



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σύνταξη λογισμικού σχεδιασμού δοκών κύλισης γερανογεφυρών



Δημήτριος Ι. Κουτσουρέλης
Επιβλέπων: Καθηγητής Ε.Μ.Π. Δρ. Χάρης Γαντές

Αθήνα, Οκτώβριος 2016
ΕΜΚ ΔΕ 2016 / 53

Copyright © Δημήτριος Ι. Κουτσορέλης, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Dimitrios I. Koutsourelis, 2016

All Rights Reserved

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

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

Κουτσορέλης Δ. Ι. (2016)
Σύνταξη λογισμικού σχεδιασμού δοκών κύλισης γερανογεφυρών
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2016/53
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Koutsourelis D. I. (2016).
Development of application for designing Crane Runway Beams
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2016/53
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Χάρη Γαντέ για τη βοήθειά του και κυρίως για την υπομονή που έδειξε, καθώς και τη συνάδελφο κ. Κωνσταντίνα Κουλάτσου η βοήθεια της οποίας ήταν περισσότερο από πολύτιμη.

Αφιερώνω αυτή την εργασία στα παιδιά μου Γιάννη και Μαρίλια που αποτελούν πηγή έμπνευσης σε κάθε μου προσπάθεια.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2016/53

Σύνταξη λογισμικού σχεδιασμού δοκών κύλισης γερανογεφυρών

Κουτσορέλης Δ. Ι. (Επιβλέπων: Γαντές Χ.)

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την ανάπτυξη εφαρμογής για τον έλεγχο δοκών κύλισης γερανογεφυρών με βάση τους Ευρωκώδικες

Στο κεφάλαιο «Γενικά» παρουσιάζονται οι τύποι των γερανογεφυρών και των δοκών κύλισης καθώς και το κανονιστικό πλαίσιο.

Στο κεφάλαιο «Φορτία» περιγράφονται οι δράσεις που προκαλούνται σε μια δοκό κύλισης γερανογέφυρας λόγω των κατακόρυφων φορτίων και λόγω της κίνησης. Επίσης παρουσιάζονται οι δυναμικοί συντελεστές με τους οποίους προσαυξάνονται οι δράσεις για να λάβουμε υπ' όψιν τις αδρανειακές δυνάμεις λόγω επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης.

Στο κεφάλαιο «Έλεγχοι Επάρκειας» περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού της εντατικής κατάστασης και της παραμόρφωσης της δοκούς κύλισης για τους συνδυασμούς δράσεων που προβλέπονται από τους Ευρωκώδικες, καθώς και οι έλεγχοι επάρκειας που θα πρέπει να ικανοποιούνται.

Στο κεφάλαιο «Κόπωση» αναλύεται ο έλεγχος κόπωσης για την περίπτωση συγκολλητής διατομής.

Στο κεφάλαιο «Λογισμικό για έλεγχο επάρκειας δοκού κύλισης γερανογέφυρας» περιγράφεται η εφαρμογή που αναπτύχθηκε, δηλαδή ο τρόπος εισαγωγής των δεδομένων, ο υπολογισμός των δράσεων ή ο καθορισμός τους από το μελετητή, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων μέσω γραφικών και ο υπολογισμός της προτεινόμενης βέλτιστης διατομής.

Στο κεφάλαιο «Παραδείγματα» παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής για δυο χαρακτηριστικές περιπτώσεις.

Τέλος στο κεφάλαιο «Συμπεράσματα» γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για διάφορες περιπτώσεις.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

DIVISION OF STRUCTURAL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS
EMK ΔE 2016/53

Development of application for designing Crane Runway Beams

Dimitrios I. Koutsourelis

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

Abstract

This diploma thesis deals with development of application for designing crane runway beams.

In the chapter "General" we show the types of cranes and crane runway beams and the regulatory framework.

In the chapter "Loads" we describe the actions on a crane runway beam due to vertical loads and due to the motion. We also present the dynamic factors to take into account the inertial forces due to acceleration or deceleration.

In the chapter "Capacity Checks" we describe the method for calculation the stress and deformation of crane runway beams for all combinations of actions considered by the Eurocodes, and also the capacity checks.

In the chapter "Fatigue" we analyze the fatigue check for the case of soldered section.

In the chapter "Software for checking crane runway beams" we present the application, we show form to input data, the calculation of actions or the definition of actions by the user, we explain how we can observe the results through graphics and how we obtain the optimal cross-section.

In the "Examples" section we present the results of the application for two typical cases.

In the "Conclusions" section we discuss the results for different cases.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	
Περίληψη.....	
Abstract	
1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά περί γερανογεφυρών.....	1
1.2 Η σπουδαιότητα της σωστής επιλογής δοκού κύλισης.....	1
1.3 Στατικό σύστημα δοκού κύλισης	2
1.3.1 Αμφιέριστη δοκός	2
1.3.2 Συνεχής δοκός άνισων ανοιγμάτων.....	2
1.4 Διατομή δοκού κύλισης	2
1.4.1 Πρότυπη διατομή	2
1.4.2 Συγκολλητή διατομή.....	2
1.4.3 Κανονιστικό πλαίσιο.....	3
2 Φορτία.....	5
2.1 Δυναμικοί συντελεστές	5
Πίνακας 2.1: Δυναμικοί συντελεστές ϕ_i	5
2.1.1 ϕ_1	5
2.1.2 ϕ_2	5
Πίνακας 2.4: Δυναμικοί συντελεστές ϕ_i για κατακόρυφα φορτία	6
Πίνακας 2.5: Τιμές του β_2 και $\phi_{2,\min}$	6
2.1.3 ϕ_3	6
2.1.4 ϕ_4	7
2.1.5 ϕ_5	7
Πίνακας 2.6: Δυναμικός συντελεστής ϕ_5	7
2.1.6 ϕ_6	7
2.1.7 ϕ_7	7
Πιν.2.2 Ομάδες φορτίων και δυναμικοί συντελεστές	8
2.2 Κατακόρυφα φορτία	9
2.2.1 Ελάχιστες τιμές.....	9
Σχέδιο Δ1: Γερανογέφυρα με το φορείο στα άκρα	9
Σχέδιο Δ2: Κατακόρυφες δυνάμεις με το φορείο άδειο στην ακραία θέση.....	9
2.2.2 Μέγιστες τιμές	10
Σχέδιο Δ3: Κατακόρυφες δυνάμεις με το φορείο στην ακραία θέση και με το μέγιστο φορτίο ..	10
2.2.3 Εκκεντρότητα	10
Σχήμα 2.2: Εκκεντρότητα επιβολής του φορτίου από τον τροχό	10
2.3 Οριζόντια φορτία	11
2.3.1 Από επιτάχυνση ή επιβράδυνση γερανογέφυρας	11
Σχήμα 2.5: Κατά μήκος οριζόντιες δυνάμεις HL, i	11
Σχήμα 2.7 -- Ορισμός της δύναμης οδήγησης K	12
Σχήμα 2.6 – Ορισμός των εγκάρσιων δυνάμεων HT, i	12
Σχήμα 2.1: Δυνάμεις στη δοκό κύλισης υπό τη δράση των κατακόρυφων φορτίων.....	13
2.3.2 Φορτία από παράγωγη (λοξή) κίνηση γερανογέφυρας.....	14
Πίνακας 2.7 – Ορισμός των α_F, α_V και α_0	14
Πίνακας 2.8 – Ορισμός της απόστασης h	15
Πίνακας 2.9 – Ορισμός των τιμών του λ_S, i, j, T	15
Σχήμα 2.8 – Ορισμός της γωνίας α και της απόστασης h	16

Σχήμα 2.4: Κατά μήκος και εγκάρσιες δυνάμεις προκαλούμενες από παράγωγη κίνηση των τροχών.....	16
3 Απαιτούμενοι έλεγχοι επάρκειας.....	17
3.1 Γενικά	17
3.2 Οριακές καταστάσεις αστοχίας (ΟΚΑ).....	17
3.2.1 Έλεγχος του κορμού σε διάτμηση.....	17
3.2.2 Έλεγχος του άνω πέλματος σε διάτμηση	17
3.2.3 Έλεγχος διατομής σε διαξονική κάμψη και αξονική δύναμη για το συνδυασμό φορτίων 1 (μέγιστη ροπή περί τον ισχυρό άξονα αδρανείας).....	17
3.2.4 Έλεγχος διατομής σε διαξονική κάμψη για το συνδυασμό φορτίων 5 (μέγιστη ροπή περί τον ασθενή άξονα αδρανείας).....	18
3.3 Έλεγχος τοπικής έντασης υπό το φορτίο δοκού	18
3.3.1 Ορθή κατά μήκος τάση λόγω κύριας κάμψης	18
3.3.2 Ορθή εγκάρσια θλιπτική τάση λόγω φορτίου τροχού	19
Σχήμα 5.2: Ελάχιστο πάχος t κάτω από τη φέρουσα επιφάνεια της τροχιάς.	19
Σχήμα 5.2: Ενεργό μήκος φόρτισης $leff$	19
Σχήμα 5.3: Κατανομή σε 45° του ενεργού πλάτους φόρτισης $leff$	19
Πίνακας 5.1: Ενεργό πλάτος φόρτισης $leff$	20
3.3.3 Ορθές τάσεις επί του κορμού λόγω εκκεντρότητας του κατακόρυφου φορτίου.....	20
3.3.4 Διατμητικές τάσεις από κάμψη	21
3.3.5 Πρόσθετες διατμητικές τάσεις	21
3.3.6 Έλεγχος ισοδύναμης τάσης.....	21
3.4 Έλεγχος μέλους έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού για συνδυασμό φορτίων 1	21
3.4.1 Ιδεατή διατομή αποτελούμενη από το θλιβόμενο πέλμα και το $1/5$ του κορμού.....	22
3.4.2 Θλιβόμενο πέλμα.....	22
3.5 Αντοχή του κορμού υπό τα φορτία τροχού	23
3.5.1 Ενεργό φορτιζόμενο μήκος.....	23
Σχήμα 6.1: Συντελεστές πλευρικού λυγισμού για διάφορους τύπους εφαρμογής φορτίου	23
Σχήμα 6.2: Μήκος έδρασης.....	23
3.5.2 Μειωτικός συντελεστής χF ενεργού μήκους για την αντοχή	23
3.5.3 Έλεγχος κορμού υπό εγκάρσια φορτία:	24
3.5.4 Περίπτωση κύλισης στο κάτω πέλμα	24
Σχήμα 5.6: Θέσεις για τον υπολογισμό τάσεων λόγω φορτίων τροχού.	24
3.6 Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας (ΟΚΑ)	25
3.6.1 Στατικό σύστημα δοκού κυλίσεως.....	25
3.6.2 Κατακόρυφη παραμόρφωση δοκού κυλίσεως υπό τα φορτία τροχού	25
3.6.3 Διαφορική κατακόρυφη παραμόρφωση των απέναντι δοκών κυλίσεως	26
3.6.4 Παραμόρφωση δοκού κυλίσεως υπό οριζόντια φορτία.....	26
3.6.5 Αποφυγή ταλάντωσης του κάτω πέλματος	26
3.6.6 Περιορισμός της ευαισθησίας του κορμού έναντι λυγισμού (limitation of web breathing).....	27
3.6.7 Αναστρεψιμότητα των τάσεων	27
4 Κόπωση.....	29
4.1 Γενικά	29
4.2 Ιδεατά ισοδύναμα φορτία κοπώσεως	29
4.3 Έλεγχος έναντι κοπώσεως της συγκόλλησης άνω πέλματος - κορμού.....	30
4.3.1 Ορθές τάσεις.....	30
4.3.2 Διατμητικές τάσεις.....	31
Πίνακας 8.2: Συγκολλητές διατομές.....	32
Πίνακας 8.10: Ένωση άνω πέλματος με κορμό στη δοκό κύλισης	33
4.3.3 Γ. Αλληλεπίδραση ορθών και διατμητικών τάσεων.....	33
Πίν. Β1 – Συστάσεις για την επιλογή κατηγορίας φόρτισης.....	34
Πίν. 2.12 – Τιμές του li σύμφωνα με την κατηγορία του γερανού.....	34

5	Λογισμικό για έλεγχο επάρκειας δοκού κύλισης γερανογέφυρας	35
5.1	Γενικά	35
5.2	Εισαγωγή χαρακτηριστικών γερανογέφυρας και δοκού κύλισης.	35
	Σχέδιο A1: Φόρμα εισαγωγής δεδομένων	35
	Σχέδιο A2: Φόρμα εισαγωγής συμπληρωματικών στοιχείων	36
5.3	Έλεγχος διατομής.....	36
5.4	Βέλτιστη επιλογή	36
	Σχέδιο A3: Αυτόματη επιλογή βέλτιστης διατομής	37
5.5	Στατικό Σύστημα	37
	Σχέδιο A4: Ελαστική γραμμή δοκού για τυχαία θέση της γερανογέφυρας.....	37
	Σχέδιο A5: Διάγραμμα ροπών για τυχαία θέση της γερανογέφυρας.....	38
	Σχέδιο A6: Διάγραμμα τεμνουσών για τυχαία θέση της γερανογέφυρας.....	38
5.6	Δυνατότητα εισαγωγής δράσεων από το μελετητή	38
	Σχέδιο A7: Φόρμα με Πίνακα δράσεων για αλλαγή τιμών από μελετητή	39
5.7	Αναλυτική εκτύπωση αποτελεσμάτων	39
5.8	Σχεδίαση δοκών γερανογέφυρας.....	39
6	Παραδείγματα	41
6.1	Παράδειγμα 1. Συγκολλητή διατομή, Συνεχής Δοκός.....	41
6.2	Παράδειγμα 2. Πρότυπη Διατομή, Αμφιέριστη δοκός.....	47
6.3	Σύγκριση Πρότυπων προς Συγκολλητές διατομές.....	51
	Πίνακας A1: Σύγκριση επάρκειας πρότυπης διατομής σε σχέση με ισοδύναμη συγκολλητή.....	51
6.4	Σύγκριση ως προς το στατικό σύστημα.....	51
	Πίνακας A2: Σύγκριση τιμών επάρκειας σε σχέση με το στατικό σύστημα	51
7	Συμπεράσματα	53
8	Βιβλιογραφία	55

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά περί γερανογεφυρών

Η γερανογέφυρα είναι ένας τύπος γερανού που χρησιμοποιείται σε βιομηχανικά κτίρια. Αποτελείται από δυο παράλληλους δοκούς κύλισης πάνω στους οποίους κινείται μια γέφυρα, κατά μήκος της οποίας κινείται ένας ανυψωτικός μηχανισμός.

Η γερανογέφυρα επιτρέπει την εύκολη και γρήγορη φόρτωση ή εκφόρτωση υλικών και τη μεταφορά τους σε οποιοδήποτε σημείο του βιομηχανικού χώρου.

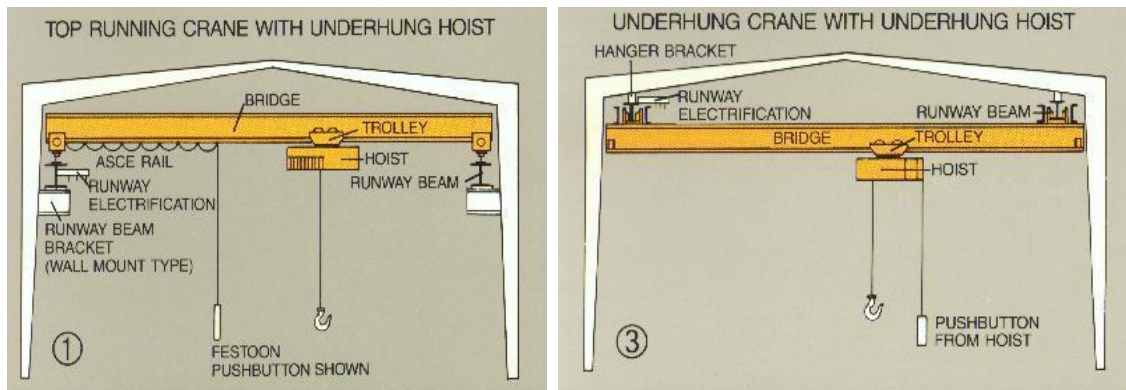


1.2 Η σπουδαιότητα της σωστής επιλογής δοκού κύλισης

Μια γερανογέφυρα είναι ένας αρκετά βαρύς μηχανισμός, απόλυτα απαραίτητος στη λειτουργία κάθε βιομηχανικής μονάδας. Θα πρέπει λοιπόν να σχεδιαστεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία της και η συντήρησή της. Οι δυο παράλληλες δοκοί πάνω στις οποίες κινείται η γερανογέφυρα θα πρέπει να είναι επίσης σωστά σχεδιασμένες ώστε να μπορούν να φέρουν τα στατικά και δυναμικά φορτία της γερανογέφυρας με ασφάλεια και αξιοπιστία.

1.3 Στατικό σύστημα δοκού κύλισης

Οι δοκοί κύλισης είτε στηρίζονται από κάτω είτε αναρτώνται από το άνω πέλμα τους πάνω σε προβόλους, όπως φαίνεται στα δυο παρακάτω σχήματα.



Οι στηρίξεις αυτές μπορεί να ισαπέχουν, μπορεί όμως και όχι. Επίσης ο τρόπος κατασκευής μιας δοκού κύλισης μπορεί να γίνεται με αρθρώσεις στα σημεία στήριξης, ή με τρόπο που να εξασφαλίζεται η συνέχεια της δοκού.

Έτσι, αναλόγως τους τρόπους κατασκευής της, μπορούμε να έχουμε στατικό σύστημα αμφιέρειστης δοκού ή συνεχούς δοκού πολλών ίσων ή άνισων ανοιγμάτων.

1.3.1 Αμφιέρειστη δοκός

Ο συνηθέστερος τρόπος κατασκευής δοκού κύλισης είναι με διαμόρφωση αρθρώσεων στα σημεία στήριξης. Ο τρόπος αυτός είναι απλούστερος στην κατασκευή κι επίσης εξασφαλίζεται καλύτερα η συντήρηση της δοκού αφού μπορούν και αντικαθίστανται εύκολα τα τμήματα που έχουν φθορές.

1.3.2 Συνεχής δοκός άνισων ανοιγμάτων

Η δοκός κατασκευάζεται με τρόπο που να εξασφαλίζεται η συνέχεια σε κάθε τμήμα της. Έτσι έχουμε στατικό σύστημα συνεχούς δοκού που δίνει ελαφρώς ευνοϊκότερες μέγιστες ροπές και βέλη κάμψης.

1.4 Διατομή δοκού κύλισης

Η σωστή επιλογή διατομής δοκού κύλισης είναι ο κύριος σκοπός αυτής της εργασίας. Αναλόγως της περίπτωσης μπορούμε να επιλέξουμε κάποια πρότυπη διατομή, ή να σχεδιάσουμε μια συγκολλητή διατομή.

1.4.1 Πρότυπη διατομή

Η επιλογή πρότυπης διατομής είναι συνήθως προτιμότερη γιατί έχει καλύτερη συμπεριφορά έναντι κόπωσης. Συνήθως επιλέγουμε από κατηγορίες HEA ή HEB και σπανιότερα HEM. Η κατηγορία IPE έχει μειονέκτημα λόγω της χαμηλής αντοχής της περί τον ασθενή άξονα.

1.4.2 Συγκολλητή διατομή

Η σχεδίαση συγκολλητής διατομής μας επιτρέπει να επιλέξουμε με ακρίβεια τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά έτσι ώστε να ανταποκρίνονται επακριβώς στις απαιτήσεις

μας. Το μειονέκτημα αυτής της επιλογής είναι ο έλεγχος των συγκολλήσεων σε κόπωση που είναι αρκετά δυσμενής.

1.4.3 Κανονιστικό πλαίσιο

Ο έλεγχος της δοκού κύλισης γίνεται με βάση τους κάτωθι Κανονισμούς:

Eurocode 1: Actions on structures

Part 1-1: General actions — Densities, self-weight, imposed loads for buildings (BS EN 1991-1-1:2002)

Part 3: Actions induced by cranes and machinery (BS EN 1991-3:2006)

Eurocode 3: Design of steel structures

Part 1-1: General rules and rules for buildings (BS EN 1993-1-1:2005)

Part 1-5: Plated structural elements (BS EN 1993-1-5:2006)

Part 1-9: Fatigue (BS EN 1993-1-9:2005)

Part 6: Crane supporting structures (BS EN 1993-6:2007)

2 Φορτία

Η γερανογέφυρα επιβάλλει στη δοκό κύλισης καταπόνηση από κατακόρυφα φορτία (ίδιον βάρος και ωφέλιμο φορτίο ανάρτησης) αλλά και οριζόντια φορτία από δυνάμεις λόγω εκκεντρότητας, λόγω επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης και λόγω παράγωγης κίνησης.

Ο υπολογισμός των δράσεων γίνεται με βάση τον EC1, Μέρος 3.

2.1 Δυναμικοί συντελεστές

Η δυναμική συμπεριφορά των φορτίων λαμβάνεται υπ' όψιν σύμφωνα με τον EC1, Μέρος 3, §2, με την εισαγωγή μιας σειράς δυναμικών συντελεστών φ_1 - φ_7 .

Dynamic factors	Effects to be considered	To be applied to
φ_1	– excitation of the crane structure due to lifting the hoist load off the ground	self-weight of the crane
φ_2 or φ_3	–dynamic effects of transferring the hoist load from the ground to the crane –dynamic effects of sudden release of the payload if for example grabs or magnets are used	hoist load
φ_4	–dynamic effects induced when the crane is travelling on rail tracks or runways	self-weight of the crane and hoist load
φ_5	–dynamic effects caused by drive forces	drive forces
φ_6	–dynamic effects of a test load moved by the drives in the way the crane is used	test load
φ_7	–dynamic elastic effects of impact on buffers	buffer loads

Πίνακας 2.1: Δυναμικοί συντελεστές φ_i

2.1.1 φ_1

Λαμβάνει υπ' όψιν τη δυναμική διέγερση της γερανογέφυρας κατά την ανύψωση του φορτίου από το έδαφος.

Εφαρμόζεται μόνο στο ίδιο βάρος της γερανογέφυρας.

Η τιμή του ορίζεται στον πίνακα 2.4 και συνήθως λαμβάνεται η μέγιστη τιμή 1.10 που αντιστοιχεί στην ανώτατη τιμή του παλμού δόνησης.

2.1.2 φ_2

Λαμβάνει υπ' όψη τη δυναμική επιρροή της μεταφοράς του ανυψούμενου φορτίου από το έδαφος.

Εφαρμόζεται στο ανυψούμενο φορτίο.

Η τιμή του συντελεστή υπολογίζεται από τον Πίνακα 2.4 ως συνάρτηση της ταχύτητας v_h του ανυψούμενου φορτίου.

$$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 v_h$$

όπου οι τιμές των $\varphi_{2,min}$ και β_2 ορίζονται στον Πίνακα 2.5 αναλόγως της κατηγορίας του βαρούλκου.

Values of dynamic factors	
φ_1	$0,9 < \varphi_1 < 1,1$ The two values 1,1 and 0,9 reflect the upper and lower values of the vibrational pulses.
φ_2	$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 v_h$ v_h - steady hoisting speed in m/s $\varphi_{2,min}$ and β_2 see Table 2.5
φ_3	$\varphi_3 = 1 - \frac{\Delta m}{m}(1 + \beta_3)$ where Δm released or dropped part of the hoisting mass m total hoisting mass $\beta_3 = 0,5$ for cranes equipped with grabs or similar slow-release devices $\beta_3 = 1,0$ For cranes equipped with magnets or similar rapid-release devices
φ_4	$\varphi_4 = 1,0$ provided that the tolerances for rail tracks as specified in EN 1993-6 are observed.
NOTE: If the tolerances for rail tracks as specified in EN 1993-6 are not observed, the dynamic factor φ_4 can be determined with the model provided by EN 13001-2.	

Πίνακας 2.4: Δυναμικοί συντελεστές φι για κατακόρυφα φορτία

Hoisting class of appliance	β_2	$\varphi_{2,min}$
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.		

Πίνακας 2.5: Τιμές του β_2 και $\varphi_{2,min}$

2.1.3 φ_3

Λαμβάνει υπ' όψη τη δυναμική επιρροή της ξαφνικής απελευθέρωσης του ανυψούμενου φορτίου.

Εφαρμόζεται στο ανυψούμενο φορτίο.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει πιθανότητα ξαφνικής απελευθέρωσης φορτίων, ο συντελεστής φ_3 παίρνει την τιμή 1.00, διαφορετικά υπολογίζεται σύμφωνα με τους τύπους του Πίνακα 2.4:

$$\varphi_3 = 1 - \frac{\Delta_m}{m} (1 + \beta_3)$$

όπου

Δ_m είναι το τμήμα της μάζας του φορτίου που απελευθερώνεται

m είναι το σύνολο του φορτίου

$\beta_3 = 0.5$ για αργή απελευθέρωση φορτίου (π.χ. αρπάγες)

$\beta_3 = 1.0$ για ταχεία απελευθέρωση φορτίου (π.χ. μαγνήτες)

2.1.4 φ_4

Αν οι κατασκευαστικές ανοχές που ορίζονται στον EN 1993-6 ικανοποιούνται, ο φ_4 λαμβάνεται ίσος με 1.00. Διαφορετικά μπορεί να υπολογισθεί με τα μοντέλα που περιγράφονται στο πρότυπο EN 13001-2 και εφαρμόζεται στο ίδιο βάρος της γερανογέφυρας και στο ανυψούμενο φορτίο.

2.1.5 φ_5

Λαμβάνει υπ' όψη τη δυναμική επιρροή της δύναμης προώθησης.

Εφαρμόζεται επί των οριζόντιων δυνάμεων που αναπτύσσονται στις τροχιές κατά την επιτάχυνση ή επιβράδυνση της γερανογέφυρας.

Υπολογίζεται από τον Πίνακα 2.6

Values of the dynamic factor φ_5	Specific use
$\varphi_5 = 1,0$	for centrifugal forces
$1,0 \leq \varphi_5 \leq 1,5$	for systems where forces change smoothly
$1,5 \leq \varphi_5 \leq 2,0$	for cases where sudden changes can occur
$\varphi_5 = 3,0$	for drives with considerable backlash

Πίνακας 2.6: Δυναμικός συντελεστής φ_5

2.1.6 φ_6

Λαμβάνει υπ' όψιν τη δυναμική διέγερση της γερανογέφυρας υπό δοκιμαστικό φορτίο που κινείται με τους οδηγούς με τον ίδιο τρόπο που θα χρησιμοποιηθεί η γερανογέφυρα.

2.1.7 φ_7

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται προστατευτικά, ο συντελεστής φ_7 λαμβάνει υπ' όψη την ελαστική δυναμική απόκριση των δυνάμεων που αναπτύσσονται από πιθανή σύγκρουσή σε κάποιο εμπόδιο.

Οι 10 συνδυασμοί φορτίων που θα πρέπει να ελεγχθούν με τους αντίστοιχους δυναμικούς συντελεστές ανά φόρτιση εμφανίζονται στον πίνακα 2.2

		Σύμβολο	Παράγραφος	Ομάδες φορτίων									
				ULS							Φορτίο δοκιμής	Τυχηματικό	
				1	2	3	4	5	6	7			
1	Ίδιο βάρος γερανού	Q_c	2.6	φ_1	φ_1	1	φ_4	φ_4	φ_4	1	φ_1	1	1
2	Φορτίο βαρούλκου	Q_h	2.6	φ_2	φ_3	-	φ_4	φ_4	φ_4	$\eta^{1)}$	-	1	1
3	Επιτάχυνση γερανογέφυρας	H_L, H_T	2.7	φ_5	φ_5	φ_5	φ_5	-	-	-	φ_5	-	-
4	Λοξότητα γερανογέφυρας	H_S	2.7	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
5	Επιτάχυνση ή πέδηση του φορείου ή του φορείου βαρούλκου	H_{T3}	2.7	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
6	Ανεμοπίεση κατά τη λειτουργία	F_W^*	Παράρτ.Α	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-
7	Φορτίο δοκιμής	Q_T	2.10	-	-	-	-	-	-	-	φ_6	-	-
8	Δύναμη πρόσκρουσης	H_B	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	φ_7	-
9	Δύναμη πλάγιας πρόσκρουσης	H_{TA}	2.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για ανεμοπίεση χωρίς λειτουργία, βλ. Παράρτημα Α.

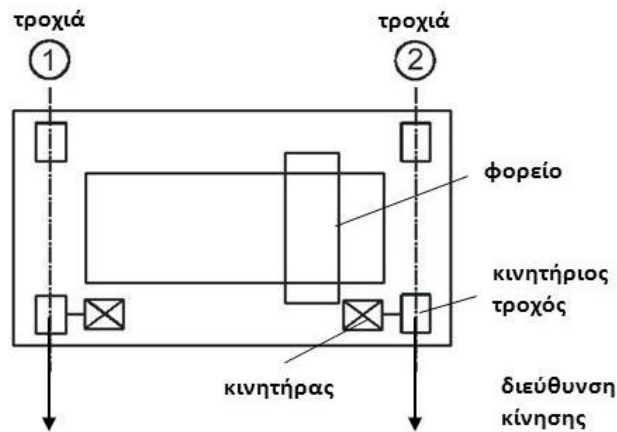
¹⁾ η είναι ο λόγος του φορτίου βαρούλκου που παραμένει προς το φορτίο ανάρτησης όταν αυτό αφαιρείται, το οποίο όμως δεν περιλαμβάνεται στο ίδιο βάρος του γερανού.

Πιν.2.2 Ομάδες φορτίων και δυναμικοί συντελεστές

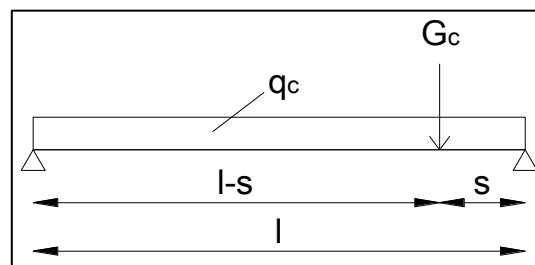
2.2 Κατακόρυφα φορτία

2.2.1 Ελάχιστες τιμές

Ελάχιστες τιμές κατακόρυφων φορτίων έχουμε με τη γερανογέφυρα αφόρτιστη και το φορείο στην ακραία δυνατή θέση.



Σχέδιο Δ1: Γερανογέφυρα με το φορείο στα άκρα



Σχέδιο Δ2: Κατακόρυφες δυνάμεις με το φορείο άδειο στην ακραία θέση

Το συνολικό φορτίο της περισσότερο φορτισμένης δοκού είναι:

$$\Sigma Q_{r,min,1} = \frac{1}{2} q_c l + G_c \frac{l-s}{l}$$

Και το συνολικό φορτίο της λιγότερο φορτισμένης δοκού είναι:

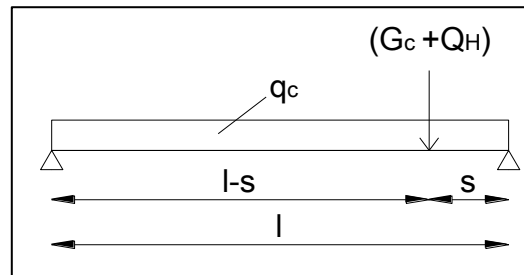
$$\Sigma Q_{r,min,2} = \frac{1}{2} q_c l + G_c \frac{s}{l}$$

Το ελάχιστο φορτίο $\Sigma Q_{r,min}$ υπολογίζεται χωριστά για κάθε συνδυασμό του Πίνακα 2.2 με εφαρμογή των αντίστοιχων δυναμικών συντελεστών.

Το φορτίο ανά τροχό προκύπτει με διαίρεση του $\Sigma Q_{r,min}$ με τον αριθμό των τροχών ανά τροχιά, που συνήθως είναι 2.

2.2.2 Μέγιστες τιμές

Οι μέγιστες τιμές των κατακόρυφων φορτίων προκύπτουν με τη γερανογέφυρα φορτισμένη και το φορείο στην ακραία δυνατή θέση.



Σχέδιο Δ3: Κατακόρυφες δυνάμεις με το φορείο στην ακραία θέση και με το μέγιστο φορτίο

Το συνολικό φορτίο της περισσότερο φορτισμένης δοκού είναι:

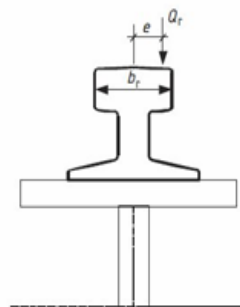
$$\Sigma Q_{r,max,1} = \frac{1}{2} q_c l + (G_c + Q_H) \frac{l-s}{l}$$

Και το συνολικό φορτίο της λιγότερο φορτισμένης δοκού είναι:

$$\Sigma Q_{r,max,2} = \frac{1}{2} q_c l + (G_c + Q_H) \frac{s}{l}$$

Το μέγιστο φορτίο $\Sigma Q_{r,max}$ υπολογίζεται χωριστά για κάθε συνδυασμό του Πίνακα 2.2 με εφαρμογή των αντίστοιχων δυναμικών συντελεστών, ενώ το φορτίο ανά τροχό προκύπτει με διαίρεση του $\Sigma Q_{r,max}$ με τον αριθμό των τροχών ανά τροχιά, (συνήθως 2).

2.2.3 Εκκεντρότητα



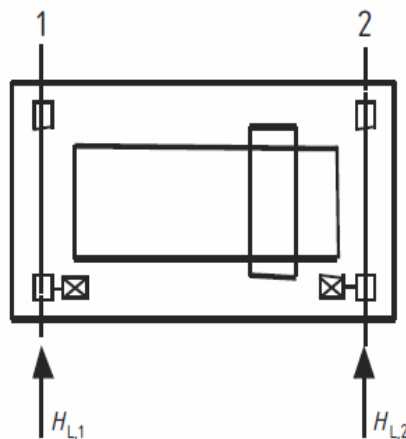
Σχήμα 2.2: Εκκεντρότητα επιβολής του φορτίου από τον τροχό

Στην περίπτωση γερανογέφυρας που κινείται στο άνω πέλμα της δοκού κύλισης σε σιδηροτροχιά, υπολογίζεται εκκεντρότητα του φορτίου Q_r του τροχού με βάση το σχήμα 2.2 και με τιμή του e όπως ορίζεται στο εθνικό προσάρτημα. Η προτεινόμενη τιμή στο κείμενο του Ευρωκώδικα (όπως και στο ελληνικό εθνικό προσάρτημα) είναι:

$$e = 0.25 b_r$$

2.3 Οριζόντια φορτία

2.3.1 Από επιτάχυνση ή επιβράδυνση γερανογέφυρας



Σχήμα 2.5: Κατά μήκος οριζόντιες δυνάμεις $H_{L,i}$

Οι δυνάμεις αυτές συνήθως δίνονται από τον κατασκευαστή της γερανογέφυρας οπότε λαμβάνονται ως χαρακτηριστικές δυνάμεις. Διαφορετικά υπολογίζονται σύμφωνα με τις παραγράφους 2.7.2 - 2.7.5 του EN1991-3 όπως περιγράφεται παρακάτω.

2.3.1.1 Κατά μήκος δυνάμεις

Οι διαμήκεις δυνάμεις $H_{L,i}$ που προκαλούνται από την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση της γερανογέφυρας οφείλονται στην τριβή ανάμεσα στην τροχιά και τους τροχούς οδήγησης όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

$$H_{L,i} = \varphi_5 K \frac{1}{n_r} \quad (2.2)$$

Όπου:

n_r είναι ο αριθμός των δοκών κύλισης

K είναι η δύναμη οδήγησης σύμφωνα με την 2.7.3

φ_5 είναι ο δυναμικός συντελεστής από τον πίνακα 2.6

i είναι ο αριθμός της δοκού κύλισης ($i=1,2$)

Η δύναμη οδήγησης K

Η δύναμη οδήγησης K θα λαμβάνεται με τρόπο που θα αποφεύγεται το σπινάρισμα (ολίσθηση) του τροχού.

Η δύναμη οδήγησης K μπορεί να λαμβάνεται από τον κατασκευαστή.

Στην περίπτωση που δεν εφαρμόζεται σύστημα ελέγχου του τροχού, η δύναμη K μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$K = K1 + K2 = \mu \Sigma Q_{r,min}^* \quad (2.5)$$

Όπου:

μ είναι ο συντελεστής τριβής.

Για μονό τροχό οδήγησης: $\Sigma Q_{r,min}^* = m_w Q_{r,min}$ όπου m_w είναι ο αριθμός των μονών τροχών οδήγησης

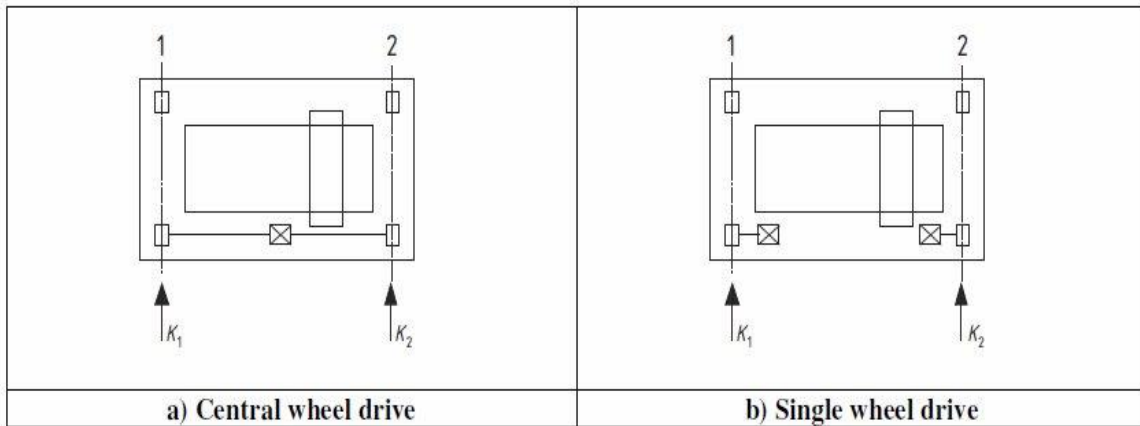
Για κεντρικό τροχό οδήγησης: $\Sigma Q_{r,min}^* = Q_{r,min} + Q_{r,(min)}$

Παρατήρηση 1: Οι σύγχρονες γερανογέφυρες δεν συνηθίζεται να έχουν κεντρικό τροχό οδήγησης.

Παρατήρηση 2: Η τιμή του συντελεστή τριβής δίνεται στο Εθνικό Προσάρτημα. Προτεινόμενες τιμές είναι:

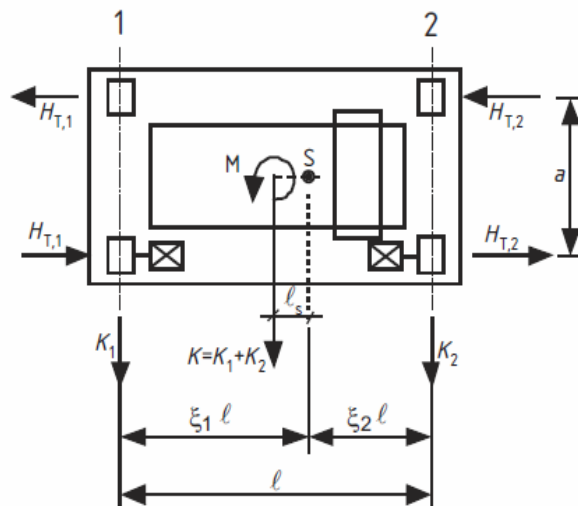
$\mu = 0,2$ για επαφή χάλυβα με χάλυβα

$\mu = 0,5$ για επαφή χάλυβα με ελαστικό



Σχήμα 2.7 -- Ορισμός της δύναμης οδήγησης K

2.3.1.2 Εγκάρσιες δυνάμεις



Σχήμα 2.6 – Ορισμός των εγκάρσιων δυνάμεων $H_{T,i}$

Όταν το κέντρο βάρους S που εφαρμόζεται η δύναμη οδήγησης απέχει από το μέσον της γερανογέφυρας κατά απόσταση l_s δημιουργείται ροπή M που εξισορροπείται από εγκάρσιες οριζόντιες δυνάμεις $H_{T,1}$, $H_{T,2}$ όπως φαίνονται στο παραπάνω σχήμα (Eurocode 1 Actions on structures) (Eurocode 3: Design of steel structures) (Eurocode 3: Design of steel structures) (Eurocode 1 Actions on structures) 2.6

Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να υπολογισθούν ως ακολούθως:

$$H_{T,1} = \varphi_5 \xi_2 \frac{M}{\alpha} \quad (2.3)$$

$$H_{T,2} = \varphi_5 \xi_1 \frac{M}{\alpha} \quad (2.4)$$

Όπου

$$\xi_1 = \Sigma Q_{r,max} / \Sigma Q_r$$

$$\xi_2 = 1 - \xi_1$$

$$\Sigma Q_r = Q_{r,max} + Q_{r,(max)}$$

Τα $\Sigma Q_{r,max}$ και $\Sigma Q_{r,(max)}$ ορίζονται σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα 2.1
α είναι η απόσταση ανάμεσα στους τροχούς οδήγησης.

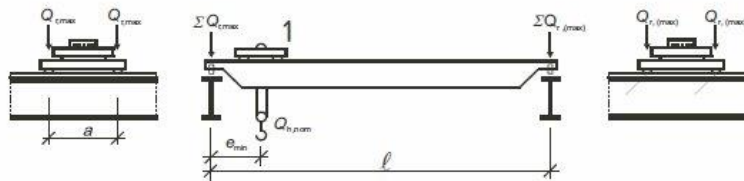
$$M = K l_s$$

$$l_s = (\xi_1 - 0,5) l$$

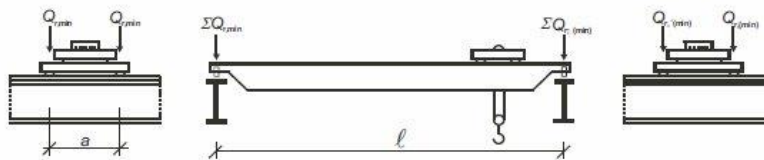
l είναι το άνοιγμα της γερανογέφυρας

φ_5 είναι ο δυναμικό συντελεστής από τον Πίνακα 2.6

K είναι η δύναμη οδήγησης, σύμφωνα με την §2.7.3 και το σχήμα 2.7



a) Load arrangement of the loaded crane to obtain the maximum loading on the runway beam



b) Load arrangement of the unloaded crane to obtain the minimum loading on the runway beam

$Q_{r,max}$ μέγιστο φορτίο ανά τροχό της φορτωμένης γερανογέφυρας

$Q_{r,(max)}$ μέγιστο συνοδευτικό φορτίο ανά τροχό της φορτωμένης γερανογέφυρας

$\Sigma Q_{r,max}$ άθροισμα των μέγιστων φορτίων $Q_{r,max}$ ανά δοκό κύλισης της φορτωμένης γερανογέφυρας

$\Sigma Q_{r,(max)}$ άθροισμα των συνοδευτικών μέγιστων φορτίων $Q_{r,(max)}$ ανά δοκό κύλισης της φορτωμένης γερανογέφυρας

$Q_{r,min}$ ελάχιστο φορτίο ανά τροχό της αφόρτιστης γερανογέφυρας

$Q_{r,(min)}$ ελάχιστο συνοδευτικό φορτίο ανά τροχό της αφόρτιστης γερανογέφυρας

$\Sigma Q_{r,min}$ άθροισμα των ελάχιστων φορτίων $Q_{r,min}$ ανά δοκό κύλισης της αφόρτιστης γερανογέφυρας

$\Sigma Q_{r,(min)}$ άθροισμα των συνοδευτικών ελάχιστων φορτίων $Q_{r,(min)}$ ανά δοκό κύλισης της αφόρτιστης γερανογέφυρας

$Q_{h,nom}$ ονομαστικό φορτίο ανύψωσης

Σχήμα 2.1: Δυνάμεις στη δοκό κύλισης υπό τη δράση των κατακόρυφων φορτίων

2.3.2 Φορτία από παράγωγη (λοξή) κίνηση γερανογέφυρας

1. Η δύναμη οδήγησης S και οι εγκάρσιες δυνάμεις $H_{S,i,j,T}$ που προκαλούνται από την παράγωγη κίνηση μπορούν να υπολογισθούν ως εξής:

$$S = f \lambda_{S,j} \Sigma Q_r \quad (2.6)$$

$$H_{S,1,j,L} = f \lambda_{S,1,j,L} \Sigma Q_r \quad (2.7)$$

$$H_{S,2,j,L} = f \lambda_{S,2,j,L} \Sigma Q_r \quad (2.8)$$

$$H_{S,1,j,T} = f \lambda_{S,1,j,T} \Sigma Q_r \quad (2.9)$$

$$H_{S,2,j,T} = f \lambda_{S,2,j,T} \Sigma Q_r \quad (2.10)$$

Όπου

$\lambda_{S,2,j,T}$ ο συντελεστής δύναμης και υπολογίζεται σύμφωνα με τον πίνακα 2.9

i η τροχιά

j το ζεύγος τροχών

k η διεύθυνση της δύναμης: L =longitudinal (διαμήκης) T =transversal (εγκάρσια)

2. Ο μη θετικός συντελεστής f μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

$$f = 0,3 (1 - \exp(-250 \alpha)) \leq 0,3 \quad (2.11)$$

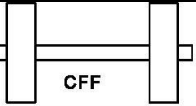
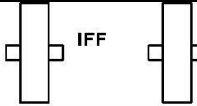
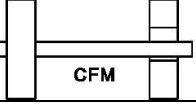
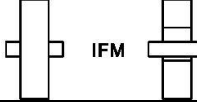
3. Η γωνία λοξότητας α όπως ορίζεται στο σχήμα 2.8 και θα πρέπει να μην υπερβαίνει την τιμή 0.015 rad. Θα πρέπει να υπολογίζεται λαμβάνοντας υπ' όψιν την απόσταση ανάμεσα στα μέσα οδήγησης και την τροχιά καθώς επίσης και μια λογική διακύμανση της διάστασης και φθοράς των τροχών και των τροχιών. Μπορεί να υπολογισθεί από τον παρακάτω τύπο:

$$\alpha = \alpha_F + \alpha_V + \alpha_0 \leq 0,015 \text{ rad}$$

όπου τα α_F , α_V και α_0 ορίζονται σύμφωνα με τον Πίνακα 2.7

Angles α_i	Minimum values of α_i
$\alpha_F = \frac{0,75x}{a_{\text{ext}}}$	$0,75x \geq 5 \text{ mm}$ for guide rollers
	$0,75x \geq 10 \text{ mm}$ for wheel flanges
$\alpha_V = \frac{y}{a_{\text{ext}}}$	$y \geq 0,03b \text{ mm}$ for guide rollers
	$y \geq 0,10b \text{ mm}$ for wheel flanges
α_0	$\alpha_0 = 0,001$
Where: a_{ext} is the spacing of the outer guidance means or flanged wheels on the guiding rail; b is the width of the rail head; x is the track clearance between the rail and the guidance means (lateral slip); y is the wear of the rail and the guidance means; α_0 is the tolerance on wheel and rail directions.	

Πίνακας 2.7 – Ορισμός των α_F , α_V και α_0

Τοποθέτηση τροχών σύμφωνα με τις εγκάρσιες κινήσεις	Συνδυασμός ζευγών τροχών		h
	συζευγμένοι (c)	ανεξάρτητοι (i)	
Σταθερός/Σταθερός FF			$\frac{m\xi_1\xi_2\ell^2 + \sum e_j^2}{\sum e_j}$
Σταθερός/Κινητός FM			$\frac{m\xi_1\ell^2 + \sum e_j^2}{\sum e_j}$

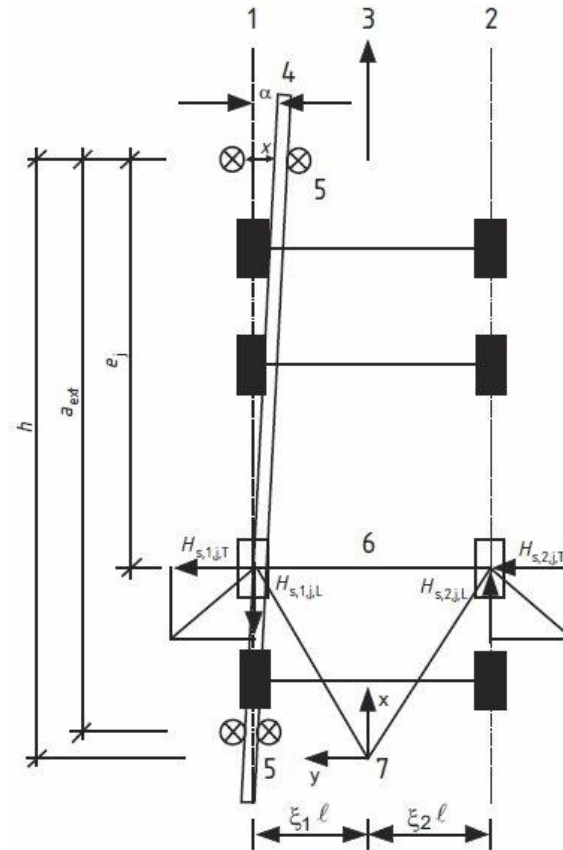
Όπου:
 h είναι η απόσταση μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και των σχετικών μέσων οδήγησης,
 m είναι ο αριθμός ζευγών των συζευγμένων τροχών ($m=0$ για ανεξάρτητα ζεύγη τροχών),
 $\xi_1\ell$ είναι η απόσταση μεταξύ του στιγμιαίου πόλου στροφής και της τροχιάς 1,
 $\xi_2\ell$ είναι η απόσταση μεταξύ 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.

Πίνακας 2.8 – Ορισμός της απόστασης h

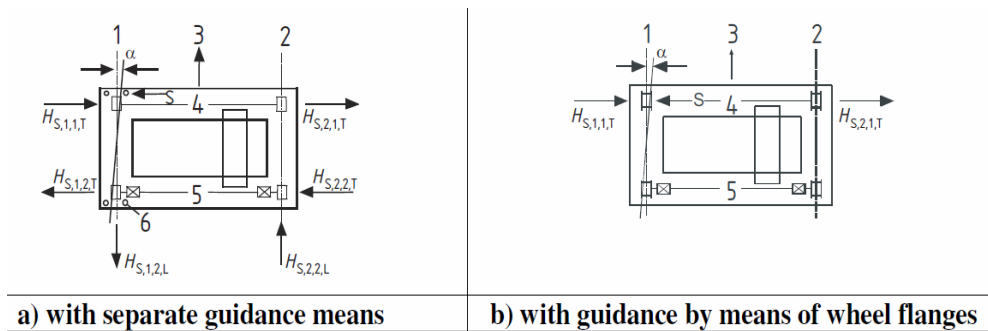
Σύστημα	$\lambda_{S,j}$	$\lambda_{S,1,i,L}$	$\lambda_{S,1,i,T}$	$\lambda_{S,2,i,L}$	$\lambda_{S,2,i,T}$
CFF	$1 - \frac{\sum e_j}{nh}$	$\frac{\xi_1\xi_2\ell}{n h}$	$\frac{\xi_2}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$	$\frac{\xi_1\xi_2\ell}{n h}$	$\frac{\xi_1}{n} \left(1 - \frac{e_j}{h}\right)$
IFF		0	$\frac{\xi_2}{n}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

Πίνακας 2.9 – Ορισμός των τιμών του $\lambda_{S,i,j,T}$



Σχήμα 2.8 – Ορισμός της γωνίας α και της απόστασης h



Key

- 1 Rail $i = 1$
- 2 Rail $i = 2$
- 3 Direction of motion
- 4 Wheel pair $j = 1$
- 5 Wheel pair $j = 2$
- 6 Guide means

NOTE 1: The direction of the horizontal forces depends on the type of guidance means, the direction of motion and on the type of wheel drive.

NOTE 2: The forces $H_{s,i,j,k}$ are defined in 2.7.4(1).

Σχήμα 2.4: Κατά μήκος και εγκάρσιες δυνάμεις προκαλούμενες από παράγωγη κίνηση των τροχών

3 Απαιτούμενοι έλεγχοι επάρκειας

3.1 Γενικά

Οι κρίσιμες διατομές της δοκού κύλισης θα πρέπει να ελεγχθούν στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ), στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργίας (ΟΚΛ) κι εφόσον έχουμε συγκολλητή διατομή και σε Κόπωση.

3.2 Οριακές καταστάσεις αστοχίας (ΟΚΑ)

Έλεγχος διατομής στην οριακή κατάσταση αστοχίας.

3.2.1 Έλεγχος του κορμού σε διάτμηση

Η δράση $V_{y,Ed}$ λαμβάνεται από τα εντατικά μεγέθη των συνδυασμών [3]+[6].

Η διατμητική αντοχή $V_{y,Rd}$ υπολογίζεται κατά EC3, Μέρος 1.1, εξ. (6.18):

$$V_{y,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_V \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M_0}}$$

Όπου $A_V = A - 2b_f t_f + (t_w + 2r)t_f$

$$\text{Έλεγχος: } K = \frac{V_{y,Ed}}{V_{y,Rd}} \leq 1,00$$

3.2.2 Έλεγχος του άνω πέλματος σε διάτμηση

Η οριζόντια διατμητική δράση $V_{z,Ed}$ που παραλαμβάνεται από τη λεπίδα του άνω πέλματος της δοκού υπολογίζεται από εντατικά [5].

Η διατμητική αντοχή $V_{z,Rd}$ υπολογίζεται κατά EC3, Μέρος 1.1, εξ. (6.18):

$$V_{z,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_V \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M_0}}$$

όπου $A_V = b_f t_f$

$$\text{Έλεγχος: } K = \frac{V_{z,Ed}}{V_{z,Rd}} \leq 1,00$$

3.2.3 Έλεγχος διατομής σε διαξονική κάμψη και αξονική δύναμη για το συνδυασμό φορτίων 1 (μέγιστη ροπή περί τον ισχυρό άξονα αδρανείας)

Ο έλεγχος γίνεται ελαστικά σε όρους τάσεων για ένα γωνιακό σημείο της διατομής.

Στο εξεταζόμενο γωνιακό σημείο δεν υπάρχουν διατμητικές τάσεις.

Τάση σ_{y1} λόγω M_y από εντατικά [2]+[6]

$$\sigma_{y1} = \frac{M_y}{W_{el,y}}$$

Τάση σ_{y2} λόγω M_z από εντατικά [2]

$$\sigma_{y2} = \frac{M_z}{W_{el,f,z}}$$

Όπου

$$W_{el,f,z} = \frac{1}{6} t_f b^2$$

Τάση λόγω αξονικής δύναμης H_L

$$\sigma_{y3} = \frac{H_L}{A}$$

Τάση αντοχής χάλυβα:

$$\sigma_{y,Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M_0}}$$

Συνολική τάση:

$$\sigma_{y,Ed} = \sigma_{y1} + \sigma_{y2} + \sigma_{y3}$$

$$\text{Έλεγχος: } K = \frac{\sigma_{y,Ed}}{\sigma_{y,Rd}} \leq 1,00$$

3.2.4 Έλεγχος διατομής σε διαξονική κάμψη για το συνδυασμό φορτίων 5 (μέγιστη ροπή περί τον ασθενή άξονα αδρανείας)

$$\sigma_{y1} = \frac{M_y}{W_{el,y}}$$

$$\sigma_{y2} = \frac{M_z}{W_{el,f,z}}$$

$$W_{el,f,z} = \frac{1}{6} t_f b^2$$

$$\sigma_{y,Ed} = \sigma_{y1} + \sigma_{y2}$$

$$\text{Έλεγχος: } K = \frac{\sigma_{y,Ed}}{\sigma_{y,Rd}} \leq 1,00$$

3.3 Έλεγχος τοπικής έντασης υπό το φορτίο δοκού

Ο έλεγχος γίνεται στο ανώτατο σημείο του κορμού με βάση την ελαστική ανάλυση και κριτήριο ισοδύναμης τάσης

3.3.1 Ορθή κατά μήκος τάση λόγω κύριας κάμψης

$$\sigma_x = \frac{M_y}{I_y} y$$

όπου

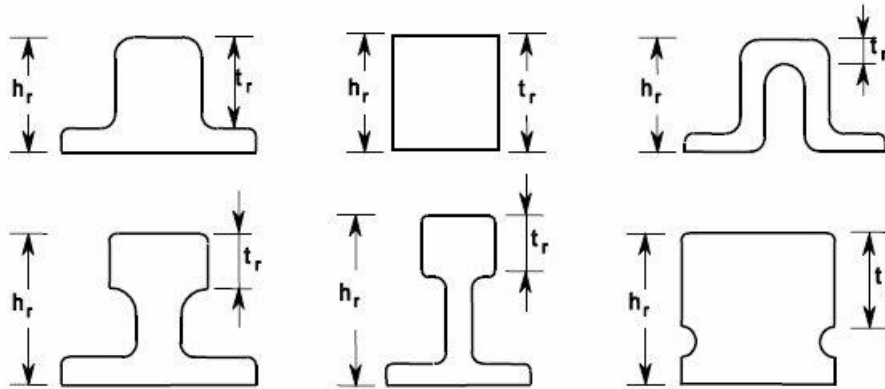
M_y η ροπή περί τον ισχυρό άξονα από εντατικά μεγέθη [2]+[6]

$y = d/2$ δηλ. το μισό καθαρό ύψος του κορμού

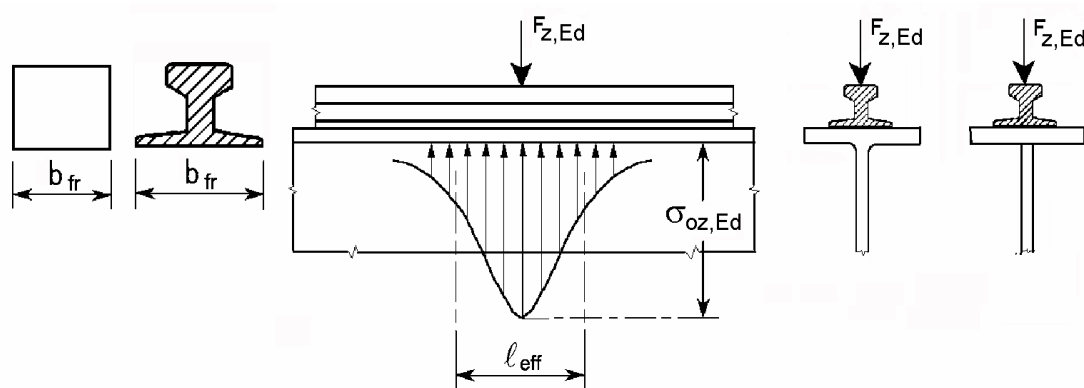
I_y η ροπή αδράνειας της διατομής περί τον ισχυρό άξονα y .

3.3.2 Ορθή εγκάρσια θλιπτική τάση λόγω φορτίου τροχού

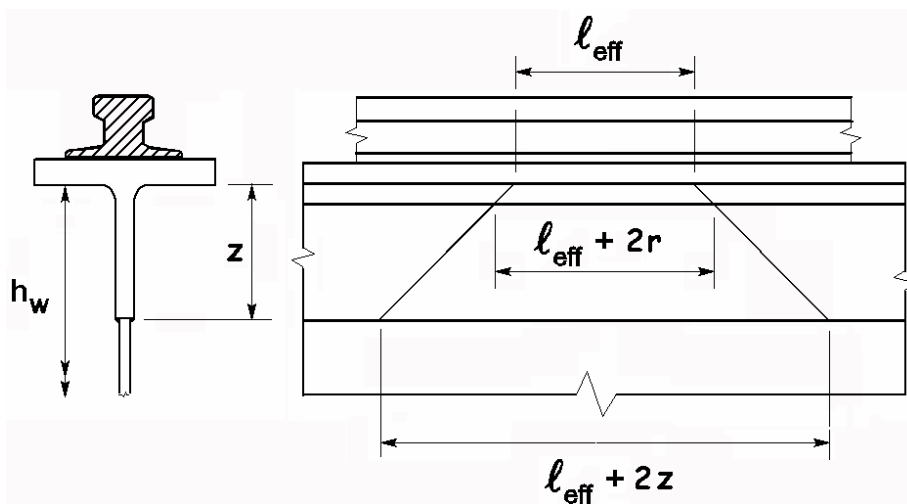
Σύμφωνα με τον EC3, Μέρος 6.



Σχήμα 5.2: Ελάχιστο πάχος t_r κάτω από τη φέρουσα επιφάνεια της τροχιάς.



Σχήμα 5.2: Ενεργό μήκος φόρτισης l_{eff}



Σχήμα 5.3: Κατανομή σε 45° του ενεργού πλάτους φόρτισης l_{eff}

Case	Description	Effective loaded length ℓ_{eff}
(a)	Crane rail rigidly fixed to the flange	$\ell_{\text{eff}} = 3,25 [I_{\text{rf}} / t_w]^{1/3}$
(b)	Crane rail not rigidly fixed to flange	$\ell_{\text{eff}} = 3,25 [(I_r + I_{\text{f,eff}}) / t_w]^{1/3}$
(c)	Crane rail mounted on a suitable resilient elastomeric bearing pad at least 6mm thick.	$\ell_{\text{eff}} = 4,25 [(I_r + I_{\text{f,eff}}) / t_w]^{1/3}$
<p>$I_{\text{f,eff}}$ is the second moment of area, about its horizontal centroidal axis, of a flange with an effective width of b_{eff}</p> <p>I_r is the second moment of area, about its horizontal centroidal axis, of the rail</p> <p>I_{rf} is the second moment of area, about its horizontal centroidal axis, of the combined cross-section comprising the rail and a flange with an effective width of b_{eff}</p> <p>t_w is the web thickness.</p>		
<p>$b_{\text{eff}} = b_{\text{fr}} + h_r + t_f$ but $b_{\text{eff}} \leq b$</p> <p>where: b is the overall width of the top flange;</p> <p>b_{fr} is the width of the foot of the rail, see figure 5.2;</p> <p>h_r is the height of the rail, see figure 5.1;</p> <p>t_f is the flange thickness.</p>		
<p>Note: Allow for crane rail wear, see 5.6.2(2) and 5.6.2(3) in determining I_r, I_{rf} and h_r.</p>		

Πίνακας 5.1: Ενεργό πλάτος φόρτισης ℓ_{eff}

Το h_r λαμβάνεται μειωμένο κατά 25%, δηλ. στο 75% του ονομαστικού του πάχους λόγω φθοράς σύμφωνα με την EC3-6, §5.6.2 (2)

$$\sigma_{y1} = \frac{Q_{r,max}}{\ell_{\text{eff}} t_w}$$

3.3.3 Ορθές τάσεις επί του κορμού λόγω εκκεντρότητας του κατακόρυφου φορτίου

Η εκκεντρότητα προκαλεί στροφή του πέλματος της δοκού και επομένως ορθές τάσεις από κάμψη στον κορμό.

Στρεπτική ροπή αδράνειας του άνω πέλματος είναι:

$$I_t = \frac{1}{3} b t_f^3$$

Ο συντελεστής n υπολογίζεται σύμφωνα με τον EC3, Μέρος 6, εξ.

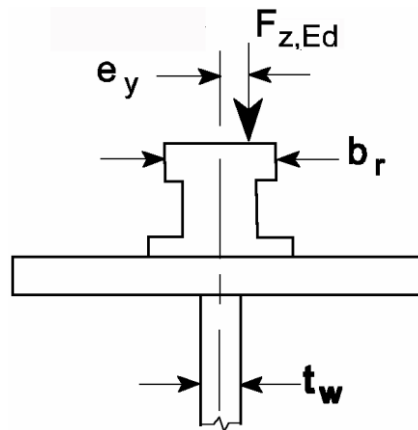
$$n = \left(\frac{0.75 a t_w^3}{I_t} \frac{\sinh^2 \left(\pi \frac{h_w}{a} \right)}{\sinh \left(\frac{2\pi h_w}{\alpha} \right) - \frac{2\pi h_w}{\alpha}} \right)^{0.5} \quad (5.3)$$

Η ορθή τάση σ_{y2} υπολογίζεται σύμφωνα με τον EC3, Μέρος 6, εξ.:

$$\sigma_{y2} = \sigma_{T,Ed} = \frac{6 T_{Ed}}{\alpha t_w} n \tanh(n), \quad (5.2)$$

$$T_{Ed} = F_{z,Ed} e_y \quad (5.4)$$

Όπου e_y είναι η εκκεντρότητα του φορτίου του τροχού, αλλά με $e_y \geq 0,5 t_w$. Το φορτίο του τροχού ορίζεται στην §2.5.2.1(2) του EC1-3. $F_{z,ED} = Q_{r,max}$



Σχέδιο 5.5: Στρέψη άνω πέλματος

3.3.4 Διατμητικές τάσεις από κάμψη

$$S = b \frac{t_f (h - t_f)}{2}$$

$$\tau_1 = \frac{V_{Ed} S}{t_w I_y}$$

Όπου V_{Ed} από εντατικά μεγέθη [2]+[6]

3.3.5 Πρόσθετες διατμητικές τάσεις

Λαμβάνεται το 20% της ορθής εγκάρσιας θλιπτικής τάσης λόγω του φορτίου τροχού:

$$\tau_2 = 0,20 \sigma_{y1}$$

όπου σ_{y1} η ορθή τάση από την § 3.3.2

3.3.6 Έλεγχος ισοδύναμης τάσης

$$\sigma_y = \sigma_{y1} + \sigma_{y2}$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 3\tau^2 - \sigma_x \sigma_y}$$

$$\text{Έλεγχος: } K = \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{y,Rd}} \leq 1,00$$

3.4 Έλεγχος μέλους έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού για συνδυασμό φορτίων 1

Ο έλεγχος γίνεται με βάση την αντοχή έναντι καμπτικού λυγισμού περί τον άξονα z ιδεατής διατομής αποτελούμενης από το θλιβόμενο πέλμα και το 1/5 του κορμού, όπου οι πλευρικές δυνάμεις και οι στρεπτικές ροπές λαμβάνονται υπόψη, EC3-Μέρος 6-§6.3.2.3 (1).

3.4.1 Ιδεατή διατομή αποτελούμενη από το θλιβόμενο πέλμα και το 1/5 του κορμού

$$A = b t_f + \frac{1}{5} (h - 2t_f) t_w + 2r^2 - \pi \frac{r^2}{2}$$

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} \quad \text{όπου } I_z = \frac{1}{12} t_f b_f^3$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} \quad \text{όπου } \lambda_z = \frac{L_{cr}}{i_z} \quad \text{και } \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

$$\Phi = 0.5 [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$N_{f,Ed} = \frac{M_y}{h - t_f}$$

$$N_{Rd} = \chi \frac{A f_y}{\gamma_{M_1}}$$

$$\text{Έλεγχος: } K = \frac{N_{f,Ed}}{N_{Rd}} \leq 1,00$$

3.4.2 Θλιβόμενο πέλμα

Οι οριζόντιες δυνάμεις στις οποίες περιέχεται η επιρροή των στρεπτικών ροπών θεωρείται ότι παραλαμβάνονται μόνο από το θλιβόμενο πέλμα.

$$W_{pl,f} = \frac{1}{4} t_f b^2$$

$$M_{z,Rd} = \frac{W_{pl,f} f_y}{\gamma_{M_0}}$$

Για τον έλεγχο αλληλεπίδρασης μέλους υπό κάμψη και αξονική θλιπτική δύναμη χρησιμοποιείται η Μέθοδος 2 του ΕΚ3-Μέρος 1.1-Παράρτημα Β, όπου το c_{mz} λαμβάνεται σύμφωνα με τον Πίνακα Β.3, π.χ. 0,9, για μέλη με λυγισμό από μετάθεση,.

$$k_{zz} = c_{mz} \left[1 + (2\bar{\lambda}_z - 0.6) \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M_1}}} \right] \leq c_{mz} \left[1 + 1.4 \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M_1}}} \right]$$

$$\text{Έλεγχος: } K = \frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M_1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\frac{\chi_{LT} M_{y,Rk}}{\gamma_{M_1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M_1}}} \leq 1.00$$

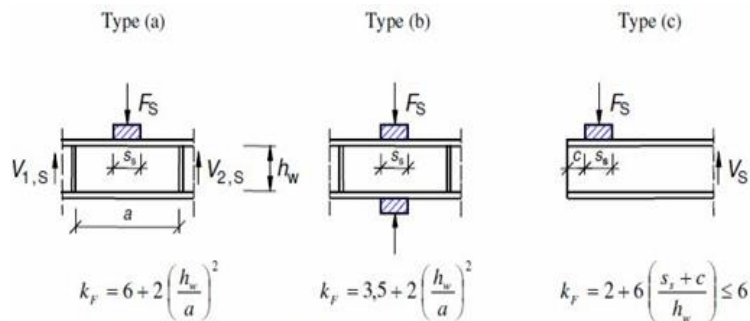
3.5 Αντοχή του κορμού υπό τα φορτία τροχού

Ο έλεγχος αυτός αφορά μόνο την περίπτωση που η κύλιση είναι στο άνω πέλαμα.

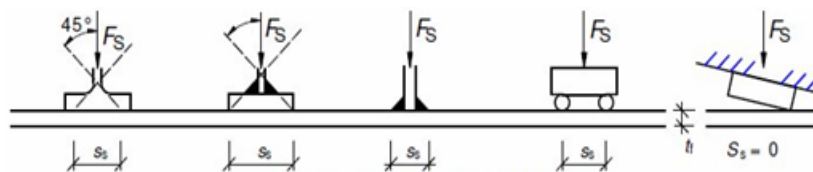
3.5.1 Ενεργό φορτιζόμενο μήκος.

Υπολογίζεται σύμφωνα με την §6.5 του EC3, Μέρος 1.5.

Ανάλογα με την απόσταση των νευρώσεων, διακρίνουμε 3 περιπτώσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1



Σχήμα 6.1: Συντελεστές πλευρικού λυγισμού για διάφορους τύπους εφαρμογής φορτίου



Σχήμα 6.2: Μήκος έδρασης

Για τη περίπτωση (a) το ενεργό φορτιζόμενο μήκος l_y υπολογίζεται σύμφωνα με την εξ. (6.1) του EC3, Μέρος 6, ως εξής:

$$l_y = s_s + 2t_f(1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \text{ όπου } s_s = l_{eff} - 2t_f$$

Όπου

l_{eff} ορίζεται στον Πίνακα 5.1 της §3.3.2

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w}$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 \text{ if } \bar{\lambda}_F > 0,5$$

$$m_2 = 0 \text{ if } \bar{\lambda}_F \leq 0,5$$

3.5.2 Μειωτικός συντελεστής χ_F ενεργού μήκους για την αντοχή

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1,00$$

όπου

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}}$$

και

$$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w}, \quad k_f \text{ από σχήμα 6.1}$$

3.5.3 Έλεγχος κορμού υπό εγκάρσια φορτία:

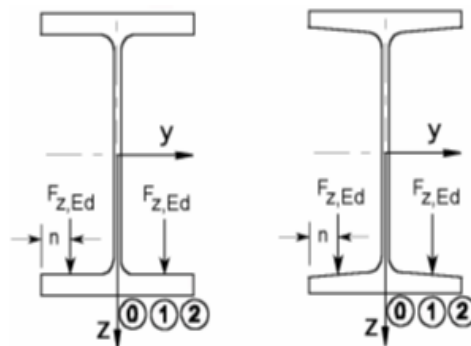
$$L_{eff} = \chi_F l_y$$

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} l_{eff} t_w}{\gamma_{M_1}}$$

$$\text{Έλεγχος: } K = \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,00$$

όπου F_{Ed} το μέγιστο κατακόρυφο φορτίο ανά τροχό από συνδυασμό [1].

3.5.4 Περίπτωση κύλισης στο κάτω πέλμα



Σχήμα 5.6: Θέσεις για τον υπολογισμό τάσεων λόγω φορτίων τροχού.

Με δεδομένο ότι η απόσταση x_w κατά μήκος του δοκού κύλισης ανάμεσα σε δυο γειτονικούς τροχούς δεν είναι μικρότερη από $1.5 b$ (όπου b το πλάτος του πέλματος της δοκού), η τοπική τάση $\sigma_{ox,Ed}$ λόγω διαμήκου κάμψης και η τάση $\sigma_{oy,Ed}$ λόγω της εγκάρσιας κάμψης στο κάτω πέλμα και σε απόσταση από το άκρο της δοκού όχι μικρότερης από b , υπολογίζεται με βάση τους τύπους (EN 1993-6:2007)

$$\sigma_{ox,Ed} = c_x F_{z,Ed} / t_1^2 \quad (5.5)$$

$$\sigma_{oy,Ed} = c_y F_{z,Ed} / t_1^2 \quad (5.6)$$

όπου: $F_{z,Ed}$ είναι το εγκάρσιο φορτίο του τροχού και t_1 είναι το πάχος του πέλματος στον άξονα του φορτίου του τροχού.

Γενικά οι συντελεστές c_x και c_y στις θέσεις 0, 1 και 2 σύμφωνα με το σχήμα 5.6 μπορούν να λαμβάνονται από τον Πίνακα 5.2 ανάλογα αν τα πέλματα της δοκού είναι παράλληλα ή με κλίση, και ανάλογα με την τιμή μ που ορίζεται από τον τύπο:

$$\mu = 2 n / (b - t_w) \quad (5.7)$$

Σε απουσία καλύτερης πληροφόρησης, η τοπική τάση $\sigma_{oy,end,Ed}$ σε κάτω πέλμα δοκού χωρίς ενισχύσεις, εξαιτίας φορτίου τροχού σε ένα κάθετο άκρο της δοκού μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$\sigma_{oy,end,Ed} = (5,6 - 3.225 \mu - 2.8 \mu^3) F_{z,Ed} / t_f^2 \quad (5.6)$$

όπου t_f είναι το μέσο πάχος του πέλματος.

3.6 Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας (ΟΚΛ)

3.6.1 Στατικό σύστημα δοκού κύλισεως

Στην περίπτωση που το στατικό σύστημα της δοκού κύλισης είναι συνεχής δοκός πολλών άνισων ανοιγμάτων, το μέγιστο βέλος κάμψης προκύπτει από μητρωική ανάλυση του φορέα.

Στην περίπτωση της αμφιέριστης δοκού το βέλος κάμψης προκύπτει πιο απλά από τους τύπους της στατικής ισοστατικών φορέων.

Παρακάτω θα παρουσιάσουμε την περίπτωση της αμφιέριστης δοκού επειδή είναι απλούστερη με γνωστούς τύπους υπολογισμού. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε καλύπτει και τις δυο περιπτώσεις.

3.6.2 Κατακόρυφη παραμόρφωση δοκού κύλισεως υπό τα φορτία τροχού

Για την περίπτωση στατικού συστήματος αμφιέριστης δοκού, ανάλογα με την απόσταση των τροχών a το βέλος κάμψης f λόγω του φορτίου $Q_{r,max}$ του τροχού της γερανογέφυρας υπολογίζεται:

$$\text{Αν } a < 0.65 l \text{ τότε } \delta_{z1} = \frac{Q_{r,max} c}{24 E I} (3 l^2 - 4 c^2)$$

$$\text{Αν } a \geq 0.65 l \text{ τότε } \delta_{z1} = \frac{Q_{r,max} l^3}{48 E I}$$

Το $Q_{r,max}$ υπολογίζεται με συντελεστή ασφάλειας για μόνιμα και κινητά φορτία $\gamma = 1$. Τα κινητά φορτία εισάγονται με τους δυναμικούς τους συντελεστές ανάλογα με το συνδυασμό φόρτισης.

Το βέλος κάμψης λόγω του ίδιου βάρους q της δοκού κύλισης υπολογίζεται:

$$\delta_{z2} = \frac{5}{384} \frac{q l^3}{E I}$$

Και το συνολικό βέλος κάμψης είναι το άθροισμα των δυο παραπάνω.

$$\delta_z = \delta_{z1} + \delta_{z2}$$

Το μέγιστο επιτρεπόμενο βέλος κάμψης υπολογίζεται σύμφωνα με τον Πίν. 7.2α του ΕΚ3 μέρος 6:

$$\delta_{z,max} = \min \left\{ \frac{L}{600} ; 25mm \right\}$$

$$\text{Έλεγχος: } K = \frac{\delta_z}{\delta_{z,max}} \leq 1,00$$

3.6.3 Διαφορική κατακόρυφη παραμόρφωση των απέναντι δοκών κυλίσεως

Όταν στην περισσότερη φορτιζόμενη δοκό ασκείται το μέγιστο φορτίο, στην απέναντι δοκό ασκείται το ελάχιστο.

Το φορτίο των δοκών λαμβάνεται χωρίς δυναμικούς συντελεστές, από συνδυασμό 4 ή 5. Υπολογίζονται τα βέλη κάμψης των απέναντι δοκών για $Q_{r,min}$ και $Q_{r,max}$ αντίστοιχα και ελέγχεται η διαφορά τους Δh_c να μην υπερβαίνει το

$$\Delta h_{max} = s/600$$

όπου s το άνοιγμα της γερανογέφυρας.

$$\text{Έλεγχος: } K = \frac{\Delta h_c}{\Delta h_{max}} \leq 1,00$$

3.6.4 Παραμόρφωση δοκού κυλίσεως υπό οριζόντια φορτία

Η δυσμενέστερη περίπτωση είναι όταν το φορτίο H_s ασκηθεί στο μέσον του ανοίγματος. Όπως και στην περίπτωση της ΟΚΑ, θα υποθεθεί ότι το φορτίο θα παραληφθεί από το άνω πέλμα της δοκού κύλισης με ροπή αδράνειας:

$$I_{f,z} = \frac{1}{12} t_f b^3$$

Το βέλος κάμψης δ_y υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\delta_y = \frac{H_s l^3}{48 E I_{f,z}}$$

Και θα πρέπει να μην υπερβαίνει το $\delta_{y,max} = L/600$

$$\text{Έλεγχος: } K = \frac{\delta_y}{\delta_{y,max}} \leq 1,00$$

3.6.5 Αποφυγή ταλάντωσης του κάτω πέλματος

Ελέγχεται ότι η λυγνρότητα του κάτω πέλματος δεν θα υπερβεί την τιμή 250 σύμφωνα με την παράγραφο 7.6(2) του ΕΚ3, μέρος

Ροπή αδράνειας κάτω πέλματος:

$$I_z = \frac{1}{12} t_f b^3$$

Ακτίνα αντίστασης:

$$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{t_f b}}$$

Λυγηρότητα κάτω πέλματος:

$$\lambda = L/i_z$$

$$\text{Έλεγχος: } K = \frac{\lambda}{250} \leq 1,00$$

3.6.6 Περιορισμός της ευαισθησίας του κορμού έναντι λυγισμού (limitation of web breathing)

Το υπερβολικό τρεμούλιασμα του κορμού μπορεί να αμεληθεί σε φατνώματα χωρίς κατά μήκος νευρώσεις στις οποίες ο λόγος b/t_w είναι μικρότερος του 120 σύμφωνα με την §7.4 (3) του EC3, Μέρος 6.

$$\text{Έλεγχος: } K = (b/t_w)/120 \leq 1,00$$

3.6.7 Αναστρεψιμότητα των τάσεων

Στη στάθμη φορτίων της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας πρέπει να εξασφαλίζεται, τόσο για τη γενική όσο και την τοπική ένταση, ότι οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις είναι ελαστικές και επομένως οι αντίστοιχες τάσεις αναστρέψιμες.

Εφόσον δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι πλαστικές αντοχές των διατομών, οι δε έλεγχοι στην οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ) έχουν γίνει ελαστικά, η αντίστοιχη συμπεριφορά στην στάθμη λειτουργίας είναι εξασφαλισμένη.

4 Κόπωση

4.1 Γενικά

Λαμβάνονται υπ' όψιν οι κάτωθι διατάξεις των Ευρωκωδίκων:

EC1 - Μέρος 3 - §2.12.1 (2) - (3)

(2) Για συνθήκες κανονικής λειτουργίας του γερανού τα φορτία κόπωσης μπορούν να εκφράζονται με φορτία κόπωσης ισοδύναμης βλάβης Q_e που μπορούν να λαμβάνονται σταθερά για όλες τις θέσεις του γερανού ώστε να καθορίζονται οι επιδράσεις από φορτία κόπωσης.

(3) Το φορτίο κόπωσης ισοδύναμης βλάβης Q_e μπορεί να προσδιορίζεται έτσι ώστε να περιλαμβάνει τις επιδράσεις του ιστορικού τάσεων που προκύπτει από τις καθορισμένες συνθήκες λειτουργίας και το λόγο του απόλυτου αριθμού κύκλων φόρτισης κατά τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού ως προς την τιμή αναφοράς $N = 2.0 \times 10^6$ κύκλους.

EC3 - Μέρος 6 - §9.1 (3)

(3) Ο έλεγχος σε κόπωση απαιτείται γενικά μόνο για εκείνα τα στοιχεία της κατασκευής που υποστηρίζει γερανό τα οποία υπόκεινται σε μεταβολές τάσεων από τα κατακόρυφα φορτία του γερανού. Δηλ. οι τάσεις που προκαλούνται από τα οριζόντια φορτία δε λαμβάνονται υπόψη.

Κατά τον προσδιορισμό της διακυμάνσεως των τάσεων λαμβάνονται υπόψη οι τάσεις οφειλόμενες, τόσο στη συνολική συμπεριφορά της δοκού κυλίσεως, όσο και σε τοπικά φαινόμενα και ειδικότερα οι αναπτυσσόμενες τάσεις κάτω από τα συγκεντρωμένα φορτία τροχών αφ' ενός, και οι αναπτυσσόμενες λόγω της στροφής του άνω πέλματος της δοκού, ως συνέπεια της έκκεντρης επιβολής των κατακόρυφων φορτίων, αφ' ετέρου.

4.2 Ιδεατά ισοδύναμα φορτία κοπώσεως

Τα ισοδύναμα ιδεατά φορτία κοπώσεως προσδιορίζονται από τη σχέση:

$$Q_e = \varphi_{fat} \lambda_i Q_{max,i}$$

Για το συντελεστή λ_i , λαμβάνονται δυο τιμές, μια για ορθές και μια για διατμητικές τάσεις, που υπολογίζονται σύμφωνα με τον EC1, Μέρος 3, Πίν. 2.12. Αντίστοιχα υπολογίζονται δυο τιμές του $Q_{e,i}$ μια για ορθές και μια για διατμητικές τάσεις.

Για τον υπολογισμό του λ_i πρέπει να ξέρουμε την κατηγορία κόπωσης της γερανογέφυρας που παίρνει τιμές από S0-S9, όπου μεγαλύτερη κατηγορία σημαίνει και μεγαλύτερη ευαισθησία στα φαινόμενα κόπωσης. Συνήθως δίνεται από τον κατασκευαστή, αλλά αν δεν παρέχεται αυτή η πληροφορία, τότε μπορεί να λαμβάνεται με βάση τον EC1, Μέρος 3, Παρ. Β, Πίν. Β1 ανάλογα με τον τύπο του γερανού και της ανάρτησης.

Η χαρακτηριστική τιμή φορτίου τροχού $Q_{max,i}$ λαμβάνεται από τους συνδυασμούς 4 και 5 χωρίς να θεωρηθούν δυναμικοί συντελεστές.

Ο δυναμικός συντελεστής φ_{fat} λαμβάνεται ως η μέγιστη από τις παρακάτω τιμές:

$$\varphi_{fat,1} = \frac{1 + \varphi_1}{2}$$

$$\varphi_{fat,2} = \frac{1 + \varphi_2}{2}$$

4.3 Έλεγχος έναντι κοπώσεως της συγκόλλησης άνω πέλματος - κορμού

4.3.1 Ορθές τάσεις

4.3.1.1 Τάση λόγω συγκεντρωμένου φορτίου τροχού

Υπολογίζεται το ενεργό μήκος κορμού l_{eff} όπως στην ΟΚΑ-2-β, αλλά λαμβάνοντας φθορά της τροχιάς το ήμισυ της θεωρηθείσης στον έλεγχο αντοχής σύμφωνα με EC3, Μέρος 6, §5.6.2 (3):

$$\Delta t_r = \frac{1}{2} 25\% h_r$$

Η απόσταση του ανώτερου σημείου της τροχιάς από το ανώτατο σημείο του κορμού είναι:

$$d_r = h_r - \Delta t_f + t_f$$

Το ενεργό πλάτος τροχιάς είναι (EC3, Μέρος 6, Πίν. 5.1) :

$$b_{eff} = b_r + d_r$$

Ροπή αδράνειας ενεργού πέλματος:

$$I_{f,eff} = \frac{1}{12} b_{eff} t_f^3$$

Ροπή αδράνειας τροχιάς:

$$I_r = \frac{1}{12} b_r (h_r - \Delta t_r)^3$$

Ενεργό μήκος κατανομής της τάσης (EC3, Μέρος 6, Πίν. 5.1) :

$$l_{eff} = 3.25 \left(\frac{I_r + I_{f,eff}}{t_w} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Το ενεργό εμβαδόν του κορμού υπολογίζεται:

$$A_{w,eff} = l_{eff} t_w$$

Και έτσι η ορθή τάση είναι:

$$\sigma_1 = Q_{e,N} / A_{w,eff}$$

4.3.1.2 Τάση λόγω στροφής του άνω πέλματος (οφειλόμενης στην έκκεντρη δράση του κατακόρυφου φορτίου)

Η εκκεντρότητα του κατακόρυφου φορτίου είναι:

$$e = b_r / 4$$

και η στρεπτική ροπή είναι:

$$T_{Ed} = e Q_{e,N}$$

Η ροπή στρέψης I_t είναι:

$$I_t = \frac{1}{3} b t_f^3$$

Ο συντελεστής n είναι:

$$n = \left[\frac{0.75 a t_w^3}{I_t} \frac{\sinh^2\left(\pi \frac{h_w}{a}\right)}{\sinh\left(2\pi \frac{h_w}{a}\right) - 2\pi h_w/a} \right]^{0.5}$$

Όπου a η απόσταση των εγκάρσιων νευρώσεων κορμού.

Οπότε η ορθή τάση σ_{y2} είναι

$$\sigma_{y2} = \sigma_{T,Ed} = \frac{6 T_{Ed}}{a t_w^2} n \tanh(n)$$

4.3.1.3 Έλεγχος σε κόπωση λόγω των ορθών τάσεων.

Η διακύμανση ορθής τάσης είναι:

$$\Delta\sigma_{E2} = \sigma_1 + \sigma_{y2}$$

Η κατηγορία συγκόλλησης λαμβάνεται σύμφωνα με τον EC3, Μέρος 1-9, Πίνακας 8.10, και με βάση αυτή υπολογίζεται η ορθή τάση αντοχής $\Delta\sigma_c$

Ο συντελεστής $\gamma_{Ff} = 1$ σύμφωνα με τον EC3, Μέρος 6, §9.2 (1)

Ο συντελεστής $\gamma_{Mf} = 1.35$ σύμφωνα με τον EC3, Μέρος 6, §9.2 (2)

$$\text{Έλεγχος: } K = \frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \leq 1,00$$

4.3.2 Διατμητικές τάσεις

4.3.2.1 Τάση λόγω συγκεντρωμένου φορτίου τροχού.

Εμβαδόν κορμού: $A_w = h_w t_w$

Διατμητική τάση: $\tau_1 = Q_{e,T} / A_w$

4.3.2.2 Πρόσθετες διατμητικές τάσεις

Η διατμητική τάση τ_2 λαμβάνεται ίση με το 20% της ορθής εγκάρσιας θλιπτικής τάσης λόγω του φορτίου τροχού, σύμφωνα με τον EC3, Μέρος 6, §5.7.2 (1).

$$\tau_2 = 0.20 \sigma_1$$

4.3.2.3 Έλεγχος σε κόπωση λόγω των διατμητικών τάσεων

Η διακύμανση διατμητικής τάσης είναι:

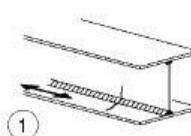
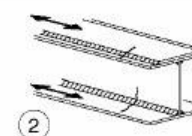
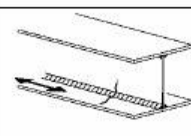
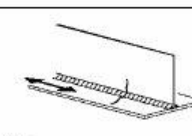

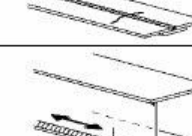
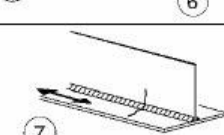
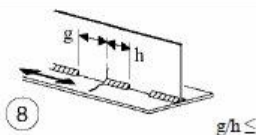
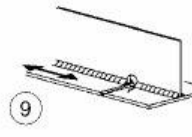

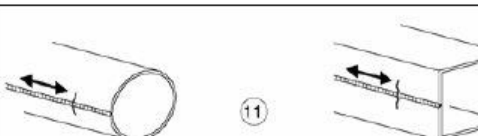
$$\Delta\tau_{E2} = \tau_1 + 2\tau_2$$

Η διατμητική τάση αντοχής $\Delta\sigma_c$ υπολογίζεται με βάση την κατηγορία συγκόλλησης σύμφωνα με τον Πίνακα 8.2, EC3, Μέρος 1-9.

Ο συντελεστής $\gamma_{Ff} = 1.00$ σύμφωνα με τον EC3, Μέρος 6, §9.2 (1)

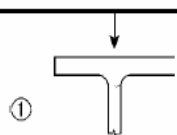
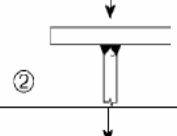
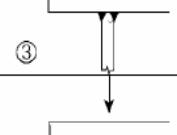
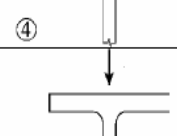
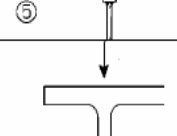
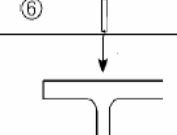
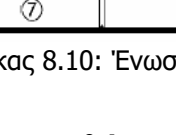
Ο συντελεστής $\gamma_{Mf} = 1.35$ σύμφωνα με τον EC3, Μέρος 6, §9.2 (2)

$$\text{Έλεγχος: } K = \frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \leq 1,00$$

Detail category	Constructional detail	Description	Requirements
125	 	<u>Continuous longitudinal welds:</u> 1) Automatic butt welds carried out from both sides. 2) Automatic fillet welds. Cover plate ends to be checked using detail 6) or 7) in Table 8.5.	<u>Details 1) and 2):</u> No stop/start position is permitted except when the repair is performed by a specialist and inspection is carried out to verify the proper execution of the repair.
112	 	3) Automatic fillet or butt weld carried out from both sides but containing stop/start positions. 4) Automatic butt welds made from one side only, with a continuous backing bar, but without stop/start positions.	4) When this detail contains stop/start positions category 100 to be used.
100	 	5) Manual fillet or butt weld. 6) Manual or automatic butt welds carried out from one side only, particularly for box girders	5), 6) A very good fit between the flange and web plates is essential. The web edge to be prepared such that the root face is adequate for the achievement of regular root penetration without break-out.
100		7) Repaired automatic or manual fillet or butt welds for categories 1) to 6).	7) Improvement by grinding performed by specialist to remove all visible signs and adequate verification can restore the original category.
80	 $g/h \leq 2,5$	8) Intermittent longitudinal fillet welds.	8) $\Delta\sigma$ based on direct stress in flange.
71		9) Longitudinal butt weld, fillet weld or intermittent weld with a cope hole height not greater than 60 mm. For cope holes with a height > 60 mm see detail 1) in Table 8.4	9) $\Delta\sigma$ based on direct stress in flange.
125		10) Longitudinal butt weld, both sides ground flush parallel to load direction, 100% NDT	
112		10) No grinding and no start/stop	
90		10) with start/stop positions	
140		11) Automatic longitudinal seam weld without stop/start positions in hollow sections	11) Free from defects outside the tolerances of EN 1090. Wall thickness $t \leq 12,5$ mm.
125		11) Automatic longitudinal seam weld without stop/start positions in hollow sections	11) Wall thickness $t > 12,5$ mm.
90		11) with stop/start positions	

For details 1 to 11 made with fully mechanized welding the categories for automatic welding apply.

Πίνακας 8.2: Συγκολλητές διατομές

Detail category	Constructional detail	Description	Requirements
160		1) Rolled I- or H-sections	1) Vertical compressive stress range $\Delta\sigma_{vert}$ in web due to wheel loads
71		2) Full penetration tee-butt weld	2) Vertical compressive stress range $\Delta\sigma_{vert}$ in web due to wheel loads
36*		3) Partial penetration tee-butt welds, or effective full penetration tee-butt weld conforming with EN 1993-1-8	3) Stress range $\Delta\sigma_{vert}$ in weld throat due to vertical compression from wheel loads
36*		4) Fillet welds	4) Stress range $\Delta\sigma_{vert}$ in weld throat due to vertical compression from wheel loads
71		5) T-section flange with full penetration tee-butt weld	5) Vertical compressive stress range $\Delta\sigma_{vert}$ in web due to wheel loads
36*		6) T-section flange with partial penetration tee-butt weld, or effective full penetration tee-butt weld conforming with EN 1993-1-8	6) Stress range $\Delta\sigma_{vert}$ in weld throat due to vertical compression from wheel loads
36*		7) T-section flange with fillet welds	7) Stress range $\Delta\sigma_{vert}$ in weld throat due to vertical compression from wheel loads

Πίνακας 8.10: Ένωση άνω πέλματος με κορμό στη δοκό κύλισης

4.3.3 Αλληλεπίδραση ορθών και διατμητικών τάσεων

Ο έλεγχος αλληλεπίδρασης ορθών και διατμητικών τάσεων γίνεται σύμφωνα με τον EC3, Μέρος 1-9, εξ. (8.3) με τον τύπο:

$$k = \left[\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E2}}{\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}} \right]^3 + \left[\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E2}}{\frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf}}} \right]^5 \leq 1,00$$

No	Τύπος γερανού	Κατηγορία ανάρτησης	Κατηγορίες S
1	Χειροκίνητοι γερανοί	HC 1	S0, S1
2	Γερανοί συναρμολόγησης	HC 1, HC 2	S0, S1
3	Γερανοί σε υποσταθμούς ρεύματος	HC 1	S1, S2
4	Γερανοί αποθηκών – με διακοπτόμενη λειτουργία	HC 2	S4
5	Γερανοί αποθηκών, διασκόρπισης υλικών, μάντρες υλικών – με συνεχή λειτουργία	HC 3, HC 4	S6, S7
6	Γερανοί εργοταξίων	HC 2, HC 3	S3, S4
7	Υπερυψωμένοι γερανοί, γερανοί κριού – με αρπάγη ή μαγνητική έλξη	HC 3, HC 4	S6, S7
8	Γερανοί χύτευσης	HC 2, HC 3	S6, S7
9	Γερανοί βυθιζόμενου άκρου	HC 3, HC 4	S7, S8
10	Γερανοί απόξυσης, πλήρωσης	HC 4	S8, S9
11	Γερανοί σφυρηλάτησης	HC 4	S6, S7
12	Γερανογέφυρες μεταφοράς, ημι-φορητοί γερανοί, φορητοί γερανοί με φορείο ή βαρούλκο – με λειτουργία βαρούλκου	HC 2	S4, S5
13	Γερανογέφυρες μεταφοράς, ημι-φορητοί γερανοί, φορητοί γερανοί με φορείο ή βαρούλκο – με αρπάγη ή μαγνητική έλξη	HC 3, HC 4	S6, S7
14	Γερανογέφυρα με σταθερούς ή κυλιόμενους ιμάντες	HC 1	S3, S4
15	Γερανοί λιμένων, ολισθαίνοντες, προσαρμοζόμενοι – με λειτουργία βαρούλκου	HC 2	S3, S4
16	Γερανοί αποβαθρών, επιπλέοντες γερανοί, ρυθμιζόμενου επιπέδου – με βαρούλκο	HC 2	S4, S5
17	Γερανοί αποβαθρών, επιπλέοντες γερανοί, ρυθμιζόμενου επιπέδου – με αρπάγη	HC 3, HC 4	S6, S7
18	Επιπλέοντες γερανοί βαρέος φορτίου, γερανοί με δικτυωτό σκελετό	HC 1	S1, S2
19	Γερανοί εμπορευματοκιβωτίων πλοίων – με λειτουργία βαρούλκου	HC 2	S3, S4
20	Γερανοί εμπορευματοκιβωτίων πλοίων – με αρπάγη ή μαγνητική έλξη	HC 3, HC 4	S4, S5
21	Πυργογερανοί για κατασκευαστική βιομηχανία	HC 1	S2, S3
22	Γερανοί ανέγερσης, δικτυωτοί γερανοί – με λειτουργία βαρούλκου	HC 1, HC 2	S1, S2
23	Γερανοί ανηρτημένοι σε καμπύλη δοκό – με λειτουργία βαρούλκου	HC 2	S3, S4
24	Γερανοί ανηρτημένοι σε καμπύλη δοκό – με αρπάγη ή μαγνητική έλξη	HC 3, HC 4	S4, S5
25	Γερανοί σε δοκούς κυλίσεως με επιτρεπτή χρήση σε τραίνα	HC 2	S4
26	Γερανοί οχημάτων, κινητοί γερανοί – με λειτουργία βαρούλκου	HC 2	S3, S4
27	Γερανοί οχημάτων, κινητοί γερανοί – με αρπάγη ή μαγνητική έλξη	HC 3, HC 4	S4, S5
28	Γερανοί βαρέων οχημάτων, βαρείς κινητοί γερανοί	HC 1	S1, S2

Πίν. Β1 – Συστάσεις για την επιλογή κατηγορίας φόρτισης

Κατηγορίες S	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉
Ορθές τάσεις	0,198	0,250	0,315	0,397	0,500	0,630	0,794	1,00	1,260	1,587
Διατμητικές τάσεις	0,379	0,436	0,500	0,575	0,660	0,758	0,871	1,00	1,149	1,320
<p>ΣΗΜΕΙΩΣΗ 1: Κατά τον προσδιορισμό των λ με πρότυπα φάσματα και κατανομή Gauss για τις επιδράσεις φορτίων, έχουν χρησιμοποιηθεί ο κανόνας Miner και καμπύλες αντοχής σε κόπωση S-N με κλίση $m=3$ για ορθές τάσεις και $m=5$ για διατμητικές τάσεις.</p> <p>ΣΗΜΕΙΩΣΗ 2: Στην περίπτωση που η κατηγορία του γερανού δεν περιλαμβάνεται στα συνοδευτικά έγγραφα δίδονται ενδείξεις στο Παράρτημα Β.</p>										

Πίν. 2.12 – Τιμές του λ σύμφωνα με την κατηγορία του γερανού

5 Λογισμικό για έλεγχο επάρκειας δοκού κύλισης γερανογέφυρας

5.1 Γενικά

Η ανάπτυξη της εφαρμογής έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού Pascal και σε περιβάλλον Delphi 7 για το λειτουργικό σύστημα των MS Windows. Είναι ανεξάρτητη εφαρμογή, δηλ. δεν απαιτείται κάποιο άλλο πρόγραμμα για να τρέξει.

Ο λόγος που επελέγη η γλώσσα Pascal είναι η ευελιξία που προσφέρει το προγραμματιστικό περιβάλλον του Delphi. Επίσης, η Pascal είναι γλώσσα πιο υψηλού επιπέδου από τη C ή τη Fortran και πιο φιλική για την ανάπτυξη επιστημονικών εφαρμογών.

5.2 Εισαγωγή χαρακτηριστικών γερανογέφυρας και δοκού κύλισης.

Η κύρια φόρμα εισαγωγής των χαρακτηριστικών της γερανογέφυρας είναι η παρακάτω.

The screenshot shows the 'ΔΟΚΟΣ ΚΥΛΙΣΗΣ ΓΕΡΑΝΟΓΕΦΥΡΑΣ Geranogefyra_01.GGF' application window. The interface is divided into several sections:

- Input Parameters:** Includes fields for 'Συγκολλητή Διατομή' (Welded Section), 'Χάλυβας' (Steel S 235), 'Κατηγορία συγκόλλησης' (Welding Category 71, 100), 'Στατικό σύστημα' (2. Συνεχής δοκός), 'Max μήκος ανοίγματος Lmax=' (7 m), 'Απόσταση νευρώσεων ak =' (650 cm), 'Βάρος γερανογέφυρας Gg=' (34.5 kN), 'Ανυψωτική ικανότητα Qr,nom=' (100 kN), 'ταχύτητα ανύψωσης vh=' (8 m/min), 'Απόσταση αγκίστρου από δοκό s=' (900 mm), '# τροχών στο άκρο n=' (2), '# ζευγών συζευγμένων τροχών m=' (2), 'απόσταση τροχών at=' (3.15 m), 'γωνία λοξότητας a=' (0.015 rad), 'Διαστάσεις τροχιάς: πλάτος br=' (50 mm), 'Σύστημα διάταξης τροχών' (IFF), 'Ανοιγμάτων' table (L1: 6.00, L2: 7.00, L3: 6.00, L4: 5.00), 'Δοκοί Γερανογέφυρας' (HEA 800, K = 1.008), and '# Αριθμός Δοκών' (2).
- Diagram:** A cross-section diagram of an I-beam with dimensions: height h=300, flange width b=250, flange thickness tf=20, and web thickness tw=15. The Y and Z axes are shown.
- Results Panel:** 'Επάρκεια Δοκού' (Beam Sufficiency) showing: K.O.KA = 0.637, K.O.KA = 0.639, K_κοπωσης = 0.978, and K = 0.639.
- Buttons:** 'Επίλυση', 'Εκτύπωση', 'Βέλτιστη Διατομή', 'Help', and 'Τέλος'.

Σχέδιο A1: Φόρμα εισαγωγής δεδομένων

Κάποια επιπλέον στοιχεία εισάγονται χωριστά με τον παρακάτω διάλογο:

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΓΕΡΑΝΟΓΕΦΥΡΑΣ

Βήμα κίνησης φορτίων dx	0.05
Οι Δρασεις ορίζονται από κατασκευαστή	N
Τρόπος σύνδεσης τροχιάς (EK3-6, tab.3.1)	2
Πέλμα κύλισης γερανογέφυρας (0=πάνω, 1=κάτω)	0
Συντελεστής μ για κύλιση στο κάτω πέλαμα	0.5
Γλώσσα εκτύπωσης: 0=Ελληνικά 1=Αγγλικά	0
Ελεγχος δοκών Γερανογέφυρας	Υ
Χάλυβας δοκών Γερανογέφυρας (0 = ίδιος με δοκό κύλισης)	0
Συντελεστής τριβής κύλισης φορείου μ =	0.2

OK Cancel

Σχέδιο Α2: Φόρμα εισαγωγής συμπληρωματικών στοιχείων

5.3 Έλεγχος διατομής

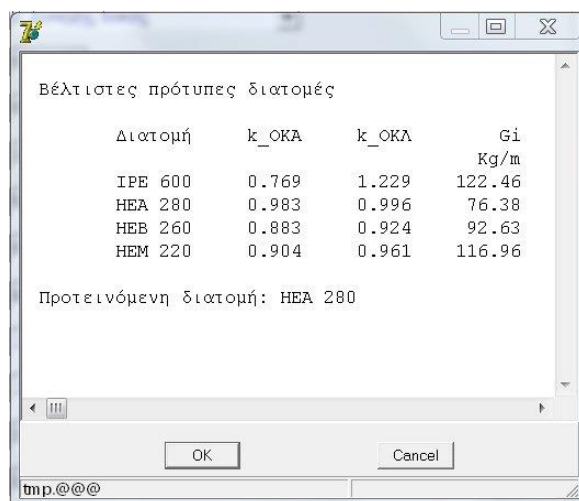
Μπορούμε να δοκιμάσουμε πρότυπες διατομές από τις κατηγορίες IPE, HEA, HEB και HEM που υπάρχουν έτοιμες στη βιβλιοθήκη διατομών του προγράμματος, ή να περιγράψουμε συγκολλητή διατομή δίνοντας τις διαστάσεις κορμού και πελμάτων καθώς και τα πάχη συγκόλλησης και την κατηγορία συγκόλλησης. Για κάθε περίπτωση παίρνουμε το συνολικό βαθμό επάρκειας της διατομής, αλλά και τους επιμέρους βαθμούς επάρκειας για τους ελέγχους ΟΚΑ, ΟΚΛ και Κόπωσης ώστε να δούμε που υπάρχει το πρόβλημα.

5.4 Βέλτιστη επιλογή

Πατώντας το κουμπί «Βέλτιστη Διατομή» το πρόγραμμα δοκιμάζει όλες τις περιπτώσεις των πρότυπων διατομών και επιλέγει αυτή που επαρκεί, βρίσκεται πλησιέστερα στο 1 και έχει το μικρότερο δυνατό βάρος. Επίσης το πρόγραμμα μας πληροφορεί και για τη βέλτιστη από κάθε κατηγορία πρότυπων διατομών.

Στον παρακάτω πίνακα βλέπουμε ότι στην κατηγορία διατομών IPE δεν υπάρχει διατομή που να είναι επαρκής.

Σε κάθε κατηγορία διατομής δίνεται χωριστά ο βαθμός επάρκειας για τους ελέγχους ΟΚΑ και για χωριστά για τους ελέγχους ΟΚΛ. Παρατηρούμε ότι στις διατομές τύπου HEA οι δυο βαθμοί επάρκειας είναι πολύ κοντά και δίνουν την πιο οικονομική λύση.

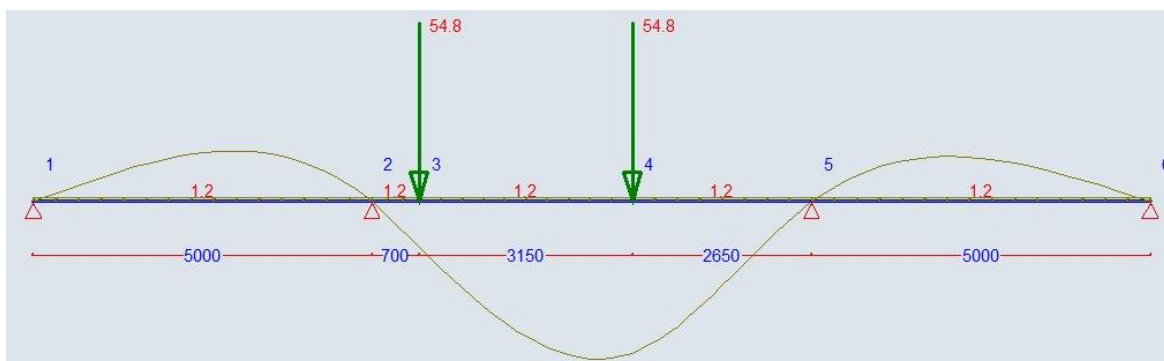


Σχέδιο A3: Αυτόματη επιλογή βέλτιστης διατομής

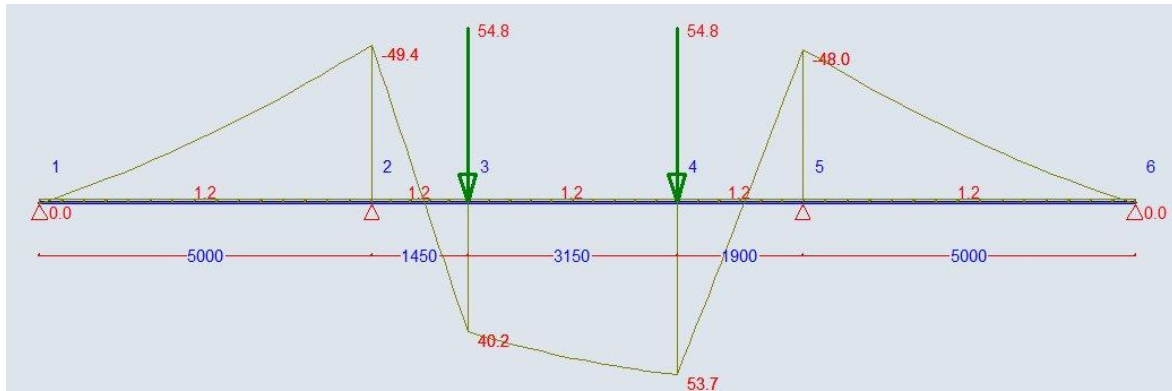
5.5 Στατικό Σύστημα

Αν επιλέξουμε στατικό σύστημα συνεχούς δοκού, θα πρέπει να δώσουμε τον αριθμό των ανοιγμάτων καθώς και το μήκος εκάστου ανοίγματος, στο κάτω αριστερά μέρος της φόρμας. Στην περίπτωση αυτή η ανάλυση γίνεται με τη μητρική μέθοδο και με μετακίνηση των φορτίων των τροχών σε κάθε πιθανή θέση της συνεχούς δοκού ώστε να προσδιορίσουμε τη θέση με το δυσμενέστερο συνδυασμό εντατικών μεγεθών για τα οποία και ελέγχουμε τη διατομή.

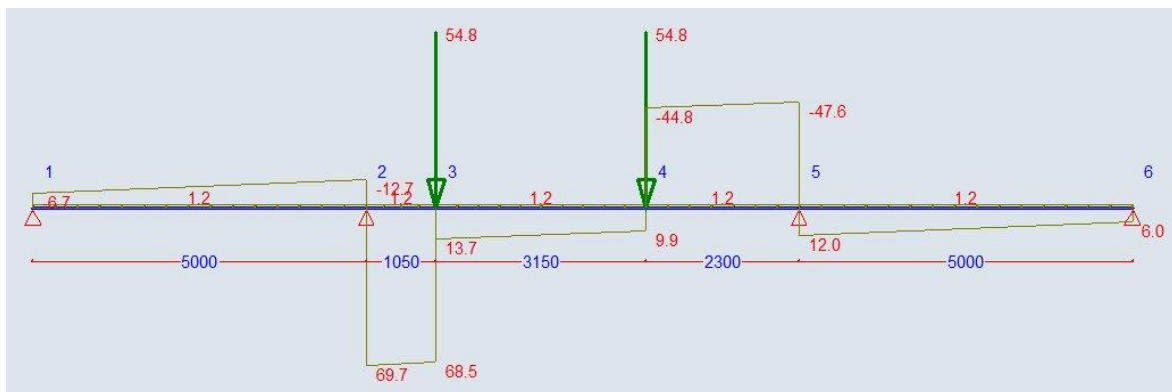
Η μετακίνηση των φορτίων γίνεται με βήμα 0.05m που θεωρείται επαρκές, αλλά ο μελετητής μπορεί να εισάγει και διαφορετικό βήμα αλλά όχι μικρότερο από 0.01 m. Επίσης μπορεί να ελέγξει τα εντατικά μεγέθη $M(x)$, $Q(x)$ καθώς και την παραμόρφωση $w(x)$ σε κάθε σημείο x της δοκού και για οποιαδήποτε θέση της γερανογέφυρας, όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.



Σχέδιο A4: Ελαστική γραμμή δοκού για τυχαία θέση της γερανογέφυρας



Σχέδιο A5: Διάγραμμα ροπών για τυχαία θέση της γερανογέφυρας



Σχέδιο A6: Διάγραμμα τεμνουσών για τυχαία θέση της γερανογέφυρας

5.6 Δυνατότητα εισαγωγής δράσεων από το μελετητή

Ο υπολογισμός των δράσεων γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα και σχηματίζεται το μητρώο δράσεων για όλους τους συνδυασμούς που προβλέπονται από τον κανονισμό. Όμως σε αρκετές περιπτώσεις ο κατασκευαστής της γερανογέφυρας μας δίνει κάποιες από τις δράσεις που προέρχονται από πειραματικά δεδομένα και είναι πιο ακριβείς. Το πρόγραμμα μας επιτρέπει να παρέμβουμε στον πίνακα και να αλλάξουμε όσες από τις δράσεις θέλουμε.

Η δυνατότητα να μπορούμε ή όχι να παρεμβαίνουμε στις δράσεις γίνεται από το διάλογο των σταθερών, στη 2^η σειρά. Αν η τιμή είναι N (No) τότε ο πίνακας είναι κλειδωμένος και δεν μπορούμε να παρέμβουμε. Αν η τιμή είναι Y (Yes) τότε το πρόγραμμα αφήνει τις δράσεις που έχει εισάγει ο μελετητής.

Ο σωστός τρόπος λοιπόν είναι ο εξής.

1. Εισάγουμε τα στοιχεία και ελέγχουμε πρώτη φορά τη δοκό με την παραπάνω τιμή στο N. Έτσι το πρόγραμμα υπολογίζει τις δράσεις αυτόματα.
2. Αλλάζουμε τη μεταβλητή σε Y και παρεμβαίνουμε στον πίνακα αλλάζοντας όσες δράσεις θέλουμε.
3. Επαναλαμβάνουμε τον έλεγχο με τις νέες δράσεις.

Ακόμα λοιπόν και στην περίπτωση που έχουμε γνωστές κάποιες δράσεις, είναι καλύτερα να βάλουμε το πρόγραμμα να μας υπολογίσει τις θεωρητικές τιμές και μετά να κάνουμε τις αλλαγές ώστε να έχουμε τιμές αναφοράς και να συγκρίνουμε.

Ο πίνακας με τις τιμές των δράσεων εμφανίζεται στην παρακάτω μορφή:

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΡΑΣΕΩΝ (ΧΩΡΙΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΑΛΛΑΓΩΝ)

	ΣΦ 1	ΣΦ 2	ΣΦ 3	ΣΦ 4	ΣΦ 5
QrMin1	13.22	13.22	12.02	12.02	12.02
QrMin2	9.66	9.66	8.78	8.78	8.78
QrMax1	40.56	37.09	-	35.89	35.89
QrMax2	10.95	10.79	-	9.91	9.91
HL1	2.64	2.64	2.64	2.64	-
HL2	2.64	2.64	2.64	2.64	-
HT1	2.05	2.05	2.05	2.05	-
HT2	7.44	7.44	7.44	7.44	-
Hs1T	-	-	-	-	8.24
Hs2T	-	-	-	-	8.24

Ενημέρωση Άκυρο

Σχέδιο Α7: Φόρμα με Πίνακα δράσεων για αλλαγή τιμών από μελετητή

5.7 Αναλυτική εκτύπωση αποτελεσμάτων

Το πρόγραμμα εκτυπώνει αναλυτικά όλους τους ελέγχους και τους συντελεστές επάρκειας για τον κάθε έλεγχο. Παραδείγματα αναλυτικών εκτυπώσεων παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα. Μπορούμε να έχουμε εκτύπωση στα ελληνικά και στα αγγλικά.

5.8 Σχεδίαση δοκών γερανογέφυρας

Συνήθως η σχεδίαση της γερανογέφυρας δεν είναι δουλειά του πολιτικού μηχανικού. Όμως σε κάποιες πιο απλές περιπτώσεις μπορεί ο μελετητής να κληθεί να προτείνει διατομές και για τους δοκούς της γερανογέφυρας. Η εφαρμογή δίνει λύση και σ' αυτήν την περίπτωση. Ο έλεγχος γίνεται με την παραδοχή στατικού συστήματος αμφιέριστης δοκού όπου το φορτίο του φορίου με το μέγιστο ωφέλιμο φορτίο ανύψωσης (προσαυξημένα με τον αντίστοιχο δυναμικό συντελεστή) εφαρμόζονται στο μέσον του ανοίγματος. Υπολογίζονται επίσης και οι δυνάμεις λόγω κίνησης της γερανογέφυρα και λόγω κίνησης του φορίου. Έτσι, για την εντατική κατάσταση που προκύπτει ελέγχεται η επάρκεια των δοκών της γερανογέφυρας στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (ΟΚΑ) και στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας (ΟΚΛ).

6 Παραδείγματα

6.1 Παράδειγμα 1. Συγκολλητή διατομή, Συνεχής Δοκός

ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΟΥ ΚΥΛΙΣΗΣ ΓΕΡΑΝΟΓΕΦΥΡΑΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Διαστασιολόγηση σύμφωνα με τα EN1991-3, EN1993-1-1, EN1993-1-5, EN1993-1-9, EN1993-6.

1. Δοκός κύλισης

υλικό	S275	Ροπή αδράνειας $I_z =$	5215.6 cm ⁴
διατομή	300/250/15/20	ελ. ροπή αντ. $W_{el,y} =$	1455.4 cm ³
ύψος διατομής $h =$	300.0 mm	ελ. ροπή αντ. $W_{el,z} =$	417.3 cm ³
πλάτος διατομής $b =$	250.0 mm	ίδιο βάρος $G =$	1.09 kN/m
πάχος κορμού $t_w =$	15.0 mm	Κατηγορία διατομής	1
πάχος πέλματος $t_f =$	20.0 mm	Στατικό σύστημα	Συνεχής
Δοκός		Μήκος ανοίγματος $L =$	6.50 m
εμβαδόν διατομής $A =$	139.0 cm ²		
ροπή αδράνειας $I_y =$	21830.3 cm ⁴		

2. Γερανογέφυρα

Ανοίγμα $l =$	20.00 m	απόσταση τροχών $a =$	3.15 m
Βάρος $G_g =$	34.50 kN	τροχιά	50/30
βάρος φορείου $g_f =$	7.10 kN	πλάτος τροχιάς $b_r =$	50 mm
ανυψ. ικαν. $Q_r, nom =$	50.00 kN	ύψος τροχιάς $h_r =$	30 mm
κατηγορία ανύψωσης	HC2	εκκεντρότητα $e =$	12.50 mm
απόστ. αγκ.-δοκού $s =$	900 mm	ταχύτητα ανύψ. $v =$	8.00 m/min
# τροχών $n =$	2		

3. Δυναμικοί συντελεστές

$\phi_1 =$	1.100	$\phi_4 =$	1.000
$\phi_2 =$	1.145	$\phi_5 =$	1.500
$\phi_3 =$	1.000		

4. Δράσεις

EN1991, Μέρος 3, §2, Πίν.2.2			Συνδυασμοί φόρτισης				
			1	2	3	4	5
Κατακόρυφα φορτία	Ίδιο βάρος δοκού κύλισης (kN/m)	G	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
			1.63	1.63	1.63	1.63	1.63
	Ίδιο βάρος γερανογέφυρας (kN)	Q _r Min1	13.22	13.22	12.02	12.02	12.02
			17.84	17.84	16.22	16.22	16.22
		Q _r Min2	9.66	9.66	8.78	8.78	8.78
			13.05	13.05	11.86	11.86	11.86
Ίδιο βάρος γερανογέφυρας + Ανυψούμενο φορτίο (kN)	Q _r Max1	40.56	37.09	-	35.89	35.89	
		54.76	50.07	-	48.45	48.45	

		QrMax2	10.95	10.79	-	9.91	9.91
			14.78	14.56	-	13.38	13.38
Οριζόντια φορτία	Επιτάχυνση και επιβράδυνση της γερανογέφυρας (kN)	HL1	2.64	2.64	2.64	2.64	-
			3.56	3.56	3.56	3.56	-
		HL2	2.64	2.64	2.64	2.64	-
			3.56	3.56	3.56	3.56	-
		HT1	2.05	2.05	2.05	2.05	-
			2.77	2.77	2.77	2.77	-
	HT2	7.44	7.44	7.44	7.44	-	
		10.04	10.04	10.04	10.04	-	
	Παράγωγη κίνηση γερανογέφυρας (kN)	Hs1T	-	-	-	-	8.24
			-	-	-	-	11.12
		Hs2T	-	-	-	-	8.24
			-	-	-	-	11.12

Οι πρώτοι αριθμοί δηλώνουν τα φορτία λειτουργίας με $\gamma=1.0$ και οι δεύτεροι τα φορτία σχεδιασμού με $\gamma=1.35$.

5. Εντατικά μεγέθη

		My	Vy	Mz	Vz
		KNm	KN	KNm	KN
συνδυασμός 1	max ροπή κατά τον ισχυρό άξονα y	102.17	41.49	19.69	8.50
	max τέμνουσα κατά τον ισχυρό άξονα y	-	82.98	-	-
συνδυασμός 5	max ροπή κατά τον ασθενή άξονα z	81.16	-	29.69	-
	max τέμνουσα κατά τον ασθενή άξονα z	-	-	-	18.27
λόγω ίδιου βάρους (στο κέντρο της δοκού)		8.62	5.30	-	-

Εντατικά μεγέθη από ανάλυση αμφιέρειστης δοκού

5. Εντατικά μεγέθη

		My	Vy	Mz	Vz
		KNm	KN	KNm	KN
συνδυασμός 1	max ροπή κατά τον ισχυρό άξονα y	62.64	19.61	16.15	8.63
	max τέμνουσα κατά τον ισχυρό άξονα y	-	82.38	-	-

συνδυασμός 5	max ροπή κατά τον ασθενή άξονα z	81.16	-	29.69	-
	max τέμνουσα κατά τον ασθενή άξονα z	-	-	-	18.27
	λόγω ίδιου βάρους (στο κέντρο της δοκού)	3.10	5.30	-	-

Εντατικά μεγέθη από ανάλυση συνεχούς δοκού

6. Έλεγχος στην οριακή κατάσταση αστοχίας (OKA)

A. Έλεγχος διατομής

A1. Έλεγχος κορμού σε διάτμηση

Δράση $V_y, Ed = 87.68$ KN
 Αντοχή $V_y, Rd = 619.21$ KN
 $k = V_y, Ed / V_y, Rd = 0.142$
 έλεγχος OK

A2. Έλεγχος άνω πέλματος σε διάτμηση

Δράση $V_z, Ed = 18.27$ KN
 Αντοχή $V_z, Rd = 793.86$ KN
 $V_z, Ed / V_z, Rd = 0.023$
 έλεγχος OK

A3. Έλεγχος σε διαξονική κάμψη και αξονική δύναμη

για το συνδυασμό φορτίων 1 - $\max M_y$
 συν. ορθή τάση $\sigma_y, Ed = 12.64$ kN/cm²
 αντοχή $\sigma_y, Rd = 27.50$ kN/cm²
 $V_z, Ed / V_z, Rd = 0.460$
 έλεγχος OK

A4. Έλεγχος σε διαξονική κάμψη για το συνδυασμό φορτίων 5 - $\max M_z$

συν. ορθή τάση $\sigma_y, Ed = 19.83$ kN/cm²
 αντοχή $\sigma_y, Rd = 27.50$ kN/cm²
 $V_z, Ed / V_z, Rd = 0.721$
 έλεγχος OK

B. Έλεγχος τοπικής έντασης υπό το φορτίο τροχού

κ. μήκος ορθή τάση $\sigma_x = 4.05$ kN/cm²
 εγκ. ορθή τάση $\sigma_y = 9.21$ kN/cm²
 διατμητική τάση $\tau = 1.61$ kN/cm²
 ισοδύναμη τάση $\sigma_{eq} = 8.46$ kN/cm²
 αντοχή $\sigma_{Rd} = 27.50$ kN/cm²
 $\sigma_{eq} / \sigma_{Rd} = 0.308$
 έλεγχος OK

Γ. Έλεγχος μέλους σε στρεπτοκαμπτικού λυγισμού για το συνδυασμό φορτίων 1 [EC3, Μέρος 6, §6.3.2.3 (1)]

Για το θλιβόμενο πέλμα και το 1/5 του κορμού:

ροπή αδρανείας $I_z = 2604.17$ cm⁴
 εμβαδόν $A = 57.91$ cm²
 ανηγμ. λυγ. $\lambda_z = 1.12$
 καμπύλη λυγισμού c
 μειωτικός συντ. $\chi_z = 0.476$
 θλ. δύναμη $N_f, Ed = 252.70$ kN
 αντοχή $N_{Rd} = 757.29$ kN

Για το θλιβόμενο πέλμα :

καμπτική ροπή $M_z, Ed = 16.15$ KNm
 ροπή αντίστασ. $W_f, pl = 312.50$ cm³
 ροπή αντοχής $M_z, Rd = 85.94$ KNm
 $k_{zz} = 1.32$
 λόγος $k = 0.582$
 έλεγχος OK

Δ. Έλεγχος κορμού υπό τα φορτία τροχού

εγκάρσια δύναμη F_{Ed} =	54.76 KN
ενεργό μήκος L_{eff} =	22.63 cm
αντοχή F_{Rd} =	933.38 KN
F_{Ed}/F_{Rd} =	0.059
έλεγχος	OK

7. Έλεγχος στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (ΟΚΛ)**Α. Κατακόρυφη παραμόρφωση υπό τα φορτία τροχού**

κατακόρυφο βέλος δz =	0.63 cm
επιτρ. βέλος $\delta z, \max 1$ =	1.08 cm
επιτρ. βέλος $\delta z, \max 2$ =	2.50 cm
$\delta z/\delta z, \max$ =	0.639
έλεγχος	OK

Β. Διαφορική κατακόρυφη παραμόρφωση απέναντι δοκών κυλίσεων

διαφορική παρ. Δh_c =	0.46 cm
επιτρ. παραμ. $\Delta h_c, \max$ =	3.33 cm
$\Delta h_c/\Delta h_c, \max$ =	0.137
έλεγχος	OK

Γ. Παραμόρφωση υπό οριζόντια φορτία

οριζόντιο βέλος δy =	0.86 cm
επιτρ. βέλος $\delta y, \max$ =	1.08 cm
$\delta y/\delta y, \max$ =	0.796
έλεγχος	OK

Δ. Αποφυγή ταλάντωσης του κάτω πέλματος

λυγηρ. πέλματος $L/if, z$ =	90.07
max λυγηρ. $L/if, z, \max$ =	250.00
$(L/if, z) / (L/if, z, \max)$ =	0.360
έλεγχος	OK

Ε. Περιορισμός ευαισθησίας κορμού έναντι λυγισμού

λόγος b/tw =	17.33
max b/tw =	120.00
$(b/tw) / (\max b/tw)$ =	0.144
περιορισμός	ΔΕΝ ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ

ΣΤ. 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 στη στάθμη λειτουργίας είναι εξασφαλισμένη.
έλεγχος OK

8. Έλεγχος σε κόπωση**Α. Ιδεατά ισοδύναμα φορτία κοπώσεως**

κατηγορία κόπωσης	S6
για ορθές τάσεις λ_i =	0.794
για διατμητικές τάσεις λ_i =	0.871
χαρ. φορ. τροχ. $Q_{\max, i}$ =	35.89 KN
δυναμικός συντ. ϕ_{fat} =	1.073
ιδ. φορ.-ορθ. τ. $Q_{e, i}$ =	30.57 KN
ιδ. φορ.-διατμ. τ. $Q_{e, i}$ =	33.53 KN

Β. Έλεγχος κόπωσης συγκόλλησης άνω πέλματος-κορμού

B1. Ορθές τάσεις	
διακύμ. τάσης $\Delta\sigma E2=$	4.89 kN/cm ²
κατηγ. συγκόλλησης	71
συντελεστής $\gamma Ff=$	1.00
συντελεστής $\gamma Mf=$	1.35
ορθή τ. αντοχής $\Delta\sigma c=$	7.10 kN/cm ²
λόγος $k=$	0.929
έλεγχος	OK

B2. Διατμητικές τάσεις	
διακύμ διατμ. τ. $\Delta\tau E2=$	2.05 kN/cm ²
κατηγ. συγκόλλησης	100
συντελεστής $\gamma Ff=$	1.00
συντελεστής $\gamma Mf=$	1.35
διατμ. τ. αντοχής $\Delta\sigma c=$	10.00 kN/cm ²
λόγος $k=$	0.277
έλεγχος	OK

B3. Αλληλεπίδραση ορθών και διατμητικών τάσεων	
λόγος $k=$	0.803
έλεγχος	OK

9. Επάρκεια διατομής δοκού κύλισης

Έλεγχος ΟΚΑ: $k=$	0.721	
Έλεγχος ΟΚΛ: $k=$	0.796	
Έλεγχος κοπώσεως: $k=$	0.803	
$k, \max=$	0.803	OK

ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΩΝ ΓΕΡΑΝΟΓΕΦΥΡΑΣ

Χάλυβας S275 $f_y=27.50$ KN/cm², $f_u=43.00$ KN/cm²
 Δοκοί : 2 x HEA 500

Φορτία ανά δοκό

Ιδίων βάρος: $g_i = 0.019800\text{m}^2 * 7.85 \text{ kN/m}^3 = 0.16 \text{ KN/m}$
 $q_c = \phi_1 * g_i = 1.10 * 0.16 = 0.17 \text{ KN/m}$
 Βάρος φορτίου: $G_c = \phi_1 * g_f = 1.10 * 7.10 / 2 = 3.91 \text{ KN}$
 Οφέλιμο φορτίο: $Q_h = \phi_2 * Q_r = 1.15 * 50.00 / 2 = 28.63 \text{ KN}$

Στατικό Σύστημα

Αμφιέρειστη δοκός με συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσον.

Έλεγχος στην οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ)

Εντατικά Μεγέθη από κατακόρυφα φορτία

$$M_y = 1/8 * q_c * L^2 + 1/4 * (G_c + Q_h) * L$$

$$= 1/8 * 0.17 * 20.00^2 + 1/4 * (3.91 + 28.63) * 20.00$$

$$= 171.24 \text{ KN.m}$$

$$V_z = 1/2 * (G_c + Q_h)$$

$$= 1/2 * (3.91 + 28.63)$$

$$= 16.27 \text{ KN}$$

Αξονική δύναμη τριβής κατά την κίνηση του φορτίου

$$N = -(G_c + Q_h) * \mu$$

$$= -(3.91 + 28.63) * 0.20$$

$$= -6.51 \text{ KN}$$

Εντατικά Μεγέθη από εγκάρσια αδρανειακά φορτία

$$Q_r = q_c * L + G_c + Q_h$$

$$= 0.17 * 20.00 + 3.91 + 28.63$$

$$= 35.96 \text{ KN}$$

$$K_{kin} = \mu * Q_r = 0.20 * 35.96 = 7.19 \text{ KN}$$

$$H_L = \phi_5 * K_{kin} = 1.50 * 7.19 = 10.79 \text{ KN}$$

$$V_y = H_L / 2 = 5.39 \text{ KN}$$

$$M_z = 1/4 * HL * L = 1/4 * 10.79 * 20.00 = 53.94 \text{ KNm}$$

Συντελεστής ασφάλειας φορτίων $\gamma = 1.35$

Ενταση:	N	My	Mz	Vz	Vy
	kN	kN*cm	kN*cm	kN	kN
Akro 1:	-8.8	0.0	0.0	22.0	7.3
Akro 2:	-8.8	0.0	0.0	-22.0	-7.3
max :	-8.8	23117.4	7281.5	22.0	7.3

Χαρακτηριστικά διατομής HEA500.

Χάλυβας S275: $f_y=27.50 \text{ kN/cm}^2$, $f_u=43.00 \text{ kN/cm}^2$
 $b=30.0\text{cm}$ $h=49.0\text{cm}$ $t_w=1.20\text{cm}$ $t_f=2.30\text{cm}$ $A=198.0\text{cm}^2$
 $I_x=317.9\text{cm}^4$ $I_y=86970.0\text{cm}^4$ $I_z=10370.0\text{cm}^4$ $I_w=5569200.0\text{cm}^6$
 $W_{ely}=3550.00\text{cm}^3$ $W_{elz}=691.00\text{cm}^3$ $W_{ply}=3949.00\text{cm}^3$ $W_{plz}=1059.00\text{cm}^3$
 $M_{ely}=88750.0\text{kNcm}$ $M_{elz}=17275.0\text{kNcm}$ $M_{ply}=98725.0\text{kNcm}$ $M_{plz}=26475.0\text{kNcm}$

Κατάταξη διατομής: $\epsilon=0.924$ $d=39.00\text{cm}$ $c=13.05\text{cm}$

Κορμός: $d/t_w=39.00/1.20 = 32.50 \rightarrow (66.0 \ 76.0 \ 113.8) \Rightarrow$ κατηγορίας 1

Πέλμα: $c/t_f=13.05/2.30 = 5.67 \rightarrow (8.3 \ 9.2 \ 12.9) \Rightarrow$ κατηγορίας 1

Αρα η διατομή είναι κατηγορίας 1

Έλεγχος σε Κύρτωση

$d/t_w=35.08 \leq 69\epsilon=63.78 \Rightarrow$ δέν απαιτείται έλεγχος σε κύρτωση.

Έλεγχος σε Διάτμηση κάθετα στον άξονα y-y

$A_v = 58.80\text{cm}^2$ $V_{pl} = 848.70 \text{ kN}$

$V/V_{pl} = 21.96/848.70 = 0.026 \leq 1 \Rightarrow \rho = 0.000$

Έλεγχος σε Διάτμηση κάθετα στον άξονα z-z

$A_v = 147.48\text{cm}^2$ $V_{pl} = 2128.69 \text{ kN}$

$V/V_{pl} = 7.28/2128.69 = 0.003 \leq 1 \Rightarrow \rho = 0.000$

Έλεγχος σε Αξονική Δύναμη (Θλιπτική).

$N_{pl} = 198.00 * 27.5 / 1.10 = 4950.00 \text{ kN} > 8.79 \text{ kN}$

$n = 8.79 / 4950.00 = 0.002$

Έλεγχος σε Κάμψη [6.2.9.1 (5)]

$a_w = A - 2 * b * t_f / A = \min[0.5 (198.00 - 2 * 30.00 * 2.30) / 198.00] = 0.30$

$a_f = A - 2 * b * t_w / A = \min[0.5 (198.00 - 2 * 49.00 * 1.20) / 198.00] = 0.41$

$M_y = M_{ry} * (1 - n) / (1 - 0.5 * a_w) = 98725.0 * (1 - 0.002) / (1 - 0.5 * 0.30) = 116148.0 \text{ KNcm}$

$M_z = M_{rz} * (1 - [(n - a_w) / (1 - a_w)]^2) * 26475.0 * (1 - [(0.002 - 0.30) / (1 - 0.30)]^2) = 26475.0 \text{ KNcm}$

$M_{ny} = \min(116148.0 \ 98725.0) = 98725.0 \text{ KNcm}$

$M_{nz} = \min(26475.0 \ 26475.0) = 26475.0 \text{ KNcm}$

$M_y / M_{ny} = 23117.4 / 98725.0 = 0.234 \leq 1$

$M_z / M_{nz} = 7281.5 / 26475.0 = 0.275 \leq 1$

Ελαστικός έλεγχος σύνθετων τάσεων von Mises (6.1)

$\sigma_x, E_d = 8.8 / 198.0 + 23117.4 / 3550.0 + 7281.5 / 691.0 = 17.09 \text{ KN/cm}^2$

$\tau, E_d, xz = V_y / A_{vy} = 21.96 / 58.80 = 0.37 \text{ KN/cm}^2$

$\tau, E_d, xy = V_z / A_{vz} = 7.28 / 147.48 = 0.05 \text{ KN/cm}^2$

$\sigma, E_q = \sqrt{17.09^2 + 3 * (0.37^2 + 0.05^2)} = 17.11 \text{ KN/cm}^2$

$k = \sigma, E_q / f_{yd} = 17.11 / 25.00 = 0.684$

Έλεγχος σε Διαξονική Κάμψη (6.41)

$\alpha=2.00$ $b=1.00$

$(23117.4 / 98725.0)^{2.00} + (7281.5 / 26475.0)^{1.00} = 0.330 \leq 1$

$N / N_{pl} + M_y / M_{ypl} + M_z / M_{zpl} = 8.8 / 4950.0 + 23117 / 98725 + 7281 / 26475 = 0.511 \leq 1$

Έλεγχος σε Λυγισμό

$L_y=2000\text{cm}$ $k_y=1.00$ $i_y=20.958\text{cm}$ $\lambda_y=95.43$ $\lambda_1=86.80$

$\lambda_y^* = 1.10$ $\text{καμπύλη} = a \Rightarrow \chi_y = 0.596$

$L_z=2000\text{cm}$ $k_z=1.00$ $i_z=7.237\text{cm}$ $\lambda_z=276.36$ $\lambda_1=86.80$

$\lambda_z^* = 3.18$ $\text{καμπύλη} = b \Rightarrow \chi_z = 0.089$

$\chi_{\min} = 0.089$

$b_{my} = 1.300$ $\mu_y = -1.427$ $k_y = 1.004$

$b_{mz} = 1.300$ $\mu_z = -3.925$ $k_z = 1.071$

$$8.8 / (0.09 * 4950.0) + 1.00 * 23117 / 98725 + 1.07 * 7281 / 26475 = 0.550 \leq 1$$

Έλεγχος στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (ΟΚΛ)

Βέλος από κατανεμημένο φορτίο

$$\begin{aligned} fb1 &= 5/384 * q * L^4 / (E * I_y) \\ &= 5/384 * 0.001710 * 2000.0^4 / (21000 * 86970) \\ &= 0.195 \text{ cm} \end{aligned}$$

Βέλος από συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσον (φορτίο+ωφέλιμο)

$$\begin{aligned} fb2 &= (G_c + Q_h) * L^3 / (48 * E * I_y) \\ &= (3.91 + 28.63) * 2000.0^3 / (48 * 21000 * 86970) \\ &= 2.969 \text{ cm} \end{aligned}$$

Συνολικό βέλος

$$\begin{aligned} f_o &= fb1 + fb2 = 0.195 + 2.969 = 3.164 \text{ cm} \\ f_{max} &= L / 600 = 2000.0 / 600 = 3.333 \text{ cm} \\ k_f &= f_o / f_{max} = 3.164 / 3.333 = 0.949 \end{aligned}$$

Συνολικός Δείκτης επάρκειας

$$k_o = \max(k_b, k_f) = \max(0.684, 0.949) = 0.949 \text{ OK}$$

6.2 Παράδειγμα 2. Πρότυπη Διατομή, Αμφιέρειστη δοκός

ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΟΚΟΥ ΚΥΛΙΣΗΣ ΓΕΡΑΝΟΓΕΦΥΡΑΣ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Διαστασιολόγηση σύμφωνα με τα EN1991-3, EN1993-1-1, EN1993-1-5, EN1993-1-9, EN1993-6.

1. Δοκός κύλισης

υλικό	S235	Ροπή αδράνειας $I_z =$	2770.0 cm⁴
διατομή	HEA 240	ελ. ροπή αντ. $W_{el,y} =$	675.0 cm³
ύψος διατομής $h =$	230.0 mm	ελ. ροπή αντ. $W_{el,z} =$	231.0 cm³
πλάτος διατομής $b =$	240.0 mm	ίδιο βάρος $G =$	0.60 kN/m
πάχος κορμού $t_w =$	7.5 mm	Κατηγορία διατομής	1
πάχος πέλματος $t_f =$	12.0 mm	Στατικό σύστημα	Αμφιέρειστο
εμβαδόν διατομής $A =$	76.8 cm²	Μήκος ανοίγματος $L =$	6.50 m
ροπή αδράνειας $I_y =$	7760.0 cm⁴		
ακτίνα συναρμογής $r =$	21.0 cm		

2. Γερανογέφυρα

Ανοίγμα $l =$	20.00 m	απόσταση τροχών $a =$	3.15 m
Βάρος $G_g =$	34.50 kN	τροχιά	50/30
βάρος φορείου $G_f =$	7.10 kN	πλάτος τροχιάς $b_r =$	50 mm
ανυψ. ικαν. $Q_r, nom =$	50.00 kN	ύψος τροχιάς $h_r =$	30 mm
κατηγορία ανύψωσης	HC2	εκκεντρότητα $e =$	12.50 mm
απόστ. αγκ.-δοκού $s =$	900 mm	ταχύτητα ανύψ. $v =$	8.00 m/min
# τροχών $n =$	2		

3. Δυναμικοί συντελεστές

$\phi_1 =$	1.100	$\phi_4 =$	1.000
$\phi_2 =$	1.145	$\phi_5 =$	1.500
$\phi_3 =$	1.000		

4. Δράσεις

EN1991, Μέρος 3, §2, Πίν.2.2	Συνδυασμοί φόρτισης				
	1	2	3	4	5

Κατακόρυφα φορτία	Ίδιο βάρος δοκού κυλίσεως (kN/m)	G	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	
			0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	
	Ίδιο βάρος γερανογέφυρας (kN)	QrMin1	13.22	13.22	12.02	12.02	12.02	
			17.84	17.84	16.22	16.22	16.22	
		QrMin2	9.66	9.66	8.78	8.78	8.78	
			13.05	13.05	11.86	11.86	11.86	
	Ίδιο βάρος γερανογέφυρας + Ανυψούμενο φορτίο (kN)	QrMax1	40.56	37.09	-	35.89	35.89	
			54.76	50.07	-	48.45	48.45	
		QrMax2	10.95	10.79	-	9.91	9.91	
			14.78	14.56	-	13.38	13.38	
	Οριζόντια φορτία	Επιτάχυνση και επιβράδυνση της γερανογέφυρας (kN)	HL1	2.64	2.64	2.64	2.64	-
				3.56	3.56	3.56	3.56	-
HL2			2.64	2.64	2.64	2.64	-	
			3.56	3.56	3.56	3.56	-	
HT1			2.05	2.05	2.05	2.05	-	
			2.77	2.77	2.77	2.77	-	
HT2		7.44	7.44	7.44	7.44	-		
		10.04	10.04	10.04	10.04	-		
Παράγωγη κίνηση γερανογέφυρας (kN)		Hs1T	-	-	-	-	8.24	
			-	-	-	-	11.12	
		Hs2T	-	-	-	-	8.24	
			-	-	-	-	11.12	

Οι πρώτοι αριθμοί δηλώνουν τα φορτία λειτουργίας με $\gamma=1.0$ και οι δεύτεροι τα φορτία σχεδιασμού με $\gamma=1.35$.

5. Εντατικά μεγέθη

		My	Vy	Mz	Vz
		KNm	KN	KNm	KN
συνδυασμός 1	max ροπή κατά τον ισχυρό άξονα y	102.17	41.49	19.95	8.62
	max τέμνουσα κατά τον ισχυρό άξονα y	-	82.98	-	-
συνδυασμός 5	max ροπή κατά τον ασθενή άξονα z	81.16	-	30.10	-
	max τέμνουσα κατά τον ασθενή άξονα z	-	-	-	18.52
λόγω ίδιου βάρους (στο κέντρο της δοκού)		5.14	3.16	-	-

6. Έλεγχος στην οριακή κατάσταση αστοχίας (OKA)**A. Έλεγχος διατομής**

A1. Έλεγχος κορμού σε διάτμηση
 Δράση $V_{y,Ed}$ = 86.14 KN
 Αντοχή $V_{y,Rd}$ = 341.09 KN
 $k = V_{y,Ed}/V_{y,Rd}$ = 0.253
 έλεγχος OK

A2. Έλεγχος άνω πέλματος σε διάτμηση
 Δράση $V_{z,Ed}$ = 18.52 KN
 Αντοχή $V_{z,Rd}$ = 390.75 KN
 $V_{z,Ed}/V_{z,Rd}$ = 0.047
 έλεγχος OK

A3. Έλεγχος σε διαξονική κάμψη και αξονική δύναμη
 για το συνδυασμό φορτίων 1 - $\max M_y$
 συν. ορθή τάση $\sigma_{y,Ed}$ = 33.22 kN/cm²
 αντοχή $\sigma_{y,Rd}$ = 23.50 kN/cm²
 $V_{z,Ed}/V_{z,Rd}$ = 1.414
 έλεγχος ****

A4. Έλεγχος σε διαξονική κάμψη για το συνδυασμό φορτίων 5 - $\max M_z$
 συν. ορθή τάση $\sigma_{y,Ed}$ 38.15 kN/cm²
 αντοχή $\sigma_{y,Rd}$ = 23.50 kN/cm²
 $V_{z,Ed}/V_{z,Rd}$ = 1.623
 έλεγχος ****

B. Έλεγχος τοπικής έντασης υπό το φορτίο τροχού

κ. μήκος ορθή τάση σ_x = 11.31 kN/cm²
 εγκ. ορθή τάση σ_y = 23.15 kN/cm²
 διατμητική τάση τ = 4.53 kN/cm²
 ισοδύναμη τάση σ_{eq} = 21.53 kN/cm²
 αντοχή σ_{Rd} = 23.50 kN/cm²
 σ_{eq}/σ_{Rd} = 0.916
 έλεγχος OK

Γ. Έλεγχος μέλους σε στρεπτοκαμπτικού λυγισμού για το συνδυασμό φορτίων 1 [EC3, Μέρος 6, §6.3.2.3 (1)]

Για το θλιβόμενο πέλμα και το 1/5 του κορμού:
 ροπή αδρανείας I_z = 1382.40 cm⁴
 εμβαδόν A = 33.78 cm²
 ανηγμ. λυγ. $*\lambda_z$ = 1.08
 καμπύλη λυγισμού c
 μειωτικός συντ. χ_z = 0.494
 θλ. δύναμη $N_{f,Ed}$ = 490.85 kN
 αντοχή N_{Rd} = 392.12 kN

Για το θλιβόμενο πέλμα :
 καμπτική ροπή $M_{z,Ed}$ = 19.95 KNm
 ροπή αντίστασ. $W_{f,pl}$ = 172.80 cm³
 ροπή αντοχής $M_{z,Rd}$ = 40.61 KNm
 k_{zz} = 2.48
 λόγος k = 2.469
 έλεγχος ****

Δ. Έλεγχος κορμού υπό τα φορτία τροχού

εγκάρσια δύναμη F_{Ed} = 54.76 KN
 ενεργό μήκος L_{eff} = 20.06 cm
 αντοχή F_{Rd} = 353.61 KN
 F_{Ed}/F_{Rd} = 0.155
 έλεγχος OK

7. Έλεγχος στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (ΟΚΛ)

Α. Κατακόρυφη παραμόρφωση υπό τα φορτία τροχού

κατακόρυφο βέλος δz =	1.78 cm
επιτρ. βέλος $\delta z, \max 1$ =	1.08 cm
επιτρ. βέλος $\delta z, \max 2$ =	2.50 cm
$\delta z / \delta z, \max$ =	1.734
έλεγχος	****

Β. Διαφορική κατακόρυφη παραμόρφωση απέναντι δοκών κυλίσεων

διαφορική παρ. Δh_c =	1.29 cm
επιτρ. παραμ. $\Delta h_c, \max$ =	3.33 cm
$\Delta h_c / \Delta h_c, \max$ =	0.386
έλεγχος	OK

Γ. Παραμόρφωση υπό οριζόντια φορτία

οριζόντιο βέλος δy =	1.62 cm
επιτρ. βέλος $\delta y, \max$ =	1.08 cm
$\delta y / \delta y, \max$ =	1.499
έλεγχος	****

Δ. Αποφυγή ταλάντωσης του κάτω πέλματος

λυγηρ. πέλματος $L / i f, z$ =	93.82
max λυγηρ. $L / i f, z, \max$ =	250.00
$(L / i f, z) / (L / i f, z, \max)$ =	0.375
έλεγχος	OK

Ε. Περιορισμός ευαισθησίας κορμού έναντι λυγισμού

λόγος b / t_w =	27.47
max b / t_w =	120.00
$(b / t_w) / (\max b / t_w)$ =	0.229
περιορισμός	ΔΕΝ ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ

ΣΤ. 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 στη στάθμη λειτουργίας είναι εξασφαλισμένη.
έλεγχος OK

8. Επάρκεια διατομής δοκού κύλισης

Έλεγχος ΟΚΑ: k =	2.469
Έλεγχος ΟΚΛ: k =	1.734
k, \max =	2.469 ****

6.3 Σύγκριση Πρότυπων προς Συγκολλητές διατομές

Για τον ίδιο τύπο γερανογέφυρας και με ίδιες όλες τις παραμέτρους του παραδείγματος 2 και για αυξανόμενες τιμές του ωφέλιμου φορτίου, παρατίθεται συγκριτικός πίνακας με τη βέλτιστη πρότυπη διατομή και αντίστοιχη συγκολλητή με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά (hw , tw , bf , tf) και τους αντίστοιχους δείκτες επάρκειας.

Στην τελευταία στήλη του πίνακα αναγράφεται η απαιτούμενη αύξηση πάχους του κορμού tw της συγκολλητής διατομής, σε σχέση με αυτό της πρότυπη, ώστε η συγκολλητή διατομή να είναι επαρκής.

Qr,nom	ΠΡΟΤΥΠΗ ΔΙΑΤΟΜΗ			ΣΥΓΚΟΛΛΗΤΗ ΔΙΑΤΟΜΗ			
	Διατομή	K_OKA	K_OKL	K_OKA	K_OKL	K_κόπωσης	tw
50	HEA 300	0.933	0.753	0.949	0.791	4.804	8.5 → 21
100	HEB 340	0.963	0.768	0.972	0.768	3.916	12 → 25.5
150	HEB 500	0.945	0.854	0.951	0.854	3.087	14.5 → 26.5
200	HEM 300	0.998	0.728	1.003	0.728	2.386	16 → 25.5
250	HEM 600	0.993	0.992	0.997	0.922	1.832	21 → 29

Πίνακας A1: Σύγκριση επάρκειας πρότυπης διατομής σε σχέση με ισοδύναμη συγκολλητή

6.4 Σύγκριση ως προς το στατικό σύστημα

Για τον ίδιο τύπο γερανογέφυρας, για πρότυπη διατομή και με ίδιες όλες τις παραμέτρους του παραδείγματος 2 και για αυξανόμενες τιμές του ωφέλιμου φορτίου, παρατίθεται συγκριτικός πίνακας των δεικτών επάρκειας σε σχέση με το στατικό σύστημα. Η συνεχής δοκός που ελέγξαμε είναι 3 ίσων ανοιγμάτων. Παρατηρούμε ότι για μεγάλες τιμές ωφέλιμου φορτίου δεν υπάρχει καμιά βελτίωση.

Qr,nom	Διατομή	ΑΜΦΙΕΡΕΙΣΤΗ ΔΟΚΟΣ		ΣΥΝΕΧΗΣ ΔΟΚΟΣ		
		K_OKA	K_OKL	K_OKA	K_OKL	βελτίωση %
40	HEA 280	1.103	0.873	0.924	0.873	16.22
50	HEA 300	0.933	0.753	0.873	0.753	6.43
100	HEB 340	0.963	0.768	0.963	0.768	0
150	HEB 500	0.945	0.854	0.945	0.854	0
200	HEM 300	0.998	0.728	0.998	0.728	0
250	HEM 600	0.993	0.992	0.993	0.922	0

Πίνακας A2: Σύγκριση τιμών επάρκειας σε σχέση με το στατικό σύστημα

7 Συμπεράσματα

Η εφαρμογή που αναπτύξαμε δίνει τη δυνατότητα στο μελετητή να εξετάσει εύκολα και γρήγορα πολλές εναλλακτικές λύσεις για τη δοκό κύλισης γερανογέφυρας που θέλει να σχεδιάσει κι επίσης να τις αξιολογήσει ως προς την επάρκεια και την οικονομία.

Σύμφωνα με τα συγκριτικά αποτελέσματα του Πίνακα Α1, οι πρότυπες διατομές έχουν σχεδόν τις ίδιες τιμές δεικτών επάρκειας σε έλεγχο ΟΚΑ και ΟΚΛ με τις ισοδύναμες συγκολλητές διατομές, όμως ο έλεγχος Κόπωσης που απαιτείται για τις συγκολλητές είναι πολύ δυσμενής, πράγμα που οδηγεί σε σημαντική αύξηση διαστάσεων.

Η καλύτερη βελτίωση που μπορούμε να κάνουμε στις συγκολλητές διατομές ώστε να ικανοποιηθεί ο έλεγχος κόπωσης είναι η αύξηση πάχους του κορμού, ή και των πελμάτων και του κορμού. Προτιμότερη πάντως είναι η αύξηση του πάχους του κορμού γιατί έτσι βελτιώνεται ταχύτερα ο έλεγχος ορθών τάσεων της §4.3.1

Σύμφωνα με τα συγκριτικά αποτελέσματα του Πίνακα Α2, το στατικό σύστημα της συνεχούς δοκού πολλών ανοιγμάτων είναι ευνοϊκότερο σε σχέση με αυτό της αμφιέρειστης δοκού, όμως για μεγάλες τιμές του ωφέλιμου φορτίου δεν υπάρχει κανένα όφελος.

8 Βιβλιογραφία

1. Βάγιας, Ι., Ερμόπουλος, Ι., Ιωαννίδης, Γ., “ΣΙΔΗΡΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ”, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, Ελλάδα, 1999.
2. Eurocode 1, Part 1-1, “General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings”, 2002.
3. Eurocode 1, Part 3, “Actions induced by cranes and machinery”, 2006.
4. Eurocode 3, Part 1-1, “General rules and rules for buildings”, 2005.
5. Eurocode 3, Part 1-5, “Plated structural elements”, 2006.
6. Eurocode 3, Part 1-9, “Fatigue”, 2005.
7. Eurocode 3, Part 6, “Crane supporting structures”, 2007.