντας την επιλογή αυτή, σε Automatic (με Stabilization Factor ίσο με 1.0^{-10}) επιτρέπουμε να επέλθει πιο εύκολα σύγκλιση στα πρώτα βήματα της ανάλυσης. Στα επόμενα βήματα γίνεται αυτόματα η απαραίτητη διόρθωση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Χ. Ι. Γαντές, Σημειώσεις του μαθήματος 9ου εξαμήνου Ε.Μ.Π. «ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»
- [2] Α.Ν. Κουνάδης, *Μη Γραμμική Θεωρία Ελαστικής Ευστάθειας*, Β' Έκδοση, Συμεών, 2004
- [3] ADINA, *Theory and Modeling Guide*, ADINA R & D, Inc., Vol. 1, 2005
- [4] Bathe, K.J. (1996): *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, Inc.
- [5] Παπαδρακάκη Μ. (1996): Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.
- [6] Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005α). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, 2η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- [7] Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (1999). «Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος ΙΙ». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- [8] EN 1993-1-1, 2005: Eurocode 3
- [9] EN 1998-1, 2005: Eurocode 8
- [10] Μελισσιανός Β., Βερνάρδος Σ., Θανάσουλας Η., «Οδηγίες χρήσης του λογισμικού ADINA ». ΕΜΠ, ΑΘΗΝΑ 2016