



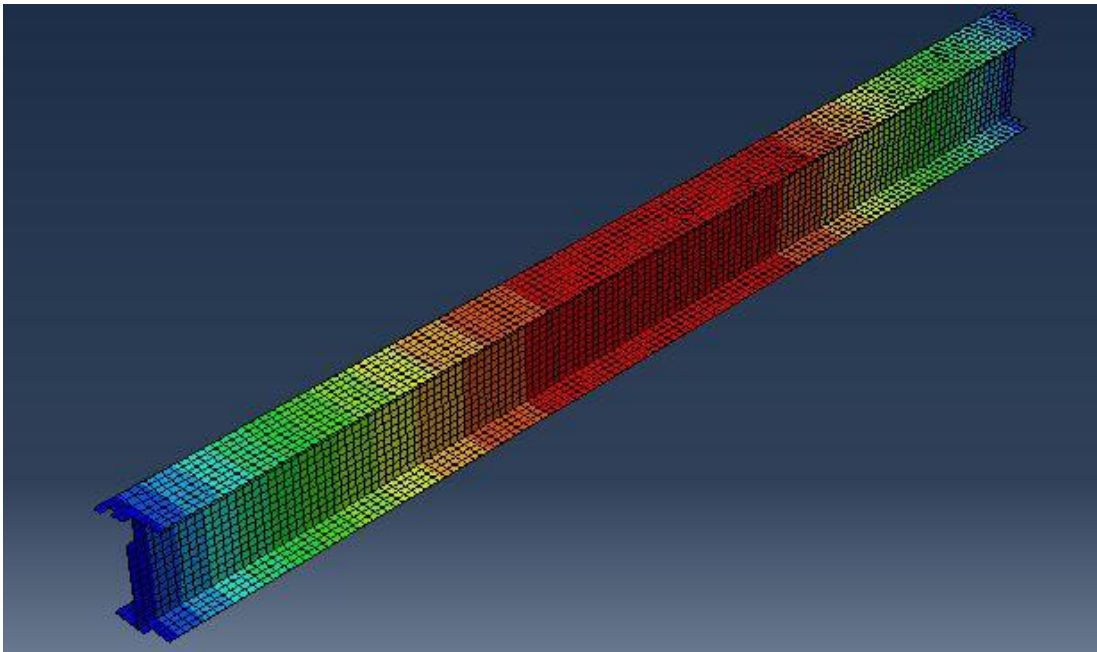
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Δ.Μ.Π.Σ.: Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών

Ευαισθησία του κορμού δοκών κύλισης γερανογεφυρών έναντι τοπικής αστάθειας



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θωμάς Η. Αλτανόπουλος

Επιβλέπων: Γεώργιος Ιωαννίδης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2013

ΕΜΚ ΜΕ 2013/16

Αλτανόπουλος Θ. Η. (2013).
Ευαισθησία κορμού δοκών κύλισης γερανογεφυρών έναντι τοπικής αστάθειας
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2013/16
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Altanopoulos Th. I. (2013).
Web breathing of crane runway girders
Postgraduate Diploma Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2013/16
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων	3
Περίληψη	5
Abstract.....	6
Ευχαριστίες	7
1 Ευαισθησία των κορμών δοκών έναντι ελαστικού λυγισμού (web breathing).....	8
1.1 Το φαινόμενο του ελαστικού, εκτός επιπέδου, λυγισμού κορμών δοκών (web breathing).....	8
1.2 Πειραματική διερεύνηση του φαινομένου	9
1.3 Πειραματικά αποτελέσματα.....	10
1.4 Συμπεράσματα ερευνητών.....	12
1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν τον εκτός επιπέδου λυγισμό των κορμών δοκών από λεπτότοιχα επίπεδα ελάσματα και το όριο κόπωσης τους.....	12
1.6 Προτάσεις σχεδιασμού έναντι του φαινομένου και σχέσεις του EC3.....	14
2 Δοκοί Κύλισης Γερανογεφυρών (10tn, 20tn, 40tn)	17
2.1 Χαρακτηριστικά Γερανογέφυρας 10tn (μήκος 8m, άνοιγμα 20m)	17
2.1.1 Δυναμικοί Συντελεστές.....	19
2.1.2 Υπολογισμός Κατακόρυφων Φορτίων.....	21
2.1.3 Υπολογισμός Οριζόντιων Φορτίων.....	23
2.1.4 Οριζόντια φορτία προερχόμενα από την επιτάχυνση/επιβράδυνση της γερανογέφυρας	24
2.1.5 Τα οριζόντια φορτία οφειλόμενα στη λοξή κίνηση της γερανογέφυρας ως προς τις τροχιές κύλισης.....	25
2.1.6 Έλεγχος Δοκού Κύλισης στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας.....	28
2.1.7 Έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας.....	33
2.2 Χαρακτηριστικά Γερανογέφυρας 20tn (μήκος 8m, άνοιγμα 20m)	35
2.2.1 Δυναμικοί Συντελεστές.....	37
2.2.2 Υπολογισμός Κατακόρυφων Φορτίων.....	39
2.2.3 Υπολογισμός Οριζόντιων Φορτίων.....	41
2.2.4 Οριζόντια φορτία προερχόμενα από την επιτάχυνση/επιβράδυνση της γερανογέφυρας	42
2.2.5 Τα οριζόντια φορτία οφειλόμενα στη λοξή κίνηση της γερανογέφυρας ως προς τις τροχιές κύλισης.....	43
2.2.6 Έλεγχος Δοκού Κύλισης στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας.....	47
2.2.7 Έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας.....	52

2.3	Χαρακτηριστικά Γερανογέφυρας 40tn (μήκος 8m, άνοιγμα 20m)	53
2.3.1	Δυναμικοί Συντελεστές	55
2.3.2	Υπολογισμός Κατακόρυφων Φορτίων	57
2.3.3	Υπολογισμός Οριζόντιων Φορτίων	59
2.3.4	Οριζόντια φορτία προερχόμενα από την επιτάχυνση/επιβράδυνση της γερανογέφυρας	59
2.3.5	Τα οριζόντια φορτία οφειλόμενα στη λοξή κίνηση της γερανογέφυρας ως προς τις τροχιές κύλισης.....	61
2.3.6	Έλεγχος Δοκού Κύλισης στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας.....	64
2.3.7	Έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας.....	69
2.4	Δοκός Κύλισης (συγκολλητής διατομής) Γερανογέφυρας 10tn (μήκος 8m, άνοιγμα 20m).....	71
2.4.1	Έλεγχος Δοκού Κύλισης στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας.....	71
2.4.2	Έλεγχοι οριστικής συγκολλητής Δοκού Κύλισης	74
2.5	Δοκός Κύλισης (συγκολλητής διατομής) Γερανογέφυρας 20tn (μήκος 8m, άνοιγμα 20m).....	77
2.5.1	Έλεγχος Δοκού Κύλισης στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας.....	77
2.5.2	Έλεγχοι οριστικής συγκολλητής Δοκού Κύλισης	81
2.6	Δοκός Κύλισης (συγκολλητής διατομής) Γερανογέφυρας 40tn (μήκος 8m, άνοιγμα 20m).....	83
2.6.1	Έλεγχος Δοκού Κύλισης στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας.....	84
2.6.2	Έλεγχοι οριστικής συγκολλητής Δοκού Κύλισης	87
3	Οριακή προσέγγιση του λόγου (ύψους προς πάχος κορμού), δοκών κύλισης γερανογεφυρών, με τη χρήση μεθόδων του EC3	90
3.1	Μαθηματικές εκφράσεις για τα αποτελέσματα του λυγισμού των επίπεδων ελασμάτων (EC3 Part 1.5).....	90
3.2	Η μέθοδος των συστατικών μερών καταπόνησης και η σύγκριση του καθορισμού των ορίων αστοχίας και λειτουργικότητας	91
3.3	Εφαρμογή των προηγούμενων μεθόδων στις δοκούς κύλισης γερανογεφυρών	93
4	Βαθμονόμηση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση δοκών από επίπεδα ελάσματα	95
4.1	Πειραματικά δεδομένα της δοκού που χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση	95
4.2	Χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και σύγκριση αποτελεσμάτων με αυτά των πειραμάτων	98
5	Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στις συγκολλητές δοκούς κύλισης των γερανογεφυρών (10tn, 20tn, 40tn)	107
5.1	Προσομοίωση της συγκολλητής δοκού κύλισης της γερανογέφυρας των 20tn	107
5.2	Ανάλυση κόπωσης για τη συγκολλητή δοκό της γερανογέφυρας των 20tn με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	110
6	Συμπεράσματα.....	115
7	Βιβλιογραφία	116

Ευαισθησία κορμού δοκών κύλισης γερανογεφυρών έναντι τοπικής αστάθειας

Αλτανόπουλος Θ. Η. (Επιβλέπων: Ιωαννίδης Γ.)

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση του φαινομένου της ευαισθησίας των κορμών δοκών έναντι του ελαστικού λυγισμού. Αυτή η ευαισθησία αφορά δοκούς με μεγάλο λόγο ύψους προς πάχος κορμού και ατέλειες. Όταν οι δοκοί αυτοί υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις οι κορμοί τους λυγίζουν ελαστικά εκτός του επιπέδου τους. Ειδικά σε αυτή την εργασία γίνεται ενασχόληση με τις δοκούς κύλισης γερανογεφυρών.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή του φαινομένου όπως αυτή προκύπτει από τις μέχρι τώρα έρευνες διαφόρων επιστημόνων. Γίνεται ακόμα παρουσίαση των τρόπων σχεδιασμού έναντι του φαινομένου, όπως αυτοί προτείνονται από διάφορους ερευνητές. Ακόμη δίνεται και η αντιμετώπιση του φαινομένου από τον EC3.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση σε δοκούς κύλισης, με διατομή ΗΕΒ, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για γερανογέφυρες που κυκλοφορούν στην αγορά. Εφαρμόζονται όλοι οι έλεγχοι που απαιτούνται από τον EC3 τόσο για την οριακή κατάσταση αστοχίας όσο και για αυτή της λειτουργικότητας. Στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια προσέγγισης του οριακού λόγου ύψους προς πάχος κορμού που προτείνει ο EC3 με τη χρήση συγκολλητών διατομών οι οποίες ελέγχονται και αυτές όπως και οι πρότυπες ΗΕΒ.

Στο τρίτο κεφάλαιο με τη βοήθεια μεθόδων που προτείνονται στα σχόλια του EC3 και σχέσεων που αφορούν το λυγισμό επίπεδων ελασμάτων (EC3 μέρος 1.5) επιχειρείται μια ακόμη προσπάθεια προσέγγισης της οριακής τιμής του λόγου (πάχος προς ύψος κορμού) ειδικά για τις δοκούς κύλισης γερανογεφυρών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η βαθμονόμηση του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούμε για την ανάλυση των δοκών κύλισης. Η βαθμονόμηση επιτυγχάνεται με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων από πειράματα που έγιναν σε συγκολλητή δοκό. Τα πειραματικά αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν από διδακτορική διατριβή του Jonas Gozzi (βλέπε βιβλιογραφία [11]). Το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων είναι τετραεδρικά κελύφους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων από λογισμικό Abaqus 6.10.1 για την ανάλυση των συγκολλητών δοκών κύλισης. Γίνεται βασικά μια ανάλυση κόπωσης για δοκούς στις οποίες μεταβάλλονται το πάχος και το ύψος του κορμού. Για την ανάλυση αυτή γίνεται και χρήση ατελειών. Τα αποτελέσματα που εξάγονται οδηγούν σε διαγράμματα λόγου ύψους προς πάχος κορμού – συντελεστή εκμετάλλευσης της κατηγορίας λεπτομέρειας κόπωσης.

Τέλος στο έκτο κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Το βασικότερο από τα συμπεράσματα είναι ότι για τις συνήθεις δοκούς κύλισης των γερανογεφυρών δεν έχουμε εμφάνιση του φαινομένου web breathing.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

POSTGRADUATE DIPLOMA THESIS
EMK ME 2013/16

Web breathing of crane runway girders

Altanopoulos Th. I. (supervised by Ioannidis G.)

Abstract

In this postgraduate diploma thesis a research of the phenomenon of girder «web breathing» under too many times repeated loading is taking place. Specifically in this investigation , great attention has been paid to the behavior of crane runway girders.

In the first chapter there is a description of the phenomenon as it is derived from current scientific research. A presentation of design procedures against «the web breathing», as these are suggested from researchers, is also included in this chapter. At the end of the chapter, a presentation of the EC3 design approach is given.

In the second chapter, an analysis of girders with cross section of type HEB is taking place. These cross sections can be used for crane runway girders. All the checks that are required from EC3 for crane girders are implemented. The analysis takes into account both the ultimate limit state and the serviceability limit state. After this , an attempt of approaching the limit of the slenderness ratio (web depth to web thickness) that EC3 suggests for crane girders, follows. This approach is achieved by using welded cross sections instead of HEB type. The same checks, that are implemented to the girders with the HEB type cross sections , are applied.

In the third chapter another approach of the crane girders slenderness limit is applied. This application is delivered by using methods that are suggested in the commentary of EC3 and mathematical expressions that consider the plate buckling effects due to direct stresses (EC3 Part 1.5).

In the fourth chapter, the calibration of the finite elements model that is used for the crane girder analysis, takes place. The calibration is executed with the comparison of the results from experiments that were applied in a girder composed of thin plate elements. The experimental results were taken from Jonas Gozzi Doctoral Thesis. The finite elements that were used were quad structured shell elements.

In the fifth chapter the previous finite element model is used, with the help of the Abaqus 6.10.1 software, for the analysis of crane girders with welded cross sections . A fatigue analysis of girders ,in which the depth and the thickness are varied , is given. In this analysis an application of web imperfection is used. The results that are derived lead to figures that show the variation between the slenderness ratio and the ratio of normal stresses (in the web to flange junction) to fatigue detail category.

Finally in the sixth chapter the conclusions of this postgraduate diploma thesis are presented . The main conclusion is that in the most common runway girders the web breathing phenomenon is negligible.

Ευχαριστίες

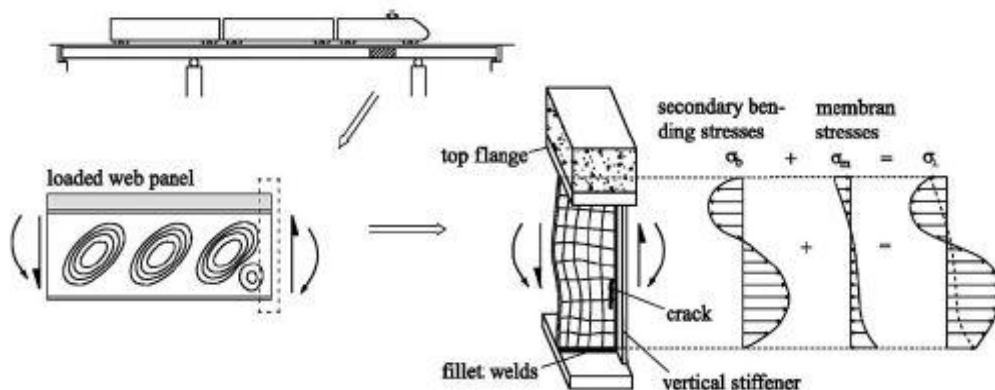
Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Ε.Μ.Π κ. Γ.Ιωαννίδη καθώς και την υποψήφια Δρ. Ε.Μ.Π Μ.Ε.Δασίου για τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγηση που μου παρείχαν κατά την εκπόνηση αυτής της Μ.Ε.

1 Ευαισθησία των κορμών δοκών έναντι ελαστικού λυγισμού (web breathing)

1.1 Το φαινόμενο του ελαστικού, εκτός επιπέδου, λυγισμού κορμών δοκών (web breathing)

Στην εποχή μας είναι ευρέως διαδεδομένη η χρήση συστημάτων αποτελούμενων από λεπτότοιχα επίπεδα ελάσματα στις κατασκευές. Αυτό συμβαίνει για λόγους οικονομίας αλλά και μεταλυγισμικής συμπεριφοράς. Τα στοιχεία αυτά όταν λυγίσουν είναι ικανά να αναπτύξουν μια δική τους «αυτοάμυνα» έναντι περαιτέρω παραμόρφωσης. Τα επίπεδα αυτά ελάσματα παρουσιάζουν ένα σημαντικό απόθεμα αντοχής μεγαλύτερο από το κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Αυτό εξηγεί τη σημαντική έρευνα που έχει γίνει διεθνώς για τη μεταλυγισμική συμπεριφορά και το οριακό φορτίο λεπτών κορμών και πελμάτων.

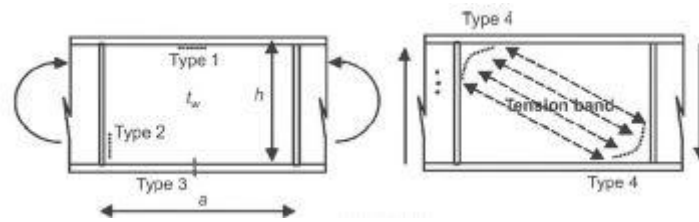
Από όλες τις κατασκευές στις οποίες γίνεται χρήση τέτοιων στοιχείων μια ειδική κατηγορία είναι αυτή των δοκών γεφυρών και των δοκών κύλισης γερανογεφυρών. Αυτές οι κατασκευές είναι εκτεθειμένες σε μεγάλο αριθμό επαναλαμβανόμενων φορτίσεων. Όταν οι κορμοί των δοκών αυτών των κατασκευών είναι αρκετά λεπτοί (μεγάλος λόγος ύψους προς πάχος) και παρουσιάζουν όπως είναι αναπόφευκτο γεωμετρικές ατέλειες, τότε αυτοί επαναλαμβανόμενα λυγίζουν εκτός του επιπέδου τους. Το φαινόμενο αυτό καλείται συνήθως με τον όρο web breathing. Αυτός ο εκτός επιπέδου λυγισμός εισάγει σημαντικές δευτερεύουσες καμπτικές τάσεις σε συντομικές περιοχές των κορμών. Αυτές οι τάσεις φαίνονται στο σχήμα 1.1 από το επιστημονικό άρθρο της U. Kuhlmann. (βλέπε βιβλιογραφία [10])



Σχήμα 1.1: Δευτερεύουσες καμπτικές τάσεις καθ' ύψος κορμού.

Περιοχές που εμφανίζονται οι δευτερεύουσες τάσεις είναι εκεί που έχουμε επαφή κορμού με πέλμα δοκού ή κορμού με κάποια εγκάρσια νεύρωση. Το ερώτημα που τίθεται είναι αν το φαινόμενο οδηγεί σε σημαντική μείωση του μεταλυγισμικού αποθέματος αντοχής για το οποίο έγινε λόγος πιο πάνω. Ακόμα είναι προφανές από τη φύση του φαινομένου ότι μια αθροιστική «ζημιά» (κόπωση) είναι επακόλουθη.

Ρωγμές κόπωσης εμφανίζονται σε διάφορα σημεία των κορμών που υπόκεινται στο φαινόμενο. Στο σχήμα πιο κάτω, από επιστημονικό άρθρο των M.Skaloud και M.Zornerova (βλέπε βιβλιογραφία [9]), φαίνονται αυτές οι περιοχές.



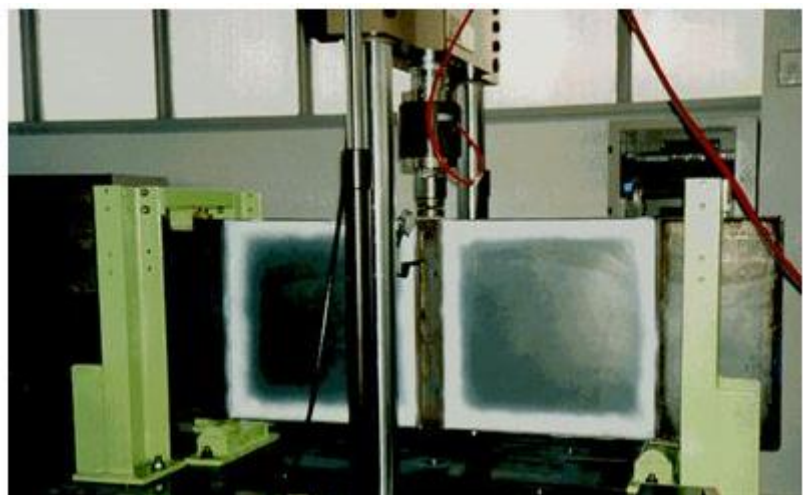
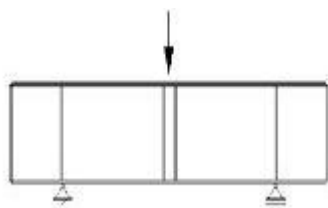
Σχήμα 1.2: Περιοχές εμφάνισης ρωγμών κόπωσης

Όταν η δοκός υπόκειται κυρίως σε κάμψη εμφανίζονται ρωγμές του τύπου 1. Αυτές είναι στις περιοχές συγκόλλησης στη σύνδεση του κορμού με το θλιβόμενο πέλμα. Μια άλλη μορφή ρωγμής αυτή του τύπου 4 μπορεί να αναπτυχθεί στον κορμό όταν έχουμε κυρίαρχη τη διάτμηση. Αυτές οι ρωγμές εμφανίζονται σε σημεία όπου η περιοχή της «εφελκυστικής διαγωνίου» συναντά τα συνοριακά στο κορμό στοιχεία. Οι ρωγμές τότε πολλαπλασιάζονται και προς τα πέλματα και προς τις εγκάρσιες νευρώσεις. Ρωγμές μπορούν να εμφανιστούν, ανεξάρτητα από αυτές τύπου 1, στη εφελκυστική ζώνη της δοκού είτε στη περιοχή του εφελκυσμένου πέλματος είτε στο ίδιο το πέλμα (τύπος 3) ή ακόμα στην άκρη της εγκάρσιας νεύρωσης (τύπος 2).

1.2 Πειραματική διερεύνηση του φαινομένου

Για την μελέτη του φαινομένου και τη διερεύνηση της απαρχής και της εξέλιξης των ρωγμών κόπωσης στους κορμούς δοκών που υπόκεινται στο φαινόμενο διεξήχθησαν πειράματα στη Πράγα από το Ινστιτούτο Θεωρητικής και Εφαρμοσμένης Μηχανικής της Ακαδημίας των Επιστημών. Ακόμα ανάλογα πειράματα έγιναν στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης.

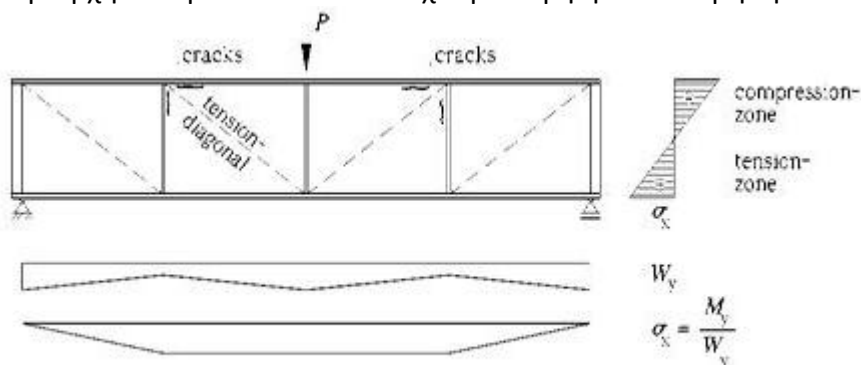
Στα πειράματα της Πράγας υπήρχαν τέσσερις σειρές δοκών. Οι λόγοι ύψους προς πάχος κορμού πήραν τις τιμές 175, 200, 250 και 320. Είναι προφανές ότι στα πειράματα αυτά είχαμε μια ποικιλία δοκών που είχαν κορμούς από πολύ λεπτούς μέχρι αυτούς που θεωρητικά δεν εμφανίζουν το υπό μελέτη φαινόμενο. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.1 οι δοκοί αποτελούνται από δυο τετραγωνικά «πάνελ» κορμών με μικρό μήκος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να είναι κυρίαρχη η διάτμηση.



Εικόνα 1.1: Δοκοί πειραμάτων Πράγας

Τα πειράματα της Πράγας δεν σταμάτησαν παρά μόνο όταν κατέληξαν στην αστοχία των δοκών. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την καταγραφή όλης της εξέλιξης των ρωγμών της κόπωσης.

Για τα πειράματα στο Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης χρησιμοποιήθηκαν 4 δοκοί. Το μήκος των δοκών ήταν 6.12μ και 7.92μ. Ο λόγος ύψος κορμού προς πάχος ήταν 250. Οι δοκοί όπως φαίνεται από το σχήμα 1.3 αποτελούνται από 4 «πάνελ» κορμών όπου στα δυο ακραία η διάτμηση είναι κυρίαρχη. Στα μεσαία «πάνελ» έχουμε κάμψη και διάτμηση.

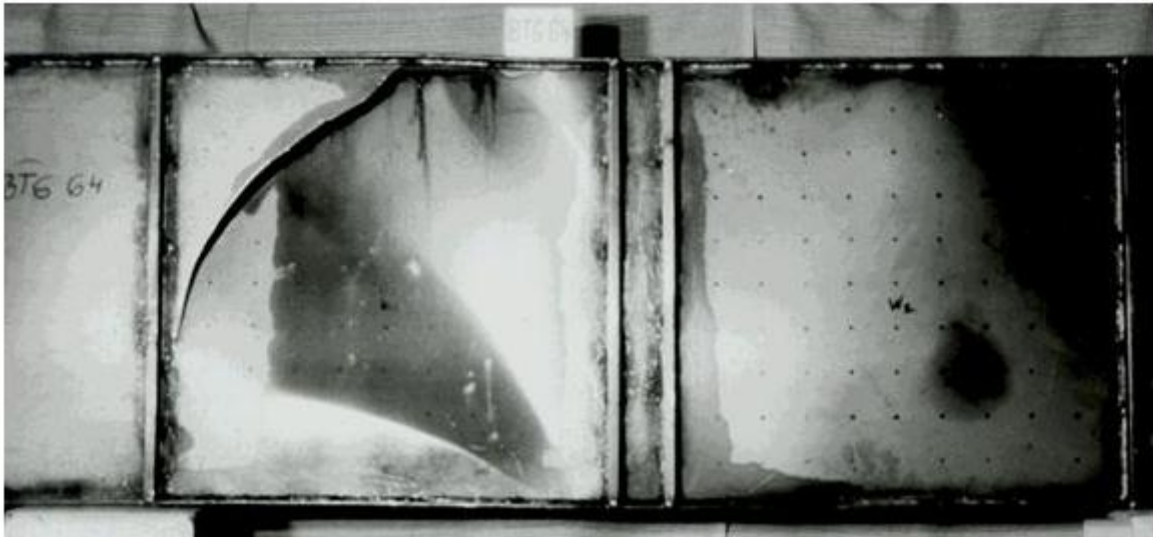


Σχήμα 1.3: Δοκοί πειραμάτων Στουτγάρδης

Η αλληλεπίδραση κάμψης και διάτμησης αυξάνει τη πιθανότητα δημιουργίας ρωγμών λόγω του φαινομένου «webs breathing». Τα πειράματα της Στουτγάρδης σχεδιάστηκαν, έτσι ώστε να μελετηθούν τα φαινόμενα κόπωσης, με ρωγμές που είναι πιθανότερο να εμφανιστούν στις γωνίες της εφελκυστικής διαγωνίου των κορμών και κυρίως στη θλιβόμενη περιοχή των δοκών. Για να συμβεί αυτό το πλάτος των πελμάτων των δυο μεσαίων πάνελ μεταβάλλεται με τέτοιο τρόπο ώστε η ροπή αντίστασης της διατομής να είναι ανάλογη της ροπής κάμψης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σταθερή ορθή τάση στα δυο μεσαία πάνελ. Αυτή η διαδικασία ήταν απαραίτητη για να μην υπερβεί η μέγιστη μεταβολή τάσης $\Delta\sigma_x$ το όριο κόπωσης στη μεσαία εγκάρσια νεύρωση η οποία φέρει και το φορτίο.

1.3 Πειραματικά αποτελέσματα

Όσον αφορά τα πειράματα της Πράγας οι περισσότερες δοκοί παρουσίασαν ένα τυπικό διατμητικό τύπο αστοχίας. Σημαντικός λυγισμός αναπτύχθηκε κατά μήκος της εφελκυστικής διαγωνίου των κορμών και πλαστικές ζώνες εμφανίστηκαν στα πέλματα των δοκών. Τελικά μόλις η κύρια ρωγμή έκοβε την εφελκυστική ζώνη, οι δοκοί συμπεριφέρονταν και αστοχούσαν σαν αυτές που έχουν ένα μεγάλο άνοιγμα στο κορμό. Το «κόψιμο» της εφελκυστικής περιοχής γινόταν είτε από μια μεγάλη ρωγμή είτε σε άλλες περιπτώσεις από μια ομάδα μικρότερων χωριστών. Αυτού του τύπου η αστοχία φαίνεται στην εικόνα 1.2.



Εικόνα 1.2: Τύπος αστοχίας δοκών πειραμάτων Πράγας

Ένας άλλος τύπος αστοχίας παρουσιάστηκε σε πολύ λίγες δοκούς. Αυτές αστόχησαν ως αποτέλεσμα του λυγισμού του θλιβομένου πέλματος, όταν είχαμε τον αποχωρισμό αυτού από τον κορμό, εξαιτίας μιας αρκετά μεγάλης ρωγμής κόπωσης.

Ο τύπος των ρωγμών στα πειράματα της Στουτγάρδης ήταν παρόμοιος με αυτών της Πράγας. Και εδώ παρατηρήθηκαν ρωγμές στις περιοχές που έρχονται σε επαφή ο κορμός με τα πέλματα και τις εγκάρσιες νευρώσεις. Η αστοχία των δοκών ήταν ένα προοδευτικό φαινόμενο. Ο αριθμός των κύκλων φόρτισης για τον οποίο είχαμε αστοχία ήταν διπλάσιος αυτού για τον οποίο παρατηρήθηκε η έναρξη της πρώτης ρωγμής. Η αστοχία και εδώ ήταν ίδιου τύπου με αυτή των πειραμάτων της Πράγας.

- A. Αστοχία λόγω κοψίματος της εφελκυστικής ζώνης από ρωγμή που εισβάλλει στον κορμό και οδηγεί στο λυγισμό του.
- B. Λυγισμός του θλιβομένου πέλματος λόγω ρωγμής που διαχωρίζει τον κορμό από το πέλμα. Αυτός ο τύπος είναι εμφανής στην εικόνα 1.3.



Εικόνα 1.3: Τύπος αστοχίας δοκών πειραμάτων Πράγας και Στουτγάρδης

1.4 Συμπεράσματα ερευνητών

Έχοντας ένα πλήθος πειραματικών δεδομένων οι ερευνητές θέλησαν να καθορίσουν το όριο κόπωσης των δοκών που υπόκεινται στο φαινόμενο. Στην προσπάθειά τους αυτή είχαν τρεις πιθανές επιλογές.

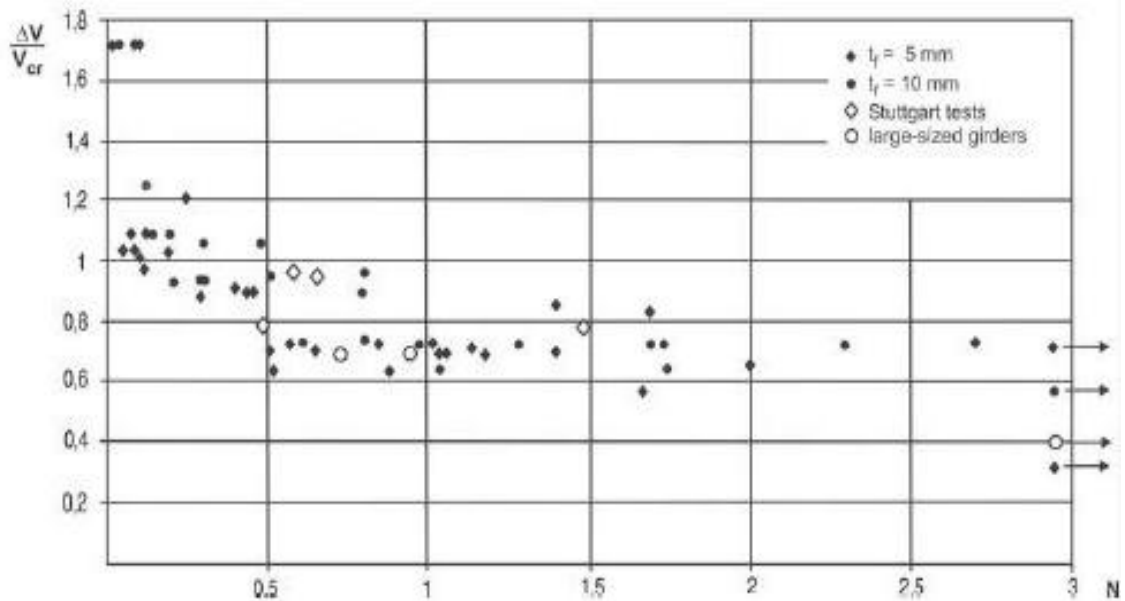
1. Τον καθορισμό βασισμένο στην απαρχή της πρώτης ρωγμής.
2. Αυτόν που σχετίζεται με ένα δεδομένο μήκος ρωγμής τμήμα της κύριας.
3. Τον καθορισμό που βασίζεται στην αστοχία λόγω κόπωσης της δοκού.

Η πρώτη περίπτωση εμφανίζει το πρόβλημα του εντοπισμού της πρώτης ρωγμής. Σύμφωνα με τους ερευνητές M.Skaloud και M.Zornerova (βλέπε βιβλιογραφία [9]) σε πάρα πολλές δοκούς των πειραμάτων της Πράγας περισσότερες από μια ρωγμές εμφανίζονταν μαζί και συχνά δεν ήταν η πρώτη αυτή που αποδεικνυόταν κρίσιμη. Ακόμη η παρατήρηση των ρωγμών είναι δυνατή αφού αυτές έχουν ένα συγκεκριμένο μέγεθος. Επομένως αυτό κάνει πολύ δύσκολο τον εντοπισμό της πραγματικής έναρξης τους. Για τους ερευνητές που εκτέλεσαν τα πειράματα της Πράγας η εμφάνιση μιας μικρής ρωγμής στις δοκούς των «breathing webs» δεν σημαίνει πολλά πράγματα για την αστοχία από κόπωση.

Η δεύτερη περίπτωση μοιάζει ευκολότερη στη παρατήρηση και τον εντοπισμό. Όμως και αυτή οδηγεί σε καθορισμό ορίου κοπώσεως χωρίς μεγάλη σχέση με αυτό της πραγματικής αστοχίας. Το τελικό συμπέρασμα των ερευνητών είναι ότι πιο ιδανικός είναι ο καθορισμός του ορίου μέσω της αστοχίας λόγω κόπωσης. Η ζωή των δοκών θα είναι ίση με το συνολικό αριθμό κύκλων φόρτισης που απαιτείται μέχρι την αστοχία.

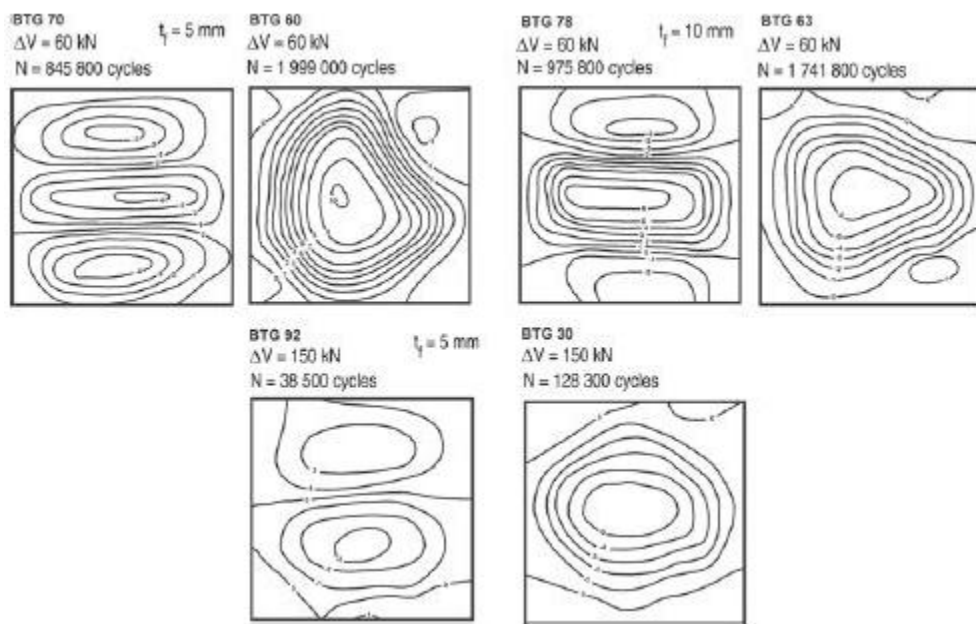
1.5 Παράγοντες που επηρεάζουν τον εκτός επιπέδου λυγισμό των κορμών δοκών από λεπτότοιχα επίπεδα ελάσματα και το όριο κόπωσης τους

- Ένας πρώτος παράγοντας που επηρεάζει το φαινόμενο είναι η θέση των ρωγμών κόπωσης. Σε όλα σχεδόν τα πειράματα της Πράγας οι ρωγμές εμφανίστηκαν στις περιοχές συγκόλλησης κορμών με τα πέλματα και κορμών με τις εγκάρσιες νευρώσεις. Όταν η φόρτιση μεγαλώνει, η μεταλυγισμική συμπεριφορά γίνεται έντονη και οι τάσεις στον κορμό επηρεάζονται σημαντικά από τις μεμβρανικές τάσεις στην εφελκυστική διαγώνιο που δημιουργούνται στις γωνίες του κορμού. Γι' αυτό και οι ρωγμές τότε εμφανίζονται στις γωνίες του πάνελ του κορμού.
- Επίδραση στο φαινόμενο έχει και το μέγεθος μεταβολής της τέμνουσας στη δοκό. Τα πειραματικά αποτελέσματα Πράγας και Στουτγάρδης οδήγησαν σε διαγράμματα όπως στο σχήμα 1.4, όπου N ο αριθμός των κύκλων φόρτισης.



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα μεταβολής τέμνουσας δοκού – αριθμού κύκλων φόρτισης (βλέπε βιβλιογραφία [9])

- Ακόμα έχουμε επίδραση στο φαινόμενο από το λόγο της ελάχιστης προς τη μέγιστη τέμνουσα V_{\min}/V_{\max} αν και στη περιοχή έρευνας ($V_{\min}/V_{\max}=0-0.67$) των μελετητών δε φάνηκε τόσο αυτό.
- Ένας ακόμα παράγοντας που σχετίζεται με το θέμα είναι το μέγεθος των πελμάτων. Όταν τα πέλματα των δοκών έχουν σημαντικό πάχος η ζωή των δοκών έναντι κόπωσης επεκτείνεται. Η επίδραση της στρεπτικής δυσκαμψίας των πελμάτων που παρέχει στους «αναπνέοντες κορμούς» στήριξη μπορεί να γίνει πολλή σημαντική και να επηρεάσει τη μεταλυγισμική συμπεριφορά τους. Το συγκεκριμένο θέμα σύμφωνα με μελετητές χρήζει σημαντικής έρευνας.
- Τα πειραματικά αποτελέσματα εμφάνισαν μια σημαντική διασπορά. Ο σημαντικότερος λόγος είναι το αποτέλεσμα των αναπόφευκτων αρχικών ατελειών των δοκών. Τη μεγαλύτερη επιρροή έχουν οι ατέλειες με μορφή αρχικών καμπυλών στους κορμούς των δοκών. Αυτές οι καμπύλες ποικίλουν με ένα σύνθετο και απρόβλεπτο τρόπο από δοκό σε δοκό. Η επιρροή τους έχει να κάνει τόσο με το σχήμα της αρχικής ατέλειας όσο και με το μέγεθός της. Αυτή η επιρροή είναι πιο επιζήμια όταν έχουμε ένα σχήμα με διάφορα «ημικύματα» καμπυλών από όταν έχουμε μόλις ένα. Αυτή η διαπίστωση ισχύει όταν η φόρτιση δεν είναι μεγάλη. Στο σχήμα 1.5 από το επιστημονικό άρθρο των M. Skaloud και M. Zornerova (βλέπε βιβλιογραφία [9]) φαίνεται η επιρροή του σχήματος της αρχικής ατέλειας σε διάφορες δοκούς για τις οποίες έγιναν πειράματα.



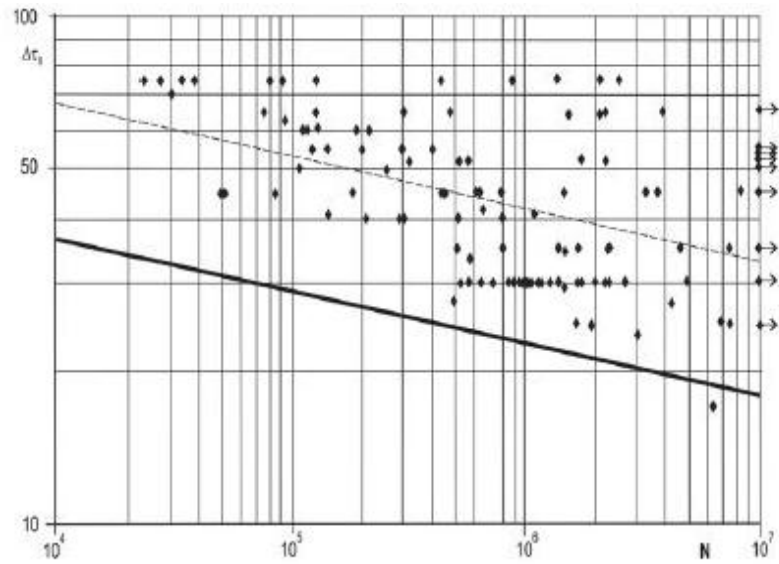
Σχήμα 1.5: Επιρροή του σχήματος της αρχικής ατέλειας της δοκού στο φαινόμενο web breathing

- Ένας τελευταίος παράγοντας με σημαντική επιρροή στα αποτελέσματα του φαινομένου των «αναπνεόντων κορμών» είναι η ποιότητα των συγκολλήσεων στις ενώσεις των κορμών με τα πέλματα των δοκών και των εγκάρσιων νευρώσεων. Είναι προφανές ότι το επίπεδο της ποιότητας των συγκολλήσεων επιδρά τόσο στη θέση της εμφάνισης των ρωγμών κόπωσης όσο και στη ζωή των δοκών.

1.6 Προτάσεις σχεδιασμού έναντι του φαινομένου και σχέσεις του EC3

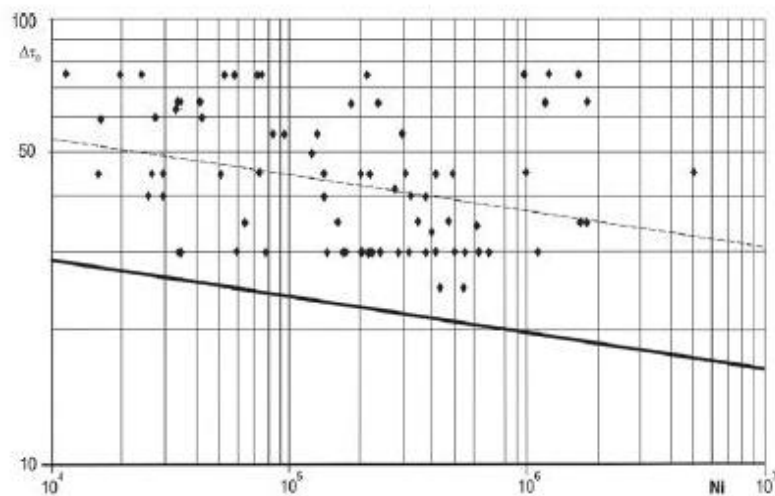
Σύμφωνα με τους διάφορους ερευνητές, (βλέπε βιβλιογραφία [9]), δυο απλές προσεγγίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για να περιλάβουν την επιρροή του φαινομένου «των αναπνεόντων κορμών», για το σχεδιασμό. Η μια προσέγγιση είναι η μείωση του λόγου ύψους προς πάχος κορμού, ώστε να μπορούμε να αγνοήσουμε τα αποτελέσματα του φαινομένου. Η άλλη είναι να μειωθεί η επίδραση του φορτίου στους κορμούς με τις ίδιες με πριν συνέπειες. Σύμφωνα με τους μελετητές των πειραμάτων της Πράγας, όπου είχαμε λόγους με τιμή 175, το φαινόμενο του web breathing, για τις δοκούς που χρησιμοποιήθηκαν μόνο αμελητέο δεν ήταν. Επομένως γι' αυτούς, ακόμα μικρότεροι λόγοι (ύψους προς πάχος) πρέπει να υιοθετηθούν για την ασφάλεια έναντι των επιπτώσεων του φαινομένου. Όσον αφορά τη δεύτερη προσέγγιση τα πειράματα έδειξαν ότι το φαινόμενο εμφανίζεται σε τέτοιους κορμούς (όταν υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση) ακόμα και όταν το φορτίο είναι μικρότερο από το κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Άρα η προσέγγιση σχεδιασμού με περιορισμό της φόρτισης δεν είναι κάτι που δίνει σίγουρα αποτελέσματα.

Άλλες προσεγγίσεις σχεδιασμού που προτείνονται είναι με χρήση εφαρμογών της θραυστομηχανικής. Οι M.Skaloud και Maquoi καταλήγουν σε καμπύλες S-N κάνοντας χρήση των πειραματικών δεδομένων. Οι συγγραφείς εισάγουν τις έννοιες του ορίου αντοχής σε κόπωση και αυτού σε λειτουργικότητα. Στο σχήμα 1.6 φαίνονται οι καμπύλες S-N (τάσεις-κύκλοι φόρτισης).



$$\log \Delta\tau_1 = -0,1044158 \log N + 1,9884888$$

Fig 11. Fatigue limit state, $175 \leq \lambda \leq 250$



Σχήμα 1.6: Καμπύλες S – N εξαγόμενες από πειραματικά δεδομένα

Σύμφωνα με τους συγγραφείς με την χρήση των καμπυλών μπορεί να προσεγγιστεί η ζωή της κατασκευής αλλά και το χρονικό σημείο στο οποίο μπορεί να γίνει μια πρώτη επιθεώρηση για την πιθανή παρατήρηση ρωγμών κόπωσης. Στην πραγματικότητα αντιμετωπίζουν το σχεδιασμό έναντι του φαινομένου του web breathing με όμοιο τρόπο όπως το σχεδιασμό έναντι κόπωσης. Άλλωστε η βασική συνέπεια του φαινομένου είναι η κόπωση.

Ο EC3 ειδικά για τις δοκούς κύλισης των γερανογεφυρών που αποτελούν και αντικείμενο της παρούσας εργασίας θεωρεί ότι ο ελαστικός εκτός του επιπέδου τους λυγισμός των κορμών μπορεί να αμεληθεί όταν ικανοποιείται το ακόλουθο κριτήριο για το συχνό συνδυασμό φορτίων.

$$\sqrt{\left\{\frac{\sigma_{\chi,Ed,ser}}{k_{\sigma} \cdot \sigma_E}\right\} + \left\{1.1 \frac{\tau_{Ed,ser}}{k_{\tau} \cdot \sigma_E}\right\}} \leq 1.1$$

Όπου b είναι η μικρότερη διάσταση του φανώματος του κορμού.

k_{σ} , k_{τ} είναι οι συντελεστές γραμμικού ελαστικού λυγισμού που δίνονται στο EN 1993-1-5.

$$\sigma_E = 190000 / (b/t_w)^2 \text{ [N/mm}^2\text{]}.$$

$\sigma_{\chi,Ed,ser}$ είναι η ορθή τάση στο φάνωμα του κορμού.

$\tau_{Ed,ser}$ είναι η διατμητική τάση στο φάνωμα του κορμού.

Σύμφωνα με τον EC3 το φαινόμενο *web breathing* μπορεί ακόμα να αμεληθεί σε φανώματα χωρίς διαμήκης νευρώσεις για λόγο $b/t_w < 120$ όπου t_w είναι το πάχος του κορμού.

2 Δοκοί Κύλισης Γερανογεφυρών (10tn, 20tn, 40tn)

2.1 Χαρακτηριστικά Γερανογέφυρας 10tn (μήκος 8m, άνοιγμα 20m)

Η γερανογέφυρα η οποία επιλέχθηκε είναι:

ZKKE without crane walkway SWL 10t

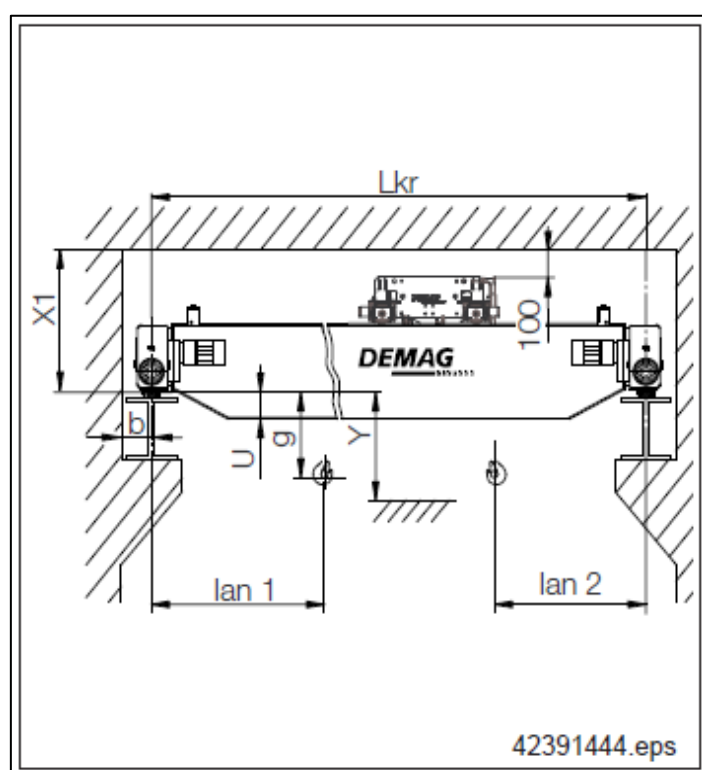
Crane girder: Box girder section; design 1

Travel unit: DFW-L-Z_/_/_/_/_/S

Crab: 1xEZDR 10-10 4/1 H20

Τα χαρακτηριστικά της οποίας είναι:

(πηγή των παρακάτω στοιχείων είναι το φυλλάδιο της DEMAG –σελ 56, 91, 99):



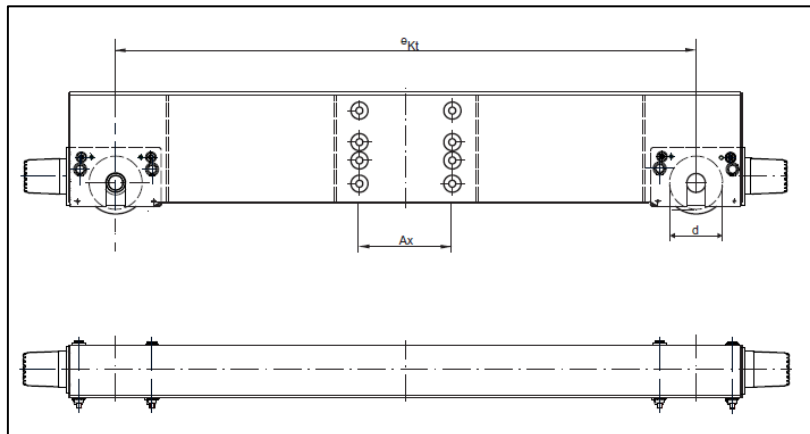
Σχήμα 2.1 Γερανογέφυρα.

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά γερανογέφυρας 10tn

Hook path: 10 or 6 m; hoist speed: 6/1 m/min; 9/1.5 m/min or 1 - 12.5 m/min infinitely variable;
cross travel speed 1.5 - 30 m/min infinitely variable

Crane			Crane girder			Crab				Travel unit							
L _{cr}	max. R	G _{cr}	X 1)	H 1)	u	l _{m1} 1)	l _{m2} 1)	g 1)	y	L _{ca}	l _{m3}	l _{m4}	d	e ₉₀	l _{wh}	DPZ	b 1)
4	5561	1975															
5	5760	2155															
6	5907	2334	808	708	68			37	568								
7	6024	2512															
8	6124	2693															
9	6274	3123	810	710	72			35	572								
10	6337	3243	808	708	168	1090	700	37	668		1320	1673	160		2992		
11	6466	3647	810	710	170			35	670						2500	100	
12	6545	3877			268				768								
13	6648	4212	808	708	270			37	770								
14	6836	4899	810	710	275			35	775	1400							
15	6913	5150	808	708	368			37	868								
16	7113	5919	897	797	283			-52	783								
17	7274	6517	899	799	285			-54	785		1353	1706			3058		175
18	7334	6720			381				881								
19	7458	7183	897	797	383			-52	883								
20	7629	8371	895	795	381			-50	881								
21	7804	9044			381				881								
22	7981	9729	897	797	383			-52	883		1698	2051		3150	3748		
23	8260	10822	899	799	385	1100	710	-54	885				200				
24	8321	11049							983								130
25	7722	11656	897	797	483			-52									
26	7927	12462	899	799				-54									
27	7878	12252	895	795	581			-50	1081	2240	2217	2382		4000	4598		
28	8192	13499	897	797				-52	1083								
29	8534	14961	895	795				-50									
30	8956	16540	897	797	585			-52	1085		2249	2414			4662	160	

Στοιχεία βαρούλκου:



Σχήμα 2.2: Τύπος βαρούλκου.

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά γερανογέφυρας 10tn

SWL [t]	Type FEM	Reeving	Hook path [m]	L _{ho} [mm]	max. R [kg]				Hoist speed [m/min]	Weight [kg]
					R1	R2	R3	R4		
10	EZDR 10 Pro 2m	4/1	6	1400	2812	2812	1815	3819	5/0.8	648
					2820	2820	1832	3824	1-9; 0.5-12.5	686
				2240	2750	2750	1863	3723	5/0.8	687
					2758	2758	1880	3728	1-9; 0.5-12.5	724
				2800	2739	2739	1704	3758	5/0.8	730
					2747	2747	1721	3762	1-9; 0.5-12.5	787
			10	1400	3266	3266	1378	2962	5/0.8	672
					3271	3271	1424	2943	1-9; 0.5-12.5	709
				2240	2825	2825	1838	3818	5/0.8	714
					2831	2831	1888	3897	1-9; 0.5-12.5	757
				2800	2804	2804	1678	3871	5/0.8	757
					2810	2810	1729	3851	1-9; 0.5-12.5	800
			20	1400	-				5/0.8	807
					4493	2693	1204	2617	5/0.8	807
				2240	4500	2700	1257	2593	1-9; 0.5-12.5	850
					3633	2193	1561	3853	5/0.8	850
				2800	3639	2199	1617	3828	1-9; 0.5-12.5	893

Σύμφωνα με τον πίνακα κατάταξης γερανογεφυρών, η υπό μελέτη γερανογέφυρα ανήκει στην κατηγορία Hoisting class- HC2 και S-classes – S6.

Βάρος γερανογέφυρας = 83,71KN
 Βάρος βαρούλκου = 6,86KN
 Ανυψωτική ικανότητα = 100KN
 Απόσταση τροχών ekt = 3150mm
 L_{an,2} = 0,71m

2.1.1 Δυναμικοί Συντελεστές

Οι δυναμικοί συντελεστές προκύπτουν από το τους πίνακες του Ευρωκώδικα 1 μέρος 3. Ο συντελεστής ϕ_1 εφαρμόζεται μόνο στο ίδιο βάρος της γερανογέφυρας και λαμβάνει υπόψη την δυναμική διέγερση της κατά την ανύψωση του φορτίου από το έδαφος. Η τιμή του κυμαίνεται από 0,9-1,10 και θα ληφθεί ίσος με 1,10.

$$\phi_1 = 1,10$$

Ο συντελεστής ϕ_2 εφαρμόζεται στο ανυψούμενο φορτίο και λαμβάνει υπόψη του την δυναμική επιρροή όταν το φορτίο αυτό μεταφέρεται από το έδαφος στην γερανογέφυρα

$$\phi_2 = \phi_{2,min} + \beta_2 * v_h$$

Η γερανογέφυρα είναι κατηγορία ανύψωσης 2 (HC2) άρα από τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.3: Τιμές συντελεστών για κατηγορίες γερανογεφυρών HC

Values of β_2 and $v_{2,min}$		
Hoisting class of appliance	β_2	$v_{2,min}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20

NOTE: Cranes are assigned to Hoisting Classes HC1 to HC4 to allow for the dynamic effects of transferring the load from the ground to the crane. The selection depends on the particular type of crane. see recommendation in annex B.

$\beta_2=0,34$ και $v_{2,min}=1.10$

ενώ η ταχύτητα ανύψωσης είναι $v_h=12.5\text{m}/\text{min}=0.2083\text{m}/\text{sec}$.

Συνεπώς $\phi_2=1.10+0.34*0.2083=1.17$.

$\phi_2=1.17$

Ο συντελεστής ϕ_3 θα ληφθεί ίσος με 1.00 αφού θεωρούμε ότι δεν υπάρχει δυνατότητα ξαφνικής απελευθέρωσης του συνόλου ή μέρους του αναρτημένου φορτίου (λόγω του ότι δεν χρησιμοποιούμε αρπαγές ή μαγνήτες για την ανύψωση του φορτίου).

$\phi_3=1.00$

Ο συντελεστής ϕ_4 εφαρμόζεται τόσο στο ίδιο βάρος της γερανογέφυρας όσο και στο ανυψούμενο φορτίο. Θεωρούμε ότι οι κατασκευαστικές ανοχές που ορίζονται στον Ευρωκώδικα 3 μέρος 6 ικανοποιούνται άρα ο συντελεστής ϕ_4 μπορεί να ληφθεί ίσος με 1.00.

$\phi_4=1.00$

Ο δυναμικός συντελεστής ϕ_5 λαμβάνει υπόψη την δυναμική επιρροή της δύναμης προώθησης και εφαρμόζεται επί των οριζόντιων δυνάμεων που αναπτύσσονται στις τροχιές κατά την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση της γερανογέφυρας. Με την υπόθεση ότι αυτές οι δυνάμεις μεταβάλλονται ομαλά ο συντελεστής αυτός λαμβάνεται ίσος με 1.50 σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.4: Δυναμικός συντελεστής ϕ_5

Dynamic factor v_5	
$v_5 = 1.0$	for centrifugal forces
$1 \# v_5 \# 1.5$	correspond to systems in which forces change smoothly
$1.5 \# v_5 \# 2.0$	when sudden changes occur
$v_5 = 3.0$	for drives with considerable backlash

$\phi_5=1.50$

2.1.2 Υπολογισμός Κατακόρυφων Φορτίων

Στη δοκό κύλισης μεταφέρονται τα φορτία της γερανογέφυρας μέσω των τροχών. Στα κατακόρυφα φορτία συμπεριλαμβάνονται:

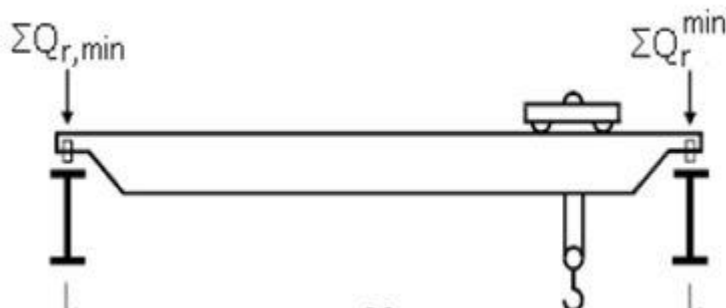
- Ίδιο βάρος γερανογέφυρας
- Βάρος βαρούλκου
- Μέγιστο ανυψούμενο φορτίο

Η διαστασιολόγηση της δοκού θα γίνει με τους παρακάτω συνδυασμούς φορτίσεων που δίνει ο Ευρωκώδικας.

Πίνακας 2.5: Δυναμικοί συντελεστές για διάφορους συνδυασμούς φόρτισης

		Ομάδες φορτίων									
		Οριακή κατάσταση αστοχίας							Δοκιμαστική	Τυχηματική	
		1	2	3	4	5	6	7			
1	Ίδιο βάρος γερανογέφυρας	φ_1	φ_1	1	φ_4	φ_4	φ_4	1	φ_1	1	1
2	Ανυψούμενο φορτίο	φ_2	φ_3	-	φ_4	φ_4	φ_4	$\eta^{1)}$	-	1	1
3	Επιτάχυνση της γερανογέφυρας	φ_5	φ_5	φ_5	φ_{5-}	-	-	-	φ_5	-	-
4	Λοξή κίνηση της γερανογέφυρας	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
5	Επιτάχυνση ή επιβράδυνση του ανυψωτικού συστήματος	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
6	Ανεμος	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-
7	Δοκιμαστικό φορτίο	-	-	-	-	-	-	-	φ_6	-	-
8	Πρόσκρουση στο stop	-	-	-	-	-	-	-	-	φ_7	-
9	Πρόσκρουση βαρούλκου σε εμπόδιο	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

Το βαρούλκο και το φορτίο μπορούν να κινηθούν μεταξύ 2 συγκεκριμένων σημείων της γερανογέφυρας χαρακτηριστικά για κάθε τύπο γερανογέφυρας ($L_{an,2}$).



Σχήμα 2.3: Θέση βαρούλκου

Συνδυασμός φορτίων 1:

$$\text{Ίδιο βάρος γερανογέφυρας } q_c = \frac{83.71\text{KN}}{20\text{m}} = 4.19\text{KN/m}$$

$$\text{Δυναμική προσαύξηση : } 1.10 q_c = 1.10 * 4.19 = 4.61\text{KN/m}$$

$$\text{Βάρος βαρούλκου – σημειακό φορτίο } 6.86\text{KN}$$

$$\text{Δυναμική προσαύξηση } 1.10 * 6.86 = 7.55\text{KN}$$

Στην περισσότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmin} = \frac{1}{2} * 4.61 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + 7.55\text{KN} * (20-0.71)/20 = 53.38\text{KN}$$

$$\text{Ανά τροχό ασκείται } Q_{rmin} = 53.38/2 = 26.69\text{KN}$$

Στην λιγότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmin} = \frac{1}{2} * 4.61 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + 7.55\text{KN} * 0.71/20 = 46.37\text{KN}$$

$$\text{Ανά τροχό ασκείται } Q_{rmin} = 46.37/2 = 23.19\text{KN}$$

Συνδυασμός φορτίων 4,5,6 με δυναμικό συντελεστή ϕ_4 :

Στην περισσότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmin} = (53.38/1.10) * 1.00 = 48.53\text{KN}$$

$$\text{Ανά τροχό ασκείται } Q_{rmin} = 48.53/2 = 24.27\text{KN}$$

Στην λιγότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmin} = (46.37/1.10) * 1.00 = 42.15\text{KN}$$

$$\text{Ανά τροχό ασκείται } Q_{rmin} = 42.15/2 = 21.08 \text{KN}$$

Συνδυασμός φορτίων 1 με ανυψούμενο φορτίο (10tn) – πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα.

$$Q_H = \phi_2 * 100\text{KN} = 1.17 * 100 = 117\text{KN}$$

Στην περισσότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} * 4.61 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + (117+7.55)\text{KN} * (20-0.71)/20 = 166.23\text{KN}$$

$$\text{Ανά τροχό ασκείται } Q_{rmax} = 166.23/2 = 83.12\text{KN}$$

Στην λιγότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} * 4.61 \text{ KN/m} * 20\text{m} + (117+7.55)\text{KN} * 0.71/20 = 50.52\text{KN}$$

$$\text{Ανά τροχό ασκείται } Q_{rmax} = 50.52/2 = 25.26 \text{KN}$$

Συνδυασμός φορτίων 2 – πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα.

$$Q_H = \phi_3 * 100\text{KN} = 1.00 * 100\text{KN} = 100\text{KN}$$

Στην περισσότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} * 4.61 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + (100+7.55)\text{KN} * (20-0.71)/20 = 149.83\text{KN}$$

$$\text{Ανά τροχό ασκείται } Q_{rmax} = 149.83/2 = 74.92\text{KN}$$

Στην λιγότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} * 4.61 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + (100+7.55)\text{KN} * 0.71/20 = 49.92\text{KN}$$

$$\text{Ανά τροχό ασκείται } Q_{rmax} = 49.92/2 = 24.96 \text{KN}$$

Συνδυασμός 4,5 (συντελεστής φ4)- πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα.

Στην περισσότερο φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} * 4.19 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + (100+6.86) \text{ KN} * (20-0.71)/20 = 144.97 \text{ KN}$$

Ανα τροχό ασκείται

$$Q_{rmax} = 144.97/2 = 72.49 \text{ KN}$$

Στην λιγότερο φορτισμένη δοκό

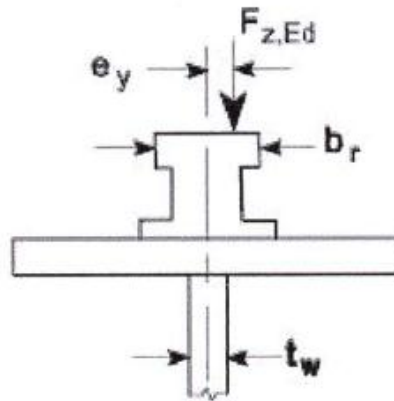
$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} * 4.19 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + (100+6.86) \text{ KN} * 0.71/20 = 45.69 \text{ KN}$$

Ανα τροχό ασκείται

$$Q_{rmax} = 45.69/2 = 22.85 \text{ KN}$$

2.1.3 Υπολογισμός Οριζόντιων Φορτίων

Λόγω του ότι η τροχιά σταθμίζεται και ευθυγραμμίζεται μετά την ανέγερση του κτιρίου και την τοποθέτηση των δοκών κυλίσεως είναι δυνατόν το κατακόρυφο φορτίο να ασκηθεί έκκεντρα στην δοκό κυλίσεως.



Σχήμα 2.4: Θέση κατακόρυφου φορτίου

Η εκκεντρότητα λαμβάνεται ίση με το $\frac{1}{4}$ του πλάτους της τροχιάς.

Πλάτος τροχιάς = 7cm μήκος = 5cm

Εκκεντρότητα $e = 1/4 * 7 \text{ cm} = 17.5 \text{ mm}$

Έχουμε:

Τα οριζόντια φορτία τα οποία οφείλονται στην επιτάχυνση επιβράδυνση της γερανογέφυρας κατά την κίνηση της πάνω στην δοκό κύλισης.

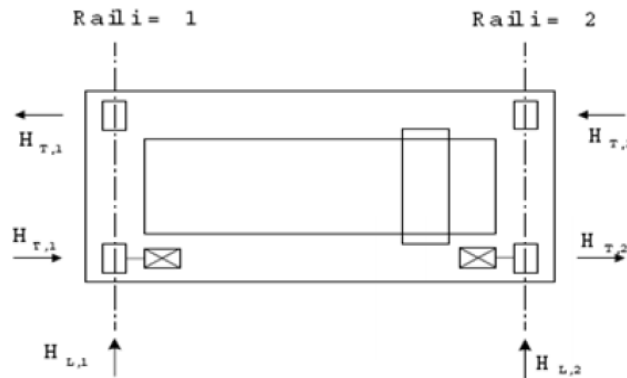
Τα οριζόντια φορτία τα οποία οφείλονται στην επιτάχυνση επιβράδυνση του βαρούλκου κατά την κίνηση του πάνω στην γερανογέφυρα.

Τα οριζόντια φορτία οφειλόμενα στη λοξή κίνηση της γερανογέφυρας ως προς τις τροχιές κύλισης.

Πιο αναλυτικά παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

2.1.4 Οριζόντια φορτία προερχόμενα από την επιτάχυνση/επιβράδυνση της γερανογέφυρας

Η κινητήριος δύναμη K της γερανογέφυρας ασκείται στον άξονα κίνησης ενώ το κέντρο βάρους του συστήματος γερανογέφυρα-αναρτώμενο φορτίο διαφέρει με αποτέλεσμα να προκύπτει μια ροπή. Αυτή εξισορροπείται με ένα ζεύγος εγκάρσιων δυνάμεων οι οποίες ασκούνται μεταξύ τροχών και τροχιών (δυνάμεις H_T). Ταυτόχρονα ασκούνται και κατά μήκος οι δυνάμεις H_L .



Σχήμα 2.5: Οριζόντια φορτία γερανογέφυρας

Οριζόντιες Δυνάμεις H_L

$$H_{L,i} = \phi_5 \times K \times 1/n_r$$

K : κινητήριος δύναμη

n_r = αριθμός δοκών κύλισης =2

$$K = \mu \times m_w \times \Sigma Q_{rmin}$$

ΣQ_{rmin} : στην λιγότερο φορτισμένη δοκό- ίδια βάρη γερανογέφυρας + βαρούλκου με δυναμικό συντελεστή $\phi_4 = 21.08\text{KN}$ –ανά τροχό.

$m_w = 2$ (ένας κινητήριος τροχός με ανεξάρτητη κίνηση σε κάθε τροχιά).

$\mu = 0.2$ συντελεστής τριβής τροχού- τροχιάς (χάλυβας-χάλυβας)

$$K = 0.2 * 2 * 21.08\text{KN} = 8.43\text{KN}$$

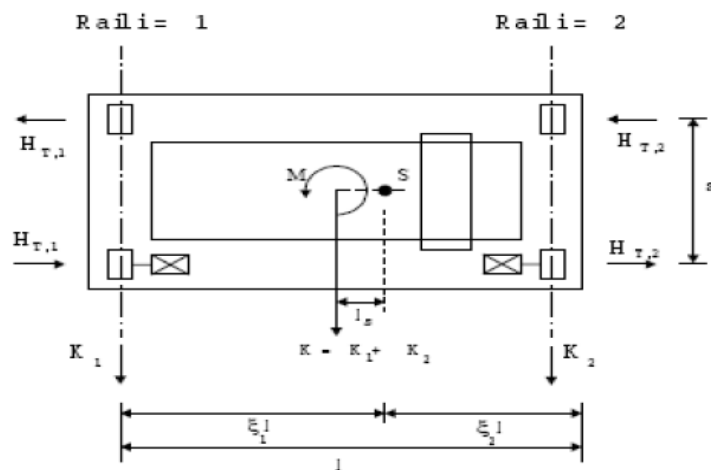
$$H_{L,1} = H_{L,2} = \phi_5 \times K \times 1/n_r = 1.5 * 8.43 * 1/2 = 6.32\text{KN} \text{ (είναι ίδιες)}$$

Εγκάρσιες Δυνάμεις H_T

$$H_{T,1} = \phi_5 \times \xi_2 \times M/a$$

$M = K \times l_s$ ροπή στροφής

a : απόσταση τροχών = 3.15 m



Σχήμα 2.6: Δυνάμεις $H_{T,1}$, $H_{T,2}$ και ροπή M

$$\xi_1 = \frac{\Sigma Q_{rmax}}{\Sigma Q_r}$$

ΣQ_{rmax} : στην περισσότερο φορτισμένη δοκό – πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα = 144.97KN

ΣQ_{rmin} : στην λιγότερο φορτισμένη δοκό – πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα = 45.69KN

$$\xi_1 = 144.97 / (144.97 + 45.69) = 0.76$$

$$\xi_2 = 1 - \xi_1 = 1 - 0.76 = 0.24$$

$$l_s = (\xi_1 - 0.5) \times l = (0.76 - 0.5) \times 20m = 5.2m$$

$$M = K \times l_s = 8.43KN \times 5.2m = 43.84KNm$$

Στην περισσότερο φορτισμένη δοκό

$$H_{T,2} = \phi_5 \times \xi_1 \times M / a = 1.5 \times 0.76 \times 43.84 / 3.15 = 15.87KN$$

Στην λιγότερο φορτισμένη δοκό

$$H_{T,1} = \phi_5 \times \xi_2 \times M / a = 1.5 \times 0.24 \times 43.84 / 3.15 = 5.01KN$$

2.1.5 Τα οριζόντια φορτία οφειλόμενα στη λοξή κίνηση της γερανογέφυρας ως προς τις τροχιές κύλισης

Η οδηγούσα δύναμη S και οι εγκάρσιες δυνάμεις $H_{S,i,j,k}$ που οφείλονται στην λοξή κίνηση της γερανογέφυρας:

$$S = f \times \lambda_s \times \Sigma Q_{rmax}$$

$$H_{S,1,1,T} = f \times \lambda_{s,1,1,T} \times \Sigma Q_{rmax}$$

$$H_{S,2,1,T} = f \times \lambda_{s,2,1,T} \times \Sigma Q_{rmax}$$

$$H_{S,1,2,T} = f \times \lambda_{s,1,2,T} \times \Sigma Q_{rmax}$$

$$H_{S,2,2,T} = f \times \lambda_{s,2,2,T} \times \Sigma Q_{rmax}$$

λ_s : συντελεστής δύναμης

i : είναι ο αριθμός της τροχιάς κύλισης

j : η διεύθυνση L-κατά μήκος, T-εγκάρσια

ΣQ_{rmax} : άθροισμα κατακόρυφων αντιδράσεων τροχών στην περισσότερο καταπονούμενης τροχιάς για πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα.

$$f = 0.3 \times [1 - \exp(-250 \times a)]$$

a : γωνία λοξότητας (skewing angle) η οποία εξαρτάται από το διάκενο μεταξύ των μέσων καθοδήγησης και της τροχιάς, το είδος των μέσων καθοδήγησης και άλλους παράγοντες. Εάν δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία λαμβάνεται ίση με 0.015 rad.

$$f = 0.3 \times (1 - \exp(-250 \times 0.015)) = 0.293 < 0.3$$

Στον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και των μέσων καθοδήγησης «h» θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω πίνακα. Το σύμβολο IFF δηλώνει τροχούς με ανεξάρτητη κίνηση (independent) και σταθερά συνδεδεμένους με τον άξονα (fixed).

Πίνακας 2.6: Απόσταση στιγμιαίου πόλου στροφής – μέσων καθοδήγησης

	Συνδυασμός ζευγών τροχών		h
	συνεζευγμένοι (c)	ανεξάρτητοι (i)	
Σταθερά/Σταθερά FF			$\frac{m\xi_1\xi_2\ell^2 + \sum e_i^2}{\sum e_i}$
Σταθερά/Κινητά FM			$\frac{m\xi_1\ell^2 + \sum e_i^2}{\sum e_i}$

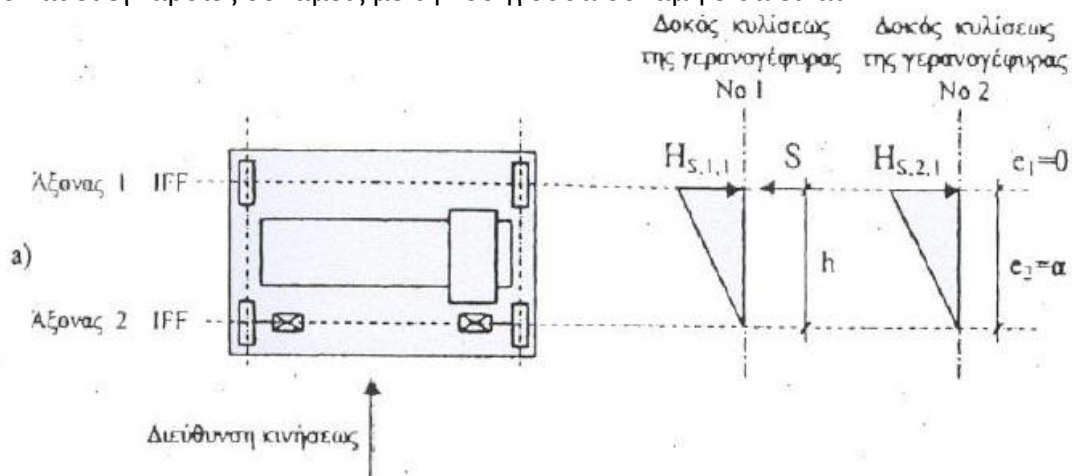
h είναι η απόσταση μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και των μέσων καθοδήγησης
m είναι ο αριθμός των συνεζευγμένων ζευγών τροχών (m = 0 για ανεξάρτητα ζεύγη τροχών)
ξ₁ είναι η απόσταση του στιγμιαίου πόλου στροφής από την τροχιά 1
ξ₂ είναι η απόσταση του στιγμιαίου πόλου στροφής από την τροχιά 2
ℓ είναι το άνοιγμα της γερανογέφυρας
e_i είναι η απόσταση του ζεύγους τροχών i από τα μέσα καθοδήγησης

$$h = \frac{m\xi_1\xi_2\ell^2 + \sum e_i^2}{\sum e_i}$$

m=0 ανεξάρτητα ζεύγη τροχών

$$h = \sum e_i^2 / \sum e_i = 3.15^2 / 3.15 = 3.15$$

Άρα $e_1=0$ και οι εγκάρσιες δυνάμεις με την οδηγούσα δύναμη S θα είναι :



Σχήμα 2.7: Η οδηγούσα δύναμη S και οι εγκάρσιες δυνάμεις HS,i,j,k

Πίνακας 2.7: Πίνακας υπολογισμού συντελεστή δύναμης

Σύστημα	$\lambda_{S,j}$	$\lambda_{S,1,j,L}$	$\lambda_{S,1,j,T}$	$\lambda_{S,2,j,L}$	$\lambda_{S,2,j,T}$
CFF	$1 - \frac{\sum e_j}{nh}$	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \frac{\ell}{h}$	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \frac{\ell}{h}$	$\frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$
IFF		0	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	0	$\frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$
CFM	$\xi_2 \left(1 - \frac{\sum e_j}{nh}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \frac{\ell}{h}$	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \frac{\ell}{h}$	0
IFM		0	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	0	0

Όπου:

n είναι ο αριθμός ζευγών τροχών,

ξ_1^{ℓ} είναι η απόσταση μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και της τροχιάς 1,

ξ_2^{ℓ} είναι η απόσταση μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και της τροχιάς 2,

ℓ είναι το άνοιγμα της συσκευής,

e_j είναι η απόσταση του ζεύγους τροχών j από τα σχετικά μέσα οδήγησης,

h είναι η απόσταση μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και των σχετικών μέσων οδήγησης.

$n =$ αριθμός των ζευγών των τροχών $= 2$

$\lambda_s = 1 - \sum e_i / nh = 1 - 3.15 / (2 * 3.15) = 0.5$

$\lambda_{s,1L} = \lambda_{s,2L} = 0$

$\lambda_{s,1T} = \xi_2 / n (1 - e_i / h) = 0.24 / 2 (1 - 0) = 0.12$

$\lambda_{s,2T} = \xi_1 / n (1 - e_i / h) = 0.76 / 2 (1 - 0) = 0.38$

Υπολογισμός δυνάμεων

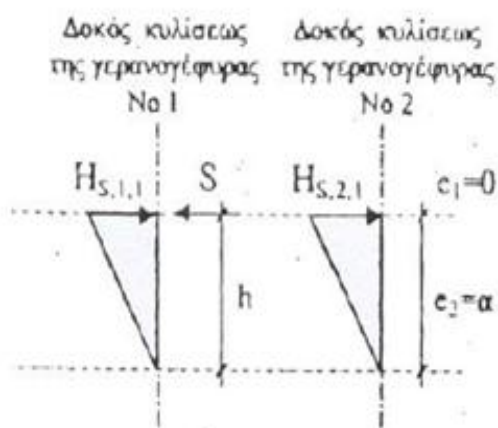
$S = f \times \lambda_s \times \sum Q_{rmax} = 0.293 * 0.5 * 144.97 = 21.24 \text{ KN}$

$H_{s,1,1,T} = f \times \lambda_{s,1,1,T} \times \sum Q_{rmax} = 0.293 * 0.12 * 144.97 = 5.10 \text{ KN}$

$H_{s,2,1,T} = f \times \lambda_{s,2,1,T} \times \sum Q_{rmax} = 0.293 * 0.38 * 144.97 = 16.14 \text{ KN}$

$H_{s,1,2,T} = f \times \lambda_{s,1,2,T} \times \sum Q_{rmax} = 0$

$H_{s,2,2,T} = f \times \lambda_{s,2,2,T} \times \sum Q_{rmax} = 0$



Στο προπορευόμενο ζεύγος τροχών επί της τροχιάς 1:

$H_{s,1,T} = H_{s,1,1,T} - S = 5.10 - 21.24 = -16.14 \text{ KN}$

Επί της τροχιάς 2:

$H_{s,2,T} = 16.14 \text{ KN}$

Σχήμα 2.8: Η οδηγούσα δύναμη S και οι εγκάρσιες δυνάμεις $H_{S,i,j,k}$

Πίνακας 2.8: Συγκεντρωτικός πίνακας φορτίων

		Ομάδες φορτίων				
		Οριακή κατάσταση αστοχίας				
		1	2	3	4	5
Ίδιο βάρος γερανογέφυρας		26.69	26.69	24.27	24.27	24.27
		36.03	36.03	32.76	32.76	32.76
		23.19	23.19	21.08	21.08	21.08
		31.31	31.31	28.46	28.46	28.46
Ίδιο βάρος γερανογέφυρας + Ανυψούμενο φορτίο		83.12	74.92	-	72.49	72.49
		112.21	101.14	-	97.86	97.86
		25.26	24.96	-	22.85	22.85
		34.10	33.70	-	30.85	30.85
Επιτάχυνση της γερανογέφυρας	HL1	6.32	6.32	6.32	6.32	
		8.53	8.53	8.53	8.52	
	HL2	6.32	6.32	6.32	6.32	
		8.53	8.53	8.53	8.53	
	HT1	5.01	5.01	5.01	5.01	
		6.76	6.76	6.76	6.76	
	HT2	15.87	15.87	15.87	15.87	
		21.42	21.42	21.42	21.42	
Λοξή κίνηση της γερανογέφυρας	H _{S,1,T}					16.14 21.79
	H _{S,2,T}					16.14 21.79

2.1.6 Έλεγχος Δοκού Κύλισης στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας

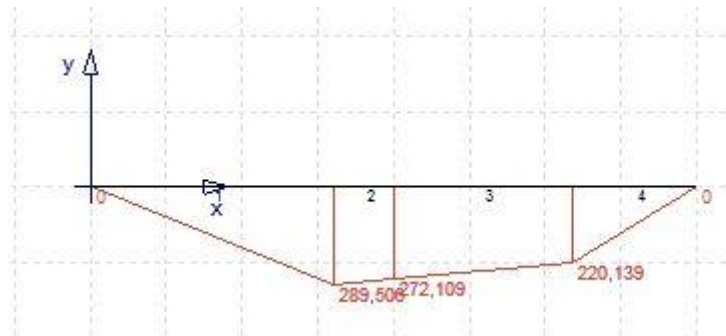
Η απόσταση των τροχών είναι $3.15\text{m} < 0.586 \times l = 0.586 \times 8.0\text{m} = 4.69\text{m}$

Q_{rmax}

Η μέγιστη ροπή αναπτύσσεται όταν το ένα φορτίο είναι στη θέση $\chi = (2 \cdot l - a) / 4 = 3.21$ της δοκού. Πιο συγκεκριμένα:



Σχήμα 2.9: Φορτίο Q_{rmax} στη θέση $\chi=3.21$



Σχήμα 2.10: Διάγραμμα ροπών



Σχήμα 2.11: Διάγραμμα τεμνουσών

Ταυτόχρονα ασκείται και η οριζόντια δύναμη $H_{T2}=21.42\text{KN}$ η οποία προκαλεί στρεπτική ροπή: Έστω διατομή δοκού κύλισης ΗΕΒ400.

$$H_{T2} \times \alpha = 21.42\text{KN} \times (20+5)\text{cm} = 535.5\text{KNcm} \quad \text{*ύψος τροχιάς+ύψοςδοκού}\sqrt{2}$$

$$H_t = M_t / \text{απόσταση Κ.Β πελμάτων} = 535.5 / 37.6 = 14.24\text{KN}$$

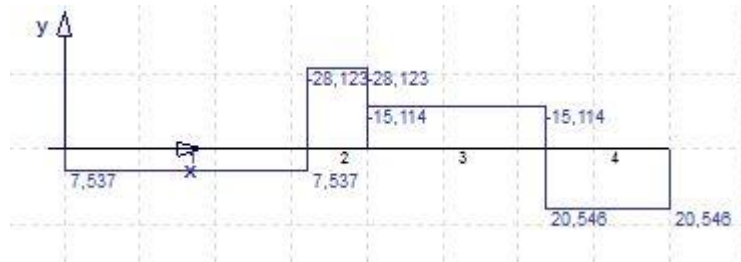
Στο άνω πέλμα της δοκού κυλίσεως ασκούνται συνολικά $H = H_{T2} + H_t = 21.42\text{KN} + 14.24\text{KN} = 35.66\text{KN}$ η οποία δίνει στον άξονα z (πλευρική στήριξη).



Σχήμα 2.12: Φορτίο Η στη θέση $\chi=3.21$



Σχήμα 2.13: Διάγραμμα ροπών



Σχήμα 2.14: Διάγραμμα τεμνουσών

Επίσης, σε αυτό τον συνδυασμό ασκείται και η H_L η οποία δίνει συγκεντρωμένη ροπή κάμψης περί τον άξονα y και σταθερή τέμνουσα κατά μήκος της δοκού τα οποία είναι αμελητέα σε σχέση με αυτά που δίνουν τα κατακόρυφα.

Μέγιστη τέμνουσα για τον συνδυασμό 1 θα είναι όταν το κατακόρυφο φορτίο θα είναι πάνω στην στήριξη.

$$\max V_{Ed} = 112.21(1 + (8 - 3 \cdot 15)/8) = 180.24 \text{ kN}$$

Η μέγιστη ροπή περί τον άξονα z για τον συνδυασμό 5:

$$H_s = 21.79 \text{ kN} \rightarrow M_t = 21.79 \cdot 25 = 544.75 \text{ kNcm}$$

$$H_t = 544.75 / 37.6 = 14.49 \text{ kN}$$

$$H = H_s + H_t = 21.79 + 14.49 = 36.28 \text{ kN}$$

Η οποία δύναμη δίνει μέγιστη ροπή όταν ο τροχός βρίσκεται στο μέσο του πρώτου ανοίγματος.



Σχήμα 2.15: Φορτίο H στο μέσο του πρώτου ανοίγματος

$$M_z = 29.48 \text{ kNm}$$

Η συνυπάρχουσα ροπή M_y θα είναι αυτή που αντιστοιχεί στα κατακόρυφα φορτία για τον συνδυασμό 5 $\rightarrow Q = 97.86 \text{ kN}$

$$M_y = 216.51 \text{ kNm}$$

Μέγιστη τέμνουσα για τον συνδυασμό 5 θα έχουμε όταν ο τροχός βρίσκεται στην στήριξη και θα είναι ίση: $V_z = 36.28 \text{ kN}$

Εντατικά μεγέθη λόγω ίδιου βάρους

$$\text{HEB400: } 1.55 \text{ kN/m}$$

$$\text{Τροχιά: } (0.05 \cdot 0.07) \text{ m}^2 \cdot 78.5 \text{ kN/m}^3 = 0.27 \text{ kN/m}$$

$$\text{Σύνολο } w = 1.55 + 0.27 = 1.82 \text{ kN/m}$$

$$M_{g,Ed} = 1/8 \cdot 1.82 \cdot 8^2 \cdot 1.35 = 19.66 \text{ kNm}$$

$$V_{g,Ed} = 1/2 \cdot 1.82 \cdot 8 \cdot 1.35 = 9.83 \text{ kN}$$

Έλεγχοι

- Έλεγχος κορμού σε διάτμηση (S355)

Επιφάνεια διάτμησης : $A_v = 69.98 \text{ cm}^2$

Αντοχή σε διάτμηση : $V_{y,Rd} = A_v \cdot f_y / \sqrt{3} \gamma_M = 69.98 \cdot 35.5 / \sqrt{3} \cdot 1.0 = 1434.35 \text{ KN}$

$V_{y,Ed} = 180.24 \text{ KN} + 9.83 \text{ KN} = 190.07 \text{ KN} < 1434.35 \text{ KN}$ **Ικανοποιείται**

- Έλεγχος του άνω πέλματος σε διάτμηση

$V_{z,Rd} = b \cdot t \cdot f_y / \sqrt{3} \cdot \gamma_M = 30 \cdot 2.4 \cdot 35.5 / \sqrt{3} \cdot 1.0 = 1475.75 \text{ KN} > V_z = 36.28 \text{ KN}$ **Ικανοποιείται**

- Διαξονική κάμψη και αξονική – συνδυασμός 1

Έλεγχος ελαστικός :

Καμπτική ροπή περί τον ισχυρό άξονα y

$M_y = 289.51 \text{ KNm} + 18.89 \cdot \text{KNm} = 308.4 \text{ KNm}$ *ροπή λόγω ιδ.βάρους στη θέση $\chi = 3.21$

$\sigma_y = M_y / W_{el,y} = 308.4 \text{ KN} \cdot 100 / 2884 = 10.69 \text{ KN/cm}^2$

Ροπή αντίστασης μεμονωμένου άνω πέλματος

$W_{el,f,z} = 1/6 \cdot 2.4 \cdot 30^2 = 360 \text{ cm}^3$

Αντίστοιχη ορθή τάση

$\sigma_{y,2} = 24.19 \cdot 100 / 360 = 6.72 \text{ KN/cm}^2$

ορθή τάση λόγω αξονικής δύναμης

$\sigma_y = N/A = 8.53 / 197.8 = 0.043 \text{ KN/cm}^2$

A:εμβαδόν διατομής

Συνισταμένη ορθή τάση

$\sigma_{y,Ed} = 10.69 + 6.72 + 0.043 = 17.45 \text{ KN/cm}^2 < 35.5 \text{ KN/cm}^2$

Ικανοποιείται

- Διαξονική κάμψη – συνδυασμός 5

$216.51 \cdot 100 / 2884 + 29.48 \cdot 100 / 360 = 7.51 + 8.19 = 15.70 < 35.5$ **Ικανοποιείται**

- Έλεγχος τοπικής έντασης υπό φορτίο τροχού

Ορθή τάση λόγω κύριας κάμψης

9.41 KN/cm^2

Ορθή τάση λόγω φορτίου τροχού

Πλάτος τροχιάς $b_{fr} = 7 \text{ cm}$

Ύψος τροχιάς $h = 5 \text{ cm}$

Φθορά κατά το ύψος της τροχιάς $\Delta_{tr} = 0.25 \cdot 5 \text{ cm} = 1.25 \text{ cm}$

Πάχος πέλματος διατομής $t_f = 2.4 \text{ cm}$

Απόσταση ανώτερου σημείου τροχιάς από το ανώτερο σημείο του κορμού

$d_r = 5 - 1.25 + 2.4 = 6.15 \text{ cm}$

Ενεργό πλάτος πέλματος $b_{eff} = b_{fr} + d_r = 7 + 6.15 = 13.15 < 30 \text{ cm}$ (πλάτος πέλματος)

Ροπή αδράνειας του ενεργού πλάτους του πέλματος

$I_{f,eff} = 13.15 \cdot 2.4^3 / 12 = 15.15 \text{ cm}^4$

Ροπή αδράνειας της τροχιάς ως προς τον οριζόντιο κεντροβαρικό της άξονα

$I_r = 7 \cdot (5 - 1.25)^3 / 12 = 30.76 \text{ cm}^4$

$$I_{rf} = I_{f,eff} + I_r = 15.15 + 30.76 = 45.91 \text{ cm}^4$$

Ενεργό μήκος κατανομής τάσης

Πάχος κορμού = 1.35 cm

$$I_{eff} = 3.25 * (45.91 / 1.35)^{1/3} = 10.53 \text{ cm}$$

$Q_{rmax} = 112.21 \text{ KN}$ (ένας τροχός – συνδυασμός 1)

$$\sigma_{y1} = \frac{112.21}{1.35 * 10.53} = 7.89 \text{ KN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω εκκεντρότητας κατακόρυφου φορτίου

$$T_{ed} = f_{zed} * I_y = 112.21 * 1/4 * 7 = 196.37 \text{ KNcm}$$

Υποθέτουμε ότι οι νευρώσεις τοποθετούνται μόνο στις θέσεις των στηρίξεων $\alpha = 800 \text{ cm}$

$h_w = 35.2 \text{ cm}$ ύψος κορμού

$$\pi h_w / \alpha = 0.138$$

$$\sinh(\pi h_w / \alpha) = 0.138$$

$$\sinh(2\pi h_w / \alpha) = 0.279$$

$$I_t = 1/3 * 30 * 2.4^3 = 138.24 \text{ cm}^4$$

$$n = \left(\frac{0.75 \cdot \alpha \cdot t_w^3}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\pi \cdot h_w / \alpha)}{\sinh(2\pi \cdot h_w / \alpha) - 2\pi \cdot h_w / \alpha} \right)^{0.5} = \left(\frac{0.75 * 800 * 1.35^3 * 0.138^2}{138.24 * (0.279 - 2 * 0.138)} \right)^{0.5} = 8.23$$

$$\sigma_{y,2} = \frac{6T_{ed}}{\alpha * t_w^2} n * \tanh(n) = \frac{6 * 196.37}{800 * 1.35^2} 8.23 \tanh(8.23) = 6.65 \text{ KN/cm}^2$$

Διατμητική τάση

$V_{ed} = 90.19 + 1.94 = 92.13 \text{ KN}$ (λόγω κύριας κάμψης και ίδιου βάρους)

$S = 30 * 2.4 * 18.8 = 1353.6 \text{ cm}^3$ (*απόσταση κ.β με κ.β πέλματος)

Πλάτος πέλματος = 30 cm

Πάχος πέλματος = 2.4 cm

$$\tau = V_{ed} * S / b * I = 92.13 * 1353.6 / (1.35 * 57680) = 1.60 \text{ KN/cm}^2$$

Πρόσθετη διατμητική τάση $\tau_2 = 0.2 * 7.89 = 1.58 \text{ KN/cm}^2$

Έλεγχος ισοδύναμης τάσης

$\sigma_y = 7.89 + 6.65 = 14.54 \text{ KN/cm}^2$ (λόγω κατακόρυφου φορτίου και λόγω εκκεντρότητας)

$z = 1.6 + 1.58 = 3.18 \text{ KN/cm}^2$

$$\sigma_{eq} = (9.41^2 + 14.54^2 - 9.41 * 14.54 + 3 * 3.18^2)^{1/2} = 13.91 \text{ KN/cm}^2 < 35.5 \text{ KN/cm}^2$$

Ικανοποιείται

➤ Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός

Ιδεατή διατομή

$$I_z = 30^3 * 2.4 / 12 = 5400 \text{ cm}^3 \text{ (πέλματος)}$$

$$A = 30 * 2.4 + 1.35 * 35.2 / 5 = 81.5 \text{ cm}^2$$

$$i_z=(I_z/A)^{1/2}=8.14\text{cm}$$

$$\lambda_z=400/8.14=49.14$$

$$\lambda_1=\pi (E/\sigma_y)^{0.5}=76.37$$

$$\bar{\lambda}_z=\lambda_z/\lambda_1=0.64$$

$\chi_z=0.816$ καμπύλη λυγισμού b

$$N_{f,Ed}=(289.51+18.89)*100/(40-2.4^*)=820.21\text{KN} \text{ *(απόσταση κ.βαρών πελμάτων)}$$

$$N_{Rd}=\chi_z * A * \sigma_y / \gamma_{Mo} = 0.816 * 81.5 * 35.5 / 1.00 = 2360.89\text{KN} > 820.21\text{KN} \text{ Ικανοποιείται}$$

Για τον όρο της κάμψης είναι:

$$M_{zEd}=24.19\text{KNm}$$

$$W_{plf}=2.4*30^2/4=540\text{cm}^2$$

$$M_{z,Rk}=W_{plf}*\sigma_y=540*35.5/100=191.7\text{KNcm}$$

$$k_{zz}=C_{mz} (1+1.4N_{Ed}/N_{Rd})=0.9*(1+1.4 * 820.21/2360.89)=1.34$$

Ο έλεγχος αλληλεπίδρασης

$$820.21/2360.89+1.34*24.19/191.70=0.52 < 1 \text{ Ικανοποιείται}$$

2.1.7 Έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας

Οι έλεγχοι λειτουργικότητας έχουν ως σκοπό τον περιορισμό των παραμορφώσεων ώστε να εξασφαλίσουμε την σωστή λειτουργία της γερανογέφυρας και να αποφύγουμε ανεπιθύμητες κλίσεις, σε κατακόρυφο και οριζόντιο επίπεδο, των τροχιών καθώς επίσης και οποιαδήποτε μεταβολή της απόστασης μεταξύ των απέναντι τροχιών που έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες πλευρικές ωθήσεις, ταλαντώσεις και φθορά των τροχών.

$$a=3.15\text{m} < 0.65*8=5.2\text{m}$$

Μέγιστο βέλος

Το φορτίο P είναι χωρίς τους δυναμικούς συντελεστές.

$$P=1/2*4.19*20+(100+6.86)*(20-0.71)/20=144.97\text{KN}$$

$$\text{Ανά τροχό } P=144.97/2=72.49\text{KN}$$

$$\text{Ίδιο βάρος} = 1.82\text{KN/m}$$

Βέλος στο μέσο για συγκεντρωμένο φορτίο

$$\delta_{z1}=p*c(3l^2-4c^2)/24EI=72.49*242.5(3*800^2-4*242.5^2)/(24*21000*57680)=1.02\text{cm}$$

$$\text{όπου } c \text{ η απόσταση κάθε φορτίου από το άκρο } c=(800-315)/2=242.5\text{cm}$$

λόγω του ίδιου βάρους

$$\delta_{z2}=5*1.82*800^4/(100*384*21000*57680)=0.08\text{cm}$$

Η συνολική παραμόρφωση θα είναι

$$\delta_z=1.02+0.08=1.1\text{cm} < 2.5\text{cm}$$

$$l/600=800/600=1.33\text{cm} > 1.1\text{cm}$$

Ικανοποιείται

[EC EN 1993-6-2006-Πίνακας 7.2]

Διαφορική κατακόρυφη παραμόρφωση των απέναντι δοκών κυλίσεως

$P'=22.85\text{KN}$ στην ελάχιστη καταπονούμενη δοκό

$$\delta_{z1}'=22.85*242.5(3*800^2-4*242.5^2)/(24*21000*57680)=0.32\text{cm}$$

$$\delta_{hc}=1.02-0.32=0.7\text{cm} < 2000/600=3.33\text{cm} \text{ Ικανοποιείται}$$

Παραμόρφωση υπό τα οριζόντια φορτία

Δυσμενέστερη παραμόρφωση προκαλείται όταν το φορτίο H_s ασκείται στο μέσον του ανοίγματος.

Όπως για την περίπτωση των ελέγχων στην οριακή κατάσταση αστοχίας, θα υποτεθεί ότι το φορτίο αυτό θα παραληφθεί από το άνω πέλμα της δοκού κυλίσεως.

Ροπή αδρανείας πέλματος: $I_{fz} = 2.4 \cdot 30^3 / 12 = 5400 \text{ cm}^4$

$\delta y = 16.14 \cdot 400^3 / (48 \cdot 21000 \cdot 5400) = 0.19 \text{ cm} < 400 / 600 = 0.666 \text{ cm}$ **Ικανοποιείται**

Περιορισμοί λειτουργικότητας συνδεδεμένοι με το κτήριο

Κατά τη σύνταξη των μελετών, εκτός των περιορισμών των κατακόρυφων και οριζοντίων παραμορφώσεων των δοκών κυλίσεως, πρέπει επίσης να περιορίζονται και οι παραμορφώσεις του κτιρίου και ειδικότερα των θέσεων επί των οποίων οι δοκοί κυλίσεως εδράζονται, κατά τις προβλέψεις του Πινάκων 7.1 του Ευρωκώδικα 3 - Μέρος 6. Πρέπει να περιορίζονται:

(α) η οριζόντια μετακίνηση των θέσεων έδρασης των δοκών κυλίσεως

(β) η διαφορική οριζόντια μετακίνηση των διαδοχικών θέσεων έδρασης τους

(γ) η μεταβολή της απόστασης μεταξύ των κέντρων των απέναντι τροχιών. Ο έλεγχος αυτός πρέπει να γίνεται μεταξύ των αντίστοιχων θέσεων έδρασης των δοκών κυλίσεως όσο και μεταξύ των απέναντι σημείων σε ενδιάμεσες θέσεις.

- Αποφυγή ταλάντωσης του κάτω πέλματος

Ροπή αδρανείας κάτω πέλματος ως προς τον ασθενή άξονα αδρανείας της διατομής:

$$I_{fz} = 5400 \text{ cm}^4$$

Αντίστοιχη ακτίνα αδρανείας:

$$i_{fz} = (5400 / (30 \cdot 2.4))^{0.5} = 8.66 \text{ cm}$$

Λυγνότητα κάτω πέλματος

$$L / i_z = 800 / 8.66 = 92.38 < 250$$

Δεν υπάρχει κίνδυνος ταλάντωσης του κάτω πέλματος

- Περιορισμός ευαισθησίας του κορμού έναντι λυγισμού

Επειδή για τη σχέση των διαστάσεων του άνευ νευρώσεων κορμού (ύψος προς πάχος) ισχύει:

$$b / t_w = 352 / 13.5 = 26.07 < 120 \quad \text{Δεν υπάρχει ευαισθησία του κορμού έναντι ελαστικού λυγισμού}$$

- Αναστρεψιμότητα των τάσεων

Εν προκειμένω, επειδή δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι πλαστικές αντοχές των διατομών, οι δε έλεγχοι στην οριακή κατάσταση αστοχίας έχουν γίνει ελαστικά, η αντίστοιχη συμπεριφορά στην στάθμη λειτουργίας είναι εξασφαλισμένη.

2.2 Χαρακτηριστικά Γερανογέφυρας 20tn (μήκος 8m, άνοιγμα 20m)

Η γερανογέφυρα η οποία επιλέχθηκε είναι:

ZKKE without crane walkway SWL 20t

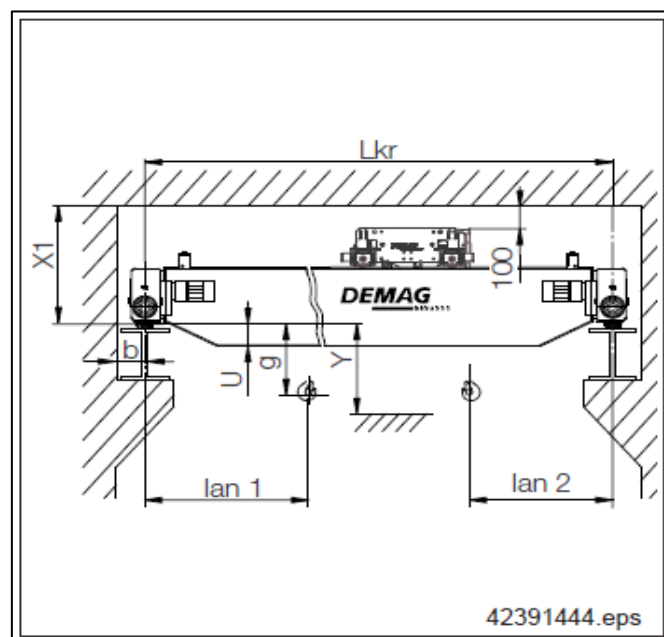
Crane girder: Box girder section; design 1

Travel unit: DFW-L-Z___/___/S

Crab: 1xEZDR 20-20 4/1-18 Z-8 FEM 2m

Τα χαρακτηριστικά της οποίας είναι:

(πηγή των παρακάτω στοιχείων είναι το φυλλάδιο της DEMAG –σελ64,111):



Σχήμα 2.16: Γερανογέφυρα.

Πίνακας 2.10: Χαρακτηριστικά στοιχεία γερανογέφυρας 20tn

SWL [t]	Type FEM	Reeving	Hook path [m]	L _h [mm]	max. R [kg]				Hoist speed [m/min]	Weight [kg]	
					R1	R2	R3	R4			
16	EZDR 20 3m	8/2	10.3	1400	-						
				2240	6790	6723	6723	6745	3/0.5	1981	
					6796	6788	6788	6751	6/1	2123	
					6817	6709	6674	6737	0.5-5 (7)	1937	
					6820	6750	6715	6740	0.5-8 (11)	2025	
				2800	6812	6739	6739	6767	3/0.5	2057	
					6818	6804	6804	6773	6/1	2199	
					6839	6725	6690	6759	0.5-5 (7)	2013	
					6842	6766	6731	6762	0.5-8 (11)	2101	
				16.3	1400	-					
					2240	6346	6361	7211	7201	3/0.5	2119
						6352	6427	7277	7207	6/1	2263
			6372			6347	7162	7192	0.5-5 (7)	2073	
			6376			6389	7204	7196	0.5-8 (11)	2165	
			2800		6818	6802	6802	6773	3/0.5	2195	
					6824	6868	6868	6779	6/1	2339	
					6844	6788	6753	6764	0.5-5 (7)	2149	
					6848	6830	6795	6768	0.5-8 (11)	2241	
			23.4		1400	-					
					2240	-					
					2800	6419	6475	7325	7260	3/0.5	2479
				6425		6541	7391	7266	6/1	2623	
				6444		6462	7277	7250	0.5-5 (7)	2433	
				6449		6504	7319	7255	0.5-8 (11)	2527	
20	EZDR 20 2m	4/1	12	1400	7604	7448	5873	5884	3/0.5	1809	
					7610	7514	5939	5890	6/1	1953	
					7630	7434	5824	5875	0.5-5 (7)	1763	
					7634	7475	5865	5879	0.5-8 (11)	1853	
				2240	7261	7120	6245	6291	3/0.5	1917	
					7267	7186	6311	6297	6/1	2061	
					7287	7106	6196	6282	0.5-5 (7)	1871	
					7291	7147	6237	6286	0.5-8 (11)	1961	
					7283	7136	6261	6313	3/0.5	1993	
					7289	7202	6327	6319	6/1	2137	
					7309	7122	6212	6304	0.5-5 (7)	1947	
					7313	7163	6253	6308	0.5-8 (11)	2037	

Σύμφωνα με τον πίνακα κατάταξης γερανογεφυρών η υπό μελέτη γερανογέφυρα ανήκει στην κατηγορία Hoisting class- HC2 και S-classes – S6.

Βάρος γερανογέφυρας = 119.54KN

Βάρος βαρούλκου = 19.61KN

Ανυψωτική ικανότητα = 200KN

Απόσταση τροχών ekt = 4000mm

L_{an,2} = 1.49m

2.2.1 Δυναμικοί Συντελεστές

Οι δυναμικοί συντελεστές προκύπτουν από το τους πίνακες του Ευρωκώδικα 1 μέρος 3. Ο συντελεστής φ₁ εφαρμόζεται μόνο στο ίδιο βάρος της γερανογέφυρας και λαμβάνει υπόψη την

δυναμική διέγερση της κατά την ανύψωση του φορτίου από το έδαφος. Η τιμή του κυμαίνεται από 0,9-1,10 και θα ληφθεί ίσος με 1,10.

$$\phi_1=1,10$$

Ο συντελεστής ϕ_2 εφαρμόζεται στο ανυψούμενο φορτίο και λαμβάνει υπόψη του την δυναμική επιρροή όταν το φορτίο αυτό μεταφέρεται από το έδαφος στην γερανογέφυρα $\phi_2=\phi_{2,min}+\beta_2*vh$
 Η γερανογέφυρα είναι κατηγορία ανύψωσης 2 (HC2) άρα από τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.11: Τιμές συντελεστών για κατηγορίες γερανογεφυρών HC

Values of β_2 and $v_{2,min}$		
Hoisting class of appliance	β_2	$v_{2,min}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20

NOTE: Cranes are assigned to Hoisting Classes HC1 to HC4 to allow for the dynamic effects of transferring the load from the ground to the crane. The selection depends on the particular type of crane. see recommendation in annex B.

$$\beta_2=0,34 \text{ και } v_{2,min}=1.10$$

ενώ η ταχύτητα ανύψωσης είναι $vh=8\text{m}/\text{min}=0.133\text{m}/\text{sec}$.

$$\text{Συνεπώς } \phi_2=1.10+0.34*0.133=1.15.$$

$$\phi_2=1.15$$

Ο συντελεστής ϕ_3 θα ληφθεί ίσος με 1.00 αφού θεωρούμε ότι δεν υπάρχει δυνατότητα ξαφνικής απελευθέρωσης του συνόλου ή μέρους του αναρτημένου φορτίου (λόγω του ότι δεν χρησιμοποιούμε αρπαγές ή μαγνήτες για την ανύψωση του φορτίου).

$$\phi_3=1.00$$

Ο συντελεστής ϕ_4 εφαρμόζεται τόσο στο ίδιο βάρος της γερανογέφυρας όσο και στο ανυψούμενο φορτίο. Θεωρούμε ότι οι κατασκευαστικές ανοχές που ορίζονται στον Ευρωκώδικα 3 μέρος 6 ικανοποιούνται άρα ο συντελεστής ϕ_4 μπορεί να ληφθεί ίσος με 1.00.

$$\phi_4=1.00$$

Ο δυναμικός συντελεστής ϕ_5 λαμβάνει υπόψη την δυναμική επιρροή της δύναμης προώθησης και εφαρμόζεται επί των οριζόντιων δυνάμεων που αναπτύσσονται στις τροχιές κατά την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση της γερανογέφυρας. Με την υπόθεση ότι αυτές οι δυνάμεις μεταβάλλονται ομαλά ο συντελεστής αυτός λαμβάνεται ίσος με 1.50 σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.12: Δυναμικός συντελεστής ϕ_5

Dynamic factor v_5	
$v_5 = 1.0$	for centrifugal forces
$1 \# v_5 \# 1.5$	correspond to systems in which forces change smoothly
$1.5 \# v_5 \# 2.0$	when sudden changes occur
$v_5 = 3.0$	for drives with considerable backlash

$\phi_5=1.50$

2.2.2 Υπολογισμός Κατακόρυφων Φορτίων

Στη δοκό κύλισης μεταφέρονται τα φορτία της γερανογέφυρας μέσω των τροχών. Στα κατακόρυφα φορτία συμπεριλαμβάνονται:

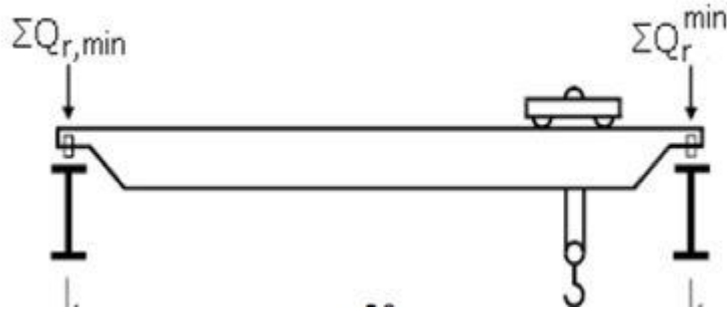
- Ίδιο βάρος γερανογέφυρας
- Βάρος βαρούλκου
- Μέγιστο ανυψούμενο φορτίο

Η διαστασιολόγηση της δοκού θα γίνει με τους παρακάτω συνδυασμούς φορτίσεων που δίνει ο Ευρωκώδικας.

Πίνακας 2.13: Δυναμικοί συντελεστές για τους διάφορους συνδυασμούς φόρτισης

		Ομάδες φορτίων									
		Οριακή κατάσταση αστοχίας							Δοκιμαστική	Τυχηματική	
		1	2	3	4	5	6	7		8	9
1	Ίδιο βάρος γερανογέφυρας	ϕ_1	ϕ_1	1	ϕ_4	ϕ_4	ϕ_4	1	ϕ_1	1	1
2	Ανυψούμενο φορτίο	ϕ_2	ϕ_3	-	ϕ_4	ϕ_4	ϕ_4	$\eta^{1)}$	-	1	1
3	Επιτάχυνση της γερανογέφυρας	ϕ_5	ϕ_5	ϕ_5	ϕ_5	-	-	-	ϕ_5	-	-
4	Λοξή κίνηση της γερανογέφυρας	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
5	Επιτάχυνση ή επιβράδυνση του ανυψωτικού συστήματος	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
6	Ανεμος	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-
7	Δοκιμαστικό φορτίο	-	-	-	-	-	-	-	ϕ_6	-	-
8	Πρόσκρουση στο stop	-	-	-	-	-	-	-	-	ϕ_7	-
9	Πρόσκρουση βαρούλκου σε εμπόδιο	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

Το βαρούλκο και το φορτίο μπορούν να κινηθούν μεταξύ 2 συγκεκριμένων σημείων της γερανογέφυρας χαρακτηριστικά για κάθε τύπο γερανογέφυρας ($L_{an,2}$).



Σχήμα 2.17: Θέση βαρούλκου

Συνδυασμός φορτίων 1:

Ίδιο βάρος γερανογέφυρας $q_c = \frac{119.54\text{KN}}{20\text{m}} = 5.98\text{KN/m}$

Δυναμική προσαύξηση : $1.10 q_c = 1.10 * 5.98 = 6.58\text{KN/m}$

Βάρος βαρούλκου – σημειακό φορτίο 19.61KN

Δυναμική προσαύξηση $1.10 * 19.61 = 21.57\text{KN}$

Στην περισσότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmin} = \frac{1}{2} * 6.58 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + 21.57\text{KN} * (20-1.49)/20 = 85.76\text{KN}$$

Ανά τροχό ασκείται $Q_{rmin} = 85.76/2 = 42.88\text{KN}$

Στην λιγότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmin} = \frac{1}{2} * 6.58 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + 21.57\text{KN} * 1.49/20 = 67.41\text{KN}$$

Ανά τροχό ασκείται $Q_{rmin} = 67.41/2 = 33.71\text{KN}$

Συνδυασμός φορτίων 4,5,6 με δυναμικό συντελεστή ϕ_4 :

Στην περισσότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmin} = (85.76/1.10) * 1.00 = 77.96\text{KN}$$

Ανά τροχό ασκείται $Q_{rmin} = 77.96/2 = 38.98\text{KN}$

Στην λιγότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmin} = (67.41/1.10) * 1.00 = 61.28\text{KN}$$

Ανά τροχό ασκείται $Q_{rmin} = 61.28/2 = 30.64 \text{KN}$

Συνδυασμός φορτίων 1 με ανυψούμενο φορτίο (20tn) – πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα.

$$QH = \phi_2 * 200\text{KN} = 1.15 * 200 = 230\text{KN}$$

Στην περισσότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} * 6.58 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + (230+21.57)\text{KN} * (20-1.49)/20 = 298.63\text{KN}$$

Ανά τροχό ασκείται $Q_{rmax} = 298.63/2 = 149.32\text{KN}$

Στην λιγότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} * 6.58 \text{ KN/m} * 20\text{m} + (230+21.57)\text{KN} * 1.49/20 = 84.54\text{KN}$$

Ανά τροχό ασκείται $Q_{rmax} = 84.54/2 = 42.27 \text{KN}$

Συνδυασμός φορτίων 2 – πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα.

$$Q_H = \phi_3 * 200 \text{KN} = 1.00 * 200 \text{KN} = 200 \text{KN}$$

Στην περισσότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} * 6.58 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + (200 + 21.57) \text{KN} * (20 - 1.49) / 20 = 270.86 \text{KN}$$

Ανα τροχό ασκείται

$$Q_{rmax} = 270.86 / 2 = 135.43 \text{KN}$$

Στην λιγότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} * 6.58 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + (200 + 21.57) \text{KN} * 1.49 / 20 = 82.31 \text{KN}$$

Ανα τροχό ασκείται

$$Q_{rmax} = 82.31 / 2 = 41.16 \text{KN}$$

Συνδυασμός 4,5 (συντελεστής ϕ_4)- πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα.

Στην περισσότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} * 5.98 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + (200 + 19.61) \text{KN} * (20 - 1.49) / 20 = 263.05 \text{KN}$$

Ανα τροχό ασκείται

$$Q_{rmax} = 263.05 / 2 = 131.53 \text{KN}$$

Στην λιγότερη φορτισμένη δοκό

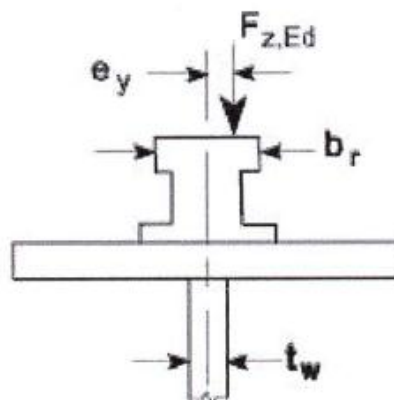
$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} * 5.98 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + (200 + 19.61) \text{KN} * 1.49 / 20 = 76.16 \text{KN}$$

Ανα τροχό ασκείται

$$Q_{rmax} = 76.16 / 2 = 38.08 \text{KN}$$

2.2.3 Υπολογισμός Οριζόντιων Φορτίων

Λόγω του ότι η τροχιά σταθμίζεται και ευθυγραμμίζεται μετά την ανέγερση του κτιρίου και την τοποθέτηση των δοκών κυλίσεως είναι δυνατόν το κατακόρυφο φορτίο να ασκηθεί έκκεντρα στην δοκό κυλίσεως.



Σχήμα 2.18: Θέση κατακόρυφου φορτίου

Η εκκεντρότητα λαμβάνεται ίση με το $\frac{1}{4}$ του πλάτους της τροχιάς.

Πλάτος τροχιάς = 7cm μήκος = 5cm

Εκκεντρότητα $e = 1/4 * 7 \text{cm} = 17.5 \text{mm}$

Έχουμε:

Τα οριζόντια φορτία τα οποία οφείλονται στην επιτάχυνση επιβράδυνση της γερανογέφυρας κατά την κίνηση της πάνω στην δοκό κύλισης.

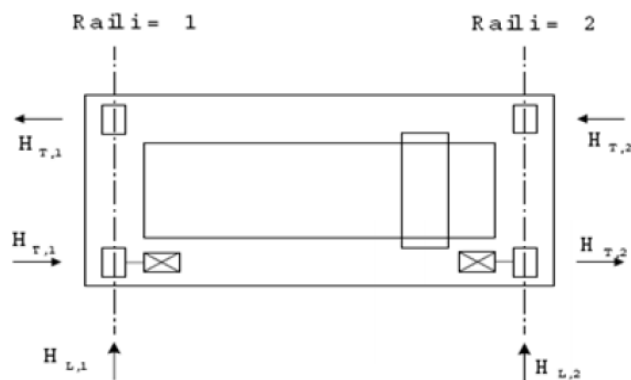
Τα οριζόντια φορτία τα οποία οφείλονται στην επιτάχυνση επιβράδυνση του βαρούλκου κατά την κίνηση του πάνω στην γερανογέφυρα.

Τα οριζόντια φορτία οφειλόμενα στη λοξή κίνηση της γερανογέφυρας ως προς τις τροχιές κύλισης.

Αναλυτικότερα παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

2.2.4 Οριζόντια φορτία προερχόμενα από την επιτάχυνση/επιβράδυνση της γερανογέφυρας

Η κινητήριος δύναμη K της γερανογέφυρας ασκείται στον άξονα κίνησης ενώ το κέντρο βάρους του συστήματος γερανογέφυρα-αναρτώμενο φορτίο διαφέρει με αποτέλεσμα να προκύπτει μια ροπή. Αυτή εξισορροπείται με ένα ζεύγος εγκάρσιων δυνάμεων οι οποίες ασκούνται μεταξύ τροχών και τροχιών (δυνάμεις H_T). Ταυτόχρονα ασκούνται και κατά μήκος οι δυνάμεις H_L .



Σχήμα 2.19: Οριζόντια-εγκάρσια φορτία γερανογέφυρας

Οριζόντιες Δυνάμεις H_L

$$H_{L,i} = \phi_5 \times K \times 1/n_r$$

K : κινητήριος δύναμη

n_r = αριθμός δοκών κύλισης =2

$$K = \mu \times m_w \times \Sigma Q_{rmin}$$

ΣQ_{rmin} : στην λιγότερο φορτισμένη δοκό- ίδια βάρη γερανογέφυρας + βαρούλκου με δυναμικό συντελεστή $\phi_4 = 30.64\text{KN}$ –ανά τροχό.

$m_w = 2$ (ένας κινητήριος τροχός με ανεξάρτητη κίνηση σε κάθε τροχιά).

$\mu = 0.2$ συντελεστής τριβής τροχού- τροχιάς (χάλυβας-χάλυβας)

$$K = 0.2 \times 2 \times 30.64\text{KN} = 12.26\text{KN}$$

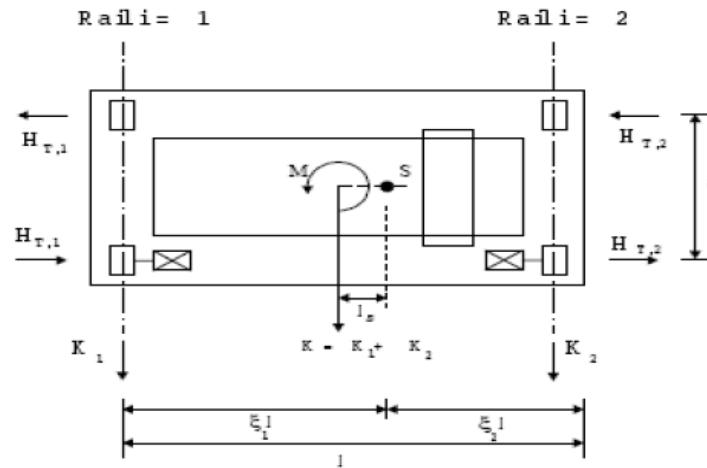
$$H_{L,1} = H_{L,2} = \phi_5 \times K \times 1/n_r = 1.5 \times 12.26 \times \frac{1}{2} = 9.20\text{KN} \text{ (είναι ίδιες)}$$

Εγκάρσιες Δυνάμεις HT

$$H_{T,1} = \phi_5 \times \xi_2 M/\alpha$$

$$M = K \times l_s \text{ ροπή στροφής}$$

α : απόσταση τροχών = 4.00 m



Σχήμα 2.20: Δυνάμεις HT,1 HT,2 και ροπή M

$$\xi_1 = \Sigma Q_{rmax} / \Sigma Q_r$$

ΣQ_{rmax} : στην περισσότερο φορτισμένη δοκό – πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα = 263.05KN

ΣQ_r : στην λιγότερο φορτισμένη δοκό – πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα = 76.16KN

$$\xi_1 = 263.05 / (263.05 + 76.16) = 0.77$$

$$\xi_2 = 1 - \xi_1 = 1 - 0.77 = 0.23$$

$$l_s = (\xi_1 - 0.5) \times l = (0.77 - 0.5) \times 20m = 5.4m$$

$$M = K \times l_s = 12.26KN \times 5.4m = 66.20KNm$$

Στην περισσότερο φορτισμένη δοκό

$$H_{T,2} = \phi_5 \times \xi_1 M/\alpha = 1.5 \times 0.77 \times 66.2/4 = 19.12KN$$

Στην λιγότερο φορτισμένη δοκό

$$H_{T,1} = \phi_5 \times \xi_2 M/\alpha = 1.5 \times 0.23 \times 66.2/4 = 5.71KN$$

2.2.5 Τα οριζόντια φορτία οφειλόμενα στη λοξή κίνηση της γερανογέφυρας ως προς τις τροχιές κύλισης

Η οδηγούσα δύναμη S και οι εγκάρσιες δυνάμεις $H_{s,i,j,k}$ που οφείλονται στην λοξή κίνηση της γερανογέφυρας :

$$S = f \times \lambda_s \times \Sigma Q_{rmax}$$

$$H_{s,1,1,T} = f \times \lambda_{s,1,1,T} \times \Sigma Q_{rmax}$$

$$H_{s,2,1,T} = f \times \lambda_{s,2,1,T} \times \Sigma Q_{rmax}$$

$$H_{s,1,2,T} = f \times \lambda_{s,1,2,T} \times \Sigma Q_{rmax}$$

$$H_{s,2,2,T} = f \times \lambda_{s,2,2,T} \times \Sigma Q_{rmax}$$

λ_s : συντελεστής δύναμης

i : είναι ο αριθμός της τροχιάς κύλισης

j : η διεύθυνση L-κατά μήκος ,T-εγκάρσια

ΣQ_{rmax} : άθροισμα κατακόρυφων αντιδράσεων τροχών στην περισσότερο καταπονούμενης τροχιάς για πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα.

$$\text{Παράγων } f=0.3 \times [1 - \exp(-250 \times a)]$$

a : γωνία λοξότητας (skewing angle) η οποία εξαρτάται από το διάκενο μεταξύ των μέσων καθοδήγησης και της τροχιάς, το είδος των μέσων καθοδήγησης και άλλους παράγοντες. Εάν δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία λαμβάνεται ίση με 0.015 rad .

$$f=0.3 \times (1 - \exp(-250 \times 0.015))=0.293 < 0.3$$

Στον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και των μέσων καθοδήγησης «h» θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω πίνακα. Το σύμβολο IFF δηλώνει τροχούς με ανεξάρτητη κίνηση (independent) και σταθερά συνδεδεμένους με τον άξονα (fixed).

Πίνακας 2.14: Απόσταση στιγμιαίου πόλου στροφής – μέσων καθοδήγησης

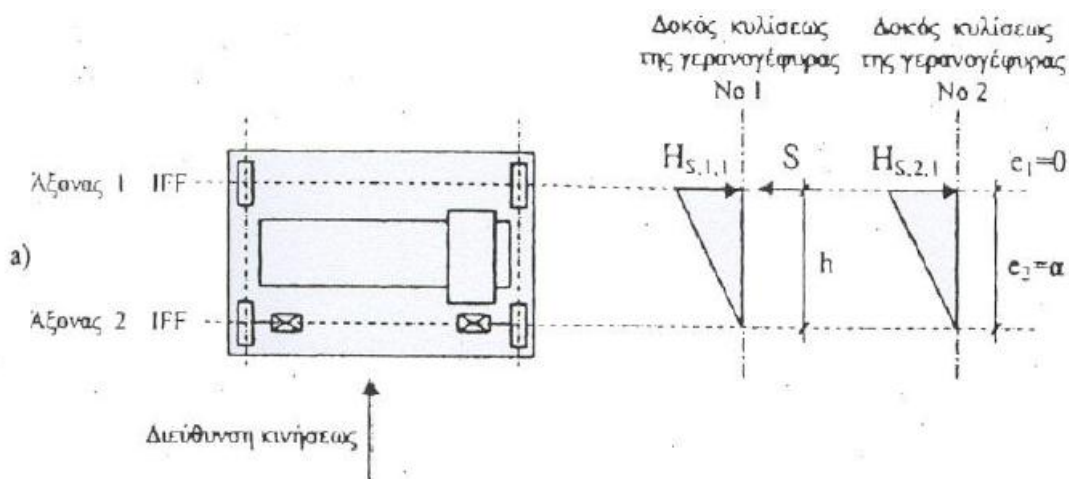
	Συνδυασμός ζευγών τροχών		h
	συνεξευγμένοι (c)	ανεξάρτητοι (i)	
Σταθερά/Σταθερά FF	CFF	IFF	$\frac{m\xi_1\xi_2\ell^2 + \sum e_i^2}{\sum e_i}$
Σταθερά/Κινητά FM	CFM	IFM	$\frac{m\xi_1\ell^2 + \sum e_i^2}{\sum e_i}$
<p>h είναι η απόσταση μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και των μέσων καθοδήγησης</p> <p>m είναι ο αριθμός των συνεξευγμένων ζευγών τροχών (m = 0 για ανεξάρτητα ζεύγη τροχών)</p> <p>ξ_1 είναι η απόσταση του στιγμιαίου πόλου στροφής από την τροχιά 1</p> <p>ξ_2 είναι η απόσταση του στιγμιαίου πόλου στροφής από την τροχιά 2</p> <p>ℓ είναι το άνοιγμα της γερανογέφυρας</p> <p>e_i είναι η απόσταση του ζεύγους τροχών i από τα μέσα καθοδήγησης</p>			

$$h = \frac{m\xi_1\xi_2\ell^2 + \sum e_i^2}{\sum e_i}$$

$m=0$ ανεξάρτητα ζεύγη τροχών

$$h = \frac{\sum e_i^2}{\sum e_i} = \frac{4^2}{4} = 4$$

Άρα $e_1=0$ και οι εγκάρσιες δυνάμεις με την οδηγούσα δύναμη S θα είναι:



Σχήμα 2.21: Η οδηγούσα δύναμη S και οι εγκάρσιες δυνάμεις $H_{S,i,j,k}$

Πίνακας 2.15: Πίνακας υπολογισμού συντελεστή δύναμης

Σύστημα	$\lambda_{S,j}$	$\lambda_{S,1,j,L}$	$\lambda_{S,1,j,T}$	$\lambda_{S,2,j,L}$	$\lambda_{S,2,j,T}$
CFF	$1 - \frac{\sum e_j}{nh}$	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \frac{\ell}{h}$	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \frac{\ell}{h}$	$\frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$
IFF		0	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	0	$\frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$
CFM	$\xi_2 \left(1 - \frac{\sum e_j}{nh}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \frac{\ell}{h}$	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2}{n} \frac{\ell}{h}$	0
IFM		0	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	0	0

Όπου:

n είναι ο αριθμός ζευγών τροχών,

$\xi_1 \ell$ είναι η απόσταση μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και της τροχιάς 1,

$\xi_2 \ell$ είναι η απόσταση μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και της τροχιάς 2,

ℓ είναι το άνοιγμα της συσκευής,

e_j είναι η απόσταση του ζεύγους τροχών j από τα σχετικά μέσα οδήγησης,

h είναι η απόσταση μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και των σχετικών μέσων οδήγησης.

$n =$ αριθμός των ζευγών των τροχών $= 2$

$\lambda_s = 1 - \sum e_i / nh = 1 - 4 / (2 * 4) = 0.5$

$\lambda_{s,1L} = \lambda_{s,2L} = 0$

$\lambda_{s,1T} = \xi_2 / n (1 - e_i / h) = 0.23 / 2 (1 - 0) = 0.12$

$\lambda_{s,2T} = \xi_1 / n (1 - e_i / h) = 0.77 / 2 (1 - 0) = 0.38$

Υπολογισμός δυνάμεων

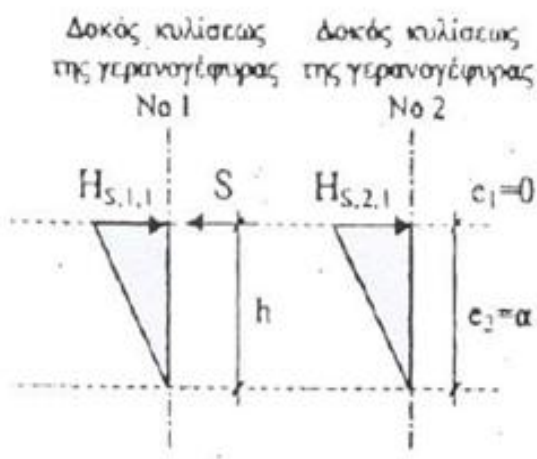
$S = f \times \lambda_s \times \sum Q_{rmax} = 0.293 * 0.5 * 263.05 = 38.54 \text{ KN}$

$H_{S,1,1,T} = f \times \lambda_{s,1,1,T} \times \sum Q_{rmax} = 0.293 * 0.12 * 263.05 = 9.25 \text{ KN}$

$$H_{S,2,1,T} = f \times \lambda_{s,2,1,T} \times \Sigma Q_{rmax} = 0.293 \times 0.38 \times 263.05 = 29.29 \text{ KN}$$

$$H_{S,1,2,T} = f \times \lambda_{s,1,2,T} \times \Sigma Q_{rmax} = 0$$

$$H_{S,2,2,T} = f \times \lambda_{s,2,2,T} \times \Sigma Q_{rmax} = 0$$



Στο προπορευόμενο ζεύγος τροχών επί της τροχιάς 1 : $H_{s,1,T} = H_{S,1,1,T} - S = 9.25 - 38.54 = -29.29 \text{ KN}$

Επί της τροχιάς 2:

$$H_{S,2,T} = 29.29 \text{ KN}$$

Σχήμα 2.22: Η οδηγούσα δύναμη S και οι εγκάρσιες δυνάμεις $H_{S,i,j,k}$

Πίνακας 2.16: Συγκεντρωτικός πίνακας φορτίων

		Ομάδες φορτίων					
		Οριακή κατάσταση αστοχίας					
		1	2	3	4	5	
Ιδιο βάρος γερανογέφυρας		42.88	42.88	38.98	38.98	38.98	
		57.89	57.89	52.62	52.62	52.62	
		33.71	33.71	30.64	30.64	30.64	
		45.51	45.51	41.36	41.36	41.36	
Ίδιο βάρος γερανογέφυρας + Ανυψούμενο φορτίο		149.32	135.43	-	131.53	131.53	
		201.58	182.83	-	177.56	177.56	
		42.27	41.16	-	38.08	38.08	
Επιτάχυνση της γερανογέφυρας		57.06	55.57	-	51.41	51.41	
	HL1		9.20	9.20	9.20	9.20	
			12.42	12.42	12.42	12.42	
	HL2		9.20	9.20	9.20	9.20	
			12.42	12.42	12.42	12.42	
	HT1		5.71	5.71	5.71	5.71	
		7.71	7.71	7.71	7.71		
HT2		19.12	19.12	19.12	19.12		
		25.81	25.81	25.81	25.81		
Λοξή κίνηση της γερανογέφυρας	$H_{S,1,T}$					29.29	
						39.54	
	$H_{S,2,T}$					29.29	
						39.54	

2.2.6 Έλεγχος Δοκού Κύλισης στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας

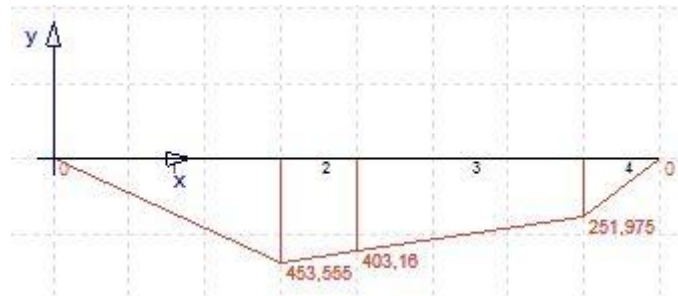
Η απόσταση των τροχών είναι $4.00\text{m} < 0.586 \times l = 0.586 \times 8.0\text{m} = 4.69\text{m}$

Q_{rmax}

Η μέγιστη ροπή αναπτύσσεται όταν το ένα φορτίο είναι στη θέση $\chi = (2 \cdot l - a) \sqrt{4} = 3.00$ της δοκού. Πιο συγκεκριμένα:



Σχήμα 2.23: Φορτίο Q_{rmax} στη θέση $\chi = 3.00$



Σχήμα 2.24: Διάγραμμα ροπών



Σχήμα 2.25: Διάγραμμα τεμνουσών

Ταυτόχρονα ασκείται και η οριζόντια δύναμη $H_{T2} = 25.81\text{KN}$ η οποία προκαλεί στρεπτική ροπή: Έστω διατομή δοκού κύλισης HEB500.

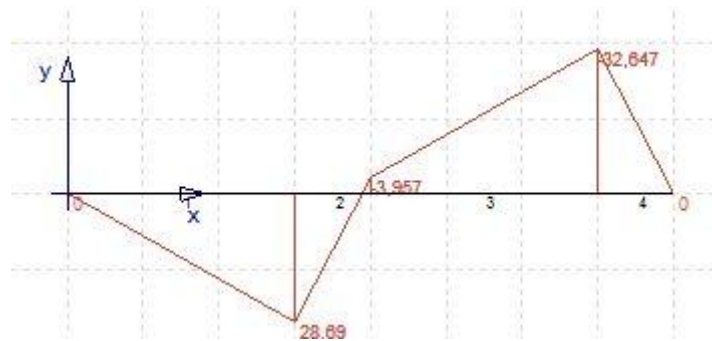
$H_{T2} \times \alpha = 25.81\text{KN} \times 30\text{cm} = 774.30\text{KNcm}$ *ύψος τροχιάς+ύψοςδοκού\2

$H_t = M_t / \text{απόσταση Κ.Β πελμάτων} = 774.30 / 47.2 = 16.40\text{KN}$

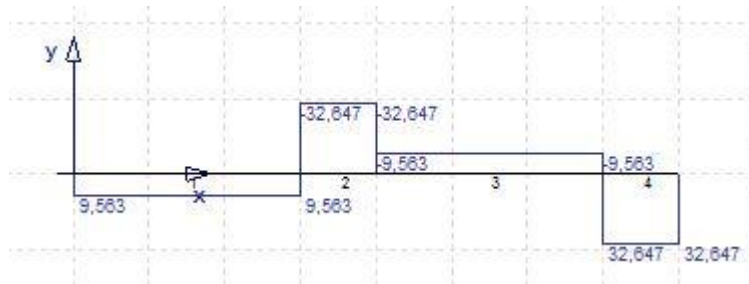
Στο άνω πέλαμα της δοκού κυλίσεως ασκούνται συνολικά $H = H_{T2} + H_t = 25.81\text{KN} + 16.40\text{KN} = 42.21\text{KN}$ η οποία δίνει στον άξονα z (πλευρική στήριξη).



Σχήμα 2.26: Φορτίο Η στη θέση $\chi=3.00$



Σχήμα 2.27: Διάγραμμα ροπών



Σχήμα 2.28 Διάγραμμα τεμνουσών

Επίσης, σε αυτό τον συνδυασμό ασκείται και η H_L η οποία δίνει συγκεντρωμένη ροπή κάμψης περί τον άξονα y και σταθερή τέμνουσα κατά μήκος της δοκού τα οποία είναι αμελητέα σε σχέση με αυτά που δίνουν τα κατακόρυφα.

Μέγιστη τέμνουσα για τον συνδυασμό 1 θα είναι όταν το κατακόρυφο φορτίο θα είναι πάνω στην στήριξη.

$$\max V_{Ed} = 201.58(1 + (8-4)/8) = 302.37 \text{ KN}$$

Η μέγιστη ροπή περί τον άξονα z για τον συνδυασμό 5 :

$$H_s = 39.54 \text{ KN} \rightarrow M_t = 39.54 * 30 = 1186.20 \text{ KNcm}$$

$$H_t = 1186.20 / 47.20 = 25.13 \text{ KN}$$

$$H = H_s + H_t = 39.54 + 25.13 = 64.67 \text{ KN}$$

Η οποία δύναμη δίνει μέγιστη ροπή όταν ο τροχός βρίσκεται στο μέσο του πρώτου ανοίγματος.



Σχήμα 2.29: Δύναμη H στο μέσο του πρώτου ανοίγματος

$$M_z = 52.54 \text{ kNm}$$

Η συνυπάρχουσα ροπή M_y θα είναι αυτή που αντιστοιχεί στα κατακόρυφα φορτία για τον συνδυασμό 5 $\rightarrow Q = 177.56 \text{ kN}$

$$M_y = 355.12 \text{ kNm}$$

Μέγιστη τέμνουσα για τον συνδυασμό 5 θα έχουμε όταν ο τροχός βρίσκεται στην στήριξη και θα είναι ίση: $V_z = 64.67 \text{ kN}$

Εντατικά μεγέθη λόγω ίδιου βάρους

HEB500: 1.87 kN/m

Τροχιά: $(0.05 \cdot 0.07) \text{ m}^2 \cdot 78.5 \text{ kN/m}^3 = 0.27 \text{ kN/m}$

Σύνολο $w = 1.87 + 0.27 = 2.14 \text{ kN/m}$

$$M_{g,Ed} = \frac{1}{8} \cdot 2.14 \cdot 8^2 \cdot 1.35 = 23.11 \text{ kNm}$$

$$V_{g,Ed} = \frac{1}{2} \cdot 2.14 \cdot 8 \cdot 1.35 = 11.55 \text{ kN}$$

Έλεγχοι

- Έλεγχος κορμού σε διάτμηση (S355)

Επιφάνεια διάτμησης: $A_v = 89.82 \text{ cm}^2$

Αντοχή σε διάτμηση: $V_{y,Rd} = A_v \cdot f_y / \sqrt{3} \gamma_M = 89.82 \cdot 35.5 / \sqrt{3} \cdot 1.0 = 1841.00 \text{ kN}$

$V_{y,Ed} = 302.37 \text{ kN} + 11.55 \text{ kN} = 313.92 \text{ kN} < 1841.00 \text{ kN}$ **Ικανοποιείται**

- Έλεγχος του άνω πέλματος σε διάτμηση

$V_{z,Rd} = b \cdot t \cdot f_y / \sqrt{3} \cdot \gamma_M = 30 \cdot 2.8 \cdot 35.5 / \sqrt{3} \cdot 1.0 = 1721.71 \text{ kN} > V_z = 64.67 \text{ kN}$ **Ικανοποιείται**

- Διαξονική κάμψη και αξονική – συνδυασμός 1

Έλεγχος ελαστικός:

Καμπτική ροπή περί τον ισχυρό άξονα y

$M_y = 453.56 \text{ kNm} + 21.65 \cdot \text{kNm} = 475.21 \text{ kNm}$ *ροπή λόγω ιδ.βάρους στη θέση $\chi = 3.00$

$\sigma_y = M_y / W_{el} = 475.21 \text{ kN} \cdot 100 / 4287 = 11.08 \text{ kN/cm}^2$

Ροπή αντίστασης μεμονωμένου άνω πέλματος

$$W_{elf,z} = \frac{1}{6} \cdot 2.8 \cdot 30^2 = 420 \text{ cm}^3$$

Αντίστοιχη ορθή τάση

$$\sigma_{y,z} = 28.69 \cdot 100 / 420 = 6.83 \text{ kN/cm}^2$$

ορθή τάση λόγω αξονικής δύναμης

$$\sigma_y = N / A = 12.42 / 238.60 = 0.05 \text{ kN/cm}^2$$

A: εμβαδόν διατομής

Συνισταμένη ορθή τάση

$$\sigma_{y,Ed} = 11.08 + 6.83 + 0.05 = 17.96 \text{ KN/cm}^2 < 35.5 \text{ KN/cm}^2$$

Ικανοποιείται

➤ Διαξονική κάμψη – συνδυασμός 5

$$355.12 * 100 / 4287 + 52.54 * 100 / 420 = 8.28 + 12.5 = 20.78 < 35.5$$

Ικανοποιείται

➤ Έλεγχος τοπικής έντασης υπό φορτίο τροχού

Ορθή τάση λόγω κύριας κάμψης

$$9.84 \text{ KN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω φορτίου τροχού

Πλάτος τροχιάς $b_{fr} = 7 \text{ cm}$

Ύψος τροχιάς $h = 5 \text{ cm}$

Φθορά κατά το ύψος της τροχιάς $\Delta_{tr} = 0.25 * 5 \text{ cm} = 1.25 \text{ cm}$

Πάχος πέλματος διατομής $t_f = 2.4 \text{ cm}$

Απόσταση ανώτερου σημείου τροχιάς από το ανώτερο σημείο του κορμού

$$d_r = 5 - 1.25 + 2.8 = 6.55 \text{ cm}$$

Ενεργό πλάτος πέλματος $b_{eff} = b_{fr} + d_r = 7 + 6.55 = 13.55 < 30 \text{ cm}$ (πλάτος πέλματος)

Ροπή αδράνειας του ενεργού πλάτους του πέλματος

$$I_{f,eff} = 13.55 * 2.8^3 / 12 = 24.79 \text{ cm}^4$$

Ροπή αδράνειας της τροχιάς ως προς τον οριζόντιο κεντροβαρικό της άξονα

$$I_r = 7 * (5 - 1.25)^3 / 12 = 30.76 \text{ cm}^4$$

$$I_{rf} = I_{f,eff} + I_r = 24.79 + 30.76 = 55.55 \text{ cm}^4$$

Ενεργό μήκος κατανομής τάσης

Πάχος κορμού $= 1.45 \text{ cm}$

$$l_{eff} = 3.25 * (55.55 / 1.45)^{1/3} = 10.96 \text{ cm}$$

$Q_{r,max} = 201.58 \text{ KN}$ (ένας τροχός – συνδυασμός 1)

$$\sigma_{y1} = \frac{201.58}{1.45 * 10.96} = 12.68 \text{ KN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω εκκεντρότητας κατακόρυφου φορτίου

$$T_{ed} = f_{zed} * I_y = 201.58 * 1/4 * 7 = 352.76 \text{ KNcm}$$

Υποθέτουμε ότι οι νευρώσεις τοποθετούνται μόνο στις θέσεις των στηρίξεων $\alpha = 800 \text{ cm}$

$h_w = 44.4 \text{ cm}$ ύψος κορμού

$$\pi h_w / \alpha = 0.174$$

$$\sinh(\pi h_w / \alpha) = 0.175$$

$$\sinh(2\pi h_w / \alpha) = 0.355$$

$$I_t = 1/3 * 30 * 2.8^3 = 219.52 \text{ cm}^4$$

$$n = \left(\frac{0,75 \cdot \alpha \cdot t_w^3}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\pi \cdot h_w / \alpha)}{\sinh(2\pi \cdot h_w / \alpha) - 2\pi \cdot h_w / \alpha} \right)^{0.5} = \left(\frac{0,75 \cdot 800 \cdot 1,45^3 \cdot 0,175^2}{219,52 \cdot (0,355 - 2 \cdot 0,174)} \right)^{0.5} = 6,04$$

$$\sigma_{y,2} = \frac{6T_{ed}}{\alpha \cdot t_w^2} n \cdot \tanh(n) = \frac{6 \cdot 352,76}{800 \cdot 1,45^2} 6,04 \tanh(6,04) = 7,60 \text{ KN/cm}^2$$

Διατμητική τάση

$V_{ed} = 151,18 + 2,88 = 154,06 \text{ KN}$ (λόγω κύριας κάμψης και ίδιου βάρους)

$S = 30 \cdot 2,8 \cdot 23,6 = 1982,4 \text{ cm}^3$ (*απόσταση κ.β με κ.β πέλματος)

Πλάτος πέλματος = 30 cm

Πάχος πέλματος = 2,8 cm

$\tau = V_{ed} \cdot S / b \cdot I = 154,06 \cdot 1982,4 / (1,45 \cdot 107200) = 1,96 \text{ KN/cm}^2$

Πρόσθετη διατμητική τάση $\tau_2 = 0,2 \cdot 12,68 = 2,54 \text{ KN/cm}^2$

Έλεγχος ισοδύναμης τάσης

$\Sigma \gamma = 12,68 + 7,60 = 20,28 \text{ KN/cm}^2$ (λόγω κατακόρυφου φορτίου και λόγω εκκεντρότητας)

$z = 1,96 + 2,54 = 4,50 \text{ KN/cm}^2$

$$\sigma_{eq} = (9,84^2 + 20,28^2 - 9,84 \cdot 20,28 + 3 \cdot 4,5^2)^{1/2} = 19,22 \text{ KN/cm}^2 < 35,5 \text{ KN/cm}^2$$

Ικανοποιείται

➤ Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός

Ιδεατή διατομή

$I_z = 30^3 \cdot 2,8 / 12 = 6300 \text{ cm}^4$ (πέλματος)

$A = 30 \cdot 2,8 + 1,45 \cdot 44,4 / 5 = 96,88 \text{ cm}^2$

$I_z = (I_z / A)^{1/2} = 8,06 \text{ cm}$

$\lambda_z = 400 / 8,06 = 49,62$

$\lambda_1 = \pi (E / \sigma_y)^{0.5} = 76,37$

$\bar{\lambda}_z = \lambda_z / \lambda_1 = 0,65$

$\chi_z = 0,812$ καμπύλη λυγισμού b

$N_{f,Ed} = (475,21 \cdot 100) / (50 - 2,8) = 1006,80 \text{ KN}$ (*απόσταση κ.βαρών πελμάτων)

$N_{Rd} = \chi_z \cdot A \cdot \sigma_y / \gamma_{Mo} = 0,812 \cdot 96,88 \cdot 35,5 / 1,00 = 2792,66 \text{ KN} > 1006,80 \text{ KN}$ **Ικανοποιείται**

Για τον όρο της κάμψης είναι:

$M_{z,Ed} = 28,69 \text{ KNm}$

$W_{plf} = 2,8 \cdot 30^2 / 4 = 630 \text{ cm}^3$

$M_{z,Rk} = W_{plf} \cdot \sigma_y = 630 \cdot 35,5 / 100 = 223,65 \text{ KNcm}$

$K_{zz} = C_{mz} (1 + 1,4 N_{Ed} / N_{Rd}) = 0,9 \cdot (1 + 1,4 \cdot 1006,80 / 2792,66) = 1,35$

Ο έλεγχος αλληλεπίδρασης

$1006,80 / 2792,66 + 1,35 \cdot 28,69 / 223,65 = 0,53 < 1$ **Ικανοποιείται**

2.2.7 Έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας

Οι έλεγχοι λειτουργικότητας έχουν ως σκοπό τον περιορισμό των παραμορφώσεων ώστε να εξασφαλίσουμε την σωστή λειτουργία της γερανογέφυρας και να αποφύγουμε ανεπιθύμητες κλίσεις, σε κατακόρυφο και οριζόντιο επίπεδο, των τροχιών. Επιπλέον, περιορίζουν οποιαδήποτε μεταβολή της απόστασης μεταξύ των απέναντι τροχιών που έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες πλευρικές ωθήσεις, ταλαντώσεις και φθορά των τροχιών.

$$\alpha=4\text{m}<0.65*8=5.2\text{m}$$

Μέγιστο βέλος

Το φορτίο P είναι χωρίς τους δυναμικούς συντελεστές.

$$P=1/2*5.98*20+(200+19.61)*(20-1.49)/20=263.05 \text{ KN}$$

$$\text{Ανά τροχό } P=263.05/2=131.52\text{KN}$$

$$\text{Ίδιο βάρος} = 2.14\text{KN/m}$$

Βέλος στο μέσο για συγκεντρωμένο φορτίο

$$\delta_{z1}=p*c(3l^2-4c^2)/24EI=131.52*200(3*800^2-4*200^2)/(24*21000*107200)=0.86\text{cm}$$

$$\text{όπου } c \text{ η απόσταση κάθε φορτίου από το άκρο } c=(800-400)/2=200\text{cm}$$

Λόγω του ίδιου βάρους

$$\delta_{z2}=5*2.14*800^4/(100*384*21000*107200)=0,05\text{cm}$$

Η συνολική παραμόρφωση θα είναι

$$\delta z=0.86+0.05=0.91\text{cm}<2.5\text{cm}$$

$$l/600=800/600=1.33\text{cm}>0.91\text{cm}$$

Ικανοποιείται

[EC EN 1993-6-2006-Πίνακας 7.2]

Διαφορική κατακόρυφη παραμόρφωση των απέναντι δοκών κυλίσεως

P'=38.08KN στην ελάχιστη καταπονούμενη δοκό

$$\delta_{z1}'=38.08*200(3*800^2-4*200^2)/(24*21000*107200)=0.25\text{cm}$$

$$\delta_{hc}=0.86-0.25=0.61\text{cm}<2000/600=3.33\text{cm} \text{ **Ικανοποιείται**}$$

Παραμόρφωση υπό τα οριζόντια φορτία

Δυσμενέστερη παραμόρφωση προκαλείται όταν το φορτίο H₅ ασκείται στο μέσον του ανοίγματος.

Όπως για την περίπτωση των ελέγχων στην οριακή κατάσταση αστοχίας, θα υποτεθεί ότι το φορτίο αυτό θα παραληφθεί από το άνω πέλμα της δοκού κυλίσεως.

$$\text{Ροπή αδρανείας πέλματος: } I_{fz}=2.8*30^3/12=6300\text{cm}^4$$

$$\delta y=29.29*400^3/(48*21000*6300)=0.29\text{cm} <400/600=0.666\text{cm} \text{ **Ικανοποιείται**}$$

Περιορισμοί λειτουργικότητας συνδεδεμένοι με το κτήριο

Κατά τη σύνταξη των μελετών, εκτός των περιορισμών των κατακόρυφων και οριζοντίων παραμορφώσεων των δοκών κυλίσεως, πρέπει επίσης να περιορίζονται και οι παραμορφώσεις του κτιρίου και ειδικότερα των θέσεων επί των οποίων οι δοκοί κυλίσεως εδράζονται, κατά τις προβλέψεις του Πινάκων 7.1 του Ευρωκώδικα 3 - Μέρος 6. Πρέπει να περιορίζονται:

(α) η οριζόντια μετακίνηση των θέσεων έδρασης των δοκών κυλίσεως

(β) η διαφορική οριζόντια μετακίνηση των διαδοχικών θέσεων έδρασης τους

(γ) η μεταβολή της απόστασης μεταξύ των κέντρων των απέναντι τροχιών. Ο έλεγχος αυτός πρέπει να γίνεται μεταξύ των αντίστοιχων θέσεων έδρασης των δοκών κυλίσεως όσο και μεταξύ των απέναντι σημείων σε ενδιάμεσες θέσεις.

- Αποφυγή ταλάντωσης του κάτω πέλματος

Ροπή αδρανείας κάτω πέλματος ως προς τον ασθενή άξονα αδρανείας της διατομής:

$$I_{fz}=6300\text{cm}^4$$

Αντίστοιχη ακτίνα αδρανείας:

$$i_{fz}=(6300/(30*2.8))^{0.5}=8.66\text{cm}$$

Λυγνότητα κάτω πέλματος

$$L/i_z=800/8.66=92.38<250$$

Δεν υπάρχει κίνδυνος ταλάντωσης του κάτω πέλματος

- Περιορισμός ευαισθησίας του κορμού έναντι λυγισμού

Επειδή για τη σχέση των διαστάσεων του άνευ νευρώσεων κορμού (ύψος προς πάχος) ισχύει:

$$b/t_w=444/14.5=30.62<120 \quad \text{Δεν υπάρχει ευαισθησία του κορμού έναντι ελαστικού λυγισμού}$$

- Αναστρεψιμότητα των τάσεων

Εν προκειμένω, επειδή δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι πλαστικές αντοχές των διατομών, οι δε έλεγχοι στην οριακή κατάσταση αστοχίας έχουν γίνει ελαστικά, η αντίστοιχη συμπεριφορά στην στάθμη λειτουργίας είναι εξασφαλισμένη.

2.3 Χαρακτηριστικά Γερανογέφυρας 40tn (μήκος 8m, άνοιγμα 20m)

Η γερανογέφυρα η οποία επιλέχθηκε είναι:

ZKKE without crane walkway SWL 40t

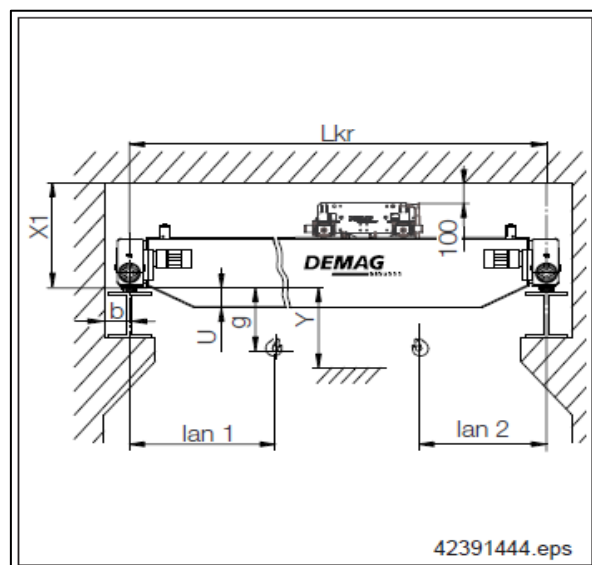
Crane girder: Box girder section; design 1

Travel unit: DFW-L-Z___/___/S

Crab: 1xEZDR 20-40 6/1-8 Z-5.3 FEM 1Am

Τα χαρακτηριστικά της οποίας είναι:

(πηγή των παρακάτω στοιχείων είναι το φυλλάδιο της DEMAG –σελ70,119):



Σχήμα 2.30: Γερανογέφυρα.

Πίνακας 2.17: Χαρακτηριστικά γερανοέφυρας 40tn

Hook path: 8 to 24.7 m; hoist speed: 4/0.7 m/min; 0.3 - 3.3 m/min or 0.3 - 5.3 m/min infinitely variable;
 ross travel speed up to 30 m/min infinitely variable

Crane			Crane girder			Crab				Travel unit							
L _h	max. R	G _h	X 1)	H 1)	u	I _{max} 1)	I _{min} 1)	g 1)	γ	L _{ka}	I _{max} A	d	e _{ho}	L _{ho}	DPZ	b 1)	
4	16119	5292			-5				495								
5	17778	5584	1289	1189	-3			524	497								
6	18932	5965			97				597		1594		2500	3187	100		
7	19790	6372			99				599			315					225
8	20473	6832	1291	1191	197			522	697	1400							
9	20820	7909	1289	1189	195			524	695								
10	21337	8592	1291	1191	197			522	697		1939		3150	3877			
11	21747	9096	1289	1189	297			524	797								
12	11426	9620	1306	1206	260			507	780								
13	11626	10639	1308	1208	262			505	782								
14	11756	10995			380				880								130
15	11897	11535	1306	1206	478			507	978								
16	12076	12484			480				980		2474			4948			
17	12223	13232	1308	1208	482	1345	(1470)	505	982								
18	12308	13512	1306	1206	628			507	1128								
19	12483	14594	1308	1208	630			505	1130								
(20)	12608	(15293)	1306	1206	730			507	1230	(2240)		250	(4300)				200
21	12742	16107	1308	1208	732			505	1232								
22	12922	17340			880				1380								
23	13084	18449	1310	1210				503	1380								
24	13244	19561							1380		2506			5012	160		
25	13344	20187	1313	1213				500									
26	13393	21936	1310	1210				503									
27	13569	23360							1382								
28	13726	24632	1313	1213	882			500									
29	13817	25301							1580								
30	13904	25946	1308	1208	1080			505									

Πίνακας 2.18: Χαρακτηριστικά γερανογέφυρας 40tn

SWL [t]	Type FEM	Reeving	Hook path [m]	L _{an} [mm]	max. R [kg]				Hoist speed [m/min]	Weight [kg]			
					R1	R2	R3	R4					
40	EZDR 20 1Am	6/1	8	1400	12712	12128	8533	8818	0.3-3.3 (4.7)	2191			
					12691	12208	8648	8832	4/0.7	2379			
					12715	12170	8575	8821	0.3-5.3 (7.4)	2281			
				2240	11350	10872	9877	10216	0.3-3.3 (4.7)	2315			
					11329	10952	9992	10230	4/0.7	2503			
					11353	10914	9919	10219	0.3-5.3 (7.4)	2405			
				2800	11374	10887	9892	10240	0.3-3.3 (4.7)	2393			
					11353	10967	10007	10254	4/0.7	2581			
					11377	10929	9934	10243	0.3-5.3 (7.4)	2483			
				12	1400	-	-	-	-	-	-	-	-
						2240	11635	11169	9694	9961	0.3-3.3 (4.7)	2439	
							11614	11175	9735	9995	4/0.7	2479	
			2800		11638	11210	9735	9984	0.3-5.3 (7.4)	2527			
					11499	11024	9829	10165	0.3-3.3 (4.7)	2517			
					11478	11030	9870	10179	4/0.7	2557			
			11502		11065	9870	10168	10168	0.3-5.3 (7.4)	2605			
					-	-	-	-	-	-			
					-	-	-	-	-	-			
			18		1400	15761	15086	5931	5827	0.3-3.3 (4.7)	2605		
						15741	15166	6046	5842	4/0.7	2795		
						15765	15127	5972	5831	0.3-5.3 (7.4)	2695		
				2800	12745	12261	6746	6931	0.3-3.3 (4.7)	2683			
					12725	12341	6861	6946	4/0.7	2873			
					12749	12302	6787	6935	0.3-5.3 (7.4)	2773			
			24.7	1400	-	-	-	-	-	-			
					2240	-	-	-	-	-			
				2800	16942	16250	5095	4848	0.3-3.3 (4.7)	3135			
					16922	16330	5210	4863	4/0.7	3325			
			16946	16291	5136	4852	0.3-5.3 (7.4)	3225					

Σύμφωνα με τον πίνακα κατάταξης γερανογεφυρών, η υπό μελέτη γερανογέφυρα ανήκει στην κατηγορία Hoisting class- HC2 και S-classes – S6.

Βάρος γερανογέφυρας = 152.93KN

Βάρος βαρούλκου = 23.15KN

Ανυψωτική ικανότητα = 400KN

Απόσταση τροχών ekt = 4300mm

L_{an,2} = 1.47m

2.3.1 Δυναμικοί Συντελεστές

Οι δυναμικοί συντελεστές προκύπτουν από το τους πίνακες του Ευρωκώδικα 1 μέρος 3. Ο συντελεστής ϕ_1 εφαρμόζεται μόνο στο ίδιο βάρος της γερανογέφυρας και λαμβάνει υπόψη την δυναμική διέγερση της κατά την ανύψωση του φορτίου από το έδαφος. Η τιμή του κυμαίνεται από 0,9-1,10 και θα ληφθεί ίσος με 1,10.

$\phi_1=1,10$

Ο συντελεστής ϕ_2 εφαρμόζεται στο ανυψούμενο φορτίο και λαμβάνει υπόψη του την δυναμική επιρροή όταν το φορτίο αυτό μεταφέρεται από το έδαφος στην γερανογέφυρα $\phi_2=\phi_{2,min}+\beta_2 \cdot v_h$. Η γερανογέφυρα είναι κατηγορία ανύψωσης 2 (HC2) άρα από τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.19: Συντελεστές για κατηγορίες γερανογεφυρών HC

Values of β_2 and $v_{2,min}$		
Hoisting class of appliance	β_2	$v_{2,min}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20

NOTE: Cranes are assigned to Hoisting Classes HC1 to HC4 to allow for the dynamic effects of transferring the load from the ground to the crane. The selection depends on the particular type of crane. see recommendation in annex B.

$\beta_2=0,34$ και $v_{2,min}=1.10$

ενώ η ταχύτητα ανύψωσης είναι $v_h=3.3\text{m}/\text{min}=0.055\text{m}/\text{sec}$.

Συνεπώς $\phi_2=1.10+0.34*0.055=1.12$.

$\phi_2=1.12$

Ο συντελεστής ϕ_3 θα ληφθεί ίσος με 1.00 αφού θεωρούμε ότι δεν υπάρχει δυνατότητα ξαφνικής απελευθέρωσης του συνόλου ή μέρους του αναρτημένου φορτίου (λόγω του ότι δεν χρησιμοποιούμε αρπαγές ή μαγνήτες για την ανύψωση του φορτίου).

$\phi_3=1.00$

Ο συντελεστής ϕ_4 εφαρμόζεται τόσο στο ίδιο βάρος της γερανογέφυρας όσο και στο ανυψούμενο φορτίο. Θεωρούμε ότι οι κατασκευαστικές ανοχές που ορίζονται στον Ευρωκώδικα 3 μέρος 6 ικανοποιούνται άρα ο συντελεστής ϕ_4 μπορεί να ληφθεί ίσος με 1.00.

$\phi_4=1.00$

Ο δυναμικός συντελεστής ϕ_5 λαμβάνει υπόψη την δυναμική επιρροή της δύναμης προώθησης και εφαρμόζεται επί των οριζόντιων δυνάμεων που αναπτύσσονται στις τροχιές κατά την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση της γερανογέφυρας. Με την υπόθεση ότι αυτές οι δυνάμεις μεταβάλλονται ομαλά ο συντελεστής αυτός λαμβάνεται ίσος με 1.50 σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.20: Δυναμικός συντελεστής ϕ_5

Dynamic factor v_5	
$v_5 = 1,0$	for centrifugal forces
$1 \# v_5 \# 1,5$	correspond to systems in which forces change smoothly
$1,5 \# v_5 \# 2,0$	when sudden changes occur
$v_5 = 3,0$	for drives with considerable backlash

$\phi_5=1.50$

2.3.2 Υπολογισμός Κατακόρυφων Φορτίων

Στη δοκό κύλισης μεταφέρονται τα φορτία της γερανογέφυρας μέσω των τροχών. Στα κατακόρυφα φορτία συμπεριλαμβάνονται:

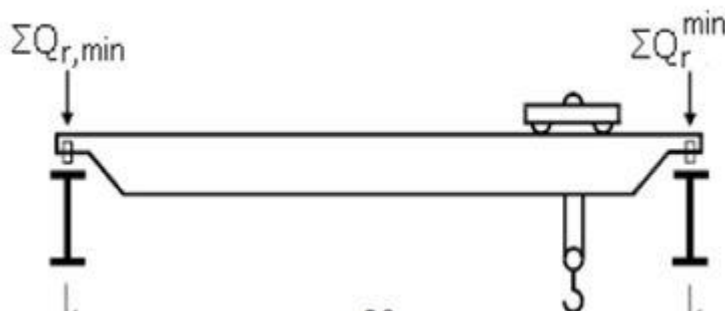
- Ίδιο βάρος γερανογέφυρας
- Βάρος βαρούλκου
- Μέγιστο ανυψούμενο φορτίο

Η διαστασιολόγηση της δοκού θα γίνει με τους παρακάτω συνδυασμούς φορτίσεων που δίνει ο Ευρωκώδικας.

Πίνακας 2.21: Δυναμικοί συντελεστές για διάφορους συντελεστές φόρτισης

		Ομάδες φορτίων									
		Οριακή κατάσταση αστοχίας							Δοκιμαστική	Τυχηματική	
		1	2	3	4	5	6	7			
1	Ίδιο βάρος γερανογέφυρας	φ_1	φ_1	1	φ_4	φ_4	φ_4	1	φ_1	1	1
2	Ανυψούμενο φορτίο	φ_2	φ_3	-	φ_4	φ_4	φ_4	$\eta^{1)}$	-	1	1
3	Επιτάχυνση της γερανογέφυρας	φ_5	φ_5	φ_5	φ_5	-	-	-	φ_5	-	-
4	Λοξή κίνηση της γερανογέφυρας	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
5	Επιτάχυνση ή επιβράδυνση του ανυψωτικού συστήματος	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
6	Ανεμος	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-
7	Δοκιμαστικό φορτίο	-	-	-	-	-	-	-	φ_6	-	-
8	Πρόσκρουση στο stop	-	-	-	-	-	-	-	-	φ_7	-
9	Πρόσκρουση βαρούλκου σε εμπόδιο	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

Το βαρούλκο και το φορτίο μπορούν να κινηθούν μεταξύ 2 συγκεκριμένων σημείων της γερανογέφυρας χαρακτηριστικά για κάθε τύπο γερανογέφυρας ($L_{an,2}$).



Σχήμα 2.31: Θέση βαρούλκου

Συνδυασμός φορτίων 1:

$$\text{Ίδιο βάρος γερανογέφυρας } q_c = \frac{152.93 \text{ KN}}{20 \text{ m}} = 7.65 \text{ KN/m}$$

$$\text{Δυναμική προσαύξηση: } 1.10 q_c = 1.10 * 7.65 = 8.42 \text{ KN/m}$$

Βάρος βαρούλκου – σημειακό φορτίο 23.15KN
Δυναμική προσαύξηση $1.10 \cdot 23.15 = 25.47\text{KN}$

Στην περισσότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmin} = \frac{1}{2} \cdot 8.42 \text{ KN/m} \cdot 20 \text{ m} + 25.47\text{KN} \cdot (20-1.47)/20 = 107.80\text{KN}$$

Ανα τροχό ασκείται $Q_{rmin} = 107.80/2 = 53.90\text{KN}$

Στην λιγότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmin} = \frac{1}{2} \cdot 8.42 \text{ KN/m} \cdot 20 \text{ m} + 25.47\text{KN} \cdot 1.47/20 = 86.07\text{KN}$$

Ανα τροχό ασκείται $Q_{rmin} = 86.07/2 = 43.04\text{KN}$

Συνδυασμός φορτίων 4,5,6 με δυναμικό συντελεστή ϕ_4 :

Στην περισσότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmin} = (107.8/1.10) \cdot 1.00 = 98\text{KN}$$

Ανά τροχό ασκείται $Q_{rmin} = 98/2 = 49\text{KN}$

Στην λιγότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmin} = (86.07/1.10) \cdot 1.00 = 78.25\text{KN}$$

Ανά τροχό ασκείται $Q_{rmin} = 78.25/2 = 39.13 \text{ KN}$

Συνδυασμός φορτίων 1 με ανυψούμενο φορτίο (40tn) – πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα.

$$QH = \phi_2 \cdot 400\text{KN} = 1.12 \cdot 400 = 448\text{KN}$$

Στην περισσότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} \cdot 8.42 \text{ KN/m} \cdot 20 \text{ m} + (448+25.47)\text{KN} \cdot (20-1.47)/20 = 522.87\text{KN}$$

Ανα τροχό ασκείται $Q_{rmax} = 522.87/2 = 261.44\text{KN}$

Στην λιγότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} \cdot 8.42 \text{ KN/m} \cdot 20\text{m} + (448+25.47)\text{KN} \cdot 1.47/20 = 119\text{KN}$$

Ανα τροχό ασκείται $Q_{rmax} = 119/2 = 59.5 \text{ KN}$

Συνδυασμός φορτίων 2 – πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα.

$$QH = \phi_3 \cdot 400\text{KN} = 1.00 \cdot 400\text{KN} = 400\text{KN}$$

Στην περισσότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} \cdot 8.42 \text{ KN/m} \cdot 20 \text{ m} + (400+25.47)\text{KN} \cdot (20-1.47)/20 = 478.40\text{KN}$$

Ανα τροχό ασκείται $Q_{rmax} = 478.40/2 = 239.20\text{KN}$

Στην λιγότερη φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} \cdot 8.42 \text{ KN/m} \cdot 20 \text{ m} + (400+25.47)\text{KN} \cdot 1.47/20 = 115.47\text{KN}$$

Ανα τροχό ασκείται $Q_{rmax} = 115.47/2 = 57.74 \text{ KN}$

Συνδυασμός 4,5 (συντελεστής ϕ_4)- πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα.

Στην περισσότερο φορτισμένη δοκό

$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} * 7.65 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + (400+23.15) \text{ KN} * (20-1.47)/20 = 468.55 \text{ KN}$$

Ανα τροχό ασκείται

$$Q_{rmax} = 468.55/2 = 234.28 \text{ KN}$$

Στην λιγότερο φορτισμένη δοκό

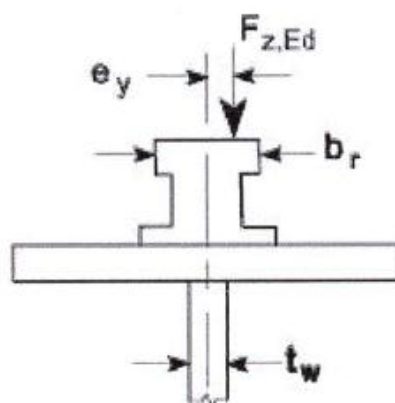
$$\Sigma Q_{rmax} = \frac{1}{2} * 7.65 \text{ KN/m} * 20 \text{ m} + (400+23.15) \text{ KN} * 1.47/20 = 107.60 \text{ KN}$$

Ανα τροχό ασκείται

$$Q_{rmax} = 107.60/2 = 53.80 \text{ KN}$$

2.3.3 Υπολογισμός Οριζόντιων Φορτίων

Λόγω του ότι η τροχιά σταθμίζεται και ευθυγραμμίζεται μετά την ανέγερση του κτιρίου και την τοποθέτηση των δοκών κυλίσεως είναι δυνατόν το κατακόρυφο φορτίο να ασκηθεί έκκεντρα στην δοκό κυλίσεως.



Σχήμα 2.32: Θέση κατακόρυφου φορτίου

Η εκκεντρότητα λαμβάνεται ίση με το ¼ του πλάτους της τροχιάς.

Πλάτος τροχιάς = 7cm μήκος = 5cm

Εκκεντρότητα $e = 1/4 * 7 \text{ cm} = 17.5 \text{ mm}$

Έχουμε:

Τα οριζόντια φορτία τα οποία οφείλονται στην επιτάχυνση επιβράδυνση της γερανογέφυρας κατά την κίνηση της πάνω στην δοκό κύλισης.

Τα οριζόντια φορτία τα οποία οφείλονται στην επιτάχυνση επιβράδυνση του βαρούλκου κατά την κίνηση του πάνω στην γερανογέφυρα.

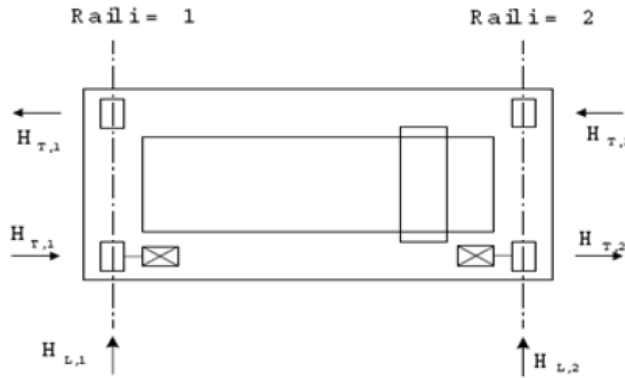
Τα οριζόντια φορτία οφειλόμενα στη λοξή κίνηση της γερανογέφυρας ως προς τις τροχιές κύλισης.

Αναλυτικότερα παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

2.3.4 Οριζόντια φορτία προερχόμενα από την επιτάχυνση/επιβράδυνση της γερανογέφυρας

Η κινητήριος δύναμη K της γερανογέφυρας ασκείται στον άξονα κίνησης ενώ το κέντρο βάρους του συστήματος γερανογέφυρα-αναρτώμενο φορτίο διαφέρει με αποτέλεσμα να προκύπτει μια ροπή. Αυτή εξισορροπείται με ένα ζεύγος εγκάρσιων δυνάμεων οι οποίες

ασκούνται μεταξύ τροχών και τροχιών (δυνάμεις HT). Ταυτόχρονα ασκούνται και κατά μήκος οι δυνάμεις HL.



Σχήμα 2.33: Οριζόντια-εγκάρσια φορτία γερανογέφυρας

Οριζόντιες Δυνάμεις HL

$$H_{L,i} = \phi_5 \times K \times 1/n_r$$

K: κινητήριος δύναμη

n_r = αριθμός δοκών κύλισης =2

$$K = \mu \times m_w \times \Sigma Q_{rmin}$$

ΣQ_{rmin} : στην λιγότερο φορτισμένη δοκό- ίδια βάρη γερανογέφυρας + βαρούλκου με δυναμικό συντελεστή $\phi_4 = 39.13\text{KN}$ –ανά τροχό.

$m_w = 2$ (ένας κινητήριος τροχός με ανεξάρτητη κίνηση σε κάθε τροχιά).

$\mu = 0.2$ συντελεστής τριβής τροχού- τροχιάς (χάλυβας-χάλυβας)

$$K = 0.2 \times 2 \times 39.13\text{KN} = 15.65\text{KN}$$

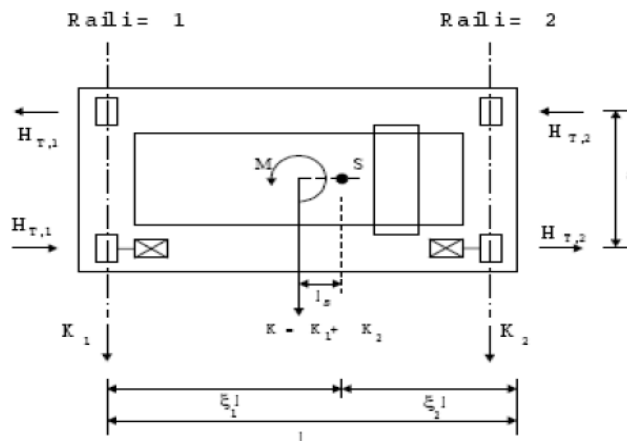
$$H_{L,1} = H_{L,2} = \phi_5 \times K \times 1/n_r = 1.5 \times 15.65 \times 1/2 = 11.74\text{KN} \text{ (είναι ίδιες)}$$

Εγκάρσιες Δυνάμεις HT

$$H_{T,1} = \phi_5 \times \xi_2 \times M/a$$

$M = K \times l_s$ ροπή στροφής

a : απόσταση τροχών = 4.30 m



Σχήμα 2.34: Δυνάμεις HT,1 HT,2 και ροπή M

$$\xi_1 = \Sigma Q_{rmax} / \Sigma Q_r$$

ΣQ_{rmax} : στην περισσότερη φορτισμένη δοκό – πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα = 468.55KN

ΣQ_{rmin} : στην λιγότερη φορτισμένη δοκό – πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα = 107.60KN

$$\xi_1 = 468.55 / (468.55 + 107.60) = 0.81$$

$$\xi_2 = 1 - \xi_1 = 1 - 0.81 = 0.19$$

$$l_s = (\xi_1 - 0.5) \times l = (0.81 - 0.5) \times 20m = 6.2m$$

$$M = K \times l_s = 15.65KN \times 6.2m = 97.03KNm$$

Στην περισσότερη φορτισμένη δοκό

$$H_{T,2} = \phi_5 \times \xi_1 \times M / \alpha = 1.5 \times 0.81 \times 97.03 / 4.3 = 27.42KN$$

Στην λιγότερη φορτισμένη δοκό

$$H_{T,1} = \phi_5 \times \xi_2 \times M / \alpha = 1.5 \times 0.19 \times 97.03 / 4.3 = 6.43KN$$

2.3.5 Τα οριζόντια φορτία οφειλόμενα στη λοξή κίνηση της γερανογέφυρας ως προς τις τροχιές κύλισης

Η οδηγούσα δύναμη S και οι εγκάρσιες δυνάμεις $H_{S,i,j,k}$ που οφείλονται στην λοξή κίνηση της γερανογέφυρας:

$$S = f \times \lambda_s \times \Sigma Q_{rmax}$$

$$H_{S,1,1,T} = f \times \lambda_{s,1,1,T} \times \Sigma Q_{rmax}$$

$$H_{S,2,1,T} = f \times \lambda_{s,2,1,T} \times \Sigma Q_{rmax}$$

$$H_{S,1,2,T} = f \times \lambda_{s,1,2,T} \times \Sigma Q_{rmax}$$

$$H_{S,2,2,T} = f \times \lambda_{s,2,2,T} \times \Sigma Q_{rmax}$$

λ_s : συντελεστής δύναμης

i : είναι ο αριθμός της τροχιάς κύλισης

j : η διεύθυνση L-κατά μήκος, T-εγκάρσια

ΣQ_{rmax} : άθροισμα κατακόρυφων αντιδράσεων τροχών στην περισσότερη καταπονούμενη τροχιά για πλήρως φορτισμένη γερανογέφυρα.

$$\text{Παράγων } f = 0.3 \times [1 - \exp(-250 \times a)]$$

a : γωνία λοξότητας (skewing angle) η οποία εξαρτάται από το διάκενο μεταξύ των μέσων καθοδήγησης και της τροχιάς, το είδος των μέσων καθοδήγησης και άλλους παράγοντες. Εάν δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία λαμβάνεται ίση με 0.015 rad.

$$f = 0.3 \times (1 - \exp(-250 \times 0.015)) = 0.293 < 0.3$$

Στον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και των μέσων καθοδήγησης «h» θα χρησιμοποιήσουμε τον παρακάτω πίνακα. Το σύμβολο IFF δηλώνει τροχούς με ανεξάρτητη κίνηση (independent) και σταθερά συνδεδεμένους με τον άξονα (fixed).

Πίνακας 2.22: Απόσταση στιγμιαίου πόλου στροφής – μέσω καθοδήγησης

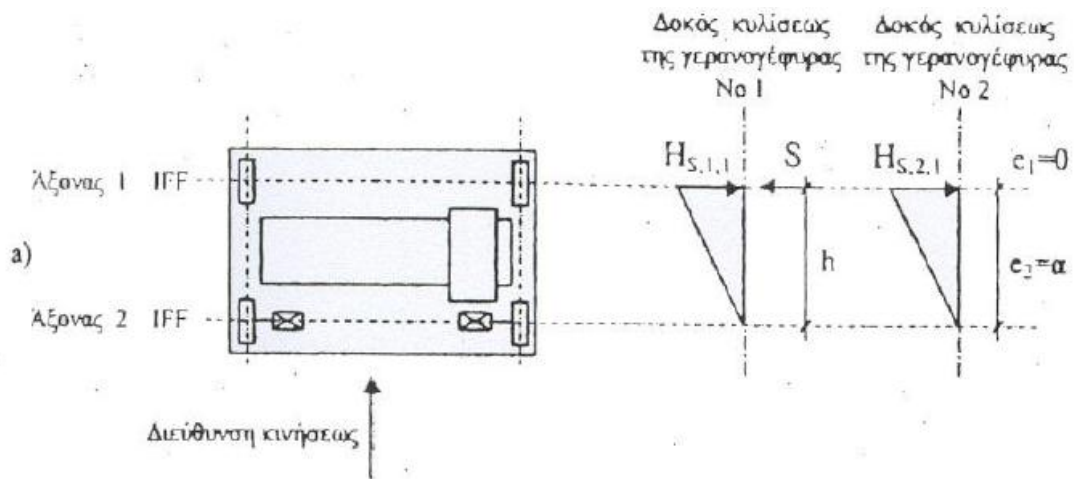
	Συνδυασμός ζευγών τροχών		h
	συνεζευγμένοι (c)	ανεξάρτητοι (i)	
Σταθερά/Σταθερά FF	 CFF	 IFF	$\frac{m\xi_1\xi_2\ell^2 + \sum e_i^2}{\sum e_i}$
Σταθερά/Κινητά FM	 CFM	 IFM	$\frac{m\xi_1\ell^2 + \sum e_i^2}{\sum e_i}$
h είναι η απόσταση μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και των μέσων καθοδήγησης m είναι ο αριθμός των συνεζευγμένων ζευγών τροχών (m = 0 για ανεξάρτητα ζεύγη τροχών) ξ ₁ είναι η απόσταση του στιγμιαίου πόλου στροφής από την τροχιά 1 ξ ₂ είναι η απόσταση του στιγμιαίου πόλου στροφής από την τροχιά 2 ℓ είναι το άνοιγμα της γερανογέφυρας e _i είναι η απόσταση του ζεύγους τροχών i από τα μέσα καθοδήγησης			

$$h = \frac{m\xi_1\xi_2\ell^2 + \sum e_i^2}{\sum e_i}$$

m=0 ανεξάρτητα ζεύγη τροχών

$$h = \sum e_i^2 / \sum e_i = 4.3^2 / 4.3 = 4.3$$

Άρα e₁=0 και οι εγκάρσιες δυνάμεις με την οδηγούσα δύναμη S θα είναι:



Σχήμα 2.35: Η οδηγούσα δύναμη S και οι εγκάρσιες δυνάμεις HS,i,j,k

Πίνακας 2.23: Πίνακας υπολογισμού συντελεστή δύναμης

Σύστημα	$\lambda_{S,j}$	$\lambda_{S,1,j,L}$	$\lambda_{S,1,j,T}$	$\lambda_{S,2,j,L}$	$\lambda_{S,2,j,T}$
CFF	$1 - \frac{\sum e_j}{nh}$	$\frac{\xi_1 \xi_2 \ell}{n h}$	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2 \ell}{n h}$	$\frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$
IFF		0	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	0	$\frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$
CFM	$\xi_2 \left(1 - \frac{\sum e_j}{nh}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2 \ell}{n h}$	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	$\frac{\xi_1 \xi_2 \ell}{n h}$	0
IFM		0	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	0	0

Όπου:

n είναι ο αριθμός ζευγών τροχών,

$\xi_1 \ell$ είναι η απόσταση μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και της τροχιάς 1,

$\xi_2 \ell$ είναι η απόσταση μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και της τροχιάς 2,

ℓ είναι το άνοιγμα της συσκευής,

e_j είναι η απόσταση του ζεύγους τροχών j από τα σχετικά μέσα οδήγησης,

h είναι η απόσταση μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και των σχετικών μέσων οδήγησης.

$n =$ αριθμός των ζευγών των τροχών $= 2$

$\lambda_s = 1 - \sum e_i / nh = 1 - 4.3 / (2 * 4.3) = 0.5$

$\lambda_{s,1L} = \lambda_{s,2L} = 0$

$\lambda_{s,1T} = \xi_2 / n (1 - e_i / h) = 0.19 / 2 (1 - 0) = 0.10$

$\lambda_{s,2T} = \xi_1 / n (1 - e_i / h) = 0.81 / 2 (1 - 0) = 0.40$

Υπολογισμός δυνάμεων

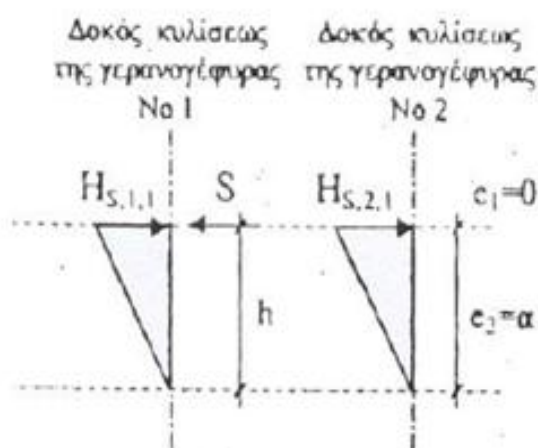
$S = f \times \lambda_s \times \sum Q_{rmax} = 0.293 * 0.5 * 468.55 = 68.64 \text{ KN}$

$H_{s,1,1,T} = f \times \lambda_{s,1,1,T} \times \sum Q_{rmax} = 0.293 * 0.10 * 468.55 = 13.73 \text{ KN}$

$H_{s,2,1,T} = f \times \lambda_{s,2,1,T} \times \sum Q_{rmax} = 0.293 * 0.40 * 468.55 = 54.91 \text{ KN}$

$H_{s,1,2,T} = f \times \lambda_{s,1,2,T} \times \sum Q_{rmax} = 0$

$H_{s,2,2,T} = f \times \lambda_{s,2,2,T} \times \sum Q_{rmax} = 0$



Στο προπορευόμενο ζεύγος τροχών επί της τροχιάς

1: $H_{s,1,T} = H_{s,1,1,T} - S = 13.73 - 68.64 = -54.91 \text{ KN}$

Επί της τροχιάς 2:

$H_{s,2,T} = 54.91 \text{ KN}$

Σχήμα 2.36: Η οδηγούσα δύναμη S και οι εγκάρσιες δυνάμεις $H_{S,i,j,k}$

Πίνακας 2.24: Συγκεντρωτικός πίνακας φορτίων

		Ομάδες φορτίων				
		Οριακή κατάσταση αστοχίας				
		1	2	3	4	5
Ίδιο βάρος γερανογέφυρας		53.90	53.90	49.00	49.00	49.00
		72.77	72.77	66.15	66.15	66.15
		43.04	43.04	39.13	39.13	39.13
		58.10	58.10	52.82	52.82	52.82
Ίδιο βάρος γερανογέφυρας + Ανυψούμενο φορτίο		261.44	239.20	-	234.28	234.28
		352.94	322.92	-	316.28	316.28
		59.50	57.74	-	53.80	53.80
		80.33	77.95	-	72.63	72.63
Επιτάχυνση της γερανογέφυρας	HL1	11.74	11.74	11.74	11.74	
		15.85	15.85	15.85	15.85	
	HL2	11.74	11.74	11.74	11.74	
		15.85	15.85	15.85	15.85	
	HT1	6.43	6.43	6.43	6.43	
		8.68	8.68	8.68	8.68	
	HT2	27.42	27.42	27.42	27.42	
		37.02	37.02	37.02	37.02	
Λοξή κίνηση της γερανογέφυρας	H _{S,1,T}					54.91 74.13
	H _{S,2,T}					54.91 74.13

2.3.6 Έλεγχος Δοκού Κύλισης στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας

Η απόσταση των τροχών είναι $4.30\text{m} < 0.586 \times l = 0.586 \times 8.0\text{m} = 4.69\text{m}$

Q_{rmax}

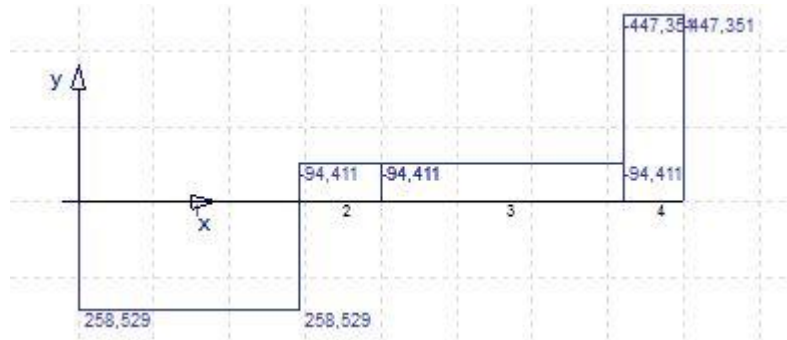
Η μέγιστη ροπή αναπτύσσεται όταν το ένα φορτίο είναι στη θέση $\chi = (2 \cdot l - a) / 4 = 2.92$ της δοκού. Πιο συγκεκριμένα:



Σχήμα 2.37: Φορτίο Q_{rmax} στη θέση $\chi = 2.92$



Σχήμα 2.38: Διάγραμμα ροπών



Σχήμα 2.39: Διάγραμμα τεμνουσών

Ταυτόχρονα ασκείται και η οριζόντια δύναμη $H_{T2}=37.02\text{KN}$ η οποία προκαλεί στρεπτική ροπή: Έστω διατομή δοκού κύλισης ΗΕΒ700.

$$H_{T2} \times \alpha = 37.02\text{KN} \times 40\text{cm} = 1480.80\text{KNcm} \quad * \text{ύψος τροχιάς} + \text{ύψος δοκού} \setminus 2$$

$$H_t = M_t / \text{απόσταση Κ.Β πελμάτων} = 1480.80 / 66.8 = 22.17\text{KN}$$

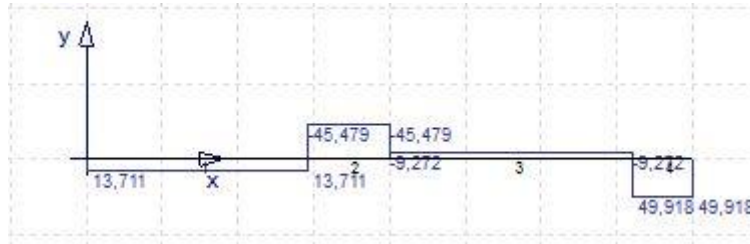
Στο άνω πέλμα της δοκού κυλίσσεως ασκούνται συνολικά $H = H_{T2} + H_t = 37.02\text{KN} + 22.17\text{KN} = 59.19\text{KN}$ η οποία δίνει στον άξονα z (πλευρική στήριξη).



Σχήμα 2.40: Φορτίο H στη θέση $x=2.92$



Σχήμα 2.41: Διάγραμμα ροπών



Σχήμα 2.42: Διάγραμμα τεμνουσών

Επίσης σε αυτό τον συνδυασμό ασκείται και η H_L η οποία δίνει συγκεντρωμένη ροπή κάμψης περί τον άξονα y και σταθερή τέμνουσα κατά μήκος της δοκού τα οποία είναι αμελητέα σε σχέση με αυτά που δίνουν τα κατακόρυφα.

Μέγιστη τέμνουσα για τον συνδυασμό 1 θα είναι όταν το κατακόρυφο φορτίο θα είναι πάνω στην στήριξη.

$$\max V_{Ed} = 352.94(1 + (8-4.3)/8) = 516.17 \text{ kN}$$

Η μέγιστη ροπή περί τον άξονα z για τον συνδυασμό 5:

$$H_s = 74.13 \text{ kN} \rightarrow M_t = 74.13 \cdot 40 = 2965.20 \text{ kNm}$$

$$H_t = 2965.20 / 66.80 = 44.39 \text{ kN}$$

$$H = H_s + H_t = 74.13 + 44.39 = 118.52 \text{ kN}$$

Η οποία δύναμη δίνει μέγιστη ροπή όταν ο τροχός βρίσκεται στο μέσο του πρώτου ανοίγματος.



Σχήμα 2.43: Δύναμη H στο μέσο του πρώτου ανοίγματος

$$M_2 = 96.30 \text{ kNm}$$

Η συνυπάρχουσα ροπή M_y θα είναι αυτή που αντιστοιχεί στα κατακόρυφα φορτία για τον συνδυασμό 5 $\rightarrow Q = 316.28 \text{ kN}$

$$M_y = 608.84 \text{ kNm}$$

Μέγιστη τέμνουσα για τον συνδυασμό 5 θα έχουμε όταν ο τροχός βρίσκεται στην στήριξη και θα είναι ίση: $V_z = 118.52 \text{ kN}$

Εντατικά μεγέθη λόγω ίδιου βάρους

$$\text{HEB700: } 2.41 \text{ kN/m}$$

$$\text{Τροχιά: } (0.05 \cdot 0.07) \text{ m}^2 \cdot 78.5 \text{ kN/m}^3 = 0.27 \text{ kN/m}$$

$$\text{Σύνολο } w = 2.41 + 0.27 = 2.68 \text{ kN/m}$$

$$M_{g,Ed} = 1/8 \cdot 2.68 \cdot 8^2 \cdot 1.35 = 28.94 \text{ kNm}$$

$$V_{g,Ed} = 1/2 \cdot 2.68 \cdot 8 \cdot 1.35 = 14.47 \text{ kN}$$

Έλεγχοι

- Έλεγχος κορμού σε διάτμηση (S355)

Επιφάνεια διάτμησης : $A_v = 137.10 \text{ cm}^2$

Αντοχή σε διάτμηση : $V_{y,Rd} = A_v \cdot f_y / \sqrt{3} \cdot \gamma_M = 137.10 \cdot 35.5 / \sqrt{3} \cdot 1.0 = 2810.07 \text{ KN}$

$V_{y,Ed} = 516.17 \text{ KN} + 14.47 \text{ KN} = 530.64 \text{ KN} < 2810.07 \text{ KN}$ **Ικανοποιείται**

- Έλεγχος του άνω πέλματος σε διάτμηση

$V_{z,Rd} = b \cdot t \cdot f_y / \sqrt{3} \cdot \gamma_M = 30 \cdot 3.2 \cdot 35.5 / \sqrt{3} \cdot 1.0 = 1967.67 \text{ KN} > V_z = 118.52 \text{ KN}$ **Ικανοποιείται**

- Διαξονική κάμψη και αξονική – συνδυασμός 1

Έλεγχος ελαστικός :

Καμπτική ροπή περί τον ισχυρό άξονα y

$M_y = 754.91 \text{ KNm} + 26.82 \cdot \text{KNm} = 781.73 \text{ KNm}$ *ροπή λόγω ιδ.βάρους στη θέση $\chi = 2.92$

$\sigma_y = M_y / W_{eff} = 781.73 \text{ KN} \cdot 100 / 7340 = 10.65 \text{ KN/cm}^2$

Ροπή αντίστασης μεμονωμένου άνω πέλματος

$W_{eff,z} = 1/6 \cdot 3.2 \cdot 30^2 = 480 \text{ cm}^3$

Αντίστοιχη ορθή τάση

$\sigma_{y,2} = 40.04 \cdot 100 / 480 = 8.34 \text{ KN/cm}^2$

ορθή τάση λόγω αξονικής δύναμης

$\sigma_y = N/A = 15.85 / 306.40 = 0.05 \text{ KN/cm}^2$

A:εμβαδόν διατομής

Συνισταμένη ορθή τάση

$\sigma_{y,Ed} = 10.65 + 8.34 + 0.05 = 19.04 \text{ KN/cm}^2 < 35.5 \text{ KN/cm}^2$

Ικανοποιείται

- Διαξονική κάμψη – συνδυασμός 5

$608.84 \cdot 100 / 7340 + 96.30 \cdot 100 / 480 = 8.29 + 20.06 = 28.35 < 35.5$ **Ικανοποιείται**

- Έλεγχος τοπικής έντασης υπό φορτίο τροχού

Ορθή τάση λόγω κύριας κάμψης

9.68 KN/cm^2

Ορθή τάση λόγω φορτίου τροχού

Πλάτος τροχιάς $b_{fr} = 7 \text{ cm}$

Ύψος τροχιάς $h = 5 \text{ cm}$

Φθορά κατά το ύψος της τροχιάς $\Delta_{tr} = 0.25 \cdot 5 \text{ cm} = 1.25 \text{ cm}$

Πάχος πέλματος διατομής $t_f = 3.2 \text{ cm}$

Απόσταση ανώτερου σημείου τροχιάς από το ανώτερο σημείο του κορμού

$d_r = 5 - 1.25 + 3.2 = 6.95 \text{ cm}$

Ενεργό πλάτος πέλματος $b_{eff} = b_{fr} + d_r = 7 + 6.95 = 13.95 < 30 \text{ cm}$ (πλάτος πέλματος)

Ροπή αδράνειας του ενεργού πλάτους του πέλματος

$I_{f,eff} = 13.95 \cdot 3.2^3 / 12 = 38.09 \text{ cm}^4$

Ροπή αδράνειας της τροχιάς ως προς τον οριζόντιο κεντροβαρικό της άξονα

$$I_r = 7 \cdot (5 - 1.25)^3 / 12 = 30.76 \text{ cm}^4$$

$$I_{rf} = I_{f, \text{eff}} + I_r = 38.09 + 30.76 = 68.85 \text{ cm}^4$$

Ενεργό μήκος κατανομής τάσης

Πάχος κορμού = 1.70 cm

$$l_{\text{eff}} = 3.25 \cdot (68.85 / 1.70)^{1/3} = 11.16 \text{ cm}$$

$Q_{r \text{max}} = 352.94 \text{ KN}$ (έναν τροχός – συνδυασμός 1)

$$\sigma_{y1} = \frac{352.94}{1.70 \cdot 11.16} = 18.60 \text{ KN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω εκκεντρότητας κατακόρυφου φορτίου

$$T_{\text{ed}} = f_{\text{zed}} \cdot I_y = 352.94 \cdot 1/4 \cdot 7 = 617.64 \text{ KNcm}$$

Υποθέτουμε ότι οι νευρώσεις τοποθετούνται μόνο στις θέσεις των στηρίξεων $\alpha = 800 \text{ cm}$

$h_w = 63.6 \text{ cm}$ ύψος κορμού

$$p h_w / \alpha = 0.25$$

$$\sinh(p h_w / \alpha) = 0.253$$

$$\sinh(2 p h_w / \alpha) = 0.521$$

$$I_t = 1/3 \cdot 30 \cdot 3.2^3 = 327.68 \text{ cm}^4$$

$$n = \left(\frac{0.75 \cdot \alpha \cdot t_w^3}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\pi \cdot h_w / \alpha)}{\sinh(2\pi \cdot h_w / \alpha) - 2\pi \cdot h_w / \alpha} \right)^{0.5} = \left(\frac{0.75 \cdot 800 \cdot 1.70^3 \cdot 0.253^2}{327.68 \cdot (0.521 - 2 \cdot 0.25)} \right)^{0.5} = 5.24$$

$$\sigma_{y,2} = \frac{6 T_{\text{ed}}}{\alpha \cdot t_w^2} n \cdot \tanh(n) = \frac{6 \cdot 617.64}{800 \cdot 1.70^2} 5.24 \tanh(5.24) = 8.40 \text{ KN/cm}^2$$

Διατμητική τάση

$$V_{\text{ed}} = 258.53 + 3.90 = 262.43 \text{ KN} \text{ (λόγω κύριας κάμψης και ίδιου βάρους)}$$

$$S = 30 \cdot 3.2 \cdot 33.4 = 3206.4 \text{ cm}^3 \text{ (*απόσταση κ.β με κ.β πέλματος)}$$

Πλάτος πέλματος = 30 cm

Πάχος πέλματος = 3.2 cm

$$\tau = V_{\text{ed}} \cdot S / b \cdot I = 262.43 \cdot 3206.4 / (1.70 \cdot 256900) = 2.66 \text{ KN/cm}^2$$

$$\text{Πρόσθετη διατμητική τάση } \tau_2 = 0.2 \cdot 18.6 = 3.72 \text{ KN/cm}^2$$

Έλεγχος ισοδύναμης τάσης

$$\sigma_y = 18.6 + 8.4 = 27 \text{ KN/cm}^2 \text{ (λόγω κατακόρυφου φορτίου και λόγω εκκεντρότητας)}$$

$$z = 2.66 + 3.72 = 6.38 \text{ KN/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{eq}} = (27^2 + 9.68^2 - 27 \cdot 9.68 + 3 \cdot 6.38^2)^{1/2} = 26.14 \text{ KN/cm}^2 < 35.5 \text{ KN/cm}^2$$

Ικανοποιείται

➤ Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός

Ιδεατή διατομή

$$I_z = 30^3 \cdot 3.2 / 12 = 7200 \text{ cm}^4 \text{ (πέλματος)}$$

$$A=30*3.2+1.70*63.6/5=117.62\text{cm}^2$$

$$I_z=(I_z/A)^{1/2}=7.82\text{cm}$$

$$\lambda_z=400/7.82=51.15$$

$$\lambda_1=\pi (E/\sigma_y)^{0.5}=76.37$$

$$\bar{\lambda}_z=\lambda_z/\lambda_1=0.67$$

$\chi_z=0.80$ καμπύλη λυγισμού b

$$N_{f,Ed}=(781.73*100/(66.8*))=1170.25\text{KN} \text{ (απόσταση κ.βαρών πελμάτων)}$$

$$N_{Rd}=\chi_z * A * \sigma_y / \gamma_{Mo} = 0.80*117.62*35.5/1.00=3340.41\text{KN} > 1170.25\text{KN} \text{ Ικανοποιείται}$$

Για τον όρο της κάμψης είναι:

$$M_{z,Ed}=40.04\text{KNm}$$

$$W_{plf}=3.2*30^2/4=720\text{cm}^2$$

$$M_{z,Rk}=W_{plf}*\sigma_y=720*35.5/100=255.60\text{KNcm}$$

$$K_{zz}=C_{mz} (1+1.4N_{Ed}/N_{Rd})=0.9*(1+1.4 * 1170.25/3340.41)=1.34$$

Ο έλεγχος αλληλεπίδρασης

$$1170.25/3340.41+1.34*40.04/255.60=0.56 < 1 \text{ Ικανοποιείται}$$

2.3.7 Έλεγχος σε Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας

Οι έλεγχοι λειτουργικότητας έχουν ως σκοπό τον περιορισμό των παραμορφώσεων ώστε να εξασφαλίσουμε την σωστή λειτουργία της γερανογέφυρας και να αποφύγουμε ανεπιθύμητες κλίσεις, σε κατακόρυφο και οριζόντιο επίπεδο, των τροχιών. Επιπλέον, περιορίζουν οποιαδήποτε μεταβολή της απόστασης μεταξύ των απέναντι τροχιών που έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες πλευρικές ωθήσεις, ταλαντώσεις και φθορά των τροχιών.

$$\alpha=4.3\text{m} < 0.65*8=5.2\text{m}$$

Μέγιστο βέλος

Το φορτίο P είναι χωρίς τους δυναμικούς συντελεστές.

$$P=1/2*7.65*20+(400+23.15)*(20-1.47)/20=468.55 \text{ KN}$$

$$\text{Ανά τροχό } P=468.55/2=234.27\text{KN}$$

$$\text{Ίδιο βάρος} = 2.68\text{KN/m}$$

Βέλος στο μέσο για συγκεντρωμένο φορτίο

$$\delta_{z1}=p*c(3l^2-4c^2)/24EI=234.27*185(3*800^2-4*185^2)/(24*21000*256900)=0.60\text{cm}$$

όπου c η απόσταση κάθε φορτίου από το άκρο $c=(800-430)/2=185\text{cm}$

λόγω του ίδιου βάρους

$$\delta_{z2}=5*2.68*800^4/(100*384*21000*256900)=0,03\text{cm}$$

Η συνολική παραμόρφωση θα είναι

$$\delta_z=0.60+0.03=0.63\text{cm} < 2.5\text{cm}$$

$$l/600=800/600=1.33\text{cm} > 0.63\text{cm}$$

Ικανοποιείται

[EC EN 1993-6-2006-Πίνακας 7.2]

Διαφορική κατακόρυφη παραμόρφωση των απέναντι δοκών κυλίσεως

$P'=53.80\text{KN}$ στην ελάχιστη καταπονούμενη δοκό

$$\delta_{z1'}=53.80*185(3*800^2-4*185^2)/(24*21000*256900)=0.14\text{cm}$$

$$\delta_{hc}=0.60-0.14=0.46\text{cm}<2000/600=3.33\text{cm} \text{ Ικανοποιείται}$$

Παραμόρφωση υπό τα οριζόντια φορτία

Δυσμενέστερη παραμόρφωση προκαλείται όταν το φορτίο H_5 ασκείται στο μέσον του ανοίγματος.

Όπως για την περίπτωση των ελέγχων στην οριακή κατάσταση αστοχίας, θα υποτεθεί ότι το φορτίο αυτό θα παραληφθεί από το άνω πέλμα της δοκού κυλίσεως.

$$\text{Ροπή αδρανείας πέλματος: } I_{fz}=3.2 \cdot 30^3/12=7200\text{cm}^4$$

$$\delta_{\gamma}=54.91 \cdot 400^3/(48 \cdot 21000 \cdot 7200)=0.48\text{cm} < 400/600=0.666\text{cm} \quad \text{Ικανοποιείται}$$

Περιορισμοί λειτουργικότητας συνδεδεμένοι με το κτήριο

Κατά τη σύνταξη των μελετών, εκτός των περιορισμών των κατακόρυφων και οριζοντίων παραμορφώσεων των δοκών κυλίσεως, πρέπει επίσης να περιορίζονται και οι παραμορφώσεις του κτιρίου και ειδικότερα των θέσεων επί των οποίων οι δοκοί κυλίσεως εδράζονται, κατά τις προβλέψεις του Πινάκων 7.1 του Ευρωκώδικα 3 - Μέρος 6. Πρέπει να περιορίζονται:

(α) η οριζόντια μετακίνηση των θέσεων έδρασης των δοκών κυλίσεως

(β) η διαφορική οριζόντια μετακίνηση των διαδοχικών θέσεων έδρασης τους

(γ) η μεταβολή της απόστασης μεταξύ των κέντρων των απέναντι τροχιών. Ο έλεγχος αυτός πρέπει να γίνεται μεταξύ των αντίστοιχων θέσεων έδρασης των δοκών κυλίσεως όσο και μεταξύ των απέναντι σημείων σε ενδιάμεσες θέσεις.

- Αποφυγή ταλάντωσης του κάτω πέλματος

Ροπή αδρανείας κάτω πέλματος ως προς τον ασθενή άξονα αδρανείας της διατομής:

$$I_{fz}=7200\text{cm}^4$$

Αντίστοιχη ακτίνα αδρανείας:

$$i_{fz}=(7200/(30 \cdot 3.2))^{0.5}=8.66\text{cm}$$

Λυγνρότητα κάτω πέλματος

$$L/i_z=800/8.66=92.38 < 250$$

Δεν υπάρχει κίνδυνος ταλάντωσης του κάτω πέλματος

- Περιορισμός ευαισθησίας του κορμού έναντι λυγισμού

Επειδή για τη σχέση των διαστάσεων του άνευ νευρώσεων κορμού (ύψος προς πάχος) ισχύει:

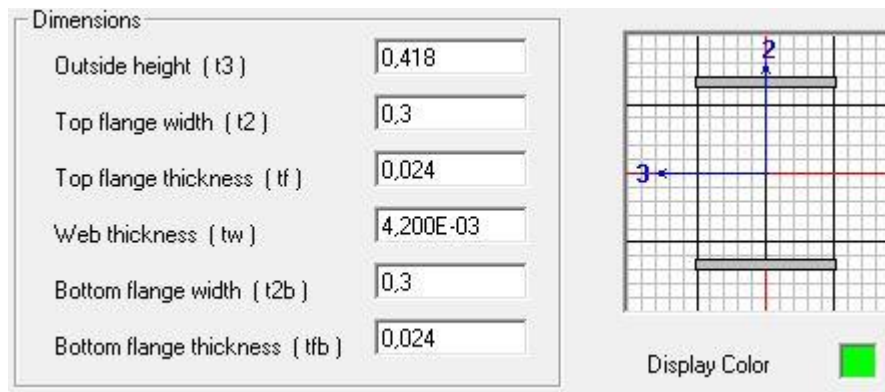
$$b/t_w=636/17=37.41 < 120 \quad \text{Δεν υπάρχει ευαισθησία του κορμού έναντι ελαστικού λυγισμού}$$

- Αναστρεψιμότητα των τάσεων

Εν προκειμένω, επειδή δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι πλαστικές αντοχές των διατομών, οι δε έλεγχοι στην οριακή κατάσταση αστοχίας έχουν γίνει ελαστικά, η αντίστοιχη συμπεριφορά στην στάθμη λειτουργίας είναι εξασφαλισμένη.

2.4 Δοκός Κύλισης (συγκολλητής διατομής) Γερανογέφυρας 10tn (μήκος 8m, άνοιγμα 20m)

Σε αυτή τη παράγραφο γίνεται μια προσπάθεια να μεγαλώσουμε το λόγο ύψους προς πάχος κορμού προσεγγίζοντας έτσι το όριο που θέτει ο EC3 για τις δοκούς κύλισης γερανογεφυρών. Στη προσπάθεια αυτή ξεκινώντας από την HEB400 η οποία ικανοποιεί όλους τους ελέγχους δημιουργούμε μια συγκολλητή διατομή διατηρώντας την ίδια ροπή αδρανείας.



Σχήμα 2.44: Διατομή συγκολλητής δοκού

$$I_y = 57680 \text{ cm}^4, h_w/t_w = 37/0.42 = 88 < 120$$

2.4.1 Έλεγχος Δοκού Κύλισης στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας

$\max M_y = 289.51 \text{ kNm}$. Ταυτόχρονα ασκείται και η οριζόντια δύναμη $H_{T2} = 21.42 \text{ kN}$ η οποία προκαλεί στρεπτική ροπή.

$$M_t \times \alpha = 21.42 \text{ kN} \times 25.9 \text{ cm} = 554.78 \text{ kNcm} \quad * \text{ύψος τροχιάς} + \text{ύψος δοκού} \times 2$$

$$H_t = M_t / \text{απόσταση Κ.Β πελμάτων} = 554.78 / 39.4 = 14.08 \text{ kN}$$

Στο άνω πέλμα της δοκού κυλίσεως ασκούνται συνολικά $H = H_{T2} + H_t = 21.42 \text{ kN} + 14.08 \text{ kN} = 35.50 \text{ kN}$ η οποία δίνει στον άξονα z (πλευρική στήριξη) $M_z = 24.08 \text{ kNm}$.

Επίσης σε αυτό τον συνδυασμό ασκείται και η H_L η οποία δίνει συγκεντρωμένη ροπή κάμψης περί τον άξονα y και σταθερή τέμνουσα κατά μήκος της δοκού τα οποία είναι αμελητέα σε σχέση με αυτά που δίνουν τα κατακόρυφα.

Μέγιστη τέμνουσα για τον συνδυασμό 1 θα είναι όταν το κατακόρυφο φορτίο θα είναι πάνω στην στήριξη.

$$\max V_{Ed} = 112.21(1 + (8 - 3.15)/8) = 180.24 \text{ kN}$$

Η μέγιστη ροπή περί τον άξονα z για τον συνδυασμό 5 :

$$H_s = 21.79 \text{ kN} \rightarrow M_t = 21.79 \times 25.9 = 564.36 \text{ kNcm}$$

$$H_t = 564.36 / 39.4 = 14.32 \text{ kN}$$

$$H = H_s + H_t = 21.79 + 14.32 = 36.11 \text{ kN}$$

Η οποία δύναμη δίνει μέγιστη ροπή όταν ο τροχός βρίσκεται στο μέσο του πρώτου ανοίγματος.

$$M_z = 29.34 \text{ kNm}$$

Η συνυπάρχουσα ροπή M_y θα είναι αυτή που αντιστοιχεί στα κατακόρυφα φορτία για τον συνδυασμό 5 $\rightarrow Q=97.86\text{KN}$

$$M_y = 216.51\text{KNm}$$

Μέγιστη τέμνουσα για τον συνδυασμό 5 θα έχουμε όταν ο τροχός βρίσκεται στην στήριξη και θα είναι ίση : $V_z=36.11\text{KN}$

Εντατικά μεγέθη λόγω ίδιου βάρους

$$I.\text{βάρους διατομής}=(2*0.024*0.3+0.37*0.0042)*78.5=1.25\text{KN/m}$$

$$\text{Τροχιά : } (0.05*0.07)\text{m}^2 \times 78.5\text{KN/m}^3=0.27\text{KN/m}$$

$$\text{Σύνολο } w= 1.25+0.27=1.52\text{KN/m}$$

$$M_{g,Ed} = 1/8 * 1.52 * 8^2 * 1.35 = 16.42\text{KNm}$$

$$V_{g,Ed} = 1/2 * 1.52 * 8 * 1.35 = 8.21\text{KN}$$

Έλεγχοι

- Έλεγχος κορμού σε διάτμηση (S355)

$$\text{Επιφάνεια διάτμησης : } A_v = 37*0.42=15.54\text{cm}^2$$

$$\text{Αντοχή σε διάτμηση : } V_{y,Rd} = A_v * f_y / \sqrt{3} \gamma_M = 15.54 * 35.5 / \sqrt{3} * 1.0 = 318.52\text{KN}$$

$$V_{y,Ed} = 180.24\text{KN} + 8.21\text{KN} = 188.45\text{KN} < 318.52\text{KN} \text{ Ικανοποιείται}$$

- Έλεγχος του άνω πέλματος σε διάτμηση

$$V_{z,Rd} = b * t * f_y / \sqrt{3} * \gamma_M = 30 * 2.4 * 35.5 / \sqrt{3} * 1.0 = 1475.75\text{KN} > V_z = 36.11\text{KN} \text{ Ικανοποιείται}$$

- Διαξονική κάμψη και αξονική – συνδυασμός 1

Έλεγχος ελαστικός :

Καμπτική ροπή περί τον ισχυρό άξονα y

$$M_y = 289.51\text{KNm} + 15.78 * \text{KNm} = 305.29\text{KNm} \text{ *ροπή λόγω ιδ.βάρους στη θέση } \chi=3.21$$

$$\sigma_y = M_y / W_{el,y} = 305.29\text{KN} * 100 * 20.9 / 57680 = 11.06\text{KN/cm}^2$$

Ροπή αντίστασης μεμονωμένου άνω πέλματος

$$W_{el,f,z} = 1/6 * 2.4 * 30^2 = 360\text{cm}^3$$

Αντίστοιχη ορθή τάση

$$\sigma_{y,2} = 24.08 * 100 / 360 = 6.69\text{KN/cm}^2$$

ορθή τάση λόγω αξονικής δύναμης

$$\sigma_y = N/A = 8.53 / 159.54 = 0.053\text{KN/cm}^2$$

A:εμβαδόν διατομής

Συνισταμένη ορθή τάση

$$\sigma_{y,Ed} = 11.06 + 6.69 + 0.053 = 17.80\text{KN/cm}^2 < 35.5\text{KN/cm}^2$$

Ικανοποιείται

- Διαξονική κάμψη – συνδυασμός 5

$$216.51 * 100 / 2759.81 + 29.34 * 100 / 360 = 7.84 + 8.15 = 15.99 < 35.5$$

Ικανοποιείται

- Έλεγχος τοπικής έντασης υπό φορτίο τροχού

Ορθή τάση λόγω κύριας κάμψης

$$9.79\text{KN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω φορτίου τροχού

Πλάτος τροχιάς $b_{fr}=7\text{cm}$

Ύψος τροχιάς $h=5\text{cm}$

Φθορά κατά το ύψος της τροχιάς $\Delta_{tr}=0.25*5\text{cm}=1.25\text{cm}$

Πάχος πέλματος διατομής $t_f=2.4\text{cm}$

Απόσταση ανώτερου σημείου τροχιάς από το ανώτερο σημείο του κορμού

$$d_r=5-1.25+2.4=6.15\text{cm}$$

Ενεργό πλάτος πέλματος $b_{eff}=b_{fr}+d_r=7+6.15=13.15<30\text{cm}$ (πλάτος πέλματος)

Ροπή αδράνειας του ενεργού πλάτους του πέλματος

$$I_{f,eff}=13.15*2.4^3/12=15.15\text{cm}^4$$

Ροπή αδράνειας της τροχιάς ως προς τον οριζόντιο κεντροβαρικό της άξονα

$$I_r=7*(5-1.25)^3/12=30.76\text{cm}^4$$

$$I_{rf}=I_{f,eff}+I_r=15.15+30.76=45.91\text{cm}^4$$

Ενεργό μήκος κατανομής τάσης

Πάχος κορμού $=0.42\text{cm}$

$$l_{eff}=3.25*(45.91/0.42)^{1/3}=15.54\text{cm}$$

$Q_{rmax}=112.21\text{KN}$ (ένας τροχός – συνδυασμός 1)

$$\sigma_{y1} = \frac{112.21}{0.42*15.54} = 17.19\text{KN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω εκκεντρότητας κατακόρυφου φορτίου

$$T_{ed}=f_{zed} * I_y=112.21*1/4 * 7 = 196.37 \text{KNcm}$$

Υποθέτουμε ότι οι νευρώσεις τοποθετούνται μόνο στις θέσεις των στηρίξεων $\alpha=800\text{cm}$

$h_w=37\text{cm}$ ύψος κορμού

$$p h_w/\alpha=0.145$$

$$\sinh(p h_w/\alpha) = 0.146$$

$$\sinh(2 p h_w/\alpha)=0.294$$

$$I_t=1/3*30*2.4^3=138.24\text{cm}^4$$

$$n = \left(\frac{0,75 \cdot \alpha \cdot t_w^3}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\pi \cdot h_w/\alpha)}{\sinh(2\pi \cdot h_w/\alpha) - 2\pi \cdot h_w/\alpha} \right)^{0.5} = \left(\frac{0.75*800*0.42^3*0.146^2}{138.24*(0.294-0.29)} \right)^{0.5} = 1.31$$

$$\sigma_{y,2} = \frac{6T_{ed}}{a*t_w^2} n * \tanh(n) = \frac{6*196.37}{800*0.42^2} 1.31 \tanh(1.31) = 9.45\text{KN/cm}^2$$

Διατμητική τάση

$V_{ed}=90.19+1.62=91.81\text{KN}$ (λόγω κύριας κάμψης και ίδιου βάρους)

$S=30*2.4*19.7*=1418.4\text{cm}^3$ (*απόσταση κ.β με κ.β πέλματος)

Πλάτος πέλματος $=30\text{cm}$

Πάχος πέλματος=2.4cm

$$\tau = V_{ed} * S / b * I = 91.81 * 1418.4 / (0.42 * 57680) = 5.37 \text{KN/cm}^2$$

$$\text{Πρόσθετη διατμητική τάση } \tau_2 = 0,2 * 17.19 = 3.44 \text{KN/cm}^2$$

Έλεγχος ισοδύναμης τάσης

$$\Sigma \gamma = 17.19 + 9.45 = 26.64 \text{KN/cm}^2 \text{ (λόγω κατακόρυφου φορτίου και λόγω εκκεντρότητας)}$$

$$z = 5.37 + 3.44 = 8.81 \text{KN/cm}^2$$

$$\sigma_{eq} = (9.79^2 + 26.64^2 - 9.79 * 26.64 + 3 * 8.81^2)^{1/2} = 27.88 \text{KN/cm}^2 < 35.5 \text{KN/cm}^2$$

Ικανοποιείται

➤ Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός

Ιδεατή διατομή

$$I_z = 30^3 * 2.4 / 12 = 5400 \text{cm}^3 \text{ (πέλματος)}$$

$$A = 30 * 2.4 + 0.42 * 37 / 5 = 75.11 \text{cm}^2$$

$$I_z = (I_z / A)^{1/2} = 8.48 \text{cm}$$

$$\lambda_z = 400 / 8.48 = 47.17$$

$$\lambda_1 = \pi (E / \sigma_y)^{0.5} = 76.37$$

$$\bar{\lambda}_z = \lambda_z / \lambda_1 = 0.62$$

$\chi_z = 0.773$ καμπύλη λυγισμού c

$$N_{f,Ed} = (289.51 + 15.78) * 100 / (39.4) = 774.85 \text{KN} \text{ (απόσταση κ.βαρών πελμάτων)}$$

$$N_{Rd} = \chi_z * A * \sigma_y / \gamma_{Mo} = 0.773 * 75.11 * 35.5 / 1.00 = 2061.13 \text{KN} > 774.85 \text{KN} \text{ **Ικανοποιείται**}$$

Για τον όρο της κάμψης είναι:

$$M_{z,Ed} = 24.08 \text{KNm}$$

$$W_{plf} = 2.4 * 30^2 / 4 = 540 \text{cm}^2$$

$$M_{z,Rk} = W_{plf} * \sigma_y = 540 * 35.5 / 100 = 191.7 \text{KNcm}$$

$$k_{zz} = C_{mz} (1 + 1.4 N_{Ed} / N_{Rd}) = 0.9 * (1 + 1.4 * 774.85 / 2061.13) = 1.37$$

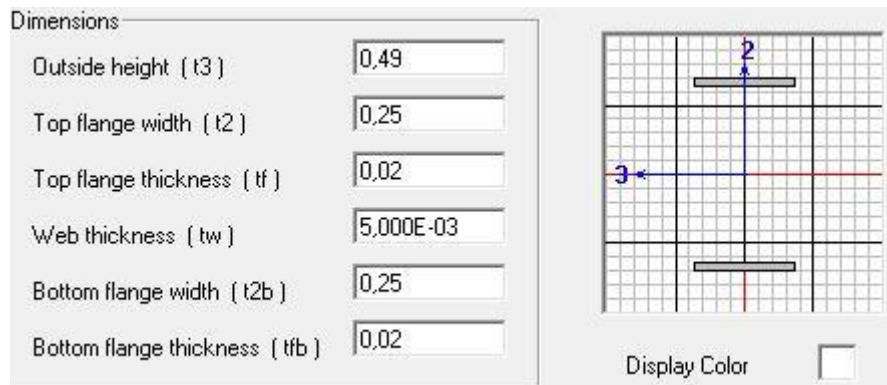
Ο έλεγχος αλληλεπίδρασης

$$774.85 / 2061.13 + 1.37 * 24.08 / 191.70 = 0.54 < 1 \text{ **Ικανοποιείται**}$$

Οι έλεγχοι Ο.Κ.Λ είναι προφανές ότι ικανοποιούνται αφού έχουμε ίδια ροπή αδρανείας με την HEB400.

2.4.2 Έλεγχοι οριστικής συγκολλητής Δοκού Κύλισης

Σε αυτή τη παράγραφο γίνεται μια τελική προσπάθεια αύξησης του λόγου ύψους προς πάχους κορμού ώστε να προσεγγίσουμε όσο είναι δυνατόν το όριο του EC3. Αυτή η προσπάθεια γίνεται και με ταυτόχρονη αύξηση της ροπής αδρανείας.



Σχήμα 2.45: Διατομή συγκολλητής δοκού

$$I_y = 2 \cdot 2 \cdot 25 \cdot 23.5^2 + 45^3 \cdot 0.5 / 12 = 59021.87 \text{ cm}^4 \quad h_w / t_w = 450 / 5 = 90 < 120$$

$$\text{Ίδιο βάρος} = (2 \cdot 0.25 \cdot 0.02 + 0.45 \cdot 0.005) \cdot 78.5 = 0.96 \text{ kN/m}$$

$$\text{Ίδιο βάρος τροχιάς} = 0.27 \text{ kN/m}$$

$$M_g = 1.35 \cdot 1.23 \cdot 8^2 / 8 = 13.28 \text{ kNm}$$

$$V_g = 1.35 \cdot 1.23 \cdot 8 / 2 = 6.64 \text{ kN}$$

Έλεγχοι

- Διαξονική κάμψη και αξονική – συνδυασμός 1

Έλεγχος ελαστικός:

Καμπτική ροπή περί τον ισχυρό άξονα y

$$M_y = 289.51 \text{ kNm} + 12.75 \cdot \text{kNm} = 302.26 \text{ kNm} \quad \text{*ροπή λόγω ιδ.βάρους στη θέση } \chi = 3.21$$

$$\sigma_y = M_y / W_{eff,z} = 302.26 \text{ kN} \cdot 100 \cdot 24.5 / 59021.87 = 12.55 \text{ kN/cm}^2$$

Ροπή αντίστασης μεμονωμένου άνω πέλματος

$$W_{eff,z} = 1/6 \cdot 2 \cdot 25^2 = 208.33 \text{ cm}^3$$

Αντίστοιχη ορθή τάση

$$\sigma_{y,2} = 24.08 \cdot 100 / 208.33 = 11.56 \text{ kN/cm}^2$$

ορθή τάση λόγω αξονικής δύναμης

$$\sigma_y = N/A = 8.53 / 122.5 = 0.069 \text{ kN/cm}^2$$

A:εμβαδόν διατομής

Συνισταμένη ορθή τάση

$$\sigma_{y,Ed} = 12.55 + 11.56 + 0.069 = 24.18 \text{ kN/cm}^2 < 35.5 \text{ kN/cm}^2$$

Ικανοποιείται

- Διαξονική κάμψη – συνδυασμός 5

$$216.51 \cdot 100 / 2409.05 + 29.34 \cdot 100 / 208.33 = 8.98 + 14.08 = 23.06 < 35.5$$

Ικανοποιείται

- Έλεγχος τοπικής έντασης υπό φορτίο τροχού

Ορθή τάση λόγω κύριας κάμψης

$$11.52 \text{ kN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω φορτίου τροχού

Πλάτος τροχιάς $b_{fr} = 7 \text{ cm}$

Ύψος τροχιάς $h = 5 \text{ cm}$

Φθορά κατά το ύψος της τροχιάς $\Delta_{tr}=0.25*5\text{cm}=1.25\text{cm}$

Πάχος πέλματος διατομής $t_f=2\text{cm}$

Απόσταση ανώτερου σημείου τροχιάς από το ανώτερο σημείο του κορμού

$$d_r=5-1.25+2=5.75\text{cm}$$

Ενεργό πλάτος πέλματος $b_{\text{eff}}=b_{fr}+d_r=7+5.75=12.75<30\text{cm}$ (πλάτος πέλματος)

Ροπή αδράνειας του ενεργού πλάτους του πέλματος

$$I_{f,\text{eff}}=12.75*2^3/12=8.5\text{cm}^4$$

Ροπή αδράνειας της τροχιάς ως προς τον οριζόντιο κεντροβαρικό της άξονα

$$I_r=7*(5-1.25)^3/12=30.76\text{cm}^4$$

$$I_{rt}=I_{f,\text{eff}}+I_r=8.5+30.76=39.26\text{cm}^4$$

Ενεργό μήκος κατανομής τάσης

Πάχος κορμού=0.5cm

$$l_{\text{eff}}=3.25*(39.26/0.5)^{1/3}=13.92\text{cm}$$

$Q_{r\text{max}}=112.21\text{KN}$ (ένας τροχός – συνδυασμός 1)

$$\sigma_{y1} = \frac{112.21}{0.5*13.92} = 16.12\text{KN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω εκκεντρότητας κατακόρυφου φορτίου

$$T_{\text{ed}}=f_{\text{zed}} * I_y=112.21*1/4 * 7 = 196.37 \text{KNcm}$$

Υποθέτουμε ότι οι νευρώσεις τοποθετούνται μόνο στις θέσεις των στηρίξεων $\alpha=800\text{cm}$

$h_w=45\text{cm}$ ύψος κορμού

$$\pi h_w/\alpha=0.177$$

$$\sinh(\pi h_w/\alpha) = 0.178$$

$$\sinh(2\pi h_w/\alpha)=0.361$$

$$I_t=1/3*25*2^3=66.67\text{cm}^4$$

$$n = \left(\frac{0,75 \cdot \alpha \cdot t_w^3}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\pi \cdot h_w/\alpha)}{\sinh(2\pi \cdot h_w/\alpha) - 2\pi \cdot h_w/\alpha} \right)^{0.5} = \left(\frac{0.75*800*0.5^3*0.178^2}{66.67*(0.361-0.354)} \right)^{0.5} = 2.26$$

$$\sigma_{y,2} = \frac{6T_{\text{ed}}}{\alpha * t_w^2} n * \tanh(n) = \frac{6*196.37}{800*0.5^2} 2.26 \tanh(2.26) = 13.03\text{KN/cm}^2$$

Διατμητική τάση

$V_{\text{ed}}=90.19+1.31=91.50\text{KN}$ (λόγω κύριας κάμψης και ίδιου βάρους)

$S=30*2*23.5*=1175\text{cm}^3$ (*απόσταση κ.β με κ.β πέλματος)

Πλάτος πέλματος=25cm

Πάχος πέλματος=2cm

$$\tau = V_{\text{ed}} * S / b * I = 91.50*1175/(0.5*59021.87)=3.64\text{KN/cm}^2$$

Πρόσθετη διατμητική τάση $\tau_2=0,2*16.12=3.22\text{KN/cm}^2$

Έλεγχος ισοδύναμης τάσης

$\Sigma\gamma=16.12+13.03=29.15\text{KN/cm}^2$ (λόγω κατακόρυφου φορτίου και λόγω εκκεντρότητας)
 $z=3.64+3.22=6.86\text{KN/cm}^2$

$\sigma_{\text{eq}}=(11.52^2+29.15^2-11.52*29.15+3*6.86^2)^{1/2}=28.07\text{KN/cm}^2 < 35.5 \text{ KN/cm}^2$ **Ικανοποιείται**

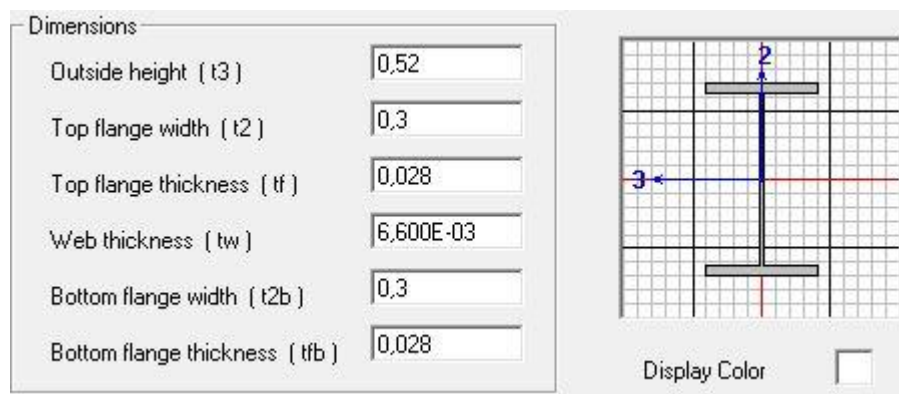
➤ Έλεγχος παραμόρφωσης υπό οριζόντια φορτία

$$I_{Fz}=25^3*2/12=2604.17\text{cm}^4$$

$$\delta_z=16.14*400^3/(48*21000*2604.17)=0.39\text{cm}<400/600=0.66\text{cm}$$
 ικανοποιείται

2.5 Δοκός Κύλισης (συγκολλητής διατομής) Γερανογέφυρας 20tn (μήκος 8m, άνοιγμα 20m)

Σε αυτή τη παράγραφο γίνεται μια προσπάθεια να μεγαλώσουμε το λόγο ύψους προς πάχος κορμού προσεγγίζοντας έτσι το όριο που θέτει ο EC3 για τις δοκούς κύλισης γερανογεφυρών. Στη προσπάθεια αυτή ξεκινώντας από την HEB500 η οποία ικανοποιεί όλους τους ελέγχους δημιουργούμε μια συγκολλητή διατομή διατηρώντας την ίδια ροπή αδρανείας.



Σχήμα 2.46: Διατομή συγκολλητής δοκού

$$I_{\gamma}=107200\text{cm}^4, h_w/t_w=46.4/0.66=70.3<120$$

2.5.1 Έλεγχος Δοκού Κύλισης στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας

$\max M_{\gamma}=453.56\text{KNm}$. Ταυτόχρονα ασκείται και η οριζόντια δύναμη $H_{T2}=25.81\text{KN}$ η οποία προκαλεί στρεπτική ροπή.

$$M_t \times \alpha = 25.81\text{KN} * 31 * \text{cm} = 800.11\text{KNcm} \quad * \text{ύψος τροχιάς} + \text{ύψος δοκού} \setminus 2$$

$$H_t = M_t / \text{απόσταση Κ.Β πελμάτων} = 800.11 / 49.2 = 16.26\text{KN}$$

Στο άνω πέλμα της δοκού κυλίσεως ασκούνται συνολικά $H = H_{T2} + H_t = 25.81\text{KN} + 16.26\text{KN} = 42.07\text{KN}$ η οποία δίνει στον άξονα z (πλευρική στήριξη) $M_z = 28.59\text{KNm}$.

Επίσης σε αυτό τον συνδυασμό ασκείται και η H_L η οποία δίνει συγκεντρωμένη ροπή κάμψης περί τον άξονα γ και σταθερή τέμνουσα κατά μήκος της δοκού τα οποία είναι αμελητέα σε σχέση με αυτά που δίνουν τα κατακόρυφα.

Μέγιστη τέμνουσα για τον συνδυασμό 1 θα είναι όταν το κατακόρυφο φορτίο θα είναι πάνω στην στήριξη.

$$\max V_E = 302.37 \text{ KN}$$

Η μέγιστη ροπή περί τον άξονα z για τον συνδυασμό 5:

$$H_s = 39.54 \text{ KN} \rightarrow M_t = 39.34 * 31 = 1225.74 \text{ KNcm}$$

$$H_t = 1225.74 / 49.2 = 24.91 \text{ KN}$$

$$H = H_s + H_t = 39.54 + 24.91 = 64.45 \text{ KN}$$

Η οποία δύναμη δίνει μέγιστη ροπή όταν ο τροχός βρίσκεται στο μέσο του πρώτου ανοίγματος.

$$M_z = 52.37 \text{ KNm}$$

Η συνυπάρχουσα ροπή M_y θα είναι αυτή που αντιστοιχεί στα κατακόρυφα φορτία για τον συνδυασμό 5 \rightarrow

$$M_y = 355.12 \text{ KNm}$$

Μέγιστη τέμνουσα για τον συνδυασμό 5 θα έχουμε όταν ο τροχός βρίσκεται στην στήριξη και θα είναι ίση: $V_z = 64.45 \text{ KN}$

Εντατικά μεγέθη λόγω ίδιου βάρους

$$l. \text{βάρους διατομής} = (2 * 0.028 * 0.3 + 0.464 * 0.0066) * 78.5 = 1.56 \text{ KN/m}$$

$$\text{Τροχιά} : (0.05 * 0.07) \text{ m}^2 * 78.5 \text{ KN/m}^3 = 0.27 \text{ KN/m}$$

$$\text{Σύνολο } w = 1.56 + 0.27 = 1.83 \text{ KN/m}$$

$$M_{g,Ed} = 1/8 * 1.83 * 8^2 * 1.35 = 19.76 \text{ KNm}$$

$$V_{g,Ed} = 1/2 * 1.83 * 8 * 1.35 = 9.88 \text{ KN}$$

Έλεγχοι

- Έλεγχος κορμού σε διάτμηση (S355)

$$\text{Επιφάνεια διάτμησης} : A_v = 46.4 * 0.66 = 30.62 \text{ cm}^2$$

$$\text{Αντοχή σε διάτμηση} : V_{y,Rd} = A_v * f_y / \sqrt{3} \gamma_M = 30.62 * 35.5 / \sqrt{3} * 1.0 = 627.60 \text{ KN}$$

$$V_{y,Ed} = 302.37 \text{ KN} + 9.88 \text{ KN} = 312.25 \text{ KN} < 627.60 \text{ KN} \text{ Ικανοποιείται}$$

- Έλεγχος του άνω πέλματος σε διάτμηση

$$V_{z,Rd} = b * t * f_y / \sqrt{3} * \gamma_M = 30 * 2.8 * 35.5 / \sqrt{3} * 1.0 = 1721.71 \text{ KN} > V_z = 64.45 \text{ KN} \text{ Ικανοποιείται}$$

- Διαξονική κάμψη και αξονική – συνδυασμός 1

Έλεγχος ελαστικός:

Καμπτική ροπή περί τον ισχυρό άξονα y

$$M_y = 453.56 \text{ KNm} + 18.52 * \text{KNm} = 472.08 \text{ KNm} \text{ *ροπή λόγω ιδ.βάρους στη θέση } \chi = 3.00$$

$$\sigma_y = M_y / W_{el,y} = 472.08 \text{ KN} * 100 * 26 / 107200 = 11.45 \text{ KN/cm}^2$$

Ροπή αντίστασης μεμονωμένου άνω πέλματος

$$W_{elf,z} = 1/6 * 2.8 * 30^2 = 420 \text{ cm}^3$$

Αντίστοιχη ορθή τάση

$$\sigma_{y,2} = 28.59 * 100 / 420 = 6.81 \text{ KN/cm}^2$$

ορθή τάση λόγω αξονικής δύναμης

$$\sigma_y = N / A = 12.42 / 198.63 = 0.06 \text{ KN/cm}^2$$

A: εμβαδόν διατομής

Συνισταμένη ορθή τάση

$$\sigma_{y,Ed} = 11.45 + 6.81 + 0.06 = 18.32 \text{ KN/cm}^2 < 35.5 \text{ KN/cm}^2$$

Ικανοποιείται

➤ Διαξονική κάμψη – συνδυασμός 5

$$355.12 * 100 / 4123.08 + 52.37 * 100 / 420 = 8.61 + 12.47 = 21.08 < 35.5$$

Ικανοποιείται

➤ Έλεγχος τοπικής έντασης υπό φορτίο τροχού

Ορθή τάση λόγω κύριας κάμψης

$$10.22 \text{ KN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω φορτίου τροχού

Πλάτος τροχιάς $b_{fr} = 7 \text{ cm}$

Ύψος τροχιάς $h = 5 \text{ cm}$

Φθορά κατά το ύψος της τροχιάς $\Delta_{tr} = 0.25 * 5 \text{ cm} = 1.25 \text{ cm}$

Πάχος πέλματος διατομής $t_f = 2.8 \text{ cm}$

Απόσταση ανώτερου σημείου τροχιάς από το ανώτερο σημείο του κορμού

$$d_r = 5 - 1.25 + 2.8 = 6.55 \text{ cm}$$

Ενεργό πλάτος πέλματος $b_{eff} = b_{fr} + d_r = 7 + 6.55 = 13.55 < 30 \text{ cm}$ (πλάτος πέλματος)

Ροπή αδράνειας του ενεργού πλάτους του πέλματος

$$I_{f,eff} = 13.55 * 2.8^3 / 12 = 24.79 \text{ cm}^4$$

Ροπή αδράνειας της τροχιάς ως προς τον οριζόντιο κεντροβαρικό της άξονα

$$I_r = 7 * (5 - 1.25)^3 / 12 = 30.76 \text{ cm}^4$$

$$I_{rf} = I_{f,eff} + I_r = 24.79 + 30.76 = 55.55 \text{ cm}^4$$

Ενεργό μήκος κατανομής τάσης

Πάχος κορμού $= 0.42 \text{ cm}$

$$l_{eff} = 3.25 * (55.55 / 0.66)^{1/3} = 14.24 \text{ cm}$$

$Q_{r,max} = 201.58 \text{ KN}$ (ένας τροχός – συνδυασμός 1)

$$\sigma_{y1} = \frac{201.58}{0.66 * 14.24} = 21.44 \text{ KN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω εκκεντρότητας κατακόρυφου φορτίου

$$T_{ed} = f_{zed} * I_y = 201.58 * 1/4 * 7 = 352.76 \text{ KNcm}$$

Υποθέτουμε ότι οι νευρώσεις τοποθετούνται μόνο στις θέσεις των στηρίξεων $\alpha = 800 \text{ cm}$

$h_w = 46.4 \text{ cm}$ ύψος κορμού

$$\pi h_w / \alpha = 0.182$$

$$\sinh(\pi h_w / \alpha) = 0.183$$

$$\sinh(2\pi h_w / \alpha) = 0.372$$

$$I_t = 1/3 * 30 * 2.8^3 = 219.52 \text{ cm}^4$$

$$n = \left(\frac{0,75 \cdot \alpha \cdot t_w^3}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\pi \cdot h_w / \alpha)}{\sinh(2\pi \cdot h_w / \alpha) - 2\pi \cdot h_w / \alpha} \right)^{0.5} = \left(\frac{0,75 \cdot 800 \cdot 0,66^3 \cdot 0,183^2}{219,52 \cdot (0,372 - 0,364)} \right)^{0.5} = 1,81$$

$$\sigma_{y,2} = \frac{6T_{ed}}{a \cdot t_w^2} n \cdot \tan \alpha(n) = \frac{6 \cdot 352,76}{800 \cdot 0,66^2} 1,81 \tanh(1,81) = 10,41 \text{ KN/cm}^2$$

Διατμητική τάση

$V_{ed} = 151,18 + 2,47 = 153,65 \text{ KN}$ (λόγω κύριας κάμψης και ίδιου βάρους)

$S = 30 \cdot 2,8 \cdot 24,6 = 2066,4 \text{ cm}^3$ (*απόσταση κ.β με κ.β πέλματος)

Πλάτος πέλματος = 30 cm

Πάχος πέλματος = 2,8 cm

$\tau = V_{ed} \cdot S / b \cdot I = 153,65 \cdot 2066,4 / (0,66 \cdot 107200) = 4,48 \text{ KN/cm}^2$

Πρόσθετη διατμητική τάση $\tau_2 = 0,2 \cdot 21,44 = 4,29 \text{ KN/cm}^2$

Έλεγχος ισοδύναμης τάσης

$\Sigma \gamma = 21,44 + 10,41 = 31,85 \text{ KN/cm}^2$ (λόγω κατακόρυφου φορτίου και λόγω εκκεντρότητας)

$z = 4,48 + 4,29 = 8,77 \text{ KN/cm}^2$

$$\sigma_{eq} = (10,22^2 + 31,85^2 - 10,22 \cdot 31,85 + 3 \cdot 8,77^2)^{1/2} = 32 \text{ KN/cm}^2 < 35,5 \text{ KN/cm}^2$$

Ικανοποιείται

➤ Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός

Ιδεατή διατομή

$I_z = 30^3 \cdot 2,8 / 12 = 6300 \text{ cm}^4$ (πέλματος)

$A = 30 \cdot 2,8 + 0,66 \cdot 46,4 / 5 = 90,12 \text{ cm}^2$

$I_z = (I_z / A)^{1/2} = 8,36 \text{ cm}$

$\lambda_z = 400 / 8,36 = 47,85$

$\lambda_1 = \pi (E / \sigma_y)^{0.5} = 76,37$

$\bar{\lambda}_z = \lambda_z / \lambda_1 = 0,63$

$\chi_z = 0,767$ καμπύλη λυγισμού c

$N_{f,Ed} = 472,08 \cdot 100 / (49,2 \cdot) = 959,51 \text{ KN}$ *(απόσταση κ.βαρών πελμάτων)

$N_{Rd} = \chi_z \cdot A \cdot \sigma_y / \gamma_{Mo} = 0,767 \cdot 90,12 \cdot 35,5 / 1,00 = 2453,83 \text{ KN} > 959,51 \text{ KN}$ **Ικανοποιείται**

Για τον όρο της κάμψης είναι:

$M_{z,Ed} = 28,59 \text{ KNm}$

$W_{plf} = 2,8 \cdot 30^2 / 4 = 630 \text{ cm}^3$

$M_{z,Rk} = W_{plf} \cdot \sigma_y = 630 \cdot 35,5 / 100 = 223,65 \text{ KNcm}$

$K_{zz} = C_{mz} (1 + 1,4 N_{Ed} / N_{Rd}) = 0,9 \cdot (1 + 1,4 \cdot 959,51 / 2453,83) = 1,39$

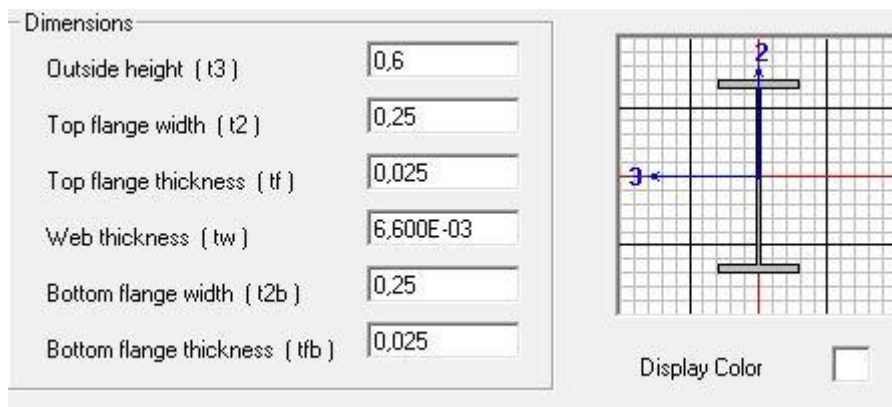
Ο έλεγχος αλληλεπίδρασης

$959,51 / 2453,83 + 1,39 \cdot 28,59 / 223,65 = 0,57 < 1$ **Ικανοποιείται**

Οι έλεγχοι Ο.Κ.Λ είναι προφανές ότι ικανοποιούνται αφού έχουμε ίδια ροπή αδρανείας με την ΗΕΒ500.

2.5.2 Έλεγχοι οριστικής συγκολλητής δοκού κύλισης

Σε αυτή τη παράγραφο γίνεται μια τελική προσπάθεια αύξησης του λόγου ύψους προς πάχους κορμού ώστε να προσεγγίσουμε όσο είναι δυνατόν το όριο του EC3. Αυτή η προσπάθεια γίνεται και με ταυτόχρονη αύξηση της ροπής αδρανείας.



Σχήμα 2.47: Διατομή συγκολλητής δοκού

$$I_y = 2 \cdot 2.5 \cdot 25 \cdot 28.75^2 + 55^3 \cdot 0.66 / 12 = 112470.94 \text{ cm}^4 \quad h_w / t_w = 550 / 6.6 = 83.3 < 120$$

$$\text{Ίδιο βάρος} = (2 \cdot 0.25 \cdot 0.025 + 0.55 \cdot 0.0066) \cdot 78.5 = 1.27 \text{ KN/m}$$

$$\text{Ίδιο βάρος τροχιάς} = 0.27 \text{ KN/m}$$

$$M_g = 1.35 \cdot 1.54 \cdot 8^2 / 8 = 16.63 \text{ KNm}$$

$$V_g = 1.35 \cdot 1.54 \cdot 8 / 2 = 8.32 \text{ KN}$$

Έλεγχοι

- Διαξονική κάμψη και αξονική – συνδυασμός 1

Έλεγχος ελαστικός:

Καμπτική ροπή περί τον ισχυρό άξονα γ

$$M_y = 453.56 \text{ KNm} + 15.60 \cdot \text{KNm} = 469.16 \text{ KNm} \quad \text{*ροπή λόγω ιδ.βάρους στη θέση } \chi = 3.00$$

$$\sigma_y = M_y / W_{el,y} = 469.16 \text{ KN} \cdot 100 \cdot 30 / 112470.94 = 12.51 \text{ KN/cm}^2$$

Ροπή αντίστασης μεμονωμένου άνω πέλματος

$$W_{el,y,z} = 1/6 \cdot 2.5 \cdot 25^2 = 260.42 \text{ cm}^3$$

Αντίστοιχη ορθή τάση

$$\sigma_{y,z} = 28.59 \cdot 100 / 260.42 = 10.98 \text{ KN/cm}^2$$

ορθή τάση λόγω αξονικής δύναμης

$$\sigma_y = N / A = 12.42 / 161.3 = 0.077 \text{ KN/cm}^2$$

A: εμβαδόν διατομής

Συνισταμένη ορθή τάση

$$\sigma_{y,Ed} = 12.51 + 10.98 + 0.077 = 23.57 \text{ KN/cm}^2 < 35.5 \text{ KN/cm}^2$$

Ικανοποιείται

- Διαξονική κάμψη – συνδυασμός 5

$$355.12 \cdot 100 / 3749.03 + 52.37 \cdot 100 / 260.42 = 9.47 + 20.11 = 29.58 < 35.5$$

Ικανοποιείται

- Έλεγχος τοπικής έντασης υπό φορτίο τροχού

Ορθή τάση λόγω κύριας κάμψης

$$11.47 \text{KN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω φορτίου τροχού

Πλάτος τροχιάς $b_{fr}=7\text{cm}$

Ύψος τροχιάς $h=5\text{cm}$

Φθορά κατά το ύψος της τροχιάς $\Delta_{tr}=0.25 \cdot 5\text{cm}=1.25\text{cm}$

Πάχος πέλματος διατομής $t_f=2.5\text{cm}$

Απόσταση ανώτερου σημείου τροχιάς από το ανώτερο σημείο του κορμού

$$d_r=5-1.25+2.5=6.25\text{cm}$$

Ενεργό πλάτος πέλματος $b_{eff}=b_{fr}+d_r=7+6.25=13.25 < 30\text{cm}$ (πλάτος πέλματος)

Ροπή αδράνειας του ενεργού πλάτους του πέλματος

$$I_{f,eff}=13.25 \cdot 2.5^3 / 12 = 17.25 \text{cm}^4$$

Ροπή αδράνειας της τροχιάς ως προς τον οριζόντιο κεντροβαρικό της άξονα

$$I_r=7 \cdot (5-1.25)^3 / 12 = 30.76 \text{cm}^4$$

$$I_{rf}=I_{f,eff}+I_r=17.25+30.76=48.01 \text{cm}^4$$

Ενεργό μήκος κατανομής τάσης

Πάχος κορμού $=0.66\text{cm}$

$$l_{eff}=3.25 \cdot (48.01 / 0.66)^{1/3} = 13.57 \text{cm}$$

$Q_{rmax}=201.58\text{KN}$ (ένας τροχός – συνδυασμός 1)

$$\sigma_{y1} = \frac{201.58}{0.66 \cdot 13.57} = 22.51 \text{KN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω εκκεντρότητας κατακόρυφου φορτίου

$$T_{ed}=f_{zed} \cdot l_y=201.58 \cdot 1/4 \cdot 7 = 352.76 \text{KNcm}$$

Υποθέτουμε ότι οι νευρώσεις τοποθετούνται μόνο στις θέσεις των στηρίξεων $\alpha=800\text{cm}$

$h_w=55\text{cm}$ ύψος κορμού

$$\pi h_w / \alpha = 0.216$$

$$\sinh(\pi h_w / \alpha) = 0.218$$

$$\sinh(2\pi h_w / \alpha) = 0.445$$

$$I_t = 1/3 \cdot 25 \cdot 2.5^3 = 130.21 \text{cm}^4$$

$$n = \left(\frac{0.75 \cdot \alpha \cdot t_w^3}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\pi \cdot h_w / \alpha)}{\sinh(2\pi \cdot h_w / \alpha) - 2\pi \cdot h_w / \alpha} \right)^{0.5} = \left(\frac{0.75 \cdot 800 \cdot 0.66^3 \cdot 0.218^2}{130.21 \cdot (0.445 - 0.432)} \right)^{0.5} = 2.2$$

$$\sigma_{y,2} = \frac{6T_{ed}}{\alpha \cdot t_w^2} n \cdot \tanh(n) = \frac{6 \cdot 352.76}{800 \cdot 0.66^2} 2.2 \tanh(2.2) = 13.03 \text{KN/cm}^2$$

Διατμητική τάση

$V_{ed}=151.18+2.08=153.26\text{KN}$ (λόγω κύριας κάμψης και ίδιου βάρους)

$S=25*2.5*28.75=1796.87\text{cm}^3$ (*απόσταση κ.β με κ.β πέλματος)

Πλάτος πέλματος=25cm

Πάχος πέλματος=2.5cm

$\tau = V_{ed} * S / b * I = 153.26*1796.87/(0.66*112470.94)=3.70\text{KN/cm}^2$

Πρόσθετη διατμητική τάση $\tau_2=0,2*22.51=4.50\text{KN/cm}^2$

Έλεγχος ισοδύναμης τάσης

$\sigma_y=22.51+13.03=35.5\text{KN/cm}^2$ (λόγω κατακόρυφου φορτίου και λόγω εκκεντρότητας)

$z=3.7+4.5=8.20\text{KN/cm}^2$

$\sigma_{eq}=(11.47^2+35.5^2-11.47*35.5+3*8.2^2)^{1/2}=34.44\text{KN/cm}^2 < 35.5\text{KN/cm}^2$

Ικανοποιείται

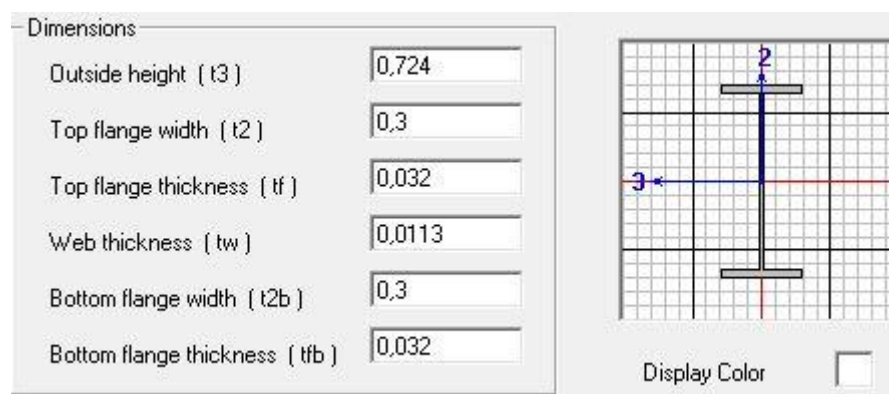
➤ Έλεγχος παραμόρφωσης υπό οριζόντια φορτία

$I_{FZ}=25^3*2.5/12=3255.21\text{cm}^4$

$\delta_z=29.29*400^3/(48*21000*3255.21)=0.57\text{cm} < 400/600=0.66\text{cm}$ **Ικανοποιείται**

2.6 Δοκός Κύλισης (συγκολλητής διατομής) Γερανογέφυρας 40tn (μήκος 8m, άνοιγμα 20m)

Σε αυτή τη παράγραφο γίνεται μια προσπάθεια να μεγαλώσουμε το λόγο ύψους προς πάχος κορμού προσεγγίζοντας έτσι το όριο που θέτει ο EC3 για τις δοκούς κύλισης γερανογεφυρών. Στη προσπάθεια αυτή ξεκινώντας από την HEB700, η οποία ικανοποιεί όλους τους ελέγχους, δημιουργούμε μια συγκολλητή διατομή διατηρώντας την ίδια ροπή αδρανείας.



Σχήμα 2.48: Διατομή συγκολλητής δοκού

$I_y=256900\text{cm}^4, h_w/t_w=66/1.13=58.41 < 120$

2.6.1 Έλεγχος Δοκού Κύλισης στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας

$\max M_y = 754.91 \text{ KNm}$. Ταυτόχρονα ασκείται και η οριζόντια δύναμη $H_{T2} = 37.02 \text{ KN}$ η οποία προκαλεί στρεπτική ροπή.

$$M_t \times \alpha = 37.02 \text{ KN} \times 41.2 \text{ cm} = 1525.22 \text{ KNcm} \quad * \text{ ύψος τροχιάς} + \text{ ύψος δοκού} \sqrt{2}$$

$$H_t = M_t / \text{απόσταση Κ.Β πελμάτων} = 1525.22 / 69.2 = 22.04 \text{ KN}$$

Στο άνω πέλμα της δοκού κυλίσεως ασκούνται συνολικά $H = H_{T2} + H_t = 37.02 \text{ KN} + 22.04 \text{ KN} = 59.06 \text{ KN}$ η οποία δίνει στον άξονα z (πλευρική στήριξη) $M_z = 39.95 \text{ KNm}$.

Επίσης σε αυτό τον συνδυασμό ασκείται και η H_L η οποία δίνει συγκεντρωμένη ροπή κάμψης περί τον άξονα y και σταθερή τέμνουσα κατά μήκος της δοκού τα οποία είναι αμελητέα σε σχέση με αυτά που δίνουν τα κατακόρυφα.

Μέγιστη τέμνουσα για τον συνδυασμό 1 θα είναι όταν το κατακόρυφο φορτίο θα είναι πάνω στην στήριξη.

$$\max V_E = 516.17 \text{ KN}$$

Η μέγιστη ροπή περί τον άξονα z για τον συνδυασμό 5:

$$H_s = 74.13 \text{ KN} \rightarrow M_t = 74.13 \times 41.2 = 3054.16 \text{ KNcm}$$

$$H_t = 3054.16 / 69.2 = 44.13 \text{ KN}$$

$$H = H_s + H_t = 74.13 + 44.13 = 118.26 \text{ KN}$$

Η οποία δύναμη δίνει μέγιστη ροπή όταν ο τροχός βρίσκεται στο μέσο του πρώτου ανοίγματος.

$$M_z = 96.09 \text{ KNm}$$

Η συνυπάρχουσα ροπή M_y θα είναι αυτή που αντιστοιχεί στα κατακόρυφα φορτία για τον συνδυασμό 5 \rightarrow

$$M_y = 608.84 \text{ KNm}$$

Μέγιστη τέμνουσα για τον συνδυασμό 5 θα έχουμε όταν ο τροχός βρίσκεται στην στήριξη και θα είναι ίση: $V_z = 118.26 \text{ KN}$

Εντατικά μεγέθη λόγω ίδιου βάρους

$$\text{Ιδ. βάρος διατομής} = (2 \times 0.032 \times 0.3 + 0.66 \times 0.0113) \times 78.5 = 2.09 \text{ KN/m}$$

$$\text{Τροχιά} : (0.05 \times 0.07) \text{ m}^2 \times 78.5 \text{ KN/m}^3 = 0.27 \text{ KN/m}$$

$$\text{Σύνολο } w = 2.09 + 0.27 = 2.36 \text{ KN/m}$$

$$M_{g,Ed} = 1/8 \times 2.36 \times 8^2 \times 1.35 = 25.49 \text{ KNm}$$

$$V_{g,Ed} = 1/2 \times 2.36 \times 8 \times 1.35 = 12.74 \text{ KN}$$

Έλεγχοι

- Έλεγχος κορμού σε διάτμηση (S355)

$$\text{Επιφάνεια διάτμησης: } A_v = 66 \times 1.13 = 74.58 \text{ cm}^2$$

$$\text{Αντοχή σε διάτμηση: } V_{y,Rd} = A_v \times f_y / \sqrt{3} \gamma_M = 74.58 \times 35.5 / \sqrt{3} \times 1.0 = 1528.63 \text{ KN}$$

$$V_{y,Ed} = 516.17 \text{ KN} + 12.74 \text{ KN} = 528.91 \text{ KN} < 1528.63 \text{ KN} \quad \text{Ικανοποιείται}$$

- Έλεγχος του άνω πέλματος σε διάτμηση

$$V_{z,Rd} = b \times t \times f_y / \sqrt{3} \times \gamma_M = 30 \times 3.2 \times 35.5 / \sqrt{3} \times 1.0 = 1967.67 \text{ KN} > V_z = 118.26 \text{ KN} \quad \text{Ικανοποιείται}$$

- Διαξονική κάμψη και αξονική – συνδυασμός 1

Έλεγχος ελαστικός:

Καμπτική ροπή περί τον ισχυρό άξονα γ

$$M_{\gamma} = 754.91 \text{ kNm} + 23.61 \cdot \text{kNm} = 778.52 \text{ kNm} \quad \text{*ροπή λόγω ιδ.βάρους στη θέση } \chi = 2.92$$

$$\sigma_{\gamma} = M_{\gamma} / W_{\text{eff}} = 778.52 \text{ kN} \cdot 100 / 36.2 / 256900 = 10.97 \text{ kN/cm}^2$$

Ροπή αντίστασης μεμονωμένου άνω πέλματος

$$W_{\text{eff},z} = 1/6 \cdot 3.2 \cdot 30^2 = 480 \text{ cm}^3$$

Αντίστοιχη ορθή τάση

$$\sigma_{\gamma,2} = 39.95 \cdot 100 / 480 = 8.32 \text{ kN/cm}^2$$

ορθή τάση λόγω αξονικής δύναμης

$$\sigma_{\gamma} = N/A = 15.85 / 266.58 = 0.06 \text{ kN/cm}^2$$

A:εμβαδόν διατομής

Συνισταμένη ορθή τάση

$$\sigma_{\gamma,Ed} = 10.97 + 8.32 + 0.06 = 19.35 \text{ kN/cm}^2 < 35.5 \text{ kN/cm}^2$$

Ικανοποιείται

- Διαξονική κάμψη – συνδυασμός 5

$$608.84 \cdot 100 / 7096.68 + 96.09 \cdot 100 / 480 = 8.58 + 20.02 = 28.60 < 35.5$$

Ικανοποιείται

- Έλεγχος τοπικής έντασης υπό φορτίο τροχού

Ορθή τάση λόγω κύριας κάμψης

$$10.00 \text{ kN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω φορτίου τροχού

Πλάτος τροχιάς $b_{fr} = 7 \text{ cm}$

Ύψος τροχιάς $h = 5 \text{ cm}$

Φθορά κατά το ύψος της τροχιάς $\Delta_{tr} = 0.25 \cdot 5 \text{ cm} = 1.25 \text{ cm}$

Πάχος πέλματος διατομής $t_f = 3.2 \text{ cm}$

Απόσταση ανώτερου σημείου τροχιάς από το ανώτερο σημείο του κορμού

$$d_r = 5 - 1.25 + 3.2 = 6.95 \text{ cm}$$

Ενεργό πλάτος πέλματος $b_{\text{eff}} = b_{fr} + d_r = 7 + 6.95 = 13.95 < 30 \text{ cm}$ (πλάτος πέλματος)

Ροπή αδράνειας του ενεργού πλάτους του πέλματος

$$I_{f,\text{eff}} = 13.95 \cdot 3.2^3 / 12 = 38.09 \text{ cm}^4$$

Ροπή αδράνειας της τροχιάς ως προς τον οριζόντιο κεντροβαρικό της άξονα

$$I_r = 7 \cdot (5 - 1.25)^3 / 12 = 30.76 \text{ cm}^4$$

$$I_{rf} = I_{f,\text{eff}} + I_r = 38.09 + 30.76 = 68.85 \text{ cm}^4$$

Ενεργό μήκος κατανομής τάσης

Πάχος κορμού $= 1.13 \text{ cm}$

$$l_{\text{eff}} = 3.25 \cdot (68.85 / 1.13)^{1/3} = 12.79 \text{ cm}$$

$Q_{r,\text{max}} = 352.94 \text{ kN}$ (ένας τροχός – συνδυασμός 1)

$$\sigma_{\gamma 1} = \frac{352.94}{1.13 \cdot 12.79} = 24.42 \text{ kN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω εκκεντρότητας κατακόρυφου φορτίου

$$T_{ed} = f_{zed} \cdot I_y = 617.64 \text{ KNcm}$$

Υποθέτουμε ότι οι νευρώσεις τοποθετούνται μόνο στις θέσεις των στηρίξεων $\alpha = 800 \text{ cm}$

$$h_w = 66 \text{ cm} \text{ ύψος κορμού}$$

$$\pi h_w / \alpha = 0.259$$

$$\sinh(\pi h_w / \alpha) = 0.262$$

$$\sinh(2\pi h_w / \alpha) = 0.541$$

$$I_t = 1/3 \cdot 30 \cdot 3.2^3 = 327.68 \text{ cm}^4$$

$$n = \left(\frac{0.75 \cdot \alpha \cdot t_w^3}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\pi \cdot h_w / \alpha)}{\sinh(2\pi \cdot h_w / \alpha) - 2\pi \cdot h_w / \alpha} \right)^{0.5} = \left(\frac{0.75 \cdot 800 \cdot 1.13^3 \cdot 0.262^2}{327.68 \cdot (0.541 - 0.518)} \right)^{0.5} = 2.80$$

$$\sigma_{y,2} = \frac{6T_{ed}}{\alpha \cdot t_w^2} n \cdot \tanh(n) = \frac{6 \cdot 617.64}{800 \cdot 1.13^2} \cdot 2.80 \cdot \tanh(2.80) = 10.08 \text{ KN/cm}^2$$

Διατμητική τάση

$$V_{ed} = 258.53 + 3.44 = 261.97 \text{ KN} \text{ (λόγω κύριας κάμψης και ίδιου βάρους)}$$

$$S = 30 \cdot 3.2 \cdot 34.6 = 3321.6 \text{ cm}^3 \text{ (* απόσταση κ.β με κ.β πέλματος)}$$

$$\text{Πλάτος πέλματος} = 30 \text{ cm}$$

$$\text{Πάχος πέλματος} = 3.2 \text{ cm}$$

$$\tau = V_{ed} \cdot S / b \cdot I = 261.97 \cdot 3321.6 / (1.13 \cdot 256900) = 3.00 \text{ KN/cm}^2$$

$$\text{Πρόσθετη διατμητική τάση } \tau_2 = 0.2 \cdot 24.42 = 4.88 \text{ KN/cm}^2$$

Έλεγχος ισοδύναμης τάσης

$$\Sigma \gamma = 24.42 + 10.08 = 34.50 \text{ KN/cm}^2 \text{ (λόγω κατακόρυφου φορτίου και λόγω εκκεντρότητας)}$$

$$z = 3.0 + 4.88 = 7.88 \text{ KN/cm}^2$$

$$\sigma_{eq} = (10.00^2 + 34.50^2 - 10.00 \cdot 34.50 + 3 \cdot 7.88^2)^{1/2} = 33.64 \text{ KN/cm}^2 < 35.5 \text{ KN/cm}^2$$

Ικανοποιείται

➤ Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός

Ιδεατή διατομή

$$I_z = 30^3 \cdot 3.2 / 12 = 7200 \text{ cm}^3 \text{ (πέλματος)}$$

$$A = 30 \cdot 3.2 + 1.13 \cdot 66 / 5 = 110.92 \text{ cm}^2$$

$$I_z = (I_z / A)^{1/2} = 8.06 \text{ cm}$$

$$\lambda_z = 400 / 8.06 = 49.63$$

$$\lambda_1 = \pi (E / \sigma_y)^{0.5} = 76.37$$

$$\bar{\lambda}_z = \lambda_z / \lambda_1 = 0.65$$

$\chi_z = 0.755$ καμπύλη λυγισμού c

$$N_{f,Ed} = 778.52 \cdot 100 / (69.2) = 1125.03 \text{ KN} \text{ (* απόσταση κ.βαρών πελμάτων)}$$

$$N_{Rd} = \chi_z \cdot A \cdot \sigma_y / \gamma_{Mo} = 0.755 \cdot 110.92 \cdot 35.5 / 1.00 = 2972.93 \text{ KN} > 1125.03 \text{ KN} \text{ **Ικανοποιείται**}$$

Για τον όρο της κάμψης είναι:

$$M_{z,Ed} = 39.95 \text{ KNm}$$

$$W_{plf} = 3.2 \cdot 30^2 / 4 = 720 \text{ cm}^2$$

$$M_{z,Rk} = W_{plf} \cdot \sigma_y = 720 \cdot 35.5 / 100 = 255.60 \text{ KNcm}$$

$$K_{zz}=C_{mz} (1+1.4NEd/NRd)=0.9*(1+1.4 * 1125.03/2972.93)=1.38$$

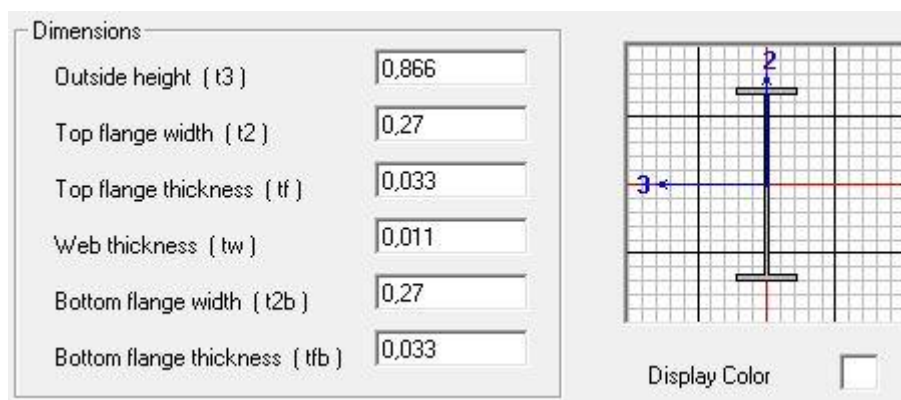
Ο έλεγχος αλληλεπίδρασης

$$1125.03/2972.93+1.38*39.95/255.60=0.59<1 \text{ Ικανοποιείται}$$

Οι έλεγχοι Ο.Κ.Λ είναι προφανές ότι ικανοποιούνται αφού έχουμε ίδια ροπή αδρανείας με την ΗΕΒ700.

2.6.2 Έλεγχοι οριστικής συγκολλητής Δοκού Κύλισης

Σε αυτή τη παράγραφο γίνεται μια τελική προσπάθεια αύξησης του λόγου ύψους προς πάχους κορμού ώστε να προσεγγίσουμε όσο είναι δυνατόν το όριο του EC3. Αυτή η προσπάθεια γίνεται και με ταυτόχρονη αύξηση της ροπής αδρανείας.



Σχήμα 2.49: Διατομή συγκολλητής δοκού

$$I_y=2*3.3*27*41.65^2+80^3*1.1/12=356060.88\text{cm}^4 \quad h_w/t_w=800/11=72.7<120$$

$$\text{Ίδιο βάρος}=(2*0.27*0.033+0.8*0.011)*78.5=2.09\text{KN/m}$$

$$\text{Ίδιο βάρος τροχιάς}=0.27\text{KN/m}$$

Έλεγχοι

- Διαξονική κάμψη και αξονική – συνδυασμός 1

Έλεγχος ελαστικός:

Καμπτική ροπή περί τον ισχυρό άξονα y

$$M_y = 778.52\text{KNm}$$

$$\sigma_y = M_y/W_{eff} = 778.52\text{KN} * 100*43.3 / 356060.88 = 9.47\text{KN/cm}^2$$

Ροπή αντίστασης μεμονωμένου άνω πέλματος

$$W_{elf,z} = 1/6 * 3.3 * 27^2 = 400.95\text{cm}^3$$

Αντίστοιχη ορθή τάση

$$\sigma_{y,2} = 39.95 * 100/400.95 = 9.96 \text{KN/cm}^2$$

ορθή τάση λόγω αξονικής δύναμης

$$\sigma_y = N/A = 15.85/266.20 = 0.059\text{KN/cm}^2$$

A:εμβαδόν διατομής

Συνισταμένη ορθή τάση

$$\sigma_{y,Ed} = 9.47 + 9.96 + 0.059 = 19.49 \text{ KN/cm}^2 < 35.5 \text{ KN/cm}^2$$

Ικανοποιείται

➤ Διαξονική κάμψη – συνδυασμός 5

$$608.84 * 100 / 8223.11 + 96.09 * 100 / 400.95 = 7.40 + 23.96 = 31.36 < 35.5$$

Ικανοποιείται

➤ Έλεγχος τοπικής έντασης υπό φορτίο τροχού

Ορθή τάση λόγω κύριας κάμψης

$$8.74 \text{ KN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω φορτίου τροχού

Πλάτος τροχιάς $b_{fr} = 7 \text{ cm}$

Ύψος τροχιάς $h = 5 \text{ cm}$

Φθορά κατά το ύψος της τροχιάς $\Delta_{tr} = 0.25 * 5 \text{ cm} = 1.25 \text{ cm}$

Πάχος πέλματος διατομής $t_f = 3.3 \text{ cm}$

Απόσταση ανώτερου σημείου τροχιάς από το ανώτερο σημείο του κορμού

$$d_r = 5 - 1.25 + 3.3 = 7.05 \text{ cm}$$

Ενεργό πλάτος πέλματος $b_{eff} = b_{fr} + d_r = 7 + 7.05 = 14.05 < 30 \text{ cm}$ (πλάτος πέλματος)

Ροπή αδράνειας του ενεργού πλάτους του πέλματος

$$I_{f,eff} = 14.05 * 3.3^3 / 12 = 42.08 \text{ cm}^4$$

Ροπή αδράνειας της τροχιάς ως προς τον οριζόντιο κεντροβαρικό της άξονα

$$I_r = 7 * (5 - 1.25)^3 / 12 = 30.76 \text{ cm}^4$$

$$I_{rf} = I_{f,eff} + I_r = 42.08 + 30.76 = 72.84 \text{ cm}^4$$

Ενεργό μήκος κατανομής τάσης

Πάχος κορμού $= 1.1 \text{ cm}$

$$l_{eff} = 3.25 * (72.84 / 1.1)^{1/3} = 13.15 \text{ cm}$$

$Q_{r,max} = 352.94 \text{ KN}$ (ένας τροχός – συνδυασμός 1)

$$\sigma_{y1} = \frac{352.94}{1.1 * 13.15} = 24.40 \text{ KN/cm}^2$$

Ορθή τάση λόγω εκκεντρότητας κατακόρυφου φορτίου

$$T_{ed} = f_{zed} * I_y = 617.64 \text{ KNcm}$$

Υποθέτουμε ότι οι νευρώσεις τοποθετούνται μόνο στις θέσεις των στηρίξεων $a = 800 \text{ cm}$

$h_w = 80 \text{ cm}$ ύψος κορμού

$$\pi h_w / \alpha = 0.314$$

$$\sinh(\pi h_w / \alpha) = 0.319$$

$$\sinh(2\pi h_w / \alpha) = 0.67$$

$$I_t = 1/3 * 27 * 3.3^3 = 323.43 \text{ cm}^4$$

$$n = \left(\frac{0,75 \cdot \alpha \cdot t_w^3}{I_t} \cdot \frac{\sinh^2(\pi \cdot h_w / \alpha)}{\sinh(2\pi \cdot h_w / \alpha) - 2\pi \cdot h_w / \alpha} \right)^{0.5} = \left(\frac{0.75 \cdot 800 \cdot 1.1^3 \cdot 0.319^2}{323.43 \cdot (0.67 - 0.628)} \right)^{0.5} = 2.44$$

$$\sigma_{y,2} = \frac{6T_{ed}}{\alpha \cdot t_w^2} n \cdot \tanh(n) = \frac{6 \cdot 617.64}{800 \cdot 1.1^2} 2.44 \tanh(2.44) = 9.20 \text{ KN/cm}^2$$

Διατμητική τάση

$V_{ed} = 261.97 \text{ KN}$ (λόγω κύριας κάμψης και ίδιου βάρους)

$S = 27 \cdot 3.3 \cdot 41.65 = 3711.01 \text{ cm}^3$ (*απόσταση κ.β με κ.β πέλματος)

Πλάτος πέλματος = 27 cm

Πάχος πέλματος = 3.3 cm

$\tau = V_{ed} \cdot S / b \cdot I = 261.97 \cdot 3711.01 / (1.1 \cdot 356060.88) = 2.48 \text{ KN/cm}^2$

Πρόσθετη διατμητική τάση $\tau_2 = 0,2 \cdot 24.40 = 4.88 \text{ KN/cm}^2$

Έλεγχος ισοδύναμης τάσης

$\Sigma \gamma = 24.40 + 9.20 = 33.60 \text{ KN/cm}^2$ (λόγω κατακόρυφου φορτίου και λόγω εκκεντρότητας)

$z = 2.48 + 4.88 = 7.36 \text{ KN/cm}^2$

$$\sigma_{eq} = (8.74^2 + 33.6^2 - 8.74 \cdot 33.6 + 3 \cdot 7.36^2)^{1/2} = 32.77 \text{ KN/cm}^2 < 35.5 \text{ KN/cm}^2$$

Ικανοποιείται

➤ Έλεγχος παραμόρφωσης υπό οριζόντια φορτία

$$I_{Fz} = 27^3 \cdot 3.3 / 12 = 5412.82 \text{ cm}^4$$

$$\delta_z = 54.91 \cdot 400^3 / (48 \cdot 21000 \cdot 5412.82) = 0.64 \text{ cm} < 400 / 600 = 0.66 \text{ cm} \text{ **Ικανοποιείται**}$$

3 Οριακή προσέγγιση του λόγου (ύψους προς πάχος κορμού), δοκών κύλισης γερανογεφυρών, με τη χρήση μεθόδων του EC3

3.1 Μαθηματικές εκφράσεις για τα αποτελέσματα του λυγισμού των επίπεδων ελασμάτων (EC3 Part 1.5)

Για τον υπολογισμό των διαμήκων τάσεων και της αντίστασης των επίπεδων ελασμάτων γίνεται χρήση μιας ενεργής διατομής. Το εμβαδό αυτής της ενεργής διατομής μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση $A_{c,eff} = \rho \cdot A_c$ όπου A_c το εμβαδό της πραγματικής διατομής.

Το ρ είναι συντελεστής απομείωσης λόγο του λυγισμού.

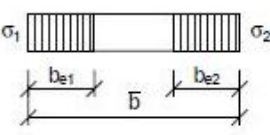
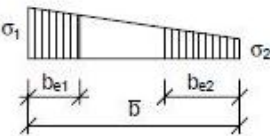
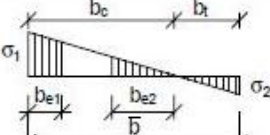
Η μαθηματική έκφραση που μας δίνει την τιμή αυτού του μειωτικού συντελεστή είναι:

$$\rho = (\lambda_p - 0.055(3 + \psi)) / \lambda_p^2 \leq 1$$

όπου ψ ο λόγος της τάσης στο πάνω όριο του κορμού προς την τάση στο κάτω όριο.

Ο καθορισμός του ψ σύμφωνα με τον EC3 γίνεται σύμφωνα με τον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Καθορισμός των συντελεστών ψ και κ_σ

Stress distribution (compression positive)				Effective ^p width b_{eff}		
				$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi > 0$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -2$
Buckling factor κ_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Ο συντελεστής λ_p (slenderness) είναι:

$$\lambda_p = \sqrt{(f_y / \sigma_{cr})} = (b/t) / (\sqrt{28.4 \cdot \epsilon \cdot \kappa_\sigma})$$

Το b είναι η μικρότερη από τις διαστάσεις του πάνελ του κορμού.

Το κ_σ είναι συντελεστής λυγισμού ανταποκρινόμενος στον λόγο ψ .

σ_{cr} είναι η κρίσιμη τάση λυγισμού.

Όσον αφορά την αντίσταση των επίπεδων ελασμάτων έναντι τέμνουσας έχουμε

$$V_{c,Rd} = \chi_v \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}) \quad , \quad \chi_v = \chi_w + \chi_f$$

Ο χ_w είναι μειωτικός συντελεστής για τη συνεισφορά του κορμού.

Η τιμή του συντελεστή χ_w δίνεται για διάφορες περιπτώσεις από τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.2: Τιμές συντελεστή χ_w

	Rigid end post	Non-rigid end post
$\bar{\lambda}_w < 0,83/\eta$	η	η
$0,83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83/\bar{\lambda}_w$	$0,83/\bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37/(0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83/\bar{\lambda}_w$

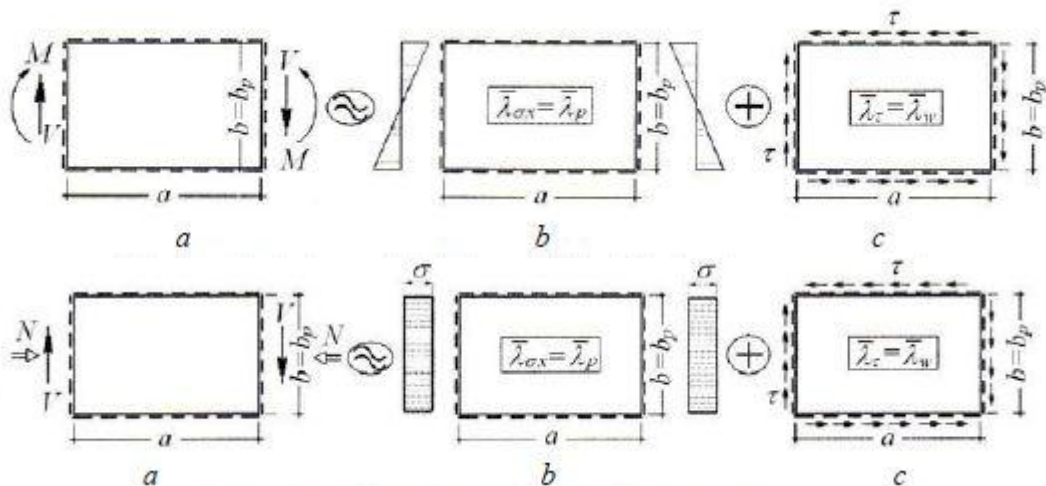
Σε αντιστοιχία με τον συντελεστή λ_p για την διάτμηση έχουμε τον λ_w (slenderness parameter).

$\lambda_w = 0,76 \cdot \sqrt{(f_{yw}/\tau_{cr})}$ όπου $\tau_{cr} = k_T \cdot \sigma_E$ και $\sigma_E = 190000(b/t)$ Μρα.

Για κορμούς με εγκάρσιες νευρώσεις μόνο στις στηρίξεις ο συντελεστής λ_w δίνεται από τον τύπο: $\lambda_w = h_w / (86,4 \cdot t \cdot \epsilon)$.

3.2 Η μέθοδος των συστατικών μερών καταπόνησης και η σύγκριση του καθορισμού των ορίων αστοχίας και λειτουργικότητας

Σύμφωνα με τα σχόλια του EC3 Part1-5 η μέθοδος αυτή προσεγγίζει τη συμπεριφορά ενός τμήματος του μέλους με τη συμπεριφορά ενός «σετ» από βασικά συνθετικά μέρη καθένα από τα οποία υπόκειται σε σ_x , σ_y και τ .



Σχήμα 3.1: Ανάλυση σύνθετης καταπόνησης επίπεδων ελασμάτων

Για ελάσματα που υπόκεινται σε θλίψη και διάτμηση θα έχουμε για τα όρια αστοχίας και λειτουργικότητας:

Ο.Κ.Λ $\sigma_{\chi,Ed,ser}/\sigma_{\chi,crit} \leq 1,1$ και $1,1 \cdot \tau_{Ed,ser}/\tau_{crit} \leq 1,1$

Ο.Κ.Α $\sigma_{\chi,Ed}/(\rho_{\chi} \cdot f_y \cdot \gamma_{M1}) \leq 1$ και $\tau_{Ed,ser} \cdot \sqrt{3}/(\chi_w \cdot f_y \cdot \gamma_{M1}) \leq 1$

Οι τάσεις $\sigma_{\chi,Ed,ser}$ και $\tau_{Ed,ser}$ μπορούν να δοθούν από τις εκφράσεις:

$$\sigma_{\chi,Ed,ser} = [(\mu/\gamma_G) + (\psi_1 \cdot (1-\mu)/\gamma_Q)] \cdot \sigma_{\chi,Ed}$$

$$\tau_{Ed,ser} = [(\mu/\gamma_G) + (\psi_1 \cdot (1-\mu)/\gamma_Q)] \cdot \tau_{Ed}$$

όπου ψ_1 είναι ο συντελεστής για το συνδυασμό των συχνών φορτίων.

Οι γ_G και γ_Q είναι συντελεστές που αφορούν τα μόνιμα και τα μεταβαλλόμενα φορτία.

Τέλος το μ είναι ο λόγος $\mu = G/(G+Q)$.

Σύμφωνα με τα σχόλια του EC3 για μια οδική γέφυρα μπορεί να γίνει η εξής υπόθεση:

$$\mu=0.5$$

$$\gamma_G = \gamma_Q = \gamma_F = 1.35$$

$\psi_1=0.75$ για μικρά ανοίγματα

$\psi_1=0.40$ για μεγάλα ανοίγματα

$$\rho = (\lambda_p - 0.055(3 + \psi)) / \lambda_p^2 = (\lambda_p - 0.22) / \lambda_p^2 \text{ (για } \psi=1)$$

$$x_w = 0.83 / \lambda_w$$

$$\gamma_{M1} = 1.10$$

Τότε ο έλεγχος για τα όρια αστοχίας και λειτουργικότητας μπορεί να γραφεί.

Ο.Κ.Α $\sigma_{\chi,Ed,ser} / (\sigma_{\chi,crit} * 1.10) \leq 1$ και $\tau_{Ed,ser} / \tau_{crit} \leq 1$

Ο.Κ.Α $\sigma_{\chi,Ed,ser} / \{[(\mu/\gamma_G) + (\psi_1 * (1-\mu)/\gamma_Q) * [1/\lambda_p - 0.22/\lambda_p^2] * (f_y/\gamma_{M1})]\} = \varepsilon_\sigma * \sigma_{\chi,Ed,ser} / (1.10 * \sigma_{\chi,crit}) \leq 1$
 όπου $\varepsilon_\sigma = 1.10 * \gamma_{M1} / \{[(\mu/\gamma_G) + (\psi_1 * (1-\mu)/\gamma_Q) * [1/\lambda_p - 0.22/\lambda_p^2] * (f_y/\sigma_{\chi,crit})]\} = 3.27 / [(1 + \psi_1) + (\lambda_p - 0.22)]$

και $\tau_{Ed,ser} * \sqrt{3} / \{[(\mu/\gamma_G) + (\psi_1 * (1-\mu)/\gamma_Q) * (0.83/\lambda_w)] * (f_y/\gamma_{M1})\} = \varepsilon_\tau * \tau_{Ed,ser} / \tau_{crit} \leq 1$
 όπου $\varepsilon_\tau = \sqrt{3} * \gamma_{M1} / \{[(\mu/\gamma_G) + (\psi_1 * (1-\mu)/\gamma_Q) * (0.83/\lambda_w)] * (f_y/\tau_{crit})\} = 2.97 / [(1 + \psi_1) * 0.83 * \lambda_w]$

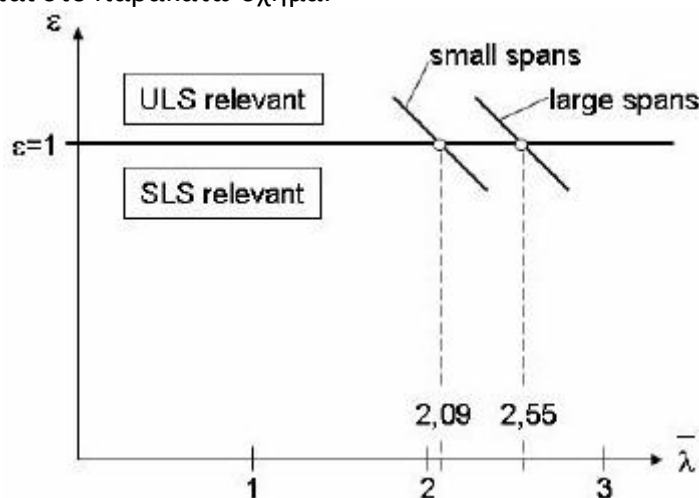
Για $\varepsilon_\sigma \geq 1$ και $\varepsilon_\tau \geq 1$ το όριο αστοχίας είναι κρίσιμο ενώ αν ισχύει το αντίθετο το όριο λειτουργικότητας είναι κρίσιμο.

Επομένως για την οριακή τιμή $\varepsilon_\sigma = \varepsilon_\tau = 1$ μπορούμε να οδηγηθούμε στις ακόλουθες οριακές τιμές για τους συντελεστές λ_p και λ_w .

Για μικρά ανοίγματα έχουμε: $\lambda_p = 3.267 / 1.75 + 0.22 = 2.09$ και $\lambda_w = 2.97 / 1.75 + 0.83 = 2.045$

Για μεγάλα ανοίγματα έχουμε: $\lambda_p = 3.267 / 1.4 + 0.22 = 2.55$ και $\lambda_w = 2.97 / 1.4 + 0.83 = 2.56$

Τα όρια αυτά φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.2 : Όρια λ_p για δοκούς γεφυρών

3.3 Εφαρμογή των προηγούμενων μεθόδων στις δοκούς κύλισης γερανογεφυρών

Σε αυτή την παράγραφο γίνεται μια προσπάθεια εφαρμογής των προαναφερθέντων μεθόδων στις δοκούς κύλισης γερανογεφυρών.

Για την συγκολλητή δοκό κύλισης της γερανογέφυρας των 10τ που εξετάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο έχουμε ότι G (φορτίο τροχού από γεραν. και βαρούλκο χωρίς αν. φορτίο χωρίς συντελεστή)=26.69KN

Q (φορτίο τροχού από γεραν. βαρούλκο και αν. φορτίο χωρίς συντελεστή)=83.12KN

Άρα $\mu=G/(G+Q)=26.69/83.12=0.32$

$\gamma_G = \gamma_Q = 1.35$

$\psi_1 = 0.90$ (για γερανογέφυρες)

Επομένως $\kappa = [(\mu/\gamma_G) + (\psi_1 * (1-\mu)/\gamma_Q)] = 0.32/1.35 + (0.90/1.35) * (1-0.32) = 0.69$

Ο.Κ.Α $\sigma_{\chi,Ed,ser}/(\sigma_{\chi,crit} * 1.10) \leq 1$ και $\tau_{Ed,ser}/\tau_{crit} \leq 1$

Ο.Κ.Α $\varepsilon_{\sigma} * \sigma_{\chi,Ed,ser}/(1.10 * \sigma_{\chi,crit}) \leq 1$ και $\varepsilon_{\tau} * \tau_{Ed,ser}/\tau_{crit} \leq 1$

Στην περίπτωση της δοκού κύλισης έχουμε κάμψη και διάτμηση αντί θλίψης και διάτμησης. Άρα θα έχουμε :

$\lambda_p = (\lambda_p - 0.055(3+\psi))/\lambda_p^2 = (\lambda_p - 0.11)/\lambda_p^2$ (για $\psi = -1$)

$\lambda_p = \sqrt{f_y/\sigma_{\chi,crit}}$

$\lambda_w = 0.76 * \sqrt{f_{yw}/\tau_{cr}}$

$\gamma_{M1} = 1$ (για γερανογέφυρες)

$\varepsilon_{\sigma} = 1.10 * \gamma_{M1} / \{ [(\mu/\gamma_G) + (\psi_1 * (1-\mu)/\gamma_Q)] * [1/\lambda_p - 0.11/\lambda_p^2] * (f_y/\sigma_{\chi,crit}) \} = 1.10 * 1 / [0.69 * (\lambda_p - 0.11)]$

για να είναι κρίσιμο το όριο αστοχίας θα πρέπει $\varepsilon_{\sigma} \geq 1$.

Επομένως $1.10 * 1 / [0.69 * (\lambda_p - 0.11)] \geq 1$ και $\lambda_p \leq 1.70$.

$\varepsilon_{\tau} = \sqrt{3} * \gamma_{M1} / \{ [(\mu/\gamma_G) + (\psi_1 * (1-\mu)/\gamma_Q)] * (0.83/\lambda_w) \} * (f_y/\tau_{crit}) = \sqrt{3} * 1 / [0.69 * (0.83 * \lambda_w / 0.76^2)]$

για να είναι κρίσιμο το όριο αστοχίας θα πρέπει $\varepsilon_{\tau} \geq 1$.

Άρα $\sqrt{3} * 1 / [0.69 * (0.83 * \lambda_w / 0.76^2)] \geq 1$ και $\lambda_w \leq 1.75$

Ακόμα ισχύει ότι $\lambda_p = (b/t) / (28.4 * \varepsilon * \nu_{k\sigma})$

Για τη δοκό που μελετάμε ισχύει $\varepsilon = \sqrt{235/355} = 0.81$ (S355) και $\nu_{k\sigma} = 23.9$ (σχήμα 3.1).

Έτσι προκύπτει $b/t = \lambda_p * 28,4 * \epsilon * \nu_{k\sigma} = 1,70 * 28,480,81 * \nu_{23,9} = 191,18$.

Συγχρόνως ισχύει ότι $\lambda_w = b / (86,4 * t * \epsilon)$.

Άρα $b/t = \lambda_w * 86,4 * \epsilon = 1,75 * 86,4 * 0,81 = 122,47$.

Με τη χρήση του excel εφαρμόζουμε τη μέθοδο και για τις δοκούς κύλισης των άλλων δυο γερανογεφυρών (20τ και 40τ). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.3 : Οριακοί λόγοι b/t για τις συγκολλητές δοκούς κύλισης γερανογεφυρών

G	G+Q	$\mu = G / (G+Q)$	$K = (\mu / 1,35) + (0,9 / 1,35) * (1 - \mu)$	ψ	$\lambda_p = (1,1 / K) + 0,055 * (3 + \psi)$	$\lambda_w = 1,2 / K$	$\rho = (\lambda_p - 0,055 * (3 + \psi)) / \lambda_p^2$
26,69	83,12	0,32	0,69	-1	1,70	1,74	0,55
42,88	149,32	0,29	0,69	-1	1,71	1,74	0,55
53,9	261,44	0,21	0,68	-1	1,72	1,76	0,54

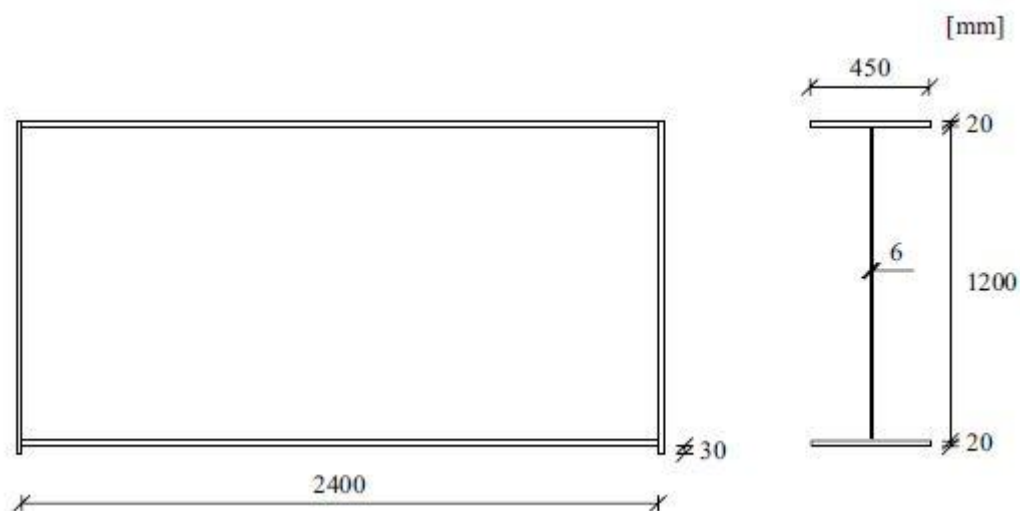
$E_s = 1,1 / (K * (\lambda_p - 0,055 * (3 + \psi)))$	$E_t = 1,2 / (K * \lambda_w)$	f_y	ϵ	K_σ	$b_p / t = \lambda_p * 28,4 * \epsilon * \text{sqr}(K_\sigma)$	$b / t = \lambda_w * 86,4 * \epsilon$
1	1	355	0,81	23,9	192,47	122,17
1	1	355	0,81	23,9	193,13	122,62
1	1	355	0,81	23,9	194,72	123,70

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι οριακοί λόγοι (ύψους προς πάχος κορμών), για τις δοκούς κύλισης των γερανογεφυρών, που εξάγουμε από αυτή τη μεθοδολογία προσεγγίζουν την τιμή που δίνει ο EC3 για το φαινόμενο της ευαισθησίας των κορμών έναντι τοπικής αστάθειας ($b/t \leq 120$).

4 Βαθμονόμηση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση δοκών από επίπεδα ελάσματα

4.1 Πειραματικά δεδομένα της δοκού που χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται χρήση των πειραματικών δεδομένων από τη διδακτορική διατριβή του Jonas Gozzi (βλέπε βιβλιογραφία [11]). Σε αυτή τη διατριβή χρησιμοποιήθηκε μια δοκός με μήκος 2.4μ. Η διατομή της δοκού είναι συγκολλητή μορφής διπλού ταυ. Στις άκρες της δοκού υπάρχουν εγκάρσιες νευρώσεις. Η δοκός και οι διαστάσεις τις φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

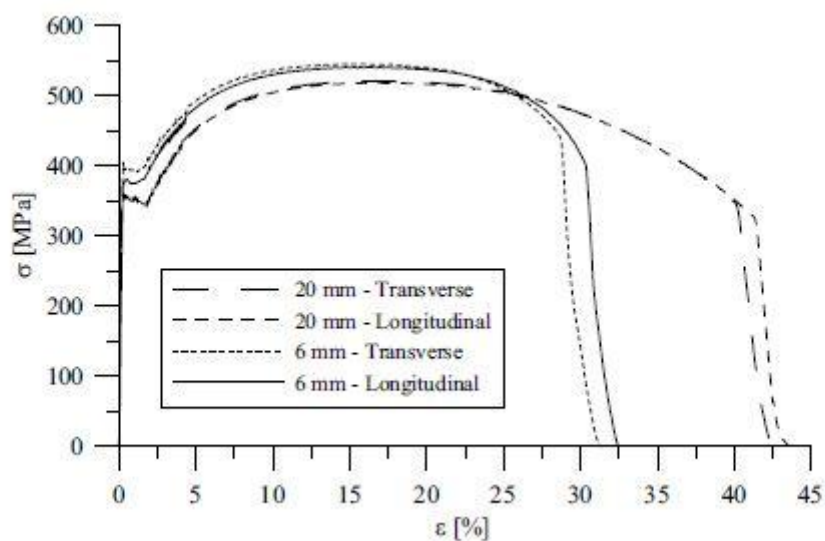


Σχήμα 4.1: Δοκός πειραμάτων



Εικόνα 4.1: Δοκός πειραμάτων

Το πάχος των εγκάρσιων νευρώσεων είναι ίδιο με αυτό των πελμάτων 20mm. Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων προέκυψε από πειράματα και φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



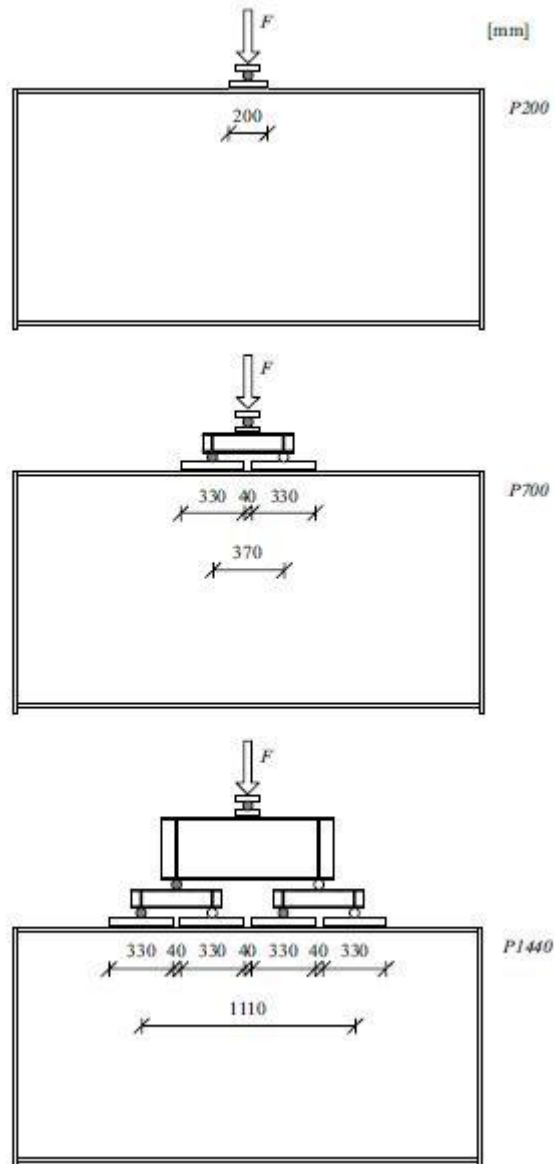
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων για τη δοκό των πειραμάτων

Πίνακας 4.1: Όρια διαρροής και αστοχίας για τη δοκό των πειραμάτων

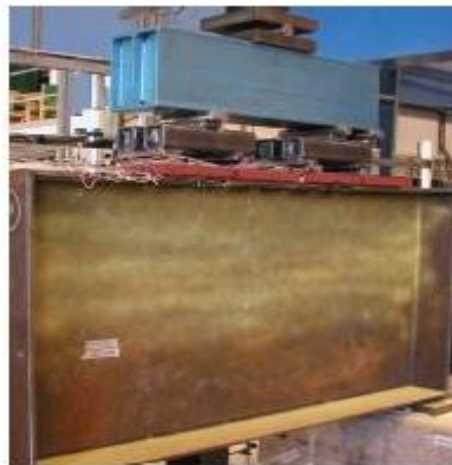
Section	Direction	Number of tests	f_y [MPa]	f_u [MPa]
Web	Longitudinal	3	371	542
Web	Transverse	3	394	543
Flange/Stiffener	Longitudinal	3	354	519
Flange/Stiffener	Transverse	3	354	521

Για τον κορμό της δοκού υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας 185 GPa ενώ για τα πέλματα και τις εγκάρσιες νευρώσεις 200GPa. Ο λόγος του Poisson είναι 0.3.

Χρησιμοποιήθηκαν τρεις τύποι φορτίσεων ανάλογα με το μήκος εφαρμογής των φορτίων. Οι τύποι ήταν οι P200,P700 και P1440. Η εφαρμογή των φορτίων στα πειράματα έγινε μέσω πλακών πάχους 40mm. Για την πρώτη περίπτωση (P200) το μήκος της πλάκας φόρτισης ήταν 200mm. Για τις άλλες δυο περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν περισσότερες από μια πλάκες με μήκος 330mm. Οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στο παρακάτω σχήμα και στην εικόνα.



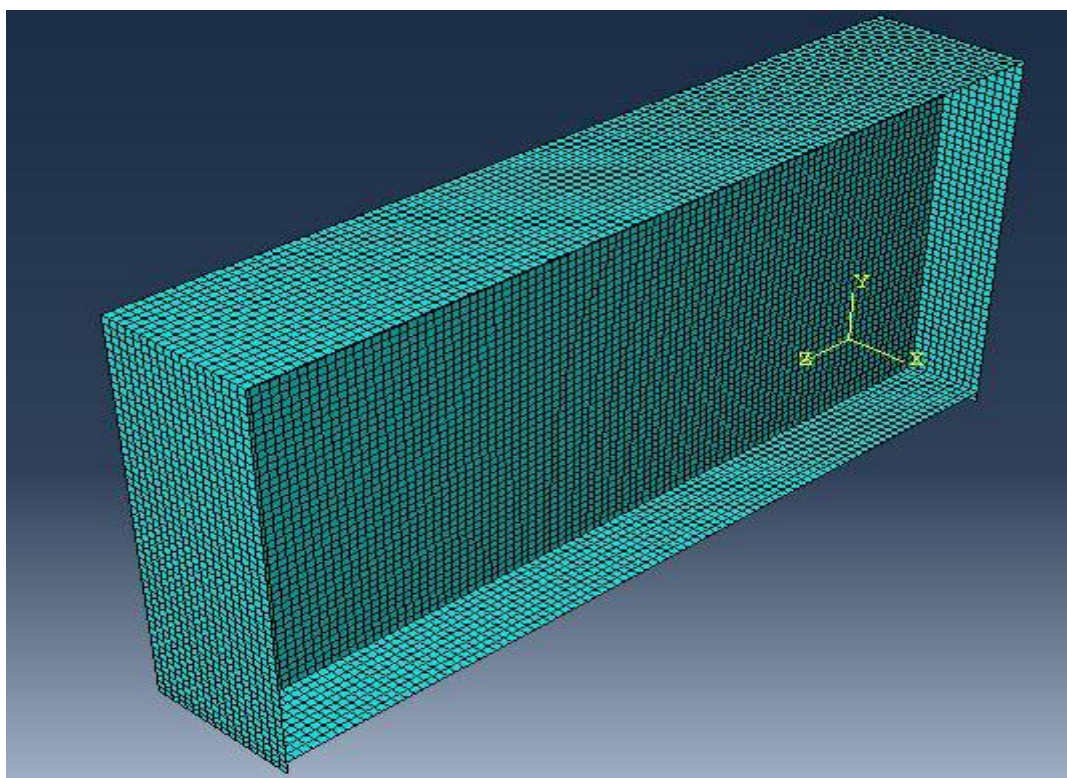
Σχήμα 4.3: Τύποι φορτίσεων στα πειράματα



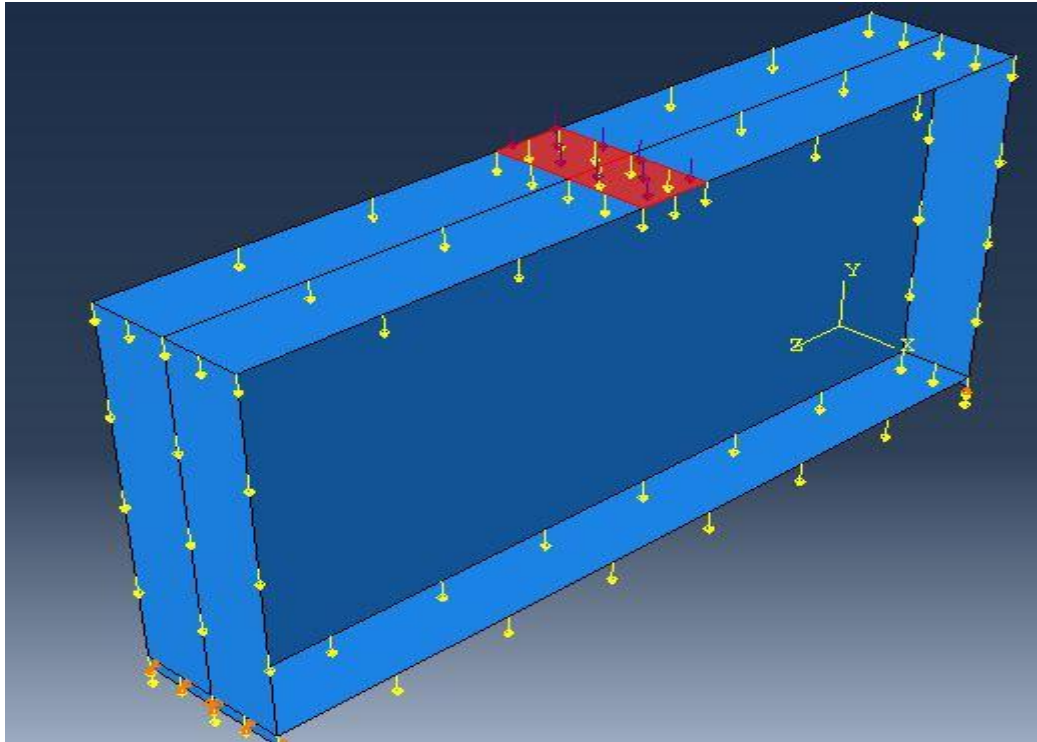
Εικόνα 4.2: Πειραματική διάταξη φόρτισης P1440

4.2 Χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και σύγκριση αποτελεσμάτων με αυτά των πειραμάτων

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Abaqus 6.10-1. Η προσομοίωση έγινε με τετραεδρικά στοιχεία κελύφους με διαστάσεις περίπου 25mm. Η φόρτιση επιβλήθηκε με τη μορφή πίεσης σε επιφάνεια ίδιου εμβαδού με αυτή των πλακών φόρτισης. Δεν έγινε κάποια προσομοίωση των πλακών φόρτισης πράγμα που όπως θα φανεί παρακάτω δεν επηρέασε σημαντικά τα αποτελέσματα. Η προσομοίωση και η φόρτιση της δοκού παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



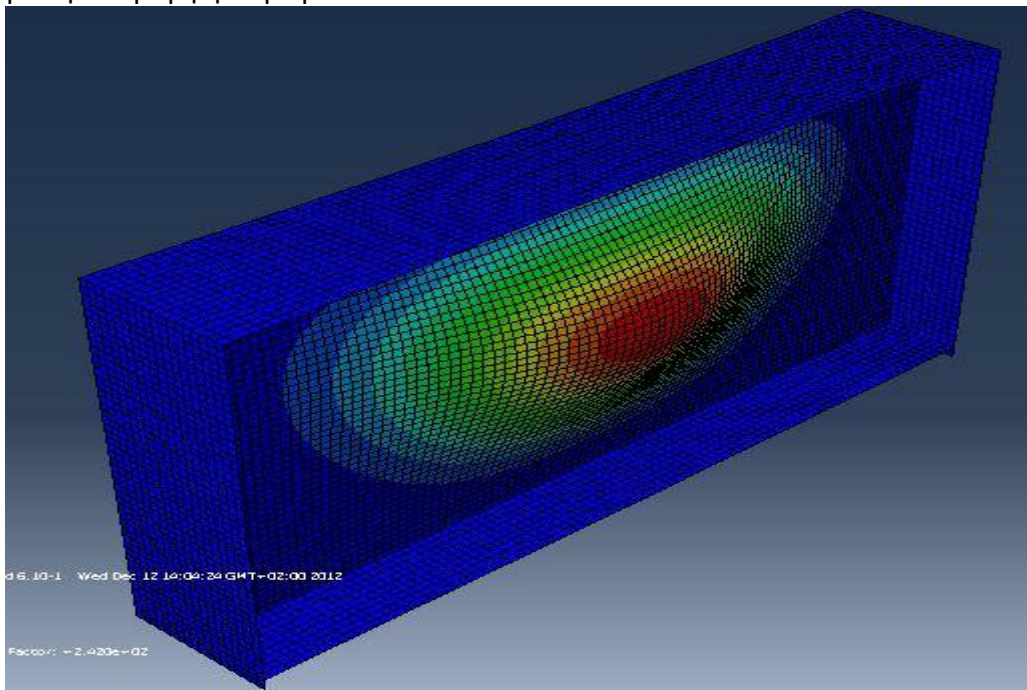
Εικόνα 4.3: Ανάλυση της δοκού με τετραεδρικά στοιχεία κελύφους



Εικόνα 4.4: Μοντελοποίηση της φόρτισης P200

Για τις συνοριακές συνθήκες στα κάτω όρια των εγκάρσιων νευρώσεων δεσμεύτηκαν οι μεταφορικοί βαθμοί στη διεύθυνση Y. Στη μια πλευρά της δοκού δεσμεύτηκαν και οι μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας στη διεύθυνση Z. Τέλος, στα μέσα των ευθειών των κάτω άκρων των εγκάρσιων νευρώσεων δεσμεύτηκαν οι μεταφορικοί β. ελευθερίας στη διεύθυνση X.

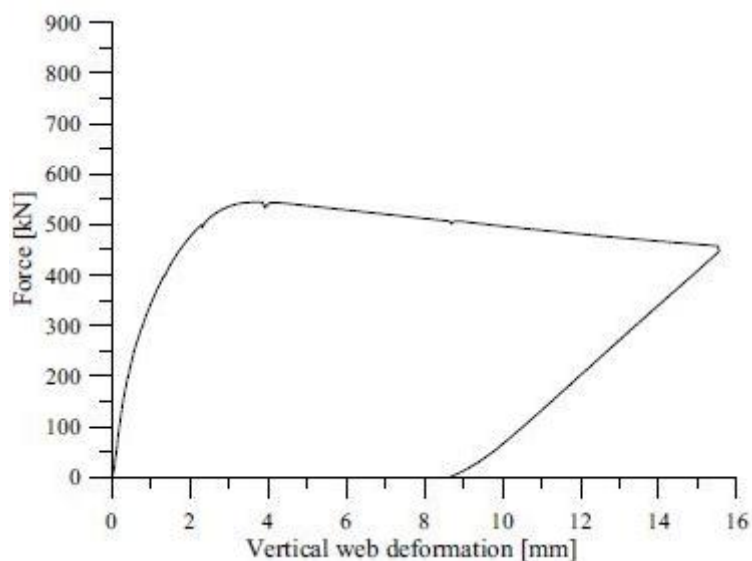
Για την προσομοίωση ατελειών έγινε πρώτα ανάλυση ελαστικού λυγισμού. Η πρώτη ιδιομορφή λυγισμού χρησιμοποιείται για την μορφοποίηση της ατέλειας. Η μέγιστη τιμή της ατέλειας λαμβάνεται $h/200=1200/200=6\text{mm}$. Για την φόρτιση P200 φαίνεται στην παρακάτω εικόνα η πρώτη ιδιομορφή λυγισμού.



Εικόνα 4.5: Πρώτη ιδιομορφή λυγισμού

Στην συνέχεια εκτελείται η ανάλυση Riks (στην οποία λαμβάνεται υπόψη η ατέλεια που περιγράφηκε πιο πάνω) στην οποία επιβάλλεται το φορτίο σταδιακά. Από τα αποτελέσματα εξάγεται η τιμή του οριακού φορτίου καθώς και η αντίστοιχη μετατόπιση. Τα αποτελέσματα παρατίθενται μαζί με τα αντίστοιχα των πειραματικών

- 1) Φόρτιση P200. Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα στο σχήμα 4.4 φαίνεται το διάγραμμα εφαρμοζόμενης δύναμης – κατακόρυφης παραμόρφωσης στον κορμό. Η κατακόρυφη παραμόρφωση του κορμού λαμβάνεται ως η διαφορά της κατακόρυφης μετατόπισης της πλάκας φόρτισης με την κατακόρυφη μετατόπιση του κάτω πέλματος της δοκού.

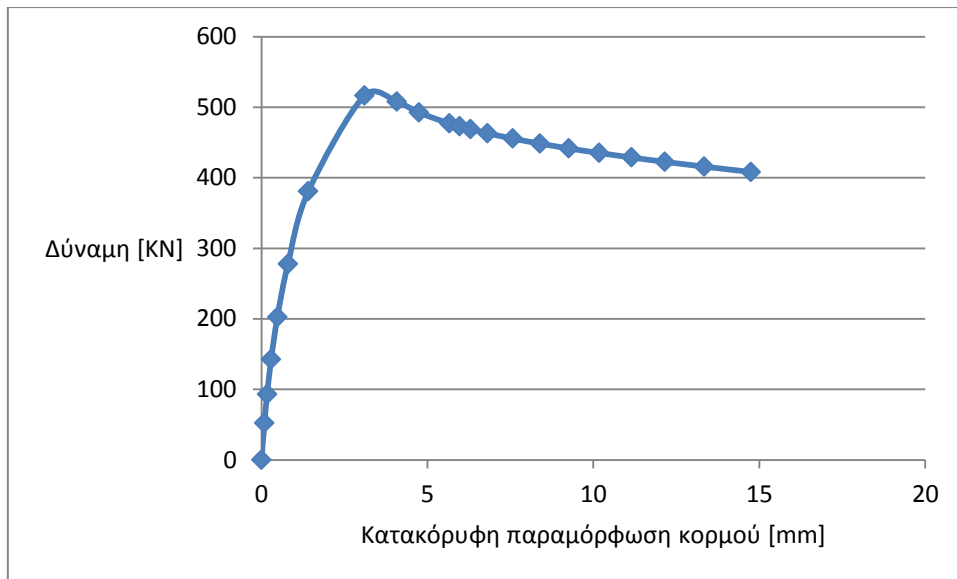


Σχήμα 4.4: Διάγραμμα δύναμης κατακόρυφης παραμόρφωσης (πειράματα)

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι το οριακό φορτίο είναι 544kN. Στο πιο κάτω σχήμα παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα όπως εξάγεται από την ανάλυση με το λογισμικό Abaqus.

Πίνακας 4.2: Δύναμη-Κατακόρυφη Παραμόρφωση

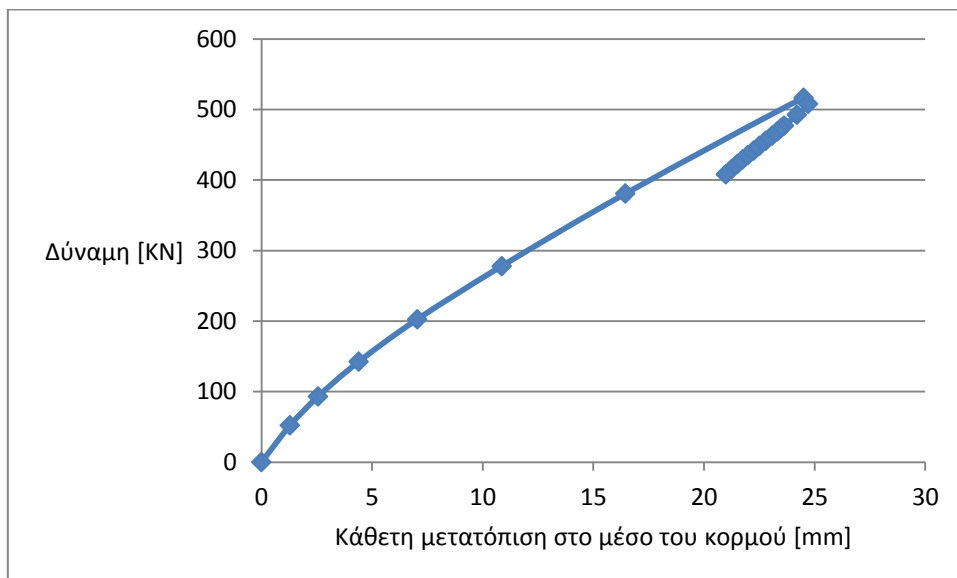
U2(up.)- U2(lower)	Loading factor	load
0	0	0
-0,08883	0,0867993	52,07958
-0,17081	0,154926	92,9556
-0,29109	0,237405	142,443
-0,47921	0,337456	202,4736
-0,79827	0,463188	277,9128
-1,41072	0,63451	380,706
-3,10286	0,860827	516,4962
-4,0766	0,846216	507,7296
-4,74273	0,820747	492,4482



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα δύναμης κατακόρυφης παραμόρφωσης (πεπερασμένα στοιχεία)

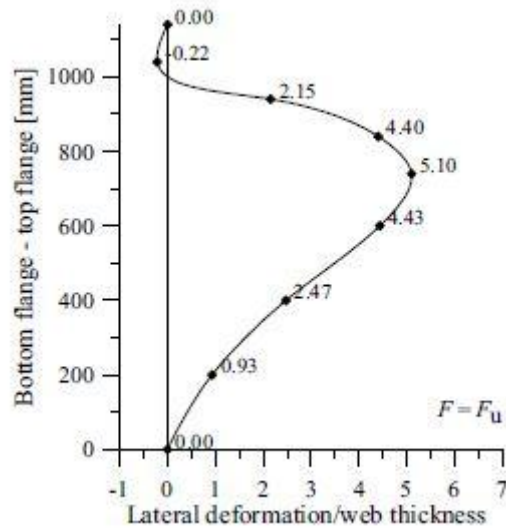
Από την ανάλυση με τα πεπερασμένα στοιχεία προκύπτει ότι το οριακό φορτίο είναι 516.50kN σχετικά κοντά σε αυτό των πειραματικών δεδομένων. Αντίστοιχα και η μετατόπιση είναι 3.10mm ίδια περίπου με αυτή των πειραμάτων.

Το πιο κάτω διάγραμμα (ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία) δείχνει τη μεταβολή της κάθετης στον κορμό μετατόπισης (στο μέσον του κορμού) με την επιβαλλόμενη δύναμη.



Σχήμα 4.6 : Διάγραμμα δύναμης –κάθετης στον κορμό μετατόπισης

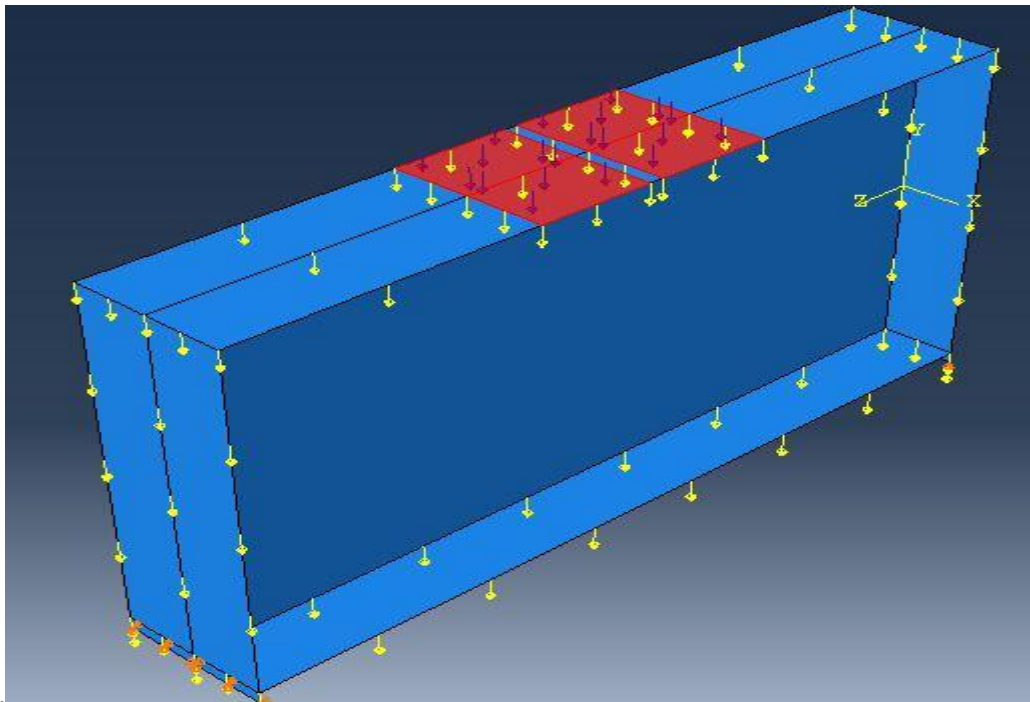
Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η μετατόπιση αυτή είναι περίπου 25mm όταν έχουμε την εφαρμογή του μέγιστου οριακού φορτίου. Στο επόμενο διάγραμμα (πειραματικά δεδομένα) φαίνεται η καθ' ύψος στον κορμό κάθετη του μετατόπιση.



Σχήμα 4.7 : Κάθετη μετατόπιση καθ' ύψος του κορμού

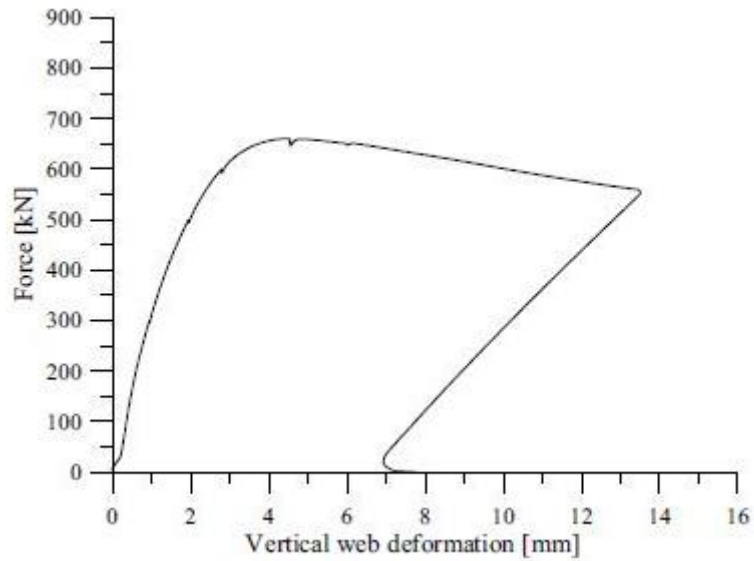
Εδώ προκύπτει ότι η κάθετη μετατόπιση στο μέσο του κορμού είναι $4.43 \cdot 6 = 26.58 \text{ mm}$ περίπου ίδια με αυτή της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.

2) Φόρτιση P700. Στη πιο κάτω εικόνα φαίνεται η προσομοίωση της φόρτισης (αντί των πλακών φόρτισης)



Εικόνα 4.6: Μοντελοποίηση της φόρτισης P700

Και γι αυτή την περίπτωση φόρτισης ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογία για την προσομοίωση γεωμετρικής ατέλειας. Δηλαδή έγινε πρώτα ανάλυση ελαστικού λυγισμού και η πρώτη ιδιομορφή χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση Riks (με μέγιστη τιμή παραμόρφωσης 6mm) σαν ατέλεια. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων για την P700 φαίνονται στο πιο κάτω σχήμα.

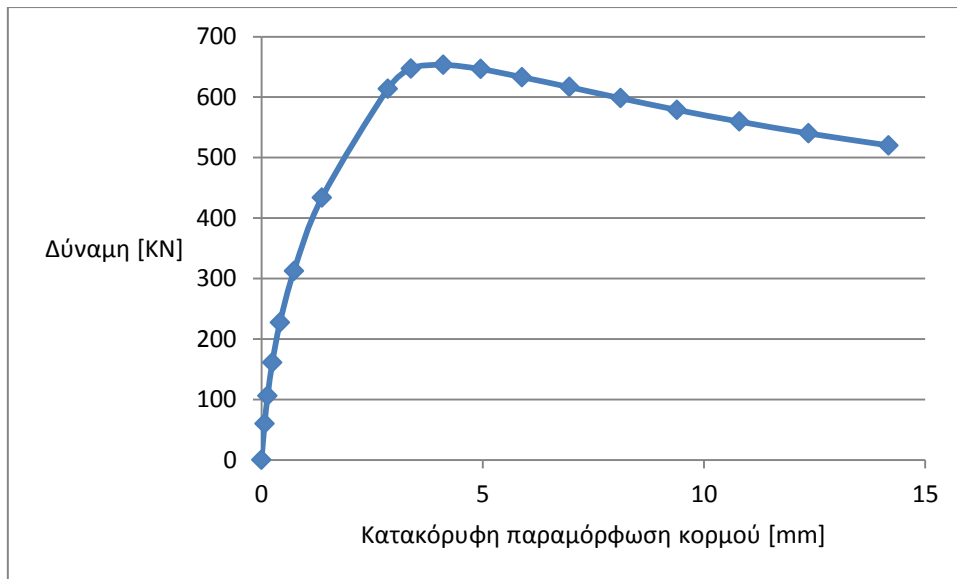


Σχήμα 4.8: Διάγραμμα δύναμης κατακόρυφης παραμόρφωσης (πειράματα)

Η παραμόρφωση εδώ προκύπτει ως η διαφορά της μέσης κατακόρυφης μετατόπισης των δυο φορτισμένων πλακών με τη μετατόπιση του κάτω πέλματος της δοκού. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι το οριακό φορτίο είναι 660kN ενώ όταν αυτό εφαρμόζεται η παραμόρφωση είναι περίπου 4mm. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται το αντίστοιχο αποτέλεσμα της ανάλυσης με τη βοήθεια του λογισμικού Abaqus.

Πίνακας 4.3: Δύναμη-Κατακόρυφη Παραμόρφωση

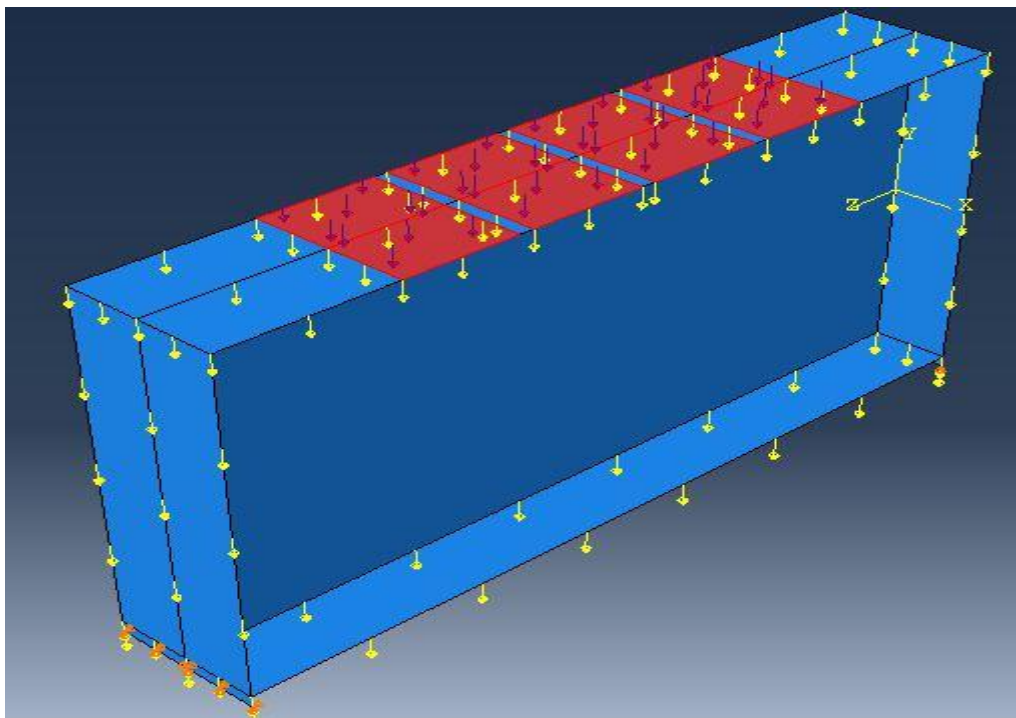
U2(up)- U2(lower)	Force
0	0
-0,07107	59,98076
-0,13967	106,0654
-0,24526	161,0336
-0,41967	227,4118
-0,73432	312,5332
-1,36641	433,7375
-2,85352	613,5059
-3,37572	647,2865
-4,10795	653,2743
-4,95405	646,3989
-5,88893	633,0205
-6,95591	616,6174
-8,11309	598,2571
-9,38655	578,9378
-10,8024	559,5009
-12,3618	540,036
-14,1729	520,1546



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα δύναμης κατακόρυφης παραμόρφωσης (πεπερασμένα στοιχεία)

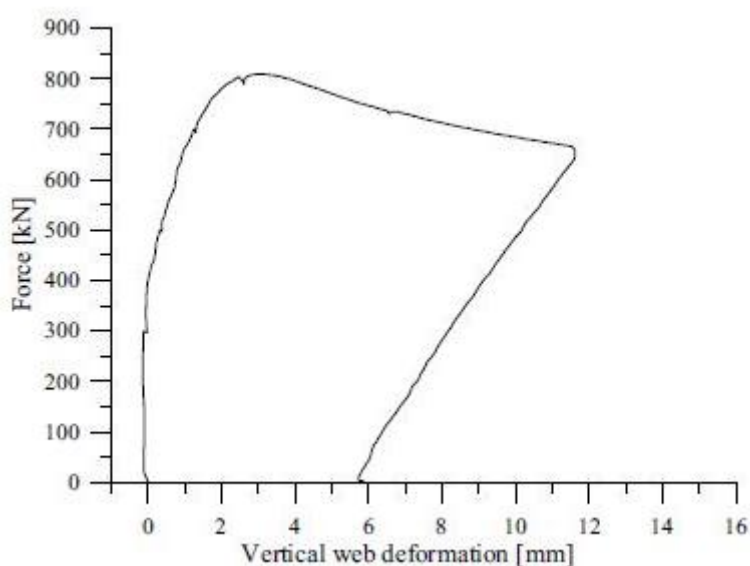
Από το διάγραμμα προκύπτει οριακό φορτίο 653.27kN με αντίστοιχη παραμόρφωση 4.11mm. Όπως είναι εμφανές και εδώ τα αποτελέσματα είναι αρκετά κοντά.

3) Φόρτιση P1440. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται η προσομοίωση των επιφανειών που τους ασκείται η αντίστοιχη πίεση (αντί των φορτισμένων πλακών) για αυτή τη περίπτωση φόρτισης.



Εικόνα 4.7: Μοντελοποίηση της φόρτισης P1440

Για την P1440 από τα πειραματικά αποτελέσματα παίρνουμε το ακόλουθο διάγραμμα επιβαλλόμενης δύναμης- κατακόρυφης παραμόρφωσης του κορμού.

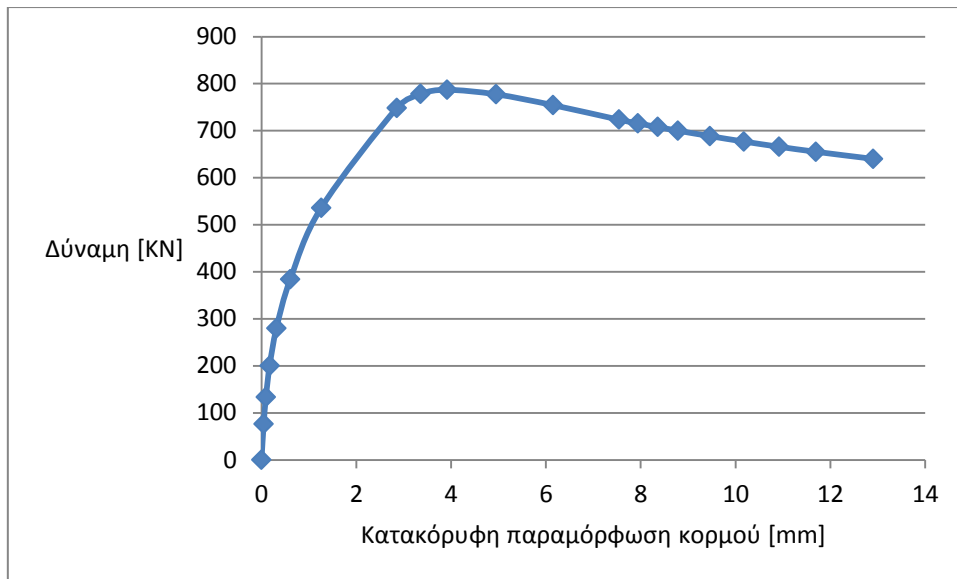


Σχήμα 4.10: Διάγραμμα δύναμης κατακόρυφης παραμόρφωσης (πειράματα)

Από το διάγραμμα προκύπτει οριακό φορτίο 808kN για αντίστοιχη παραμόρφωση περίπου 4mm. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα που προέκυψε από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία.

Πίνακας 4.4: Δύναμη-Κατακόρυφη Παραμόρφωση

U2(up)- U2(lower)	Force
0	0
-0,0461	76,10364
-0,09317	133,1631
-0,17156	199,9179
-0,31542	279,891
-0,60744	383,9769
-1,2592	536,0112
-2,85626	748,4409
-3,35678	778,0959
-3,91617	787,0077
-4,94531	777,465
-6,15256	754,3818
-7,53947	723,4416
-7,93906	715,6359
-8,35532	707,8446
-8,78477	700,0407
-9,4581	688,5513
-10,1715	677,0322



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα δύναμης κατακόρυφης παραμόρφωσης (πεπερασμένα στοιχεία)

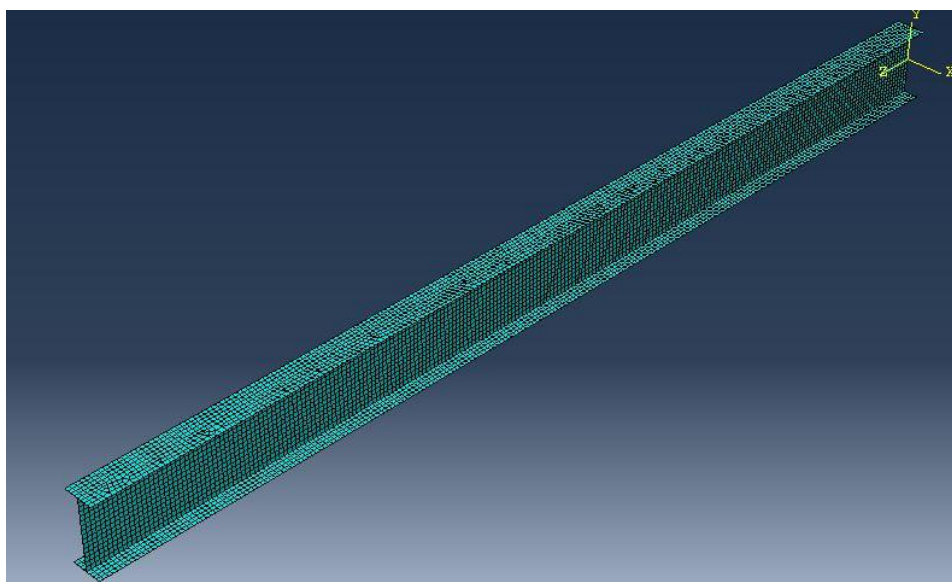
Από το διάγραμμα προκύπτει ότι το οριακό φορτίο είναι 787kN με αντίστοιχη παραμόρφωση 3.92mm αποτελέσματα αρκετά κοντινά με αυτά των πειραματικών.

Από τη παρουσίαση των συγκριτικών αποτελεσμάτων προκύπτουν αρκετά κοντινά αποτελέσματα μεταξύ πειραμάτων και ανάλυσης με τη χρήση λογισμικού. Οι όποιες μικρές διαφορές εμφανίστηκαν, μπορούν να δικαιολογηθούν από τη μη προσομοίωση των φορτισμένων πλακών οι οποίες εφαρμόστηκαν στα πειράματα. Μπορούμε λοιπόν να πούμε με αρκετή βεβαιότητα ότι μπορεί να γίνει χρήση τετραεδρικών πεπερασμένων στοιχείων κελύφους για την ανάλυση δοκών αποτελούμενων από επίπεδα ελάσματα.

5 Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στις συγκολλητές δοκούς κύλισης των γερανογεφυρών (10tn, 20tn, 40tn)

5.1 Προσομοίωση της συγκολλητής δοκού κύλισης της γερανογέφυρας των 20tn

Για την δοκό (συγκολλητή 20τ) που προέκυψε, από την ανάλυση σύμφωνα με τους ελέγχους του EC3, στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι αυτό των τετραεδρικών στοιχείων κελύφους που όπως αποδείχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην ανάλυση δοκών που αποτελούνται από επίπεδα ελάσματα. Η προσομοίωση της δοκού έγινε με τετραεδρικά στοιχεία των 40mm όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



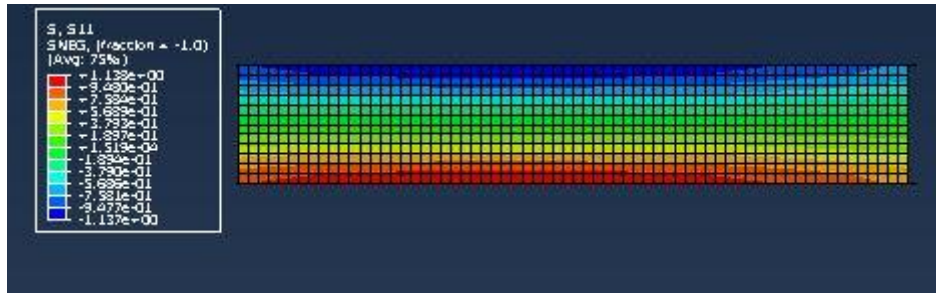
Σχήμα 5.1: Προσομοίωση δοκού κύλισης με τετραεδρικά στοιχεία 40mm

Η επιλογή του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων έγινε μετά από διαδοχικές επιλύσεις της δοκού (στοιχεία 80mm, στοιχεία 40mm κ.ο.κ) μόνο για τη φόρτιση του ιδ. βάρους. Έτσι έγινε και η επιλογή των συνοριακών συνθηκών για τη δοκό. Για τη δοκό κύλισης της γερανογέφυρας των 10τ, μόνο για τη φόρτιση του ιδίου βάρους, η μέγιστη ροπή θα είναι στο μέσο και θα έχει τιμή: $M=q \cdot l^2/8=0.96 \cdot 8^2/8=7.68 \text{KNm}$.

Επομένως η μέγιστη ορθή τάση στο σημείο σύνδεσης κορμού πέλματος θα είναι :

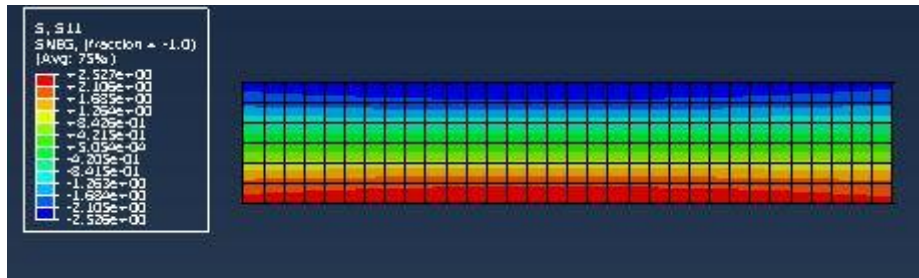
$$\sigma_x=(M/I_y) \cdot y=(7680000/59021.87 \cdot 10^4) \cdot 225=2.93 \text{MPa}.$$

Με τη χρήση στοιχείων 40mm και συνοριακές συνθήκες δέσμωσης των μεταφορικών βαθμών ελευθερίας σε όλο το ύψος του κορμού έχουμε το ακόλουθο αποτέλεσμα για την ορθή τάση σ_x .



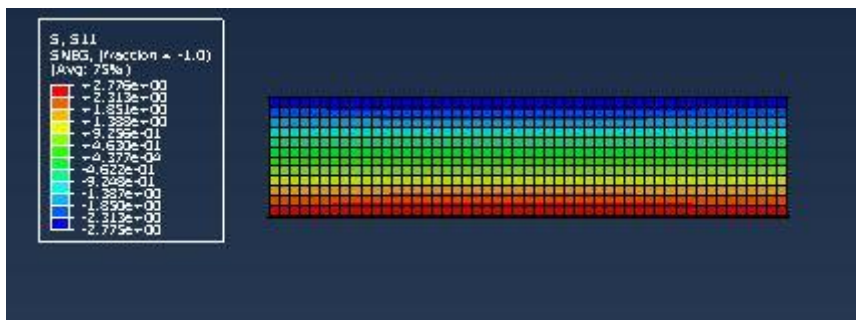
Σχήμα 5.2: Ορθή τάση καθ' ύψος του κορμού με δέσμευση των μεταφορικών β.ελευθερίας σε όλο το ύψος του κορμού (στοιχεία 40mm)

Είναι προφανές ότι οι τάσεις που φαίνονται στο σχήμα δεν είναι αυτές που αναμένονταν. Αν χρησιμοποιήσουμε δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων των 80mm και συνοριακές συνθήκες τη δέσμευση των μεταφορικών βαθμών ελευθερίας στη θέση του κ.βάρους του κορμού στα άκρα της δοκού θα έχουμε το παρακάτω αποτέλεσμα.



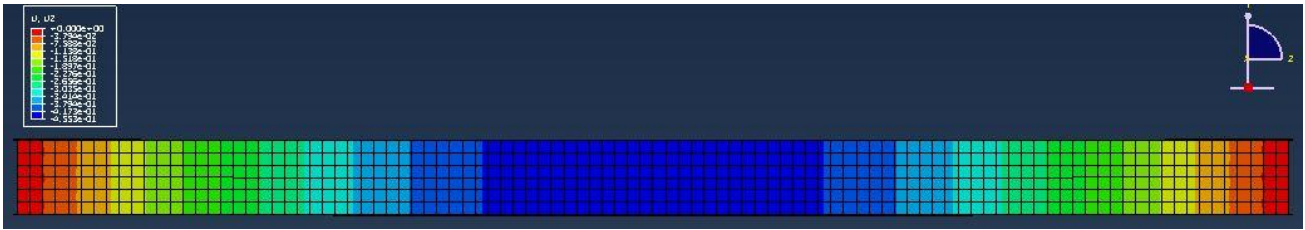
Σχήμα 5.3 :Ορθή τάση καθ' ύψος του κορμού με δέσμευση των μεταφορικών β.ελευθερίας στη θέση του κ.βάρους του κορμού (στοιχεία 80mm)

Είναι φανερό από αυτή την επίλυση είμαστε πιο κοντά στο αναμενόμενο αποτέλεσμα. Αν πυκνώσουμε ακόμα πιο πολύ το δίκτυο χρησιμοποιώντας στοιχεία των 40mm θα έχουμε το αποτέλεσμα του σχήματος 5.4.

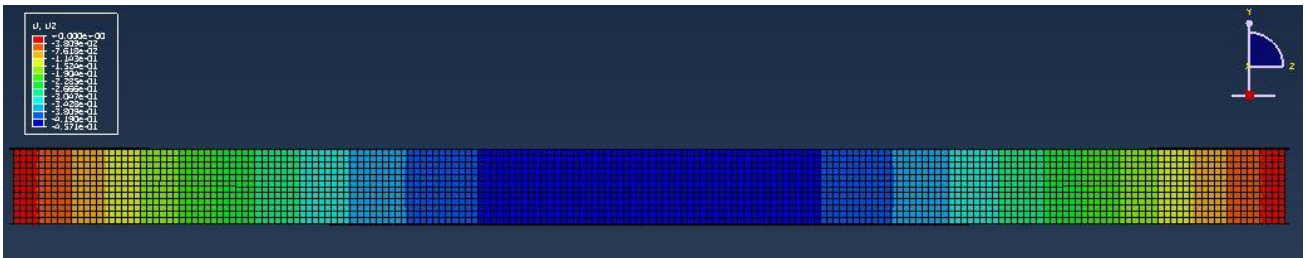


Σχήμα 5.4: Ορθή τάση σ_x καθ' ύψος του κορμού με τετραεδρικά στοιχεία κελύφους των 40mm

Η τάση που προκύπτει είναι 2.78 MPa πολύ κοντά σε αυτή που αναμέναμε. Το ίδιο μπορούμε να πούμε για τη μορφή του διαγράμματος της κατανομής της τάση καθ' ύψος που όπως φαίνεται στο σχήμα είναι τριγωνικό με συντελεστή $\psi=-1$. Για την επιλογή της πύκνωσης του δικτύου έγινε και έλεγχος της κατακόρυφης μετατόπισης στον κορμό.



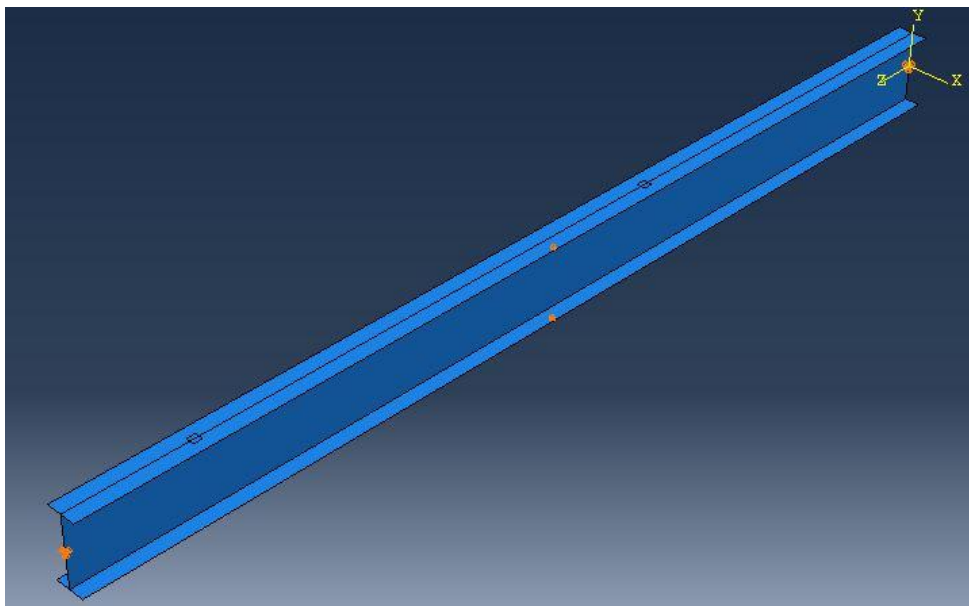
Σχήμα 5.5:Κατακόρυφη μετατόπιση δοκού (στοιχεία 80mm)



Σχήμα 5.6:Κατακόρυφη μετατόπιση δοκού (στοιχεία 40 mm)

Από τα παραπάνω σχήματα είναι προφανές ότι έχουμε το ίδιο αποτέλεσμα για την κατακόρυφη μετατόπιση στη δοκό. Σύμφωνα με τα προηγούμενα καταλήγουμε στο δίκτυο των στοιχείων των 40mm.

Η προσομοίωση της δοκού όσο αφορά τις συνοριακές συνθήκες φαίνεται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7:Συνοριακές συνθήκες συγκολλητής δοκού

Όπως φαίνεται στο σχήμα, δεσμεύονται οι μεταφορικοί β.ελευθερίας στα κ.βάρους των κορμών (u_1, u_2, u_3) καθώς και η οριζόντια μετατόπιση στο μέσο των πελμάτων (u_1). Η δέσμευση αυτή γίνεται γιατί σε αυτή τη συγκολλητή δοκό χρησιμοποιήσαμε πλευρική στήριξη για να ικανοποιηθεί ο έλεγχος σε παραμόρφωση υπό οριζόντια φορτία.

Για τη συγκολλητή δοκό των 20t το ισοδύναμο φορτίο κόπωσης σύμφωνα με τον EC3 είναι:

$$Q_e = \lambda_i * \phi_{fat} * Q_{max,i}$$

Όπου $\lambda_i = 0.794$ για ορθές τάσεις.

$$\phi_{fat} = (1 + \phi_2) / 2 = (1 + 1.15) / 2 = 1.075.$$

$Q_{max,i} = 131.53 \text{ kN}$ (φορτίο τροχού στη περισσότερο φορτισμένη δοκό με συντελεστή 1).

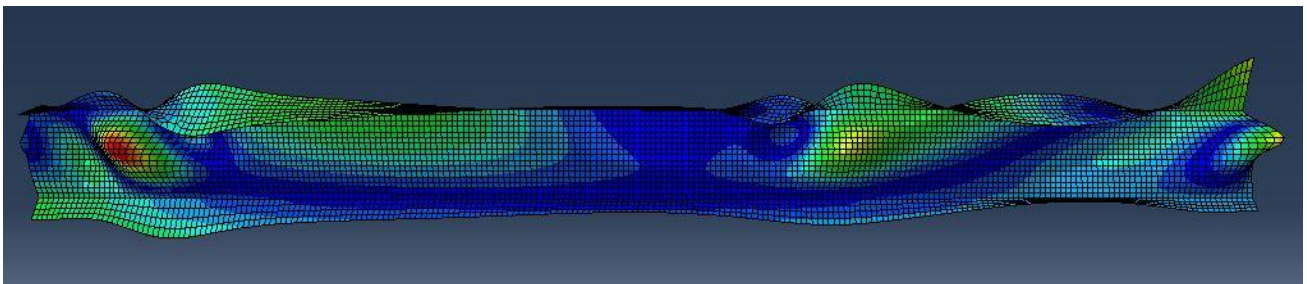
$$Q_e = 0.794 \cdot 1.075 \cdot 131.53 = 112.27 \text{ kN}.$$

Η αντίστοιχη κατηγορία λεπτομέρειας, σύμφωνα με τον EC3, είναι η 71 (71 MPa). Για την προσομοίωση της φόρτισης ασκείται στη δοκό, εκτός από το ίδιο βάρος, πίεση σε επιφάνεια 70mm*70mm (όση είναι επιφάνεια της τροχιάς) στις δυο θέσεις που τα φορτία δίνουν τη μέγιστη ροπή και άρα τη μέγιστη ορθή τάση. Οι θέσεις αυτές είναι σύμφωνα με όσα έγιναν στο δεύτερο κεφάλαιο σε απόσταση 3m και 7m από την άκρη της δοκού. Οι δυο θέσεις φαίνονται στο σχήμα 5.7. Η πίεση είναι:

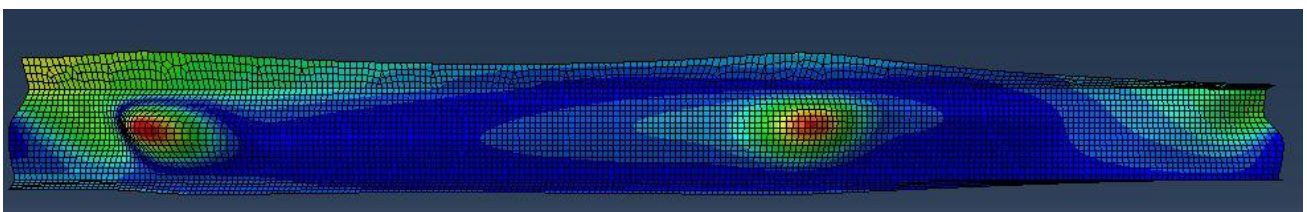
$$P = 112.27 \cdot 1000 / (70 \cdot 70) = 22.91 \text{ MPa}.$$

5.2 Ανάλυση κόπωσης για τη συγκολλητή δοκό της γερανογέφυρας των 20tn με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

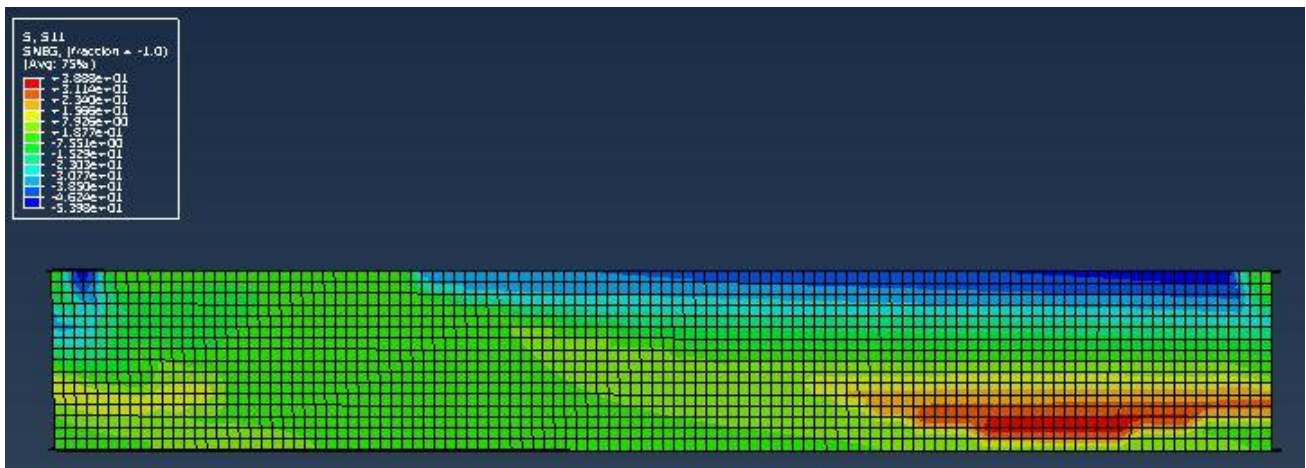
Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε μια σειρά δοκών που είχαν ίδια πέλματα με αυτά τις συγκολλητής δηλαδή με διαστάσεις 250mm*25mm κορμό με ύψος 550mm (ίδιο με της συγκολλητής του δευτέρου κεφαλαίου) και πάχος που μεταβαλλόταν μεταξύ τιμών 27.5mm και 4.58mm ώστε να έχουμε λόγους h_w/t_w από 20 έως 120. Σε όλες τις δοκούς ασκήθηκε το ισοδύναμο φορτίο κόπωσης με τον τρόπο που αναλύθηκε στη προηγούμενη παράγραφο. Σε πρώτη φάση έγινε ανάλυση χωρίς την χρήση ατέλειας. Στη συνέχεια έγινε ανάλυση ελαστικού λυγισμού και προσδιορίστηκαν οι αντίστοιχες ιδιομορφές για κάθε δοκό. Τέλος χρησιμοποιώντας για κάθε δοκό την κατάλληλη ιδιομορφή, προσομοιώθηκε η μορφή της ατέλειας της δοκού και έγινε η τελική ανάλυση (ανάλυση RIKS στο Abaqus). Προτιμήθηκαν οι ιδιομορφές που έδιναν τοπική παραμόρφωση στον κορμό στις θέσεις κάτω από την εφαρμογή των φορτίων κόπωσης. Το μέγεθος της ατέλειας λήφθηκε $h_w/200 = 2.75 \text{ mm}$. Ενδεικτικά στα παρακάτω σχήματα παρατίθενται οι χαρακτηριστικές ιδιομορφές που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και τα διαγράμματα των ορθών τάσεων καθ' ύψος του κορμού που προέκυψαν.



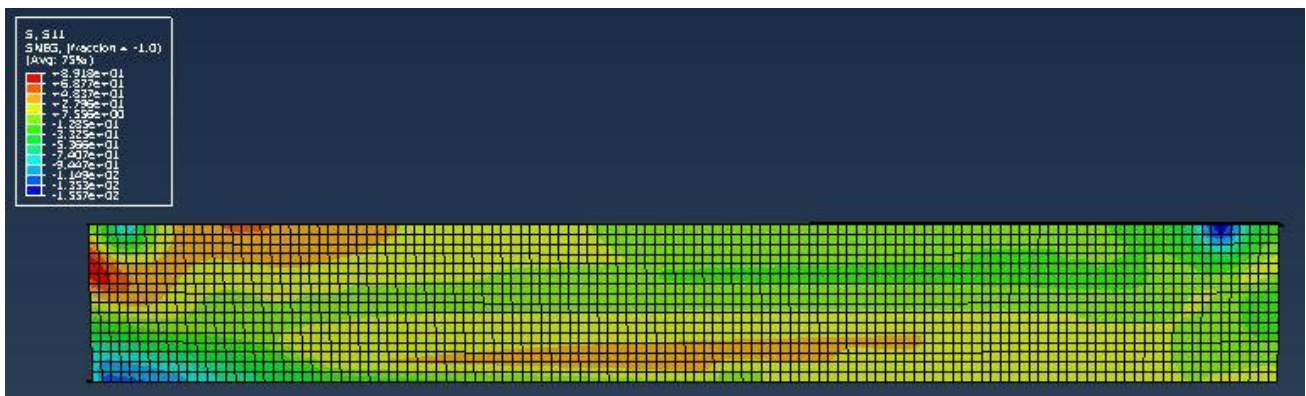
Σχήμα 5.8 : Ιδιομορφή 15 δοκός με $h_w/t_w = 40$



Σχήμα 5.9: Ιδιομορφή 7 δοκός με $h_w/t_w = 83.3$ (η συγκολλητή που αναλύθηκε στο δεύτερο κεφ.)



Σχήμα 5.10 : Ορθές τάσεις καθ' ύψος του κορμού για τη δοκό με $h_w/t_w=40$

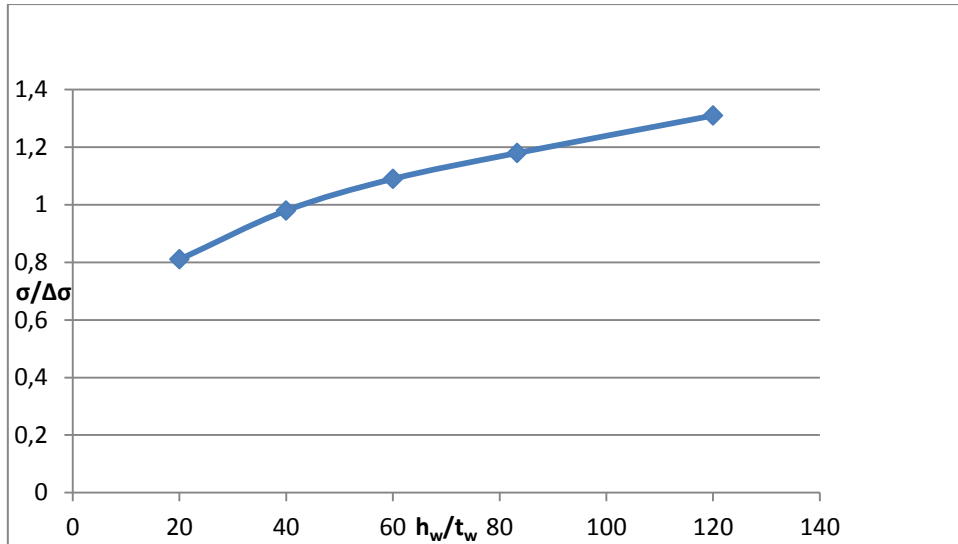


Σχήμα 5.11: Ορθές τάσεις καθ' ύψος του κορμού για τη δοκό με $h_w/t_w=83.3$

Έτσι συμπληρώθηκαν οι ακόλουθοι πίνακες και δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα.

Πίνακας 5.1: Τιμές τάσεων για δοκούς με ύψος κορμού 550mm χωρίς ατέλειες

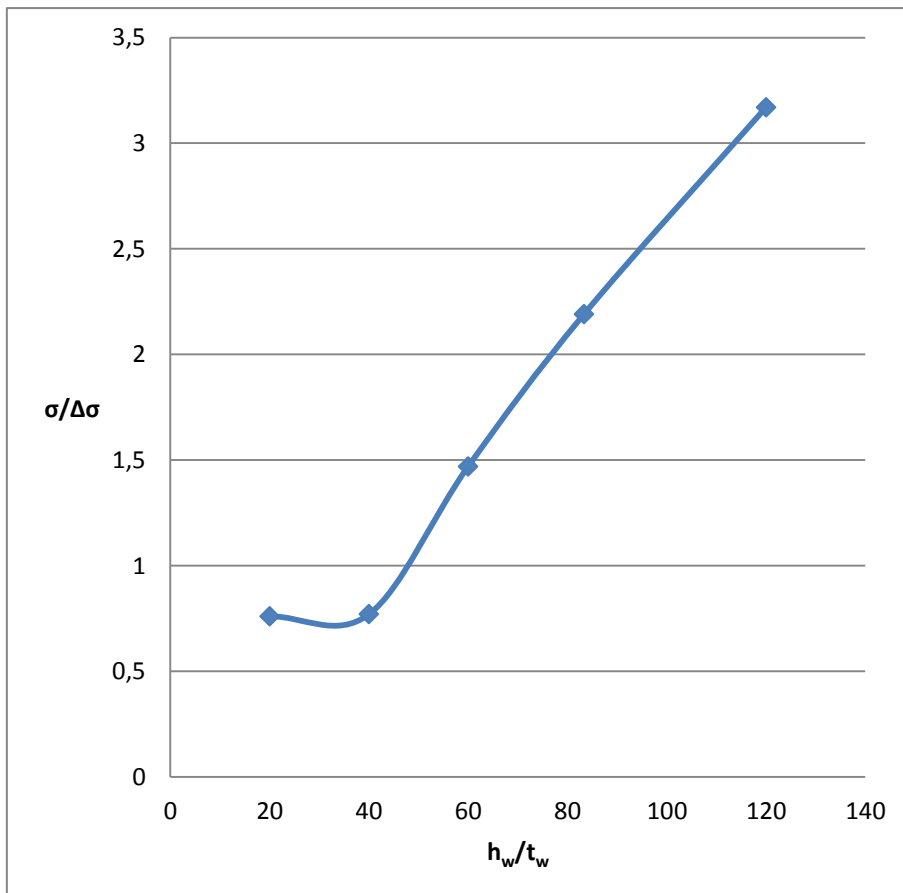
Ανάλυση χωρίς ατέλειες (20τ)					
h_w/t_w	20	40	60	83,3	120
σ (στη συγκολ.κορμού πέλματος)	57,68	69,86	77,26	84,16	93,27
$\sigma/\Delta\sigma$ (κατηγ.λεπτομέρειας 71)	0,81	0,98	1,09	1,18	1,31



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα συντελεστή εκμετάλλευσης λεπτομέρειας κόπωσης- h_w/t_w

Πίνακας 5.2: Τιμές τάσεων για δοκούς με ύψος κορμού 550mm με ατέλειες

Ανάλυση με ατέλειες (20τ) $h=550\text{mm}$					
h_w/t_w	20	40	60	83,3	120
σ (στη συγκολ.κορμού πέλματος)	53,77	54,62	104,2	155,74	225,31
$\sigma/\Delta\sigma$ (κατηγ.λεπτομέρειας 71)	0,76	0,77	1,47	2,19	3,17

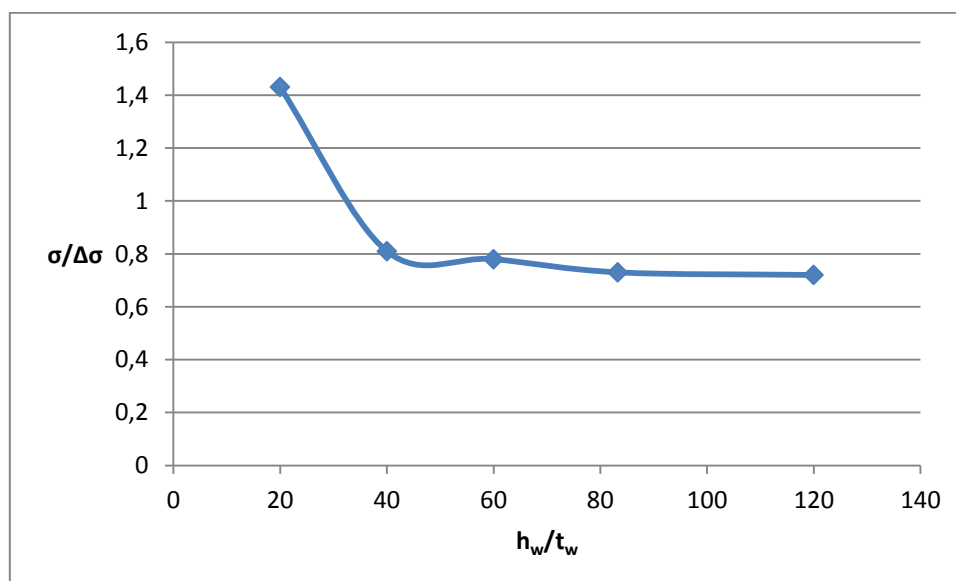


Σχήμα 5.13: Διάγραμμα συντελεστή εκμετάλλευσης λεπτομέρειας κόπωσης- h_w/t_w

Στη συνέχεια έγινε ανάλυση σε δοκούς για τις οποίες είχαμε σταθερό πάχος κορμού και μεταβαλλόμενο ύψος. Εδώ είναι φανερό ότι μεταβαλλόταν και το μέγεθος της ατέλειας $h_w/200$. Από τα αποτελέσματα προέκυψαν οι ακόλουθοι πίνακες και διαγράμματα.

Πίνακας 5.3: Τιμές τάσεων για δοκούς με πάχος κορμού 16mm

Ανάλυση με ατέλειες (20τ) $t=16\text{mm}$					
h_w/t_w	20	40	60	83,3	120
σ (στη συγκολ.κορμού πέλματος)	101,92	57,87	55,46	52,12	51,46
$\sigma/\Delta\sigma$ (κατηγ.λεπτομέρειας 71)	1,43	0,81	0,78	0,73	0,72

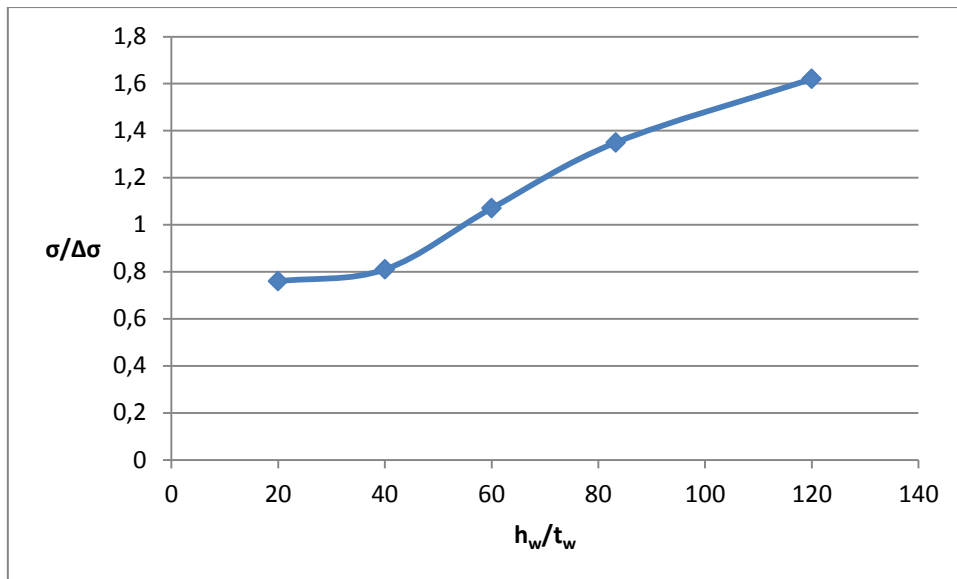


Σχήμα 5.14: Διάγραμμα συντελεστή εκμετάλλευσης λεπτομέρειας κόπωσης- h_w/t_w

Έπειτα έγινε ανάλυση κόπωσης με τον ίδιο τρόπο όπως πριν με τη διαφορά ότι η αύξηση του λόγου h_w/t_w επιτυγχάνεται με ταυτόχρονη αύξηση του ύψους και μείωση του πάχους του κορμού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο πίνακα 5.4 και στο σχήμα 5.15.

Πίνακας 5.4: Τιμές τάσεων για διάφορους λόγους h_w/t_w

Ανάλυση με ατέλειες (20τ)					
h_w/t_w	550/27,5	640/16	720/12	833/10	900/7,5
	20	40	60	83,3	120
σ (στη συγκολ.κορμού πέλματος)	53,77	57,87	76,3	95,64	115,38
$\sigma/\Delta\sigma$ (κατηγ.λεπτομέρειας 71)	0,76	0,81	1,07	1,35	1,62



Σχήμα 5.15: Διάγραμμα συντελεστή εκμετάλλευσης λεπτομέρειας κόπωσης- h_w/t_w

Τέλος για τις συγκολλητές δοκούς των 10τ, 20τ και 40τ που προέκυψαν από τους ελέγχους του δευτέρου κεφαλαίου έγινε ίδιου τύπου ανάλυση κόπωσης με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και τα αποτελέσματα ήταν τα ακόλουθα.

Πίνακας 5.5: Τιμές τάσεων για τις συγκολλητές δοκούς του δευτέρου κεφαλαίου

Ανάλυση με ατέλεια ($h_w/200$)			
h_w/t_w	72,7	83,3	90
σ (στη συγκόλ. κορμού πέλματος)	134,09	155,74	120,5
$\sigma/\Delta\sigma$ (κατ. λεπτομέρειας 71)	1,89	2,19	1,7

6 Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία έγινε μια διερεύνηση του φαινομένου web breathing ειδικά στις δοκούς κύλισης γερανογεφυρών. Στο δεύτερο κεφάλαιο έγιναν, σε δοκούς κύλισης για γερανογέφυρες της αγοράς, όλοι οι έλεγχοι που προβλέπονται από τον EC3 για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας εκτός από αυτόν της κόπωσης. Στο ίδιο κεφάλαιο έγινε προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν συγκολλητές διατομές για τις δοκούς με όσο το δυνατό μεγαλύτερο λόγο ύψους προς πάχος κορμού. Η ανάλυση αυτή οδήγησε σε διατομές με λόγους που δεν ξεπερνάνε την τιμή 90 και ικανοποιούν οριακά τους ελέγχους.

Στο τρίτο κεφάλαιο έγινε ανάλυση (για τις δοκούς που προέκυψαν στο δεύτερο κεφάλαιο) σύμφωνη με τα σχόλια του EC3 και προέκυψε ότι για να είναι κρίσιμο το όριο αστοχίας αντί του ορίου λειτουργικότητας στις δοκούς κύλισης, που υπόκεινται σε σύνθετη καταπόνηση κάμψης και διάτμησης, θα πρέπει ο λόγος ύψους προς πάχος κορμού να είναι μικρότερος από την τιμή περίπου 120. Αυτή η ανάλυση έγινε με χρήση των τύπων για τα αποτελέσματα του λυγισμού στα επίπεδα ελάσματα σύμφωνα με το μέρος 1.5 του EC3.

Στο πέμπτο κεφάλαιο έγινε ανάλυση κόπωσης με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Για τη δοκό κύλισης της γερανογέφυρας των 20t διατηρώντας το ύψος του κορμού σταθερό και αλλάζοντας μόνο το πάχος προκύπτει ότι η αύξηση του λόγου h_w/t_w οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή εκμετάλλευσης της κατηγορίας λεπτομέρειας. Μάλιστα, για λόγους μεγαλύτερους του 50 έχουμε συντελεστές εκμετάλλευσης μεγαλύτερους της μονάδας άρα αστοχία έναντι κόπωσης. Αν αντίθετα διατηρήσουμε σταθερό το πάχος του κορμού και αυξάνουμε το ύψος του κορμού για να μεγαλώσουμε το λόγο h_w/t_w οδηγούμαστε σε μικρή μείωση των τάσεων και του συντελεστή εκμετάλλευσης της λεπτομέρειας κόπωσης. Σε αυτό το αποτέλεσμα θα είχαμε οδηγηθεί αν αντί της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είχαμε κάνει τον έλεγχο κόπωσης που προτείνει ο EC3. Σύμφωνα με αυτόν, το ύψος του κορμού εισάγεται στον υπολογισμό της τάσης λόγω της εκκεντρότητας του κατακόρυφου φορτίου σαν τιμή υπερβολικού ημιτόνου. Όταν όλα τα υπόλοιπα μεγέθη είναι σταθερά, η αύξηση του ύψους οδηγεί σε μικρή μείωση της τάσης:

$$\lambda = \sinh^2(\pi \cdot h/a) / (\sinh(2 \cdot \pi \cdot h/a) - 2 \cdot \pi \cdot h/a) \text{ για } h \uparrow, \lambda \downarrow, \sigma \downarrow$$

Σε κάθε περίπτωση αυτή η ανάλυση είναι ανάλυση κόπωσης και όχι φαινομένου web breathing. Πάντως η αύξηση του λόγου h_w/t_w με ταυτόχρονη αύξηση του ύψους και μείωση του πάχους οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή εκμετάλλευσης της λεπτομέρειας κόπωσης. Ειδικά για λόγους με τιμή περίπου 60 έχουμε αστοχία έναντι κόπωσης.

Το βασικό συμπέρασμα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι ότι για τις δοκούς κύλισης των γερανογεφυρών που κυκλοφορούν στην αγορά είναι σχεδόν αδύνατο να χρησιμοποιήσουμε διατομές με λόγο h_w/t_w που να προσεγγίζει την τιμή 120. Αυτό συμβαίνει τόσο για τους ελέγχους της οριακής κατάστασης αστοχίας όσο και λειτουργικότητας. Αλλά και για την ανάλυση σε κόπωση, οι λόγοι που προκύπτουν για να μην έχουμε αστοχία πρέπει να είναι αρκετά μικρότεροι του 120. Άρα είναι φανερό ότι το φαινόμενο web breathing δεν είναι δυνατό να εμφανισθεί σε συνήθεις δοκούς κύλισης γερανογεφυρών.

7 Βιβλιογραφία

- [1] Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης .: Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα, Κλειδάριθμος, 2005.
- [2] Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης .: Σιδηρές Κατασκευές, Παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος Ι, 2^η έκδοση, Κλειδάριθμος, 1997, 2005.
- [3] Ι. Βάγιας, Ι. Ερμόπουλος, Γ. Ιωαννίδης .: Σιδηρές Κατασκευές, Παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος ΙΙ, Κλειδάριθμος, 1999, 2004.
- [4] Ι. Βάγιας .: Σιδηρές Κατασκευές, Ανάλυση και διαστασιολόγηση, Κλειδάριθμος, 2003.
- [5] Ι. Χ. Ερμόπουλος .: Στοιχεία Σχεδιασμού Μεταλλικών Κατασκευών, Ε.Μ.Π, 2000.
- [6] Ι. Χ. Ερμόπουλος: Ευρωκώδικας 1, Βασικές αρχές σχεδιασμού και δράσεις επί των κατασκευών, Ερμηνευτικά σχόλια και παραδείγματα εφαρμογής, 2^η έκδοση, Κλειδάριθμος, 2005.
- [7] Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-5: Plated structural elements, CEN, EN 1993-1-5, February 2003.
- [8] Commentary and worked examples to EN 1993-1-5
- [9] "THE FATIGUE BEHAVIOURE OF THE BREATHING WEBS OF STEEL BRIDGE GIRDERS" Miroslav Skaloud and Marie Zornerova. July 2005
- [10] «Numerical studies on web breathing of unstiffened and stiffened plate girders» H.P. Gunther and U.Kuhlmann.
- [11] "Patch loading Resistance of plated girders –Ultimate and serviceability limit state" Jonas Gozzi