



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

**Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός μελών από χάλυβα.
Σύγκριση των Μεθόδων Α και Β του Ευρωκώδικα 3
μέσω παραμετρικής διερεύνησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΑΥΡΟΣ ΕΥΣ. ΧΡΥΣΙΚΑΚΟΣ

Επιβλέπων : Γεώργιος Ιωαννίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

**Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός μελών από χάλυβα.
Σύγκριση των Μεθόδων Α και Β του Ευρωκώδικα 3
μέσω παραμετρικής διερεύνησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΤΑΥΡΟΣ ΕΥΣ. ΧΡΥΣΙΚΑΚΟΣ

Επιβλέπων : Γεώργιος Ιωαννίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή τον Οκτώβριο του 2011.

(Υπογραφή)

.....
Γ. Ιωαννίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Χ. Γαντές
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Τ. Αβραάμ
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

(Υπογραφή)

.....
Σταύρος Ευσ. Χρυσικάκος

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Copyright © Χρυσικάκος Ευσ. Σταύρος, 2011

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, 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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στους γονείς μου: Ευστράτιο και Παναγιώτα

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή κ. Γιώργο Ιωαννίδη επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής μου εργασίας για τη συνεχή, πολύτιμη και πρόσχαρη βοήθεια που μου προσέφερε, ώστε να υπάρξει αυτό το αποτέλεσμα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, επίσης, τον Ανδρέα Σπηλιόπουλο υποψήφιο διδάκτορα για τη καθοδήγηση και την αμέριστη βοήθειά του σε ολόκληρη την περίοδο εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές κ. Χαράλαμπο Γαντέ και κ. Τάσο Αβραάμ για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Τέλος, ένα μεγάλο 'ευχαριστώ' στους στυλοβάτες της ζωής μου, τους γονείς μου, για τις αμέτρητες θυσίες τους ώστε να σπουδάσω και να προοδεύσω σε δύσκολες εποχές.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

**Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός μελών από χάλυβα.
Σύγκριση των Μεθόδων Α και Β του Ευρωκώδικα 3
μέσω παραμετρικής διερεύνησης**

Διπλωματική εργασία του Χρυσικάκου Σταύρου

Επιβλέπων : Γεώργιος Ιωαννίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με το πρόβλημα του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού σε μέλη από χάλυβα όταν αυτά υπόκεινται σε αξονική θλίψη και μονοαξονική ή διαξονική κάμψη.

Έγινε ανάλυση των δύο Μεθόδων Α και Β του Ευρωκώδικα 3 για υπολογισμό των συντελεστών αλληλεπίδρασης k_{ij} για τον έλεγχο ευστάθειας των μελών. Επιπλέον, αποφασίσαμε την παραμετρική διερεύνηση της συμπεριφοράς των μελών σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό.

Η παραμετρική διερεύνηση έγινε με τη χρήση υπολογιστικού φύλλου Excel, η εγκυρότητα του οποίου ελέγχθηκε μέσω αριθμητικών επιλύσεων σε πλήθος θεωρητικών προσομοιωμάτων. Με τη βοήθεια του προαναφερθέντος υπολογιστικού φύλλου ελέγχθηκε η επίδραση στην ευστάθεια του εκάστοτε μέλους των διαφόρων παραμέτρων που επηρεάζουν την αντοχή του. Από τις αναλύσεις προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων του κανονισμού καθώς και για τις διαφορές στα αποτελέσματα αυτών. Οι παραπάνω διερευνήσεις οδήγησαν στην δημιουργία διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης με περιβάλλουσες ευστάθειας των μελών για συνεχή μεταβολή του λόγου $N_{Ed} / N_{pl,Rd}$ στον άξονα x και του $M_{y,Ed} / M_{pl,Rd}$ στον άξονα y . Επίσης, δείξαμε την συμβολή των όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας για μεταβολή της ανηγμένης λυγηρότητας των μελών.

Τέλος, αναφέρονται προτάσεις για μελλοντική μελέτη και επέκταση του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
DIVISION OF STRUCTURAL ENGINEERING
LABORATORY OF STEEL STRUCTURES

**Torsional flexural buckling of steel members.
Comparison of Method A and B of Eurocode 3
through parametric investigation**

Diploma thesis of Chrysikakos Stavros

Supervisor: G. Ioannidis, Professor N.T.U.A

Abstract

In this paper we dealt with the problem of torsional flexural buckling for steel members being subjected to axial compression and uniaxial or biaxial bending.

We analyzed both Methods A and B of Eurocode 3 in order to calculate the interaction factors k_{ij} for the buckling check of members. In addition, we decided to investigate parametrically the behavior of members in buckling.

In parametric investigation, we used the Excel whose validity checked by numerical solve a variety of theoretical simulators. Using the Excel, checked the effect of the various parameters, that affects its resistance, on the stability of member. The analysis showed useful conclusions about the accuracy of the results of two methods of Eurocode 3 and differences in these results. These investigations resulted in the creation of interaction diagrams with surrounding stability of members for a continuous change of $N_{Ed} / N_{pl,Rd}$ on axis x and $M_{y,Ed} / M_{pl,Rd}$ on axis y . Also shown the contribution of terms of interaction formulae in the final stability's which resulted the change of slenderness ratio of the members.

Finally, suggestions are given for future study and extend the topic of this diploma thesis.

Περιεχόμενα

Περίληψη

Abstract

σελ.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Το φαινόμενο του λυγισμού σε μέλη από χάλυβα	4
1.2 Μορφές λυγισμού	
1.2.1 Καμπτικός λυγισμός (flexural buckling)	4
1.2.2 Στρεπτικός λυγισμός (torsional buckling).....	5
1.2.3 Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (torsional flexural buckling)	6

Κεφάλαιο 2: Μέθοδος A υπολογισμού συντελεστών αλληλεπίδρασης

2.1 Εισαγωγή	7
2.2 Συντελεστές ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής C_m	
2.2.1 Ελαστικός έλεγχος	8
2.2.2 Ελαστοπλαστικός έλεγχος	9
2.3 Συμπεριφορά μέλους στο χώρο	
2.3.1 Μέλος προστατευμένο έναντι πλευρικής εκτροπής	10
2.3.2 Μέλος μη προστατευμένο έναντι πλευρικής εκτροπής	11
2.3.3 Ειδική περίπτωση λυγηρότητας: $\lambda \rightarrow 0$	14
2.4 Μέλος με διατομή κατηγορίας 3	15
2.5 Αξιοπιστία και ακρίβεια της Μεθόδου A	15

Κεφάλαιο 3: Μέθοδος B υπολογισμού συντελεστών αλληλεπίδρασης

3.1 Εισαγωγή	16
3.2 Σχέσεις αλληλεπίδρασης για μονοαξονική κάμψη	17

3.3 Σχέσεις αλληλεπίδρασης για διαξονική κάμψη	19
3.4 Συντελεστές ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής C_m	20
3.5 Μέλη ευαίσθητα σε στρεπτικές παραμορφώσεις (διατομές κατηγορίας 1 και 2)	21
3.6 Μέλη μη ευαίσθητα σε στρεπτικές παραμορφώσεις (διατομές κατηγορίας 1 και 2)	23
3.7 Μέλη με διατομές κατηγορίας 3 και 4	23
3.8 Σύγκριση των Μεθόδων A και B	24

Κεφάλαιο 4: Αριθμητικά παραδείγματα-υπολογιστικό φύλλο Excel

4.1 Εισαγωγή	26
4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων	
4.2.1 Μέλος με διατομή IPE450	27
4.2.1.1 1η περίπτωση φόρτισης: $N_{Ed} = 620kN$	29
4.2.1.2 2η περίπτωση φόρτισης: $N_{Ed} = 200kN$	41
4.2.1.3 3η περίπτωση φόρτισης: $N_{Ed} = 310kN$	51
4.2.2 Μέλος με διατομή HEB300	64
4.2.2.1 1η περίπτωση φόρτισης: $N_{Ed} = 620kN$	66
4.2.2.2 2η περίπτωση φόρτισης: $N_{Ed} = 200kN$	77
4.2.2.3 3η περίπτωση φόρτισης: $N_{Ed} = 310kN$	88
4.2.3 Συμπεράσματα σύγκρισης των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων	
4.2.3.1 Μέλη με διατομή IPE450	99
4.2.3.2 Μέλη με διατομή HEB300	100

Κεφάλαιο 5: Παραμετρική διερεύνηση

5.1 Εισαγωγή	101
5.2 Μεταβολή ανηγμένων λυγηροτήτων	102
5.2.1 Μέλος με διατομή IPE450	102

5.2.2 Μέλος με διατομή HEB300	109
5.3 Συμβολή όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας	116
5.3.1 Μέλος με διατομή IPE450	117
5.3.2 Μέλος με διατομή HEB300	121
5.4 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης	128
5.4.1 Μέλος με διατομή HEB300	129
5.4.2 Μέλος με διατομή IPE450 ($\bar{\lambda}_z = 1,016$)	133
5.4.3 Μέλος με διατομή IPE450 ($\bar{\lambda}_z = 1,461$)	137
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα	141

Βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Το φαινόμενο του λυγισμού σε μέλη από χάλυβα

Ένα δομικό μέλος από χάλυβα, κυρίως αν αυτό είναι υποστύλωμα, είναι σύνηθες να καταπονείται από το συνδυασμό μίας σημαντικής σε μέγεθος αξονικής θλιπτικής δύναμης με ταυτόχρονη κάμψη περί τον ισχυρό ή/και τον ασθενή άξονα της διατομής του. Το μέλος σε αυτή την περίπτωση μπορεί να χάσει την ευστάθειά του, δηλαδή να ισορροπήσει πέραν της αρχικής και σε μία γειτονική θέση ισορροπίας. Το φαινόμενο αυτό καλείται λυγισμός.

Η στάθμη της εξωτερικής φόρτισης όπου παρουσιάζεται ο λυγισμός, εκφράζει την εξάντληση της αντοχής του μέλους και παρατηρείται, γενικά, χαμηλότερα από τη στάθμη της φόρτισης, η οποία εξαντλεί την αντοχή της διατομής του. Άρα, ο έλεγχος της ευστάθειας του μέλους σε λυγισμό είναι, συνήθως, πιο κρίσιμος από τον έλεγχο της αντοχής της διατομής του.

Για τον έλεγχο ευστάθειας του μέλους σε λυγισμό έχουν αναπτυχτεί οι λεγόμενες σχέσεις αλληλεπίδρασης. Η ύπαρξη, ταυτόχρονης δράσης, αξονικής δύναμης και κάμψης σε ένα μέλος δημιούργησε την ανάγκη να βρεθούν σχέσεις μέσω των οποίων θα είναι δυνατός ο υπολογισμός της αντοχής του μέλους. Αναλυτικά, οι σχέσεις αυτές, θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

1.2 Μορφές λυγισμού

1.2.1 Καμπτικός λυγισμός (flexural buckling)

Η εμφάνιση του καμπτικού λυγισμού οφείλεται στην αξονική θλιπτική δύναμη που ασκείται στο μέλος από χάλυβα, κυρίως υποστύλωμα. Αποτελεί τη συνηθέστερη μορφή αστάθειας θλιβόμενων μεταλλικών μελών. Το υποστύλωμα αρχικώς είναι ευθύγραμμο. Λόγω της αξονικής συμπίεσης, όμως, η τελική θέση ισορροπίας του δίνει μία καμπυλωμένη μορφή, δηλαδή κάμπτεται περί τον ισχυρό ή τον ασθενή άξονα της διατομής του, χωρίς να εμφανίζεται σχετική στροφή των διατομών.

Το μέλος αστοχεί λόγω λυγισμού αλλά χωρίς να ξεπερνά την πλαστική αντοχή της διατομής του. Συνεπώς, η πλαστική αντοχή ελαττώνεται με ένα μειωτικό συντελεστή χ .

Για κατηγορίες διατομής 1, 2 και 3, η αντοχή ενός θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό δίνεται από τη σχέση:

$$N_{b,Rd} = \chi N_{pl,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (1.1)$$

Για κατηγορία διατομής 4 :

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (1.2)$$

οπου

χ μειωτικός συντελεστής

A_{eff} η ενεργός διατομή κατηγορίας 4

Ο μειωτικός συντελεστής εξαρτάται από τη λυγηρότητα και από τις ατέλειες του μέλους. Για τον υπολογισμό του υπάρχουν οι καμπύλες λυγισμού σε σχέση με την ανηγμένη λυγηρότητα του μέλους.

1.2.2 Στρεπτικός λυγισμός (torsional buckling)

Όπως ομολογεί η ονομασία αυτής της μορφής λυγισμού, κατά την παραμόρφωση του θλιβόμενου μέλους, οι διατομές του στρέφονται περί τον ευθύγραμμο διαμήκη άξονα του. Ευαίσθητες σε στρεπτικές παραμορφώσεις είναι μόνο οι ανοικτές διατομές (όπως οι διατομές που θα ερευνήσουμε στη συνέχεια, IPE450 και HEB300) ενώ μη ευαίσθητες, δηλαδή δεν διατρέχουν κανένα κίνδυνο, είναι οι κλειστές διατομές λόγω της μεγάλης τους δυστρεψιάς.

Στην περίπτωση του στρεπτικού λυγισμού, μας ενδιαφέρει η κρίσιμη τιμή της αξονικής συμπίεσης οπου εμφανίζεται η αστοχία. Αυτή η τιμή μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την αντοχή σε καμπτικό λυγισμό $N_{b,Rd}$. Τότε πρέπει να ελέγξουμε και τις δύο μορφές λυγισμού ώστε να γνωρίζουμε το μικρότερο κρίσιμο φορτίο. Πρακτικά, για περιορισμένο αριθμό διατομών, ο στρεπτικός λυγισμός είναι δυσμενέστερος του καμπτικού.

Το ελαστικό κρίσιμο φορτίο στρεπτικού λυγισμού, για ένα θλιβόμενο μέλος με στρεπτικές στηρίξεις στα άκρα του, υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_M^2} \cdot \left(G I_t + \frac{\pi^2 E I_w}{L_T^2} \right) \quad (1.3)$$

οπου

$i_M^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_M^2$ η πολική ακτίνα αδράνειας της διατομής ως προς το κέντρο διάτμησης

y_M η απόσταση κέντρου βάρους και κέντρου διάτμησης της διατομής επί του άξονα y

I_t, I_w οι σταθερές στρέψης και στρέβλωσης της διατομής

L_T το μήκος λυγισμού έναντι στρέψης

για διχαλωτές στηρίξεις: $L_T = L$

για πακτώσεις στα άκρα: $L_T = 0,5 L$

1.2.3 Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (Torsional flexural buckling)

Στη παρούσα εργασία, θα ασχοληθούμε με μέλη σταθερής διατομής από χάλυβα όπου εμφανίζεται το φαινόμενο του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού λόγω της φόρτισης τους. Συγκεκριμένα, τα μέλη αυτά καταπονούνται ταυτόχρονα από αξονική θλιπτική δύναμη και ροπές κάμψης περί τον ισχυρό και τον ασθενή άξονα της διατομής.

Οι διατομές, μετά το λυγισμό, στρέφονται περί το κέντρο διάτμησης και ταυτόχρονα μετατοπίζονται σε σχέση με τον αρχικώς ευθύγραμμο διαμήκη άξονα του μέλους. Πιο επιρρεπείς διατομές στην αστοχία αυτή είναι οι ανοικτές.

Λόγω της ταυτόχρονης δράσης αξονικής δύναμης και διαξονικής κάμψης στο μέλος υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ τους στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας του. Αυτή η αλληλεπίδραση έχει διατυπωθεί με τις σχέσεις αλληλεπίδρασης οι οποίες αναφέρονται σε μέλη με σταθερή διατομή διπλής συμμετρίας.

Στη περίπτωση που γίνει ανάλυση με χρήση της θεωρίας 2ης τάξης, λαμβάνοντας συγχρόνως υπόψη τις καθολικές και τοπικές ατέλειες, δεν απαιτείται ιδιαίτερος έλεγχος ευστάθειας του μέλους, αλλά μόνο έλεγχος αντοχής της διατομής για τα εντατικά μεγέθη που προέκυψαν από την ανάλυση 2ης τάξης.

Εάν όμως γίνει ανάλυση 1ης τάξης με χρήση μόνο των καθολικών ατελειών, πρέπει να ελέγχεται η ευστάθεια των μελών σύμφωνα με τις σχέσεις αλληλεπίδρασης, στις οποίες έχουν ενσωματωθεί οι τοπικές ατέλειες των μελών.

Οι σχέσεις αλληλεπίδρασης εξαρτώνται από τους συντελεστές αλληλεπίδρασης k_{ij} οι οποίοι προκύπτουν από δύο εναλλακτικές μεθόδους. Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται προσπάθεια ανάλυσης των τύπων που χρησιμοποιούνται αλλά και του φυσικού τους υποβάθρου για κάθε μία μέθοδο ξεχωριστά.

Κεφάλαιο 2

Μέθοδος Α υπολογισμού συντελεστών αλληλεπίδρασης

2.1 Εισαγωγή

Ένα δομικό μέλος από χάλυβα που υποβάλλεται σε συνδυασμένη αξονική θλίψη και κάμψη, δηλαδή ροπές στα άκρα ή/και εγκάρσια φόρτιση, πρέπει να ελεγχθεί ως προς την επάρκεια-ευσταθεια του σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό. Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους μέχρι την κατάρρευση γίνεται αξιόπιστα με χρήση προγραμμάτων πεπερασμένων στοιχείων αλλά πιο πρακτικά και λογιστικά με χρήση των σχέσεων αλληλεπίδρασης.

Διάφορες μελέτες έχουν δείξει ότι οι κανόνες σχεδιασμού για τα μεταλλικά μέλη που περιλαμβάνονται στη ENV-έκδοση του Ευρωκώδικα 3 δεν είναι ικανοποιητικοί όσον αφορά στην ακρίβειά τους και το φυσικό υπόβαθρό τους. Κατά συνέπεια, τα τελευταία χρόνια, η Τεχνική Επιτροπή 8 έχει εργαστεί πάνω σε δύο σύνολα σχέσεων: το πρώτο από αυτά, έχει συνταχθεί από μία αυστρογερμανική ομάδα και βασίζεται σε μία ημιεμπειρική προσέγγιση με χρήση καμπυλών (γραφική μέθοδος). Το δεύτερο σύνολο σχέσεων, έχει αναπτυχθεί από μία γαλλοβελγική ομάδα, το οποίο με το θεωρητικό υπόβαθρό του οδηγεί σε έναν ευρύτερο πεδίο εφαρμογών και ένα υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας.

Εμείς παρουσιάζουμε το δεύτερο σύνολο των σχέσεων αλληλεπίδρασης (γαλλοβελγική ομάδα) με στόχο την απόδειξη της αποτελεσματικότητάς του με απώτερο σκοπό: την οικονομία και την ακρίβεια, γενικά, και τη φυσική συνέπεια με όλους τους μεμονωμένους ελέγχους ευστάθειας των μελών (καμπτική αστάθεια σε θλίψη, πλευρικός λυγισμός σε κάμψη, κ.λπ.) και ελέγχους αντοχής των διατομών. Οι τύποι αυτοί είναι βασισμένοι σε μία 2ης τάξης ελαστική θεωρία, και έχουν επεκταθεί σταδιακά στη χωρική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά.

2.2 Συντελεστές ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής C_m

2.2.1 Ελαστικός έλεγχος

Εξετάζουμε μία δοκό, απλά στηριζόμενη με αρχική γεωμετρική ατέλεια $e_{0,d}$, που υποβάλλεται σε κάμψη λόγω ακραίων ροπών M_{Sd} ($-1 \leq \psi \leq 1$) και αξονική δύναμη N_{Sd} . Η προτεινόμενη λύση βασίζεται στον ακόλουθο τύπο ελέγχου αντοχής διατομής:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} + \frac{1}{\left(1 - N_{Sd}/N_{cr}\right)} \frac{N_{Sd} \cdot e_{0,d}}{M_{el,Rd}} + \frac{1}{\left(1 - N_{Sd}/N_{cr}\right)} \frac{C_m \cdot M_{Sd}}{M_{el,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.1)$$

Στην εξίσωση (2.1), ο όρος $1/(1 - N_{Sd}/N_{cr})$, λόγω των επιρροών 2ης τάξης εμφανίζεται και στους δύο καμπτικούς όρους. Η χρήση του είναι ακριβής στο πρώτο καμπτικό όρο " $N_{Sd} \cdot e_{0,d}$ ", ενώ στον δεύτερο " $C_m \cdot M_{Sd}$ " προσεγγιστική. Συγκεκριμένα, ο κατάλληλος συντελεστής για αυτό τον όρο (για σταθερή ροπή) είναι $1/\cos(\pi/2) \sqrt{N_{Sd}/N_{cr}}$. Όταν η N_{Sd} είναι μικρή σε σχέση με την N_{cr} , τότε και οι δύο εκφράσεις δίνουν παρομοια αποτελέσματα. Η διαφορά μεταξύ τους όμως γίνεται σημαντική, όταν η αξονική θλιπτική δύναμη προσεγγίζει την κρίσιμη τιμή N_{cr} . Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη στους προτεινόμενους τύπους και, για λόγους απλότητας, έχει αποφασιστεί να διατηρηθεί ο κλασσικός συντελεστής στους δύο καμπτικούς όρους και να αλλάξει η έκφραση του συντελεστή ισοδύναμης ροπής C_m ανάλογα.

Σύμφωνα με τον Austin, ο συντελεστής C_m ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής, για γραμμικό διάγραμμα ροπής κατά μήκος του μέλους με ροπές στα άκρα M και ψM δίνεται από τη σχέση:

$$C_m = 0,6 + 0,4 \cdot \psi \geq 0,4 \quad (2.2)$$

Ένας πιο ακριβής τύπος, όπου λαμβάνεται υπόψη και η επίδραση της αξονικής δύναμης, είναι ο εξής:

$$C_m = 0,79 + 0,21 \cdot \psi + 0,36(\psi - 0,33) \frac{N_{Sd}}{N_{cr}} \quad (2.3)$$

Όταν έχουμε εγκάρσια φόρτιση ή συνδυασμό ακραίων ροπών και εγκάρσιας φόρτισης τότε ισχύει:

$$C_m = 1 + \left(\frac{\pi^2 EI \delta_x}{M_x L^2} - 1 \right) \frac{N_{Sd}}{N_{cr}} \quad (2.4)$$

όπου M_x είναι η μέγιστη ροπή και δ_x η μέγιστη μετατόπιση του μέλους κατά το μήκος του.

2.2.2 Ελαστοπλαστικός έλεγχος

Όλες οι προηγούμενες εκτιμήσεις και έννοιες βασίζονται σε μία ελαστική 2ης τάξης θεωρία. Επειδή όμως η επιρροή της ανελαστικής περιοχής είναι σημαντική στην αντοχή των μελών, η εξίσωση (2.1) πρέπει να βελτιωθεί για κατηγορίες διατομής μέλους 1 και 2. Στη συνέχεια επεκτείνεται ο τύπος για την ελαστική θεωρία και στην πραγματική ελαστοπλαστική συμπεριφορά των μελών.

Αρχικά, όταν ασκείται μόνο αξονική θλιπτική δύναμη N_{Sd} , η εξίσωση (2.1) δίνει την αντοχή του μέλους σε λυγισμό $N_{b,Rd} = \chi \cdot N_{pl,Rd}$. Τότε, η αρχική γεωμετρική ατέλεια $e_{0,d}$ μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$e_{0,d} = \frac{(1 - \chi)(1 - \chi \cdot N_{pl,Rd}/N_{cr}) M_{el,Rd}}{\chi N_{pl,Rd}} \quad (2.5)$$

Μπορούμε, επομένως, να γράψουμε εκ νέου την εξίσωση (2.1) με τη χρήση ενός βοηθητικού συντελεστή μ :

$$\frac{N_{Sd}}{\chi N_{pl,Rd}} + \mu \frac{C_m M_{Sd}}{(1 - N_{Sd}/N_{cr}) \cdot C \cdot M_{pl,Rd}} \leq 1 \quad (2.6)$$

όπου

$$\mu = \frac{1 - N_{Sd}/N_{cr}}{1 - \chi N_{Sd}/N_{cr}} \quad (2.7)$$

Για μέλος που υπόκειται σε καθαρή θλίψη ($M_{Sd}=0$), η εξίσωση (2.6) καταλήγει στον απλό τύπο για έλεγχο σε λυγισμό. Επιπλέον, έχουμε αντικαταστήσει την ελαστική αντοχή σε κάμψη $M_{el,Rd}$ με το γινόμενο $C \cdot M_{pl,Rd}$. Με τη χρήση του C λαμβάνουμε υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ της κάμψης και της αξονικής δύναμης. Ειδικότερα,

το C πρέπει να εξαρτάται από την ανηγμένη λυγηρότητα του μέλους. Στη συνέχεια δίνονται τύποι για κατηγορίες διατομής 1 και 2 :

$$C = 1 + (w - 1) \left[2 - \frac{1,6}{w} C_m^2 (\bar{\lambda} + \bar{\lambda}^2) \right] \frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} \geq \frac{W_{el}}{W_{pl}} \quad (2.8)$$

όπου $w = W_{pl}/W_{el} \leq 1,5$

Ο συντελεστής $(w - 1)$ αντιστοιχεί στη μέγιστη διαθέσιμη κάμψη του μέλους για πλήρη πλαστικότητα. Το C πρέπει να εξαρτάται και από το συντελεστή ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής C_m διότι η ελαστοπλαστική αντοχή του μέλους εξαρτάται από τη δεδομένη εγκάρσια φόρτιση του. Επίσης, στην εξίσωση (2.8) το αποτέλεσμα δεν μπορεί να είναι μικρότερο της τιμής W_{el}/W_{pl} .

2.3 Συμπεριφορά μέλους στο χώρο

2.3.1 Μέλος προστατευμένο έναντι πλευρικής εκτροπής

Αρχικά, για τις περιπτώσεις όπου ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός αποτρέπεται και με τη βοήθεια της μορφής της εξίσωσης (2.6), δίνονται δύο τύποι για τον έλεγχο της αντοχής μέλους που υπόκειται σε διαξονική κάμψη και σε αξονική θλίψη.

$$\begin{aligned} \frac{N_{Sd}}{\chi_y \cdot N_{pl,Rd}} + \mu_y \left[\frac{C_{my} \cdot M_{y,Sd}}{(1 - N_{Sd}/N_{cr,y}) \cdot C_{yy} \cdot M_{pl,y,Rd}} \right] \\ + \alpha \mu_y \left[\frac{C_{mz} \cdot M_{z,Sd}}{(1 - N_{Sd}/N_{cr,z}) \cdot C_{yz} \cdot M_{pl,z,Rd}} \right] \leq 1 \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{N_{Sd}}{\chi_z \cdot N_{pl,Rd}} + \beta \mu_z \left[\frac{C_{my} \cdot M_{y,Sd}}{(1 - N_{Sd}/N_{cr,y}) \cdot C_{zy} \cdot M_{pl,y,Rd}} \right] \\ + \mu_z \left[\frac{C_{mz} \cdot M_{z,Sd}}{(1 - N_{Sd}/N_{cr,z}) \cdot C_{zz} \cdot M_{pl,z,Rd}} \right] \leq 1 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Επιπλέον, μπορούμε να έχουμε λυγισμό στο επίπεδο είτε του ισχυρού είτε του ασθενούς άξονα. Η εξίσωση (2.9) αντιστοιχεί για έλεγχο στον ισχυρό άξονα ενώ η (2.10) στον ασθενή άξονα. Ωστόσο, οι σχέσεις αυτές αγνοούν τη περίπτωση λυγισμού εντός και των δύο επιπέδων ταυτόχρονα. Κατά συνέπεια, ο συντελεστής μ πρέπει να

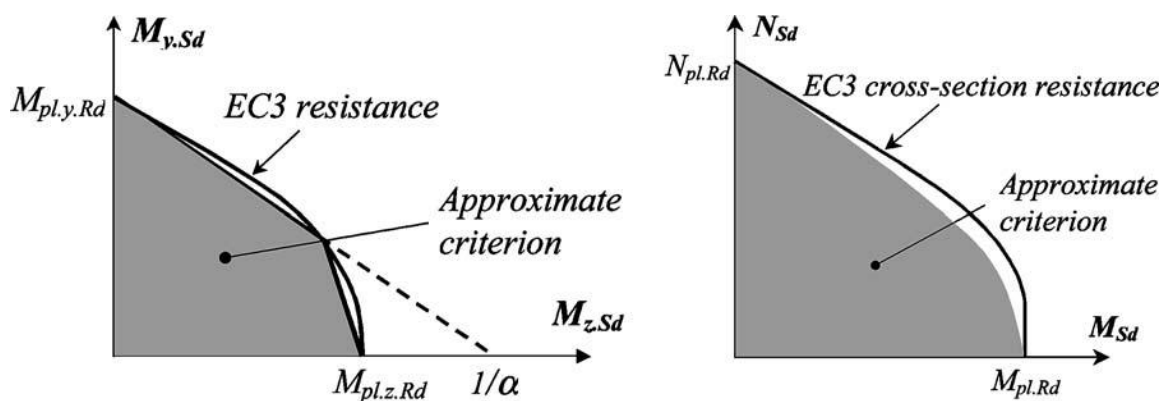
προσαρμόζεται ανάλογα το επίπεδο λυγισμού και να εισάγουμε δείκτες C_{ii} και C_{ij} , όπου i, j τα κύρια επίπεδα.

$$C_{ii} = 1 + (w_i - 1) \left[2 - \frac{1,6}{w_i} C_{mi}^2 (\bar{\lambda}_{max} + \bar{\lambda}_{max}^2) \right] \frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} \geq \frac{W_{el,i}}{W_{pl,i}} \quad (2.11)$$

$$C_{ij} = 1 + (w_j - 1) \left[2 - 14 \frac{C_{mj}^2 \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_j^5} \right] \frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} \geq \frac{0,6}{\sqrt{w_j/w_i}} \frac{W_{el,j}}{W_{pl,j}} \quad (2.12)$$

Χρησιμοποιούμε τη μέγιστη ανηγμένη λυγηρότητα του μέλους δηλαδή: $\bar{\lambda}_{max} = \max(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z)$.

Επίσης, επειδή οι δρώσες καμπτικές ροπές $M_{y,Sd}$ και $M_{z,Sd}$ αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μη γραμμικά, έχουμε εισάγει τους διορθωτικούς συντελεστές α και β στις εξισώσεις (2.9) και (2.10). Στο σχήμα 1 δίνεται ένα παράδειγμα σύμφωνα με την παραπάνω προσέγγιση και με βάση τις συστάσεις του Ευρωκώδικα 3.



Σχήμα 1: Κριτήρια αντοχής για διαξονική κάμψη και αλληλεπίδραση $N-M$ (για διατομές μορφής Η ή Ι)

2.3.2 Μέλος μη προστατευμένο έναντι πλευρικής εκτροπής

Στις περισσότερες των περιπτώσεων, ένα μέλος που υπόκειται σε διαξονική κάμψη είναι ευαίσθητο σε πλευρικό λυγισμό. Η γενική μορφή των εξισώσεων (2.9) και (2.10) διατηρείται και γίνονται ορισμένες τροποποιήσεις. Ο όρος για κάμψη περί τον ισχυρό άξονα γίνεται:

$$\frac{C_{mLT}}{\chi_{LT}} \frac{C^*_{my} \cdot M_{y,Sd}}{(1 - N_{Sd}/N_{cr,y}) \cdot C_{yy,mod} \cdot M_{pl,y,Rd}} \quad (2.13)$$

Ο μειωτικός συντελεστής χ_{LT} χρησιμοποιείται στον παραπάνω όρο, όταν το μέλος υπόκειται μόνο σε κάμψη περί τον ισχυρό άξονα ώστε να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις από πλευρικό λυγισμό. Επιπλέον, πρέπει να θεωρηθεί μία τροποποιημένη έκφραση του C_{my} , έτσι ώστε η εξίσωση (2.13) να μειώνεται όταν το e_y τείνει στο μηδέν.

$$C^*_{my} = C_{my} + (1 - C_{my}) \frac{\alpha_{LT} \cdot \sqrt{e_y}}{1 + \alpha_{LT} \cdot \sqrt{e_y}} \quad (2.14)$$

όπου $e_y = (M_{y,Sd}/N_{Sd})/(A/W_{el,y})$. Ο συντελεστής C_{mLT} υπολογίζει την επίδραση της αξονικής θλιπτικής δύναμης στο φαινόμενο του πλευρικού λυγισμού. Ο παρανομαστής του προκύπτει από θεωρητικές μελέτες.

$$C_{mLT} = \frac{C^2_{my} \cdot \alpha_{LT}}{\sqrt{(1 - N_{Sd}/N_{cr,z})(1 - N_{Sd}/N_{cr,T})}} \geq 1 \quad (2.15)$$

όπου $N_{cr,T}$ είναι το ελαστικό κρίσιμο φορτίο στρεπτικού λυγισμού, και επίσης ισχύει $\alpha_{LT} = 1 - (I_t/I_y) \geq 0$.

Όλοι οι άλλοι όροι των εξισώσεων (2.9) και (2.10) μένουν ίδιοι, εκτός από τους συντελεστές C που τροποποιούνται για πλευρικό λυγισμό:

$$C_{yy,mod} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} C^2_{my} (\bar{\lambda}_{max} + \bar{\lambda}^2_{max}) \right) \frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} - b_{LT} \right] \geq \frac{1}{w_y} \quad (2.16)$$

$$C_{yz,mod} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C^2_{mz} \cdot \bar{\lambda}^2_{max}}{w_z^5} \right) \frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} - c_{LT} \right] \geq \frac{0,6}{\sqrt{w_y \cdot w_z}} \quad (2.17)$$

$$C_{zy,mod} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{mz}^{*2} \cdot \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) \frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} - d_{LT} \right] \geq \frac{0,6}{\sqrt{w_y \cdot w_z}} \quad (2.18)$$

$$C_{zz,mod} = 1 + (w_z - 1) \left[2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 (\bar{\lambda}_{max} + \bar{\lambda}_{max}^2) - e_{LT} \right] \frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} \geq \frac{1}{w_z} \quad (2.19)$$

Προφανώς, όλοι οι παραπάνω τύποι παίρνουν τη μορφή των εξισώσεων (2.11) και (2.12) όταν ο πλευρικός λυγισμός αποτρέπεται, υπό την προϋπόθεση ότι οι συμπληρωματικοί παράγοντες τείνουν στο μηδέν. Αυτοί είναι οι εξής:

$$b_{LT} = 0,5 \cdot \alpha_{LT} \cdot \bar{\lambda}_{LT,0}^2 \frac{M_{y,Sd}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Sd}}{M_{pl,z,Rd}} \quad (2.20)$$

$$c_{LT} = 10 \cdot \alpha_{LT} \frac{\bar{\lambda}_{LT,0}^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Sd}}{C_{my}^* \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \quad (2.21)$$

$$d_{LT} = 2 \cdot \alpha_{LT} \frac{\bar{\lambda}_{LT,0}}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Sd}}{C_{my}^* \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Sd}}{C_{mz} \cdot M_{pl,z,Rd}} \quad (2.22)$$

$$e_{LT} = 1,7 \cdot \alpha_{LT} \frac{\bar{\lambda}_{LT,0}}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Sd}}{C_{my}^* \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \quad (2.23)$$

Στις εξισώσεις (2.20) έως (2.23) το $\bar{\lambda}_{LT,0}$ είναι η ανηγμένη λυγηρότητα για πλευρικό λυγισμό λόγω σταθερής καμπτικής ροπής. Για κατηγορία διατομής 3 προτείνονται οι ίδιες εκφράσεις αλλά όπου W_{pl} τοποθετώ το W_3 .

2.3.3 Ειδική περίπτωση λυγηρότητας: $\lambda \rightarrow 0$

Όταν η λυγηρότητα του μέλους τείνει στο μηδέν, όλη η παραπάνω διαδικασία ελέγχου επάρκειας εκφυλίζεται σε απλό έλεγχο διατομής. Στην περίπτωση της διαξονικής κάμψης έχουμε: για κατηγορία διατομής 3 οι συντελεστές C_{ii} και C_{ij} είναι ίσοι με 1 και η διαδικασία ελέγχου επάρκειας καταλήγει στο γνωστό ελαστικό έλεγχο διατομής. Επιπλέον, για τις κατηγορίες διατομής 1 και 2 οι εξισώσεις (2.9) και (2.10) διαμορφώνονται ως εξής:

$$\frac{M_{y,Sd}}{M_{pl,y,Rd}} + \alpha \frac{M_{z,Sd}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1 \quad \text{και} \quad \beta \frac{M_{y,Sd}}{M_{pl,y,Rd}} + \frac{M_{z,Sd}}{M_{pl,z,Rd}} \leq 1 \quad (2.24)$$

επειδή οι $N_{cr,y}$ και $N_{cr,z}$ τείνουν στο άπειρο τότε έχουμε $C_{my} = C_{mz} = 1$, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.

Ο πλαστικός έλεγχος διατομής ενός μέλους που υποβάλλεται σε αξονική θλίψη και μονοαξονική κάμψη γίνεται:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{Sd}}{C \cdot M_{pl,Rd}} \leq 1 \quad (2.25)$$

όπου

$$C = 1 + 2(w - 1) \frac{N_{Sd}}{N_{pl,Rd}} \geq \frac{1}{w} \quad (2.26)$$

Στην εξίσωση (2.26) η μέγιστη τιμή είναι το 2 όταν η αξονική δύναμη είναι σημαντική, χωρίς να υπάρχει πρόβλημα ασφάλειας. Στο σχήμα 1 συγκρίνονται τα αποτελέσματα από την εξίσωση (2.26) με το κριτήριο του Ευρωκώδικα 3 για αλληλεπίδραση N - M .

2.4 Μέλος με διατομή κατηγορίας 3

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στις εξισώσεις (2.20) έως (2.23) για κατηγορία διατομής 3 προτείνονται οι ίδιες εκφράσεις αλλά όπου χρησιμοποιείται το W_{pl} αντικαθίσταται από το W_3 . Προσπαθούμε, λοιπόν, η μετάβαση μεταξύ ελαστικότητας και πλαστικότητας να είναι όσο το δυνατό πιο ομαλή και συνεχή. Για το λόγο αυτό προτείνεται να υιοθετηθεί ένα νέο “ελαστοπλαστικό μέτρο W_3 ” το οποίο να επιτρέπει την ομαλή μετάβαση μεταξύ της κατηγορίας 2 και 3. Η τιμή του εξαρτάται από το λόγο του πλάτους προς το πάχος θλιβόμενων στοιχείων του μέλους b/t . Σύμφωνα με τα αυστραλιανά πρότυπα:

$$W_3 = W_{el} + (W_{pl} - W_{el}) \min \left[\frac{(b/t)_{3,i} - (b/t)_i}{(b/t)_{3,i} - (b/t)_{2,i}} \right] \quad (2.27)$$

όπου τα $(b/t)_{3,i}$ και $(b/t)_{2,i}$ είναι οι λογοί για δεδομένη θλίψη του μέλους για κατηγορία διατομής 3 και 2 αντίστοιχα. Τέλος, προτείνεται στη βιβλιογραφία (Maquoi R, Boissonnade N, Muzeau J-P, Jaspard J-P, Villette M. The interaction formulae for beam-columns: a new step of a yet long story. Proceedings of the 2001 SSRC Annual Technical Session & Meeting. 2001, p. 63–88) και μία παρόμοια ομαλή προσαρμογή των τύπων α και β έτσι ώστε να υπάρχει μία συνεχής μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική διαξονική αλληλεπίδραση.

2.5 Αξιοπιστία και ακρίβεια της Μεθόδου Α

Τα αποτελέσματα της Μεθόδου Α συγκρίθηκαν με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 αλλά και με υπολογισμούς προσομοιωμάτων με πεπερασμένα στοιχεία. Σύμφωνα με δεδομένες μετρήσεις που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, η Μέθοδος Α είναι φανερά πιο αξιόπιστη σε σχέση με την ENV-έκδοση του Ευρωκώδικα 3. Τα ποσοστά απόκλισης σε σχέση με τα σχεδόν ακριβή αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων κυμαίνονται στο 7% ενώ του Ευρωκώδικα 3 στο 24%.

Επίσης, όπως αναλύθηκε παραπάνω οι τύποι έχουν φυσικό υπόβαθρο και οι συντελεστές τους δικαιολογούνται πλήρως. Για τους λόγους αυτούς, τα τελικά επίσημα κείμενα του Ευρωκώδικα 3 συστήνουν τη μέθοδο Α ως την ακριβέστερη από τις δύο που προτείνονται προς χρήση από τους ευρωπαίους μελετητές μηχανικούς.

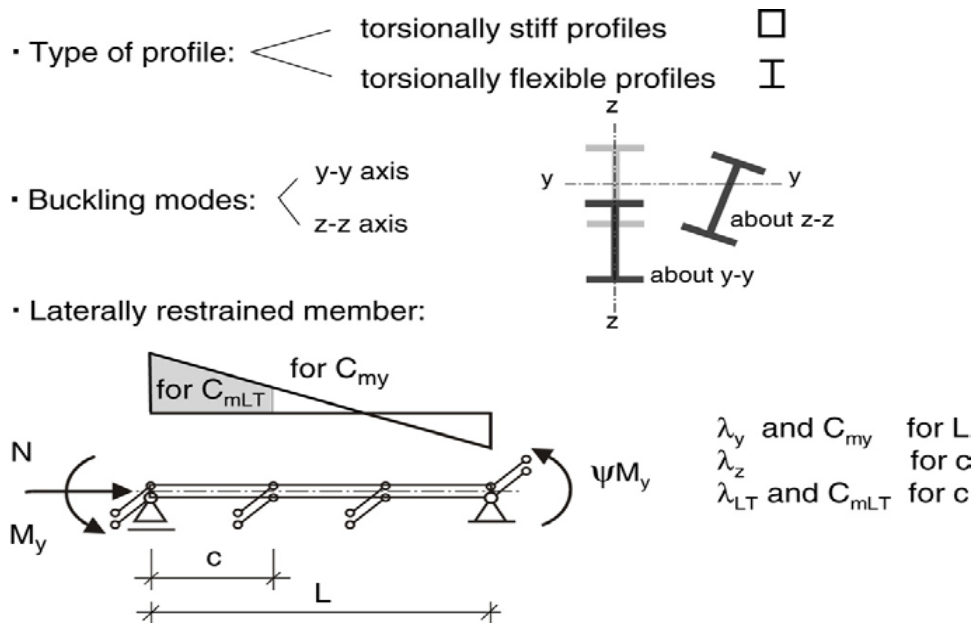
Κεφάλαιο 3

Μέθοδος B υπολογισμού συντελεστών αλληλεπίδρασης

3.1 Εισαγωγή

Η Μέθοδος B δεν είναι τόσο γενικευμένη όσο η Μέθοδος A, με κάλυψη όλων των περιπτώσεων μέσω τυπολογίου, και στηρίζεται σε συγκεκριμένους κανόνες λυγισμού. Οι κανόνες λυγισμού της Μεθόδου B έχουν σκοπό να καλύψουν τα ακόλουθα τρία κύρια χαρακτηριστικά της δομικής συμπεριφοράς των μελών από χάλυβα (σχήμα 2):

- **Μορφές διατομής:** Ανάλογα με τη μορφή της διατομής του μέλους, που υποβάλλεται στην αξονική θλίψη και κάμψη, μπορεί να είναι ευαίσθητο στις στρεπτικές παραμορφώσεις ή όχι. Επομένως, προβλέπονται συγκεκριμένοι τύποι των συντελεστών αλληλεπίδρασης για τα μη ευαίσθητα μέλη σε στρεπτικές παραμορφώσεις (κοίλες κυκλικές διατομές, ή μέλη στα οποία η στρέψη παρεμποδίζεται, στα οποία λαμβάνεται $\chi_{LT} = 1,0$.) και άλλοι για τα ευαίσθητα μέλη (μέλη με ανοιχτές διατομές και μη παρεμποδιζόμενη στρέψη, όπου ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός αποτελεί πιθανή μορφή αστοχίας, οπότε πρέπει να υπολογίζεται ο χ_{LT}).
- **Επίπεδα λυγισμού:** Όπως και στη Μέθοδο A, η χωρική παραμόρφωση λόγω λυγισμού των μελών που υποβάλλονται σε αξονική θλίψη και κάμψη αναλύεται σε δύο επίπεδα λυγισμού: περί τον άξονα y και περί τον άξονα z . Σε κάθε σύνολο τύπων, ο πρώτος περιγράφει τη λειτουργία περί τον ισχυρό άξονα και ο δεύτερος περί τον ασθενή άξονα. Κατά αυτόν τον τρόπο, η συγκεκριμένη φυσική συμπεριφορά του μέλους συνδέεται εμφανώς με τη διαδικασία σχεδιασμού (πλευρική παρεμπόδιση κ.λπ.).
- **Ενδιάμεσοι πλευρικοί περιορισμοί:** Οι τύποι λυγισμού παρήχθησαν πρώτιστα για ελεύθερο μέλος με "αρθρωτά άκρα", άκρα παρεμποδιζόμενα έναντι πλευρικής μετακίνησης αλλά ελεύθερα να στρέφονται στο επίπεδο λυγισμού. Εντούτοις, συχνά στην πράξη συναντούμε στα μέλη μας ενδιάμεσα πλευρικά στηρίγματα. Αυτό μας αναγκάζει να υπολογίσουμε εκ νέου τα μήκη λυγισμού και τα διαγράμματα ροπών κατά μήκος του μέλους και κατά μήκος ενός τμήματος μεταξύ πλευρικών στηριγμάτων.



Σχήμα 2. Χαρακτηριστικά της Μεθόδου B του EC3

3.2 Σχέσεις αλληλεπίδρασης για μονοαξονική κάμψη

Όπως εξηγείται ήδη στην εισαγωγή, δύο ομάδες τύπων λυγισμού υπάρχουν. Η μία περιγράφει τη συμπεριφορά των μη ευαίσθητων μελών σε στρεπτικές παραμορφώσεις από χάλυβα και η άλλη των ευαίσθητων αντίστοιχα. Ο πρώτος τύπος κάθε ομάδας συσχετίζεται με το λυγισμό περί τον άξονα y και ο δεύτερος με λυγισμό περί τον άξονα z . Έχει ειπωθεί ήδη, ότι οι τύποι λυγισμού είναι κατάλληλοι για ενιαία μέλη αλλά και για εκείνα που παρεμποδίζονται πλευρικά από ενδιάμεσες στηρίξεις. Στην παρούσα κατάσταση, οι εν λόγω στηρίξεις αναμένεται να εξασφαλίζουν πλήρη στήριξη, πράγμα που σημαίνει ότι στην περίπτωση στρεπτοκαμπτικού λυγισμού μία απλή πλευρική συγκράτηση θα ήταν επαρκής, ενώ στην περίπτωση πλευρικού λυγισμού θα υπήρχε απαίτηση, εκτός από πλευρική παρεμπόδιση, και στρεπτική. Οι τύποι σχεδιασμού για μονοαξονική κάμψη είναι οι ακόλουθοι:

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{pl,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_y \frac{C_{my} M_{y,Ed}}{\frac{M_{pl,y,Rd}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (3.1)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{pl,Rd}}{\gamma_{M1}}} + 0,6 k_y \frac{C_{my} M_{y,Ed}}{\frac{M_{pl,y,Rd}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (3.2)$$

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

(3.2α)

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{pl,Rd}} + k_y \frac{C_{my} M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \leq 1,0$$

(3.3)

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{pl,Rd}} + k_{LT} \frac{C_{my} M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \leq 1,0$$

(3.4)

Οι εξισώσεις (3.1) και (3.2) περιγράφουν το στρεπτοκαμπτικό λυγισμό μη ευαίσθητων μελών σε στρεπτικές παραμορφώσεις και οι εξισώσεις (3.3) και (3.4) τον πλευρικό λυγισμό των ευαίσθητων μελών αντίστοιχα. Στην περίπτωση του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού για τον ασθενή άξονα μία απλουστευμένη προσέγγιση (3.2α) επιτρέπεται, η οποία είναι βασισμένη μόνο στον όρο της αξονικής θλιπτικής δύναμης. Αυτός ο παραδοσιακός κανόνας, που χρησιμοποιείται σε πολλούς από τους υφιστάμενους κώδικες, έχει διατηρηθεί στον EC3 για μονοαξονική κάμψη και θλίψη.

Οι νέοι τύποι αλληλεπίδρασης της Μεθόδου Β χρησιμοποιούν τους ακόλουθους συντελεστές :

- Συντελεστές αλληλεπίδρασης k_y , k_z , k_{LT}
- Συντελεστές ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής C_{my} , C_{mz} , C_{mLT} .

Επιπλέον, ο υπολογισμός των μειωτικών συντελεστών χ_y , χ_z , χ_{LT} για τους βασικούς τρόπους λυγισμού υπό καθαρή θλίψη ή καθαρή κάμψη είναι απαραίτητος. Οι συντελεστές αλληλεπίδρασης k_y και k_z ισχύουν για την ομοιόμορφη κατανομή των ροπών κάμψης M_y και M_z , ενώ ο k_{LT} περιλαμβάνει τη μη ομοιομορφία των διαγραμμάτων ροπών M_y . Αυτή η μη ομοιομορφία λαμβάνεται υπόψη με το συντελεστή C_m , ο οποίος είναι βασισμένος στον ευρέως χρησιμοποιημένο τύπο του Austin, δηλαδή για $C_m=1,0$ έχουμε ομοιόμορφη ροπή παντού (ορθογωνικό διάγραμμα ροπών) και για οποιοδήποτε άλλης μορφής διάγραμμα να ισχύει C_m μικρότερο της μονάδας. Από αυτή την άποψη, ο ορισμός του C_m είναι διαφορετικός από το συντελεστή β_M της ENV-έκδοσης. Μπορεί επίσης να σημειωθεί, ότι οι συντελεστές χ_y και χ_z (ευρωπαϊκές καμπύλες λυγισμού) είναι οι ίδιοι όπως στην ENV-έκδοση, ενώ ο συντελεστής χ_{LT} είναι βελτιωμένος για την EN-έκδοση. Το τελευταίο αφορά κυρίως την ταξινόμηση των καμπυλών πλευρικού λυγισμού που συνδέονται με τη στρεπτική ικανότητα της διατομής ($h/b \geq$ ή < 2) και το συνυπολογισμό της ευεργετικής επίδρασης των ανομοιόμορφων διαγραμμάτων ροπών από τον τροποποιημένο

συντελεστή $\chi_{LT,mod}$. Πρέπει να επισημανθεί, ότι ο έλεγχος επάρκειας από τους τύπους αλληλεπίδρασης (3.1) έως (3.4) πρέπει να συμπληρωθεί από τον έλεγχο αντοχής της διατομής στις άκρες του μέλους, εάν το διάγραμμα καμπτικών ροπών είναι ανομοιόμορφο κατά μήκος του μέλους και η μέγιστη ροπή εμφανίζεται στα άκρα του μέλους. Αυτό σημαίνει, ότι η αντοχή της διατομής στα άκρα ίσως να είναι η κρισιμότερη, εάν τα αποτελέσματα της ευστάθειας κατά μήκος του μέλους είναι χαμηλά.

3.3 Σχέσεις αλληλεπίδρασης για διαξονική κάμψη

Οι τύποι σχεδιασμού είναι οι ακόλουθοι:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{pl,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_y \frac{\frac{C_{my} M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + 0,6 k_z \frac{\frac{C_{mz} M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (3.5)$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{pl,Rd}}}{\gamma_{M1}} + 0,6 k_y \frac{\frac{C_{my} M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + k_z \frac{\frac{C_{mz} M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (3.6)$$

Οι σχέσεις αλληλεπίδρασης (3.5) και (3.6) για διαξονική κάμψη έχουν αναπτυχθεί επεκτείνοντας τους δεδομένους τύπους (3.1) και (3.2) με τους όρους της M_z . Για τον λυγισμό περί τον άξονα y , έχουμε ολόκληρο τον συντελεστή k_z ο οποίος εφαρμόζεται και για λυγισμό περί τον άξονα z με την μειωμένη τιμή $0,6 \cdot k_z$.

Λόγω αυτού, οι δύο εξισώσεις παρουσιάζουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- η μορφή τους είναι 'συμμετρική' όσον αφορά τους άξονες y και z . Αυτό είναι σημαντικό για να περιγραφεί με συνέπεια, η μετατροπή από ορθογώνιες σε τετράγωνες κοίλες διατομές,
- επιτρέπουν μέσω των παραγόντων $0,6$ μία ποιοτικά καλή προσέγγιση της πλαστικής αλληλεπίδρασης της διατομής για διαξονική κάμψη. Για αξονική δύναμη που τείνει στο μηδέν, εμφανίζονται δύο γραμμικές εξισώσεις οι (3.7) και (3.8).

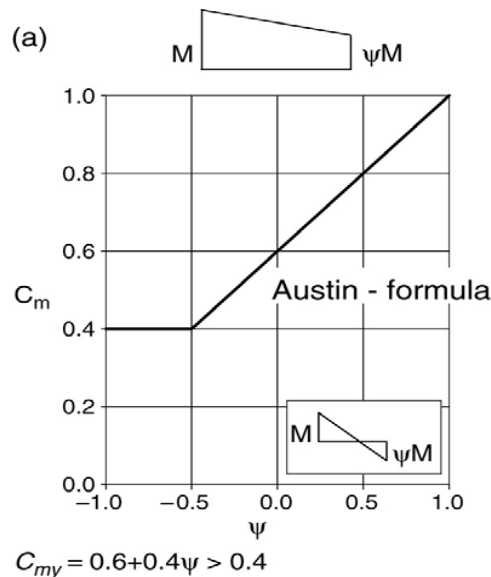
$$\frac{\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}}}{\gamma_{M1}} + 0,6 \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}}{\gamma_{M1}} \leq 1,0 \quad (3.7)$$

$$0,6 \frac{M_{y,Ed}}{\frac{M_{pl,y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{pl,z,Rd}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (3.8)$$

3.4 Συντελεστές ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής C_m

Ο συντελεστής C_m έχει σκοπό να λάβει υπόψη τα διαγράμματα καμπτικής ροπής, τα οποία είναι ανομοιόμορφα κατά μήκος του μέλους ή κατά μήκος ενός τμήματος μεταξύ δύο πλευρικών στηρίξεων, εάν υπάρχουν. Θεωρούμε ότι η εικονική ομοιόμορφη καμπτική ροπή $C_m \cdot M$ έχει την ίδια επίδραση στη συμπεριφορά λυγισμού όπως το πραγματικό διάγραμμα ροπής. Τα ανομοιόμορφα διαγράμματα καμπτικής ροπής έχουν γενικά πιο ευνοϊκές επιπτώσεις από τα ομοιόμορφα, επομένως οι συντελεστές C_m είναι πάντα μικρότεροι ή ίσοι από 1,0.

Ο ισοδύναμος ομοιόμορφος συντελεστής ροπής C_m διαφέρει από τον ανάλογο συντελεστή β_M της προηγούμενης ENV-έκδοσης και διαφέρει επίσης και από τον συντελεστή C_m της Μεθόδου A, ο οποίος παίρνει την ημιτονοειδή μορφή του διαγράμματος ροπής ως βασική μορφή του. Στη Μέθοδο B η προσέγγιση του, ευρείας χρήσης, «τύπου του Austin» έχει εφαρμοστεί για λόγους ευχρηστίας. Ο τύπος του Austin (εξισώσεις (7) και (12)) ισχύει για γραμμικά διαγράμματα ροπής (σχήμα).



Σχήμα 3. Συντελεστής ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής κατά Austin

Αν και πολύ απλός στη μορφή του είναι σε θέση να περιγράψει τις συνέπειες του λυγισμού πολύ αξιόπιστα. Οι πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι ο τύπος αυτός δεν αφορά μόνο ελαστική συμπεριφορά, αλλά και πλαστική συμπεριφορά με ή χωρίς ατέλειες. Έδειξε, επίσης, ότι ο περιορισμός για ελάχιστη τιμή $C_m = 0,4$ για $\psi \leq -0,5$ είναι συντηρητική δεδομένου ότι τιμές κάτω από 0,2 μπορούν να επιτευχθούν από

αριθμητικό προσομοιωτή. Αυτό το περιθώριο, εντούτοις, δεν έχει χρησιμοποιηθεί στους κανόνες σχεδιασμού της Μεθόδου Β, δεδομένου ότι πρώτον, ο έλεγχος διατομής στα άκρα του μέλους είναι συχνά κρίσιμος και δεύτερον, για την ειδική περίπτωση των παραβολικών διαγραμμάτων ροπής.

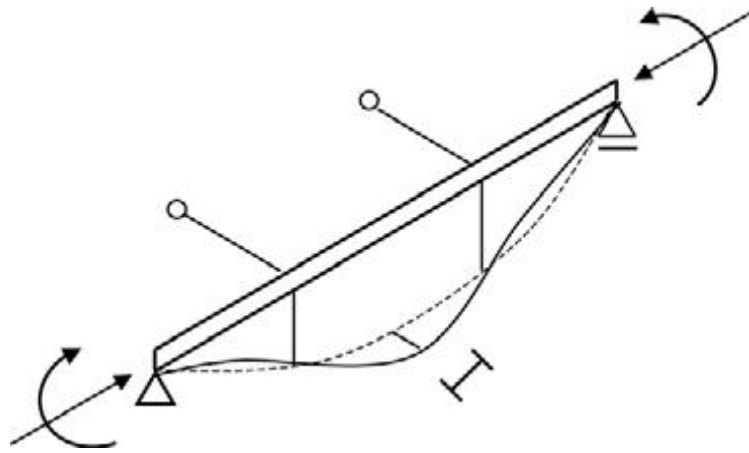
Για τη χρήση των συντελεστών C_m , τα ακόλουθα δύο σημεία πρέπει να επισημανθούν:

- Πρώτον, οι δεδομένοι συντελεστές C_m μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο εάν και στα δύο άκρα του μέλους υπάρχουν στηρίξεις. Για μέλη με λυγισμό από μετάθεση ο συντελεστής C_m πρέπει να λαμβάνεται ίσος με 0,9. Αυτό ισχύει κυρίως για τους στύλους με παραμορφώσιμο μόνο το άνω άκρο τους.

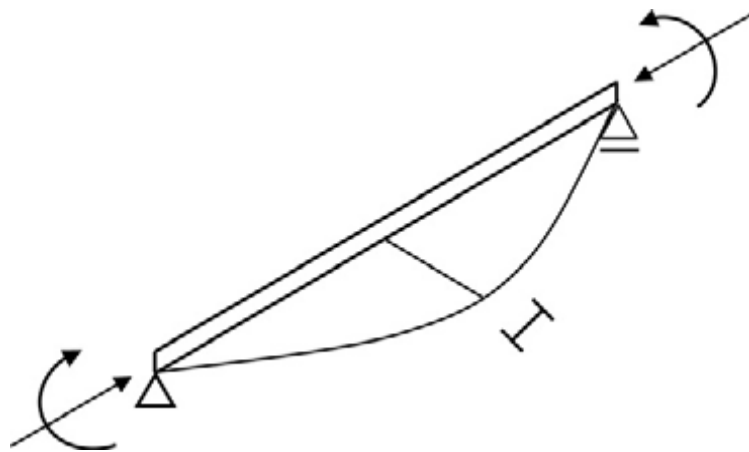
- Δεύτερον, ο συντελεστής C_m σχετίζεται με τη μορφή του διαγράμματος ροπής του τμήματος που ορίζεται μεταξύ πλευρικών στηρίξεων. Ενώ ο C_{my} αφορά πάντα το συνολικό μήκος του μέλους, οι C_{mLT} και C_{mz} μπορεί να καθοριστούν από το τμηματικό διάγραμμα ροπών μεταξύ ενδιάμεσων στηρίξεων.

3.5 Μέλη ευαίσθητα σε στρεπτικές παραμορφώσεις (διατομές κατηγορίας 1 και 2)

Η συμπεριφορά σε λυγισμό των ευαίσθητων μελών σε στρεπτικές παραμορφώσεις εξηγείται από το φαινόμενο του πλευρικού λυγισμού. Μία απεικόνιση των χαρακτηριστικών τρόπων λυγισμού δίνεται στο σχήμα 4. . Ενώ για τα μέλη, που είναι πλευρικά ελεύθερα κατά μήκος τους, ο πλευρικός λυγισμός περί τον άξονα z κυριαρχεί πάντα, τα μέλη με ενδιάμεσες πλευρικές στηρίξεις ενδέχεται να αστοχήσουν σε μία μορφή λυγισμού, όπου η παραμόρφωση περί τον άξονα y κυριαρχεί και η επίδραση του πλευρικού λυγισμού μεταξύ των στηρίξεων είναι απλά μία πρόσθετη δράση. Η πρώτη περίπτωση περιγράφεται από την σχέση αλληλεπίδρασης (3.4) και η δεύτερη από την (3.3). Εάν οι πλευρικές στηρίξεις βρίσκονται σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, ο τρόπος λυγισμού στον $y-y$ τείνει στην περίπτωση του εντός επιπέδου στρεπτοκαμπτικό λυγισμό. Έτσι μπορεί να επαναληφθεί, ότι στην περίπτωση των ελεύθερων μελών πρέπει να ελέγχεται ο λυγισμός περί τον $z-z$ (εξίσωση (3.4)), ενώ για τα μέλη με ενδιάμεσες πλευρικές στηρίξεις και οι δύο εξισώσεις (3.3) και (3.4) πρέπει να ελέγχονται, δεδομένου ότι ανάλογα με τις συγκεκριμένες εντός και εκτός επιπέδου λυγηρότητες ένας από τους δύο τρόπους λυγισμού μπορεί να είναι καθοριστικός.



(α) Πλευρικός λυγισμός περί τον άξονα y-y



(β) Πλευρικός λυγισμός περί τον άξονα z-z

Σχήμα 4. Γενικές μορφές λυγισμού των ευαίσθητων μελών σε στρεπτικές παραμορφώσεις

3.6 Μέλη μη ευαίσθητα σε στρεπτικές παραμορφώσεις (διατομές κατηγορίας 1 και 2)

Η συμπεριφορά σε λυγισμό μελών τα οποία είναι μη ευαίσθητα σε στρεπτικές παραμορφώσεις οδηγεί σε καμπτικό λυγισμό. Το φαινόμενο του λυγισμού ενός πλευρικά ελεύθερου μέλους μπορεί να περιγραφεί με δύο σχέσεις αλληλεπίδρασης, οι οποίες σχετίζονται με τον εντός επιπέδου και τον εκτός επιπέδου λυγισμό αντίστοιχα. Ο τύπος (3.1) περιγράφει την πρώτη σχέση και ο τύπος (3.2) τη δεύτερη. Ο συντελεστής αλληλεπίδρασης στην εξίσωση (3.2) έχει οριστεί ως $0,6 k_y$, που σημαίνει ότι το 60% του εντός επιπέδου καμπτικού όρου έχει επιπτώσεις στον εκτός επιπέδου λυγισμό.

Στην περίπτωση επαρκούς ενδιάμεσης πλευρικής στήριξης στο επίπεδο λυγισμού, έχουμε την κατάσταση η οποία προσεγγίζεται από την εξίσωση (3.1). Για ένα ασυγκράτητο μέλος, που είναι ελεύθερο να εκτραπεί χωρικά κατά μήκος του, εκτός επιπέδου λυγισμός, θα εμφανιστεί εάν N/N_{pl} είναι σχετικά μεγάλος. Αυτό προσεγγίζεται από την εξίσωση (3.2). Η προσέγγιση γίνεται και με την εξίσωση (3.2α). Η βασική παράμετρος της συμπεριφοράς αλληλεπίδρασης είναι ο συντελεστής αλληλεπίδρασης k . Οι παράμετροι $\bar{\lambda}_y$, χ_y και N/N_{pl} καθορίζουν τη συμπεριφορά αλληλεπίδρασης. Οι συντελεστές αλληλεπίδρασης εξαρτώνται τελικά από το $\bar{\lambda}_y$ και το n_y , το τελευταίο εκ των οποίων συνδέεται με το N/N_{pl} και χ_y όπως στον όρο για λυγισμό υπό καθαρή αξονική θλίψη.

$$n_y = \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{pl,Rd}}{\gamma_{M1}}} \quad (3.9)$$

3.7 Μέλη με διατομές κατηγορίας 3 και 4

Οι σχέσεις αλληλεπίδρασης για τον έλεγχο ευστάθειας μελών με διατομές κατηγορίας 3 και 4 είναι ανάλογοι με τις εξισώσεις (3.1) έως (3.4) για τις κατηγορίες 1 και 2. Ο καθορισμός της πλήρους ελαστικής συμπεριφοράς αποκλείει την εξέταση των παραμενουσών τάσεων και επίσης δεν μας επιτρέπει να υπολογίσουμε εκ νέου τους μειωτικούς συντελεστές λυγισμού τέτοιων διατομών. Πρόσφατες αριθμητικές προσομοιώσεις διατομών κατηγορίας 3 έχουν, ωστόσο, επιβεβαιώσει την μερική-πλαστική αντοχή τέτοιων διατομών. Αυτές δείχνουν ότι η πλαστική συμπεριφορά αλληλεπίδρασης, αν και σχετίζονται με την αντοχή $M_{el,Rd}$, υφίσταται. Με βάση τα στοιχεία αυτά, οι τύποι σχεδιασμού για τις διατομές κατηγορίας 3 και 4 παίρνουν εν μέρει υπόψη τους τις επιπτώσεις της μερικής-πλαστικής συμπεριφοράς, προκειμένου

να χρησιμοποιηθούν μερικές από αυτές, κυρίως θετικές, για το σχεδιασμό. Οι αλλαγές που πρέπει να γίνουν στις σχέσεις (3.1) έως (3.4) είναι: οι ροπές M_{pl} έχουν αντικατασταθεί από τις M_{el} ή M_{eff} και η μετατόπιση του ουδέτερου άξονα των διατομών κατηγορίας 4 έχει ληφθεί υπόψη από $\Delta M = e_N \cdot N$.

Οι γενικές, λοιπόν, σχέσεις αλληλεπίδρασης με τις προσθήκες που αναφέραμε για την κατηγορία διατομής 4 είναι οι ακόλουθες:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (3.10)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rd}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rd}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (3.11)$$

3.8 Σύγκριση των Μεθόδων Α και Β

Ο Ευρωκώδικας 3 περιέχει δύο εναλλακτικούς τρόπους προσδιορισμού των συντελεστών αλληλεπίδρασης, τη Μέθοδο Β και τη Μέθοδο Α. Ωστόσο, ο κώδικας δεν δίνει καμία έμφαση στις διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων, οι οποίες χρησιμοποιούν τις ίδιες τελικές σχέσεις αλληλεπίδρασης για τον έλεγχο της ευστάθειας των μελών σε λυγισμό. Οι τύποι αυτοί προέρχονται από το EN1993-1-1, το οποίο εκτός από αυτές τις δύο μεθόδους περιέχει και επιπλέον άλλες δύο, την λεγόμενη Γενική Μέθοδο (General Method) και την Μέθοδο Σταθερού Μήκους (Stable-Length Method). Επομένως, συνολικά προσφέρονται τέσσερις εναλλακτικές μέθοδοι στο σχεδιαστή, οι οποίες αφορούν τα μέλη που λυγίζουν υπό την επίδραση της κάμψης και της αξονικής θλίψης.

Εάν επικεντρωθούμε στις δύο πρώτες μεθόδους, πρέπει να κάνουμε κάποιες αναφορές σχετικά με τις διαφορές που υπάρχουν μεταξύ τους. Αρχικά, ερμηνεύονται οι διαφορές στην έννοια των συντελεστών C_m , οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην περίπτωση του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού για να ληφθεί υπόψη η ανομοιόμορφη κατανομή της ροπής. Ενώ οι συντελεστές C_m της Μεθόδου Β είναι βασισμένοι στην ισοδύναμη 'ομοιομορφία' των ροπών, αυτοί της Μεθόδου Α βασίζονται στο ισοδύναμο 'ημιτονοειδές' των ροπών. Αυτοί οι συντελεστές C_m της Μεθόδου Α, οι οποίοι προέρχονται από την ελαστική θεωρία λυγισμού, εξαρτώνται από το κρίσιμο φορτίο στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, ενώ εκείνοι της Μεθόδου Β ακολουθούν τον τύπο του Austin. Λόγω αυτών των διαφορετικών βασικών υποθέσεων, οι συντελεστές C_m είναι, γενικά, διαφορετικοί στο μέγεθος.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι συντελεστής C_{mLT} και των δύο μεθόδων σχετίζονται με την ανομοιόμορφη κατανομή της ροπής στην περίπτωση του πλευρικού λυγισμού αλλά με διαφορετικό τρόπο. Ενώ ο C_{mLT} στη Μέθοδο Α είναι ένας παράγοντας που συνδέεται άμεσα με τον C_{my} , ο C_{mLT} στη Μέθοδο Β είναι ένας ανεξάρτητος παράγοντας που δείχνει την επίδραση του σχετικού διαγράμματος ροπής μεταξύ ενδιάμεσων πλευρικά στηρίξεων. Τελικά και οι συντελεστές C_{mLT} , των δύο μεθόδων, είναι γενικά διαφορετικοί.

Το πεδίο εφαρμογής των δύο μεθόδων είναι, και στις δύο περιπτώσεις, ένα μέλος ενιαίου μήκους διπλής συμμετρίας διατομής που υποβάλλεται σε αξονική θλίψη, με ροπές στα άκρα του και εγκάρσια φόρτιση. Στην περίπτωση της Μεθόδου Α η μετάβαση από το καμπτικό σε πλευρικό λυγισμό προσεγγίζεται σύμφωνα με τη στρεπτική ακαμψία του μέλους.

Η Μέθοδος Β διακρίνει τις δύο τυποποιημένες περιπτώσεις, των μη ευαίσθητων και ευαίσθητων μελών σε στρεπτικές παραμορφώσεις αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η Μέθοδος Β έχει αναπτυχθεί κυρίως κατά τέτοιο τρόπο ώστε το πεδίο εφαρμογής της να καλύπτει επίσης τα μέλη με ενδιάμεσες πλευρικές στηρίξεις, οι οποίες μπορεί να μην είναι αποτελεσματικές για εντός επιπέδου στρεπτοκαμπτικό λυγισμό. Οι ρητά δοσμένες οδηγίες για τη χρήση των συγκεκριμένων συντελεστών C_{mLT} καθιστούν την πρακτική εφαρμογή, για αυτές τις περιπτώσεις, εύκολη.

Η ακρίβεια των δύο μεθόδων έχει ελεγχθεί για κάθε μία από αυτές από στατιστικές αξιολογήσεις του μικρού αριθμού διαθέσιμων αποτελεσμάτων δοκιμών και του μεγάλου αριθμού θεωρητικών υπολογισμών με πεπερασμένα στοιχεία FEM. Έτσι από αυτήν την άποψη οι μέθοδοι είναι ισοδύναμες γενικά. Εντούτοις, αυτό δεν αποκλείει τις διαφορές των αποτελεσμάτων σε συγκεκριμένα παραδείγματα. Δεδομένου ότι η Μέθοδος Α έχει βασιστεί στη θεωρητική εξαγωγή των χωρικών μορφών στρεπτοκαμπτικού λυγισμού και στη χρήση διαφόρων ειδικών συντελεστών, αυτή καλύπτει και τις δύο περιπτώσεις λυγισμού αξιόπιστα, αλλά ιδιαίτερα την εκτός επιπέδου. Η Μέθοδος Β είναι βασισμένη στη θεωρητική εξαγωγή του εντός επιπέδου τύπου λυγισμού με μόνο έναν παράγοντα, ο οποίος εξαρτάται από την ελαστοπλαστική ικανότητα του μέλους. Επομένως, καλύπτει τον εντός επιπέδου λυγισμό καλύτερα και λιγότερο αξιόπιστα τον εκτός επιπέδου. Στην περίπτωση του πλευρικού λυγισμού, και οι δύο μέθοδοι είναι επεκτάσεις από τον στρεπτοκαμπτικό λυγισμό βαθμονομημένες κυρίως στα αποτελέσματα των ελαστοπλαστικών αριθμητικών προσομοιώσεων.

Όσον αφορά την πρακτική χρήση των τύπων των δύο μεθόδων έχουν διαφορετικούς στόχους. Η Μέθοδος Β, όπως και πολλοί υπάρχοντες κώδικες, στοχεύει στο σχεδιαστή ο οποίος δουλεύει χειρονακτικά και περιμένει εύκολα και γρήγορα αποτελέσματα, λόγω της απλότητας των τύπων της. Η Μέθοδος Α στοχεύει σε μία δομή των τύπων, η οποία είναι όσο το δυνατόν περισσότερο βασισμένη στην ελαστική θεωρία, που περιγράφεται από έναν μεγαλύτερο αριθμό παραγόντων. Συνεπώς, η χρήση των υπολογιστών φαίνεται να είναι απαραίτητη για την πρακτική εφαρμογή της. Κατά αυτήν την άποψη εναπόκειται στο χρήστη να επιλέξει, ποια μέθοδος θα ήταν πιο επωφελής στην δική του ξεχωριστή περίπτωση σχεδιασμού.

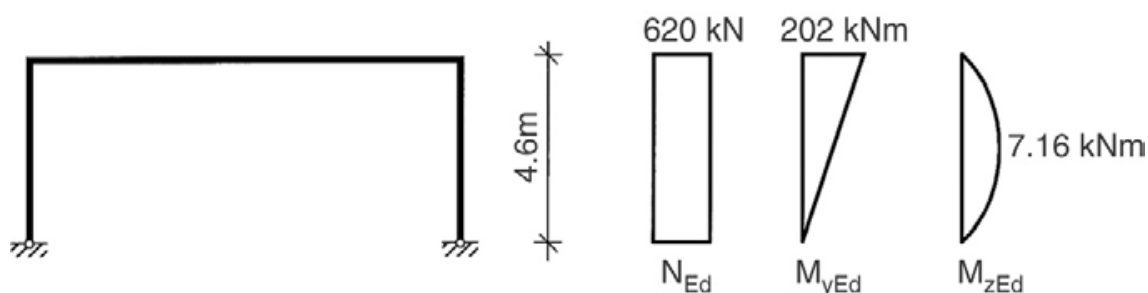
Κεφάλαιο 4

Αριθμητικά παραδείγματα - υπολογιστικό φύλλο Excel

4.1 Εισαγωγή

Με στόχο την παραμετρική διερεύνηση της συμπεριφοράς σε λυγισμό μελών από χάλυβα, επιλέξαμε δύο διατομές με τις οποίες θα ασχοληθούμε στη συνέχεια. Οι διατομές αυτές είναι οι IPE450 και HEB300. Οι δύο αυτές διατομές έχουν παραπλήσια αντοχή σε καμτική ροπή περί τον ισχυρό τους άξονα αλλά σημαντική διαφορά στη συμπεριφορά τους στη λυγηρότητα κυρίως στον ασθενή τους άξονα.

Αμφότερες θεωρούνται ότι αποτελούν τα υποστυλώματα ενός απλού μεταλλικού πλαισίου με την ίδια ακριβώς φόρτιση (σχήμα 5). Πιο αναλυτικά, έχουμε τριγωνικό διάγραμμα ροπής M_y και μέγιστη τιμή του στο άνω άκρο $M_{y,Ed} = 202 \text{ kNm}$ και παραβολικό διάγραμμα ροπής M_z με μέγιστη τιμή στο μέσο $M_{z,Ed} = 7,16 \text{ kNm}$. Η πρώτη τιμή της αξονικής δύναμης που μελετήσαμε είναι $N_{Ed} = 620 \text{ kN}$ ενώ συνεχίσαμε την ανάλυση μας με δύο μικρότερες τιμές $N_{Ed} = 310 \text{ kN}$ και $N_{Ed} = 200 \text{ kN}$. Οι τιμές των ροπών σε όλες τις επιλύσεις έμειναν ίδιες. Τα κρίσιμα μήκη λυγισμού είναι: $L_{cr,z} = L = 4,6 \text{ m}$ και $L_{cr,y} = 2,3 \cdot 4,6 = 10,6 \text{ m}$. Η ποιότητα του χάλυβα που χρησιμοποιείται είναι S355 σε όλες τις περιπτώσεις.



Σχήμα 5. Πλαίσιο και φόρτιση

Για αυτά, λοιπόν, τα δεδομένα και για τις δύο διατομές μας έγινε έλεγχος έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού με τις Μεθόδους Α και Β. Σε αυτό το κεφάλαιο δίνονται αναλυτικά η διαδικασία ελέγχου και όλοι οι υπολογισμοί. Έγινε προσπάθεια ώστε να είμαστε απόλυτα σίγουροι ότι τα τελικά αποτελέσματα ευστάθειας είναι σωστά. Υπό την προϋπόθεση αυτή, δημιουργήσαμε ένα υπολογιστικό φύλλο Excel με το οποίο θα

έχουμε άμεσα αποτελέσματα σε ελάχιστο χρόνο και με τις δύο μεθόδους. Κάνοντας συνέχεια βαθμονόμηση των αποτελεσμάτων από το πρόγραμμα Excel και των χειρόγραφων επιλύσεων που επισυνάπτονται, καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα του προγράμματος είναι αξιόπιστα. Διευκρινίζεται ότι όλες οι επιλύσεις έγιναν με χρήση του μειωτικού συντελεστή $\chi_{LT,mod}$, ειδικώς για ελατές ή ισοδύναμες συγκολλητές διατομές υπό κάμψη. Στα Excels που ακολουθούν έχει γίνει και υπολογισμός του μειωτικού συντελεστή χ με τη γενική διαδικασία για να γίνει μία απλή σύγκριση με τον $\chi_{LT,mod}$. Βέβαια, έχει δημιουργηθεί άλλο ένα υπολογιστικό φύλλο Excel το οποίο χρησιμοποιεί στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων ευστάθειας το μειωτικό συντελεστή χ από τη γενική διαδικασία υπολογισμού του. Αυτά τα Excels μπορεί να ζητηθούν από το συγγραφέα.

Η αξιοπιστία του προγράμματος Excel μας βοηθά στην εξαγωγή εύκολων και γρήγορων αποτελεσμάτων ευστάθειας για να συνεχίσουμε στο επόμενο κεφάλαιο στη παραμετρική διερεύνηση που έχουμε αποφασίσει.

4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων

4.2.1 Μέλος με διατομή IPE450

Υπολογίζεται ο μειωτικός συντελεστής $\chi_{LT,mod}$ ειδικώς για ελατές διατομές ή ισοδύναμες συγκολλητές διατομές υπό κάμψη.

$$M_{z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \times f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00} = 9812,2kN$$

$$M_{cr} = 1,879 \frac{\pi^2 \times 21000kN/cm^2 \times 1676cm^2}{(1,00 \times 460cm)^2} \times$$

$$\times \left\{ \left(\frac{1,00}{1,00} \right)^2 \frac{791000cm^6}{1676cm^4} + \frac{(1,00 \times 460cm)^2 \times 8077kN/cm^2 \times 66,87cm^4}{\pi^2 \times 21000kN/cm^2 \times 1676cm^2} \right\}^{0,5} = 87301,05kNm$$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα y-y δίνεται ως εξής:

$$\lambda_y = \frac{L_y}{i_y} = \frac{1060cm}{18,48cm} = 57,36$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα y-y δίνεται ως εξής:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{57,36}{76,40} = 0,751$$

όπου

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{210000MPa}{355MPa}} = 76,4$$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα z-z δίνεται ως εξής:

$$\lambda_z = \frac{L_z}{i_z} = \frac{460cm}{4,12cm} = 111,65$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα z-z δίνεται ως εξής:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{111,65}{76,40} = 1,461$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1702cm^3 \times 35.5kN/cm^2}{87301,05kNcm}} = 0,832$$

Μειωτικοί συντελεστές χ

Για ανηγμένη λυγηρότητα κατά τον άξονα y $\bar{\lambda}_y = 0,751$, ο συντελεστής χ_y , για καμπύλη λυγισμού a, είναι ίσος με $\chi_y = 0,823$, ενώ για ανηγμένη λυγηρότητα κατά τον άξονα z $\bar{\lambda}_z = 1,461$ ο συντελεστής χ_z , για καμπύλη λυγισμού b, είναι ίσος με $\chi_z = 0,357$.

Για καμπύλη λυγισμού c ισχύει $\alpha=0,49$

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \left[1 + 0,49 \cdot (0,831 - 0,4) + 0,75 \times 0,831^2 \right] = 0,8645$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,8645 + \sqrt{0,8645^2 - 0,75 \times 0,831^2}} = 0,7443 < 1,00$$

Όπου $\beta=0,75$ και $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c) \left[1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] = 1 - 0,5(1 - 0,752) \left[1 - 2,0(0,831 - 0,8)^2 \right] = 0,8762$$

όπου

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33\psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 \times 0} = 0,752 \text{ για } \psi=0 \text{ για τριγωνικής μορφής διάγραμμα}$$

ροπών κατά y-y

Συνεπώς

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} = \frac{0,7443}{0,8762} = 0,849$$

4.2.1.1 1η περίπτωση φόρτισης: $N_{Ed} = 620 \text{ kN}$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης με τη Μέθοδο Β

1η περίπτωση φόρτισης: αξονική δύναμη: $N_{Ed} = 620 \text{ kN}$

ι) ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$C_{my} = 0,9 \quad \text{λόγω μετάθεσης}$$

$$C_{mZ} = 0,95 \quad \text{για παραβολικό διάγραμμα ροπών}$$

$$C_{mLT} = 0,6 \quad \text{για τριγωνικό διάγραμμα ροπών}$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,9 \left(1 + (0,751 - 0,2) \frac{620}{0,824 \times 98,82 \times 35,5} \right) = 1,00636 \leq$$
$$\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,9 \left(1 + 0,8 \frac{620}{0,824 \times 98,82 \times 35,5} \right) = 1,0544$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,6 \cdot 1,6084 = 0,96504$$

$$k_{zz} = C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,95 \left(1 + (2 \times 1,461 - 0,6) \frac{620}{0,357 \times 98,82 \times 35,5} \right) = 2,0420 \leq$$
$$\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,95 \left(1 + 1,4 \frac{620}{0,357 \times 98,82 \times 35,5} \right) = 1,6084$$

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = \left[1 - \frac{0,1 \times 1,461}{(0,6 - 0,25)} \frac{620}{0,357 \times 98,82 \times 35,5} \right] = 0,79335 \geq$$

$$\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = \left[1 - \frac{0,1}{(0,6 - 0,25)} \frac{620}{0,357 \times 98,82 \times 35,5} \right] = 0,85856$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό με τη Μέθοδο Β:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{620kN}{0,824 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 1,00636 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,96504 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,2145 + 0,3963 + 0,0704 = 0,6812$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{620kN}{0,357 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,85856 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,6084 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,4950 + 0,3381 + 0,1174 = 0,9505$$

υ) μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 1,00636 = 0,6038$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό με τη Μέθοδο Β:

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} = \frac{620kN}{0,824 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 1,00636 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,96504 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,2145 + 0,3963 + 0,0704 = 0,6812 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} = \frac{620kN}{0,357 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 0,6038 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,6084 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,4950 + 0,2378 + 0,1174 = 0,8502 \end{aligned}$$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης με τη Μέθοδο Α

Η ελαστική δύναμη καμπτικού λυγισμού περί τους άξονες y-y και z-z είναι αντίστοιχα:

$$N_{cr,y} = \pi^2 EI_y / L_y^2 = \pi^2 \times 21000kN/cm^2 \times 33740cm^4 / (1060cm)^2 = 6217,44kN$$

$$N_{cr,z} = \pi^2 EI_z / L_z^2 = \pi^2 \times 21000kN/cm^2 \times 1676cm^4 / (460cm)^2 = 1640,0kN$$

Το ελαστικό κρίσιμο φορτίο στρεπτικού λυγισμού δίνεται ως εξής:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_M^2} \left(GI_T + \frac{\pi^2 EI_w}{L_T^2} \right) = \frac{1}{358,48cm^2} \left(8077kN/cm^2 \times 66,87cm^4 + \frac{\pi^2 21000kN/cm^2 \times 791000cm^6}{(460cm)^2} \right) =$$

$$= 3665,77kN$$

όπου i_M είναι η πολική ροπή αδράνειας της διατομής ως προς το κέντρο διάτμησης:

$$i_M^2 = i_y^2 + i_z^2 = (18,48cm)^2 + (4,12cm)^2 = 358,48cm^2$$

Για τον υπολογισμό της ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}_o$ για στρεπτοκαμπτικό λυγισμό λόγω σταθερής καμπτικής ροπής, θα πρέπει να ξαναυπολογιστεί η ελαστική κρίσιμη ροπή σε πλευρικό λυγισμό. Έτσι θα έχουμε $\psi=1$ και για $k=1,00$:

$$C_1=1,00$$

Η ελαστική κρίσιμη ροπή σε αυτή την περίπτωση θα είναι:

$$M_{cr,LT}=87230,47Ncm/1,879 \times 1,00=46423,88kNcm$$

και η ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}_o$ θα είναι:

$$\bar{\lambda}_o = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr,LT}}} = \sqrt{\frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{46423,88kNcm}} = 1,1408$$

1η περίπτωση φόρτισης: αξονική δύναμη: $N_{Ed} = 620kN$

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_o &> 0,2\sqrt{C_1} \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)} = \\ &= 0,2\sqrt{1,879} \sqrt{\left(1 - \frac{620kN}{1640kN}\right) \left(1 - \frac{620kN}{3665,77kN}\right)} = 0,2323 \end{aligned}$$

Για $\psi_y=0$ υπολογίζεται ο συντελεστής C_{my} :

$$\begin{aligned} C_{my,0} &= \\ &= 0,79 + 0,21\psi_y + 0,36(\psi_y - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 0,79 + 0 + 0,36(0 - 0,33) \frac{620kN}{6217,44kN} = 0,778 \end{aligned}$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{20200kNcm}{620kN} \frac{98,82cm^2}{1500cm^3} = 2,146$$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{66,87cm^4}{33740cm^4} = 0,998 \geq 0$$

$$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 0,778 + (1 - 0,778) \frac{\sqrt{2,146} \cdot 0,998}{1 + \sqrt{2,146} \cdot 0,998} = 0,9098$$

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 0,9098^2 \frac{0,998}{\sqrt{\left(1 - \frac{620kN}{1640kN}\right) \left(1 - \frac{620kN}{3665,77kN}\right)}} = 1,149 \geq 1$$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{620kN}{\frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = 0,1767$$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} = \frac{1702cm^3}{1500cm^3} = 1,13467 < 1,5$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} = \frac{276,4cm^3}{176,4cm^3} = 1,566 > 1,5 \Rightarrow w_z = 1,50$$

$$C_{mZ,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,Z}} = 1 + 0,03 \times \frac{620}{1640} = 1,0113$$

$$b_{LT} = 0,5 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{\chi_{LT}} \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = 0,5 \times 0,998 \times 1,1408^2 \frac{20200}{0,849 \times 60400} \frac{716}{9812,2} = 0,0187$$

$$c_{LT} = 10 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} = 10 \times 0,998 \frac{1,1408^2}{5 + 1,4614^4} \frac{20200}{0,9098 \times 0,849 \times 60400} = 0,58817$$

$$d_{LT} = 2 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} M_{pl,z,Rd}} =$$

$$= 2 \times 0,998 \frac{1,1408}{0,1 + 1,4614^4} \frac{20200}{0,9098 \times 0,849 \times 60400} \frac{716}{1,0113 \times 9812,2} = 0,01527$$

$$e_{LT} = 1,7 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} = 1,7 \times 0,998 \frac{1,1408}{0,1 + 1,4614^4} \frac{20200}{0,9098 \times 0,849 \times 60400} =$$

$$= 0,17979$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} = 1 + (1,13467 - 1)$$

$$\left[\left(2 - \frac{1,6}{1,13467} \times 0,9098^2 \times 1,4614 - \frac{1,6}{1,13467} \times 0,9098^2 \times 1,4614^2 \right) \times 0,1767 - 0,0187 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{yy} = 0,94517 > \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} = \frac{1500 \text{ cm}^3}{1702 \text{ cm}^3} = 0,8813$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} =$$

$$= 1 + (1,5 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,0113^2 \times 1,4614^2}{1,5^5} \right) 0,1767 - 0,58817 \right] = 0,52666 \geq 0,6 \sqrt{\frac{1,5}{1,13467}} \frac{176,4}{276,4} =$$

$$= 0,440$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}}$$

$$C_{zy} = 1 + (1,13467 - 1) \left[\left(2 - 14 \times \frac{0,9098^2 \times 1,4614^2}{1,13467^5} \right) \times 0,1767 - 0,01527 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{zy} = 0,73244 > 0,6 \sqrt{\frac{1,13467}{1,50} \frac{1500cm^3}{1702cm^3}} = 0,4599$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) n_{pl} - e_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{zz} = 1 + (1,5 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,5} 1,0113^2 \times 1,4614 - \frac{1,6}{1,5} 1,0113^2 \times 1,4614^2 \right) 0,1767 - 0,17979 \right] =$$

$$= 0,74011 \geq \frac{176,4}{276,4} = 0,638$$

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{620kN}{6217,44kN}}{1 - 0,824 \frac{620kN}{6217,44kN}} = 0,9806$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \frac{620kN}{1640kN}}{1 - 0,357 \frac{620kN}{1640kN}} = 0,719$$

$$k_{yy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}} = 0,9098 \times 1,149 \times \frac{0,9806}{1 - \frac{620kN}{6217,44kN}} \times \frac{1}{0,94517} = 1,2089$$

$$k_{yz} = C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 1,0113 \frac{0,9806}{1 - \frac{620}{1640}} \frac{1}{0,52666} 0,6 \sqrt{\frac{1,5}{1,13467}} = 2,08857$$

$$k_{zy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} = 0,9098 \times 1,149 \times \frac{0,719}{1 - \frac{620kN}{6217,44kN}} \times \frac{1}{0,73244} \times 0,6 \sqrt{\frac{1,13467}{1,50}} =$$

$$= 0,59498$$

$$k_{zz} = C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}} = 1,0113 \frac{0,719}{1 - \frac{620}{1640}} \frac{1}{0,74011} = 1,57964$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό με τη Μέθοδο Α:

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} = \frac{620kN}{0,824 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 1,2089 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 2,08857 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,2145 + 0,4739 + 0,1524 = 0,8408 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} = \frac{620kN}{0,357 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 0,59498 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,57964 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,4950 + 0,2343 + 0,1153 = 0,8446 \end{aligned}$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό με το φύλλο Excel

ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΜΕΛΟΥΣ ΣΕ ΛΥΓΙΣΜΟ

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ (ΣΥΜΠΛΗΡΩΝΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΛΕΤΗΤΗ)

ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΛΟΥΣ

Σειρά διατομής:	IPE450
A (cm ²)	98,82
I _y (cm ⁴)	33740
W _{el,y} (cm ³)	1500
W _{pl,y} (cm ³)	1702
W _{el,z} (cm ³)	176,4
W _{pl,z} (cm ³)	276,4
I _t (cm ⁴)	66,87
I _z (cm ⁴)	1676
I _w (cm ⁶)	791000
i _y (cm)	18,48
i _z (cm)	4,12
π ²	9,87

ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΧΑΛΥΒΑΣ

Όριο διαρροής:	f _y (kN/cm ²)	35,5
Μέτρο ελαστικότητας:	E (kN/cm ²)	21000
Λόγος Poisson:	N	0,3
Μέτρο διάτμησης:	G (kN/cm ²)	8076,92
Συντελεστής ασφαλείας:	γ _{M1}	1

ΜΕΛΟΣ

Μήκη λυγισμού

L _y (cm)	1060
L _z (cm)	460

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ

M _{y,Rd} (kNcm)	60421
M _{z,Rd} (kNcm)	9812,2
N _{cr,y} (kN)	6224,00
N _{cr,z} (kN)	1641,70
i _M ² (cm ²)	358,48
N _{cr,T} (kN)	3667,99

Κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού

k	1,00	(και τα δύο άκρα του μέλους είναι στρεπτικά ελεύθερα)
k _w	1,00	(θεωρούμε ότι και τα δύο άκρα του μέλους είναι ελεύθερα σε στρέβλωση)

z_a	0,00	(το ίδιο βάρος ασκείται στο Κ.Β.)
z_s	0,00	(Κ.Δ.=Κ.Β.)
z_j	0,00	(για διατομή διπλής συμμετρίας)
z_g	0,00	
C1	1,879	(για $\psi=0$ για τριγωνικό διάγραμμα ροπών)
C2	0,00	
C3	0,939	

Άρα $M_{cr} = 87301,85$

ΛΥΓΗΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΜΕΙΩΤΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

$\lambda_1 = 76,41$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα $y-y$:

$\lambda_y = 57,36$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα $y-y$:

$\lambda_y = 0,751$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα $z-z$:

$\lambda_z = 111,65$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα $z-z$:

$\lambda_z = 1,461$

$\lambda_{max} = 1,461$

Για καμπύλη λυγισμού **a** κατά τον άξονα y έχω συντελεστή ατελειών:

$\alpha = 0,21$

Για καμπύλη λυγισμού **b** κατά τον άξονα z έχω συντελεστή ατελειών:

$\alpha = 0,34$

Περί τον άξονα $y-y$:

$\phi_y = 0,840$

$\chi_y = 0,823$

Περί τον άξονα $z-z$:

$\phi_z = 1,782$

$\chi_z = 0,357$

ΜΕΘΟΔΟΣ Β

Η ανηγμένη λυγηρότητα στρεπτοκαμπτικού λυγισμού είναι:

$\lambda_{lt} = 0,832$

Ειδικώς για ελατές διατομές ή ισοδύναμες συγκολλητές διατομές έχω:

Για καμπύλη λυγισμού **c** έχω:

$\alpha = 0,49$

$\phi_{lt} = 0,865$

όπου: $\lambda_{lt,0} = 0,4$

$\beta = 0,75$

$\chi_{lt} = 0,744$

Για τριγωνικό διάγραμμα ροπών κατά $y-y$:

ψ	0
k_c	0,752
f	0,876
$\chi_{it,mod}$	0,849

Γενική διαδικασία υπολογισμού χ_{it} :

Για καμπύλη λυγισμού **b** έχω:

α	0,34
ϕ_{it}	0,953
χ_{it}	0,705

ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ N (kN)= 620

ΚΑΜΠΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ: $M_{y,Ed}$ (kNcm) 20200 $M_{z,Ed}$ (kNcm) 716

Περίπτωση α) μέλος ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις

C_{my}	0,9	(λόγω μετάθεσης)
C_{mz}	0,95	(για παραβολικό διάγραμμα ροπών)
C_{mt}	0,6	(για τριγωνικό διάγραμμα ροπών)

Συντελεστές αλληλεπίδρασης (πλαστικές ιδιότητες διατομών κατηγορίας 1 και 2)

k_{yy}	$k_{yy,max}$	
1,0065	1,0547	
τελικά:	k_{yy}	1,0065
k_{zz}	$k_{zz,max}$	(για διατομές μορφής I)
2,0425	1,6086	
τελικά:	k_{zz}	1,6086

Για ανηγμένη λυγηρότητα $\lambda_z \geq 0,4$ ισχύει:

k_{zy}	$k_{zy,min}$
0,7933	0,8585

άρα για $\lambda_z \geq 0,4$, το k_{zy} ισούται με:

k_{zy}	0,8585
----------	--------

Ενώ, για $\lambda_z < 0,4$ ισχύει:

k_{zy}	$k_{zy,max}$
2,061	0,7933

άρα για $\lambda_z < 0,4$, το k_{zy} ισούται με:

k_{zy}	0,7933
----------	--------

Τελικώς, για την περίπτωσή μας, έχουμε:

k_{zy}	0,8585
k_{yz}	0,9652

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ-γ:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,2148	+	0,3965	+	0,0704	=
=	0,6817	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,4952	+	0,3382	+	0,1174	=
=	0,9507	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

Περίπτωση β) μέλος μη ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$k_{yy} = 1,0065$$

$$k_{zz} = 1,6086$$

$$k_{yz} = 0,9652$$

$$k_{zy} = 0,6039$$

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ-γ:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,2148	+	0,3965	+	0,0704	=
=	0,6817	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,4952	+	0,2379	+	0,1174	=
=	0,8504	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

ΜΕΘΟΔΟΣ Α

Η ελαστική κρίσιμη ροπή σε πλευρικό λυγισμό λόγω σταθερής καμπτικής ροπής είναι:

$$M_{cr,lt} = 46461,87$$

όπου, για $\psi=1$ και $k=1$ έχω:

$$C1 = 1$$

$$C2 = 0$$

$$C3 = 1$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα λ_0 ισούται με:

$$\lambda_0 = 1,140$$

Συντελεστές ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής:

$$\text{Για } \psi_y = 0$$

$$C_{m,y,0} = 0,7782$$

Για παραβολικό διάγραμμα ροπών:

$$C_{mz,0} = 1,0113$$

$$a_{lt} = 0,9980$$

$$\epsilon_y = 2,1464 \quad (\text{για διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3})$$

Για $\lambda_0 \leq 0,232$ ισχύουν:

$$C_{m,y} = 0,7782$$

$$C_{mz} = 1,0113$$

$$C_{m,lt} = 1,0$$

Εάν $\lambda_0 > 0,232$ ισχύουν:

$$C_{m,y} = 0,9099$$

C_{mz} 1,0113

C_{mlt} 1,1490

Στην περίπτωση μας, για το λ_0 :

C_{my} 0,9099

C_{mz} 1,0113

C_{mlt} 1,1490

Βοηθητικοί συντελεστές

n_{pl} 0,1767

w_y 1,1347

w_z 1,5000

μ_y 0,9808

μ_z 0,7193

b_{lt} 0,0187

c_{lt} 0,5878

d_{lt} 0,0153

e_{lt} 0,1798

C_{yy} 0,9452

$C_{yy,min}$ 0,8813

άρα τελικά έχουμε: C_{yy} 0,9452

C_{yz} 0,5271

$C_{yz,min}$ 0,4403

άρα τελικά έχουμε: C_{yz} 0,5271

C_{zy} 0,7324

$C_{zy,min}$ 0,4599

άρα τελικά έχουμε: C_{zy} 0,7324

C_{zz} 0,7401

$C_{zz,min}$ 0,6382

άρα τελικά έχουμε: C_{zz} 0,7401

Συντελεστές αλληλεπίδρασης (πλαστικές ιδιότητες διατομών κατηγορίας 1 και 2)

k_{yy} 1,2049

k_{yz} 2,0860

k_{zy} 0,5951

k_{zz} 1,5793

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ - γ :

όρος αξονικής δύναμης	+	όρος καμπτικής ροπής γ - γ	+	όρος καμπτικής ροπής z-z	=
0,2148		0,4746		0,1522	
=		0,8417		ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ	

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z
0,4952	+	0,2344
=	0,8448	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ

4.2.1.2 2η περίπτωση φόρτισης: $N_{Ed} = 200 \text{ kN}$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης με τη Μέθοδο Β

2η περίπτωση φόρτισης: αξονική δύναμη: $N_{Ed} = 200 \text{ kN}$

ι) ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$C_{my} = 0,9 \quad \text{λόγω μετάθεσης}$$

$$C_{mz} = 0,95 \quad \text{για παραβολικό διάγραμμα ροπών}$$

$$C_{mLT} = 0,6 \quad \text{για τριγωνικό διάγραμμα ροπών}$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,9 \left(1 + (0,75 - 0,2) \frac{200}{0,824 \times 98,82 \times 35,5} \right) = 0,93425 \leq$$

$$\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,9 \left(1 + 0,8 \frac{200}{0,824 \times 98,82 \times 35,5} \right) = 0,94982$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,6 \cdot 1,16239 = 0,69743$$

$$k_{zz} = C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,95 \left(1 + (2 \times 1,4614 - 0,6) \frac{200}{0,357 \times 98,82 \times 35,5} \right) = 1,30239 \leq$$

$$\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,95 \left(1 + 1,4 \frac{200}{0,357 \times 98,82 \times 35,5} \right) = 1,16239$$

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = \left[1 - \frac{0,1 \times 1,4614}{(0,6 - 0,25)} \frac{200}{0,357 \times 98,82 \times 35,5} \right] = 0,93332 \geq$$

$$\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = \left[1 - \frac{0,1}{(0,6 - 0,25)} \frac{200}{0,357 \times 98,82 \times 35,5} \right] = 0,95437$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λογισμό με τη Μέθοδο Β:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{200kN}{0,824 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,93425 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,69743 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,0692 + 0,3679 + 0,0509 = 0,4880$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{200kN}{0,357 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,95437 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,16239 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,1597 + 0,3758 + 0,0848 = 0,6203$$

ii) μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,93425 = 0,56055$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λογισμό με τη Μέθοδο Β:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{200kN}{0,824 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,93425 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,69743 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,0692 + 0,3679 + 0,0509 = 0,4880$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{200kN}{0,357 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,56055 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,16239 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,1597 + 0,2207 + 0,0848 = 0,4652$$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης με τη Μέθοδο Α

2^η περίπτωση φόρτισης: αξονική δύναμη: $N_{Ed} = 200kN$

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_0 &> 0,2\sqrt{C_1} \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)} = \\ &= 0,2\sqrt{1,879} \sqrt{\left(1 - \frac{200kN}{1640kN}\right)\left(1 - \frac{200kN}{3665,77kN}\right)} = 0,2616\end{aligned}$$

Για $\psi_y=0$ υπολογίζεται ο συντελεστής C_{my} :

$$\begin{aligned}C_{my,0} &= \\ &= 0,79 + 0,21\psi_y + 0,36(\psi_y - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 0,79 + 0 + 0,36(0 - 0,33) \frac{200kN}{6217,44kN} = 0,786\end{aligned}$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{20200kNcm}{200kN} \frac{98,82cm^2}{1500cm^3} = 6,654$$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{66,87cm^4}{33740cm^4} = 0,998 \geq 0$$

$$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 0,786 + (1 - 0,786) \frac{\sqrt{6,654} \cdot 0,998}{1 + \sqrt{6,654} \cdot 0,998} = 0,9401$$

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 0,9401^2 \frac{0,998}{\sqrt{\left(1 - \frac{200kN}{1640kN}\right)\left(1 - \frac{200kN}{3665,77kN}\right)}} = 0,968 \geq 1$$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{200kN}{\frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = 0,057$$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} = \frac{1702cm^3}{1500cm^3} = 1,13467 < 1,5$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} = \frac{276,4cm^3}{176,4cm^3} = 1,566 > 1,5 \Rightarrow w_z = 1,50$$

$$C_{mZ,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,Z}} = 1 + 0,03 \times \frac{200}{1640} = 1,003658$$

$$b_{LT} = 0,5 a_{LT} \bar{\lambda}_0^{-2} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = 0,5 \times 0,998 \times 1,1408^2 \frac{20200}{0,849 \times 60400} \frac{716}{9812,2} = 0,0187$$

$$c_{LT} = 10 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} = 10 \times 0,998 \frac{1,1408^2}{5 + 1,4614^4} \frac{20200}{0,9401 \times 0,849 \times 60400} = 0,5692$$

$$d_{LT} = 2 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} M_{pl,z,Rd}} =$$

$$= 2 \times 0,998 \frac{1,1408}{0,1 + 1,4614^4} \frac{20200}{0,9401 \times 0,849 \times 60400} \frac{716}{1,003658 \times 9812,2} = 0,01488$$

$$e_{LT} = 1,7 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} = 1,7 \times 0,998 \frac{1,1408}{0,1 + 1,4614^4} \frac{20200}{0,9401 \times 0,849 \times 60400} =$$

$$= 0,17404$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} = 1 + (1,13467 - 1)$$

$$\left[\left(2 - \frac{1,6}{1,13467} \times 0,9401^2 \times 1,4614 - \frac{1,6}{1,13467} \times 0,9401^2 \times 1,4614^2 \right) \times 0,057 - 0,0187 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{yy} = 0,9784 > \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} = \frac{1500 \text{cm}^3}{1702 \text{cm}^3} = 0,8813$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} =$$

$$= 1 + (1,5 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,003658^2 \times 1,4614^2}{1,5^5} \right) 0,057 - 0,5692 \right] = 0,65936 \geq 0,6 \sqrt{\frac{1,5}{1,13467}} \frac{176,4}{276,4} = 0,440$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} = 1 + (1,13467 - 1) \left[\left(2 - 14 \times \frac{0,9401^2 \times 1,4614^2}{1,13467^5} \right) \times 0,057 - 0,01488 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{zy} = 0,9055 > 0,6 \sqrt{\frac{1,13467}{1,50} \frac{1500cm^3}{1702cm^3}} = 0,4599$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) n_{pl} - e_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{zz} = 1 + (1,5 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,5} 1,003658^2 \times 1,4614 - \frac{1,6}{1,5} 1,003658^2 \times 1,4614^2 \right) 0,057 - 0,17404 \right] =$$

$$= 0,8598 \geq \frac{176,4}{276,4} = 0,638$$

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{200kN}{6217,44kN}}{1 - 0,824 \frac{200kN}{6217,44kN}} = 0,994$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \frac{200kN}{1640kN}}{1 - 0,357 \frac{200kN}{1640kN}} = 0,9179$$

$$k_{yy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}} = 0,9401 \times 1,0 \times \frac{0,994}{1 - \frac{200kN}{6217,44kN}} \times \frac{1}{0,9784} = 0,98529$$

$$k_{yz} = C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 1,003658 \frac{0,994}{1 - \frac{200}{1640}} \frac{1}{0,7004} 0,6 \sqrt{\frac{1,5}{1,13467}} = 1,18882$$

$$k_{zy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} = 0,9401 \times 1,0 \times \frac{0,9179}{1 - \frac{200kN}{6217,44kN}} \times \frac{1}{0,9055} \times$$

$$\times 0,6 \sqrt{\frac{1,13467}{1,50}} = 0,51741$$

$$k_{zz} = C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}} = 1,003658 \frac{0,9179}{1 - \frac{200}{1640}} \frac{1}{0,8598} = 1,22036$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λογισμό με τη Μέθοδο Α:

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{200kN}{0,824 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 0,98529 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,18882 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,0692 + 0,3862 + 0,0867 = 0,5421 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{200kN}{0,357 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 0,51741 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,22036 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,1597 + 0,2059 + 0,0891 = 0,4547 \end{aligned}$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό με Excel

ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΜΕΛΟΥΣ ΣΕ ΛΥΓΙΣΜΟ

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ (ΣΥΜΠΛΗΡΩΝΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΛΕΤΗΤΗ)

ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΛΟΥΣ

Σειρά διατομής:	ΙΡΕ450
A (cm ²)	98,82
I _y (cm ⁴)	33740
W _{el,y} (cm ³)	1500
W _{pl,y} (cm ³)	1702
W _{el,z} (cm ³)	176,4
W _{pl,z} (cm ³)	276,4
I _t (cm ⁴)	66,87
I _z (cm ⁴)	1676
I _w (cm ⁶)	791000
i _y (cm)	18,48
i _z (cm)	4,12
π ²	9,87

ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΧΑΛΥΒΑΣ

Όριο διαρροής:	f _y (kN/cm ²)	35,5
Μέτρο ελαστικότητας:	E (kN/cm ²)	21000
Λόγος Poisson:	ν	0,3
Μέτρο διάτμησης:	G (kN/cm ²)	8076,92
Συντελεστής ασφαλείας:	γ _{M1}	1

ΜΕΛΟΣ

Μήκη λυγισμού

L _y (cm)	1060
L _z (cm)	460

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ

M _{y,Rd} (kNcm)	60421
M _{z,Rd} (kNcm)	9812,2
N _{cr,y} (kN)	6224,00
N _{cr,z} (kN)	1641,70
i _M ² (cm ²)	358,48
N _{cr,T} (kN)	3667,99

Κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού

k	1,00	(και τα δύο άκρα του μέλους είναι στρεπτικά ελεύθερα)
k _w	1,00	(θεωρούμε ότι και τα δύο άκρα του μέλους είναι ελεύθερα σε στρέβλωση)

z_a	0,00	(το ίδιο βάρος ασκείται στο Κ.Β.)
z_s	0,00	(Κ.Δ.=Κ.Β.)
z_j	0,00	(για διατομή διπλής συμμετρίας)
z_g	0,00	
C1	1,879	(για $\psi=0$ για τριγωνικό διάγραμμα ροπών)
C2	0,00	
C3	0,939	

Άρα $M_{cr} = 87301,85$

ΛΥΓΗΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΜΕΙΩΤΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

$\lambda_1 = 76,41$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα $y-y$:

$\lambda_y = 57,36$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα $y-y$:

$\lambda_y = 0,751$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα $z-z$:

$\lambda_z = 111,65$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα $z-z$:

$\lambda_z = 1,461$

$\lambda_{max} = 1,461$

Για καμπύλη λυγισμού **a** κατά τον άξονα y έχω συντελεστή ατελειών:

$\alpha = 0,21$

Για καμπύλη λυγισμού **b** κατά τον άξονα z έχω συντελεστή ατελειών:

$\alpha = 0,34$

Περί τον άξονα $y-y$:

$\phi_y = 0,840$

$\chi_y = 0,823$

Περί τον άξονα $z-z$:

$\phi_z = 1,782$

$\chi_z = 0,357$

ΜΕΘΟΔΟΣ Β

Η ανηγμένη λυγηρότητα στρεπτοκαμπτικού λυγισμού είναι:

$\lambda_{lt} = 0,832$

Ειδικώς για ελατές διατομές ή ισοδύναμες συγκολλητές διατομές έχω:

Για καμπύλη λυγισμού **c** έχω:

$\alpha = 0,49$

$\phi_{lt} = 0,865$

όπου: $\lambda_{lt,0} = 0,4$

$\beta = 0,75$

$\chi_{lt} = 0,744$

Για τριγωνικό διάγραμμα ροπών κατά $y-y$:

ψ	0
k_c	0,752
f	0,876
$\chi_{it,mod}$	0,849

Γενική διαδικασία υπολογισμού χ_{lt} :

Για καμπύλη λυγισμού b έχω:

α	0,34
ϕ_{lt}	0,953
χ_{lt}	0,705

ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ N (kN)= 200

ΚΑΜΠΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ: $M_{y,Ed}$ (kNcm) 20200 $M_{z,Ed}$ (kNcm) 716

Περίπτωση α) μέλος ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις

C_{my}	0,9	(λόγω μετάθεσης)
C_{mz}	0,95	(για παραβολικό διάγραμμα ροπών)
C_{m1t}	0,6	(για τριγωνικό διάγραμμα ροπών)

Συντελεστές αλληλεπίδρασης (πλαστικές ιδιότητες διατομών κατηγορίας 1 και 2)

k_{yy}	$k_{yy,max}$	
0,9343	0,9499	
τελικά:	k_{yy}	0,9343
k_{zz}	$k_{zz,max}$	(για διατομές μορφής I)
1,3024	1,1624	
τελικά:	k_{zz}	1,1624

Για ανηγμένη λυγηρότητα $\lambda_z \geq 0,4$ ισχύει:

k_{zy}	$k_{zy,min}$
0,9333	0,9544

άρα για $\lambda_z \geq 0,4$, το k_{zy} ισούται με:

k_{zy}	0,9544
----------	--------

Ενώ, για $\lambda_z < 0,4$ ισχύει:

k_{zy}	$k_{zy,max}$
2,061	0,9333

άρα για $\lambda_z < 0,4$, το k_{zy} ισούται με:

k_{zy}	0,9333
----------	--------

Τελικώς, για την περίπτωση μας, έχουμε:

k_{zy}	0,9544
k_{yz}	0,6975

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ - γ :

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ - γ	όρος καμπτικής ροπής z - z	
0,0693	+	0,3680	+
		0,0509	=
=	0,4882	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ	

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,1597	+	0,3759	+	0,0848	=
=	0,6205	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

Περίπτωση β) μέλος μη ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$k_{yy} = 0,9343$$

$$k_{zz} = 1,1624$$

$$k_{yz} = 0,6975$$

$$k_{zy} = 0,5606$$

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ-γ:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,0693	+	0,3680	+	0,0509	=
=	0,4882	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,1597	+	0,2208	+	0,0848	=
=	0,4654	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

ΜΕΘΟΔΟΣ Α

Η ελαστική κρίσιμη ροπή σε πλευρικό λυγισμό λόγω σταθερής καμπτικής ροπής είναι:

$$M_{cr,lt} = 46461,87$$

όπου, για $\psi=1$ και $k=1$ έχω:

$$C1 = 1$$

$$C2 = 0$$

$$C3 = 1$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα λ_0 ισούται με:

$$\lambda_0 = 1,140$$

Συντελεστές ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής:

$$\text{Για } \psi_y = 0$$

$$C_{m_y,0} = 0,7862$$

Για παραβολικό διάγραμμα ροπών:

$$C_{m_z,0} = 1,0037$$

$$a_{lt} = 0,9980$$

$$\epsilon_y = 6,6539 \quad (\text{για διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3})$$

Για $\lambda_0 \leq 0,262$ ισχύουν:

$$C_{m_y} = 0,7862$$

$$C_{m_z} = 1,0037$$

$$C_{m_{lt}} = 1,0$$

Εάν $\lambda_0 > 0,262$ ισχύουν:

$$C_{m_y} = 0,9402$$

C_{mz} 1,0037

C_{mlt} 0,9682

Στην περίπτωση μας, για το λ_0 :

C_{my} 0,9402

C_{mz} 1,0037

C_{mlt} 1,0000

Βοηθητικοί συντελεστές

n_{pl} 0,0570

w_y 1,1347

w_z 1,5000

μ_y 0,9941

μ_z 0,9181

b_{lt} 0,0187

c_{lt} 0,5689

d_{lt} 0,0149

e_{lt} 0,1740

C_{yy} 0,9784

$C_{yy,min}$ 0,8813

άρα τελικά έχουμε: C_{yy} 0,9784

C_{yz} 0,6595

$C_{yz,min}$ 0,4403

άρα τελικά έχουμε: C_{yz} 0,6595

C_{zy} 0,9055

$C_{zy,min}$ 0,4599

άρα τελικά έχουμε: C_{zy} 0,9055

C_{zz} 0,8599

$C_{zz,min}$ 0,6382

άρα τελικά έχουμε: C_{zz} 0,8599

Συντελεστές αλληλεπίδρασης (πλαστικές ιδιότητες διατομών κατηγορίας 1 και 2)

k_{yy} 0,9870

k_{yz} 1,1884

k_{zy} 0,5140

k_{zz} 1,2203

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ - γ :

όρος αξονικής δύναμης	+	όρος καμπτικής ροπής γ - γ	+	όρος καμπτικής ροπής z-z	=
0,0693		0,3888		0,0867	
=		0,5448		ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ	

κατά τον z-z:

0,1597	+	0,2025	+	0,0890	=
=		0,4512		ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ	

4.2.1.3 3η περίπτωση φόρτισης: $N_{Ed} = 310 \text{ kN}$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης με τη Μέθοδο Β

3η περίπτωση φόρτισης: αξονική δύναμη: $N_{Ed} = 310 \text{ kN}$

ι) ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$C_{my} = 0,9 \quad \text{λόγω μετάθεσης}$$

$$C_{mz} = 0,95 \quad \text{για παραβολικό διάγραμμα ροπών}$$

$$C_{mLT} = 0,6 \quad \text{για τριγωνικό διάγραμμα ροπών}$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,9 \left(1 + (0,75 - 0,2) \frac{310}{0,824 \times 98,82 \times 35,5} \right) = 0,95308 \leq$$

$$\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,9 \left(1 + 0,8 \frac{310}{0,824 \times 98,82 \times 35,5} \right) = 0,97721$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,6 \cdot 1,27921 = 0,76753$$

$$k_{zz} = C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,95 \left(1 + (2 \times 1,4614 - 0,6) \frac{310}{0,357 \times 98,82 \times 35,5} \right) = 1,49620 \leq$$

$$\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,95 \left(1 + 1,4 \frac{310}{0,357 \times 98,82 \times 35,5} \right) = 1,27921$$

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = \left[1 - \frac{0,1 \times 1,4614}{(0,6 - 0,25)} \frac{310}{0,357 \times 98,82 \times 35,5} \right] = 0,89665 \geq$$

$$\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = \left[1 - \frac{0,1}{(0,6 - 0,25)} \frac{310}{0,357 \times 98,82 \times 35,5} \right] = 0,92928$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό με τη Μέθοδο Β:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{310kN}{0,824 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,95308 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,76753 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,1072 + 0,3753 + 0,0560 = 0,5385$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{310kN}{0,357 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,92928 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,27921 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,2475 + 0,3659 + 0,0933 = 0,7067$$

υ) μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,95308 = 0,57185$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό με τη Μέθοδο Β:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{310kN}{0,824 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,95308 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,76753 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,1072 + 0,3753 + 0,0560 = 0,5385$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{310kN}{0,357 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,57185 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,27921 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,2475 + 0,2252 + 0,0933 = 0,5660$$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης με τη Μέθοδο Α

3η περίπτωση φόρτισης: αξονική δύναμη: $N_{Ed} = 310kN$

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_0 &> 0,2\sqrt{C_1} \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)} = \\ &= 0,2\sqrt{1,879} \sqrt{\left(1 - \frac{310kN}{1640kN}\right)\left(1 - \frac{310kN}{3665,77kN}\right)} = 0,2544\end{aligned}$$

Για $\psi_y=0$ υπολογίζεται ο συντελεστής C_{my} :

$$\begin{aligned}C_{my,0} &= \\ &= 0,79 + 0,21\psi_y + 0,36(\psi_y - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 0,79 + 0 + 0,36(0 - 0,33) \frac{310kN}{6217,44kN} = 0,784\end{aligned}$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{20200kNcm}{310kN} \frac{98,82cm^2}{1500cm^3} = 4,293$$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{66,87cm^4}{33740cm^4} = 0,998 \geq 0$$

$$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y a_{LT}}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y a_{LT}}} = 0,784 + (1 - 0,784) \frac{\sqrt{4,293 \cdot 0,998}}{1 + \sqrt{4,293 \cdot 0,998}} = 0,9295$$

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 0,9295^2 \frac{0,998}{\sqrt{\left(1 - \frac{310kN}{1640kN}\right)\left(1 - \frac{310kN}{3665,77kN}\right)}} = 1,00156 \geq 1$$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{310kN}{\frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = 0,088367$$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} = \frac{1702cm^3}{1500cm^3} = 1,13467 < 1,5$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} = \frac{276,4cm^3}{176,4cm^3} = 1,566 > 1,5 \Rightarrow w_z = 1,50$$

$$C_{mZ,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,Z}} = 1 + 0,03 \times \frac{310}{1640} = 1,00567$$

$$b_{LT} = 0,5 a_{LT} \bar{\lambda}_0^{-2} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = 0,5 \times 0,998 \times 1,1408^2 \frac{20200}{0,849 \times 60400} \frac{716}{9812,2} = 0,0187$$

$$c_{LT} = 10 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} = 10 \times 0,998 \frac{1,1408^2}{5 + 1,4614^4} \frac{20200}{0,9295 \times 0,849 \times 60400} = 0,57571$$

$$d_{LT} = 2 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} M_{pl,z,Rd}} =$$

$$= 2 \times 0,998 \frac{1,1408}{0,1 + 1,4614^4} \frac{20200}{0,9295 \times 0,849 \times 60400} \frac{716}{1,00567 \times 9812,2} = 0,01502$$

$$e_{LT} = 1,7 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} = 1,7 \times 0,998 \frac{1,1408}{0,1 + 1,4614^4} \frac{20200}{0,9295 \times 0,849 \times 60400} =$$

$$= 0,17598$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} = 1 + (1,13467 - 1)$$

$$\left[\left(2 - \frac{1,6}{1,13467} \times 0,9295^2 \times 1,4614 - \frac{1,6}{1,13467} \times 0,9295^2 \times 1,4614^2 \right) \times 0,0884 - 0,0187 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{yy} = 0,96912 > \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} = \frac{1500 \text{cm}^3}{1702 \text{cm}^3} = 0,8813$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} =$$

$$= 1 + (1,5 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,00567^2 \times 1,4614^2}{1,5^5} \right) 0,0884 - 0,5757 \right] = 0,62445 \geq 0,6 \sqrt{\frac{1,5}{1,13467}} \frac{176,4}{276,4} = 0,440$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} = 1 + (1,13467 - 1) \left[\left(2 - 14 \times \frac{0,9295^2 \times 1,4614^2}{1,13467^5} \right) \times 0,0884 - 0,01502 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{zy} = 0,85829 > 0,6 \sqrt{\frac{1,13467}{1,50} \frac{1500cm^3}{1702cm^3}} = 0,4599$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max}^{-2} \right) n_{pl} - e_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow C_{zz} &= 1 + (1,5 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,5} 1,00567^2 \times 1,4614 - \frac{1,6}{1,5} 1,00567^2 \times 1,4614^2 \right) 0,0884 - 0,17598 \right] = \\ &= 0,82889 \geq \frac{176,4}{276,4} = 0,638 \end{aligned}$$

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{310kN}{6217,44kN}}{1 - 0,824 \frac{310kN}{6217,44kN}} = 0,9907$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \frac{310kN}{1640kN}}{1 - 0,357 \frac{310kN}{1640kN}} = 0,8696$$

$$k_{yy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}} = 0,9295 \times 1,00156 \times \frac{0,9907}{1 - \frac{310kN}{6217,44kN}} \times \frac{1}{0,96912} = 1,00177$$

$$k_{yz} = C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 1,00567 \frac{0,9907}{1 - \frac{310}{1640}} \frac{1}{0,62445} 0,6 \sqrt{\frac{1,5}{1,13467}} = 1,35724$$

$$\begin{aligned} k_{zy} &= C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} = 0,9295 \times 1,00156 \times \frac{0,8696}{1 - \frac{310kN}{6217,44kN}} \times \frac{1}{0,85829} \times \\ &\times 0,6 \sqrt{\frac{1,13467}{1,50}} = 0,51809 \end{aligned}$$

$$k_{zz} = C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}} = 1,00567 \frac{0,8696}{1 - \frac{310}{1640}} \frac{1}{0,82889} = 1,30099$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λογισμό με τη Μέθοδο Α:

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{310kN}{0,824 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 1,00177 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,35724 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,1072 + 0,3945 + 0,0990 = 0,6007 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{310kN}{0,357 \times \frac{98,82cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 0,51809 \frac{20200kNcm}{0,849 \times \frac{1702cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,30099 \frac{716kNcm}{\frac{276,4cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,2475 + 0,2040 + 0,0949 = 0,5464 \end{aligned}$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό με Excel

ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΜΕΛΟΥΣ ΣΕ ΛΥΓΙΣΜΟ

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ (ΣΥΜΠΛΗΡΩΝΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΛΕΤΗΤΗ)

ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΛΟΥΣ

Σειρά διατομής:	ΙΡΕ450
A (cm ²)	98,82
I _y (cm ⁴)	33740
W _{el,y} (cm ³)	1500
W _{pl,y} (cm ³)	1702
W _{el,z} (cm ³)	176,4
W _{pl,z} (cm ³)	276,4
I _t (cm ⁴)	66,87
I _z (cm ⁴)	1676
I _w (cm ⁶)	791000
i _y (cm)	18,48
i _z (cm)	4,12
π ²	9,87

ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΧΑΛΥΒΑΣ

Όριο διαρροής:	f _y (kN/cm ²)	35,5
Μέτρο ελαστικότητας:	E (kN/cm ²)	21000
Λόγος Poisson:	N	0,3
Μέτρο διάτμησης:	G (kN/cm ²)	8076,92
Συντελεστής ασφαλείας:	γ _{M1}	1

ΜΕΛΟΣ

Μήκη λυγισμού

L _y (cm)	1060
L _z (cm)	460

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ

M _{y,Rd} (kNcm)	60421
M _{z,Rd} (kNcm)	9812,2
N _{cr,y} (kN)	6224,00
N _{cr,z} (kN)	1641,70
i _M ² (cm ²)	358,48
N _{cr,T} (kN)	3667,99

Κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού

k	1,00	(και τα δύο άκρα του μέλους είναι στρεπτικά ελεύθερα)
k _w	1,00	(θεωρούμε ότι και τα δύο άκρα του μέλους είναι ελεύθερα σε στρέβλωση)

z_a	0,00	(το ίδιο βάρος ασκείται στο Κ.Β.)
z_s	0,00	(Κ.Δ.=Κ.Β.)
z_j	0,00	(για διατομή διπλής συμμετρίας)
z_g	0,00	
C1	1,879	(για $\psi=0$ για τριγωνικό διάγραμμα ροπών)
C2	0,00	
C3	0,939	

Άρα $M_{cr} = 87301,85$

ΛΥΓΗΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΜΕΙΩΤΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

$\lambda_1 = 76,41$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα γ-γ:

$\lambda_y = 57,36$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα γ-γ:

$\lambda_y = 0,751$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα z-z:

$\lambda_z = 111,65$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα z-z:

$\lambda_z = 1,461$

$\lambda_{max} = 1,461$

Για καμπύλη λυγισμού **a** κατά τον άξονα γ έχω συντελεστή ατελειών:

$\alpha = 0,21$

Για καμπύλη λυγισμού **b** κατά τον άξονα z έχω συντελεστή ατελειών:

$\alpha = 0,34$

Περί τον άξονα γ-γ:

$\phi_y = 0,840$

$\chi_y = 0,823$

Περί τον άξονα z-z:

$\phi_z = 1,782$

$\chi_z = 0,357$

ΜΕΘΟΔΟΣ Β

Η ανηγμένη λυγηρότητα στρεπτοκαμπτικού λυγισμού είναι:

$\lambda_{lt} = 0,832$

Ειδικώς για ελατές διατομές ή ισοδύναμες συγκολλητές διατομές έχω:

Για καμπύλη λυγισμού **c** έχω:

$\alpha = 0,49$

$\phi_{lt} = 0,865$

όπου: $\lambda_{lt,0} = 0,4$

$\beta = 0,75$

$\chi_{lt} = 0,744$

Για τριγωνικό διάγραμμα ροπών κατά γ-γ:

ψ	0
k_c	0,752
f	0,876
$\chi_{it,mod}$	0,849

Γενική διαδικασία υπολογισμού χ_{it} :

Για καμπύλη λυγισμού b έχω:

α	0,34
ϕ_{it}	0,953
χ_{it}	0,705

ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ N (kN)= 310

ΚΑΜΠΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ: $M_{y,Ed}$ (kNcm) 20200 $M_{z,Ed}$ (kNcm) 716

Περίπτωση α) μέλος ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις

C_{my}	0,9	(λόγω μετάθεσης)
C_{mz}	0,95	(για παραβολικό διάγραμμα ροπών)
C_{mt}	0,6	(για τριγωνικό διάγραμμα ροπών)

Συντελεστές αλληλεπίδρασης (πλαστικές ιδιότητες διατομών κατηγορίας 1 και 2)

k_{yy}	$k_{yy,max}$	
0,9532	0,9773	
τελικά:	k_{yy}	0,9532
k_{zz}	$k_{zz,max}$	(για διατομές μορφής I)
1,4962	1,2793	
τελικά:	k_{zz}	1,2793

Για ανηγμένη λυγηρότητα $\lambda_z \geq 0,4$ ισχύει:

k_{zy}	$k_{zy,min}$
0,8966	0,9293

άρα για $\lambda_z \geq 0,4$, το k_{zy} ισούται με:

k_{zy}	0,9293
----------	--------

Ενώ, για $\lambda_z < 0,4$ ισχύει:

k_{zy}	$k_{zy,max}$
2,061	0,8966

άρα για $\lambda_z < 0,4$, το k_{zy} ισούται με:

k_{zy}	0,8966
----------	--------

Τελικώς, για την περίπτωσή μας, έχουμε:

k_{zy}	0,9293
k_{yz}	0,7676

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ - γ :

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ - γ	όρος καμπτικής ροπής z - z	
0,1074	+	0,3755	+
		0,0560	=
=	0,5389	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ	

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z		
0,2476	+	0,3660		
		+	0,0934	=
=	0,7070	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ		

Περίπτωση β) μέλος μη ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$k_{yy} = 0,9532$$

$$k_{zz} = 1,2793$$

$$k_{yz} = 0,7676$$

$$k_{zy} = 0,5719$$

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ-γ:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z		
0,1074	+	0,3755		
		+	0,0560	=
=	0,5389	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ		

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z		
0,2476	+	0,2253		
		+	0,0934	=
=	0,5662	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ		

ΜΕΘΟΔΟΣ Α

Η ελαστική κρίσιμη ροπή σε πλευρικό λυγισμό λόγω σταθερής καμπτικής ροπής είναι:

$$M_{cr,lt} = 46461,87$$

όπου, για $\psi=1$ και $k=1$ έχω:

$$C1 = 1$$

$$C2 = 0$$

$$C3 = 1$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα λ_0 ισούται με:

$$\lambda_0 = 1,140$$

Συντελεστές ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής:

$$\text{Για } \psi_y = 0$$

$$C_{my,0} = 0,7841$$

Για παραβολικό διάγραμμα ροπών:

$$C_{mz,0} = 1,0057$$

$$a_{lt} = 0,9980$$

$$\epsilon_y = 4,2928 \quad (\text{για διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3})$$

Για $\lambda_0 \leq 0,254$ ισχύουν:

$$C_{my} = 0,7841$$

$$C_{mz} = 1,0057$$

$$C_{mlt} = 1,0$$

Εάν $\lambda_0 > 0,254$ ισχύουν:

$$C_{my} = 0,9296$$

$$C_{mz} = 1,0057$$

$$C_{mlt} = 1,0008$$

Στην περίπτωση μας, για το λ₀:

$$C_{my} = 0,9296$$

$$C_{mz} = 1,0057$$

$$C_{mlt} = 1,0008$$

Βοηθητικοί συντελεστές

$$n_{pl} = 0,0884$$

$$w_y = 1,1347$$

$$w_z = 1,5000$$

$$\mu_y = 0,9908$$

$$\mu_z = 0,8698$$

$$b_{lt} = 0,0187$$

$$c_{lt} = 0,5753$$

$$d_{lt} = 0,0150$$

$$e_{lt} = 0,1760$$

$$C_{yy} = 0,9691$$

$$C_{yy,min} = 0,8813$$

$$\text{άρα τελικά έχουμε: } C_{yy} = 0,9691$$

$$C_{yz} = 0,6248$$

$$C_{yz,min} = 0,4403$$

$$\text{άρα τελικά έχουμε: } C_{yz} = 0,6248$$

$$C_{zy} = 0,8583$$

$$C_{zy,min} = 0,4599$$

$$\text{άρα τελικά έχουμε: } C_{zy} = 0,8583$$

$$C_{zz} = 0,8290$$

$$C_{zz,min} = 0,6382$$

$$\text{άρα τελικά έχουμε: } C_{zz} = 0,8290$$

Συντελεστές αλληλεπίδρασης (πλαστικές ιδιότητες διατομών κατηγορίας 1 και 2)

$$k_{yy} = 1,0010$$

$$k_{yz} = 1,3563$$

$$k_{zy} = 0,5178$$

$$k_{zz} = 1,3008$$

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ-γ:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,1074	+	0,3943	+	0,0990	=
=	0,6007	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης		όρος καμπτικής ροπής γ-γ		όρος καμπτικής ροπής z-z	
0,2476	+	0,2040	+	0,0949	=
=		0,5465		ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ	

4.2.2 Μέλος με διατομή ΗΕΒ300

Υπολογίζεται ο μειωτικός συντελεστής $\chi_{LT,mod}$ ειδικώς για ελατές διατομές ή ισοδύναμες συγκολλητές διατομές υπό κάμψη.

$$M_{y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \times f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00} = 66349,5kN$$

$$M_{z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \times f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00} = 30888,5kN$$

$$M_{cr} = 1,879 \frac{\pi^2 \times 21000kN/cm^2 \times 8563cm^2}{(1,00 \times 460cm)^2} \times$$
$$\times \left\{ \left(\frac{1,00}{1,00} \right)^2 \frac{1688000cm^6}{8563cm^4} + \frac{(1,00 \times 460cm)^2 \times 8077kN/cm^2 \times 185cm^4}{\pi^2 \times 21000kN/cm^2 \times 8563cm^2} \right\}^{0,5} = 305072,3kNm$$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα y-y δίνεται ως εξής:

$$\lambda_y = \frac{L_y}{i_y} = \frac{1060cm}{12,99cm} = 81,6$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα y-y δίνεται ως εξής:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{81,6}{76,40} = 1,068$$

όπου

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{210000MPa}{355MPa}} = 76,4$$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα z-z δίνεται ως εξής:

$$\lambda_z = \frac{L_z}{i_z} = \frac{460cm}{7,58cm} = 60,7$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα z-z δίνεται ως εξής:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{60,7}{76,4} = 0,794$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{305072,3kNm}} = 0,466$$

Μειωτικοί συντελεστές χ

Για ανηγμένη λυγηρότητα κατά τον άξονα y $\bar{\lambda}_y = 1,068$, ο συντελεστής χ_y , για καμπύλη λυγισμού b , είναι ίσος με $\chi_y = 0,555$, ενώ για ανηγμένη λυγηρότητα κατά τον άξονα z $\bar{\lambda}_z = 0,794$ ο συντελεστής χ_z , για καμπύλη λυγισμού c , είναι ίσος με $\chi_z = 0,666$.

Για καμπύλη λυγισμού c ισχύει $\alpha=0,49$

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0,5 \left[1 + 0,49 \cdot (0,466 - 0,4) + 0,75 \times 0,466^2 \right] = 0,5977$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} = \frac{1}{0,5977 + \sqrt{0,5977^2 - 0,75 \times 0,466^2}} = 0,974 < 1,00$$

Όπου $\beta=0,75$ και $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c) \left[1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] = 1 - 0,5(1 - 0,752) \left[1 - 2,0(0,466 - 0,8)^2 \right] = 0,904$$

όπου

$$k_c = \frac{1}{1,33 - 0,33\psi} = \frac{1}{1,33 - 0,33 \times 0} = 0,752 \text{ για } \psi=0 \text{ για τριγωνικής μορφής διάγραμμα}$$

ροπών κατά $y-y$

Συνεπώς

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} = \frac{0,974}{0,904} = 1,077$$

Όμως πρέπει $\chi_{LT,mod} \leq 1$, άρα $\chi_{LT,mod} = 1,0$

4.2.2.1 1η περίπτωση φόρτισης: $N_{Ed} = 620 \text{ kN}$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης με τη Μέθοδο Β

1η περίπτωση φόρτισης: αξονική δύναμη: $N_{Ed} = 620 \text{ kN}$

ι) ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$C_{my} = 0,9 \quad \text{λόγω μετάθεσης}$$

$$C_{mz} = 0,95 \quad \text{για παραβολικό διάγραμμα ροπών}$$

$$C_{mLT} = 0,6 \quad \text{για τριγωνικό διάγραμμα ροπών}$$

$$\begin{aligned} k_{yy} &= C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,9 \left(1 + (1,068 - 0,2) \frac{620}{0,555 \times 149,1 \times 35,5} \right) = 1,064 \leq \\ &\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,9 \left(1 + 0,8 \frac{620}{0,555 \times 149,1 \times 35,5} \right) = 1,052 \end{aligned}$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,6 \cdot 1,115 = 0,669$$

$$\begin{aligned} k_{zz} &= C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,95 \left(1 + (2 \times 0,794 - 0,6) \frac{620}{0,666 \times 149,1 \times 35,5} \right) = 1,115 \leq \\ &\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,95 \left(1 + 1,4 \frac{620}{0,665 \times 149,1 \times 35,5} \right) = 1,184 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{zy} &= \left[1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = \left[1 - \frac{0,1 \times 0,794}{(0,6 - 0,25)} \frac{620}{0,666 \times 149,1 \times 35,5} \right] = 0,960 \geq \\ &\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = \left[1 - \frac{0,1}{(0,6 - 0,25)} \frac{620}{0,665 \times 149,1 \times 35,5} \right] = 0,949 \end{aligned}$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λογισμό με τη Μέθοδο Β:

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{620kN}{0,555 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 1,052 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,669 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,2119 + 0,3201 + 0,0155 = 0,5474 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{620kN}{0,666 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 0,960 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,115 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,1760 + 0,2910 + 0,0258 = 0,4928 \end{aligned}$$

υ) μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 1,052 = 0,6312$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λογισμό με τη Μέθοδο Β:

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{620kN}{0,555 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 1,052 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,669 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,2119 + 0,3201 + 0,0155 = 0,5474 \end{aligned}$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}}}{\gamma_{M1}} = \frac{620kN}{0,666 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,6312 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,115 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,1760 + 0,1930 + 0,0258 = 0,3948$$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης με τη Μέθοδο Α

Η ελαστική δύναμη καμπτικού λυγισμού περί τους άξονες y-y και z-z είναι αντίστοιχα:

$$N_{cr,y} = \pi^2 EI_y / L_y^2 = \pi^2 \times 21000kN/cm^2 \times 25170cm^4 / (1060cm)^2 = 4638,2kN$$

$$N_{cr,z} = \pi^2 EI_z / L_z^2 = \pi^2 \times 21000kN/cm^2 \times 8563cm^4 / (460cm)^2 = 8378,9kN$$

Το ελαστικό κρίσιμο φορτίο στρεπτικού λυγισμού δίνεται ως εξής:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_M^2} \left(GI_T + \frac{\pi^2 EI_w}{L_T^2} \right) = \frac{1}{226,19cm^2} \left(8077kN/cm^2 \times 185,0cm^4 + \frac{\pi^2 21000kN/cm^2 \times 1688000cm^6}{(460cm)^2} \right) =$$

$$= 13908,5kN$$

όπου i_M είναι η πολική ροπή αδράνειας της διατομής ως προς το κέντρο διάτμησης:

$$i_M^2 = i_y^2 + i_z^2 = (12,99cm)^2 + (7,58cm)^2 = 226,19cm^2$$

Για τον υπολογισμό της ανηγμένης λυγηρότητας $\bar{\lambda}_o$ για στρεπτοκαμπτικό λυγισμό λόγω σταθερής καμπτικής ροπής, θα πρέπει να ξαναυπολογιστεί η ελαστική κρίσιμη ροπή σε πλευρικό λυγισμό. Έτσι θα έχουμε $\psi=1$ και για $k=1,00$:

$$C_1=1,00$$

Η ελαστική κρίσιμη ροπή σε αυτή την περίπτωση θα είναι:

$$M_{cr,LT} = 305072,3Ncm / 1,879 \times 1,00 = 162358,90kNcm$$

και η ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}_o$ θα είναι:

$$\bar{\lambda}_o = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr,LT}}} = \sqrt{\frac{1869,0cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{162357,60kNcm}} = 0,6393$$

1η περίπτωση φόρτισης: αξονική δύναμη: $N_{Ed} = 620kN$

$$\bar{\lambda}_o > 0,2 \sqrt{C_1} \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)} =$$

$$= 0,2\sqrt{1,879^4} \sqrt{\left(1 - \frac{620\text{kN}}{8378,9\text{kN}}\right) \left(1 - \frac{620\text{kN}}{13908,5\text{kN}}\right)} = 0,2657$$

Για $\psi_y=0$ υπολογίζεται ο συντελεστής C_{my} :

$$C_{my,0} =$$

$$= 0,79 + 0,21\psi_y + 0,36(\psi_y - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 0,79 + 0 + 0,36(0 - 0,33) \frac{620\text{kN}}{4638,2\text{kN}} = 0,7741$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{20200\text{kNcm}}{620\text{kN}} \frac{149,1\text{cm}^2}{1678\text{cm}^3} = 2,895$$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{185\text{cm}^4}{25170\text{cm}^4} = 0,993 \geq 0$$

$$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 0,7741 + (1 - 0,7741) \frac{\sqrt{2,895} \cdot 0,993}{1 + \sqrt{2,895} \cdot 0,993} = 0,916$$

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 0,916^2 \frac{0,993}{\sqrt{\left(1 - \frac{620\text{kN}}{8378,9\text{kN}}\right) \left(1 - \frac{620\text{kN}}{13908,5\text{kN}}\right)}} = 0,886 \geq 1$$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{620\text{kN}}{\frac{149,1\text{cm}^2 \times 35,5\text{kN/cm}^2}{1,00}} = 0,1171$$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} = \frac{1869\text{cm}^3}{1678\text{cm}^3} = 1,11 < 1,5$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} = \frac{870,1\text{cm}^3}{570,9\text{cm}^3} = 1,524 > 1,5 \Rightarrow w_z = 1,50$$

$$C_{mZ,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,Z}} = 1 + 0,03 \times \frac{620}{8379} = 1,0022$$

$$b_{LT} = 0,5 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{\chi_{LT}} \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = 0,5 \times 0,993 \times 0,6393^2 \frac{20200}{1,041 \times 66349,5} \frac{716}{30888,5} = 0,0014$$

$$c_{LT} = 10 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{5 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} = 10 \times 0,993 \frac{0,6393^2}{5 + 0,794^4} \frac{20200}{0,916 \times 1,0 \times 66349,5} = 0,2496$$

$$d_{LT} = 2 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} M_{pl,z,Rd}} =$$

$$= 2 \times 0,993 \frac{0,6393}{0,1 + 0,794^4} \frac{20200}{0,916 \times 1,0 \times 66349,5} \frac{716}{1,0022 \times 30888,5} = 0,0196$$

$$e_{LT} = 1,7 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} = 1,7 \times 0,993 \frac{0,6393}{0,1 + 0,794^4} \frac{20200}{0,916 \times 1,0 \times 66349,5} = 0,7168$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} = 1 + (1,11 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,11} \times 0,916^2 \times 1,068 - \frac{1,6}{1,11} \times 0,916^2 \times 1,068^2 \right) \times 0,117 - 0,0014 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{yy} = 0,9912 > \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} = \frac{1678cm^3}{1869cm^3} = 0,897$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} =$$

$$= 1 + (1,5 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,0022^2 \times 1,068^2}{1,5^5} \right) 0,117 - 0,2496 \right] = 0,8684 \geq 0,6 \sqrt{\frac{1,5}{1,11}} \frac{570,9}{870,1} = 0,4576$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} = 1 + (1,11 - 1) \left[\left(2 - 14 \times \frac{0,916^2 \times 1,068^2}{1,11^5} \right) \times 0,117 - 0,0196 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{zy} = 0,9203 > 0,6 \sqrt{\frac{1,11}{1,50}} \frac{1678cm^3}{1869cm^3} = 0,4642$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^2 \right) - e_{LT} \right] n_{pl} \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{zz} = 1 + (1,5 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,5} 1,0022^2 \times 1,068 - \frac{1,6}{1,5} 1,0022^2 \times 1,068^2 \right) - 0,7168 \right] 0,117 = 0,6186 \geq$$

$$\geq \frac{570,9}{870,1} = 0,656$$

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{620kN}{4638,2kN}}{1 - 0,555 \frac{620kN}{4638,2kN}} = 0,9358$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \frac{620kN}{8378,9kN}}{1 - 0,666 \frac{620kN}{8378,9kN}} = 0,974$$

$$k_{yy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}} = 0,916 \times 1,0 \times \frac{0,9413}{1 - \frac{620kN}{4638,2kN}} \times \frac{1}{0,9912} = 0,9982$$

$$k_{yz} = C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 1,0022 \frac{0,9358}{1 - \frac{620}{4638,2}} \frac{1}{0,8684} 0,6 \sqrt{\frac{1,5}{1,11}} = 0,8118$$

$$k_{zy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} = 0,916 \times 1,0 \times \frac{0,974}{1 - \frac{620kN}{4638,2kN}} \times \frac{1}{0,9203} \times 0,6 \sqrt{\frac{1,11}{1,50}} = 0,5784$$

$$k_{zz} = C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}} = 1,0022 \frac{0,974}{1 - \frac{620}{8378,9}} \frac{1}{0,656} = 1,607$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λογισμό με τη Μέθοδο Α:

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{620kN}{0,555 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 0,9982 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,8118 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,2119 + 0,3038 + 0,0188 = 0,5345 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{620kN}{0,666 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 0,5784 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,607 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,1760 + 0,1762 + 0,0372 = 0,3894 \end{aligned}$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό με Excel

ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΜΕΛΟΥΣ ΣΕ ΛΥΓΙΣΜΟ

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ (ΣΥΜΠΛΗΡΩΝΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΛΕΤΗΤΗ)

ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΛΟΥΣ

Σειρά διατομής:	HEB300
A (cm ²)	149,1
I _y (cm ⁴)	25170
W _{el,y} (cm ³)	1678
W _{pl,y} (cm ³)	1869
W _{el,z} (cm ³)	570,9
W _{pl,z} (cm ³)	870,1
I _t (cm ⁴)	185
I _z (cm ⁴)	8563
I _w (cm ⁶)	1688000
i _y (cm)	12,99
i _z (cm)	7,58
π ²	9,87

ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΧΑΛΥΒΑΣ

Όριο διαρροής:	f _y (kN/cm ²)	35,5
Μέτρο ελαστικότητας:	E (kN/cm ²)	21000
Λόγος Poisson:	ν	0,3
Μέτρο διάτμησης:	G (kN/cm ²)	8076,92
Συντελεστής ασφαλείας:	γ _{M1}	1

ΜΕΛΟΣ

Μήκη λυγισμού

L _y (cm)	1060
L _z (cm)	460

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ

M _{y,Rd} (kNcm)	66349,5
M _{z,Rd} (kNcm)	30888,55
N _{cr,y} (kN)	4643,10
N _{cr,z} (kN)	8387,77
i _M ² (cm ²)	226,20
N _{cr,T} (kN)	13915,73

Κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού

k	1,00	(και τα δύο άκρα του μέλους είναι στρεπτικά ελεύθερα)
k _w	1,00	(θεωρούμε ότι και τα δύο άκρα του μέλους είναι ελεύθερα σε στρέβλωση)

z_a	0,00	(το ίδιο βάρος ασκείται στο Κ.Β.)
z_s	0,00	(Κ.Δ.=Κ.Β.)
z_j	0,00	(για διατομή διπλής συμμετρίας)
z_g	0,00	
C1	1,879	(για $\psi=0$ για τριγωνικό διάγραμμα ροπών)
C2	0,00	
C3	0,939	

Άρα $M_{cr} = 305313,53$

ΛΥΓΗΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΜΕΙΩΤΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

$\lambda_1 = 76,41$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα γ-γ:

$\lambda_y = 81,60$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα γ-γ:

$\lambda_y = 1,068$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα z-z:

$\lambda_z = 60,69$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα z-z:

$\lambda_z = 0,794$

$\lambda_{max} = 1,068$

Για καμπύλη λυγισμού **b** κατά τον άξονα γ έχω συντελεστή ατελειών:

$\alpha = 0,34$

Για καμπύλη λυγισμού **c** κατά τον άξονα z έχω συντελεστή ατελειών:

$\alpha = 0,49$

Περί τον άξονα γ-γ:

$\phi_y = 1,218$

$\chi_y = 0,555$

Περί τον άξονα z-z:

$\phi_z = 0,961$

$\chi_z = 0,666$

ΜΕΘΟΔΟΣ Β

Η ανηγμένη λυγηρότητα στρεπτοκαμπτικού λυγισμού είναι:

$\lambda_{lt} = 0,466$

Ειδικώς για ελατές διατομές ή ισοδύναμες συγκολλητές διατομές έχω:

Για καμπύλη λυγισμού **b** έχω:

$\alpha = 0,34$

$\phi_{lt} = 0,593$

όπου: $\lambda_{lt,0} = 0,4$

$\beta = 0,75$

$\chi_{lt} = 0,974$

Για τριγωνικό διάγραμμα ροπών κατά γ-γ:

ψ	0
k_c	0,752
f	0,904
$\chi_{it,mod}$	1,000

Γενική διαδικασία υπολογισμού χ_{it} :

Για καμπύλη λυγισμού α έχω:

α	0,21
ϕ_{it}	0,637
χ_{it}	0,934

ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ N (kN)= 620

ΚΑΜΠΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ: $M_{y,Ed}$ (kNcm) 20200 $M_{z,Ed}$ (kNcm) 716

Περίπτωση α) μέλος ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις

C_{my}	0,9	(λόγω μετάθεσης)
C_{mz}	0,95	(για παραβολικό διάγραμμα ροπών)
C_{mt}	0,6	(για τριγωνικό διάγραμμα ροπών)

Συντελεστές αλληλεπίδρασης (πλαστικές ιδιότητες διατομών κατηγορίας 1 και 2)

k_{yy}	$k_{yy,max}$	
1,0650	1,0521	
τελικά:	k_{yy}	1,0521
k_{zz}	$k_{zz,max}$	(για διατομές μορφής I)
1,1152	1,1840	
τελικά:	k_{zz}	1,1152

Για ανηγμένη λυγηρότητα $\lambda_z \geq 0,4$ ισχύει:

k_{zy}	$k_{zy,min}$
0,9601	0,9497

άρα για $\lambda_z \geq 0,4$, το k_{zy} ισούται με:

k_{zy}	0,9601
----------	--------

Ενώ, για $\lambda_z < 0,4$ ισχύει:

k_{zy}	$k_{zy,max}$
1,394	0,9601

άρα για $\lambda_z < 0,4$, το k_{zy} ισούται με:

k_{zy}	0,9601
----------	--------

Τελικώς, για την περίπτωσή μας, έχουμε:

k_{zy}	0,9601
k_{yz}	0,6691

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ - γ :

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ - γ	όρος καμπτικής ροπής z-z	
0,2112	+	0,3203	+
		0,0155	=
=	0,5470	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ	

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,1759	+	0,2923	+	0,0259	=
=	0,4941	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

Περίπτωση β) μέλος μη ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$k_{yy} \quad 1,0521$$

$$k_{zz} \quad 1,1152$$

$$k_{yz} \quad 0,6691$$

$$k_{zy} \quad 0,6312$$

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ-γ:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,2112	+	0,3203	+	0,0155	=
=	0,5470	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,1759	+	0,1922	+	0,0259	=
=	0,3940	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

ΜΕΘΟΔΟΣ Α

Η ελαστική κρίσιμη ροπή σε πλευρικό λυγισμό λόγω σταθερής καμπτικής ροπής είναι:

$$M_{cr,lt} \quad 162487,24$$

όπου, για $\psi=1$ και $k=1$ έχω:

$$C1 \quad 1$$

$$C2 \quad 0$$

$$C3 \quad 1$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα λ_0 ισούται με:

$$\lambda_0 \quad 0,639$$

Συντελεστές ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής:

$$\text{Για } \psi_y = \quad 0$$

$$C_{m_y,0} \quad 0,7741$$

Για παραβολικό διάγραμμα ροπών:

$$C_{m_z,0} \quad 1,0022$$

$$a_{lt} \quad 0,9926$$

$$\epsilon_y \quad 2,8950 \quad (\text{για διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3})$$

Για $\lambda_0 \leq 0,266$ ισχύουν:

$$C_{m_y} \quad 0,7741$$

$$C_{m_z} \quad 1,0022$$

$$C_{m_{lt}} \quad 1,0$$

Εάν $\lambda_0 > 0,266$ ισχύουν:

$$C_{m_y} \quad 0,9160$$

$$C_{mz} = 1,0022$$

$$C_{mlt} = 0,8854$$

Στην περίπτωση μας, για το λ₀:

$$C_{my} = 0,9160$$

$$C_{mz} = 1,0022$$

$$C_{mlt} = 1,0000$$

Βοηθητικοί συντελεστές

$$n_{pl} = 0,1171$$

$$w_y = 1,1138$$

$$w_z = 1,5000$$

$$\mu_y = 0,9358$$

$$\mu_z = 0,9740$$

$$b_{lt} = 0,0014$$

$$c_{lt} = 0,2496$$

$$d_{lt} = 0,0196$$

$$e_{lt} = 0,7199$$

$$C_{yy} = 0,9910$$

$$C_{yy,min} = 0,8978$$

$$\text{άρα τελικά έχουμε: } C_{yy} = 0,9910$$

$$C_{yz} = 0,8687$$

$$C_{yz,min} = 0,4569$$

$$\text{άρα τελικά έχουμε: } C_{yz} = 0,8687$$

$$C_{zy} = 0,9202$$

$$C_{zy,min} = 0,4642$$

$$\text{άρα τελικά έχουμε: } C_{zy} = 0,9202$$

$$C_{zz} = 0,6186$$

$$C_{zz,min} = 0,6561$$

$$\text{άρα τελικά έχουμε: } C_{zz} = 0,6561$$

Συντελεστές αλληλεπίδρασης (πλαστικές ιδιότητες διατομών κατηγορίας 1 και 2)

$$k_{yy} = 0,9982$$

$$k_{yz} = 0,8118$$

$$k_{zy} = 0,5785$$

$$k_{zz} = 1,6065$$

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ-γ:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,2112	+	0,3039	+	0,0188	=
=	0,5339	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z
0,1759	+	0,1761
=	0,3893	+
		0,0372
		=
		ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ

4.2.2.2 2η περίπτωση φόρτισης: $N_{Ed} = 200 \text{ kN}$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης με τη Μέθοδο Β

2η περίπτωση φόρτισης: αξονική δύναμη: $N_{Ed} = 200 \text{ kN}$

ι) ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$C_{my} = 0,9 \quad \text{λόγω μετάθεσης}$$

$$C_{mZ} = 0,95 \quad \text{για παραβολικό διάγραμμα ροπών}$$

$$C_{mLT} = 0,6 \quad \text{για τριγωνικό διάγραμμα ροπών}$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,9 \left(1 + (1,068 - 0,2) \frac{200}{0,555 \times 149,1 \times 35,5} \right) = 0,9496 \leq$$

$$\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,9 \left(1 + 0,8 \frac{200}{0,555 \times 149,1 \times 35,5} \right) = 0,9457$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,6 \cdot 1,0033 = 0,6020$$

$$k_{zz} = C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,95 \left(1 + (2 \times 0,794 - 0,6) \frac{200}{0,666 \times 149,1 \times 35,5} \right) = 1,0033 \leq$$

$$\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,95 \left(1 + 1,4 \frac{200}{0,666 \times 149,1 \times 35,5} \right) = 1,0255$$

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = \left[1 - \frac{0,1 \times 0,794}{(0,6 - 0,25)} \frac{200}{0,666 \times 149,1 \times 35,5} \right] = 0,987 \geq$$

$$\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = \left[1 - \frac{0,1}{(0,6 - 0,25)} \frac{200}{0,666 \times 149,1 \times 35,5} \right] = 0,984$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό με τη Μέθοδο Β:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{200kN}{0,555 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,9457 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,6020 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,0681 + 0,2886 + 0,0140 = 0,3707$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{200kN}{0,666 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,9870 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,0033 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,0568 + 0,3001 + 0,0230 = 0,3799$$

υ) μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,9457 = 0,5674$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό με τη Μέθοδο Β:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{200kN}{0,555 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,9457 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,6020 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,0681 + 0,2886 + 0,0140 = 0,3707$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{200kN}{0,666 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,5674 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,0033 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,0568 + 0,1734 + 0,0230 = 0,2534$$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης με τη Μέθοδο Α

2η περίπτωση φόρτισης: αξονική δύναμη: $N_{Ed} = 200kN$

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_0 &> 0,2\sqrt{C_1} \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)} = \\ &= 0,2\sqrt{1,879} \sqrt{\left(1 - \frac{200kN}{8378,9kN}\right)\left(1 - \frac{200kN}{13908,5kN}\right)} = 0,271\end{aligned}$$

Για $\psi_y=0$ υπολογίζεται ο συντελεστής C_{my} :

$$\begin{aligned}C_{my,0} &= \\ &= 0,79 + 0,21\psi_y + 0,36(\psi_y - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 0,79 + 0 + 0,36(0 - 0,33) \frac{200kN}{4638,2kN} = 0,7849\end{aligned}$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{20200kNcm}{200kN} \frac{149,1cm^2}{1678cm^3} = 8,975$$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{185cm^4}{25170cm^4} = 0,993 \geq 0$$

$$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 0,7849 + (1 - 0,7849) \frac{\sqrt{8,975} \cdot 0,993}{1 + \sqrt{8,975} \cdot 0,993} = 0,946$$

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 0,946^2 \frac{0,993}{\sqrt{\left(1 - \frac{200kN}{8378,9kN}\right)\left(1 - \frac{200kN}{13908,5kN}\right)}} = 0,907 \geq 1$$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{200kN}{\frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = 0,038$$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} = \frac{1869cm^3}{1678cm^3} = 1,11 < 1,5$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} = \frac{870,1cm^3}{570,9cm^3} = 1,524 > 1,5 \Rightarrow w_z = 1,50$$

$$C_{mZ,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,Z}} = 1 + 0,03 \times \frac{200}{8379} = 1,000$$

$$b_{LT} = 0,5 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{\chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = 0,5 \times 0,993 \times 0,6393^2 \frac{20200}{1,0 \times 66349,5} \frac{716}{30888,5} = 0,0014$$

$$c_{LT} = 10 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{5 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} = 10 \times 0,993 \frac{0,6393^2}{5 + 0,794^4} \frac{20200}{0,946 \times 1,0 \times 66349,5} = 0,2424$$

$$d_{LT} = 2 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} M_{pl,z,Rd}} =$$

$$= 2 \times 0,993 \frac{0,6393}{0,1 + 0,794^4} \frac{20200}{0,946 \times 1,041 \times 66349,5} \frac{716}{1,000 \times 30888,5} = 0,019$$

$$e_{LT} = 1,7 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} = 1,7 \times 0,993 \frac{0,6393}{0,1 + 0,794^4} \frac{20200}{0,946 \times 1,0 \times 66349,5} = 0,6970$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} = 1 + (1,11 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,11} \times 0,946^2 \times 1,068 - \frac{1,6}{1,11} \times 0,946^2 \times 1,068^2 \right) \times 0,038 - 0,0014 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{yy} = 0,9963 > \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} = \frac{1678 \text{cm}^3}{1869 \text{cm}^3} = 0,8978$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} =$$

$$= 1 + (1,5 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,000^2 \times 1,068^2}{1,5^5} \right) 0,038 - 0,2424 \right] = 0,8772 \geq 0,6 \sqrt{\frac{1,5}{1,11}} \frac{570,9}{870,1} = 0,4576$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} = 1 + (1,11 - 1) \left[\left(2 - 14 \times \frac{0,946^2 \times 1,068^2}{1,11^5} \right) \times 0,038 - 0,019 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{zy} = 0,9709 > 0,6 \sqrt{\frac{1,11}{1,50}} \frac{1678 \text{cm}^3}{1869 \text{cm}^3} = 0,4633$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) - e_{LT} \right] n_{pl} \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{zz} = 1 + (1,5 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,5} 1,000^2 \times 1,068 - \frac{1,6}{1,5} 1,000^2 \times 1,068^2 \right) - 0,6970 \right] 0,038 = 0,6446 \geq$$

$$\geq \frac{570,9}{870,1} = 0,656$$

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{200kN}{4638,2kN}}{1 - 0,555 \frac{200kN}{4638,2kN}} = 0,9803$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \frac{200kN}{8378,9kN}}{1 - 0,666 \frac{200kN}{8378,9kN}} = 0,992$$

$$k_{yy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}} = 0,946 \times 1,0 \times \frac{0,9825}{1 - \frac{200kN}{4638,2kN}} \times \frac{1}{0,9963} = 0,9727$$

$$k_{yz} = C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 1,000 \frac{0,9803}{1 - \frac{200}{4638,2}} \frac{1}{0,8772} 0,6 \sqrt{\frac{1,5}{1,11}} = 0,7978$$

$$k_{zy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} = 0,946 \times 1,0 \times \frac{0,992}{1 - \frac{200kN}{4638,2kN}} \times \frac{1}{0,9709} \times 0,6 \sqrt{\frac{1,11}{1,50}} = 0,5223$$

$$k_{zz} = C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}} = 1,000 \frac{0,992}{1 - \frac{200}{8378,9}} \frac{1}{0,656} = 1,5494$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λογισμό με τη Μέθοδο Α:

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{200kN}{0,555 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 0,9727 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,7978 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,0681 + 0,2961 + 0,0185 = 0,3827 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{200kN}{0,666 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 0,5223 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,5494 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,0568 + 0,1590 + 0,0358 = 0,2516 \end{aligned}$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό με Excel

ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΜΕΛΟΥΣ ΣΕ ΛΥΓΙΣΜΟ

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ (ΣΥΜΠΛΗΡΩΝΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΛΕΤΗΤΗ)

ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΛΟΥΣ

Σειρά διατομής: **HEB300**

A (cm ²)	149,1
I _y (cm ⁴)	25170
W _{el,y} (cm ³)	1678
W _{pl,y} (cm ³)	1869
W _{el,z} (cm ³)	570,9
W _{pl,z} (cm ³)	870,1
I _t (cm ⁴)	185
I _z (cm ⁴)	8563
I _w (cm ⁶)	1688000
i _y (cm)	12,99
i _z (cm)	7,58
π ²	9,87

ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΧΑΛΥΒΑΣ

Όριο διαρροής:	f _y (kN/cm ²)	35,5
Μέτρο ελαστικότητας:	E (kN/cm ²)	21000
Λόγος Poisson:	ν	0,3
Μέτρο διάτμησης:	G (kN/cm ²)	8076,92
Συντελεστής ασφαλείας:	γ _{M1}	1

ΜΕΛΟΣ

Μήκη λυγισμού

L _y (cm)	1060
L _z (cm)	460

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ

M _{y,Rd} (kNcm)	66349,5
M _{z,Rd} (kNcm)	30888,55
N _{cr,y} (kN)	4643,10
N _{cr,z} (kN)	8387,77
i _M ² (cm ²)	226,20
N _{cr,T} (kN)	13915,73

Κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού

k	1,00	(και τα δύο άκρα του μέλους είναι στρεπτικά ελεύθερα)
k _w	1,00	(θεωρούμε ότι και τα δύο άκρα του μέλους είναι ελεύθερα σε στρέβλωση)

z_a	0,00	(το ίδιο βάρος ασκείται στο Κ.Β.)
z_s	0,00	(Κ.Δ.=Κ.Β.)
z_j	0,00	(για διατομή διπλής συμμετρίας)
z_g	0,00	
C1	1,879	(για $\psi=0$ για τριγωνικό διάγραμμα ροπών)
C2	0,00	
C3	0,939	

Άρα $M_{cr} = 305313,53$

ΛΥΓΗΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΜΕΙΩΤΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

$\lambda_1 = 76,41$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα $y-y$:

$\lambda_y = 81,60$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα $y-y$:

$\lambda_y = 1,068$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα $z-z$:

$\lambda_z = 60,69$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα $z-z$:

$\lambda_z = 0,794$

$\lambda_{max} = 1,068$

Για καμπύλη λυγισμού b κατά τον άξονα y έχω συντελεστή ατελειών:

$\alpha = 0,34$

Για καμπύλη λυγισμού c κατά τον άξονα z έχω συντελεστή ατελειών:

$\alpha = 0,49$

Περί τον άξονα $y-y$:

$\phi_y = 1,218$

$\chi_y = 0,555$

Περί τον άξονα $z-z$:

$\phi_z = 0,961$

$\chi_z = 0,666$

ΜΕΘΟΔΟΣ Β

Η ανηγμένη λυγηρότητα στρεπτοκαμπτικού λυγισμού είναι:

$\lambda_{lt} = 0,466$

Ειδικώς για ελατές διατομές ή ισοδύναμες συγκολλητές διατομές έχω:

Για καμπύλη λυγισμού b έχω:

$\alpha = 0,34$

$\phi_{lt} = 0,593$

όπου: $\lambda_{lt,0} = 0,4$

$\beta = 0,75$

$\chi_{lt} = 0,974$

Για τριγωνικό διάγραμμα ροπών κατά $y-y$:

ψ	0
k_c	0,752
f	0,904
$\chi_{it,mod}$	1,000

Γενική διαδικασία υπολογισμού χ_{it} :

Για καμπύλη λυγισμού α έχω:

α	0,21
ϕ_{it}	0,637
χ_{it}	0,934

ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ N (kN)= 200

ΚΑΜΠΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ: $M_{y,Ed}$ (kNcm) 20200 $M_{z,Ed}$ (kNcm) 716

Περίπτωση α) μέλος ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις

C_{my}	0,9	(λόγω μετάθεσης)
C_{mz}	0,95	(για παραβολικό διάγραμμα ροπών)
C_{mt}	0,6	(για τριγωνικό διάγραμμα ροπών)

Συντελεστές αλληλεπίδρασης (πλαστικές ιδιότητες διατομών κατηγορίας 1 και 2)

k_{yy}	$k_{yy,max}$	
0,9532	0,9491	
τελικά:	k_{yy}	0,9491
k_{zz}	$k_{zz,max}$	(για διατομές μορφής I)
1,0033	1,0255	
τελικά:	k_{zz}	1,0033

Για ανηγμένη λυγηρότητα $\lambda_z \geq 0,4$ ισχύει:

k_{zy}	$k_{zy,min}$
0,9871	0,9838

άρα για $\lambda_z \geq 0,4$, το k_{zy} ισούται με:

k_{zy}	0,9871
----------	--------

Ενώ, για $\lambda_z < 0,4$ ισχύει:

k_{zy}	$k_{zy,max}$
1,394	0,9871

άρα για $\lambda_z < 0,4$, το k_{zy} ισούται με:

k_{zy}	0,9871
----------	--------

Τελικώς, για την περίπτωση μας, έχουμε:

k_{zy}	0,9871
k_{yz}	0,6020

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ - γ :

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ - γ	όρος καμπτικής ροπής z-z	
0,0681	+	0,2889	+
		0,0140	=
=	0,3710	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ	

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,0568	+	0,3005	+	0,0233	=
=	0,3805	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

Περίπτωση β) μέλος μη ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$k_{yy} \quad 0,9491$$

$$k_{zz} \quad 1,0033$$

$$k_{yz} \quad 0,6020$$

$$k_{zy} \quad 0,5694$$

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ-γ:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,0681	+	0,2889	+	0,0140	=
=	0,3710	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,0568	+	0,1734	+	0,0233	=
=	0,2534	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

ΜΕΘΟΔΟΣ Α

Η ελαστική κρίσιμη ροπή σε πλευρικό λυγισμό λόγω σταθερής καμπτικής ροπής είναι:

$$M_{cr,lt} \quad 162487,24$$

όπου, για $\psi=1$ και $k=1$ έχω:

$$C1 \quad 1$$

$$C2 \quad 0$$

$$C3 \quad 1$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα λ_0 ισούται με:

$$\lambda_0 \quad 0,639$$

Συντελεστές ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής:

$$\text{Για } \psi_y = \quad 0$$

$$C_{m_y,0} \quad 0,7849$$

Για παραβολικό διάγραμμα ροπών:

$$C_{m_z,0} \quad 1,0007$$

$$a_{lt} \quad 0,9926$$

$$\epsilon_y \quad 8,9744 \quad (\text{για διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3})$$

Για $\lambda_0 \leq 0,272$ ισχύουν:

$$C_{m_y} \quad 0,7849$$

$$C_{m_z} \quad 1,0007$$

$$C_{m_{lt}} \quad 1,0$$

Εάν $\lambda_0 > 0,272$ ισχύουν:

$$C_{m_y} \quad 0,9459$$

$$C_{mz} = 1,0007$$

$$C_{mlt} = 0,9054$$

Στην περίπτωση μας, για το λ₀:

$$C_{my} = 0,9459$$

$$C_{mz} = 1,0007$$

$$C_{mlt} = 1,0000$$

Βοηθητικοί συντελεστές

$$n_{pl} = 0,0378$$

$$w_y = 1,1138$$

$$w_z = 1,5000$$

$$\mu_y = 0,9803$$

$$\mu_z = 0,9919$$

$$b_{lt} = 0,0014$$

$$c_{lt} = 0,2417$$

$$d_{lt} = 0,0190$$

$$e_{lt} = 0,6971$$

$$C_{yy} = 0,9962$$

$$C_{yy,min} = 0,8978$$

$$\text{άρα τελικά έχουμε: } C_{yy} = 0,9962$$

$$C_{yz} = 0,8772$$

$$C_{yz,min} = 0,4569$$

$$\text{άρα τελικά έχουμε: } C_{yz} = 0,8772$$

$$C_{zy} = 0,9706$$

$$C_{zy,min} = 0,4642$$

$$\text{άρα τελικά έχουμε: } C_{zy} = 0,9706$$

$$C_{zz} = 0,6446$$

$$C_{zz,min} = 0,6561$$

$$\text{άρα τελικά έχουμε: } C_{zz} = 0,6561$$

Συντελεστές αλληλεπίδρασης (πλαστικές ιδιότητες διατομών κατηγορίας 1 και 2)

$$k_{yy} = 0,9727$$

$$k_{yz} = 0,7978$$

$$k_{zy} = 0,5223$$

$$k_{zz} = 1,5498$$

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ-γ:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,0681	+	0,2961	+	0,0185	=
=	0,3828	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

κατά τον z-z:

0,0568	+	0,1590	+	0,0359	=
=		0,2517		ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ	

4.2.2.3 3η περίπτωση φόρτισης: $N_{Ed} = 310 \text{ kN}$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης με τη Μέθοδο Β

3η περίπτωση φόρτισης: αξονική δύναμη: $N_{Ed} = 310 \text{ kN}$

ι) ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$C_{my} = 0,9 \quad \text{λόγω μετάθεσης}$$

$$C_{mZ} = 0,95 \quad \text{για παραβολικό διάγραμμα ροπών}$$

$$C_{mLT} = 0,6 \quad \text{για τριγωνικό διάγραμμα ροπών}$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,9 \left(1 + (1,068 - 0,2) \frac{310}{0,555 \times 149,1 \times 35,5} \right) = 0,9769 \leq$$

$$\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,9 \left(1 + 0,8 \frac{310}{0,555 \times 149,1 \times 35,5} \right) = 0,9708$$

$$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz} = 0,6 \cdot 1,0330 = 0,6196$$

$$k_{zz} = C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,95 \left(1 + (2 \times 0,794 - 0,6) \frac{310}{0,666 \times 149,1 \times 35,5} \right) = 1,0330 \leq$$

$$\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right) = 0,95 \left(1 + 1,4 \frac{310}{0,666 \times 149,1 \times 35,5} \right) = 1,0670$$

$$k_{zy} = \left[1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = \left[1 - \frac{0,1 \times 0,794}{(0,6 - 0,25)} \frac{310}{0,666 \times 149,1 \times 35,5} \right] = 0,9800 \geq$$

$$\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] = \left[1 - \frac{0,1}{(0,6 - 0,25)} \frac{310}{0,666 \times 149,1 \times 35,5} \right] = 0,9750$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λογισμό με τη Μέθοδο Β:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{310kN}{0,555 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,9708 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,6196 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,1055 + 0,2940 + 0,0144 = 0,4139$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{310kN}{0,666 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,9800 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,0330 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,0881 + 0,2986 + 0,0240 = 0,4107$$

υ) μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,6 \cdot 0,9708 = 0,5856$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λογισμό με τη Μέθοδο Β:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{310kN}{0,555 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,9708 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,6196 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,1055 + 0,2940 + 0,0144 = 0,4139$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{310kN}{0,666 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} +$$

$$+ 0,5856 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,0330 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} =$$

$$= 0,0881 + 0,1783 + 0,0240 = 0,2904$$

Υπολογισμός συντελεστών αλληλεπίδρασης με τη Μέθοδο Α

3η περίπτωση φόρτισης: αξονική δύναμη: $N_{Ed} = 310kN$

$$\begin{aligned}\bar{\lambda}_0 &> 0,2\sqrt{C_1} \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)} = \\ &= 0,2\sqrt{1,879} \sqrt{\left(1 - \frac{310kN}{8378,9kN}\right)\left(1 - \frac{310kN}{13908,5kN}\right)} = 0,270\end{aligned}$$

Για $\psi_y=0$ υπολογίζεται ο συντελεστής C_{my} :

$$\begin{aligned}C_{my,0} &= \\ &= 0,79 + 0,21\psi_y + 0,36(\psi_y - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 0,79 + 0 + 0,36(0 - 0,33) \frac{310kN}{4638,2kN} = 0,7820\end{aligned}$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{20200kNcm}{310kN} \frac{149,1cm^2}{1678cm^3} = 5,79$$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} = 1 - \frac{185cm^4}{25170cm^4} = 0,993 \geq 0$$

$$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}} = 0,7820 + (1 - 0,7820) \frac{\sqrt{5,79} \cdot 0,993}{1 + \sqrt{5,79} \cdot 0,993} = 0,936$$

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 0,936^2 \frac{0,993}{\sqrt{\left(1 - \frac{310kN}{8378,9kN}\right)\left(1 - \frac{310kN}{13908,5kN}\right)}} = 0,910 \geq 1$$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{310kN}{\frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = 0,059$$

$$w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} = \frac{1869cm^3}{1678cm^3} = 1,11 < 1,5$$

$$w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} = \frac{870,1cm^3}{570,9cm^3} = 1,524 > 1,5 \Rightarrow w_z = 1,50$$

$$C_{mz,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} = 1 + 0,03 \times \frac{310}{8379} = 1,0011$$

$$b_{LT} = 0,5 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{\chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} = 0,5 \times 0,993 \times 0,6393^2 \frac{20200}{1,0 \times 66349,5} \frac{716}{30888,5} = 0,0014$$

$$c_{LT} = 10 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^2}{5 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} = 10 \times 0,993 \frac{0,6393^2}{5 + 0,794^4} \frac{20200}{0,936 \times 1,0 \times 66349,5} = 0,2443$$

$$d_{LT} = 2 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} M_{pl,z,Rd}} =$$

$$= 2 \times 0,993 \frac{0,6393}{0,1 + 0,794^4} \frac{20200}{0,936 \times 1,0 \times 66349,5} \frac{716}{1,0011 \times 30888,5} = 0,0192$$

$$e_{LT} = 1,7 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^4} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} = 1,7 \times 0,993 \frac{0,6393}{0,1 + 0,794^4} \frac{20200}{0,936 \times 1,0 \times 66349,5} = 0,7047$$

$$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{yy} = 1 + (1,11 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,11} \times 0,936^2 \times 1,068 - \frac{1,6}{1,11} \times 0,936^2 \times 1,068^2 \right) \times 0,059 - 0,0014 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{yy} = 0,9947 > \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}} = \frac{1678cm^3}{1869cm^3} = 0,897$$

$$C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} =$$

$$= 1 + (1,5 - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{1,0011^2 \times 1,068^2}{1,5^5} \right) 0,059 - 0,2423 \right] = 0,8793 \geq 0,6 \sqrt{\frac{1,5}{1,11}} \frac{570,9}{870,1} = 0,8746$$

$$C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$$

$$C_{zy} = 1 + (1,11 - 1) \left[\left(2 - 14 \times \frac{0,936^2 \times 1,068^2}{1,11^5} \right) \times 0,059 - 0,0192 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{zy} = 0,9571 > 0,6 \sqrt{\frac{1,11}{1,50}} \frac{1678cm^3}{1869cm^3} = 0,4633$$

$$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) - e_{LT} \right] n_{pl} \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{zz} = 1 + (1,5 - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{1,5} 1,0011^2 \times 1068 - \frac{1,6}{1,5} 1,0011^2 \times 1,068^2 \right) - 0,7047 \right] 0,059 = 0,6370 \geq$$

$$\geq \frac{570,9}{870,1} = 0,656$$

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{310kN}{4638,2kN}}{1 - 0,555 \frac{310kN}{4638,2kN}} = 0,9691$$

$$\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \frac{310kN}{8378,9kN}}{1 - 0,665 \frac{310kN}{8378,9kN}} = 0,9873$$

$$k_{yy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}} = 0,936 \times 1,0 \times \frac{0,972}{1 - \frac{310kN}{4638,2kN}} \times \frac{1}{0,9947} = 0,9769$$

$$k_{yz} = C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 1,0011 \frac{0,9691}{1 - \frac{310}{4638,2}} \frac{1}{0,8793} 0,6 \sqrt{\frac{1,5}{1,11}} = 0,8019$$

$$k_{zy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} = 0,936 \times 1,0 \times \frac{0,9873}{1 - \frac{310kN}{4638,2kN}} \times \frac{1}{0,9571} \times 0,6 \sqrt{\frac{1,11}{1,50}} = 0,5348$$

$$k_{zz} = C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}} = 1,0011 \frac{0,9873}{1 - \frac{310}{8378,9}} \frac{1}{0,656} = 1,5652$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό με τη Μέθοδο Α:

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{310kN}{0,555 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 0,9769 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 0,8019 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,1055 + 0,2975 + 0,0186 = 0,4216 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} = \frac{310kN}{0,666 \times \frac{149,1cm^2 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + \\ & + 0,5348 \frac{20200kNcm}{1,0 \times \frac{1869cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} + 1,5652 \frac{716kNcm}{\frac{870,1cm^3 \times 35,5kN/cm^2}{1,00}} = \\ & = 0,0881 + 0,1626 + 0,0363 = 0,2870 \end{aligned}$$

Έλεγχος σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό με Excel

ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΜΕΛΟΥΣ ΣΕ ΛΥΓΙΣΜΟ

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΕ ΚΟΚΚΙΝΟ ΧΡΩΜΑ (ΣΥΜΠΛΗΡΩΝΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΛΕΤΗΤΗ)

ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕΛΟΥΣ

Σειρά διατομής: **HEB300**

A (cm ²)	149,1
I _y (cm ⁴)	25170
W _{el,y} (cm ³)	1678
W _{pl,y} (cm ³)	1869
W _{el,z} (cm ³)	570,9
W _{pl,z} (cm ³)	870,1
I _t (cm ⁴)	185
I _z (cm ⁴)	8563
I _w (cm ⁶)	1688000
i _y (cm)	12,99
i _z (cm)	7,58
π ²	9,87

ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΧΑΛΥΒΑΣ

Όριο διαρροής:	f _y (kN/cm ²)	35,5
Μέτρο ελαστικότητας:	E (kN/cm ²)	21000
Λόγος Poisson:	ν	0,3
Μέτρο διάτμησης:	G (kN/cm ²)	8076,92
Συντελεστής ασφαλείας:	γ _{M1}	1

ΜΕΛΟΣ

Μήκη λυγισμού

L _y (cm)	1060
L _z (cm)	460

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ

M _{y,Rd} (kNcm)	66349,5
M _{z,Rd} (kNcm)	30888,55
N _{cr,y} (kN)	4643,10
N _{cr,z} (kN)	8387,77
i _M ² (cm ²)	226,20
N _{cr,T} (kN)	13915,73

Κρίσιμη ροπή πλευρικού λυγισμού

k	1,00	(και τα δύο άκρα του μέλους είναι στρεπτικά ελεύθερα)
k _w	1,00	(θεωρούμε ότι και τα δύο άκρα του μέλους είναι ελεύθερα σε στρέβλωση)

z_a	0,00	(το ίδιο βάρος ασκείται στο Κ.Β.)
z_s	0,00	(Κ.Δ.=Κ.Β.)
z_j	0,00	(για διατομή διπλής συμμετρίας)
z_g	0,00	
C1	1,879	(για $\psi=0$ για τριγωνικό διάγραμμα ροπών)
C2	0,00	
C3	0,939	

Άρα $M_{cr} = 305313,53$

ΛΥΓΗΡΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΜΕΙΩΤΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ

$\lambda_1 = 76,41$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα $y-y$:

$\lambda_y = 81,60$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα $y-y$:

$\lambda_y = 1,068$

Η λυγηρότητα ως προς τον άξονα $z-z$:

$\lambda_z = 60,69$

Η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα $z-z$:

$\lambda_z = 0,794$

$\lambda_{max} = 1,068$

Για καμπύλη λυγισμού b κατά τον άξονα y έχω συντελεστή ατελειών:

$\alpha = 0,34$

Για καμπύλη λυγισμού c κατά τον άξονα z έχω συντελεστή ατελειών:

$\alpha = 0,49$

Περί τον άξονα $y-y$:

$\phi_y = 1,218$

$\chi_y = 0,555$

Περί τον άξονα $z-z$:

$\phi_z = 0,961$

$\chi_z = 0,666$

ΜΕΘΟΔΟΣ Β

Η ανηγμένη λυγηρότητα στρεπτοκαμπτικού λυγισμού είναι:

$\lambda_{It} = 0,466$

Ειδικώς για ελατές διατομές ή ισοδύναμες συγκολλητές διατομές έχω:

Για καμπύλη λυγισμού b έχω:

$\alpha = 0,34$

$\phi_{It} = 0,593$

όπου: $\lambda_{It,0} = 0,4$

$\beta = 0,75$

$\chi_{It} = 0,974$

Για τριγωνικό διάγραμμα ροπών κατά $y-y$:

ψ	0
k_c	0,752
f	0,904
$\chi_{it,mod}$	1,000

Γενική διαδικασία υπολογισμού χ_{it} :

Για καμπύλη λυγισμού α έχω:

α	0,21
ϕ_{it}	0,637
χ_{it}	0,934

ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ N (kN)= 310

ΚΑΜΠΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ: $M_{y,Ed}$ (kNcm) 20200 $M_{z,Ed}$ (kNcm) 716

Περίπτωση α) μέλος ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις

C_{my}	0,9	(λόγω μετάθεσης)
C_{mz}	0,95	(για παραβολικό διάγραμμα ροπών)
C_{mt}	0,6	(για τριγωνικό διάγραμμα ροπών)

Συντελεστές αλληλεπίδρασης (πλαστικές ιδιότητες διατομών κατηγορίας 1 και 2)

k_{yy}	$k_{yy,max}$	
0,9825	0,9760	
τελικά:	k_{yy}	0,9760
k_{zz}	$k_{zz,max}$	(για διατομές μορφής I)
1,0326	1,0670	
τελικά:	k_{zz}	1,0326

Για ανηγμένη λυγηρότητα $\lambda_z \geq 0,4$ ισχύει:

k_{zy}	$k_{zy,min}$
0,9800	0,9749

άρα για $\lambda_z \geq 0,4$, το k_{zy} ισούται με:

k_{zy}	0,9800
----------	--------

Ενώ, για $\lambda_z < 0,4$ ισχύει:

k_{zy}	$k_{zy,max}$
1,394	0,9800

άρα για $\lambda_z < 0,4$, το k_{zy} ισούται με:

k_{zy}	0,9800
----------	--------

Τελικώς, για την περίπτωσή μας, έχουμε:

k_{zy}	0,9800
k_{yz}	0,6196

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ - γ :

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ - γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,1056	+	0,2972	+	0,0144	=
=	0,4171	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,0880	+	0,2984	+	0,0239	=
=	0,4103	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

Περίπτωση β) μέλος μη ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις

$$k_{yy} \quad 0,9760$$

$$k_{zz} \quad 1,0326$$

$$k_{yz} \quad 0,6196$$

$$k_{zy} \quad 0,5856$$

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ-γ:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,1056	+	0,2972	+	0,0144	=
=	0,4171	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,0880	+	0,1783	+	0,0239	=
=	0,2902	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

ΜΕΘΟΔΟΣ Α

Η ελαστική κρίσιμη ροπή σε πλευρικό λυγισμό λόγω σταθερής καμπτικής ροπής είναι:

$$M_{cr,lt} \quad 162487,24$$

όπου, για $\psi=1$ και $k=1$ έχω:

$$C1 \quad 1$$

$$C2 \quad 0$$

$$C3 \quad 1$$

Η ανηγμένη λυγηρότητα λ_0 ισούται με:

$$\lambda_0 \quad 0,639$$

Συντελεστές ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής:

$$\text{Για } \psi_y = \quad 0$$

$$C_{my,0} \quad 0,7821$$

Για παραβολικό διάγραμμα ροπών:

$$C_{mz,0} \quad 1,0011$$

$$a_{lt} \quad 0,9926$$

$$\epsilon_y \quad 5,7900 \quad (\text{για διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3})$$

Για $\lambda_0 \leq 0,270$ ισχύουν:

$$C_{my} \quad 0,7821$$

$$C_{mz} \quad 1,0011$$

$$C_{m1t} \quad 1,0$$

Εάν $\lambda_0 > 0,270$ ισχύουν:

$$C_{my} \quad 0,9357$$

C_{mz} 1,0011

C_{mlt} 0,8956

Στην περίπτωση μας, για το λ_0 :

C_{my} 0,9357

C_{mz} 1,0011

C_{mlt} 1,0000

Βοηθητικοί συντελεστές

n_{pl} 0,0586

w_y 1,1138

w_z 1,5000

μ_y 0,9691

μ_z 0,9873

b_{lt} 0,0014

c_{lt} 0,2443

d_{lt} 0,0192

e_{lt} 0,7047

C_{yy} 0,9947

$C_{yy,min}$ 0,8978

άρα τελικά έχουμε: C_{yy} 0,9947

C_{yz} 0,8747

$C_{yz,min}$ 0,4569

άρα τελικά έχουμε: C_{yz} 0,8747

C_{zy} 0,9568

$C_{zy,min}$ 0,4642

άρα τελικά έχουμε: C_{zy} 0,9568

C_{zz} 0,6371

$C_{zz,min}$ 0,6561

άρα τελικά έχουμε: C_{zz} 0,6561

Συντελεστές αλληλεπίδρασης (πλαστικές ιδιότητες διατομών κατηγορίας 1 και 2)

k_{yy} 0,9769

k_{yz} 0,8019

k_{zy} 0,5349

k_{zz} 1,5643

Έλεγχος επάρκειας μέλους:

κατά τον γ - γ :

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ - γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,1056	+	0,2974	+	0,0186	=
=	0,4216	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

κατά τον z-z:

όρος αξονικής δύναμης	όρος καμπτικής ροπής γ-γ	όρος καμπτικής ροπής z-z			
0,0880	+	0,1629	+	0,0363	=
=	0,2871	ΤΟ ΜΕΛΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙ			

4.2.3 Συμπεράσματα σύγκρισης των αποτελεσμάτων ευστάθειας μεταξύ των δύο μεθόδων

4.2.3.1 Μέλος με διατομή IPE450

Οι διαφορές στις τιμές των αποτελεσμάτων ευστάθειας της διατομής IPE450 μεταξύ των Μεθόδων Α και Β είναι σημαντικές. Αυτό οφείλεται στις ανάλογες διαφορές των συντελεστών αλληλεπίδρασης k_{ij} .

Αρχικά, πρέπει να σημειώσουμε τις διαφοροποιήσεις που υφίστανται στη Μέθοδο Β μεταξύ της διάκρισης σε ευαίσθητα και μη ευαίσθητα μέλη σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Οι συντελεστές αλληλεπίδρασης k_{yy} , k_{yz} και k_{zz} είναι πάντα ίσοι για τις δύο περιπτώσεις. Άρα η πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης για λυγισμό περί τον ισχυρό άξονα y δίνει πάντα ίδιο αποτέλεσμα ευστάθειας. Η μόνη διαφορά που υπάρχει είναι στο συντελεστή k_{zy} . Για μέλος μη ευαίσθητο με διατομή κατηγορίας 1 ή 2, όπως η IPE450, ισχύει $k_{zy} = 0,6 k_{yy}$. Ενώ για ευαίσθητο μέλος το k_{zy} εξαρτάται από την αξονική δύναμη και την ανηγμένη λυγηρότητα κατά τον άξονα z . Στην περίπτωση μας έχουμε $\bar{\lambda}_z = 1,461$. Αυτή η τιμή είναι αρκετά μεγάλη. Τότε το k_{zy} εξαρτάται μόνο από την αξονική δύναμη. Έτσι όσο μεγαλύτερη είναι η αξονική δύναμη τόσο η διαφορά μικραίνει. Η μέση ποσοστιαία διαφορά για το k_{zy} για τις τρεις περιπτώσεις φόρτισης είναι περίπου 70%, με πάντα μεγαλύτερο για ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις.

Οι συντελεστές αλληλεπίδρασης της Μεθόδου Α υπολογίζονται από διαφορετικούς τύπους και συνεπώς οι τιμές τους δεν είναι ίδιες με της Μεθόδου Β. Στους συντελεστές k_{yy} και k_{zz} η απόκλιση είναι μικρή. Ειδικά στο k_{yy} η διαφορά μεγαλώνει στο 20% στη μεγαλύτερη αξονική δύναμη ενώ για τις μικρότερες αξονικές είναι περίπου 5%. Αντίθετα για το k_{zz} οι διαφορές είναι ακόμα μικρότερες. Έτσι η μεγαλύτερη απόκλιση συναντάται για τη μικρότερη αξονική δύναμη και δεν ξεπερνά το 3%.

Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις τιμών των συντελεστών αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο μεθόδων συναντούνται στους k_{yz} και k_{zy} . Πιο αναλυτικά, ο συντελεστής k_{yz} της Μεθόδου Α είναι σχεδόν διπλάσιος της Μεθόδου Β, με τη διαφορά να μειώνεται ελάχιστα όσο πιο μικρή αξονική δύναμη έχουμε. Ακόμα, ο συντελεστής k_{zy} της Μεθόδου Α είναι περίπου ίσος με την περίπτωση του μη ευαίσθητου μελους σε στρεπτικές παραμορφώσεις της Μεθόδου Β, ειδικά για την μεγαλύτερη αξονική ενώ

για τις μικρότερες η απόκλιση είναι περίπου 8%. Στην περίπτωση όμως του ευαίσθητου μέλους της Μεθόδου Β, ο συντελεστής k_{zy} είναι σχεδόν διπλάσιος της Μεθόδου Α.

Εν κατακλείδι, οι συντελεστές αλληλεπίδρασης και τα αποτελέσματα ευστάθειας εν γένει της Μεθόδου Α για την διατομή ΙΡΕ450 προσεγγίζουν καλύτερα αυτά της Μεθόδου Β για μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Αυτό συμβαίνει στη δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης αφού στην πρώτη δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ ευαίσθητου και μη ευαίσθητου μέλους.

Για τη πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης η διαφορά δεν είναι ασήμαντη ενώ γίνεται αρκετά μεγάλη για την πρώτη περίπτωση φόρτισης με τη μεγάλη αξονική δύναμη. Για ολόκληρη τη διαδικασία υπολογισμού των αποτελεσμάτων ευστάθειας και με τις δύο μεθόδους, το πρόγραμμα Excel δίνει ίδια αποτελέσματα με αμελητέες διαφοροποιήσεις λόγω της στρογγύλευσης των τιμών που γίνεται στις χειρόγραφες επιλύσεις.

4.2.3.2 Μέλος με διατομή ΗΕΒ300

Οι παρατηρήσεις που έγιναν παραπάνω για τη διατομή ΙΡΕ450 σχετικά με τις διαφορές στις τιμές των συντελεστών αλληλεπίδρασης μεταξύ ευαίσθητου και μη ευαίσθητου μέλους σε στρεπτικές παραμορφώσεις της Μεθόδου Β είναι παρόμοιες.

Υπάρχουν όμως διαφορές στη σύγκριση των τιμών μεταξύ των δύο μεθόδων. Ο συντελεστής k_{yy} είναι σχεδόν ισότιμος για τις δύο μεθόδους με τη μεγιστη αποκλιση στο 5% για τη μεγαλύτερη αξονική δύναμη. Αντίθετα η απόκλιση φτάνει στο 55% για το συντελεστή k_{zz} με μικρότερη τιμή αυτή της Μεθόδου Β. Μία σταθερή διαφορά της τάξεως του 30% υπάρχει στο k_{yz} με μεγαλύτερη τιμή της Μεθόδου Α. Σχετικά με το συντελεστή k_{zy} , οι τιμές είναι αρκετά κοντά για την περίπτωση του μη ευαίσθητου της Μεθόδου Β και της Α. Ενώ για ευαίσθητο μέλος το k_{zy} είναι διπλάσιο της Μεθόδου Α.

Τέλος, τα αποτελέσματα ευστάθειας της Μεθόδου Α είναι σχεδόν ίδια με αυτά του μη ευαίσθητου μέλους σε στρεπτικές παραμορφώσεις της Μεθόδου Β και για τις δύο σχέσεις αλληλεπίδρασης. Αυτό συμβαίνει, χωρίς οι συντελεστές αλληλεπίδρασης να είναι ίσοι στις δύο περιπτώσεις. Μπορεί δηλαδή το τελικό αποτέλεσμα να είναι ίδιο αλλά είναι διαφορετική η συμβολή του κάθε όρου των σχέσεων αλληλεπίδρασης σε αυτό. Βέβαια, όπως αναφέρθηκε και για τη διατομή ΙΡΕ450, η ΗΕΒ300 είναι μία ανοιχτή διατομή η οποία θεωρητικά πρέπει να συμπεριφέρεται ως ευαίσθητη σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Επίσης, το Excel είναι πλήρως αξιόπιστο και για την επίλυση προβλημάτων για τη διατομή αυτή.

Κεφάλαιο 5

Παραμετρική διερεύνηση

5.1 Εισαγωγή

Απώτερος στόχος της εργασίας αυτής είναι η κατανόηση της συμπεριφοράς των μεταλλικών μελών στο φαινόμενο του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού μέσα από πλήθος δοκιμών και αποτελεσμάτων ευστάθειας που θα παρουσιάσουμε στο κεφάλαιο αυτό. Η μέθοδος που ακολουθείται για να επιτύχουμε τον παραπάνω στόχο στηρίζεται στη συνεχή μεταβολή κάποιας παραμέτρου που επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας του μέλους. Αρχικά πρέπει να αναφέρουμε πως οι διατομές που θα χρησιμοποιηθούν στην παραμετρική αυτή διερεύνηση είναι οι IPE450 και HEB300.

Οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν στη συγκεκριμένη διερεύνηση είναι οι εξής:

- Η πρώτη παράμετρος που μεταβάλλουμε είναι η ανηγμένη λυγηρότητα του μέλους της εκάστοτε διατομής. Εξαρτάται γενικά από τα γεωμετρικά στοιχεία του μέλους και της διατομής του, όπως είναι το μήκος του και η ακτίνα αδράνειας περί τον αντίστοιχο άξονα και από την ποιότητα του δομικού χάλυβα. Πιο αναλυτικά, εξαρτάται από το ισοδύναμο μήκος λυγισμού L_{cr} στο υπο θεωρηση επιπεδο λυγισμού από τη δυστρεψία των άκρων του μέλους και εάν αυτά είναι μεταθετά ή αμετάθετα.
- Η δεύτερη παράμετρος που επηρεάζει τα τελικά αποτελέσματα ευστάθειας είναι ο μειωτικός συντελεστής χ_{LT} ο οποίος μειώνει τη ροπή αντοχής μίας δοκού λόγω πλευρικού λυγισμού. Πολλές επιλύσεις ευστάθειας έγιναν και με τους δύο μειωτικούς συντελεστές που επιτρέπεται να χρησιμοποιήσουμε. Έτσι γίνεται διάκριση ανάμεσα στο μειωτικό συντελεστή χ_{LT} από τη γενική διαδικασία υπολογισμού και στο μειωτικό συντελεστή $\chi_{LT,mod}$ ειδικώς για ελατές ή ισοδύναμες συγκολλητές διατομές υπό κάμψη.
- Τέλος, για σταθερό μήκος μέλους δηλαδή λυγηρότητας, οι τελευταίοι παράμετροι που μεταβάλλαμε είναι ο λόγος της τιμής σχεδιασμού της θλιπτικής αξονικής δύναμης προς την πλαστική αντοχή της διατομής $N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ και ο λόγος της τιμής σχεδιασμού της μέγιστης ροπής ως προς τον άξονα y-y προς τη πλαστική ροπή αντοχής περί τον y-y, $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$.

5.2 Μεταβολή ανηγμένων λυγηροτήτων

Η ανάλυση γίνεται και για τις δύο διατομές, IPE450 και HEB300. Σε κάθε περίπτωση κρατάμε σταθερή τη μία από τις δύο ανηγμένες λυγηρότητες και μεταβάλλουμε την άλλη μέχρι η διατομή να μην επαρκεί σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό δηλαδή το αποτέλεσμα επάρκειας ή ευστάθειας να είναι μεγαλύτερο του 1,0. Όταν αναφερόμαστε σε αποτελέσματα επάρκειας κατά τον άξονα y εννοούμε τις τιμές που προκύπτουν από την πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης με τους συντελεστές k_{yy} και k_{yz} , ενώ κατά τον άξονα z από τη δεύτερη σχέση με τους k_{zy} και k_{zz} ανάλογα.

Η τιμή σχεδιασμού της αξονικής θλιπτικής δύναμης που χρησιμοποιείται είναι $N_{Ed} = 620kN$, της ροπής ως προς τον άξονα $y-y$ $M_{y,Ed} = 202kNm = 202000kNcm$ και της ροπής ως προς τον άξονα $z-z$ $M_{z,Ed} = 7,16kNm = 716kNcm$.

Τα αρχικά ισοδύναμα μήκη λυγισμού είναι $L_{cr,y} = 10,6m = 1060cm$ και $L_{cr,z} = 4,6m = 460cm$. έτσι όταν κρατάμε μία ανηγμένη λυγηρότητα σταθερή σημαίνει ότι το μήκος στο συγκεκριμένο επίπεδο λυγισμού είναι μία από αυτές τις τιμές.

Τα αποτελέσματα ευστάθειας υπολογίζονται και για τις δύο μεθόδους, για ευαίσθητο και μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Οπου οι καμπύλες συμπίπτουν απόλυτα θα αναφέρεται στο δεδομένο σχήμα. Επίσης γίνεται διάκριση σχετικά με τη χρήση του μειωτικού συντελεστή χ_{LT} και του $\chi_{LT,mod}$.

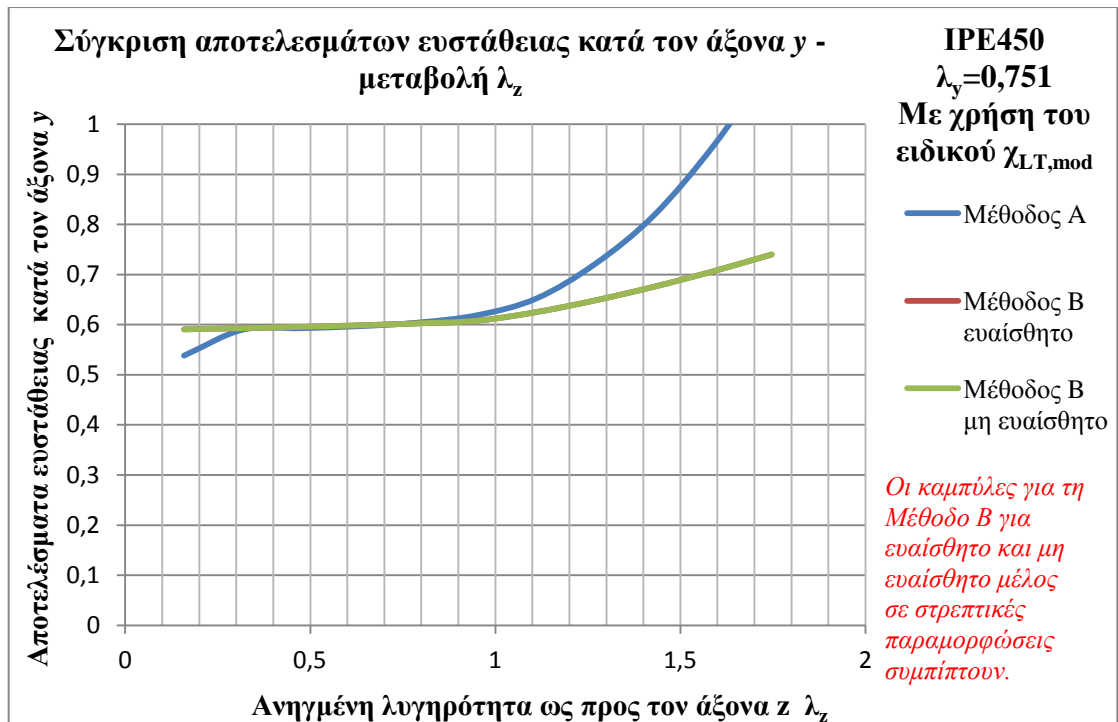
5.2.1 Μέλος με διατομή IPE450

Οι ανηγμένες λυγηρότητες που προκύπτουν από τα δεδομένα ισοδύναμα μήκη λυγισμού στο κάθε επίπεδο λυγισμού είναι:

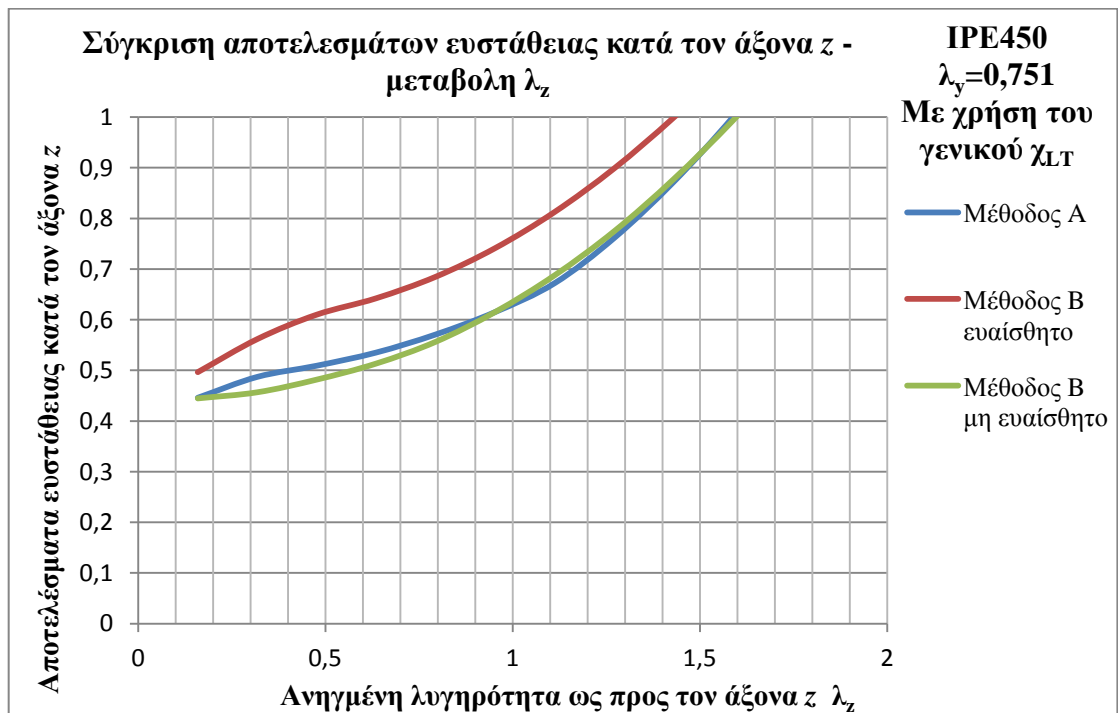
- ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα $y-y$ για $L_{cr,y} = 10,6m : \bar{\lambda}_y = 0,751$
- ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα $z-z$ για $L_{cr,z} = 4,6m : \bar{\lambda}_z = 1,461$

Κρατώντας κάθε φορά μία από τις δύο σταθερή, θα μεταβάλλουμε την άλλη έως ότου το μέλος μας να μην επαρκεί έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού.

Στο σχήμα 5 βλέπουμε τα αποτελέσματα ευστάθειας της πρώτης σχέσης αλληλεπίδρασης ενός IPE450 με σταθερή ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα $y-y$, $\bar{\lambda}_y = 0,751$ για μεταβολή της $\bar{\lambda}_z = 0,159 \div 1,747$ και χρήση του γενικού χ_{LT} . Στο διάστημα τιμών $\bar{\lambda}_z = 0,3 \div 1,0$ οι καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν. Το μέλος χάνει την ευστάθειά του για $\bar{\lambda}_z = 1,5$ σύμφωνα με τη Μέθοδο A, ενώ για τη Μέθοδο B το μέλος αντέχει ικανοποιητικά μέχρι την τιμή 1,75.

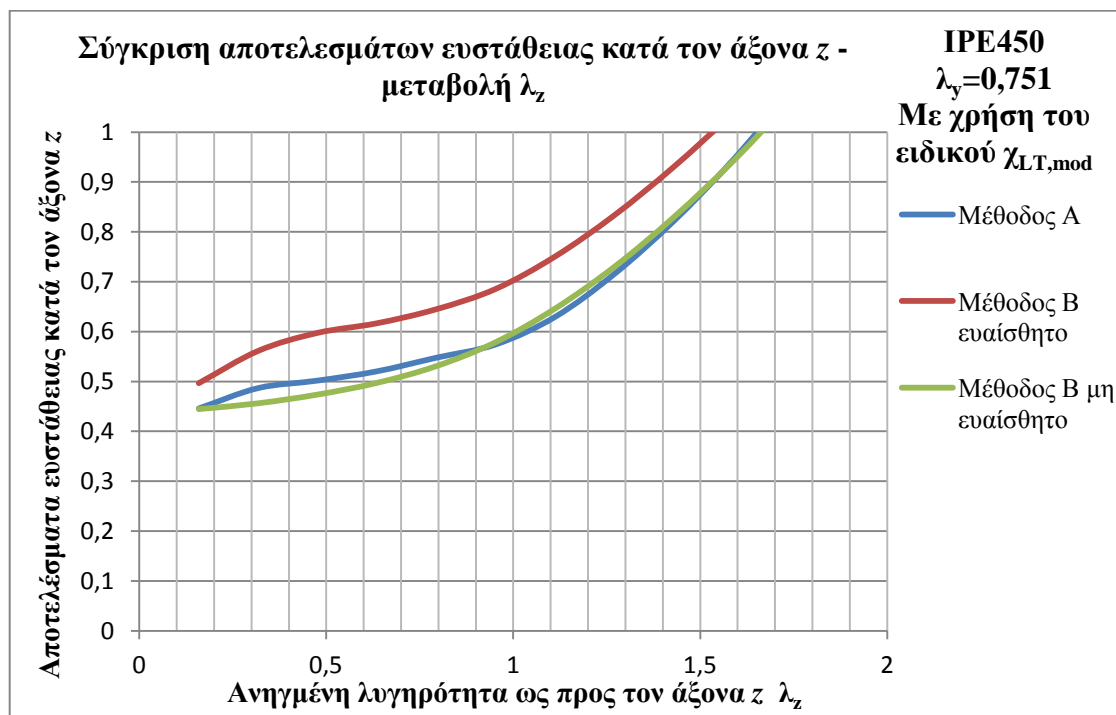


Σχήμα 6. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα y – μεταβολή $\bar{\lambda}_z$ για ΙΡΕ450 με χρήση ειδικού μειωτικού συντελεστή $\chi_{LT,mod}$.



Σχήμα 7. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα z – μεταβολή $\bar{\lambda}_z$ για ΙΡΕ450 με χρήση γενικού μειωτικού συντελεστή χ_{LT} .

Για χρήση του ειδικού μειωτικού συντελεστή στη δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης (σχήμα 8) ισχύουν γενικά οι ίδιες παρατηρήσεις όπως με το γενικό χ_{LT} του σχήματος 7.



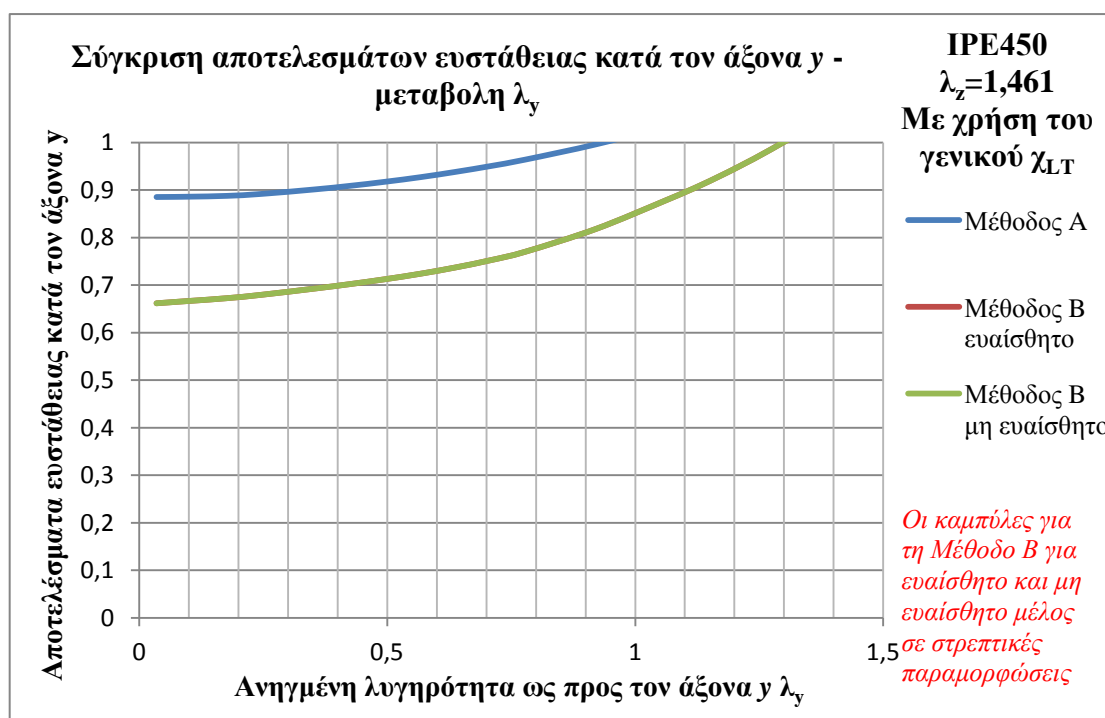
Σχήμα 8. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα z – μεταβολή $\bar{\lambda}_z$ για IPE450 με χρήση ειδικού μειωτικού συντελεστή $\chi_{LT,mod}$.

Στη συνέχεια η ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα z-z παραμένει σταθερή $\bar{\lambda}_z = 1,461$ και μεταβάλλεται η $\bar{\lambda}_y = 0,035 \div 1,346$.

Αρχικά, με χρήση του γενικού μειωτικού συντελεστή χ_{LT} , για αποτελέσματα ευστάθειας κατά τον ισχυρό άξονα (σχήμα 9) φαίνεται ότι οι καμπύλες των δύο μεθόδων ξεκινούν από πολύ υψηλές τιμές σε σχέση με τα προηγούμενα σχήματα για σταθερή τη $\bar{\lambda}_y$ και μεταβολή της $\bar{\lambda}_z$. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη τιμή της σταθερης ανηγμενης λυγηροτητας ως προς τον z. Έτσι το μέλος χάνει την ευστάθειά του επίσης για μικρότερες τιμές της $\bar{\lambda}_y$. Στην περίπτωση της Μεθοδου Α αυτό συμβαινει για $\bar{\lambda}_y = 0,95$ ενώ για τη Μεθοδο Β, όπου οι δύο καμπύλες για το ευαίσθητο και μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις συμπίπτουν πάντα για την πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης, συμβαίνει για $\bar{\lambda}_y = 1,3$. Επιπλέον, τα αποτελέσματα ευστάθειας μεταξύ των δύο μεθόδων διαφέρουν σημαντικά.

Για τα ίδια δεδομένα αλλά με χρήση του ειδικού μειωτικού συντελεστή $\chi_{LT,mod}$ (σχήμα 10), οι καμπύλες και των δύο μεθόδων για το ίδιο φάσμα μεταβολής της $\bar{\lambda}_y$ ξεκινουν από μικρότερες τιμές από πριν και είναι αρκετά πιο ομαλές με μικρότερη κλίση ως

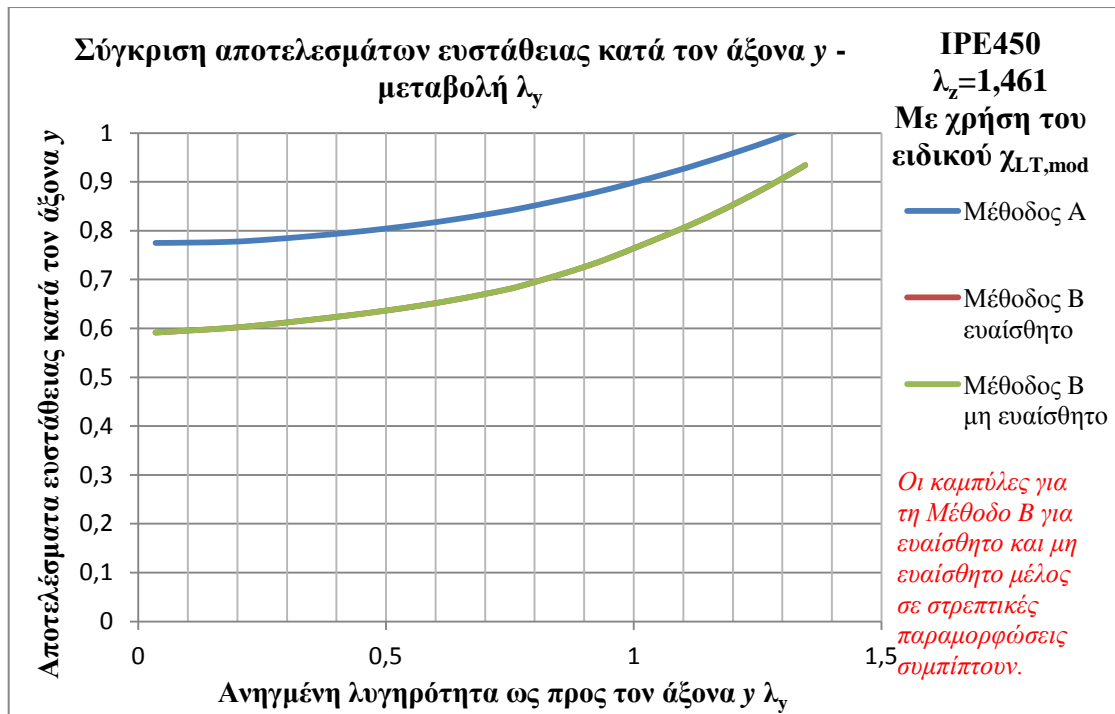
προς τον άξονα των χ . Πιο αναλυτικά, η καμπύλη της Μεθόδου A έχει αρχή την τιμή 0,77 έναντι 0,9 για γενικό μειωτικό συντελεστή ενώ φτάνει στην κρίσιμη τιμή αστάθειας για $\bar{\lambda}_y = 1,33$, περίπου 50% μεγαλύτερη τιμή λυγηρότητας σε σχέση με το σχήμα 9. Όμοια, η καμπύλη της Μεθόδου B αρχίζει από το 0,6 έναντι 0,67 και καταλήγει σε στάθμη αστοχίας στη προβλεπόμενη τιμή λυγηρότητας $\bar{\lambda}_y = 1,5$.



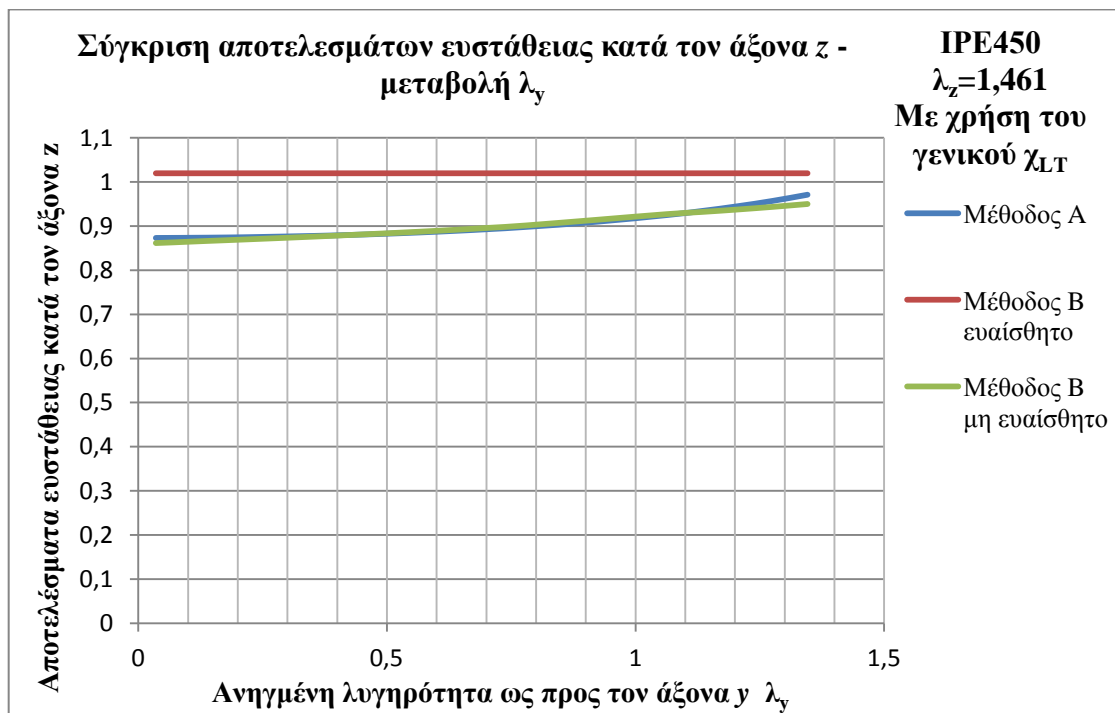
Σχήμα 9. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα y – μεταβολή $\bar{\lambda}_y$ για IPE450 με χρήση γενικού μειωτικού συντελεστή χ_{LT} .

Στο σχήμα 11 φαίνονται τα αποτελέσματα για τη δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης με χρήση του γενικού χ_{LT} . Η καμπύλη της Μεθόδου B για ευαίσθητο μέλος ξεπερνά για όλες τις τιμές του $\bar{\lambda}_y$ την κρίσιμη τιμή ασταθειας 1,0 . Οι καμπύλες της Μεθόδου A και της B για μη ευαίσθητο συμπίπτουν σχεδόν και είναι σχεδόν παράλληλες με τον άξονα της λυγηρότητας. Ξεκινούν από τη τιμή 0,9 και καταλήγουν στο 1,0 περίπου για $\bar{\lambda}_y = 1,45$. Άρα το μέλος μας κινδυνεύει να λυγίσει περί τον ασθενή άξονα του λόγω της μεγάλης τιμής ανηγμένης λυγηρότητας σε αυτόν.

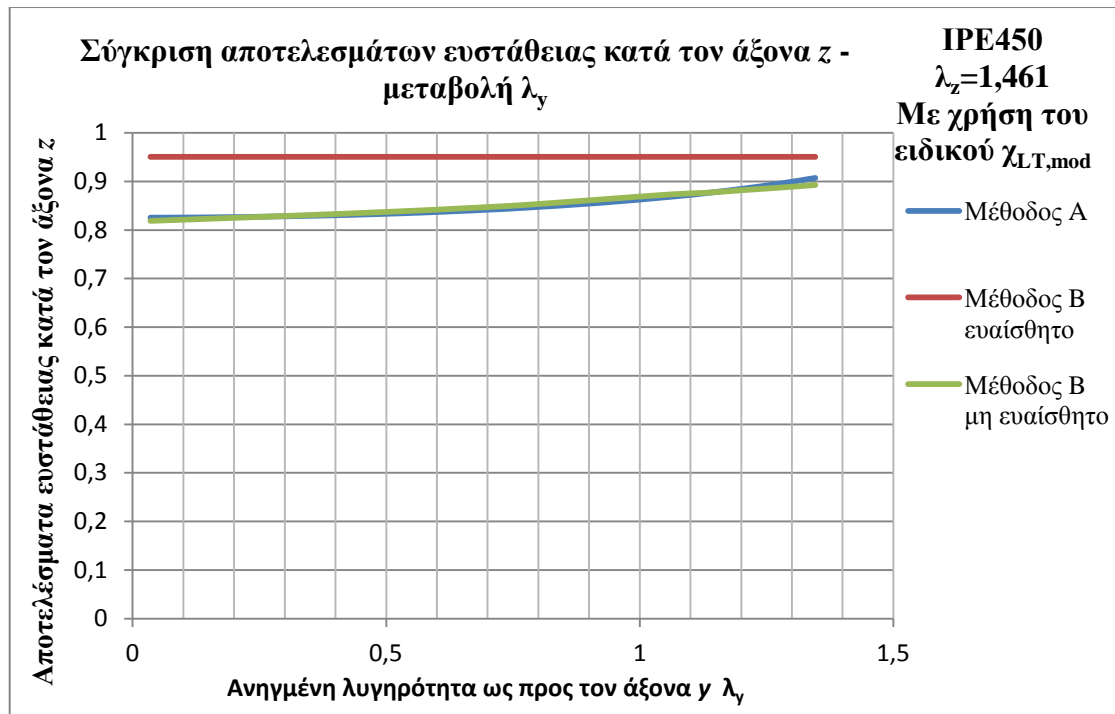
Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με χρήση του ειδικού μειωτικού συντελεστή. Οι καμπύλες είναι και εδώ οριζόντιες δείχνοντας ότι όσο και μεγαλύτερες τιμές λυγηρότητας να δίνουμε αυτές θα έχουν το ίδιο αποτέλεσμα ευστάθειας. Αυτό υποδηλώνει ότι δεν παίζει κάποιο ρόλο η λυγηρότητα στο τελικό αποτέλεσμα διότι πάντα είναι μικρότερη από τη σταθερή τιμή της $\bar{\lambda}_z = 1,461$. Εάν ξεπεράσει αυτή την τιμή ίσως η συμπεριφορά του μέλους να αλλάζει αισθητά.



Σχήμα 10. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα y – μεταβολή $\bar{\lambda}_y$ για IPE450 με χρήση ειδικού μειωτικού συντελεστή $\chi_{LT,mod}$.



Σχήμα 11. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα z – μεταβολή $\bar{\lambda}_y$ για IPE450 με χρήση γενικού μειωτικού συντελεστή χ_{LT} .



Σχήμα 12. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα z – μεταβολή $\bar{\lambda}_y$ για IPE450 με χρήση ειδικού μειωτικού συντελεστή $\chi_{LT,mod}$.

Συμπερασματικά, η ανηγμένη λυγηρότητα είναι μία παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά των μελών από χάλυβα στο φαινόμενο του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού. Ειδικά στην περίπτωση της διατομής IPE450. Η διατομή αυτή χαρακτηρίζεται από μεγάλη ακαμψία και ακτίνα αδράνειας περί τον ισχυρό άξονα της αλλά πολύ μικρή περί τον ασθενή. Αυτή η ανομοιομορφία εξηγεί και τη συμπεριφορά του μέλους σε λυγισμό όπως είδαμε στα σχήματα 5 έως 12.

Για σταθερή ανηγμένη λυγηρότητα ως προς y, $\bar{\lambda}_y = 0,751$ οι καμπύλες της Μεθόδου A και της B για μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις συμπίπτουν για μεγάλο φάσμα τιμών της λυγηρότητας $\bar{\lambda}_z$. Δεν συναντάμε μεγάλες διαφορές στα αποτελέσματα ευστάθειας για χρήση του γενικού και του ειδικού μειωτικού συντελεστή. Γενικά λόγω της μικρής τιμής $\bar{\lambda}_y = 0,751$ η συμπεριφορά του μέλους δεν κρύβει μεγάλες εκπλήξεις.

Αντίθετα στην περίπτωση της σχετικά μεγάλης σταθερής ανηγμένης λυγηρότητας ως προς z, $\bar{\lambda}_z = 1,461$ το μέλος έχει διαφορετική συμπεριφορά. Οι καμπύλες είναι μετατοπισμένες προς τα επάνω σε μεγαλύτερες τιμές επάρκειας. Επίσης, για την πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης οι δύο Μέθοδοι δίνουν τελείως διαφορετικά αποτελέσματα, ενώ για τη δεύτερη σχέση συμπίπτουν όπως και πριν αλλά βρίσκονται συνεχώς κοντά στο όριο αστάθειας. Επιπλέον, πάντα η χρήση του γενικού μειωτικού συντελεστή χ_{LT} δίνει μεγαλύτερα αποτελέσματα ευστάθειας δηλαδή πιο συντηρητικά σε σχέση με αυτά του ειδικού. Η διατομή μας είναι ελατή αρά ο ειδικός $\chi_{LT,mod}$ ίσως ερμηνεύει καλύτερα την συμπεριφορά της γι' αυτό είναι σκόπιμο να χρησιμοποιείται.

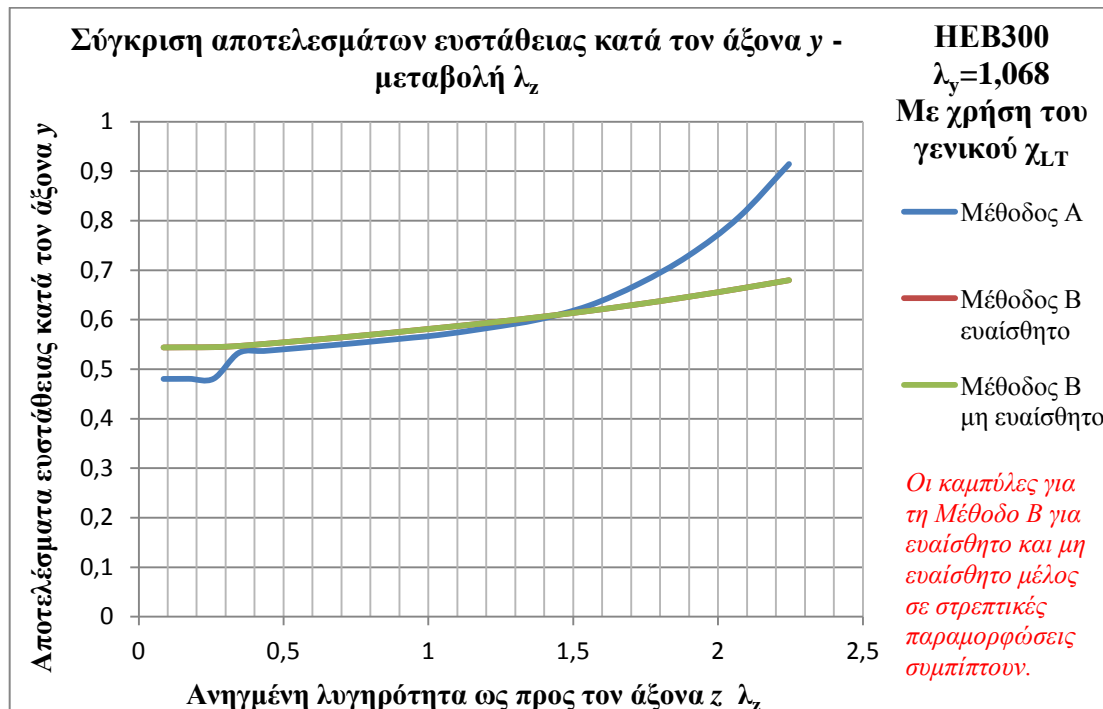
5.2.2 Μέλος με διατομή ΗΕΒ300

Οι ανηγμένες λυγηρότητες που προκύπτουν από τα δεδομένα ισοδύναμα μήκη λυγισμού στο κάθε επίπεδο λυγισμού είναι:

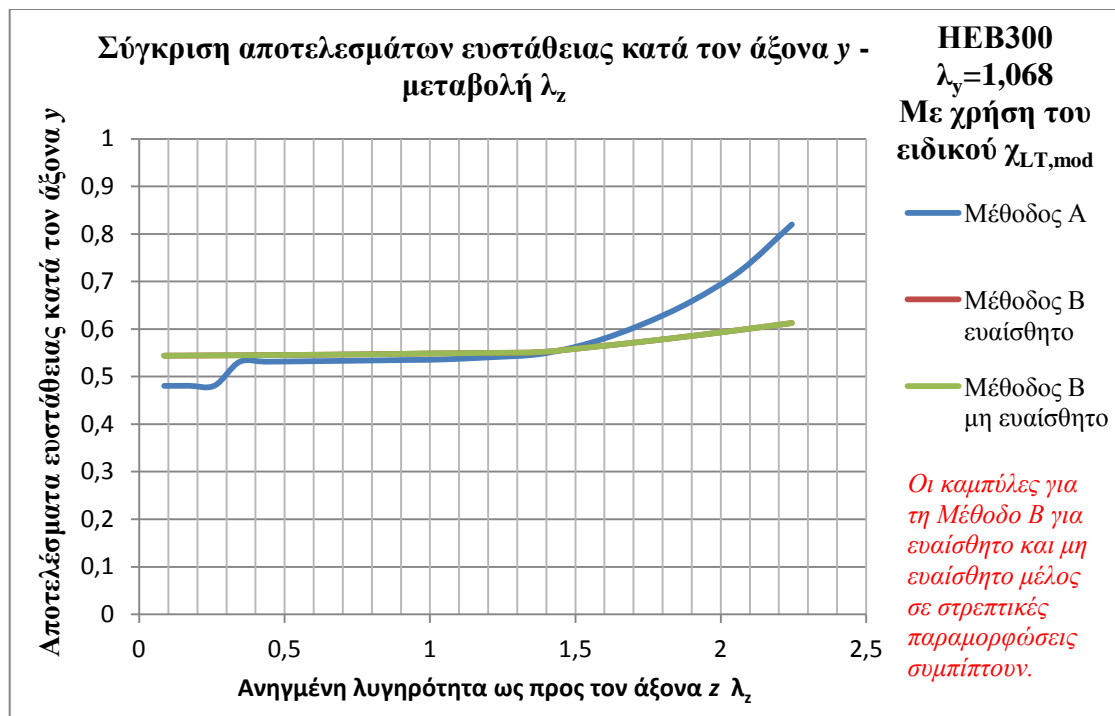
- ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα y-y για $L_{cr,y} = 10,6m : \bar{\lambda}_y = 1,068$
- ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα z-z για $L_{cr,z} = 4,6m : \bar{\lambda}_z = 0,794$

Κρατώντας κάθε φορά μία από τις δύο σταθερή, θα μεταβάλλουμε την άλλη έως ότου το μέλος μας να μην επαρκεί έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού.

Αρχικά, για σταθερή ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα y, $\bar{\lambda}_y = 1,068$ και για την πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης (σχήμα 13) στο συγκεκριμένο διάστημα τιμών $\bar{\lambda}_z = 0,086 \div 2,245$ κάνουμε χρήση του γενικού μειωτικού συντελεστή χ_{LT} . Οι καμπύλες της Μεθόδου Α και της Β σχεδόν συμπίπτουν για τις τιμές $\bar{\lambda}_z = 0,4 \div 1,6$ και η πρώτη φτάνει στο όριο αστάθειας για τιμή σχεδόν $\bar{\lambda}_z = 2,5$. Η καμπύλη Α για $\bar{\lambda}_z = 0,3$ αναπηδα. Στη συνέχεια, για χρήση του ειδικού συντελεστή $\chi_{LT,mod}$ (σχήμα 14) ισχύουν παρόμοια σχόλια με μόνη διαφορά ότι οι καμπύλες είναι πιο οριζόντιες δίνοντας μικρότερες τιμές επάρκειας. Γενικά, η μορφή των καμπυλών στα δύο αυτά σχήματα μοιάζει με αυτή στα σχήματα 5 και 6 για διατομή ΙΡΕ450.



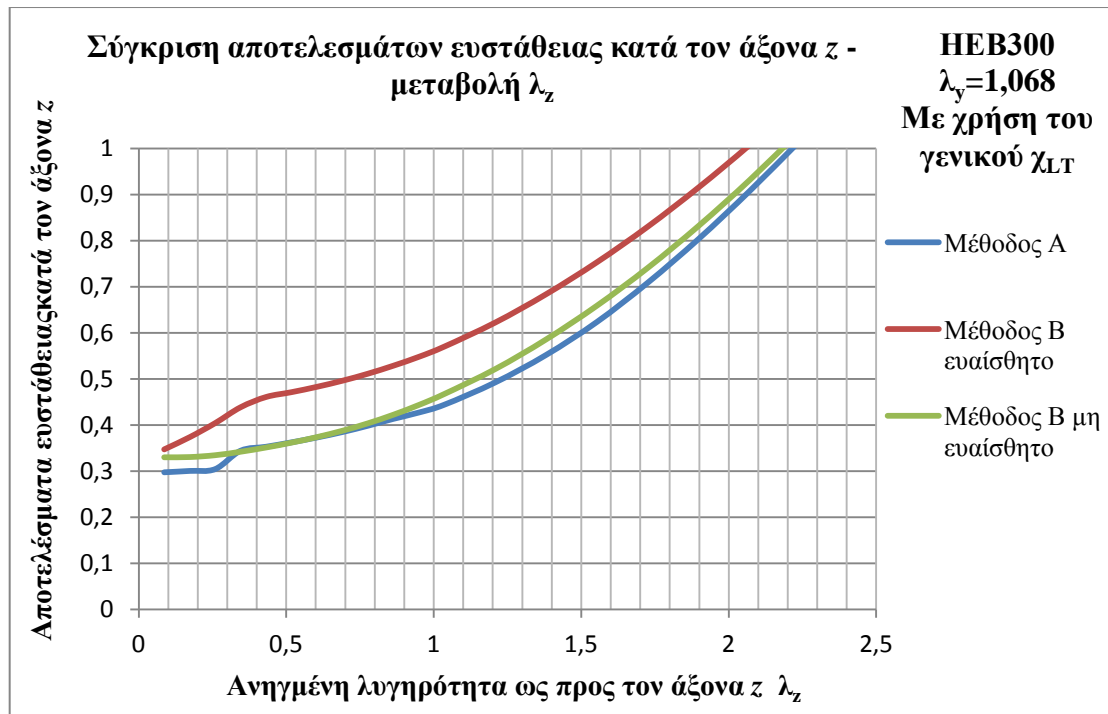
Σχήμα 13. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα y – μεταβολή $\bar{\lambda}_z$ για ΗΕΒ300 με χρήση γενικού μειωτικού συντελεστή χ_{LT} .



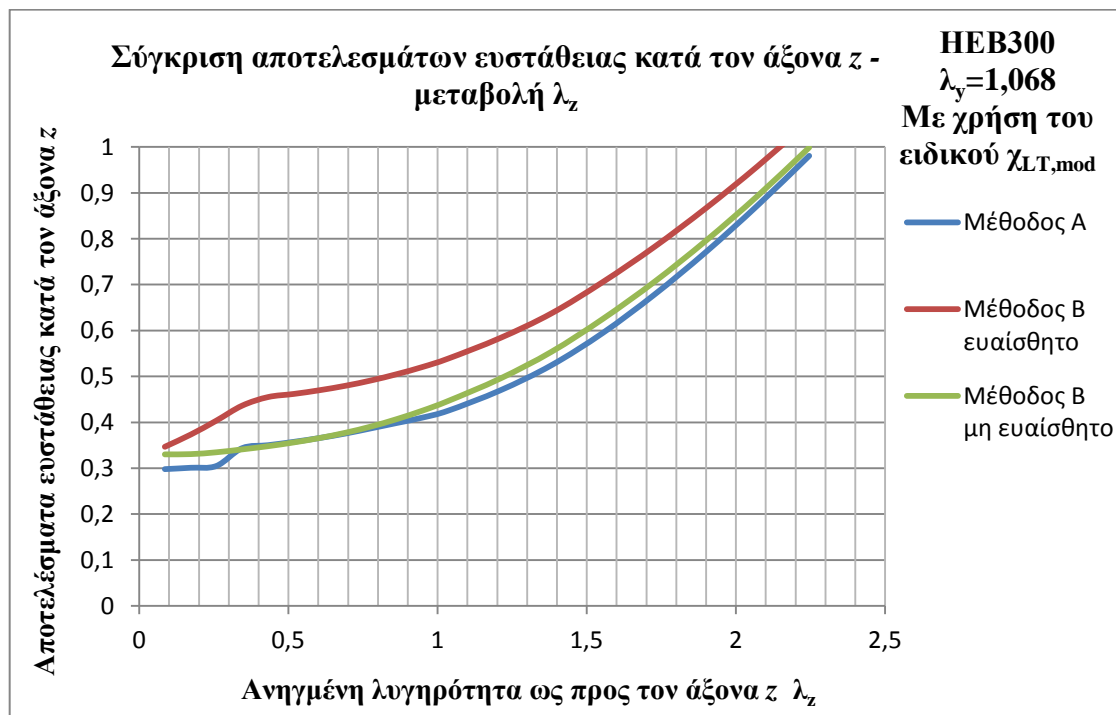
Σχήμα 14. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα y – μεταβολή $\bar{\lambda}_z$ για HEB300 με χρήση ειδικού μειωτικού συντελεστή $\chi_{LT,mod}$.

Στο σχήμα 15 δίνονται οι καμπύλες ευστάθειας για την δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης με χρήση του γενικού μειωτικού συντελεστή. Οι καμπύλες είναι πολύ πιο ανηφορικές σε σχέση με αυτές της πρώτης σχέσης. Τα αποτελέσματα ευστάθειας της Μεθόδου A και της B για μη ευαίσθητο μέλος είναι σχεδόν ίδια και φτάνουν στο 1,0 για $\bar{\lambda}_z = 2,2$ ενώ για $\bar{\lambda}_z = 0,3$ έχουν αποτομή αναπηδηση (γονατο) . Η καμπύλη για ευαίσθητο μέλος απέχει αισθητά από τις προηγούμενες. Όλες οι καμπύλες ξεκινούν από μικρές τιμές ευστάθειας περί το 0,3.

Για χρήση του ειδικού μειωτικού συντελεστή $\chi_{LT,mod}$ οι καμπύλες έχουν ίδια μορφή (σχήμα 16), χωρίς κάποια διαφορά στα παραπάνω σχόλια. Η συνεχής ταύτιση των αποτελεσμάτων ευστάθειας της Μεθόδου A με το μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις της Μεθόδου B εξηγείται από το γεγονός ότι ο μειωτικός συντελεστής γενικά είναι κοντά στη μονάδα ή ακόμα και μονάδα. Άρα ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός δεν αποτελεί πιθανή μορφή αστοχίας. Αυτό το σχόλιο αναφέρεται σε μεγάλο μέρος αυτής της εργασίας όπου συναντάται αυτό το φαινόμενο.



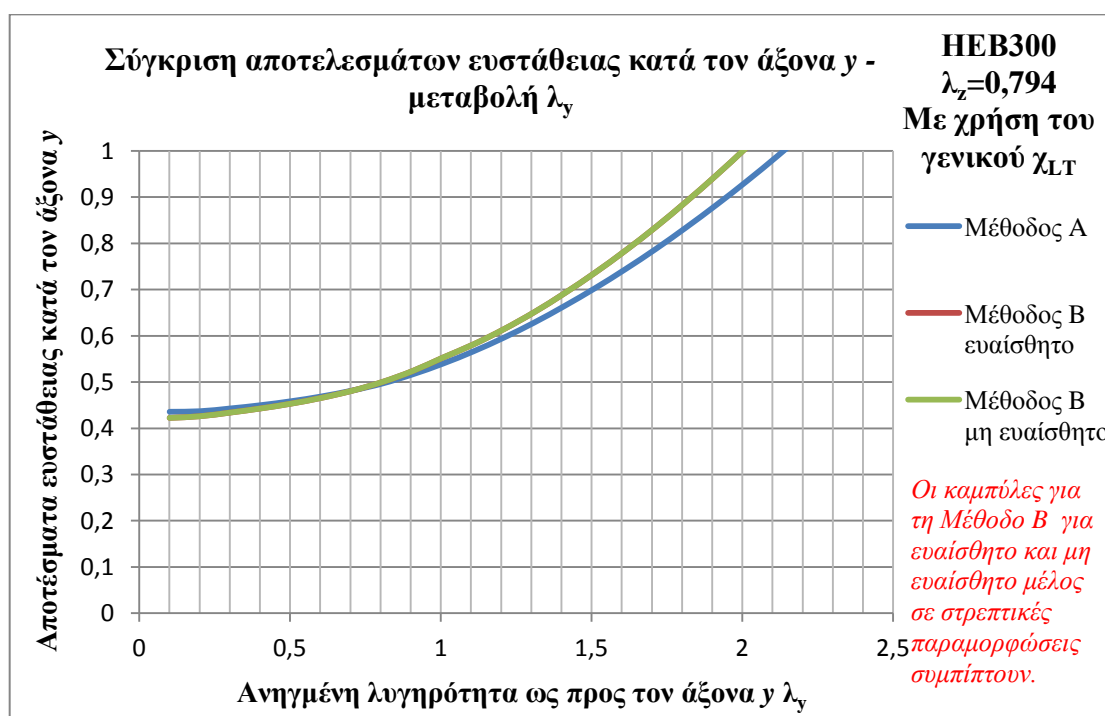
Σχήμα 15. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα z – μεταβολή $\bar{\lambda}_z$ για HEB300 με χρήση γενικού μειωτικού συντελεστή χ_{LT} .



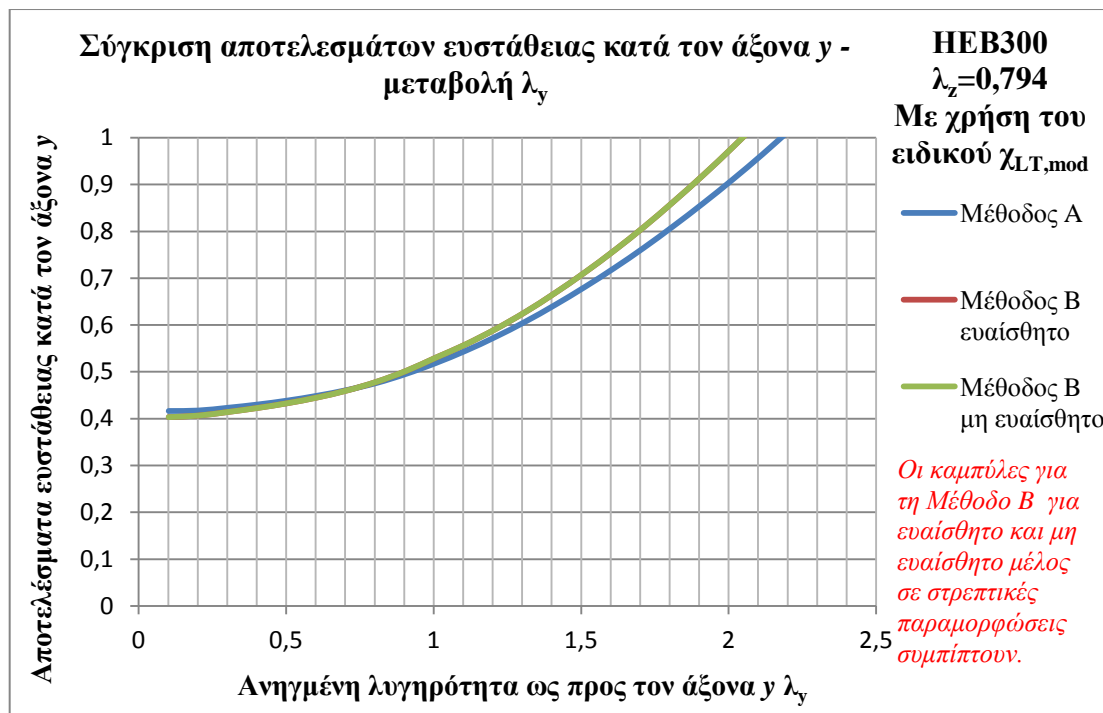
Σχήμα 16. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα z – μεταβολή $\bar{\lambda}_z$ για HEB300 με χρήση ειδικού μειωτικού συντελεστή $\chi_{LT,mod}$.

Επόμενο βήμα στην έρευνά μας είναι για σταθερή ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα z, $\bar{\lambda}_z = 0,794$ να μεταβαλλουμε την $\bar{\lambda}_y = 0,101 \div 2,216$ στο συγκεκριμένο διαστημα τιμών.

Στο σχήμα 17 με χρήση του γενικού μειωτικού συντελεστή βλέπουμε τα αποτελέσματα ευστάθειας για λυγισμό περί τον ισχυρό άξονα. Γενικά οι καμπύλες των δύο μεθόδων εφάπτονται στο διάστημα $\bar{\lambda}_y = 0,101 \div 1,50$ και ξεκινούν από μία μέση τιμή επάρκειας 0,43. Από λίγο μικρότερη τιμή 0,4 ξεκινούν οι καμπυλες στο σχημα 18 για χρήση του ειδικου $\chi_{LT,mod}$, όπου και εδώ σχεδόν συμπίπτουν. Και στις δύο περιπτώσεις οι καμπύλες είναι ομαλές χωρίς κάποιο γόνατο στην έκτασή τους.

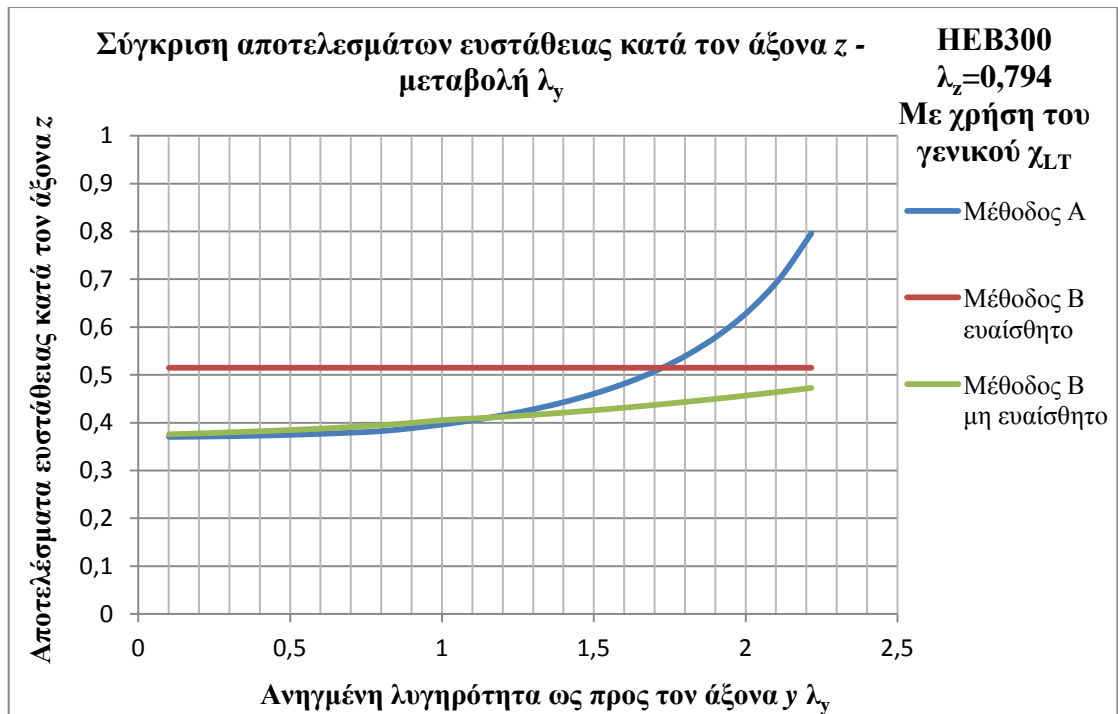


Σχήμα 17. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα y – μεταβολή $\bar{\lambda}_y$ για HEB300 με χρήση γενικού μειωτικού συντελεστή χ_{LT} .

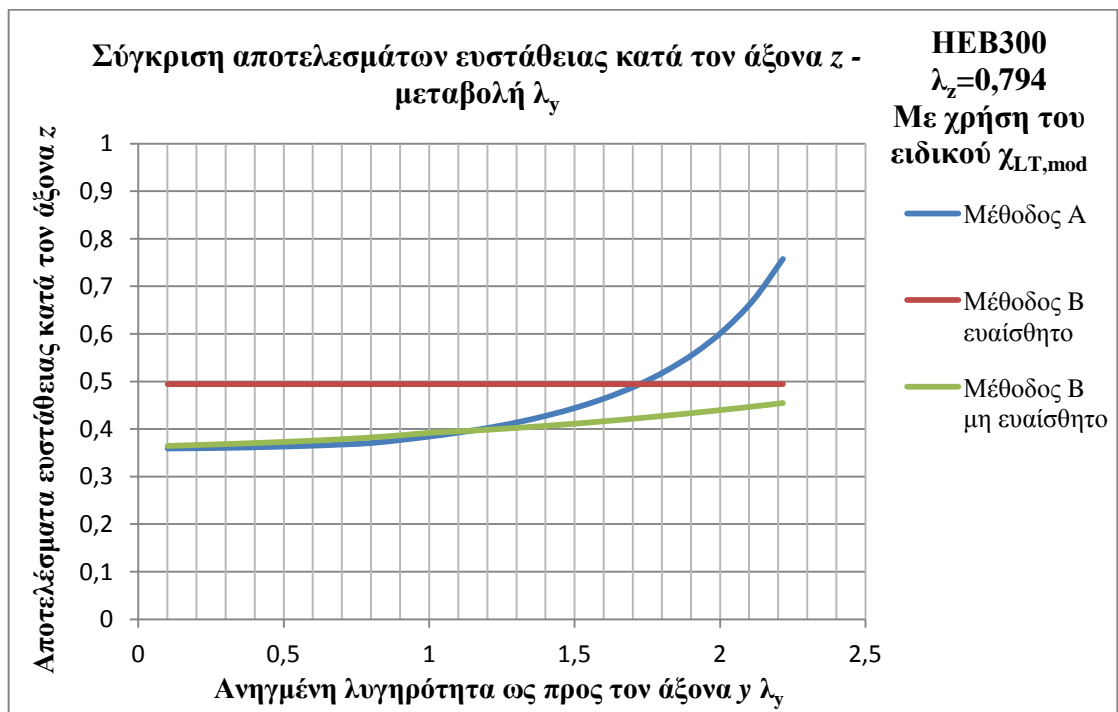


Σχήμα 18. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα y – μεταβολή $\bar{\lambda}_y$ για HEB300 με χρήση ειδικού μειωτικού συντελεστή $\chi_{LT,mod}$.

Για λυγισμό περί τον ασθενή άξονα της διατομής HEB300 τα αποτελέσματα ευστάθειας με χρήση των δύο μειωτικών συντελεστών συμβαδίζουν. Αυτό οφείλεται όπως αναφέραμε παραπάνω στις τιμές τους οι οποίες προσεγγίζουν συνήθως τη μονάδα. Αυτό δικαιολογεί ότι οι καμπύλες της Μεθόδου A και του μη ευαίσθητου μέλους σε στρεπτικές παραμορφώσεις συμπίπτουν στο διάστημα τιμών $\bar{\lambda}_y = 0,101 \div 1,30$, όπου είναι σχεδόν οριζοντίες. Όμως στην τιμή $\bar{\lambda}_y = 1,4$ η κλίση αυξάνεται αποτομα για την καμπύλη της Μεθόδου A. Η καμπύλη του μη ευαίσθητου συνεχίζει με ελάχιστη κλίση όπως πριν και δεν ξεπερνά για μεγάλες λυγηρότητες την τιμή 0,5. Επίσης, η καμπύλη για ευαίσθητο μέλος με σχεδόν σταθερή τιμή 0,5 συναντά αυτή της Μεθόδου A στο $\bar{\lambda}_y = 1,7$. Για απαγορευτικές τιμές ανηγμένης λυγηρότητας οι καμπύλες της Μεθόδου B για ευαίσθητο και μη ευαίσθητο μέλος τέμνονται.



Σχήμα 19. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα z – μεταβολή $\bar{\lambda}_y$ για HEB300 με χρήση γενικού μειωτικού συντελεστή χ_{LT} .



Σχήμα 20. Σύγκριση αποτελεσμάτων ευστάθειας κατά τον άξονα z – μεταβολή $\bar{\lambda}_y$ για HEB300 με χρήση ειδικού μειωτικού συντελεστή $\chi_{LT,mod}$.

Συμπερασματικά, η διατομή HEB300 είναι περισσότερο συμμετρική ως προς την ακαμψία της και την αδράνεια της σε σχέση με την IPE450. Έτσι, ο ασθηνής της άξονας δεν υστερεί ως προς τον ισχυρό της σε τόσο μεγάλο βαθμό όσο της IPE450. Βέβαια, και στις δύο περιπτώσεις σταθερών ανηγμένων λυγηροτήτων αυτές δεν ήταν πολύ μεγαλύτερες από την μονάδα. Προφανώς, λοιπόν, η γενική συμπεριφορά στο φαινόμενο του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού της HEB300 είναι καλύτερη από της IPE450 όπως είδαμε στα σχήματα 13 έως 20.

Για σταθερή ανηγμένη λυγηρότητα ως προς y , $\bar{\lambda}_y = 1,068$ για την πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης οι καμπύλες της Μεθόδου A και της B για μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις εφάπτονται για τις τιμές $\bar{\lambda}_z = 0,4 \div 1,6$ και δεν δείχνουν να φτάνουν συντομα στη κρίσιμη τιμή 1,0. Για τη δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης αυτές σχεδόν συμπίπτουν. Δεν συναντάμε σημαντικές διαφορές από τη χρήση των δύο διαφορετικών προσεγγίσεων για το μειωτικό συντελεστή.

Στην περίπτωση της σταθερής ανηγμένης λυγηρότητας ως προς z , $\bar{\lambda}_z = 0,794$, για λυγισμό περί τον ισχυρό άξονα οι ίδιες καμπύλες όπως πριν συμπίπτουν για όλο το πεδίο τιμών $\bar{\lambda}_y = 0,101 \div 2,216$ και για λυγηρότητες κοντά στη τιμή 2,0 φτάνουν στην κρίσιμη τιμή 1,0. Επίσης, για λυγισμό περι τον ασθηνή άξονα της διατομής μας το μη ευαίσθητο μέλος δίνει ίδια αποτελέσματα με τη Μέθοδο A για τις τιμές $\bar{\lambda}_y = 0,101 \div 1,30$. Εδώ συναντάται και η μεγάλη διαφορά στις συμπεριφορές των δύο διατομών. Η HEB300 για ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις δίνει μία σταθερή τιμή επάρκειας 0,5 και για τους δύο μειωτικούς συντελεστές. Ενώ, η IPE450 αρχικά για χρήση του γενικού χ_{LT} δίνει τιμές επάρκειας μόνο πάνω από τη μονάδα, δηλαδή το μέλος σε καμιά περίπτωση δεν ευσταθεί και στη συνέχεια για χρήση του ειδικού $\chi_{LT,mod}$ οι τιμές ξεκινούν από το 0,9. Επιπλέον, οι υπόλοιπες καμπύλες της IPE450 μπορεί να συμπίπτουν αλλά ξεκινούν και αυτές από πολύ υψηλές τιμές επάρκειας, σε αντίθεση με της HEB300 όπου κυμαίνονται σε μεσαίες τιμές περί το 0,4 και μόνο η καμπύλη A δείχνει πιθανότητες αστάθειας αλλά για πολύ μεγάλες τιμές ανηγμένης λυγηρότητας.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί και σε άλλα σημεία της εργασίας, η ταύτιση των αποτελεσμάτων ευστάθειας μεταξύ της Μεθόδου A και της B για μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις συμβαίνει και για τις δύο διατομές μας. Η εξήγηση βρίσκεται στην ερμηνεία των μειωτικών συντελεστών. Για τις δεδομένες φορτίσεις και τις αρχικές υποθέσεις στις περισσότερες επιλύσεις μας προκύπτουν μειωτικοί συντελεστές κοντά στη μονάδα ή ακόμα και μονάδα. Αυτό υποδηλώνει ότι το μέλος δεν είναι ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις και συνεπώς, ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός δεν αποτελεί πιθανή μορφή αστοχίας. Βέβαια, εάν δεν υπολογίσουμε το μειωτικό συντελεστή δεν μπορούμε να προχωρήσουμε σε τέτοιες διαπιστώσεις. Το μόνο που γνωρίζουμε εξ αρχής είναι ότι τα μέλη με ανοιχτές διατομές και μη παρεμποδιζόμενη στρέψη είναι ευαίσθητα σε στρεπτικές παραμορφώσεις και πρέπει να γίνει αναλυτικός υπολογισμός του μειωτικού του συντελεστή. Αντίθετα, τα μέλη με κοίλες κυκλικές διατομές ή μέλη στα οποία η στρέψη παρεμποδίζεται θεωρούνται μη ευαίσθητα και ο μειωτικός συντελεστής λαμβάνεται μονάδα.

5.3 Συμβολή όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας

Στο υποκεφάλαιο 5.2 ασχοληθήκαμε με την παράμετρο ανηγμένη λυγηρότητα και με τη γνωστή διαδικασία μεταβολής της προέκυψαν τα σχήματα 5 έως 20. Στο υποκεφάλαιο αυτό θα δείξουμε τη συμβολή των όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας μέσα σε ένα συγκεκριμένο διάστημα τιμών ανηγμένων λυγηροτήτων.

Οι όροι που συμβάλουν στο αποτέλεσμα ευστάθειας είναι:

- ο όρος της αξονικής δύναμης
- ο όρος της καμπτικής ροπής περί τον άξονα y-y
- ο όρος της καμπτικής ροπής περί τον άξονα z-z

Η ανάλυση θα γίνει και για τις δύο διατομές τις IPE450 και HEB300. Οι διατομές αυτές είναι ελατές και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ειδικός μειωτικός συντελεστής $\chi_{LT,mod}$. Ο συντελεστής αυτός είναι πιο αξιόπιστος για τις διατομές στις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί δηλαδή ελατές ή ισοδύναμες συγκολλητές υπό κάμψη διότι λαμβάνει υπόψη του την κατανομή της ροπής μεταξύ των πλευρικών στηρίξεων με τη χρήση διορθωτικού συντελεστή. Έτσι, στην παρούσα έρευνα θα χρησιμοποιήσουμε μόνο τον $\chi_{LT,mod}$.

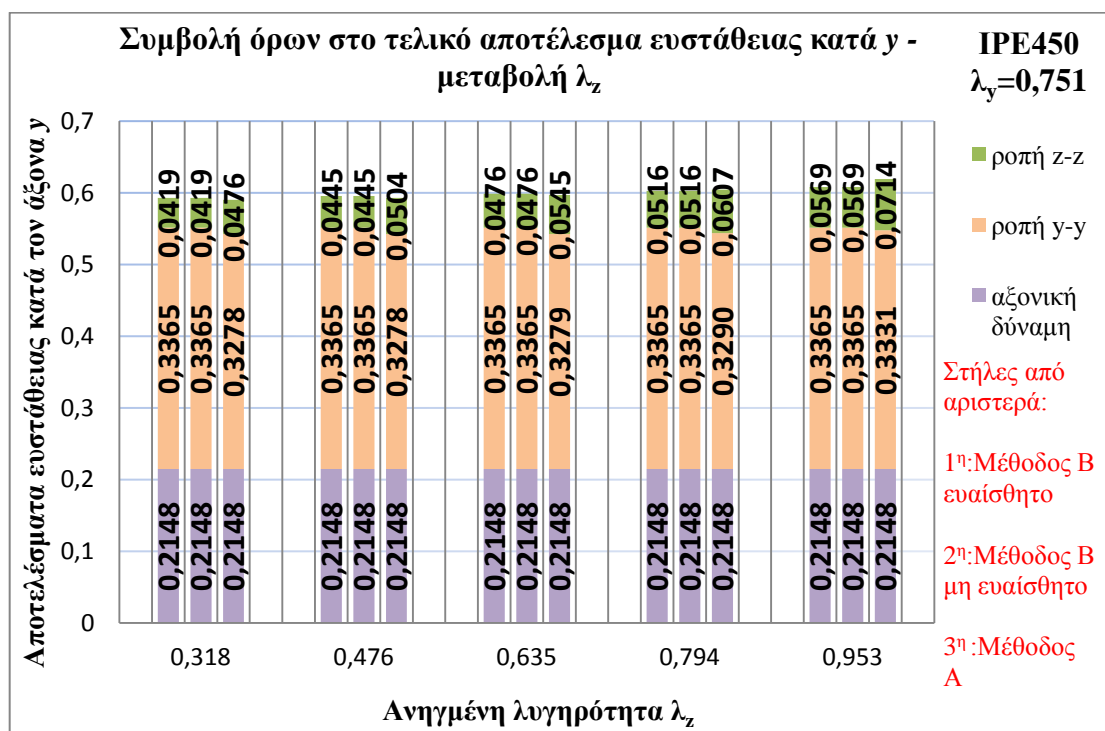
Όπως αναφέραμε η έρευνα θα γίνει σε συγκεκριμένο διάστημα τιμών ανηγμένων λυγηροτήτων. Αυτό θα προκύψει ως εξής για κάθε διατομή: καταρχάς γίνεται διάκριση πάλι σε δύο περιπτώσεις, για σταθερή ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα y, $\bar{\lambda}_y$ μεταβάλλουμε την $\bar{\lambda}_z$ και το αντίθετο. Για κάθε μία από τις περιπτώσεις αυτές βρίσκουμε το διάστημα τιμών της εκάστοτε μεταβαλλόμενης ανηγμένης λυγηρότητας όπου τα αποτελέσματα ευστάθειας συμπίπτουν (συνήθως της Μεθόδου A και της B για μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις) και για τις δύο σχέσεις αλληλεπίδρασης. Τέλος, από αυτά τα δύο διαστήματα τιμών, ένα για κάθε σχέση αλληλεπίδρασης, εξάγουμε ένα διάστημα μόνο με τις κοινές τιμές των προηγούμενων. Σε αυτό το κοινό διάστημα τιμών της ανηγμένης λυγηρότητας θα αναλύσουμε τη συμβολή των όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας.

Όσο αφορά τα σχήματα που δίνονται, ο κατακόρυφος άξονας περιλαμβάνει τα αποτελέσματα ευστάθειας για λυγισμό περί τον εκάστοτε άξονα και στον οριζόντιο άξονα θα βρίσκονται οι τιμές της ανηγμένης λυγηρότητας. Για κάθε τιμή της θα υπάρχουν τρεις στήλες, μία για κάθε μέθοδο (Μέθοδος A, Μέθοδος B για ευαίσθητο μέλος και Μέθοδος B για μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις). Η κάθε στήλη χωρίζεται σε τρία μέρη, ένα για κάθε όρο της σχέσης αλληλεπίδρασης.

5.3.1 Μέλος με διατομή IPE450

Για σταθερή ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα y , $\bar{\lambda}_y = 0,751$, το κοινό διάστημα τιμών $\bar{\lambda}_z$ για τις δύο σχέσεις αλληλεπίδρασης με το οποίο θα ασχοληθούμε είναι $\bar{\lambda}_z = 0,318 \div 0,953$. Ενώ για την περίπτωση της σταθερής $\bar{\lambda}_z = 1,461$ το κοινό διάστημα είναι $\bar{\lambda}_y = 1,062 \div 1,346$. Σημειώνουμε ότι θα γίνει χρήση μόνο του ειδικού μειωτικού συντελεστή $\chi_{LT,mod}$. Επίσης, η τιμή σχεδιασμού της αξονικής δύναμης είναι $N_{Ed} = 620kN$, της ροπής περί τον άξονα $y-y$ $M_{y,Ed} = 20.200kNcm$ και της ροπής περί τον $z-z$, $M_{z,Ed} = 716kNcm$.

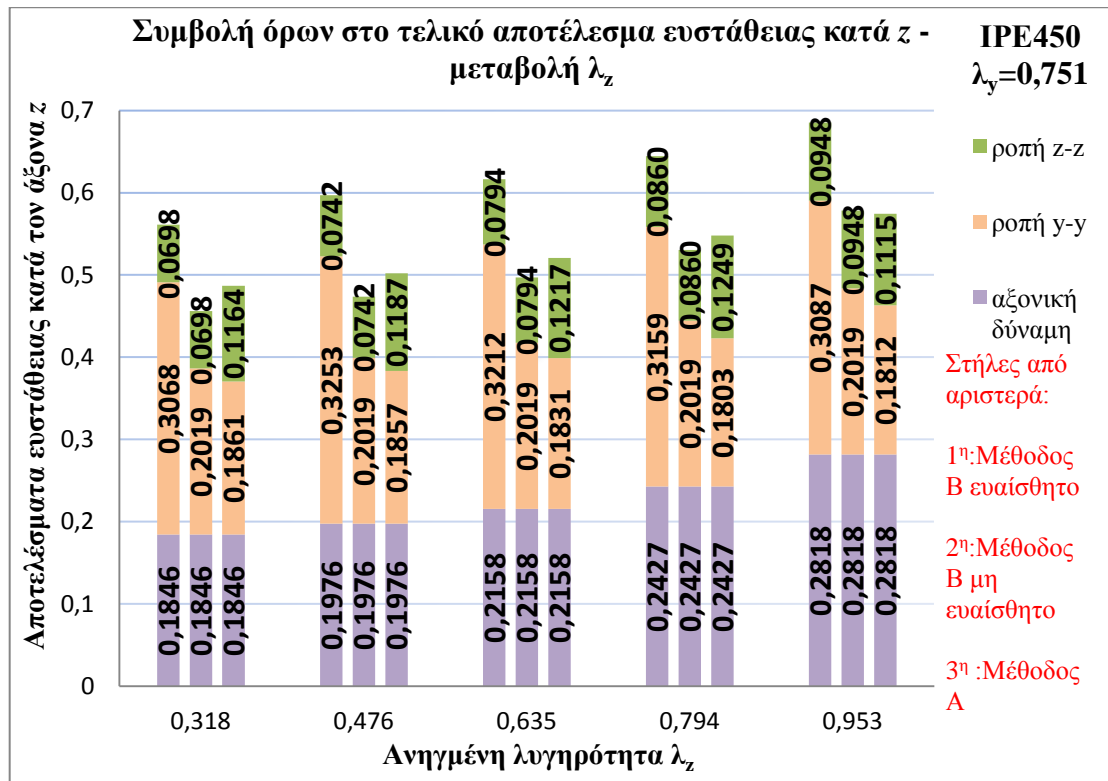
Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για σταθερή την ανηγμένη λυγηρότητα ως προς y , $\bar{\lambda}_y = 0,751$. Στο σχήμα 21 για την πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης, είναι γνωστό ότι τα αποτελέσματα ευστάθειας για τη Μέθοδο B για ευαίσθητο και μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις είναι ακριβώς ίδια, διότι είναι ίδιοι οι συντελεστές αλληλεπίδρασης k_{yy} και k_{yz} . Άρα, και οι όροι της σχέσης αλληλεπίδρασης είναι ίδιοι. Επιπλέον, ο όρος της αξονικής δύναμης δεν εξαρτάται από κάποιο συντελεστή αλληλεπίδρασης k και συνεπώς, είναι ίδιος για κάθε σχέση αλληλεπίδρασης. Για τη μικρότερη τιμή της $\bar{\lambda}_z$, η Μέθοδος A δίνει μικρότερο όρο ροπής περί τον άξονα y από αυτόν της Μεθόδου B, ενώ συμβαίνει το αντίθετο για τον όρο της ροπής περί τον z . Έτσι, τελικά έχουμε παρόμοια τελικά αποτελέσματα ευστάθειας. Όσο μεγαλώνει η λυγηρότητα, η διαφορά για τον όρο της ροπής περί τον y μειώνεται μεταξύ των δύο μεθόδων ενώ αυτή του καμπτικού όρου περί τον z αυξάνεται. Για το λόγο αυτό, τα τελικά αποτελέσματα αρχίζουν και διαφοροποιούνται (σχήμα 21).



Σχήμα 21. Συμβολή όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας κατά τον άξονα y –μεταβολή $\bar{\lambda}_z$ για IPE450.

Στη δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης τα αποτελέσματα ευστάθειας για ευαίσθητο και μη ευαίσθητο μέλος είναι διαφορετικά. Αυτά του ευαίσθητου μέλους δεν ακολουθούν τα υπόλοιπα στο τελικό αποτέλεσμα. Αυτό οφείλεται κυρίως στον όρο της ροπής περί τον άξονα y , διότι ο συντελεστής αλληλεπίδρασης k_{zy} είναι αρκετά διαφορετικός.

Όσο αφορά τη Μέθοδο Α και τη Β για μη ευαίσθητο μέλος όπου τα τελικά αποτελέσματα είναι παρόμοια φαίνεται ότι ο όρος της ροπής περί τον y της Α είναι πάντα μικρότερος από του Β αλλά αντίθετα αυτός της ροπής περί τον z είναι μεγαλύτερος. Οι διαφορές μικραίνουν όσο η ανηγμένη λυγηρότητα μεγαλώνει αλλά αυτές είναι ανάλογες έτσι ώστε να καταλήγουμε σε ίδια τελικά αποτελέσματα ευστάθειας μεταξύ των δύο μεθόδων (σχήμα 22).

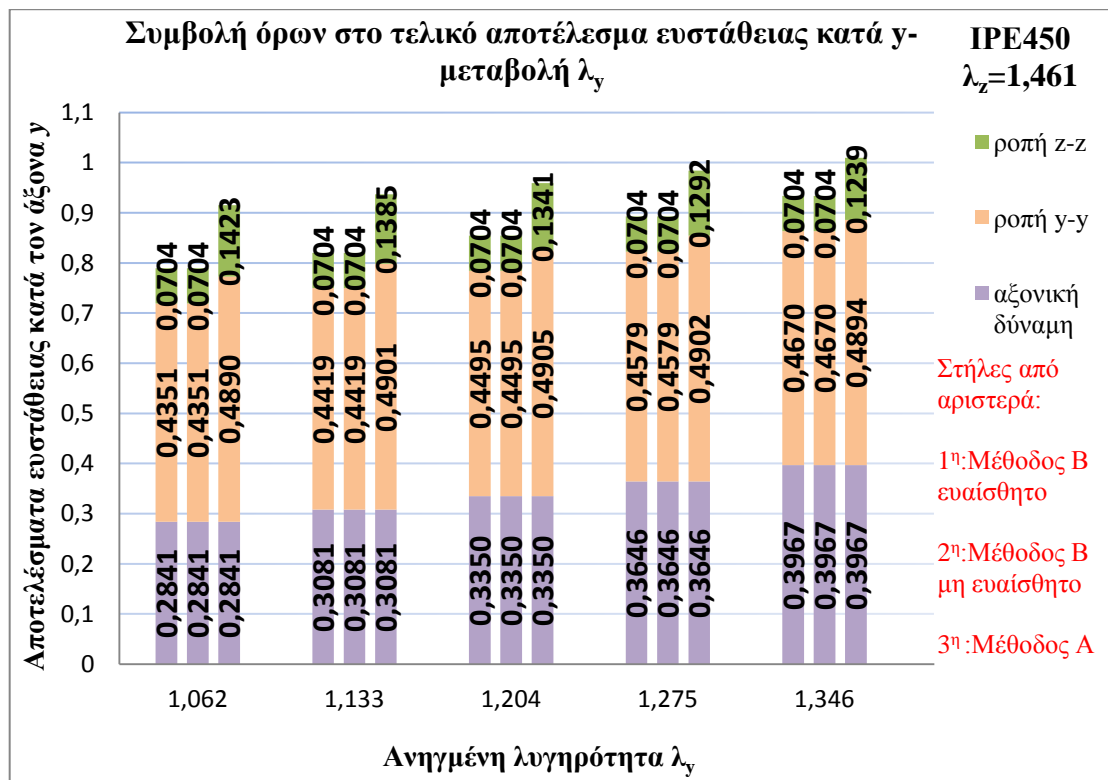


Σχήμα 22. Συμβολή όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας κατά τον άξονα z –μεταβολή λ_z για IPE450.

Στη συνέχεια κρατάμε σταθερή την ανηγμένη λυγηρότητα ως προς z , $\bar{\lambda}_z = 1,461$ και στο διάστημα τιμών $\bar{\lambda}_y = 1,062 \div 1,346$ δειχνουμε την συμβολη των ορων στο τελικο αποτελεσμα.

Γενικά, σε αυτή την περίπτωση προσπαθήσαμε να βρούμε ένα διάστημα τιμών της ανηγμένης λυγηρότητας όπου είναι πιο κοντά τα αποτελέσματα ευστάθειας για τις δύο μεθόδους, διότι σε καμιά τιμή οι καμπύλες δεν εφάπτονταν.

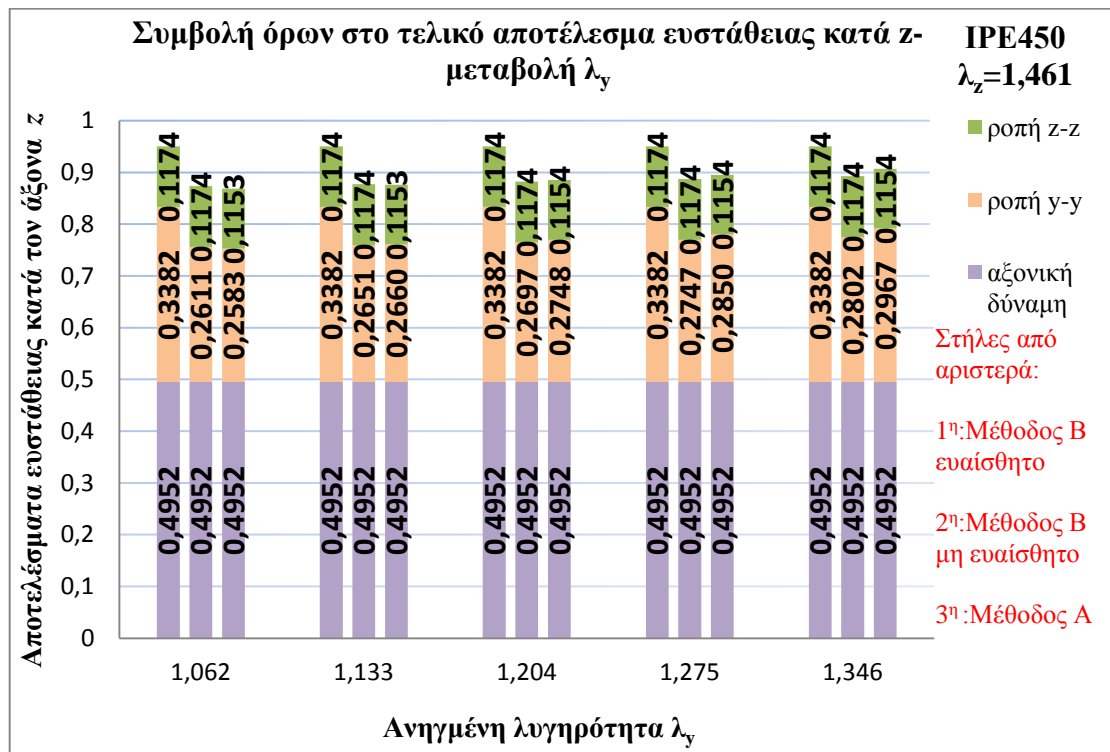
Σχετικά με λυγισμό περί τον ισχυρό άξονα (σχήμα 23), ο όρος της ροπής περί τον άξονα y της Μεθόδου A είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν της B αλλά η διαφορά μικραίνει πάρα πολύ για την μεγαλύτερη τιμή λυγηρότητας. Επίσης, ο όρος της ροπής περί τον z της A είναι σχεδόν διπλάσιος της B για τη μικρότερη λυγηρότητα και μειώνεται ελάχιστα όσο αυτή μεγαλώνει. Έτσι, όσο η λυγηρότητα μεγαλώνει τόσο η διαφορά των τελικών αποτελεσμάτων ευστάθειας μεταξύ των δύο μεθόδων μειώνεται αλλά σε καμιά περίπτωση δεν μπορούμε να πούμε ότι οι καμπύλες τους τέμνονται.



Σχήμα 23. Συμβολή όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας κατά τον άξονα y –μεταβολή $\bar{\lambda}_y$ για IPE450.

Για τη δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης τα αποτελέσματα ευστάθειας είναι πολύ κοντά στη μονάδα. Για ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις η τιμή παραμένει σταθερή και άρα, η συμβολή των όρων σε αυτή. Οι όροι της ροπής περί τον άξονα z είναι σχεδόν σταθεροί με μικρότερο αυτόν της Μεθόδου A σε σχέση με το μη ευαίσθητο μέλος. Επίσης, μικρότερος είναι και άλλος καμπτικός όρος μόνο, όμως, για τη μικρότερη ανηγμένη λυγηρότητα αφού για τις άλλες τιμές της συμβαίνει το αντίθετο.

Γενικά οι καμπύλες και για τις δύο μεθόδους είναι σχεδόν οριζόντιες και δεν παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις στις τιμές τους.



Σχήμα 24. Συμβολή όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας κατά τον άξονα z –μεταβολή $\bar{\lambda}_y$ για IPE450.

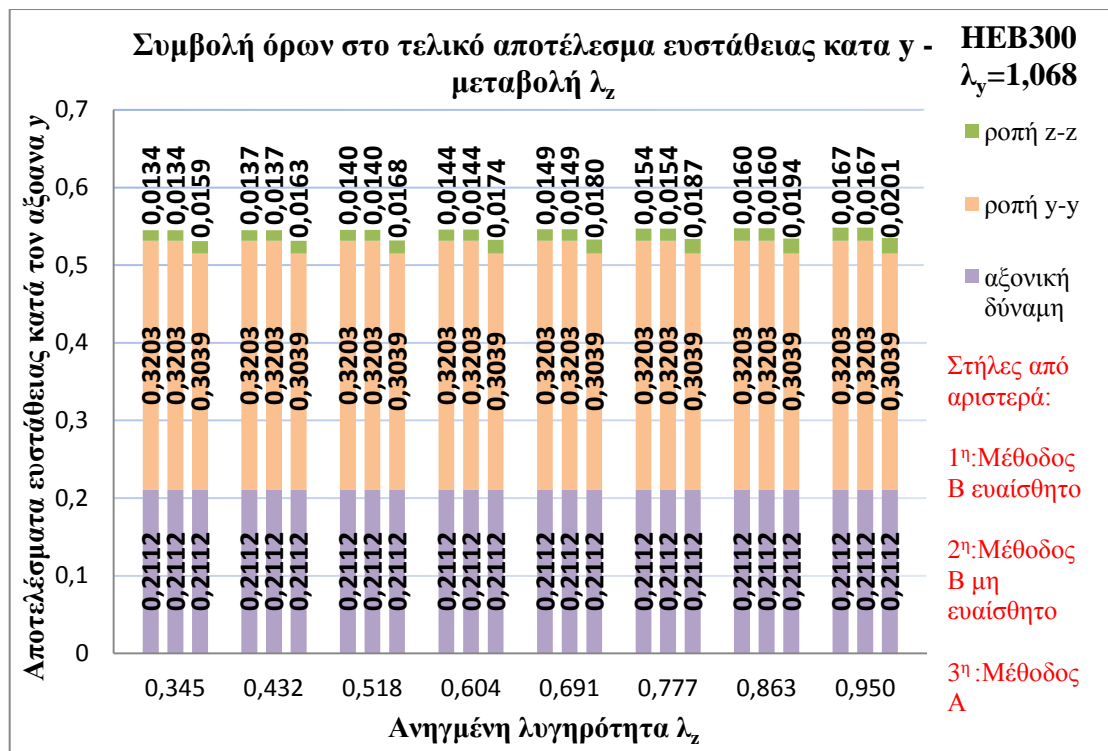
5.3.2 Μέλος με διατομή HEB300

Για σταθερή ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα y , $\bar{\lambda}_y = 1,068$, το κοινό διάστημα τιμών $\bar{\lambda}_z$ για τις δύο σχέσεις αλληλεπίδρασης με το οποίο θα ασχοληθούμε είναι $\bar{\lambda}_z = 0,345 \div 1,554$. Ενώ για την περίπτωση της σταθερής $\bar{\lambda}_z = 0,794$ το κοινό διάστημα είναι $\bar{\lambda}_y = 0,101 \div 1,310$. Τα διαστήματα αυτά είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα της IPE450, διότι στη HEB300 τα αποτελέσματα ευστάθειας της Μεθόδου Α και της Β για μη ευαίσθητο συμπίπτουν για μεγάλο πλήθος λυγηροτήτων. Έτσι, για κάθε περίπτωση υπάρχουν δύο σχήματα για να είναι πιο ευδιάκριτα τα αποτελέσματα στο μελετητή. Σημειώνουμε ότι θα γίνει χρήση μόνο του ειδικού μειωτικού συντελεστή $\chi_{LT,mod}$. Επίσης, η τιμή σχεδιασμού της αξονικής δύναμης είναι $N_{Ed} = 620kN$, της ροπής περί τον άξονα $y-y$ $M_{y,Ed} = 20.200kNcm$ και της ροπής περί τον $z-z$, $M_{z,Ed} = 716kNcm$.

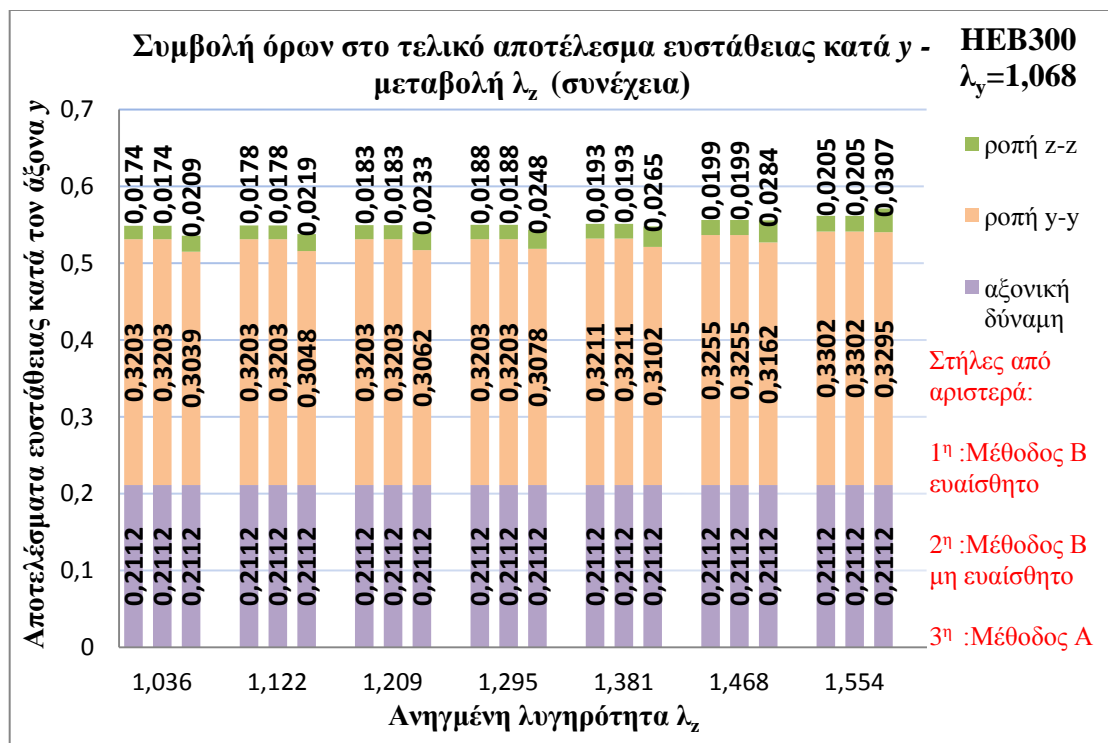
Στα σχήματα 25 και 26 βλέπουμε τη συμβολή των όρων στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας για την πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης και για σταθερή $\bar{\lambda}_y = 1,068$. Για τη μικροτερη τιμη λυγηροτητας, ο ορος της ροπης περι τον αξονα y της Μεθόδου Α έχει τη μεγαλύτερη διαφορά με αυτόν της Β, με μικρότερο της Α. Όσο η ανηγμένη λυγηρότητα αυξάνεται τόσο η διαφορά αυτή μειώνεται και για $\bar{\lambda}_z = 1,554$ σχεδόν εξανεμίζεται. Αντίθετα, ο άλλος καμπτικός όρος της Μεθόδου Α είναι πάντα μεγαλύτερος από της Β και η διαφορά αυξάνεται όσο η λυγηρότητα μεγαλώνει. Βέβαια, πρέπει να σημειώσουμε ότι λόγω της μικρής τιμής σχεδιασμού της ροπής περί τον άξονα z , $M_{y,Ed} = 716kNcm$ ο όρος της συμβάλει ελάχιστα στο τελικό αποτέλεσμα σε σχέση με τους άλλους και κατ' επέκταση οι διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ακόμα μικρότερες. Αυτό δεν σημαίνει ότι πρέπει να αγνοούνται, αφού οι συντελεστές αλληλεπίδρασης k_{yz} και k_{zz} μπορούν να λαβουν σημαντικες τιμες.

Στην περίπτωση μας, οι διαφορές μεταξύ των όρων της ροπής $y-y$ των δύο μεθόδων, που πρέπει να εξισορροπισθούν από αυτές του άλλου καμπτικού όρου, είναι μικρές. Άρα το τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας καταλήγει να είναι σχεδόν ίσο για τις δύο μεθόδους.

Πιο συγκεκριμένα, στο σχήμα 26, για τις τρεις τελευταίες τιμές ανηγμένης λυγηρότητας τα τελικά αποτελέσματα ευστάθειας για τις δύο μεθόδους είναι ίσα λόγω των ίσων διαφορών των δύο καμπτικών όρων.



Σχήμα 25. Συμβολή όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας κατά τον άξονα y –μεταβολή $\bar{\lambda}_z$ για HEB300.

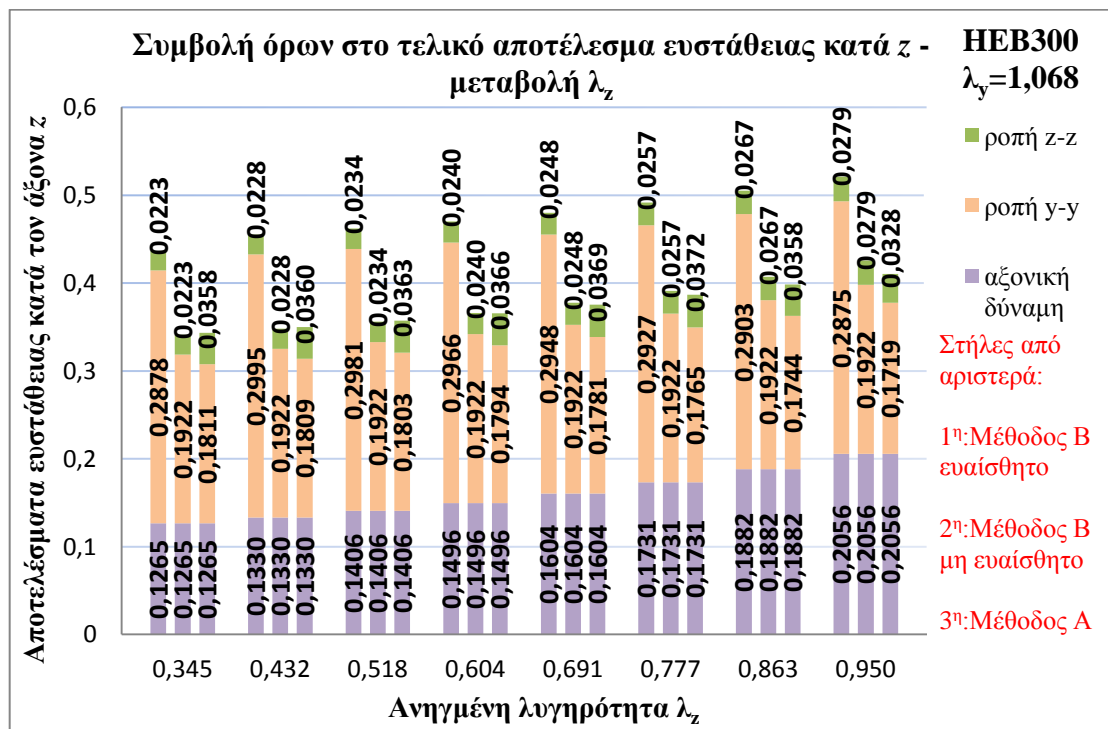


Σχήμα 26. Συμβολή όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας κατά τον άξονα y –μεταβολή $\bar{\lambda}_z$ για HEB300 (συνέχεια).

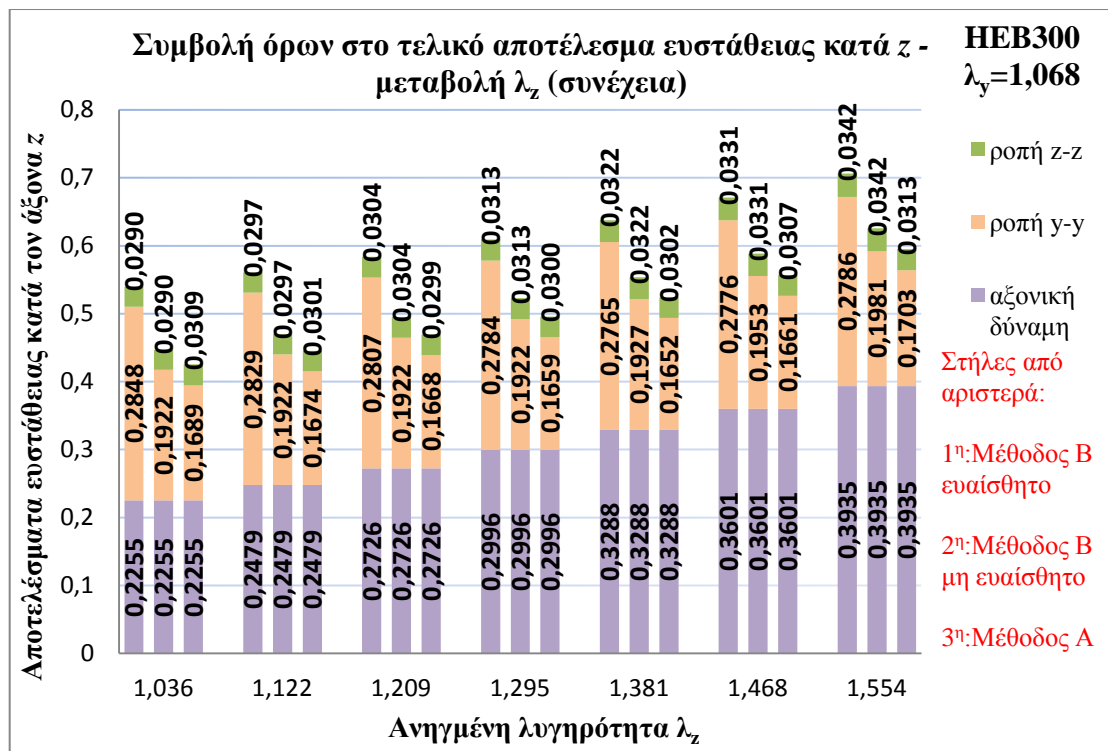
Συνεχίζοντας με την ανάλυση για τα αποτελέσματα της δεύτερης σχέσης αλληλεπίδρασης, εστιάζουμε στα σχήματα 27 και 28. Όπως περιμέναμε, το ευαίσθητο μέλος έχει μεγάλες διαφορές στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας από τις άλλες δύο περιπτώσεις, λόγω του όρου της ροπής περί τον άξονα y , αντίθετα ο άλλος καμπτικός όρος είναι ίσο με αυτόν για μη ευαίσθητο αφού ο συντελεστής αλληλεπίδρασης k_{zz} δεν αλλάζει.

Ο όρος της ροπής $y-y$ της Μεθόδου B για μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις είναι σταθερός και μόνο για τις τρεις μεγαλύτερες τιμές λυγηρότητας αυξάνεται ελάχιστα. Ο ίδιος όρος της Μεθόδου A είναι πάντα μικρότερος από του μη ευαίσθητου και μειώνεται όσο αυξάνεται η λυγηρότητα. Βέβαια, στις δύο τελευταίες τιμές του διαστήματος αυτού δείχνει να αυξάνεται ελάχιστα.

Για τον δεύτερο καμπτικό όρο, η τιμή της Μεθόδου A μέχρι $\bar{\lambda}_z = 1,112$ είναι παντα μεγαλύτερη από της B, ενώ για μεγαλύτερη λυγηρότητα συμβαίνει το αντίθετο.



Σχήμα 27. Συμβολή όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας κατά τον άξονα z –μεταβολή $\bar{\lambda}_z$ για HEB300.

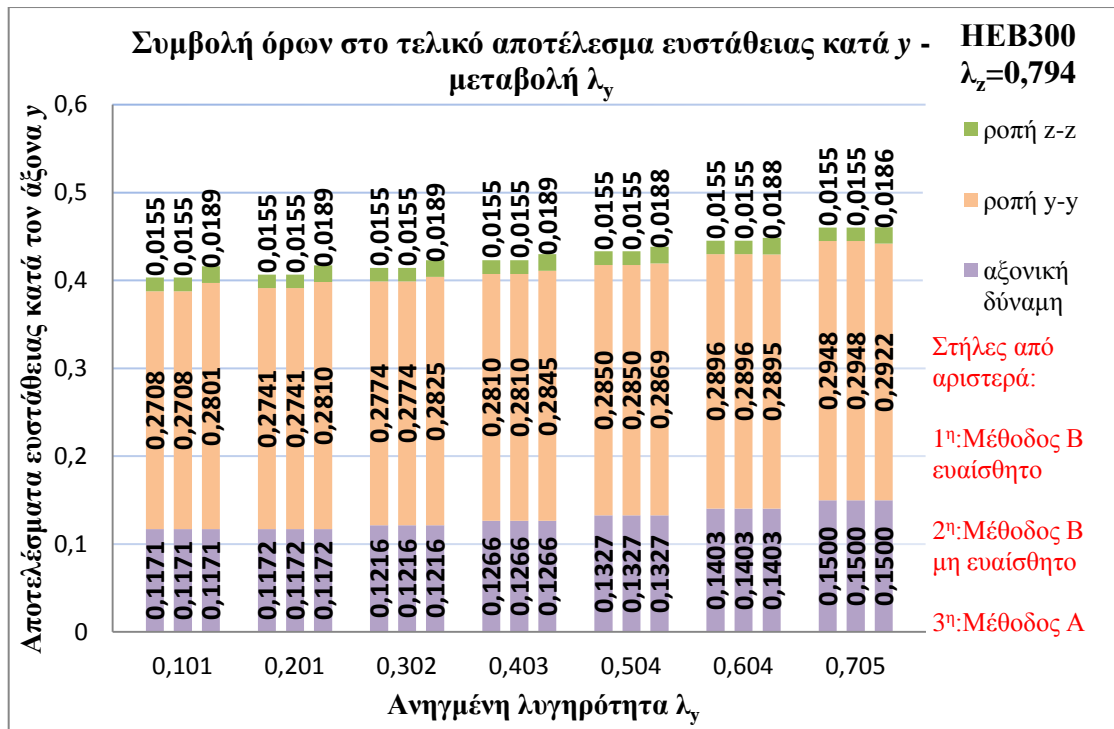


Σχήμα 28. Συμβολή όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας κατά τον άξονα z –μεταβολή $\bar{\lambda}_z$ για HEB300 (συνέχεια).

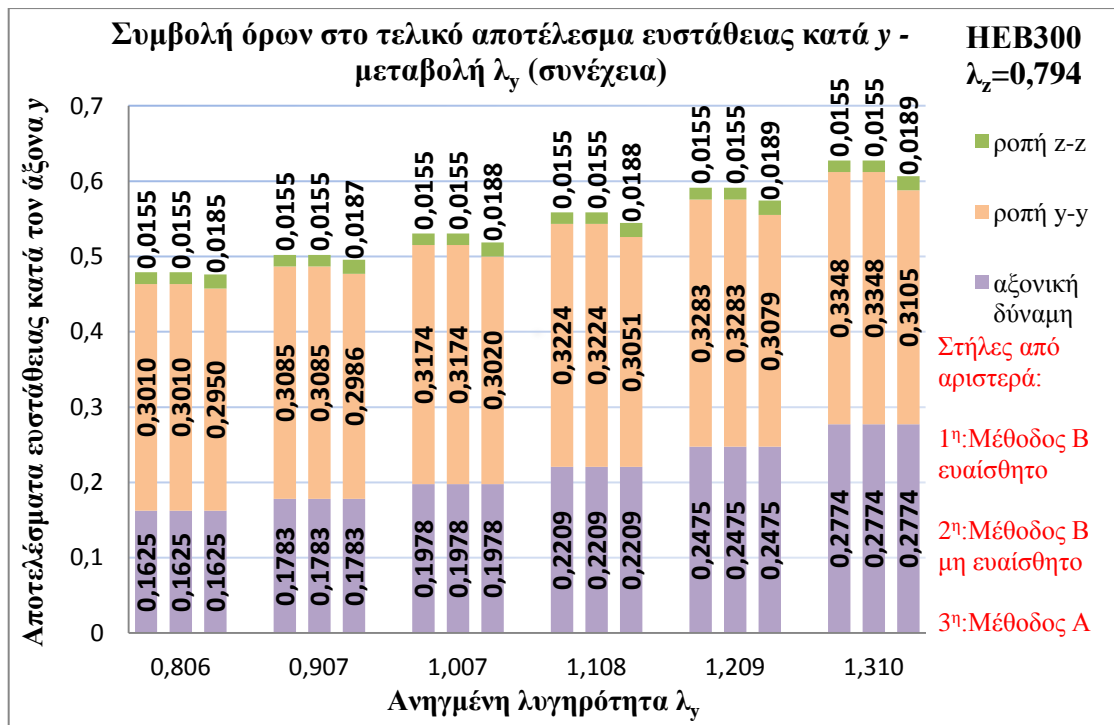
Στα σχήματα 29 έως 32 έχουμε σταθερή την ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα z, $\bar{\lambda}_z = 0,794$.

Πιο συγκεκριμένα, στα σχήματα 29 και 30 φαίνονται τα αποτελέσματα ευστάθειας για την πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης στο διάστημα τιμών $\bar{\lambda}_y = 0,101 \div 1,310$. Μεχρι την τιμή $\bar{\lambda}_y = 0,504$, ο όρος της ροπής y-y της Μεθόδου A είναι πάντα μεγαλύτερος από της B με τη διαφορά να μειώνεται όσο η λυγηρότητα αυξάνεται. Όμως, για μεγαλύτερες τιμές λυγηρότητας συμβαίνει το αντίθετο αφού ο όρος της B αυξάνεται με πιο γρήγορο ρυθμό από αυτόν της B και μάλιστα η διαφορά παίρνει τη μέγιστη τιμή της για $\bar{\lambda}_y = 1,310$.

Επιπλέον, ο όρος της ροπής z-z παραμένει σταθερός στην περίπτωση της Μεθόδου B ενώ για την A αλλάζει ελάχιστα. Έτσι η διαφορά παραμένει πάντα ίδια μεταξύ τους αλλά είναι πολύ μικρή και σε ελάχιστες περιπτώσεις εξισορροπεί αυτή του άλλου καμπτικού όρου.



Σχήμα 29. Συμβολή όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας κατά τον άξονα y –μεταβολή $\bar{\lambda}_y$ για HEB300.

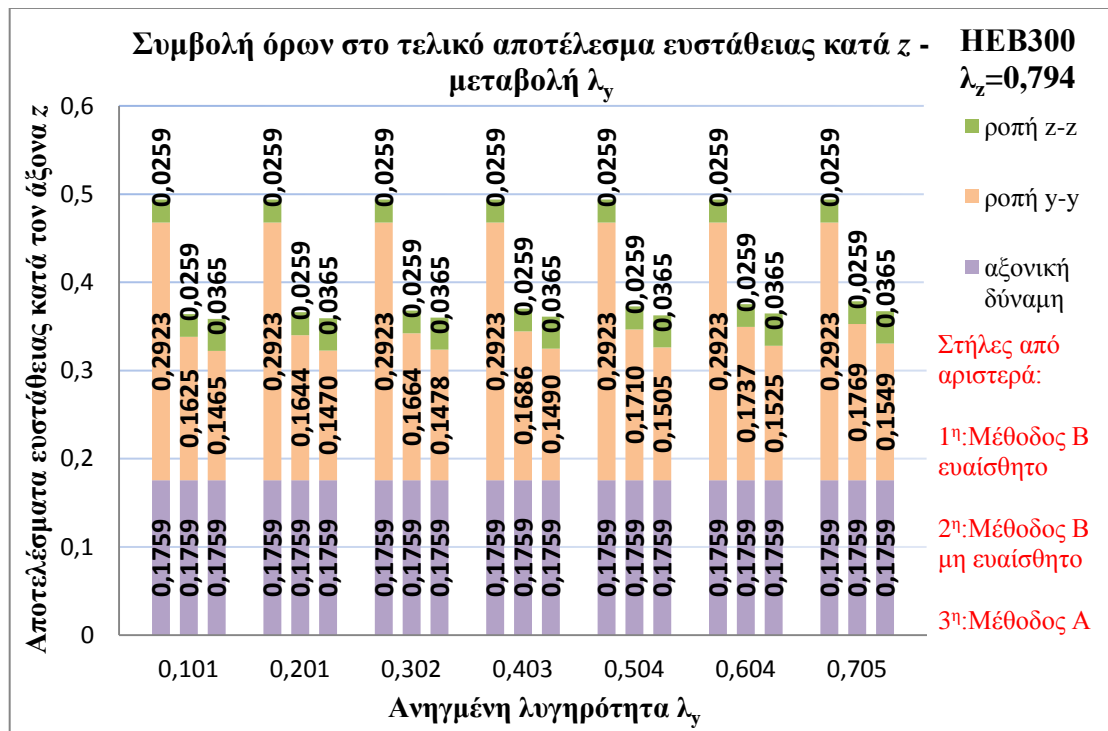


Σχήμα 30. Συμβολή όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας κατά τον άξονα y –μεταβολή $\bar{\lambda}_y$ για HEB300 (συνέχεια).

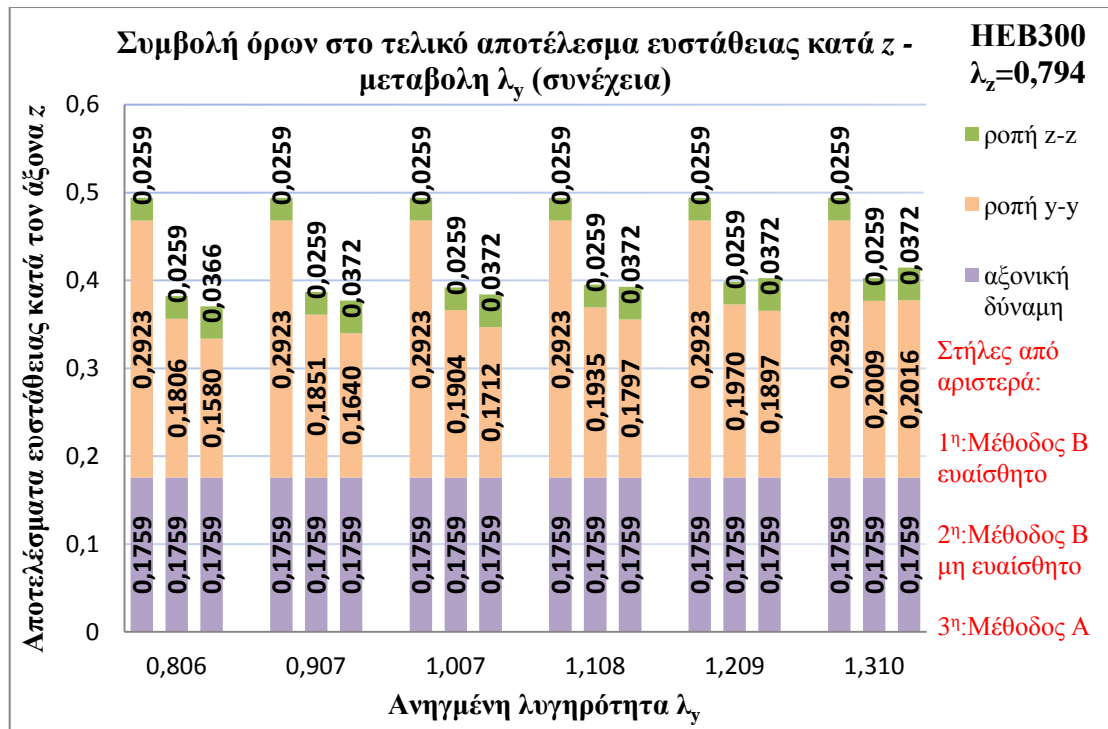
Τέλος, για τη συμβολή των όρων στη δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης μας ενδιαφέρουν τα σχήματα 31 και 32.

Το ευαίσθητο μέλος παρουσιάζει όπως πάντα μεγάλες διαφορές στον όρο της ροπής $y-y$, ο οποίος έχει σχεδόν σταθερή τιμή. Αντίθετα, ο όρος αυτός αυξάνεται και στις δύο άλλες περιπτώσεις όσο η λυγηρότητα μεγαλώνει. Ο ρυθμός αύξησης για τη Μέθοδο A είναι μεγαλύτερος. Έτσι, ενώ αρχικά αυτός του μη ευαίσθητου είναι μεγαλύτερος από της A, για τη μεγαλύτερη τιμή λυγηρότητας η διαφορά εξανεμίζεται και γίνονται σχεδόν ίσοι.

Σχετικά με τον δεύτερο καμπτικό όρο $z-z$, αυτός παραμένει σταθερός στη Μέθοδο B ενώ αυξάνεται ελάχιστα στην A. Συνεπώς, η διαφορά τους παραμένει σχεδόν σταθερή και δεν μπορούμε να την αμελήσουμε.



Σχήμα 31. Συμβολή όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας κατά τον άξονα z –μεταβολή $\bar{\lambda}_y$ για HEB300.



Σχήμα 32. Συμβολή όρων των σχέσεων αλληλεπίδρασης στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας κατά τον άξονα z –μεταβολή λ_y για HEB300 (συνέχεια).

5.4 Διαγράμματα αλληλεπίδρασης

Η επόμενη παράμετρος που θα μεταβάλλουμε είναι η φόρτιση του εκάστοτε μέλους. Πιο συγκεκριμένα, θα γίνει μεταβολή της τιμής σχεδιασμού της αξονικής θλιπτικής δύναμης και της ροπής περί τον ισχυρό άξονα y . Δεν θα γίνει μεταβολή της ροπής περί τον ασθενή άξονα z .

Αναλυτικά, υπολογίζεται, και για τις δύο διατομές μας HEB300 και IPE450, η πλαστική αντοχή τους, $N_{pl,Rd}$ και η καμπτική αντοχή για κάμψη περί τον ισχυρό τους άξονα, $M_{pl,y,Rd}$. Στη συνέχεια μεταβάλλουμε ποσοστιαία το λόγο της τιμής σχεδιασμού προς την αντίστοιχη αντοχή για κάθε μέγεθος δηλαδή για την αξονική δύναμη, $N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ και την ροπή περι τον y - y , $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$.

Αρχικά, για σταθερό λόγο της $N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ μεταβαλλουμε το $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$ μέχρι τα αποτελέσματα ευστάθειας και για τις δύο σχέσεις αλληλεπίδρασης να φτάσουν τη μονάδα ($R_d=1$). Δεν χρειάστηκε σε καμιά περίπτωση διατομής να φτάσει ο λόγος $N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ κοντα στη μοναδα, αφού ειχε χασει σε μικροτερη τιμη του την ευσταθεια του. Στην περίπτωση του IPE450 έγιναν δύο δοκιμές με δύο διαφορετικές τιμές ανηγμένης λυγηρότητας ως προς τον άξονα z , επειδή λόγω της αρχικής μεγάλης τιμής της, $\bar{\lambda}_z = 1,461$ το μελος εχανε για μικρο λογο $N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ την ευσταθεια του. Έτσι επιλέχτηκε άλλη μία τιμή λυγηρότητας αλλά πιο μικρή από την προηγούμενη, $\bar{\lambda}_z = 1,016$. Πιο απλα, επιλεξαμε μικροτερο μηκος λυγισμου στη διευθυνση z . Κάτι ανάλογο δεν χρειάστηκε να γίνει για τη HEB300. Το βήμα των ποσοστιαίων μεταβολών είναι 5%. Λόγω των υπεράριθμων σχημάτων, θα δοθούν επιλεκτικά κάποια στο παρόν κεφάλαιο. Τα υπόλοιπα μπορούν να ζητηθούν από τον γραφών.

Για να μπορέσουμε να δούμε πιο συνοπτικά τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης και να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα αλληλεπίδρασης τα οποία περιέχουν τις περιβάλλουσες ευστάθειας για κάθε μέλος.

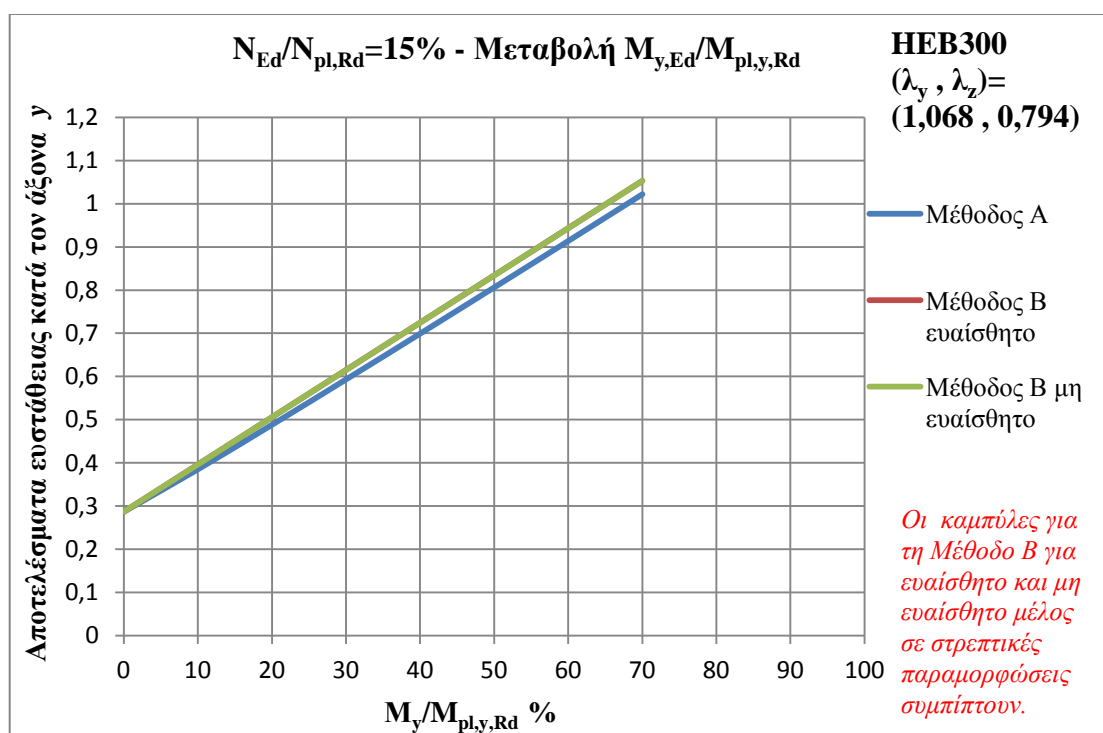
Πιο συγκεκριμένα, για κάθε σχέση αλληλεπίδρασης και για κάθε μέθοδο προσπαθήσαμε με γραμμική παρεμβολή από τα προηγούμενα σχήματα και με τη βοήθεια του Excel να δούμε πότε αυτή φτάνει στο όριο αστάθειας σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό ($R_d=1$) για δεδομένη σχέση αλληλεπίδρασης $N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ και $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$. Έτσι, στον οριζοντιο αξονα βρισκεται ο λογος $N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ και στον κατακόρυφο άξονα ο $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$. Οι καμπύλες δείχνουν ότι εκεί ακριβώς το αποτέλεσμα ευστάθειας είναι μονάδα, ($R_d=1$). Άρα, για κάθε σχέση των δύο λόγων που περιέχονται στα αριστερά της κάθε καμπύλης, το μέλος ευσταθεί έναντι λυγισμού για τη συγκεκριμένη σχέση αλληλεπίδρασης και μέθοδο. Συμβολίζουμε με (B1) τη Μέθοδο B για ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις και (B2) για μη ευαίσθητο μέλος.

5.4.1 Μέλος με διατομή ΗΕΒ300

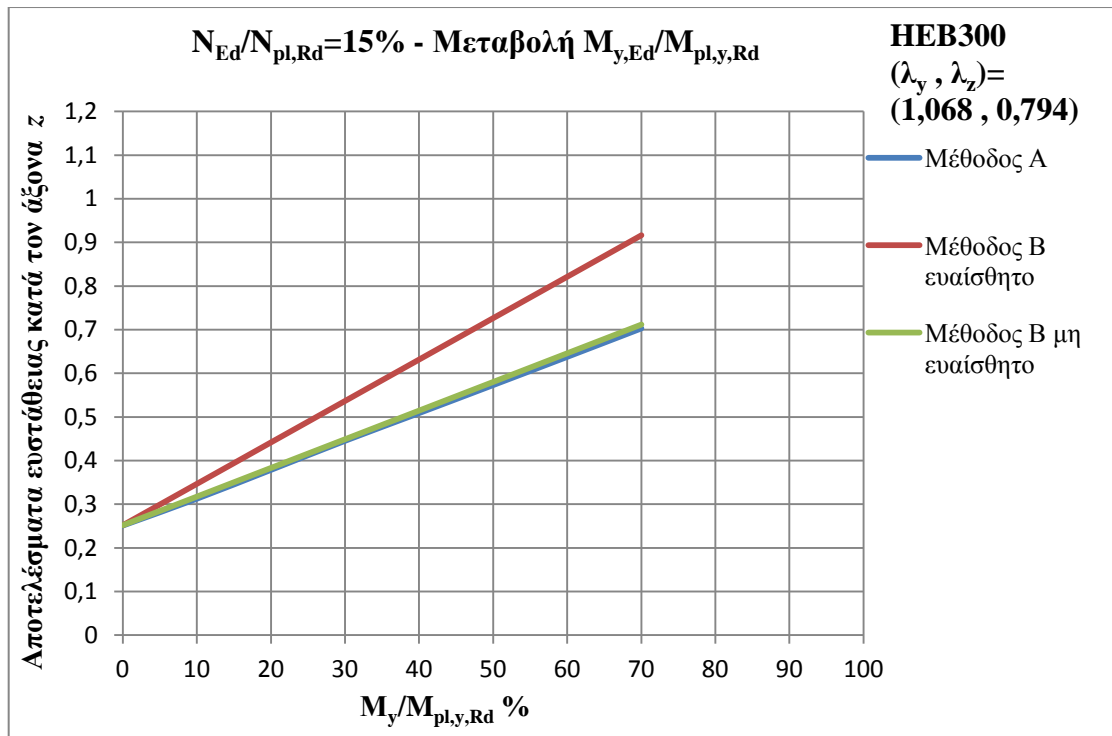
Οι ανηγμένες λυγηρότητες της διατομής ΗΕΒ300 είναι $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (1,068, 0,794)$. Η πλαστική αντοχή είναι ίση με $N_{pl,Rd} = A f_y = 149,1 \times 35,5 = 5293,05kN$ και η καμπτική αντοχή για κάμψη περί τον $y-y$, $M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} f_y = 1869 \times 35,5 = 66349,5kNcm$.

Δίνονται παρακάτω κάποια σχήματα για σταθερό λόγο $N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ και μεταβολή του $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$.

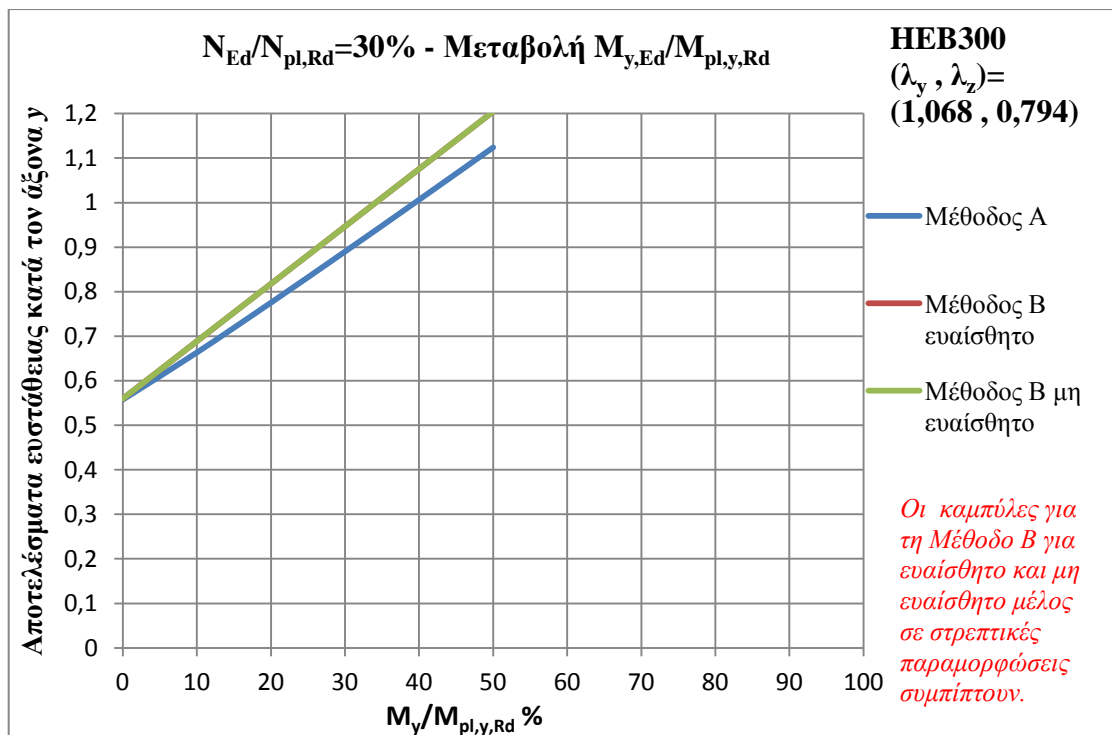
Έτσι, για λόγο $N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 15\%$ φαίνεται η πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης στο σχήμα 33 και η δεύτερη σχέση στο σχήμα 34. Για αυτό το λόγο αξονικής, τα αποτελέσματα ευστάθειας της Μεθόδου Α συμφωνούν με αυτά της Β για μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Οι καμπύλες της πρώτης σχέσης αλληλεπίδρασης έχουν μεγαλύτερη κλίση, είναι πιο ανηφορικές, σε σχέση με της δεύτερης σχέσης όπου η αύξηση της ροπής περί τον ισχυρό άξονα δεν έχει τόσο δυσμενή επιρροή στο τελικό αποτέλεσμα ευστάθειας. Ανάλογα συμβαίνουν και στην περίπτωση $N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 30\%$ στα σχήματα 35 και 36. Εδώ, οι καμπύλες είναι ακόμα πιο ανηφορικές ειδικά στη δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης.



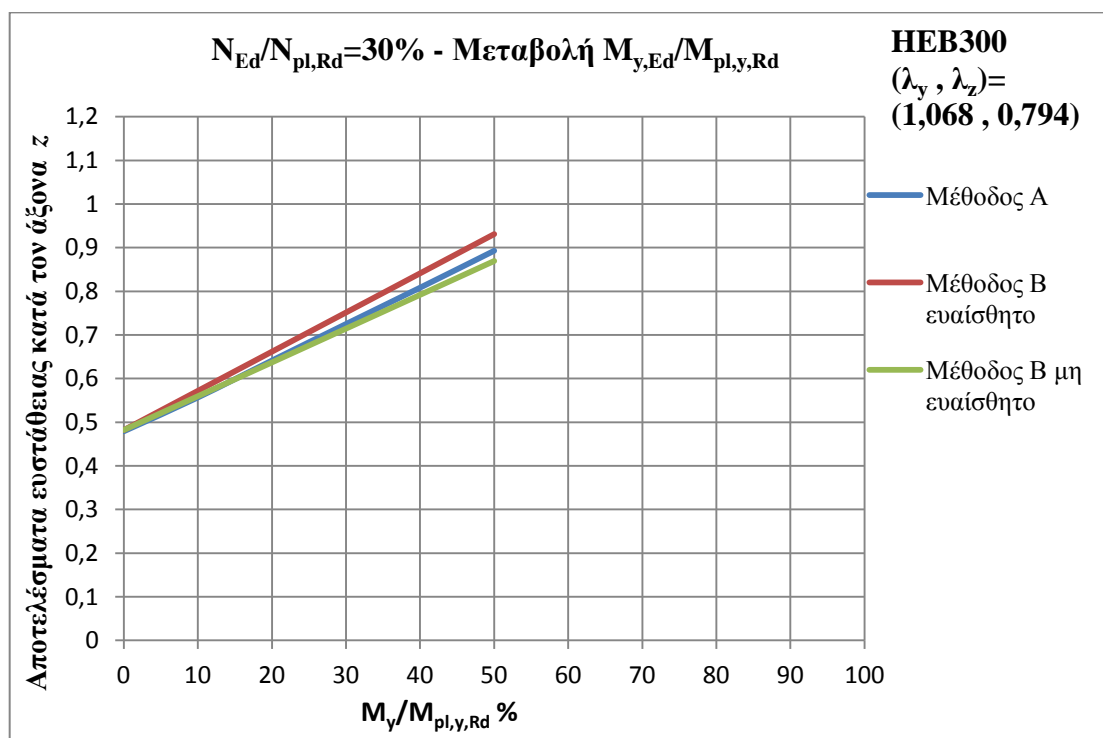
Σχήμα 33. $N_{Ed}/N_{pl,Rd}=15\%$ - Μεταβολή $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$ για αποτελέσματα ευστάθειας κατά τον άξονα y . ΗΕΒ300 $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (1,068, 0,794)$



Σχήμα 34. $N_{Ed}/N_{pl,Rd}=15\%$ - Μεταβολή $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$ για αποτελέσματα ευστάθειας κατά τον άξονα z. HEB300 $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (1,068, 0,794)$



Σχήμα 35. $N_{Ed}/N_{pl,Rd}=30\%$ - Μεταβολή $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$ για αποτελέσματα ευστάθειας κατά τον άξονα y. HEB300 $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (1,068, 0,794)$



Σχήμα 36. $N_{Ed}/N_{pl,Rd}=30\%$ - Μεταβολή $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$ για αποτελέσματα ευστάθειας κατά τον άξονα z. HEB300 ($\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z$)= (1,068, 0,794)

Τελικά, καταλήγουμε στις περιβάλλουσες ευστάθειας μέσα από το διάγραμμα αλληλεπίδρασης (σχήμα 37) για τη διατομή HEB300 με τις δεδομένες ανηγμένες λυγηρότητες.

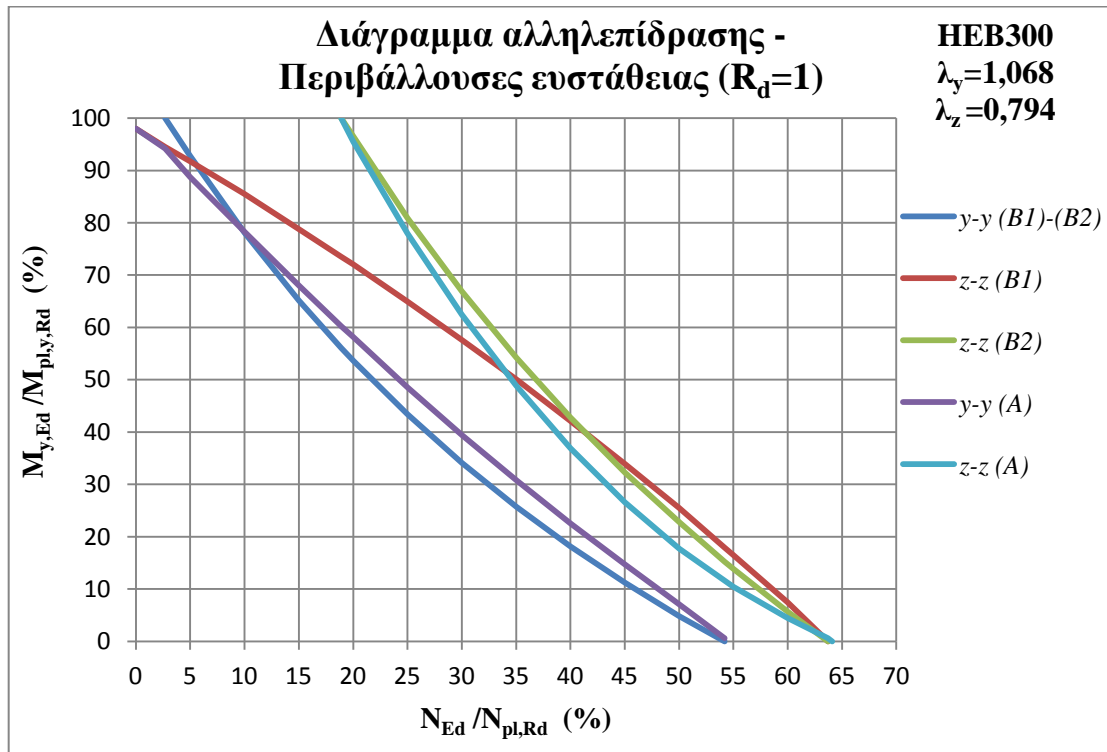
Για μεγαλύτερους λόγους από την τιμή $N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 64\%$, το μέλος αστοχεί λόγω λυγισμού περί τον ασθενή άξονα της διατομής του. Επίσης, για μεγαλύτερους λόγους από $N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 53\%$, το μέλος ακόμα και για μηδενική ροπή περι τον άξονα y δεν ευσταθεί, λόγω λυγισμού περί τον ισχυρό άξονα. Τελικά, μόνο για μικρότερες τιμές από το 53% και για μηδενική ροπή περί τον y, το μέλος ευσταθεί γενικά.

Για την πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης, καμπύλες y-y, οι μέθοδοι δίνουν περιβάλλουσες που βρίσκονται αρκετά κοντά μεταξύ τους. Αυτή της Μεθόδου A είναι πιο ευθύγραμμη δείχνοντας μία σχέση αντιστρόφων ανάλογων μεγεθών για τους λόγους της αξονικής και της ροπής.

Το ίδιο συμβαίνει για τη δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης αλλά με εναλλαγή των ρόλων ως προς την ευθυγραμμία. Αρκετά διαφορετική μορφή έχει η καμπύλη B1 (ευαίσθητο μέλος), αφού για $N_{Ed}/N_{pl,Rd} < 35\%$ χρειάζονται και μικροτεροι λογοι ροπης για να αστοχησε σε σχεση με τις A και B2.

Τελικά συμπεραίνουμε πως η κρίσιμη μορφή λυγισμού είναι περί τον ισχυρό άξονα, αφού οι καμπύλες αυτές περιέχονται πάντα στο πεδίο ευστάθειας των καμπυλών z-z. Έτσι, εάν το μέλος ευσταθεί για λυγισμό περί τον ισχυρό άξονα είναι βέβαιο πως

αυτό συμβαίνει και για τον ασθενή. Μόνο για την περίπτωση $N_{Ed}/N_{pl,Rd} < 5\%$ και $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd} > 90\%$ για ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις δεν ισχύει αυτή η υπόθεση.



Σχήμα 37. Διάγραμμα αλληλεπίδρασης - Περιβάλλουσες ευστάθειας ($R_d=1$) για HEB300 με $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (1,068, 0,794)$

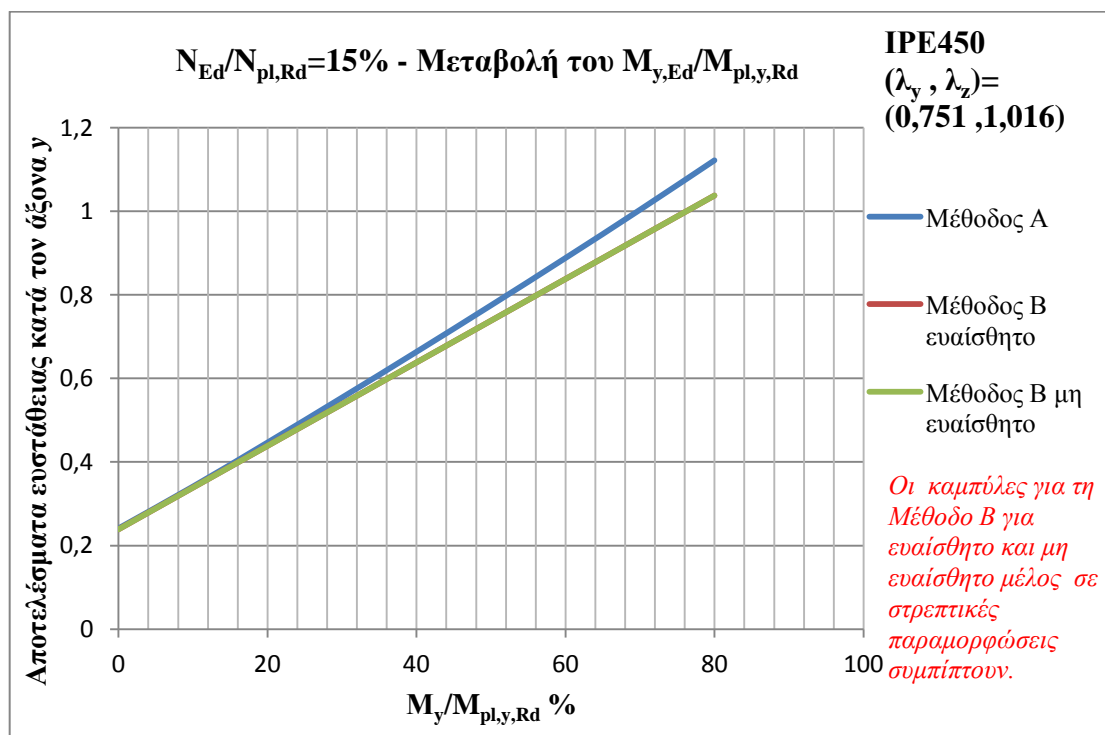
5.4.2 Μέλος με διατομή IPE450 ($\bar{\lambda}_z = 1,016$)

Το μήκος λυγισμού μειώνεται σε $L_{cr,z} = 320\text{cm}$. Οι ανηγμένες λυγηρότητες της διατομής IPE450 τώρα είναι $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (0,751, 1,016)$. Η πλαστική αντοχή είναι ίση με $N_{pl,Rd} = A f_y = 98,82 \times 35,5 = 3508,11\text{kN}$ και η καμπτική αντοχή για κάμψη περί τον y-y, $M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} f_y = 1702 \times 35,5 = 60421\text{kNcm}$.

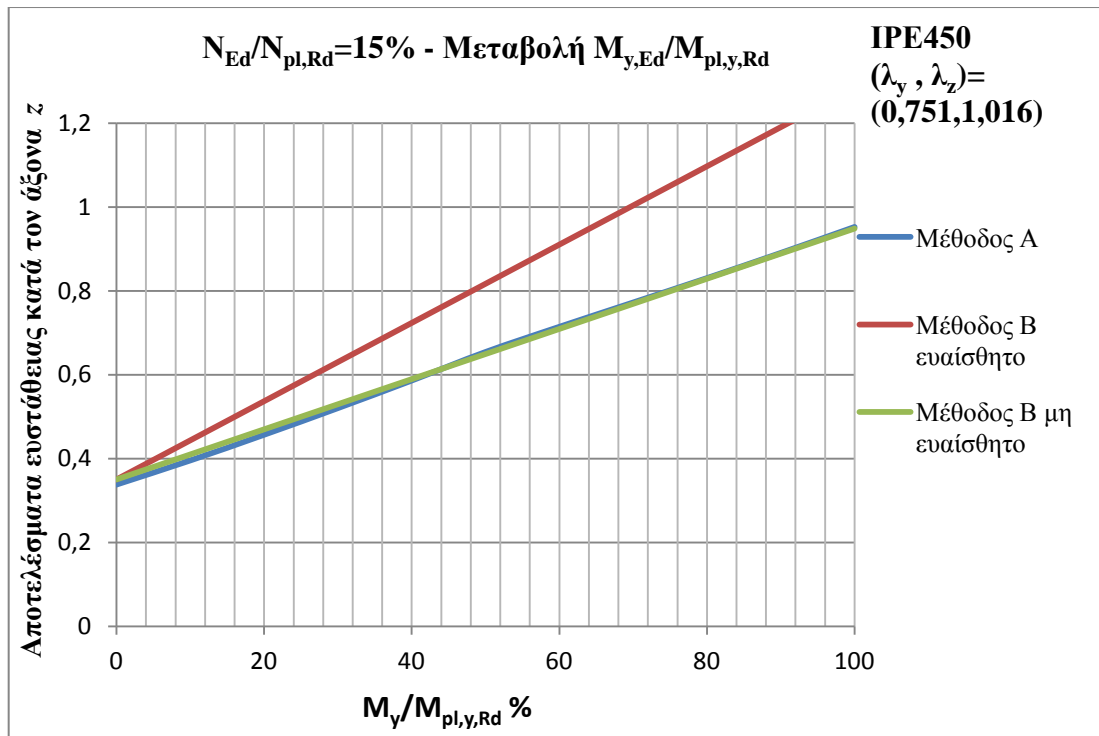
Δίνονται παρακάτω κάποια σχήματα για σταθερό λόγο $N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ και μεταβολή του $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$.

Για σταθερή τιμή λόγου αξονικής $N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 15\%$ δίνονται τα σχήματα 38 και 39. Οι καμπύλες για την πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης της Μεθόδου A και B είναι γενικά, πολύ κοντά μεταξύ τους (σχήμα 38). Η πρώτη φτάνει στο 1,0 για $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd} = 70\%$ ενώ η δεύτερη για 76% . Στο σχήμα 40 για $N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 35\%$ οι καμπύλες έχουν μεγαλύτερη κλίση. Το μέλος χάνει την ευστάθειά του σύμφωνα με την καμπύλη A για $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd} = 40\%$ ενώ με τη B για 44% .

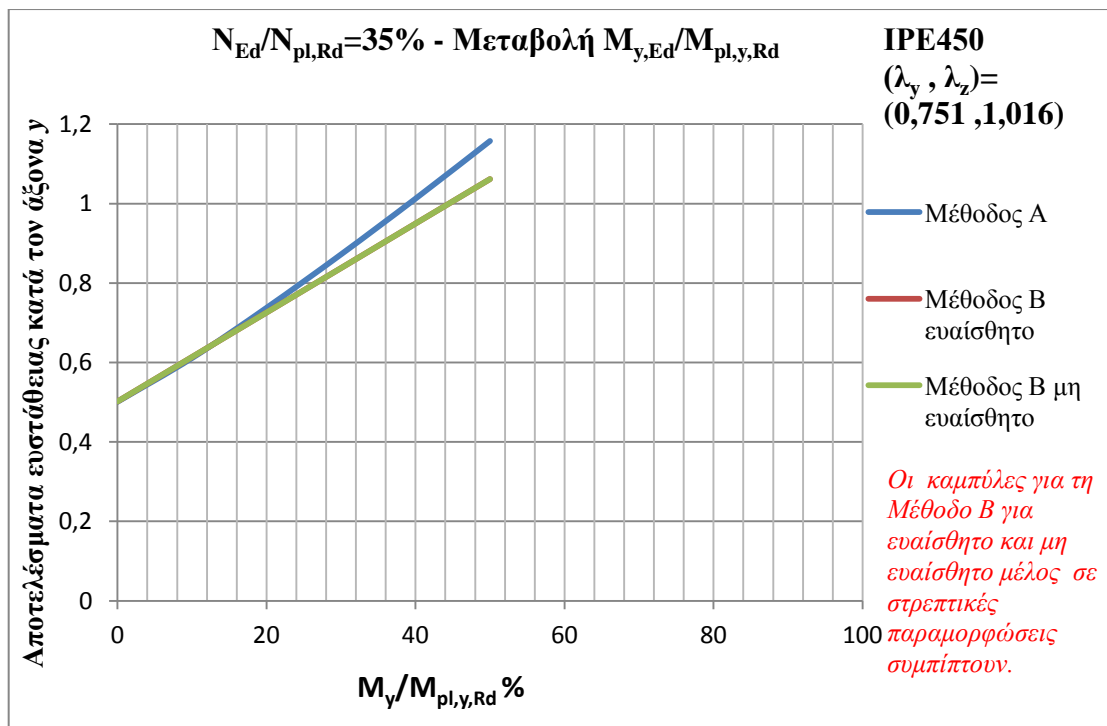
Για την δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης (σχήμα 39), οι καμπύλες A και B2 (μη ευαίσθητο) σχεδόν ταυτίζονται ενώ δεν φτάνουν στο όριο αστάθειας ούτε για $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd} = 100\%$. Αντιθετα, η καμπύλη B1 (ευαίσθητο) απομακρυνεται ολο και περισσότερο από τις άλλες όσο η ροπή σχεδιασμού αυξανεται και φτανει στο 1,0 για $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd} = 70\%$. Στο σχημα 41 για $N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 35\%$ οι καμπυλες ξεκινουν από το 0,7 και οι A και B2 φτάνουν στο 1,0 για $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd} = 40\%$ ενώ η B1 για 33% .



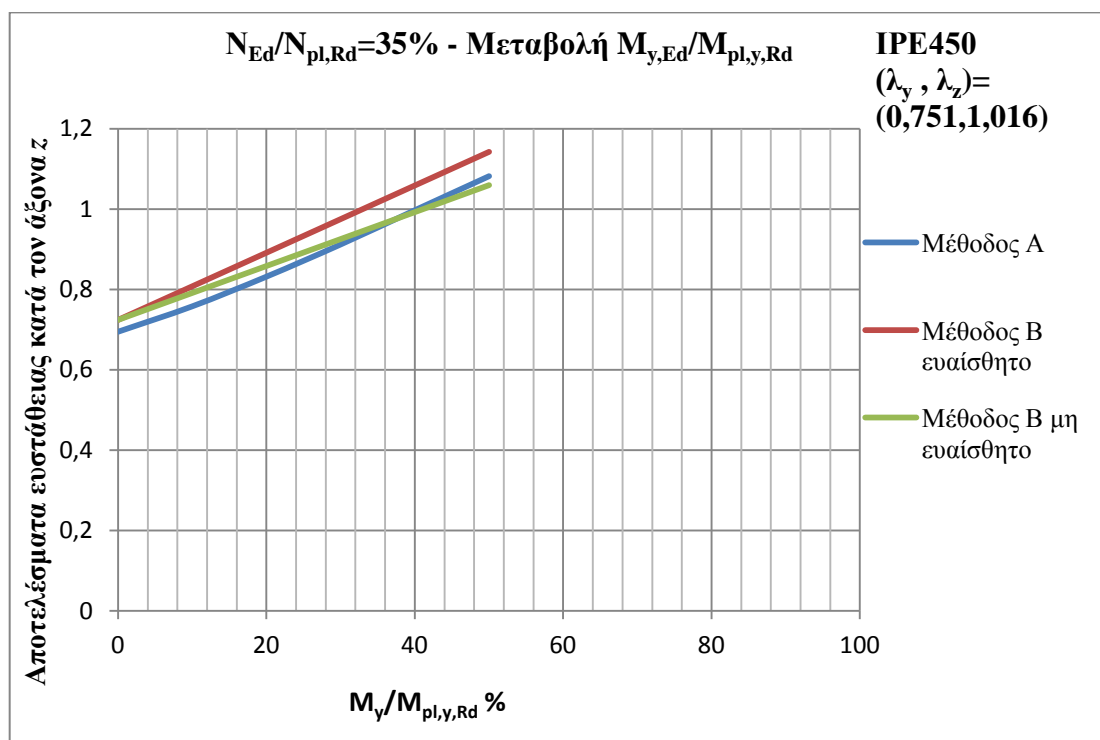
Σχήμα 38. $N_{Ed}/N_{pl,Rd}=15\%$ - Μεταβολή $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$ για αποτελέσματα ευστάθειας κατά τον άξονα y. IPE450 ($\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z$)= (0,751, 1,016)



Σχήμα 39. $N_{Ed}/N_{pl,Rd}=15\%$ - Μεταβολή $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$ για αποτελέσματα ευστάθειας κατά τον άξονα z. IPE450 $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (0,751, 1,016)$



Σχήμα 40. $N_{Ed}/N_{pl,Rd}=35\%$ - Μεταβολή $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$ για αποτελέσματα ευστάθειας κατά τον άξονα y. IPE450 $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (0,751, 1,016)$



Σχήμα 41. $N_{Ed}/N_{pl,Rd}=35\%$ - Μεταβολή $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$ για αποτελέσματα ευστάθειας κατά τον άξονα z. IPE450 $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (0,751, 1,016)$

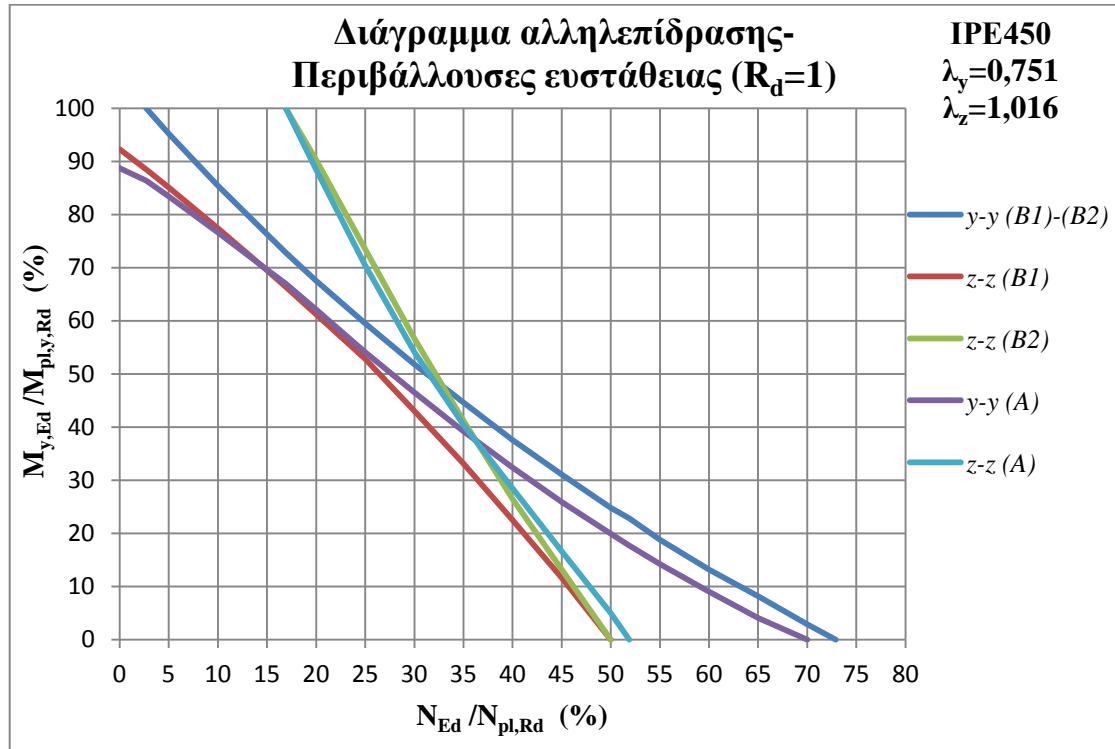
Επόμενο βήμα είναι το γενικό διάγραμμα αλληλεπίδρασης με τις περιβάλλουσες ευστάθειας για τη διατομή IPE450 με ανηγμένες λυγηρότητες $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (0,751, 1,016)$. Όπως έχουμε αναφέρει για οποιοδήποτε σημείο αριστερά μίας περιβάλλουσας το μέλος επαρκεί, για αυτές τις τιμές αξονικής και ροπής, στην ανάλογη μορφή λυγισμού που εκφράζει αυτή η καμπύλη.

Εδώ, οι καμπύλες είναι ακανόνιστες σε σχέση με το διάγραμμα αλληλεπίδρασης της HEB300. Η καμπύλη y-y για τη Μέθοδο A για μηδενική ροπή περί τον άξονα y αντέχει σε λυγισμό για $N_{Ed}/N_{pl,Rd} \leq 70\%$ ενώ υπό ελάχιστη αξονική δύναμη $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd} < 88\%$. Η καμπύλη y-y (B1)-(B2) περιέχει πάντα στα αριστερά της την y-y (A) και για μηδενική ροπή περί τον y, ξεπερνά την τιμή 1,0 για $N_{Ed}/N_{pl,Rd} \geq 73\%$.

Οι καμπύλες για τη δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης z-z (A) και (B2) σχεδόν συμπίπτουν και για $N_{Ed}/N_{pl,Rd} \geq 51\%$ βρισκόμαστε πάντα στην απαγορευμένη δεξιά περιοχή. Αυτή, του ευαίσθητου μέλους σε στρεπτικές παραμορφώσεις, z-z (B1) περιέχεται πάντα στο πεδίο ευστάθειας των προηγούμενων δύο.

Συνοπτικά, η z-z (B1) περιέχεται πάντα στα αριστερά της y-y (B1)-(B2). Άρα το ευαίσθητο μέλος πρέπει να το προσέχουμε για λυγισμό περί τον ισχυρό του άξονα. Για $N_{Ed}/N_{pl,Rd} \geq 32\%$ και $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd} \leq 45\%$, εάν το μη ευαίσθητο μέλος

ευσταθεί για λυγισμό περί τον ασθενή του άξονα, τότε ευσταθεί γενικώς. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και τη Μέθοδο Α για λίγο μικρότερες τιμές.



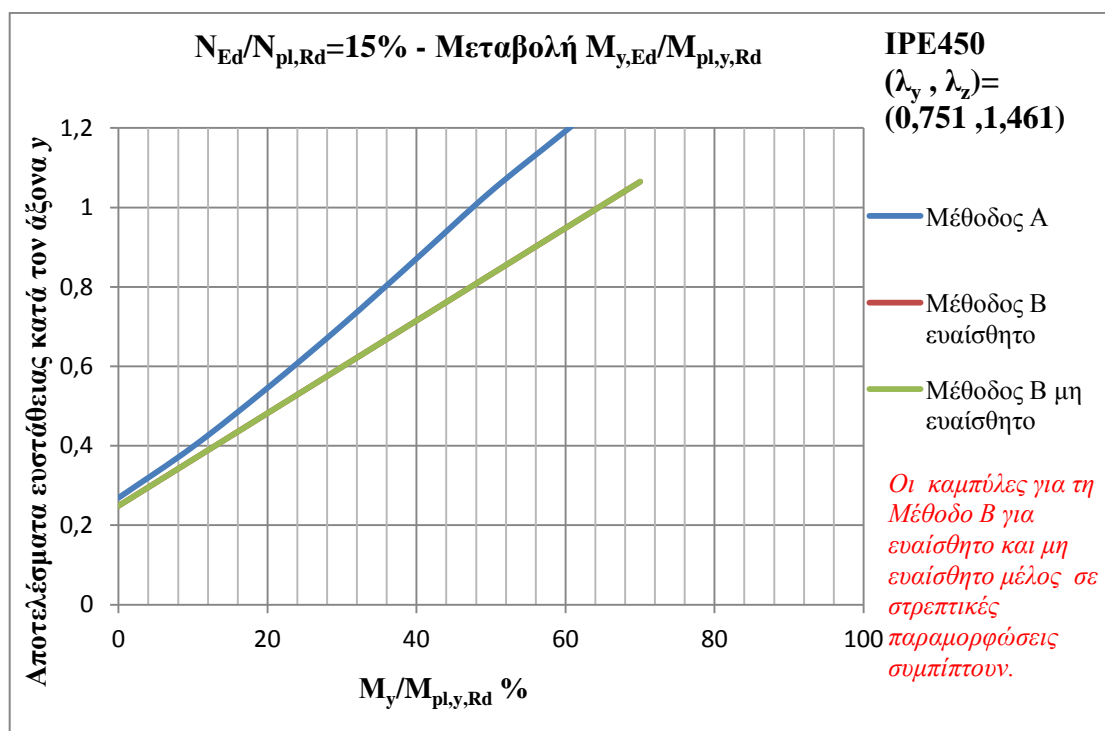
Σχήμα 42. Διάγραμμα αλληλεπίδρασης - Περιβάλλουσες ευστάθειας ($R_d=1$) για IPE450 με $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (0,751, 1,016)$

5.4.3 Μέλος με διατομή IPE450 ($\bar{\lambda}_z = 1,461$)

Οι ανηγμένες λυγηρότητες της διατομής IPE450 είναι $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (0,751, 1,461)$. Η πλαστική αντοχή δεν αλλάζει και είναι ίση με $N_{pl,Rd} = A f_y = 98,82 \times 35,5 = 3508,11kN$ και η καμπτική αντοχή για κάμψη περί τον y-y, $M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} f_y = 1702 \times 35,5 = 60421kNcm$.

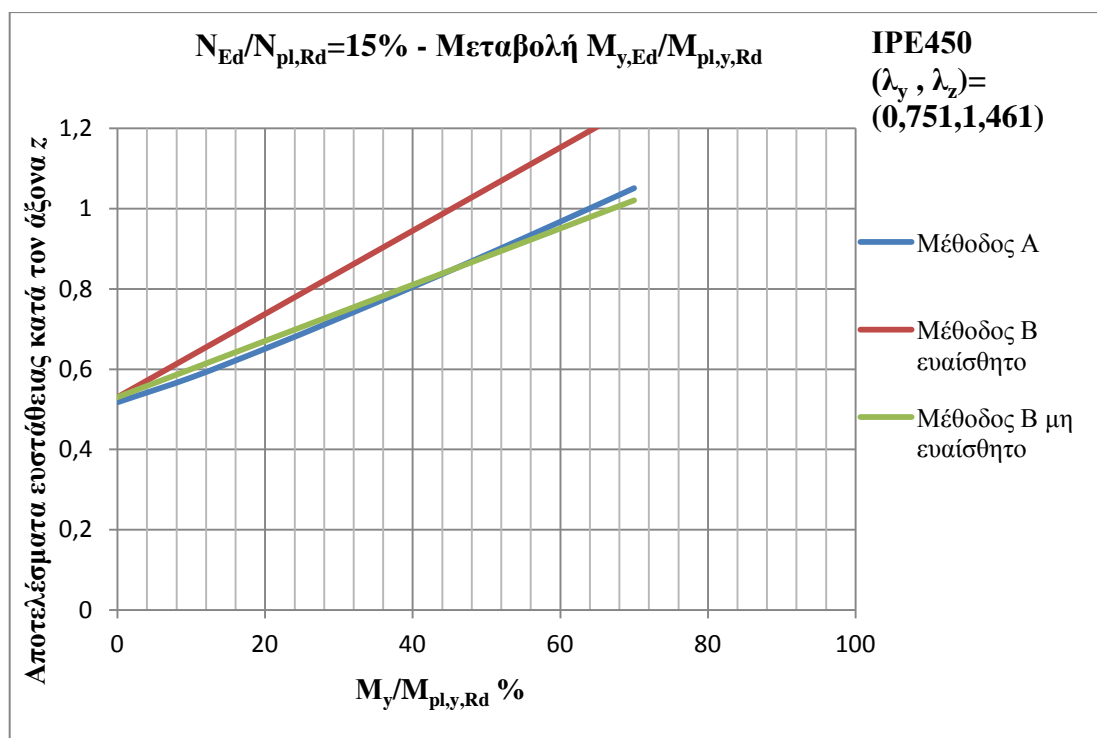
Δίνονται παρακάτω κάποια σχήματα για σταθερό λόγο $N_{Ed}/N_{pl,Rd}$ και μεταβολή του $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$.

Όπως και για την προηγούμενη περίπτωση (5.4.3) της μικρότερης ανηγμένης λυγηρότητας παρουσιάζονται τα σχήματα 43 και 44 για $N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 15\%$. Στο σχήμα 43 για την πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης οι καμπύλες A και B απέχουν αρκετά μεταξύ τους ενώ για τη μικρότερη λυγηρότητα έδιναν σχεδόν ίδια αποτελέσματα. Ακόμα, η A φτάνει στο όριο αστάθειας για $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd} = 48\%$ ενώ η B για 64%. Δηλαδή λόγω μεγαλύτερης λυγηρότητας οι λόγοι των ροπών που μπορεί να αντέξει το μέλος σε σχέση με πριν (σχήμα 38) είναι μειωμένοι για την A περίπου 45% και για τη B, 20%



Σχήμα 43. $N_{Ed}/N_{pl,Rd}=15\%$ - Μεταβολή $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$ για αποτελέσματα ευστάθειας κατά τον άξονα y. IPE450 $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (0,751, 1,461)$

Για τον ίδιο λόγο αξονικής, στο σχήμα 44 φαίνονται τα αποτελέσματα ευστάθειας για λυγισμό περί τον ασθενή άξονα της διατομής. Εδώ, οι καμπύλες A και B2 εφάπτονται όπως και στο σχήμα 39. Επίσης, η A και η B2 φτάνουν στο 1,0 για $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd} = 64\%$ ενώ η B1 (ευαίσθητο μέλος) για 46%. Στην περίπτωση του μέλους με τη μικρότερη λυγηρότητα, αυτό σύμφωνα με τη Μέθοδο A και τη B2 δεν έχανε ούτε για το 100% της ροπής την ευστάθειά του δηλαδή άντεχε διπλάσια ροπή. Ενώ για ευαίσθητο μέλος η αύξηση είναι 55%.



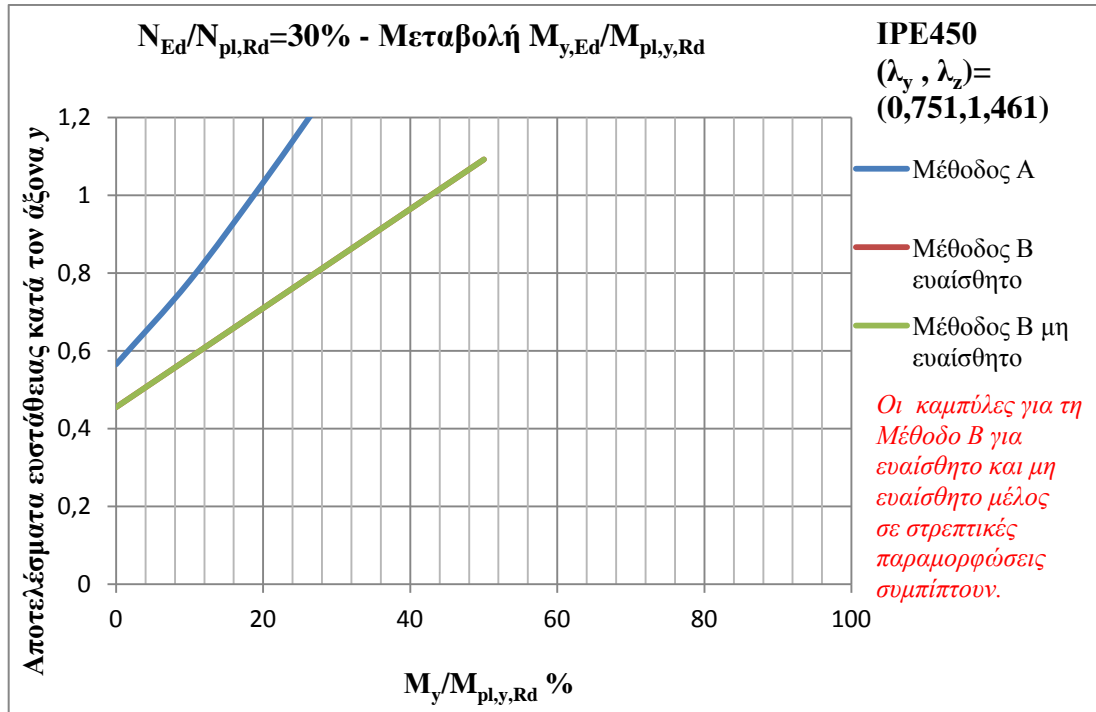
Σχήμα 44. $N_{Ed}/N_{pl,Rd}=15\%$ - Μεταβολή $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$ για αποτελέσματα ευστάθειας κατά τον άξονα z. IPE450 $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (0,751, 1,461)$

Παραπάνω συγκρίναμε για τον ίδιο λόγο αξονικής τη συμπεριφορά του IPE450 για διαφορετικές ανηγμένες λυγηρότητες. Όπως είδαμε, το μέλος με τη μεγαλύτερη λυγηρότητα χρειάζεται λιγότερη ροπή για να χάσει την ευστάθειά του. Έτσι, ενώ για τη μικρότερη λυγηρότητα έχουμε παραθέσει στο υποκεφάλαιο σχήματα με λόγο αξονικής $N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 35\%$, εδώ δεν είναι θεμιτό αφού το μέλος σχεδόν έχει χάσει την ευστάθειά του για αυτή την τιμή αξονικής χωρίς την συνδρομή ροπής.

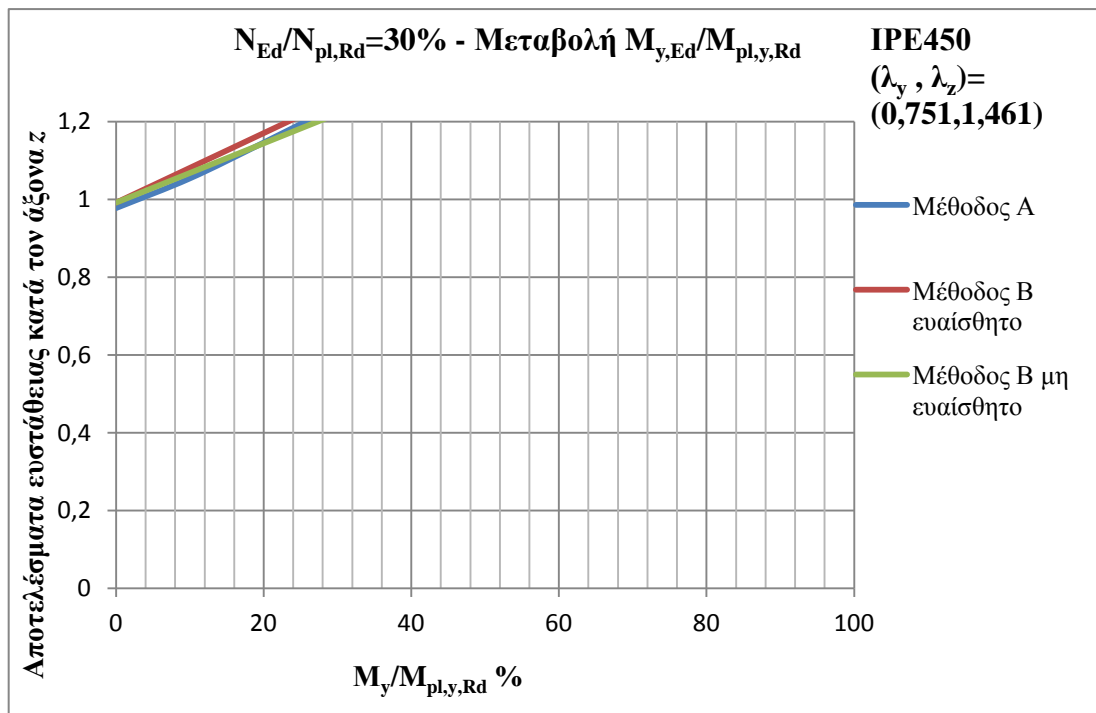
Παρουσιάζονται, λοιπόν, τα σχήματα 45 και 46 για $N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 30\%$. Στο πρώτο βλέπουμε πως οι καμπυλες ξεκινούν από πολύ διαφορετικές τιμές. Αυτό οφείλεται στο καμπτικό όρο της ροπής z-z, αν και η ροπή σχεδιασμού περί τον z είναι πολύ μικρή. Για τη Μέθοδο B ο συντελεστής αλληλεπίδρασης $k_{yz} = 1,3093$ ενώ στην A είναι $k_{yz} = 3,5388$ δηλαδή σχεδόν τριπλασιος. Στη Μεθοδο A, ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από το λόγο $N_{Ed}/N_{cr,z}$ ο οποίος προσεγγίζει την μονάδα για αυτή την τιμή αξονικής γι' αυτό ο k παίρνει μεγάλες τιμές.

Η καμπύλη Α φτάνει στο 1,0 για $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd} = 18\%$ ενώ η Β για 44%. Βλέπουμε ότι για μικρές τιμές του λόγου της ροπής, το μέλος φτάνει στο όριο αστάθειας του.

Στο σχήμα 46 για τη δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης το μέλος ακόμα και για μηδενική ροπή περί τον y , αστοχεί μόνο υπό την επίδραση της αξονικής.



Σχήμα 45. $N_{Ed}/N_{pl,Rd}=30\%$ - Μεταβολή $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$ για αποτελέσματα ευστάθειας κατά τον άξονα y . IPE450 $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (0,751, 1,461)$

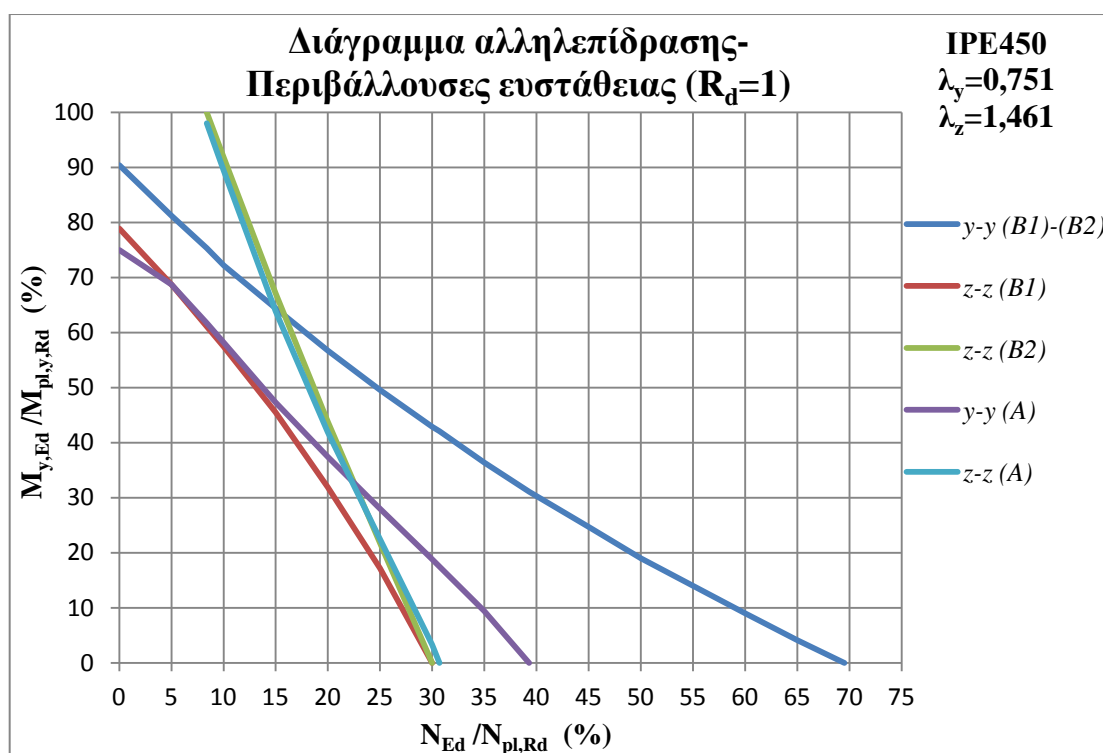


Σχήμα 46. $N_{Ed}/N_{pl,Rd}=30\%$ - Μεταβολή $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd}$ για αποτελέσματα ευστάθειας κατά τον άξονα z . IPE450 $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (0,751, 1,461)$

Στο σχήμα 47 δίνεται το διάγραμμα αλληλεπίδρασης για τη διατομή IPE450 με ανηγμένες λυγηρότητες $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (0,751, 1,461)$. Θα προσπαθήσουμε να συγκρινουμε τη συμπεριφορά αυτού του μέλους με εκείνο της ίδιας διατομής αλλά με μικρότερη ανηγμένη λυγηρότητα ως προς τον άξονα z.

Το μέλος χάνει την ευστάθειά του για λυγισμό περί τον ασθενή άξονα της διατομής του, όταν δεν ασκείται ροπή περί τον y και έχουμε $N_{Ed}/N_{pl,Rd} \geq 30\%$, τιμή μειωμένη κατά 65% σε σχέση με αυτή του μέλους με την μικρότερη $\bar{\lambda}_z$. Επίσης, η αύξηση της ανηγμένης λυγηρότητας μετατοπίζει την καμπύλη y-y (A), για μηδενική ροπή, στο $N_{Ed}/N_{pl,Rd} = 38\%$ αντί 70% πριν την αύξηση. Το ίδιο συμβαίνει και για σχεδόν μηδενική αξονική δύναμη με το ποσοστό του λόγου της ροπής να μειώνεται από το 90% στο 75%. Αντίθετα, τα αποτελέσματα ευστάθειας για την πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης για τη Μέθοδο B αλλάζουν ελάχιστα και η καμπύλη y-y παρουσιάζει μία μικρή μετατόπιση προς τα αριστερά.

Πιο αναλυτικά, για ευαίσθητο μέλος, η ικανοποίηση της ευστάθειας σε λυγισμό περί τον ισχυρό άξονα προϋποθέτει τον έλεγχο και για τον ασθενή άξονα. Για μη ευαίσθητο μέλος η καμπύλη z-z (B2) συμπίπτει με αυτή της Μεθόδου A. Για σημεία του διαγράμματος που έχουν τους εξής περιορισμούς το μη ευαίσθητο μέλος πρέπει να ελέγχεται πρώτα με τη δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης, αφού περιέχεται στα αριστερά της πρώτης σχέσης: $N_{Ed}/N_{pl,Rd} \geq 30\%$ και $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd} \leq 65\%$. Επίσης, για μέλος που ελέγχεται με τη Μέθοδο A για $N_{Ed}/N_{pl,Rd} \geq 22\%$ και $M_{y,Ed}/M_{pl,y,Rd} \leq 35\%$ πρέπει να ελέγχεται πρώτα η δεύτερη σχέση.



Σχήμα 47. Διάγραμμα αλληλεπίδρασης - Περιβάλλουσες ευστάθειας ($R_d=1$) για IPE450 με $(\bar{\lambda}_y, \bar{\lambda}_z) = (0,751, 1,461)$

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Όπως γνωρίζουμε υπάρχουν δυο μειωτικοί συντελεστές που δείχνουν την επιρροή του λυγισμού στην καμπτική αντοχή ενός μέλους. Ο πρώτος προκύπτει από τη γενική διαδικασία υπολογισμού για οποιαδήποτε μορφή διατομής και ο δεύτερος είναι ειδικώς για ελατές ή ισοδύναμες συγκολλητές διατομές υπό κάμψη. Οι διατομές που ερευνήσαμε είναι οι IPE και οι πλατύπελμες HEB, οι οποίες είναι ελατές διατομές. Σε όλη την πορεία της έρευνάς μας, ο γενικός μειωτικός συντελεστής χ_{LT} ήταν πάντα μικρότερος από τον ειδικό $\chi_{LT,mod}$. Έτσι, τα αποτελέσματα ευστάθειας για χρήση του γενικού μειωτικού συντελεστή είναι μεγαλύτερα και συνεπώς πιο συντηρητικά από αυτά του ειδικού. Οι δυο αυτοί συντελεστές διαφέρουν διότι χρησιμοποιούν διαφορετικές καμπύλες λυγισμού για το ίδιο μέλος στον υπολογισμό τους και επιπλέον, ο ειδικός $\chi_{LT,mod}$ λαμβάνει υπόψη του την κατανομή της ροπής μεταξύ πλευρικών στηρίξεων με τη χρήση διορθωτικού συντελεστή. Άρα, χάριν της οικονομίας και χωρίς να αμελείται η ασφάλεια στο σχεδιασμό, προτείνεται στους μελετητές να χρησιμοποιούν τον ειδικό μειωτικό συντελεστή $\chi_{LT,mod}$ στις περιπτώσεις ελατών ή ισοδύναμων συγκολλητών διατομών υπό κάμψη.

Σχετικά, με την παράμετρο της ανηγμένης λυγηρότητας, η οποία είναι πολύ σημαντική στη συμπεριφορά ενός μέλους σε λυγισμό, έχουν να γίνουν κάποιες γενικές παρατηρήσεις για τις δυο μορφές διατομών. Για διατομές IPE και HEB με μικρές έως κανονικές τιμές ανηγμένων λυγηροτήτων και ως προς τους δυο άξονες τους, δηλαδή τιμές από 0,5 έως 1,1, η Μέθοδος A δίνει παρόμοια αποτελέσματα ευστάθειας με τη Μέθοδο B για μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις και για τις δυο σχέσεις αλληλεπίδρασης. Ειδικώς, για μεγάλες τιμές ανηγμένης λυγηρότητας ως προς τον ασθενή άξονα, παρουσιάζονται διαφορές μεταξύ των IPE και HEB. Αυτό οφείλεται στη γενικότερη αδυναμία ως προς την ακαμψία του άξονα z σε σχέση με του ισχυρού άξονα y. Επιπλέον, οι διατομές HEB είναι περισσότερο συμμετρικές ως προς την ακαμψία και την αδράνεια τους σε σχέση με τις IPE. Έτσι, ο ασθενής τους άξονας δεν υστερεί ως προς τον ισχυρό τους σε τόσο μεγάλο βαθμό όσο των IPE. Άρα, όταν η ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}_z$ παίρνει τιμές πάνω από 1,2, για διατομές IPE, στην πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης οι δυο μέθοδοι δεν συμφωνούν όπως πριν, ενώ στη δεύτερη τα αποτελέσματα ευστάθειας για οποιαδήποτε $\bar{\lambda}_y$ ξεπερνούν την μονάδα για ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις και για μη ευαίσθητο είναι αρκετά κοντά στο 1,0 όπως και στη Μέθοδο A. Για διατομές HEB, με τον ισχυρότερο ασθενή άξονα, η δεύτερη σχέση δίνει αποτελέσματα πολύ πιο ασφαλέστατα. Γενικά, καταλήγουμε πως στις περισσότερες περιπτώσεις η Μέθοδος A συμφωνεί με το μη ευαίσθητο μέλος σε στρεπτικές παραμορφώσεις της Μεθόδου B. Η εξήγηση βρίσκεται στην ερμηνεία των μειωτικών συντελεστών. Για τις

δεδομένες φορτίσεις και τις αρχικές υποθέσεις στις περισσότερες επιλύσεις μας προκύπτουν μειωτικοί συντελεστές κοντά στη μονάδα ή ακόμα και μονάδα. Αυτό υποδηλώνει ότι το μέλος δεν είναι ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις και συνεπώς, ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός δεν αποτελεί πιθανή μορφή αστοχίας. Βέβαια, εάν δεν υπολογίσουμε το μειωτικό συντελεστή δεν μπορούμε να προχωρήσουμε σε τέτοιες διαπιστώσεις. Το μόνο που γνωρίζουμε εξαρχής είναι ότι τα μέλη με ανοιχτές διατομές και μη παρεμποδιζόμενη στρέψη είναι ευαίσθητα σε στρεπτικές παραμορφώσεις και πρέπει να γίνει αναλυτικός υπολογισμός του μειωτικού του συντελεστή. Αντίθετα, τα μέλη με κοίλες κυκλικές διατομές ή μέλη στα οποία η στρέψη παρεμποδίζεται θεωρούνται μη ευαίσθητα και ο μειωτικός συντελεστής λαμβάνεται μονάδα.

Οι σχέσεις αλληλεπίδρασης περιέχουν τους όρους της αξονικής δύναμης, της καμπτικής ροπής περί τον y και περί τον z . Ο όρος της αξονικής δύναμης δεν εξαρτάται από κάποιο συντελεστή αλληλεπίδρασης και συνεπώς, παραμένει ίδιος για τις δυο μεθόδους. Το ίδιο δεν συμβαίνει για τους άλλους δυο όρους, με αποτέλεσμα οι τελικές τιμές ευσταθειας των δυο μεθόδων να διαφέρουν. Επίσης, στη πρώτη σχέση αλληλεπίδρασης η Μέθοδος B δίνει ίδια αποτελέσματα ευσταθειας για ευαίσθητο και μη ευαίσθητο μέλος αφού οι συντελεστές αλληλεπίδρασης k_{yy} και k_{yz} δεν αλλάζουν. Ο μοναδικός συντελεστής αλληλεπίδρασης που αλλάζει μεταξύ των δυο περιπτώσεων είναι ο k_{zy} . Αυτός ο συντελεστής βρίσκεται στη δεύτερη σχέση αλληλεπίδρασης στον όρο της καμπτικής ροπής περί τον ισχυρό άξονα της διατομής του μέλους και είναι υπεύθυνος για τη μεγάλη διάφορα στα τελικά αποτελέσματα ανάμεσα στις δυο περιπτώσεις. Από τα αριθμητικά παραδείγματα με διαφορές τιμές αξονικής θλιπτικής δύναμης, για την διατομή IPE, όπου οι Μέθοδοι A και B για μη ευαίσθητο μέλος συμφωνούν, οι αντίστοιχοι συντελεστές αλληλεπίδρασης είναι ίσοι, δηλαδή οι αντίστοιχοι όροι είναι ίσοι. Αντίθετα, για τη HEB, οι συντελεστές αλληλεπίδρασης δεν είναι ίσοι στις δύο περιπτώσεις. Μπορεί δηλαδή το τελικό αποτέλεσμα να είναι ίδιο αλλά είναι διαφορετική η συμβολή του κάθε όρου των σχέσεων αλληλεπίδρασης σε αυτό.

Για μεταβολή των ανηγμένων λυγηροτήτων, για μικρές έως κανονικές τιμές ανηγμένων λυγηροτήτων και για τις δυο μορφές διατομών HEB και IPE οι συντελεστές αλληλεπίδρασης δεν είναι ίσοι για τη Μέθοδο A και B για μη ευαίσθητο μέλος, αν και τα τελικά αποτελέσματα ευσταθειας συμφωνούν. Αυτό γίνεται με εξισορρόπηση των διαφορών μεταξύ των όρων της εκάστοτε σχέσης αλληλεπίδρασης. Η Μέθοδος A δίνει μεγαλύτερους συντελεστές των όρων για την καμπτική ροπή περί τον ασθενή άξονα, δηλαδή τους k_{yz} και k_{zz} . Αντίθετα, η Μέθοδος B για μη ευαίσθητο μέλος δίνει μεγαλύτερους συντελεστές αλληλεπίδρασης k_{yy} και k_{zy} . Έτσι, τελικά παίρνουμε παρόμοια αποτελέσματα. Όπως αναφέραμε ο συντελεστής k_{zy} διαφέρει πολύ για μέλος ευαίσθητο σε στρεπτικές παραμορφώσεις. Για μεγαλύτερες τιμές ανηγμένης λυγηρότητας, οι διατομές HEB συμπεριφέρονται όπως προηγούμενα, ενώ οι IPE έχουν μεγάλες διαφορές με την Μέθοδο A να έχει συνήθως μεγαλύτερους συντελεστές αλληλεπίδρασης.

Για τις διατομές ΗΕΒ, και για παράλληλη μεταβολή της αξονικής θλιπτικής δύναμης και καμπτικής ροπής περί τον ισχυρό άξονα, οι Μέθοδοι Α και Β για μη ευαίσθητο συμφωνούν. Το ίδιο συμβαίνει για ΙΡΕ με κανονικές ανηγμένες λυγηρότητες κοντά στη μονάδα ή μικρότερες, ενώ για μεγαλύτερες τιμές δεν υπάρχει συμφωνία. Αυτή η ασυμφωνία γίνεται εντονότερη όσο η αξονική δύναμη μεγαλώνει, διότι στη Μέθοδο Α, ο συντελεστής k_{yz} εξαρτάται από το λόγο $N_{Ed}/N_{cr,z}$. Επιπλέον, εάν το μέλος με διατομή ΗΕΒ ευσταθεί για λυγισμό περί τον ισχυρό άξονα είναι βέβαιο πως αυτό συμβαίνει και για τον ασθενή, εκτός ελαχίστων περιπτώσεων. Τέτοια απόλυτα συμπεράσματα δεν μπορούν να εξαχθούν για διατομές ΙΡΕ. Βεβαία, όσο η ανηγμένη λυγηρότητα μεγαλώνει, τόσο μικρότερη αξονική δύναμη χρειάζεται για να αστοχήσει το μέλος.

Ελπίζουμε, τα συμπεράσματα αυτά να είναι χρήσιμα στους επομένους μελετητές που θα ασχοληθούν με το φαινόμενο του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού σε μέλη από χάλυβα. Είναι πολύ σημαντικό να ασχοληθούν και με άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν το φαινόμενο αυτό όπως η μορφή των διατομών, η μεταβολή της καμπτικής ροπής περί τον ασθενή άξονα, η ποιότητα του χάλυβα, μορφή διαγραμμάτων καμπτικών ροπών κ.α.

Βιβλιογραφία

- Βάγιας Ι. , Ερμόπουλος Ι. , Ιωαννίδης Γ. , Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα. Κλειδάριθμος, Αθήνα 2008
- Ευρωκώδικας 3, Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα
- Nicolas Boissonnade, Jean-Pierre Jaspart, Jean-Pierre Muzeau, Marc Villette, *New interaction formulae for beam-columns in Eurocode 3: The French-Belgian approach*, 2003
- Greiner R. , Lindner J. , *Interaction formulae for members subjected to bending and axial compression in Eurocode 3 – The Method 2 approach*, 2005
- Ι. Βάγιας, Σιδηρές Κατασκευές Ανάλυση και Διαστασιολόγηση, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2003