



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΞΩΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

Δημήτριος Ευσταθίου

ΕΜΚ ΜΕ 2018/11

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

Αθήνα, Ιούνιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΟΞΩΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

Δημήτριος Ευσταθίου

ΕΜΚ ΜΕ 2018/11

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

Αθήνα, Ιούνιος 2018

Copyright © Δημήτριος Ευσταθίου, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Dimitrios Efstathiou, 2018

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).

Δημήτριος Ευσταθίου (2018)
Εναλλακτικές Μέθοδοι Σχεδιασμού Τοξωτής Μεταλλικής Γέφυρας
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2018/11
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Dimitrios Efstathiou (2018)
Master Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2018/11
Alternative Methods for the Design of Steel Arch Bridge
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Χάρη Γαντέ για την ανάθεση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας και για την πολύτιμη βοήθεια, που μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της. Του είμαι ευγνώμων, για τις γνώσεις, που μου μετέδωσε, το χρόνο, που αφιέρωσε και τη συνεχή υποστήριξη.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Ισαβέλλα Βασιλοπούλου, για τη βοήθεια, που μου προσέφερε στα πρώτα στάδια της εργασίας με το προσομοίωμα του φορέα.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ίδρυμα Μποδοσάκη για τη χορήγηση της υποτροφίας για μεταπτυχιακές σπουδές.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Βάγια Ιωάννη και το Λέκτορα κ. Παύλο Θανόπουλο για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΜΕ 2018/11

Εναλλακτικές Μέθοδοι Σχεδιασμού Τοξωτής Μεταλλικής Γέφυρας

Δημήτριος Ευσταθίου

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί η εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων σχεδιασμού τοξωτής μεταλλικής γέφυρας. Οι μέθοδοι αυτές βρίσκονται στο νέο υπό διαμόρφωση κείμενο του Ευρωκώδικα 3 και αναφέρονται σε πλαισιακές κατασκευές. Στόχος της εργασίας είναι η εφαρμογή των μεθόδων σε ένα φορέα με διαφορετική γεωμετρία από εκείνη των πλαισίων, όπως είναι ο φορέας μίας τοξωτής γέφυρας. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου εξετάστηκε μία ήδη διαστασιοποιημένη τοξωτή μεταλλική γέφυρα με τις διατάξεις των υφιστάμενων Κανονισμών. Σε αυτήν τη γέφυρα εφαρμόστηκαν οι νέες μέθοδοι, με κατάλληλες τροποποιήσεις ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή τους σε έναν τοξωτό φορέα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε μέσω σύγκρισης των βαθμών αξιοποίησης των μελών της γέφυρας.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποιες βασικές έννοιες για την ανάλυση των μεταλλικών κατασκευών. Επίσης, παρουσιάζονται οι μέθοδοι, που περιέχονται στο νέο Ευρωκώδικα 3.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η γεωμετρία της γέφυρας και το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων, που δημιουργήθηκε. Γίνεται παρουσίαση της γεωμετρίας κάθε μέλους, των διατομών και των υλικών, που χρησιμοποιήθηκαν. Επίσης, αναφέρονται και οι παραδοχές, που πραγματοποιήθηκαν κατά τη δημιουργία του αριθμητικού προσομοιώματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φορτία, που θεωρήθηκαν κατά την στατική ανάλυση της γέφυρας. Τα φορτία έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τις αντίστοιχες διατάξεις του Ευρωκώδικα αλλά έχουν γίνει και κάποιες απλοποιήσεις.

Στα επόμενα τέσσερα κεφάλαια (4,5,6,7) γίνεται η εφαρμογή των μεθόδων M1, M2, M3 και M5 αντίστοιχα. Υπολογίστηκαν για το κάθε μέλος και την κάθε μέθοδο οι βαθμοί αξιοποίησης και πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις των αποτελεσμάτων. Πραγματοποιήθηκαν στατικές αναλύσεις 1^{ης} και 2^{ης} τάξης, ενώ τοποθετήθηκαν και διάφορα σχήματα αρχικών ατελειών στο φορέα. Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.



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

MASTER THESIS
EMK ME 2018/11

Alternative Methods for the Design of Steel Arch Bridge

Dimitrios Efstathiou

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

ABSTRACT

The present master thesis deals with the implementation of alternative methods for the design of a steel arch bridge. These methods are included in the text of the new (currently under revision) Eurocode 3 and are oriented towards frame structures. The aim of the present master thesis is the implementation of these methods in a structure with different geometry from frames. A steel arch bridge is a structure which fulfills this requirement. Thus, an already designed with the existing Eurocodes steel arch bridge was examined. The new methods were implemented in the design of this bridge, after appropriate modification and the utilization factor of each member was calculated. The utilization factors, which were calculated in each method were finally compared.

The first chapter presents some basic issues of the analysis of steel structures. There are also presented the methods, that are included in the new Eurocode 3.

The second chapter presents the geometry of the bridge and the finite element model, which was created. The geometry of each member, the cross sections and the materials used are described. Also, in this chapter are presented the assumptions made in order to create the finite element model.

The third chapter presents the loads, which were considered in the analysis of the bridge. The loads were calculated in accordance with the Eurocodes but there were made some simplifications.

The next four chapters (4,5,6,7) present the implementation of methods M1, M2, M3 and M5. The utilisation factors of each member and for each method are calculated and compared. Different types of analysis (first order and second order) are conducted and different shapes of initial imperfection are used. Finally, the eighth chapter presents the final conclusions of this thesis.

Πίνακας περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Βασικές έννοιες.....	1
1.2	Μη γραμμικότητα γεωμετρίας και αρχικές ατέλειες	1
1.3	Διατάξεις νέου Ευρωκώδικα 3.....	3
1.3.1	Καθολική ανάλυση.....	3
1.3.2	Μέθοδοι ανάλυσης και έλεγχοι οριακής αντοχής σύμφωνα με το νέο κείμενο του Ευρωκώδικα 3	5
1.4	Στόχος και διάρθρωση της εργασίας	8
2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	11
2.1	Γενικά	11
2.2	Γεωμετρία φορέα	11
2.3	Προσομοίωμα γέφυρας.....	14
3	ΦΟΡΤΙΑ.....	19
3.1	Γενικά	19
3.2	Μόνιμα Φορτία.....	19
3.3	Φορτία κυκλοφορίας.....	21
3.4	Φορτία ανέμου	23
3.4.1	Γενικά.....	23
3.4.2	Ιδιομορφές ταλάντωσης γέφυρας.....	23
3.4.3	Υπολογισμός φορτίων ανέμου	24
3.5	Συνδυασμοί φόρτισης	34
4	ΜΕΘΟΔΟΣ Μ1.....	35
4.1	Γενικά	35
4.2	Έλεγχος τόξων	36
4.3	Έλεγχος κύριων δοκών	43
4.4	Έλεγχος διαδοκίδων.....	49
4.5	Έλεγχος εγκάρσιων συνδέσμων τόξων.....	53
4.6	Έλεγχος διαγώνιων συνδέσμων τόξων	60
4.7	Έλεγχος αναρτήρων	66
4.8	Έλεγχος συνδέσμων καταστρώματος	68
4.9	Σύνοψη αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα.....	70
5	ΜΕΘΟΔΟΣ Μ2.....	73
5.1	Γενικά	73

5.2	Ατέλεια φορέα.....	74
5.2.1	Ατέλεια σύμφωνα με το EN 1993-2	74
5.2.2	Ατέλεια στο σχήμα της 1 ^{ης} ιδιομορφής λυγισμού (EUGLI).....	75
5.3	Έλεγχος τόξων.....	76
5.4	Έλεγχος κύριων δοκών.....	80
5.5	Έλεγχος διαδοκίδων	84
5.6	Έλεγχος εγκάρσιων συνδέσμων τόξων	86
5.7	Έλεγχος διαγώνιων συνδέσμων τόξων.....	90
5.8	Έλεγχος αναρτήρων	95
5.9	Έλεγχος συνδέσμων καταστρώματος.....	96
5.10	Σύνοψη αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα	97
6	ΜΕΘΟΔΟΣ Μ3	99
6.1	Γενικά.....	99
6.2	Έλεγχος τόξων.....	100
6.3	Έλεγχος κύριων δοκών.....	104
6.4	Έλεγχος διαδοκίδων	107
6.5	Έλεγχος εγκάρσιων συνδέσμων τόξων	109
6.6	Έλεγχος διαγώνιων συνδέσμων τόξων.....	111
6.7	Έλεγχος αναρτήρων	114
6.8	Έλεγχος συνδέσμων καταστρώματος.....	115
6.9	Σύνοψη αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα	115
7	ΜΕΘΟΔΟΣ Μ5	117
7.1	Γενικά.....	117
7.2	Τοπική ατέλεια μελών	118
7.3	Έλεγχος τόξων.....	120
7.3.1	Ατέλεια κατά EN 1993-2	120
7.3.2	Ατέλεια στο σχήμα της 1ης ιδιομορφής λυγισμού	124
7.3.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδου Μ5	126
7.4	Έλεγχος κύριων δοκών.....	127
7.4.1	Ατέλεια κατά EN 1993-2	127
7.4.2	Ατέλεια στο σχήμα της 1 ^{ης} ιδιομορφής λυγισμού.....	130
7.4.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδου Μ5	133
7.5	Έλεγχος διαδοκίδων	136
7.6	Έλεγχος εγκάρσιων συνδέσμων τόξων	137
7.6.1	Ατέλεια κατά EN 1993-2	137

7.6.2	Ατέλεια στο σχήμα της 1 ^{ης} ιδιομορφής λυγισμού	139
7.6.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδου M5	142
7.7	Έλεγχος διαγώνιων συνδέσμων τόξων	143
7.7.1	Ατέλεια κατά EN 1993-2.....	143
7.7.2	Ατέλεια στο σχήμα της 1 ^{ης} ιδιομορφής λυγισμού	145
7.7.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων M5.....	147
7.7.4	Διερεύνηση αποτελεσμάτων	148
7.8	Συνδυασμός τοπικής ατέλειας μέλους και ατέλειας στο σχήμα της 1 ^{ης} ιδιομορφής λυγισμού	152
7.9	Έλεγχος αναρτήρων	154
7.10	Έλεγχος συνδέσμων καταστρώματος	155
7.11	Σύνοψη αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα.....	156
8	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	157
8.1	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	157
8.2	Παρατηρήσεις	163
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	165

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Βασικές έννοιες

Η συμπεριφορά ενός μεταλλικού φορέα είναι δυνατό να επηρεαστεί από δύο ειδών μη γραμμικότητες: τη μη γραμμικότητα της γεωμετρίας και τη μη γραμμικότητα του υλικού. Η μη γραμμικότητα της γεωμετρίας αναφέρεται στη μη γραμμική σχέση φορτίου-μετατόπισης, που προκύπτει ως αποτέλεσμα διατύπωσης των εξισώσεων ισορροπίας στην παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα. Η μη γραμμικότητα του υλικού αναφέρεται με τη σειρά της, στη μη γραμμική σχέση φορτίου-μετατόπισης, η οποία προκύπτει ως αποτέλεσμα υπέρβασης του ορίου διαρροής του υλικού σε κάποιες θέσεις του φορέα.

Ένας ακόμη παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τη συμπεριφορά των μεταλλικών κατασκευών είναι οι αποκλίσεις που υπάρχουν στις πραγματικές κατασκευές σε σχέση με τις θεωρητικώς ιδεατές τόσο από άποψη γεωμετρίας όσο και εγγενών τάσεων στην αφόρτιστη κατάσταση. Οι αποκλίσεις αυτές είναι γνωστές με τον όρο ατέλειες και εξετάζονται τόσο σε επίπεδο φορέα (καθολική ατέλεια) τόσο και σε επίπεδο μέλους (τοπική ατέλεια).

Τα υπολογιστικά μέσα σήμερα επιτρέπουν στο μηχανικό να πραγματοποιήσει σύνθετες αναλύσεις, που λαμβάνουν υπόψη τη μη γραμμικότητα της γεωμετρίας και του υλικού καθώς και τις ατέλειες. Το είδος της ανάλυσης που θα επιλεγεί θα πρέπει αφενός να εξασφαλίζει ακριβή αποτελέσματα που οδηγούν σε ασφαλή σχεδιασμό, αφετέρου να διατηρεί την απλότητα στους υπολογισμούς.

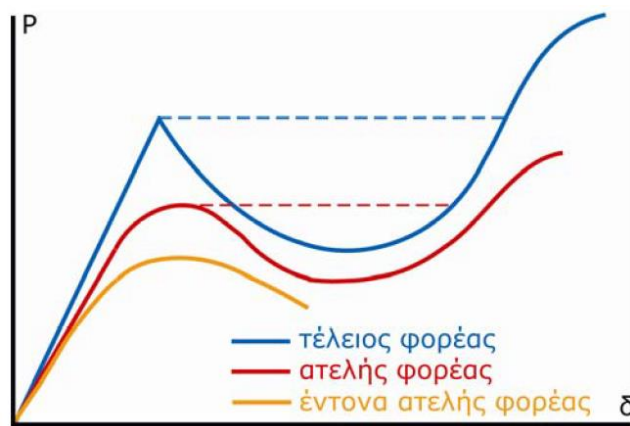
1.2 Μη γραμμικότητα γεωμετρίας και αρχικές ατέλειες

Η στατική ανάλυση των φορέων μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε θεωρώντας ότι η ισορροπία επιτυγχάνεται στην απαραμόρφωτη γεωμετρία είτε θεωρώντας ότι επιτυγχάνεται στην παραμορφωμένη λόγω των φορτίων γεωμετρία. Η πρώτη θεώρηση είναι γνωστή με τον όρο θεωρία 1^{ης} τάξης και σε συγκεκριμένους φορείς, κυρίως με μικρή δυσκαμψία, είναι δυνατό να οδηγήσει σε ανασφαλή εντατικά μεγέθη, τα οποία δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Η δεύτερη θεώρηση, η οποία είναι γνωστή με τον όρο θεωρία 2^{ης} τάξης ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματική συμπεριφορά του φορέα, αφού η ισορροπία των φορέων πραγματοποιείται από φυσικής πλευράς στην παραμορφωμένη γεωμετρία. Η στατική ανάλυση

που θεωρεί ότι η ισορροπία πραγματοποιείται στην παραμορφωμένη γεωμετρία ονομάζεται ανάλυση 2^{ης} τάξης ή γεωμετρικά μη γραμμική ανάλυση.

Ο Ευρωκώδικας 3 παρέχει κριτήρια σχετικά με το πότε θεωρείται σημαντική η επίδραση των παραμορφώσεων στην ένταση του μεταλλικού φορέα και είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί ανάλυση 2^{ης} τάξης. Γενικά, η θεωρία 1^{ης} τάξης εφαρμόζεται σε φορείς με ικανοποιητική δυσκαμψία. Η θεωρία 2^{ης} τάξης μπορεί να χρησιμοποιείται για την ανάλυση του φορέα σε κάθε περίπτωση χωρίς κάποιο περιορισμό.

Η συμπεριφορά των πραγματικών μεταλλικών κατασκευών είναι διαφορετική από την ιδεατή που προβλέπεται θεωρητικά. Αυτό συμβαίνει επειδή στις πραγματικές κατασκευές υπάρχουν ατέλειες, όπως παραμένουσες τάσεις στην αφόρτιστη κατάσταση, έλλειψη κατακορυφότητας, έλλειψη ευθυγραμμίας, εκκεντρότητες του εφαρμοζόμενου φορτίου κλπ. Οι Ευρωκώδικας 3 απαιτεί σε κάποιες περιπτώσεις να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάλυση οι ατέλειες. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται στην ανάλυση του φορέα ισοδύναμες γεωμετρικές ατέλειες, οι οποίες απεικονίζουν όλες τις επιδράσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει ποιοτικά το δρόμο ισορροπίας για ένα τόξο με μεγάλο λόγο ύψους προς άνοιγμα. Η αγνόηση των φαινομένων 2^{ης} τάξης οδηγεί σε λανθασμένη εκτίμηση της συμπεριφοράς του τόξου. Επίσης, η αρχική ατέλεια οδηγεί σε σημαντική μείωση της οριακής αντοχής του φορέα.



Σχήμα 1.1: Φαινόμενα 2^{ης} τάξης και επιρροή αρχικής ατέλειας σε τόξο με μεγάλο λόγο ύψους προς άνοιγμα [6]

Στην πράξη υπάρχουν δύο προσεγγίσεις, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι ατέλειες. Στην πρώτη περίπτωση δεν εισάγεται τοπική ατέλεια στα μέλη, ενώ είναι δυνατό να εισαχθεί καθολική ατέλεια στο φορέα και πραγματοποιείται ο έλεγχος του μέλους σε λυγισμό καθώς και ο έλεγχος της διατομής. Η στατική ανάλυση μπορεί να είναι 1^{ης} ή 2^{ης} τάξης ανάλογα με το φορέα. Οι σχέσεις ελέγχου του μέλους, που βρίσκονται στον Ευρωκώδικα 3, λαμβάνουν υπόψη την επιρροή της τοπικής ατέλειας και των φαινομένων 2^{ης} τάξης σε επίπεδο μέλους, μέσω των καμπυλών λυγισμού και του μειωτικού συντελεστή χ . Στη δεύτερη προσέγγιση εισάγονται όλες οι ατέλειες στα μέλη του φορέα και πραγματοποιείται ανάλυση 2^{ης} τάξης. Σε αυτήν την περίπτωση ο έλεγχος του μέλους αντικαθίσταται από τον έλεγχο της κρίσιμης διατομής με τα εντατικά μεγέθη, που προέκυψαν από στατική ανάλυση 2^{ης} τάξης.

1.3 Διατάξεις νέου Ευρωκώδικα 3

Στο σημείο αυτό θα γίνει μία συνοπτική παρουσίαση κάποιων βασικών στοιχείων από το νέο υπό διαμόρφωση κείμενο του Ευρωκώδικα 3. Αυτά βρίσκονται στο 7^ο κεφάλαιο του νέου Ευρωκώδικα και αναφέρονται στις μεθόδους ανάλυσης και διαστασιολόγησης του φορέα. Στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας θα γίνει η εφαρμογή κάποιων μεθόδων σε μία τοξωτή μεταλλική γέφυρα. Πρέπει να επισημανθεί ότι το κείμενο του Ευρωκώδικα αναφέρεται σε πλαισιακές κατασκευές, οπότε κατά την εφαρμογή των μεθόδων στο τοξωτό φορέα της γέφυρας θα πραγματοποιηθούν κάποιες τροποποιήσεις.

1.3.1 Καθολική ανάλυση

Σύμφωνα με το νέο κείμενο του Ευρωκώδικα 3 τα εντατικά μεγέθη στο φορέα μπορούν να προσδιοριστούν με 2 τρόπους, είτε με στατική ανάλυση 1^{ης} τάξης, με βάση την απαραμόρφωτη γεωμετρία του φορέα, είτε με στατική ανάλυση 2^{ης} τάξης, λαμβάνοντας υπόψη και την επιρροή των παραμορφώσεων. Οι επιρροές 2^{ης} τάξης πρέπει να λαμβάνονται υπόψη αν αυξάνουν σημαντικά τα αποτελέσματα των δράσεων ή αν μεταβάλουν σημαντικά τη συμπεριφορά του φορέα. Το κριτήριο που θέτει ο Ευρωκώδικας προκειμένου να επιτρέπεται η στατική ανάλυση του φορέα με θεωρία 1^{ης} τάξης χωρίς αρχική ατέλεια λαμβάνει τη μορφή:

$$a_{cr,FB} = \frac{F_{cr,FB}}{F_{Ed}} \geq k \quad (1.1)$$

Στην παραπάνω σχέση:

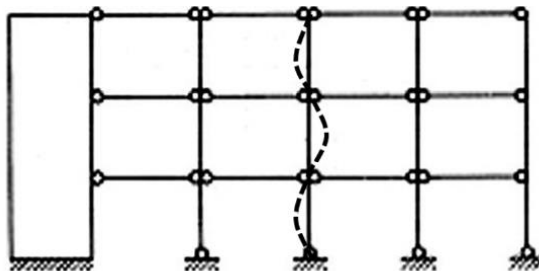
$F_{cr,FB}$: είναι το μικρότερο κρίσιμο φορτίο καμπτικού λυγισμού για εντός επιπέδου ή εκτός επιπέδου καθολική ιδιομορφή λυγισμού ή ιδιομορφή λυγισμού μέλους. Ο στρεπτικός και στρεπτοκαμπτικός λυγισμός δε λαμβάνονται υπόψη.

F_{Ed} : είναι τα φορτία σχεδιασμού του φορέα.

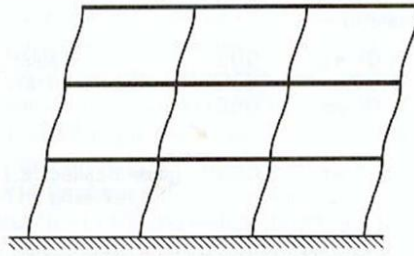
$a_{cr,FB}$: είναι ο συντελεστής με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιαστεί η φόρτιση σχεδιασμού, προκειμένου να προκληθεί οποιαδήποτε από τις παραπάνω μορφές καμπτικού λυγισμού.

k : Το νέο κείμενο του Ευρωκώδικα προτείνει για το k την τιμή 25, εκτός αν ορίζεται διαφορετικά στο Εθνικό Προσάρτημα.

Οι ιδιομορφές λυγισμού μπορούν να χωριστούν σε 2 κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν εκείνες που αναφέρονται σε πλαίσια με μέλη με μεταθετά άκρα, ενώ στη δεύτερη κατηγορία εκείνες που αναφέρονται σε πλαίσια με μέλη με αμετάθετα άκρα. Στην πρώτη κατηγορία παρατηρείται σημαντική σχετική μετατόπιση των άκρων του μέλους. Στο Σχήμα 1.2 και στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζονται ποιοτικά οι δύο αυτές κατηγορίες.



Σχήμα 1.2: Πλαίσιο με ιδιομορφή λυγισμού μέλους (non sway) [1]



Σχήμα 1.3: Πλαίσιο με καθολική ιδιομορφή λυγισμού (sway) [1]

Εκτός από τη σχέση (1.1) στο νέο κείμενο του Ευρωκώδικα 3 υπάρχει ακόμα ένα κριτήριο προκειμένου να καθορισθεί πότε πρέπει να γίνει στατική ανάλυση 2^{ης} τάξης με αρχική ατέλεια. Το δεύτερο κριτήριο αναφέρεται στην ιδιομορφή λυγισμού με μετάθεση του πλαισίου. Επιτρέπεται η χρήση στατικής ανάλυσης 1^{ης} τάξης για τον υπολογισμό των εντός επιπέδου καμπτικών ροπών, εφόσον η αύξηση των εσωτερικών δυνάμεων και ροπών λόγω φαινομένων 2^{ης} τάξης δεν υπερβαίνει το 10% σε σχέση με τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από ανάλυση 1^{ης} τάξης. Η παραπάνω συνθήκη θεωρείται ότι ικανοποιείται εφόσον ικανοποιείται το παρακάτω κριτήριο:

$$\alpha_{cr,sw} = \frac{F_{cr,sw}}{F_{Ed}} \geq 10 \quad (1.2)$$

Στην παραπάνω σχέση:

- $F_{cr,sw}$: είναι το ελαστικό κρίσιμο φορτίο καμπτικού λυγισμού για καθολικό λυγισμό του πλαισίου με μετάθεση.
- F_{Ed} : είναι το φορτίο σχεδιασμού του φορέα.
- $\alpha_{cr,sw}$: είναι ο συντελεστής με τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιαστεί η φόρτιση σχεδιασμού, προκειμένου να προκληθεί καθολική αστάθεια με ιδιομορφή λυγισμού μετάθεσης του πλαισίου εντός επιπέδου.

Τα φαινόμενα 2^{ης} τάξης λόγω στρεπτοκαμπτικού λυγισμού μπορούν να αγνοηθούν στην καθολική ανάλυση και στους ελέγχους επάρκειας των μελών στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Για συγκεκριμένους τύπους διατομών π.χ. κοίλες τετραγωνικές ή κοίλες κυκλικές διατομές.
- Όταν σε μέλος με μονοσυμμετρική διατομή ή με διατομή διπλής συμμετρίας ασκούνται καμπτικές ροπές μόνο περί τον ασθενή άξονα.
- Σε περίπτωση επαρκών πλευρικών στηρίξεων του θλιβόμενου πέλματος.
- Όταν η λυγηρότητα του μέλους για στρεπτοκαμπτικό λυγισμό είναι μικρότερη από την οριακή λυγηρότητα, η οποία ορίζεται στην παράγραφο 8.3.3(7) του νέου Ευρωκώδικα και διακρίνει τα μέλη σε ευαίσθητα και μη ευαίσθητα σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό.

Στην ανάλυση του φορέα επιβάλλεται σε κάποιες περιπτώσεις η εισαγωγή ατέλειας. Η ατέλεια μπορεί να είναι καθολική (κλίση στο πλαίσιο) ή τοπική (καμπυλότητα στο μέλος). Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού με κατάλληλο μέγεθος ατέλειας. Σημειώνεται ότι η επίδραση της ατέλειας λαμβάνεται υπόψη και στις σχέσεις ελέγχου του μέλους σε θλίψη και κάμψη μέσω του μειωτικού συντελεστή χ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στην περίπτωση που πραγματοποιηθεί ανάλυση 2^{ης} τάξης στην οποία έχουν ληφθεί όλων των ειδών οι ατέλειες (τοπικές και καθολική), να απαιτείται μόνο ο έλεγχος της διατομής και όχι ο έλεγχος του μέλους. Επομένως, υπάρχει άμεση συσχέτιση της μεθόδου στατικής ανάλυσης και

των απαιτούμενων ελέγχων επάρκειας. Στην επόμενη ενότητα περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο ο νέος Ευρωκώδικας 3 αντιμετωπίζει το συγκεκριμένο ζήτημα.

1.3.2 Μέθοδοι ανάλυσης και έλεγχοι οριακής αντοχής σύμφωνα με το νέο κείμενο του Ευρωκώδικα 3

Όπως αναφέρθηκε η μέθοδος στατικής ανάλυσης (στατική ανάλυση 1^{ης} ή 2^{ης} τάξης με ατέλειες ή χωρίς) πρέπει να είναι συμβατή με τους ελέγχους επάρκειας των διατομών και των μελών. Στο νέο κείμενο του Ευρωκώδικα 3 υπάρχουν επτά μέθοδοι, που καθορίζουν το είδος της ανάλυσης και τους ελέγχους που πρέπει να πραγματοποιηθούν. Αυτές οι μέθοδοι είναι οι: M0, M1, M2, M3, M4, M5 καθώς και η μέθοδος ισοδύναμου μέλους (Equivalent Member-EM). Η πολυπλοκότητα της στατικής ανάλυσης αυξάνεται καθώς κινούμαστε από τη μέθοδο M0 στη μέθοδο M5. Για παράδειγμα η μέθοδος M0 απαιτεί μια απλή γραμμική στατική ανάλυση, ενώ η μέθοδος M5 απαιτεί μία πολύπλοκη στατική ανάλυση, στην οποία λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα 2^{ης} τάξης και οι ατέλειες.

Η επιλογή της μεθόδου με την οποία θα πραγματοποιηθεί η στατική ανάλυση του φορέα και ο έλεγχος των στοιχείων εξαρτάται από μία σειρά από παράγοντες, που αναλύονται στη συνέχεια του κεφαλαίου. Σε κάθε περίπτωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία πιο σύνθετη μέθοδος έναντι μίας απλούστερης.

ΜΕΘΟΔΟΣ M0

Η μέθοδος M0 μπορεί να εφαρμοστεί εφόσον:

- i. Επιτρέπεται η αγνόηση των φαινομένων 2^{ης} τάξης, σύμφωνα με τις εξισώσεις (1.1) και (1.2).
- ii. Επιτρέπεται η αγνόηση του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, όπως περιγράφεται στην ενότητα 1.3.1.

Σύμφωνα με τη μέθοδο M0:

- Ο έλεγχος των διατομών, μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από στατική ανάλυση 1^{ης} τάξης.
- Δεν απαιτείται ο έλεγχος των μελών σε λυγισμό.
- Δεν απαιτείται η πραγματοποίηση στατικής ανάλυσης με ατέλειες.

ΜΕΘΟΔΟΣ M1

Η μέθοδος M1 μπορεί να εφαρμοστεί εφόσον:

- i. Επιτρέπεται η αγνόηση των φαινομένων 2^{ης} τάξης σύμφωνα με την εξίσωση (1.1).
- ii. Δεν επιτρέπεται να αγνοηθεί η επιρροή του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, όπως περιγράφεται στην ενότητα 1.3.1.

Σύμφωνα με τη Μέθοδο M1:

- Ο έλεγχος των διατομών μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από στατική ανάλυση 1^{ης} τάξης.
- Απαιτείται ο έλεγχος των μελών για λυγισμό εκτός επιπέδου. Ο έλεγχος αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί με τα εντατικά μεγέθη, που προκύπτουν από στατική ανάλυση 1^{ης} τάξης.
- Δεν απαιτείται η πραγματοποίηση στατικής ανάλυσης με ατέλειες.

ΜΕΘΟΔΟΣ M2

Η μέθοδος M2 μπορεί να εφαρμοστεί εφόσον:

- i. Δεν επιτρέπεται η αγνόηση των φαινομένων 2^{ης} τάξης λόγω λυγισμού κάποιου μέλους, που σημαίνει ότι δεν ικανοποιείται το κριτήριο της εξίσωσης (1.1).
- ii. Επιτρέπεται η αγνόηση των φαινομένων 2^{ης} τάξης, που σχετίζονται με καθολική μορφή αστάθειας με μετάθεση εντός επιπέδου, που σημαίνει ότι ικανοποιείται το κριτήριο της εξίσωσης (1.2).

Σύμφωνα με τη μέθοδο M2:

- Ο έλεγχος των διατομών μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από στατική ανάλυση 1^{ης} τάξης.
- Απαιτείται ο έλεγχος των μελών για λυγισμό εντός και εκτός επιπέδου.
- Στην καθολική ανάλυση μπορούν να αγνοηθούν οι τοπικές ατέλειες των μελών αλλά πρέπει να θεωρηθεί καθολική ατέλεια (με τη μορφή αρχικής κλίσης του φορέα).
- Το κρίσιμο μήκος λυγισμού των μελών μπορεί συντηρητικά να θεωρηθεί ίσο με το μήκος του συστήματος.

Βασικό χαρακτηριστικό των παραπάνω μεθόδων είναι ότι δεν απαιτείται η εφαρμογή στατική ανάλυσης 2^{ης} τάξης. Στις τρεις αυτές μεθόδους ικανοποιείται τουλάχιστον το κριτήριο της εξίσωσης (1.2). Σε περίπτωση που δεν ικανοποιούνται τα κριτήρια των εξισώσεων (1.1) και (1.2) απαιτείται η πραγματοποίηση στατικής ανάλυσης 2^{ης} τάξης με μία από τις παρακάτω μεθόδους.

ΜΕΘΟΔΟΣ M3

Η μέθοδος M3 μπορεί να εφαρμοστεί εφόσον:

- i. Επιτρέπεται η αγνόηση της τοπικής ατέλειας στα μέλη. Αυτό εξαρτάται από τη στάθμη της αξονικής θλιπτικής δύναμης στα μέλη. Αν η θλιπτική δύναμη είναι μικρότερη από το 25% του κρίσιμου φορτίου λυγισμού, δηλαδή $N_{Ed} \leq N_{cr}/4$, τότε δεν απαιτείται η τοποθέτηση τοπικής ατέλειας και εφαρμόζεται η μέθοδος M3. Στο πλαίσιο της μεθόδου M3 επιβάλλεται η τοποθέτηση καθολικής ατέλειας.

Σύμφωνα με τη μέθοδο M3:

- Ο έλεγχος των διατομών πραγματοποιείται με τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από στατική ανάλυση 2^{ης} τάξης. Στον έλεγχο της διατομής χρησιμοποιείται ο συντελεστής γ_{M1} .
- Ο έλεγχος των μελών για λυγισμό εντός και εκτός επιπέδου πραγματοποιείται με τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από ανάλυση 2^{ης} τάξης.
- Το εντός επιπέδου κρίσιμο μήκος λυγισμού μπορεί να θεωρηθεί ίσο με το μήκος του συστήματος.

ΜΕΘΟΔΟΣ M4

Η μέθοδος M4 μπορεί να εφαρμοστεί εφόσον:

- i. Λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση του φορέα όλα τα εντός επιπέδου φαινόμενα 2^{ης} τάξης. Πρέπει να τοποθετηθεί τόσο καθολική ατέλεια όσο και ατέλεια μέλους για εντός επιπέδου λυγισμό.

Σύμφωνα με τη μέθοδο M4:

- Ο έλεγχος των διατομών πραγματοποιείται με τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από στατική ανάλυση 2^{ης} τάξης. Στον έλεγχο της διατομής χρησιμοποιείται ο συντελεστής γ_{M1} .
- Δεν απαιτείται να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος των μελών για λυγισμό εντός επιπέδου.

- Ο έλεγχος των μελών για λυγισμό εκτός επιπέδου πραγματοποιείται με τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από ανάλυση 2^{ης} τάξης.

ΜΕΘΟΔΟΣ M5

Η μέθοδος M5 μπορεί να εφαρμοστεί εφόσον:

- i. Λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση του φορέα, τα φαινόμενα 2^{ης} τάξης τόσο εντός όσο και εκτός επιπέδου, συμπεριλαμβανομένων και των στρεπτικών επιδράσεων. Στην ανάλυση εισάγεται καθολική ατέλεια και ατέλεια μέλους εντός και εκτός επιπέδου

Σύμφωνα με τη μέθοδο M5:

- Ο έλεγχος των διατομών πραγματοποιείται με τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από στατική ανάλυση 2^{ης} τάξης. Στον έλεγχο της διατομής χρησιμοποιείται ο συντελεστής γ_{M1} .
- Δεν απαιτείται να πραγματοποιηθεί έλεγχος μέλους.

ΜΕΘΟΔΟΣ EM

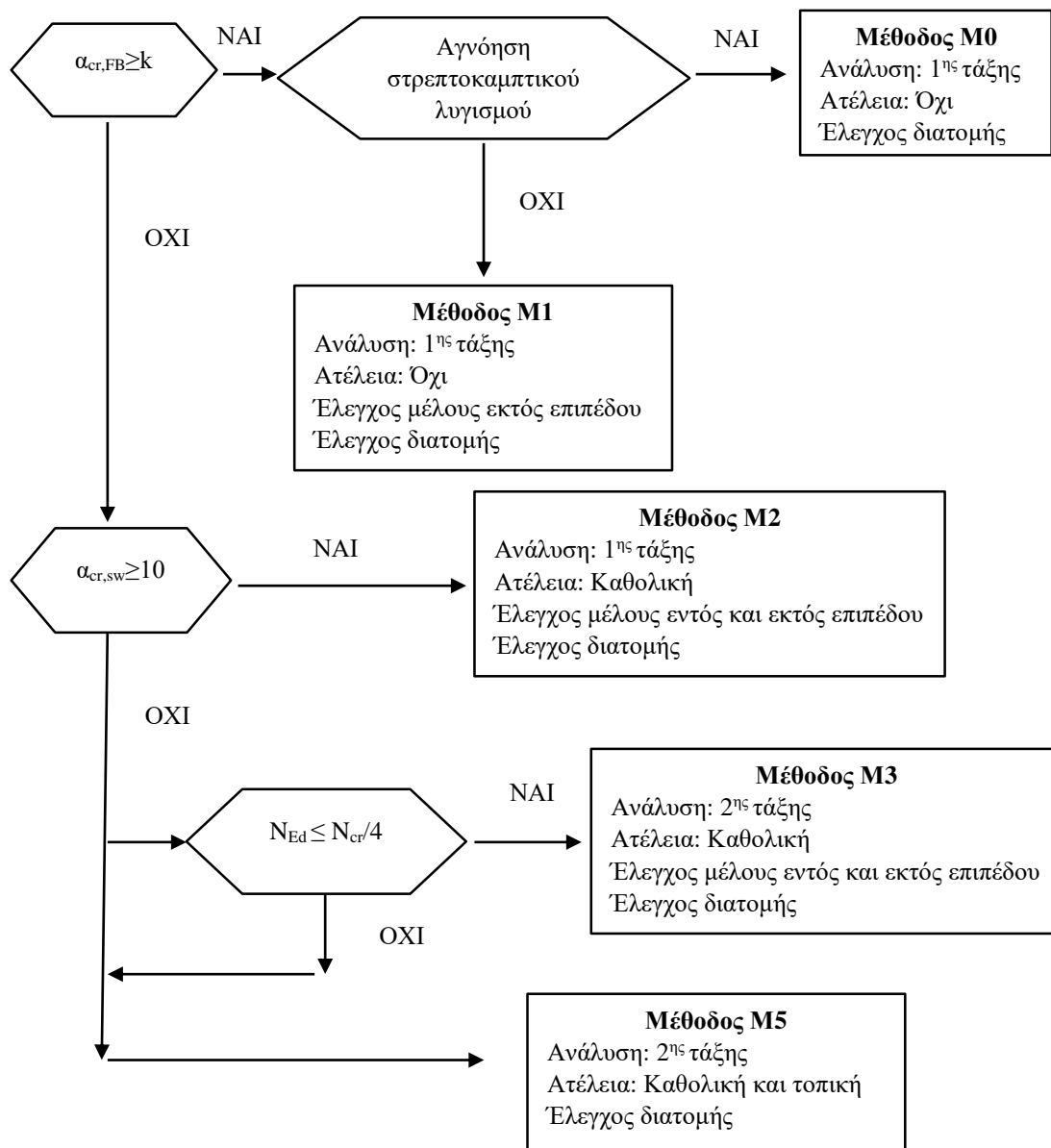
Η μέθοδος ισοδύναμου μέλους EM (Equivalent Member) μπορεί να εφαρμοστεί εφόσον:

- i. Δεν επιτρέπεται η αγνόηση των φαινομένων 2^{ης} τάξης στην καθολική ανάλυση, σύμφωνα με το κριτήριο της εξίσωσης (1.1).

Σύμφωνα με τη μέθοδο EM:

- Ο έλεγχος των διατομών, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από στατική ανάλυση 1^{ης} τάξης.
- Δε χρειάζεται να ληφθούν υπόψη ατέλειες στην καθολική ανάλυση του φορέα.
- Ο έλεγχος μέλους σε λυγισμό, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από ανάλυση 1^{ης} τάξης, λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις του συστήματος στον καθορισμό του κρίσιμου μήκους του «ισοδύναμου μέλους».

Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι M1, M2, M3 και M5. Στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζονται σε μορφή διαγράμματος ροής οι μέθοδοι, που εξετάστηκαν στην εργασία.



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα ροής μεθόδων ανάλυσης και διαστασιολόγησης, που εφαρμόστηκαν στην εργασία

1.4 Στόχος και διάρθρωση της εργασίας

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή των μεθόδων που προτείνονται στο νέο υπό διαμόρφωση κείμενο του Ευρωκώδικα 3, σε έναν τοξωτό μεταλλικό φορέα και συγκεκριμένα σε μία τοξωτή μεταλλική γέφυρα, η οποία έχει διαστασιολογηθεί σε προηγούμενη διπλωματική εργασία. Οι διατάξεις του Ευρωκώδικα αναφέρονται σε πλασιακές κατασκευές με αποτέλεσμα να μην είναι σε κάποιες περιπτώσεις προφανές, πώς πρέπει να γίνει η εφαρμογή τους σε ένα φορέα με διαφορετική γεωμετρία. Επίσης, στο πλαίσιο της εργασίας επιχειρείται να πραγματοποιηθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν ανάμεσα

στις μεθόδους και να εξεταστεί η επιρροή των διαφορών παραγόντων όπως είναι η γεωμετρική μη γραμμικότητα και οι ατέλειες στο τελικό αποτέλεσμα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται η γεωμετρία της γέφυρας και το προσομοίωμα της στο λογισμικό. Συγκεκριμένα γίνεται η περιγραφή όλων των μελών της γέφυρας, των διατομών τους και των υλικών, που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το αριθμητικό προσομοίωμα του φορέα μαζί με όλες τις παραδοχές, που πραγματοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φορτία, τα οποία ασκούνται στη γέφυρα. Οι τιμές των φορτίων βασίζονται στις αντίστοιχες διατάξεις, που βρίσκονται στους Ευρωκώδικες αλλά έχουν γίνει και κάποιες απλοποιήσεις. Τα φορτία, που λαμβάνονται υπόψη είναι τα μόνιμα και τα κινητά της γέφυρας καθώς και τα φορτία ανέμου κατά την εγκάρσια, τη διαμήκη και την κατακόρυφη διεύθυνση.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εφαρμόζεται η μέθοδος M1. Η μέθοδος εφαρμόζεται αναλυτικά για την περίπτωση του εγκάρσιου ανέμου, ενώ παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα για τις άλλες δύο διευθύνσεις ανέμου. Υπολογίζονται οι βαθμοί αξιοποίησης των μελών και γίνεται σύγκριση, όπου απαιτείται των βαθμών αξιοποίησης, που προκύπτουν από τον έλεγχο του μέλους και τον έλεγχο της διατομής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εφαρμόζεται η μέθοδος M2, για δύο περιπτώσεις ατέλειας, η πρώτη σύμφωνα με τον EN 1993-2 (εντός και εκτός επιπέδου ατέλεια για τα τόξα) και η δεύτερη στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού. Υπολογίζονται οι βαθμοί αξιοποίησης για τα μέλη και συγκρίνονται με αυτούς, που προέκυψαν από τη M1.

Στο έκτο κεφάλαιο εφαρμόζεται η μέθοδος M3 για την περίπτωση ατέλειας τόξων σύμφωνα με τον EN 1993-2. Υπολογίζονται οι βαθμοί αξιοποίησης για τα μέλη και συγκρίνονται με αυτούς, που προέκυψαν από τη μέθοδο M2.

Στο έβδομο κεφάλαιο εφαρμόζεται η μέθοδος M5 για την περίπτωση ατέλεια τόξων κατά EN 1993-2 και τοπικής ατέλειας μελών σύμφωνα με το νέο κείμενο του Ευρωκώδικα 3 και για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού. Υπολογίζονται οι βαθμοί αξιοποίησης για τα μέλη και συγκρίνονται με αυτούς, που προέκυψαν από τη μέθοδο M3 και τη μέθοδο M2.

Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μεθόδων και συνοψίζονται τα συμπεράσματα. Επίσης, καταγράφονται και μία σειρά από παρατηρήσεις σχετικά με το νέο κείμενο του Ευρωκώδικα 3.

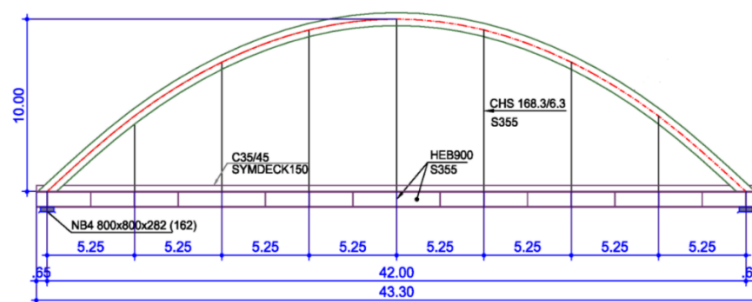
2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

2.1 Γενικά

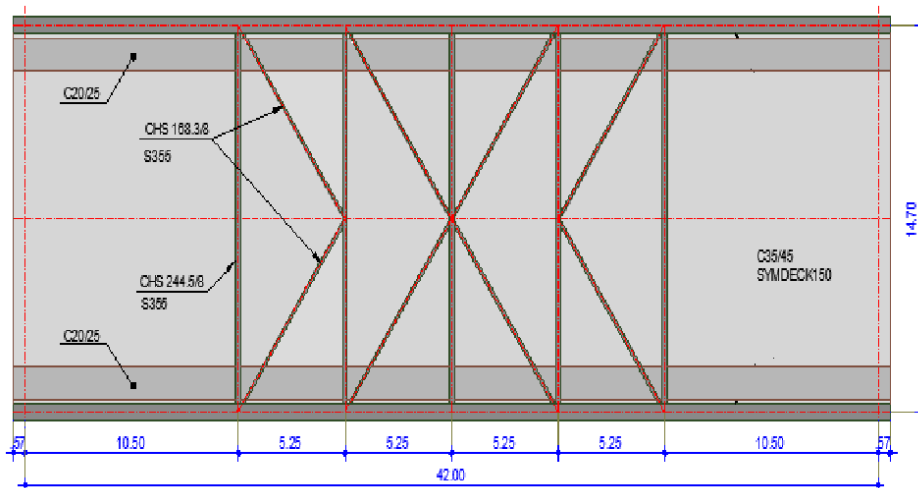
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η γεωμετρία του φορέα και το αντίστοιχο προσομοίωμα, που αναπτύχθηκε στο λογισμικό SOFiSTik 2018. Όπως αναφέρθηκε ο εξεταζόμενος φορέας είναι μία τοξωτή γέφυρα, η οποία έχει ήδη διαστασιολογηθεί σε προηγούμενη διπλωματική εργασία [13] σύμφωνα με τις διατάξεις του EN 1993-2 για σιδηρές γέφυρες και του Ευρωκώδικα 4. Στο προσομοίωμα της παρούσας εργασίας έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές τροποποιήσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

2.2 Γεωμετρία φορέα

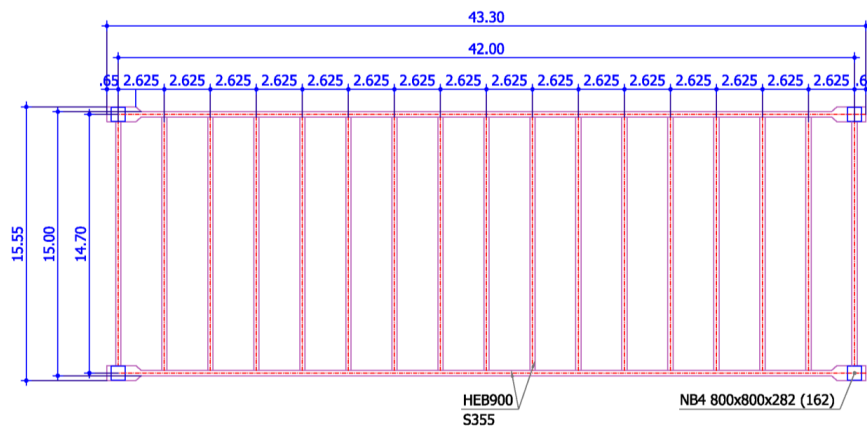
Η τοξωτή γέφυρα της παρούσας εργασίας, αποτελείται από 2 μεταλλικά τόξα κοίλης κυκλικής διατομής CHS 750/25, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με 8 διαγώνιους και 4 εγκάρσιους, κάθετους στα τόξα συνδέσμους. Η διατομή των διαγώνιων συνδέσμων είναι CHS 168.3/8, ενώ των εγκάρσιων συνδέσμων CHS 244.5/8. Τα τόξα έχουν ύψος $f=10\text{m}$ και άνοιγμα $L=42\text{m}$. Η σύνδεση των δύο τόξων με τις κύριες δοκούς θεωρείται μονολιθική, ενώ ταυτόχρονα έχει γίνει διαπλάτυνση των κύριων δοκών στην περιοχή της στήριξης προκειμένου να είναι εφικτή η σύνδεση. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται η όψη και η κάτοψη της γέφυρας καθώς και η λεπτομέρεια στην περιοχή της στήριξης.



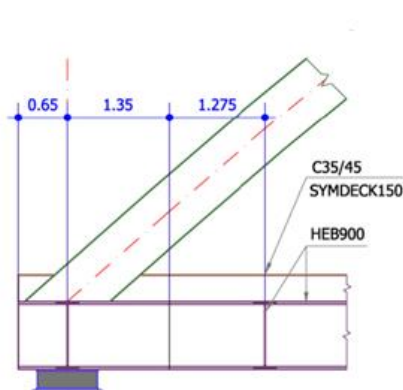
Σχήμα 2.1: Όψη γέφυρας [12]



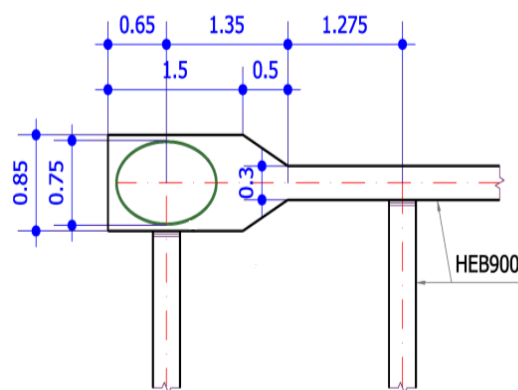
Σχήμα 2.2: Κάτοψη γέφυρας μαζί με την πλάκα του καταστρώματος [12]



Σχήμα 2.3: Κάτοψη μεταλλικών στοιχείων καταστρώματος (χωρίς τους χιαστί συνδέσμους) [12]



Σχήμα 2.4: Λεπτομέρεια στη θέση στήριξης [12]



Σχήμα 2.5: Λεπτομέρεια στη θέση στήριξης [12]

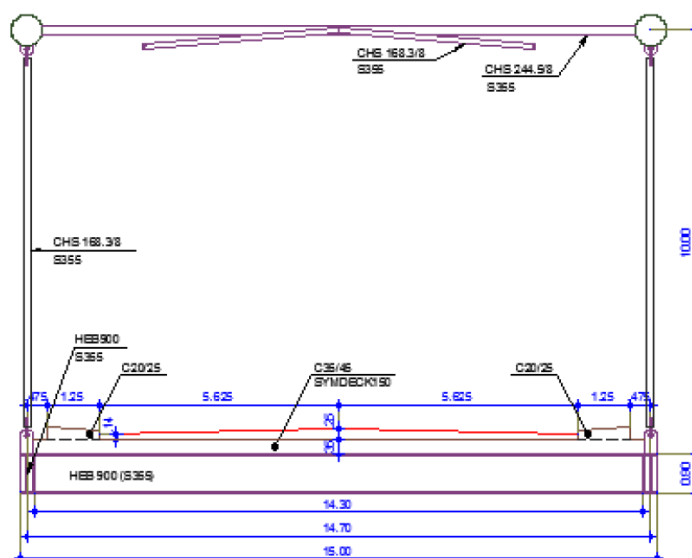
Οι κύριες δοκοί έχουν μήκος 43.30m αν ληφθεί υπόψη και η ειδική διαμόρφωση που έγινε στις θέσεις των στηρίξεων και έχουν διατομή HEB 900. Οι κύριες δοκοί συνδέονται με τα τόξα με τη βοήθεια 7 αναρτήρων, διατομής CHS 168.3/8, οι οποίοι τοποθετούνται σε απόσταση 5.25m μεταξύ τους. Το κατάστρωμα της γέφυρας, πλάτους 15m και μήκους 43.30m, αποτελείται από

την πλάκα του σκυροδέματος, η οποία έχει καθαρό πάχος 25cm και τις διαδοκίδες, που έχουν διατομή HEB 900. Συνολικά τοποθετήθηκαν 17 διαδοκίδες σε απόσταση 2.625m μεταξύ τους.

Στην παρούσα εργασία αγνοήθηκε πλήρως η σύμμικτη λειτουργία του καταστρώματος αν και η γέφυρα είχε αρχικά σχεδιαστεί θεωρώντας διατμητική σύνδεση των διαδοκίδων και των κύριων δοκών με την πλάκα του καταστρώματος. Η απόφαση αυτή ελήφθη γιατί ο στόχος της εργασίας ήταν να επικεντρωθεί στη συμπεριφορά του μεταλλικού φορέα και να εξεταστεί η συμπεριφορά των μεταλλικών μελών κάτω από τις διατάξεις του νέου Ευρωκώδικα 3. Με την αγνόηση της σύμμικτης λειτουργίας της πλάκας του καταστρώματος, οι διαδοκίδες παύουν να είναι πλευρικά εξασφαλισμένες και επιβάλλεται η προσθήκη χιαστί συνδέσμων ανάμεσα στις διαδοκίδες για την αντιμετώπιση του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού. Για αυτόν το λόγο προστέθηκαν χιαστί και διαμήκεις σύνδεσμοι στο άνω πέλμα των διαδοκίδων, διατομής CHS 139.7/10, οι οποίοι χωρίζουν τις διαδοκίδες σε 6 ίσα τμήματα. Η απόσταση μεταξύ των χιαστί συνδέσμων του καταστρώματος είναι 2.45m. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι διατομές όλων των μελών. Τέλος, για όλα τα μέλη ο χάλυβας είναι S355.

Πίνακας 2.1: Διατομές μελών γέφυρας

Κύριες δοκοί	HEB 900
Διαδοκίδες	HEB 900
Τόξα	CHS 750/25
Εγκάρσιοι σύνδεσμοι	CHS 244.5/8
Διαγώνιοι σύνδεσμοι	CHS 168.3/8
Αναρτήρες	CHS 168.3/8
Χιαστί σύνδεσμοι	CHS 139.7/10



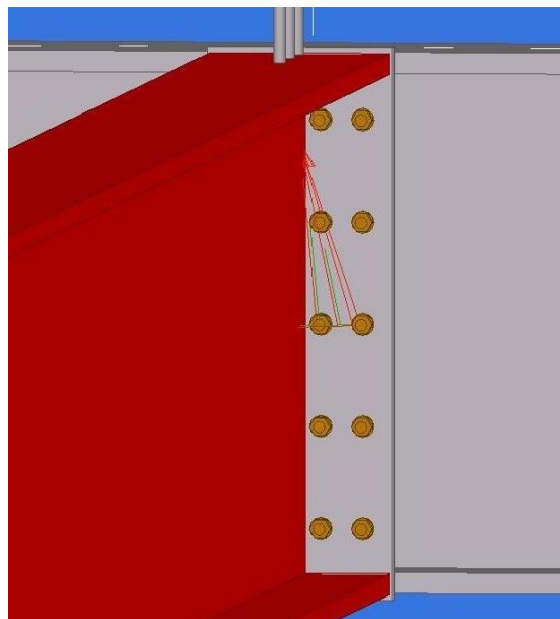
Σχήμα 2.6: Τομή γέφυρας

2.3 Προσομοίωμα γέφυρας

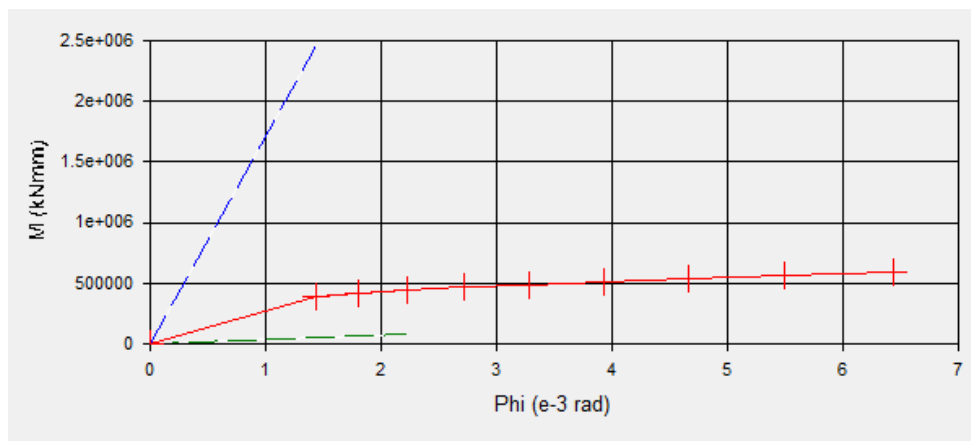
Για την προσομοίωση των μελών του φορέα χρησιμοποιήθηκαν μόνο στοιχεία δοκού, καθώς επιλέχθηκε να μην τοποθετηθεί η πλάκα του σκυροδέματος στο προσομοίωμα, αφού αγνοήθηκε η σύμμικτη λειτουργία. Το SOFiSTiK προσφέρει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί στο στοιχείο δοκού ένας επιπλέον βαθμός ελευθερίας, με τον οποίο είναι δυνατό να ληφθεί υπόψη η στρέβλωση και να υπολογιστεί το δίρροπο, που απαιτείται κατά το σχεδιασμό. Για λόγους ακριβέστερης προσομοίωσης της στρεπτικής συμπεριφοράς των κύριων δοκών και των διαδοκίδων επιλέχθηκε αυτό το 14βάθμιο στοιχείο δοκού.

Η σύνδεση των τόξων με τις κύριες δοκούς είναι μονολιθική, ενώ έχει ληφθεί υπόψη και η εκκεντρότητα. Τα πεπερασμένα στοιχεία των τόξων συνδέονται με το άνω πέλμα των κύριων δοκών μέσω άκαμπτων συνδέσμων (rigid links). Οι αναρτήσεις, οι διαγώνιοι σύνδεσμοι του τόξου και οι χιαστί σύνδεσμοι του καταστρώματος συνδέονται αρθρωτά με τα μέλη της γέφυρας, ενώ οι εγκάρσιοι σύνδεσμοι θεωρούνται μονολιθικά συνδεδεμένοι με τα τόξα. Επισημαίνεται ότι στο προσομοίωμα το μήκος της γέφυρας είναι ίσο με 43.30m, ενώ το πλάτος της είναι ίσο με τη θεωρητική απόσταση των κύριων δοκών δηλαδή 14.7m.

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στην προσομοίωση του κόμβου διαδοκίδας-κύριας δοκού. Η πραγματική σύνδεση, όπως καθορίστηκε σε προηγούμενη διπλωματική παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7 . Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Steelcon ανάλυση του κόμβου και προέκυψε το διάγραμμα ροπής-στροφής (M-φ) του κόμβου, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8 . Στην ίδια εικόνα, παρουσιάζονται με πράσινο και μπλε χρώμα τα όρια για τη θεώρηση του κόμβου ως αρθρωτού και άκαμπτου αντίστοιχα σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως φαίνεται και στο Σχήμα, ο κόμβος είναι ημιάκαμπος. Για την προσομοίωση του κόμβου στο προσομοίωμα της γέφυρας χρησιμοποιήθηκαν στροφικά ελατήρια, τα οποία για κάμψη περί τον ισχυρό άξονα των διαδοκίδων παρουσιάζουν το συγκεκριμένο διάγραμμα M-φ. Για την στρέψη και την κάμψη περί τον ασθενή άξονα της διαδοκίδας δόθηκαν στα ελατήρια πολύ μικρές τιμές δυσκαμψίας. Επίσης, λόγω της μετωπικής πλάκας δεσμεύτηκε και η στρέβλωση στα άκρα των διαδοκίδων.

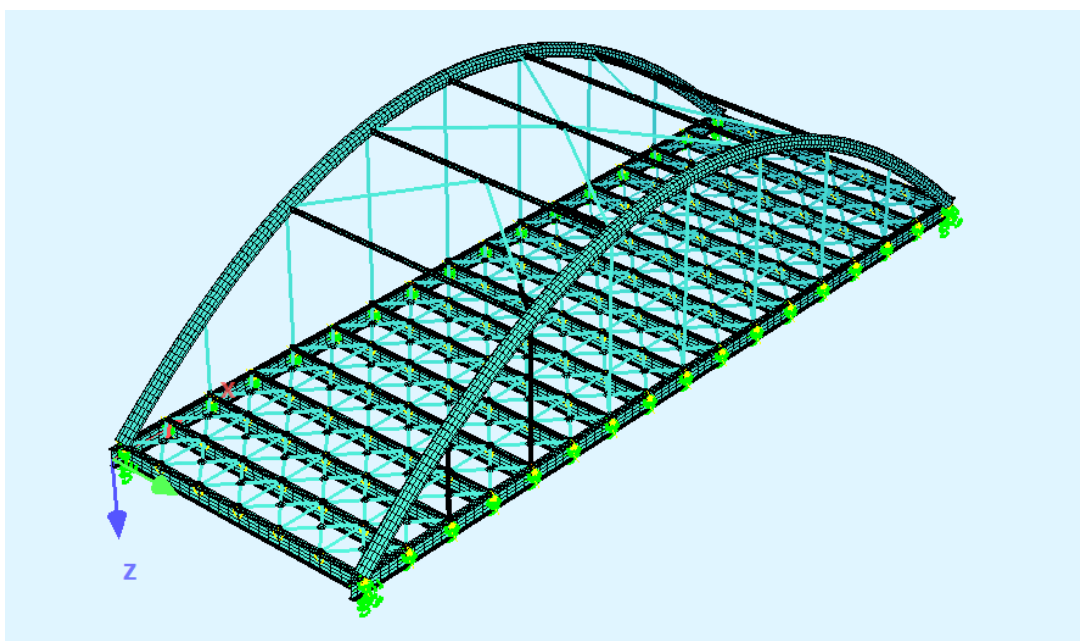


Σχήμα 2.7: Λεπτομέρεια σύνδεσης διαδοκίδας-κύριας δοκού

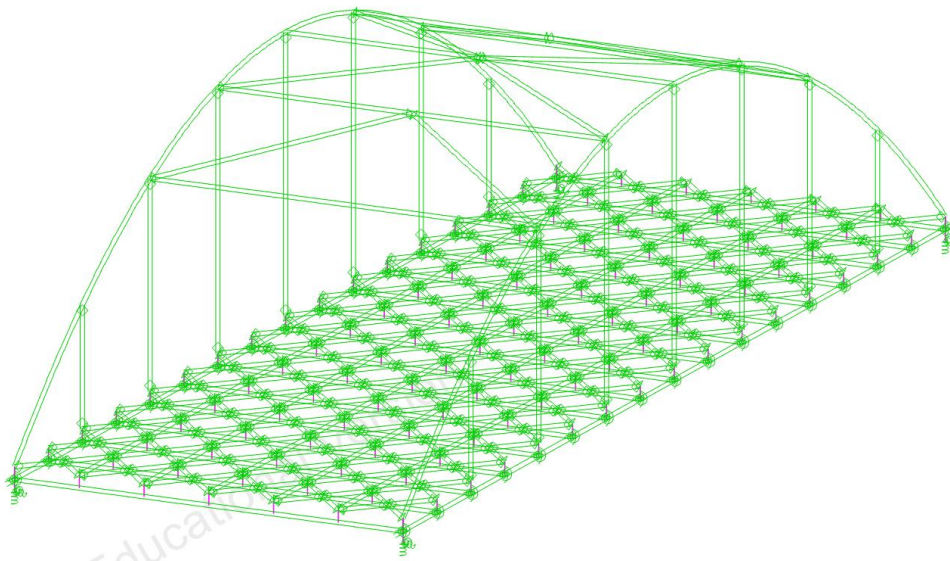


Σχήμα 2.8: Διάγραμμα M - ϕ κόμβου διαδοκίδας-κύριας δοκού

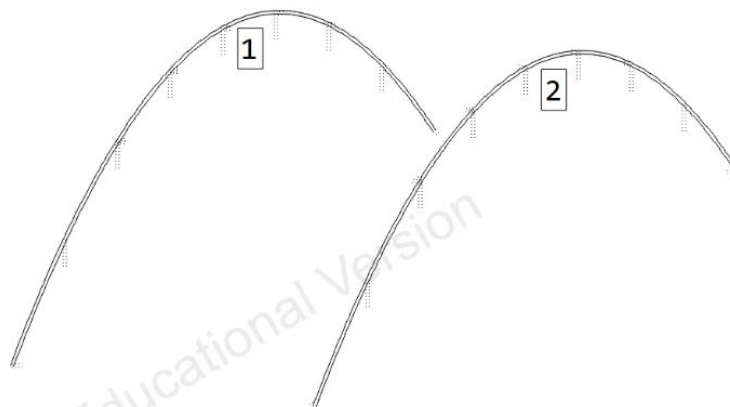
Τα εφέδρανα προσομοιώθηκαν με μετακινησιακά ελατήρια κατά τις διευθύνσεις x , y και z . Οι σταθερές αυτών των ελατηρίων είναι για την κατακόρυφη διεύθυνση 226000 kN/m ενώ για την εγκάρσια και τη διαμήκη διεύθυνση 3360 kN/m [12]. Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται το προσομοίωμα της γέφυρας, στο οποίο έχουν σχεδιαστεί και οι διατομές των μελών, ενώ στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται το προσομοίωμα με τα πεπερασμένα στοιχεία. Τέλος, επειδή στο κείμενο της εργασίας γίνεται πολύ συχνά αναφορά σε συγκεκριμένα μέλη του φορέα κρίθηκε σκόπιμο να γίνει αρίθμηση των μελών αυτών, προκειμένου να είναι δυνατός ο εντοπισμός τους από τον αναγνώστη. Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται η αρίθμηση των τόξων, όπου το τόξο 1 είναι το αριστερό και το τόξο 2 είναι το δεξιό, στο Σχήμα 2.12 η αρίθμηση των εγκάρσιων συνδέσμων και στο Σχήμα 2.13 η αρίθμηση των διαγώνιων συνδέσμων των τόξων.



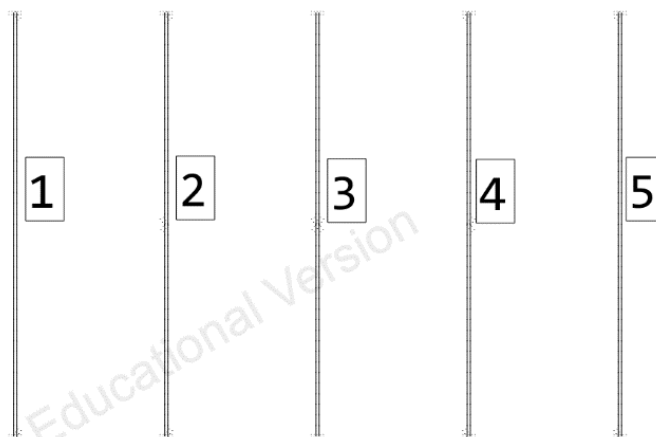
Σχήμα 2.9: Προσομοίωμα γέφυρας



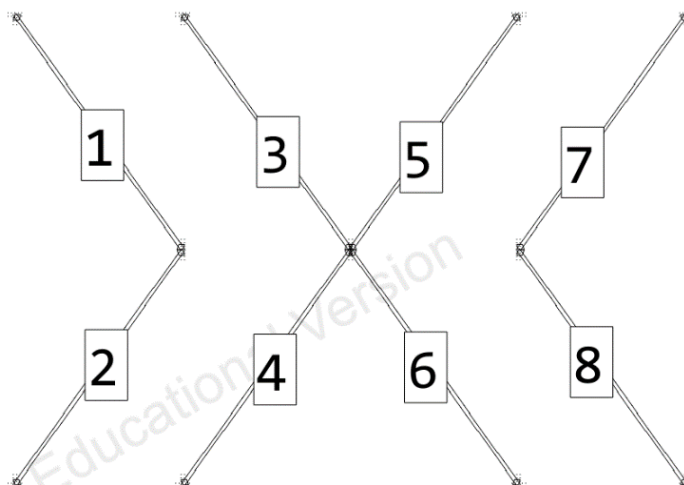
Σχήμα 2.10: Προσομοίωμα γέφυρας



Σχήμα 2.11: Αρίθμηση τόξων



Σχήμα 2.12: Αρίθμηση εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (κάτοψη)



Σχήμα 2.13: Αρίθμηση διαγώνιων συνδέσμων τόξων (κάτοψη)

3 ΦΟΡΤΙΑ

3.1 Γενικά

Για τη φόρτιση της γέφυρας ελήφθησαν υπόψη τα μόνιμα φορτία, τα φορτία κυκλοφορίας και τα φορτία ανέμου. Ο υπολογισμός των φορτίων έγινε με βάση τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1 για φορτία ανέμου (EN 1991-1-4) και για φορτία σε γέφυρες (EN 1991-2). Κατά τον υπολογισμό των φορτίων πραγματοποιήθηκαν κάποιες απλοποιήσεις, γιατί στόχος της εργασίας δεν είναι ο ακριβής σχεδιασμός της γέφυρας αλλά η εφαρμογή του κειμένου του νέου Ευρωκώδικα 3. Στο πλαίσιο αυτό δεν πραγματοποιήθηκαν δυσμενείς φορτίσεις με τα κινητά φορτία προκειμένου να ληφθούν οι περιβάλλουσες των διάφορων μεγεθών. Επίσης, για τα μόνιμα φορτία και για τα φορτία κυκλοφορίας, θεωρήθηκε ένα ισοδύναμο ομοιόμορφο φορτίο, το οποίο ασκήθηκε σε όλη την επιφάνεια του καταστρώματος της γέφυρας. Η επιφάνεια αυτή είναι ίση με:

$$A_{\text{κατ}}=14.7\text{m}\cdot 43.3\text{m}=636.51\text{m}^2$$

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται αναλυτικά ο υπολογισμός των φορτίων πάνω στη γέφυρα. Επίσης, παρουσιάζονται και οι συνδυασμοί φόρτισης που χρησιμοποιούνται στην εργασία.

3.2 Μόνιμα Φορτία

Τα μόνιμα φορτία αποτελούνται από το ίδιο βάρος του φορέα και από τα πρόσθετα μόνιμα φορτία. Στις περιπτώσεις όπου το φορτίο δεν ασκείται σε όλο το πλάτος της γέφυρας, υπολογίζεται η συνολική τιμή της κατακόρυφης δύναμης και αυτή διαιρείται με το εμβαδόν της επιφάνειας του καταστρώματος $A_{\text{κατ}}$, προκειμένου να ληφθεί το ισοδύναμο ομοιόμορφο φορτίο.

Ίδιο βάρος

Για τον υπολογισμό των φορτίων λόγω ίδιου βάρους λαμβάνονται υπόψη το ίδιο βάρος του μεταλλικού φορέα (τόξα, κύριες δοκοί, διαδοκίδες κλπ) και το ίδιο βάρος της πλάκας του καταστρώματος.

- Μεταλλικός φορέας: Λαμβάνεται αυτόματα από το λογισμικό με ειδικό βάρος χάλυβα 78.5 kN/m^3 .
- Πλάκα καταστρώματος: Το συμπαγές τμήμα της πλάκας πάνω από το χαλυβδόφυλλο είναι 25cm με ειδικό βάρος σκυροδέματος 25kN/m^3 . Οπότε το αντίστοιχο φορτίο είναι:

$$g_{\text{πλακ,κατ}} = 0.25\text{m} \cdot 25\text{kN/m}^3 = 6.25\text{kN/m}^2$$

Πρόσθετα μόνιμα φορτία

Για τον υπολογισμό των πρόσθετων μόνιμων φορτίων λαμβάνονται υπόψη το ίδιο βάρος των πεζοδρομίων, οι ασφαλικές στρώσεις, ένα φορτίο εξομάλυνσης καθώς και τα στηθαία ασφαλείας.

- Πεζοδρόμια: Το κάθε πεζοδρόμιο έχει πλάτος 1.25m (Σχήμα 2.6). Θεωρείται ότι το ύψος των πεζοδρομίων μεταβάλλεται από 24cm μέχρι 29cm , που αντιστοιχεί σε εγκάρσια κλίση ίση με 4% . Το ίδιο βάρος λαμβάνεται 25kN/m^3 , αφού πρόκειται για στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Συνολικό φορτίο πεζοδρομίων :

$$G_{\text{πεζ}} = 2 \cdot \frac{0.24\text{m} + 0.29\text{m}}{2} \cdot 1.25\text{m} \cdot 43.3\text{m} \cdot 25\text{kN/m}^3 = 717.16\text{kN}$$

Το ισοδύναμο ομοιόμορφο φορτίο είναι ίσο με:

$$g_{\text{πεζ}} = \frac{G_{\text{πεζ}}}{A_{\text{κατ}}} = \frac{717.16\text{kN}}{636.51\text{m}^2} = 1.13\text{kN/m}^2$$

- Ασφαλικές στρώσεις: Οι ασφαλικές στρώσεις έχουν πάχος 10 cm , εκτείνονται σε πλάτος 11.25m με ειδικό βάρος 24kN/m^2 .

Συνολικό φορτίο ασφαλικών στρώσεων:

$$G_{\text{ασφ}} = 0.1\text{m} \cdot 11.25\text{m} \cdot 43.3\text{m} \cdot 24\text{kN/m}^2 = 1169.10\text{kN}$$

Το ισοδύναμο ομοιόμορφο φορτίο είναι ίσο με:

$$g_{\text{ασφ}} = \frac{G_{\text{ασφ}}}{A_{\text{κατ}}} = \frac{1169.10\text{kN}}{636.51\text{m}^2} = 1.84\text{kN/m}^2$$

- Φορτίο εξομάλυνσης: Λαμβάνεται ίσο με 0.5kN/m^2 σε όλο το πλάτος της γέφυρας.
- Στηθαία ασφαλείας: Θεωρούνται τέσσερα συνολικά στηθαία ασφαλείας. Τα δύο αντιστοιχούν στο σύστημα αναχαίτισης οχημάτων και λαμβάνονται ίσα με 1kN/m το καθένα και τα άλλα δύο αντιστοιχούν σε κιγκλιδώματα για τους πεζούς και λαμβάνονται 0.5kN/m το καθένα. Το συνολικό φορτίο που προκύπτει είναι:

$$G_{\text{στηθ}} = (2 \cdot 1\text{kN/m} + 2 \cdot 0.5\text{kN/m}) \cdot 43.3\text{m} = 129.90\text{kN}$$

Το ισοδύναμο ομοιόμορφο φορτίο είναι ίσο με:

$$g_{\text{στηθ}} = \frac{G_{\text{στηθ}}}{A_{\text{κατ}}} = \frac{129.90\text{kN}}{636.51\text{m}^2} = 0.20\text{kN/m}^2$$

Ο Πίνακας 3.1 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις τιμές των μόνιμων φορτίων. Οι ίδιες τιμές ορίστηκαν και στο λογισμικό ως μόνιμα φορτία για την ανάλυση του φορέα.

Πίνακας 3.1: Συγκεντρωτικός πίνακας μόνιμων φορτίων

Μόνιμα Φορτία (kN/m ²)	
Μεταλλικός σκελετός	Αυτόματα
Πλάκα καταστρώματος	6.25
Πεζοδρόμια	1.13
Ασφαλτικές στρώσεις	1.84
Φορτίο εξομάλυνσης	0.50
Στηθαία ασφαλείας	0.20
Σύνολο	9.92

3.3 Φορτία κυκλοφορίας

Τα φορτία κυκλοφορίας προκύπτουν από την πρότυπη φόρτιση 1 (LM1) του Ευρωκώδικα 1 (EN 1991-2). Η φόρτιση αυτή, που χρησιμοποιείται για τοπικούς και καθολικούς ελέγχους αποτελείται από:

- Διαξονικά συγκεντρωμένα φορτία TS (tandem system) μεγέθους $\alpha_{Qi} \cdot Q_k$ ανά άξονα.
- Ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία UDL, μεγέθους $\alpha_{qi} \cdot q_k$.

Για τα συγκεντρωμένα φορτία οι συντελεστές προσαρμογής είναι ίσοι με $\alpha_Q = 0.90$, ενώ για τα κατανεμημένα φορτία είναι ίσοι με $\alpha_q = 1.0$. Οι τιμές των συγκεντρωμένων φορτίων ανά άξονα είναι 300kN στην 1^η λωρίδα, 200kN στη 2^η λωρίδα και 100kN στην 3^η λωρίδα. Τα ομοιόμορφα φορτία είναι ίσα με 9kN/m² στην 1^η λωρίδα και 2.5kN/m² στις υπόλοιπες λωρίδες συμπεριλαμβανομένης και της απομένουσας επιφάνειας.

Το πλάτος του οδοστρώματος λαμβάνεται ίσο με την απόσταση μεταξύ των συστημάτων αναχαίτισης, δηλαδή ίσο με 11.25m. Ορίζονται 3 λωρίδες πλάτους 3m, η καθεμιά και μία απομένουσα επιφάνεια πλάτους 2.25m.

- Ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία UDL: Η λωρίδα 1 φορτίζεται με 9kN/m² και οι υπόλοιπες λωρίδες και η απομένουσα επιφάνεια με 2.5kN/m². Το συνολικό φορτίο από τα ομοιόμορφα φορτία UDL είναι:

$$Q_{UDL} = (9\text{kN/m}^2 \cdot 3\text{m} + 2.5\text{kN/m}^2 \cdot 8.25\text{m}) \cdot 43.3\text{m} = 2062.16\text{kN}$$

Το ισοδύναμο ομοιόμορφο φορτίο είναι:

$$q_{UDL} = \frac{Q_{UDL}}{A_{κατ}} = \frac{2062.16\text{kN}}{636.51\text{m}^2} = 3.24\text{kN/m}^2$$

- Συγκεντρωμένα φορτία TS: Τα 3 οχήματα έχουν συνολικό βάρος 540kN, 360kN και 180kN. Το συνολικό φορτίο είναι:

$$Q_{TS} = 540\text{kN} + 360\text{kN} + 180\text{kN} = 1080\text{kN}$$

Το ισοδύναμο ομοιόμορφο φορτίο είναι:

$$q_{TS} = \frac{Q_{TS}}{A_{κατ}} = \frac{1080\text{kN}}{636.51\text{m}^2} = 1.70\text{kN/m}^2$$

- Φορτίο πεζοδρομίου: Το φορτίο του πεζοδρομίου που συνδυάζεται με τα φορτία κυκλοφορίας είναι ίσο με 3kN/m^2 . Το φορτίο αυτό λαμβάνεται σε όλο το πλάτος των πεζοδρομίων ακόμα και στις ζώνες των κιγκλιδωμάτων και των στηθαίων ασφαλείας. Αναφέρεται, δηλαδή, σε πλάτος $14.7\text{m}-11.25\text{m}=3.45\text{m}$. Το αντίστοιχο συνολικό φορτίο είναι ίσο με:

$$Q_{\text{πεζ}}=3.45\text{m}\cdot 43.3\text{m}\cdot 3\text{kN/m}^2=448.16\text{kN}$$

Το αντίστοιχο ισοδύναμο ομοιόμορφο φορτίο είναι:

$$q_{\text{πεζ}}=\frac{Q_{\text{πεζ}}}{A_{\text{κατ}}}=\frac{448.16\text{kN}}{636.51\text{m}^2}=0.70\text{ kN/m}^2$$

Ο Πίνακας 3.2 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις τιμές των κινητών φορτίων. Οι ίδιες τιμές ορίστηκαν και στο λογισμικό ως κινητά φορτία για την ανάλυση του φορέα.

Πίνακας 3.2: Συγκεντρωτικός πίνακας κινητών φορτίων

Κινητά Φορτία (kN/m²)	
Ομοιόμορφα κυκλοφορίας	3.24
Συγκεντρωμένα κυκλοφορίας	1.70
Πεζοδρόμια	0.70
Σύνολο	5.64

Τα κινητά φορτία όπως ορίστηκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της εργασίας για τον έλεγχο όλων των μελών του φορέα πλην των διαδοκίδων. Οι διαδοκίδες καταπονούνται κυρίως από τα συγκεντρωμένα φορτία, με αποτέλεσμα η θεώρηση ότι αυτά ασκούνται με τη μορφή ισοδύναμου ομοιόμορφου φορτίου σε όλη την επιφάνεια της γέφυρας, να οδηγεί σε σημαντική υποεκτίμηση του βαθμού αξιοποίησης των διαδοκίδων. Για αυτόν το λόγο, για τον έλεγχο των διαδοκίδων θεωρήθηκε ξεχωριστή φόρτιση, στην οποία ασκούνται τα συγκεντρωμένα φορτία κυκλοφορίας με την πραγματική τους μορφή και τιμή. Στο πλαίσιο της εργασίας ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε απλοποιητικά για τη μεσαία διαδοκίδα. Η διάταξη των φορτίων είναι τέτοια ώστε να αναπτύσσεται η μέγιστη ροπή στη μεσαία διατομή της διαδοκίδας και παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Στο συγκεκριμένο σχήμα εμφανίζεται μόνο η μεσαία διαδοκίδα και όχι ολόκληρος ο τριςδιάστατος φορέας για λόγους ευκρίνειας. Η τοποθέτηση των συγκεντρωμένων φορτίων έχει γίνει απλοποιητικά, θεωρώντας μόνο έναν τροχό, ενώ η τιμή τους έχει προσαυξηθεί με ένα συντελεστή κατανομής τροχών ίσο με 1.543. Ο Πίνακας 3.3 παρουσιάζει τα ομοιόμορφα φορτία κυκλοφορίας, όπως τοποθετήθηκαν στο προσομοίωμα για τον έλεγχο της διαδοκίδας.



Σχήμα 3.1: Διάταξη συγκεντρωμένων φορτίων στη μεσαία διαδοκίδα της γέφυρας

Πίνακας 3.3: Συγκεντρωτικός πίνακας κινητών φορτίων για τον έλεγχο της διαδοκίδας

Κινητά Φορτία (kN/m ²)	
Ομοιόμορφα κυκλοφορίας	3.24
Πεζοδρόμια	0.70
Σύνολο	3.94

3.4 Φορτία ανέμου

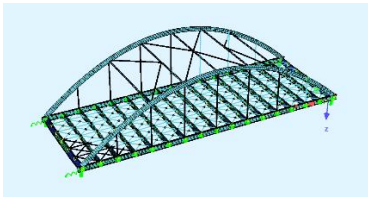
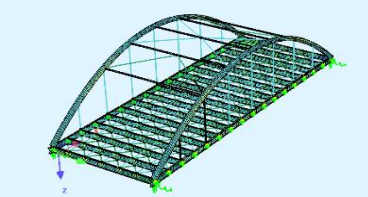
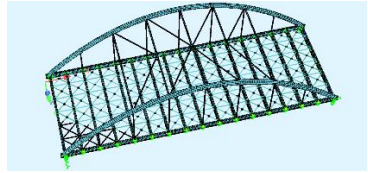
3.4.1 Γενικά

Ο υπολογισμός των φορτίων ανέμου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1-Μέρος 1-4. Στη δημιουργία των συνδυασμών φόρτισης θεωρήθηκε ότι τα φορτία ανέμου ασκούνται στη γέφυρα ταυτόχρονα με τα φορτία κυκλοφορίας. Κατά τον υπολογισμό των φορτίων ανέμου ο δυναμικός συντελεστής c_{se} υπολογίστηκε σύμφωνα με τη λεπτομερή διαδικασία. Για αυτόν το λόγο στο πλαίσιο υπολογισμού των φορτίων ανέμου πραγματοποιήθηκε και ιδιομορφική ανάλυση, προκειμένου να υπολογιστούν οι ιδιομορφές ταλάντωσης και οι αντίστοιχες ιδιοσυχνότητες.

3.4.2 Ιδιομορφές ταλάντωσης γέφυρας

Αρχικά πραγματοποιήθηκε ιδιομορφική ανάλυση, θεωρώντας ως μάζα της κατασκευής αυτή που προέρχεται από τη φόρτιση με τα μόνιμα και τα κινητά φορτία $G+Q$. Ο Πίνακας 3.4 παρουσιάζει τις τρεις πρώτες ιδιομορφές ταλάντωσης. Η 1^η ιδιομορφή αντιστοιχεί σε μεταφορική κατά X ιδιομορφή, η 2^η σε μεταφορική κατά Y και η 3^η σε στροφική.

Πίνακας 3.4: Ιδιομορφές ταλάντωσης γέφυρας

α/α	Ιδιοσυχνότητα (Hz)	Ιδιομορφή
1	0.545 (T=1.83s)	
2	0.592 (T=1.69s)	
3	0.977 (T=1.02s)	

3.4.3 Υπολογισμός φορτίων ανέμου

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των φορτίων ανέμου απαιτείται να είναι γνωστό για το κάθε μέλος το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται. Για τα επιμέρους μέλη της γέφυρας θεωρήθηκαν τα παρακάτω ύψη αναφοράς.

Κατάστρωμα: $z_{κατ}=11.10m$

Τόξα και αναρτήρες: $z_{τοξ}=z_{κατ}+H_{τοξ}/2=11.10+10/2=16.10m$

Εγκάρσιοι και διαγώνιοι σύνδεσμοι τόξου: $z_{συνδ}=z_{κατ}+H_{τοξ}=11.10+10=21.10m$

Επίσης, πραγματοποιήθηκε μία ομαδοποίηση των αναρτήρων, προκειμένου να είναι πιο εύκολη η αναφορά σε αυτούς. Ο δείκτης 1 αναφέρεται στον πρώτο και τον έβδομο (τελευταίο) αναρτήρα κάθε τόξου. Ο δείκτης 2 αναφέρεται στο δεύτερο και τον έκτο αναρτήρα κάθε τόξου και τέλος ο δείκτης 3 αναφέρεται στον τρίτο, τον τέταρτο (μεσαίο) και τον πέμπτο αναρτήρα κάθε τόξου.

Βασική ταχύτητα ανέμου

Η βασική ταχύτητα ανέμου δίνεται από τη σχέση:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}$$

Η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας ανέμου ελήφθη $v_{b,0}=27m/s$, η οποία αντιστοιχεί σε περιοχές μη νησιωτικές, που απέχουν πάνω από 10km από την ακτή. Οι τιμές των συντελεστών c_{dir} και c_{season} είναι ίσοι με τη μονάδα. Οπότε, η βασική ταχύτητα ανέμου ισούται με τη θεμελιώδη βασική ταχύτητα ανέμου, δηλαδή $v_b=27m/sec$. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε φορτία ανέμου, που δρουν στη γέφυρα χωρίς τα φορτία κυκλοφορίας. Στην περίπτωση που τα φορτία ανέμου δρουν ταυτόχρονα με τα φορτία κυκλοφορίας τότε λαμβάνεται $v_b^*=23m/sec$, αφού $v_{b,0}^*=23m/sec$ για οδικές γέφυρες. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1-Μέρος 1-4 κατά το συνδυασμό των φορτίων ανέμου με τα φορτία κυκλοφορίας λαμβάνεται η μικρότερη εκ των τιμών $\psi_0 F_{wk}$ και F_w^* , οι οποίες προκύπτουν για τιμές βασικής ταχύτητας ανέμου $v_b=27m/sec$ και $v_b^*=23m/sec$ αντίστοιχα. Επειδή, στο τέλος προέκυψε μικρότερη η τιμή συνδυασμού $\psi_0 F_{wk}$ στη συνέχεια παρουσιάζεται η πορεία υπολογισμού των φορτίων ανέμου για $v_b=27m/sec$. Η πορεία είναι ακριβώς η ίδια και για την περίπτωση $v_b^*=23m/sec$.

Πίεση ταχύτητας αιχμής

Για τον υπολογισμό της πίεσης ταχύτητας αιχμής σε ύψος z χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση του Ευρωκώδικα 1-Μέρος 1-4:

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

Στην παραπάνω σχέση:

ρ : είναι η πυκνότητα του αέρα, η οποία θεωρείται ίση με 1.25 kg/m^3 .

$I_v(z)$: είναι η ένταση στροβιλισμού σε ύψος z , η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$$

Ο συντελεστής στροβιλισμού k_1 λαμβάνεται ίσος με 1.

$v_m(z)$: η μέση ταχύτητα ανέμου σε ύψος z , η οποία δίνεται από τη σχέση:

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

Συντελεστής τραχύτητας $c_r(z)$

Για τον υπολογισμό του συντελεστή τραχύτητας θεωρήθηκε κατηγορία εδάφους II με $z_0=0.05\text{m}$. Ο συντελεστής τραχύτητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_{0,II}}\right)$$

Στην παραπάνω σχέση:

k_r : συντελεστής εδάφους

z_0 : μήκος τραχύτητας ίσο με 0.05 m για κατηγορία εδάφους II

$z_{0,II}$: 0.05 m

Συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης $c_0(z)$

Ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης θεωρήθηκε ίσος με 1.0, τόσο για την εγκάρσια όσο και για τη διαμήκη διεύθυνση.

Για κάθε υψόμετρο υπολογίστηκαν οι συντελεστές τραχύτητας και προέκυψε η μέση ταχύτητα ανέμου, ενώ υπολογίστηκε και η ένταση στροβιλισμού. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η πίεση ταχύτητας αιχμής.

3.4.3.1 Εγκάρσια φορτία ανέμου Y

Με βάση όσα αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο προέκυψαν οι πιέσεις ταχύτητας αιχμής για εγκάρσιο άνεμο Y (Πίνακας 3.5). Όπως εξηγείται και στις ενότητες 3.4.3.2 και 3.4.3.3, προκύπτουν οι ίδιες τιμές πιέσεων ταχύτητας αιχμής και για τα φορτία ανέμου κατά τις άλλες δύο διευθύνσεις Y και Z.

Πίνακας 3.5: Υπολογισμός πίεσης ταχύτητας αιχμής

	z(m)	c_r	c_0	v_m (m/sec)	I_v	q_p (kN/m ²)
Κατάστρωμα	11.1	1.027	1	27.716	0.185	1.102
Τόξα-Αναρτήρες	16.1	1.097	1	29.623	0.173	1.213
Σύνδεσμοι	21.1	1.149	1	31.011	0.165	1.297

Για τον υπολογισμό των εγκάρσιων φορτίων ανέμου είναι απαραίτητος ο δυναμικός συντελεστής $c_s c_d$. Για τον υπολογισμό του, που παρουσιάζεται παρακάτω, το πλάτος b ισούται με το μήκος του καταστρώματος και είναι ίσο με 43.30m, ενώ χρησιμοποιείται η 2^η ιδιομορφή ταλάντωσης, η οποία είναι μεταφορική κατά Y, με ιδιοσυχνότητα $\eta_{1,x} = 0.592\text{Hz}$.

Μήκος στροβιλισμού

Θεωρείται ύψος αναφοράς $z=11.10\text{m} > z_{\min}=2\text{m}$ για έδαφος κατηγορίας II. Η τιμή αυτή του z αντιστοιχεί στο ύψος αναφοράς του καταστρώματος και χρησιμοποιείται, γιατί στο κατάστρωμα είναι συγκεντρωμένο το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του φορέα.

$$\alpha = 0.67 + 0.05 \cdot \ln(z_0) = 0.67 + 0.05 \cdot \ln(0.05) = 0.52$$

$$L(z) = L_t \cdot \left(\frac{z}{z_t}\right)^{0.52} = 300\text{m} \cdot \left(\frac{11.10\text{m}}{200\text{m}}\right)^{0.52} = 66.66\text{m}$$

όπου $z_i=200\text{m}$ το ύψος αναφοράς και $L_i=300\text{m}$ το μήκος αναφοράς.

Αδιάστατη συνάρτηση φάσματος πυκνότητας S_L

Αρχικά υπολογίζεται η αδιάστατη συχνότητα $f_L(z,n)$ για $n=n_{1,x}=0.592$.

$$f_L(z,n) = \frac{n \cdot L(z)}{v_m(z)} = \frac{0.592\text{Hz} \cdot 66.66\text{m}}{27.716\text{m/s}} = 1.424$$

$$S_L(z,n) = \frac{6.8 \cdot f_L(z,n)}{(1+10.2 \cdot f_L(z,n))^{5/3}} = \frac{6.8 \cdot 1.424}{(1+10.2 \cdot 1.424)^{5/3}} = 0.1002$$

Συντελεστής υπόβαθρου B^2 και συντελεστή απόκρισης συντονισμού R^2

Κατά τον υπολογισμό του συντελεστή συντονισμού λαμβάνεται απόσβεση $\delta=0.03$. Στον υπολογισμό είναι, επίσης, απαραίτητη η γνώση του ύψους αναφοράς h , που δίνεται από τη σχέση $h=d+2$, για την περίπτωση παρουσίας κυκλοφορίας σε οδικές γέφυρες. Το ύψος d ισούνται με το άθροισμα του ύψους της μεταλλικής δοκού HEB 900, του πάχους της πλάκας καταστρώματος και της ασφαλικής στρώσης, δηλαδή $d=0.90\text{m}+0.25\text{m}+0.10=1.25\text{m}$. Τελικά προκύπτει $h=1.25\text{m}+2.00=3.25\text{m}$

$$B^2 = \frac{1}{1+0.9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_e)}\right)^{0.63}} = \frac{1}{1+0.9 \cdot \left(\frac{43.3\text{m}+3.25\text{m}}{66.66\text{m}}\right)^{0.63}} = 0.582$$

$$\eta_h = \frac{4.6 \cdot h}{L(z_e)} \cdot f_L(z,n) = \frac{4.6 \cdot 3.25\text{m}}{66.66\text{m}} \cdot 1.424 = 0.319$$

$$\eta_b = \frac{4.6 \cdot b}{L(z_e)} \cdot f_L(z,n) = \frac{4.6 \cdot 43.3\text{m}}{66.66\text{m}} \cdot 1.424 = 4.254$$

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}) = \frac{1}{0.319} - \frac{1}{2 \cdot 0.319^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 0.319}) = 0.817$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}) = \frac{1}{4.254} - \frac{1}{2 \cdot 4.254^2} \cdot (1 - e^{-2 \cdot 4.254}) = 0.207$$

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b) = \frac{\pi^2}{2 \cdot 0.03} \cdot 0.1002 \cdot 0.817 \cdot 0.207 = 2.795$$

Δυναμικός συντελεστής c_{sd}

Πρώτα υπολογίζονται η συχνότητα v και ο συντελεστής αιχμής k_p . Ο Πίνακας 3.6 παρουσιάζει όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό του δυναμικού συντελεστή.

$$v = n_{1,x} \cdot \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} = 0.592\text{Hz} \cdot \sqrt{\frac{2.795}{0.582 + 2.795}} = 0.539\text{Hz}$$

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0.6}{2 \cdot \ln(v \cdot T)} = \sqrt{2 \cdot \ln(0.539\text{Hz} \cdot 600\text{s})} + \frac{0.6}{2 \cdot \ln(0.539\text{Hz} \cdot 600\text{s})} = 3.576 > 3$$

$$c_{sd} = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_e) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_e)} = \frac{1 + 2 \cdot 3.576 \cdot 0.185 \cdot \sqrt{0.582 + 2.795}}{1 + 7 \cdot 0.185} = 1.495$$

Πίνακας 3.6: Υπολογισμός δυναμικού συντελεστή $c_s c_d$

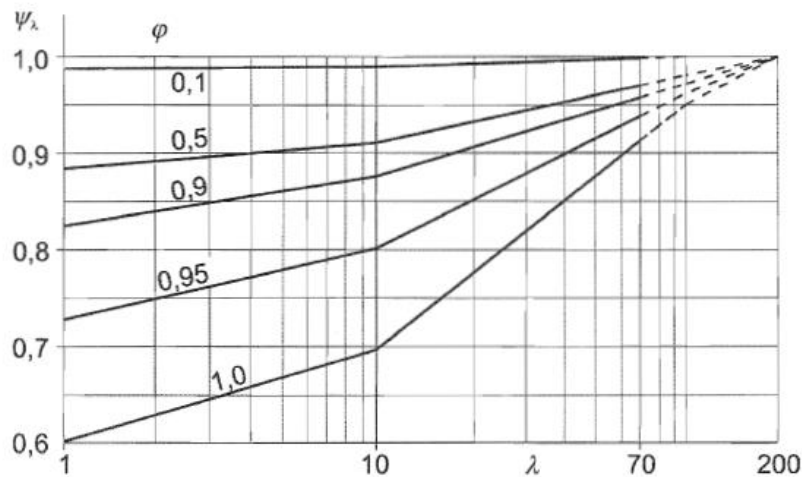
z (m)	11.10	R_h	0.817
α	0.52	R_b	0.207
L (m)	66.663	δ	0.03
f_L	1.424	R^2	2.795
S_L	0.1002	v	0.539
b (m)	43.30	k_p	3.576
h (m)	3.25	$c_s c_d$	1.495
B^2	0.582		
η_h	0.319		
η_b	4.254		

Συντελεστές επίδρασης άκρων ψ_L

Για τον υπολογισμό των συντελεστών επίδρασης άκρων των διάφορων μελών της γέφυρας απαιτείται πρώτα ο υπολογισμός της ενεργού λυγηρότητας τους λ με βάση τον πίνακα στο Σχήμα 3.2. Στη συνέχεια, με γνωστή τη λυγηρότητα λ και για λόγο πληρότητας $\phi=1$ για όλα τα μέλη, μπορεί να προσδιοριστεί ο συντελεστής επίδρασης άκρων από το Σχήμα 3.3. Ο Πίνακας 3.7 παρουσιάζει όλα τα αποτελέσματα των υπολογισμών καθώς και την τελική τιμή του συντελεστή επίδρασης άκρων για το κάθε μέλος. Οι τιμές αυτές είναι ίδιες και για τις τρεις διευθύνσεις ανέμου.

No.	Position of the structure, wind normal to the plane of the page	Effective slenderness λ
1		For polygonal, rectangular and sharp edged sections and lattice structures: for $\ell \geq 50$ m, $\lambda = 1.4 \ell/b$ or $\lambda = 70$, whichever is smaller
2		for $\ell < 15$ m, $\lambda = 2 \ell/b$ or $\lambda = 70$, whichever is smaller For circular cylinders: for $\ell \geq 50$ m, $\lambda = 0.7 \ell/b$ or $\lambda = 70$, whichever is smaller for $\ell < 15$ m, $\lambda = \ell/b$ or $\lambda = 70$, whichever is smaller
3		For intermediate values of ℓ , linear interpolation should be used
4		for $\ell \geq 50$ m, $\lambda = 0.7 \ell/b$ or $\lambda = 70$, whichever is larger for $\ell < 15$ m, $\lambda = \ell/b$ or $\lambda = 70$, whichever is larger For intermediate values of ℓ , linear interpolation should be used

Σχήμα 3.2: Προτεινόμενες τιμές του λ για κυλίνδρους, πολυγωνικές διατομές, ορθογωνικές διατομές, πινακίδες σήμανσης, διατομές με αιχμηρές ακμές και δικτυωτές κατασκευές [4]



Σχήμα 3.3: Συντελεστές επίδρασης άκρων ψ_λ ως συνάρτηση του συντελεστή πληρότητας ϕ και της λυγηρότητας λ [4]

Πίνακας 3.7: Συντελεστές επίδρασης άκρων ψ_λ

	b(m)	L(m)	L/b	λ	ϕ	ψ_λ
Τόξα	0.75	47.7	63.60	45.77	1	0.87
Αναρτήρες 1	0.1683	4.375	26.00	26.00	1	0.80
Αναρτήρες 2	0.1683	7.5	44.56	44.56	1	0.86
Αναρτήρες 3	0.1683	10	59.42	59.42	1	0.89
Εγκάρσιοι σύνδεσμοι	0.2445	14.7	60.12	60.12	1	0.89
Διαγώνιοι σύνδεσμοι	0.1683	9.13	54.25	54.25	1	0.88

Συντελεστές δύναμης

Για το κατάστρωμα λαμβάνεται $c_{f,0}=1.30$. Η τελική τιμή του συντελεστή δύναμης για το κατάστρωμα είναι η παραπάνω $c_f=1.30$. Για τα υπόλοιπα μέλη ο συντελεστής δύναμης χωρίς ροή ελεύθερων άκρων εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds, που δίνεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{b \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}}}{\nu}$$

όπου:

b: είναι η διάμετρος του μέλους

ν : είναι το κινηματικό ιξώδες του αέρα ($\nu=15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

q_p : η πίεση της ταχύτητας αιχμής

ρ : η πυκνότητα του αέρα ίση με 1.25 kg/m^3 ή 0.00125 Mg/m^3

Με γνωστό τον αριθμό Reynolds υπολογίζεται η τιμή του συντελεστή δύναμης χωρίς ροή ελεύθερων άκρων από τη σχέση:

$$c_{f,0} = 1.2 + \frac{0.18 \cdot \log(10 \cdot k/b)}{1 + 0.4 \cdot \log(Re/10^6)}$$

Στην παραπάνω σχέση το k είναι η ισοδύναμη τραχύτητα της επιφάνειας. Θεωρείται ότι ο τύπος της επιφάνειας των μελών είναι γαλβανισμένος χάλυβας, οπότε λαμβάνεται η τιμή $k=0.2\text{mm}$. Επίσης, b είναι η διάμετρος του μέλους. Η τελική τιμή του συντελεστή δύναμης δίνεται από τη σχέση:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \Psi_\lambda$$

Για τους αναρτήρες πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο συντελεστής κ , αφού είναι διατεταγμένοι σε σειρά. Ο υπολογισμός του γίνεται με τη βοήθεια του πίνακα στο Σχήμα 3.4. Σε αυτήν την περίπτωση ο συντελεστής δύναμης δίνεται από τη σχέση

$$c_f = c_{f,0} \cdot \Psi_\lambda \cdot \kappa$$

Επίσης

$$\frac{a}{b} = \frac{5.25}{0.1683} = 31.19 > 30$$

Οπότε

$$\kappa = 1.0$$

a/b	κ	
2,5 < a/b < 3,5 (A)	1,15	
3,5 < a/b < 30	$\kappa = \frac{210 - \frac{a}{b}}{180}$	
a/b > 30	1,00	
a: distance b: diameter NOTE For a/b < 2,5 the values of κ may be given in the National Annex (A)		

Σχήμα 3.4: Συντελεστές κ για κατακόρυφους κυλίνδρους με εν σειρά διάταξη [4]

Ο Πίνακας 3.8 παρουσιάζει τον υπολογισμό του συντελεστή δύναμης για όλα τα μέλη του φορέα.

Πίνακας 3.8: Συντελεστής δύναμης για τα επιμέρους μέλη του φορέα (εγκάρσιος άνεμος Y)

	q_p (kN/m ²)	Re	$c_{f,0}$	Ψ_λ	c_f
Κατάστρωμα	1.102	-	1.30	-	1.30
Τόξα	1.213	2203025	0.79	0.87	0.69
Αναρτήρες 1	1.213	494359	0.81	0.8	0.64
Αναρτήρες 2	1.213	494359	0.81	0.86	0.69
Αναρτήρες 3	1.213	494359	0.81	0.89	0.72
Διαγώνιοι Σύνδεσμοι	1.297	511129	0.81	0.88	0.71

Φορτία ανέμου

Ο υπολογισμός των φορτίων ανέμου δίνεται από τη σχέση:

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

Όπου:

- $c_s c_d$: είναι ο δυναμικός συντελεστής
- c_f : είναι ο συντελεστής δύναμης για την κατασκευή ή το στοιχείο της κατασκευής
- $q_p(z_e)$: είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής σε ύψος αναφοράς z_e
- A_{ref} : είναι η επιφάνεια αναφοράς της κατασκευής ή στοιχείου της κατασκευής, μετρούμενη γενικά ως η προβολή της κατασκευής σε επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση του ανέμου

Ο Πίνακας 3.9 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα φορτία ανέμου κατά την εγκάρσια διεύθυνση Y, τα οποία υπολογίζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Κατάστρωμα

Πρώτα υπολογίζεται η επιφάνεια αναφοράς κατά την εγκάρσια έννοια, λαμβάνοντας υπόψη ότι υπάρχει κυκλοφορία. Σε αυτήν την περίπτωση το ύψος αναφοράς της γέφυρας είναι ίσο με:

$$d_{ref} = d + 2 = (0.9\text{m} + 0.25\text{m} + 0.10\text{m}) + 2\text{m} = 3.25\text{m}$$

$$A_{ref} = L \cdot d_{ref} = 43.30\text{m} \cdot 3.25\text{m} = 140.725\text{m}^2$$

$$F_{w,κατ} = c_{f,κατ} \cdot c_s c_d \cdot q_{p,κατ} \cdot A_{ref} = 1.30 \cdot 1.495 \cdot 1.102\text{kN/m}^2 \cdot 140.725\text{m}^2 = 301.40\text{kN}$$

Το αντίστοιχο καταναμημένο φορτίο στο κατάστρωμα της γέφυρας είναι ίσο με:

$$f_{w,κατ} = \frac{F_{w,κατ}}{L} = \frac{301.40\text{kN}}{43.30\text{m}} = 6.96\text{kN/m}$$

Τόξα

Για τα τόξα υπολογίζεται απευθείας το καταναμημένο φορτίο

$$f_{w,τοξ} = c_{f,τοξ} \cdot c_s c_d \cdot q_{p,τοξ} \cdot b_{τοξ} = 0.69 \cdot 1.495 \cdot 1.213\text{kN/m}^2 \cdot 0.75\text{m} = 0.94\text{kN/m}$$

Αναρτήρες

Όμοια

$$f_{w,αν,1} = c_{f,αν,1} \cdot c_s c_d \cdot q_{p,τοξ} \cdot b_{αν,1} = 0.64 \cdot 1.495 \cdot 1.213\text{kN/m}^2 \cdot 0.1683\text{m} = 0.20\text{kN/m}$$

$$f_{w,αν,2} = c_{f,αν,2} \cdot c_s c_d \cdot q_{p,τοξ} \cdot b_{αν,2} = 0.69 \cdot 1.495 \cdot 1.213\text{kN/m}^2 \cdot 0.1683\text{m} = 0.21\text{kN/m}$$

$$f_{w,αν,3} = c_{f,αν,3} \cdot c_s c_d \cdot q_{p,τοξ} \cdot b_{αν,3} = 0.72 \cdot 1.495 \cdot 1.213\text{kN/m}^2 \cdot 0.1683\text{m} = 0.22\text{kN/m}$$

Διαγώνιοι σύνδεσμοι

Όμοια

$$f_{w,δ,σ} = c_{f,δ,σ} \cdot c_s c_d \cdot q_{p,συνδ} \cdot b_{δ,σ} = 0.71 \cdot 1.495 \cdot 1.297\text{kN/m}^2 \cdot 0.1683\text{m} = 0.23\text{kN/m}$$

Πίνακας 3.9: Ασκούμενες δυνάμεις εγκάρσιου ανέμου Y

Μέλος	f_w (kN/m)
Κατάστρωμα	6.96
Τόξα	0.94
Αναρτήρες 1	0.20
Αναρτήρες 2	0.21
Αναρτήρες 3	0.22
Διαγώνιοι σύνδεσμοι	0.23

3.4.3.2 Διαμήκη φορτία ανέμου X

Η πορεία υπολογισμού των φορτίων ανέμου κατά τη διαμήκη διεύθυνση είναι όμοια με αυτήν για την εγκάρσια, η οποία παρουσιάστηκε αναλυτικά στην ενότητα 3.4.3.1.

Πιέσεις ταχύτητας αιχμής

Με βάση όσα αναπτύχθηκαν στην ενότητα 3.4.3 προέκυψαν οι πιέσεις ταχύτητας αιχμής. Για τα φορτία ανέμου κατά τη διαμήκη διεύθυνση θεωρήθηκε συντελεστής $c_0=1$, χωρίς να γίνει περαιτέρω διερεύνηση. Για αυτόν το λόγο οι πιέσεις ταχύτητας αιχμής, που προέκυψαν για το διαμήκη άνεμο είναι ίδιες με αυτές του εγκάρσιου ανέμου και παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.4.3.1 (Πίνακας 3.5).

Συντελεστές επίδρασης άκρων

Για τους συντελεστές επίδρασης άκρων ψ_l ισχύουν όσα αναλύθηκαν στην ενότητα 3.4.3.1. Τα αποτελέσματα για το διαμήκη άνεμο X είναι ίδια με εκείνα για τον εγκάρσιο άνεμο Y (Πίνακας 3.7)

Συντελεστές δύναμης

Ο υπολογισμός των συντελεστών δύναμης γίνεται όπως στην ενότητα 3.4.3.1. Ο Πίνακας 3.10 παρουσιάζει τους συντελεστές δύναμης για τα μέλη της γέφυρας στην περίπτωση ανέμου κατά X.

Πίνακας 3.10: Συντελεστής δύναμης μελών (διαμήκης άνεμος X)

	q_p (kN/m ²)	Re	$c_{f,0}$	ψ_l	c_f
Κατάστρωμα	1.102	-	1.30	-	1.30
Τόξα	1.213	2203025	0.79	0.87	0.69
Αναρτήρες 1	1.213	494359	0.80	0.8	0.64
Αναρτήρες 2	1.213	494359	0.80	0.86	0.69
Αναρτήρες 3	1.213	494359	0.80	0.89	0.72
Εγκάρσιοι Σύνδεσμοι	1.297	742550	0.80	0.89	0.72
Διαγώνιοι Σύνδεσμοι	1.297	511129	0.81	0.88	0.71

Φορτία ανέμου

Ο υπολογισμός των φορτίων ανέμου πραγματοποιείται όπως και στην ενότητα 3.4.3.1 αναλυτικά για το κάθε μέλος και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο τέλος (Πίνακας 3.11).

Κατάστρωμα

Για το κατάστρωμα θεωρείται ότι κατά τη διαμήκη διεύθυνση ασκείται το 25% της εγκάρσιας φόρτισης του ανέμου. Οπότε:

$$f_{w,κατ} = 0.25 \cdot f_{w,κατ,y} = 0.25 \cdot 6.96 \text{ kN/m} = 1.74 \text{ kN/m}$$

Τόξα

Για τα τόξα υπολογίζεται απευθείας το κατανεμημένο φορτίο

$$f_{w,τοξ} = c_{f,τοξ} \cdot q_{p,τοξ} \cdot b_{τοξ} = 0.69 \cdot 1.213 \cdot 0.75 = 0.63 \text{ kN/m}$$

Αναρτήρες

Όμοια

$$f_{w,αν,1} = c_{f,αν,1} \cdot q_{p,τοξ} \cdot b_{αν,1} = 0.64 \cdot 1.213 \text{ kN/m}^2 \cdot 0.1683 \text{ m} = 0.13 \text{ kN/m}$$

$$f_{w,αν,2} = c_{f,αν,2} \cdot q_{p,τοξ} \cdot b_{αν,2} = 0.69 \cdot 1.213 \text{ kN/m}^2 \cdot 0.1683 \text{ m} = 0.14 \text{ kN/m}$$

$$f_{w,αν,3} = c_{f,αν,3} \cdot q_{p,τοξ} \cdot b_{αν,3} = 0.72 \cdot 1.213 \text{ kN/m}^2 \cdot 0.1683 \text{ m} = 0.15 \text{ kN/m}$$

Διαγώνιοι σύνδεσμοι

Όμοια

$$f_{w,δ,σ} = c_{f,δ,σ} \cdot q_{p,συνδ} \cdot b_{δ,σ} = 0.71 \cdot 1.297 \text{ kN/m}^2 \cdot 0.1683 \text{ m} = 0.16 \text{ kN/m}$$

Εγκάρσιοι σύνδεσμοι

Όμοια

$$f_{w,ε,σ} = c_{f,ε,σ} \cdot q_{p,συνδ} \cdot b_{ε,σ} = 0.72 \cdot 1.297 \text{ kN/m}^2 \cdot 0.2445 \text{ m} = 0.23 \text{ kN/m}$$

Πίνακας 3.11: Ασκούμενες δυνάμεις διαμήκους ανέμου X

Μέλος	f_w (kN/m)
Κατάστρωμα	1.74
Τόξα	0.63
Αναρτήρες 1	0.13
Αναρτήρες 2	0.14
Αναρτήρες 3	0.15
Εγκάρσιοι σύνδεσμοι	0.23
Διαγώνιοι σύνδεσμοι	0.16

3.4.3.3 Κατακόρυφα φορτία ανέμου Z

Η πορεία υπολογισμού των κατακόρυφων φορτίων ανέμου είναι όμοια με αυτήν των εγκάρσιων που αναπτύχθηκε αναλυτικά στην ενότητα 3.4.3.1.

Πιέσεις ταχύτητας αιχμής

Οι πιέσεις ταχύτητας αιχμής που υπολογίστηκαν είναι ίδιες με αυτές του εγκάρσιου ανέμου Y, αφού δε μεταβάλλεται κάποιο από τα δεδομένα εισόδου (Πίνακας 3.5)

Συντελεστές επίδρασης άκρων

Για τους συντελεστές επίδρασης άκρων ισχύουν όσα αναλύθηκαν στην ενότητα 3.4.3.1 (Πίνακας 3.7).

Συντελεστές δύναμης

Στην περίπτωση του κατακόρυφου ανέμου ο συντελεστής δύναμης του καταστρώματος, μπορεί να λαμβάνεται ίσος με 0.90. Για τους συντελεστές δύναμης των άλλων μελών ισχύουν όσα αναπτύχθηκαν στην ενότητα 3.4.3.1. Ο Πίνακας 3.12 παρουσιάζει τις τιμές του συντελεστή δύναμης για τα μέλη της γέφυρας στην περίπτωση κατακόρυφων φορτίων ανέμου.

Πίνακας 3.12: Συντελεστές δύναμης μελών (κατακόρυφος άνεμος Z)

	q_p (kN/m ²)	Re	$c_{f,0}$	Ψ_λ	c_f
Κατάστρωμα	1.102	-	0.90	-	0.90
Τόξα	1.213	2203025	0.79	0.87	0.69
Εγκάρσιοι Σύνδεσμοι	1.297	742550	0.80	0.89	0.72
Διαγώνιοι Σύνδεσμοι	1.297	511129	0.81	0.88	0.71

Φορτία ανέμου

Ο υπολογισμός των φορτίων ανέμου πραγματοποιείται όπως και στην ενότητα 3.4.3.1 αναλυτικά για το κάθε μέλος και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στο τέλος (Πίνακας 3.13).

Κατάστρωμα

Η επιφάνεια αναφοράς του καταστρώματος στην περίπτωση κατακόρυφων φορτίων ανέμου είναι ίση με την επιφάνεια της κάτοψης:

$$A_{ref}=b \cdot L=14.7m \cdot 43.3m=636.51 \text{ m}^2$$

Η συνολική δύναμη του κατακόρυφου ανέμου που ασκείται στο κατάστρωμα δίνεται από τη σχέση:

$$F_{w,κατ}=c_{f,κατ} \cdot q_{p,κατ} \cdot A_{ref}=0.90 \cdot 1.102 \text{ kN/m}^2 \cdot 636.51 \text{ m}^2=631.29 \text{ kN}$$

Η δύναμη αυτή λαμβάνεται με εκκεντρότητα:

$$e=\frac{b}{4}=\frac{14.7m}{4}=3.675m$$

Το αντίστοιχο ισοδύναμο ομοιόμορφο φορτίο είναι $q=1.98 \text{ kN/m}^2$, το οποίο ασκείται στο μισό πλάτος της γέφυρας.

Τόξα

Για τα τόξα υπολογίζεται απευθείας το κατανεμημένο φορτίο

$$f_{w,τοξ} = c_{f,τοξ} \cdot q_{p,τοξ} \cdot b_{τοξ} = 0.69 \cdot 1.213 \cdot 0.75 = 0.63 \text{ kN/m}$$

Διαγώνιοι σύνδεσμοι

Όμοια

$$f_{w,\delta,\sigma} = c_{f,\delta,\sigma} \cdot q_{p,\sigma\text{υν}\delta} \cdot b_{\delta,\sigma} = 0.71 \cdot 1.297 \text{ kN/m}^2 \cdot 0.1683 \text{ m} = 0.16 \text{ kN/m}$$

Εγκάρσιοι σύνδεσμοι

Όμοια

$$f_{w,\epsilon,\sigma} = c_{f,\epsilon,\sigma} \cdot q_{p,\sigma\text{υν}\delta} \cdot b_{\epsilon,\sigma} = 0.72 \cdot 1.297 \text{ kN/m}^2 \cdot 0.2445 \text{ m} = 0.23 \text{ kN/m}$$

Πίνακας 3.13: Ασκούμενες δυνάμεις κατακόρυφου ανέμου Z

Μέλος	Φορτίο
Κατάστρωμα	1.98 kN/m ²
Τόξα	0.63 kN/m
Εγκάρσιοι σύνδεσμοι	0.23 kN/m
Διαγώνιοι σύνδεσμοι	0.16 kN/m

3.5 Συνδυασμοί φόρτισης

Με βάση τα φορτία που υπολογίστηκαν στις προηγούμενες ενότητες δημιουργήθηκαν οι τρεις παρακάτω συνδυασμοί φόρτισης, οι οποίοι αναφέρονται στην οριακή κατάσταση αστοχίας.

Μόνιμα + Κινητά + Άνεμος Y	1.35G+1.35Q+0.90W _y
Μόνιμα + Κινητά + Άνεμος X	1.35G+1.35Q+0.90W _x
Μόνιμα + Κινητά + Άνεμος Z	1.35G+1.35Q+0.90W _z

Σε κάθε συνδυασμό εμφανίζονται τα μόνιμα και τα κινητά φορτία με συντελεστές, $\gamma_G=1.35$ και $\gamma_Q=1.35$, οι οποίοι αντιστοιχούν σε δυσμενή επίδραση. Επίσης σε κάθε συνδυασμό εμφανίζεται και το φορτίο του ανέμου σε μία από τις τρεις διευθύνσεις. Για το εκάστοτε φορτίο ανέμου ελήφθη συντελεστής συνδυασμού $\psi_0=0.6$, που αντιστοιχεί σε φορτίο διαρκείας και $\gamma_Q=1.50$, το οποίο αναφέρεται σε δυσμενή επίδραση.

Για τη φόρτιση της γέφυρας, όπως ήδη αναφέρθηκε, δεν πραγματοποιήθηκαν δυσμενείς φορτίσεις. Τα φορτία, όπως υπολογίστηκαν στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου, εισάγονται στους παραπάνω συνδυασμούς φόρτισης και εξετάζεται η επιρροή της κάθε φόρτισης στα μέλη της γέφυρας. Στη συνέχεια της εργασίας, οι παραπάνω συνδυασμοί φόρτισης αναφέρονται και ως εγκάρσιος άνεμος (ο πρώτος συνδυασμός), διαμήκης άνεμος (ο δεύτερος συνδυασμός) και κατακόρυφος άνεμος (ο τρίτος συνδυασμός).

4 ΜΕΘΟΔΟΣ M1

4.1 Γενικά

Η πρώτη μέθοδος με την οποία επιλέγεται να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος των στοιχείων της γέφυρας είναι η μέθοδος M1, η οποία παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 1. Στο πλαίσιο της μεθόδου απαιτείται στατική ανάλυση 1^{ης} τάξης χωρίς ατέλειες για τον υπολογισμό των εντατικών μεγεθών. Επίσης, είναι απαραίτητη η γραμμική ανάλυση λυγισμού, προκειμένου να υπολογιστούν τα κρίσιμα φορτία και οι ιδιομορφές λυγισμού.

Μετά τη στατική ανάλυση πραγματοποιήθηκαν οι έλεγχοι επάρκειας των δομικών στοιχείων του φορέα. Σύμφωνα με τη μέθοδο M1 απαιτείται να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος της διατομής και ο έλεγχος του μέλους για λυγισμό εκτός επιπέδου. Ο έλεγχος των διατομών πραγματοποιήθηκε με βάση την πλαστική αντοχή της κάθε διατομής, αφού όλες οι διατομές προέκυψαν κατηγορία 1. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις γραμμικής αλληλεπίδρασης. Η σχέση (4.1) αναφέρεται στις κοίλες κυκλικές διατομές και η σχέση (4.2) στη διατομή των κύριων δοκών και των διαδοκίδων, που είναι η HEB 900.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rk}} \leq 1 \quad (4.1)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} + \frac{B_{Ed}}{B_{Rk}} \leq 1 \quad (4.2)$$

Για τον έλεγχο μέλους σε κάμψη και θλίψη στις κοίλες κυκλικές διατομές υπολογίστηκε η μέγιστη ροπή του μέλους ως η συνισταμένη ροπή των δύο διανυσμάτων M_y και M_z και για την εκτός επιπέδου διεύθυνση λυγισμού πραγματοποιήθηκε έλεγχος με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.3)$$

Τέλος, για τον έλεγχο μέλους στις διαδοκίδες (HEB 900) και τις κύριες δοκούς (HEB 900) χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση γραμμικής αλληλεπίδρασης, η οποία βρίσκεται στο παράρτημα C του νέου Ευρωκώδικα 3.

$$\frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1} \cdot \frac{X_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\gamma_{M1} \cdot \frac{X_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1} \cdot \frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{B_{Ed}}{\gamma_{M1} \cdot \frac{B_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (4.4)$$

Επισημαίνεται ότι επειδή πρόκειται για γέφυρα, οι συντελεστές ασφαλείας ελήφθησαν $\gamma_{M0}=1.00$ και $\gamma_{M1}=1.10$, όπως ορίζονται στο EN 1993-2, που αναφέρεται στις σιδηρές γέφυρες. Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται η εφαρμογή της μεθόδου M1 για όλα τα μέλη της γέφυρας και υπολογίζονται οι αντίστοιχοι βαθμοί αξιοποίησης με βάση τις παραπάνω σχέσεις. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται αναλυτικά για τον εγκάρσιο άνεμο Y (συνδυασμός φόρτισης 1), ενώ για το διαμήκη X (συνδυασμός φόρτισης 2) και τον κατακόρυφο Z (συνδυασμός φόρτισης 3) απλά παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα.

4.2 Έλεγχος τόξων

Η διατομή των τόξων είναι CHS 750x25. Η συγκεκριμένη διατομή είναι κατηγορία 1 αφού ικανοποιείται το παρακάτω κριτήριο:

$$\frac{d}{t} = \frac{750}{25} = 30 < 50\epsilon^2 = 33.1$$

Ακόμα, δεν απαιτείται να γίνει έλεγχος για διατμητική κύρτωση, αφού ικανοποιείται το κριτήριο του νέου κειμένου του Ευρωκώδικα:

$$\frac{d-t}{t} < 100 \cdot \epsilon^2$$

$$\frac{750-25}{25} = 29 < 66.2$$

Ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει τα πλαστικά μεγέθη αντοχής της διατομής των τόξων. Στους ελέγχους της διατομής των τόξων για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης δεν απαιτήθηκε απομείωση της ροπής κάμψης λόγω τέμνουσας. Ο κρίσιμος έλεγχος για τα δύο τόξα και στους τρεις συνδυασμούς φόρτισης ήταν ο έλεγχος του μέλους σε θλίψη και κάμψη, ο οποίος παρουσιάζεται στη συνέχεια αναλυτικά για την περίπτωση του εγκάρσιου ανέμου Y. Το μέλος που ελέγχεται είναι το δεξί τόξο, το οποίο παρουσίασε και το μεγαλύτερο βαθμό αξιοποίησης για την περίπτωση εγκάρσιου ανέμου.

Πίνακας 4.1: Πλαστικά μεγέθη αντοχής διατομής τόξων

$N_{pl,Rd}$ (kN)	20214.19
$M_{pl,Rd}$ (kNm)	4666.77
$M_{t,pl,Rd}$ (kNm)	4230.62
$V_{pl,Rd}$ (kN)	7429.78

Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού προέκυψαν οι ιδιομορφές λυγισμού εντός και εκτός επιπέδου και οι αντίστοιχοι συντελεστές φόρτισης (Σχήμα 4.1, Σχήμα 4.2, Σχήμα 4.3). Το διάγραμμα της πρώτης ιδιομορφής λυγισμού έχει συνιστώσες και προς τις τρεις διευθύνσεις σε αντίθεση με εκείνο της δεύτερης, το οποίο αναφέρεται σε ιδιομορφή λυγισμού εκτός επιπέδου. Για τον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου λυγισμού, το οποίο απαιτείται για την πραγματοποίηση του ελέγχου του μέλους για λυγισμό εκτός επιπέδου, χρησιμοποιήθηκε η πρώτη ιδιομορφή με $\alpha_{cr}=16.57$, γιατί σε αυτήν εμφανίζονται σημαντικές μετακινήσεις εκτός

επιπέδου. Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για το δεξιό τόξο, που είναι κρίσιμο στην περίπτωση εγκάρσιου ανέμου είναι:

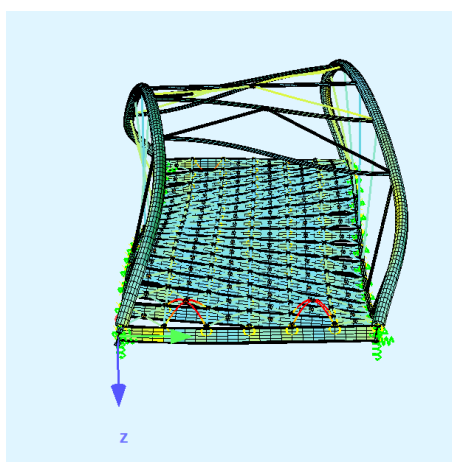
$$N_{cr} = \alpha_{cr} \cdot N_{Ed} = 16.57 \cdot 4962.77 \text{ kN} = 82233.10 \text{ kN}$$

Όπου $N_{Ed} = 4962.77 \text{ kN}$ είναι η μέγιστη αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στη βάση του δεξιού τόξου.

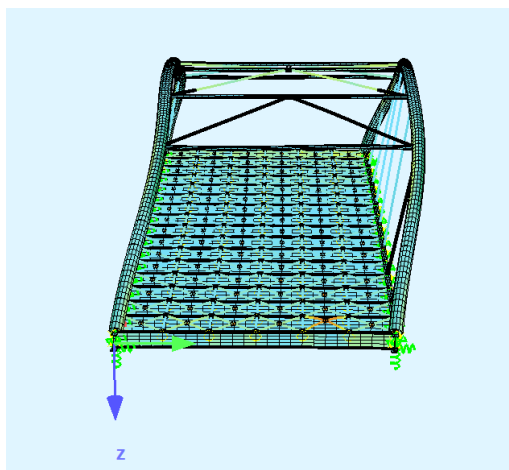
Για τους άλλους δύο συνδυασμούς φόρτισης, με φορτία ανέμου κατά X και κατά Z, οι ιδιομορφές λυγισμού των τόξων έχουν την ίδια μορφή, όπως του εγκάρσιου ανέμου Y. Ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει τα κρίσιμα φορτία λυγισμού των τόξων για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης. Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα, η φορά των φορτίων ανέμου δεν έχει ουσιαστική επίδραση στις τιμές των κρίσιμων φορτίων λυγισμού.

Πίνακας 4.2: Κρίσιμα φορτία λυγισμού τόξων για κάθε συνδυασμό φόρτισης

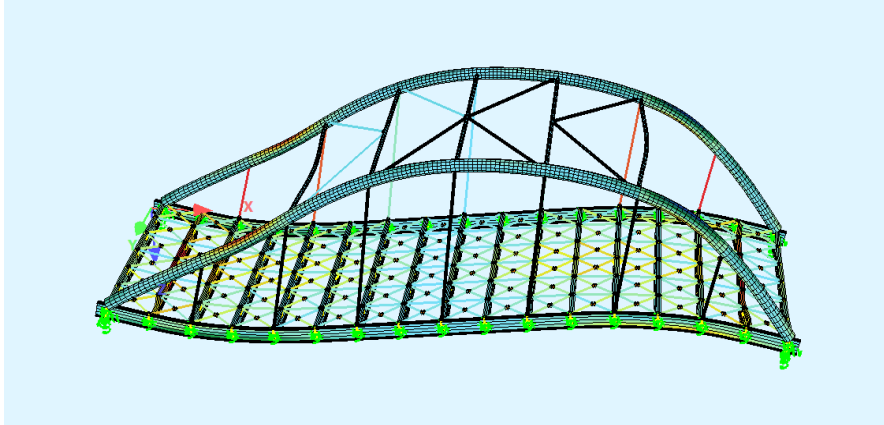
Συνδυασμός φόρτισης	α_{cr}	Αριστερό τόξο - N_{cr} (kN)	Δεξιό τόξο - N_{cr} (kN)
Άνεμος Y	16.57	81876.18	82233.10
Άνεμος X	16.70	82951.74	82951.74
Άνεμος Z	15.84	80296.60	83083.65



Σχήμα 4.1: Πρώτη ιδιομορφή λυγισμού τόξου $\alpha_{cr} = 16.57$ (εγκάρσιος άνεμος Y)

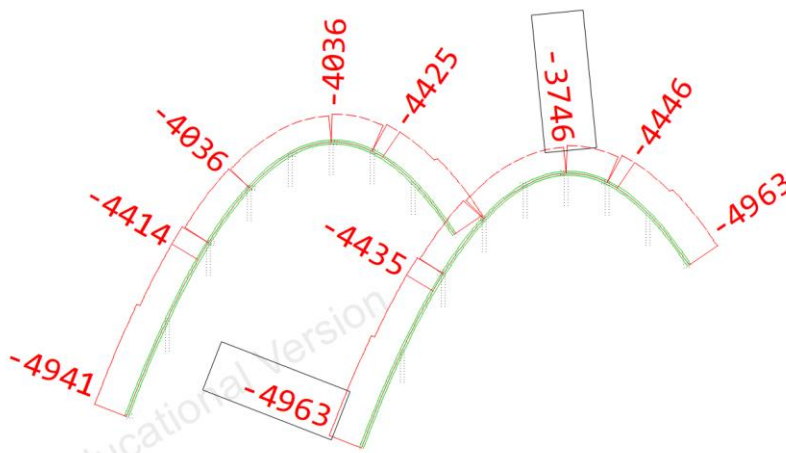


Σχήμα 4.2: Δεύτερη ιδιομορφή λυγισμού τόξου $\alpha_{cr} = 17.25$ (εγκάρσιος άνεμος Y)

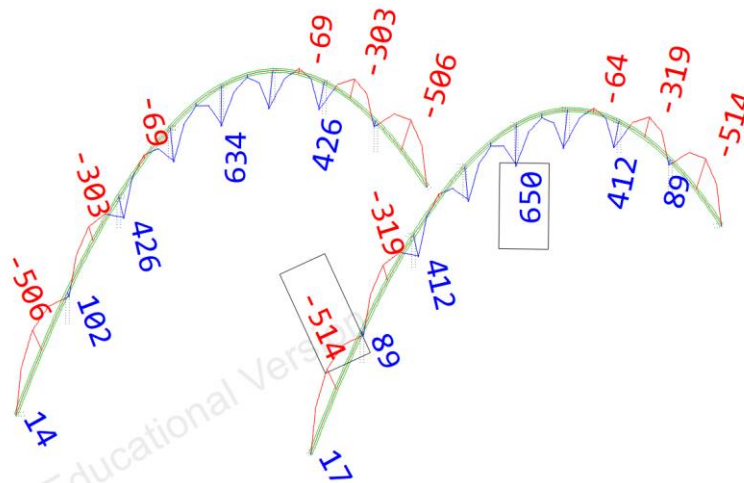


Σχήμα 4.3: Ιδιομορφή λυγισμού εντός επιπέδου τόξου $\alpha_{cr} = 35.08$ (εγκάρσιος άνεμος Y)

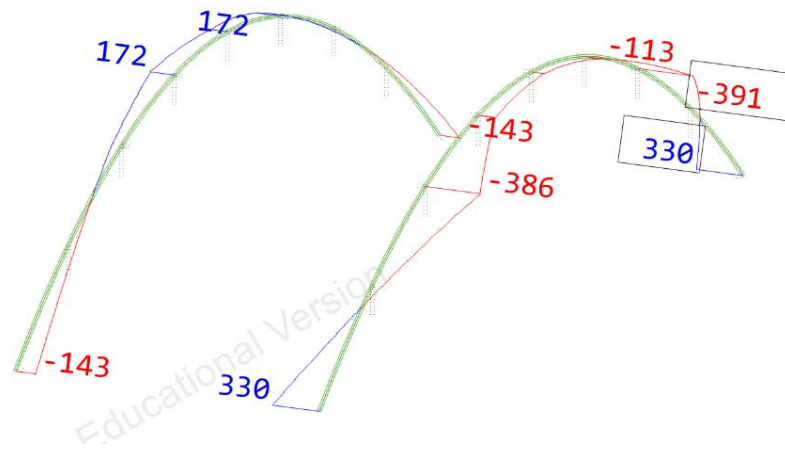
Με γνωστά τα κρίσιμα φορτία λυγισμού είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος του μέλους σε κάμψη και θλίψη σύμφωνα με τη σχέση (4.3). Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων και ροπών κάμψης των τόξων για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης. Ο Πίνακας 4.3 παρουσιάζει τα μέγιστα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στο δεξιό τόξο για την περίπτωση εγκάρσιου ανέμου Y, με τα οποία πραγματοποιείται ο έλεγχος του μέλους.



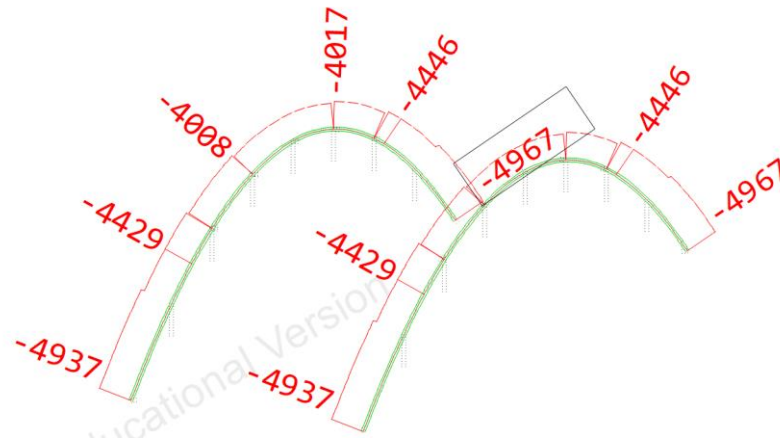
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N τόξων (άνεμος Y)



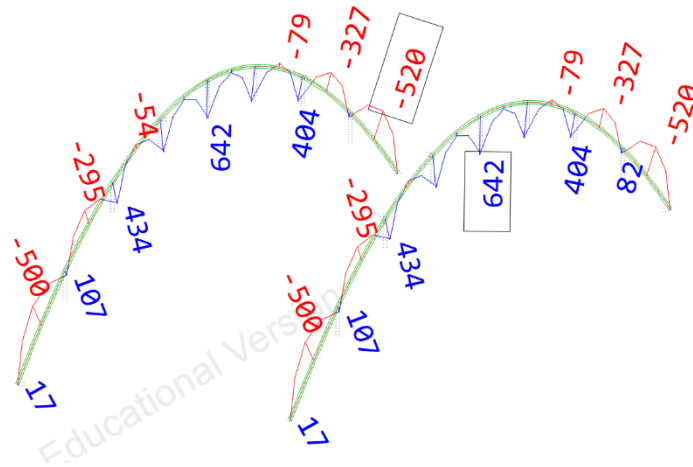
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y τόξων (άνεμος Y)



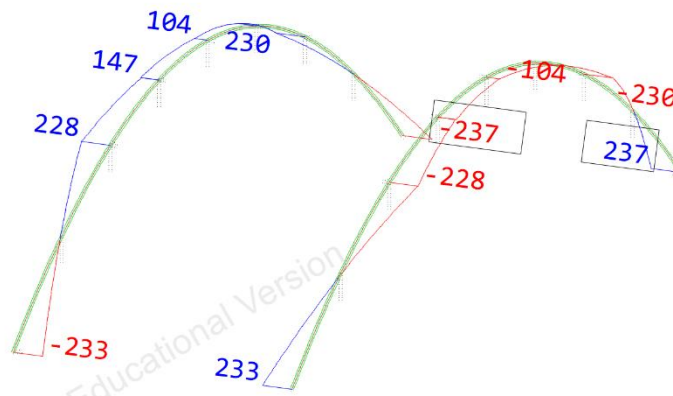
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z τόξων (άνεμος Y)



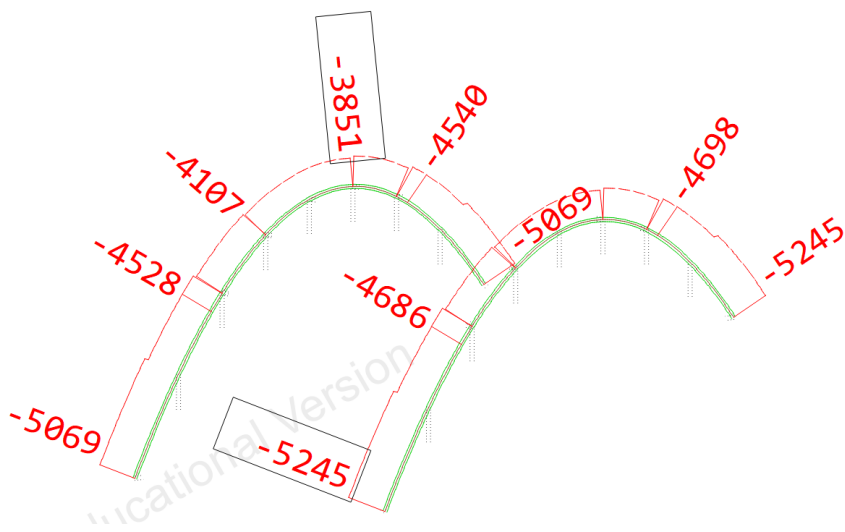
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N τόξων (άνεμος X)



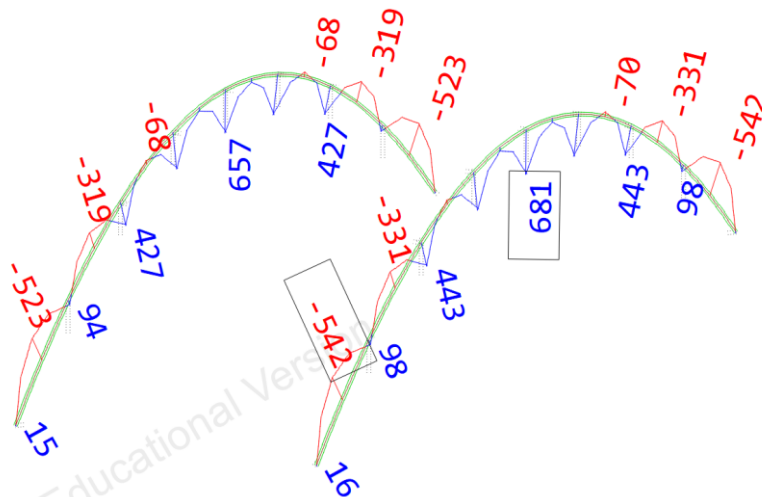
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα ροπών κάμψη M_y τόξων (άνεμος X)



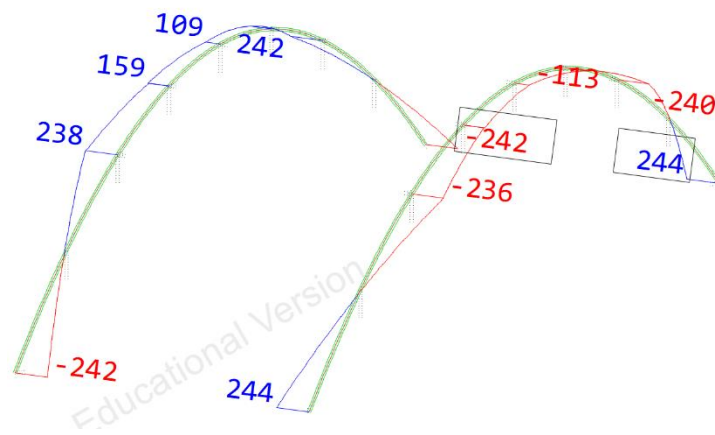
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z τόξων (άνεμος X)



Σχήμα 4.10: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N τόξων (άνεμος Z)



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y τόξων (άνεμος Z)



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z τόξων (άνεμος Z)

Πίνακας 4.3: Εντατικά μεγέθη δεξιού τόξο (άνεμος Y)

N_{Ed} (kN)	-4962.77
$M_{y,Ed}$ (kNm)	649.69
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-88.58
M_{Ed} (kNm)	655.70

Η ανηγμένη λυγηρότητα του μέλους για καμπτικό λυγισμό είναι:

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{N_{pl,Rd}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{20214.19}{82233.10}} = 0.496$$

Η διατομή είναι ψυχρής έλασης οπότε η καμπύλη λυγισμού είναι η c με αντίστοιχο συντελεστή ατελειών $\alpha = 0.49$.

$$\Phi_z = 0.5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0.5 \cdot [1 + 0.49 \cdot (0.496 - 0.2) + 0.496^2] = 0.695$$

Η τιμή του μειωτικού συντελεστή χ_z είναι:

$$\chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0.695 + \sqrt{0.695^2 - 0.496^2}} = 0.845$$

Η διατομή των τόξων είναι κοίλη κυκλική, η οποία δεν είναι ευαίσθητη σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Για αυτόν το λόγο η τιμή του συντελεστή ατελειών για στρεπτοκαμπτικό λυγισμό χ_{LT} λαμβάνεται ίση με τη μονάδα, δηλαδή:

$$\chi_{LT} = 1$$

Η διατομή των τόξων καταπονείται από ροπές M_y και M_z . Επειδή, όμως, η διατομή είναι κοίλη κυκλική οι ροπές αυτές συντίθεται σε μία, λαμβάνοντας το διανυσματικό τους άθροισμα. Ο συντελεστής ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα. Για $\bar{\lambda}_z < 1$ και για κοίλες διατομές προκύπτουν:

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{pl,Rd} / \gamma_{M1}} = \frac{4962.77}{0.845 \cdot 20214.19 / 1.10} = 0.319$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot (1 + (\bar{\lambda}_z - 0.2) \cdot n_z) = 1 \cdot (1 + (0.496 - 0.2) \cdot 0.319) = 1.094$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{4962.77}{0.845 \cdot 20214.19} + 1.094 \cdot \frac{655.70}{1 \cdot \frac{4666.77}{1.10}} = 0.489$$

Ο συντελεστής αξιοποίησης προέκυψε για το δεξιό τόξο ίσος με 0.489 στην περίπτωση του εγκάρσιου ανέμου Υ. Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 4.4 και Πίνακας 4.5) παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη, με τα οποία πραγματοποιείται ο έλεγχος, για τα δύο τόξα για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης μαζί με τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης.

Πίνακας 4.4: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης αριστερού τόξου (υπ' αριθμόν 1) για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης

	Άνεμος Υ	Άνεμος Χ	Άνεμος Ζ
N_{Ed} (kN)	-4941.23	-4967.17	-5069.23
$M_{y,Ed}$ (kNm)	633.77	641.83	656.76
$M_{z,Ed}$ (kNm)	117.04	103.76	109.02
M_{Ed} (kNm)	644.49	650.16	665.75
Βαθμός αξιοποίησης	0.485	0.487	0.500

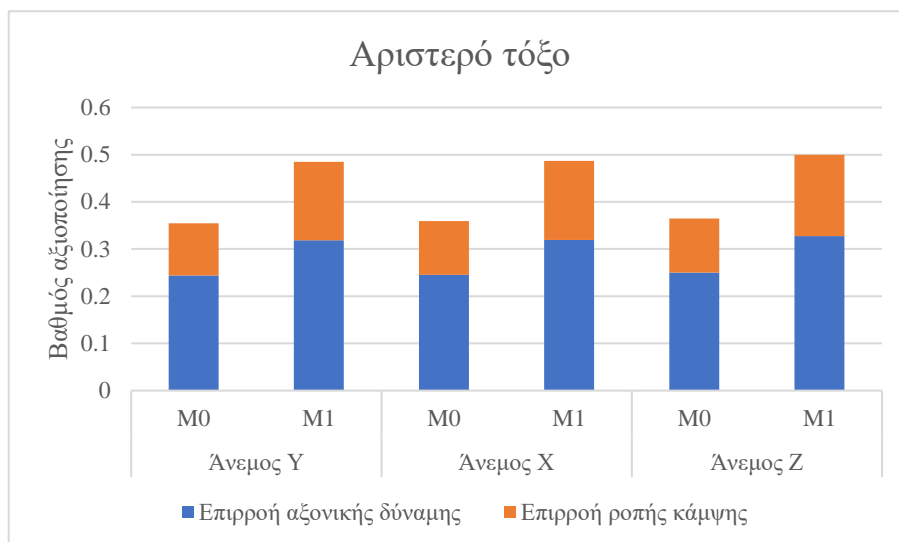
Πίνακας 4.5: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης δεξιού τόξου (υπ' αριθμόν 2) για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης

	Άνεμος Υ	Άνεμος Χ	Άνεμος Ζ
N_{Ed} (kN)	-4962.77	-4967.17	-5245.18
$M_{y,Ed}$ (kNm)	649.69	641.83	680.95
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-88.58	-103.76	-113.13
M_{Ed} (kNm)	655.70	650.16	690.28
Βαθμός αξιοποίησης	0.489	0.487	0.516

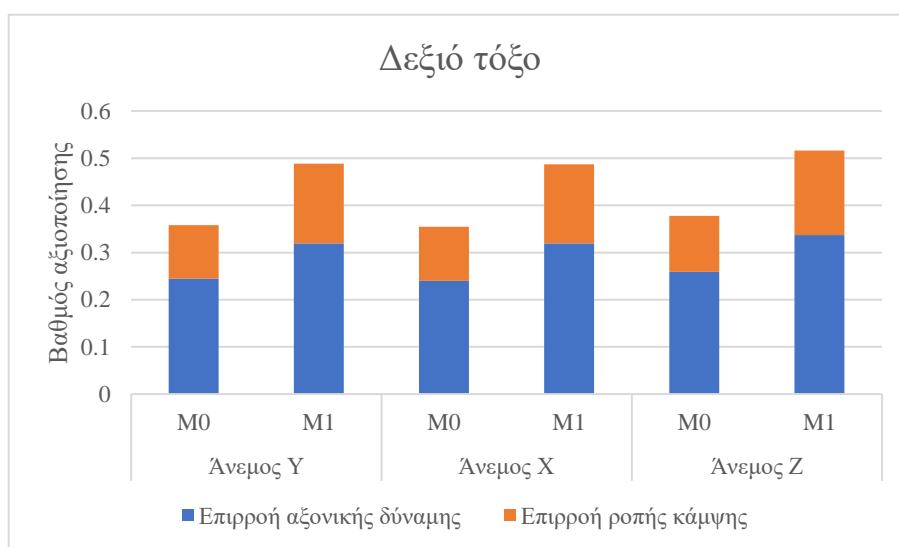
Συνοψίζοντας, ο κρίσιμος έλεγχος και για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης ήταν ο έλεγχος του μέλους σε κάμψη και θλίψη με τον αντίστοιχο βαθμό αξιοποίησης να είναι σχετικά χαμηλός. Επίσης, ανεξάρτητα από τη φορά του ασκούμενου φορτίου ανέμου δεν υπάρχει ουσιαστική διαφορά τόσο στα κρίσιμα φορτία λυγισμού των τόξων όσο και στους βαθμούς αξιοποίησης.

Τέλος, παρουσιάζεται σε μορφή διαγράμματος ο βαθμός αξιοποίησης για τα τόξα. Στο Σχήμα 4.13 και στο Σχήμα 4.14 η κάθε στήλη αντιπροσωπεύει το βαθμό αξιοποίησης για τη μέθοδο M0, που αναφέρεται ουσιαστικά στον έλεγχο της διατομής και τη μέθοδο M1. Με μπλε χρώμα εμφανίζεται ο όρος της αξονικής δύναμης, ενώ με πορτοκαλί ο όρος της ροπής κάμψης. Οι βαθμοί αξιοποίησης, που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο M1 είναι μεγαλύτεροι, ενώ μεγαλύτερη είναι και η επιρροή τόσο της αξονικής δύναμης όσο και της ροπής κάμψης. Το πρώτο οφείλεται στο ότι στον έλεγχο μέλους με τη μέθοδο M1, λαμβάνονται υπόψη τα φαινόμενα 2^{ης} τάξης και η επιρροή της τοπικής ατέλειας μέσω των καμπυλών λυγισμού και του μειωτικού συντελεστή χ . Έτσι, παρόλο που η αξονική δύναμη, που χρησιμοποιείται κατά τον έλεγχο της διατομής και του μέλους δε διαφέρει ουσιαστικά, παρουσιάζεται αισθητή αύξηση της επιρροής της αξονικής δύναμης. Το δεύτερο οφείλεται στη σχέση ελέγχου του μέλους όπου συνδυάζεται η μέγιστη ροπή κάμψης με τη μέγιστη αξονική δύναμη και η απόκλιση οφείλεται στο ότι εμφανίζεται σε

διαφορετική διατομή η μέγιστη ροπή. Τέλος, στη σχέση ελέγχου του μέλους χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής ασφαλείας $\gamma_{M1}=1.1$, ενώ στη σχέση ελέγχου της διατομής ο $\gamma_{M0}=1.0$, κάτι που οδήγησε με τη σειρά του σε αύξηση των βαθμών αξιοποίησης. Σημειώνεται ότι οι βαθμοί αξιοποίησης παρουσίασαν μέση αύξηση ίση με 36.60%.



Σχήμα 4.13: Βαθμοί αξιοποίησης αριστερού τόξου



Σχήμα 4.14: Βαθμοί αξιοποίησης δεξιού τόξου

4.3 Έλεγχος κύριων δοκών

Για την κατάταξη των κύριων δοκών υπό διαξονική κάμψη θεωρείται επί το δυσμενέστερο ότι ο κορμός βρίσκεται υπό καθαρή κάμψη και το πέλμα υπό καθαρή θλίψη. Σε αυτήν την περίπτωση η διατομή HEB 900 είναι κατηγορία 1.

Επίσης, προκειμένου να απαιτείται έλεγχος σε διατμητική κύρτωση θα πρέπει:

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \cdot \frac{\epsilon}{\eta}$$

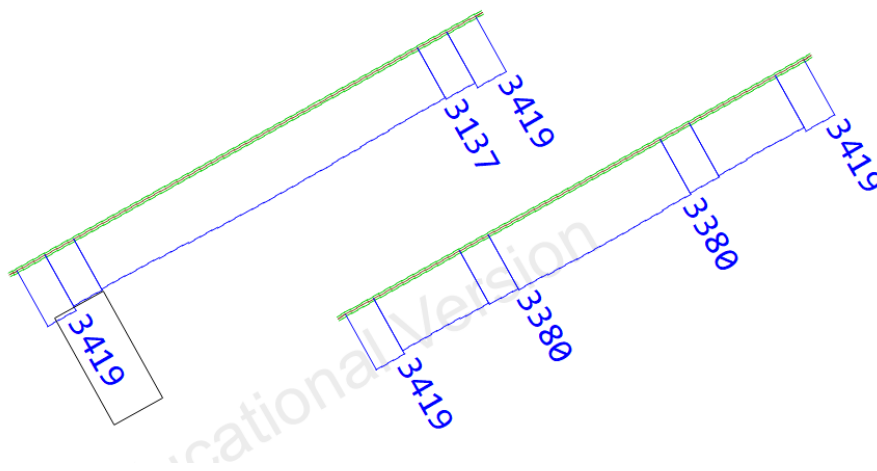
Για τις κύριες δοκούς ισχύει:

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{830}{18.5} = 44.9 < 72 \cdot \frac{0.81}{1.2} = 48.6$$

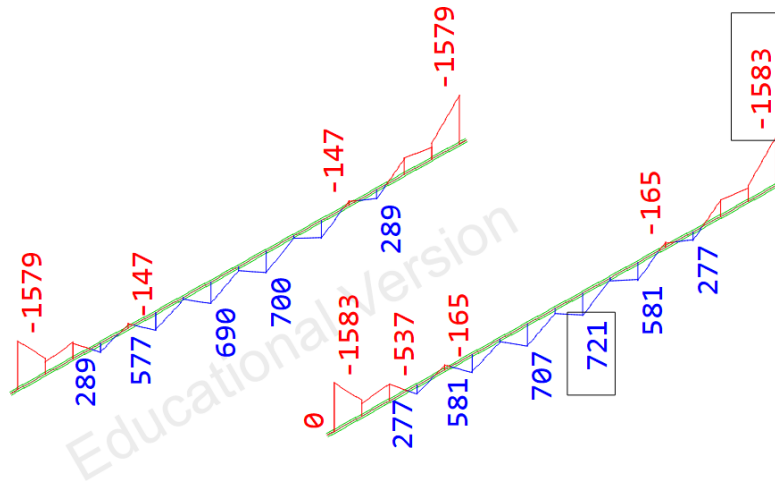
Επομένως, δεν απαιτείται να πραγματοποιηθεί έλεγχος σε διατμητική κύρτωση για τις κύριες δοκούς. Το ίδιο ισχύει και τις διαδοκίδες, οι οποίες έχουν την ίδια διατομή ΗΕΒ 900. Κατά τον έλεγχο των κύριων δοκών για τα εγκάρσια φορτία ανέμου, προέκυψε κρίσιμος ο έλεγχος της διατομής της δεξιάς κύριας δοκού, ο οποίος παρουσιάζεται στη συνέχεια. Ο Πίνακας 4.6 παρουσιάζει τα πλαστικά μεγέθη αντοχής των κύριων δοκών. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων και ροπών κάμψης στις κύριες δοκούς για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης.

Πίνακας 4.6: Πλαστικά μεγέθη αντοχής διατομής κύριας δοκού

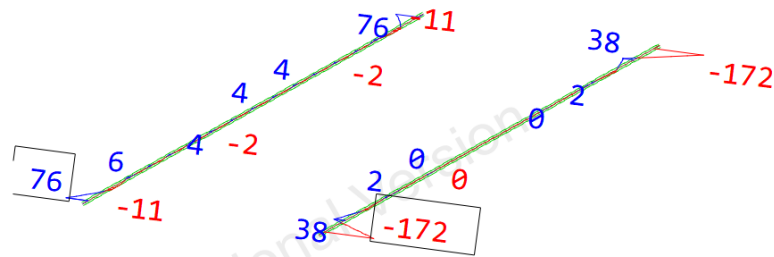
$N_{pl,Rd}$ (kN)	13181.15
$M_{y,pl,Rd}$ (kNm)	4465.90
$M_{z,pl,Rd}$ (kNm)	588.59
$B_{pl,Rd}$ (kNm ²)	241.82
$V_{z,pl,Rd}$ (kN)	3869.12
$V_{y,pl,Rd}$ (kN)	4304.15



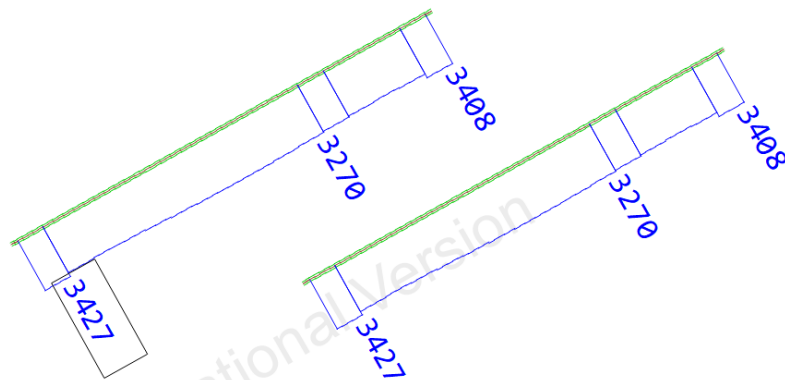
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N κύριων δοκών (άνεμος Y)



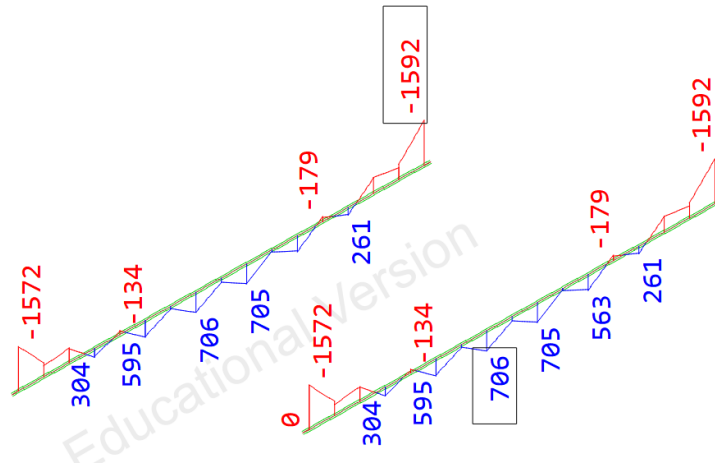
Σχήμα 4.16: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y κύριων δοκών (άνεμος Y)



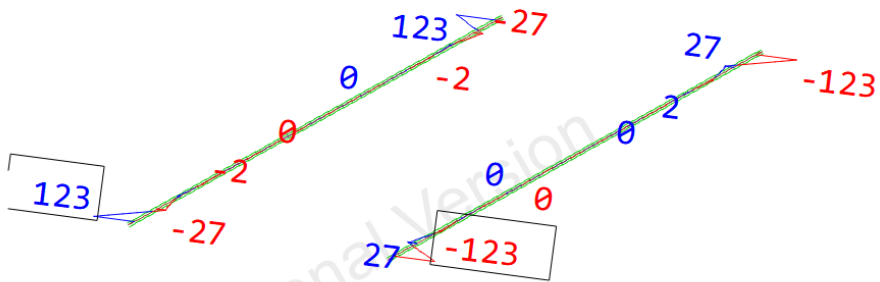
Σχήμα 4.17: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z κύριων δοκών (άνεμος Y)



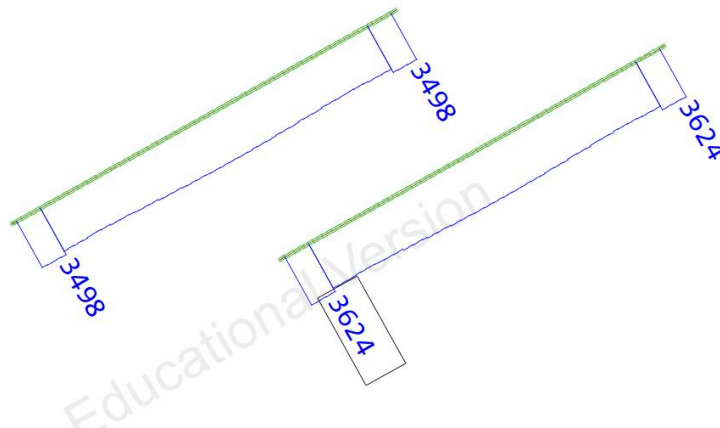
Σχήμα 4.18: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N κύριων δοκών (άνεμος X)



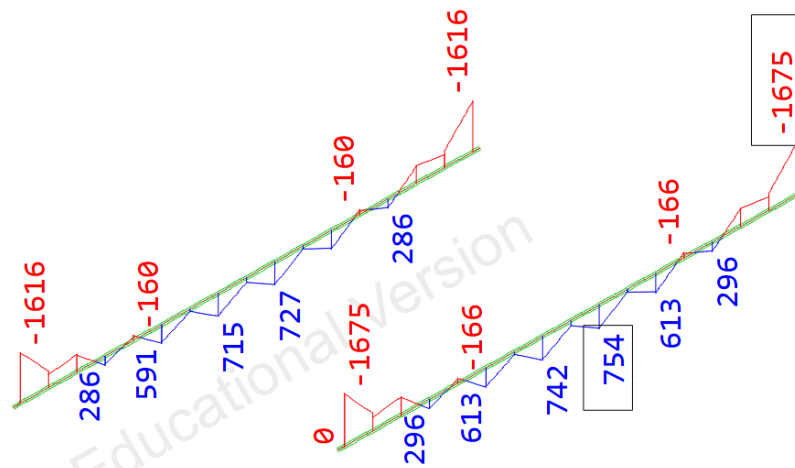
Σχήμα 4.19: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y κύριων δοκών (άνεμος X)



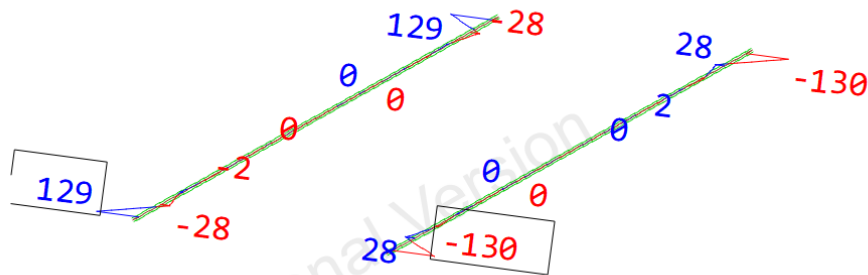
Σχήμα 4.20: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z κύριων δοκών (άνεμος X)



Σχήμα 4.21: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N κύριων δοκών (άνεμος Z)



Σχήμα 4.22: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y κύριων δοκών (άνεμος Z)



Σχήμα 4.23: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z κύριων δοκών (άνεμος Z)

Έλεγχος διατομής

Ο Πίνακας 4.7 παρουσιάζει τα εντατικά μεγέθη που ασκούνται στην κρίσιμη διατομή της δεξιάς κύριας δοκού, για την περίπτωση εγκάρσιας φόρτισης ανέμου.

Πίνακας 4.7: Εντατικά μεγέθη στην κρίσιμη διατομή της κύριας δοκού (άνεμος Y)

N_{Ed} (kN)	3418.79
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1582.65
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-172.05
B_{Ed} (kNm ²)	0.71
$V_{z,Ed}$ (kN)	410.66
$V_{y,Ed}$ (kN)	-80.14

Οι τέμνουσες που ασκούνται σε κάθε διεύθυνση είναι μικρότερες από το 50% της αντίστοιχης αντοχής σε τέμνουσα, οπότε δεν απαιτείται απομείωση της αντοχής σε κάμψη σε κάποια διεύθυνση.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,ed}}{M_{y,pl,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl,Rd}} + \frac{B_{Ed}}{B_{pl,Rd}} = \frac{3418.79}{13181.15} + \frac{1582.65}{4465.90} + \frac{172.05}{588.59} + \frac{0.71}{241.82} = 0.909$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω για τη δεξιά κύρια δοκό προέκυψε βαθμός αξιοποίησης 0.909. Ο

Πίνακας 4.8 και ο Πίνακας 4.9 παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στην κρίσιμη διατομή για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης μαζί με τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης για την αριστερή και τη δεξιά κύρια δοκό. Σε κάθε περίπτωση κρίσιμος ήταν ο έλεγχος της διατομής.

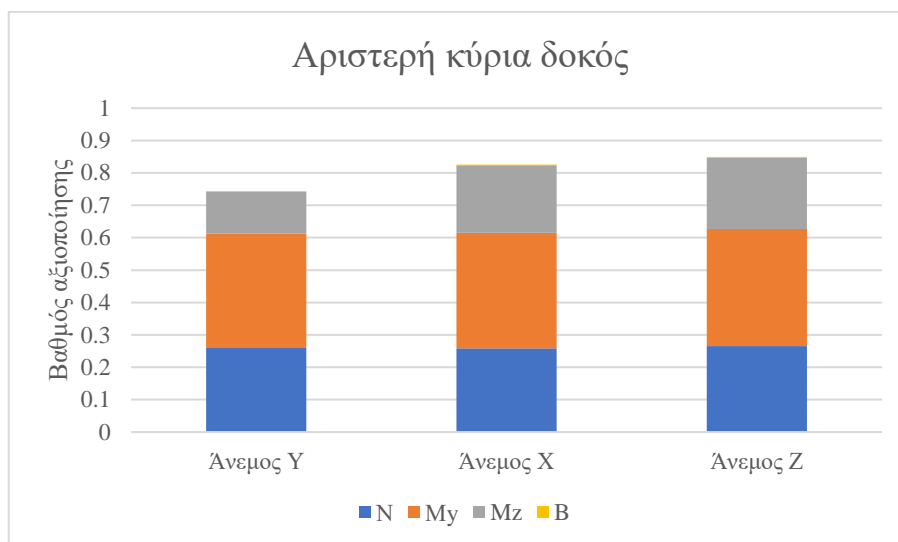
Πίνακας 4.8: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης

	Άνεμος Y	Άνεμος X	Άνεμος Z
N_{Ed} (kN)	3419.41	3407.96	3498.50
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1579.23	-1592.38	-1616.25
$M_{z,Ed}$ (kNm)	76.02	122.66	129.33
B_{Ed} (kNm ²)	-0.28	-0.49	-0.50
Βαθμός αξιοποίησης	0.743	0.826	0.849

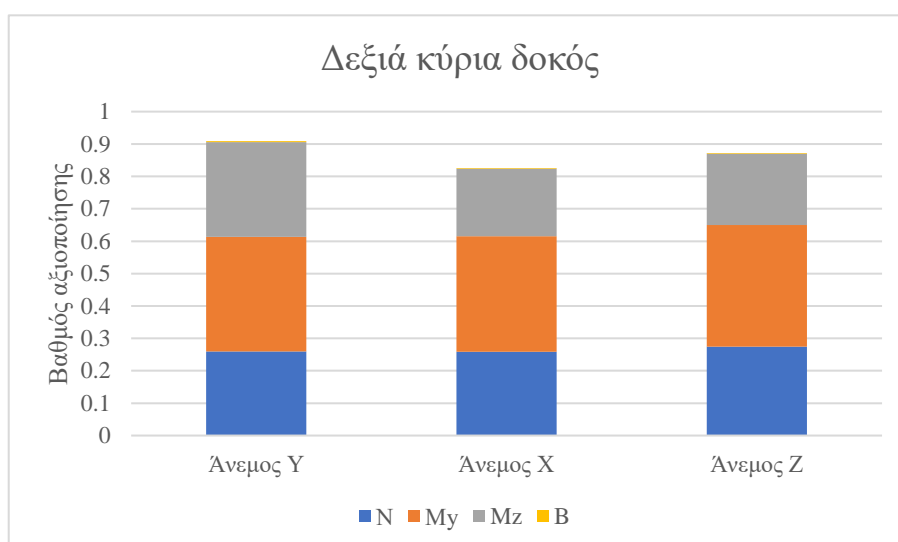
Πίνακας 4.9: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης

	Άνεμος Y	Άνεμος X	Άνεμος Z
N_{Ed} (kN)	3418.79	3407.96	3624.34
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1582.65	-1592.38	-1674.81
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-172.05	-122.66	-129.58
B_{Ed} (kNm ²)	0.71	0.49	0.51
Βαθμός αξιοποίησης	0.909	0.826	0.872

Τα παρακάτω σχήματα παρουσιάζουν τους βαθμούς αξιοποίησης για τη δεξιά και την αριστερή κύρια δοκό μαζί με την επιρροή των επιμέρους εντατικών μεγεθών, τα οποία είναι η αξονική δύναμη N , η ροπή κάμψης περί τον ισχυρό άξονα M_y , η ροπή κάμψης περί τον ασθενή άξονα M_z και το δίρροπο B . Ο όρος, που έχει τη μεγαλύτερη επιρροή είναι η ροπή περί τον ισχυρό άξονα, ενώ σημαντική είναι και η επιρροή της ροπής περί τον ασθενή άξονα. Αυτό συμβαίνει λόγω της έκκεντρης τοποθέτησης των τόξων πάνω στις κύριες δοκούς.



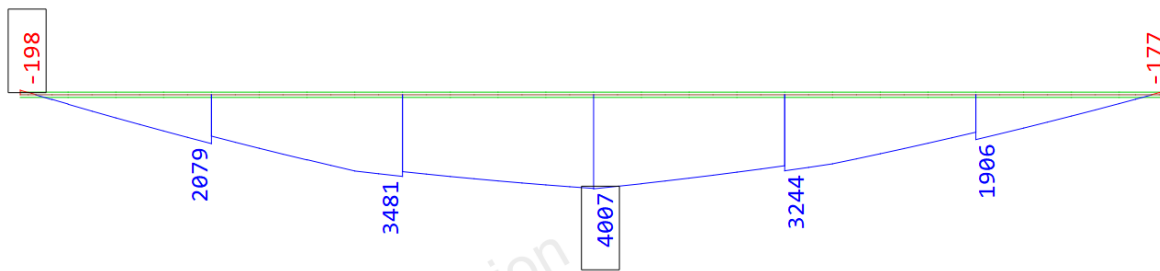
Σχήμα 4.24: Βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού (M1)



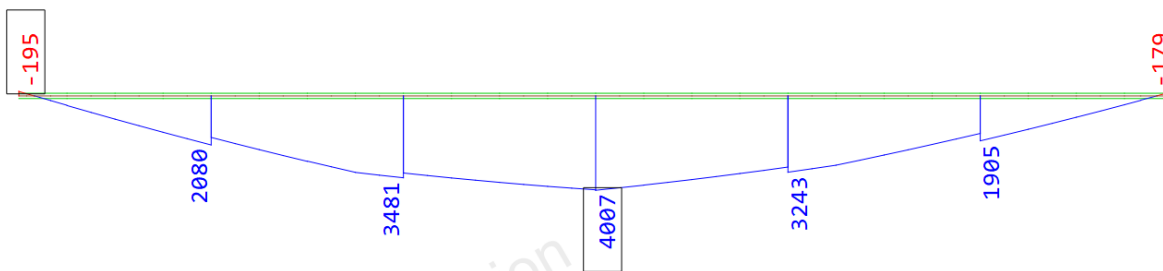
Σχήμα 4.25: Βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού (M1)

4.4 Έλεγχος διαδοκίδων

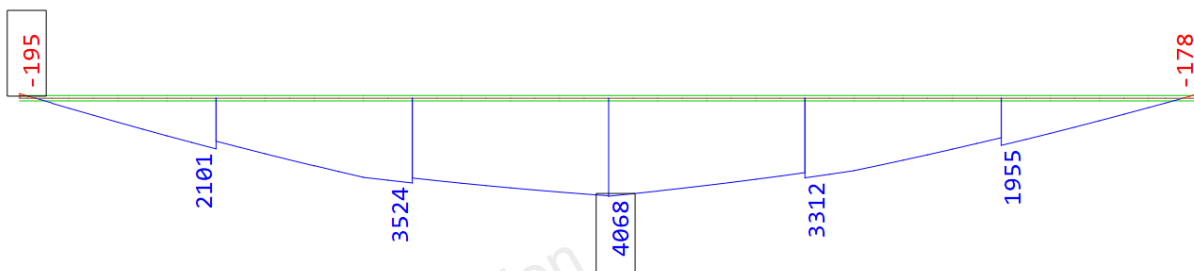
Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.3, για τον έλεγχο των διαδοκίδων θεωρήθηκε ότι τα συγκεντρωμένα φορτία ασκούνται με την πραγματική τους μορφή και όχι ως ισοδύναμο ομοιόμορφο φορτίο. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε για τη μεσαία διαδοκίδα της γέφυρας. Το κύριο εντατικό μέγεθος που αναπτύσσεται είναι η ροπή κάμψης περί τον ισχυρό άξονα M_y . Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροπών κάμψης M_y της μεσαίας διαδοκίδας για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά ο έλεγχος της μεσαίας διατομής και ο έλεγχος του μέλους για την περίπτωση εγκάρσιου ανέμου.



Σχήμα 4.26: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y μεσαίας διαδοκίδας (άνεμος Y)



Σχήμα 4.27: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y μεσαίας διαδοκίδας (άνεμος X)



Σχήμα 4.28: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y μεσαίας διαδοκίδας (άνεμος Z)

Έλεγχος διατομής

Ο Πίνακας 4.10 παρουσιάζει τα μέγιστα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στην κρίσιμη διατομή του μέσου για την περίπτωση φόρτισης με εγκάρσιο άνεμο.

Πίνακας 4.10: Εντατικά μεγέθη στην κρίσιμη διατομή (άνεμος Y)

N_{Ed} (kN)	1461.68
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4006.64
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.44
B_{Ed} (kNm ²)	-0.02
$V_{z,Ed}$ (kN)	-334.65
$V_{y,Ed}$ (kN)	0.03

Επειδή $V_{Ed} < 0.5 V_{pl,Rd}$ δεν απαιτείται απομείωση της αντοχής σε κάμψη λόγω τέμνουσας. Επομένως σύμφωνα με τη σχέση (4.2).

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,ed}}{M_{y,pl,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl,Rd}} + \frac{B_{Ed}}{B_{pl,Rd}} = \frac{1461.68}{13181.15} + \frac{4006.64}{4465.90} + \frac{0.44}{588.59} + \frac{0.02}{241.82} = 1.009$$

Έλεγχος μέλους

Τα μέγιστα εντατικά μεγέθη που αναπτύσσονται στη μεσαία διαδοκίδα για εγκάρσιο άνεμο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Τα εντατικά μεγέθη αναφέρονται στο τμήμα της διαδοκίδας δεξιά του μέσου, μεταξύ των δύο σημείων, που εξασφαλίζονται πλευρικά με τους χιαστί συνδέσμους.

Πίνακας 4.11: Εντατικά μεγέθη για τον έλεγχο μέλους (άνεμος Y)

N_{Ed} (kN)	1461.68
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4006.64
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.44
B_{Ed} (kNm ²)	-0.02

Κατά τον έλεγχο του μέλους αγνοείται η ευνοϊκή επίδραση της εφελκυστικής δύναμης, που ασκείται στη διαδοκίδα. Το μήκος της δοκού μεταξύ πλευρικά εξασφαλισμένων σημείων είναι 2.45m και ταυτόχρονα λαμβάνεται $k=k_w=1$. Τα φορτία θεωρείται ότι ασκούνται στην άνω ίνα της πλάκας σκυροδέματος σε απόσταση $z_g=0.8m$ από το κέντρο διάτμησης της δοκού.

Η ελαστική κρίσιμη ροπή δίνεται σε αυτήν την περίπτωση από την ακόλουθη σχέση [7]:

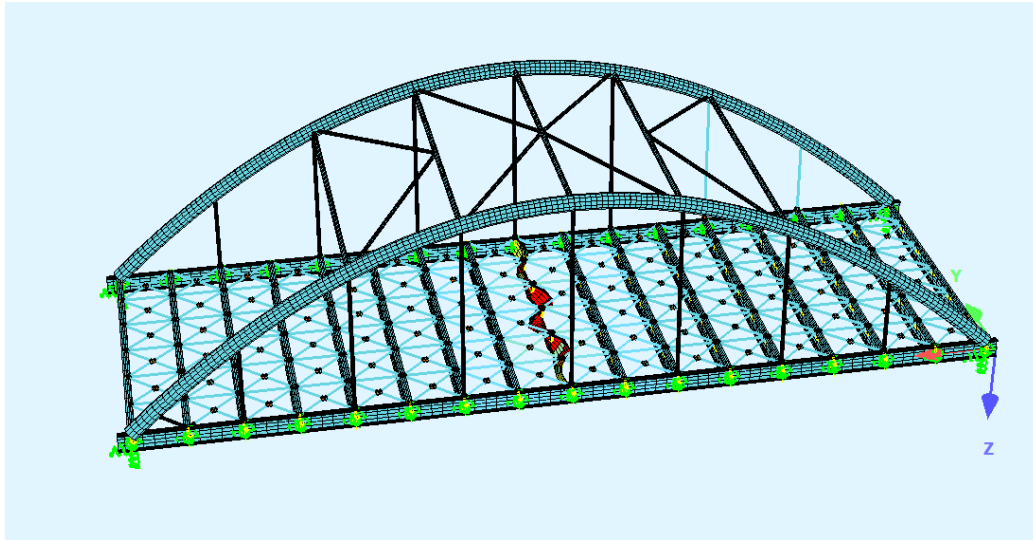
$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \cdot \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} \right]^{0.5}$$

Οι ακραίες τιμές του διαγράμματος ροπής M_y είναι 4006.64kNm και 3027.5kNm, οπότε προκύπτει $\psi=0.756$. Για την τιμή αυτή προκύπτει $C_1=1.158$ [7]. Τελικά:

$$M_{cr} = 1.158 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 15820}{245^2} \cdot \left[\frac{29460000}{15820} + \frac{(245)^2 \cdot 8077 \cdot 1137}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 15820} \right]^{0.5} = 2850256 \text{ kNcm} = 28502.56 \text{ kNm}$$

Η παραπάνω τιμή της κρίσιμης ροπής είναι υπολογισμένη αγνοώντας την επιρροή της εφελκυστικής δύναμης, η οποία εμφανίζεται λόγω των χιαστί συνδέσμων του καταστρώματος. Υπάρχει η δυνατότητα στο λογισμικό μέσα από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού να ληφθούν οι ιδιομορφές στρεπτοκαμπτικού λυγισμού της διαδοκίδας. Η ιδιομορφή στρεπτοκάμπτικού λυγισμού που προκύπτει παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.29 και αντιστοιχεί σε συντελεστή $\alpha_{cr}=9.04$. Η αντίστοιχη κρίσιμη ροπή είναι

$$M_{cr} = \alpha_{cr} \cdot M_{Ed} = 9.04 \cdot 4006.64 = 36220.03 \text{ kNm}$$



Σχήμα 4.29: Ιδιομορφή στρεπτοκαμπτικού λυγισμού μεσαίας διαδοκίδας- $\alpha_{cr}=9.04$ (άνεμος Y)

Η ελαστική κρίσιμη ροπή στρεπτοκαμπτικού λυγισμού που προκύπτει με αυτόν τον τρόπο είναι μεγαλύτερη κατά 27.07% σε σχέση με αυτήν που υπολογίστηκε μέσω της εξίσωσης. Η απόκλιση οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την εφαρμογή της αναλυτικής σχέσης αγνοήθηκε η επίδραση της εφελκυστικής δύναμης. Στη συνέχεια της εργασίας χρησιμοποιείται η αναλυτική σχέση για την εξαγωγή των κρίσιμων ελαστικών ροπών αγνόηση της εφελκυστικής δύναμης.

Η ανηγμένη λυγηρότητα σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό του μέλους δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl,Rd}}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{4465.90}{28502.56}} = 0.396 < \bar{\lambda}_{Lt,0} = 0.4$$

Η παραπάνω τιμή ανηγμένης λυγηρότητας είναι μικρότερη από την οριακή τιμή, που επιβάλλει το νέο κείμενο του Ευρωκώδικα 3, για την αγνόηση του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού. Επομένως, ο μειωτικός συντελεστής χ_{LT} λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα, δηλαδή:

$$\chi_{LT} = 1.0$$

Η αντοχή του μέλους σε πλευρικό λυγισμό είναι:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot \frac{M_{pl,Rd}}{\gamma_{M1}} = 1.0 \cdot \frac{4465.90}{1.10} = 4059.91 \text{ kNm}$$

Ο έλεγχος του μέλους γίνεται με τη βοήθεια της απλοποιητικής σχέσης γραμμικής αλληλεπίδρασης του παραρτήματος C του νέου Ευρωκώδικα (σχέση (4.4)), η οποία επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί, επειδή η διατομή είναι κατηγορία 1.

$$\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,pl,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,pl,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{B_{Ed}}{\frac{B_{pl,Rd}}{\gamma_{M1}}} = \frac{4006.64}{1.0 \cdot \frac{4465.90}{1.10}} + \frac{0.44}{\frac{588.59}{1.10}} + \frac{0.02}{\frac{241.82}{1.10}} = 0.988$$

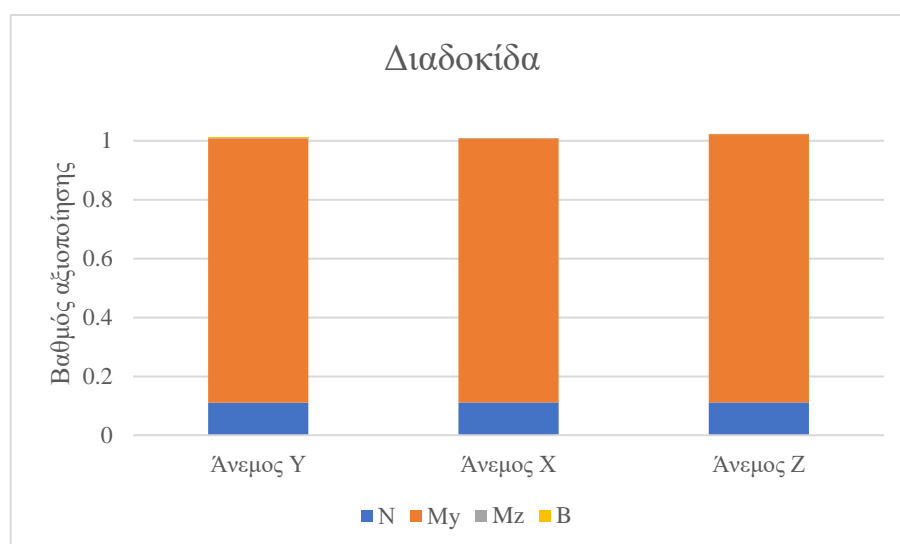
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι κρίσιμος στην περίπτωση του εγκάρσιου ανέμου είναι ο έλεγχος της διατομής με βαθμό αξιοποίησης ίσο με 1.009. Ο έλεγχος της διατομής του μέσου προέκυψε κρίσιμος και για τους άλλους δύο συνδυασμούς φόρτισης. Ο Πίνακας 4.12 παρουσιάζει τα εντατικά μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν στις σχέσεις ελέγχου καθώς και ο βαθμός αξιοποίησης του μέλους. Όπως φαίνεται οι βαθμοί αξιοποίησης είναι οριακά μεγαλύτεροι της μονάδας, που σημαίνει ότι η διαδοκίδα δεν επαρκεί. Αυτό οφείλεται στο

γεγονός ότι οι διαδοκίδες είχαν σχεδιαστεί σε προηγούμενη διπλωματική ([13]) λαμβάνοντας υπόψη τη σύμμικτη λειτουργία του καταστρώματος, κάτι που οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερη ροπή αντοχής σε σχέση με την αντοχή της μεταλλικής δοκού μόνο.

Πίνακας 4.12: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης μεσαίας διαδοκίδας για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης

	Άνεμος Y	Άνεμος X	Άνεμος Z
N_{Ed} (kN)	1461.68	1469.46	1474.50
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4006.64	4006.84	4067.90
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.44	0.47	0.44
B_{Ed} (kNm ²)	-0.02	-0.02	-0.02
Βαθμός αξιοποίησης	1.009	1.009	1.023

Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν τους βαθμούς αξιοποίησης για τη μεσαία διαδοκίδα για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης. Η κύρια καταπόνηση της διαδοκίδας είναι με ροπές κάμψης περί τον ισχυρό άξονα.



Σχήμα 4.30: Βαθμοί αξιοποίησης μεσαίας διαδοκίδας (M1)

4.5 Έλεγχος εγκάρσιων συνδέσμων τόξων

Η διατομή των εγκάρσιων συνδέσμων του τόξου είναι CHS 244.5x8. Η συγκεκριμένη διατομή είναι κατηγορία 1, αφού ικανοποιείται το παρακάτω κριτήριο:

$$\frac{d}{t} = \frac{244.5}{8} = 30.6 < 50\epsilon^2 = 33.1$$

Ακόμα, δεν απαιτείται να γίνει έλεγχος για διατμητική κύρτωση, αφού ικανοποιείται το κριτήριο του νέου κείμενου του Ευρωκώδικα 3:

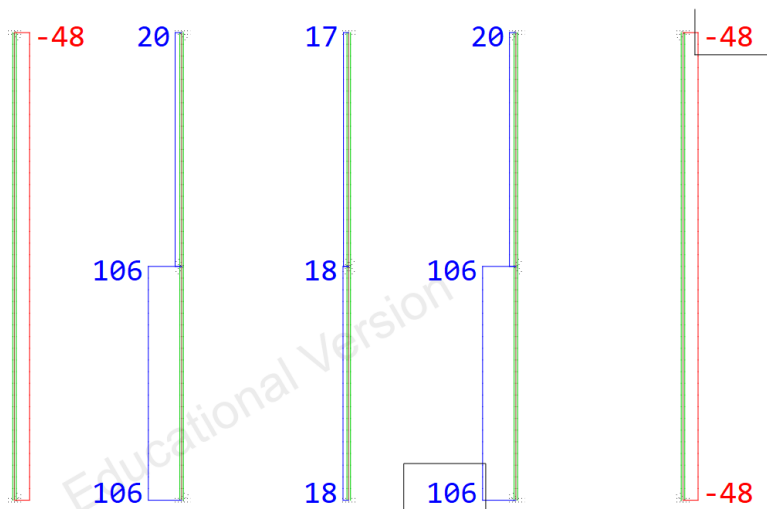
$$\frac{d-t}{t} < 100 \cdot \epsilon^2$$

$$\frac{244.5-8}{8} = 29.56 < 66.2$$

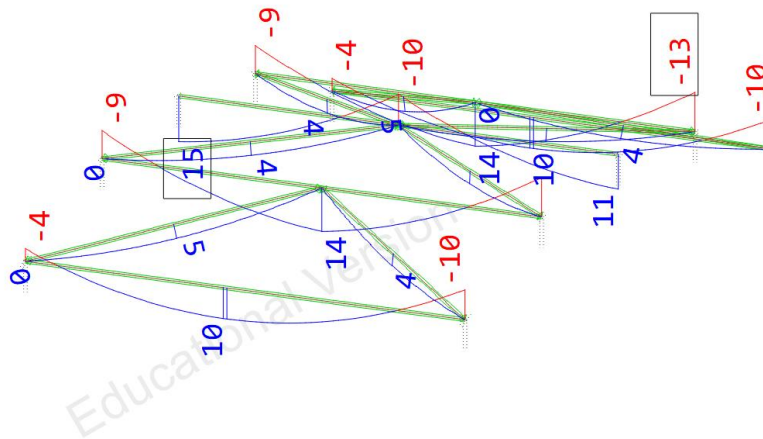
Τα πλαστικά μεγέθη αντοχής της διατομής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Ο κρίσιμος έλεγχος για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης ήταν ο έλεγχος της διατομής σύμφωνα με τη σχέση (4.1). Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροπών κάμψης και αξονικών δυνάμεων των εγκάρσιων συνδέσμων για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ο έλεγχος της κρίσιμης διατομής και ο έλεγχος του κρίσιμου μέλους για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης.

Πίνακας 4.13: Πλαστικά μεγέθη αντοχής διατομής εγκάρσιων συνδέσμων τόξων

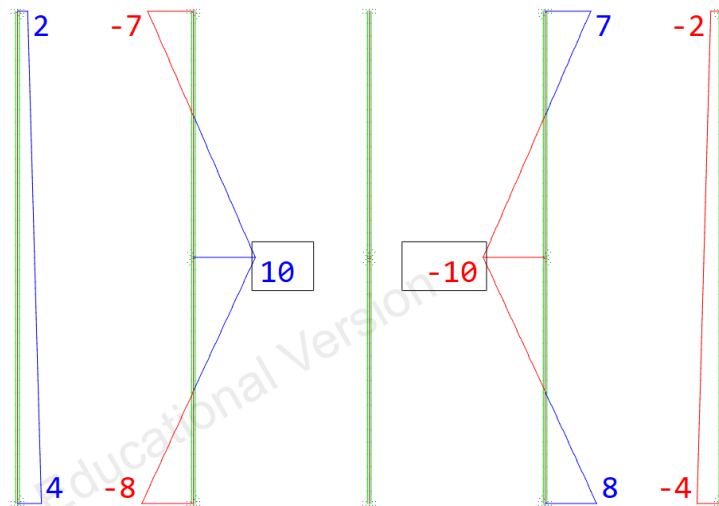
$N_{pl,Rd}$ (kN)	2110.08
$M_{pl,Rd}$ (kNm)	158.91
$M_{t,pl,Rd}$ (kNm)	144.06
$V_{pl,Rd}$ (kN)	775.57



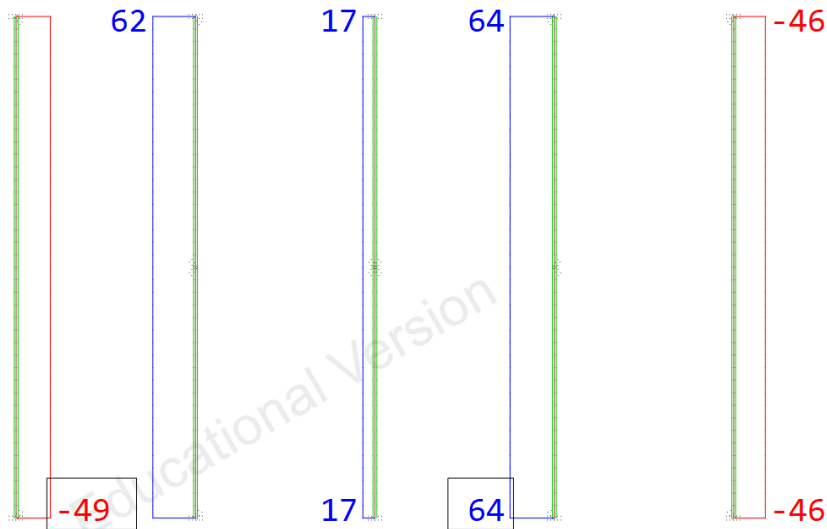
Σχήμα 4.31: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Y)



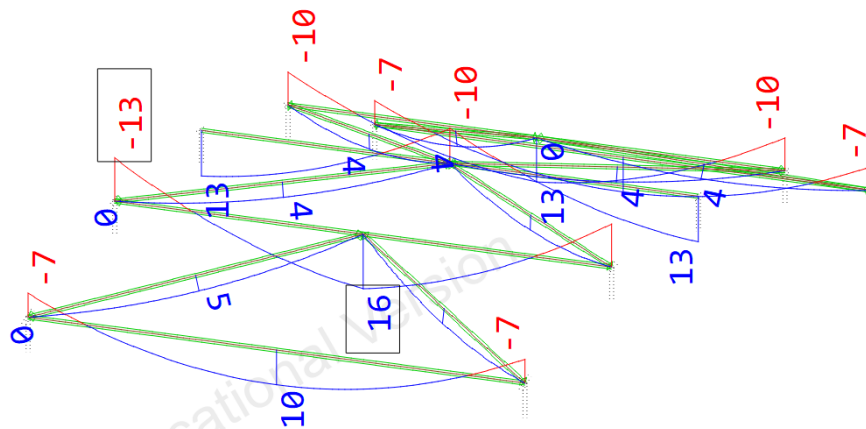
Σχήμα 4.32: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Y)



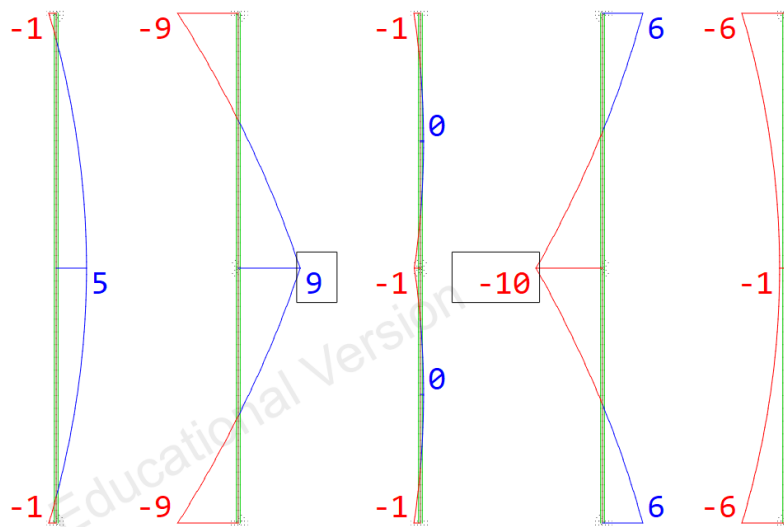
Σχήμα 4.33: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Y)



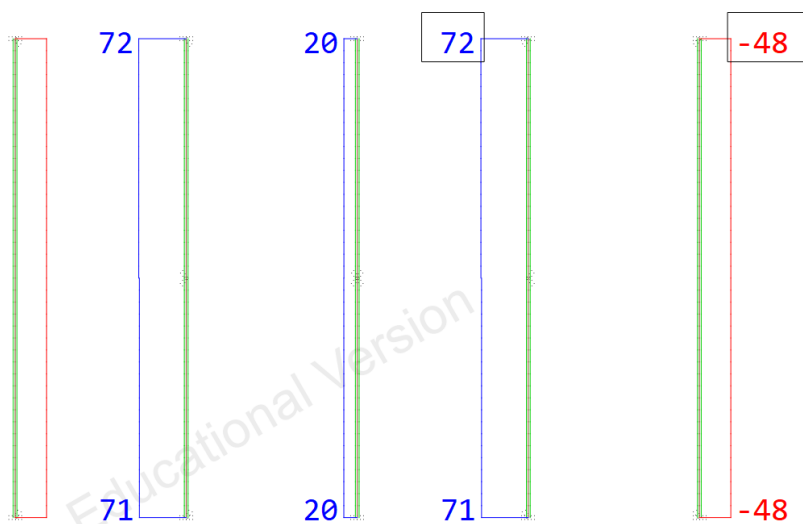
Σχήμα 4.34: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος X)



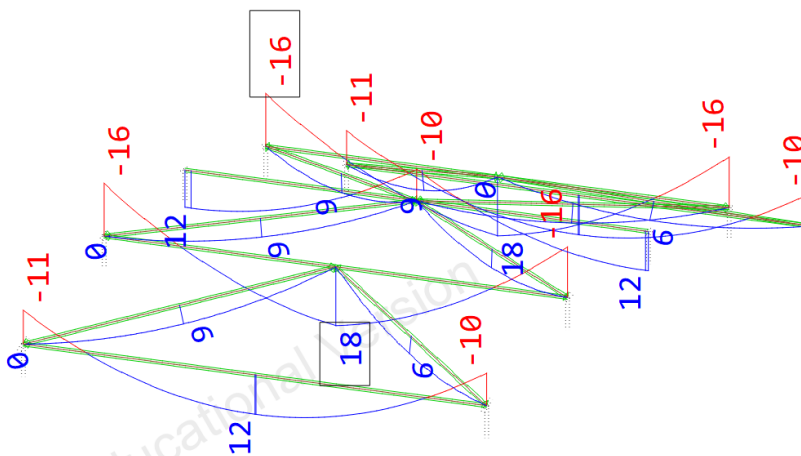
Σχήμα 4.35: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος X)



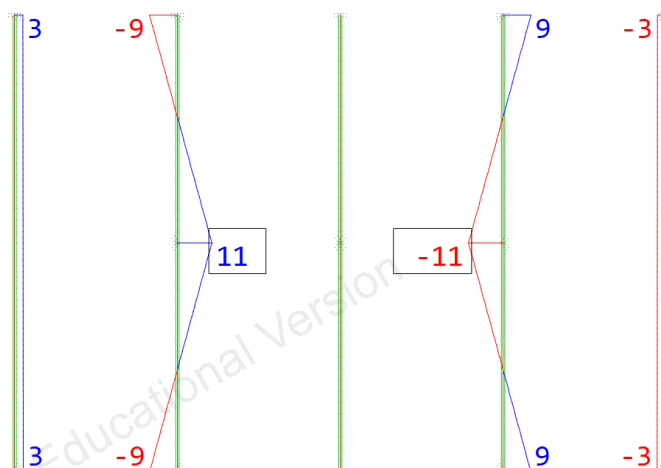
Σχήμα 4.36: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_x εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος X)



Σχήμα 4.37: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Z)



Σχήμα 4.38: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Z)



Σχήμα 4.39: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Z)

Έλεγχος διατομής

Για την περίπτωση ανέμου κατά Y κρίσιμη είναι η διατομή του μέσου του δεύτερου και του τέταρτου εγκάρσιου συνδέσμου των τόξων. Ο Πίνακας 4.14 παρουσιάζει τα εντατικά μεγέθη, που ασκούνται στην κρίσιμη διατομή.

Πίνακας 4.14: Εντατικά μεγέθη στην κρίσιμη διατομή των εγκάρσιων συνδέσμων των τόξων (άνεμος Y)

N_{Ed} (kN)	105.59
$M_{y,Ed}$ (kNm)	14.36
$M_{z,Ed}$ (kNm)	9.51
$M_{t,Ed}$ (kNm)	-0.05
$V_{z,Ed}$ (kN)	-1.40
$V_{y,Ed}$ (kN)	2.37

Επειδή η τέμνουσα είναι πολύ μικρή σε σχέση με την αντίστοιχη αντοχή της διατομής δεν απαιτείται απομείωση της αντοχής σε ροπή κάμψης λόγω τέμνουσας.

Η συνολική ροπή που αναπτύσσεται στη διατομή είναι:

$$M_{Ed} = \sqrt{M_{y,Ed}^2 + M_{z,Ed}^2} = \sqrt{14.36^2 + 9.51^2} = 17.22 \text{ kNm}$$

Με εφαρμογή της σχέσης (4.1) προκύπτει βαθμός αξιοποίησης για τον έλεγχο της διατομής:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{105.59}{2110.08} + \frac{17.22}{158.91} = 0.158$$

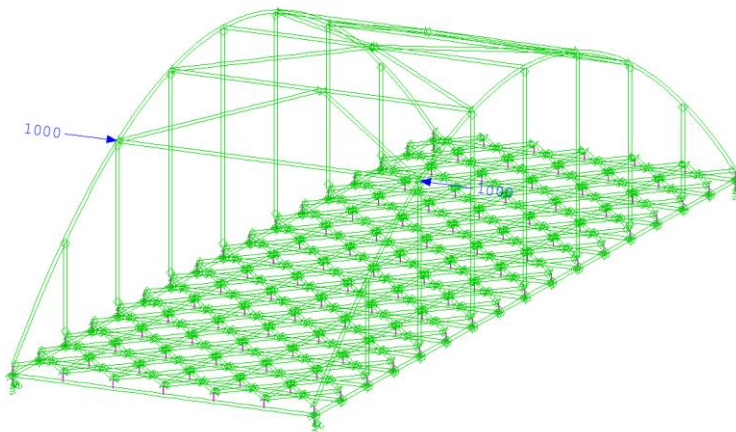
Έλεγχος μέλους

Κρίσιμο μέλος είναι το πρώτο εγκάρσιο μέλος για την περίπτωση ανέμου κατά Y. Επειδή δε βρέθηκε με την αρχική ανάλυση κάποια ιδιομορφή λυγισμού για το μέλος, για τον έλεγχο του πραγματοποιήθηκε σε απλοποιημένο προσομοίωμα γραμμική ανάλυση λυγισμού, από την οποία προέκυψε η ιδιομορφή λυγισμού του εγκάρσιου μόνο μέλους και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Το φορτίο που ασκείται είναι ίσο με 1000 kN και φαίνεται στο Σχήμα 4.40. Από την

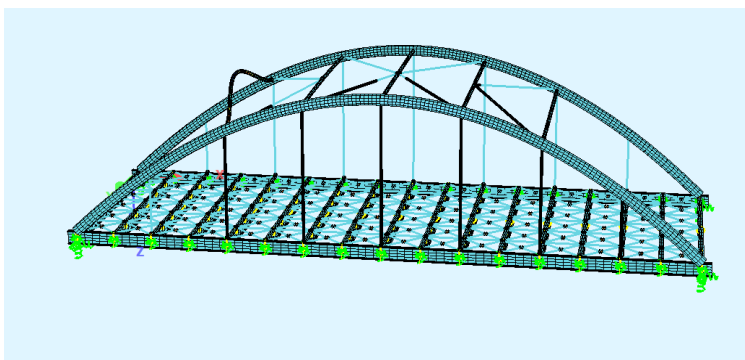
ανάλυση προέκυψε συντελεστής φόρτισης $\alpha_{cr}=1.67$ με την αντίστοιχη ιδιομορφή να φαίνεται στο Σχήμα 4.41. Το αντίστοιχο κρίσιμο φορτίο λυγισμού είναι ίσο με:

$$N_{cr}=\alpha_{cr}\cdot N_{Ed}=1.67\cdot 913.23=1525.09 \text{ kN}$$

Στην παραπάνω σχέση $N_{Ed}=913.23\text{kN}$ είναι η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στο εγκάρσιο μέλος λόγω της φόρτισης.



Σχήμα 4.40: Απλοποιημένο προσομοίωμα με φόρτιση του εγκάρσιου μέλους με φορτίο $P=1000\text{kN}$



Σχήμα 4.41: 1^η ιδιομορφή λυγισμού εγκάρσιου συνδέσμου τόξων- $\alpha_{cr}=1.67$

Ο Πίνακας 4.15 παρουσιάζει τα εντατικά μεγέθη που ασκούνται στο μέλος για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης με εγκάρσια φορτία ανέμου. Ο Πίνακας 4.16 παρουσιάζει την πορεία υπολογισμού του μειωτικού συντελεστή χ του κρίσιμου εγκάρσιου μέλους, η οποία είναι ίδια με αυτήν που αναπτύχθηκε στην ενότητα 4.2. Επειδή $N_{Ed}<0.04N_{cr}$, είναι δυνατόν να θεωρηθεί μειωτικός συντελεστής $\chi=1$. Ωστόσο, επιλέχθηκε να υπολογιστεί ο μειωτικός συντελεστής όπως ορίζεται στη γενική περίπτωση, χωρίς να επηρεάζεται ουσιαστικά το τελικό αποτέλεσμα της αντοχής του μέλους. Τέλος, επειδή η διατομή των εγκάρσιων συνδέσμων είναι κοίλη κυκλική, δηλαδή δεν είναι ευαίσθητη σε στρεπτικές παραμορφώσεις προέκυψε $\chi_{IT}=1.0$.

Πίνακας 4.15: Εντατικά μεγέθη κρίσιμου εγκάρσιου συνδέσμου τόξων (άνεμος Y)

N_{Ed} (kN)	-47.82
$M_{y,Ed}$ (kNm)	10.17
$M_{z,Ed}$ (kNm)	2.62
M_{Ed} (kNm)	10.50

Πίνακας 4.16: Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή χ κρίσιμου εγκάρσιου μέλους (άνεμος Y)

N_{cr} (kN)	1525.09
α	0.49
$\bar{\lambda}$	1.176
χ	0.445

Ο έλεγχος του μέλους σε κάμψη και θλίψη πραγματοποιείται σύμφωνα με τη σχέση (4.3).

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{pl,Rd} / \gamma_{M1}} = \frac{47.82}{0.445 \cdot 2110.08 / 1.10} = 0.056$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot (1 + 0.8 \cdot n_z) = 1 \cdot (1 + 0.8 \cdot 0.056) = 1.045$$

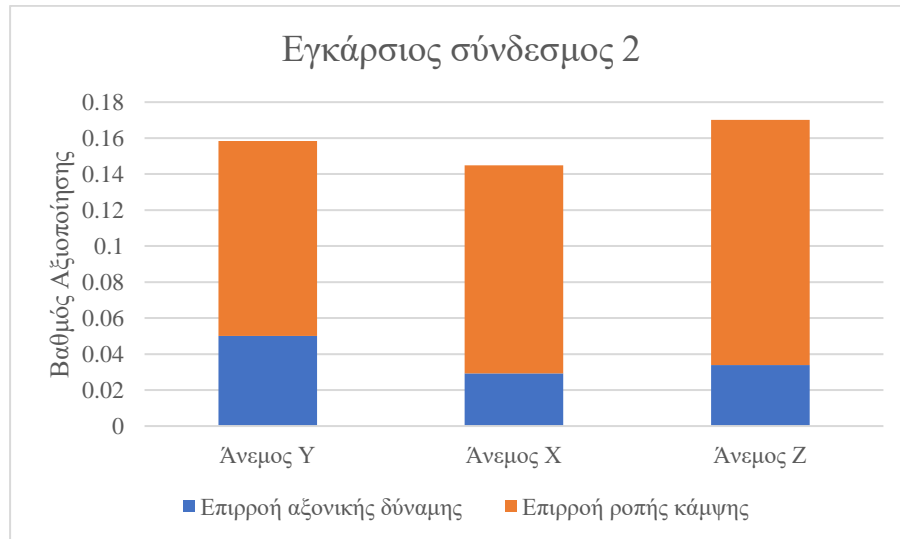
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{47.82}{0.445 \cdot 2110.08} + 1.045 \cdot \frac{10.50}{1 \cdot \frac{158.91}{1.10}} = 0.132$$

Ο συντελεστής αξιοποίησης, επομένως, είναι ίσος με 0.158 για τους εγκάρσιους συνδέσμους με κρίσιμο έλεγχο να αποτελεί ο έλεγχος της διατομής του μέσου των συνδέσμων 2 και 4 στην περίπτωση ανέμου κατά Y. Για την περίπτωση φορτίων ανέμου κατά X κρίσιμη είναι η διατομή του μέσου συνδέσμου 2, ενώ για την περίπτωση φορτίων ανέμου κατά Z κρίσιμες είναι οι διατομές του μέσου των συνδέσμων 2 και 4. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη στην εκάστοτε κρίσιμη διατομή μαζί με τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης και για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης.

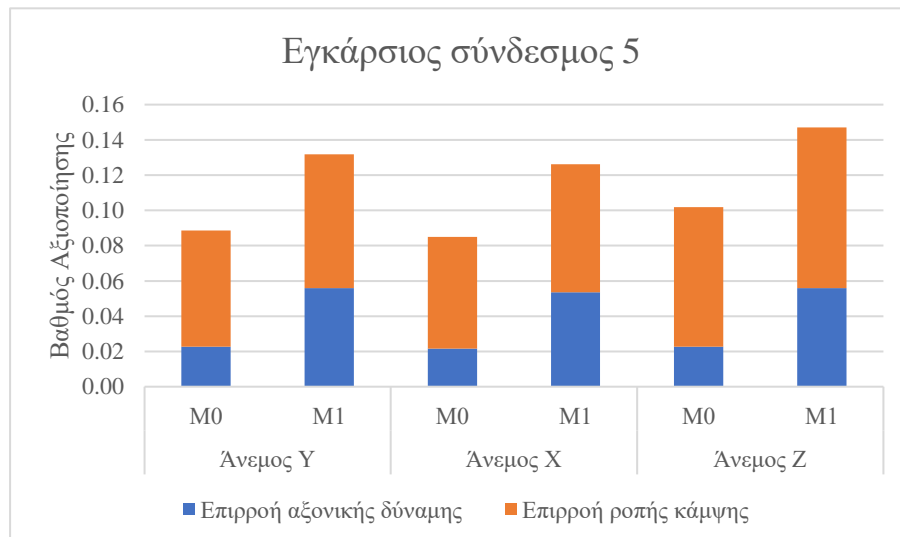
Πίνακας 4.17: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης κρίσιμης διατομής εγκάρσιων συνδέσμων τόξων για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης

	Άνεμος Y	Άνεμος X	Άνεμος Z
N_{Ed} (kN)	105.59	61.84	71.56
$M_{y,Ed}$ (kNm)	14.36	15.90	18.37
$M_{z,Ed}$ (kNm)	9.51	9.17	11.44
M_{Ed} (kNm)	17.22	18.35	21.64
Βαθμός αξιοποίησης	0.158	0.145	0.170

Το Σχήμα 4.42 παρουσιάζει τους βαθμούς αξιοποίησης για τη διατομή του μέσου του εγκάρσιου σύνδεσμου 2, που είναι και η κρίσιμη διατομή. Το συγκεκριμένο μέλος είναι εφελκόμενο και το μεγαλύτερο μέρος της καταπόνησης προέρχεται από τη ροπή κάμψης. Το Σχήμα 4.43 παρουσιάζει τους βαθμούς αξιοποίησης για το θλιβόμενο μέλος 5. Ο έλεγχος του μέλους κατά τη μέθοδο M1 οδηγεί σε μεγαλύτερους βαθμούς αξιοποίησης καθώς λαμβάνονται υπόψη η επιρροή των φαινομένων 2^{ης} τάξης και της τοπικής ατέλειας μέσω των καμπυλών λυγισμού και του μειωτικού συντελεστή χ . Επίσης, στον έλεγχο του μέλους χρησιμοποιείται ο συντελεστής $\gamma_{M1}=1.10$. Η μέση αύξηση των βαθμών αξιοποίησης από τον έλεγχο της διατομής (M0) στον έλεγχο του μέλους (M1) για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης είναι ίση με 47.5%.



Σχήμα 4.42: Βαθμοί αξιοποίησης εφελκόμενου εγκάρσιου συνδέσμου 2 (M1)



Σχήμα 4.43: Βαθμοί αξιοποίησης θλιβόμενου εγκάρσιου συνδέσμου 5 (M1)

4.6 Έλεγχος διαγώνιων συνδέσμων τόξων

Η διατομή των διαγώνιων συνδέσμων του τόξου είναι CHS 168.3x8. Η συγκεκριμένη διατομή είναι κατηγορία 1, αφού ικανοποιείται το κριτήριο:

$$\frac{d}{t} = \frac{168.3}{8} = 21 < 50\epsilon^2 = 33.1$$

Τα πλαστικά μεγέθη αντοχής της διατομής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.18: Πλαστικά μεγέθη αντοχής διατομής διαγώνιων συνδέσμων τόξων

$N_{pl,Rd}$ (kN)	1430.22
$M_{pl,Rd}$ (kNm)	73.04
$M_{t,pl,Rd}$ (kNm)	66.18
$V_{pl,Rd}$ (kN)	525.68

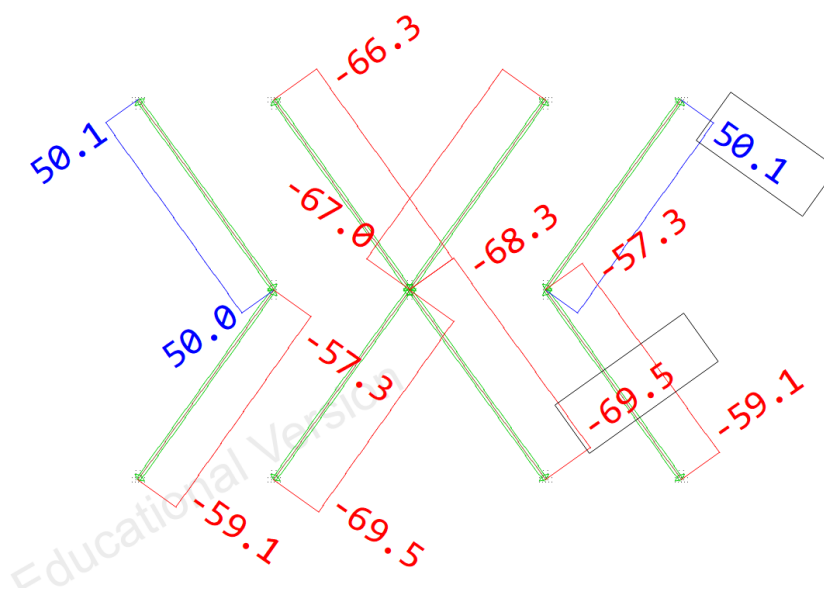
Ακόμα, δεν απαιτείται να γίνει έλεγχος για διατμητική κυρτώση, αφού ικανοποιείται το κριτήριο του νέου κειμένου του Ευρωκώδικα 3.

$$\frac{d-t}{t} < 100 \cdot \varepsilon^2$$

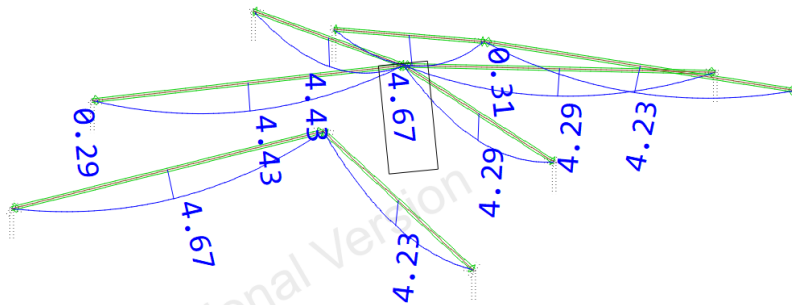
$$\frac{168.3-8}{8} = 20.04 < 66.2$$

Έλεγχος μέλους

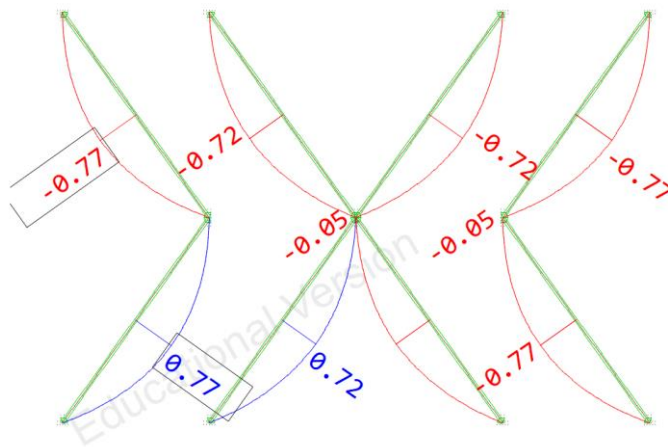
Από τη γραμμική ανάλυση λυγισμού για εγκάρσια φορτία ανέμου κατά Y προέκυψαν κρίσιμα μέλη ο δεύτερος και ο τρίτος δεξιά διαγώνιος σύνδεσμος (μέλη 4 και 6 στο Σχήμα 2.13). Για συντελεστή $\alpha_{cr}=4.76$ (Σχήμα 4.52) παρουσιάζεται ιδιομορφή λυγισμού «εντός επιπέδου», ενώ για $\alpha_{cr}=4.77$ (Σχήμα 4.53) παρουσιάζεται ιδιομορφή λυγισμού «εκτός επιπέδου». Τα διαγώνια μέλη δέχονται κατακόρυφα φορτία λόγω ίδιου βάρους και τα φορτία ανέμου με φορά τον άξονα $y'-y$. Επειδή το μέγεθος των δύο φορτίσεων είναι συγκρίσιμο και κατά τους δύο τοπικούς άξονες (το ίδιο βάρος αντιστοιχεί σε 0.32kN/m και ο άνεμος σε 0.23kN/m) και επίσης, επειδή δεν υπάρχει ισχυρός και ασθενής άξονας στην κοίλη διατομή, είναι δυσδιάκριτος ο διαχωρισμός των ιδιομορφών σε εντός και εκτός επιπέδου. Για το λόγο αυτό επιλέγεται η τιμή $\alpha_{cr}=4.76$, που αντιστοιχεί στη μικρότερη ιδιομορφή λυγισμού, χωρίς βέβαια να παρουσιάζεται κάποια ουσιαστική διαφορά στα αποτελέσματα. Ο Πίνακας 4.19 παρουσιάζει τους συντελεστές φόρτισης και τα αντίστοιχα κρίσιμα φορτία λυγισμού για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης. Τα παρακάτω σχήματα παρουσιάζουν τις αξονικές δυνάμεις και τις ροπές κάμψης που ασκούνται στους διαγώνιους συνδέσμους για κάθε συνδυασμό φόρτισης.



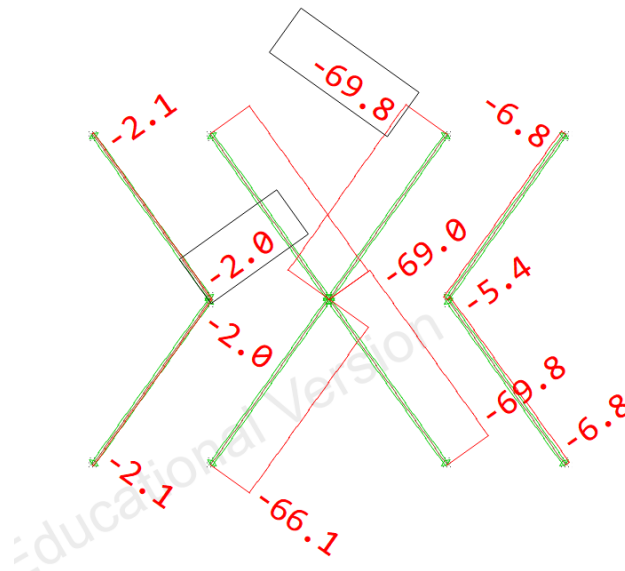
Σχήμα 4.44: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Y)



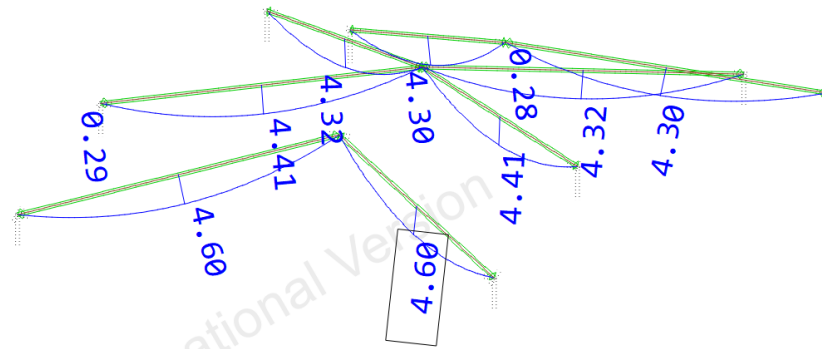
Σχήμα 4.45: Διάγραμμα ροπών κάμψη M_y διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Y)



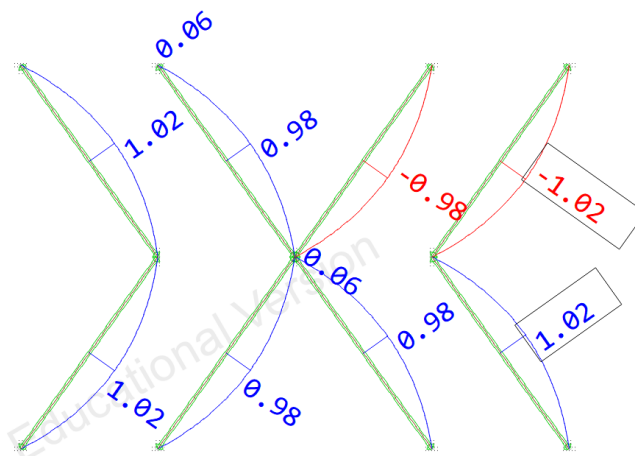
Σχήμα 4.46: Διάγραμμα ροπών κάμψη M_z διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Y)



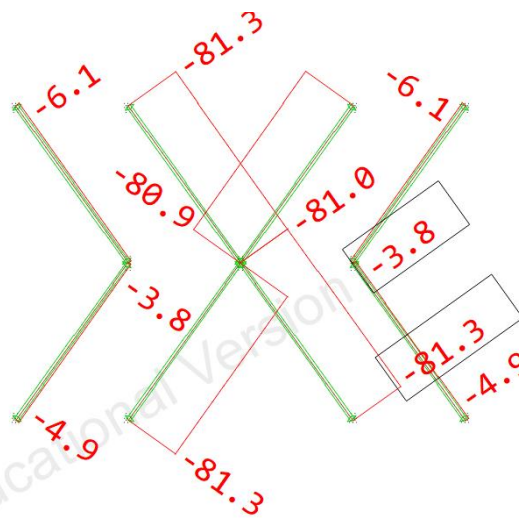
Σχήμα 4.47: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος X)



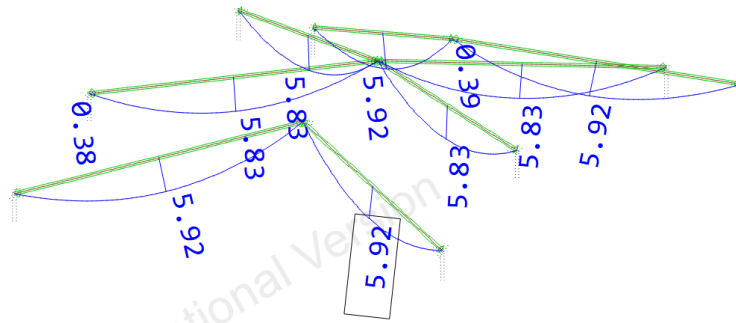
Σχήμα 4.48: Διάγραμμα ροπών κάμψη M_y διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος X)



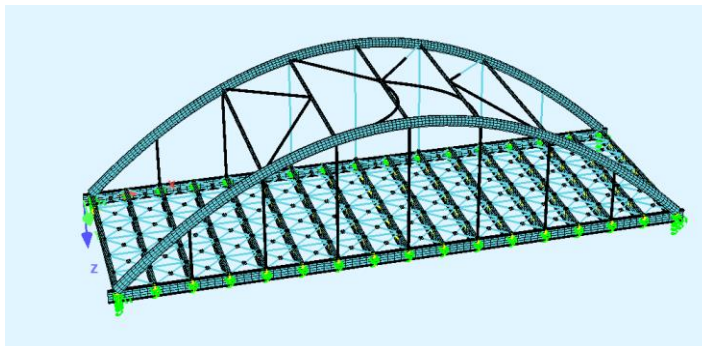
Σχήμα 4.49: Διάγραμμα ροπών κάμψη M_z διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος X)



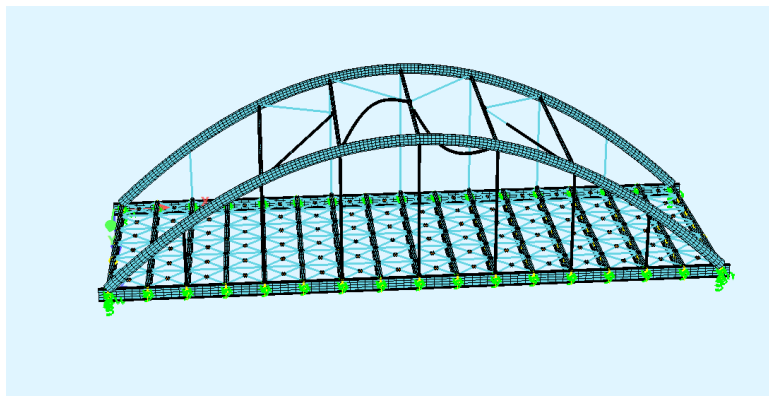
Σχήμα 4.50: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Z)



Σχήμα 4.51: Διάγραμμα ροπών κάμψη M_y διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Z)



Σχήμα 4.52: Ιδιομορφή λυγισμού εντός επιπέδου ($\alpha_{cr} = 4.76$) διαγώνιου μέλους (άνεμος Y)



Σχήμα 4.53: Ιδιομορφή λυγισμού εκτός επιπέδου ($\alpha_{cr} = 4.77$) διαγώνιου μέλους (άνεμος Y)

Πίνακας 4.19: Κρίσιμα φορτία λυγισμού διαγώνιων συνδέσμων

Συνδυασμός φόρτισης	α_{cr}	Μέλος	N_{cr} (kN)
Άνεμος Y	4.76	4,6	330.68
Άνεμος X	4.72	5,6	329.64
Άνεμος Z	4.04	3,4,5,6	328.61

Για την περίπτωση του εγκάρσιου ανέμου παρουσιάζεται ο έλεγχος των διαγώνιων μελών 4 και 6 με τα εντατικά μεγέθη που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.20: Εντατικά μεγέθη κρίσιμων διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Y)

N_{Ed} (kN)	-69.47
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4.29
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.72
M_{Ed} (kNm)	4.35

Η πορεία των υπολογισμών είναι όμοια με εκείνη της ενότητας 4.2. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζεται η πορεία για τον υπολογισμό του μειωτικού συντελεστή χ για καμπτικό λυγισμό, ο οποίος προέκυψε ίσος με 0.183. Επίσης, επειδή η διατομή των διαγώνιων συνδέσμων είναι κοίλη κυκλική, που σημαίνει ότι δεν είναι ευαίσθητη σε στρεπτικές παραμορφώσεις ισχύει $\chi_{LT}=1.0$.

Πίνακας 4.21: Υπολογισμός μειωτικού συντελεστή κρίσιμου διαγώνιου συνδέσμου (άνεμος Y)

N_{cr} (kN)	330.68
α	0.49
$\bar{\lambda}$	2.080
Φ	3.123
χ	0.183

Ο έλεγχος σε κάμψη και θλίψη πραγματοποιείται σύμφωνα με τη σχέση (4.3):

$$n_z = \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{pl,Rd} / \gamma_{M1}} = \frac{69.47}{0.183 \cdot 1430.22 / 1.10} = 0.291$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot (1 + 0.8 \cdot n_z) = 1 \cdot (1 + 0.8 \cdot 0.291) = 1.233$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{69.47}{0.183 \cdot 1430.22} + 1.233 \cdot \frac{4.35}{1 \cdot \frac{73.04}{1.10}} = 0.372$$

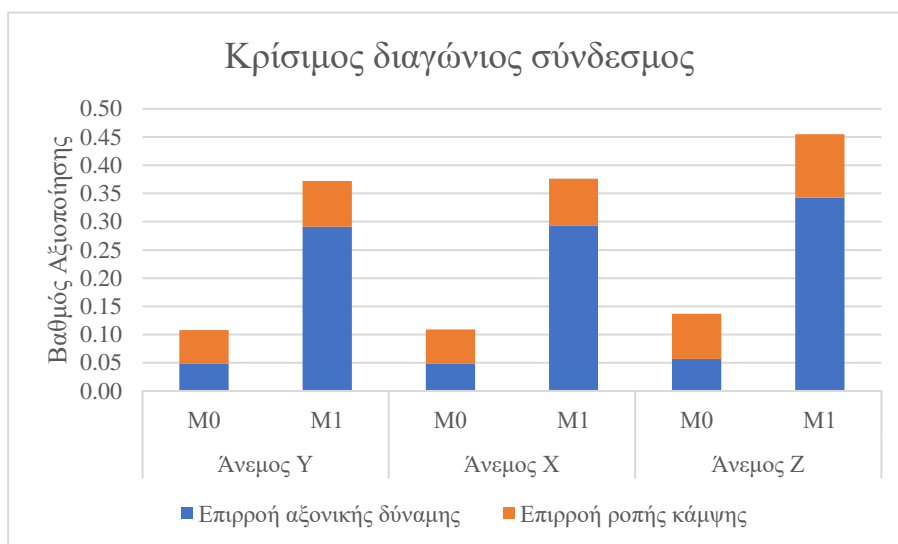
Ο Πίνακας 4.22 παρουσιάζει τα εντατικά μεγέθη, με τα οποία πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης. Ο άνεμος Y και ο άνεμος Z αναφέρονται στα μέλη 4 και 6, ενώ ο άνεμος X στα μέλη 5 και 6.

Πίνακας 4.22: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης κρίσιμων διαγώνιων συνδέσμων τόξων

	Άνεμος Y	Άνεμος X	Άνεμος Z
N_{Ed} (kN)	-69.47	-69.84	-81.34
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4.29	4.32	5.83
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.72	0.98	0
M_{Ed} (kNm)	4.35	4.43	5.83
Βαθμός αξιοποίησης	0.372	0.376	0.455

Το Σχήμα 4.54 παρουσιάζει τους βαθμούς αξιοποίησης για το εκάστοτε κρίσιμο διαγώνιο σύνδεσμο. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στο μέλος 4 για άνεμο κατά Y και Z και στο μέλος 5 για άνεμο κατά X. Για την περίπτωση ελέγχου της διατομής (M0) τα αποτελέσματα

αναφέρονται στη διατομή του μέσου των παραπάνω συνδέσμων. Ο βαθμός αξιοποίησης εμφανίζουν σημαντική αύξηση στη μέθοδο M1, όπου γίνεται έλεγχος μέλους, ενώ η αξονική δύναμη και ροπή κάμψης είναι οι ίδιες. Αυτό οφείλεται στον έλεγχο του μέλους που πραγματοποιείται, όπου λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της γεωμετρικής μη γραμμικότητας και της τοπικής ατέλειας του μέλους μέσω των καμπυλών λυγισμού και του μειωτικού συντελεστή χ . Ταυτόχρονα, στον έλεγχο μέλους χρησιμοποιήθηκε συντελεστής ασφαλείας $\gamma_{M1}=1.1$, ενώ στον έλεγχο της διατομής ο συντελεστής $\gamma_{M0}=1.0$. Η μέση αύξηση που εμφανίστηκε είναι ίση με 241%.



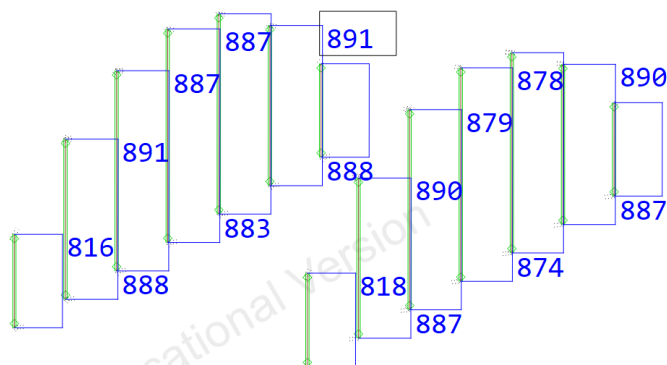
Σχήμα 4.54: Βαθμός αξιοποίησης κρίσιμου διαγώνιου συνδέσμου (M1)

4.7 Έλεγχος αναρτήρων

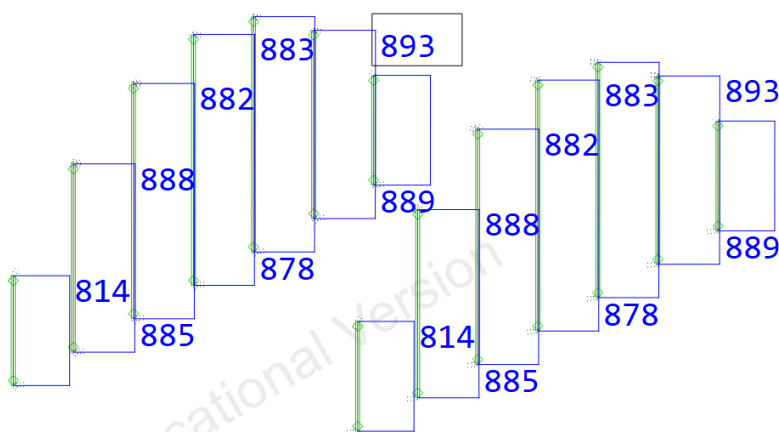
Οι αναρτήρες έχουν διατομή CHS 168.3x8. Ο Πίνακας 4.18 παρουσιάζει τα πλαστικά μεγέθη αντοχής της διατομής. Οι αναρτήρες εφελκύνονται και απαιτείται μόνο έλεγχος της διατομής τους. Σε όλους τους συνδυασμούς φόρτισης έγινε ο έλεγχος της διατομής στη θέση που γίνεται η σύνδεση με το τόξο. Στη θέση αυτή αναπτύσσεται η μέγιστη αξονική δύναμη και η ροπή κάμψης είναι μηδενική, λόγω αρθρωτής σύνδεσης των αναρτήρων με τα τόξα. Για φόρτιση με άνεμο κατά Y η μέγιστη αξονική δύναμη αναπτύσσεται στο 2^ο και τον 6^ο αναρτήρα του αριστερού τόξου και είναι ίση με $N_{Ed}=890.75\text{kN}$. Ο αντίστοιχος βαθμός αξιοποίησης είναι:

$$\frac{890.75}{1430.22}=0.623$$

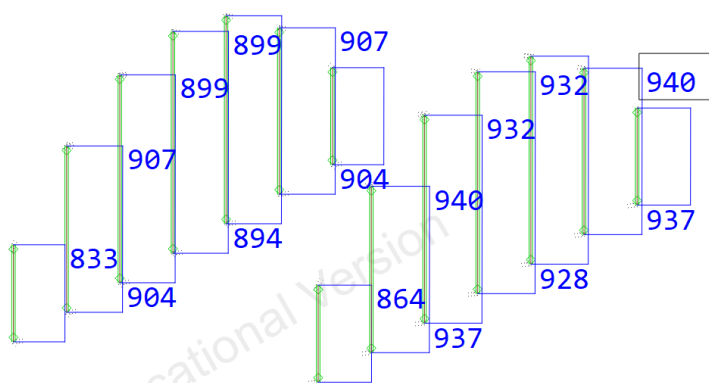
Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων των αναρτήρων για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης.



Σχήμα 4.55: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N αναρτήρων (άνεμος Y)



Σχήμα 4.56: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N αναρτήρων (άνεμος X)



Σχήμα 4.57: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N αναρτήρων (άνεμος Z)

Ο Πίνακας 4.24 παρουσιάζει την αξονική δύναμη και τον αντίστοιχο βαθμό αξιοποίησης στον κρίσιμο κάθε φορά αναρτήρα. Για το διαμήκη άνεμο κρίσιμοι προέκυψαν ο 6^{ος} αριστερός και δεξιός αναρτήρας. Για τον κατακόρυφο άνεμο κρίσιμος ήταν ο 6^{ος} δεξιός αναρτήρας

Πίνακας 4.23: Αξονικές και βαθμοί αξιοποίησης κρίσιμων αναρτήρων για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης

	Άνεμος Y	Άνεμος X	Άνεμος Z
N_{Ed} (kN)	890.75	892.57	940.37
Βαθμός αξιοποίησης	0.623	0.624	0.658

4.8 Έλεγχος συνδέσμων καταστρώματος

Η διατομή των συνδέσμων του καταστρώματος είναι CHS 139.7x10. Η συγκεκριμένη διατομή είναι κατηγορία 1, αφού ικανοποιείται το κριτήριο:

$$\frac{d}{t} = \frac{139.7}{10} = 14 < 50\varepsilon^2 = 33.1$$

Ακόμα, δεν απαιτείται να γίνει έλεγχος για διατμητική κύρτωση, αφού ικανοποιείται το κριτήριο του νέου κειμένου του Ευρωκώδικα:

$$\frac{d-t}{t} < 100 \cdot \varepsilon^2$$

$$\frac{139.7-10}{10} = 13.0 < 66.2$$

Τα πλαστικά μεγέθη αντοχής της διατομής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης κρίσιμος προέκυψε ο έλεγχος της διατομής, ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω για την περίπτωση του εγκάρσιου ανέμου.

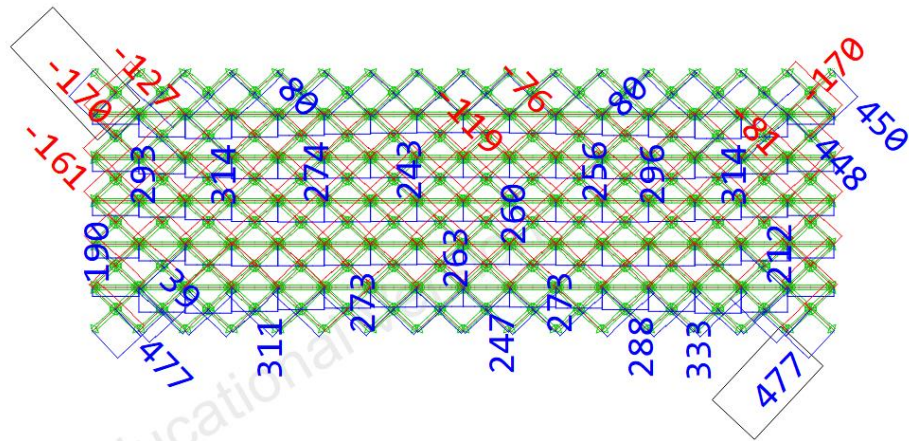
Πίνακας 4.24: Πλαστικά μεγέθη αντοχής διατομής συνδέσμων καταστρώματος

$N_{pl,Rd}$ (kN)	1446.50
$M_{pl,Rd}$ (kNm)	59.84
$M_{t,pl,Rd}$ (kNm)	54.16
$V_{pl,Rd}$ (kN)	531.66

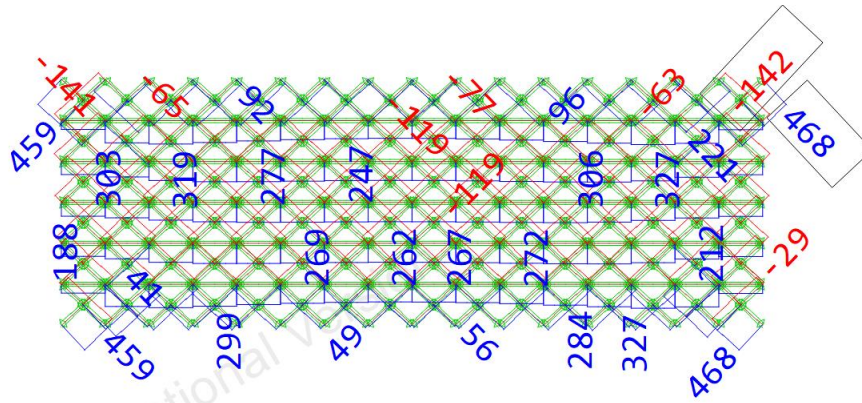
Έλεγχος διατομής

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων των συνδέσμων του καταστρώματος. Όπως φαίνεται στα σημεία τομής των συνδέσμων με τα τόξα και τις κύριες δοκούς αναπτύσσονται σημαντικές εφελκυστικές δυνάμεις. Οι υπόλοιποι σύνδεσμοι αναπτύσσουν πολύ μικρότερες εφελκυστικές και θλιπτικές δυνάμεις, καθώς και αμελητέες ροπές κάμψης και τέμνουσες, οι οποίες δεν παρουσιάζονται. Για τον υπολογισμό του βαθμού αξιοποίησης έγινε χρήση μόνο της αξονικής δύναμης, καθώς οι ροπές που αναπτύσσονται είναι πολύ μικρές και δεν επηρεάζουν ουσιαστικά το αποτέλεσμα. Για την περίπτωση του εγκάρσιου ανέμου η μέγιστη αξονική δύναμη, που αναπτύσσεται είναι $N_{Ed}=477.36\text{kN}$ και ο αντίστοιχος βαθμός αξιοποίησης:

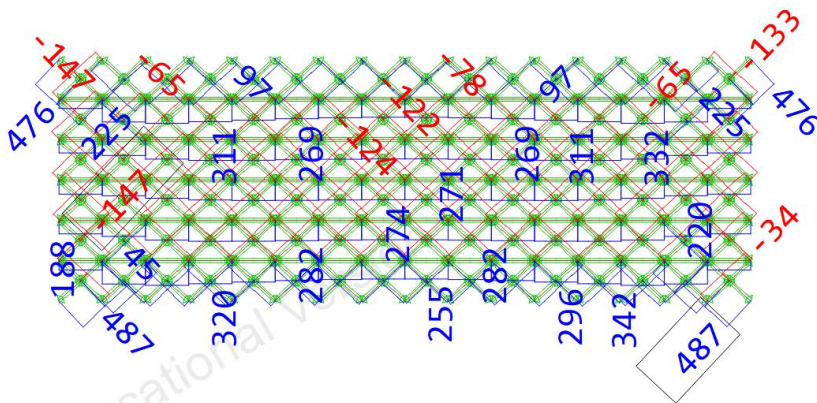
$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{477.36}{1446.50} = 0.330$$



Σχήμα 4.58: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N συνδέσμων καταστρώματος (άνεμος Y)



Σχήμα 4.59: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N συνδέσμων καταστρώματος (άνεμος X)



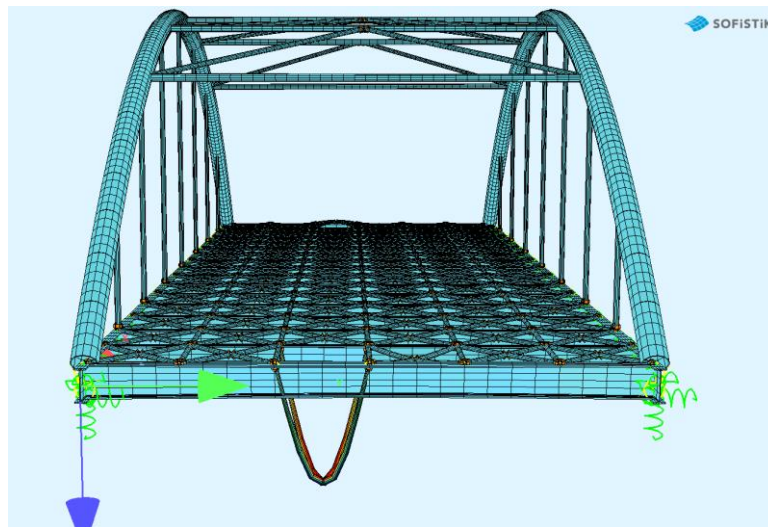
Σχήμα 4.60: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων συνδέσμων καταστρώματος (άνεμος Z)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστες αξονικές δυνάμεις για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης μαζί με τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης.

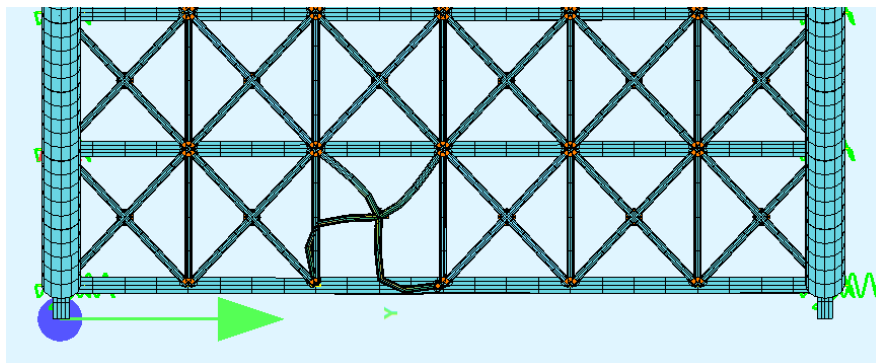
Πίνακας 4.25: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης κρίσιμων συνδέσμων καταστρώματος για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης

	Άνεμος Y	Άνεμος X	Άνεμος Z
N_{Ed} (kN)	477.36	468.42	487.18
Βαθμός αξιοποίησης	0.330	0.324	0.337

Τέλος, παρουσιάζονται για λόγους πληρότητας και οι ιδιομορφές του κρίσιμου μέλους για λυγισμό εντός και εκτός επιπέδου για την περίπτωση του εγκάρσιου ανέμου. Ο αντίστοιχος βαθμός αξιοποίησης του μέλους ήταν 0.200.



Σχήμα 4.61: Ιδιομορφή λυγισμού εκτός επιπέδου $a_{cr} = 11.53$, $N_{cr} = 1852.87$ kN (άνεμος Y)



Σχήμα 4.62: Ιδιομορφή λυγισμού εντός επιπέδου $N_{cr} = 8686.16$ kN

4.9 Σύνοψη αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα

Η μέθοδος M1 δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα στην εφαρμογή της. Οι στατικές αναλύσεις, που απαιτούνται (γραμμική στατική χωρίς ατέλειες και γραμμική ανάλυση λυγισμού), μπορούν να πραγματοποιηθούν από τα περισσότερα στατικά προγράμματα και δεν απαιτούν σημαντική εξειδίκευση του χρήστη με το λογισμικό. Επίσης, οι έλεγχοι που εφαρμόστηκαν μέσω των σχέσεων (4.1), (4.3), και (4.4) δεν είχαν κάποια πολυπλοκότητα. Από την άλλη η μέθοδος M1 μπορεί να καλύψει περιπτώσεις, στις οποίες τα φαινόμενα 2^{ης} τάξης δεν είναι σημαντικά. Στην πραγματικότητα η συγκεκριμένη γέφυρα δεν είναι δυνατόν να σχεδιαστεί με τη μέθοδο M1, καθώς για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης ισχύει $a_{cr,FB} < 25$.

Στα τόξα και στους διαγώνιους συνδέσμους των τόξων κρίσιμος ήταν ο έλεγχος του μέλους σε θλίψη και κάμψη. Τα τόξα δεν παρουσίασαν ουσιαστικές αποκλίσεις στην τιμή του βαθμού αξιοποίησης, για του τρεις συνδυασμούς φόρτισης, ενώ η μέγιστη τιμή του βαθμού αξιοποίησης, που εμφανίστηκε, ήταν 0.516 στο δεξιό τόξο για κατακόρυφο άνεμο. Οι διαγώνιοι σύνδεσμοι παρουσίασαν μέγιστο βαθμό αξιοποίησης 0.455 για κατακόρυφο άνεμο Z. Η τιμή αυτή είναι αυξημένη κατά 22.04%, σε σχέση με αυτές που προέκυψαν για εγκάρσιο άνεμο Y και κατά 21.01% για διαμήκη άνεμο X.

Στα υπόλοιπα μέλη κρίσιμος ήταν ο έλεγχος της διατομής. Η δεξιά κύρια δοκός παρουσίασε μέγιστο βαθμό αξιοποίησης ίσο με 0.909 για την περίπτωση του εγκάρσιου ανέμου Y. Η υψηλή αυτή τιμή κοντά στη μονάδα οφείλεται σε μία μεγάλη αξονική εφελκυστική δύναμη καθώς και σε σημαντικές ροπές κάμψης κατά τους δύο άξονες, που οφείλονται στην έκκεντρη σύνδεση του τόξου με την κύρια δοκό. Οι διαδοκίδες, λόγω της πυκνής διάταξης των χιαστί συνδέσμων του καταστρώματος, παρουσίασαν κρίσιμο τον έλεγχο της διατομής του μέσου τους και όχι του μέλους. Ο μέγιστος βαθμός αξιοποίησης που προέκυψε ήταν 1.023 για άνεμο κατά Z. Όπως εξηγήθηκε, ο βαθμός αξιοποίησης προέκυψε μεγαλύτερος της μονάδας, ενώ στον αρχικό σχεδιασμό της γέφυρας δε συνέβαινε κάτι τέτοιο, γιατί αγνοήθηκε πλήρως η σύμμικτη λειτουργία της διαδοκίδας με αποτέλεσμα να μειωθεί σημαντικά η ροπή αντοχής. Οι εγκάρσιοι σύνδεσμοι των τόξων παρουσίασαν χαμηλούς βαθμούς αξιοποίησης με μέγιστη τιμή για κατακόρυφο άνεμο Z ίση με 0.170. Τέλος, στους αναρτήρες και στους συνδέσμους του καταστρώματος αγνοήθηκε η πολύ μικρή τιμή της καμπτικής ροπής και προέκυψαν μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης 0.658 και 0.337 για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης με τα κατακόρυφα φορτία ανέμου.

5 ΜΕΘΟΔΟΣ M2

5.1 Γενικά

Η μέθοδος M2 εφαρμόζεται όταν τα φαινόμενα 2^{ης} τάξης λόγω λυγισμού κάποιου μέλους δεν μπορούν να αγνοηθούν αλλά μπορούν να αγνοηθούν τα εντός επιπέδου καθολικά φαινόμενα αστάθειας λόγω μετάθεσης του πλαισίου. Επειδή η παραπάνω διατύπωση, η οποία βρίσκεται στο νέο κείμενο του Ευρωκώδικα 3, αναφέρεται σε πλαίσια θα πρέπει να γίνουν κάποιες τροποποιήσεις ώστε να γίνει η εφαρμογή της μεθόδου στην τοξωτή γέφυρα της εργασίας. Για το λόγο αυτό, κατά την εφαρμογή της μεθόδου, χρησιμοποιήθηκαν και οι διατάξεις του EN 1993-2 και συγκεκριμένα του παραρτήματος D, που αναφέρεται σε τοξωτές γέφυρες.

Για την εφαρμογή της μεθόδου M2 στο φορέα της γέφυρας πρέπει να πραγματοποιηθεί γραμμική στατική ανάλυση με καθολική αρχική ατέλεια. Για τη μορφή και το μέγεθος της αρχικής ατέλειας που θεωρήθηκε δε χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις του νέου Ευρωκώδικα 3 για ατέλεια με τη μορφή αρχικής κλίσης, οι οποίες αναφέρονται σε πλαισιακούς φορείς. Αντίθετα χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις του EN 1993-2, όπου ορίζεται για το τόξο μία ατέλεια για λυγισμό εντός επιπέδου και μία ατέλεια για λυγισμό εκτός επιπέδου. Επίσης, εφαρμόστηκε και ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού του τόξου, όπως ορίζεται στο νέο κείμενο του Ευρωκώδικα 3.

Ο έλεγχος των διατομών πραγματοποιήθηκε με βάση την πλαστική αντοχή της κάθε διατομής, αφού όλες οι διατομές προέκυψαν κατηγορίας 1. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε με βάση τις παρακάτω σχέσεις γραμμικής αλληλεπίδρασης. Η σχέση (5.1) αναφέρεται στον έλεγχο των κοίλων κυκλικών διατομών, ενώ η σχέση (5.2) στον έλεγχο των κύριων δοκών και των διαδοκίδων, που έχουν διατομή HEB 900.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rk}} \leq 1 \quad (5.1)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} + \frac{B_{Ed}}{B_{Rk}} \leq 1 \quad (5.2)$$

Για τον έλεγχο μέλους στις κοίλες κυκλικές διατομές υπολογίστηκε η μέγιστη ροπή του μέλους ως η συνισταμένη ροπή των δύο διανυσμάτων M_y και M_z και πραγματοποιήθηκε έλεγχος για εντός και εκτός επιπέδου λυγισμό σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (5.3)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (5.4)$$

Για τον έλεγχο των διαδοκίδων (HEB 900) και των κύριων δοκών (HEB 900) χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω σχέσεις γραμμικής αλληλεπίδρασης, οι οποίες βρίσκονται στο παράρτημα C του νέου Ευρωκώδικα.

Για λυγισμό περί τον ισχυρό άξονα (εντός επιπέδου):

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{B_{Ed}}{\frac{B_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (5.5)$$

Για λυγισμό περί τον ασθενή άξονα (εκτός επιπέδου):

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} + \frac{B_{Ed}}{\frac{B_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (5.6)$$

Τέλος, επισημαίνεται ότι όπου απαιτείται το κρίσιμο μήκος για κάποιο μέλος, αυτό υπολογίστηκε μέσω ανάλυσης λυγισμού LBA, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4. Η μέθοδος M2 επιτρέπει, ωστόσο, ως μήκος λυγισμού να χρησιμοποιηθεί το μήκος του συστήματος.

5.2 Ατέλεια φορέα

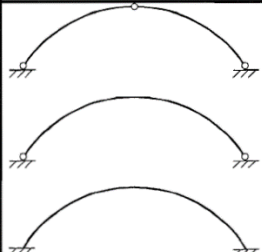
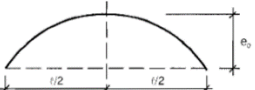
5.2.1 Ατέλεια σύμφωνα με το EN 1993-2

Ο καθορισμός της μορφής και του μεγέθους της αρχικής ατέλειας είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με βάση τις διατάξεις του EN 1993-2, που αναφέρεται στις σιδηρές γέφυρες. Στην ενότητα D.3.5 γίνεται παρουσίαση των ατελειών που είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και προτείνεται η χρήση μίας ατέλειας εντός επιπέδου και μίας ατέλειας εκτός επιπέδου, οι οποίες έχουν ημιτονοειδή ή παραβολική μορφή. Τα είδη και το μέγεθος της ατέλειας παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 5.1: Ατέλεια τόξου για λυγισμό εντός επιπέδου [2]

	1	2	3			
			e ₀ according to classification of cross section to buckling curve			
		shape of imperfection (sinus or parabola)	a	b	c	d
1			$\frac{s}{300}$	$\frac{s}{250}$	$\frac{s}{200}$	$\frac{s}{150}$
2			$\frac{l}{600}$	$\frac{l}{500}$	$\frac{l}{400}$	$\frac{l}{300}$

Πίνακας 5.2: Ατέλεια τόξου για λυγισμό εκτός επιπέδου [2]

	shape of imperfection (sinus or parabola)	e_0 according to classification of cross section to buckling curve				
		a	b	c	d	
		$\ell \leq 20 \text{ m}$	$\frac{\ell}{300}$	$\frac{\ell}{250}$	$\frac{\ell}{200}$	$\frac{\ell}{150}$
		$\ell > 20 \text{ m}$ $\ell_1 = \sqrt{20 \ell [\text{m}]}$	$\frac{\ell_1}{300}$	$\frac{\ell_1}{250}$	$\frac{\ell_1}{200}$	$\frac{\ell_1}{150}$

Με βάση τους παραπάνω πίνακες, για καμπύλη λυγισμού c και αντισυμμετρικής μορφής ατέλεια για εντός επιπέδου λυγισμό προκύπτει:

$$e_0 = \frac{L}{400} = \frac{42\text{m}}{400} = 0.105\text{m} = 105\text{mm}$$

Για εκτός επιπέδου λυγισμό, για καμπύλη λυγισμού c και $L=42\text{m} > 20\text{m}$ προκύπτουν:

$$L_1 = \sqrt{20 \cdot L} = \sqrt{20 \cdot 42} = 28.98 \text{ m}$$

$$e_0 = \frac{L_1}{200} = \frac{28.98\text{m}}{200} = 0.1449\text{m} = 144.9\text{mm}$$

5.2.2 Ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού (EUGLI)

Στον Ευρωκώδικα 3 υπάρχει η δυνατότητα, να χρησιμοποιηθεί ως αρχική ατέλεια το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού. Η συγκεκριμένη ατέλεια αντικαθιστά τόσο την τοπική όσο και την καθολική ατέλεια. Στο εξής, στην παρούσα εργασία, θα αναφέρεται και με τη συντομογραφία EUGLI (Equivalent Global and Local Imperfection). Η ατέλεια έχει μορφή που δίνεται από την εξίσωση:

$$\eta_{\text{init},m}(x) = e_{0,m} \cdot \frac{N_{\text{cr},m}}{E \cdot I_m \cdot |\eta_{\text{cr},m}''|} \cdot \eta_{\text{cr}}(x) \tag{5.7}$$

Στην παραπάνω σχέση ο δείκτης m αναφέρεται στην κρίσιμη διατομή του εξεταζόμενου μέλους. Επίσης για $\bar{\lambda}_m > 0.2$:

$$e_{0,m} = a_m \cdot (\bar{\lambda}_m - 0.2) \cdot \frac{M_{\text{Rk},m}}{N_{\text{Rk},m}} \tag{5.8}$$

Στην παραπάνω σχέση:

a_m : είναι ο συντελεστής ατελειών της καμπύλης λυγισμού του μέλους

$$\bar{\lambda}_m = \sqrt{\frac{N_{\text{Rk},m}}{N_{\text{cr},m}}} \tag{5.9}$$

$E \cdot I_m \cdot |\eta_{\text{cr},m}''|$: είναι η απόλυτη τιμή του διαγράμματος ροπών κάμψης λόγω του $\eta_{\text{cr},m}$ στην κρίσιμη διατομή. Ο συγκεκριμένος όρος μπορεί να αντικατασταθεί από το $|M_{n,\text{cr},m}^{\text{II}}| \cdot (a_{\text{cr}} - 1)$, όπου $|M_{n,\text{cr},m}^{\text{II}}|$ είναι η ροπή κάμψης στη διατομή m, η οποία υπολογίζεται πραγματοποιώντας

ανάλυση 2^{ης} τάξης με ατέλεια το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής η_{cr} , θεωρώντας μία αυθαίρετη μέγιστη τιμή για το μέγεθος της ατέλειας $\eta_{cr,max}$.

Βασικό σημείο της μεθόδου είναι η εύρεση της κρίσιμης διατομής, η οποία για να εντοπιστεί απαιτείται στη γενική περίπτωση μία επαναληπτική διαδικασία. Σύμφωνα με τη μέθοδο, κρίσιμη είναι η διατομή, όπου παρουσιάζεται ο μεγαλύτερος βαθμός αξιοποίησης:

$$U = \frac{N_{Ed,m}}{N_{Rd,m}} + \frac{M_{Ed,ugli,m}^{II}}{M_{Rd,m}} = U_N + U_M$$

Στην παραπάνω σχέση $M_{Ed,ugli,m}^{II}$, είναι η ροπή κάμψης στη διατομή, που είναι αποτέλεσμα της αξονικής δύναμης, που ασκείται στο μέλος με την ισοδύναμη ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής και με ανάλυση 2^{ης} τάξης. Για την περίπτωση των τόξων της εργασίας ο όρος U_N μεγιστοποιείται στη βάση των τόξων, όπου η αξονική είναι μέγιστη, ενώ ο όρος U_M μεγιστοποιείται στη θέση, που εμφανίζει μέγιστη τιμή ο όρος $|\eta_{cr}''(x)/I(x)|$ ή για την περίπτωση σταθερής ροπής αδράνειας ο όρος $|\eta_{cr}''|$.

Για την εύρεση της κρίσιμης διατομής απαιτήθηκαν επαναλήψεις. Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει την πορεία υπολογισμού της αρχικής ατέλειας με βάση τα στοιχεία της κρίσιμης διατομής. Η αξονική δύναμη του πίνακα προέκυψε με ανάλυση 2^{ης} τάξης, αν και σύμφωνα με τον Ευρωκωδικά 3, μπορεί να εφαρμοστεί και γραμμική στατική ανάλυση.

Πίνακας 5.3: Μέγεθος αρχικής ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λογισμού

	$N_{Ed}(kN)$	$N_{cr}(kN)$	$\bar{\lambda}_m$	$e_{0,m}(m)$	$E \cdot I_m \cdot \eta_{cr,m}'' (kNm)$	$\eta_{init,m,max}(mm)$
Άνεμος Y	4904.40	81265.9	0.499	0.0338	374.36	185.1
Άνεμος X	4928.0	82297.6	0.496	0.0334	351.90	186.3
Άνεμος Z	5204.7	82442.4	0.495	0.0334	285.92	168.9

Η μέγιστη τιμή της αρχικής ατέλειας, όπως υπολογίστηκε με τη μέθοδο αυτή είναι κοντά στην τιμή του EN 1993-2 για ατέλεια τόξου εκτός επιπέδου.

5.3 Έλεγχος τόξων

Κατά τον έλεγχο των τόξων κρίσιμος προέκυψε ο έλεγχος του μέλους σε κάμψη και θλίψη. Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη που αναπτύχθηκαν για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης και το κάθε είδος ατέλειας. Στους πίνακες αυτούς παρουσιάζεται και η αύξηση στους βαθμούς αξιοποίησης και τη ροπή κάμψης μεταξύ των μεθόδων M1 και M2 για την περίπτωση της ατέλειας εντός επιπέδου.

Πίνακας 5.4: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το αριστερό τόξο (άνεμος Y)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	-4941.23	-4961.87	-4943.00	-5023.55
$M_{y,Ed}$ (kNm)	633.77	690.14	631.08	634.41
$M_{z,Ed}$ (kNm)	117.04	164.52	121.66	118.61
M_{Ed} (kNm)	644.49	709.48 (+10.08%)	642.70	645.40
Βαθμός αξιοποίησης	0.485	0.503 (+3.71%)	0.484	0.490

Πίνακας 5.5: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το δεξιό τόξο (άνεμος Y)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	-4962.77	-4982.35	-4962.29	-5041.83
$M_{y,Ed}$ (kNm)	649.69	698.40	652.54	651.07
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-88.58	-113.76	-83.89	-90.57
M_{Ed} (kNm)	655.70	707.60 (+7.92%)	657.91	657.34
Βαθμός αξιοποίησης	0.489	0.503 (+2.86%)	0.489	0.494

Πίνακας 5.6: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το αριστερό τόξο (άνεμος X)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	-4967.17	-4987.16	-4968.56	-5014.01
$M_{y,Ed}$ (kNm)	641.83	703.83	639.09	641.97
$M_{z,Ed}$ (kNm)	103.76	140.51	108.37	103.59
M_{Ed} (kNm)	650.16	717.72 (+10.39%)	648.21	650.27
Βαθμός αξιοποίησης	0.487	0.506 (+3.90%)	0.487	0.490

Πίνακας 5.7: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το δεξιό τόξο (άνεμος X)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	-4967.17	-4987.16	-4966.24	-5041.83
$M_{y,Ed}$ (kNm)	641.83	703.83	644.64	651.07
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-103.76	-140.51	-99.07	-90.57
M_{Ed} (kNm)	650.16	717.72 (+10.31%)	652.21	657.34
Βαθμός αξιοποίησης	0.487	0.506 (+3.90%)	0.487	0.494

Πίνακας 5.8: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το αριστερό τόξο (άνεμος Z)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	-5069.23	-5090.40	-5070.45	-5144.54
$M_{y,Ed}$ (kNm)	656.76	710.46	653.80	658.41
$M_{z,Ed}$ (kNm)	109.02	151.90	113.82	99.42
M_{Ed} (kNm)	665.75	726.52 (+9.13%)	663.63	665.87
Βαθμός αξιοποίησης	0.500	0.517 (+3.40%)	0.500	0.503

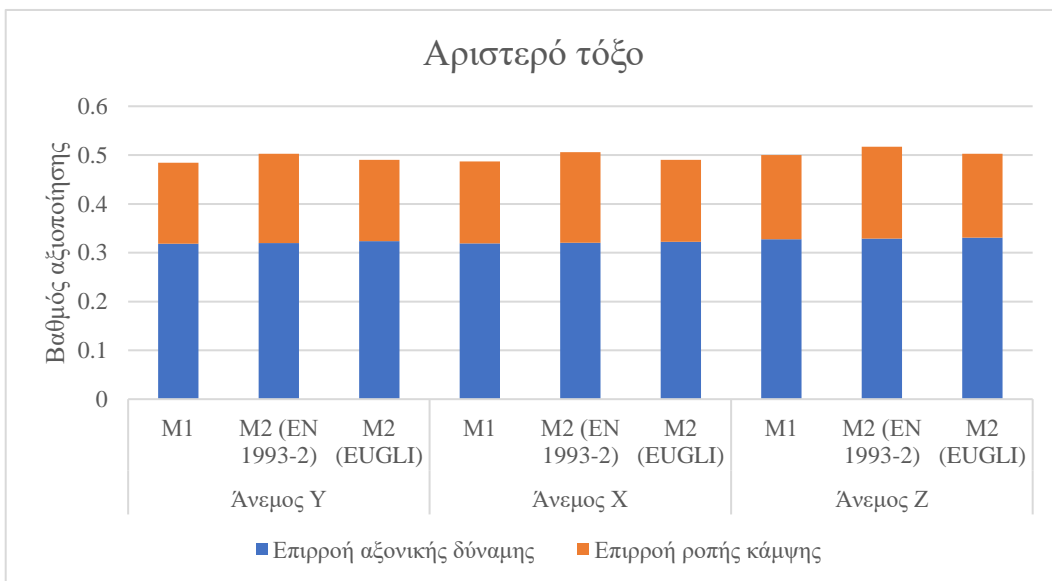
Πίνακας 5.9: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το δεξιό τόξο (άνεμος Z)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	-5245.18	-5265.88	-5244.44	-5320.35
$M_{y,Ed}$ (kNm)	680.95	735.94	684.06	682.50
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-113.13	-156.83	-108.09	-123.96
M_{Ed} (kNm)	690.28	752.46 (+9.01%)	692.55	693.67
Βαθμός αξιοποίησης	0.516	0.533 (+3.29%)	0.516	0.522

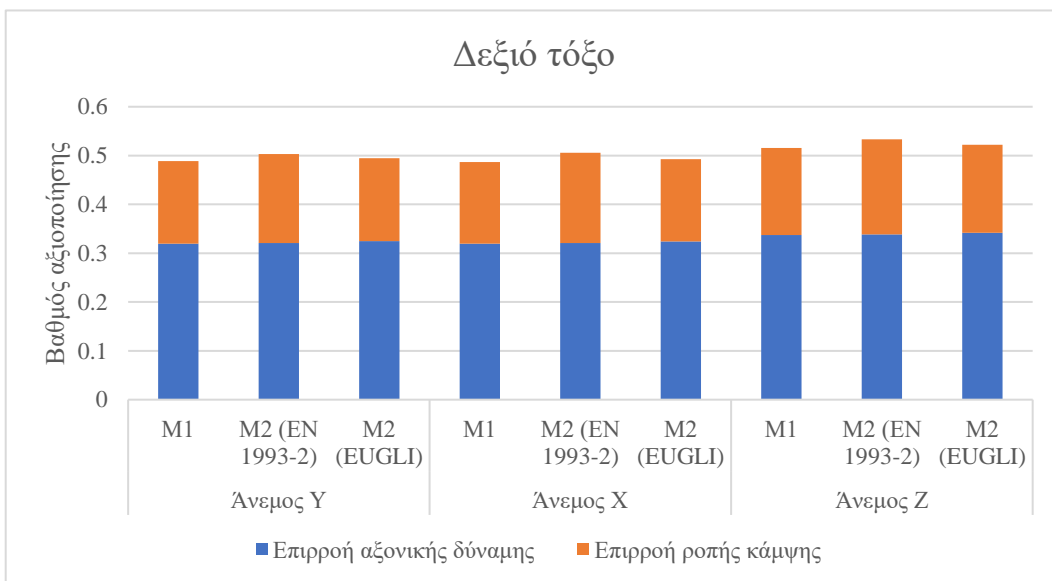
Η εισαγωγή της καθολικής ατέλειας δεν επηρεάζει σημαντικά τα εντατικά μεγέθη και τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης. Συγκεκριμένα, η ατέλεια εκτός επιπέδου οδήγησε στους ίδιους βαθμούς αξιοποίησης με αυτούς που προέκυψαν με τη μέθοδο M1, όπου δεν υπήρχε ατέλεια. Πρακτικά αμετάβλητοι παρέμειναν οι βαθμοί αξιοποίησης όταν τοποθετήθηκε η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, όπου παρατηρήθηκε μικρή αύξηση στην αξονική δύναμη. Τέλος, οι βαθμοί αξιοποίησης για την περίπτωση της ατέλειας εντός επιπέδου

ήταν ελαφρώς αυξημένοι σε σχέση με εκείνους από τη μέθοδο Μ1 (μέγιστη αύξηση ίση με 3.70%) λόγω αύξησης της ροπής κάμψης (μέγιστη αύξηση 10.39%).

Το Σχήμα 5.1 και το παρουσιάζουν σε ένα διάγραμμα το βαθμό αξιοποίησης για την κάθε μέθοδο και το κάθε τόξο. Οι βαθμοί αξιοποίησης είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Η περίπτωση της μεθόδου Μ2 κατά EN 1993-2 αναφέρεται στην ατέλεια εντός επιπέδου των τόξων, η οποία παρουσίασε και τα δυσμενέστερα αποτελέσματα. Με προσεκτική εξέταση, μπορεί κανείς να παρατηρήσει όσα περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, δηλαδή ότι η μέθοδος Μ2 με ατέλεια κατά EN 1993-2 εμφανίζει το μεγαλύτερο βαθμό αξιοποίησης (μέση αύξηση και τη μεγαλύτερη επιρροή της ροπής κάμψης. Η αύξηση αυτή, όπως, αναφέρθηκε οφείλεται στη αύξηση της ροπής κάμψης στην περίπτωση ατέλειας εντός επιπέδου για τα τόξα. Σημειώνεται ότι η μέση αύξηση των βαθμών αξιοποίησης από τη μέθοδο Μ1 στη Μ2 (EN 1993-2) ήταν 3.55%, ενώ από τη μέθοδο Μ1 στη Μ2 (EUGLI) 0.98%.

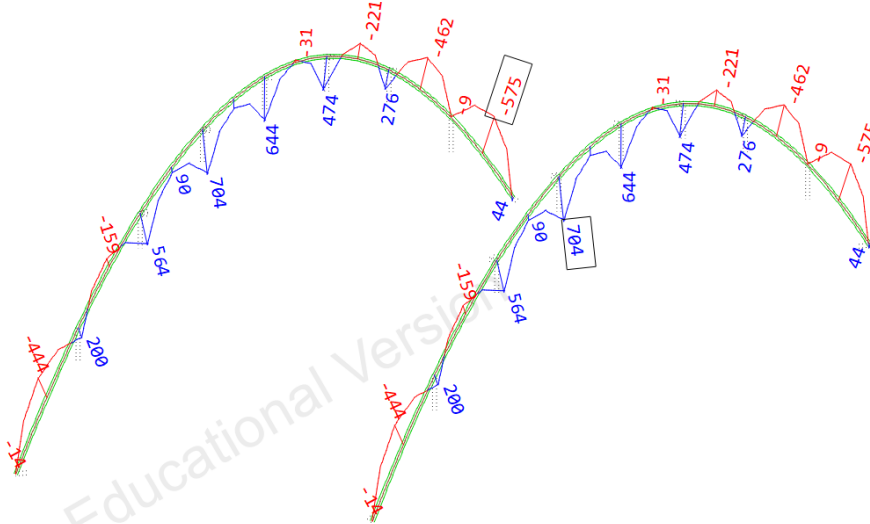


Σχήμα 5.1: Βαθμοί αξιοποίησης αριστερού τόξου (Μ2)

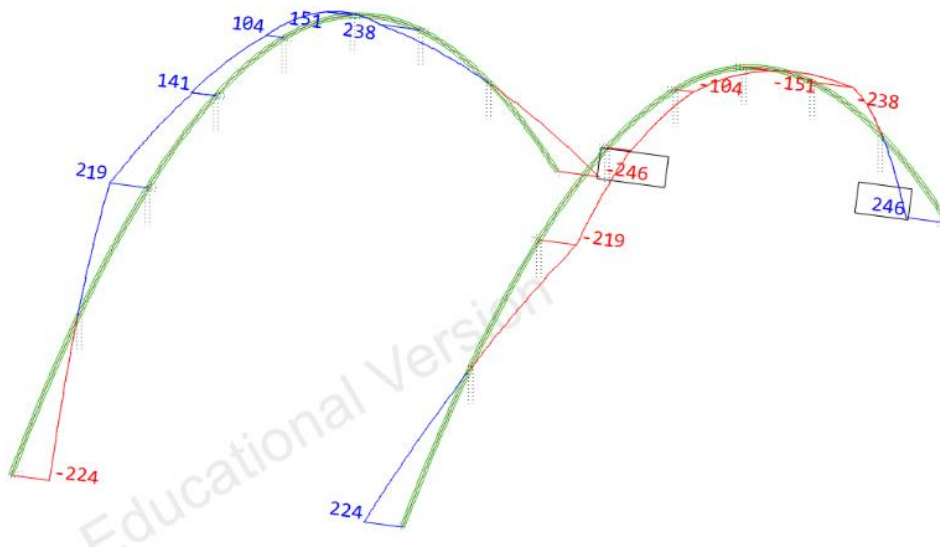


Σχήμα 5.2: Βαθμοί αξιοποίησης δεξιού τόξου (Μ2)

Το Σχήμα 5.3 και το Σχήμα 5.4 παρουσιάζουν τα διαγράμματα ροπών κάμψης M_y και M_z των τόξων αντίστοιχα, για την περίπτωση του δεύτερου συνδυασμού φόρτισης και για ατέλεια εντός επιπέδου. Για αυτήν τη φόρτιση προέκυψε η μεγαλύτερη αύξηση στη ροπή κάμψης των τόξων ανάμεσα στις μεθόδους M1 και M2.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y τόξων για ανάλυση 1^{ης} τάξης με ατέλεια εντός επιπέδου κατά EN 1993-2 (άνεμος X)



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z τόξων για ανάλυση 1^{ης} τάξης με ατέλεια εντός επιπέδου κατά EN 1993-2 (άνεμος X)

5.4 Έλεγχος κύριων δοκών

Για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης και για κάθε περίπτωση αρχικής ατέλειας, κρίσιμος προέκυψε ο έλεγχος της διατομής στις κύριες δοκούς. Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη, με τα οποία πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος των κύριων δοκών, καθώς και τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης. Στους πίνακες αυτούς παρουσιάζεται και η αύξηση στους

βαθμούς αξιοποίησης και τη ροπή κάμψης περί τον ασθενή άξονα ανάμεσα στις μεθόδους Μ1 και Μ2, για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού (EUGLI).

Πίνακας 5.10: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού (άνεμος Y)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	3419.40	3393.67	3411.60	3408.56
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1579.23	-1598.45	-1583.14	-1523.64
$M_{z,Ed}$ (kNm)	76.02	78.82	70.18	127.52 (+67.75%)
B_{Ed} (kNm ²)	-0.28	-0.28	-0.29	-0.74
Βαθμός αξιοποίησης	0.743	0.750	0.734	0.819 (+10.23%)

Πίνακας 5.11: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού (άνεμος Y)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	3418.79	3391.90	3426.88	3413.65
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1582.66	-1601.51	-1569.54	-1508.39
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-172.05	-173.87	-177.80	-224.37 (+30.41%)
B_{Ed} (kNm ²)	0.71	0.71	0.70	1.16
Βαθμός αξιοποίησης	0.909	0.914	0.916	0.983 (+7.53%)

Πίνακας 5.12: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού (άνεμος X)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	3407.96	3381.52	3400.01	3398.49
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1592.38	-1611.51	-1600.58	-1526.34
$M_{z,Ed}$ (kNm)	122.66	124.98	116.74	179.24 (+46.13%)
B_{Ed} (kNm ²)	-0.49	-0.49	-0.50	-0.98
Βαθμός αξιοποίησης	0.826	0.832	0.817	0.908 (+9.93%)

Πίνακας 5.13: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού (άνεμος X)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	3407.96	3381.52	3415.87	3415.76
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1592.38	-1611.51	-1583.52	-1511.84
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-122.66	-124.98	-128.47	-171.03 (+39.43%)
B_{Ed} (kNm ²)	0.49	0.49	0.49	0.90
Βαθμός αξιοποίησης	0.826	0.832	0.834	0.892 (+7.99%)

Πίνακας 5.14: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού (άνεμος Z)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	3498.50	3471.56	3490.29	3495.51
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1616.25	-1635.81	-1624.88	-1558.48
$M_{z,Ed}$ (kNm)	129.33	132.09	122.89	176.48 (+36.46%)
B_{Ed} (kNm ²)	-0.50	-0.50	-0.51	-0.89
Βαθμός αξιοποίησης	0.849	0.856	0.840	0.918 (+8.13%)

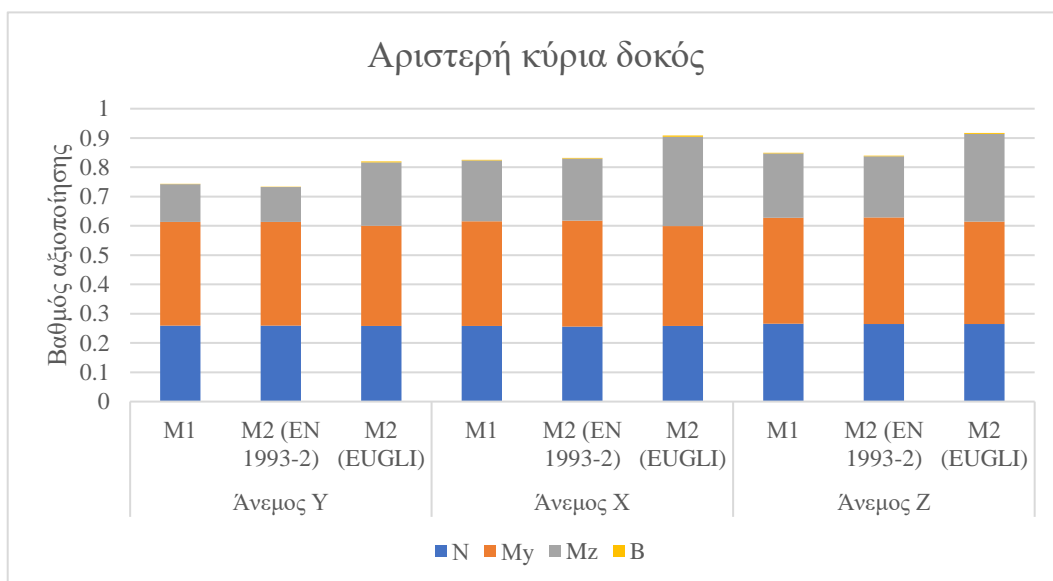
Πίνακας 5.15: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού (άνεμος Z)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	3624.34	3596.42	3632.70	3610.49
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1674.81	-1694.90	-1665.46	-1614.02
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-129.58	-131.65	-136.04	-182.12 (+40.55%)
B_{Ed} (kNm ²)	0.51	0.50	0.50	1.03
Βαθμός αξιοποίησης	0.872	0.878	0.882	0.949 (+8.83%)

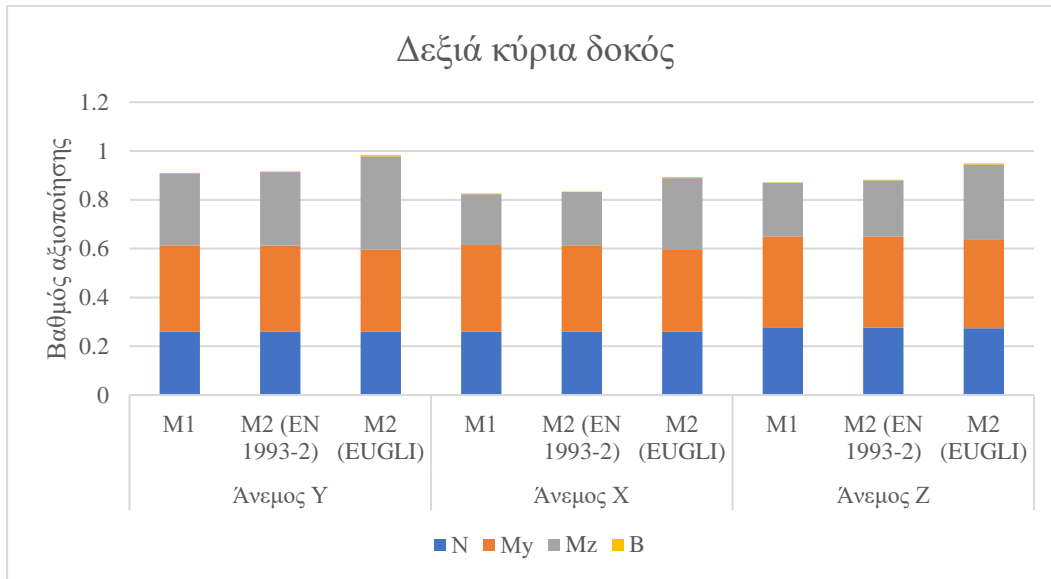
Η εισαγωγή της αρχικής ατέλειας, όπως ορίζεται στο EN 1993-2 είχε αμελητέα επιρροή στα εντατικά μεγέθη και τους βαθμούς αξιοποίησης. Αντίθετα, η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού οδήγησε σε σημαντική αύξηση της ροπής κάμψης περί τον ασθενή άξονα (μέγιστη αύξηση 67.75%) και του βαθμού αξιοποίησης (μέγιστη αύξηση 10.23%). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ιδιοδιάνυσμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού παρουσιάζει σημαντικές στροφές και μετατοπίσεις στις κύριες δοκούς.

Για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης, παρατηρείται ότι ο βαθμός αξιοποίησης είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα, κάτι που σημαίνει ότι η διατομή της κύριας δοκού δεν επαρκεί, ενώ στο αρχικό προσομοίωμα, όπου έγινε η διαστασιολόγηση δεν αντιμετώπιζαν πρόβλημα οι κύριες δοκοί. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους. Ο πρώτος είναι ότι στο προσομοίωμα, που έγινε η διαστασιολόγηση, η πλάκα του καταστρώματος θεωρήθηκε αρηγμάτωση και βρισκόταν στο ίδιο επίπεδο με τις κύριες δοκούς και τις διαδοκίδες, με αποτέλεσμα να γίνεται υποεκτίμηση της αξονικής εφελκυστικής δύναμης των κύριων δοκών. Επίσης, στην παρούσα εργασία το τόξο είναι έκκεντρα τοποθετημένο ως προς τις κύριες δοκούς, με αποτέλεσμα να ασκούνται σημαντικές ροπές κάμψης στην στήριξη.

Το Σχήμα 5.5 και το Σχήμα 5.6 παρουσιάζουν τους βαθμούς αξιοποίησης για την αριστερή και τη δεξιά κύρια δοκό. Οι μεγαλύτεροι βαθμοί αξιοποίησης εμφανίζονται για τη μέθοδο Μ2 και τη χρήση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, ενώ οι βαθμοί αξιοποίησης ανάμεσα στη μέθοδο Μ1 και τη Μ2 (EN 1993-2) δεν παρουσιάζουν κάποια εμφανή απόκλιση. Όπως αναφέρθηκε ήδη αυτό συμβαίνει, γιατί η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού εισάγει ατέλειες τοπικού χαρακτήρα στο μέλος. Οι βαθμοί αξιοποίησης ανάμεσα στη μέθοδο Μ1 και Μ2 (EN 1993-2) μειώθηκαν κατά μέσο όρο κατά 0.55% για την αριστερή κύρια δοκό και αυξήθηκαν κατά μέσο όρο κατά 0.98% για τη δεξιά κύρια δοκό. Οι βαθμοί αξιοποίησης ανάμεσα στη μέθοδο Μ1 και Μ2 (EUGLI) αυξήθηκαν κατά μέσο όρο κατά 9.44% για την αριστερή κύρια δοκό και κατά 8.32% για τη δεξιά κύρια δοκό. Για τη συγκεκριμένη ατέλεια η μέση αύξηση στη ροπή κάμψης M_z περί τον ασθενή άξονα ήταν ίση με 43.43%. Σε γενικές γραμμές η μέση αύξηση του βαθμού αξιοποίησης ήταν 0.21% για την ατέλεια σύμφωνα με τον EN 1993-2 και 8.88% για την ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού.

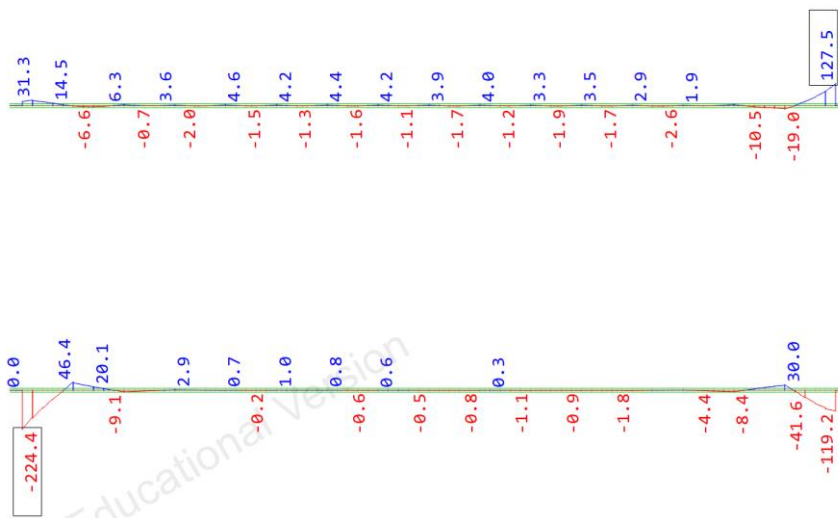


Σχήμα 5.5: Βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού (M2)



Σχήμα 5.6: Βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού (M2)

Το Σχήμα 5.7 παρουσιάζει σε κάτοψη το διάγραμμα ροπών κάμψης M_z περί τον ασθενή άξονα για τις κύριες δοκούς, για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης και για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού. Για την περίπτωση αυτή εμφανίστηκε η μεγαλύτερη αύξηση στις ροπές κάμψης M_z σε σχέση με τη μέθοδο M1.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z κύριων δοκών για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού (άνεμος Υ)

5.5 Έλεγχος διαδοκίδων

Για τις διαδοκίδες κρίσιμος ήταν ο έλεγχος της διατομής του μέσου. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης και το κάθε είδος ατέλειας, τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη και οι βαθμοί αξιοποίησης.

Πίνακας 5.16: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης μεσαίας διαδοκίδας (άνεμος Y)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	1461.68	1461.93	1462.42	1462.30
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4006.64	4006.53	4006.30	4005.44
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.44	0.78	0.44	-2.44
B_{Ed} (kNm ²)	-0.02	-0.02	-0.02	0.50
Βαθμός αξιοποίησης	1.009	1.009	1.009	1.014

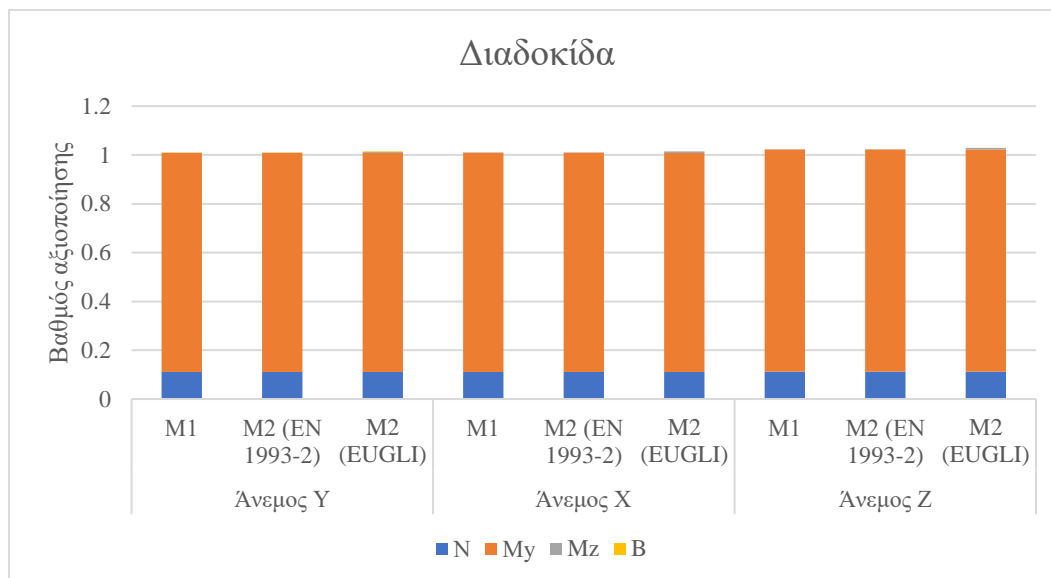
Πίνακας 5.17: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης μεσαίας διαδοκίδας (άνεμος X)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	1469.46	1469.71	1470.30	1469.43
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4006.84	4006.73	4006.46	4006.18
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.47	0.81	0.47	-3.84
B_{Ed} (kNm ²)	-0.02	-0.02	-0.02	-0.08
Βαθμός αξιοποίησης	1.009	1.010	1.010	1.015

Πίνακας 5.18: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης μεσαίας διαδοκίδας (άνεμος Z)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	1474.50	1474.76	1475.50	1474.97
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4067.90	4067.78	4067.45	4067.05
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.44	0.79	0.44	-3.51
B_{Ed} (kNm ²)	-0.02	-0.02	-0.02	-0.30
Βαθμός αξιοποίησης	1.023	1.024	1.024	1.029

Όπως φαίνεται δεν προέκυψαν διαφοροποιήσεις στους βαθμούς αξιοποίησης ανάμεσα στις μεθόδους M1 και M2. Οι βαθμοί αξιοποίησης είναι ελαφρώς αυξημένοι στην περίπτωση της εισαγωγής της αρχικής ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, επειδή εμφανίζονται και ροπές κατά τον ασθενή άξονα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ιδιοδιάνυσμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού εμφανίζει στροφές και μετακινήσεις για τη μεσαία διαδοκίδα. Αυτή η συμπεριφορά παρουσιάζεται και στο Σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8: Βαθμοί αξιοποίησης μεσαίας διαδοκίδας

5.6 Έλεγχος εγκάρσιων συνδέσμων τόξων

Κατά τον έλεγχο των εγκάρσιων συνδέσμων των τόξων προέκυψε κρίσιμος ο έλεγχος της διατομής. Ο Πίνακας 5.19 παρουσιάζει τα μέλη και την αντίστοιχη διατομή στα οποία εμφανίστηκαν οι μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης για την κάθε περίπτωση. Οι υπόλοιποι πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη και τους βαθμούς αξιοποίησης για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης και το κάθε είδος ατέλειας. Στους πίνακες παρουσιάζεται και η αύξηση στο βαθμό αξιοποίησης ανάμεσα στις μεθόδους M1 και M2 για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού (EUGLI).

Πίνακας 5.19: Εγκάρσιοι σύνδεσμοι, στους οποίους εμφανίστηκαν οι μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης (Μέθοδος M2)

	Ατέλεια εντός επιπέδου	Ατέλεια εκτός επιπέδου	EUGLI
Άνεμος Y	2 (μέσο)	2,4 (μέσο)	4 (άκρη)
Άνεμος X	2 (μέσο)	2 (μέσο)	2 (μέσο)
Άνεμος Z	2 (μέσο)	2,4 (μέσο)	4 (μέσο)

Πίνακας 5.20: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Y)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	105.59	106.30	108.41	149.05
$M_{y,Ed}$ (kNm)	14.36	14.37	14.35	-16.88
$M_{z,Ed}$ (kNm)	9.51	9.45	9.52	8.12
M_{Ed} (kNm)	17.22	17.20	17.22	18.73
Βαθμός αξιοποίησης	0.158	0.159	0.160	0.189 (+19.62%)

Πίνακας 5.21: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος X)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	61.84	62.38	64.70	103.33
$M_{y,Ed}$ (kNm)	15.90	15.93	15.90	16.31
$M_{z,Ed}$ (kNm)	9.17	9.13	9.17	9.43
M_{Ed} (kNm)	18.35	18.36	18.35	18.84
Βαθμός αξιοποίησης	0.145	0.145	0.146	0.168 (+15.86%)

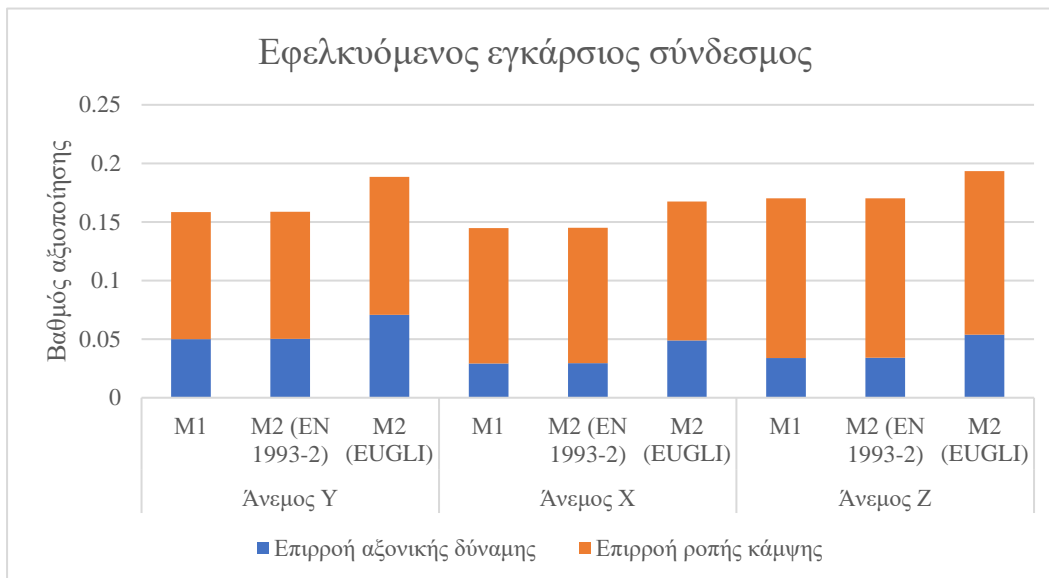
Πίνακας 5.22: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Z)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	71.56	72.08	74.37	113.48
$M_{y,Ed}$ (kNm)	18.37	18.37	18.37	18.79
$M_{z,Ed}$ (kNm)	11.44	11.40	11.44	-11.77
M_{Ed} (kNm)	21.64	21.62	21.64	22.17
Βαθμός αξιοποίησης	0.170	0.170	0.171	0.193 (+13.53%)

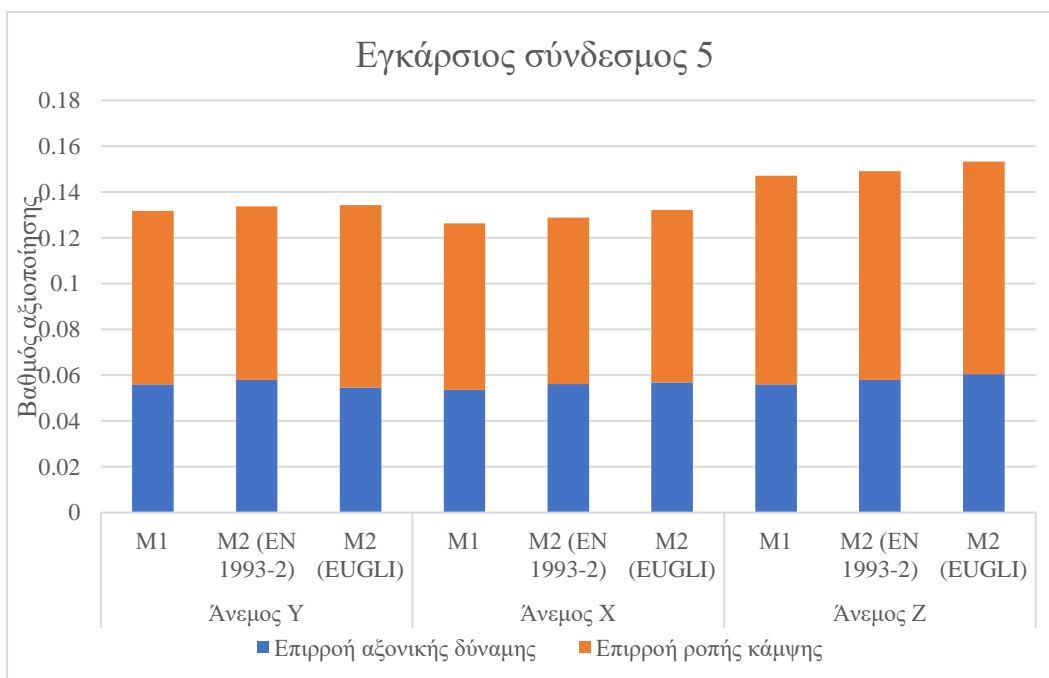
Οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στη μέθοδο M1 και M2 για την περίπτωση της ατέλειας, όπως ορίζεται στον EN 1993-2, είναι αμελητέες. Για την περίπτωση της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση των αξονικών δυνάμεων καθώς επίσης και των βαθμών αξιοποίησης. Η αύξηση αυτή παρατηρείται, επειδή κατά τον καθολικό λυγισμό των τόξων σύμφωνα με την 1^η ιδιομορφή λυγισμού, συμμετέχουν οι εγκάρσιοι σύνδεσμοι παρέχοντας πλευρική υποστήριξη.

Το Σχήμα 5.9 παρουσιάζει τους βαθμούς αξιοποίησης για τη διατομή του κρίσιμου εφελκόμενου εγκάρσιου συνδέσμου για τις μεθόδους M1 και M2 για τις περιπτώσεις ατέλειας εντός επιπέδου και ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού. Οι βαθμοί αξιοποίησης δεν παρουσιάζουν σημαντική διαφοροποίηση, ενώ είναι εμφανές ότι η χρήση ατέλειας στο

σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού δίνει τα πιο δυσμενή αποτελέσματα. Επίσης, είναι εμφανής για την ίδια περίπτωση η αύξηση της αξονικής δύναμης (μπλε χρώμα).

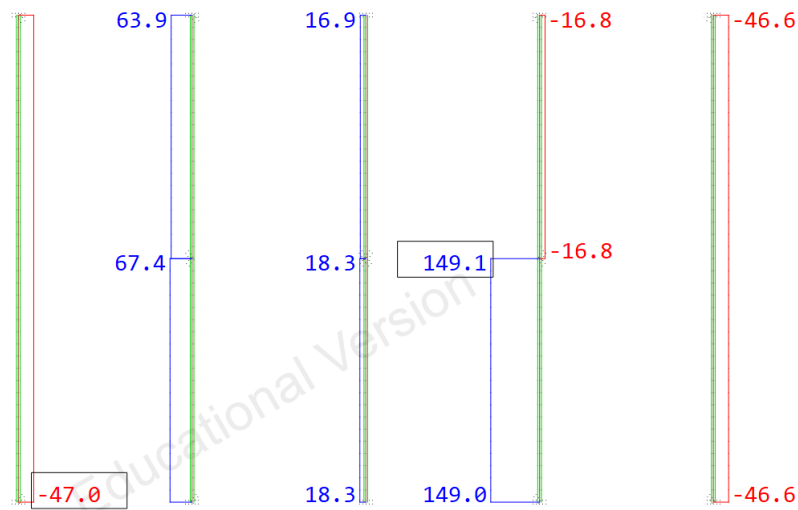


Σχήμα 5.9: Βαθμοί αξιοποίησης εφελκόμενου συνδέσμου (M2)

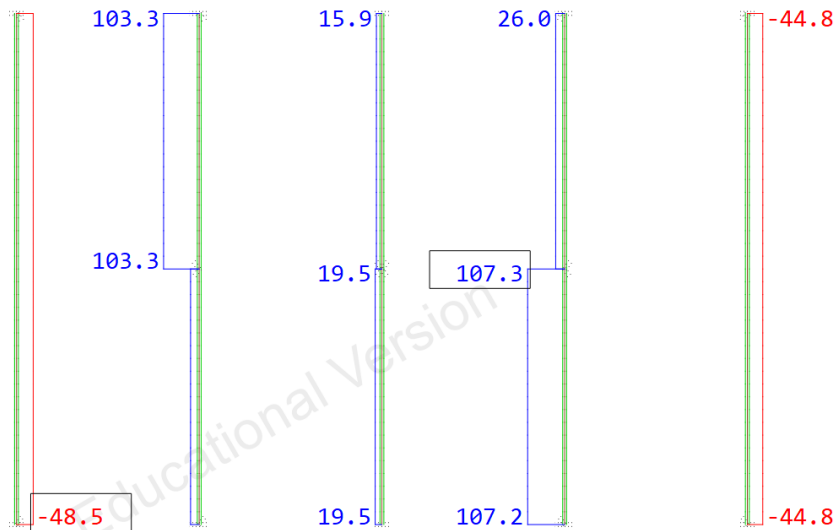


Σχήμα 5.10: Βαθμοί αξιοποίησης θλιβόμενου συνδέσμου 5 (M2)

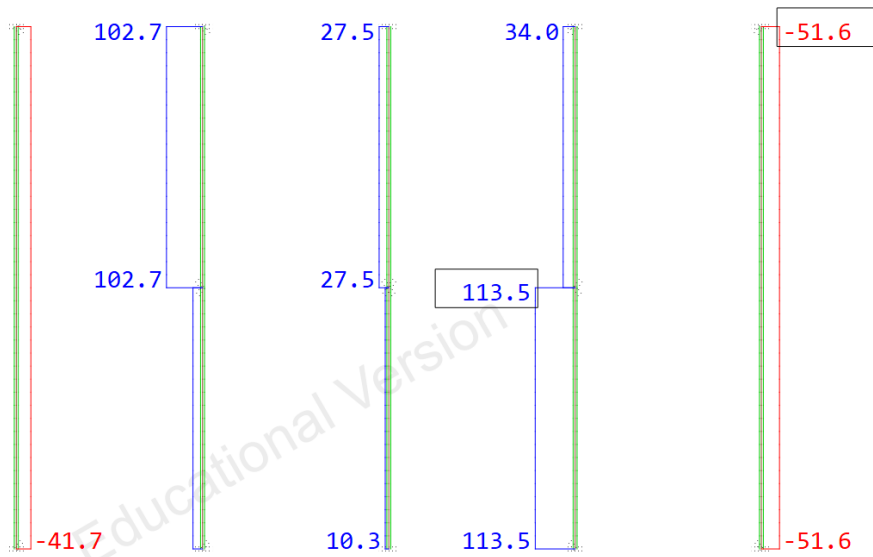
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται οι αξονικές δυνάμεις που ασκούνται στους εγκάρσιους συνδέσμους των τόξων για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού (EUGLI).



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N εγκάρσιων συνδέσμων τόξων για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λογισμού (άνεμος Y)



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N εγκάρσιων συνδέσμων τόξων για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λογισμού (άνεμος X)



Σχήμα 5.13: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N εγκάρσιων συνδέσμων τόξων για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού (άνεμος Z)

5.7 Έλεγχος διαγώνιων συνδέσμων τόξων

Κατά τον έλεγχο των διαγώνιων συνδέσμων των τόξων κρίσιμος προέκυψε ο έλεγχος του μέλους. Ο Πίνακας 5.23 παρουσιάζει τα μέλη, στα οποία παρουσιάστηκαν οι μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης. Οι υπόλοιποι πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη και τους βαθμούς αξιοποίησης για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης και το κάθε είδος ατέλειας. Στους πίνακες παρουσιάζεται και η αύξηση στο μέγιστο βαθμό αξιοποίησης ανάμεσα στις μεθόδους M1 και M2 για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού.

Πίνακας 5.23: Διαγώνια μέλη, στα οποία εμφανίστηκαν οι μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης

	Ατέλεια εντός επιπέδου	Ατέλεια εκτός επιπέδου	EUGLI
Άνεμος Y	4	4,6	6
Άνεμος X	5,6	5	6
Άνεμος Z	4	4,6	6

Πίνακας 5.24: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Y)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	-69.47	-69.99	-69.44	-128.76
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4.29	4.29	4.29	4.16
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.72	0.72	0.72	-0.77
M_{Ed} (kNm)	4.35	4.35	4.35	4.23
Βαθμός αξιοποίησης	0.372	0.372	0.372	0.631 (+69.62%)

Πίνακας 5.25: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος X)

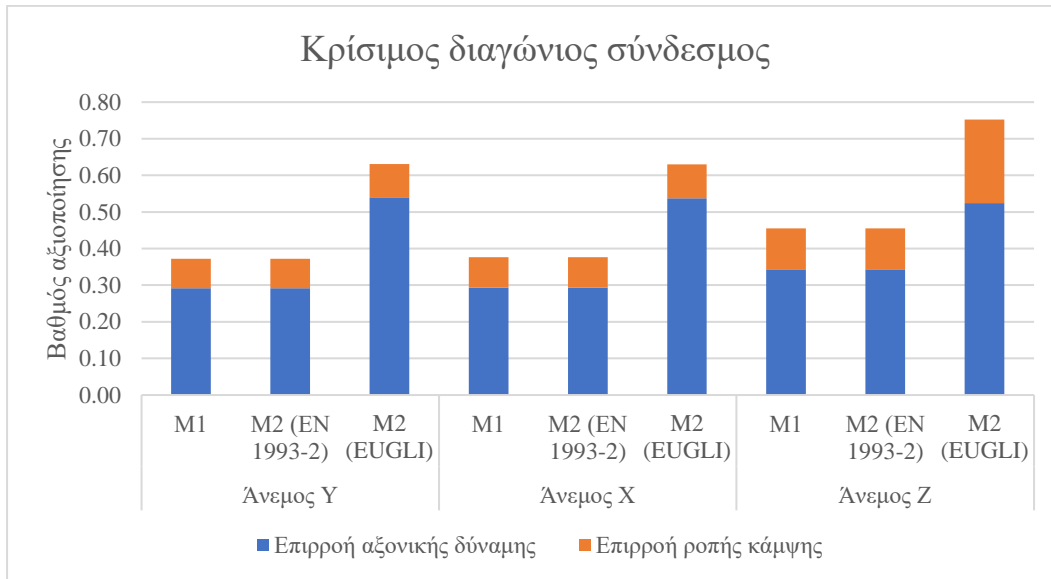
	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	-69.84	-69.98	-69.89	-127.76
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4.32	4.32	4.32	4.22
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.98	0.98	-0.98	0.77
M_{Ed} (kNm)	4.43	4.43	4.43	4.29
Βαθμός αξιοποίησης	0.376	0.376	0.376	0.630 (+67.55%)

Πίνακας 5.26: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Z)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	-81.34	-81.64	-81.33	-124.26
$M_{y,Ed}$ (kNm)	5.83	5.84	5.82	8.04
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0	0	0	-7.04
M_{Ed} (kNm)	5.83	5.84	5.82	10.69
Βαθμός αξιοποίησης	0.455	0.455	0.455	0.752 (+65.27%)

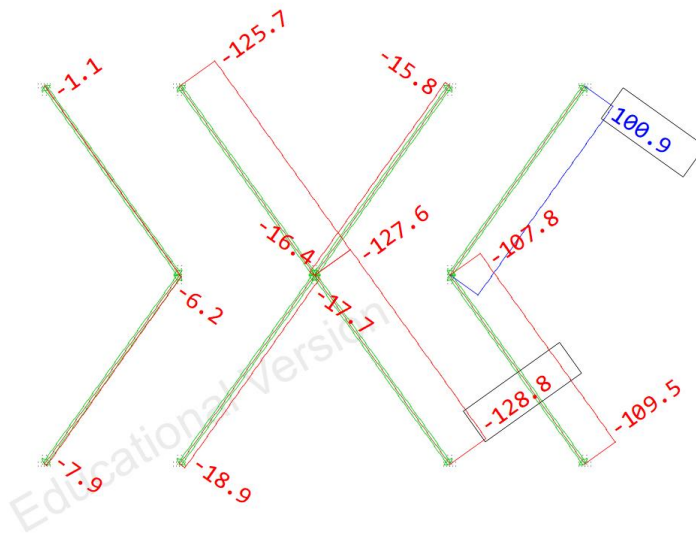
Οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στη μέθοδο M1 και M2 για την περίπτωση της ατέλειας, όπως ορίζεται στο EN 1993-2, είναι αμελητέες. Για την περίπτωση της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού εμφανίζεται σημαντική αύξηση στους βαθμούς αξιοποίησης κυρίως λόγω αύξησης της θλιπτικής αξονικής δύναμης. Η αύξηση της θλιπτικής δύναμης οφείλεται στο γεγονός ότι για την 1^η ιδιομορφή λυγισμού οι διαγώνιοι σύνδεσμοι ενεργοποιούνται εμποδίζοντας την πλευρική εκτροπή του τόξου.

Το Σχήμα 5.14 παρουσιάζει τους βαθμούς αξιοποίησης για τον εκάστοτε κρίσιμο διαγώνιο σύνδεσμο. Η επιρροή της αξονικής δύναμης είναι κυρίαρχη για όλες τις περιπτώσεις και οφείλεται στην επιρροή των φαινομένων 2^{ης} και της τοπικής ατέλειας, όπως είναι ενσωματωμένη στο μειωτικό συντελεστή χ . Όπως φαίνεται η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού οδηγεί στα πιο δυσμενή αποτελέσματα με την αντίστοιχη επιρροή της αξονικής θλιπτικής δύναμης να είναι πολύ πιο αυξημένη σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις. Επίσης, στο ίδιο Σχήμα φαίνεται ότι και η επιρροή της ροπής κάμψης είναι και αυτή αυξημένη σε σχέση με τη μέθοδο M1 και τη M2 (EN 1993-2) για την περίπτωση ανέμου κατά Z.

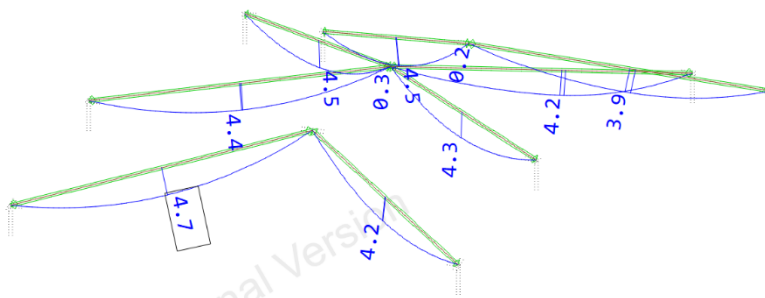


Σχήμα 5.14: Βαθμοί αξιοποίησης κρίσιμου διαγώνιου συνδέσμου (M2)

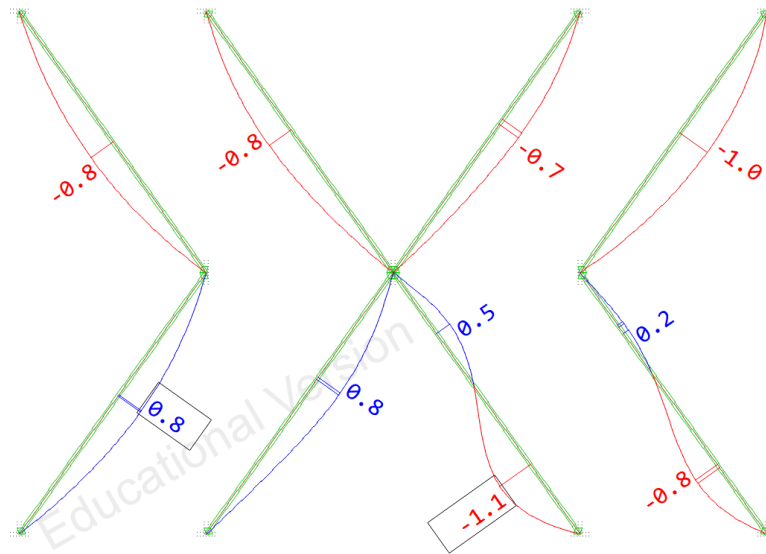
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα αξονικών δυνάμεων και ροπών κάμψης των διαγώνιων συνδέσμων των τόξων για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης, για την περίπτωση της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού.



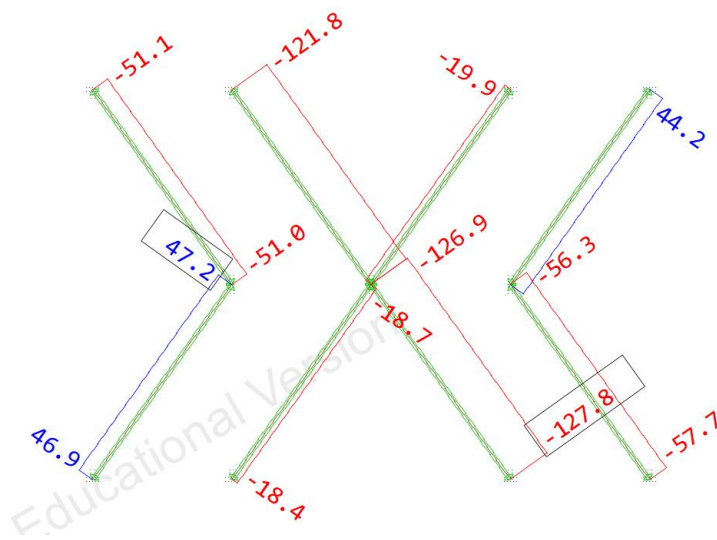
Σχήμα 5.15: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N διαγώνιων συνδέσμων τόξων για άνεμο κατά Y (EUGLI M2)



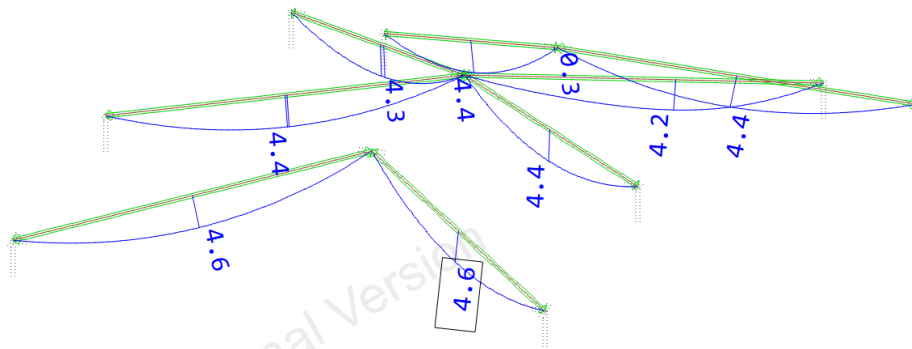
Σχήμα 5.16: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y διαγώνιων συνδέσμων τόξων για άνεμο κατά Y (EUGLI M2)



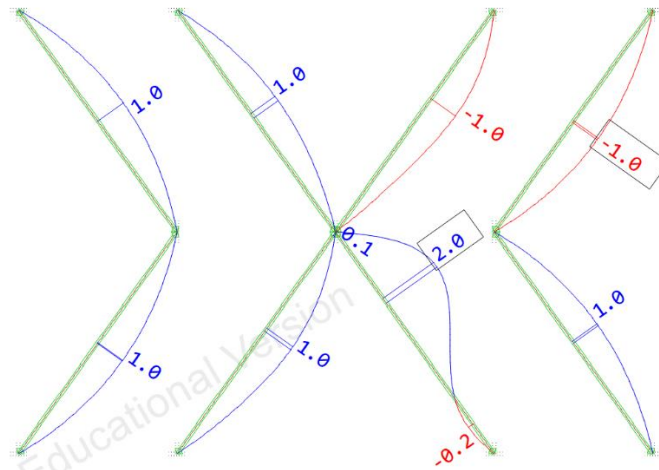
Σχήμα 5.17: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z διαγώνιων συνδέσμων τόξων για άνεμο κατά Y (EUGLI M2)



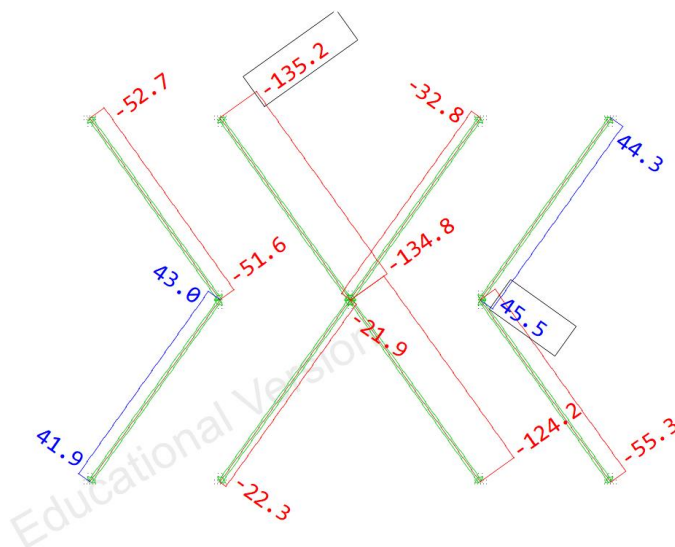
Σχήμα 5.18: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N διαγώνιων συνδέσμων τόξων για άνεμο κατά X (EUGLI M2)



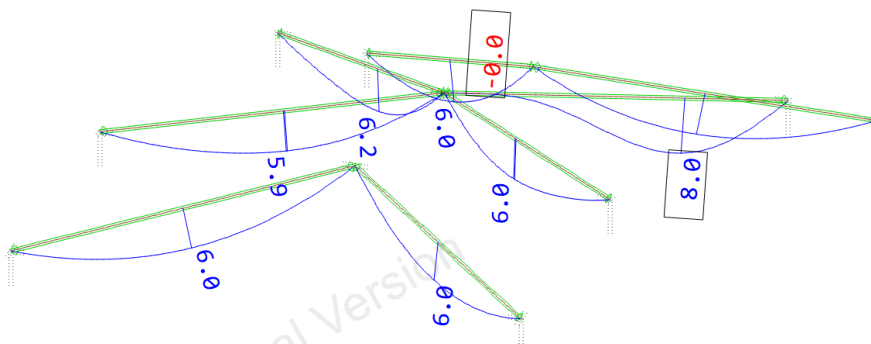
Σχήμα 5.19: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y διαγώνιων συνδέσμων τόξων για άνεμο κατά X (EUGLI M2)



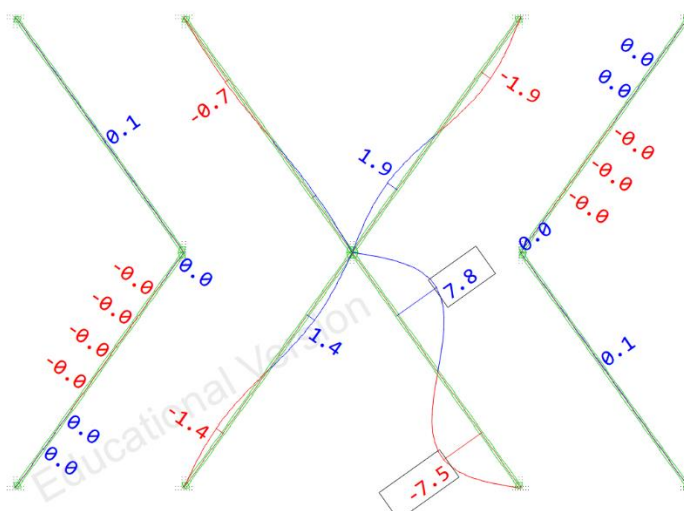
Σχήμα 5.20: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z διαγώνιων συνδέσμων τόξων για άνεμο κατά X (EUGLI M2)



Σχήμα 5.21: Διάγραμμα αξονικών δυνάμεων N διαγώνιων συνδέσμων τόξων για άνεμο κατά Z (EUGLI M2)



Σχήμα 5.22: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y διαγώνιων συνδέσμων τόξων για άνεμο κατά Z (EUGLI M2)



Σχήμα 5.23: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z διαγώνιων συνδέσμων τόξων για άνεμο κατά Z (EUGLI M2)

5.8 Έλεγχος αναρτήρων

Οι αναρτήρες είναι εφελκόμενα μέλη, οπότε κρίσιμος είναι ο έλεγχος της διατομής. Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη και τους βαθμούς αξιοποίησης για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης και το κάθε είδος ατέλειας. Για την ατέλεια εντός επιπέδου, τα αποτελέσματα αναφέρονται στον 6^ο αναρτήρα του αριστερού τόξου για άνεμο κατά Y, στον 6^ο αναρτήρα του αριστερού και του δεξιού τόξου για άνεμο κατά X και στον 6^ο αναρτήρα του δεξιού τόξου για άνεμο κατά Z. Για την ατέλεια εκτός επιπέδου, τα αποτελέσματα αναφέρονται στον 6^ο αναρτήρα του αριστερού τόξου για άνεμο κατά Y και X και στον 6^ο αναρτήρα του δεξιού τόξου για άνεμο κατά Z. Για την ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, τα αποτελέσματα αναφέρονται στον 2^ο αναρτήρα του αριστερού τόξου για άνεμο κατά Y και στον 6^ο αναρτήρα του δεξιού τόξου για άνεμο κατά X και κατά Z.

Πίνακας 5.27: Αξονικές δυνάμεις και βαθμοί αξιοποίησης αναρτήρων (άνεμος Y)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	890.75	916.75	891.54	937.42
Βαθμός αξιοποίησης	0.623	0.641	0.623	0.655

Πίνακας 5.28: Αξονικές δυνάμεις και βαθμοί αξιοποίησης αναρτήρων (άνεμος X)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	892.57	918.52	893.22	937.23
Βαθμός αξιοποίησης	0.624	0.642	0.625	0.655

Πίνακας 5.29: Αξονικές δυνάμεις και βαθμοί αξιοποίησης αναρτήρων (άνεμος Z)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	940.37	967.76	939.92	984.56
Βαθμός αξιοποίησης	0.658	0.677	0.657	0.688

Για την ατέλεια εντός επιπέδου οι αξονικές δυνάμεις των αναρτήρων εμφανίστηκαν ελαφρά αυξημένες. Για την ατέλεια εκτός επιπέδου οι αξονικές δυνάμεις δεν παρουσίασαν κάποια ουσιαστική διαφοροποίηση σε σχέση με αυτές της μεθόδου M1. Τέλος, για την περίπτωση της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, εμφανίστηκε η μεγαλύτερη αύξηση στις αξονικές δυνάμεις των αναρτήρων και στους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης, χωρίς όμως αυτή η αύξηση να επηρεάζει ουσιαστικά το σχεδιασμό.

5.9 Έλεγχος συνδέσμων καταστρώματος

Για τους συνδέσμους του καταστρώματος κρίσιμος είναι ο έλεγχος της διατομής, καθώς εμφανίζεται στα σημεία τομή με τα τόξα και τις κύριες δοκούς μία σημαντική αξονική εφελκυστική δύναμη. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι κρίσιμες αξονικές δυνάμεις και οι βαθμοί αξιοποίησης για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης και είδος ατέλειας.

Πίνακας 5.30: Αξονικές δυνάμεις και βαθμοί αξιοποίησης συνδέσμων καταστρώματος (άνεμος Y)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	477.36	512.44	463.37	489.97
Βαθμός αξιοποίησης	0.330	0.354	0.320	0.339

Πίνακας 5.31: Αξονικές δυνάμεις και βαθμοί αξιοποίησης συνδέσμων καταστρώματος (άνεμος X)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	468.42	503.34	482.56	471.73
Βαθμός αξιοποίησης	0.324	0.348	0.334	0.326

Πίνακας 5.32: Αξονικές δυνάμεις και βαθμοί αξιοποίησης συνδέσμων καταστρώματος (άνεμος Z)

	Χωρίς ατέλεια (M1)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	EUGLI
N_{Ed} (kN)	487.18	523.63	490.71	489.20
Βαθμός αξιοποίησης	0.337	0.362	0.339	0.338

Για την περίπτωση καθολικής ατέλειας εκτός επιπέδου και ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού δεν παρατηρήθηκαν ουσιαστικές διαφορές ανάμεσα στη μέθοδο M1 και στη μέθοδο M2. Για την περίπτωση καθολικής ατέλειας εντός επιπέδου παρουσιάστηκε μικρή αύξηση στις αξονικές δυνάμεις και στους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης.

5.10 Σύνοψη αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόστηκε η μέθοδος M2 για την στατική ανάλυση του φορέα και τον έλεγχο των μελών. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις μορφές αρχικής ατέλειας, οι δύο όπως ορίζονται στο κείμενο του EN 1993-2 και η τρίτη στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού των τόξων. Η μέθοδος M2 είναι πιο πολυπλοκή στην ανάλυση του φορέα σε σχέση με τη μέθοδο M1, καθώς πρέπει να γίνει η εισαγωγή της αρχικής ατέλειας στο προσομοίωμα. Ως προς τις σχέσεις ελέγχου, δεν παρουσιάζει κάποια παραπάνω δυσκολία σε σύγκριση με τη M1. Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει για τη μέθοδο της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, η οποία είναι χρονοβόρα κατά τον υπολογισμό της αρχικής ατέλειας, γιατί απαιτείται μία επαναληπτική διαδικασία, προκειμένου να εντοπιστεί η κρίσιμη διατομή. Επισημαίνεται ότι ο σχεδιασμός της γέφυρας με βάση τα κριτήρια του νέου κειμένου του Ευρωκώδικα, επιτρέπεται να πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο M2.

Για τα τόξα και τους διαγώνιους συνδέσμους των τόξων κρίσιμος προέκυψε ο έλεγχος του μέλους σε θλίψη και κάμψη. Για τα τόξα η ατέλεια εντός επιπέδου προκάλεσε τα δυσμενέστερα αποτελέσματα, καθώς οδήγησε σε μικρή αύξηση της ροπής κάμψης και του αντίστοιχου βαθμού αξιοποίησης. Για τους διαγώνιους συνδέσμους, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της αξονικής θλιπτικής δύναμης του 6^{ου} συνδέσμου στην περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, η οποία οφείλεται στην πλευρική υποστήριξη που παρέχουν οι σύνδεσμοι στο πλαίσιο της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού των τόξων.

Για τις κύριες δοκούς, τις διαδοκίδες, τους εγκάρσιους συνδέσμους των τόξων, τους αναρτήρες και τους συνδέσμους του καταστρώματος κρίσιμος προέκυψε ο έλεγχος της διατομής. Για τις κύριες δοκούς εμφανίστηκε σημαντική αύξηση της ροπής κάμψης περί τον ασθενή άξονα M_z με επακόλουθη αύξηση του βαθμού αξιοποίησης για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το ιδιοδιάγραμμα της ιδιομορφής λυγισμού των τόξων, επηρεάζει και τις κύριες δοκούς, οι οποίες στο πλαίσιο της ιδιομορφής

εμφανίζουν στροφές και μετακινήσεις. Στους εγκάρσιους συνδέσμους για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, παρουσιάστηκε σημαντική αύξηση της εφελκυστικής δύναμης ορισμένων συνδέσμων, η οποία οφείλεται στην ενεργοποίησή τους κατά το λυγισμό των τόξων. Τέλος, οι διαδοκίδες, οι αναρτήρες και οι σύνδεσμοι του καταστρώματος παρουσίασαν μικρή αύξηση των βαθμών αξιοποίησης. Για την περίπτωση των διαδοκίδων η μικρή αυτή αύξηση εμφανίστηκε για την ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού και οφείλεται, όπως και στην περίπτωση των κύριων δοκών, σε μετακινήσεις και στροφές που εισάγονται λόγω της ιδιομορφής λυγισμού.

Η αρχική ατέλεια είτε κατά τον EN 1993-2 είτε στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού οδήγησε σε παραπλήσια αποτελέσματα με αυτά που προέκυψαν από τη μέθοδο M1 για τα δύο τόξα. Ωστόσο, επειδή η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού εμπεριέχει και την τοπική ατέλεια των μελών οδήγησε σε σημαντική αύξηση του βαθμού αξιοποίησης των κύριων δοκών, των διαγώνιων και των εγκάρσιων συνδέσμων των τόξων μέσω αύξησης κυρίως της αξονικής δύναμης και σε κάποιες περιπτώσεις και της ροπής κάμψης. Αυτή η αύξηση στα εντατικά μεγέθη και στους βαθμούς αξιοποίησης δεν είναι δυνατόν να παρουσιαστεί με τη χρήση της ατέλειας κατά τον EN 1993-2, οπότε τα αντίστοιχα αποτελέσματα ήταν όμοια με αυτά της μεθόδου M1.

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο σχετικά με τα παραπάνω είναι ότι με τη χρήση της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού είναι δυνατό να αναπτυχθούν εντατικά μεγέθη στα μέλη, τα οποία δεν μπορούν να προβλεφθούν με κάποιο άλλο τρόπο. Οι αξονικές δυνάμεις που αναπτύχθηκαν λόγω της συγκεκριμένης ατέλειας στα διαγώνια και τα εγκάρσια μέλη, δεν μπορούν να αναπτυχθούν με χρήση τοπικής ατέλειας με μορφή αρχικής καμπυλότητας. Το συγκεκριμένο στοιχείο θα εξεταστεί και σε επόμενο κεφάλαιο, όπου θα γίνει χρήση και της τοπικής ατέλειας στα μέλη.

6 ΜΕΘΟΔΟΣ M3

6.1 Γενικά

Η μέθοδος M3 είναι η πρώτη μέθοδος στην οποία απαιτείται να πραγματοποιηθεί στατική ανάλυση 2^{ης} τάξης. Συγκεκριμένα απαιτείται η εισαγωγή καθολικής ατέλειας, η οποία στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε σύμφωνα με τον EN 1993-2. Η μορφή της ατέλειας αυτής, καθώς και η μέγιστη τιμή της, έχουν περιγραφεί στην ενότητα 5.2.1. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε έλαβε υπόψη τη γεωμετρική μη γραμμικότητα του φορέα και είναι γνωστή και με τον όρο GNIA.

Ο έλεγχος των διατομών πραγματοποιήθηκε με βάση την πλαστική αντοχή της κάθε διατομής, αφού όλες οι διατομές προέκυψαν κατηγορίας 1. Στα μέλη, στα οποία υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης κάποιας μορφής λυγισμού, είτε λόγω σημαντικής κάμψης είτε λόγω θλίψης, ο συντελεστής ασφαλείας του υλικού γ_{M0} αντικαταστάθηκε από το συντελεστή ασφαλείας γ_{M1} , όπως ορίζεται στη μέθοδο M3. Επισημαίνεται, ότι ο συντελεστής γ_{M0} είναι ίσος με τη μονάδα, ενώ ο συντελεστής γ_{M1} είναι ίσος με 1.10, επειδή ο φορέας είναι γέφυρα. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε με τη βάση τις παρακάτω σχέσεις γραμμικής αλληλεπίδρασης. Η σχέση (6.1) αναφέρεται στον έλεγχο των κοίλων κυκλικών διατομών, ενώ η σχέση (6.2) στον έλεγχο των κύριων δοκών και των διαδοκίδων, που έχουν διατομή HEB 900.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rk}} \leq 1 \quad (6.1)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} + \frac{B_{Ed}}{B_{Rk}} \leq 1 \quad (6.2)$$

Για τον έλεγχο μέλους στις κοίλες κυκλικές διατομές υπολογίστηκε η μέγιστη ροπή του μέλους ως η συνισταμένη ροπή των δύο διανυσμάτων M_y και M_z και πραγματοποιήθηκε έλεγχος για εντός και εκτός επιπέδου λυγισμό σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (6.3)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (6.4)$$

Για τον έλεγχο των διαδοκίδων (HEB 900) και των κύριων δοκών (HEB 900) χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω σχέσεις γραμμικής αλληλεπίδρασης, οι οποίες βρίσκονται στο παράρτημα C του νέου Ευρωκώδικα.

Για λυγισμό περί τον ισχυρό άξονα (εντός επιπέδου):

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} + \frac{B_{Ed}}{B_{Rk}} \leq 1 \quad (6.5)$$

Για λυγισμό περί τον ασθενή άξονα (εκτός επιπέδου):

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} + \frac{B_{Ed}}{B_{Rk}} \leq 1 \quad (6.6)$$

6.2 Έλεγχος τόξων

Κατά τον έλεγχο των τόξων κρίσιμος προέκυψε ο έλεγχος του μέλους σε κάμψη και θλίψη. Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη και τους βαθμούς αξιοποίησης για κάθε συνδυασμό φόρτισης και κάθε είδος ατέλειας.

Πίνακας 6.1: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το αριστερό τόξο (άνεμος Υ)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	-4961.87	-4954.29	-4943.00	-4934.51
$M_{y,Ed}$ (kNm)	690.14	694.04	631.08	633.65
$M_{z,Ed}$ (kNm)	164.52	162.71	121.66	127.57
M_{Ed} (kNm)	709.48	712.86	642.70	646.36
Βαθμός αξιοποίησης	0.502	0.503	0.484	0.485

Πίνακας 6.2: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το δεξιό τόξο (άνεμος Υ)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	-4982.35	-4973.82	-4962.29	-4953.40
$M_{y,Ed}$ (kNm)	698.40	702.10	652.54	654.46
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-113.76	-109.67	-83.89	-85.89
M_{Ed} (kNm)	707.60	710.61	657.91	660.07
Βαθμός αξιοποίησης	0.503	0.503	0.489	0.489

Πίνακας 6.3: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το αριστερό τόξο (άνεμος X)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	-4987.16	-4979.18	-4968.56	-4959.36
$M_{y,Ed}$ (kNm)	703.83	707.70	639.09	641.43
$M_{z,Ed}$ (kNm)	140.51	137.12	108.37	112.41
M_{Ed} (kNm)	717.72	720.86	648.21	651.21
Βαθμός αξιοποίησης	0.505	0.506	0.486	0.487

Πίνακας 6.4: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το δεξιό τόξο (άνεμος X)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	-4987.16	-4979.20	-4966.24	-4957.99
$M_{y,Ed}$ (kNm)	703.83	707.73	644.64	647.10
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-140.51	-136.85	-99.07	-102.71
M_{Ed} (kNm)	717.72	720.84	652.21	655.20
Βαθμός αξιοποίησης	0.505	0.506	0.487	0.488

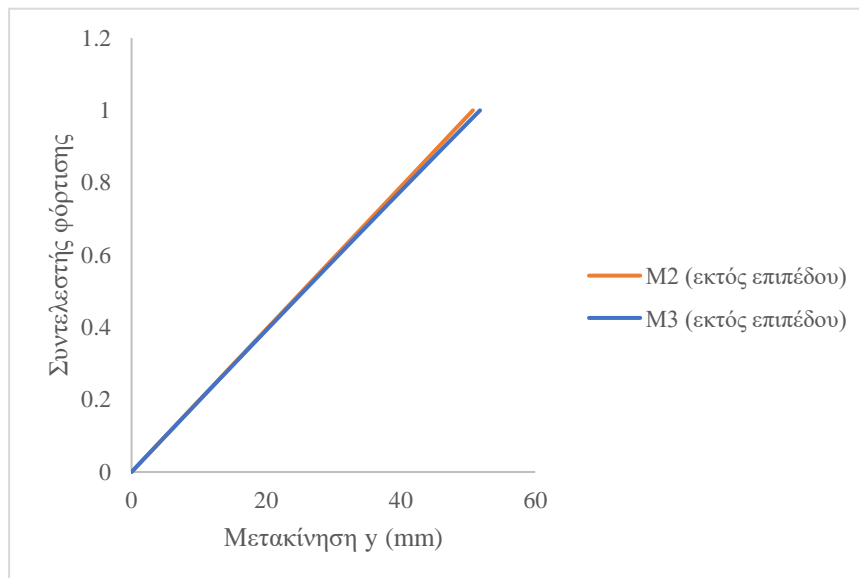
Πίνακας 6.5: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το αριστερό τόξο (άνεμος Z)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	-5090.40	-5081.75	-5070.45	-5060.55
$M_{y,Ed}$ (kNm)	710.46	714.45	653.80	656.43
$M_{z,Ed}$ (kNm)	151.90	147.73	113.82	120.06
M_{Ed} (kNm)	726.52	729.56	663.63	667.38
Βαθμός αξιοποίησης	0.517	0.517	0.500	0.500

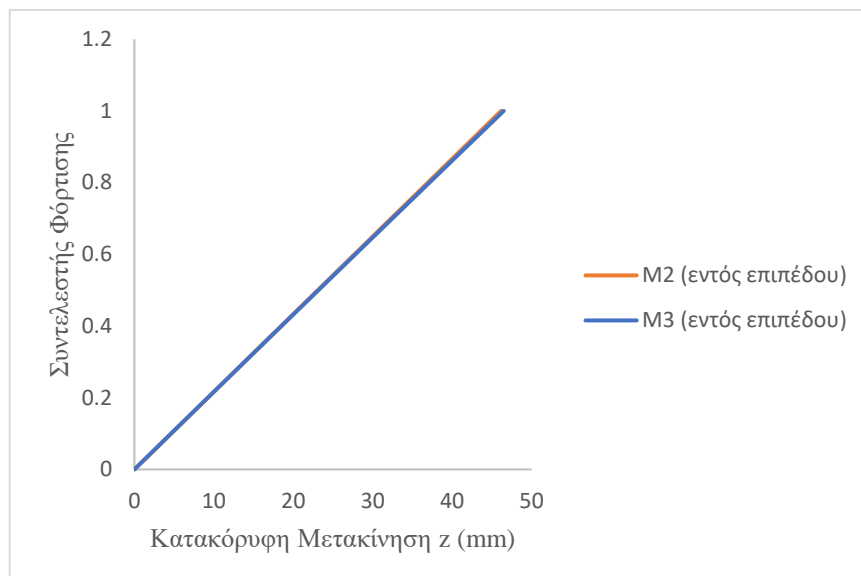
Πίνακας 6.6: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το δεξιό τόξο (άνεμος Z)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	-5265.88	-5257.08	-5244.44	-5235.17
$M_{y,Ed}$ (kNm)	735.94	740.22	684.06	686.96
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-156.83	-151.80	-108.09	-113.98
M_{Ed} (kNm)	752.46	755.62	692.55	696.35
Βαθμός αξιοποίησης	0.533	0.533	0.516	0.517

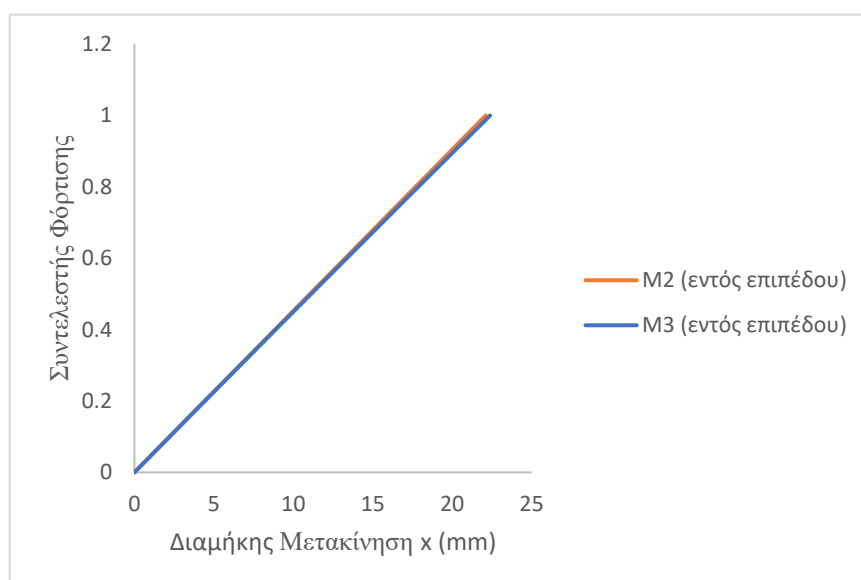
Οι βαθμοί αξιοποίησης, που προέκυψαν με τη μέθοδο M3 είναι σχεδόν οι ίδιοι με τους βαθμούς αξιοποίησης, που προέκυψαν με τη μέθοδο M2. Το ίδιο ισχύει και για τα εντατικά μεγέθη που ασκούνται στα τόξα. Αυτό σημαίνει ότι τα τόξα δεν είναι ευαίσθητα σε φαινόμενα 2ης τάξης. Στο συμπέρασμα αυτό, είναι δυνατόν να καταλήξει κανείς παρατηρώντας τους δρόμους ισορροπίας που παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα. Ο δρόμος ισορροπίας, που προέκυψε με γεωμετρικά μη γραμμική ανάλυση παρουσιάζει πολύ μικρή απόκλιση από εκείνους που προέκυψαν από γραμμική στατική ανάλυση.



Σχήμα 6.1: Δρόμοι ισορροπίας εγκάρσιας μετακίνησης κορυφής τόξου για άνεμο κατά Y και ατέλεια εκτός επιπέδου

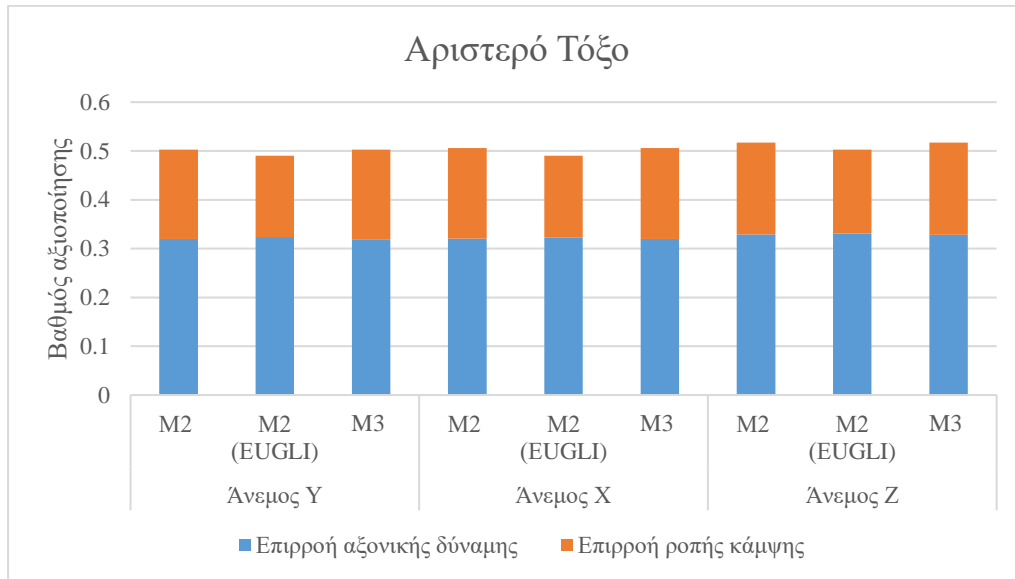


Σχήμα 6.2: Δρόμοι ισορροπίας κατακόρυφης μετακίνησης z κρίσιμου κόμβου για άνεμο κατά Z και ατέλεια εντός επιπέδου

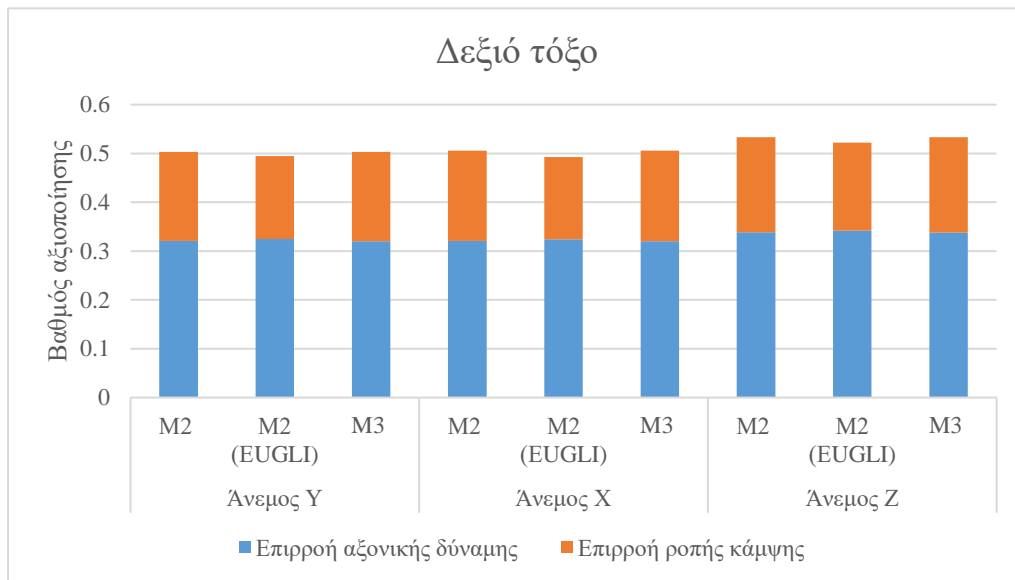


Σχήμα 6.3: Δρόμοι ισορροπίας διαμήκους μετακίνησης x κρίσιμου κόμβου για άνεμο κατά X και ατέλεια εντός επιπέδου

Το Σχήμα 6.4 και το Σχήμα 6.5 παρουσιάζουν τους βαθμούς αξιοποίησης για το αριστερό και το δεξιό τόξο για τις μεθόδους M2 και M3 με ατέλεια κατά EN 1993-2 εντός επιπέδου. Δεν παρατηρείται κάποια διαφοροποίηση, ενώ η μέση αύξηση των βαθμών αξιοποίησης και για τα δύο τόξα από τη μέθοδο M2 στη μέθοδο M3 είναι 0.02% και από τη μέθοδο M2 (EUGLI) στη μέθοδο M3 2.56%.



Σχήμα 6.4: Βαθμοί αξιοποίησης αριστερού τόξου (M3)



Σχήμα 6.5: Βαθμοί αξιοποίησης δεξιού τόξου (M3)

6.3 Έλεγχος κύριων δοκών

Κατά τον έλεγχο των κύριων δοκών κρίσιμος προέκυψε ο έλεγχος της διατομής. Στους πίνακες παρακάτω παρουσιάζονται τα εντατικά μεγέθη και οι βαθμοί αξιοποίησης για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης και το κάθε είδος ατέλειας.

Πίνακας 6.7: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού (άνεμος Υ)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	3393.67	3390.06	3411.60	3410.64
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1598.45	-1608.80	-1583.14	-1592.33
$M_{z,Ed}$ (kNm)	78.82	74.74	70.18	65.19
B_{Ed} (kNm ²)	-0.28	-0.28	-0.29	-0.29
Βαθμός αξιοποίησης	0.750	0.820	0.734	0.800

Πίνακας 6.8: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού (άνεμος Υ)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	3391.90	3389.10	3426.88	3427.86
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1601.51	-1606.14	-1569.54	-1572.14
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-173.87	-177.99	-177.80	-183.25
B_{Ed} (kNm ²)	0.71	0.78	0.70	0.78
Βαθμός αξιοποίησης	0.914	1.015	0.916	1.019

Πίνακας 6.9: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού (άνεμος Χ)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	3381.52	3377.26	3400.01	3399.22
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1611.51	-1619.59	-1600.58	-1607.59
$M_{z,Ed}$ (kNm)	124.98	124.93	116.74	115.71
B_{Ed} (kNm ²)	-0.49	-0.54	-0.50	-0.54
Βαθμός αξιοποίησης	0.832	0.917	0.817	0.898

Πίνακας 6.10: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού (άνεμος X)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	3381.52	3377.27	3415.87	3416.06
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1611.51	-1619.59	-1583.52	-1589.82
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-124.98	-124.94	-128.47	-129.82
B_{Ed} (kNm ²)	0.49	0.54	0.49	0.53
Βαθμός αξιοποίησης	0.832	0.917	0.834	0.922

Πίνακας 6.11: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού (άνεμος Z)

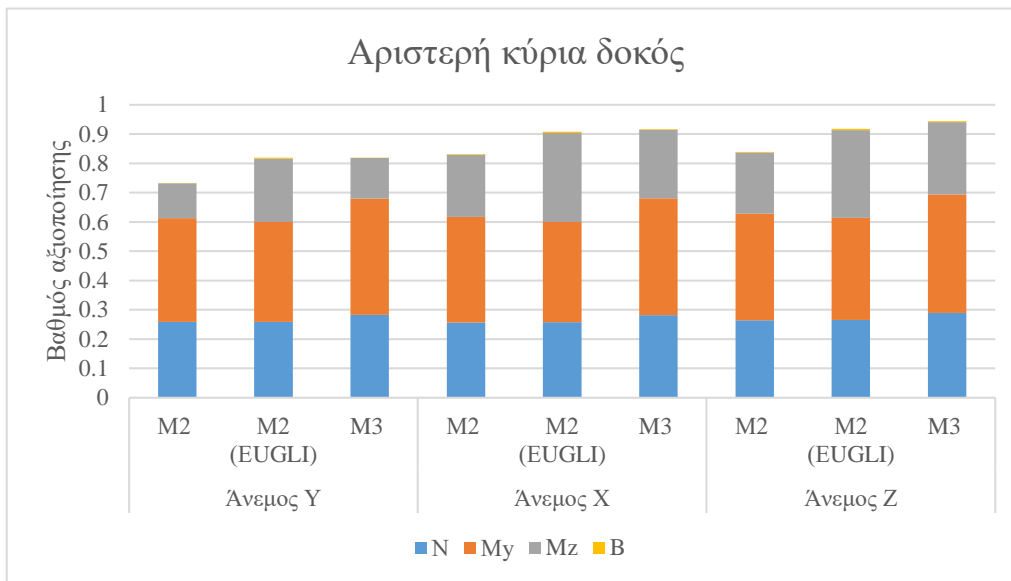
	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	3471.56	3467.50	3490.29	3489.50
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1635.81	-1643.77	-1624.88	-1631.77
$M_{z,Ed}$ (kNm)	132.09	132.10	122.89	121.79
B_{Ed} (kNm ²)	-0.50	-0.55	-0.51	-0.55
Βαθμός αξιοποίησης	0.856	0.944	0.840	0.923

Πίνακας 6.12: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού (άνεμος Z)

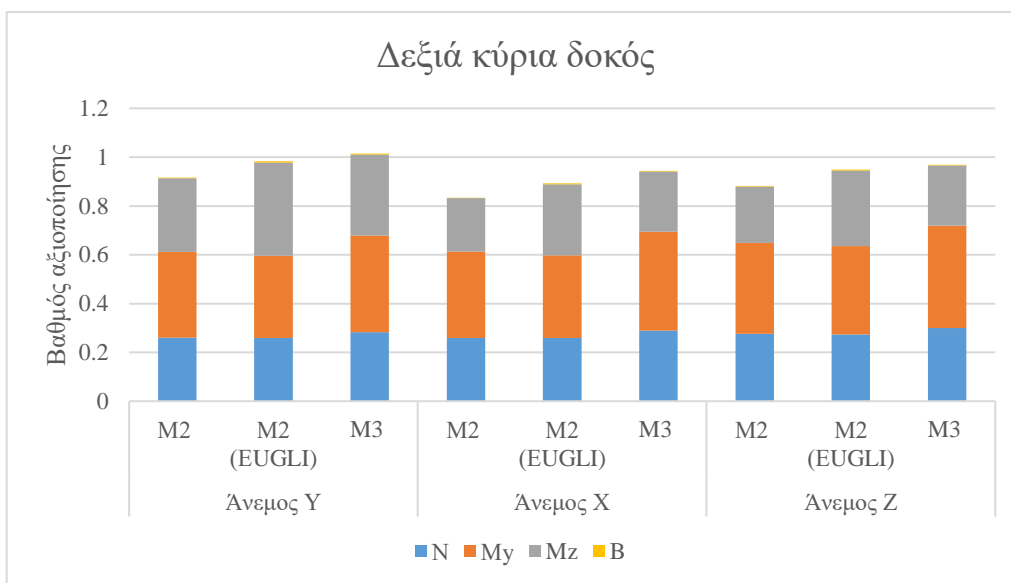
	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	3596.42	3592.18	3632.70	3632.79
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1694.90	-1703.81	-1665.46	-1672.30
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-131.65	-131.81	-136.04	-137.80
B_{Ed} (kNm ²)	0.50	0.55	0.50	0.55
Βαθμός αξιοποίησης	0.878	0.968	0.882	0.975

Τα εντατικά μεγέθη δεν παρουσίασαν κάποια ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στις μεθόδους M2 και M3 για ατέλεια σύμφωνα με τον EN 1993-2. Οι βαθμοί αξιοποίησης, ωστόσο, για τη μέθοδο M3 είναι αυξημένοι σε σχέση με τη μέθοδο M2, γιατί χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής $\gamma_{M1}=1.10$ στον έλεγχο της διατομής, όπως ορίζεται στη μέθοδο M3. Η αντικατάσταση του συντελεστή γ_{M0} έγινε, γιατί είναι πιθανός ο κίνδυνος εμφάνισης στρεπτοκαμπτικού λυγισμού στις κύριες δοκούς, λόγω της παρουσίας σημαντικής ροπής κάμψης περί τον ισχυρό άξονα. Το Σχήμα 6.6 και το Σχήμα 6.7 παρουσιάζουν τους βαθμούς αξιοποίησης για την αριστερή και τη δεξιά κύρια δοκό αντίστοιχα. Η μέση αύξηση στους βαθμούς αξιοποίησης και για τις δύο κύριες δοκούς είναι 11.35%, από την οποία το 10% οφείλεται στο συντελεστή ασφαλείας. Επίσης, παρατηρήθηκε αύξηση, στους βαθμούς αξιοποίησης από τη μέθοδο M2 (EUGLI) στη μέθοδο M3 ίση κατά μέσο όρο με 2.50%. Για την αριστερή κύρια δοκό η αύξηση είναι αμελητέα, ενώ

είναι πιο σημαντική στη δεξιά κύρια δοκό στην περίπτωση ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού.



Σχήμα 6.6: Βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού (M3)



Σχήμα 6.7: Βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού (M3)

6.4 Έλεγχος διαδοκίδων

Κατά τον έλεγχο των διαδοκίδων κρίσιμος προέκυψε ο έλεγχος της διατομής. Επειδή, υπάρχει κίνδυνος στρεπτοκαμπτικού λυγισμού στις διαδοκίδες χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής $\gamma_{M1}=1.1$, όπως ορίζεται στη μέθοδο. Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα αποτελέσματα από για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης και το κάθε είδος ατέλειας.

Πίνακας 6.13: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης μεσαίας διαδοκίδας (M3-άνεμος Y)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	1461.93	1482.32	1462.42	1483.06
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4006.53	3839.62	4006.30	3839.42
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.78	3.14	0.44	0.48
B_{Ed} (kNm ²)	-0.02	-0.28	-0.02	-0.12
Βαθμός αξιοποίησης	1.009	1.077	1.009	1.071

Πίνακας 6.14: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης μεσαίας διαδοκίδας (M3-άνεμος X)

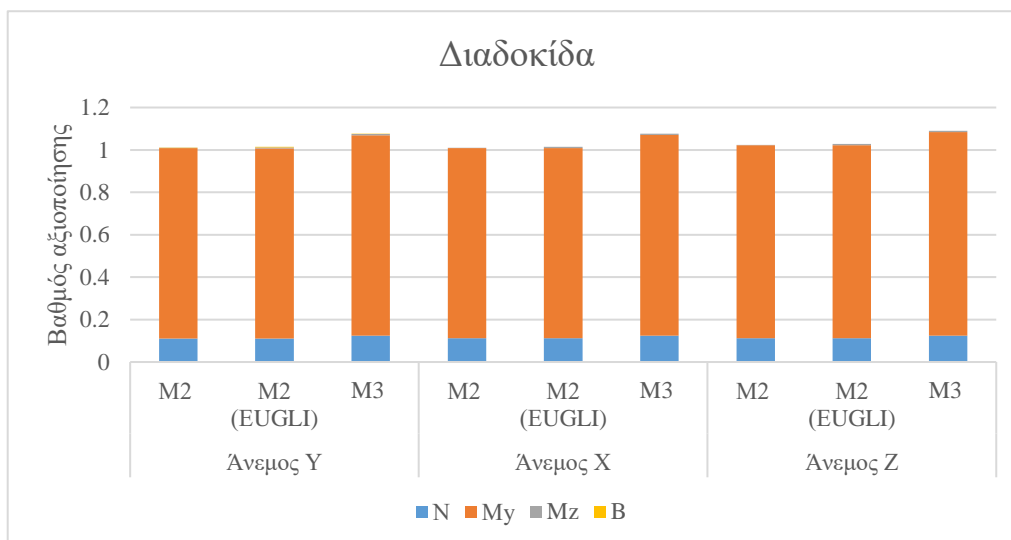
	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	1469.71	1489.90	1470.30	1490.76
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4006.73	3839.28	4006.46	3839.10
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.81	3.35	0.47	0.67
B_{Ed} (kNm ²)	-0.02	-0.30	-0.02	-0.15
Βαθμός αξιοποίησης	1.010	1.076	1.010	1.071

Πίνακας 6.15: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης μεσαίας διαδοκίδας (M3-άνεμος Z)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	1474.76	1495.19	1475.50	1496.15
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4067.78	3897.11	4067.45	3896.77
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.79	3.12	0.44	0.47
B_{Ed} (kNm ²)	-0.02	-0.30	-0.02	-0.12
Βαθμός αξιοποίησης	1.024	1.091	1.024	1.086

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι μειώθηκε η ροπή κάμψης περί τον ισχυρό άξονα M_y . Η μείωση αυτή οφείλεται στην ευνοϊκή επιρροή της αξονικής εφελκυστικής δύναμης που αναπτύσσεται στις διαδοκίδες μέσω των συνδέσμων του καταστρώματος. Η δύναμη αυτή λειτουργεί ως δύναμη επαναφοράς με αποτέλεσμα να μειώνεται η ροπή κάμψης και η βύθιση της διαδοκίδας. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μείωση στη ροπή κάμψης, είναι πολύ μικρή (μέγιστη μείωση 4.20%) και δεν έχει ουσιαστική επίδραση στο σχεδιασμό. Η ευνοϊκή επίδραση της αξονικής εφελκυστικής δύναμης είναι δυνατόν να ληφθεί υπόψη μόνο με μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας, γι' αυτό δεν εμφανίστηκε στις προηγούμενες μεθόδους. Παρόλο που μειώθηκε η ροπή κάμψης περί τον ισχυρό άξονα οι βαθμοί αξιοποίησης παρουσίασαν μικρή αύξηση λόγω χρήσης του συντελεστή ασφαλείας $\gamma_{M1}=1.10$. Το Σχήμα 6.8 παρουσιάζει τους βαθμούς αξιοποίησης για την περίπτωση ατέλειας εντός επιπέδου αλλά και στο σχήμα της 1^{ης}

ιδιομορφής λυγισμού και εμφανίζει την εικόνα, που περιγράφηκε παραπάνω. Η μέση αύξηση του βαθμού αξιοποίησης από τη μέθοδο Μ2 στη μέθοδο Μ3 είναι ίση με 6.56%. Για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού η αντίστοιχη αύξηση ισούται με 6.07%.



Σχήμα 6.8: Βαθμοί αξιοποίησης μεσαίας διαδοκίδας (Μ3)

6.5 Έλεγχος εγκάρσιων συνδέσμων τόξων

Κατά τον έλεγχο των εγκάρσιων συνδέσμων των τόξων προέκυψε κρίσιμος ο έλεγχος της διατομής. Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα αποτελέσματα από για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης και το κάθε είδος ατέλειας.

Πίνακας 6.16: Εγκάρσια μέλη, στα οποία εμφανίστηκαν οι μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης

	Ατέλεια εντός επιπέδου	Ατέλεια εκτός επιπέδου
Άνεμος Y	2	2
Άνεμος X	2	2
Άνεμος Z	2	2

Πίνακας 6.17: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Y)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (Μ2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (Μ3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (Μ2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (Μ3)
N_{Ed} (kN)	106.30	108.51	108.41	111.42
$M_{y,Ed}$ (kNm)	14.37	13.85	14.35	13.84
$M_{z,Ed}$ (kNm)	9.45	9.14	9.52	9.24
M_{Ed} (kNm)	17.20	16.59	17.22	16.64
Βαθμός αξιοποίησης	0.159	0.156	0.160	0.158

Πίνακας 6.18: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος X)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	62.38	65.52	64.70	68.54
$M_{y,Ed}$ (kNm)	15.93	15.32	15.90	15.29
$M_{z,Ed}$ (kNm)	9.13	8.79	9.17	8.86
M_{Ed} (kNm)	18.36	17.66	18.35	17.67
Βαθμός αξιοποίησης	0.145	0.142	0.146	0.144

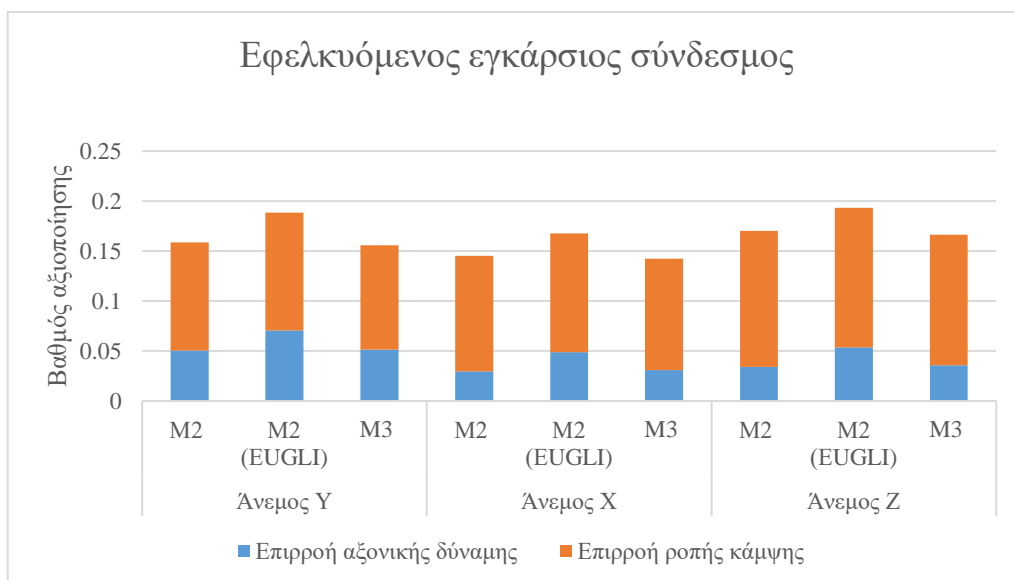
Πίνακας 6.19: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Z)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	72.08	75.75	74.37	78.82
$M_{y,Ed}$ (kNm)	18.37	17.61	18.37	17.62
$M_{z,Ed}$ (kNm)	11.40	10.92	11.44	10.99
M_{Ed} (kNm)	21.62	20.72	21.64	20.77
Βαθμός αξιοποίησης	0.170	0.166	0.171	0.168

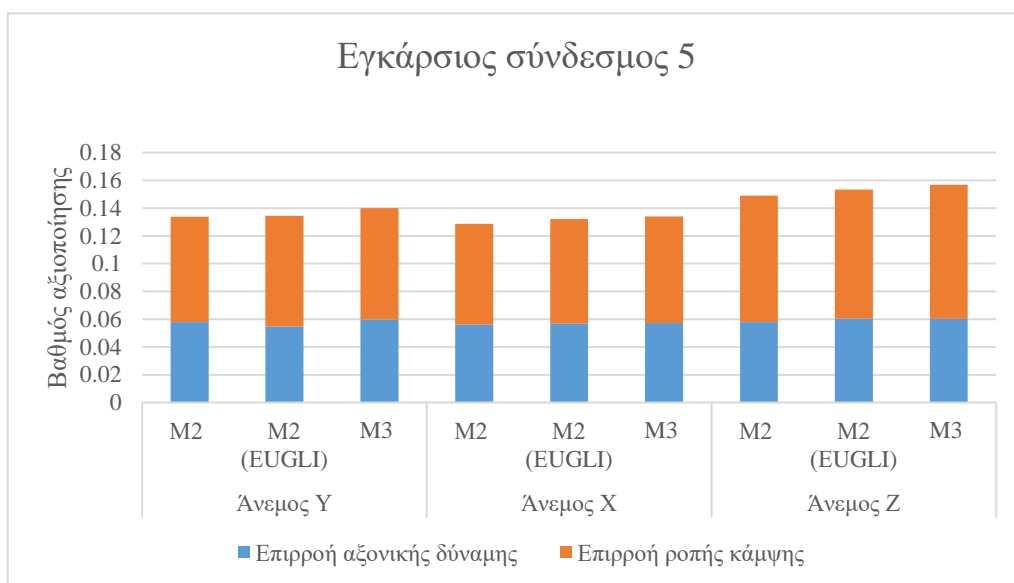
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τους εγκάρσιους συνδέσμους των τόξων δεν παρουσίασαν ουσιαστικές αποκλίσεις ανάμεσα στις μεθόδους M2 και M3. Παρατηρείται και σε αυτήν την περίπτωση, όπως και στις διαδοκίδες, μικρή μείωση στη ροπή κάμψης, η οποία οφείλεται στην ευνοϊκή επίδραση της αξονικής εφελκυστικής δύναμης των εγκάρσιων συνδέσμων. Αυτή η μείωση είναι αμελητέα και δεν έχει κάποια επίδραση στο σχεδιασμό. Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζονται αυτά τα αποτελέσματα για την περίπτωση αρχικής ατέλειας εντός επιπέδου για τον κρίσιμο εφελκυσμένο σύνδεσμο. Σημειώνεται ότι οι βαθμοί αξιοποίησης παρουσίασαν μέση μείωση 2.01%.

Το Σχήμα 6.10 παρουσιάζει τους βαθμούς αξιοποίησης για τον εγκάρσιο σύνδεσμο 5, ο οποίος είναι θλιβόμενος και στον οποίο πραγματοποιήθηκε έλεγχος μέλους σε θλίψη και κάμψη. Εμφανίζεται μικρή αύξηση του βαθμού αξιοποίησης ίση κατά μέσο όρο με 4.63% λόγω αύξησης της ροπής κάμψης. Αυτή με τη σειρά της οφείλεται στο γεγονός ότι στη μέθοδο M3 πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση 2^{ης} τάξης, η οποία είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη πρόσθετης ροπής κάμψης λόγω της θλιπτικής δύναμης του μέλους.

Για την περίπτωση της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού οι βαθμοί αξιοποίησης παρουσίασαν μείωση από τη μέθοδο M2 στη M3 ίση με 15.47% κατά μέσο όρο για τον εγκάρσιο σύνδεσμο 2, ενώ παρουσίασαν αύξηση για το σύνδεσμο 5 ίση κατά μέσο με 2.62%. Η μεγάλη μείωση στον εφελκυσμένο σύνδεσμο οφείλεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο γεγονός ότι στην 1^η ιδιομορφή λυγισμού, ο συγκεκριμένος σύνδεσμος συμμετέχει, παρέχοντας πλευρική υποστήριξη στο τόξο.



Σχήμα 6.9: Βαθμοί αξιοποίησης εφελκόμενου εγκάρσιου συνδέσμου (M3)



Σχήμα 6.10: Βαθμοί αξιοποίησης θλιβόμενου εγκάρσιου συνδέσμου 5 (M3)

6.6 Έλεγχος διαγώνιων συνδέσμων τόξων

Κατά τον έλεγχο των διαγώνιων συνδέσμων των τόξων κρίσιμος προέκυψε ο έλεγχος του μέλους σε θλίψη και κάμψη. Ο Πίνακας 6.20 παρουσιάζει τα μέλη, στα οποία παρουσιάστηκαν οι μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης. Οι υπόλοιποι πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη και τους βαθμούς αξιοποίησης για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης και είδος ατέλειας.

Πίνακας 6.20: Διαγώνια μέλη, στα οποία εμφανίστηκαν οι μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης

	Ατέλεια εντός επιπέδου	Ατέλεια εκτός επιπέδου
Άνεμος Y	4	4
Άνεμος X	5	5
Άνεμος Z	4	4

Πίνακας 6.21: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Y)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	-69.99	-68.90	-69.44	-68.47
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4.29	5.74	4.29	5.72
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.72	0.91	0.72	0.91
M_{Ed} (kNm)	4.35	5.81 (+33.56%)	4.35	5.79 (+33.10%)
Βαθμός αξιοποίησης	0.372	0.399 (+7.26%)	0.372	0.398 (+6.99%)

Πίνακας 6.22: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος X)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	-69.98	-69.90	-69.89	-69.84
$M_{y,Ed}$ (kNm)	4.32	5.60	4.32	5.60
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.98	-1.24	-0.98	-1.25
M_{Ed} (kNm)	4.43	5.74 (+29.57%)	4.43	5.74 (+29.57%)
Βαθμός αξιοποίησης	0.376	0.400 (+6.38%)	0.376	0.400 (+6.38%)

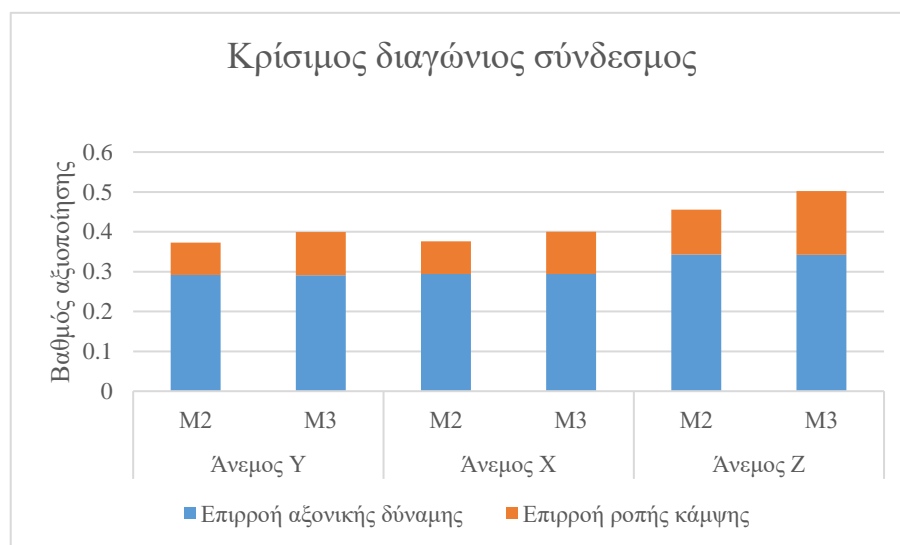
Πίνακας 6.23: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Z)

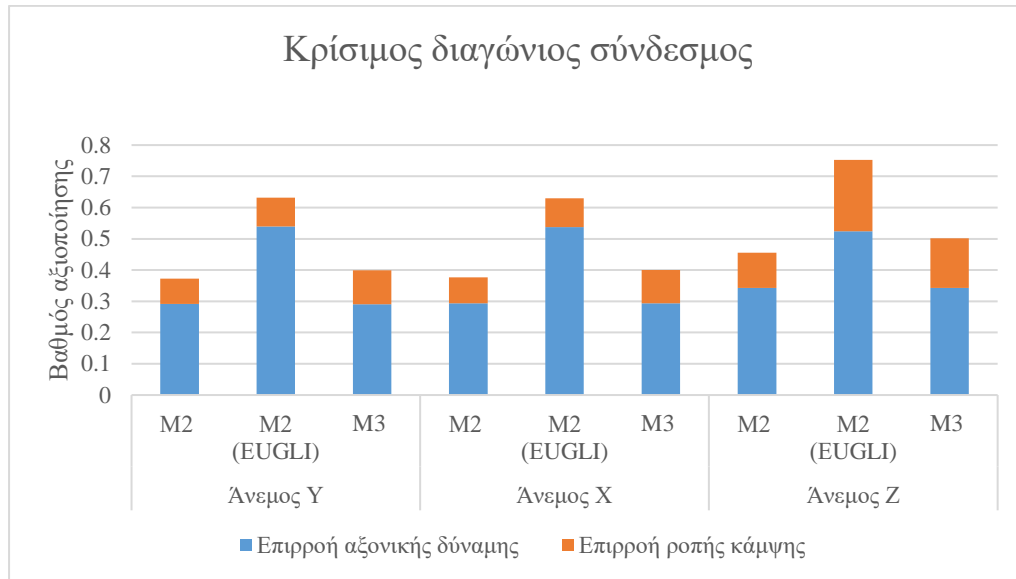
	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	-81.64	-80.48	-81.33	-80.28
$M_{y,Ed}$ (kNm)	5.84	8.30	5.82	8.26
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0	0	0	0
M_{Ed} (kNm)	5.84	8.30 (+42.12%)	5.82	8.26 (+41.92%)
Βαθμός αξιοποίησης	0.455	0.502 (+10.33%)	0.455	0.501 (+10.10%)

Στους διαγώνιους συνδέσμους των τόξων παρουσιάστηκε σημαντική αύξηση στη ροπή κάμψης, η οποία έφτασε μέχρι και το 42.12% και επακόλουθη αύξηση στους βαθμούς αξιοποίησης με μέγιστη τιμή 10.33%. Η αύξηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι με την ανάλυση 2^{ης} τάξης είναι δυνατό να ληφθεί υπόψη η αρνητική επίδραση της αξονικής θλιπτικής δύναμης, η οποία προκαλεί πρόσθετες ροπές κάμψης.

Το Σχήμα 6.11 παρουσιάζει το βαθμό αξιοποίησης του εκάστοτε κρίσιμου συνδέσμου για τις μεθόδους M2 και M3 για ατέλεια εντός επιπέδου. Η μέση αύξηση του βαθμού αξιοποίησης από τη μέθοδο M2 στη μέθοδο M3 είναι ίση με 7.93%, η μέση αύξηση της ροπής κάμψης είναι ίση με 35.08%, ενώ η αξονική δύναμη παρουσιάζει αμελητέα μείωση. Όπως φαίνεται και στο σχήμα η αύξηση του βαθμού αξιοποίησης οφείλεται αποκλειστικά στην αύξηση της ροπής κάμψης ως απόρροια της ανάλυσης με γεωμετρική μη γραμμικότητα και της αξονικής θλιπτικής δύναμης.

Στο Σχήμα 6.12 παρουσιάζεται στο διαγραμμα και ο βαθμός αξιοποίησης, που προέκυψε από τη μέθοδο M2 για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού. Ο βαθμός αξιοποίησης της M2 (EUGLI) είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο της M3, λόγω της μεγαλύτερης αξονικής θλιπτικής δύναμης που εμφανίζεται στη M2 (EUGLI). Η μέση μείωση του βαθμού αξιοποίησης από τη μέθοδο M2 για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού στη M3 είναι 35.51%

**Σχήμα 6.11: Βαθμοί αξιοποίησης κρίσιμου διαγώνιου συνδέσμου (M3)**



Σχήμα 6.12: Βαθμοί επιρροής κρίσιμου διαγώνιου συνδέσμου για όλες τις περιπτώσεις

6.7 Έλεγχος αναρτήρων

Οι αναρτήρες είναι εφελκόμενα μέλη, οπότε κρίσιμος είναι ο έλεγχος της διατομής. Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη και τους βαθμούς αξιοποίησης για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης και το κάθε είδος ατέλειας. Για την περίπτωση ατέλειας εντός επιπέδου κρίσιμος προέκυψε ο 6^{ος} αναρτήρας του αριστερού τόξου για άνεμο κατά Y, ο 6^{ος} αναρτήρας του δεξιού τόξου για άνεμο κατά X και κατά Z. Για την περίπτωση ατέλειας εκτός επιπέδου κρίσιμος προέκυψε ο 2^{ος} αναρτήρας του αριστερού τόξου για άνεμο κατά Y, ο 6^{ος} αναρτήρας του αριστερού τόξου για άνεμο κατά X και ο 2^{ος} αναρτήρας του δεξιού τόξου για άνεμο κατά Z. Η αξονική δύναμη των αναρτήρων καθώς και οι αντίστοιχοι βαθμοί αξιοποίησης δεν εμφάνισαν κάποια ουσιαστική μεταβολή ανάμεσα στις μεθόδους M2 και M3. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η γέφυρα δεν είναι ευαίσθητη φαινόμενα 2^{ης} τάξης.

Πίνακας 6.24: Αξονικές δυνάμεις και βαθμοί αξιοποίησης αναρτήρων (άνεμος Y)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	916.75	916.61	891.54	887.69
Βαθμός αξιοποίησης	0.641	0.641	0.623	0.621

Πίνακας 6.25: Αξονικές δυνάμεις και βαθμοί αξιοποίησης αναρτήρων (άνεμος X)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	918.52	918.82	893.22	889.75
Βαθμός αξιοποίησης	0.642	0.642	0.625	0.622

Πίνακας 6.26: Αξονικές δυνάμεις και βαθμοί αξιοποίησης αναρτήρων (άνεμος X)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	967.76	967.72	939.92	935.74
Βαθμός αξιοποίησης	0.677	0.677	0.657	0.654

6.8 Έλεγχος συνδέσμων καταστρώματος

Για τους συνδέσμους του καταστρώματος κρίσιμος είναι ο έλεγχος της διατομής. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι κρίσιμες αξονικές δυνάμεις και οι βαθμοί αξιοποίησης για τον κάθε συνδυασμό φόρτισης και είδος ατέλειας. Παρά την εφαρμογή ανάλυσης 2^{ης} τάξης κρίσιμος ήταν ο έλεγχος της διατομής γιατί στους ακραίους χιαστί συνδέσμους αναπτύσσεται σημαντική αξονική εφελκυστική δύναμη. Οι αξονικές δυνάμεις και οι αντίστοιχοι βαθμοί αξιοποίησης δεν παρουσίασαν ουσιαστική μεταβολή.

Πίνακας 6.27: Αξονικές δυνάμεις και βαθμοί αξιοποίησης συνδέσμων καταστρώματος (άνεμος Y)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	512.44	507.37	463.37	459.30
Βαθμός αξιοποίησης	0.354	0.351	0.320	0.318

Πίνακας 6.28: Αξονικές δυνάμεις και βαθμοί αξιοποίησης συνδέσμων καταστρώματος (άνεμος X)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	503.34	500.18	482.56	480.33
Βαθμός αξιοποίησης	0.348	0.346	0.334	0.332

Πίνακας 6.29: Αξονικές δυνάμεις και βαθμοί αξιοποίησης συνδέσμων καταστρώματος (άνεμος Z)

	Ατέλεια εντός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εντός επιπέδου (M3)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M2)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (M3)
N_{Ed} (kN)	523.63	520.34	490.71	488.28
Βαθμός αξιοποίησης	0.362	0.360	0.339	0.338

6.9 Σύνοψη αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόστηκε η μέθοδος Μ3 και υπολογίστηκαν οι βαθμοί αξιοποίησης για τα μέλη της γέφυρας. Η μέθοδος Μ3 είναι πιο απαιτητική στην ανάλυση του φορέα σε σχέση με τη μέθοδο Μ2, καθώς εκτός από την καθολική ατέλεια του φορέα πρέπει να πραγματοποιηθεί και στατική ανάλυση 2^{ης} τάξης. Οι έλεγχοι των μελών δεν παρουσιάζουν

κάποια διαφοροποίηση από τη μέθοδο M2 για την περίπτωση, που τοποθετηθεί στο τόξο ατέλεια σύμφωνα με τον EN 1993-2. Ωστόσο, η περίπτωση της μεθόδου M2 με ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού παρουσίασε σε κάποια μέλη σημαντικές αποκλίσεις

Από τη μη γραμμική ανάλυση με αρχική ατέλεια εντός και εκτός επιπέδου για τα τόξα, προέκυψε ότι ο φορέας δεν είναι ευαίσθητος σε φαινόμενα 2^{ης} τάξης, καθώς ο δρόμος ισορροπίας από την ανάλυση GNIA ταυτιζόταν με αυτόν της LIA. Αυτό το χαρακτηριστικό έγινε αντιληπτό και από τα εντατικά μεγέθη και τους βαθμούς αξιοποίησης, που προέκυψαν πολύ κοντά στους αντίστοιχους της μεθόδου M2. Στα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται παρακάτω η σύγκριση γίνεται για την ατέλεια εντός επιπέδου των τόξων.

Οι βαθμοί αξιοποίησης, που προέκυψαν για τα τόξα παρουσίασαν αμελητέα αύξηση σε σχέση με τους αντίστοιχους της M2 ίση κατά μέσο όρο με 0.02%. Επίσης, οι βαθμοί αξιοποίησης των κύριων δοκών παρουσίασαν αύξηση σε σχέση με τη μέθοδο M2 κατά μέσο ίση με 11.35%, η οποία οφείλεται στη χρήση του συντελεστή ασφαλείας $\gamma_{M1}=1.10$ αντί για το $\gamma_{M0}=1.0$, στον έλεγχο της διατομής. Για τον ίδιο λόγο παρουσιάστηκε αύξηση στο βαθμό αξιοποίησης των διαδοκίδων με μέση τιμή ίση με 6.56%. Σε σχέση με την ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού η απόκλιση από τη M2 ήταν 2.50% για τις κύριες δοκούς και 6.07% από τις διαδοκίδες κατά μέσο όρο. Για τους εγκάρσιους συνδέσμους των τόξων τα αποτελέσματα ανάμεσα στις μεθόδους M2 και M3 εμφάνισαν αμελητέες αποκλίσεις. Συγκεκριμένα για τον εφελκόμενο εγκάρσιο σύνδεσμο παρουσιάστηκε μέση μείωση 2.01% λόγω της ευνοϊκής επίδρασης της εφελκυστικής δύναμης στην ανάλυση 2^{ης} τάξης, ενώ για το θλιβόμενο σύνδεσμο παρουσιάστηκε αύξηση κατά 4.63%. Αν η σύγκριση γίνει με την ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού τότε στον εφελκόμενο εγκάρσιο σύνδεσμο, παρουσιάστηκε μείωση στο βαθμό αξιοποίησης ίση με 15.47%, ενώ στο θλιβόμενο αύξηση κατά 2.62% κατά μέσο όρο. Στους διαγώνιους συνδέσμους των τόξων παρουσιάστηκε αύξηση ίση με 7.93% κατά μέσο όρο σε σχέση με τη M2. Αν η σύγκριση γίνει με τους βαθμούς αξιοποίησης, που προέκυψαν για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, τότε το αντίστοιχο ποσοστό ισούται με 35.51%. Τέλος, για τους αναρτήρες και τους συνδέσμους του καταστρώματος προέκυψαν αποτελέσματα με αμελητέα απόκλιση από τη M2.

Η μέθοδος M3 είναι μία μέθοδος, με την οποία είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί η διαστασιολόγηση της γέφυρας, σύμφωνα με τα κριτήρια του νέου Ευρωκώδικα 3. Επειδή, η ίδια γέφυρα μπορεί να διαστασιολογηθεί και με τη μέθοδο M2, θα ήταν αναμενόμενο να μην προκύπτουν σημαντικές αποκλίσεις στους βαθμούς αξιοποίησης ανάμεσα στις δύο μεθόδους. Αν θεωρηθεί ότι το ποσοστό 10% απόκλιση είναι αποδεκτό, τότε για την περίπτωση της ατέλειας εντός επιπέδου των τόξων σύμφωνα με τον EN 1993-2, προκύπτουν αναμενόμενα αποτελέσματα. Για την περίπτωση της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, όμως, οι αποκλίσεις είναι πολύ μεγάλες για τους διαγώνιους συνδέσμους των τόξων (35.51%). Επίσης, είναι αξιόλογη και η απόκλιση για τον εγκάρσιο εφελκόμενο σύνδεσμο (15.47%).

7 ΜΕΘΟΔΟΣ M5

7.1 Γενικά

Η μέθοδος M5 είναι η πιο σύνθετη από όλες τις μεθόδους του κειμένου του νέου Ευρωκώδικα 3. Η στατική ανάλυση που πρέπει να πραγματοποιηθεί κατά την εφαρμογή της μεθόδου M5 είναι στατική ανάλυση 2^{ης} τάξης με αρχικές ατέλειες. Η διαφορά σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, συμπεριλαμβανομένης και της μεθόδου M4, που δεν εξετάστηκε στην παρούσα εργασία, είναι ότι πρέπει να τοποθετηθεί τοπική ατέλεια μέλους εντός και εκτός επιπέδου. Επιπλέον, μέσω των ατελειών πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι στρεπτικές επιδράσεις.

Η εφαρμογή της μεθόδου M5 πραγματοποιήθηκε για δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση τοποθετήθηκε στα τόξα η ατέλεια εντός και εκτός επιπέδου, όπως προδιαγράφεται στον EN 1993-2, καθώς επίσης και τοπική ατέλεια στα μέλη για λυγισμό εντός και εκτός επιπέδου αλλά και για στρεπτοκαμπτικό λυγισμό, όπως ορίζεται στο κείμενο του νέου Ευρωκώδικα 3. Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 5.2.2. Όπως αναφέρθηκε και στις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν, πραγματοποιήθηκε μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες (GNIA). Στη συνέχεια του κεφαλαίου, όταν γίνεται αναφορά στη μέθοδο M5 χωρίς κάποια πρόσθετη παρένθεση, θα εννοείται η πρώτη περίπτωση ατέλειας, ενώ η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού θα αναφέρεται ως M5 (EUGLI).

Σύμφωνα με τη μέθοδο M5, δεν απαιτείται να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος μέλους σε λυγισμό, καθώς εφόσον έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι πιθανές ατέλειες, αυτός καλύπτεται από τον έλεγχο της διατομής. Ο έλεγχος των διατομών πραγματοποιήθηκε με βάση την πλαστική αντοχή της κάθε διατομής, αφού όλες οι διατομές προέκυψαν κατηγορία 1. Στα μέλη στα οποία υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης κάποιας μορφής λυγισμού, είτε λόγω σημαντικής κάμψης είτε λόγω θλίψης, ο συντελεστής ασφαλείας του υλικού γ_{M0} αντικαταστάθηκε από το συντελεστή ασφαλείας γ_{M1} . Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε με τη βάση τις παρακάτω σχέσεις γραμμικής αλληλεπίδρασης. Η σχέση (6.1) αναφέρεται στον έλεγχο των κοίλων κυκλικών διατομών, ενώ η σχέση (6.2) στον έλεγχο των κύριων δοκών και των διαδοκίδων, που έχουν διατομή HEB 900.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rk}} \leq 1 \quad (7.1)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} + \frac{B_{Ed}}{B_{Rk}} \leq 1 \quad (7.2)$$

7.2 Τοπική ατέλεια μελών

Οι τοπικές ατέλειες μελών έχουν τη μορφή αρχικής καμπυλότητας μελών με μέγιστο βέλος ε_0 . Σύμφωνα με το νέο κείμενο του Ευρωκώδικα 3 η ισοδύναμη ατέλεια μέλους για καμπτικό λυγισμό δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon_0 = \frac{\alpha}{\varepsilon} \cdot \beta \cdot L \quad (7.3)$$

Όπου

L: είναι το μήκος του μέλους

α : είναι ο συντελεστής ατελειών ανάλογα με την καμπύλη λυγισμού

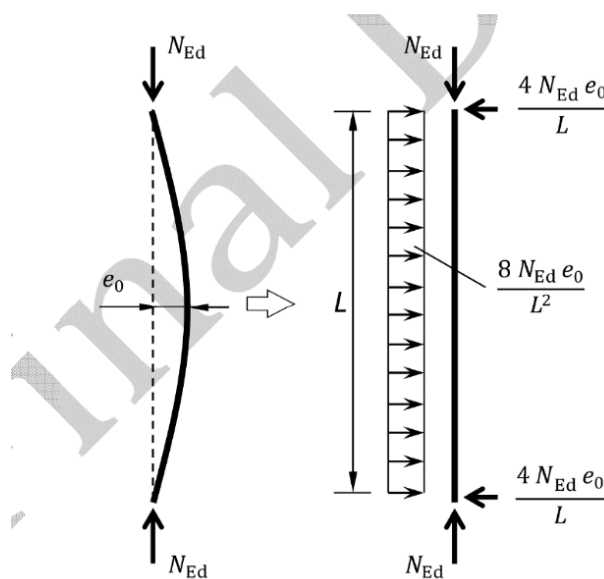
$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

β : είναι η σχετική ατέλεια αναφοράς που, υπολογίζεται με τη βοήθεια του παρακάτω πίνακα

Πίνακας 7.1: Σχετική ατέλεια αναφοράς β

Λυγισμός περί τον άξονα	Ελαστική αντοχή	Πλαστική αντοχή
y-y	1/110	1/75
z-z	1/200	1/68

Η μορφή της τοπικής ατέλειας του μέλους παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1. Η μορφή αυτή είναι δυνατό να εισαχθεί στο προσομοίωμα τροποποιώντας τις συντεταγμένες του μέλους. Επίσης, κάποια λογισμικά έχουν τη δυνατότητα να τοποθετούν αυτόματα την τοπική ατέλεια στο μέλος. Τέλος, οι επιδράσεις της τοπικής ατέλειας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 μπορούν να αντικατασταθούν από συστήματα ισοδύναμων οριζόντιων δυνάμεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1



Σχήμα 7.1: Αντικατάσταση τοπικής ατέλειας από ισοδύναμη δυνάμεις [1]

Στο νέο κείμενο του Ευρωκώδικα 3, περιγράφεται και μία πρόσθετη ατέλεια, προκειμένου να ληφθεί υπόψη ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός του μέλους σε κάμψη. Η ατέλεια αυτή έχει τη μορφή αρχικής καμπυλότητας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1, τοποθετείται στη διεύθυνση του ασθενούς άξονα της διατομής και έχει τιμή $k \cdot e_0$, όπου e_0 είναι η τιμή της τοπικής ατέλειας για καμπτικό λυγισμό περί τον ασθενή άξονα της διατομής (Σχέση (7.3)). Η τιμή του k λαμβάνεται ίση με 0.50, εκτός αν ορίζεται διαφορετικά στο Εθνικό Προσάρτημα. Σημειώνεται ότι για να ληφθεί υπόψη ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός με χρήση τοπικής ατέλειας, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί στατική ανάλυση 2^{ης} τάξης. Το ίδιο ισχύει και για τον καμπτικό λυγισμό.

Στην παρούσα εργασία η τοπική ατέλεια για τα μέλη εισήχθη στο λογισμικό μέσω ισοδύναμων κατανομημένων και συγκεντρωμένων φορτίων. Στο λογισμικό δεν υπήρχε η δυνατότητα για ταυτόχρονη χρήση του επταβάθμιου στοιχείου δοκού και της αυτόματης ατέλειας μέλους. Για αυτόν το λόγο επιλέχθηκε η παραπάνω λύση, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί και ο βαθμός της στρέβλωσης και να προσομοιωθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η στρεπτική συμπεριφορά των κύριων δοκών και των διαδοκίδων. Επίσης, για τις κύριες δοκούς και τις διαδοκίδες, οι οποίες παραλαμβάνουν μία σημαντική κάμψη περί τον ισχυρό άξονα της διατομής, θεωρήθηκε και ατέλεια στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, η οποία τοποθετήθηκε με κατάλληλη τροποποίηση των συντεταγμένων των κόμβων των μελών. Τέλος, για τα τόξα η ατέλεια εντός και εκτός επιπέδου εισήχθη στο λογισμικό με κατάλληλη τροποποίηση των συντεταγμένων των κόμβων. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η τιμή της ισοδύναμης ατέλειας, όπως υπολογίστηκε σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 για λυγισμό εντός και εκτός επιπέδου.

Πίνακας 7.2: Ισοδύναμη ατέλεια μελών

Μέλος	Ατέλεια εντός επιπέδου (mm)	Ατέλεια εκτός επιπέδου (mm)
Τόξα	105.0	144.9
Κύριες δοκοί	-	8.1
Διαδοκίδες	-	7.5
Εγκάρσιοι σύνδεσμοι τόξων	118.0	118.0
Διαγώνιοι σύνδεσμοι τόξων (μέλη 1,2,7,8)	74.1	74.1
Διαγώνιοι σύνδεσμοι τόξων (μέλη 3,4,5,6)	72.7	72.7
Σύνδεσμοι καταστρώματος	14.4	28.8

Αφού υπολογίστηκε η ισοδύναμη ατέλεια του κάθε μέλους, με γνωστή την αξονική του δύναμη και με χρήση σχέσεων (7.4) και (7.5), οι οποίες παρουσιάζονται και στο Σχήμα 7.1 προέκυψαν ένα ισοδύναμο κατανεμημένο φορτίο q_{bow} για το κάθε μέλος και δύο συγκεντρωμένα φορτία P_{bow} .

$$q_{\text{bow}} = \frac{8 \cdot N_{\text{Ed}} \cdot e_0}{L^2} \quad (7.4)$$

$$P_{\text{bow}} = \frac{4 \cdot N_{\text{Ed}} \cdot e_0}{L} \quad (7.5)$$

Η χρήση τοπικής ατέλειας σύμφωνα με τα παραπάνω αναφέρεται στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται και οι διατάξεις του EN 1993-2. Για αυτόν το λόγο στη συνέχεια του κειμένου ο όρος «ατέλεια κατά EN 1993-2» θα αναφέρεται στη χρήση της ατέλειας κατά EN 1993-2 στα τόξα και των τοπικών ατελειών στα μέλη, σύμφωνα με τις διατάξεις του νέου Ευρωκώδικα 3. Στην περίπτωση χρήσης ατέλειας στο σχήμα τη

7.3 Έλεγχος τόξων

7.3.1 Ατέλεια κατά EN 1993-2

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη στην κρίσιμη διατομή των τόξων μαζί με τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης για την περίπτωση χρήσης ατέλειας κατά EN 1993-2. Τα αποτελέσματα της μεθόδου M3, που παρουσιάζονται, αναφέρονται στην ατέλεια του τόξου εντός επιπέδου, για την οποία προέκυψαν και τα δυσμενέστερα αποτελέσματα. Οι βαθμοί αξιοποίησης, που προέκυψαν με τη μέθοδο M5 εμφάνισαν μείωση. Η αξονική δύναμη,

με την οποία έγιναν οι έλεγχοι για τη μέθοδο Μ5 και Μ3 παρέμεινε ουσιαστικά σταθερή, ενώ παρουσιάστηκε μείωση στη ροπή κάμψης.

Πίνακας 7.3: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το αριστερό τόξο (άνεμος Υ)

	Μέθοδος Μ3	Μέθοδος Μ5
N_{Ed} (kN)	-4954.29	-4951.80
$M_{y,Ed}$ (kNm)	694.04	-572.84
$M_{z,Ed}$ (kNm)	162.71	-128.17
M_{Ed} (kNm)	712.86	587.00
Βαθμός αξιοποίησης	0.503	0.408 (-18.89%)

Πίνακας 7.4: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το δεξιό τόξο (άνεμος Υ)

	Μέθοδος Μ3	Μέθοδος Μ5
N_{Ed} (kN)	-4973.82	-4965.50
$M_{y,Ed}$ (kNm)	702.10	-592.85
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-109.67	118.99
M_{Ed} (kNm)	710.61	604.67
Βαθμός αξιοποίησης	0.503	0.413 (-17.89%)

Πίνακας 7.5: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το αριστερό τόξο (άνεμος Χ)

	Μέθοδος Μ3	Μέθοδος Μ5
N_{Ed} (kN)	-4979.18	-4974.99
$M_{y,Ed}$ (kNm)	707.70	-587.28
$M_{z,Ed}$ (kNm)	137.12	-143.56
M_{Ed} (kNm)	720.86	604.57
Βαθμός αξιοποίησης	0.506	0.413 (-18.38%)

Πίνακας 7.6: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το δεξιό τόξο (άνεμος Χ)

	Μέθοδος Μ3	Μέθοδος Μ5
N_{Ed} (kN)	-4979.20	-4969.53
$M_{y,Ed}$ (kNm)	707.73	-597.29
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-136.85	103.91
M_{Ed} (kNm)	720.84	606.26
Βαθμός αξιοποίησης	0.506	0.413 (-18.38%)

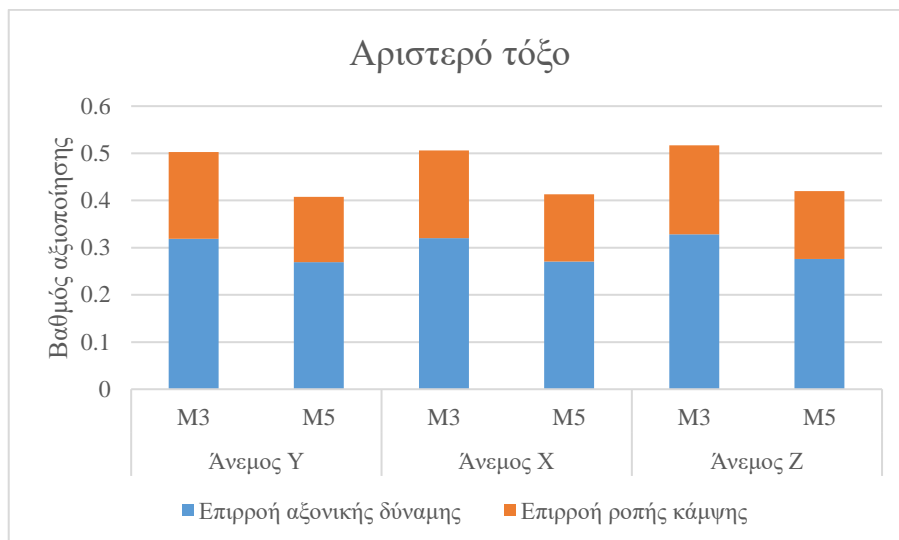
Πίνακας 7.7: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το αριστερό τόξο (άνεμος Z)

	Μέθοδος M3	Μέθοδος M5
N_{Ed} (kN)	-5081.75	-5077.69
$M_{y,Ed}$ (kNm)	714.45	-591.48
$M_{z,Ed}$ (kNm)	147.73	-144.02
M_{Ed} (kNm)	729.56	608.76
Βαθμός αξιοποίησης	0.517	0.420 (-18.76%)

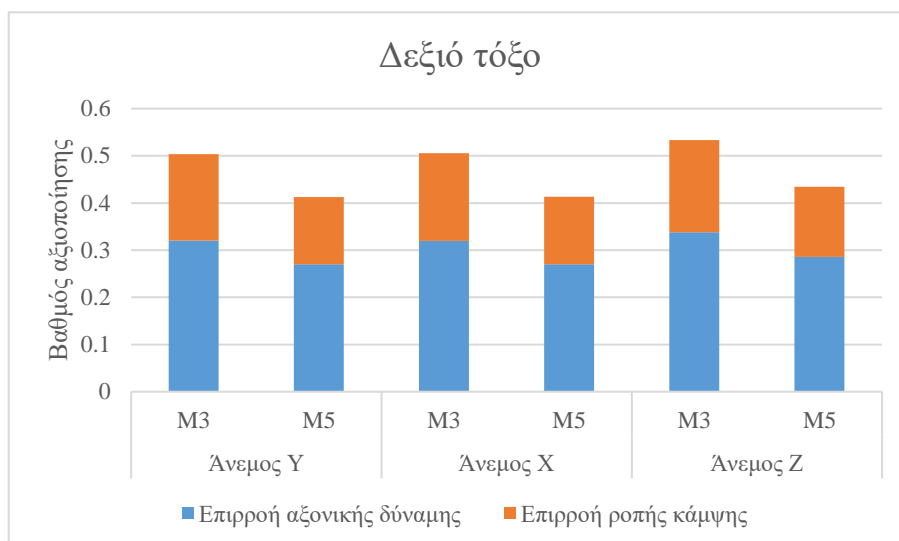
Πίνακας 7.8: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το δεξιό τόξο (άνεμος Z)

	Μέθοδος M3	Μέθοδος M5
N_{Ed} (kN)	-5257.08	5248.02
$M_{y,Ed}$ (kNm)	740.22	-623.42
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-151.80	105.64
M_{Ed} (kNm)	755.62	632.31
Βαθμός αξιοποίησης	0.533	0.435 (-18.39%)

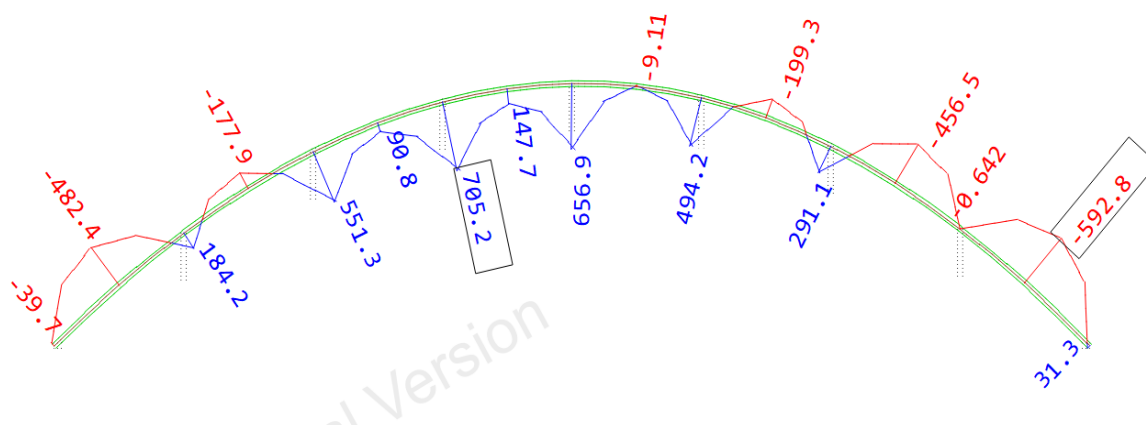
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για την περίπτωση του αριστερού (Σχήμα 7.2) και του δεξιού (Σχήμα 7.3) τόξου σε μορφή διαγράμματος. Όπως φαίνεται οι βαθμοί αξιοποίησης που προέκυψαν με τη μέθοδο M3 είναι μεγαλύτεροι από αυτούς της M5. Η επιρροή της αξονικής δύναμης στους βαθμούς αξιοποίησης μειώνεται κατά τη μέθοδο M5 αν και η τιμή της αξονικής δύναμης είναι περίπου η ίδια. Αυτό είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι στη μέθοδο M5 πραγματοποιείται έλεγχος διατομής αντί για μέλους. Ωστόσο δεν παρατηρήθηκε αύξηση στην επιρροή της ροπής κάμψης, γιατί ο φορέας δεν είναι ευαίσθητος σε φαινόμενα 2^{ης} τάξης αλλά και λόγω της σχέσης ελέγχου που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του μέλους, αφού η θέση της μέγιστης ροπής κάμψης δεν είναι ίδια με τη θέση της κρίσιμης διατομής της μεθόδου M5. Η μέγιστη μείωση που παρατηρήθηκε είναι ίση με 18.89% και η μέση τιμή αυτής της μείωσης είναι 18.68% για το αριστερό και 18.27% για το δεξιό τόξο.



Σχήμα 7.2: Βαθμοί αξιοποίησης αριστερού τόξου (M5-EN 1993-2)



Σχήμα 7.3: Βαθμοί αξιοποίησης δεξιού τόξου (M5-EN 1993-2)



Σχήμα 7.4: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_y δεξιού τόξου (M5-άνεμος Y)

7.3.2 Ατέλεια στο σχήμα της 1ης ιδιομορφής λυγισμού

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη στην κρίσιμη διατομή των τόξων μαζί με τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης για την περίπτωση χρήσης ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα μεγέθη, που προέκυψαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου M2. Όπως φαίνεται παρουσιάστηκε μείωση στους βαθμούς αξιοποίησης της μεθόδου M5. Αναφορικά με τα εντατικά μεγέθη, που χρησιμοποιήθηκαν στον έλεγχο, οι αξονικές δυνάμεις παρέμειναν ουσιαστικά σταθερές, ενώ η ροπή κάμψης παρουσίασε μία μείωση.

Πίνακας 7.9: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το αριστερό τόξο (άνεμος Y)

	Μέθοδος M2 (LIA)	Μέθοδος M5 (GNIA)
N_{Ed} (kN)	-5023.55	-5013.24
$M_{y,Ed}$ (kNm)	634.41	-565.71
$M_{z,Ed}$ (kNm)	118.61	-169.99
M_{Ed} (kNm)	645.40	590.70
Βαθμός αξιοποίησης	0.490	0.412 (-15.92%)

Πίνακας 7.10: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το δεξιό τόξο (άνεμος Y)

	Μέθοδος M2 (LIA)	Μέθοδος M5 (GNIA)
N_{Ed} (kN)	-5041.83	-5030.18
$M_{y,Ed}$ (kNm)	651.07	-570.98
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-90.57	190.49
M_{Ed} (kNm)	657.34	601.92
Βαθμός αξιοποίησης	0.494	0.416 (-15.79%)

Πίνακας 7.11: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το αριστερό τόξο (άνεμος X)

	Μέθοδος M2 (LIA)	Μέθοδος M5 (GNIA)
N_{Ed} (kN)	-5014.01	-5003.53
$M_{y,Ed}$ (kNm)	641.97	-556.61
$M_{z,Ed}$ (kNm)	103.59	-180.22
M_{Ed} (kNm)	650.27	585.06
Βαθμός αξιοποίησης	0.490	0.410 (-16.33%)

Πίνακας 7.12: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το δεξιό τόξο (άνεμος X)

	Μέθοδος Μ2 (LIA)	Μέθοδος Μ5 (GNIA)
N_{Ed} (kN)	-5041.83	-5034.09
$M_{y,Ed}$ (kNm)	651.07	-577.16
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-90.57	178.97
M_{Ed} (kNm)	657.34	604.27
Βαθμός αξιοποίησης	0.494	0.416 (-15.79%)

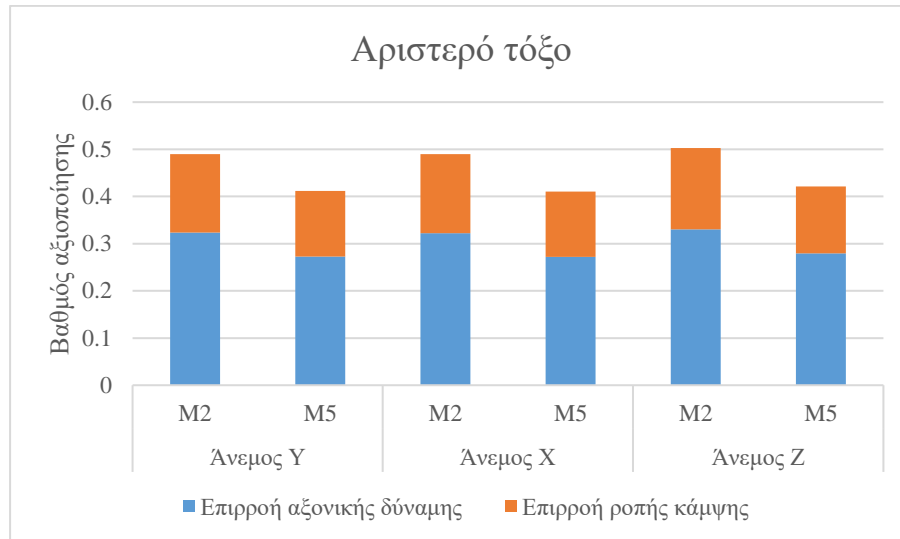
Πίνακας 7.13: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το αριστερό τόξο (άνεμος Z)

	Μέθοδος Μ2 (LIA)	Μέθοδος Μ5 (GNIA)
N_{Ed} (kN)	-5144.54	-5132.00
$M_{y,Ed}$ (kNm)	658.41	-580.72
$M_{z,Ed}$ (kNm)	99.42	-158.05
M_{Ed} (kNm)	665.87	601.84
Βαθμός αξιοποίησης	0.503	0.421 (-16.30%)

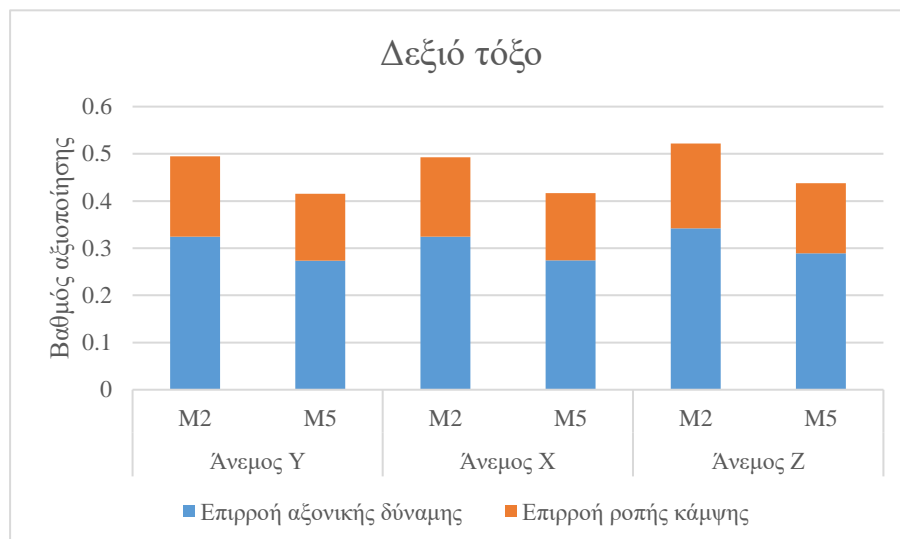
Πίνακας 7.14: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για το δεξιό τόξο (άνεμος Z)

	Μέθοδος Μ2 (LIA)	Μέθοδος Μ5 (GNIA)
N_{Ed} (kN)	-5320.35	-5307.77
$M_{y,Ed}$ (kNm)	682.50	-600.81
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-123.96	192.92
M_{Ed} (kNm)	693.67	631.02
Βαθμός αξιοποίησης	0.522	0.438 (-16.09%)

Στα παρακάτω δύο διαγράμματα παρουσιάζονται οι βαθμοί αξιοποίησης και η επιρροή των επιμέρους εντατικών μεγεθών για τα δύο τόξα για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού και τις μεθόδους Μ2 και Μ5. Ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα, που προέκυψαν για την ατέλεια κατά EN 1993-2. Η μέγιστη μείωση του βαθμού αξιοποίησης, που παρατηρήθηκε είναι 16.33% και η μέση τιμή αυτής της μείωσης είναι 16.16% για το αριστερό και 15.87% για το δεξιό τόξο.



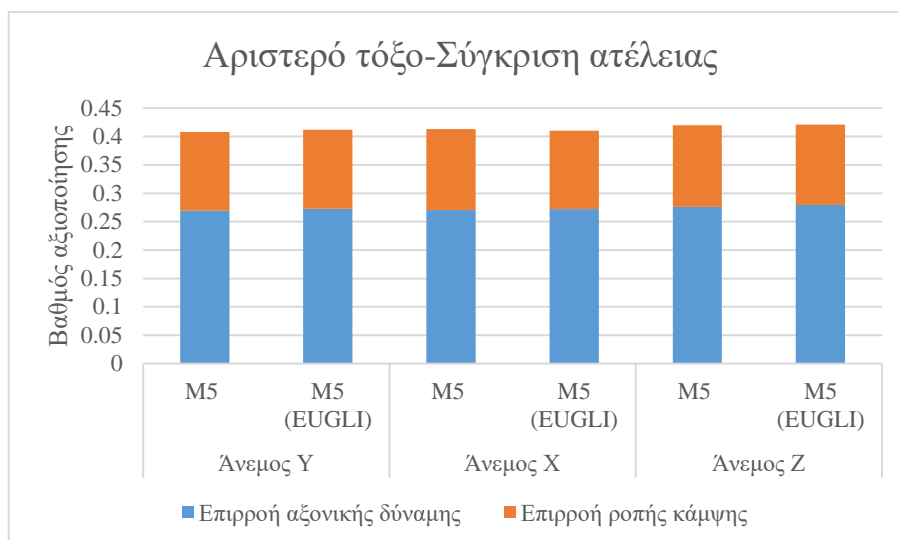
Σχήμα 7.5: Βαθμοί αξιοποίησης αριστερού τόξου (M5-EUGLI)



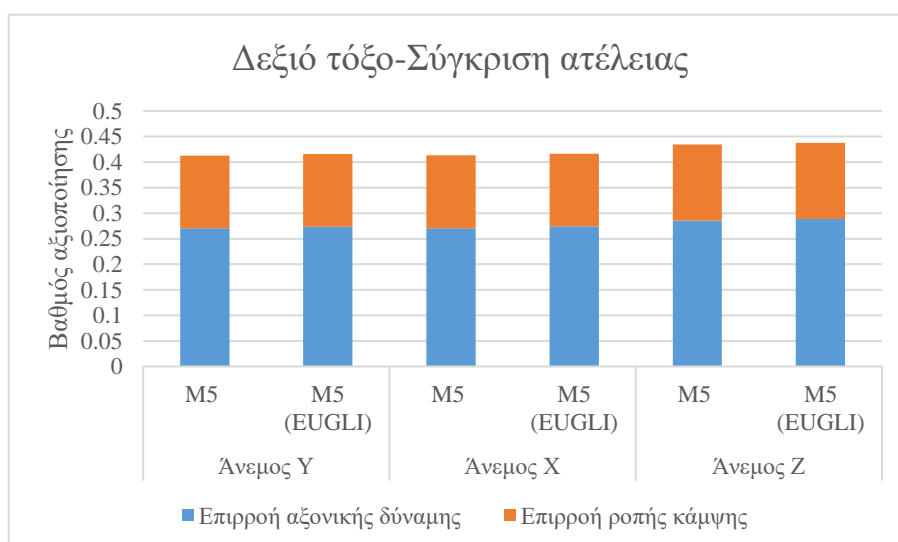
Σχήμα 7.6: Βαθμοί αξιοποίησης δεξιού τόξου (M5-EUGLI)

7.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδου M5

Από τους πίνακες στις ενότητες 7.3.1 και 7.3.2, προκύπτει ότι δεν υπάρχει κάποια ουσιαστική απόκλιση στους βαθμούς αξιοποίησης ανάλογα με το είδος της ατέλειας, που χρησιμοποιείται για τη μέθοδο M5. Στο ίδιο συμπέρασμα οδηγείται κανείς παρατηρώντας τα παρακάτω διαγράμματα με τους βαθμούς αξιοποίησης και την επιρροή των επιμέρους εντατικών μεγεθών για τα δύο τόξα και τα δύο είδη ατέλειας. Η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού οδηγεί σε πιο δυσμενή αποτελέσματα για την περίπτωση του ανέμου κατά Y και κατά Z με τη μέγιστη αύξηση να ισούται με 1.03%. Η απόκλιση αυτή είναι αμελητέα και δείχνει ότι στο πλαίσιο της μεθόδου M5, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και τα δύο είδη ατελειών για τα τόξα.



Σχήμα 7.7: Σύγκριση βαθμών αξιοποίησης αριστερού τόξου για τη μέθοδο M5 ανάλογα με το είδος της ατέλειας



Σχήμα 7.8: Σύγκριση βαθμών αξιοποίησης δεξιού τόξου για τη μέθοδο M5 ανάλογα με το είδος της ατέλειας

7.4 Έλεγχος κύριων δοκών

7.4.1 Ατέλεια κατά EN 1993-2

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη στην κρίσιμη διατομή των κύριων δοκών μαζί με τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης για την περίπτωση χρήσης ατέλειας κατά το κείμενο του EN 1993-2 και του νέου Ευρωκώδικα 3. Τα αποτελέσματα της μεθόδου M3, που παρουσιάζονται, αναφέρονται στην ατέλεια εντός επιπέδου. Στη μέθοδο M5 εμφανίστηκε μία αύξηση στο βαθμούς αξιοποίησης με τιμές, που φαίνονται στους πίνακες. Επίσης, άλλαξε θέση η κρίσιμη διατομή για τη δεξιά κύρια δοκό, που από τη διατομή του πέρατος μετατοπίστηκε στη διατομή της αρχής στο σημείο σύνδεσης με το τόξο.

Πίνακας 7.15: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για την αριστερή κύρια δοκό (άνεμος Y)

	Μέθοδος M3	Μέθοδος M5
N_{Ed} (kN)	3390.06	3381.11
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1608.80	-1610.26
$M_{z,Ed}$ (kNm)	74.74	94.83
B_{Ed} (kNm ²)	-0.28	-0.87
Βαθμός αξιοποίησης	0.820	0.860 (+4.88%)

Πίνακας 7.16: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για τη δεξιά κύρια δοκό (άνεμος Y)

	Μέθοδος M3	Μέθοδος M5
N_{Ed} (kN)	3389.10	3456.16
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1606.14	-1547.58
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-177.99	-208.75
B_{Ed} (kNm ²)	0.78	1.31
Βαθμός αξιοποίησης	1.015	1.066 (+5.02%)

Πίνακας 7.17: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για την αριστερή κύρια δοκό (άνεμος X)

	Μέθοδος M3	Μέθοδος M5
N_{Ed} (kN)	3377.26	3368.80
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1619.59	-1624.16
$M_{z,Ed}$ (kNm)	124.93	144.43
B_{Ed} (kNm ²)	-0.54	-1.15
Βαθμός αξιοποίησης	0.917	0.956 (+4.25%)

Πίνακας 7.18: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για τη δεξιά κύρια δοκό (άνεμος X)

	Μέθοδος M3	Μέθοδος M5
N_{Ed} (kN)	3377.27	3462.50
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1619.59	-1545.52
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-124.94	-155.01
B_{Ed} (kNm ²)	0.54	1.05
Βαθμός αξιοποίησης	0.944	0.964 (+2.12%)

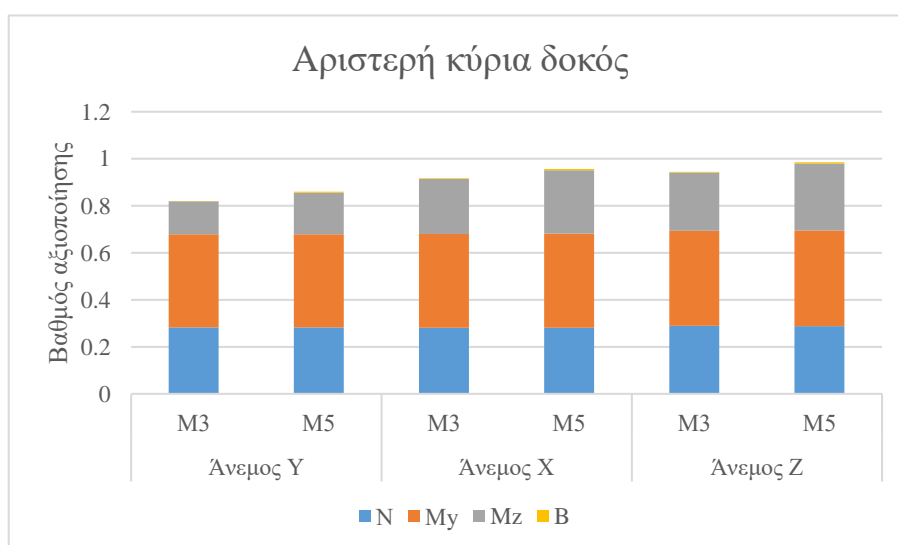
Πίνακας 7.19: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για την αριστερή κύρια δοκό (άνεμος Z)

	Μέθοδος Μ3	Μέθοδος Μ5
N_{Ed} (kN)	3467.50	3459.30
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1643.77	-1648.92
$M_{z,Ed}$ (kNm)	132.10	152.40
B_{Ed} (kNm ²)	-0.55	-1.16
Βαθμός αξιοποίησης	0.944	0.985 (+4.34%)

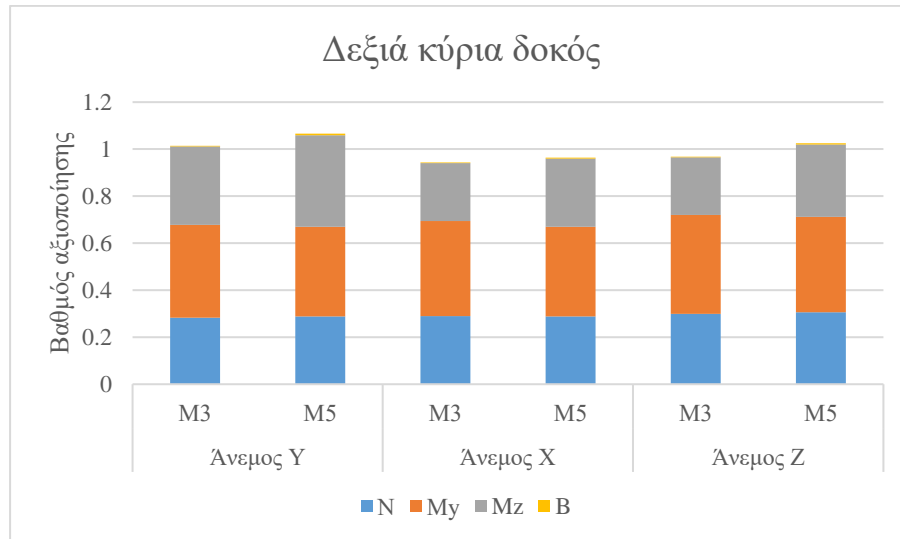
Πίνακας 7.20: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης για τη δεξιά κύρια δοκό (άνεμος Z)

	Μέθοδος Μ3	Μέθοδος Μ5
N_{Ed} (kN)	3592.18	3663.42
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1703.81	-1647.65
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-131.81	-164.93
B_{Ed} (kNm ²)	0.55	1.10
Βαθμός αξιοποίησης	0.968	1.025 (+5.89%)

Στο Σχήμα 7.9 και στο Σχήμα 7.10 παρουσιάζονται οι βαθμοί αξιοποίησης για την αριστερή και τη δεξιά κύρια δοκό. Τα αποτελέσματα για την αριστερή κύρια δοκό μπορούν να θεωρηθούν καταλληλότερα για την εξαγωγή συμπερασμάτων, γιατί η κρίσιμη διατομή παραμένει αμετάβλητη κατά τις μεθόδους Μ3 και Μ5. Παρατηρείται σε γενικές γραμμές αύξηση του βαθμού αξιοποίησης, λόγω αύξησης της ροπής κάμψης περί τον ασθενή άξονα των κυρίων δοκών, η οποία με τη σειρά της οφείλεται στην τοποθέτηση της τοπικής ατέλειας. Η μέγιστη τιμή της αύξησης είναι ίση με 5.89%.



Σχήμα 7.9: Βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού (Μ5-EN 1993-2)



Σχήμα 7.10: Βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού (M5-EN 1993-2)

7.4.2 Ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη στην κρίσιμη διατομή των κύριων δοκών μαζί με τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης για την περίπτωση χρήσης ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα μεγέθη, που προέκυψαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου M2. Δεν προέκυψε κάποια ουσιαστική διαφορά στα εντατικά μεγέθη, ενώ οι βαθμοί αξιοποίησης παρουσίασαν μικρή αύξηση λόγω χρήσης του συντελεστή γ_{M1} στον έλεγχο της διατομής. Επισημαίνεται ότι κρίσιμη διατομή ήταν και στις δύο μεθόδους η διατομή του πέρατος για την αριστερή κύρια δοκό και η διατομή της αρχής για τη δεξιά κύρια δοκό στα σημεία σύνδεσης με τα τόξα.

Πίνακας 7.21: Εντατικά μεγέθη σχεδιασμού και βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού (άνεμος Y)

	LIA (M2)	GNIA (M5)
N_{Ed} (kN)	3408.56	3406.25
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1523.64	-1527.20
$M_{z,Ed}$ (kNm)	127.52	132.82
B_{Ed} (kNm ²)	-0.74	-0.79
Βαθμός αξιοποίησης	0.819	0.912 (+11.36%)

Πίνακας 7.22: Εντατικά μεγέθη σχεδιασμού και βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού (άνεμος Y)

	LIA (M2)	GNIA (M5)
N_{Ed} (kN)	3413.65	3411.75
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1508.39	-1503.53
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-224.37	-235.97
B_{Ed} (kNm ²)	1.16	1.29
Βαθμός αξιοποίησης	0.983	1.102 (+12.11%)

Πίνακας 7.23: Εντατικά μεγέθη σχεδιασμού και βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού (άνεμος X)

	LIA (M2)	GNIA (M5)
N_{Ed} (kN)	3398.49	3397.19
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1526.34	-1526.12
$M_{z,Ed}$ (kNm)	179.24	187.97
B_{Ed} (kNm ²)	-0.98	-1.08
Βαθμός αξιοποίησης	0.908	1.016 (+11.89%)

Πίνακας 7.24: Εντατικά μεγέθη σχεδιασμού και βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού (άνεμος X)

	LIA (M2)	GNIA (M5)
N_{Ed} (kN)	3415.76	3413.18
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1511.84	-1511.95
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-171.03	-179.05
B_{Ed} (kNm ²)	0.90	0.99
Βαθμός αξιοποίησης	0.892	0.996 (+11.66%)

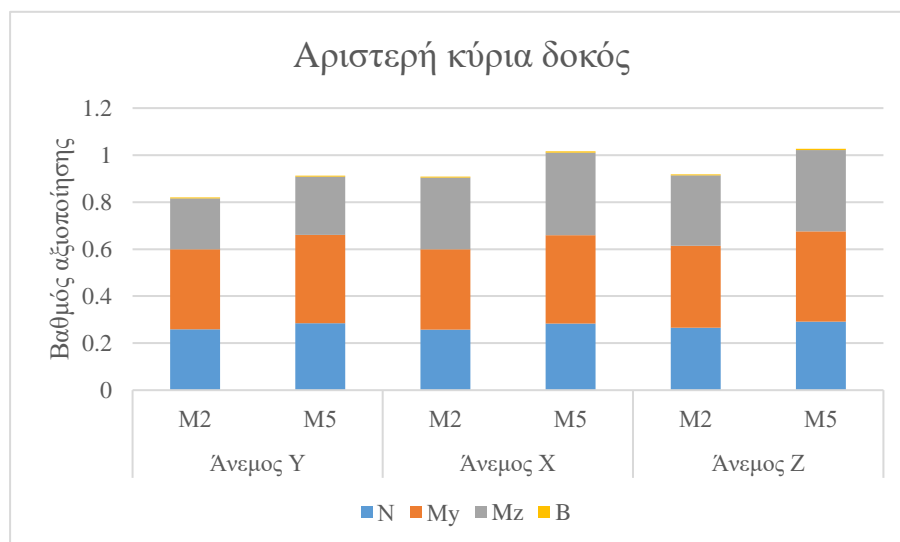
Πίνακας 7.25: Εντατικά μεγέθη σχεδιασμού και βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού (άνεμος Z)

	LIA (M2)	GNIA (M5)
N_{Ed} (kN)	3495.51	3493.88
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1558.48	-1558.39
$M_{z,Ed}$ (kNm)	176.48	185.46
B_{Ed} (kNm ²)	-0.89	-0.99
Βαθμός αξιοποίησης	0.918	1.027 (+11.87%)

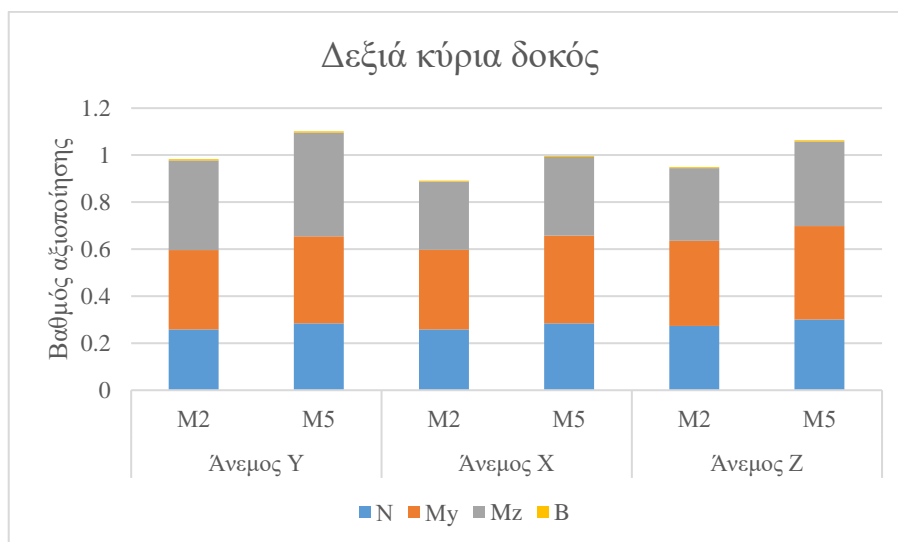
Πίνακας 7.26: Εντατικά μεγέθη σχεδιασμού και βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού (άνεμος Z)

	LIA (M2)	GNIA (M5)
N_{Ed} (kN)	3610.49	3607.55
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-1614.02	-1614.29
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-182.12	-192.14
B_{Ed} (kNm ²)	1.03	1.14
Βαθμός αξιοποίησης	0.949	1.063 (+12.01%)

Στο Σχήμα 7.11 και στο Σχήμα 7.12 παρουσιάζονται οι βαθμοί αξιοποίησης για την αριστερή και τη δεξιά κύρια δοκό, όπως προέκυψαν για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού με τις μεθόδους M2 και M5. Οι βαθμοί αξιοποίησης για τη μέθοδο M5 είναι αυξημένοι σε σχέση με τη M2 με την αύξηση αυτή να οφείλεται, όπως ήδη αναφέρθηκε στη χρήση του συντελεστή ασφαλείας $\gamma_{M1}=1.1$ αντί για τον $\gamma_{M0}=1.0$. Η μέγιστη τιμή της αύξησης, που παρατηρήθηκε είναι 12.13%.



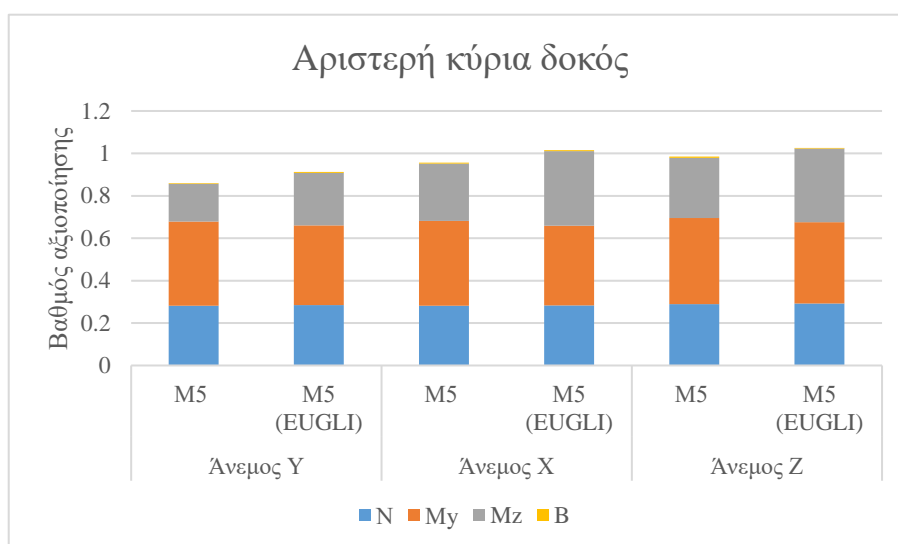
Σχήμα 7.11: Βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού (M5-EUGLI)



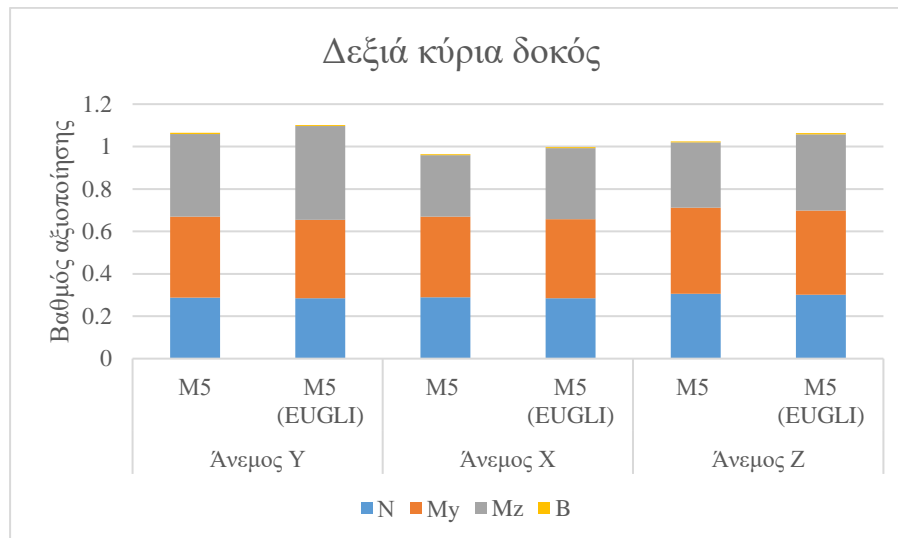
Σχήμα 7.12: Βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού (M5-EUGLI)

7.4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδου M5

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ της μεθόδου M5 με ατέλεια σύμφωνα με τον EN 1993-2 και της μεθόδου M5 με ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, παρουσιάζονται το Σχήμα 7.13 και το Σχήμα 7.14 . Οι βαθμοί αξιοποίησης που προέκυψαν με την ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού είναι εμφανώς μεγαλύτεροι, ενώ και η αύξηση που παρουσιάζεται και στη ροπή κάμψης περί τον ασθενή άξονα είναι και αυτή μεγαλύτερη. Η μέγιστη τιμή αυτής της αύξησης είναι ίση με 6.20%, η οποία όμως δεν προκαλεί κάποια ουσιαστική διαφοροποίηση στο σχεδιασμό.

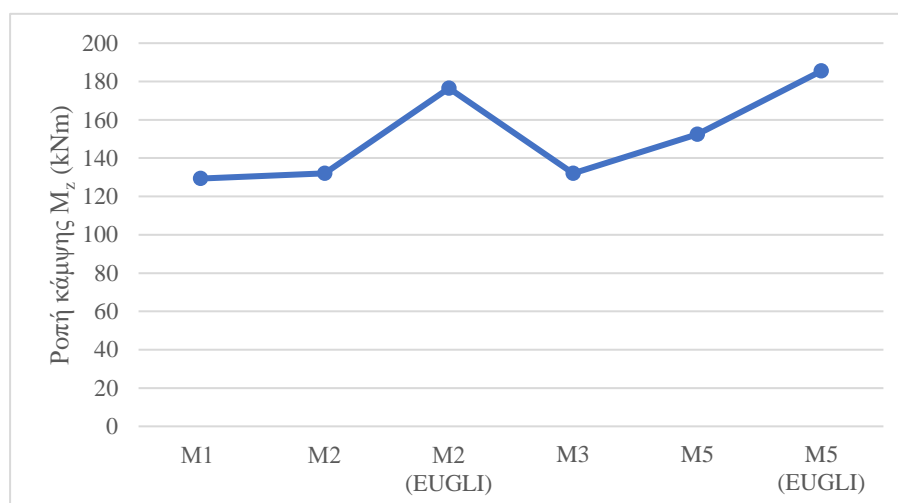


Σχήμα 7.13: Σύγκριση βαθμών αξιοποίησης της αριστερής κύριας δοκού για τη μέθοδο M5 ανάλογα με το είδος της ατέλειας



Σχήμα 7.14: Σύγκριση βαθμών αξιοποίησης της δεξιάς κύριας δοκού για τη μέθοδο M5 ανάλογα με το είδος της ατέλειας

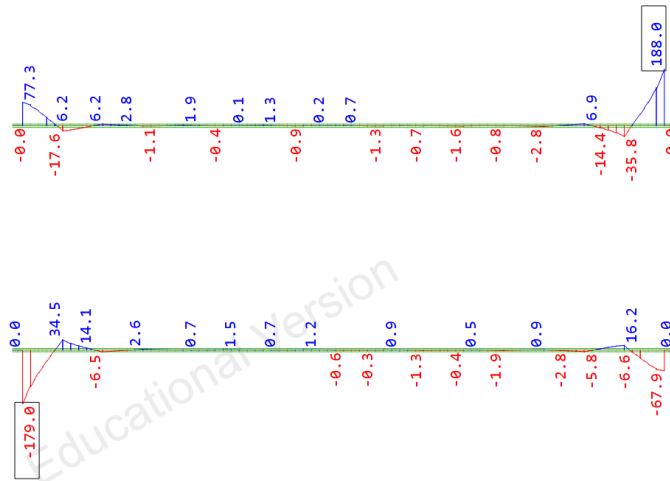
Το Σχήμα 7.15 παρουσιάζει την εξέλιξη της ροπής κάμψης περί τον ασθενή άξονα M_z για την αριστερή κύρια δοκό και για φορτία ανέμου κατά Z. Παρατηρείται σημαντική αύξηση της ροπής κάμψης για την περίπτωση της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, ενώ παρατηρείται και αξιόλογη αύξηση για την τοπική ατέλεια μέλους, που ορίζει ο Ευρωκώδικας 3 σε σχέση με το φορέα χωρίς ατέλεια μέλους. Στο πλαίσιο της μεθόδου M5 η ροπή κάμψης, που προέκυψε για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού είναι κατά 21.69% αυξημένη σε σχέση με τη ροπή κάμψης, που προέκυψε λόγω της ατέλεια μέλους, που ορίζει ο Ευρωκώδικας 3. Ωστόσο, αύξηση αυτή δεν επηρεάζει ουσιαστικά το σχεδιασμό, αφού η αντίστοιχη αύξηση του βαθμού αξιοποίησης ήταν 4.22%. Σημειώνεται, ότι το μέγεθος της εγκάρσιας ατέλειας για την αριστερή κύρια δοκό ήταν 11.6mm για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, ενώ στον Ευρωκώδικα 3 η τιμή, που προέκυψε ήταν 8.1mm. Η παραπάνω συμπεριφορά είναι παρόμοια και για τη δεξιά κύρια δοκό για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροπών κάμψης περί τον ασθενή άξονα και του δίρροπου για τις κύριες δοκούς και για την περίπτωση του δεύτερου συνδυασμού φόρτισης.



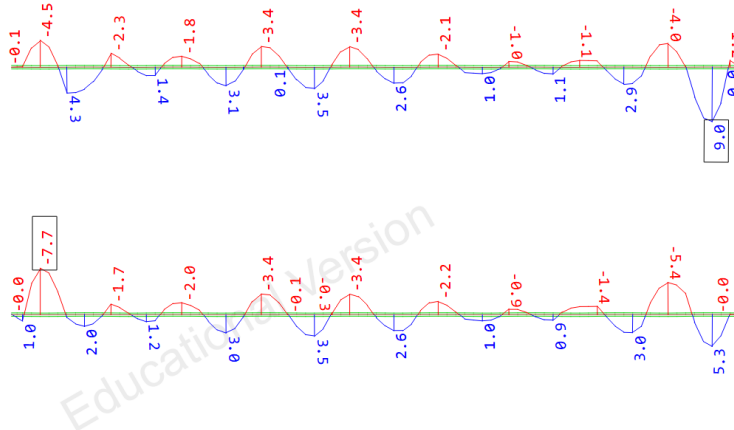
Σχήμα 7.15: Εξέλιξη ροπών κάμψης M_z αριστερής κύριας δοκού για τον τρίτο συνδυασμό φόρτισης



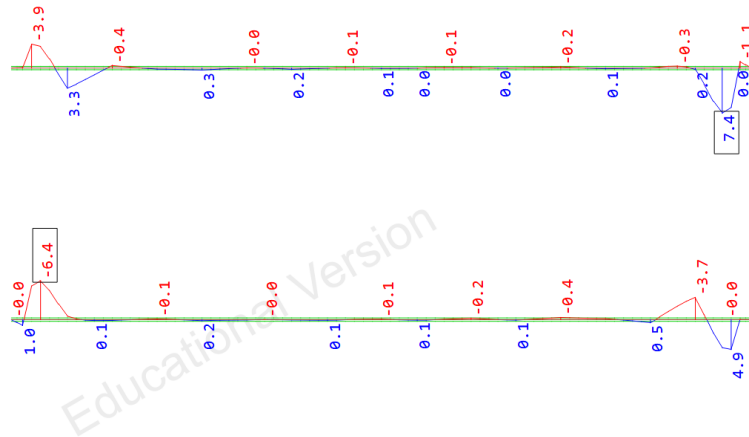
Σχήμα 7.16: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z κύριων δοκών για τοπική ατέλεια μέλους (άνεμος X)



Σχήμα 7.17: Διάγραμμα ροπών κάμψης M_z κύριων δοκών για ατέλεια στο σχήμα της 1ης ιδιομορφής λυγισμού (άνεμος X)



Σχήμα 7.18: Διάγραμμα δίρροπου B κύριων δοκών για τοπική ατέλεια μέλους (άνεμος X)



Σχήμα 7.19: Διάγραμμα δίρροπον Β κύριων δοκών για ατέλεια σύμφωνα με το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού (άνεμος Χ)

7.5 Έλεγχος διαδοκίδων

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τους βαθμούς αξιοποίησης στην κρίσιμη διατομή της μεσαίας διαδοκίδας για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης.

Πίνακας 7.27: Βαθμοί αξιοποίησης μεσαίας διαδοκίδας (Μ5-άνεμος Υ)

	M5 (EN 1993-2)	M5 (EUGLI)
N_{Ed} (kN)	1487.69	1494.62
$M_{y,Ed}$ (kNm)	3849.08	3842.57
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-4.00	-3.50
B_{Ed} (kNm ²)	-0.24	0.08
Βαθμός αξιοποίησης	1.081	1.078

Πίνακας 7.28: Βαθμοί αξιοποίησης μεσαίας διαδοκίδας (Μ5-άνεμος Χ)

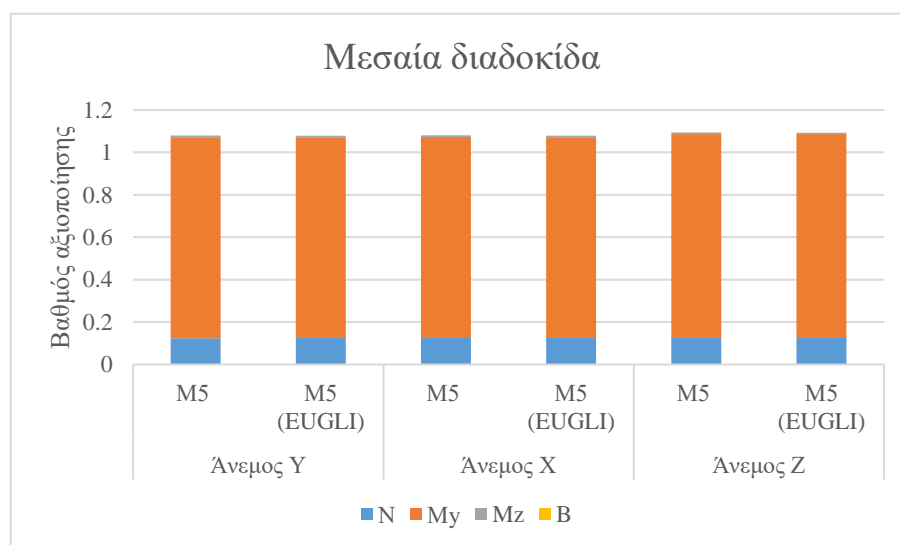
	M5 (EN 1993-2)	M5 (EUGLI)
N_{Ed} (kN)	1497.07	1501.51
$M_{y,Ed}$ (kNm)	3847.16	3842.69
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-4.01	-4.11
B_{Ed} (kNm ²)	-0.26	-0.19
Βαθμός αξιοποίησης	1.080	1.079

Πίνακας 7.29: Βαθμοί αξιοποίησης μεσαίας διαδοκίδας (Μ5-άνεμος Χ)

	Μ5 (EN 1993-2)	Μ5 (EUGLI)
N_{Ed} (kN)	1502.37	1507.30
$M_{y,Ed}$ (kNm)	3905.06	3900.24
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-3.94	-3.42
B_{Ed} (kNm ²)	-0.25	-0.30
Βαθμός αξιοποίησης	1.095	1.093

Οι αποκλίσεις στους βαθμούς αξιοποίησης ανάμεσα στη μέθοδο Μ5 και στη μέθοδο Μ2 για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού είναι αμελητέες με τα αποτελέσματα για τη μέθοδο Μ5 να είναι λίγο δυσμενέστερα. Το ίδιο ισχύει και για τα αποτελέσματα, που προέκυψαν για ατέλεια σύμφωνα με τον EN 1993-2 για τις μεθόδους Μ5 και Μ3. Ωστόσο, στη δεύτερη περίπτωση λόγω της τοπικής ατέλειας εκτός επιπέδου παρουσιάζεται σημαντική αλλαγή στο διάγραμμα ροπών κάμψης M_z και στο διάγραμμα του δίρροπου Β.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου Μ5 προέκυψαν αμελητέες αποκλίσεις. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα προκύπτει και από τους βαθμούς αξιοποίησης, που παρουσιάζονται σε μορφή διαγράμματος στο Σχήμα 7.20. Οι βαθμοί αξιοποίησης για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού είναι μειωμένοι σε σχέση με αυτούς, που προέκυψαν με χρήση της τοπικής ατέλειας του Ευρωκώδικα 3. Η μέγιστη τιμή αυτής της μείωσης ισούται με 0.25%.



Σχήμα 7.20: Σύγκριση βαθμών αξιοποίησης της μεσαίας διαδοκίδας για τη μέθοδο Μ5 ανάλογα με το είδος της ατέλειας

7.6 Έλεγχος εγκάρσιων συνδέσμων τόξων

7.6.1 Ατέλεια κατά EN 1993-2

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη στην κρίσιμη διατομή των εγκάρσιων συνδέσμων των τόξων μαζί με τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης για την περίπτωση χρήσης ατέλειας κατά EN 1993-2. Τα αποτελέσματα της μεθόδου Μ3, που παρουσιάζονται,

αναφέρονται στην ατέλεια εντός επιπέδου. Επειδή, ο μεγαλύτερος βαθμός αξιοποίησης προέκυψε για ένα εφελκόμενο μέλος δεν προέκυψαν διαφορές ανάμεσα στις μεθόδους, αφού δεν τοποθετήθηκε τοπική ατέλεια στα εφελκόμενα μέλη. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η μέγιστη αύξηση του βαθμού αξιοποίησης από τη μέθοδο M3 στη μέθοδο M5 είναι ίση με 1.19%. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από το Σχήμα 7.21, όπου παρουσιάζονται οι βαθμοί αξιοποίησης για το κρίσιμο εγκάρσιο εφελκόμενο μέλος.

Πίνακας 7.30: Εγκάρσια μέλη, στα οποία εμφανίστηκαν οι μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης

	M3	M5
Άνεμος Y	2	2
Άνεμος X	2	2
Άνεμος Z	2	2

Πίνακας 7.31: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Y)

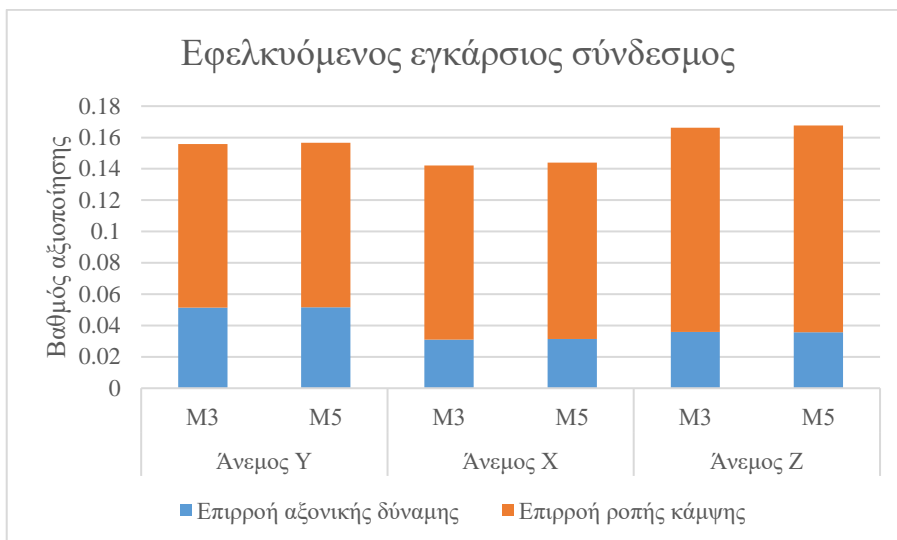
	Μέθοδος M3	Μέθοδος M5
N_{Ed} (kN)	108.51	108.77
$M_{y,Ed}$ (kNm)	13.85	14.06
$M_{z,Ed}$ (kNm)	9.14	9.03
M_{Ed} (kNm)	16.59	16.71
Βαθμός αξιοποίησης	0.156	0.157

Πίνακας 7.32: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος X)

	Μέθοδος M3	Μέθοδος M5
N_{Ed} (kN)	65.52	66.49
$M_{y,Ed}$ (kNm)	15.32	15.47
$M_{z,Ed}$ (kNm)	8.79	8.92
M_{Ed} (kNm)	17.66	17.86
Βαθμός αξιοποίησης	0.142	0.144

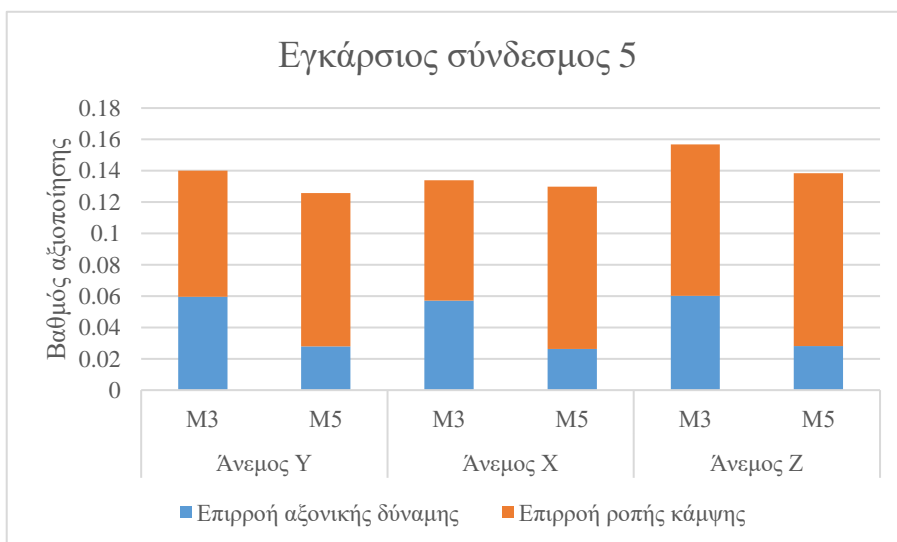
Πίνακας 7.33: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Z)

	Μέθοδος M3	Μέθοδος M5
N_{Ed} (kN)	75.75	75.21
$M_{y,Ed}$ (kNm)	17.61	17.83
$M_{z,Ed}$ (kNm)	10.92	11.08
M_{Ed} (kNm)	20.72	20.99
Βαθμός αξιοποίησης	0.166	0.168



Σχήμα 7.21: Βαθμοί αξιοποίησης εφελκόμενου εγκάρσιου συνδέσμου 2 (M5-EN 1993-2)

Προκειμένου να εκτιμηθεί η επιρροή της τοπικής ατέλειας ελέγχεται και ένα θλιβόμενο μέλος. Στο Σχήμα 7.22 παρουσιάζονται οι βαθμοί αξιοποίησης για το σύνδεσμο 5. Οι βαθμοί αξιοποίησης εμφανίζονται μειωμένοι στη μέθοδο M5, ενώ ταυτόχρονα η επιρροή της ροπής κάμψης είναι αυξημένη και η επιρροή της αξονικής δύναμης μειωμένη σε σχέση με τη μέθοδο M3. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο βαθμός αξιοποίησης προέκυψε για τη μέθοδο M3 με τον έλεγχο του μέλους, οπότε η επιρροή της τοπικής ατέλειας προσμετράται στον όρο της αξονικής δύναμης μέσω του μειωτικού συντελεστή χ , ενώ στη μέθοδο M5 πραγματοποιήθηκε έλεγχος της διατομής οπότε η επιρροή της αρχικής ατέλειας οδήγησε σε αύξηση της ροπής κάμψης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η μέγιστη μείωση του βαθμού αξιοποίησης από τη μέθοδο M3 στη μέθοδο M5 είναι 11.70%, ενώ η μέση τιμή αυτής της μείωσης ισούται με 8.32%.



Σχήμα 7.22: Βαθμοί αξιοποίησης θλιβόμενου εγκάρσιου συνδέσμου 5 (M5-EN 1993-2)

7.6.2 Ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη και τους βαθμούς αξιοποίησης για τις μεθόδους M2 και M5 στην περίπτωση τοποθέτησης ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού. Το κρίσιμο μέλος είναι εφελκόμενο και για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης,

οπότε οι βαθμοί αξιοποίησης δεν επηρεάστηκαν από την αρχική ατέλεια και προέκυψαν σχεδόν ίδιοι. Μάλιστα ο βαθμός αξιοποίησης για τη μέθοδο M5 είναι ελαφρά μικρότερος λόγω της ευνοϊκής επίδρασης της εφελκυστικής δύναμης, η οποία ελήφθη υπόψη, καθώς πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση 2^{ης} τάξης (μέγιστη μείωση 1.67%). Το Σχήμα 7.23 παρουσιάζει τους βαθμούς αξιοποίησης και την επιρροή των επιμέρους εντατικών μεγεθών για τον εγκάρσιο σύνδεσμο 2.

Πίνακας 7.34: Εγκάρσια μέλη, στα οποία εμφανίστηκαν οι μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης κατά τη μέθοδο M2 και M5 για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού

	M2	M5
Άνεμος Y	4 (δεξιά άκρη)	4 (δεξιά άκρη)
Άνεμος X	2 (μέσο)	2 (μέσο)
Άνεμος Z	4 (μέσο)	4 (μέσο)

Πίνακας 7.35: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Y)

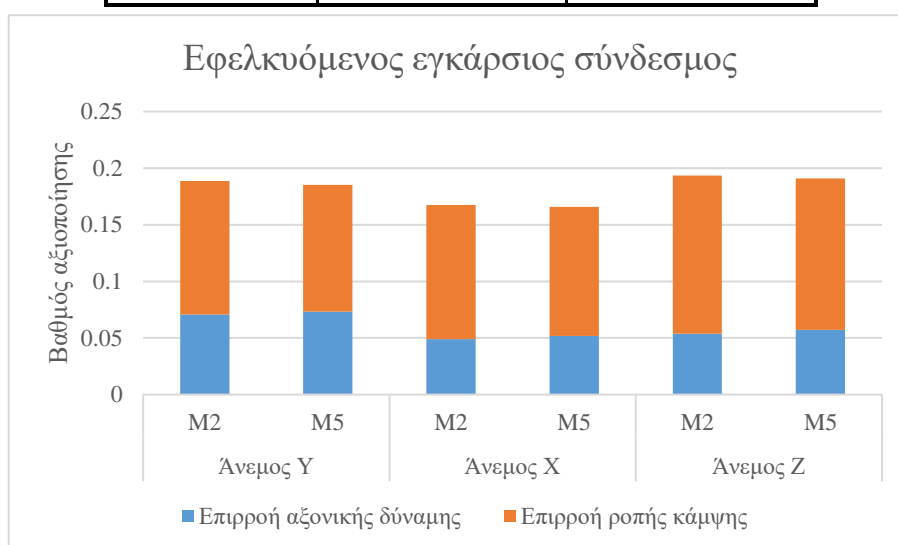
	LIA (M2)	GNIA (M5)
N_{Ed} (kN)	149.05	154.79
$M_{y,Ed}$ (kNm)	-16.88	-16.01
$M_{z,Ed}$ (kNm)	8.12	7.78
M_{Ed} (kNm)	18.73	17.80
Βαθμός αξιοποίησης	0.189	0.185

Πίνακας 7.36: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος X)

	LIA (M2)	GNIA (M5)
N_{Ed} (kN)	103.33	109.65
$M_{y,Ed}$ (kNm)	16.31	15.63
$M_{z,Ed}$ (kNm)	9.43	9.12
M_{Ed} (kNm)	18.84	18.10
Βαθμός αξιοποίησης	0.168	0.166

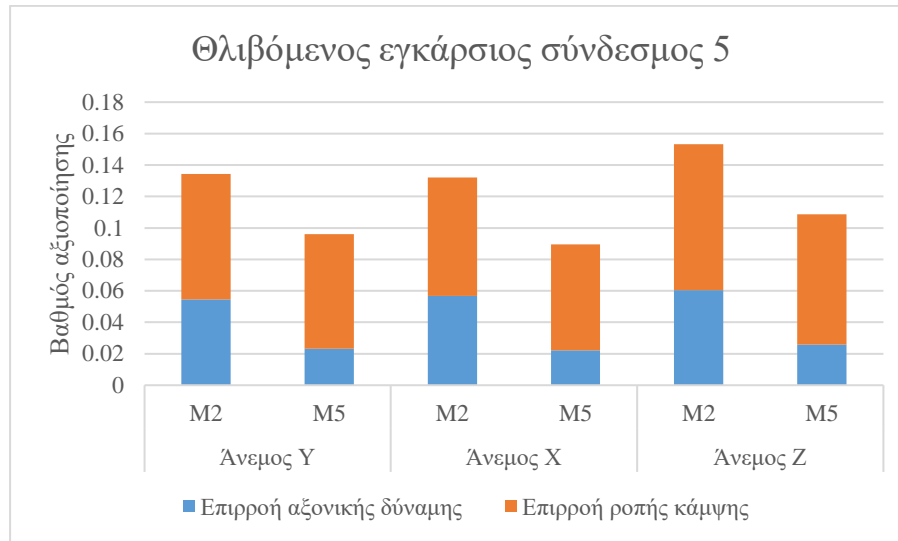
Πίνακας 7.37: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης εγκάρσιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Z)

	LIA (M2)	GNIA (M5)
N_{Ed} (kN)	113.48	120.73
$M_{y,Ed}$ (kNm)	18.79	17.96
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-11.77	-11.33
M_{Ed} (kNm)	22.17	21.24
Βαθμός αξιοποίησης	0.193	0.191



Σχήμα 7.23: Βαθμοί αξιοποίησης κρίσιμοι εφελκόμενου εγκάρσιου συνδέσμου (M5-EUGLI)

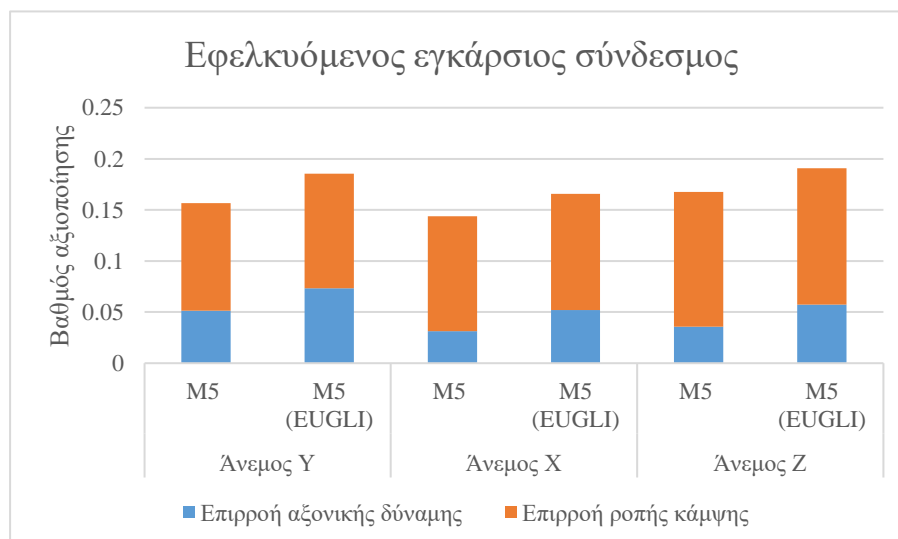
Προκειμένου να εξεταστεί η επιρροή της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής στους εγκάρσιους συνδέσμους παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.24, η σύγκριση των βαθμών αξιοποίησης για το εγκάρσιο μέλος 5, το οποίο θλίβεται. Οι βαθμοί αξιοποίησης με τη μέθοδο M5 είναι εμφανώς μικρότεροι από αυτούς της μεθόδου M2 με σημαντική μείωση της επιρροής της αξονικής δύναμης, ενώ η επιρροή της ροπής κάμψης παραμένει σχεδόν αμετάβλητη. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η μέγιστη μείωση του βαθμού αξιοποίησης είναι ίση με 32.19%. Αυτό σημαίνει ότι οι παραμορφώσεις που εισάγονται στο μέλος λόγω της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού δεν είναι σημαντικές με αποτέλεσμα η ροπή κάμψης να μην παρουσιάζει αύξηση λόγω φαινομένων 2^{ης} τάξης. Ο σχεδιασμός, επομένως, του μέλους με τη μέθοδο M5, θεωρώντας μόνο την ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, χωρίς να θεωρηθεί τοπική ατέλεια μέλους, είναι επισφαλής.



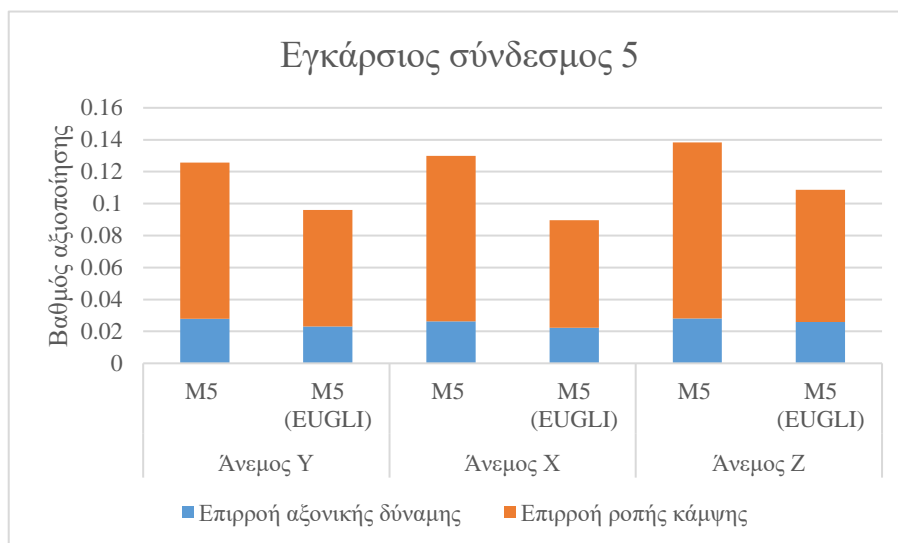
Σχήμα 7.24: Βαθμοί αξιοποίησης θλιβόμενου εγκάρσιου συνδέσμου 5

7.6.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδου M5

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου M5 παρουσιάζονται οι βαθμοί αξιοποίησης για το εφελκόμενο μέλος και το θλιβόμενο μέλος 5 στο Σχήμα 7.25 και στο Σχήμα 7.26 αντίστοιχα. Στην περίπτωση του εγκάρσιου συνδέσμου 2 οι βαθμοί αξιοποίησης λόγω τοποθέτησης της αρχικής ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού είναι εμφανώς μεγαλύτεροι. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην αύξηση του όρου της αξονικής δύναμης, καθώς λόγω της συγκεκριμένης ατέλειας εμφανίζεται σημαντική αύξηση στην εφελκυστική αξονική δύναμη του συνδέσμου, επειδή αυτός παρέχει πλευρική υποστήριξη στο σύστημα των τόξων. Η μέγιστη τιμή αυτής της αύξησης είναι 18.30%. Στην περίπτωση του εγκάρσιου συνδέσμου 5 οι βαθμοί αξιοποίησης προέκυψαν μικρότεροι στην περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν εμφανίζεται σημαντική παραμόρφωση του συνδέσμου κατά την 1^η ιδιομορφή λυγισμού, με αποτέλεσμα να μην εμφανίζεται και η αντίστοιχη ροπή 2^{ης} τάξης. Η μέγιστη τιμή της μείωσης του βαθμού αξιοποίησης από τη μέθοδο M5 (EUGLI) στη μέθοδο M5 είναι ίση με 13.73% και καθιστά επισφαλής το σχεδιασμό με χρήση μόνο της καθολικής ιδιομορφής λυγισμού ως αρχικής ατέλειας, χωρίς πρόσθετη ατέλεια για τα μέλη.



Σχήμα 7.25: Σύγκριση βαθμών αξιοποίησης εφελκόμενου εγκάρσιου συνδέσμου για τη μέθοδο Μ5 ανάλογα με το είδος της ατέλειας



Σχήμα 7.26: Σύγκριση βαθμών αξιοποίησης και επιρροής επιμέρους εντατικών μεγεθών για τον εγκάρσιο σύνδεσμο 5 και τις μεθόδους Μ5 (EN 1993-2) και Μ5 (EUGLI)

7.7 Έλεγχος διαγώνιων συνδέσμων τόξων

7.7.1 Ατέλεια κατά EN 1993-2

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη στην κρίσιμη διατομή των διαγώνιων συνδέσμων των τόξων μαζί με τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης για την περίπτωση χρήσης ατέλειας κατά EN 1993-2. Τα αποτελέσματα της μεθόδου Μ3, που παρουσιάζονται, αναφέρονται στην ατέλεια εντός επιπέδου.

Πίνακας 7.38: Διαγώνια μέλη, στα οποία εμφανίστηκαν οι μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης

	M3	M5
Άνεμος Y	4	4
Άνεμος X	5	5
Άνεμος Z	5	4

Πίνακας 7.39: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης κρίσιμων διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Y)

	Μέθοδος M3	Μέθοδος M5
N_{Ed} (kN)	-68.90	-63.19
$M_{y,Ed}$ (kNm)	5.74	11.61
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0.91	7.18
M_{Ed} (kNm)	5.81	13.65 (+134.94%)
Βαθμός αξιοποίησης	0.399	0.254 (-36.34%)

Πίνακας 7.40: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης κρίσιμων διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος X)

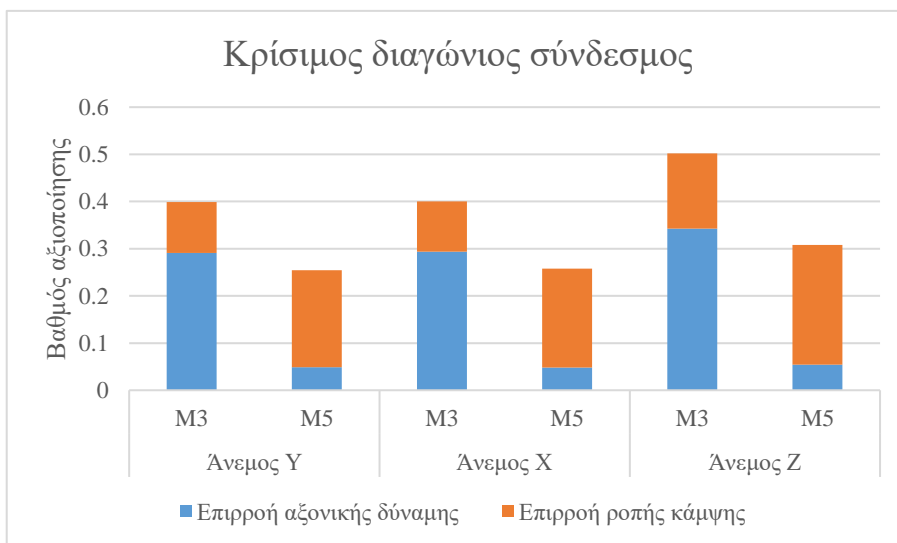
	Μέθοδος M3	Μέθοδος M5
N_{Ed} (kN)	-69.90	-62.79
$M_{y,Ed}$ (kNm)	5.60	11.70
$M_{z,Ed}$ (kNm)	-1.24	-7.53
M_{Ed} (kNm)	5.74	13.91 (+142.33%)
Βαθμός αξιοποίησης	0.400	0.258 (-35.50%)

Πίνακας 7.41: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης κρίσιμων διαγώνιων συνδέσμων τόξων (άνεμος Z)

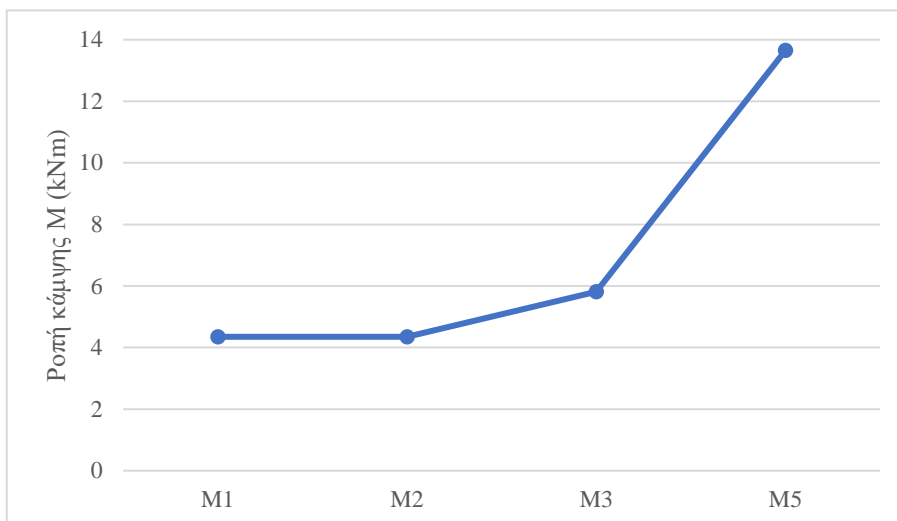
	Μέθοδος M3	Μέθοδος M5
N_{Ed} (kN)	-80.48	-70.70
$M_{y,Ed}$ (kNm)	8.30	15.04
$M_{z,Ed}$ (kNm)	0	7.57
M_{Ed} (kNm)	8.30	16.84 (+102.89%)
Βαθμός αξιοποίησης	0.502	0.308 (-38.65%)

Το Σχήμα 7.27 παρουσιάζει τους βαθμούς αξιοποίησης για το διαγώνιο σύνδεσμο, που προέκυψε κρίσιμος για κάθε συνδυασμό φόρτισης. Είναι εμφανής η μείωση της επιρροής της αξονικής δύναμης και η αύξηση της επιρροής της ροπής κάμψης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στη μέθοδο M3 η επιρροή της τοπικής ατέλειας ελήφθη μέσω του μειωτικού συντελεστή χ , ενώ στη μέθοδο M5 η τοπική ατέλεια τοποθετήθηκε στο προσομοίωμα μέσω ισοδύναμων φορτίων και οδήγησε σε αύξηση της ροπής κάμψης. Η μέγιστη αύξηση των βαθμών αξιοποίησης από τη μέθοδο M3 στη μέθοδο M5 είναι ίση με 38.62%.

Στο Σχήμα 7.28 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ροπής κάμψης του διαγώνιου συνδέσμου 4 για την περίπτωση ανέμου κατά Y. Η αύξηση της ροπής κάμψης από τη μέθοδο M3 στη μέθοδο M5 είναι ίση με 134.94% αλλά ο βαθμός αξιοποίησης μειώνεται κατά 36.28%.



Σχήμα 7.27: Βαθμοί αξιοποίησης κρίσιμου διαγώνιου συνδέσμου (M5-EN 1993-2)



Σχήμα 7.28: Μεταβολή ροπής κάμψης διαγώνιου συνδέσμου 4 για τον πρώτο συνδυασμό φόρτισης

7.7.2 Ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν τα εντατικά μεγέθη στην κρίσιμη διατομή των τόξων μαζί με τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης για την περίπτωση χρήσης ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα μεγέθη, που προέκυψαν κατά την εφαρμογή της μεθόδου M2. Σημειώνεται ότι κατά τη μέθοδο M5 για την περίπτωση ανέμου κατά Y άλλαξε η κρίσιμη διατομή και από το μέλος 6 μετατοπίστηκε στο μέλος 3. Επειδή η διαφορά στο βαθμό αξιοποίησης, που προέκυψε ήταν πολύ μικρή και για λόγους καλύτερης σύγκρισης επιλέχθηκε να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για το μέλος 6.

Οι βαθμοί αξιοποίησης που προκύπτουν με τη μέθοδο M5 είναι κατά πολύ μικρότεροι από εκείνους της M2, ενώ τα εντατικά μεγέθη δεν παρουσιάζουν αντίστοιχα μεγάλες αποκλίσεις. Λόγω των μικρών παραμορφώσεων που προκαλούνται από την ιδιομορφή λυγισμού, δεν

αναπτύσσονται αξιόλογες ροπές 2^{ης} τάξης, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται πολύ μεγάλη μείωση του βαθμού αξιοποίησης στη μέθοδο M5, με μέση τιμή 64.51%.

Πίνακας 7.42: Διαγώνια μέλη, στα οποία εμφανίστηκαν οι μέγιστοι βαθμοί αξιοποίησης

	M2	M5
Άνεμος Y	6	6
Άνεμος X	6	6
Άνεμος Z	6	6

Πίνακας 7.43: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης διαγώνιου συνδέσμου 6 (άνεμος Y-ατέλεια EUGLI)

	LIA (M2)	GNIA (M5)
N _{Ed} (kN)	-128.76	-131.13
M _{y,Ed} (kNm)	4.16	6.92
M _{z,Ed} (kNm)	-0.77	-0.91
M _{Ed} (kNm)	4.23	6.98
Βαθμός αξιοποίησης	0.631	0.206 (-67.35%)

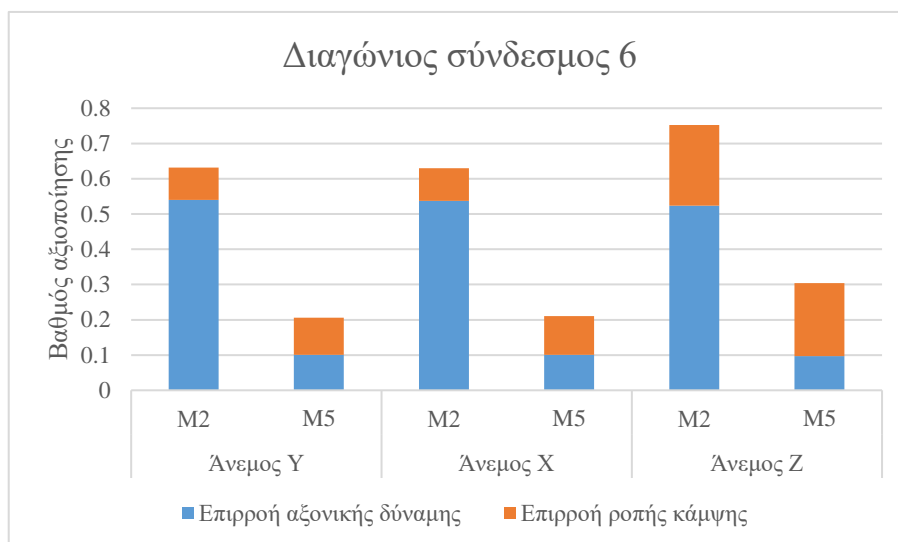
Πίνακας 7.44: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης διαγώνιου συνδέσμου 6 (άνεμος X-ατέλεια EUGLI)

	LIA (M2)	GNIA (M5)
N _{Ed} (kN)	-127.76	-130.78
M _{y,Ed} (kNm)	4.22	7.00
M _{z,Ed} (kNm)	0.77	2.11
M _{Ed} (kNm)	4.29	7.31
Βαθμός αξιοποίησης	0.630	0.211 (-66.51%)

Πίνακας 7.45: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης διαγώνιου συνδέσμου 6 (άνεμος Z-ατέλεια EUGLI)

	LIA (M2)	GNIA (M5)
N _{Ed} (kN)	-124.26	-125.62
M _{y,Ed} (kNm)	8.04	11.37
M _{z,Ed} (kNm)	-7.04	-7.74
M _{Ed} (kNm)	10.69	13.75
Βαθμός αξιοποίησης	0.752	0.304 (-59.57%)

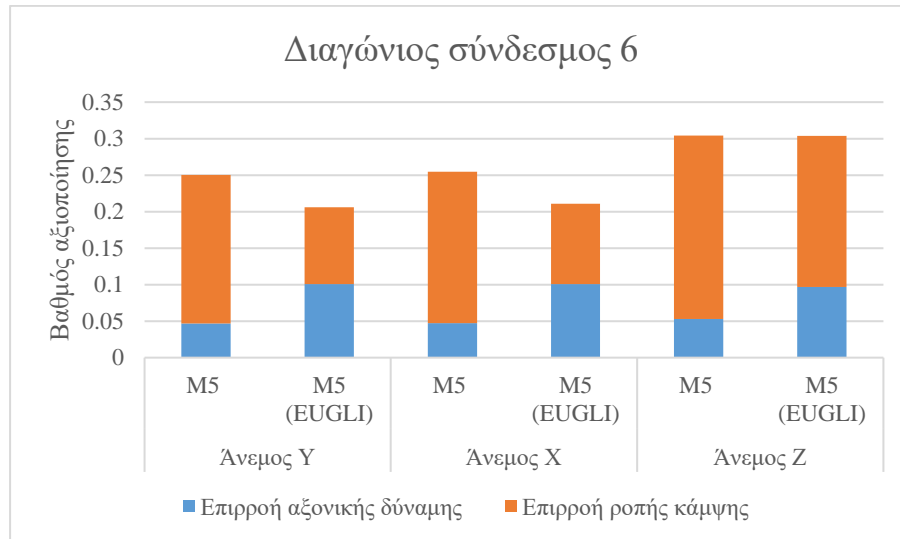
Το Σχήμα 7.29 παρουσιάζει όσα περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Είναι εμφανής η μείωση της επιρροής της αξονικής δύναμης στο βαθμό αξιοποίησης λόγω του ότι στη μέθοδο Μ5 πραγματοποιείται έλεγχος της διατομής και ως εκ τούτου δε χρησιμοποιείται ο μειωτικός συντελεστής χ . Επίσης, δεν εμφανίζεται αύξηση της ροπής κάμψης ούτε λόγω των φαινομένων 2^{ης} τάξης ούτε λόγω της ατέλειας. Επομένως, η συγκεκριμένη μείωση οφείλεται στο ότι στη μέθοδο Μ2 έχει ληφθεί κανονιστικά υπόψη η τοπική ατέλεια και τα φαινόμενα 2^{ης} τάξης μέσω του μειωτικού συντελεστή, ενώ στη μέθοδο Μ5 δεν έχει ληφθεί υπόψη η συγκεκριμένη επιρροή της τοπικής ατέλειας, γιατί η ιδιομορφή λυγισμού του φορέα δεν παρουσιάζει τις απαιτούμενες μετακινήσεις για το διαγώνιο μέλος.



Σχήμα 7.29: Βαθμός αξιοποίησης διαγώνιου συνδέσμου 6 (M5-EUGLI)

7.7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων Μ5

Το Σχήμα 7.30 παρουσιάζει τους βαθμούς αξιοποίησης για τη μέθοδο Μ5, για τοποθέτηση ατέλειας κατά τον EN 1993-2 και στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού. Οι βαθμοί αξιοποίησης στην περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού είναι εμφανώς μικρότεροι για άνεμο κατά Y και κατά X, ενώ δεν υπάρχει διαφορά για τον άνεμο κατά Z. Η τοποθέτηση της ατέλειας κατά την 1^η ιδιομορφή λυγισμού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θλιπτικής αξονικής δύναμης, το οποίο είναι αποτέλεσμα της πλευρικής υποστήριξης που προσφέρει ο σύνδεσμος στο σύστημα αλλά λόγω μικρών παραμορφώσεων του μέλους δεν αναπτύσσονται ροπές 2^{ης} τάξης. Ο σχεδιασμός με χρήση μόνο της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού χωρίς την πρόσθετη τοποθέτηση ατέλειας μέλους οδηγεί σε επισφαλή σχεδιασμό. Η μέγιστη τιμή της μείωσης των βαθμών αξιοποίησης ήταν 17.77% και η μέση τιμή αυτής της μείωσης 11.76%.



Σχήμα 7.30: Σύγκριση βαθμών αξιοποίησης για το διαγώνιο σύνδεσμο 6 και τις μεθόδους M5 (EN 1993-2) και M5 (EUGLI)

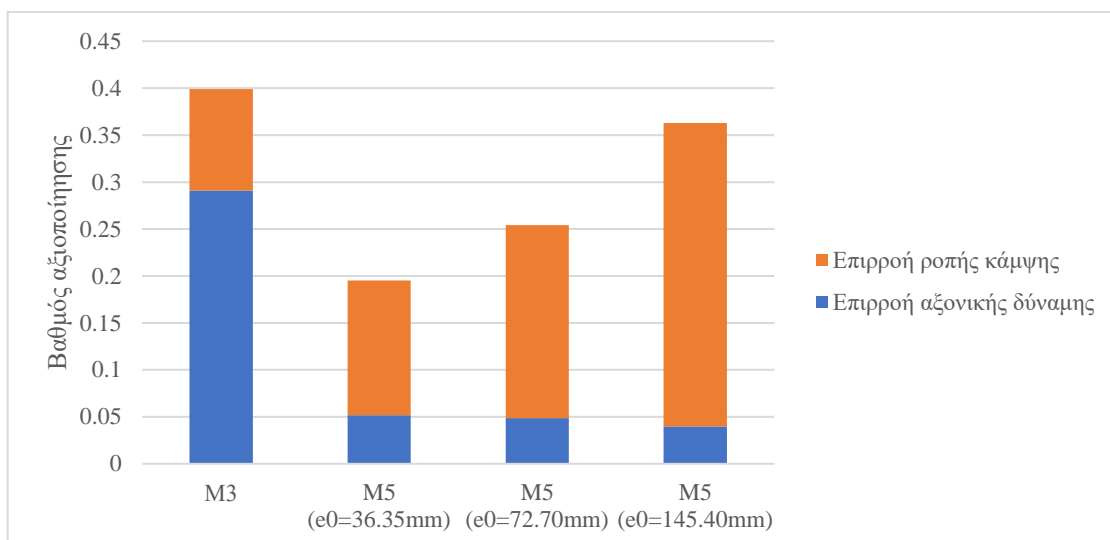
7.7.4 Διερεύνηση αποτελεσμάτων

Στην ενότητα 7.7.1 παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του βαθμού αξιοποίησης των διαγώνιων μελών από τη μέθοδο M3 στη μέθοδο M5, η οποία είχε μία μέση τιμή ίση με 36.84%, κάτι που σημαίνει ότι η διαδικασία του ελέγχου μέσω των καμπυλών λυγισμού οδηγεί σε πολύ συντηρητικά αποτελέσματα. Θεωρήθηκε σκόπιμο να εξεταστεί περαιτέρω το συγκεκριμένο ζήτημα. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν επιπλέον αναλύσεις θεωρώντας τη μισή και τη διπλάσια τιμή αρχικής ατέλειας στο μέλος, όπως ορίζεται στον Κανονισμό δηλαδή 36.35mm και 145.4mm. Η τοποθέτηση της ατέλειας πραγματοποιήθηκε σε πρώτη φάση μέσω ισοδύναμων φορτίων για την περίπτωση του πρώτου συνδυασμού φόρτισης με εγκάρσια φορτία ανέμου. Στη συνέχεια η ατέλεια τοποθετήθηκε και με χρήση της ιδιομορφής λυγισμού του μέλους με μέγεθος τις τιμές, που αναφέρθηκαν παραπάνω.

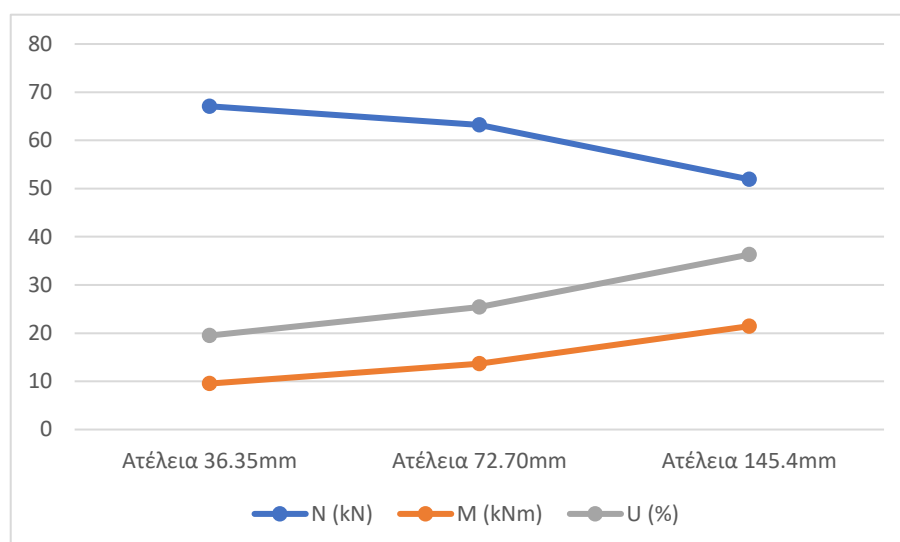
Ο Πίνακας 7.46 παρουσιάζει τα εντατικά μεγέθη και τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης για την περίπτωση τοποθέτησης της ατέλειας μέσω ισοδύναμων φορτίων για τον κρίσιμο διαγώνιο σύνδεσμο 4. Στη μέθοδο M3 ο βαθμός αξιοποίησης προέκυψε για τον άνεμο κατά Y ίσος με 0.399, τιμή που προσεγγίζει τη μέγιστη τιμή ατέλειας $e_0=145.4\text{mm}$. Το Σχήμα 7.33 παρουσιάζει τους βαθμούς αξιοποίησης για κάθε τιμή αρχικής ατέλειας. Από το Σχήμα 7.32 φαίνεται ότι καθώς αυξάνεται η τιμή της αρχικής ατέλειας εμφανίζεται μη γραμμική αύξηση της ροπής κάμψης και του βαθμού αξιοποίησης, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται και η αξονική δύναμη. Ο κατακόρυφος άξονας αναφέρεται στη ροπή κάμψης σε kNm, στην αξονική δύναμη σε kN και στο βαθμός αξιοποίησης ως ποσοστό (%).

Πίνακας 7.46: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης διαγώνιου συνδέσμου 4 (ισοδύναμα φορτία)

Ατέλεια (mm)	$e_0=36.35\text{mm}$	$e_0=72.70\text{mm}$	$e_0=145.40\text{mm}$
N_{Ed} (kN)	-67.08	-63.19	-51.92
M_{Ed} (kNm)	9.53	13.65	21.45
Βαθμός αξιοποίησης	0.195	0.254	0.363



Σχήμα 7.31: Βαθμοί αξιοποίησης διαγώνιου συνδέσμου 4 για διάφορες τιμές τοπικής ατέλειας μέλους (ισοδύναμα φορτία)

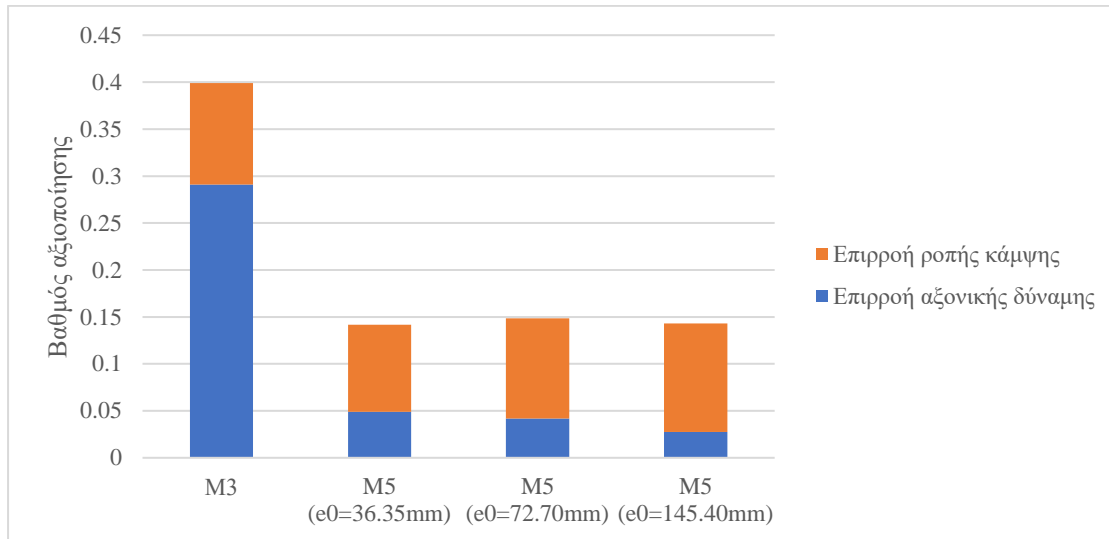


Σχήμα 7.32: Μεταβολή αξονικής δύναμης N, ροπή κάμψης M και βαθμού αξιοποίησης U, ανάλογα με το μέγεθος της ατέλειας του μέλους (ισοδύναμα φορτία)

Ο Πίνακας 7.47 παρουσιάζει τα εντατικά μεγέθη και τους βαθμούς αξιοποίησης για το διαγώνιο σύνδεσμο 4, στην περίπτωση, που τοποθετηθεί η ατέλεια με τη βοήθεια της ιδιομορφής λυγισμού του μέλους (Σχήμα 4.52). Καθώς αυξάνεται το μέγεθος της αρχικής ατέλειας μειώνεται σημαντικά η αξονική θλιπτική δύναμη και δεν εμφανίζεται ουσιαστική μεταβολή στη ροπή κάμψης και στο βαθμό αξιοποίησης.

Πίνακας 7.47: Εντατικά μεγέθη και βαθμοί αξιοποίησης διαγώνιου συνδέσμου 4 (σχήμα ιδιομορφής λυγισμού μέλους)

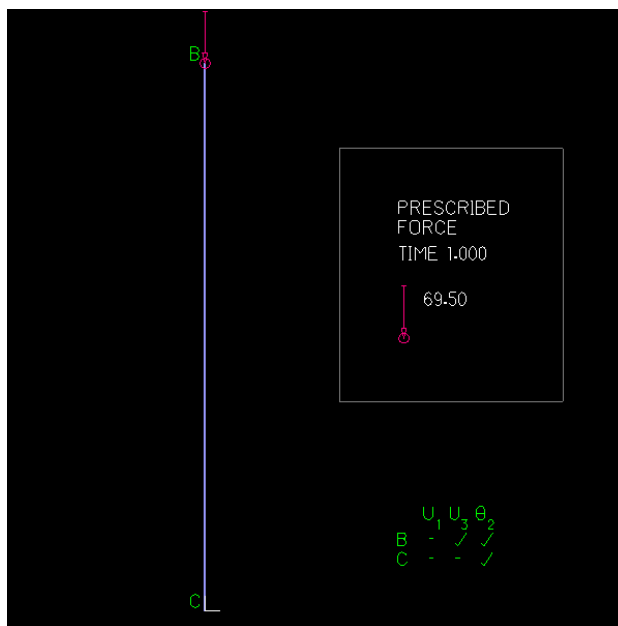
Ατέλεια (mm)	e0=36.35mm	e0=72.70mm	e0=145.40mm
N _{Ed} (kNm)	-63.57	-54.41	-35.90
M _{Ed} (kNm)	6.16	7.09	7.67
Βαθμός αξιοποίησης	0.142	0.149	0.143



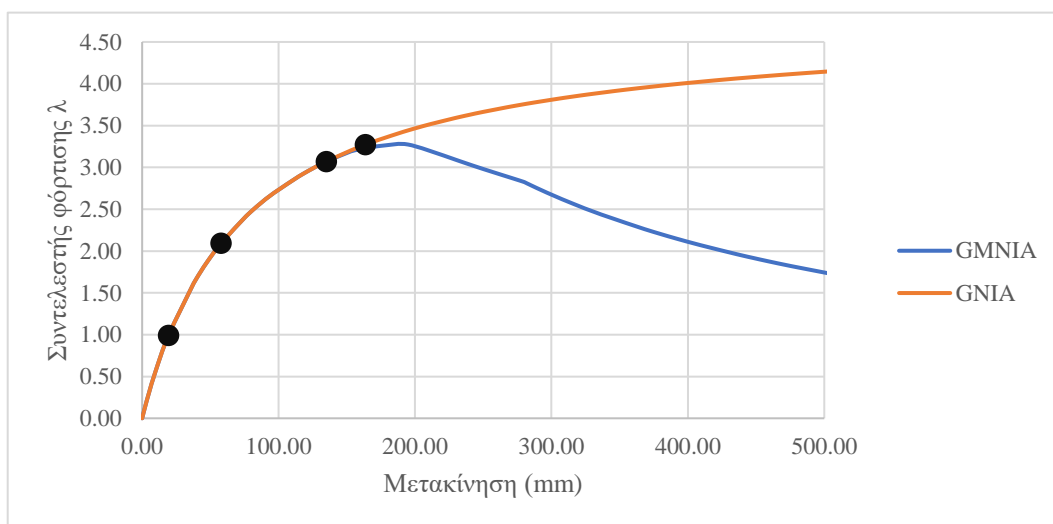
Σχήμα 7.33: Βαθμοί αξιοποίησης διαγώνιου συνδέσμου 4 για διάφορες τιμές τοπικής ατέλειας μέλους (ιδιομορφή λυγισμού μέλους)

Συνεχίζοντας τη διερεύνηση δημιουργήθηκε στο λογισμικό Adina δισδιάστατο προσομοίωμα, στο οποίο απομονώθηκε ο διαγώνιος σύνδεσμος 4 και του ασκήθηκε η αξονική θλιπτική δύναμη $N_{Ed}=69.5\text{kN}$, η οποία αναπτύσσεται στο συγκεκριμένο μέλος για άνεμο κατά Y και γραμμική στατική ανάλυση (Σχήμα 4.44). Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 7.34 παρουσιάζεται το μέλος μήκους 9.054m και διατομής CHS 168.3/8, στο οποίο ασκείται ένα αξονικό θλιπτικό φορτίο 69.5kN. Σε αυτό το μέλος πραγματοποιήθηκε ανάλυση GMNIA, θεωρώντας ως αρχική ατέλεια το σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού με μέγιστη μετατόπιση στο μέσο ίση με 72.70mm, όση δηλαδή προβλέπεται και στην ενότητα 7.2, με σκοπό να υπολογιστεί η οριακή αντοχή του μέλους. Τέλος, για την ίδια ατέλεια πραγματοποιήθηκε και ανάλυση GNIA. Στο Σχήμα 7.35 παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας της εγκάρσιας μετακίνησης του κόμβου του μέσου.

Για διάφορα σημεία κατά μήκος του δρόμου ισορροπίας, που προέκυψε από την ανάλυση GNIA, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της διατομής του μέσου καθώς και ο έλεγχος του μέλους λαμβάνοντας ως αξονική δύναμη την αρχική πολλαπλασιασμένη με το συντελεστή φόρτισης και μηδενική ροπή κάμψης. Εφαρμόστηκε, δηλαδή, στο μέλος η μέθοδος M1 και M5 και υπολογίστηκαν ο αντίστοιχοι βαθμοί αξιοποίησης. Τα σημεία ελέγχου είναι σημειωμένα στο δρόμο ισορροπίας στο Σχήμα 7.35.



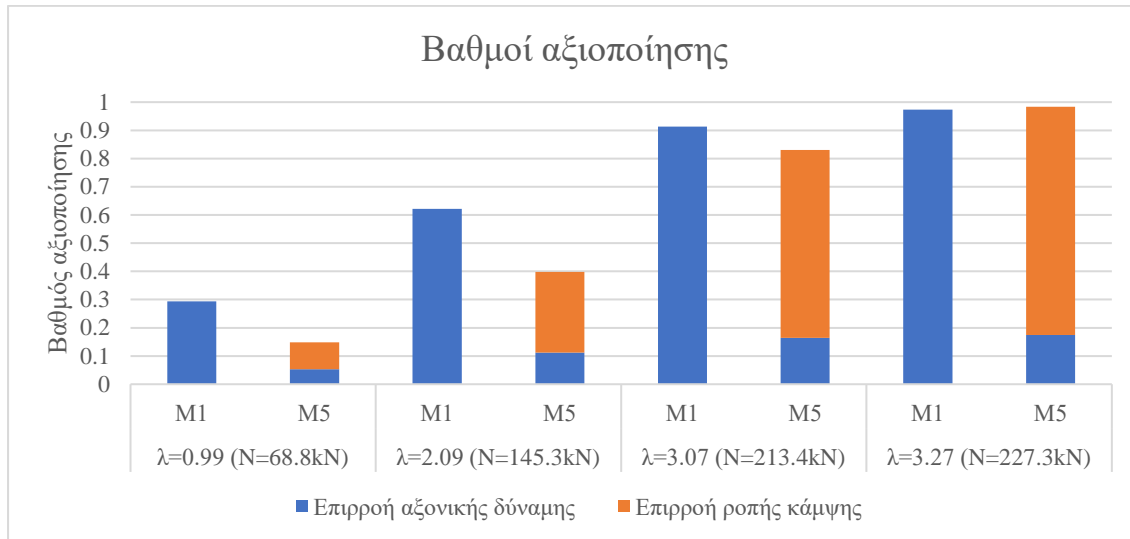
Σχήμα 7.34: Προσομοίωμα διαγώνιου συνδέσμων 4 στο Adina



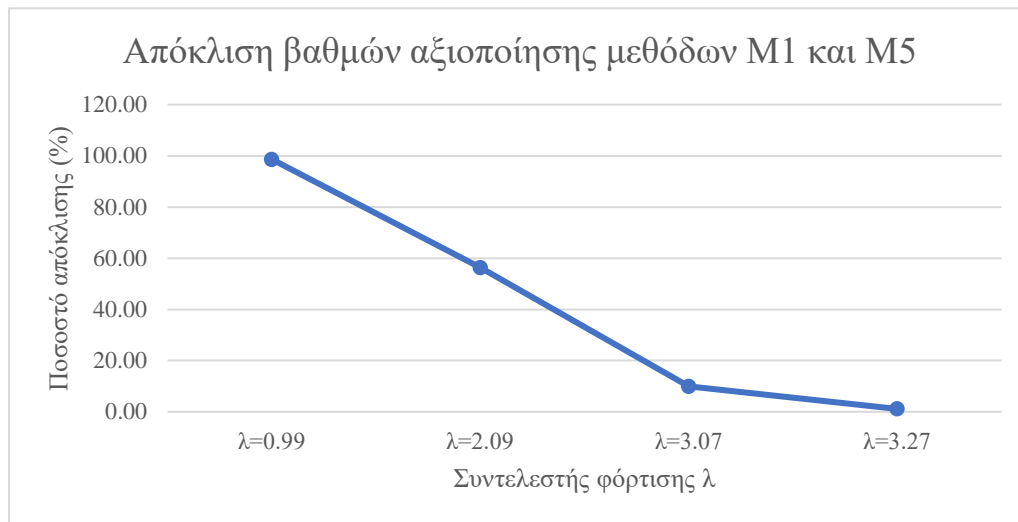
Σχήμα 7.35: Δρόμοι ισορροπίας εγκάρσιας μετακίνησης κόμβου μέσου

Στο Σχήμα 7.36 παρουσιάζονται οι βαθμοί αξιοποίησης για τον κάθε σημείο επί του δρόμου ισορροπίας και την κάθε μέθοδο. Αυτό, που γίνεται αμέσως αντιληπτό είναι ότι υπάρχει πολύ μεγάλη απόκλιση των αποτελεσμάτων των 2 μεθόδων για χαμηλές στάθμες φορτίου, με τη μέθοδο M1 να οδηγεί σε συντηρητικά αποτελέσματα αλλά όσο το φορτίο προσεγγίζει την οριακή αντοχή η απόκλιση αυτή μειώνεται. Στο τέλος τα αποτελέσματα των 2 μεθόδων ταυτίζονται. Η εικόνα αυτή φαίνεται καλύτερα στο Σχήμα 7.37, όπου παρουσιάζεται σε διάγραμμα η απόλυτη τιμή της απόκλισης των βαθμών αξιοποίησης, που προέκυψαν με τις 2 μεθόδους.

Με βάση αυτήν τη διερεύνηση είναι λογική η απόκλιση ίση με 36.84% κατά μέσο όρο, που προέκυψε μεταξύ της μεθόδου M3 και M5 για το διαγώνιο σύνδεσμο 4. Ο βαθμός αξιοποίησης της διατομής του μέσου του μέλους είναι μικρός κοντά στο 15%, τιμή για την οποία ο έλεγχος του μέλους της μεθόδου M3 οδηγεί σε συντηρητικά αποτελέσματα



Σχήμα 7.36: Βαθμοί αξιοποίησης μέλους για τον κάθε συντελεστή φόρτισης και την κάθε μέθοδο



Σχήμα 7.37: Μεταβολή της απόκλισης στους βαθμούς αξιοποίησης ανάμεσα στις μεθόδους M1 και M5 για κάθε συντελεστή φόρτισης

7.8 Συνδυασμός τοπικής ατέλειας μέλους και ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού

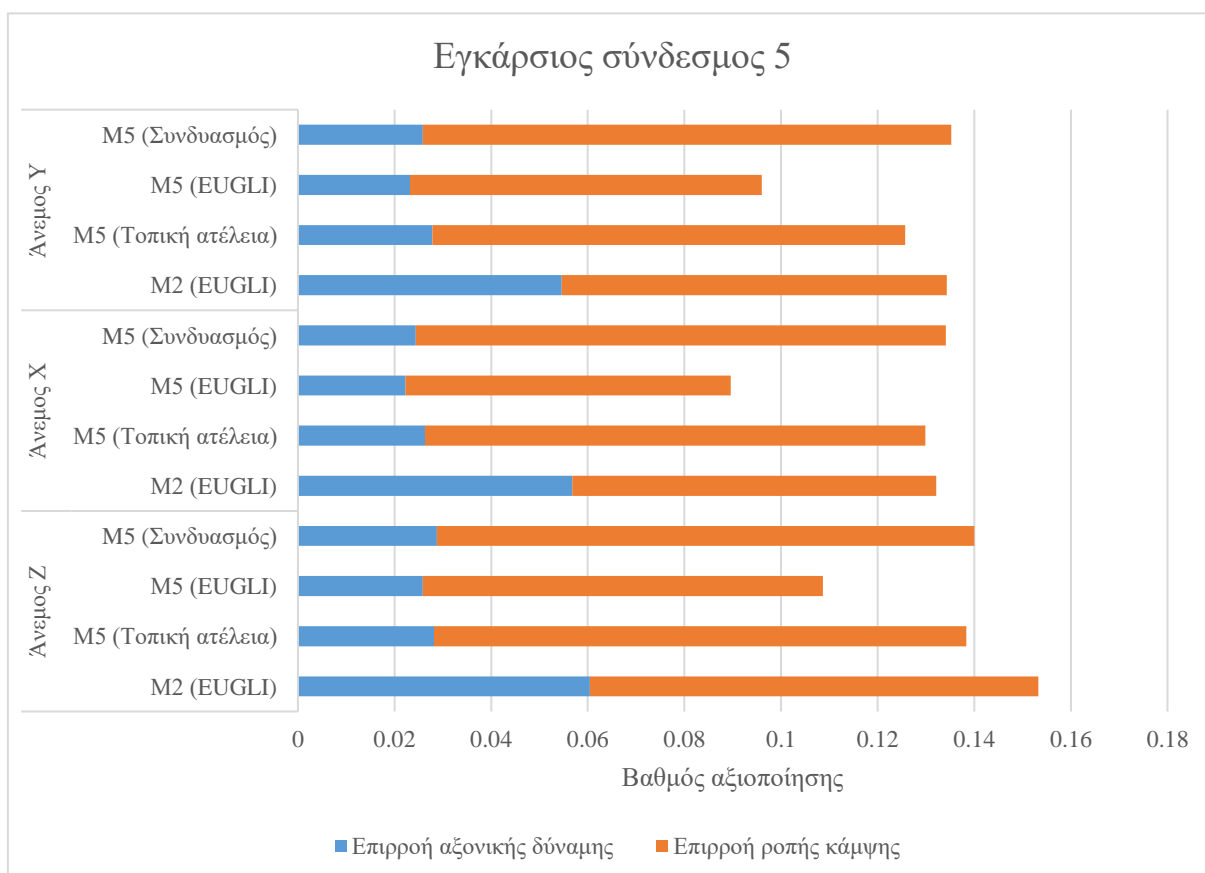
Από τα αποτελέσματα για τους θλιβόμενους εγκάρσιους και διαγώνιους συνδέσμους των τόξων προέκυψε ότι η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού χωρίς την τοποθέτηση τοπικής ατέλειας μέλους, οδηγεί σε επισφαλή σχεδιασμό. Για το λόγο αυτό εξετάζεται και η περίπτωση εισαγωγής της τοπικής ατέλειας σε αυτά τα θλιβόμενα μέλη για λυγισμό εντός και εκτός επιπέδου, ταυτόχρονα με την καθολική ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού. Η εισαγωγή της ατέλειας έγινε μέσω ισοδύναμων κατανεμημένων και συγκεντρωμένων φορτίων, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 7.2.

Στο Σχήμα 7.38 παρουσιάζεται το διάγραμμα των βαθμών αξιοποίησης για το θλιβόμενο εγκάρσιο σύνδεσμο 5. Οι βαθμοί αξιοποίησης που προέκυψαν για το συνδυασμό των 2 ατελειών είναι κοντά με τους αντίστοιχους της μεθόδου M2 (EUGLI), ενώ είναι αυξημένοι σε σχέση με αυτούς που προέκυψαν μόνο με τοπική ατέλεια ή με ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης}

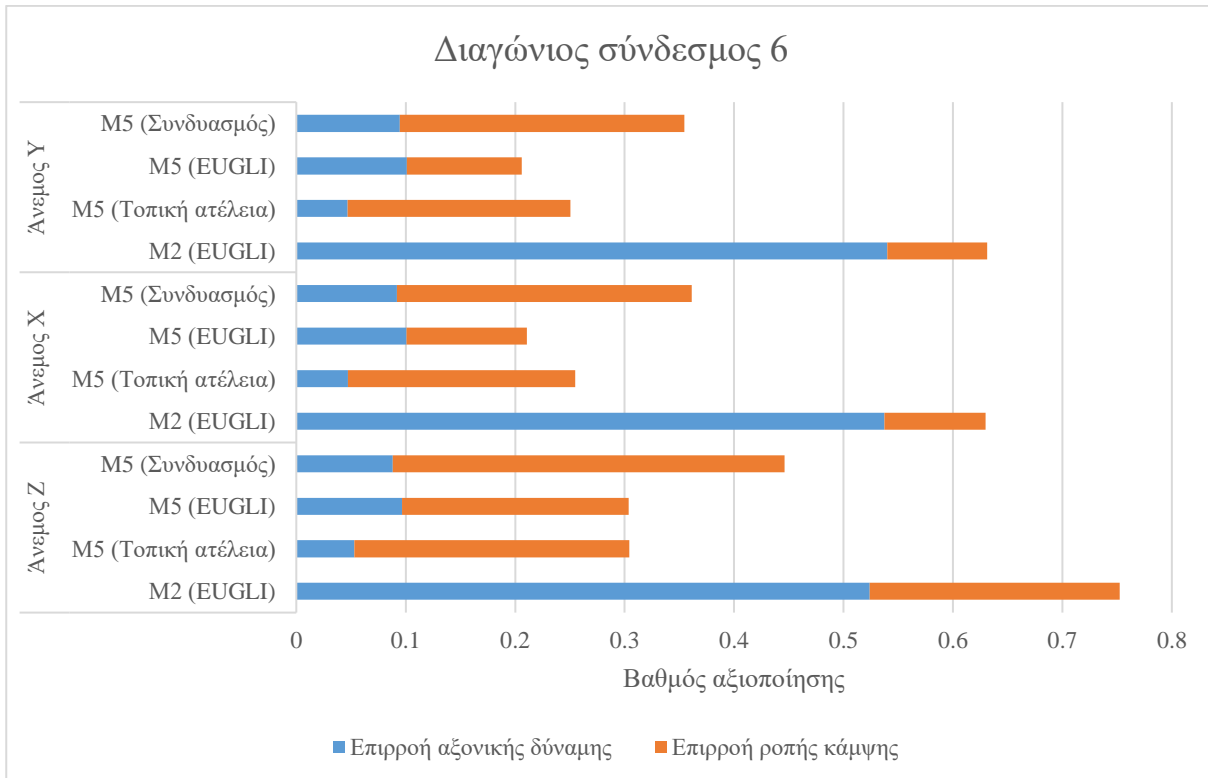
ιδιομορφής λυγισμού. Η αύξηση αυτή δικαιολογείται, γιατί για τη συνδυασμένη ατέλεια το μέγεθος της αρχικής ατέλειας είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από αυτό της τοπικής ατέλειας μέλους.

Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης η μείωση των βαθμών αξιοποίησης του συνδυασμού των ατελειών από τους αντίστοιχους βαθμούς αξιοποίησης της μεθόδου Μ2 (EUGLI), παρατηρήθηκε μόνο για τον άνεμο κατά Ζ και ήταν ίση με 8.64%. Για τους άλλους δύο συνδυασμούς φόρτισης εμφανίστηκε μικρή αύξηση. Επίσης, η μέση αύξηση των βαθμών αξιοποίησης σε σχέση με τη Μ5 (EUGLI) ήταν ίση με 39.77% και σε σχέση με την τοπική ατέλεια του Ευρωκώδικα 4.01%.

Στο Σχήμα 7.39 παρουσιάζεται το διάγραμμα των βαθμών αξιοποίησης για το διαγώνιο σύνδεσμο 6. Ο βαθμός αξιοποίησης, που προέκυψε με συνδυασμό των δύο ατελειών είναι μεγαλύτερος τόσο από το βαθμό αξιοποίησης της Μ5 (EUGLI) όσο και από το βαθμό αξιοποίησης της Μ5 με τοπική ατέλεια. Ωστόσο, εξακολουθεί να εμφανίζεται σημαντική απόκλιση από τη μέθοδο Μ2 (EUGLI), όπου γίνεται έλεγχος του μέλους. Η μέση μείωση του βαθμού αξιοποίησης από τη Μ2 (EUGLI) είναι 42.39%, η μέση αύξηση του βαθμού αξιοποίησης από τη Μ5 με τοπική ατέλεια είναι 43.30% και από τη Μ5 (EUGLI) είναι 68.27%. Η σημαντική αύξηση από τη μέθοδο Μ5 με τοπική ατέλεια οφείλεται στη σημαντική αξονική θλιπτική δύναμη, που ασκείται στο διαγώνιο μέλος για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού.



Σχήμα 7.38: Βαθμοί αξιοποίησης θλιβόμενου εγκάρσιου συνδέσμου 5



Σχήμα 7.39: Βαθμοί αξιοποίησης διαγώνιου συνδέσμου 6

7.9 Έλεγχος αναρτήρων

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν την ασκούμενη αξονική δύναμη και το βαθμό αξιοποίησης για τον εκάστοτε κρίσιμο αναρτήρα. Για την ατέλεια κατά EN 1993-2 κρίσιμος προέκυψε ο 6^{ος} αναρτήρας του αριστερού τόξου για άνεμο κατά X και Y, ενώ για άνεμο κατά Z κρίσιμος προέκυψε ο 6^{ος} αναρτήρας του δεξιού τόξου. Για την ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού κρίσιμος προέκυψε ο 2^{ος} αναρτήρας του αριστερού τόξου, ενώ για τον άνεμο κατά X και κατά Z κρίσιμος προέκυψε ο 6^{ος} αναρτήρας του δεξιού τόξου.

Πίνακας 7.48: Βαθμοί αξιοποίησης αναρτήρων (M5-άνεμος Y)

	M5 (EN 1993-2)	M5 (EUGLI)
N_{Ed} (kN)	917.98	937.00
Βαθμός αξιοποίησης	0.642	0.655

Πίνακας 7.49: Βαθμοί αξιοποίησης αναρτήρων (M5-άνεμος X)

	M5 (EN 1993-2)	M5 (EUGLI)
N_{Ed} (kN)	919.98	937.12
Βαθμός αξιοποίησης	0.643	0.655

Πίνακας 7.50: Βαθμοί αξιοποίησης αναρτήρων (Μ5-άνεμος Ζ)

	M5 (EN 1993-2)	M5 (EUGLI)
N_{Ed} (kN)	967.65	983.82
Βαθμός αξιοποίησης	0.677	0.688

Οι αποκλίσεις στους βαθμούς αξιοποίησης ανάμεσα στις μεθόδους Μ5 και Μ3 για ατέλεια κατά EN 1993-2 και Μ5 και Μ2 για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού είναι αμελητέες. Επίσης, η μέγιστη αξονική δύναμη, που αναπτύσσεται στους αναρτήρες στη μέθοδο Μ5 (EUGLI) είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτήν που αναπτύσσεται στη Μ5 (EN 1993-2).

7.10 Έλεγχος συνδέσμων καταστρώματος

Ο κρίσιμος έλεγχος για τους συνδέσμους του καταστρώματος για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης ήταν ο έλεγχος της διατομής εφελκόμενου μέλους. Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν την ασκούμενη αξονική δύναμη και το βαθμό αξιοποίησης για τον εκάστοτε κρίσιμο σύνδεσμο του καταστρώματος.

Πίνακας 7.51: Βαθμοί αξιοποίησης συνδέσμων καταστρώματος (Μ5-άνεμος Υ)

	M5 (EN 1993-2)	M5 (EUGLI)
N_{Ed} (kN)	502.42	488.34
Βαθμός αξιοποίησης	0.347	0.338

Πίνακας 7.52: Βαθμοί αξιοποίησης συνδέσμων καταστρώματος (Μ5-άνεμος Χ)

	M5 (EN 1993-2)	M5 (EUGLI)
N_{Ed} (kN)	519.24	471.58
Βαθμός αξιοποίησης	0.359	0.326

Πίνακας 7.53: Βαθμοί αξιοποίησης συνδέσμων καταστρώματος (Μ5-άνεμος Ζ)

	M5 (EN 1993-2)	M5 (EUGLI)
N_{Ed} (kN)	528.05	493.65
Βαθμός αξιοποίησης	0.365	0.341

Οι βαθμοί αξιοποίησης της μεθόδου Μ5 παρουσίασαν αμελητέες αποκλίσεις τόσο όταν τοποθετήθηκε ατέλεια κατά τον EN 1993-2 όσο και όταν τοποθετήθηκε ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού σε σχέση με τη μέθοδο Μ3 και Μ2 αντίστοιχα. Η συμπεριφορά αυτή ήταν αναμενόμενη για την ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, καθώς δεν τοποθετήθηκε τοπική ατέλεια αν και λόγω της συγκεκριμένης ιδιομορφής εμφανίζονται και μετακινήσεις εκτός επιπέδου για κάποια μέλη. Η τοπική ατέλεια, που τοποθετήθηκε κατά τον Ευρωκώδικα 3 οδήγησε σε αύξηση των ροπών κάμψης αλλά εξακολούθησε να είναι κρίσιμος

ο εφελκόμενος σύνδεσμος. Τέλος, η ατέλεια σύμφωνα με το EN 1993-2 οδήγησε σε ελαφρώς μεγαλύτερους βαθμούς αξιοποίησης κατά την εφαρμογή της μεθόδου M5 σε σύγκριση με την ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού.

7.11 Σύνοψη αποτελεσμάτων-Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό εφαρμόστηκε η μέθοδος M5 για την ανάλυση του φορέα και τον έλεγχο των στοιχείων της γέφυρας. Η μέθοδος M5 είναι ιδιαίτερα περίπλοκη, γιατί πρέπει να τοποθετηθεί ατέλεια σε όλα τα μέλη, που είναι μια χρονοβόρα διαδικασία. Ως προς τους ελέγχους είναι απλούστερη από τις προηγούμενες μεθόδους, καθώς απαιτείται έλεγχος της διατομής μόνο. Επίσης, οδηγεί πιο ακριβή αποτελέσματα, αφού η ατέλεια τοποθετείται στο προσομοίωμα και η επιρροή της δεν υπολογίζεται μέσω των καμπυλών λυγισμού.

Στα τόξα παρατηρήθηκε μείωση στο βαθμό αξιοποίησης ίση με 18.48% κατά μέσο όρο για την περίπτωση ατέλειας κατά EN 1993-2 και 16.01% για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού σε σχέση με τη μέθοδο M3 και M2 (EUGLI) αντίστοιχα. Η μείωση αυτή οφείλεται στη σχέση για τον έλεγχο του μέλους, που χρησιμοποιήθηκε στις μεθόδους M2 και M3, στην οποία συνδυάζεται η μέγιστη ροπή κάμψης του τόξου με την μέγιστη αξονική δύναμη. Η κρίσιμη διατομή της μεθόδου M5 εμφανίζει σημαντικά μικρότερη ροπή κάμψης από την αντίστοιχη ροπή, που χρησιμοποιήθηκε στη σχέση ελέγχου του μέλους των προηγούμενων μεθόδων, γι' αυτό και παρουσιάζεται και αυτή η απόκλιση στους βαθμούς αξιοποίησης.

Στις κύριες δοκούς και τις διαδοκίδες οι βαθμοί αξιοποίησης, που υπολογίστηκαν ήταν παραπλήσιοι με αυτούς της M3 και της M2 για όλες τις περιπτώσεις αρχικής ατέλειας. Οι όποιες αποκλίσεις προέκυψαν ανάμεσα στη M2 και τη M5 οφείλονται στη χρήση του συντελεστή $\gamma_{M1}=1.10$ αντί του $\gamma_{M0}=1.00$ στον έλεγχο της διατομής.

Στον εφελκόμενο εγκάρσιο σύνδεσμο 2, αποκλίσεις παρατηρήθηκαν στο πλαίσιο της μεθόδου M5 ανάλογα με την ατέλεια, που χρησιμοποιήθηκε, καθώς η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού οδήγησε σε σημαντική αύξηση της αξονικής δύναμης και κατ' επέκταση του βαθμού αξιοποίησης (μέγιστη αύξηση 18.30%). Στο θλιβόμενο εγκάρσιο σύνδεσμο παρατηρήθηκε μείωση του βαθμού αξιοποίησης ανάμεσα στις μεθόδους M5 και M3 με μέγιστη τιμή 23.08%. Η μείωση αυτή είναι μεγαλύτερη για την περίπτωση χρήσης μόνο της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού και λαμβάνει μέγιστη τιμή 32.19% ανάμεσα στις μεθόδους M2 και M5. Επίσης, από τη σύγκριση των βαθμών αξιοποίησης στο πλαίσιο της μεθόδου M5 προέκυψε ότι η χρήση της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού μόνο οδηγεί σε επισφαλή σχεδιασμό. Αν γίνει ταυτόχρονη χρήση τοπικής ατέλειας μέλους σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 και της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, τότε οι βαθμοί αξιοποίησης είναι μεγαλύτεροι από τις άλλες 2 ατέλειες χωριστά και προσεγγίζουν τους αντίστοιχους της μεθόδου M2 (EUGLI), όπου γίνεται έλεγχος του μέλους και η επιρροή των φαινομένων 2^{ης} τάξης και της τοπικής ατέλειας λαμβάνονται μέσω του συντελεστή χ .

Στους διαγώνιους συνδέσμους η χρήση τοπικής ατέλειας σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3, οδήγησε σε μείωση του βαθμού αξιοποίησης σε σχέση με τη μέθοδο M3, με μέγιστη τιμή 38.65%. Η χρήση μόνο ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, χωρίς ατέλεια μέλους οδηγεί σε επισφαλή σχεδιασμό, ενώ η τοποθέτηση και ατέλειας μέλους οδήγησε σε πιο δυσμενή αποτελέσματα από τη M5 (EN 1993-2). Τέλος, οι αναρτήρες και οι σύνδεσμοι του καταστρώματος δεν παρουσίασαν ουσιαστικές αποκλίσεις στο πλαίσιο της μεθόδου M5 ανάλογα με το είδος της ατέλειας αλλά ούτε και σε σχέση με προηγούμενες μεθόδους.

8 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

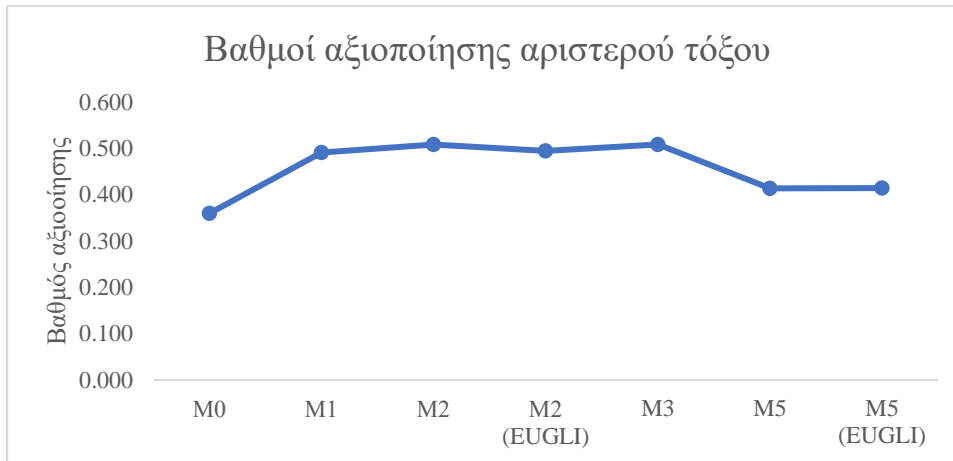
8.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα για την κάθε μέθοδο και το κάθε μέλος. Συγκεκριμένα στα σχήματα, που ακολουθούν, παρουσιάζεται ο μέσος όρος του βαθμού αξιοποίησης για τους τρεις συνδυασμούς φόρτισης για το κάθε μέλος μαζί με τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

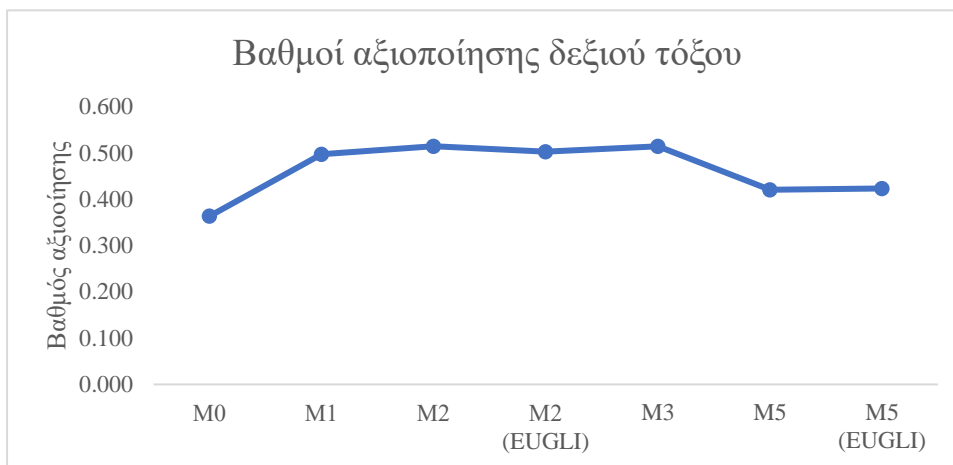
Τόξα

Με τη βοήθεια των δύο σχημάτων παρακάτω, που παρουσιάζουν τη μεταβολή των βαθμών αξιοποίησης για το αριστερό και το δεξιό τόξο προκύπτουν τα εξής:

- Οι μέθοδοι M1, M2 και M3 οδηγούν σε παραπλήσια αποτελέσματα.
- Η μέθοδος M5 οδηγεί σε σημαντική μείωση του βαθμού αξιοποίησης, η οποία οφείλεται αφενός στο ότι δεν αναπτύσσονται σημαντικές ροπές κάμψης λόγω φαινομένων 2^{ης} τάξης, αφετέρου στο ότι στη σχέση ελέγχου του μέλους συνδυάζεται η μέγιστη αξονική και η μέγιστη ροπή κάμψης. Η μείωση αυτή είναι κοντά στο 18% από τη μέθοδο M3 στη μέθοδο M5.
- Η τοποθέτηση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού οδηγεί σε παραπλήσια αποτελέσματα με την ατέλεια σύμφωνα με τον EN 1993-2 και τον EN 1993-1-1.



Σχήμα 8.1: Βαθμοί αξιοποίησης αριστερού τόξου

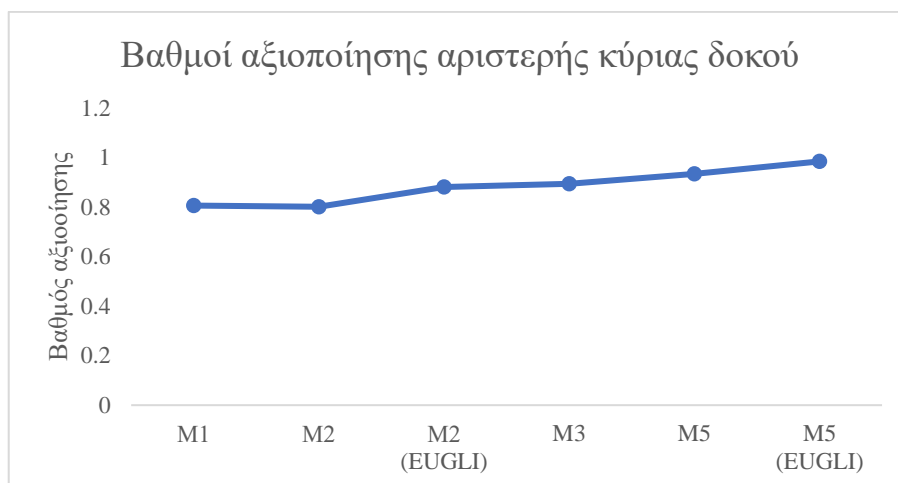


Σχήμα 8.2: Βαθμοί αξιοποίησης δεξιού τόξου

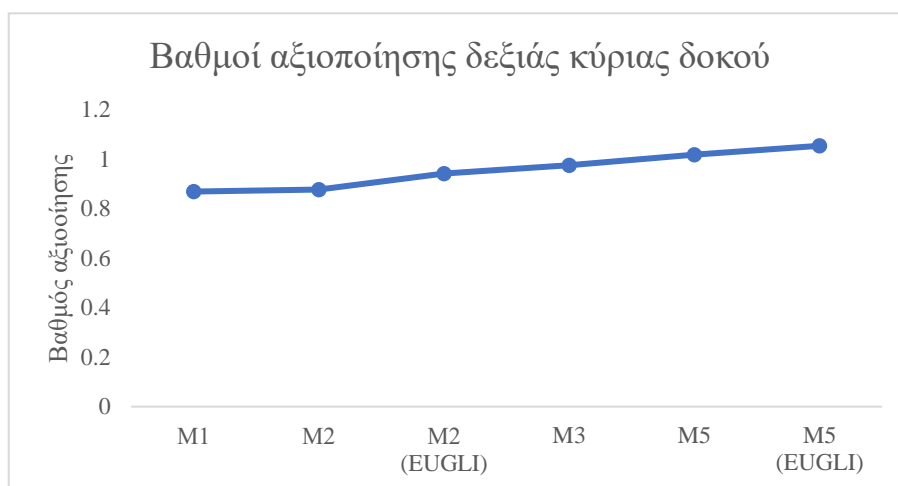
Κύριες δοκοί

Από το Σχήμα 8.3 και το Σχήμα 8.4 μπορεί κανείς να παρατηρήσει:

- Η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού οδηγεί σε αύξηση του βαθμού αξιοποίησης στη μέθοδο M2, γιατί εισάγει στο μέλος τοπική ατέλεια.
- Ο βαθμός αξιοποίησης για την ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο, που προκύπτει από την ατέλεια στρεπτοκαμπτικού λυγισμού του Ευρωκώδικα 3 στη μέθοδο M5.
- Η αύξηση του μέσου βαθμού αξιοποίησης από τη μέθοδο M2 στη μέθοδο M3 είναι αξιόλογη και ισούται με 11.48% για την αριστερή κύρια δοκό και 11.18% για τη δεξιά. Η αύξηση αυτή δεν οφείλεται σε αντίστοιχη αύξηση των εντατικών μεγεθών αλλά σε χρήση του συντελεστή ασφαλείας $\gamma_{M1}=1.10$ αντί για το $\gamma_{M0}=1.00$ στον έλεγχο της διατομής.



Σχήμα 8.3: Βαθμοί αξιοποίησης αριστερής κύριας δοκού

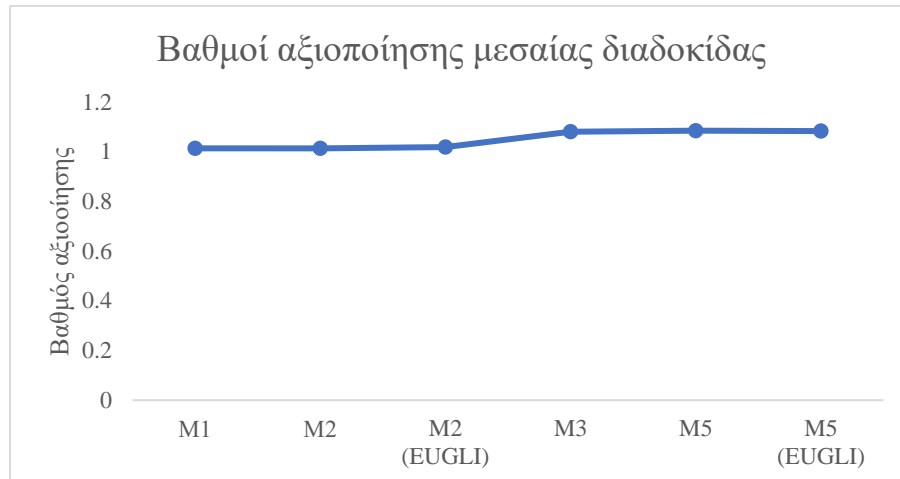


Σχήμα 8.4: Βαθμοί αξιοποίησης δεξιάς κύριας δοκού

Διαδοκίδες

Για τη μεσαία διαδοκίδα μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Για όλες τις μεθόδους τα αποτελέσματα είναι εντός ενός εύρους απόκλισης μικρότερο του 10%.
- Η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού οδηγεί σε παρόμοια αποτελέσματα με την ατέλεια του μέλους για στρεπτοκαμπτικό λυγισμό σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3.

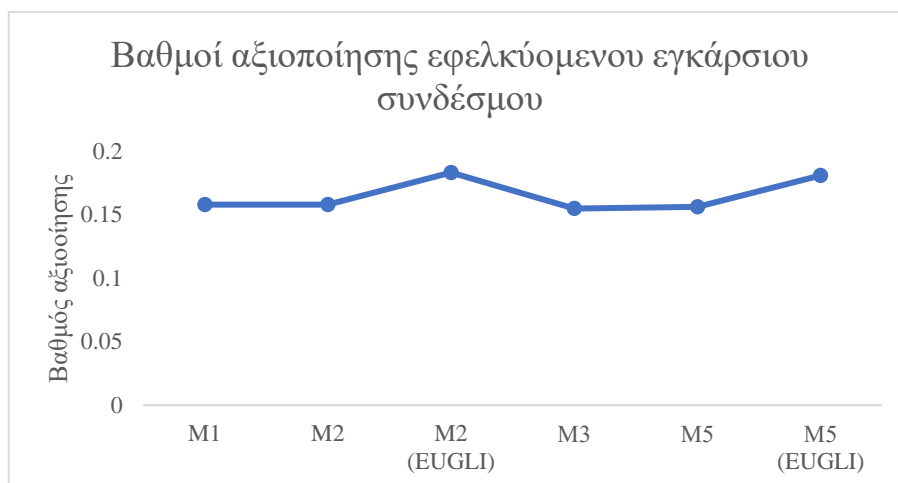


Σχήμα 8.5: Βαθμοί αξιοποίησης μεσαίας διαδοκίδας

Εγκάρσιο σύνδεσμοι τόξων

Για τον εφελκόμενο εγκάρσιο σύνδεσμο μπορούν να γίνουν οι παρακάτω παρατηρήσεις (Σχήμα 8.6):

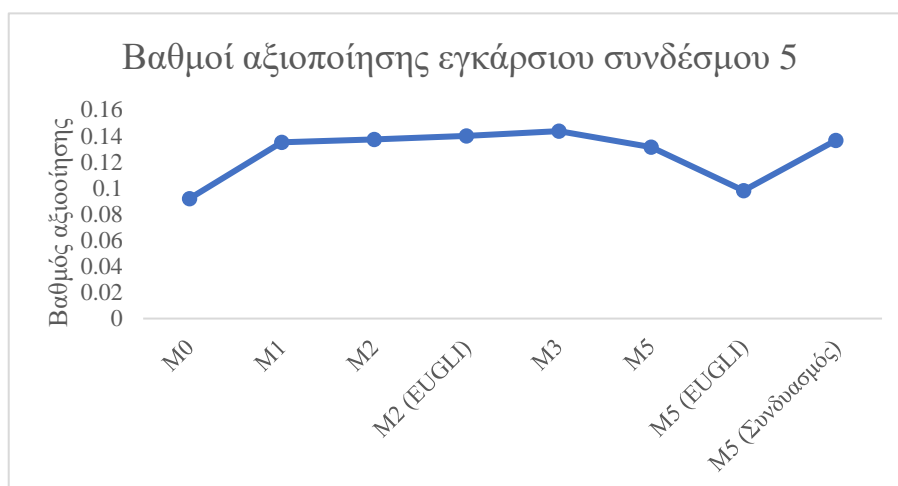
- Για την περίπτωση της ατέλειας σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 για τις σιδηρές γέφυρες παρατηρούνται αμελητέες αποκλίσεις ανάμεσα στις μεθόδους.
- Για την περίπτωση της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού είναι εμφανής η αύξηση του βαθμού αξιοποίησης από τη μέθοδο M1 στη M2 και από τη μέθοδο M3 στη M5. Το ποσοστό της αύξησης αυτής είναι ίσο με 16.06% για την πρώτη περίπτωση και 16.73% για τη δεύτερη περίπτωση. Ανάλογα ποσοστά αύξησης παρουσιάζονται και εντός της μεθόδου M2 και M5 ανάλογα με το είδος της ατέλειας, που χρησιμοποιείται.
- Η μέθοδος M2 και M5 για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού παρουσιάζουν αμελητέες αποκλίσεις.
- Η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού οδήγησε σε αυξημένους βαθμούς αξιοποίησης λόγω αύξησης της αξονικής δύναμης του μέλους. Η αύξηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι στην πρώτη ιδιομορφή συμμετέχει ο συγκεκριμένος σύνδεσμος, προσφέροντας πλευρική εξασφάλιση. Επομένως, μέσω της ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού είναι δυνατό να εισαχθούν σε κάποιο μέλος δυνάμεις, οι οποίες σχετίζονται με τον στατικό του ρόλο στο σύστημα και οι οποίες δεν μπορούν να υπολογιστούν με κάποιο άλλο τρόπο κανονιστικά.



Σχήμα 8.6: Βαθμοί αξιοποίησης εφελκόμενου εγκάρσιου συνδέσμου

Για το θλιβόμενο εγκάρσιο σύνδεσμο μπορούν να γίνουν οι παρακάτω παρατηρήσεις Σχήμα 8.7):

- Οι μέθοδοι M1, M2, M3 και M5 οδηγούν σε παραπλήσια αποτελέσματα.
- Στη μέθοδο M5 για την περίπτωση ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού παρουσιάζεται σημαντική μείωση από τη M3 ίση με 31.66%. Η χρήση μόνο ατέλειας στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού οδηγεί σε επισφαλή αποτελέσματα.
- Η μείωση του μέσου βαθμού αξιοποίησης από τη M3 στη M5 είναι ίση με 8.53% για χρήση τοπικής ατέλειας και ίση με 4.95% για χρήση συνδυασμού ατελειών. Η συνδυασμένη ατέλεια δίνει λίγο πιο δυσμενή αποτελέσματα σε σχέση με την τοπική, γιατί λόγω του συνδυασμού των 2 ατελειών προκύπτει μεγαλύτερο μέγεθος αρχικής ατέλειας.



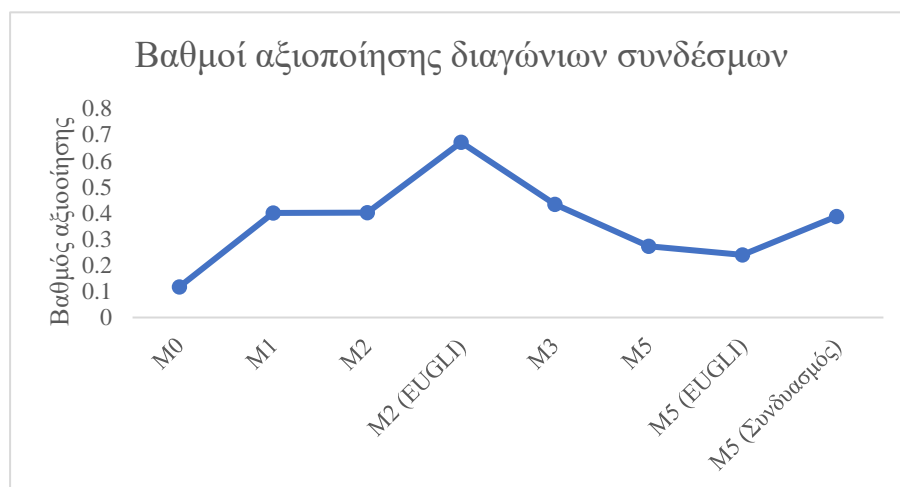
Σχήμα 8.7: Βαθμοί αξιοποίησης θλιβόμενου εγκάρσιου συνδέσμου 5

Διαγώνιοι σύνδεσμοι τόξων

Από το διάγραμμα των βαθμών αξιοποίησης για τον εκάστοτε κρίσιμο διαγώνιο σύνδεσμο μπορούν να γίνουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Η μέθοδος M1, M2 και M3 για ατέλεια τόξου εντός επιπέδου, όπως ορίζεται στον EN 1993-2 οδηγούν σε αποτελέσματα με αμελητέες αποκλίσεις.

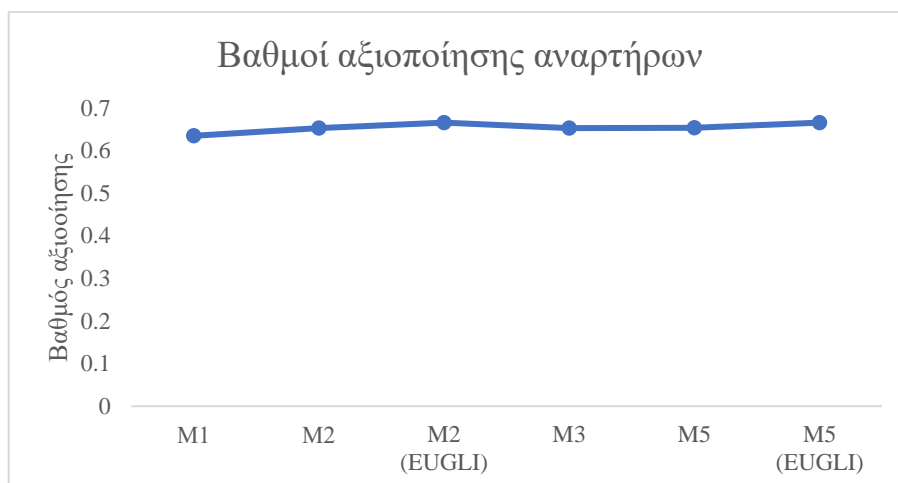
- Η μέθοδος M2 για ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού οδηγεί σε σημαντική αύξηση των βαθμών αξιοποίησης. Συγκεκριμένα ο μέσος βαθμός αξιοποίησης αυξάνεται από τη M2 με ατέλεια στα τόξα εντός επιπέδου σύμφωνα με τον EN 1993-2 κατά 67.24%. Επίσης, ο μέσος βαθμός αξιοποίησης της M3 εμφανίζει μείωση σε σχέση με τη M2 (EUGLI) ίση με 35.37%
- Η μέθοδος M5 παρουσιάζει σημαντική μείωση στο μέσο βαθμό αξιοποίησης σε σχέση με τη M3, η οποία ισούται με 36.98%. Με τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε προέκυψε ότι για το συγκεκριμένο μέλος για χαμηλή στάθμη φόρτισης, ο έλεγχος του μέλους οδηγεί σε συντηρητικά αποτελέσματα.
- Η μέθοδος M5 με ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού οδηγεί σε πολύ χαμηλούς βαθμούς αξιοποίησης και σε επισφαλή σχεδιασμό, καθώς δεν αναπτύσσονται σημαντικές εγκάρσιες παραμορφώσεις στο μέλος και κατ' επέκταση ροπές 2^{ης} τάξης. Η ταυτόχρονη εισαγωγή και τοπικής ατέλειας μέλους σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 έχει ως αποτέλεσμα αύξηση του βαθμού αξιοποίησης. Συγκεκριμένα για το συνδυασμό των δύο ατελειών, ο βαθμός αξιοποίησης είναι αυξημένος σε σχέση με αυτόν της μεθόδου M5 για ατέλεια μόνο στο μέλος κατά 41.70%. Παρατηρείται μεγάλη αύξηση λόγω της μεγαλύτερης αξονικής θλιπτικής δύναμης και του μεγαλύτερου μεγέθους αρχικής ατέλειας, που υπάρχει στη συνδυασμένη ατέλεια σε σχέση με την τοπική μόνο. Ο ίδιος βαθμός αξιοποίησης είναι μειωμένος σε σχέση με εκείνον της μεθόδου M3 κατά 10.70% και σε σχέση με εκείνον της M2 με ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού μειωμένος κατά 42.29%.



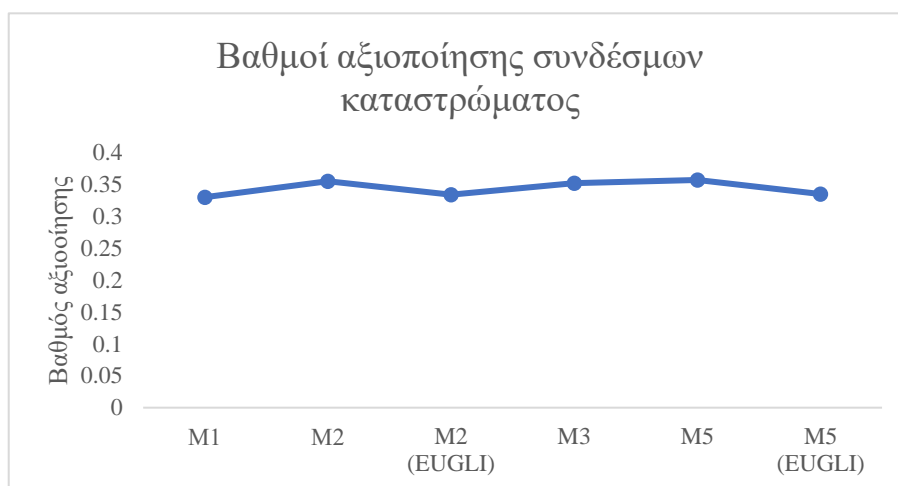
Σχήμα 8.8: Βαθμοί αξιοποίησης κρίσιμου διαγώνιου συνδέσμου

Αναρτήρες-Σύνδεσμοι καταστρώματος

Τέλος, για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται και τα διαγράμματα των βαθμών αξιοποίησης για τους αναρτήρες και τους συνδέσμους του καταστρώματος. Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται ανάμεσα στις μεθόδους είναι αμελητέες.



Σχήμα 8.9: Βαθμοί αξιοποίησης αναρτήρων



Σχήμα 8.10: Βαθμοί αξιοποίησης συνδέσμων καταστρώματος

8.2 Παρατηρήσεις

Οι διατάξεις του νέου (υπό διαμόρφωση) Ευρωκώδικα 3 σχετικά με την καθολική ανάλυση του φορέα, είναι πιο εξελιγμένες σε σχέση με αυτές του υφιστάμενου Κανονισμού. Συγκεκριμένα, στον υφιστάμενο Ευρωκώδικα 3 υπάρχει ένα μόνο κριτήριο σχετικά με το πότε είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί στατική ανάλυση 2^{ης} τάξης, το οποίο λαμβάνει υπόψη μόνο τις καθολικές ιδιομορφές λυγισμού. Αντίθετα, στο νέο Ευρωκώδικα υπάρχουν 2 κριτήρια, τα οποία λαμβάνουν υπόψη και τις ιδιομορφές καμπτικού λυγισμού εντός και εκτός επιπέδου για τα μέλη. Επίσης, ανάλογα με αυτά τα φορτία λυγισμού ο νέος Ευρωκώδικας 3 καθορίζει και το είδος της ατέλειας, που πρέπει να τοποθετηθεί στο φορέα, σε αντίθεση με το υφιστάμενο κείμενο του Ευρωκώδικα 3. Τέλος, στο νέο κείμενο πραγματοποιείται και πιο αναλυτική συσχέτιση των μεθόδων ανάλυσης με τις μεθόδους ελέγχου ενός στοιχείου. Σε γενικές γραμμές το νέο κείμενο του Ευρωκώδικα 3 μπορεί να θεωρηθεί περισσότερο πλήρες από αυτό του υφιστάμενου.

Ωστόσο, κατά την εφαρμογή των μεθόδων στην τοξωτή γέφυρα παρουσιάστηκαν προβλήματα στην εφαρμογή κάποιων σημείων του κειμένου. Ο Ευρωκώδικας 3 είναι προσανατολισμένος σε πλαίσιακές κατασκευές και στο κείμενό του γίνεται συχνά αναφορά στην ιδιομορφή λυγισμού με μετάθεση του πλαισίου, η οποία αξιοποιείται για το αν θα απαιτηθεί στατική

ανάλυση 2^{ης} τάξης ή όχι. Στο συγκεκριμένο φορέα δεν είναι δυνατό να οριστεί τέτοιου είδους ιδιομορφή.

Επίσης, για την τοξωτή γέφυρα δεν είναι δυνατόν να οριστεί και καθολική ατέλεια με τη μορφή αρχικής κλίσης, τουλάχιστον εντός επιπέδου. Το πρόβλημα της αρχικής ατέλειας μπορεί να επιλυθεί μέσω των διατάξεων του EN 1993-2, που αφορά τις σιδηρές γέφυρες και ορίζει για τις τοξωτές γέφυρες συγκεκριμένες μορφές και τιμές αρχικής ατέλειας για λυγισμό εντός και εκτός επιπέδου. Μία άλλη λύση, που προτείνεται στον Ευρωκώδικα 3 είναι η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού, η οποία είναι η πλέον κατάλληλη για την περίπτωση του τοξωτού φορέα, λόγω της ευκολίας εισαγωγής της στο προσομοίωμα. Ωστόσο, χρειάζεται προσοχή γιατί, όπως φάνηκε και από τα αποτελέσματα για το συγκεκριμένο φορέα της γέφυρας, η ατέλεια στο σχήμα της 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού δεν μπορεί να υποκαταστήσει σε κάθε περίπτωση την ατέλεια του μέλους.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι από τα αποτελέσματα για τους βαθμούς αξιοποίησης των μελών της γέφυρας, σε κάποιες περιπτώσεις προέκυψε ότι ο βαθμός αξιοποίησης από τη μέθοδο M5 ήταν αρκετά μικρότερος σε σχέση με άλλες πιο απλές μεθόδους αν και επιτρέπεται η χρήση και των δύο σύμφωνα με τον νέο κείμενο του Ευρωκώδικα 3. Εφόσον, είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί η διαστασιολόγηση της γέφυρας και με τις 2 μεθόδους θα ήταν αναμενόμενη μικρότερη απόκλιση στους βαθμούς αξιοποίησης.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] prEN 1993-1-1:2-015: Eurocode 3-Design of steel structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings, Final Draft
- [2] EN 1993-2: Eurocode 3-Design of steel structures-Part 2: Steel Bridges
- [3] EN 1990:2002: Eurocode-Basis of structural design, CEN, European Committee for Standardization, Brussels
- [4] EN 1991-1-4: 2005: Eurocode 1: Actions on structures-Part 1-4: General actions-Wind actions, CEN, European Committee for Standardization, Brussels
- [5] EN 1991-2: Eurocode 1: Actions on structures-Part 2: Traffic loads on bridges, CEN, European Committee for Standardization, Brussels
- [6] Γαντές Χ.: Μη Γραμμική Συμπεριφορά των κατασκευών, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα, 2015
- [7] Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ.: Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2005
- [8] Βάγιας Ι.: Σιδηρές Κατασκευές, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα 2003
- [9] Βάγιας Ι., Ηλιόπουλος Α., Θανόπουλος Π.: Σχεδιασμός Σύμμικτων Γεφυρών από Χάλυβα και Οπλισμένο Σκυρόδεμα, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα 2016
- [10] Σταυρίδης Λ.: Στατική των Δομικών Φορέων, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2006
- [11] Ερμόπουλος Ι.: Ευρωκώδικας 1-Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις επί των κατασκευών-Ερμηνευτικά σχόλια και παραδείγματα εφαρμογής, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2008
- [12] Κοντώση Ε.: Διερεύνηση Επιρροής Ανέμου και Χαρακτηριστικών Παραμέτρων του στον Σχεδιασμό Τοξωτής Μεταλλικής Γέφυρας, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2015
- [13] Τασιούλας Χ.: Σχεδιασμός Τοξωτής Μεταλλικής Οδικής Γέφυρας με Σύμμικτο Κατάστρωμα, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2012

- [14] Σκιαδόπουλος Α.: Σύγκριση Εναλλακτικών Μεθόδων Ανάλυσης και Σχεδιασμού Μεταλλικών Πλαισίων, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2016
- [15] Chladný E., Štujberová M.: Frames with unique global and local imperfection in the shape of the elastic buckling mode (Part 1), *Stahlbau* 82 (2012), Heft 8
- [16] Chladný E., Štujberová M.: Frames with unique global and local imperfection in the shape of the elastic buckling mode (Part 2), *Stahlbau* 82 (2012), Heft 9
- [17] Baláž I., Koleková Y.: Structures with UGLI imperfections, 18th International conference Engineering Mechanics, 2012
- [18] Dallemule M.: Equivalent imperfections in arched structures, *Slovak Journal of Civil Engineering*, Vol. 23, 2015