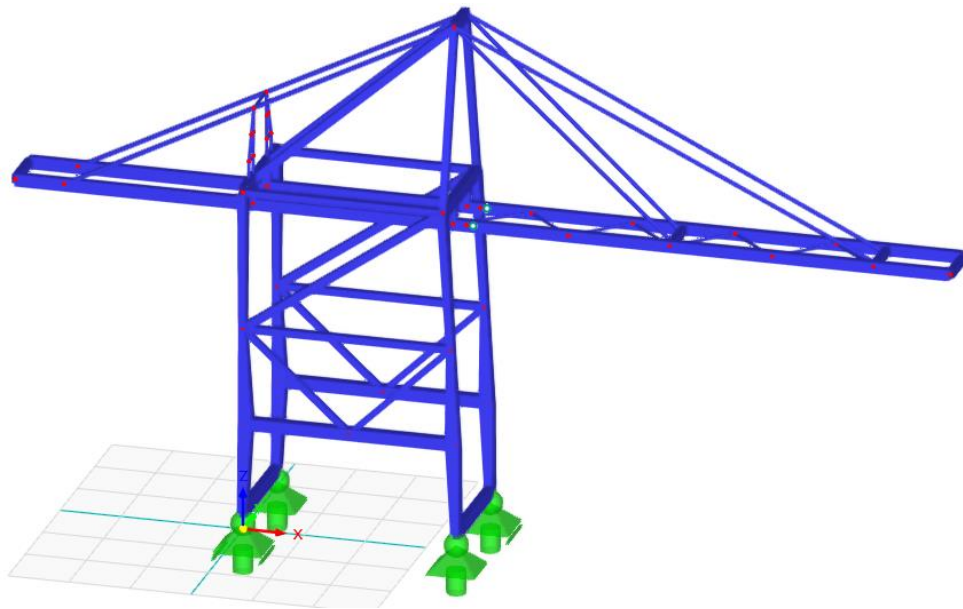




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



Σχεδιασμός Λιμενικών Γερανών Εμπορευματοκιβωτίων



Διπλωματική Εργασία
Κωνσταντίνος Ντάκος

EMK ΔΕ 007

Επιβλέπων: Χ. Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Συνεπιβλέπων: Σ. Γκατζογιάννης, Δρ. & Ακαδημαϊκός Υπότροφος Ε.Μ.Π.

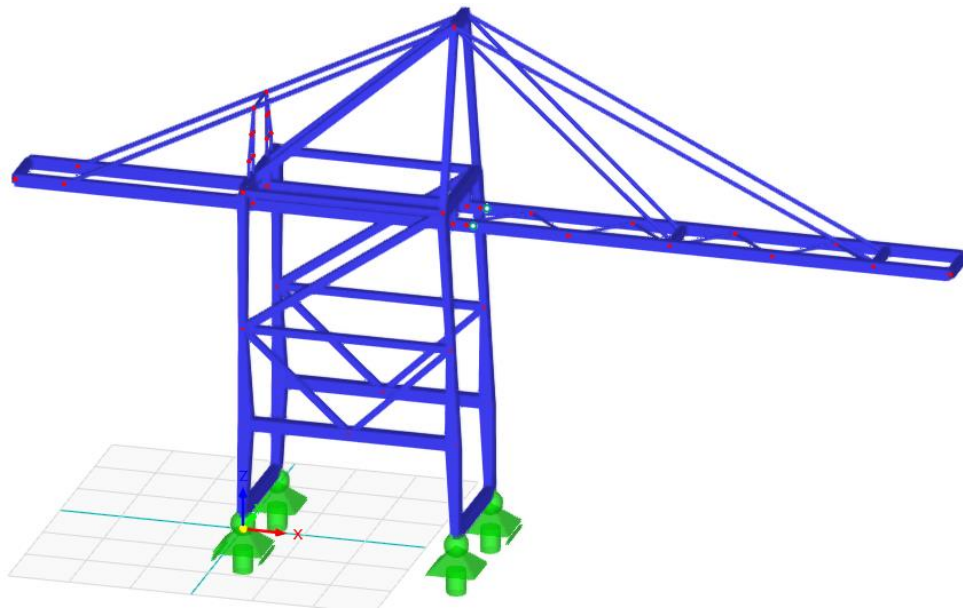
Αθήνα, Ιούλιος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



Σχεδιασμός Λιμενικών Γερανών Εμπορευματοκιβωτίων



Διπλωματική Εργασία
Κωνσταντίνος Ντάκος
EMK ΔΕ 007

Επιβλέπων: Χ. Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Συνεπιβλέπων: Σ. Γκατζογιάννης, Δρ. & Ακαδημαϊκός Υπότροφος Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2023

Copyright © Κωνσταντίνος Ντάκος, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Konstantinos Ntakos, 2023

All Rights Reserved

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

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

Κωνσταντίνος Ντάκος (2023)
Σχεδιασμός Λιμενικών Γερανών Εμπορευματοκιβωτίων
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 007
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Konstantinos Ntakos (2023)
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 007
Ship-to-Shore Container Crane Design
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για την υποστήριξη και τη βοήθεια που μου παρείχαν στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ και τον συνεπιβλέποντα Δρ. Στέφανο Γκατζογιάννη. Η βοήθεια, η άμεση ανταπόκριση αλλά και οι συμβουλές που μου προσέφεραν στις μακροσκελείς συναντήσεις μας συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Επίσης, ευχαριστίες οφείλω στην εταιρεία Shanghai Zhenhua Heavy Industries Company Limited (ZPMC) για την μεγάλη βοήθεια που μου προσέφερε παρέχοντάς μου κατάλληλο υλικό το οποίο λειτούργησε ως βάση για τον σχεδιασμό του γερανού.

Πιο πολύ από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την απεριόριστη στήριξη και βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια του απαιτητικού πενταετούς κύκλου σπουδών δίνοντάς μου τη δυνατότητα να επικεντρωθώ απερίσπαστα στις σπουδές μου. Κλείνοντας, δε θα μπορούσα να μην αναφερθώ στο πολύ όμορφο και δημιουργικό κλίμα που επικράτησε στο στενό κύκλο των συμφοιτητών μου όλα αυτά τα πέντε έτη ανταλλάσσοντας γνώσεις, γνώμες και εμπειρίες που θα θυμάμαι για πάντα.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 007

Σχεδιασμός Λιμενικών Γερανών Εμπορευματοκιβωτίων

Κωνσταντίνος Ντάκος

Επιβλέπων: Χ. Γαντές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων: Σ. Γκατζογιάννης, Δρ. & Ακαδημαϊκός Υπότροφος Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα πολύ σημαντικό και συνεχώς αυξανόμενο ποσοστό των θαλάσσιων μεταφορών πραγματοποιείται με χρήση εμπορευματοκιβωτίων, η χρήση των οποίων έχει συμβάλει τα μέγιστα στην ανάπτυξη των μεταφορών μέσω θαλάσσης. Οι λιμενικοί γερανοί εμπορευματοκιβωτίων αναλαμβάνουν το σύνθετο έργο της φορτοεκφόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων, μια διαδικασία που σε μεγάλο βαθμό κρίνει την εύρυθμη λειτουργία του λιμένα. Έτσι, επιτακτική κρίνεται η ανάγκη του σωστού σχεδιασμού των κατασκευών αυτών.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στον σχεδιασμό του μεταλλικού φέροντα οργανισμού ενός λιμενικού γερανού ανυψωτικής ικανότητας 70 tn με δυνατότητα ταυτόχρονης εξυπηρέτησης έως και 2 εμπορευματοκιβωτίων χωρητικότητας 2 TEU. Ο σχεδιασμός βασίζεται κυρίως στα κανονιστικά πρότυπα EN 13001:2021, EN 15011:2011 & EN 1993-1-1:2005. Η ανάλυση και διαστασιολόγηση του φορέα βασίζεται σε γραμμικές αναλύσεις με τα μέλη προσομοιωμένα ως γραμμικά στοιχεία. Συνέπεια του ασυνήθιστου στατικού συστήματος αλλά και της αδυναμίας διαστασιολόγησης κάποιων μελών ιδιαίτερης γεωμετρίας μέσω γραμμικών αναλύσεων και θεώρησης μηκών λυγισμού, είναι η εκτέλεση γεωμετρικά μη γραμμικών αναλύσεων με αρχικές στέλειες. Ο υπολογισμός των τοπικών αλλά & των καθολικών ατελειών πραγματοποιείται ακολουθώντας την κατάλληλη μεθοδολογία όπως αυτή ορίζεται στην έκδοση FprEN 1993-1-1:2022. Η συγκεκριμένη μέθοδος καθιστά δυνατή την διαστασιολόγηση των μελών του μεταλλικού γερανού σε όρους τάσεων. Τα δύο είδη αναλύσεων πραγματοποιούνται σε δύο διαφορετικά προσομοιώματα λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας της κατασκευής κατά τις εντός & εκτός λειτουργίας καταστάσεις της. Τέλος, την διαστασιολόγηση του φορέα ακολουθεί ο έλεγχος έναντι κόπωσης και ανατροπής.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των αναλύσεων διαπιστώνεται η σχετικά μικρή επιρροή των αρχικών ατελειών στο φορέα. Επιπλέον, αναδεικνύεται η διαφορά ευκαμψίας και ενδοσιμότητας της κατασκευής σε μετακινήσεις κατά τις δύο διευθύνσεις της. Τέλος, επαληθεύεται η κρισιμότητα του ελέγχου έναντι κόπωσης για τα μέλη που παρουσιάζουν μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων καθώς η κατασκευή σχεδιάζεται για αρκετά μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης.



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



DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 007

Ship-to-Shore Container Crane Design

Konstantinos Ntakos

Supervisor: C. Gantes, Professor NTUA

Co-supervisor: S. Gkatzogiannis, Dr.-Ing., Academic Fellow NTUA

ABSTRACT

A significant and continuously increasing percentage of maritime transportation is carried out using shipping containers, the use of which has greatly contributed to the development of sea transport system. Ship-to-Shore (STS) cranes are responsible for the complex task of loading and unloading containers, a process that largely determines the proper functioning of ports. Therefore, the need for the optimal design of these structures is crucial.

This study focuses mainly on the analysis & design of the steel structure of a Ship-to-Shore crane with a lifting capacity of 70 tons, capable of simultaneously serving up to 2 containers with a capacity of 2 TEUs each. The design is mainly based on the standards EN 13001:2021, EN 15011:2011 & EN 1993-1-1:2005. The analysis & design of structure are based on linear analysis, with the members simulated as linear elements. However, because of the non-conventional static system and the inability to design some members with particular geometrical characteristics with linear analysis & buckling length consideration, geometrically nonlinear imperfection analysis (GNIA) is necessary. Calculation of the bow & sway imperfections is performed following the appropriate methodology as defined in the new version of FprEN1993-1-1:2022. This particular method enables the design of the crane's steel structure in terms of stresses. The two analysis types are executed in two different models due to the different structure's geometry during service & non-service states. Following the crane's design, fatigue & stability checks are carried out.

Evaluating the results of the analysis & design, it is noticed that the initial imperfections have relatively a small influence on the structure. Additionally, the difference in flexibility of the crane about the two axes is highlighted. Lastly, the fatigue check is confirmed to be critical for members that exhibit stress concentrations, as the crane is designed for a significant number of stress cycles.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Θαλάσσιες μεταφορές	1
1.2	Πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων & εμπορευματοκιβώτια	2
1.3	Λιμενικές εγκαταστάσεις	4
1.4	Λιμενικοί γερανοί	5
1.4.1	Γενικά στοιχεία	5
1.4.2	Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη	6
1.4.3	Επιμέρους τμήματα λιμενικών γερανών	8
1.5	Δομή της εργασίας	11
2	ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΕΡΑΝΩΝ	13
2.1	Γενικά στοιχεία ευρωπαϊκού προτύπου EN 13001	13
2.2	Υλικά	14
2.3	Συνδέσεις	15
2.4	Εκτέλεση ελέγχων	16
2.5	Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 15011	19
3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ	23
3.1	Γενικά στοιχεία	23
3.2	Γεωμετρία φορέα	23
3.3	Υλικό	25
4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΡΑΣΕΩΝ	27
4.1	Προσδιορισμός δράσεων	27
4.2	Συνήθη φορτία	28
4.2.1	Ίδιο βάρος γερανού	28
4.2.2	Φορτία λόγω ανύψωσης εμπορευματοκιβωτίων	29
4.2.3	Απότομη ηθελημένη απώλεια μέρους της φόρτισης	33
4.2.4	Φορτία από την κύλιση & επιτάχυνση του φορείου σε ομαλή λειτουργία	34
4.3	Περιστασιακά φορτία	35
4.3.1	Ανεμοφορτίσεις σε ώρα λειτουργίας του γερανού	35
4.3.2	Δράσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών	41
4.4	Σπάνια φορτία	42
4.4.1	Δράσεις από την ανύψωση των φορτίων υπό σπάνιες συνθήκες	42
4.4.2	Σφοδρές ανεμοφορτίσεις	42
4.4.3	Φορτία ελέγχου	46
4.4.4	Φορτία προσκρουστήρων ασφαλείας	48
4.4.5	Φορτία λοξότητας	49

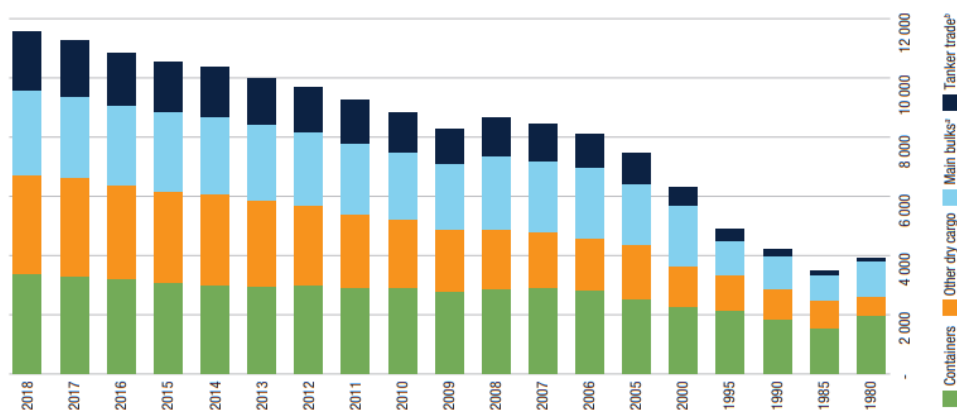
4.4.6	Δράσεις προκαλούμενες από συσκευές περιορισμού της δύναμης ανύψωσης	49
4.4.7	Σεισμικά φορτία	50
4.5	Συνδυασμοί δράσεων	51
4.5.1	Γενικά	51
4.5.2	Συνδυασμοί φορτίσεων για έλεγχο επάρκειας μελών	52
4.5.3	Συνδυασμοί φορτίσεων για έλεγχο ανατροπής γερανού	54
4.5.4	Συνδυασμοί φορτίσεων έναντι κόπωσης	55
5	ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ & ΑΤΕΛΕΙΕΣ.....	57
5.1	Γενικά.....	57
5.2	Συνοριακές συνθήκες μοντέλου & εσωτερικές ελευθερώσεις μελών	58
5.3	Προσομοίωση κίνησης εμπορευματοκιβωτίων.....	61
5.4	Υπολογισμός και εφαρμογή αρχικών ατελειών	62
5.4.1	Καθολικές ατέλειες.....	62
5.4.2	Τοπικές ατέλειες	64
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	67
6.1	Τύποι αναλύσεων	67
6.2	Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων.....	68
6.2.1	Μοντέλο σε κατάσταση λειτουργίας	68
6.2.2	Μοντέλο σε κατάσταση εκτός λειτουργίας	73
6.3	Αποτελέσματα μη γραμμικών αναλύσεων με ατέλειες	76
6.3.1	Μοντέλο σε κατάσταση λειτουργίας	76
6.3.2	Μοντέλο σε κατάσταση εκτός λειτουργίας	78
6.4	Ιδιομορφικές αναλύσεις	80
6.5	Διαπιστώσεις από τις γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις με αρχικές ατέλειες.....	82
7	ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΛΩΝ ΚΑΙ ΛΟΙΠΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ.....	83
7.1	Γενικά.....	83
7.2	Μεθοδολογία & τυπολόγιο ελέγχου επάρκειας διατομών και μελών	83
7.2.1	Έλεγχοι διατομών	84
7.2.2	Έλεγχος έναντι τοπικού λυγισμού μη ενισχυμένων μελών.....	85
7.2.3	Αντοχή τεμνουσών δυνάμεων μη ενισχυμένων μελών κατά τη διαμήκη έννοια.....	88
7.2.4	Έλεγχος έναντι κύρτωσης μελών με διαμήκεις ενισχύσεις	89
7.2.5	Έλεγχος έναντι διατμητικής κύρτωσης μελών με διαμήκεις ενισχύσεις	93
7.2.6	Έλεγχοι μελών.....	94
7.2.7	Αντοχή μελών έναντι πλευρικού-στρεπτικού λυγισμού.....	95
7.3	Διαστασιολόγηση φορέα πλην κόπωσης.....	100
7.3.1	Ελκυστήρες πρόσθιου τμήματος	100
7.3.2	Ελκυστήρες οπίσθιου τμήματος	101
7.3.3	Οπίσθιο τμήμα δοκού κύλισης.....	103

7.3.4	Πρόσθιο τμήμα δοκού κύλισης.....	105
7.3.5	Άνω δοκοί πλαισίων διεύθυνσης γ	106
7.3.6	Δοκοί βάσης πλαισίων διεύθυνσης γ	108
7.3.7	Υποστυλώματα	109
7.3.8	Άνω κεκλιμένα υποστυλώματα (1)	112
7.3.9	Άνω κεκλιμένα υποστυλώματα (2)	115
7.3.10	Σύνδεσμοι δυσκαμψίας (1)	116
7.3.11	Σύνδεσμοι δυσκαμψίας (2)	117
7.3.12	Δικτύωση δοκού κύλισης.....	118
7.4	Έλεγχος ανατροπής του γερανού	119
8	ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΚΟΠΩΣΗΣ	121
8.1	Γενικά.....	121
8.2	Εκτέλεση ελέγχου έναντι κόπωσης κατά EN 13001-3-1	122
8.2.1	Θεώρηση συνήθους κίνησης	124
8.2.2	Έλεγχος πρόσθιου ελκυστήρα.....	125
8.2.3	Έλεγχος οπίσθιου ελκυστήρα.....	127
8.2.4	Έλεγχος συγκόλλησης κάτω πέλματος δοκού κύλισης	128
8.2.5	Έλεγχος μέλους σύνδεσης ελκυστήρων-δοκού κύλισης.....	130
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	133
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	135

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Θαλάσσιες μεταφορές

Τόσο στο παρελθόν όσο και σήμερα το παγκόσμιο εμπόριο ήταν και είναι άμεσα συνδεδεμένο με τις θαλάσσιες μεταφορές. Περίπου το 80% του εμπορίου σε όρους όγκου μεταφέρεται μέσω θαλάσσης. Αρκεί να αναφερθεί πως το 1995 διακινήθηκαν 800 εκατομμύρια τόνοι ενώ η ραγδαία αύξηση σε 6 δισεκατομμύρια τόνους το 2000 μαρτυρά και την μεγάλη ανάπτυξη του συγκεκριμένου είδους των μεταφορών. Τα κύρια είδη φορτίων που διακινούνται μέσω των θαλασσών είναι τα χύδην και τα συσκευασμένα χύδην φορτία. Τα χύδην φορτία (bulk cargo) είναι φορτία που δεν είναι συσκευασμένα π.χ. ορυκτά καύσιμα & μεταλλεύματα και βρίσκονται είτε σε υγρή είτε σε ξηρή μορφή. Αντιθέτως, τα συσκευασμένα χύδην φορτία (break bulk) αφορούν γενικά φορτία συσκευασμένα σε εμπορευματοκιβώτια, παλέτες κ.λπ. (Μπάσμπας, 2013). Στην Εικόνα 1-1 φαίνεται η σημαντική ανάπτυξη των θαλάσσιων μεταφορών σε όρους εκατομμυρίων τόνων τα τελευταία 40 έτη.



Εικόνα 1-1: Θαλάσσιες μεταφορές ανά είδος φορτίου σε εκατομμύρια τόνους τα τελευταία 40 έτη. (από Review of Maritime Transport 2019 UNCTAD, 2019)

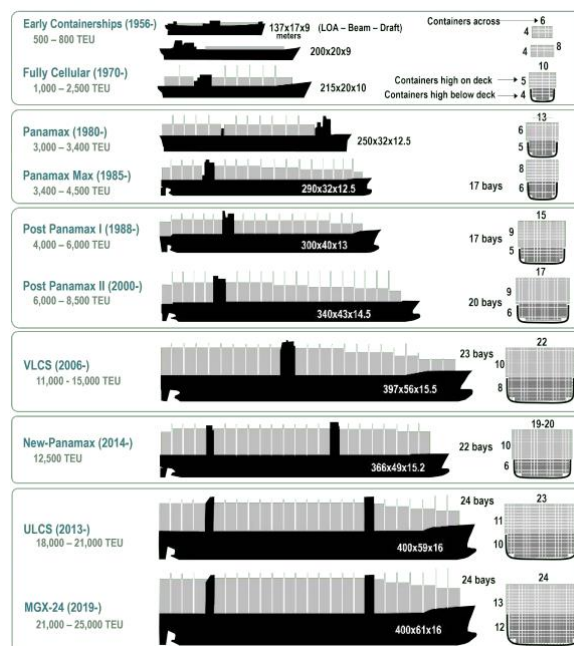
Απότοκο αυτής της προόδου ήταν η σημαντική ανάπτυξη των μέσων μεταφοράς, δηλαδή των πλοίων. Οι κυριότερες κατηγορίες των εμπορικών πλοίων είναι οι εξής:

- πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (container ships)
- πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (bulk carrier ships)
- δεξαμενόπλοια (tanker ships)
- πλοία μεταφοράς οχημάτων (roll-on roll-off ships)

1.2 Πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων & εμπορευματοκιβώτια

Τα πρώτα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ναυπηγήθηκαν περίπου το 1955. Η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητάς τους είναι η ισοδύναμη μονάδα 20 ποδιών TEU (twenty-foot equivalent units). Η όλο και μεγαλύτερη ανάπτυξη των θαλασσιών μεταφορών και ιδιαίτερα των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων οδήγησε στη μεγάλη αύξηση της φέρουσας ικανότητας και συνεπώς των διαστάσεων των εμπορικών πλοίων, πρόδος που φαίνεται στην Εικόνα 1-2. Συγκεκριμένα, τα πρώτα πλοία εμπορευματοκιβωτίων είχαν τη χαμηλή για τα σημερινά δεδομένα μεταφορική ικανότητα των 500 TEU και ήταν πλοία μήκους 200 m και πλάτους 17 m. Με το πέρασμα των δεκαετιών η μεταφορική ικανότητα αυξήθηκε ραγδαία με πολλά σημερινά πλοία να έχουν δυνατότητα μεταφοράς άνω των 20000 TEU με αντίστοιχη μεταβολή των διαστάσεων σε πλοία με μήκος 400 m και πλάτος 60 m.

Η κατηγοριοποίηση των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων γίνεται βάσει του όρου Panamax, που εκφράζει τις μέγιστες επιτρεπτές διαστάσεις για τη διέλευση ενός πλοίου από τη διώρυγα του Παναμά. Ο όρος Panamax αντιστοιχεί σε μήκος 250 m και πλάτος 32 m. Αξίζει να σημειωθεί πως το 2016 λόγω της διεύρυνσης της διώρυγας τέθηκε σε εφαρμογή η αύξηση των ορίων για διέλευση ενός πλοίου από τον Παναμά καθορίζοντας έτσι τα νέα όρια New Panamax. Επίσης, η σημαντική εξέλιξη που έχει σημειωθεί στη ναυπηγική έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή πλοίων εμπορευματοκιβωτίων χωρητικότητας έως και 24300 TEU. Το πλοίο με τη μέγιστη μεταφορική ικανότητα μέχρι σήμερα είναι το MSC IRINA, χρονολογίας 2023, μήκους 399 m, πλάτους 61 m και μέσου ύψους 65 m.



Εικόνα 1-2: : Αύξηση μεταφορικής ικανότητας και διαστάσεων πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (από Rasch, 2022)

Τα εμπορευματοκιβώτια (containers) είναι ειδικές μεταλλικές κατασκευές μέσω των οποίων γίνεται η μεταφορά των φορτίων. Παρουσιάζουν ιδιαίτερα πλεονεκτήματα σε σχέση με την ευκολία μεταφοράς από και προς το πλοίο αλλά και στις χερσαίες μεταφορές που ακολουθούν μετά την έλευση του φορτίου στον τερματικό σταθμό. Η κύρια κατηγοριοποίηση των εμπορευματοκιβωτίων γίνεται με γνώμονα τις διαστάσεις και του περιεχομένου μεταφερόμενου σε αυτά.

Ως προς τις διαστάσεις, η κατηγοριοποίηση γίνεται με χρήση της προαναφερθείσας μονάδας μέτρησης TEU, δηλαδή του όγκου που καταλαμβάνεται από ένα εμπορευματοκιβώτιο μήκους 20 ποδιών, όγκος που ισοδυναμεί με 1 TEU, μήκους 6.06 m, πλάτους 2.44 m & ύψους 2.59 m. Η μέγιστη επιτρεπτή μάζα των εμπορευματοκιβωτίων 1 TEU είναι 26330 kg. Τα συγκεκριμένα εμπορευματοκιβώτια που απεικονίζονται στο άνω τμήμα στην Εικόνα 1-3 προσφέρονται για μεταφορά φορτίων μεγάλου βάρους αλλά μικρού σχετικά όγκου. Σε αντίθεση με εμπορευματοκιβώτια 1 TEU τα κιβώτια μεγέθους 2 TEU έχουν μήκος διπλάσιο από αυτά των 1 TEU δηλαδή 12.19 m με ίδιες όμως τις διαστάσεις πλάτους & ύψους. Ο συγκεκριμένος τύπος είναι ο επικρατέστερος και κυριαρχεί στις παγκόσμιες θαλάσσιες μεταφορές. Είναι κατάλληλος για φορτία μεγάλου όγκου αλλά όχι πολύ μεγάλου βάρους. Η μέγιστη επιτρεπτή μάζα κιβωτίων 2 TEU ισούται με 26580 kg. Αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχουν αρκετά ακόμη είδη εμπορευματοκιβωτίων ακόμη και λίγο μεγαλύτερων των 2 TEU αλλά και ανοιχτής οροφής ή κιβώτια-ψυγεία όπως φαίνονται στο κάτω τμήμα στην Εικόνα 1-3 όλα όμως παρεμφερών διαστάσεων και μαζών με τα 1 & 2 TEU (στοιχεία βασισμένα στην ιστοσελίδα star-shine-shipping.com).

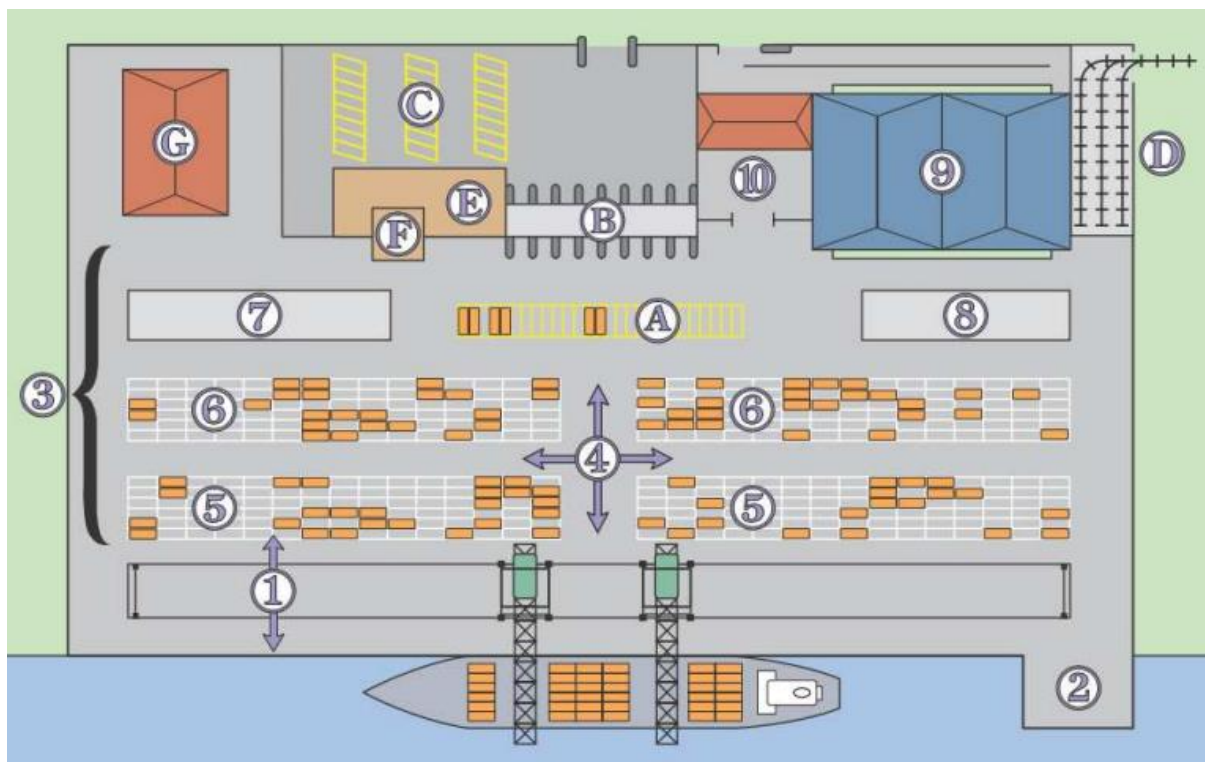
Τέλος, είναι πιθανό να υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις όλων των παραπάνω προδιαγραφών ανά τους κατασκευαστές, όμως κρίνεται αναγκαίο να υπάρχει συμμόρφωση στα εν λόγω πρότυπα. Η μεγάλη αύξηση της μεταφορικής ικανότητας των πλοίων αλλά και της διαχείρισης των εμπορευματοκιβωτίων οδήγησε στη βελτίωση της ταχύτητας και επιπέδου εξυπηρέτησης των λιμενικών εγκαταστάσεων καθώς και στην συστηματοποίηση και προτυποποίηση της διαδικασίας φορτοεκφόρτωσης και μεταφοράς.



Εικόνα 1-3: (Άνω αριστερά & δεξιά εμπορευματοκιβώτια 1 & 2 TEU αντίστοιχα & κάτω αριστερά & δεξιά εμπορευματοκιβώτια μεταφοράς υγρών & ανοιχτής οροφής αντίστοιχα)

1.3 Λιμενικές εγκαταστάσεις

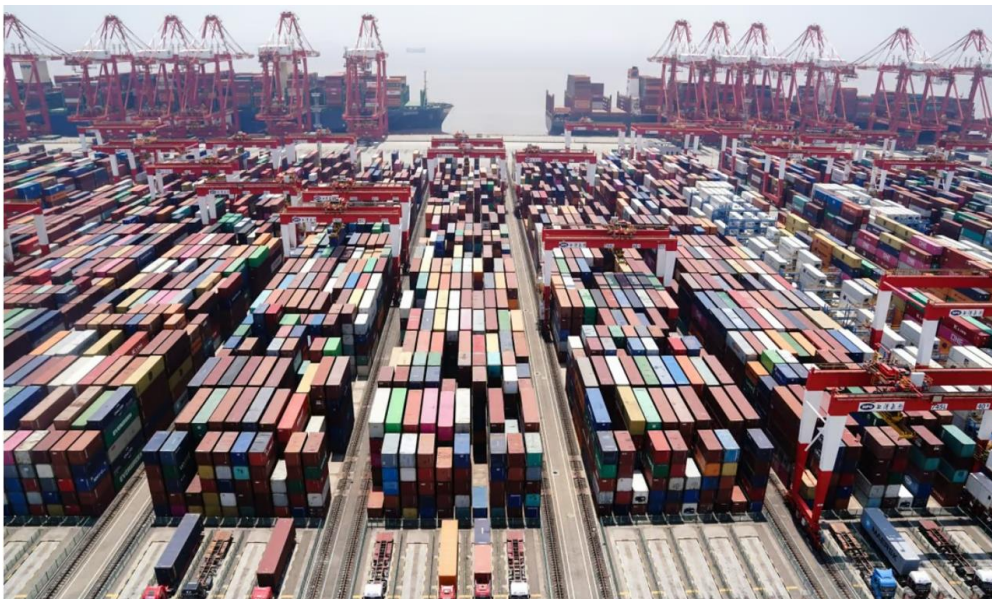
Λόγω της μεγάλης ανάπτυξης που γνωρίζουν οι θαλάσσιες μεταφορές -εμπορικές και μη- τα λιμάνια από απλοί χώροι στάθμευσης πλοίων έχουν μετατραπεί σε διεθνείς κόμβους εμπορίου και σε ιδιαίτερα σημαντικούς παράγοντες της παγκόσμιας οικονομίας. Ο λιμένας είναι ο κρίκος σύνδεσης των εμπορευματοκιβωτίων με την ενδοχώρα και τον τελικό αποδέκτη. Το πλοίο φορτώνει/εκφορτώνει εμπορευματοκιβώτια στο κρηπίδωμα όπου στη συνέχεια τα container παραλαμβάνονται και μεταφέρονται στη χερσαία ζώνη από φορτηγά ή τρένα όπου στοιβάζονται και μεταφέρονται στον τελικό τους προορισμό. Στην Εικόνα 1-4 ακολουθούν οι βασικές περιοχές ενός τυπικού σταθμού εμπορευματοκιβωτίων (Τσιτσάμης, 2009).



Εικόνα 1-4: Τυπικός σταθμός φορτοεκφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων (από Τσιτσάμης, 2009)

Βάσει της παραπάνω εικόνας οι βασικές περιοχές ενός τυπικού λιμένα εμπορευματοκιβωτίων είναι: η περιοχή παράδοσης/παραλαβής (A), η πύλη (B), ο χώρος στάθμευσης (C), ο τερματικός σιδηροδρομικός σταθμός (D), το κτήριο διοίκησης (E), το κέντρο ελέγχου (F) και το μηχανουργείο (G). Επίσης, βασικές περιοχές ενός εμπορικού λιμένα είναι το κρηπίδωμα (1), η ράμπα RO-RO (2), η αυλή των Ε/Κ (3), οι διάδρομοι (4), ο τομέας εξαγωγής και εισαγωγής (5) & (6) αντίστοιχα, οι ειδικοί χώροι (7), οι ειδικοί χώροι μακράς αποθήκευσης (8). Τέλος, φαίνονται η αποθήκη συσκευασίας (9) και οι χώροι ελέγχων (10).

Τα 9 από τα 10 πιο πολυσύχναστα λιμάνια φορτοεκφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων βρίσκονται στην Ασία (World Shipping Council). Συγκεκριμένα, το λιμάνι με τη μακράν μεγαλύτερη διακίνηση εμπορευματοκιβωτίων είναι το λιμάνι της Σαγκάης στην Κίνα, λιμένας που απεικονίζεται στην Εικόνα 1-5 και συνδέει το Κινεζικό εμπόριο με αυτό του υπόλοιπου κόσμου. Το 2019 διακινήθηκαν στο λιμάνι της Σαγκάης περισσότερα από 43 εκατομμύρια TEU σε 49 θέσεις φορτοεκφόρτωσης εμπορικών πλοίων με χρήση 176 λιμενικών γερανών Ε/Κ. Στην 10^η θέση βρίσκεται ο μόνος Ευρωπαϊκός λιμένας της κατάταξης, πρόκειται για το λιμάνι του Rotterdam στην Ολλανδία στο οποίο το 2019 διακινήθηκαν περίπου 15 εκατομμύρια TEU. Όσον αφορά την Ελλάδα, την πρώτη θέση καταλαμβάνει ο εμπορικός λιμένας Πειραιώς όντας στην 28^η θέση της παγκόσμιας κατάταξης με περίπου 5.3 εκατομμύρια TEU το 2019.

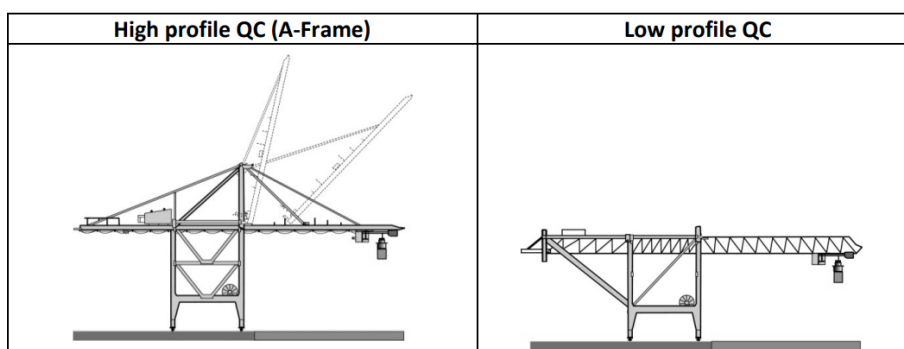


Εικόνα 1-5: Άποψη τμήματος λιμένα Σαγκάης (από www.scmp.com)

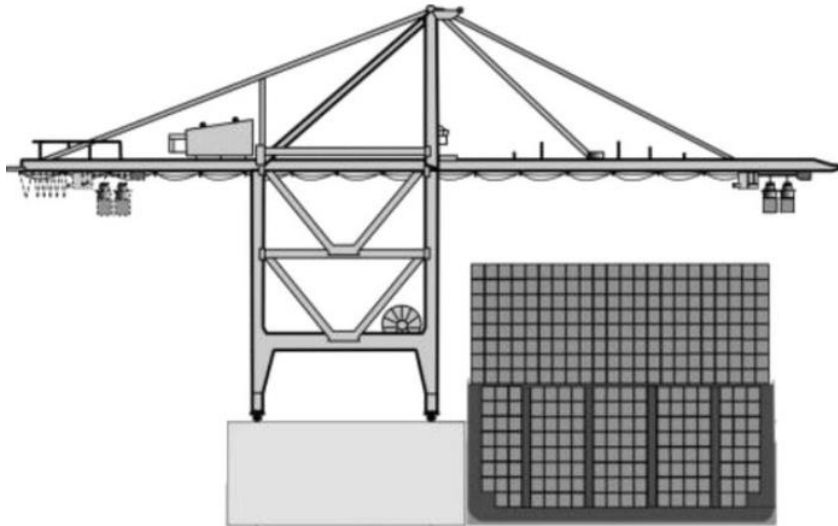
1.4 Λιμενικοί γερανοί

1.4.1 Γενικά στοιχεία

Ένας από τους κύριους παράγοντες που εξασφαλίζουν την εύρυθμη λειτουργία των εμπορικών λιμένων είναι η γρήγορη εξυπηρέτηση των πλοίων που προσαράζουν σε αυτά, μια διαδικασία άρρηκτα συνδεδεμένη με την ταχεία φορτοεκφόρτωση των Ε/Κ. Ένας από τους σημαντικότερους κρίκους της αλληλουχίας μέσω των οποίων απαιτούνται για την ικανοποίηση του παραπάνω στόχου του λιμένα είναι οι λιμενικοί γερανοί. Οι λιμενικοί γερανοί χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες, τους γεραμούς φορτοεκφόρτωσης χύδην φορτίου και τους γεραμούς μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων οι οποίοι συχνά αναφέρονται ως ship-to-shore (STS cranes) αλλά και quay cranes. Βρίσκονται στην άκρη των προβλήτων των εμπορικών λιμένων ώστε να μπορούν να έχουν άμεση πρόσβαση στα εμπορευματοκιβώτια των προσαραγμένων πλοίων και χωρίζονται σε 2 τύπους, τους χαμηλού & υψηλού. Στους γεραμούς Ε/Κ χαμηλού τύπου που φαίνονται στην Εικόνα 1-6 δεν είναι δυνατή η στροφική κίνηση του αριστερού άκρου του πρόσθιου τμήματος του γερανού πάνω στο οποίο γίνεται η μετακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων (Bartošek & Marek, 2013). Αντίθετα, στους γεραμούς υψηλού τύπου κάτι τέτοιο είναι δυνατό. Ο υπό μελέτη λιμενικός γερανός ανήκει στην κατηγορία υψηλού τύπου.



Εικόνα 1-6: Λιμενικοί γερανοί υψηλού και χαμηλού τύπου (από Bartošek & Marek, 2013)

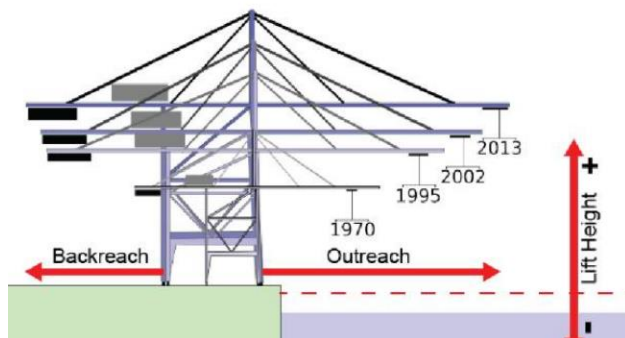


Εικόνα 1-7: : Τυπικός γερανός φορτοεκφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων υψηλού τύπου
(από Digiesi et al., 2019)

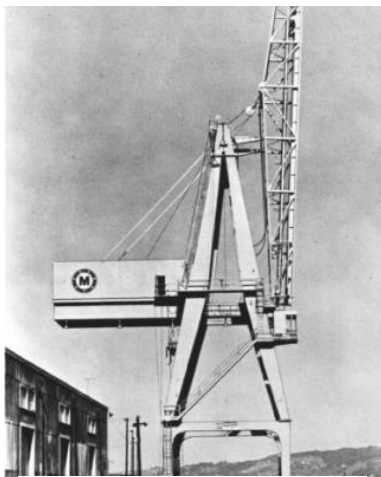
1.4.2 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη

Από την αρχαιότητα μέχρι και τα μέσα του 20^{ου} αιώνα ο τρόπος φορτοεκφόρτωσης των αγαθών που μετέφεραν τα πλωτά μέσα δεν είχε αλλάξει σε σημαντικό βαθμό, με συνέπεια συχνά να συμβαίνει το παράδοξο του ότι ο χρόνος παραμονής των πλοίων στα λιμάνια να είναι μεγαλύτερος ακόμη και από το ίδιο το ταξίδι. Ο πρώτος σύγχρονος λιμενικός γερανός εμπορευματοκιβωτίων κατασκευάστηκε το 1959, λίγο αργότερα δηλαδή από την κατασκευή πλοίων μεταφοράς Ε/Κ (Εικόνα 1-10). Ονομάστηκε RACECO Container Crane και λειτούργησε στην περιοχή Αλαμέδα της Πολιτείας της Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Η κατασκευή του θεωρήθηκε καινοτόμα για την εποχή καθώς κατάφερε να μειώσει ραγδαία τον χρόνο φορτοεκφόρτωσης από 3 εβδομάδες σε μόλις 18 ώρες (ASME, 1983). Όπως προαναφέρθηκε το μέγεθος των γερανών τύπου STS είναι άμεσα συνδεδεμένο με τα μεγέθη των εμπορικών πλοίων, οι διαστάσεις των οποίων γνώρισαν μεγάλη αύξηση τις τελευταίες δεκαετίες (Panamax, Panamax Max, Post Panamax). Στην Εικόνα 1-8 απεικονίζεται τόσο γραφικά όσο και πινακοποιημένα η σημαντική εξέλιξη του μεγέθους τους από το 1970 έως και το 2013.

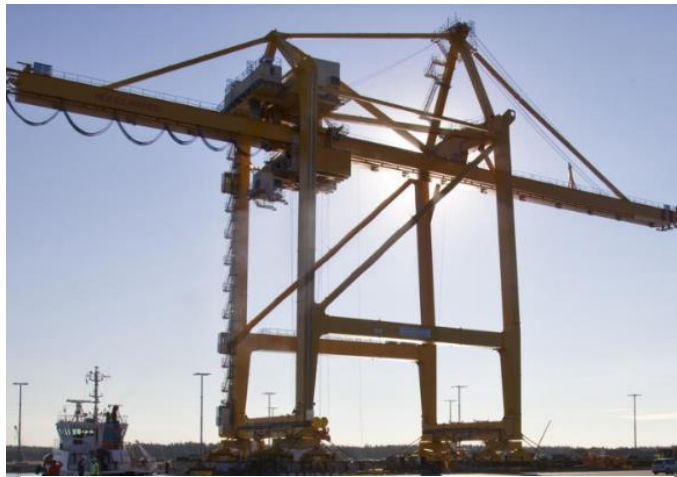
	1970	1995	2002	2013	2018
Outreach	37	54	67	72	72
Backreach	15	20	25	25	
Lift Height +	25	38	41	52	55
Lift Height -	10	14	17	17	



Εικόνα 1-8: : Εξέλιξη λιμενικών γερανών 1970-2013, (από Rasch, 2019)



Εικόνα 1-10: PACECO Crane
(από ASME, 1982)



Εικόνα 1-9: Σύγχρονος λιμενικός γερανός (από Konecranes)

Με βάση την Εικόνα 1-8 είναι φανερή η αύξηση των διαστάσεων των λιμενικών γερανών Ε/Κ. Για παράδειγμα, το μήκος του πρόσθιου τμήματος του γερανού (outreach) αυξήθηκε από 37 m το 1970 σε 72 m το 2018 ενώ το μέγιστο ύψος ανύψωσης των κιβωτίων από 25 m σε 55 m. Επίσης, εντυπωσιακό είναι το γεγονός ότι παρά την αδιαμφισβήτητη πρόοδο και εξέλιξη που σημειώθηκε όλες τις προηγούμενες δεκαετίες στο συγκεκριμένο τομέα, η μορφή του γερανού που πρότεινε και κατασκεύασε η PACECO παρουσιάζει ακόμη και σήμερα πολλά κοινά χαρακτηριστικά με τους σημερινούς γερανούς. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει ακόμη περισσότερο την καινοτομία και την επιτυχία του σχεδιασμού που προτάθηκε πριν από περίπου 65 έτη. Όσον αφορά την φέρουσα ικανότητα, ο πρώτος σύγχρονος γερανός της εταιρείας PACECO είχε δυνατότητα ανύψωσης περίπου 20 τόνων με κύκλο 3 λεπτών, δηλαδή με παραγωγικότητα περίπου 400 tn/hr. Έτσι, ήταν δυνατή η διαδικασία εξυπηρέτησης ενός πλοίου μέσα σε μόλις 18 ώρες από 3 εβδομάδες με χρήση γερανών προγενέστερης της εποχής του. Σήμερα, οι λιμενικοί γερανοί έχουν φέρουσα ικανότητα -υπό κατάλληλες προϋποθέσεις- έως και 120 tn με δυνατότητα ταυτόχρονης μεταφοράς έως και 4 μεγάλων εμπορευματοκιβωτίων 40 ft (2 TEU).

Η μέση διάρκεια της μεταφοράς ενός ή περισσότερων Ε/Κ από το πλοίο στο όχημα μεταφοράς στην προβλήτα είναι περίπου 70 δευτερόλεπτα με τη διαδικασία αυτή στη βιβλιογραφία να συναντάται με τον όρο *move*. Ο παραπάνω όρος περιλαμβάνει την καθύψωση και το «κλείδωμα» του μέσου μεταφοράς στο άνω τμήμα του εμπορευματοκιβωτίου, την ανύψωση του μέσου μεταφοράς μαζί με τα υπό μεταφορά εμπορευματοκιβώτια, τη μεταφορά στην προβλήτα καθώς και την καθύψωση τους. Η διαδικασία φορτοεκφόρτωσης ενός πλοίου (*turnaround*) εκτός από την παραγωγικότητα των γερανών εξαρτάται και από αρκετούς άλλους εξωγενείς παράγοντες που μπορούν να επιβραδύνουν τη διαδικασία ακόμη και κατά 20-30%. Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα 1.1 τα σύγχρονα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων έχουν πλέον υψηλές μεταφορικές ικανότητες που πολλές φορές ξεπερνούν και τα 20000 TEU. Συνεπώς, προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος εξυπηρέτησής τους, κάθε πλοίο εξυπηρετείται από περισσότερους από ένα γερανούς ταυτόχρονα. Ο Πίνακας 1-1 παρουσιάζει το χρόνο εξυπηρέτησης πλοίων με διάφορες χωρητικότητες με ταυτόχρονη εξυπηρέτηση από 5 με 6 γερανούς με διαφορετικές παραγωγικότητες. Ως παραγωγικότητα ορίζεται ο αριθμός των φορτοεκφορτώσεων (*moves*) ανά ώρα. Οι σύγχρονοι λιμενικοί γερανοί μπορούν να εκτελέσουν 30 έως 50 φορτοεκφορτώσεις ανά ώρα. Για παράδειγμα, η φορτοεκφόρτωση του 75% των εμπορευματοκιβωτίων ενός πλοίου μεταφορικής ικανότητας 12000 TEU αναμένεται να διαρκέσει 3 ημέρες με χρήση 6 γερανών με δυνατότητα 40 *moves* ανά ώρα (Bartošek & Marek, 2013).

Πίνακας 1-1: Χρόνοι διαδικασίας turnaround σε hr (από Bartošek & Marek, 2013)

Vessel Size (TEU)	Lifts per hour			Cranes
	30	40	50	
Vessel turnaround time (hours)				
8,000	69	51	41	5
10,000	71	54	43	6
12,000	86	64	51	6

1.4.3 Επιμέρους τμήματα λιμενικών γερανών

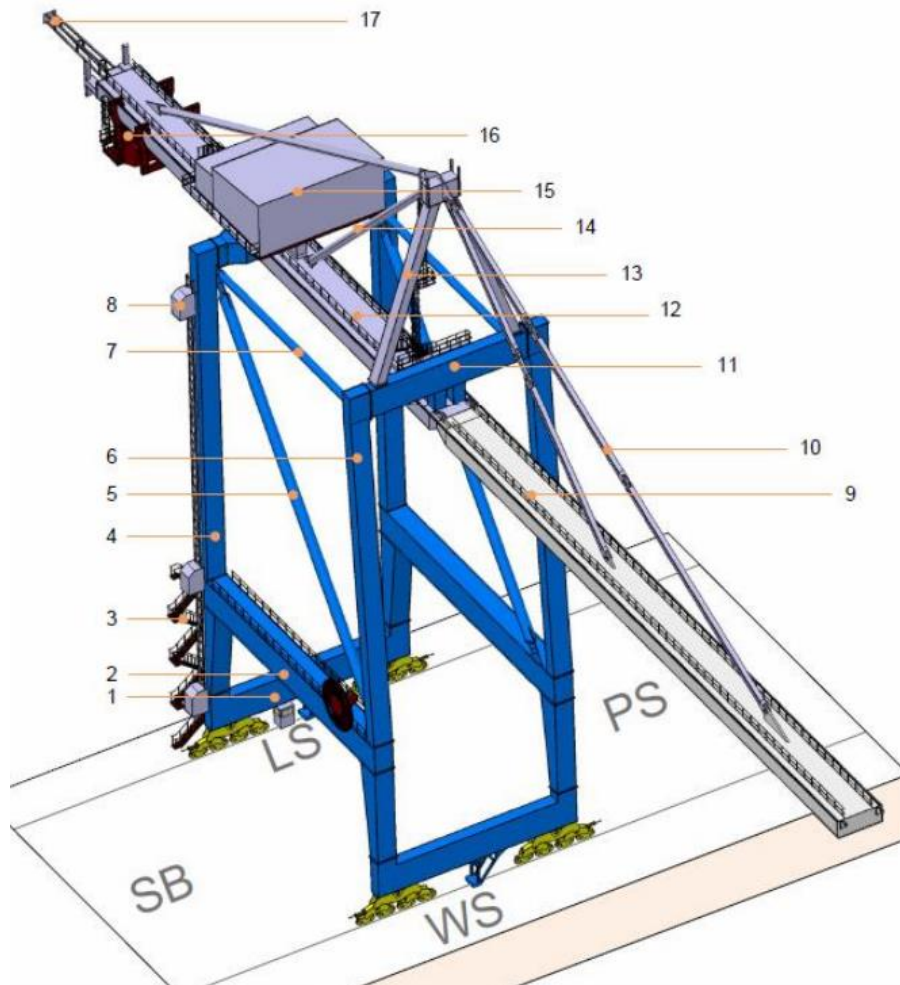
Για την επιτέλεση του σύνθετου έργου τους οι λιμενικοί γερανοί εμπορευματοκιβωτίων αποτελούνται από αρκετά επιμέρους τμήματα. Η παρακάτω παραστατική απεικόνιση αρκετών σημαντικών στοιχείων ενός λιμενικού γερανού αντλήθηκε από την επίσημη ιστοσελίδα της εταιρείας κατασκευής γερανών και λοιπού μηχανολογικού εξοπλισμού Konecranes.



Εικόνα 1-11: Επιμέρους τμήματα ενός τυπικού λιμενικού γερανού (από www.konecranes.com)

- 1: Περιοχή ονομαζόμενη ως πυρήνας ανύψωσης "core of lifting". Αποτελείται από γρανάζια κινητήρες και βρίσκονται σε διάφορα μέρη του γερανού όπως το φορείο (trolley) και το δωμάτιο Η/Μ εξοπλισμού
- 2: Δωμάτια Η/Μ εξοπλισμού, διαχωρίζεται σε 2 επιμέρους θαλάμους, ένας για την αποθήκη, τον έλεγχο και συντήρηση του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και ένας θάλαμος για τις ίδιες διαδικασίες του μηχανολογικού εξοπλισμού.
- 3: Μεταλλική κατασκευή του γερανού (φέρων οργανισμός)
- 4: Σκάλες πρόσβασης χειριστών και λοιπού προσωπικού
- 5: Ράγες κύλισης γερανού
- 6: Μέσο έντασης συρματόσχοινων στο οπίσθιο τμήμα του γερανού (backreach)
- 7: Φορεία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (trolley)

Στην Εικόνα 1-12 φαίνεται μια ακόμη διακριτοποίηση των σημαντικών στοιχείων των λιμενικών γερανών STS εστιασμένη όμως κυρίως στα τμήματα του φέροντα οργανισμού εν αντιθέσει με την Εικόνα 1-11 που αναφέρεται κυρίως στα επιμέρους εξαρτήματα του γερανού και στη λειτουργία τους.



Εικόνα 1-12: Επιμέρους τμήματα φέροντα οργανισμού (από Oudshoorn, 2014)

Διακρίνονται τα εξής:

(1) κάτω δοκός γερανού, (2) δοκός κάθετη στην (1), (3) πύργος κλιμακοστασίου, (4) ενδιάμεσο υποστύλωμα, (5) διαγώνιος σύνδεσμος, (6) στύλος πλευράς θάλασσας, (7) οριζόντιος σύνδεσμος, (8) ανελκυστήρας, (9) δοκός κύλισης, (10) αναρτήρες, (11) δοκός, (12) ενδιάμεση δοκός, (13) άνω διαγώνιοι σύνδεσμοι, (14) πίσω σύνδεσμοι, (15) δωμάτιο Η/Μ εξοπλισμού, (16) φορείο, (17) οπίσθιο τμήμα δοκού

PS = portside
 SB = starboard
 LS= landside
 WS = waterside

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως ενώ η γενική γεωμετρία μοιάζει αρκετά ανά τους κατασκευαστές, συχνά παρατηρούνται διαφοροποιήσεις ως προς τη μορφή και τον αριθμό των δοκών κύλισης. Από πολλές εταιρείες επιλέγεται το φορείο να κυλιέται σε μια και μόνο δοκό κύλισης (monobox) όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-13, ενώ άλλοι κατασκευαστές επιλέγουν το φορείο να κυλιέται σε 2 παράλληλες δοκούς (double box). Τέλος, διαφοροποίηση υπάρχει και ως προς τη μορφή των δοκών κύλισης μεταξύ δικτυωτών & ολόσωμων δοκών.



Εικόνα 1-13: Λιμενικοί γερανοί με δοκό κύλισης: monobox (αριστερά), double box (κέντρο) & lattice (δεξιά)
(από de Vette, 2011)

Ακολουθούν φωτογραφίες από συγκεκριμένα τμήματα λιμενικών γερανών τύπου STS:



Εικόνα 1-14: Θάλαμος μηχανολογικού εξοπλισμού (από de Vette, 2011)

Το τρόλεϊ, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-11 κινείται στις δοκούς κύλισης. Το μέσο με το οποίο το εμπορευματοκιβώτιο αναρτάται ονομάζεται αρπάγη (spreader), συσκευή η οποία «κλειδώνει» τα εμπορευματοκιβώτια στις 4 γωνίες τους μέσω άγκιστρων (twistlocks). Κάθε spreader μπορεί να μεταφέρει είτε 1 εμπορευματοκιβώτιο 40 ft είτε μέχρι 2 εμπορευματοκιβώτια 20 ft. Το φορείο συνδέεται με το μέσο μεταφοράς μέσω συρματοσχοινων σε μια περιοχή ακριβώς πάνω των spreaders, τμήμα που ονομάζεται κεφαλή σύνδεσης (headblock).



Εικόνα 1-15: Αρπάγη (spreader) & κεφαλή σύνδεσης (headblock) (από de Vette, 2011)

1.5 Δομή της εργασίας

Στις τέσσερις πρώτες υποενότητες του 1^{ου} κεφαλαίου πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια ανάδειξης της σημασίας και της συνεισφοράς της σωστής λειτουργίας των λιμενικών εγκαταστάσεων και δη των λιμενικών γερανών στις θαλάσσιες μεταφορές. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός λιμενικών γερανών εμπορευματοκιβωτίων. Πρόκειται για μια αρκετά σύνθετη μηχανολογική κατασκευή αλλά με πολύ μεγάλο ενδιαφέρον από τη σκοπιά του αντικειμένου του Πολιτικού Μηχανικού. Η εργασία εστιάζει σχεδόν εξ ολοκλήρου στο σχεδιασμό και διαστασιολόγηση του φέροντα οργανισμού του μεταλλικού γερανού πραγματοποιώντας εύλογες παραδοχές σε ζητήματα που άπτονται του αντικειμένου του Μηχανολόγου Μηχανικού. Ο σχεδιασμός του γερανού της εργασίας έχει ως βάση έναν υπάρχοντα υφιστάμενο της εταιρείας ZPMC (Shanghai Zhenhua Heavy Industries Co. Ltd.) από τον οποίο αντλήθηκαν πληροφορίες διαστάσεων και μορφής διατομών. Ακολουθεί η επισκόπηση των κεφαλαίων της διπλωματικής εργασίας.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο των θαλάσσιων μεταφορών, των εμπορευματοκιβωτίων αλλά και στους λιμενικούς γερανούς. Παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τα είδη, τη γεωμετρία, τη λειτουργία και τη φέρουσα ικανότητά τους.

Στο 2^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια επισκόπηση των βασικών στοιχείων των κανονιστικών διατάξεων που διέπουν το σχεδιασμό γερανών.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφονται η γεωμετρία, το υλικό αλλά και οι τεχνικές προδιαγραφές του υπό μελέτη λιμενικού γερανού τύπου STS.

Στο 4^ο κεφάλαιο προσδιορίζονται και υπολογίζονται τα φορτία που δρουν επί της κατασκευής.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται θέματα που αφορούν την προσομοίωση του φορέα, δηλαδή τους επιτρεπόμενους βαθμούς ελευθερίας των μελών, τις συνοριακές συνθήκες αλλά και την προσομοίωση των ατελειών.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται εκτενώς τα σημαντικότερα αποτελέσματα των γραμμικών (Linear) και μη γραμμικών αναλύσεων με αρχικές ατέλειες (GNIA) με τις αναλύσεις να εκτελούνται με χρήση του λογισμικού RFEM 6 της εταιρείας Dlubal.

Στο 7^ο κεφάλαιο ο φορέας διαστασιολογείται (πλην κόπωσης).

Στο 8^ο κεφάλαιο ο φορέας με τις διατομές που προέκυψαν από το παραπάνω κεφάλαιο ελέγχεται έναντι κόπωσης.

Στο 9^ο κεφάλαιο η εργασία ολοκληρώνεται με την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο 10^ο κεφάλαιο αναφέρεται το σύνολο της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε.

2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΕΡΑΝΩΝ

2.1 Γενικά στοιχεία ευρωπαϊκού προτύπου EN 13001

Για το σχεδιασμό του λιμενικού γερανού εμπορευματοκιβωτίων ακολουθήθηκαν οι διατάξεις των ευρωπαϊκών προτύπων EN 13001, EN 15011 & EN 1993. Θα πρέπει να αναφερθεί πως στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα καλυφθούν επιγραμματικά ορισμένα στοιχεία του κανονισμού. Έμφαση δίνεται στα στοιχεία για τα οποία δεν πραγματοποιείται εκτενέστερη αναφορά σε επόμενα κεφάλαια της εργασίας. Το πρότυπο EN 13001 είναι ένα κανονιστικό κείμενο που αναφέρεται σε όλες τις κατηγορίες των γερανών. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι ειδικότερες διατάξεις σε διαφορετικά κείμενα που αφορούν αποκλειστικά συγκεκριμένα είδη γερανών. Το ειδικότερο πρότυπο που θεωρήθηκε πως αφορά τους λιμενικούς γερανούς είναι το EN 15011. Στο σύνολο των ανωτέρω κειμένων διασφαλίζονται σημαντικά κίνδυνοι έναντι ανατροπής του γερανού, υπέρβασης του ορίου διαρροής του υλικού αλλά και έναντι κόπωσης. Επιπλέον, καλύπτεται ο κίνδυνος σε λυγισμό των μελών του, υπέρβασης του επιτρεπόμενου θερμοκρασιακού ορίου ορισμένων επιμέρους τμημάτων του γερανού και τέλος ο κίνδυνος υπέρβασης της μέγιστης ανεκτής παραμόρφωσης του φορέα.

Το πρότυπο EN 13001 αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα:

- Μέρος 1: Γενικές αρχές & απαιτήσεις
- Μέρος 2: Δράσεις επί του γερανού
- Μέρος 3-1: Οριακή κατάσταση & έλεγχος επάρκειας μεταλλικής κατασκευής
- Μέρος 3-2: Οριακή κατάσταση & έλεγχος επάρκειας συστήματος συρματοσχοίνων
- Μέρος 3-3: Οριακή κατάσταση & έλεγχος επάρκειας συστήματος τροχών κύλισης
- Μέρος 3-4: Οριακή κατάσταση & έλεγχος επάρκειας μηχανολογικού εξοπλισμού-υδραυλικών κυλινδρών
- Μέρος 3-5: Οριακή κατάσταση & έλεγχος επάρκειας συστήματος γαντζών

Όπως θα αναφερθεί αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 4, όπου παρουσιάζεται και η μεθοδολογία υπολογισμού των φορτίων που ελήφθησαν υπόψη στον σχεδιασμό κατά EN 13001-2:2021, οι δράσεις κατηγοριοποιούνται βάσει της συχνότητας εμφάνισής τους σε 3 επιμέρους κατηγορίες. Συγκεκριμένα, οι δράσεις που ανήκουν στην κατηγορία A είναι αυτές που συμβαίνουν συχνά και κατά τη λειτουργία του γερανού υπό κανονικές συνθήκες. Η κατηγορία B αφορά τα περιστασιακά φορτία που δεν έχουν μεγάλη συχνότητα εμφάνισης ενώ τα σπάνια φορτία που περιλαμβάνονται στην κατηγορία C προκύπτουν κατά την ανύψωση φορτίων υπό πολύ δυσμενείς συνθήκες. Ο συνδυασμός των φορτίων για τον έλεγχο επάρκειας μελών όμοια με το διαχωρισμό των φορτίων σε κατηγορίες βασίζεται στη συχνότητα εμφάνισής τους. Ο δυναμικός χαρακτήρας των δράσεων εκφράζεται μέσω των δυναμικών συντελεστών ϕ_i , συντελεστές που λαμβάνουν διαφορετική τιμή για κάθε δράση ξεχωριστά.

2.2 Υλικά

Στο πρότυπο EN 13001-3-1:2012 γίνεται εκτενής αναφορά στα επιθυμητά υλικά που μπορεί να αποτελείται ο γερανός. Για τα δομικά μέρη της κατασκευής θα πρέπει να χρησιμοποιείται:

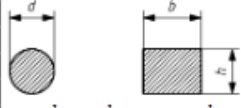
- Μη κραματομένος δομικός χάλυβας κατά EN 10025-2
- Συγκολλησιμος λεπτόκοκκος χάλυβας υπό τις προϋποθέσεις:
 - Εξομάλυνσης (N) EN 10149-3
 - Θερμομηχανικής επεξεργασίας (M) EN 10025-4
- Χάλυβες υψηλής αντοχής κατά EN 10025-6
- Χάλυβες υψηλής αντοχής υπό ψυχρή έλαση υπό τις προϋποθέσεις:
 - Θερμομηχανικής επεξεργασίας (M) EN 10149-2
 - Εξομάλυνσης (N) EN 10149-3
- Ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες κατά EN 10088-2

Εφόσον συγκολλούνται ανοξείδωτοι χάλυβες θα πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη μέριμνα στη διαδικασία της συγκόλλησης αλλά και στο φαινόμενο της διάβρωσης.

Δυσθραυστότητα

Κατά την επιλογή ποιότητας χάλυβα θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το άθροισμα των παραμέτρων q_i . Οι στατικές απαιτήσεις οδηγούν συχνά σε μεγάλα πάχη ελασμάτων. Τα ελάσματα μεγάλου πάχους έχουν μειωμένο όριο διαρροής με τάση προς τη ψαθυρή θραύση. Το συγκεκριμένο μέγεθος μετράται ως η ενέργεια που απορροφάται στη δοκιμή κρούσης κατά Charpy. Κατά την δοκιμή αυτή ένα εκκρεμές προσπίπτει με ταχύτητα στο δοκίμιο με εγκοπή με την ενέργεια που απορροφάται να μετρείται από την απώλεια του ύψους του εκκρεμούς μετά την κρούση. Ικανοποιητικές τιμές δυσθραυστότητας είναι τιμές μεγαλύτερες από 27 J. Οι γερανοί όμοια με τη γεφυροποιία είναι κατασκευές υποκείμενες σε δυναμικές φορτίσεις, με συνέπεια οι απαιτήσεις δυσθραυστότητας να είναι αυξημένες. Η συνήθης κατηγορία είναι η J2 όπου η τιμή των 27 J επιτυγχάνεται σε θερμοκρασία -20° . Τέλος, η τιμή της δυσθραυστότητας εξαρτάται και από τη θερμοκρασία λειτουργίας της κατασκευής, το πάχος του ελάσματος, το μέγεθος των ασκούμενων τάσεων, τις παραμένουσες τάσεις και την ύπαρξη ή μη συγκεντρωμένων τάσεων όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα. (Βάγιας κ.α., 2016). Έτσι, επιλέγοντας τις τιμές q_i που δίνει ο Πίνακας 2-1 και αθροίζοντάς τες είναι δυνατός ο προσδιορισμός της ποιότητας χάλυβα για επαρκή αντοχή.

Πίνακας 2-1: Πίνακας επιλογής παραμέτρων q_i

i	Influence	q_i	
1	Operating temperature T (°C)	$0 \leq T$	0
		$-10 \leq T < 0$	1
		$-20 \leq T < -10$	2
		$-30 \leq T < -20$	3
		$-40 \leq T < -30$	4
		$-50 \leq T < -40$	6
2	Yield stress f_y (N/mm ²)	$f_y \leq 300$	0
		$300 < f_y \leq 480$	1
		$480 < f_y \leq 700$	2
		$700 < f_y \leq 1000$	3
		$1000 < f_y \leq 1300$	4
3	Material thickness t (mm) Equivalent thickness t for solid bars:  $t = \frac{d}{1,8}$ for $\frac{b}{h} < 1,8$; $t = \frac{b}{1,8}$	$t \leq 10$	0
		$10 < t \leq 20$	1
		$20 < t \leq 40$	2
		$40 < t \leq 60$	3
		$60 < t \leq 80$	4
		$80 < t \leq 100$	5
		$100 < t \leq 125$	6
		$125 < t \leq 150$	7
4	Stress concentration and notch class $\Delta\sigma_s$ (N/mm ²) (see Annex D and Annex H)	$\Delta\sigma_s > 125$	0
		$80 < \Delta\sigma_s \leq 125$	1
		$56 < \Delta\sigma_s \leq 80$	2
		$40 \leq \Delta\sigma_s \leq 56$	3

Πίνακας 2-2: Προσδιορισμός επιμέρους ποιότητας χάλυβα για επαρκή αντοχή σε ψαθυρή θράυση

	$\Sigma q_i \leq 5$	$6 \leq \Sigma q_i \leq 8$	$9 \leq \Sigma q_i \leq 11$	$12 \leq \Sigma q_i \leq 14$
Impact energy/ test temperature requirement	27 J / +20°C	27 J / 0°C	27 J / -20°C	27 J / -40°C
EN 10025-2	JR	J0	J2	a)
EN 10025-3	N	N	N	NL
EN 10025-4	M	M	M	ML
EN 10025-6	Q	Q	Q	QL
EN 10149-1	NC, MC	NC, MC	NC, MC	a)
a) May be used if the impact toughness is at least 27 J at -40°C, tested in accordance with EN 10045-1 and specified ,				

2.3 Συνδέσεις

Για κοχλιωτές συνδέσεις επιτρέπονται κοχλίες ποιότητας 4.6, 5.6, 8.8, 10.9 & 12.9 σύμφωνα με το πρότυπο ISO 898-1:2013.

Πίνακας 2-3: Ποιότητες κοχλιών

Property class (Bolt grade)	4.6	5.6	8.8	10.9	12.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	300	640	900	1 080
f_{ub} (N/mm ²)	400	500	800	1 000	1 200

Προεντεταμένες συνδέσεις

Ως προεντεταμένες συνδέσεις ορίζονται αυτές που τα φορτία μεταφέρονται μέσω τριβής μεταξύ των επιφανειών. Σε αυτές τις συνδέσεις θα πρέπει:

- να χρησιμοποιούνται κοχλίες ποιότητας 8.8, 10.9 & 12.9
- οι κοχλίες θα πρέπει να εντείνονται ελεγχόμενα και σε συγκεκριμένο όριο προέντασης
- θα πρέπει να αξιολογείται η κατάσταση της επιφάνειας και να λαμβάνεται καταλλήλως υπόψη
- πλέον των κανονικών οπών είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και επιμήκεις οπές

Συνδέσεις υπό εφελκυσμό

Στις συνδέσεις που βρίσκονται υπό εφελκυσμό θα πρέπει η διεύθυνση της δύναμης να είναι παράλληλη με αυτή των κοχλίων και να προκαλεί ορθές τάσεις στους κοχλίες. Επίσης, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται κοχλίες ποιότητας 8.8, 10.9 ή 12.9 με ελεγχόμενη μέθοδο σε ένα προκαθορισμένο όριο προέντασης.

Αρθρωτές συνδέσεις

Ως αρθρωτές συνδέσεις λογίζονται αυτές που δεν περιορίζουν τη στροφή μεταξύ των συνδεόμενων τμημάτων. Η ανοχή μεταξύ της οπής και του πείρου θα πρέπει να είναι σύμφωνη με το πρότυπο EN ISO 286-2:2010, με ανοχές κατηγορίας h13 & H13 ή και μικρότερες. Σε περίπτωση εναλλασσόμενης διεύθυνσης φόρτισης θα πρέπει να επιλέγονται μικρότερες τιμές ανοχών.

Συγκολλητές συνδέσεις

Θα πρέπει να διασφαλίζεται η επιθυμητή ποιότητα των συγκολλητών συνδέσεων κατά το πρότυπο EN ISO 5817 με χρήση μη καταστρεπτικών ελέγχων. Οι συγκολλήσεις θα πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο κατηγορίας C με τις συγκολλήσεις κατηγορίας D να επιτρέπονται μόνο σε κόμβους όπου η τοπική αστοχία της συγκόλλησης δε συνεπάγεται την ολική κατάρρευση της κατασκευής ή την πτώση φορτίων. Τέλος, αναφέρεται πως σε συγκολλήσεις που το ενεργό τους μήκος είναι μικρότερο από 150 φορές το πάχος της συγκόλλησης είναι επιτρεπτό να θεωρείται ομοιόμορφη κατανομή των ορθών τάσεων κατά το διαμήκη άξονα της συγκόλλησης.

2.4 Εκτέλεση ελέγχων

Για τον έλεγχο επάρκειας των μελών και συνδέσεων θα πρέπει να ισχύει η γενική Εξ.(2-1) που θα πρέπει να επαληθεύεται σε κάθε υπό μελέτη μέλος ή σύνδεση.

$$S_d \leq R_d \quad (2-1)$$

όπου

S_d : η τάση ή δύναμη σχεδιασμού κατόπιν εφαρμογής των κατάλληλων φορτίων, συνδυασμών και συντελεστών ασφαλείας κατά EN 13001-2:2021

R_d : η αντοχή σχεδιασμού σε όρους τάσης ή δύναμης.

Σε κάθε δομικό στοιχείο και σύνδεση θα πρέπει να γίνονται έλεγχοι: αντοχής για τους συνδυασμούς φορτίσεων A, B & C, αντοχής έναντι κόπωσης, έναντι λυγισμού καθώς και έλεγχος επάρκειας κόμβων.

Ο έλεγχος επάρκειας των μελών δεν αναφέρεται στο παρόν κεφάλαιο καθώς αναφέρεται αναλυτικά στο 7^ο κεφάλαιο της εργασίας.

Στο πρότυπο EN 13001-2:2021 αναφέρονται οι τύποι υπολογισμού των οριακών δυνάμεων σχεδιασμού για συνδέσεις τέμνουσας, εφελκυσόμενων συνδέσεων, πείρων, προεντεταμένων συνδέσεων και συγκολλήσεων. Στο παρόν κείμενο θα αναφερθεί το τυπολόγιο των συνδέσεων τέμνουσας και των συγκολλήσεων.

Έλεγχος συνδέσεων τέμνουσας

Η οριακή αντοχή ενός $F_{v,Rd}$ ανά κοχλία ανά επίπεδο διάτμησης υπολογίζεται από την Εξ.(2-2), διαδικασία που είναι όμοια με αυτή που προτείνει ο Ευρωκώδικας 3 αλλά με 2 σημαντικές διαφοροποιήσεις που χρήζουν αναφοράς. Η πρώτη διαφορά αφορά την αντοχή του κοχλία. Ο Ευρωκώδικας 3 προτείνει να θεωρείται το όριο θραύσης του κοχλία έναντι του προτύπου EN 13001-3-1:2012 που δεν επιτρέπει την υπέρβαση του ορίου διαρροής του υλικού. Έτσι, ενώ κατά τον Ευρωκώδικα 3 για κοχλία ποιότητας 10.9 θα θεωρούνταν $f_{ub} = 1000$ MPa, στο πρότυπο EN 13001-2:2021 θα πρέπει να θεωρηθεί $0,9 \cdot 1000 = 900$ MPa. Η δεύτερη διαφοροποίηση αφορά το συντελεστή ασφαλείας, με τον Ευρωκώδικα 3 να θεωρεί $\gamma_{M2} = 1,25$ αλλά με το συντελεστή γ_{Rb} στο πρότυπο σχεδιασμού συνδέσεων γερανών να προκύπτει συναρτητές του αριθμού των επιπέδων διάτμησης πολλαπλασιασμένο με το συντελεστή $\gamma_m = 1,1$.

$$F_{v,Rd} = \frac{f_{yb} \cdot A}{\gamma_{Rb} \cdot \sqrt{3}} \quad (2-2)$$

όπου

f_{yb} : το όριο διαρροής του κοχλία (Πίνακας 2-3)

A: το εμβαδό του κοχλία στο επίπεδο διάτμησης

γ_{Rb} : το γινόμενο του γενικού συντελεστή αντίστασης ίσο με 1,1 με τον ειδικό συντελεστή ασφαλείας για κοχλιωτές συνδέσεις

γ_{sbs} : ειδικός συντελεστής ασφαλείας για κοχλιωτές συνδέσεις, λαμβάνει την τιμή 1,0 για παραπάνω από 1 επίπεδα διάτμησης και 1,3 για 1 επίπεδο.

Για την επιτυχία του ελέγχου θα πρέπει να ικανοποιείται η Εξ.(2-1).

Πίνακας 2-4: Δύναμη $F_{v,Rd}$ συναρτησει του μεγέθους και ποιότητας των κοχλίων για 1 επίπεδο διάτμησης

Fit bolt	Shank diameter mm	$F_{v,Rd}$ kN				
		Fit bolt material for $\gamma_{Rb} = 1,1$				
		4.6	5.6	8.8	10.9	12.9
M12	13	16,7	20,9	44,6	62,8	75,4
M16	17	28,6	35,7	76,2	107,2	128,6
M20	21	43,5	54,4	116,2	163,2	196,1
M22	23	52,2	65,3	139,4	196,0	235,2
M24	25	61,8	77,3	164,9	231,9	278,3
M27	28	77,6	97,0	206,9	291,0	349,2
M30	31	95,1	111,8	253,6	356,6	428,0

Αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας

Η αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας ανά κοχλία καθώς και οι επιτρεπόμενες αποστάσεις υπολογίζονται από την Εξ.(2-3).

$$F_{b,Rd} = \frac{f_y \cdot d \cdot t}{\gamma_{Rb}} \quad \& \quad e_1 \geq 1,5d_0, \quad e_2 \geq 1,5d_0, \quad p_1 \geq 3d_0, \quad p_2 \geq 3d_0 \quad (2-3)$$

όπου

f_y : το όριο διαρροής υλικού

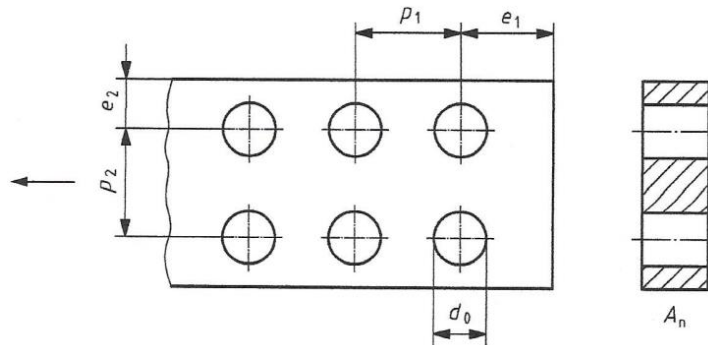
d: η διάμετρος του κορμού του κοχλία

d_0 : η διάμετρος της οπής

t: το πάχος των συνδεόμενων μερών σε επαφή με τον κοχλία

γ_{sbb} : ο ειδικός συντελεστής αντίστασης για κοχλιωτές συνδέσεις, ίσος με 0,7 για πολλαπλά επίπεδα διάτμησης και με 0,9 για 1 επίπεδο διάτμησης.

p_1, p_2, p_3 : αποστάσεις:



Εικόνα 2-1: Ελάχιστες επιτρεπόμενες αποστάσεις e_1, e_2, p_1 & p_2

Οριακή τάση σχεδιασμού συγκολλήσεων

Η οριακή τάση σχεδιασμού συγκολλήσεων $f_{w,Rd}$ εξαρτάται από το υλικό πλήρωσης αλλά και από το υπό συγκόλληση υλικό, το είδος της συγκόλλησης, το είδος της φόρτισης και την ποιότητα συγκόλλησης. Η οριακή τάση αντοχής της συγκόλλησης προσδιορίζεται από την Εξ.(2-4).

$$f_{w,Rd} = \frac{\alpha_w \cdot f_y}{\gamma_m} \quad \text{σχ. (21)} \quad \text{ή} \quad f_{w,Rd} = \frac{\alpha_w \cdot f_{uw}}{\gamma_m} \quad \text{σχ. (22)} \quad (2-4)$$

όπου

α_w : ο παράγοντας εξαρτώμενος από τον τύπο της συγκόλλησης, τον τύπο των τάσεων και το υλικό βάσει του παρακάτω πίνακα

Πίνακας 2-5: Πίνακας επιλογής παραμέτρου α_w και κατάλληλης εξίσωσης

Direction of stress	Type of weld	Type of stress	Equation number	α_w	
				$f_{yk} < 980$ N/mm ²	$f_{yk} > 980$ N/mm ²
Stress normal to the weld direction	Full penetration weld, matching weld material	Tension	21	1,0	0,93
		Compression	21	1,0	0,93
	Full penetration weld, undermatching weld materials	Tension	22	0,80	0,80
		Compression	22	0,80	0,80
	Partial penetration weld, matching weld material ^a	Tension or compression	21	0,70	0,65
		Partial penetration weld, undermatching weld material ^a	Tension or compression	22	0,56
All welds, matching weld material	All welds, undermatching weld material	Shear	21	0,70	0,65
		Shear	22	0,54	0,54
Stress parallel to the weld direction	All welds	Tension or Compression	21	1,0	0,93
	All welds, matching weld material	Shear	21	0,60	0,55
	Full penetration welds, undermatching weld material	Shear	22	0,50	0,50
	Partial penetration weld, undermatching weld material	Shear	22	0,50	0,50

f_y : η χαμηλότερη τιμή των ορίων διαρροής των συνδεόμενων μελών

f_{uw} : η εφελκυστική αντοχή του υλικού που συγκολλάται

γ_m : ο ειδικός συντελεστής αντίστασης ίσος με 1,10.

Υπολογισμός τάσης σχεδιασμού

Η τάση σχεδιασμού $\sigma_{w,sd}$ & $\tau_{w,sd}$ σε συγκολλήσεις τύπου butt όπως στην Εικόνα 2-2 υπολογίζεται κατά τα παρακάτω.

$$\sigma_{w,d} = \frac{F_{\sigma}}{\alpha_r \cdot I_r} \quad (2-5)$$

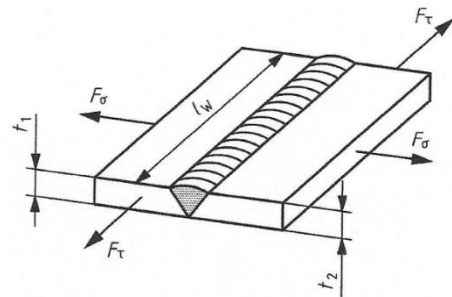
$$\tau_{w,sd} = \frac{F_{\tau}}{\alpha_r \cdot I_r} \quad (2-6)$$

όπου

F_{σ} : η κάθετη δύναμη μεταφερόμενη από τη συγκόλληση

F_{τ} : η τέμνουσα δύναμη μεταφερόμενη από τη συγκόλληση

α_r : το ενεργό πάχος της συγκόλλησης.



Εικόνα 2-2: Butt weld

Ομοίως με παραπάνω θα πρέπει να ικανοποιείται η Εξ.(2-1) αλλά στην περίπτωση παρουσίας τάσεων $\sigma_{w,d,x}$, $\sigma_{w,d,y}$ & $\tau_{w,sd}$ θα πρέπει να ικανοποιείται και η Εξ.(2-7).

$$\left(\frac{\sigma_{w,Sd,x}}{f_{w,Rd,x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{w,Sd,y}}{f_{w,Rd,y}}\right)^2 - \frac{\sigma_{w,Sd,x} \cdot \sigma_{w,Sd,y}}{f_{w,Rd,x} \cdot f_{w,Rd,y}} + \left(\frac{\tau_{w,Sd}}{f_{w,Rd}}\right)^2 \leq 1 \quad (2-7)$$

Για τη συγκόλληση της παραπάνω εικόνας το ενεργό πάχος α_r θεωρείται $\alpha_r \leq \min(t_1, t_2)$ όπου t_1 & t_2 τα πάχη των ελασμάτων, ενώ στις αμφίπλευρες συμμετρικές συγκολλήσεις πλήρους διείσδυσης το μέγεθος α_r ισούται με το διπλάσιο του πάχους της μιας συγκόλλησης.

Τέλος, πέραν του τύπου συγκόλλησης που προαναφέρθηκε παραπάνω προβλέπεται και η περίπτωση συγκόλλησης σε κόμβο τύπου T.

Έλεγχος σε κόπωση

Η διαδικασία ελέγχου έναντι κόπωσης περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 8. Συνεπώς, παραλείπεται από το συγκεκριμένο κεφάλαιο.

Έλεγχος έναντι λυγισμού

Ομοίως, ο έλεγχος έναντι του φαινομένου του λυγισμού αναλύεται στο κεφάλαιο 7.

2.5 Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 15011

Το κανονιστικό πρότυπο EN 15011:2011 αφορά το σχεδιασμό γερανών τύπου bridge & gantry. Γενικά, πρόκειται για ένα κανονιστικό κείμενο που εστιάζει στο διαφορετικό υπολογισμό ορισμένων δυναμικών συντελεστών ϕ_i αλλά και στην αναφορά των κατάλληλων προτύπων κατά τα οποία θα πρέπει να καθοριστούν διάφορα επιμέρους στοιχεία και λειτουργίες του γερανού. Αναλυτικότερα, μεταξύ άλλων αναφέρεται στην προστασία των χειριστών έναντι ηλεκτροπληξίας καθώς και στο φωτισμό του γερανού και του ευρύτερου χώρου λειτουργίας του, που ενδεικτικά θα αναφερθούν στη συνέχεια. Ο ορισμός του όρου gantry σύμφωνα με το κανονιστικό πρότυπο είναι ο ακόλουθος:

Gantry crane: γερανός δεσμευμένος ή μη, ικανός να κυλιθεί, με μια κατ' ελάχιστο οριζόντια δοκό υποστηριζόμενη από τουλάχιστον 1 υποστήριγμα με το γερανό να διαθέτει τουλάχιστον 1 ανυψωτικό σύστημα

Βάσει του παραπάνω ορισμού κρίνεται πως οι συγκεκριμένες κανονιστικές διατάξεις είναι δυνατό να εφαρμοστούν μαζί με τις γενικότερες διατάξεις που διέπουν το σχεδιασμό γερανών κατά το πρότυπο της προηγούμενης υποενότητας. Σε σχέση με τις γενικότερες διατάξεις στο συγκεκριμένο πρότυπο παρουσιάζονται κάποιες περιορισμένες διαφορές που αφορούν κυρίως τον προσδιορισμό των δυναμικών

συντελεστών ϕ_i , με την πορεία υπολογισμού και τις αντίστοιχες εξισώσεις να παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4.

Έλεγχος επάρκειας μελών

Στο πρότυπο προτείνεται να ακολουθηθεί η διαδικασία όπως αυτή ορίζεται στο EN 13001-3-1:2012 για τον έλεγχο επάρκειας των μελών αλλά και των συνδέσεων του γερανού.

Έλεγχος έναντι ανατροπής & εξασφάλιση έναντι αστάθειας στην εκτός λειτουργίας κατάσταση

Ομοίως με παραπάνω δεν προτείνεται κάτι διαφορετικό από τη νόρμα EN 13001-2:2021. Όμως, γίνεται αναφορά στο σχεδιασμό των μελών σύνδεσης του φορέα με το ακλόνητο δάπεδο στην περίπτωση που κατά τους σφοδρούς ανέμους η ροπή ανατροπής είναι μεγαλύτερη από τη ροπή ευστάθειας. Έτσι, για να διασφαλιστεί η ευστάθεια του γερανού, στη βάση των υποστυλωμάτων τοποθετούνται σύνδεσμοι ασφαλείας που ονομάζονται tie-downs, ούτως ώστε στην περίπτωση ανύψωσης ενός ή περισσότερων υποστυλωμάτων οι συγκεκριμένοι σύνδεσμοι να αποτρέψουν την ανατροπή του.

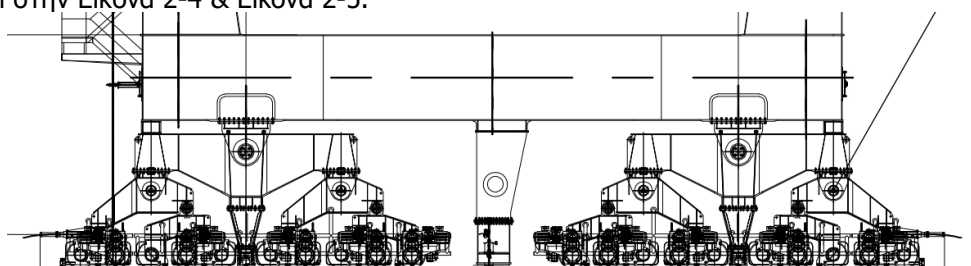


Εικόνα 2-3: Αριστερά σύνδεσμοι ασφαλείας tie-down & δεξιά κατάρρευση γερανού λόγω ανατροπής

(από Bhimani & Soderberg, 2006)

Επιπλέον εξασφάλιση κατά τη διάρκεια σφοδρών ανέμων

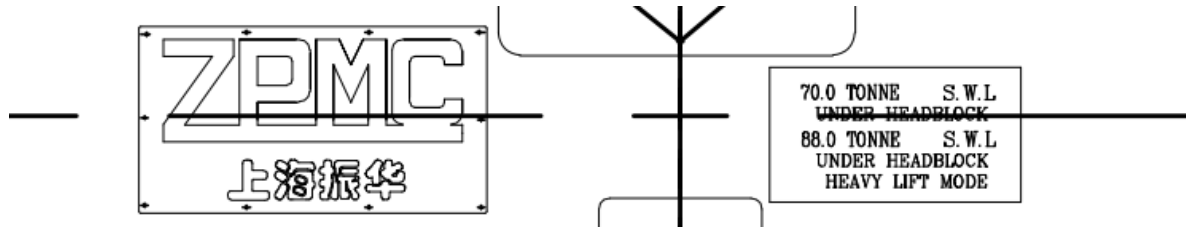
Ο κανονισμός προβλέπει πως εφόσον η τριβή και το σύστημα πέδησης του γερανού δεν επαρκεί ώστε να δύναται από μόνος του να αποτρέψει την κύλιση του, θα πρέπει να τοποθετηθούν ειδικά μέσα που να επιτελούν αυτό το έργο. Πέραν των φρένων που διαθέτει ο γερανός ώστε να αντισταθεί στην πλευρική φόρτιση που δέχεται κατά τη σφοδρή ανεμοφόρτιση, στη μέση της απόστασης των 2 μικρότερων πλευρών του γερανού τοποθετείται και από ένα μέλος ονομαζόμενο ως πείρος ασφαλείας (stowage pin). Το συγκεκριμένο μέλος προσφέρει μια επιπλέον δικλείδα ασφαλείας στην περίπτωση που ο γερανός τείνει να κυλιθεί πλευρικά στη διεύθυνση παράλληλη των ραγών. Τα συγκεκριμένα στοιχεία φαίνονται στην Εικόνα 2-4 & Εικόνα 2-5.



Εικόνα 2-4: Βάση γερανού με το stowage pin να είναι το μέλος ανάμεσα στα 2 σετ των τροχών κύλισης (σχέδιο παραχωρημένο από εταιρεία ZPMC)

Σήμανση φορτίου ασφαλούς λειτουργίας γερανών

Η τιμή του επιτρεπόμενου φορτίου ασφαλούς λειτουργίας θα πρέπει να αναγράφεται καθαρά στην κύρια δοκό του γερανού. Ένα παράδειγμα συμβολισμού ενός γερανού ανύψωσης 50 tn είναι «50 t» ή «RC 50». Στην περίπτωση που ένας γερανός έχει διαφορετικές ικανότητες ανύψωσης τότε θα πρέπει να αναγράφεται ξεκάθαρα η μέγιστη ικανότητα ανύψωσης κάθε λειτουργίας. Η Εικόνα 2-6 αποτελεί ένα πραγματικό παράδειγμα συμβολισμού της μέγιστης ικανότητας ανύψωσης ενός λιμενικού γερανού.



Εικόνα 2-6: Συμβολισμός ανυψωτικής ικανότητας γερανού εταιρείας ZPMC

(σχέδιο παραχωρημένο από εταιρεία ZPMC)

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ

3.1 Γενικά στοιχεία

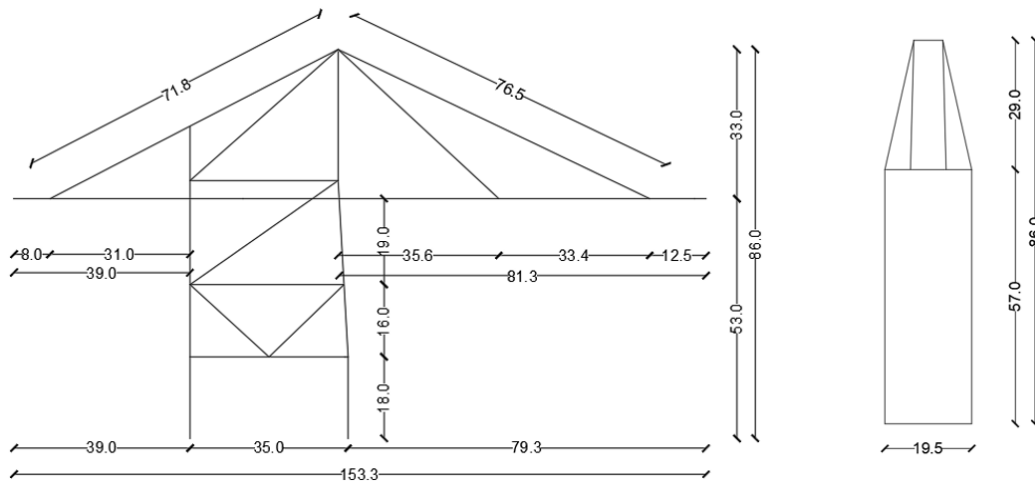
Ο υπό μελέτη λιμενικός γερανός εμπορευματοκιβωτίων είναι υψηλού τύπου (high profile). Για τις ανάγκες της μελέτης υποτέθηκε πως βρίσκεται στον εμπορικό λιμένα Πειραιώς και μπορεί να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα 2 εμπορευματοκιβώτια 1 TEU ή 2 εμπορευματοκιβώτια 2 TEU. Μπορεί να είναι πλήρως λειτουργικός με πλοία κατηγορίας έως και ULCS που είναι πλοία χωρητικότητας έως 21000 TEU με έως 23 σειρές εμπορευματοκιβωτίων. Η μέγιστη ταχύτητα ανύψωσης ισούται με 90 m/min υπό πλήρη φόρτιση ενώ στη μη φορτισμένη κατάσταση ισούται με 180 m/min. Το φορείο είναι τύπου rope trolley βάρους 30 tn, με τη μέγιστη ταχύτητα μεταφορικής κίνησής του να είναι ίση με 240 m/min διαθέτοντας κινητήρα 315 kW και 1750 rpm. Η μέγιστη ταχύτητα μεταφορικής κίνησης είναι 46 m/min με το γερανό να κυλιέται σε ράγες τύπου A 150.

Στην εκτός λειτουργίας κατάσταση το πρόσθιο τμήμα της δοκού κύλισης μπορεί να περιστραφεί μέχρι και 81° μέσα σε λιγότερο από 5 min διαθέτοντας κινητήρα ισχύος 315 kW και 875/1725 rpm. Ο γερανός θα πρέπει να βρίσκεται στην κατάσταση εκτός λειτουργίας όταν έχει ολοκληρώσει την εργασία του αλλά και όταν οι καιρικές συνθήκες, δηλαδή η ταχύτητα ανέμου βρίσκεται άνω των επιτρεπτών επιπέδων. Η παραπάνω συνθήκη εξασφαλίζεται με τη συνεχή παρακολούθηση της έντασης πνοής ανέμου με ειδικές συσκευές που βρίσκονται στην κορυφή του γερανού, δηλαδή σε υψόμετρο 86 m. Όταν η ταχύτητα τείνει να προσεγγίσει μια συγκεκριμένη προκαθορισμένη τιμή, ο γερανός θα πρέπει άμεσα να μεταβεί σε κατάσταση εκτός λειτουργίας.

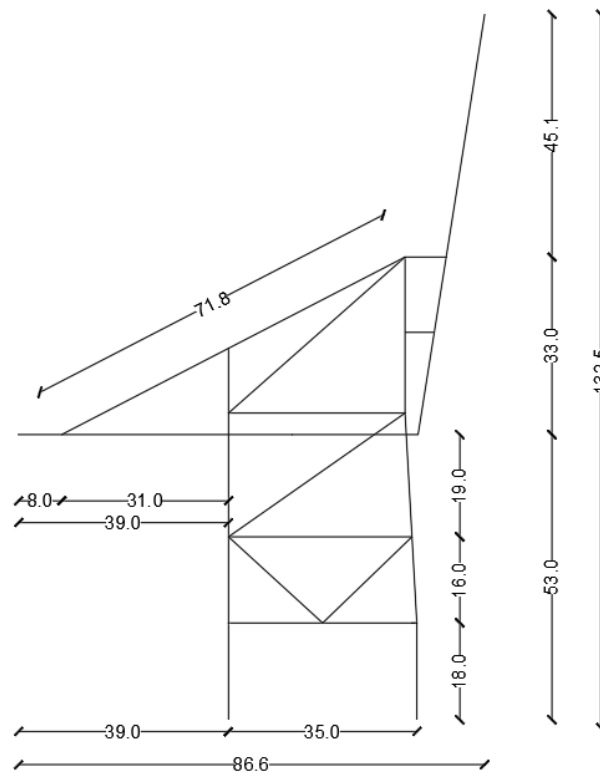
3.2 Γεωμετρία φορέα

Όπως προαναφέρθηκε, τα βασικά στοιχεία (εξωτερικές διαστάσεις και διατομές) είναι βασισμένες σε γερανό της εταιρείας ZPMC. Το φορείο μπορεί να κινηθεί στα 69 m από τα 79,3 m που είναι το συνολικό μήκος του πρόσθιου τμήματος της δοκού κύλισης. Το οπίσθιο τμήμα της δοκού κύλισης ισούται με 39 m με το φορείο να μπορεί να κινηθεί στα 23 m. Το μέγιστο δυνατό μήκος της διαδρομής του φορείου είναι 124,8 m από τα 153,3 m του συνολικού μήκους του γερανού. Το μέγιστο ύψος ανύψωσης των container ισούται με 46.5 m με το μέγιστο ύψος του γερανού στην κατάσταση λειτουργίας να είναι 86 m. Στην κατάσταση εκτός λειτουργίας και με τη δοκό κύλισης να μπορεί να ανυψωθεί σε 2 δυνατές γωνίες (55° & 81°), το μέγιστο ύψος της κατασκευής είναι ίσο με 132,5 m. Το πλάτος του γερανού είναι 19,5 m, επιτρέποντας έτσι την άνετη και απρόσκοπτη φορτοεκφόρτωση των εμπορευματοκιβωτίων.

Ακολουθεί η Εικόνα 3-1 & Εικόνα 3-2, σκαρίφημα με τις μέσες διαστάσεις του γερανού στις καταστάσεις εντός & εκτός λειτουργίας.



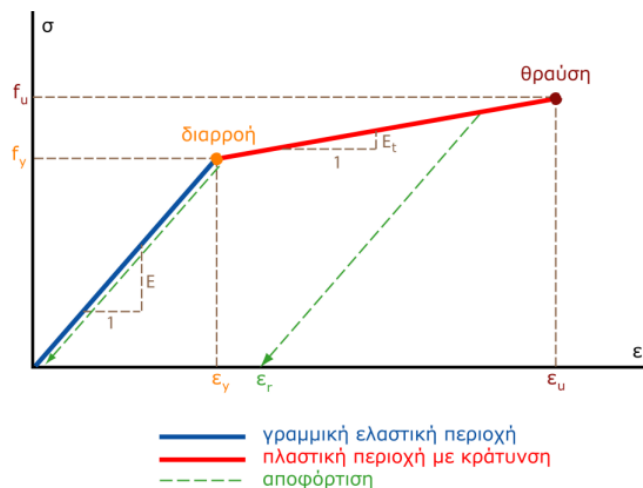
Εικόνα 3-1: Σκαρίφημα του υπό μελέτη λιμενικού γερανού σε m στην κατάσταση εντός λειτουργίας



Εικόνα 3-2: Σκαρίφημα του υπό μελέτη λιμενικού γερανού σε m στην κατάσταση εκτός λειτουργίας

3.3 Υλικό

Για τις ανάγκες της μελέτης του λιμενικού γερανού θεωρήθηκε δομικός χάλυβας S355J2+N+Z25. Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.2, σε κατασκευές που φορτίζονται δυναμικά όπως γέφυρες αλλά και γερανοί θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αυξημένη απαιτούμενη δυσθραυστότητα. Για τον παραπάνω λόγο επιλέχθηκε ο χάλυβας να είναι τύπου J2. Από τη βιβλιογραφία παρατηρήθηκε πως ο χάλυβας S355J2+N+Z25 είναι αρκετά συνηθισμένος στους μεταλλικούς γεραμούς τύπου STS. Το υλικό εισήχθη στο μοντέλο του γερανού από την εκτενή βιβλιοθήκη υλικών που διαθέτει το RFEM 6 με το χάλυβα να αντλείται από το πρότυπο EN 10025-2:2019-10. Θα πρέπει να σημειωθεί πως το υλικό εισήχθη ως γραμμικό ελαστικό αγνοώντας τον πλαστικό κλάδο στον οποίο ο χάλυβας δύναται να μεταβεί σύμφωνα με το γενικό διάγραμμα σ-ε όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3-3: Ελαστικό-γραμμικώς κρατυνόμενο διάγραμμα σ-ε (από Γαντές, 2016)

Πίνακας 3-1: Στοιχεία υλικού S355J2

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδα
Μέτρο ελαστικότητας	E	210000,0	N/mm ²
Μέτρο διάτμησης	G	80769,2	N/mm ²
Λόγος poisson	ν	0,300	--
Πυκνότητα υλικού	ρ	7850,00	kg/m ³
Ειδικό βάρος	γ	78,50	kN/m ³
Συντελεστής θερμικής διαστολής	α	0,000012	1/°C

Για την περίπτωση χρησιμοποίησης ελασμάτων μεγάλου πάχους θεωρήθηκε μείωση του ορίου διαρροής συναρτήσει της αύξησης του πάχους των ελασμάτων όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3-2: Απομείωση ορίου διαρροής και θραύσης συναρτήσει του πάχους

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή					Μονάδα
Πάχος ελάσματος	t _{max}	3,0	16,0	40,0	63,0	80,0	mm
Όριο διαρροής	f _y	355	355	345	335	325	MPa
Όριο θραύσης	f _u	510	470	470	470	470	MPa

Στο μοντέλο υπάρχουν 2 διαφορετικά υλικά του ίδιου τύπου χάλυβα S355J2+N+Z25. Αυτό συνέβη καθώς σε ορισμένα μέλη λόγω της εκδήλωσης του φαινομένου της κύρτωσης δεν είναι δυνατό να αναπτυχθεί το πλήρες όριο διαρροής f_y .

4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΡΑΣΕΩΝ

4.1 Προσδιορισμός δράσεων

Ο καθορισμός των δράσεων του φορέα έγινε κατά κύριο λόγο βάσει του προτύπου EN 13001-2:2021 που αφορά τις γενικότερες διατάξεις προσδιορισμού και υπολογισμού των δράσεων. Δευτερευόντως χρησιμοποιήθηκαν και οι διατάξεις του προτύπου EN 15011:2011.

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 13001-2:2021 οι δράσεις υποδιαιρούνται σε 3 κατηγορίες. Αναλυτικότερα, η 1^η κατηγορία ανήκει στις συχνές δράσεις (Α), δηλαδή καταστάσεις που αναμένεται να προκύψουν πολλές φορές στην ζωή του έργου π.χ. βάρος εμπορευματοκιβωτίων, περιστασιακές δράσεις που συμβαίνουν μεν αλλά όχι με την εμφάνιση των συχνών δράσεων όπως οι ανεμοφορτίσεις (Κατηγορία Β). Τέλος, στην κατηγορία C ανήκουν οι δράσεις που συμβαίνουν σπάνια στη ζωή του έργου όπως οι σφοδρές ανεμοφορτίσεις. Ακολουθούν οι δράσεις που ελήφθησαν υπόψη στη συγκεκριμένη μελέτη.

Φορτία Κατηγορίας Α:

- Ίδιο βάρος μεταλλικού γερανού
- Πρόσθετα μόνιμα φορτία
- Δυναμικά φορτία από την ανύψωση & κίνηση εμπορευματοκιβωτίων
- Φόρτιση λόγω ηθελημένης απώλειας μέρους της φόρτισης
- Φορτία από την κύλιση & επιτάχυνση/επιβράδυνση του φορείου κατά την ομαλή λειτουργία

Φορτία Κατηγορίας Β:

- Ανεμοφορτίσεις εν ώρα λειτουργίας του γερανού
- Δράσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών

Φορτία Κατηγορίας C:

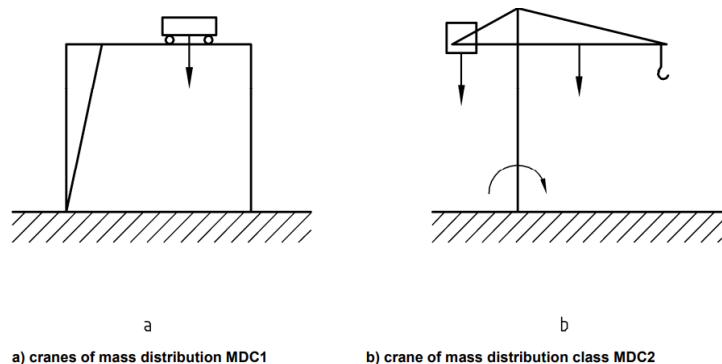
- Δράσεις από την ανύψωση φορτίων υπό σπάνιες συνθήκες
- Σφοδρές ανεμοφορτίσεις σε κατάσταση εκτός λειτουργίας
- Φορτία ελέγχου

- Φορτία προσκρουστήρων ασφαλείας
- Φορτία λόγω λοξής κίνησης του φορείου
- Δράσεις προκαλούμενες από συσκευή περιορισμού επιτρεπόμενης μάζας ανύψωσης
- Σεισμικά φορτία

4.2 Συνήθη φορτία

4.2.1 Ίδιο βάρος γερανού

Σύμφωνα με την παράγραφο 4.2.2.1 του EN 13001-2:2021 όταν ο γερανός ανυψώνει ή απελευθερώνει ένα φορτίο η κατασκευή βρίσκεται υπό διέγερση η οποία θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Αυτή λαμβάνεται υπόψη με τους δυναμικούς συντελεστές ϕ_i . Οι συντελεστές ϕ_i πολλαπλασιαζόμενοι με την αρχική τιμή της δράσης, δηλαδή του ίδιου βάρους στη συγκεκριμένη περίπτωση, τροποποιούν την τελική τιμή της δράσης είτε προσαυξητικά είτε μειωτικά. Ο συντελεστής ϕ_i που αφορά το ίδιο βάρος του γερανού εξαρτάται από το συντελεστή δ , συντελεστής που με τη σειρά του είναι εξαρτώμενος από τη μορφή του γερανού που καθορίζεται από την τάξη κατανομής της μάζας MDC (mass class distribution). Σύμφωνα με την παραπάνω ταξινόμηση ο γερανός ανήκει στην MDC2.



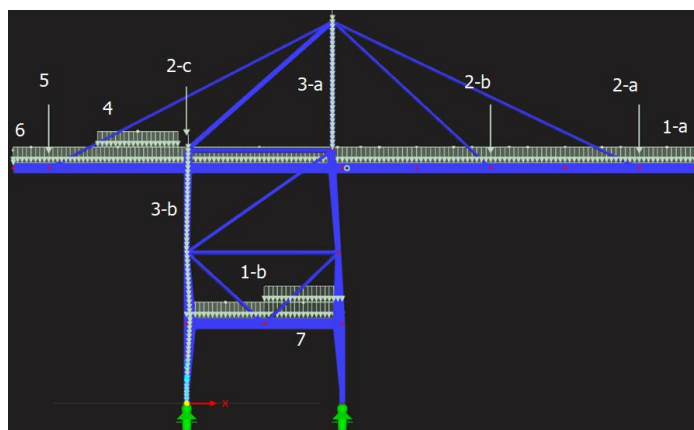
Εικόνα 4-1: : Κατηγορίες κατανομής μάζας MDC

Με γνωστή πλέον την κατηγορία MDC, σύμφωνα με τη διάταξη 5.2.1.3.1 του EN 15011:2011 η τιμή της ευμενούς επίδρασης του συντελεστή ϕ_1 ισούται με 0.90 ενώ της δυσμενούς με 1.10. Πέραν του ίδιου βάρους της μεταλλικής κατασκευής που υπολογίζεται αυτόματα από το λογισμικό RFEM 6, η κατασκευή φορτίζεται και με αρκετά πρόσθετα φορτία. Τα φορτία αυτά αφορούν το τρόλεϊ, τα μέσα μεταφοράς των Ε/Κ (spreader), το δωμάτιο ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού και τις αλυσίδες & γρανάζια κατά μήκος των δομικών μελών του γερανού. Τέλος, αφορούν τα φορτία από κιγκλιδώματα και μέσα πρόσβασης. Για τις παραπάνω τιμές πραγματοποιήθηκαν εύλογες παραδοχές, καθώς δε βρέθηκαν προτεινόμενες τιμές σε κάποιο κανονιστικό κείμενο. Στην Εικόνα 4-2 φαίνεται το άνω τμήμα ενός λιμενικού γερανού, όπου είναι ευδιάκριτο πως πέρα από το ίδιο βάρος του μεταλλικού φορέα σημαντική αναμένεται η φόρτιση των πρόσθετων μόνιμων φορτίων.



Εικόνα 4-2: Φωτογραφία άνω τμήματος γερανού τύπου STS (από <https://rsgt.com>)

Στην Εικόνα 4-3 αναφέρονται κωδικοποιημένα τα πρόσθετα μόνιμα φορτία που θεωρήθηκαν.



Εικόνα 4-3: Πρόσθετα μόνιμα φορτία

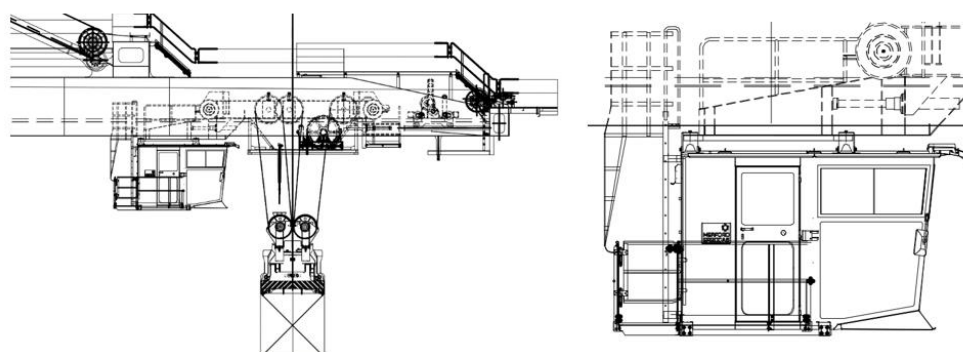
- 1-a & 1-b: Φορτίο συρματόσχοινων και προστατευτικών κιγκλιδωμάτων κατά μήκος των δομικών στοιχείων. Στο πρόσθιο τμήμα της δοκού κύλισης (outreach) τέθηκε $1,5 \text{ kN/m}$, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα όπως και στο 1-b τέθηκε φορτίο ίσο με $2,5 \text{ kN/m}$.
- 2-a, 2-b & 2-c: Φορτίο τροχαλιών συρματόσχοινων για δυνατότητα ανύψωσης της δοκού κύλισης. Θεωρήθηκε συγκεντρωμένο φορτίο ίσο με $2,0 \text{ kN}$.
- 3-a, 3-b: Σκάλες πρόσβασης προσωπικού. Φορτίο $1,0 \text{ kN/m}$
- 4: Δωμάτιο Η/Μ εξοπλισμού (machinery room). Θεωρήθηκε συνολικό φορτίο οφειλόμενο στο ίδιο βάρος του μεταλλικού σκελετού και στο βάρος των μηχανολογικών εξαρτημάτων (κινητήρες κ.λπ.) ίσο με $7,5 \text{ kN/m}^2$. Στο συγκεκριμένο δωμάτιο βρίσκονται όλες οι ηλεκτρικές και μηχανολογικές εγκαταστάσεις όπως οι κινητήρες, που δίνουν την ανυψωτική ικανότητα στο γερανό όσο και εκείνοι που του προσδίδουν την ικανότητα της κίνησης του φορείου στη δοκό κύλισης, αλλά και αυτοί που του επιτρέπουν να κινείται παράλληλα στο μήκος των πλοίων. Το συνολικό αυτό φορτίο ασκείται ως γραμμικά κατανεμημένο στις 2 δοκούς με τιμή $63,75 \text{ kN/m}$.
- 5: Ισοδύναμο βάρος από μεταλλική κατασκευή αναρτώμενη στο πίσω τμήμα της δοκού κύλισης. Τέθηκαν $65,0 \text{ kN}$ στις 2 δοκούς κύλισης.
- 6: Φορτίο κάθετο στο μήκος των δοκών κύλισης λόγω τροχαλιών και αρκετών λοιπών μηχανολογικών εξαρτημάτων που συγκεντρώνονται στην περιοχή αυτή. Τιμή φορτίου: $10,0 \text{ kN/m}$.
- 7: Συσκευή τύπου «ρόδα» μέσα στην οποία τυλίγεται το καλώδιο ηλεκτροδότησης του γερανού. Θεωρήθηκε συγκεντρωμένο φορτίο ίσο με $4,0 \text{ kN}$.

4.2.2 Φορτία λόγω ανύψωσης εμπορευματοκιβωτίων

Ομοίως με το φορτίο του ίδιου βάρους, το φορτίο που προκαλείται από την ανύψωση των εμπορευματοκιβωτίων έχει και αυτό δυναμικό χαρακτήρα, που εκφράζεται μέσω του συντελεστή φ_2 ως το γινόμενο του βάρους που ανυψώνεται μάζας m_H με τον παραπάνω συντελεστή σύμφωνα με τις παραγράφους 4.2.2.2 του EN 13001-2:2021 και 5.2.1.3.2 του EN 15011:2011. Στη συγκεκριμένη μελέτη η μάζα m_H προκύπτει ως το άθροισμα της μάζας των εμπορευματοκιβωτίων & του spreader (Πίνακας 4-1). Προαναφέρθηκε πως ο υπό μελέτη γερανός μπορεί να εξυπηρετήσει ταυτόχρονα είτε 2 εμπορευματοκιβώτια 20 ft , λειτουργία που πραγματοποιείται με 1 αρπάγη (spreader), είτε 2 εμπορευματοκιβώτια μεγάλου μεγέθους 40 ft με 2 ξεχωριστά spreaders (tandem). Εξετάστηκε η τύπου tandem ανύψωση 2 μεγάλων κιβωτίων μάζας 35 tn το κάθε container. Η μάζα του τρόλεϊ ισούται με 35 tn συνυπολογισμένου του φορτίου από το δωμάτιο χειριστή (cabin).

Πίνακας 4-1: Φορτία ανύψωσης και μάζα φορείου

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες	Παρατηρήσεις
Μέγιστο φορτίο που φέρει ο γερανός για 2 εμπορευματοκιβώτια	$m_{2εμπορ.}$	70	tn	Μέγιστο βάρος 2 εμπορευματοκιβωτίων 40' (tandem)
Μάζα μέσου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (spreader)	$m_{spreader}$	13,2	tn	Για την tandem λειτουργία υπάρχουν 2 spreader
Μάζα φορείου μεταφοράς (trolley)	$m_{trolley}$	35	tn	Rope trolley
Απόσταση αξόνων φορείου	d	6	m	-
Δύναμη σε κάθε τροχό λόγω μάζας υπό ανύψωση	$W_{hoist, wheel}$	236,4	kN	2 εμπορευματοκιβώτια & 2 μέσα μεταφοράς



Εικόνα 4-4: αριστερά trolley, δωμάτιο χειριστή & μέσο και δεξιά δωμάτιο χειριστή υπό εστίαση (σχέδια παραχωρημένα από ZPMC)

Ο δυναμικός συντελεστής λόγω του δυναμικού χαρακτήρα της ανύψωσης των εμπορευματοκιβωτίων προκύπτει από την ακόλουθη σχέση.

$$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 * v_h = 1,05 + 0,17s/m * 0,75m/s = 1,18 \quad (4-1)$$

όπου

β_2 : ο συντελεστής εξαρτώμενος από την κατηγορία δυσκαμψίας του γερανού

v_h : η χαρακτηριστική ταχύτητα ανύψωσης

$\varphi_{2,min}$: η ελάχιστη τιμή του συντελεστή φ_2 .

Η τιμή του συντελεστή $\varphi_{2,min}$ εξαρτάται από την κατηγορία ανύψωσης κίνησης HD και από την κατηγορία HC μέσω της οποίας εκφράζεται η κατηγορία δυσκαμψίας του γερανού. Θεωρήθηκε πως το μέσο μεταφοράς (spreader) συνδέεται με το φορείο με 4 συρματόσχοινα και ως κατηγορία ανύψωσης κίνησης επιλέχθηκε η HD4. Η κατηγορία δυσκαμψίας επιλέχθηκε κατόπιν υπολογισμού του θεωρητικού συντελεστή $\varphi_{2,t}$ ακολουθώντας την πορεία που προτείνεται στην παράγραφο 5.2.1.3.2.2 του προτύπου EN 15011:2011 που περιλαμβάνει άντληση στοιχείων και από το πρότυπο EN 12385-4:2002 που αφορά τα χαρακτηριστικά των συρματόσχοινων του φορείου.

Η χαρακτηριστική τιμή της παραμέτρου $\varphi_{2,t}$ προκύπτει από την απλοποιημένη Εξ.(4-2)

$$\varphi_{2,t} = 1 + \frac{2,8 * v_{h,max}}{0,45 + \sqrt{\left(\frac{R_r * I_r}{1500 * Z_d}\right)}} = 1 + \frac{2,8 * 1,5}{0,45 + \sqrt{\frac{1960 * 55}{1500 * 1,32}}} = 1,15 \quad (4-2)$$

όπου

$v_{h,max}$: η μέγιστη σταθερή ταχύτητα ανύψωσης

R_r : η κατηγορία συρματόσχοινου σύμφωνα με EN 12385-4:2002

L_r : το μήκος συρματοσχοινίων

Z_a : ο λόγος μέγιστης δύναμης αντοχής προς μέγιστη δύναμη ανύψωσης.

Ο παρακάτω Πίνακας 4-2 καθορίζει την κατηγορία δυσκαμψίας του γερανού αφού είναι γνωστή πλέον η τιμή ϕ_{2t} .

Πίνακας 4-2: Συσχετισμός κατηγορίας δυσκαμψίας & παραμέτρου ϕ_{2t}

Condition	Hoisting class
$\phi_{2t} \leq 1,07 + 0,24v_{h,max}$	HC1
$1,07 + 0,24v_{h,max} < \phi_{2t} \leq 1,12 + 0,41v_{h,max}$	HC2
$1,12 + 0,41v_{h,max} < \phi_{2t} \leq 1,17 + 0,58v_{h,max}$	HC3
$1,17 + 0,58v_{h,max} < \phi_{2t}$	HC4

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα ο υπό μελέτη λιμενικός γερανός ανήκει στην κατηγορία HC1. Με γνωστή πλέον την κατηγορία ανύψωσης HD4 και την κατηγορία δυσκαμψίας HC1 ο παρακάτω Πίνακας 4-3 προσδιορίζει την τιμή του συντελεστή $\phi_{2,min} = 1,05$.

Πίνακας 4-3: Πίνακας προσδιορισμού συντελεστή $\phi_{2,min}$

Stiffness class	Hoist drive class				
	HD1	HD2	HD3	HD4	HD5
HC1	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
HC2	1.1	1.1	1.05	1.1	1.05
HC3	1.15	1.15	1.05	1.15	1.05
HC4	1.2	1.2	1.05	1.2	1.05

Ακολουθεί πινακοποιημένη η πορεία υπολογισμού του συντελεστή φ_2 .

Πίνακας 4-4: Πορεία υπολογισμού συντελεστών 4.2.2

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες	Παρατηρήσεις
Μέγιστη ταχύτητα ανύψωσης	$v_{h,max}$	1,5	m/s	Μέγιστη ταχύτητα ανύψωσης υπό πλήρη φόρτιση φορτίου του μοντέλου της ZPMC
Κατηγορία συρματόσχοινου	R_r	1960	-	EN 12385-4:2002
Μέγιστο φορτίο που φέρει ο γερανός για 2 εμπορευματοκιβώτια	$m_{2εμπορ.}$	70	tn	Μέγιστο βάρος 2 εμπορευματοκιβωτίων 40' (tandem)
Μάζα μέσου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (spreader)	$m_{spreader}$	13,2	tn	-
Μήκος συρματόσχοινου	l_r	55	m	Μάζα 2 εμπορευματοκιβωτίων 20' και φορείο
Φορτίο ανύψωσης	$W_{hoist,max}$	945,7	kN	-
Πλήθος συρματόσχοινων στο φορείο	n	4	-	4 συρματόσχοινα ανά φορείο
Φορτίο σε κάθε συρματόσχοινο	$N_{hoist,max}$	236,4	kN	-
Ελάχιστη δύναμη θράυσης	$N_{br,min}$	313	kN	EN 12385-4:2002
Συντελεστής συρματόσχοινου	Z_a	1,32	-	Οριακή δύναμη θράυσης/μέγιστο φορτίο ανύψωσης
Θεωρητικός συντελεστής	$\varphi_{2,t}$	1,15	-	HC1
Κατηγορία κίνησης ανύψωσης	HD	HD4	-	-
Χαρακτηριστική ταχύτητα ανύψωσης για συνδυασμούς A & B	$v_{h,A\&B}$	0,75	m/s	Πίνακας 3 EN 13001-2:2021
Χαρακτηριστική ταχύτητα ανύψωσης για συνδυασμούς C	$v_{h,C}$	1,5	m/s	
Συντελεστής	β_2	0,17	s/m	HC1
Συντελεστής	$\varphi_{2,min}$	1,05	-	Πίνακας 4 EN 13001-2:2021
Δυναμικός συντελεστής	$\varphi_{2,A\&B}$	1,18	-	Για συνδυασμούς A & B

Συνεπώς, για τη λειτουργία του γερανού υπό κανονικές συνθήκες η χαρακτηριστική τιμή της δύναμης της ανυψωμένης μάζας ισούται με $F_{mH} = \varphi_2 * m_H * g = 1,18 * 96,4 \text{ tn} * 9,81 \text{ m/s}^2 = 1115,9 \text{ kN}$, η οποία συνολική δύναμη υποδιαιρέθηκε σε 2*2 ίσα μεταξύ τους συγκεντρωμένα φορτία με απόσταση 6 m όπου είναι και η απόσταση των 2 αξόνων του φορείου.

4.2.3 Απότομη ηθελημένη απώλεια μέρους της φόρτισης

Η απότομη ηθελημένη απώλεια μέρους της φόρτισης λαμβάνεται υπόψη πολλαπλασιάζοντας το συνολικό φορτίο ανύψωσης με το δυναμικό συντελεστή ϕ_3 ο οποίος προκύπτει από την παράγραφο 4.2.2.3 του EN 13001-2:2021 όπως φαίνεται παρακάτω.

$$\phi_3 = 1 - \frac{\Delta m_H}{m_H} * (1 + \beta_3) = 1 - \frac{35 \text{ tn}}{70 \text{ tn}} * (1 + 0,5) = 0,46$$

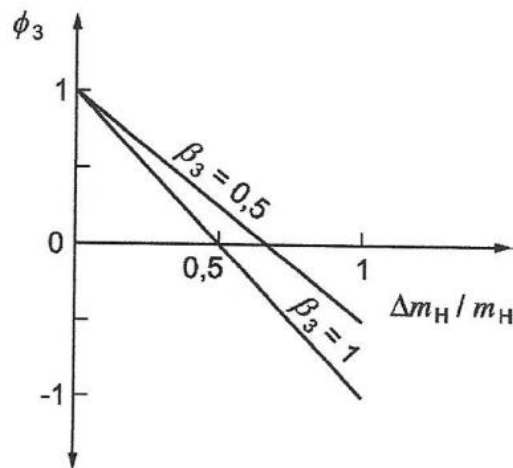
όπου

Δm_H : η μάζα που απελευθερώνεται, υποτέθηκε απελευθέρωση 1 container 40 ft, δηλαδή 35 tn

m_H : η συνολική μάζα υπό ανύψωση $2 * 35 \text{ tn} = 70 \text{ tn}$

β_3 : ο συντελεστής εξαρτώμενος από τον τρόπο ελευθέρωσης του φορτίου, ο γερανός διαθέτει μηχανισμό αργής απελευθέρωσης (άγκιστρα), οπότε ο συντελεστής είναι ίσος με 0,5.

Εναλλακτικά, ο συντελεστής ϕ_3 μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά σύμφωνα με το σχήμα που φαίνεται στην Εικόνα 4-5.



Εικόνα 4-5: Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή ϕ_3

4.2.4 Φορτία από την κύλιση & επιτάχυνση του φορείου σε ομαλή λειτουργία

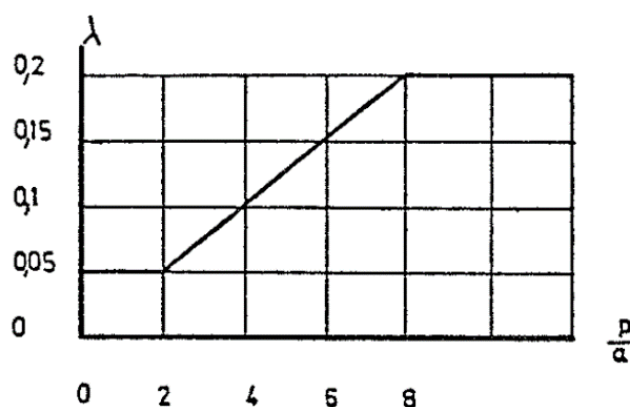
Κατά την κύλιση του φορείου στις δοκούς κύλισης συχνά το φορείο επιταχύνει και επιβραδύνει κατά μήκος αυτών. Αυτή η μεταβολή της ταχύτητας προκαλεί οριζόντια φόρτιση στις δοκούς κύλισης. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.1, το φορείο μπορεί να αναπτύξει υψηλές σχετικά ταχύτητες (έως και 240 m/min, δηλαδή 4 m/s). Έτσι, οι δυνάμεις τριβής από την αυξομείωση της παραπάνω ταχύτητας αναμένονται σημαντικές.

Η τιμή της επιτάχυνσης υπολογίστηκε βάσει της παραγράφου 2.2.3.3. του F.E.M. 1000.1. 1998.10.01. Αναλυτικότερα, με βάση τη μέγιστη ταχύτητα που δύναται να αναπτύξει το φορείο, τη λειτουργία του και την κατηγορία ταχύτητας (στήλης) επιλέγεται η κατάλληλη τιμή της επιτάχυνσης. Για το φορείο επιλέχθηκε η μεσαία στήλη, άρα $a=0,50 \text{ m/s}^2$.

Speed to be reached m/s	low and moderate speed with long travel		moderate and high speed (normal applications)		high speed with high accelerations	
	Acceleration time s	Acceleration m/s^2	Acceleration time s	Acceleration m/s^2	Acceleration time s	Acceleration m/s^2
4,00			8,0	0,50	6,0	0,67
3,15			7,1	0,44	5,4	0,58
2,5			6,3	0,39	4,8	0,52
2	9,1	0,22	5,6	0,35	4,2	0,47
1,60	8,3	0,19	5,0	0,32	3,7	0,43
1,00	6,6	0,15	4,0	0,25	3,0	0,33
0,63	5,2	0,12	3,2	0,19		
0,40	4,1	0,098	2,5	0,16		
0,25	3,2	0,078				
0,16	2,5	0,064				

Εικόνα 4-6: Επιλογή τιμής επιτάχυνσης

Η δύναμη τριβής λόγω της κύλισης του φορείου υπολογίστηκε ως το γινόμενο της κατακόρυφης συνολικής δύναμης που ασκείται στις ράγες επί τον συντελεστή λ . Ο συντελεστής λ προκύπτει από το σχήμα της παραγράφου 2.2.3.3 του F.E.M. 1000.1 1998.10.01 (Εικόνα 4-7) συναρτήσει του λόγου p/a , λόγος που προκύπτει από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ροδών κύλισης. Επειδή τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ροδών κύλισης δεν είναι γνωστά, υπέρ της ασφαλείας επιλέχθηκε τιμή του λόγου ίση με 8 άρα $\lambda=0,2$.



Εικόνα 4-7: Υπολογισμός συντελεστή τριβής λ

Η δύναμη που ασκείται παράλληλα στο μήκος των δοκών κύλισης λόγω της επιτάχυνσης υπολογίστηκε σύμφωνα με την παράγραφο 5.2.1.3.1 του EN 15011:2011. Στον πίνακα που ακολουθεί αποτυπώνονται τα αποτελέσματα του συνόλου των υπολογισμών της οριζόντιας δύναμης τριβής από την κύλιση και την επιτάχυνση/επιβράδυνση του φορείου. Η φόρτιση ασκήθηκε στο μοντέλο με 4 συγκεντρωμένα φορτία.

Πίνακας 4-5: Φορτία από κύλιση & επιτάχυνση επιβράδυνση του φορείου

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες	Παρατηρήσεις
Βάρος φορείου μεταφοράς (trolley)	m_{trolley}	35	tn	Rope trolley
Συντελεστής κίνησης	φ_p	1,0	-	$P_0 \& P_1$
Δυναμικός συντελεστής	φ_5	1,6	-	-
Τιμή επιτάχυνσης/επιβράδυνσης	a	0,5	m/s ²	FEM 1000.1 Table T2.2.3.1.1
Μάζα εμπορευματοκιβωτίων, μέσου μεταφοράς & φορείου	m	131,8	tn	-
Συνολική δύναμη λόγω επιτάχυνσης/επιβράδυνσης	F_{acc}	105,4	kN	-
Δύναμη λόγω επιτάχυνσης/επιβράδυνσης σε κάθε τροχό	$F_{\text{acc},i}$	26,4	kN	-
Δύναμη λόγω επιτάχυνσης/επιβράδυνσης στις δοκούς κύλισης	F_{acc}	52,7	kN	Φορείο θεωρούμενο ως σημειακό στις δοκούς κύλισης
Λόγος	p/a	8,0	-	FEM 1000.1
Συντελεστής	λ	0,2	-	
Οριζόντια δύναμη τριβής σε κάθε τροχό λόγω κύλισης φορείου	$F_{\text{frict},\text{wheel}}$	64,6	kN	-
Οριζόντια δύναμη τριβής στις δοκούς κύλισης φορείου	F_{frict}	129,3	kN	-
Οριζόντια δύναμη σε κάθε τροχό λόγω κύλισης φορείου	$F_{\text{frict},\text{tot},\text{wheel}}$	91,0	kN	-
Οριζόντια δύναμη στις δοκούς κύλισης φορείου	$F_{\text{frict},\text{tot}}$	182,0	kN	Φορείο θεωρούμενο ως σημειακό στις δοκούς κύλισης

4.3 Περιστασιακά φορτία

4.3.1 Ανεμοφορτίσεις σε ώρα λειτουργίας του γερανού

Ο κανονισμός διακρίνει τις ανεμοφορτίσεις σε εντός λειτουργίας (in-service) και εκτός λειτουργίας (out-of-service). Για φορτία ανέμου σύμφωνα με την παράγραφο 4.2.3.1 του EN 13001-2:2021 θεωρείται πνοή ανέμου σταθερής καθ' ύψος ταχύτητας \bar{v} . Η κάθετη δύναμη στο διαμήκη άξονα κάθε μέλους οφειλόμενη στην ανεμοφόρτιση της εντός λειτουργίας κατάσταση υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση.

$$F = q(3) \cdot c_a \cdot A \quad (4-3)$$

όπου

c_a : ο αεροδυναμικός συντελεστής του κάθε μέλους υπολογιζόμενος είτε από το παράρτημα A είτε πειραματικά

A: το εμβαδό στην προσήνεμη πλευρά του υπό μελέτη μέλους

$q(3)$: η πίεση ανέμου ταχύτητας $v(3)$.

Ο Πίνακας 4-6 εκφράζει την ταχύτητα της ριπής ανέμου διάρκειας 3 sec που προκύπτει ως το 150% της μέσης ταχύτητας 10-λέπτου ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας.

Πίνακας 4-6: Χαρακτηριστικές ταχύτητες ανέμου

Designation	Wind State		Design wind pressures at different Wind effect levels [N/m ²]		
	Characteristic wind speeds \bar{v} [m/s]	$v(3)$ [m/s]	W1 $q(3)$	W2 $e_s \cdot q(3)$	W3 $e_{st} \cdot q(3)$
Light	9,4	14	125	88	46
Normal	13,3	20	250	175	92
Heavy	18,9	28	500	350	185

Σε περίπτωση που ο διαμήκης άξονας ενός μέλους δεν είναι κάθετος με την ταχύτητα πνοής του ανέμου τότε θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη απομειωμένη ταχύτητα ανέμου ίση με το γινόμενο της ταχύτητας \bar{v} με το ημίτονο της γωνίας a_w , γωνία που σχηματίζει ο διαμήκης άξονας με τη διεύθυνση της πνοής του ανέμου. Επιλέχθηκε η ταχύτητα ανέμου κατηγορίας έντονης (heavy), με ταχύτητα $v(3)$ ίση με 28 m/s. Αξίζει να σημειωθεί πως η μέση ταχύτητα ανέμου αντιστοιχεί σε περίπου 8 Beaufort ενώ η $v(3)$ ισοδυναμεί με 10 Beaufort. Στην περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου μετρούμενη με ειδικές συσκευές τείνει να προσεγγίσει την τιμή $v(3)$ ο γερανός θα πρέπει άμεσα να τεθεί εκτός λειτουργίας και να μεταβεί στην εκτός λειτουργίας κατάσταση (out-of-service state).

Η πίεση προκαλούμενη από άνεμο ταχύτητας $v(3)$ προκύπτει από την Εξ.(4-4).

$$q(3) = 0,5 \cdot \rho \cdot v(3)^2 = 0,5 \cdot 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(1,5 \cdot 18,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 502,3 \text{ N/m}^2 \quad (4-4)$$

όπου

ρ : η πυκνότητα του ανέμου 1,25 kg/m³

$v(3)$: η ταχύτητα ριπής ανέμου διάρκειας 3 sec.

Ο αεροδυναμικός συντελεστής c_a υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξ.(4-5)


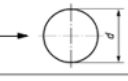


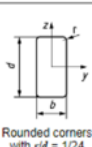
$$c_a = c_o \cdot \psi \quad (4-5)$$

όπου

c_o : ο αεροδυναμικός συντελεστής μελών απείρου μήκους

ψ : ο απομειωτικός συντελεστής του c_o , εξαρτώμενος από την αεροδυναμική λυγηρότητα των μελών.

Ο αεροδυναμικός συντελεστής καθορίζεται από τους πίνακες αεροδυναμικών συντελεστών, μέρος των οποίων φαίνεται στην Εικόνα 4-8.

No.	Shape and position of the member			Characteristic area A	c_o	No.	Shape and position of the member			Characteristic area A	c_o
	Member	Section ratio	Wind direction β				Member	Aerodynamic slenderness ratio	Wind direction β		
1		$1 \leq b/d \leq 1,4$	0°	$d \cdot l$	1,2	1		$l/d \leq \infty$	Perpendicular to axis of member	$d \cdot l$	$c_o = 1,20$ more accurately c_o is according to Figure A.3
2		$1 \leq b/d \leq 1,4$	0°	$d \cdot l$	2	2	Pipes, rods	$l/d > 100$	Perpendicular to axis of member	$d \cdot l$	$Re \leq 2 \times 10^5$ $c_o = 1,20$
3		$b/d = 0,5$	0°	$d \cdot l$	2,2						$4 \times 10^5 \leq Re \leq 10^6$ $c_o = 0,70$
		$b/d = 1$	0°	$d \cdot l$	2,0						$Re > 10^6$
		$b/d = 2$	0°	$d \cdot l$	1,5						$2 \times 10^5 \leq Re \leq 4 \times 10^5$ c_o is according to Figure A.3
		$b/d = 3$	0°	$d \cdot l$	1,3						
4		$b/d = 4$	0°	$d \cdot l$	1,0	3	Ropes	$l/d > 100$	Perpendicular to axis of member	$d \cdot l$	$Re \leq 2 \times 10^5$ $c_o = 1,20$
		$b/d = 0,5$	0°	$d \cdot l$	2,1						$4 \times 10^5 \leq Re \leq 10^6$ $c_o = 0,90$
		$b/d = 1,0$	0°	$d \cdot l$	1,5						$Re > 10^6$
		$b/d = 2,0$	0°	$d \cdot l$	1,1						$2 \times 10^5 \leq Re \leq 4 \times 10^5$ c_o is according to

Εικόνα 4-8: Πίνακες αεροδυναμικών συντελεστών c_o

Το αεροδυναμικό μήκος του μέλους υπολογίζεται από την Εξ.(4-6)

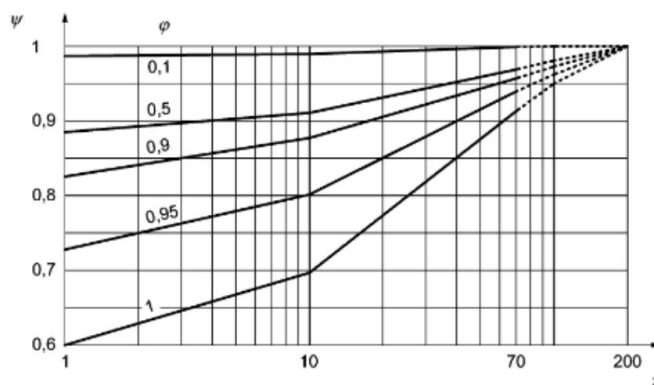
$$l_a = a_r \cdot l_o \quad (4-6)$$

όπου

l_o : το πραγματικό μήκος των μελών

a_r : ο σχετικός συντελεστής αεροδυναμικού μήκους εξαρτώμενος από τη θέση των μελών και των γειτονικών εμποδίων (Πίνακας A.1 EN 13001-2:2021).

Ο υπολογισμός της αεροδυναμικής λυγηρότητας προκύπτει ως το ηλίκο του αεροδυναμικού συντελεστή l_a με την προσήνεμη διάσταση της διατομής d .



Εικόνα 4-9: Διάγραμμα συντελεστή ψ & αεροδ. λυγηρότητας λ

Εξετάστηκαν 2 διαφορετικά σενάρια φόρτισης στην εντός λειτουργίας κατάσταση, άνεμος κατά τη διεύθυνση x & y . Το σύνολο του φορέα χωρίστηκε σε ομάδες και η ανεμοφόρτιση κάθε μέλους ασκήθηκε ως γραμμικώς κατανομημένη στο διαμήκη άξονα κάθε μέλους. Ο παρακάτω πίνακας περιλαμβάνει τους αναλυτικούς υπολογισμούς για άνεμο κατά τη διεύθυνση y στους κάτω συνδέσμους δυσκαμψίας.

Πίνακας 4-7: Ανεμοφόρτιση κατά y κάτω διαγωνίων συνδέσμων δυσκαμψίας

Ομάδα κάτω χιαστί συνδέσμων δυσκαμψίας			
Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Μήκος μέλους	l_o	23,71	m
Συντελεστής σχετικού αεροδυναμικού μήκους	a_r	0,9	-
Αεροδυναμικό μήκος μελών	l_a	21,3	m
Εξωτερική διάσταση κατά y	b	1,0	m
Χαρακτηριστική διάσταση κατά z	d	1,0	m
Χαρακτηριστική επιφάνεια	A	23,71	m ²
Κατεύθυνση ανέμου	β	0	°
Αεροδυναμικός συντελεστής	c_0	2	-
Λυγηρότητα	λ	21,3	-
Απομειωτικός συντελεστής	ψ	0,86	-
Τελικός αεροδυναμικός συντελεστής	c_a	1,72	-
Δύναμη λόγω ανεμοφόρτισης	F	20,5	kN
Κατανομημένη δύναμη λόγω ανεμοφόρτισης	F	0,86	kN/m

Όπως υπολογίστηκε παραπάνω, η συνολική δύναμη στους κάτω συνδέσμους δυσκαμψίας οφειλόμενη στον άνεμο διεύθυνσης γ ισούται με 20,5 kN, δύναμη που ισοκατανέμεται στο μήκος του μέλους με ένα κατανεμημένο φορτίο μέτρου 0,86 kN/m. Όσον αφορά τις δοκούς κύλισης, κατά τη φόρτιση με άνεμο διεύθυνσης γ οι δοκοί μπορεί να μην έχουν την αρκετά μεγάλη κεντροβαρική μεταξύ τους απόσταση των 8 m, αλλά λόγω των μεγάλων διαστάσεων των διατομών τους υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο δοκών. Συγκεκριμένα, από το διάγραμμα A.9 του παραρτήματος Α του EN 13001-2:2021 προκύπτει πως για καθαρή απόσταση των δύο δοκών κύλισης $a=6,8$ m, $d=2,1$ m & $\phi=1$ ο συντελεστής θωράκισης η προκύπτει ίσος με 0,33 (Πίνακας 4-8). Η αυξημένη επιφάνεια που θα υπολογιστεί η ανεμοφόρτιση η οποία όμως θα αφορά και τις 2 δοκούς υπολογίζεται βάσει του πίνακα A-6 του ίδιου παραρτήματος.

Πίνακας 4-8: Ανεμοφόρτιση πρόσθιου τμήματος δοκών κύλισης

Ομάδα δοκών κύλισης φορείου			
Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Μήκος μέλους	l_0	79,3	m
Συντελεστής σχετικού αεροδυναμικού μήκους	a_r	0,7	-
Αεροδυναμικό μήκος μελών	l_a	55,51	m
Εξωτερική διάσταση κατά γ	b	1,2	m
Εξωτερική διάσταση κατά z	d	2,1	m
Λόγος διαστάσεων	b/d	0,57	-
Κεντροβαρική απόσταση δοκών κύλισης	a	6,8	m
Πλήθος παράλληλων και ταυτόσημων μελών	n_m	2	-
Λόγος	a/d	3,2	-
Συντελεστής θωράκισης	η	0,33	-
Χαρακτηριστική επιφάνεια	A_1	168,1	m ²
Προσαυξημένη επιφάνεια	A	223,6	m ²
Αεροδυναμικός συντελεστής	c_0	2,13	-
Λυγηρότητα	λ	26,2	-
Απομειωτικός συντελεστής	ψ	0,80	-
Τελικός αεροδυναμικός συντελεστής	c_a	1,70	-
Δύναμη λόγω ανεμοφόρτισης	F	191,4	kN
Κατανεμημένη δύναμη λόγω ανεμοφόρτισης	F	2,41	kN/m

Στις διατάξεις του EN 13001-2:2021 δε γίνεται κάποια αναφορά στον υπολογισμό των ανεμοπιέσεων σε μη δομικά στοιχεία. Αυτό πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι σε πολλούς γερανούς είναι σπάνια η ύπαρξη μη δομικών στοιχείων μεγάλης επιφάνειας. Όμως, στους γερανούς τύπου STS κάτι τέτοιο συναντάται, επειδή τα τοιχώματα του δωματίου του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (machinery room) καταλαμβάνουν αρκετά μεγάλη επιφάνεια ώστε να μη μπορεί να αγνοηθεί η επιρροή τους στην απόκριση του φορέα υπό φορτία ανέμου. Έτσι, αφού το ύψος του γερανού είναι μικρότερο από 200 m, τα φορτία ανέμου κατά τις διευθύνσεις x & y υπολογίστηκαν βάσει του κανονιστικού κειμένου EN 1991-1-4:2006, με τη διαφοροποίηση πως ως βασική ταχύτητα $v_{b,0}$ θεωρήθηκε η ταχύτητα $v(3)$ και όχι η ταχύτητα που προτείνεται από το συγκεκριμένο μέρος του Ευρωκώδικα 1.

Πίεση του ανέμου w

Η πίεση του ανέμου που δρα κάθετα στις επιφάνειες δίνεται ως εξής:

$$w = q_p(z) \cdot c_p \quad (4-7)$$

όπου

$q_p(z)$: η πίεση ταχύτητας αιχμής στο ύψος z

z : το ύψος αναφοράς

c_p : ο συντελεστής εξωτερικής w_e και εσωτερικής w_i πίεσης.

Για την κατηγορία εδάφους ως παραθαλάσσια περιοχή θεωρήθηκε η Κατηγορία 0 με τις τιμές z_0 & z_{min} να είναι ίσες με 0,3 m και 5 m αντίστοιχα.

Πίεση ταχύτητας αιχμής q_p

Η πίεση ταχύτητας αιχμής υπολογίζεται ως εξής:

$$q_p = (1 + 7 \cdot I_v(z)) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = (1 + 7 \cdot 0,102) \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(\frac{43,5 \text{ m}}{\text{s}} \right)^2 = 2,02 \text{ kN/m}^2 \quad (4-8)$$

όπου

$I_v(z)$: η ένταση του στροβιλισμού

ρ : η πυκνότητα του ανέμου $1,25 \text{ kg/m}^3$

v_m : η μέση ταχύτητα ανέμου σε ύψος z πάνω από το έδαφος.

Ένταση στροβιλισμού $I_v(z)$

Η ένταση στροβιλισμού υπολογίστηκε από την Εξ.(4-9)

$$I_v(z) = \frac{k_1}{c_0 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1}{1 \cdot \ln\left(\frac{55,5 \text{ m}}{0,003 \text{ m}}\right)} = 0,102 \quad \text{για } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (4-9)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{για } z \leq z_{min}$$

όπου

z_{min} : το ύψος όπως αυτό προκύπτει από τον πίνακα της κατηγορίας εδάφους

k_1 : ο συντελεστής στροβιλισμού (ελήφθη ίσος με 1)

c_0 : ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης (ελήφθη ίσος με 1).

Η μέση ταχύτητα του ανέμου προέκυψε ως το γινόμενο της βασικής ταχύτητας ανέμου με τους συντελεστές τραχύτητας $c_r(z)$ και τοπογραφικής διαμόρφωσης $c_0(z)$.

Συντελεστής τραχύτητας $c_r(z)$

Ο συντελεστής τραχύτητας υπολογίστηκε σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,16 \cdot \ln\left(\frac{55 \text{ m}}{0,003 \text{ m}}\right) = 1,53 \quad (4-10)$$

όπου

k_r : ο συντελεστής εδάφους Εξ.(4-11)

z : το ύψος αναφοράς

z_0 : το ύψος όπως αυτό προκύπτει από την επιλεγθείσα κατηγορία εδάφους.

Συντελεστής εδάφους k_r

$$k_r = 0,19 * \left(\frac{z}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 * \left(\frac{55 \text{ m}}{0,02 \text{ m}} \right)^{0,07} = 0,16 \quad (4-11)$$

όπου

z : το ύψος αναφοράς

z_0 : το ύψος όπως αυτό προκύπτει από την κατηγορία εδάφους II.

Για το κάθε σενάριο φόρτισης κατά x & y ασκήθηκαν ανεμοπιέσεις τόσο στα τοιχώματα του δωματίου του Η/Μ εξοπλισμού όσο και στις οριζόντιες επιφάνειες.

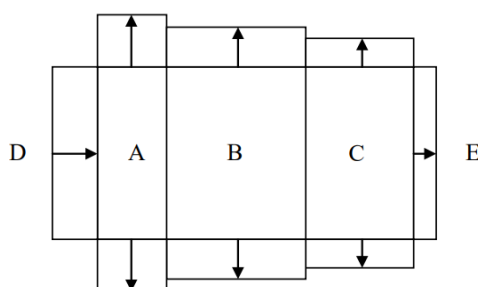
Πίεση στους κατακόρυφους τοίχους για άνεμο κατά x

Η παρακάτω ενέργεια πραγματοποιήθηκε και για τα 2 σενάρια ανεμοφόρτισης. Ενδεικτικά, παρατίθεται ο υπολογισμός των δυνάμεων λόγω ανέμου διεύθυνσης στα τοιχώματα του δωματίου Η/Μ εξοπλισμού.

Το μήκος e υπολογίζεται ως εξής:

$$e = \min(b, 2 * h) = \min(18 \text{ m}, 2 * 2,5 \text{ m}) = 5 \text{ m} \quad (4-12)$$

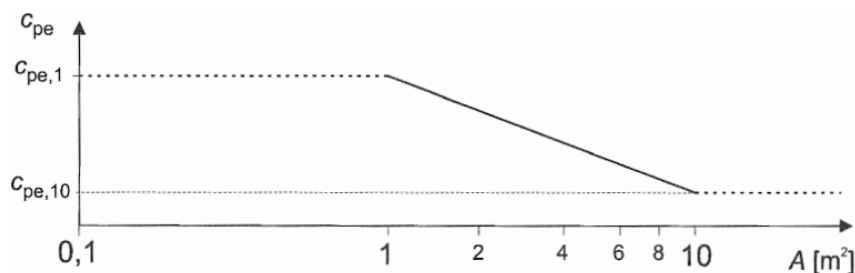
Πίνακας 4-9: Χαρακτηριστικά ζωνών



Εικόνα 4-10: Διαχωρισμός ζωνών για $e < d$

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Μήκος ζώνης A κατά x	l_A	1	m
Μήκος ζώνης B κατά x	l_B	4	m
Μήκος ζώνης C κατά x	l_C	12	m
Λόγος ύψους προς μήκος	h/L_x	0,14	-
Εμβαδό επιφάνειας A	E_A	2,5	m^2
Εμβαδό επιφάνειας B	E_B	10	m^2
Εμβαδό επιφάνειας C	E_C	30	m^2
Εμβαδό επιφάνειας D	E_D	45	m^2
Εμβαδό επιφάνειας E	E_E	45	m^2

Βάσει του εμβαδού των επιφανειών του παραπάνω πίνακα υπολογίστηκαν οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα. Σε επιφάνειες με εμβαδό μεταξύ 1 m^2 και 10 m^2 εκτελέστηκε γραμμική παρεμβολή. Ο συντελεστής εσωτερικής πίεσης θεωρήθηκε ίσος με 0.



Εικόνα 4-11: Διάγραμμα συντελεστών εξ. πίεσεων

Πίνακας 4-10: Συντελεστές εξ. πιέσεων

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή
Συντελεστής εξωτερικής πίεσης ζώνης A (1 m ²)	$C_{pe,1,A}$	-1,2
Συντελεστής εξωτερικής πίεσης ζώνης A (1 m ²)	$C_{pe,10,A}$	-1,4
Συντελεστής εξωτερικής πίεσης ζώνης A	$C_{pe,A}$	-1,28
Συντελεστής εξωτερικής πίεσης ζώνης B	$C_{pe,B}$	-0,8
Συντελεστής εξωτερικής πίεσης ζώνης C	$C_{pe,C}$	-0,5
Συντελεστής εξωτερικής πίεσης ζώνης D	$C_{pe,D}$	0,7
Συντελεστής εξωτερικής πίεσης ζώνης E	$C_{pe,E}$	-0,3

Πίνακας 4-11: Εξωτερικές πιέσεις τοιχωμάτων

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Εξωτερική πίεση ζώνης A	$W_{e,A}$	-2,59	kN/m ²
Εξωτερική πίεση ζώνης B	$W_{e,B}$	-1,62	kN/m ²
Εξωτερική πίεση ζώνης C	$W_{e,C}$	-1,01	kN/m ²
Εξωτερική πίεση ζώνης D	$W_{e,D}$	1,42	kN/m ²
Εξωτερική πίεση ζώνης E	$W_{e,E}$	-0,61	kN/m ²

Η συνολική δύναμη κατά τη διεύθυνση x (κατά μήκος των δοκών κύλισης) είναι ίση με 90.99 kN και ασκήθηκε ομοιόμορφα γραμμικά με φορτίο 2,53 kN/m σε κάθε δοκό. Όμοια διαδικασία ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό των ανεμοπιέσεων των οριζώντιων επιφανειών του δωματίου Η/Μ εξοπλισμού.

4.3.2 Δράσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών

Στις γενικότερες διατάξεις του EN 13001-2:2021 δεν προβλέπεται υποχρεωτική θεώρηση θερμοκρασιακών μεταβολών για όλα τα είδη γερανών χωρίς όμως να διευκρινίζονται τα είδη για τα οποία κάτι τέτοιο δεν απαιτείται. Στις ειδικότερες διατάξεις του EN 15011:2011 δε γίνεται επίσης κάποια αναφορά. Σύμφωνα με τον κανονισμό F.E.M. 1000.1 1998.10.01 στην παράγραφο 2.2.4.3 εξετάζεται το εύρος θερμοκρασιών από -20 °C έως +45 °C. Με βάση την παραπάνω σύσταση και θεωρώντας θερμοκρασία ολοκλήρωσης του έργου 15 °C θεωρήθηκε χαρακτηριστική τιμή μέγιστης διαστολικής θερμοκρασίας ίση με $\Delta T_{Nexp}=30$ °C και συστολικής $\Delta T_{N,con}=-35$ °C.

4.4 Σπάνια φορτία

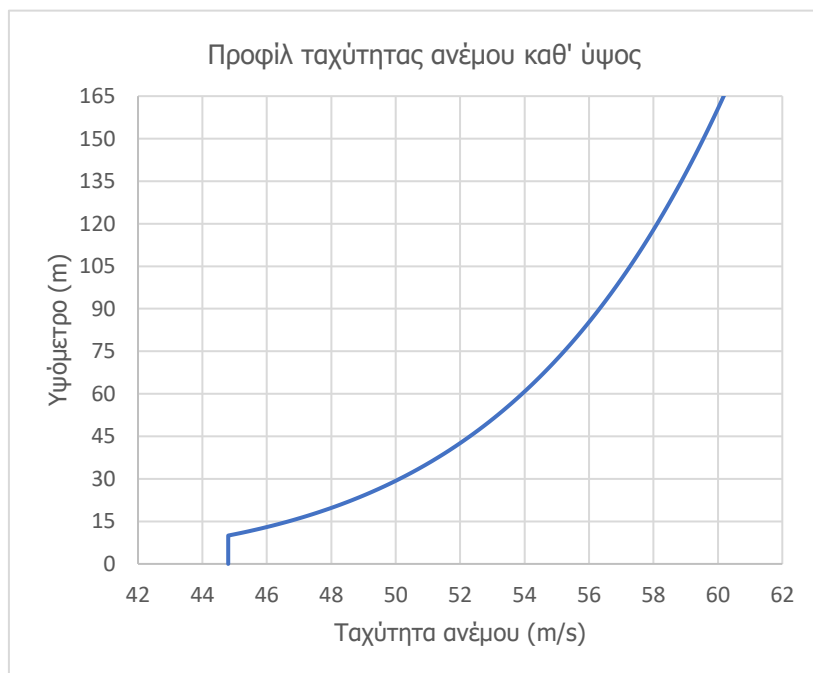
4.4.1 Δράσεις από την ανύψωση των φορτίων υπό σπάνιες συνθήκες

Για τον υπολογισμό των φορτίων από την ανύψωση των εμπορευματοκιβωτίων υπό δυσμενείς συνθήκες ακολουθήθηκε παρόμοια διαδικασία με τον υπολογισμό υπό κανονικές συνθήκες όπως στην υποενότητα 4.2.2. Στην ανύψωση υπό σπάνιες συνθήκες η ταχύτητα ανύψωσης ισούται με τη μέγιστη δυνατή, ήτοι 1.5 m/s. Έτσι, μεταβάλλεται μόνο ο όρος v_h της Εξ.(4-1) όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση.

$$\varphi_{2,c} = \varphi_{2,\min} + \beta_2 * v_{h,\max} = 1,05 + \frac{0,17s}{m} * 1,50 \text{ m/s} = 1,31 \quad (4-13)$$

4.4.2 Σφοδρές ανεμοφορτίσεις

Οι σφοδρές ανεμοφορτίσεις ανήκουν στην κατηγορία των σπάνιων φορτίσεων (exceptional loads). Ο υπολογισμός τους γίνεται για ταχύτητα ανέμου σημαντικά αυξημένη της ταχύτητας των ανεμοπιέσεων εντός λειτουργίας όπως αυτή υπολογίστηκε στην υποενότητα 4.3.1. Μια βασική διαφορά των 2 περιπτώσεων ανέμου είναι πως η ταχύτητα στην κατάσταση θύελλας σε αντίθεση με την εντός λειτουργίας κατάσταση δε θεωρείται σταθερή αλλά μεταβαλλόμενη καθ' ύψος. Στην Εικόνα 4-12 φαίνεται η σημαντική μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου όπως αυτή προκύπτει από την Εξ.(4-16).



Εικόνα 4-12: Προφίλ ταχύτητας ανέμου συναρτήσει του υψόμετρου

Η κάθετη συνολική δύναμη από σφοδρή ανεμοφόρτιση F υπολογίζεται με βάση την Εξ.(4-14).

$$F=q(z)*c_a*A \quad (4-14)$$

όπου

c_a : ο αεροδυναμικός συντελεστής κάθε μέλους όπως αυτοί προκύπτουν για κάθε μέλος σύμφωνα με την Εξ.(4-5)

A : το εμβαδό της προσήνεμης επιφάνειας κάθε μέλους

$q(z)$: η ισοδύναμη πίεση σφοδρού ανέμου όπως αυτή προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση

$$q(z)=0,5*\rho*v(z)^2 \quad (4-15)$$

όπου

ρ : η πυκνότητα του αέρα ($1,25 \text{ kg/m}^3$)

$v(z)$: η ισοδύναμη ταχύτητα ανεμοφόρτισης εκτός λειτουργίας

Η ισοδύναμη ταχύτητα ανεμοφόρτισης εκτός λειτουργίας υπολογίζεται από την Εξ.(4-16)

$$v(z)=f_{rec}*\left(\frac{v_m(z)}{v_{ref}}+\phi_8*\frac{v_g}{v_{ref}}\right)*v_{ref}\approx f_{rec}*\left(\left(\frac{z}{10}\right)^{0,14}+0,4\right)*v_{ref} \quad (4-16)$$

όπου

f_{rec} : ο συντελεστής εξαρτώμενος από την περίοδο επαναφοράς, θεωρήθηκε περίοδος επαναφοράς 50 ετών ($R=50$) με $f_{rec}=1$

$v_m(z)$: η μέση ταχύτητα ανέμου 10 λεπτών σε ύψος z

ϕ_8 : ο συντελεστής ριπής ανέμου ίσος με 1,10

v_{ref} : η ταχύτητα αναφοράς ανέμου εξαρτώμενη από τη γεωγραφική θέση του γερανού, με περίοδο επαναφοράς 50 έτη, σε υψόμετρο 10 m διάρκειας 10 min

Το ηηλικό $v_m(z)/v_{ref}$ ισούται με $(z/10)^{0,14}$, όπου z το υψόμετρο σε m με $0 \text{ m} \leq z \leq 300 \text{ m}$

Για υψόμετρα μικρότερα των 10 m και μεγαλύτερα των 300 m θα πρέπει $v=v(10)$ & $v=v(300)$ αντίστοιχα.

v_g : ταχύτητα ανέμου για ριπή 3 sec

$$v_g=v_{ref}*2*\sqrt{6*K}=32\frac{\text{m}}{\text{s}}*2*\sqrt{6*0,005}=11,09 \text{ m/s}$$

όπου

K : ο συντελεστής εδάφους ίσος με 0,005.

Η ταχύτητα v_{ref} καθορίζεται από το χάρτη στην Εικόνα 4-13.



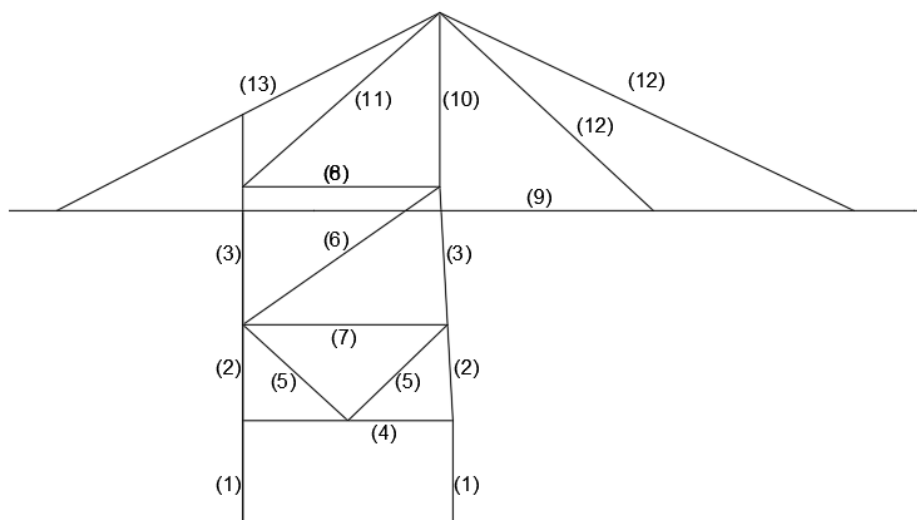
Εικόνα 4-13: Γεωγραφικός χάρτης ζωνών

Ο εμπορικός λιμένας Πειραιά βρίσκεται στη ζώνη D και σύμφωνα με τον Πίνακα 4-12 η ταχύτητα αναφοράς ισούται με 32 m/s.

Πίνακας 4-12: Ταχύτητες αναφοράς ζωνών

Region	A/B	C	D	E
v_{ref} [m/s]	24	28	32	36

Όμοια με τον υπολογισμό των ανεμοπιέσεων της in-service κατάστασης εξετάστηκαν 2 σενάρια ανεμοπιέσεων κατά τη διεύθυνση x & y. Επίσης, χωρίστηκε ο φορέας σε επιμέρους τμήματα όπως στην Εικόνα 4-14 όπου φαίνεται ο διαχωρισμός των μελών του φορέα σε υποκατηγορίες για την περίπτωση ανέμου διεύθυνσης y. Τέλος, υπολογίστηκαν σε υπολογιστικό φύλλο οι συνολικές πιέσεις όπου ασκήθηκαν στα ραβδωτά μέλη ως τραπεζοειδείς φορτίσεις κατά μήκος του διαμήκου άξονα κάθε μέλους.



Εικόνα 4-14: Διαχωρισμός φορέα σε ομάδες μελών

Στους παρακάτω πίνακες ακολουθεί ο αναλυτικός υπολογισμός των ανεμοπιέσεων για 2 ομάδες μελών.

Πίνακας 4-13: Ανεμοπιέσεις ομάδας (5) από Εικόνα 4-14

Ομάδα κάτω συνδέσμων δυσκαμψίας			
Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Μήκος μέλους	l_0	23,71	m
Τελικός αεροδυναμικός συντελεστής	c_a	1,72	-
Χαρακτηριστική επιφάνεια	A	23,71	m ²
Υψόμετρο κάτω άκρου μέλους	z_j	18,0	m
Υψόμετρο ελέγχου κάτω άκρου μέλους	$z_{j,check}$	18,0	m
Ταχύτητα πνοής κάτω άκρου j	$v(j)$	46,9	m/s
Πίεση για ταχύτητα ανέμου $v(j)$	$q(z_j)$	1,38	kN/m ²
Δύναμη για ταχύτητα $v(j)$	F(j)	56,2	kN
Κατανεμημένη δύναμη για ταχύτητα $v(j)$	F(j)	2,37	kN/m
Υψόμετρο άνω άκρου μέλους k	z_k	34	m
Υψόμετρο ελέγχου άνω άκρου μέλους	$z_{k,check}$	34	m
Ταχύτητα πνοής άνω άκρου k	$v(k)$	50,2	m/s
Πίεση για ταχύτητα ανέμου $v(k)$	$q(z_k)$	1,57	kN/m ²
Δύναμη για ταχύτητα $v(k)$	F(k)	64,2	kN
Κατανεμημένη δύναμη για ταχύτητα $v(k)$	F(k)	2,71	kN/m

Πίνακας 4-14: Ανεμοπιέσεις ομάδας (7) κατά Εικόνα 4-14

Ομάδα κάτω οριζοντίων συνδέσμων			
Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Μήκος μέλους	l_0	34,1	m
Τελικός αεροδυναμικός συντελεστής	c_a	1,64	-
Χαρακτηριστική επιφάνεια	A	34,10	m ²
Υψόμετρο κάτω άκρου μέλους	z_j	34	m
Υψόμετρο ελέγχου κάτω άκρου μέλους	$z_{j,check}$	34	m
Ταχύτητα πνοής κάτω άκρου j	$v(j)$	50,2	m/s
Πίεση για ταχύτητα ανέμου $v(j)$	$q(z_j)$	1,6	kN/m ²
Δύναμη για ταχύτητα $v(j)$	F(j)	88,0	kN
Κατανεμημένη δύναμη για ταχύτητα $v(j)$	F(j)	2,58	kN/m
Υψόμετρο άνω άκρου μέλους k	z_k	34	m
Υψόμετρο ελέγχου άνω άκρου μέλους	$z_{k,check}$	34	m
Ταχύτητα πνοής άνω άκρου k	$v(k)$	50,2	m/s
Πίεση για ταχύτητα ανέμου $v(k)$	$q(z_k)$	1,6	kN/m ²
Δύναμη για ταχύτητα $v(k)$	F(k)	88,0	kN
Κατανεμημένη δύναμη για ταχύτητα $v(k)$	F(k)	2,58	kN/m

4.4.3 Φορτία ελέγχου

Τα φορτία ελέγχου διακρίνονται σε στατικά και δυναμικά. Χάριν πληρότητας περιγράφεται η μεθοδολογία ελέγχου των στατικών και δυναμικών φορτίσεων βάσει των προδιαγραφών ΤΗΡΑ-STS-Technical Specifications. Οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τις διατάξεις του EN 13001-2:2021 & EN 15011:2011.

Στατικές φορτίσεις

Με τη στατική δοκιμαστική φόρτιση ελέγχεται η φέρουσα ικανότητα των δομικών μελών του γερανού. Ο έλεγχος θεωρείται επιτυχής εφόσον δεν παρουσιαστούν ρωγμές, μόνιμες παραμορφώσεις καθώς και χαλάρωση ή φθορές στους κόμβους. Αμέσως πριν τον έλεγχο θα πρέπει το φορείο να έχει κινηθεί σε όλο το μήκος της διαδρομής αρκετές φορές με ταχύτητα ίση με το 75% της μέγιστης δυνατής. Η κίνηση θα πρέπει να πραγματοποιείται με το 70% της φέρουσας ικανότητας του μέσου μεταφοράς (spreader). Αφού το φορτίο αφαιρεθεί, το φορείο κινείται σε 3 προκαθορισμένες θέσεις κατά μήκος των δοκών κύλισης οι οποίες είναι:

- η άκρη της δοκού κύλισης
- η μέση της δοκού κύλισης μετρούμενη από τη ράγα κύλισης στη βάση του γερανού που βρίσκεται πιο κοντά στη θάλασσα (seaside rail)
- η άκρη του οπίσθιου τμήματος της δοκού κύλισης (backreach).

Το φορείο τοποθετείται στα 3 προαναφερθέντα σημεία με τη φόρτιση σε αυτά να αυξάνεται βαθμιαία από $0,75 \cdot P$ σε $1,25 \cdot P$ όπου P η μέγιστη δυνατή ανυψωτική φόρτιση του φορείου. Το φορτίο ανυψώνεται σε ύψος 100 έως 200 mm για 10 min.

Το μέγιστο κατακόρυφο βέλος δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 200 mm. Ο έλεγχος πρέπει να πραγματοποιείται και στη μονάδα παραγωγής του γερανού (εφόσον πωλείται συναρμολογημένος) αλλά και στον τερματικό σταθμό του τελικού αποδέκτη.

Κατά το πρότυπο EN 15011:2011 ο στατικός έλεγχος θα πρέπει να πραγματοποιείται με τη θεώρηση του μέγιστου φορτίου που προκύπτει από τη θεώρηση τιμής αυξητικού συντελεστή τουλάχιστον 125% της ικανότητάς του ή από το φορτίο, όπως αυτό προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του βάρους των 2 μεγάλων εμπορευματοκιβωτίων συν το βάρος των φορτίων με το δυναμικό συντελεστή ϕ_2 της υποενότητας 4.2.2.

Κατά τον παραπάνω έλεγχο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και ανεμοφόρτιση απομειωμένης ταχύτητας $0.4 \cdot v(3)$, όπου $v(3)$ η ταχύτητα ανέμου που υπολογίστηκε αναλυτικά στην υποενότητα 4.3.1.

Πίνακας 4-15: Στατικός έλεγχος

Στατικός έλεγχος				
Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες	Παρατηρήσεις
Αθροιστική μάζα εμπορευματοκιβωτίων κατά ΖΡΜC	$m_{\text{container}2 \cdot 40'}$	70	tn	2 εμπορευματοκιβώτια 40' (tandem)
Μάζα μέσων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (spreader)	m_{spreader}	26,4	tn	Συσκευή μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων
Προσαυξητικός συντελεστής στατικού ελέγχου	κ	1,3	-	130% μέγιστης συνολικής ανυψωτικής ικανότητας
Ελάχιστο επιτρεπόμενο φορτίο	$F_{\text{test,stat}}$	1229,4	kN	-
Δυναμικός συντελεστής	ϕ_6	1	-	$\phi_6=1$

Έλεγχος σωστής συναρμολόγησης μελών

Κατά την εγκατάσταση των λιμενικών γερανών Ε/Κ στους εμπορικούς λιμένες θα πρέπει να διενεργούνται τοπογραφικές μετρήσεις με σκοπό την επιβεβαίωση της σωστής τοποθέτησης των μελών του γερανού συγκριτικά με τις ράγες κύλισης στη βάση του. Ομοίως με παραπάνω, ο έλεγχος θα πρέπει να πραγματοποιείται και στη μονάδα παραγωγής του γερανού (εφόσον πωλείται συναρμολογημένος) αλλά και στον τερματικό σταθμό του τελικού αποδέκτη.

Δυναμικές φορτίσεις

Με το δυναμικό έλεγχο πιστοποιείται η σωστή λειτουργία του γερανού όπως και η σωστή εκτέλεση κάθε κίνησης. Ο δυναμικός έλεγχος του γερανού θεωρείται επιτυχής εφόσον μετά το πέρας του ελέγχου δεν εμφανίζονται μόνιμες παραμορφώσεις, μη αναμενόμενες αποκρίσεις των μέσων ασφαλείας και η ύπαρξη χαλαρώσεων και φθορών στους κόμβους.

Η καθεμία από τις παραπάνω κινήσεις εξετάζεται ξεχωριστά. Αναλυτικότερα, η ανύψωση εξετάζεται για φορτίο κατά 10% προσαυξημένο του μέγιστου επιτρεπτού στα 3 σημεία ελέγχου που καθορίστηκαν στις στατικές φορτίσεις. Το φορτίο ανυψώνεται και καθυψώνεται αδιάκοπα 3 φορές, με τα σχετικά δεδομένα να καταγράφονται. Έπειτα, ελέγχεται η ικανότητα κύλισης του φορείου κατά μήκος των δοκών κύλισης καθώς και το σύνολο όλων των δυνατών κινήσεων που ο γερανός είναι ικανός να πραγματοποιήσει.

Επίσης, ελέγχεται η ταυτόχρονη ανύψωση και μεταφορά του φορείου υπό το μέγιστο φορτίο P. Ο δυναμικός έλεγχος θα πρέπει να πραγματοποιηθεί ασκώντας έκκεντρα τα φορτία των εμπορευματοκιβωτίων, με το κέντρο βάρους μετατοπισμένο κατά 1,2 m κατά τη διαμήκη διάστασή του & 0,2 m κατά την εγκάρσια έννοια. Αναγκαία είναι η πραγματοποίηση ελέγχου ανύψωσης και καθύψωσης του πρόσθιου τμήματος της δοκού κύλισης, η χρονομέτρηση του κύκλου εργασίας του γερανού και τέλος ο έλεγχος των μέσων πέδησης του γερανού (brake performance test) που πραγματοποιείται στον χώρο λειτουργίας του γερανού.

Κατά το πρότυπο EN 15011:2011 ο δυναμικός έλεγχος πραγματοποιείται με προσαυξητικό συντελεστή 1,10 του μέγιστου φορτίου του γερανού με $\phi_6 = \phi_2$ και θεωρώντας την ίδια απομειωμένη ταχύτητα ανέμου με το στατικό έλεγχο.

Πίνακας 4-16: Στοιχεία δυναμικού ελέγχου

Δυναμικός έλεγχος				
Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες	Παρατηρήσεις
Αθροιστική μάζα εμπορευματοκιβωτίων κατά ZPMC	$m_{\text{container}2*40'}$	70	tn	2 εμπορευματοκιβώτια 40' (tandem)
Μάζα μέσου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (spreader) & φορείου	m_{spreader}	26,4	tn	Συσκευή μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων
Προσαυξητικός συντελεστής δυναμικού ελέγχου	κ	1,2	-	-
Ελάχιστο επιτρεπόμενο φορτίο	$F_{\text{test,dyn}}$	1134,8	kN	120% μέγιστης συνολικής ανυψωτικής ικανότητας
Δυναμικός συντελεστής	ϕ_6	1,18	-	$\phi_6 = \phi_2$, ϕ_2 για το συνδυασμό A.1

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί πως προδιαγράφονται περισσότεροι από τους προαναφερθέντες ελέγχους που άπτονται όμως κυρίως μηχανολογικών θεμάτων. Η αναφορά τους παραλείπεται χωρίς κάτι τέτοιο να σημαίνει πως δε θα πρέπει να πραγματοποιηθούν ή ότι οι έλεγχοι που δεν αναφέρονται είναι ελάχιστος σημασίας από τους αναφερόμενους.

4.4.4 Φορτία προσκρουστήρων ασφαλείας

Οι προσκρουστήρες είναι μέσα ασφαλείας που τοποθετούνται στα άκρα των δοκών κύλισης με σκοπό την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας σε περίπτωση πρόσκρουσης. Έτσι, διασφαλίζεται η επάρκεια των δομικών στοιχείων του γερανού, η αποτροπή της πτώσης των κυλιόμενων μαζών καθώς και η αποφυγή μιας επικίνδυνης ταλάντευσης της υπό μεταφορά μάζας.

Για τον υπολογισμό του δυναμικού συντελεστή φορτίων λόγω προσκρουστήρων φ_7 , θα πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η παράμετρος ξ , παράμετρος που εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των προσκρουστήρων και υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$\varphi_7 = 1,25 \quad \text{για } 0 \leq \xi \leq 0,50 \quad (4-17)$$

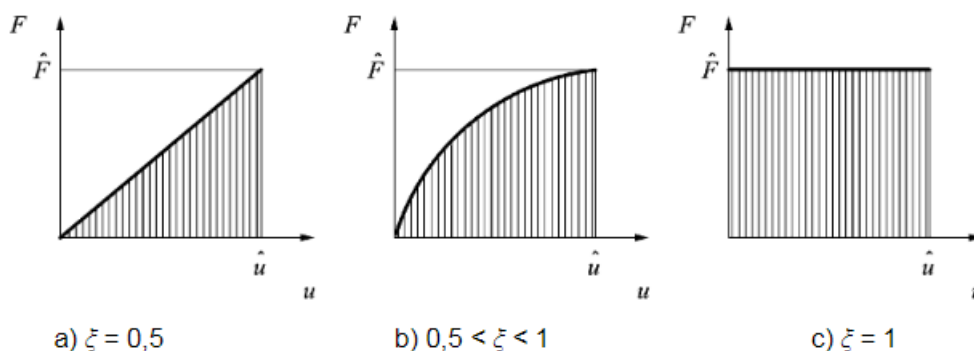
$$\varphi_7 = 1,25 + 0,7 * (\xi - 0,5) \quad \text{για } 0,50 \leq \xi \leq 1$$

όπου

$\xi = 0,50$ για προσκρουστήρες γραμμικών ελατηρίων

$\xi = 1,0$ για υδραυλικούς προσκρουστήρες.

Στην Εικόνα 4-15 φαίνεται το διάγραμμα δυνάμεων-μετακινήσεων για 3 διαφορετικές τιμές του συντελεστή ξ .



Εικόνα 4-15: Διαγράμματα δυνάμεων-μετακινήσεων για διάφορες τιμές παραμέτρου ξ

Επιλέχθηκαν προσκρουστήρες γραμμικών ελατηρίων οπότε σύμφωνα με την Εξ.(4-17), $\varphi_7 = 1,25$.

Οι προσκρουστήρες θα πρέπει να σχεδιάζονται για πρόσκρουση ενός μέσου με την ονομαστική ταχύτητα που δύναται να αναπτύξει κάθε μέσο πολλαπλασιασμένη με ένα μειωτικό συντελεστή τιμής από 0,7 έως 1,0. Αν υπάρχουν μέσα επιβράδυνσης της ταχύτητας του μέσου, είναι επιτρεπτό να θεωρηθεί συντελεστής χαμηλότερος ακόμη και από 0,7.

Ο υπολογισμός του συνολικού φορτίου από την πρόσκρουση του φορείου στα προστατευτικά μέσα υπολογίστηκε βάσει της ακόλουθης εξίσωσης.

$$H_B = \varphi_7 * v_1 * \sqrt{m_c * S_B} = 1,25 * 0,7 * 4 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \sqrt{131400 \text{ kg} * 650000 \frac{\text{N}}{\text{m}}} = 818,3 \text{ kN} \quad (4-18)$$

όπου

φ_7 : ο δυναμικός συντελεστής Εξ.(4-17)

v_1 : το 70% της ταχύτητας του φορείου, ισούται με 2,8 m/s

m_c : η συνολική μάζα φορείου και μάζας υπό ανύψωση, ισούται με 131400 kg

S_B : η σταθερά ελατηρίου, τέθηκε ίση με 650000 N/m.

Άρα, η δύναμη σε κάθε προσκρουστήρα ισούται με $\frac{1}{2} * 818,3 \text{ kN} = 409,1 \text{ kN}$.

4.4.5 Φορτία λοξότητας

Τα φορτία λοξότητας εμφανίζονται κατά την κύλιση του φορείου και προκαλούνται από τις αντιδράσεις στα μέσα οδήγησης αναγκάζοντας τους τροχούς του φορείου να αποκλίνουν από διεύθυνση στην οποία θα έπρεπε να κυλιόνταν αν ήταν ανεμπόδιοι. Τα φορτία αυτά συνήθως ανήκουν στις περιστασιακές φορτίσεις (κατηγορία Β). Πραγματοποιήθηκε η υπόθεση πως ο γερανός διαθέτει ειδικά μέσα αποτροπής εμφάνισης δυνάμεων λοξότητας (anti-skew devices) οπότε τα φορτία λοξότητας μπορούν να θεωρηθούν ως σπάνιες φορτίσεις (Κατηγορία C). Ο υπολογισμός των δυνάμεων λοξότητας πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο RIGID που προτείνεται στην παράγραφο D2 του παραρτήματος D του προτύπου EN 15011:2011. Ο Πίνακας 4-17 αναφέρει τα αποτελέσματα της μεθόδου RIGID.

Πίνακας 4-17: Αποτελέσματα μεθόδου RIGID

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Συνολική γωνία λοξότητας	α	0,0150	rad
Απομειωμένη συνολική γωνία λοξότητας σχεδιασμού	α_{red}	0,0113	rad
Συντελεστής προσκολλησεως	μ_0	0,3	-
Βάση φυσικού λογαρίθμου (αριθμός e)	e	2,718	-
Συντελεστής ολίσθησης	σ	0,0113	-
Συντελεστής ολίσθησης τριβής	μ_f	0,28	-
Συνολική δύναμη από εμπορευματοκιβώτια και φορείο	$W_{cont\&spread}$	1293,0	kN
Δύναμη σε κάθε ρόδα κύλισης φορείου	Z_j	323,2	kN
Συντελεστής	W	0	-
Πλευρική δύναμη στο σημείο επαφής της ρόδας 1	Y_1	91,1	kN
Πλευρική δύναμη στο σημείο επαφής της ρόδας 2	Y_2	0,0	kN
Πλευρική δύναμη στο σημείο επαφής της ρόδας 3	Y_3	0,0	kN
Πλευρική δύναμη στο σημείο επαφής της ρόδας 4	Y_4	91,1	kN
Πλευρική δύναμη στο μέσο οδήγησης	Y_F	182,3	kN

4.4.6 Δράσεις προκαλούμενες από συσκευές περιορισμού της δύναμης ανύψωσης

Η μέγιστη δύναμη ανύψωσης περιορίζεται από μια ειδική συσκευή η οποία θέτει το ανώτατο όριο της δύναμης που μπορεί να αναπτυχθεί αναλόγως του τύπου της συσκευής περιορισμού δύναμης και των μηχανολογικών χαρακτηριστικών του γερανού. Οι συσκευές περιορισμού διακρίνονται σε συσκευές άμεσης επιβολής της δύναμης ανύψωσης (DLF) και σε συσκευές έμμεσης επιβολής της ανύψωσης (ILF) όπου η δύναμη αρχικά μετριέται και στη συνέχεια μια δεύτερη συσκευή ενεργοποιείται και διακόπτει την κίνηση εφόσον κάτι τέτοιο απαιτηθεί. Η δύναμη που αναπτύσσεται κατά τη δράση των συσκευών περιορισμού της δύναμης υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξ.(4-19). Επιλέχθηκε άμεση συσκευή περιορισμού της δύναμης με υδραυλικό σύστημα.

$$F_L = \varphi_L * m_H * g \quad (4-19)$$

όπου

φ_L : ο δυναμικός συντελεστής, θεωρήθηκε υδραυλικό σύστημα περιορισμού δύναμης με συντελεστή 1,4

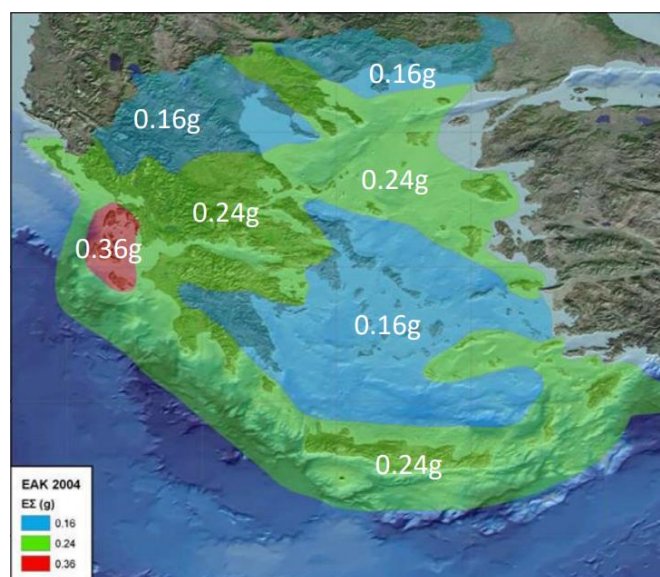
m_H : η μάζα υπό ανύψωση.

Δυναμικός συντελεστής αθέλητης απώλειας του φορτίου

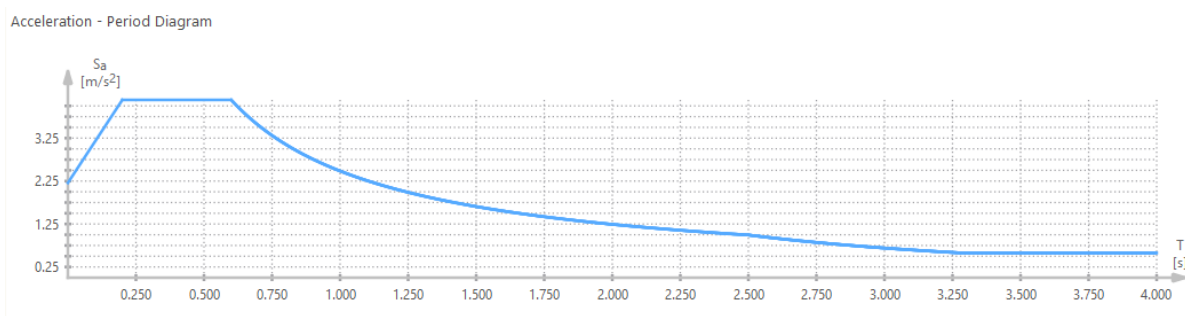
Σύμφωνα με τη διάταξη 4.2.4.10 του EN 13001-2:2021 η τιμή του συντελεστή της αθέλητης απώλειας μέρους του φορτίου φ_9 θα πρέπει να λαμβάνεται ίση με $-0,3$.

4.4.7 Σεισμικά φορτία

Ο υπολογισμός των σεισμικών φορτίων του γερανού πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις γενικές διατάξεις του EN 1998-1:2005. Ο εμπορικός λιμένας Πειραιά, που είναι και η τοποθεσία που θεωρήθηκε στη μελέτη ως περιοχή λειτουργίας του γερανού, βρίσκεται ακριβώς στα σύνορα της ΖΙ και ΖΙΙ του χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας της Ελλάδας κατά το Εθνικό προσάρτημα του ΕΚ8 (Εικόνα 4-16). Στην πραγματικότητα ο λιμένας του Πειραιά βρίσκεται στην ΖΙ, ζώνη με τη χαμηλότερη εδαφική επιτάχυνση αναφοράς a_{gR} . Όμως, η θεώρηση αυτής της χαμηλής τιμής επιτάχυνσης θα ήταν ίσως μια αρκετά επισφαλής προσέγγιση δεδομένου ότι ο παρακάτω διαχωρισμός σε ζώνες ενέχει αρκετές αβεβαιότητες. Έτσι, η ζώνη που θεωρήθηκε στη σεισμική μελέτη του γερανού είναι η Ζώνη ΙΙ με εδαφική επιτάχυνση αναφοράς $0,24\text{ g}$, με κατηγορία εδάφους C. Θεωρήθηκε ως ένα έργο σημαντικής σπουδαιότητας και συνεπώς ο συντελεστής σπουδαιότητας έλαβε την τιμή $1,2$ με το συντελεστή συμπεριφοράς να είναι ίσος με $1,5$. Πραγματοποιήθηκε η μέθοδος της φασματικής επαλληλίας των ιδιομορφών με το φάσμα που προτείνει ο Ευρωκώδικας 8, φάσμα που φαίνεται στην Εικόνα 4-17 θεωρώντας σεισμό κατά τις διευθύνσεις x & y .



Εικόνα 4-16: Χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας



Εικόνα 4-17: Φάσμα σχεδιασμού ΕΚ8

4.5 Συνδυασμοί δράσεων

4.5.1 Γενικά

Σύμφωνα με τη μέθοδο οριακής κατάστασης (Limit State Method), που είναι και η μέθοδος που ακολουθήθηκε σε όλη την πορεία της διαστασιολόγησης της κατασκευής, οι επιμέρους δράσεις που υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 4 της εργασίας θα πρέπει να πολλαπλασιάζονται με τους μερικούς συντελεστές ασφαλείας $\gamma_{p,i}$ (partial safety factors) και στη συνέχεια να επαλληλίζονται σύμφωνα με τους συνδυασμούς φορτίσεων, όπως αυτοί θα καθοριστούν στην παρούσα ενότητα. Γενικά, οι συντελεστές ασφαλείας χωρίζονται σε 3 επιμέρους κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία είναι οι συνδυασμοί A, που καλύπτουν το σύνολο των φορτίσεων του γερανού υπό κανονικές συνθήκες, η δεύτερη κατηγορία είναι οι συνδυασμοί B, που καλύπτουν την περίπτωση όπου στο γερανό ταυτόχρονα με τα κανονικά φορτία αναπτύσσονται και φορτίσεις που θεωρούνται περιστασιακές και τέλος οι συνδυασμοί κατηγορίας C, που λαμβάνουν υπόψη ταυτόχρονη φόρτιση της κατασκευής από ορισμένα συνήθη, περιστασιακά αλλά και σπάνια φορτία. Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω οι τιμές σχεδιασμού της κάθε δράσης στην οποία ο γερανός υπόκειται, υπολογίστηκε κατά την Εξ. (4-20). Κατά την παράγραφο 4.3 του EN 13001-2:2021 διακρίνονται 3 διαφορετικές ομάδες συνδυασμών φορτίσεων, οι συνδυασμοί για τον έλεγχο επάρκειας των μελών που εξετάζονται στην ενότητα 4.5.2, οι συνδυασμοί για τον έλεγχο ευστάθειας που εξετάζει η ενότητα 4.5.3 και τέλος οι συνδυασμοί ελέγχου έναντι κόπωσης που καθορίζονται στην ενότητα 4.5.4.

$$f_{d,i} = \gamma_n \cdot \gamma_{p,i} \cdot f_i \quad (4-20)$$

όπου

$f_{d,i}$: η τιμή σχεδιασμού μιας δράσης i

f_i : η χαρακτηριστική τιμή μιας δράσης i συμπεριλαμβανομένων των κατάλληλων δυναμικών συντελεστών Φ_i

γ_n : ο συντελεστής ρίσκου, ελήφθη ίσος με τη μονάδα

$\gamma_{p,i}$: ο μερικός συντελεστής ασφαλείας βάσει του κατάλληλου συνδυασμού φόρτισης.

Κατά τον υπολογισμό βαρυτικών φορτίων ενός συγκεκριμένου συνδυασμού φορτίσεων ενδέχεται οι μάζες συγκεκριμένων τμημάτων του γερανού να έχουν άλλοτε ευμενή και άλλοτε δυσμενή επιρροή μεταβάλλοντας έτσι σημαντικά τη ζητούμενη τιμή της έντασης σε ένα συγκεκριμένο σημείο του φορέα. Έτσι, αναλόγως της ευμενούς ή δυσμενούς επιρροής ενός φορτίου ο μερικός συντελεστής ασφαλείας θα λαμβάνει διαφορετική τιμή. Ο Πίνακας 4-18 απεικονίζει τις διαφορετικές τιμές που θα λαμβάνονται υπόψιν, αναλόγως της επίδρασης αλλά και της κατηγορίας συνδυασμού φόρτισης A, B & C.

Πίνακας 4-18: Συντελεστές ασφαλείας γ_p ίδιου βάρους

Συντελεστές ασφαλείας γ_p λόγω μάζας γερανού					
Συνδυασμοί φορτίσεων A		Συνδυασμοί φορτίσεων B		Συνδυασμοί Φορτίσεων C	
Δυσμενής	Ευμενής	Δυσμενής	Ευμενής	Δυσμενής	Ευμενής
1,22	0,95	1,16	0,97	1,10	1,00

4.5.2 Συνδυασμοί φορτίσεων για έλεγχο επάρκειας μελών

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα 3 μέρη του συνόλου των συνδυασμών που εξετάζεται ο γερανός όσον αφορά τον έλεγχο επάρκειας των μελών.

Πίνακας 4-19: Συνδυασμοί κατηγορίας A για τον έλεγχο επάρκειας μελών

Κατηγορίες φορτίων	Φορτία f_i		Συνδυασμοί φορτίσεων A			
			Συντελεστής ασφαλείας γ_p	A1	A2	A3
Συνήθη	Βαρυτικά φορτία	Φορτία μάζας γερανού	a	φ_1	φ_1	1
		Φορτία λόγω μάζας υπό ανύψωση	1,34	φ_2	φ_3	1
	Φορτία επιτάχυνσης & τριβής φορείου		1,34	φ_5	φ_5	φ_5
Περιστασιακά	Περιβαλλοντικές δράσεις	Ανεμοφόρτιση εν ώρα λειτουργίας	-	-	-	-
		Θερμοκρασιακές μεταβολές	-	-	-	-
Σπάνια	Φορτία λοξότητας		-	-	-	-
	Ανεμοφορτίσεις εν ώρα εκτός λειτουργίας		-	-	-	-
	Δοκιμαστικά φορτία		-	-	-	-
	Φορτία προσκρουστήρων		-	-	-	-
	Σεισμικά φορτία		-	-	-	-
Συντελεστής αντίστασης γ_m			1,10	-		

όπου

a: ο μερικός συντελεστής ασφαλείας θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αναλόγως της ευμενούς ή δυσμενούς επίδρασης σύμφωνα με τον πίνακα 9 του EN 13001-2:2021.

Ο παραπάνω πίνακας "διαβάζεται" κατά στήλες, δηλαδή οι συνδυασμοί A1 έως A3 είναι το σύνολο των συνδυασμών κατηγορίας A. Για παράδειγμα, θεωρώντας δυσμενή επίδραση της μάζας του γερανού ο συνδυασμός A1 γίνεται:

$$1,22 * \varphi_1 * \text{"ίδιο βάρος"} + 1,34 * \varphi_2 * \text{"φορτία ανύψ."} + 1,34 * \varphi_5 * \text{"φορτία επιτάχ. & τριβής"}$$

Από την παραπάνω περιγραφή του εν λόγω συνδυασμού γίνεται αντιληπτό ότι ο συνδυασμός τύπου A1 αφορά τον υπολογισμό των φορτίων του γερανού υπό κανονική λειτουργία -με ένα αρκετά αυξημένο προσαυξητικό συντελεστή βέβαια- με το φορτίο υπό ανύψωση, δηλαδή τα εμπορευματοκιβώτια να κινούνται κατά μήκος των δοκών κύλισης με φυσιολογική ταχύτητα και υπό κανονικές συνθήκες.

Πίνακας 4-20: Συνδυασμοί κατηγορίας Β για τον έλεγχο επάρκειας μελών

Κατηγορίες φορτίων	Φορτία f_i		Συνδυασμοί φορτίσεων Β			
			Συντελεστής ασφαλείας γ_p	B1	B2	B3
Συνήθη	Βαρυτικά φορτία	Φορτία μάζας γερανού	a	φ_1	φ_1	1
		Φορτία λόγω μάζας υπό ανύψωση	1,22	φ_2	φ_3	1
	Φορτία επιτάχυνσης & τριβής φορείου		1,22	φ_5	φ_5	φ_5
Περιστασιακά	Περιβαλλοντικές δράσεις	Ανεμοφόρτιση εν ώρα λειτουργίας	1,22	1	1	1
		Θερμοκρασιακές μεταβολές	1,16	1	1	1
Σπάνια	Φορτία λοξότητας		-	-	-	-
	Ανεμοφορτίσεις εν ώρα εκτός λειτουργίας		-	-	-	-
	Φορτία ελέγχου		-	-	-	-
	Φορτία προσκρουστήρων		-	-	-	-
	Σεισμικά φορτία		-	-	-	-
Συντελεστής αντίστασης γ_m			1,10	-		

Πίνακας 4-21: Α' μέρος συνδυασμών κατηγορίας C για τον έλεγχο επάρκειας μελών

Κατηγορίες φορτίων	Φορτία f_i		Συνδυασμοί φορτίσεων C						
			Συντελεστής ασφαλείας γ_p	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Συνήθη	Βαρυτικά φορτία	Φορτία μάζας γερανού	a	φ_1	1	φ_1	1	1	1
		Φορτία λόγω μάζας υπό ανύψωση	1,10	$\varphi_{2,c}$	η_w	-	1	1	1
	Φορτία επιτάχυνσης & τριβής φορείου		1,10	-	-	φ_5	-	-	-
Περιστασιακά	Περιβαλλοντικές δράσεις	Ανεμοφόρτιση εν ώρα λειτουργίας	1,16	-	-	0,4	-	-	-
		Θερμοκρασιακές μεταβολές	1,05	-	1	-	-	-	-
Σπάνια	Φορτία λοξότητας		1,16	1	1	1	1	1	1
	Ανεμοφορτίσεις εν ώρα εκτός λειτουργίας		1,10	-	1	-	-	-	-
	Φορτία ελέγχου		1,10	-	-	φ_6	-	-	-
	Φορτία προσκρουστήρων		1,10	-	-	-	φ_7	-	-
	Σεισμικά φορτία		1,10	-	-	-	-	-	-
Συντελεστής αντίστασης γ_m			1,10	-					

Πίνακας 4-22: Β' μέρος συνδυασμών κατηγορίας C για τον έλεγχο επάρκειας μελών

Κατηγορίες φορτίων	Φορτία f_i		Συνδυασμοί φορτίσεων C						
			Συντελεστής ασφαλείας γ_p	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Συνήθη	Βαρυτικά φορτία	Φορτία μάζας γερανού	a	1	1	1	1	1	1
		Φορτία λόγω μάζας υπό ανύψωση	1,10	φ_L	φ_9	1	1	-	-
	Φορτία επιτάχυνσης & τριβής φορείου		1,10	-	-	-	-	-	-
Περιστασιακά	Περιβαλλοντικές δράσεις	Ανεμοφόρτιση εν ώρα λειτουργίας	1,16	-	-	-	-	1	-
		Θερμοκρασιακές μεταβολές	1,05	-	-	-	-	-	1
Σπάνια	Φορτία λοξότητας		1,16	1	1	1	1	1	1
	Ανεμοφορτίσεις εν ώρα εκτός λειτουργίας		1,10	-	-	-	-	-	1
	Φορτία ελέγχου		1,10	-	-	-	-	-	-
	Φορτία προσκρουστήρων		1,10	-	-	-	-	-	-
	Σεισμικά φορτία		1,10	-	-	-	1	-	1
Συντελεστής αντίστασης γ_m			1,10	-					

4.5.3 Συνδυασμοί φορτίσεων για έλεγχο ανατροπής γερανού

Ένας γερανός στηριζόμενος σε 3 ή περισσότερα σημεία δεν κινδυνεύει από ανατροπή εφόσον η συνολική ροπή ευστάθειας είναι μεγαλύτερη από τη συνολική ροπή ανατροπής περί οποιαδήποτε νοητή ευθεία ορίζεται από τα σημεία των 4 (εν προκειμένω) στηρίξεων. Επιτρέπεται ανύψωση μιας στήριξης εφόσον η κατασκευή είναι καλώς στατικά ορισμένη χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η συγκεκριμένη στήριξη.

Πίνακας 4-23: Συνδυασμοί A & B κατηγορίας για έλεγχο σε ανατροπή

Κατηγορίες φορτίων	Φορτία f_i	Συνδυασμός φορτίσεων A		Συνδυασμός φορτίσεων B	
		Συντελεστής ασφαλείας γ_p	A1	Συντελεστής ασφαλείας γ_p	B1
Συνήθη	Δυσμενής επίδραση ίδιου βάρους	1,16	1	1,10	1
	Ευμενής επίδραση ίδιου βάρους	1,00	1	1,0	1
	Φορτία μάζας υπό ανύψωση	1,22	1	1,16	1
	Φορτία επιτάχυνσης φορείου	1,22	1	1,16	1
Περιστασιακά	Ανεμοφόρτιση εν ώρα λειτουργίας	-	-	1,16	1
	Φορτία προσκρουστήρων	-	-	-	-
	Ανεμοφορτίσεις εν ώρα εκτός λειτουργίας	-	-	-	-
	Φορτία ελέγχου	-	-	-	-
	Σεισμικά φορτία	-	-	-	-

Πίνακας 4-24: Συνδυασμοί C κατηγορίας για έλεγχο σε ανατροπή

Κατηγορίες φορτίων	Φορτία f_i	Συνδυασμός φορτίσεων C										
		Συντελεστής ασφαλείας γ_p	C2	C3	C4	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
Συνήθη	Δυσμενής επίδραση ίδιου βάρους	1,05	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Ευμενής επίδραση ίδιου βάρους	1,00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Φορτία μάζας υπό ανύψωση	1,10	-	-	1 ^a	1	φ_{ML}	φ_9	1	1	-	-
	Φορτία επιτάχυνσης φορείου	1,10	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Περιστασιακά	Ανεμοφόρτιση εν ώρα λειτουργίας	1,10	-	1	-	-	-	-	-	-	1	-
	Φορτία προσκρουστήρων	1,10	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	Ανεμοφορτίσεις εν ώρα εκτός λειτουργίας	1,10	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1
	Φορτία ελέγχου	1,10	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
	Σεισμικά φορτία	1,10	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1

4.5.4 Συνδυασμοί φορτίσεων έναντι κόπωσης

Γενικά, ο έλεγχος σε κόπωση θα πρέπει να πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις καταστάσεις φόρτισης που προκύπτουν συχνά στη ζωή του έργου. Σύμφωνα με την παράγραφο 4.3.7 του προτύπου EN 13001-2:2021 ο έλεγχος θα πρέπει να πραγματοποιείται στους συνδυασμούς φόρτισης A θεωρώντας όλους τους μερικούς συντελεστές ασφαλείας γ_p ίσους με τη μονάδα αλλά διατηρώντας τους δυναμικούς συντελεστές f_i αμετάβλητους, δηλαδή όπως αυτοί υπολογίστηκαν στο παρόν κεφάλαιο. Υπό τη συνθήκη ότι ορισμένα εκ των περιστασιακών ή μόνιμων φορτίων εμφανίζονται αρκετά συχνά στη ζωή του έργου τότε προτείνεται να λαμβάνονται υπόψη στον έλεγχο κόπωσης καθ' όμοιο τρόπο με το χειρισμό των συνδυασμών φορτίσεων κατηγορίας A.

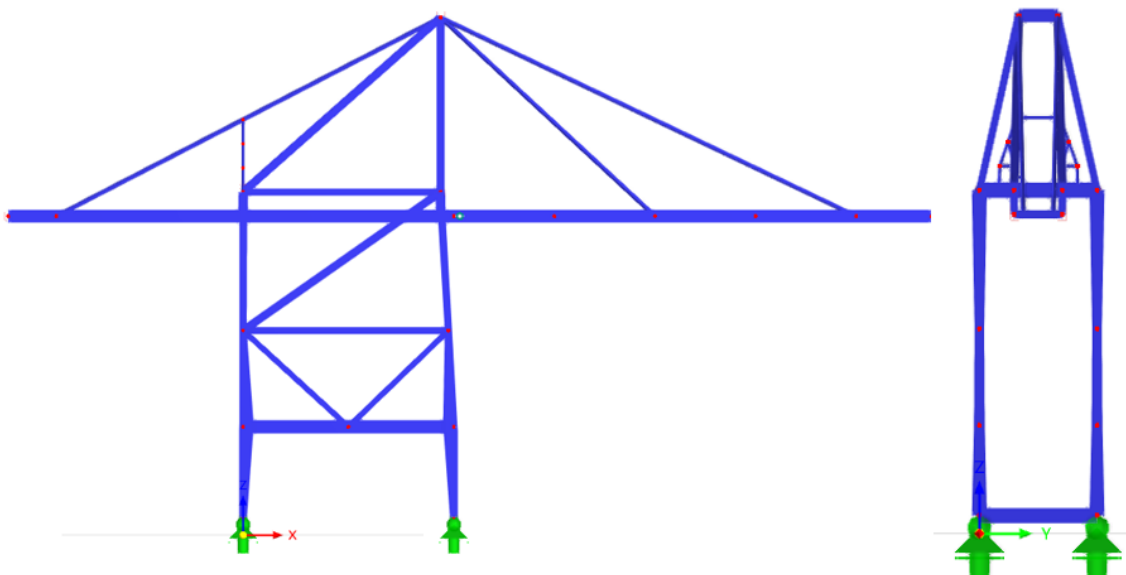
Πίνακας 4-25: Συνδυασμοί κόπωσης

Κατηγορίες φορτίων	Φορτία f_i		Συνδυασμοί φορτίσεων A				Συνδυασμοί φορτίσεων B			
			Συντελεστής ασφαλείας γ_p	A1	A2	A3	Συντελεστής ασφαλείας γ_p	B1	B2	B3
Συνήθη	Βαρυτικά φορτία	Φορτία μάζας γερανού	1,00	φ_1	φ_1	1	1,00	φ_1	φ_1	1
		Φορτία λόγω μάζας υπό ανύψωση	1,00	φ_2	φ_3	1	1,00	φ_2	φ_3	1
		Φορτία επιτάχυνσης & τριβής φορείου	1,00	φ_5	φ_5	φ_5	1,00	φ_5	φ_5	φ_5
Περιστασιακά	Περιβαλλοντικές δράσεις	Ανεμοφόρτιση εν ώρα λειτουργίας	-	-	-	-	1,00	1	1	1
		Θερμοκρασιακές μεταβολές	-	-	-	-	1,00	1	1	1
		Λοξότητα κίνησης	-	-	-	-	-	-	-	-
Σπάνια		Ανεμοφορτίσεις εν ώρα εκτός λειτουργίας	-	-	-	-	-	-	-	-
		Φορτία ελέγχου	-	-	-	-	-	-	-	-
		Φορτία προσκρουστήρων	-	-	-	-	-	-	-	-
		Σεισμικά φορτία	-	-	-	-	-	-	-	-
Συντελεστής αντίστασης γ_m			1,00	-			1,00	-		

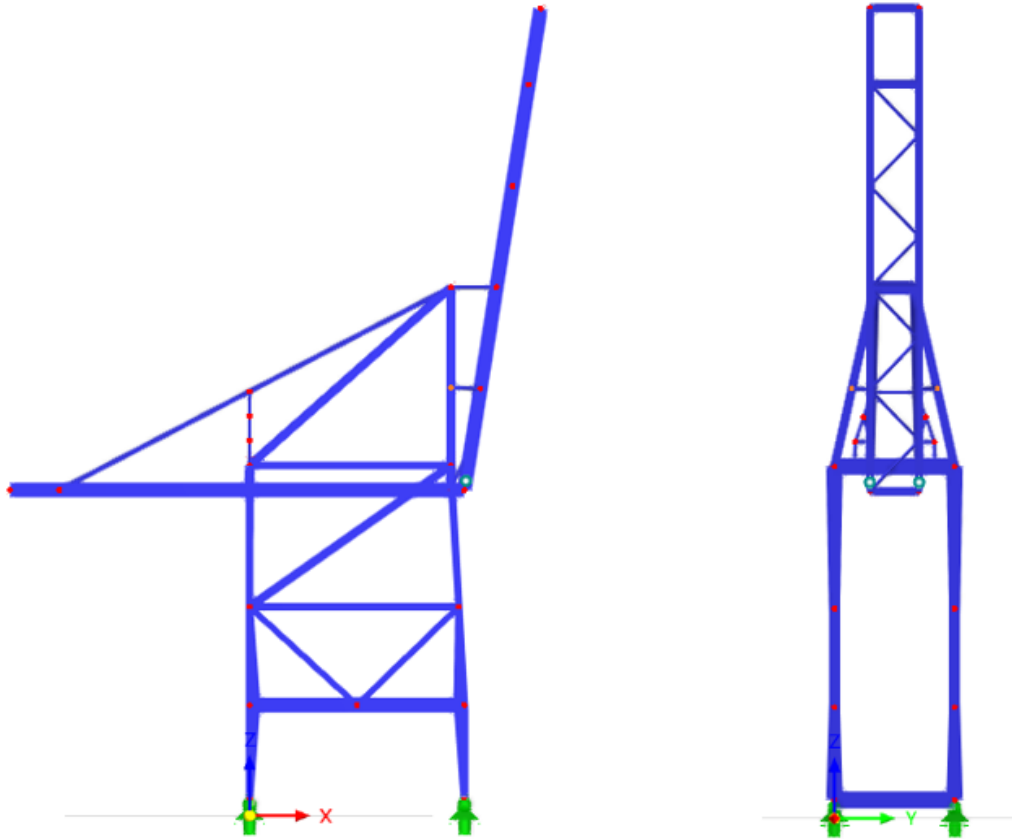
5 ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ & ΑΤΕΛΕΙΕΣ

5.1 Γενικά

Η προσομοίωση του υπό μελέτη λιμενικού γερανού εμπορευματοκιβωτίων πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα RFEM 6 με χρήση στοιχείων δοκού (beam elements). Μορφώθηκαν 2 ξεχωριστά μοντέλα, 1 για την κατάσταση λειτουργίας του γερανού (in-service state) και 1 για την κατάσταση εκτός λειτουργίας του γερανού (out-of-service state). Κατά την προσομοίωση του εντός λειτουργίας μοντέλου η δοκός κύλισης βρίσκεται υπό κλίση 0° δηλαδή στην αρχική της θέση (Εικόνα 5-1) ενώ στην κατάσταση εκτός λειτουργίας το outreach τμήμα της δοκού βρίσκεται υπό κλίση 81° (Εικόνα 5-2).



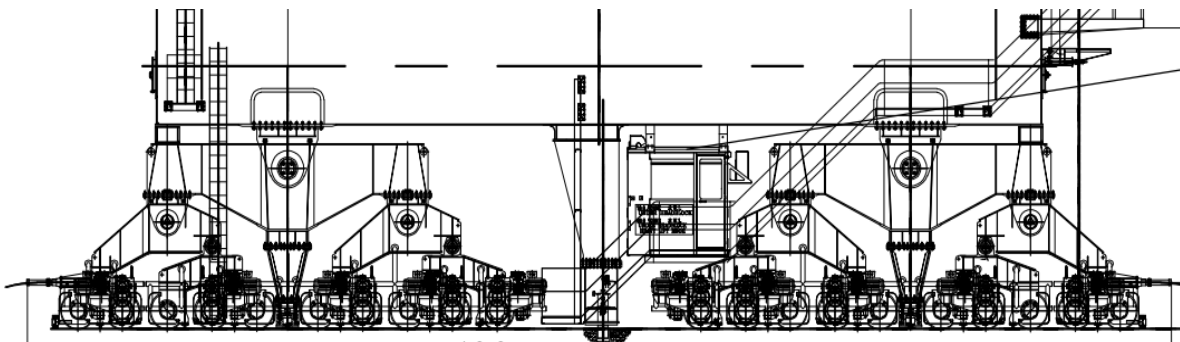
Εικόνα 5-1: Μοντέλο γερανού σε κατάσταση λειτουργίας



Εικόνα 5-2: Όψεις μοντέλου γερανού σε κατάσταση εκτός λειτουργίας

5.2 Συνοριακές συνθήκες μοντέλου & εσωτερικές ελευθερώσεις μελών

Ο γερανός κυλίνεται πάνω σε ράγες κατά μήκος της προβλήτας, δηλαδή εκτελεί μεταφορική κίνηση κατά τη διεύθυνση y όπως φαίνεται στα δεξιά στην Εικόνα 5-2. Στην πραγματικότητα ο γερανός στη βάση του διαθέτει ειδικούς μηχανισμούς κύλισης ροδών όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-3 επιτρέποντας έτσι την εν λόγω κίνηση παράλληλα στο μήκος των εμπορικών πλοίων.



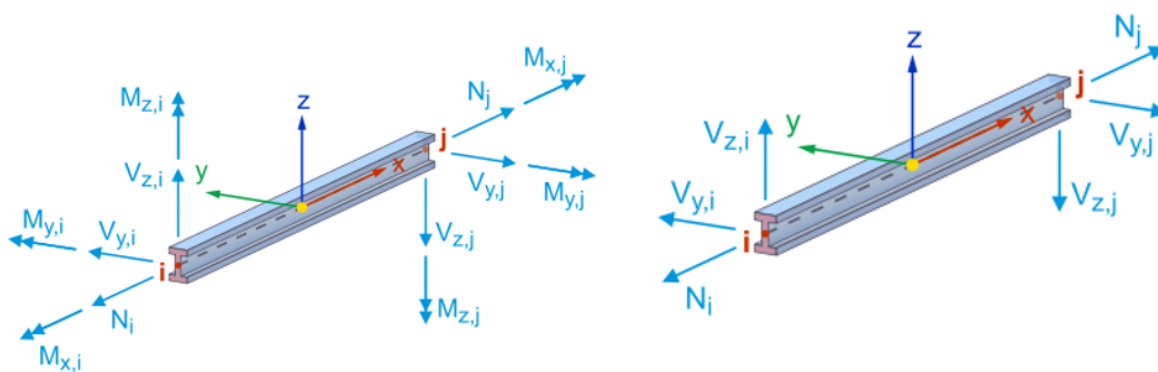
Εικόνα 5-3: Μηχανισμός κύλισης γερανού (σχέδια παραχωρημένα από ZPMC)



Εικόνα 5-4: Εικόνα μηχανισμού εκτέλεσης μεταφορικής κίνησης τυπικού λιμενικού γερανού
(από www.energyfacts.eu)

Για αυτόν το λόγο επιλέχθηκαν ως συνοριακές συνθήκες στις 4 στηρίξεις του γερανού να τεθούν απλές αρθρώσεις στα 2 από τα 4 σημεία στήριξης, δηλαδή να δεσμευτούν όλοι οι μεταφορικοί βαθμοί ελευθερίας (u_x , u_y & u_z) ενώ οι στροφικοί βαθμοί ελευθερίας (θ_x , θ_y & θ_z) να μείνουν αδέσμευτοι. Στα 2 υπόλοιπα σημεία στήριξης δεσμεύτηκαν οι βαθμοί ελευθερίας u_x & u_z με το μετακινησιακό βαθμό ελευθερίας u_y να μένει ελεύθερος με στόχο την καλύτερη δυνατή προσομοίωση. Οι στροφές έμειναν όπως και στα 2 προηγούμενα σημεία αδέσμευτες. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί πως τα 2 διαφορετικά σετ συνοριακών συνθηκών που εφαρμόστηκαν στις 4 στηρίξεις εφαρμόστηκαν διαγώνια μεταξύ τους, ώστε και στις 2 ράγες να υπάρχει από μία ελευθέρωση του βαθμού ελευθερίας u_y . Ιδανικά ενδεχομένως να έπρεπε να ελευθερωθεί και στα 4 σημεία ο βαθμός u_y , αλλά αυτή η ενέργεια θα καθιστούσε αδύνατη για το λογισμικό την επίλυση του φορέα καθώς αυτός δεν θα ήταν ευσταθής.

Όσον αφορά τις εσωτερικές ελευθερώσεις των μελών, οι περισσότεροι κόμβοι μελών του γερανού κρίθηκε προτιμότερο και πιο ρεαλιστικό να προσομοιωθούν ως συνδέσεις ροής και όχι ως συνδέσεις τέμνουσας. Από τις αναλύσεις που ακολουθούν στο επόμενο κεφάλαιο φάνηκε πως παρότι δόθηκε η δυνατότητα στο μοντέλο να αναπτύξει ροπές σε κόμβους που δεν ήταν ξεκάθαρο αν θα πρέπει να θεωρηθούν ως συνδέσεις ροής, δεν εμφανίστηκαν αξιόλογες ροπές στους υπό συζήτηση κόμβους, καθώς ο φορέας είναι κατάλληλα μορφωμένος έτσι ώστε να μην ευνοεί την ανάπτυξη πολύ σημαντικών καμπτικών ροπών. Έτσι, όλα τα στοιχεία του γερανού πλην ορισμένων που θα αναφερθούν στη συνέχεια μοντελοποιήθηκαν με στοιχεία δοκού (6 βαθμοί ελευθερίας) όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-5.

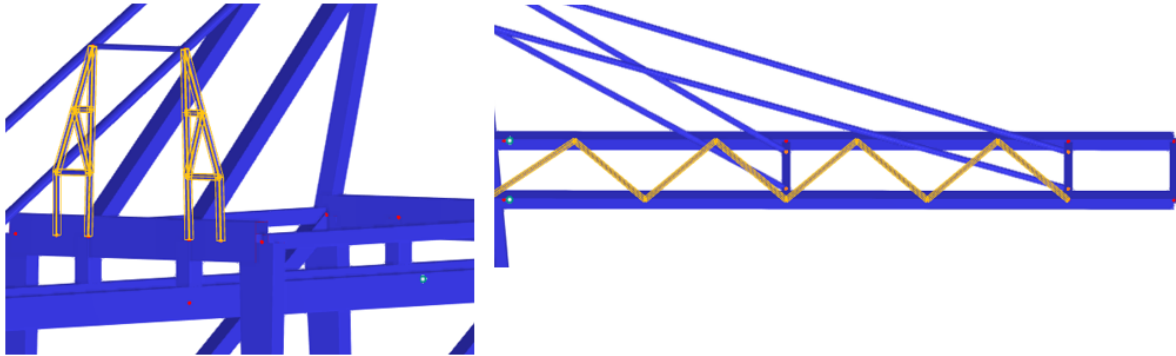


Εικόνα 5-5: (Αριστερά) στοιχείο τύπου beam & (δεξιά) στοιχείο τύπου truss (από RFEM 6)

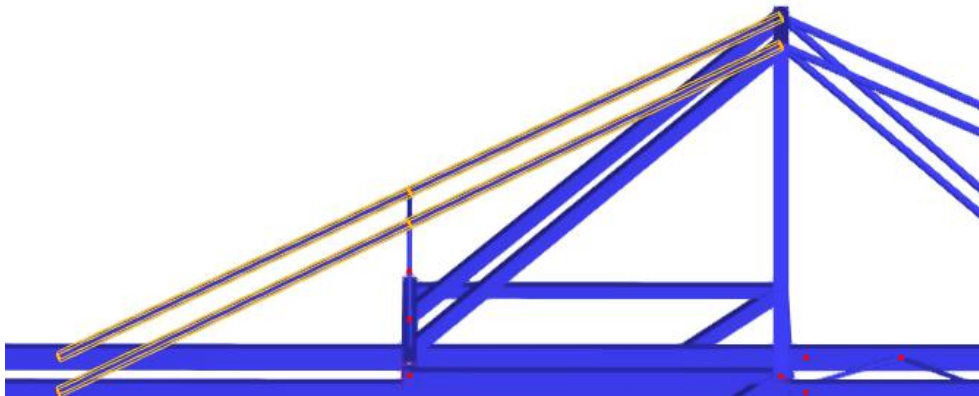
Τα μέλη τα οποία δε διακριτοποιήθηκαν με χρήση beam elements του RFEM 6 είναι τα εξής:

- διαγώνιες ράβδοι πλευρικής εξασφάλισης δοκών κύλισης
- οπίσθια δικτύωση σύνδεσης ελκυστήρων με τον υπόλοιπο φέροντα οργανισμό
- πρόσθιοι & οπίσθιοι ελκυστήρες (διαγώνια καθ' ύψος μέλη).

Αναλυτικότερα, για τις διαγώνιες ράβδους πλευρικής εξασφάλισης δοκών κύλισης όπως φαίνονται με κίτρινο χρώμα στην Εικόνα 5-7 προσομοιώθηκαν με χρήση truss element του RFEM 6. Με τη χρήση των συγκεκριμένων μελών ελευθερώνονται οι καμπτικές ροπές των άκρων περί τους άξονες y & z, ενώ είναι δυνατή η ανάπτυξη τεμνουσών δυνάμεων παράλληλα στους ίδιους άξονες.

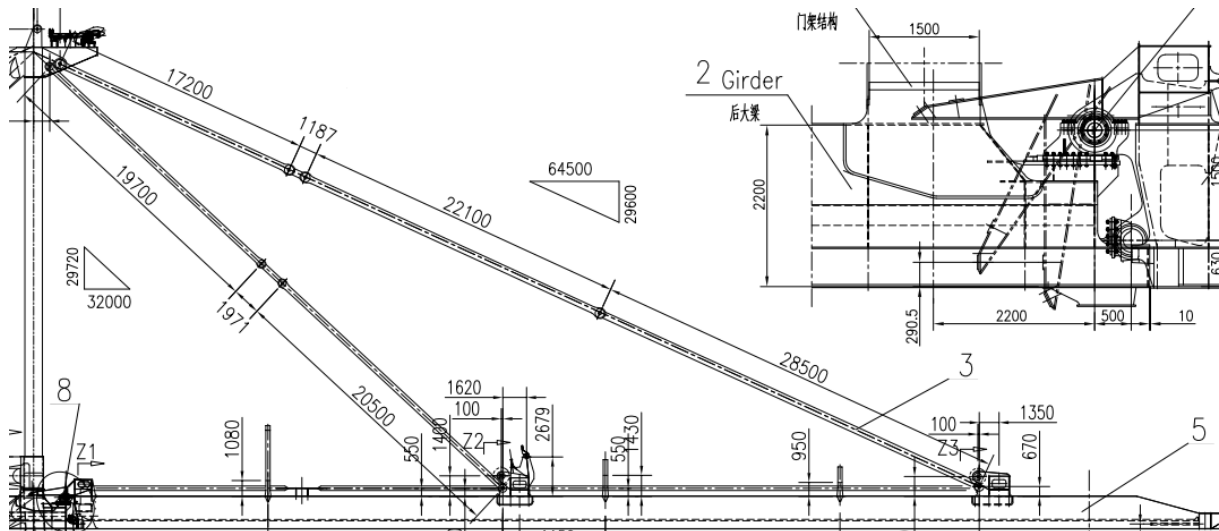


Εικόνα 5-6: (Αριστερά) δικτύωση ελκυστήρων & (δεξιά) πλευρικές εξασφαλίσεις δοκών κύλισης



Εικόνα 5-7: Ελκυστήρες οπίσθιου τμήματος γερανού

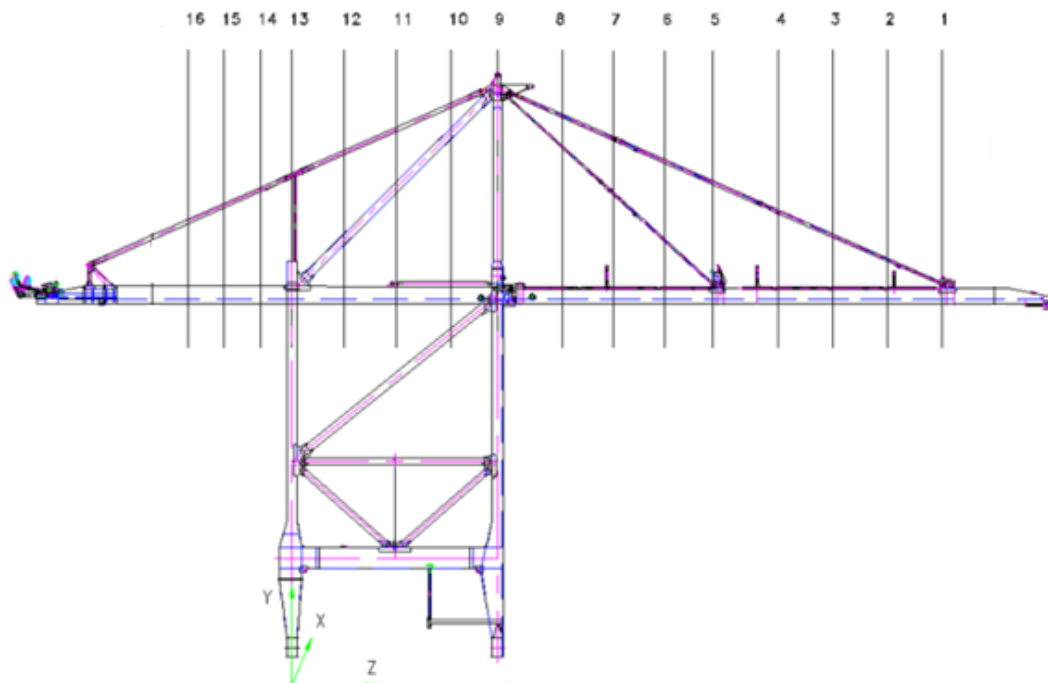
Οι ελκυστήρες του τμήματος outreach στην πραγματικότητα δεν είναι ένα ενιαίο μέλος. Αυτό συμβαίνει καθώς είναι αναγκαίο οι ελκυστήρες του πρόσθιου τμήματος του γερανού να είναι ικανοί να αναδιπλωθούν προκειμένου να είναι δυνατή η ανύψωση της δοκού κύλισης στην εκτός λειτουργίας κατάσταση. Έτσι, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5-8 στο γερανό της εταιρείας ZPMC οι ελκυστήρες αποτελούνται από περισσότερα από 1 τμήματα συνδεδεμένα με πείρους, χωρίζοντας έτσι το δεξιό ελκυστήρα συνολικού μήκους 67.8 m σε 3 τμήματα μήκους 17,2 m, 22,1 m & 28,5 m αντίστοιχα. Προσεγγιστικά, για τον υπό μελέτη γερανό θεωρήθηκε η προσομοίωση τους με στοιχεία (truss only N), στοιχεία που μπορούν να αναπτύξουν μόνο αξονική δύναμη και όχι καμπτική ροπή. Στην πραγματικότητα, αναπτύσσεται καμπτική ροπή στα μέλη από το ίδιο βάρος τους. Όμως, λόγω των πείρων το κάθε τμήμα κάμπτεται στο δικό του μήκος με τις τάσεις αυτές να υπολογίζονται εκτός του προγράμματος RFEM 6.



Εικόνα 5-8: Ελκυστήρες τμήματος outreach γερανού ZPMC (σχέδιο παραχωρημένο από εταιρεία ZPMC)

5.3 Προσομοίωση κίνησης εμπορευματοκιβωτίων

Όπως προαναφέρθηκε τα φορτία των εμπορευματοκιβωτίων, των μέσω μεταφοράς αλλά και του φορείου προσομοιώθηκαν με συγκεντρωμένα φορτία. Για την κατά το δυνατόν ακριβέστερη διαστασιολόγηση των μελών του γερανού επιλέχθηκε τα παραπάνω φορτία να ασκηθούν σε αρκετές θέσεις στη μέγιστη δυνατή διαδρομή των εμπορευματοκιβωτίων κατά μήκος των δίδυμων δοκών κύλισης. Αναλυτικότερα, τα φορτία τοποθετήθηκαν σε 16 διαφορετικές θέσεις στη διαδρομή μήκους 124,8 m όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-9, ελαφρώς τροποποιημένη εικόνα που προσέφερε η εταιρεία ZPMC.



Εικόνα 5-9: Τοποθέτηση φορτίων σε 16 θέσεις κατά μήκος των δοκών κύλισης

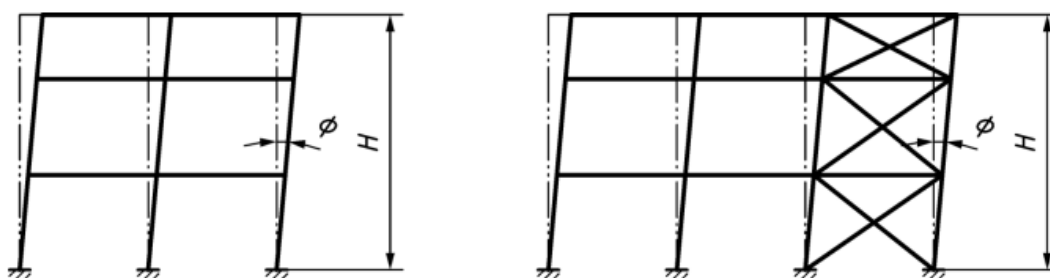
(σχέδιο βασισμένο στην εταιρεία ZPMC)

5.4 Υπολογισμός και εφαρμογή αρχικών ατελειών

Για την εκτέλεση γεωμετρικά μη γραμμικών αναλύσεων (GNIA) θεωρήθηκαν αρχικές ατέλειες στα μέλη του φορέα σύμφωνα με τις διατάξεις του FprEN 1993-1-1:2022. Ορίστηκαν 2 είδη αρχικών ατελειών, οι καθολικές (sway imperfections) και οι τοπικές ατέλειες (bow imperfections).

5.4.1 Καθολικές ατέλειες

Για μέλη επιρρεπή σε λυγισμό καθολικής μορφής, όπως τα μέλη στην Εικόνα 5-10 θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ισοδύναμες αρχικές ατέλειες σύμφωνα με την Εξ.(5-1) της παραγράφου 7.3.2 του FprEN 1993-1-1:2022. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι καθολικές ατέλειες λαμβάνονται υπόψη μόνο κατά την μία εκ των διευθύνσεων y & z κάθε φορά και όχι ταυτόχρονα.



Εικόνα 5-10: Καθολικές ατέλειες

Οι καθολικές ατέλειες στα υποστυλώματα υπολογίστηκαν από την ακόλουθη εξίσωση.

$$\varphi = \varphi_0 \cdot \alpha_H \cdot \alpha_m \quad (5-1)$$

όπου

φ_0 : η βασική τιμή των αρχικών ατελειών εξαρτώμενη από το είδος του ελέγχου, ίση με 1/400 για ελαστικό έλεγχο και 1/200 για πλαστικό

α_m : ο απομειωτικός συντελεστής, θεωρήθηκε συντηρητικά ίσος με τη μονάδα

H : το ύψος της κατασκευής.

Ο απομειωτικός συντελεστής ύψους υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση.

$$\alpha_H = \frac{2}{\sqrt{H}} \quad (5-2)$$

όπου

H : το ύψος της κατασκευής σε m.

Πίνακας 5-1: Καθολικές ατέλειες υποστυλωμάτων

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Βασική τιμή	φ_0	0,005	-
Συνολικό υψος υποστυλωμάτων	H	57	m
Απομειωτικός συντελεστής ύψους	α_H	0,265	-
Απομειωτικός συντελεστής υποστυλωμάτων	α_m	1	-
Ατέλεια τύπου sway	φ	0,00132	-

Πέραν των υποστυλωμάτων κρίθηκε σκόπιμο να τεθούν καθολικές ατέλειες και στα τμήματα των 2 δίδυμων δοκών κύλισης αλλά και στα 4 άνω κεκλιμένα υποστυλώματα του γερανού στην κορυφή. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι καθολικές ατέλειες που τέθηκαν στις δοκούς κύλισης του φορέα υπολογισμένες με χρήση της Εξ.(5-2).

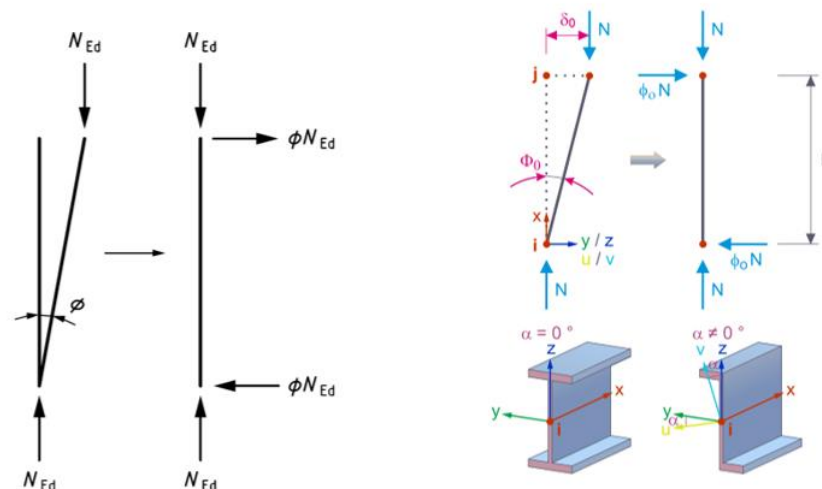
Πίνακας 5-2: Καθολικές ατέλειες οπίσθιου τμήματος δοκών κύλισης

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Βασική τιμή	ϕ_0	0,005	-
Μήκος τμήματος δοκού κύλισης	L	39	m
Απομειωτικός συντελεστής ύψους	a_H	0,320	-
Απομειωτικός συντελεστής υποστυλωμάτων	a_m	1	-
Ατέλεια	ϕ	0,00160	-

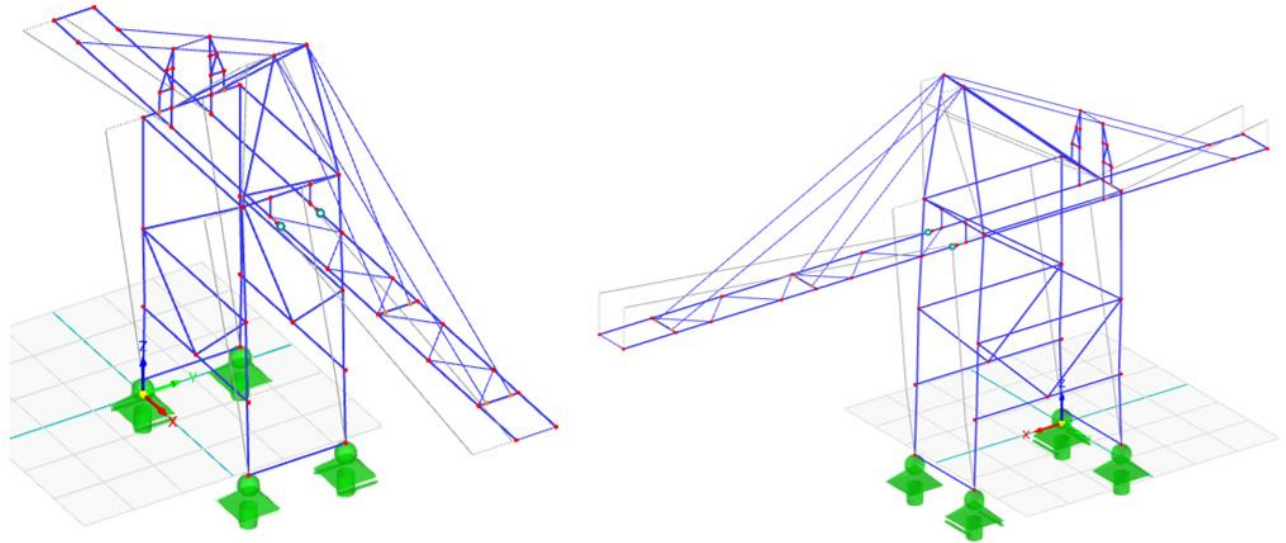
Πίνακας 5-3: Καθολικές ατέλειες πρόσθιου τμήματος δοκών κύλισης

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Βασική τιμή	ϕ_0	0,005	-
Μήκος τμήματος δοκού κύλισης	L	78,3	m
Απομειωτικός συντελεστής ύψους	a_H	0,226	-
Απομειωτικός συντελεστής υποστυλωμάτων	a_m	1	-
Ατέλεια	ϕ	0,00113	-

Στο λογισμικό RFEM 6 οι αρχικές καθολικές ατέλειες αντικαθίστανται από οριζόντια φορτία σύμφωνα με την παράγραφο 7.3.2 του FprEN 1993-1-1:2022, όπου οι ατέλειες εφαρμόζονται ως οριζόντια φορτία στα άκρα τους, εξαρτώμενα από την αξονική δύναμη N_{Ed} και την ατέλεια ϕ σύμφωνα με την Εικόνα 5-11.



Εικόνα 5-11: Αντικατάσταση ατελειών τύπου sway με οριζόντια φορτία (αριστερά) & (δεξιά) η ίδια διαδικασία κατά το RFEM 6



Εικόνα 5-12: Καθολικές ατέλειες

5.4.2 Τοπικές ατέλειες

Οι τοπικές ατέλειες υπολογίζονται σύμφωνα με την Εξ.(5-3) της παραγράφου 7.3.3.1 του FprEN 1993-1-1:2022.

$$e_0 = \frac{\alpha}{\epsilon} \cdot \beta \cdot L \quad (5-3)$$

όπου

L: το μήκος του υπό μελέτη μέλους

ϵ : η παράμετρος υλικού, για χάλυβα S355 η παράμετρος ϵ ισούται με 0,81

α : ο παράγοντας ατέλειας εξαρτώμενος από τις καμπύλες λυγισμού σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 5-4: Καθορισμός παράγοντα ατέλειας α

Buckling curve	a_0	a	b	c	d
Imperfection factor α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

β : σχετικός συντελεστής ατελειών περί τους άξονες y-y & z-z τύπου bow σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα, επιλέχθηκαν οι τιμές της ελαστικής ανάλυσης.

Πίνακας 5-5: Καθορισμός σχετικού συντελεστή ατελειών β

Buckling about axis	Elastic cross-section verification	Plastic cross-section verification
y-y	1/110	1/75
z-z	1/200	1/68

Ατέλειες λόγω πλευρικού-στρεπτικού λυγισμού

Επιλέχθηκε η μέθοδος M5 για τις μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες. Συνεπώς, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι ατέλειες πλευρικού-στρεπτικού λυγισμού περί μόνο τον ασθενή άξονα των μελών σύμφωνα με την Εξ.(5-4).

$$e_{0,LT} = \beta_{LT} \cdot \frac{L}{\epsilon} \tag{5-4}$$

όπου

β_{LT} : ο συντελεστής αναφοράς ατέλειας τύπου bow για πλευρικό-στρεπτικό λυγισμό σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα

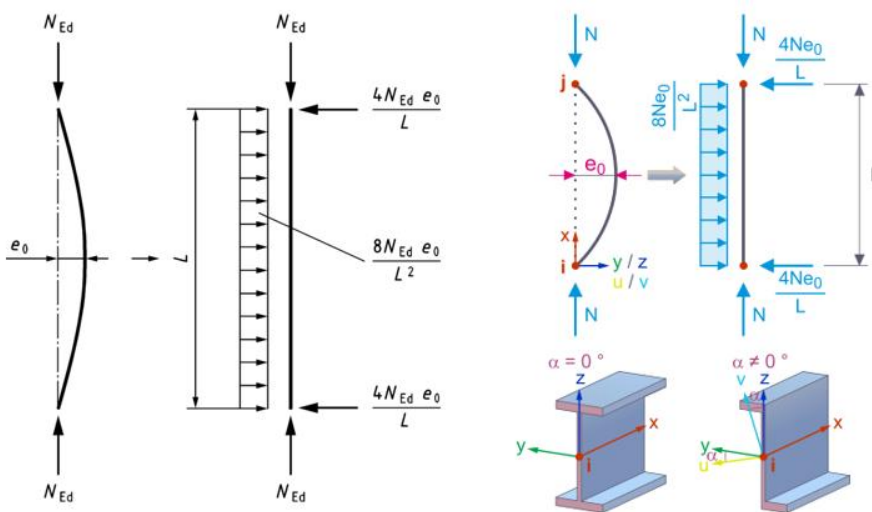
Πίνακας 5-6: Καθορισμός συντελεστή β_{LT} πλευρικού-στρεπτικού λυγισμού

Cross-section	Condition	Elastic cross-section verification	Plastic cross-section verification
rolled	$h/b \leq 2,0$	1/250	1/200
	$h/b > 2,0$	1/200	1/150
welded	$h/b \leq 2,0$	1/200	1/150
	$h/b > 2,0$	1/150	1/100

L: το μήκος των μελών

ϵ : η παράμετρος υλικού, για χάλυβα S355 η παράμετρος ϵ ισούται με 0,81

Ομοίως με τις καθολικές ατέλειες, το λογισμικό RFEM 6 θεωρεί τις εν λόγω ατέλειες ως ισοδύναμα φορτία στα μέλη. Συγκεκριμένα, σε κάθε μέλος εφαρμόζεται κατακόρυφο φορτίο κάθετο στο διαμήκη άξονα των μελών με μέτρο ίσο με $8 \cdot N_{Ed} \cdot e_0 / L^2$ αλλά και 2 επικόμβια φορτία κάθετα στα 2 άκρα των μελών μέτρου $4 \cdot N_{Ed} \cdot e_0 / L$.

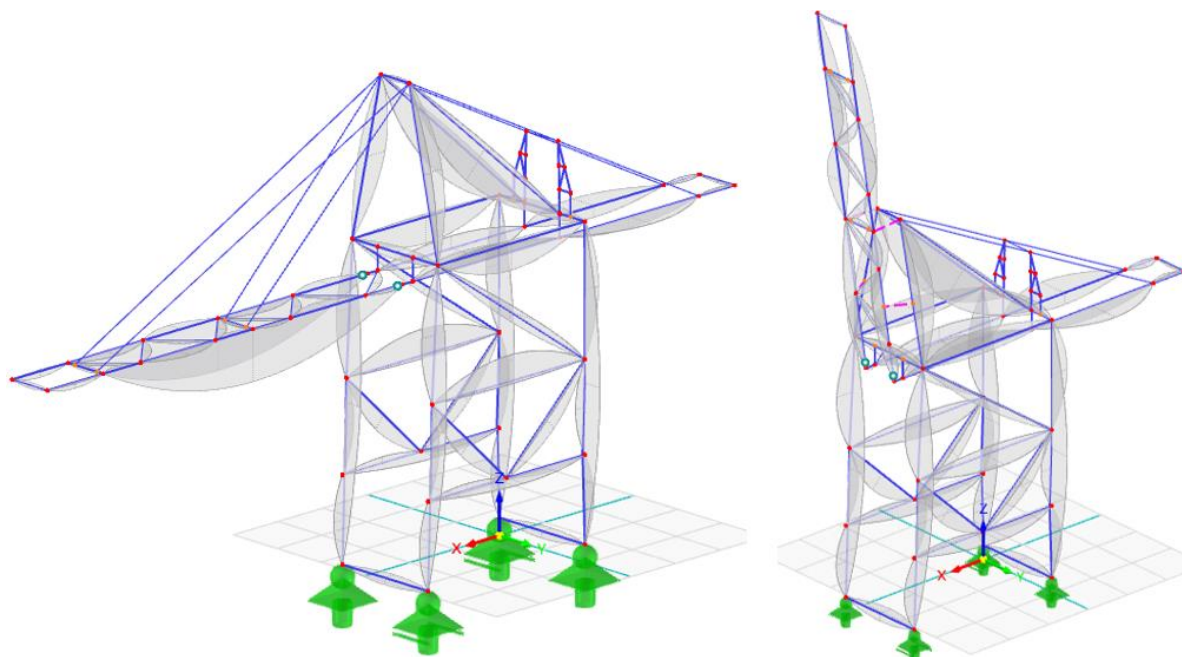


Εικόνα 5-13: Αντικατάσταση τοπικών ατελειών από ισοδύναμα φορτία

Ενδεικτικά, παρατίθενται οι πίνακες υπολογισμού ατελειών περί τον ισχυρό και ασθενή άξονα των μελών.

Πίνακας 5-7: Ατέλειες τύπου bow στους διαγώνιους συνδέσμους δυσκαμψίας

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Μήκος μέλους	L	40,06	m
Συντελεστής ατελειών	a	0,34	-
Όριο διαρροής υλικού	f_y	355	MPa
Παράμετρος υλικού	ϵ	0,81	-
Ατέλεια αναφοράς περί τον ισχυρό άξονα	β_{y-y}	0,0050	-
Ατέλεια αναφοράς περί τον ασθενή άξονα	β_{z-z}	0,0050	
Ατέλεια στον ισχυρό άξονα	$e_{0,y-y}$	0,084	m
Ατέλεια στον ασθενή άξονα	$e_{0,z-z}$	0,084	m
Ατέλεια αναφοράς τύπου bow για στρεπτοκαμπτικό λυγισμό	β_{LT}	0,0050	-
Ατέλεια στρεπτοκαμπτικού λυγισμού στον ασθενή άξονα	$e_{0,LT}$	0,246	m



Εικόνα 5-14: Σχήμα τοπικών ατελειών

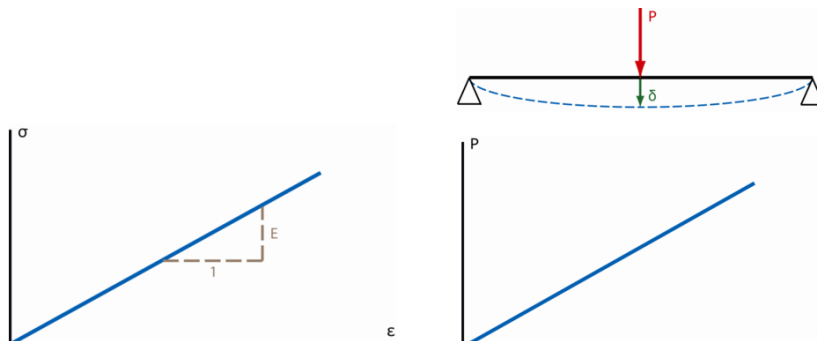
6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

6.1 Τύποι αναλύσεων

Για την ανάλυση και τη διαστασιολόγηση του φορέα χρησιμοποιήθηκαν γραμμικές αναλύσεις (Geometrically Linear), γραμμικές αναλύσεις λυγισμού (Linear Buckling Analysis) & γεωμετρικά μη γραμμικές αναλύσεις (Geometrically Nonlinear Imperfection Analysis) με ταυτόχρονη θεώρηση καθολικών αλλά και τοπικών ατελειών όπως αυτές θεωρήθηκαν στην υποενότητα 5.4.

Γραμμική ανάλυση

Οι βασικές παραδοχές και προϋποθέσεις της γραμμικής ανάλυσης αφορούν τη συμπεριφορά του υλικού και της γεωμετρίας. Προϋποτίθεται πως το υλικό συμπεριφέρεται ως γραμμικά ελαστικό δηλαδή ότι οι τάσεις σ είναι ανάλογες των ανηγμένων παραμορφώσεων με κλίση ίση με το μέτρο ελαστικότητας E , άρα ότι ισχύει ο νόμος του Hooke ($\sigma = E \cdot \epsilon$) όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-1. Με την υπέρβαση ενός ορισμένου ορίου τάσεων παύει να ισχύει η γραμμικότητα σ - ϵ . Η δεύτερη προϋπόθεση αφορά τις μετατοπίσεις οι οποίες θα πρέπει να είναι πολύ μικρές ούτως ώστε η γεωμετρία της παραμορφωμένης κατάστασης να μοιάζει πολύ με την παραμορφωμένη ώστε να μπορεί να αγνοηθεί η παραμόρφωση του φορέα κατά τη στατική ανάλυση και τον καθορισμό των εξισώσεων ισορροπίας. Με την ταυτόχρονη ικανοποίηση των 2 παραπάνω συνθηκών ισχύει η αρχή της επαλληλίας, δηλαδή η αναλογία τάσεων - μετατοπίσεων.



Εικόνα 6-1: Αναλογία τάσεων παραμορφώσεων αριστερά & φορτίου μετατόπισης δεξιά (από Γαντές, 2016)

Γραμμική ανάλυση λυγισμού

Κατά τη γραμμική θεωρία λυγισμού ή αστάθειας ο φορέας θεωρείται στην παραμορφωμένη του κατάσταση, με την παραδοχή όμως των μικρών μετατοπίσεων. Γενικά, οι γραμμικές αναλύσεις λυγισμού είναι αρκετά απλές ως προς την εκτέλεσή τους. Όμως, εκφράζουν πληροφορίες μόνο για τον κύριο δρόμο ισορροπίας και το κρίσιμο φορτίο λυγισμού.

Γεωμετρικά μη γραμμικές αναλύσεις

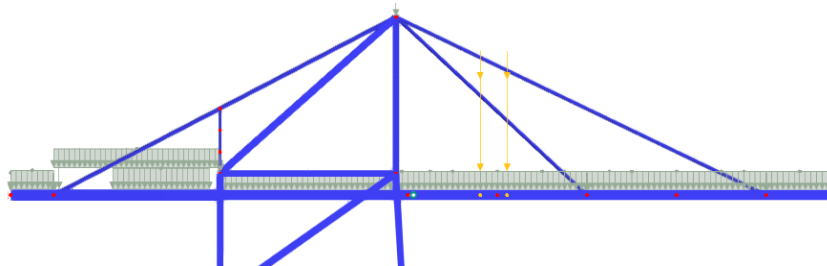
Κατά τις μη γραμμικές αναλύσεις ο φορέας θεωρείται στην παραμορφωμένη του κατάσταση, έντονα διαφοροποιημένη από την απαραμόρφωτη, έτσι ώστε να μην είναι αποδεκτοί οι περιορισμοί των μετατοπίσεων, με την συμπεριφορά του υλικού να εξακολουθεί να θεωρείται ελαστική.

6.2 Αποτελέσματα γραμμικών αναλύσεων

6.2.1 Μοντέλο σε κατάσταση λειτουργίας

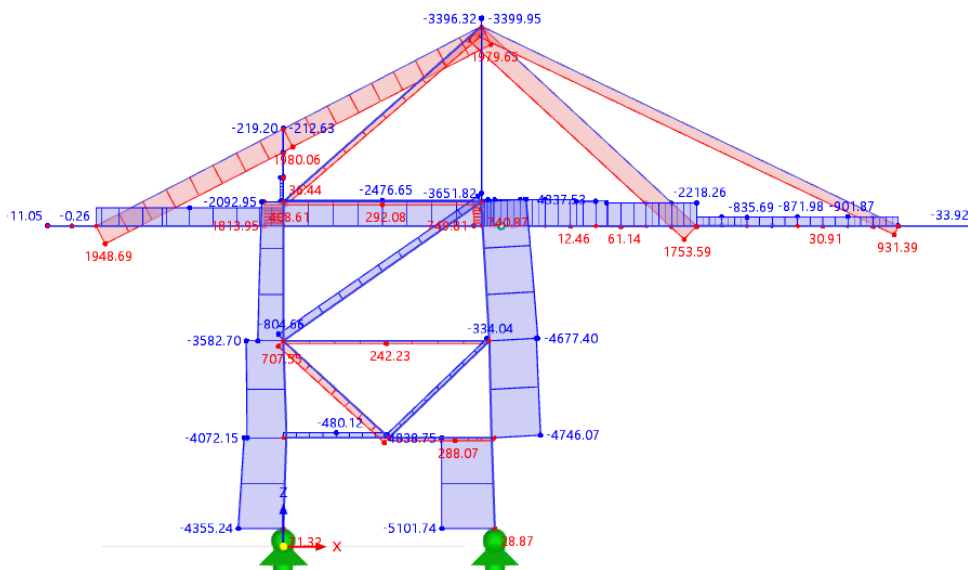
Ακολουθούν τα σημαντικότερα αποτελέσματα των γραμμικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Αποτελέσματα συνδυασμού A1 με τα Ε/Κ στη θέση 10

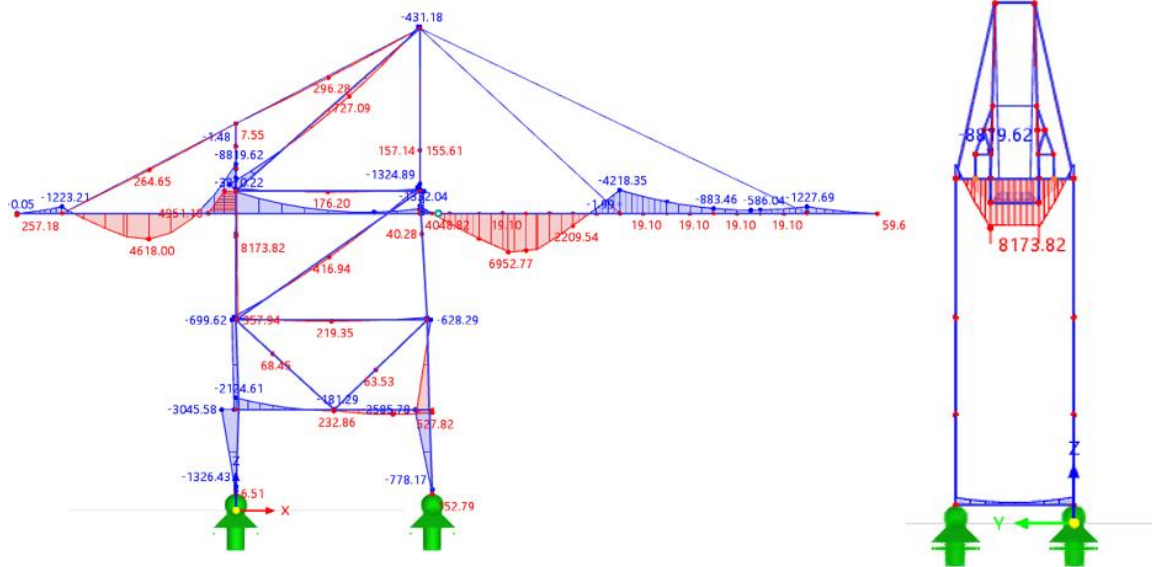


Εικόνα 6-2: Συνδυασμός φόρτισης A1 με τα Ε/Κ στη θέση 10 (φορτίο με κίτρινο χρώμα)

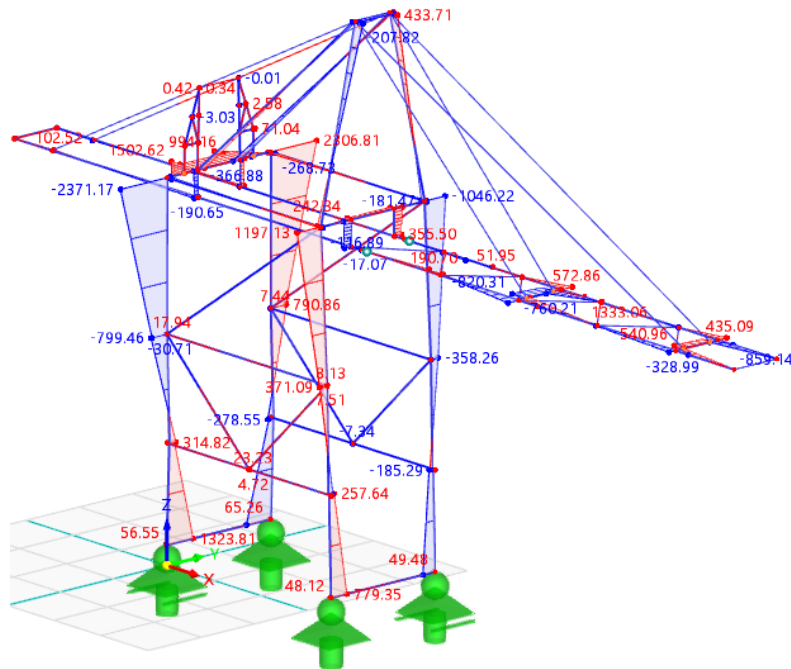
Στην Εικόνα 6-3 φαίνονται οι αξονικές δυνάμεις για τον εν λόγω συνδυασμό. Το κόκκινο χρώμα εκφράζει εφελκυσμό ενώ το μπλε θλίψη.



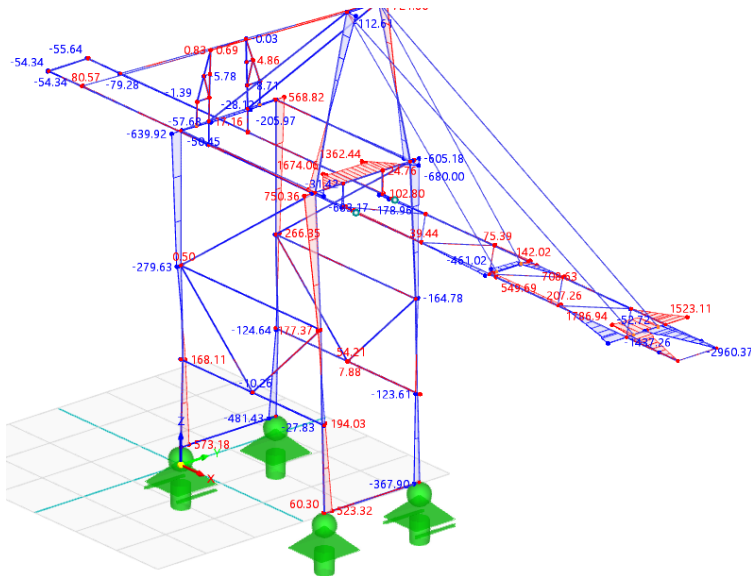
Εικόνα 6-3: Αξονικές δυνάμεις N σε kN (max N=1980 kN, min N=-5101 kN)



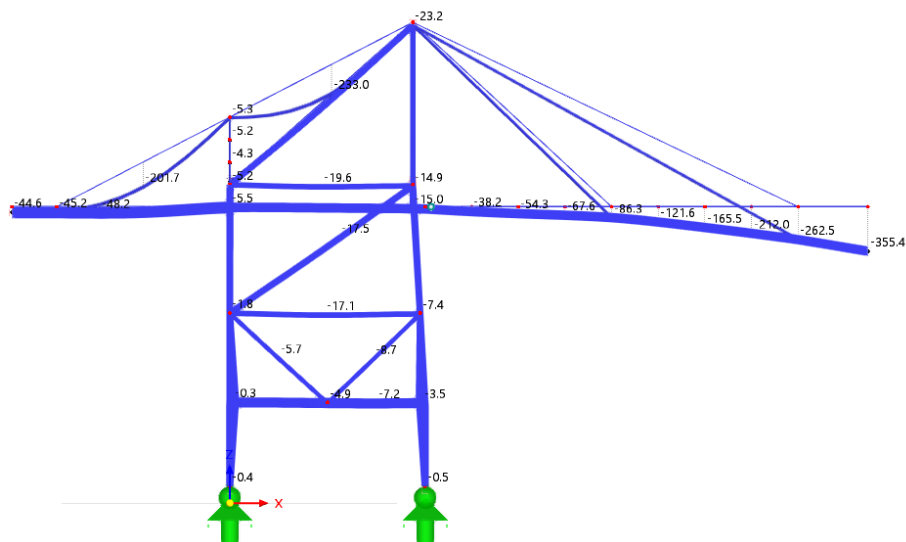
Εικόνα 6-4: Καμπτικές ροπές M_y σε kNm (max $M_y=8174$ & min $M_y=-8819$ kNm)



Εικόνα 6-5: Καμπτικές ροπές M_z σε kNm (max $M_z=2306$ kNm & min $M_z=-2371$ kNm)



Εικόνα 6-9: Καμπτικές ροπές M_z σε kNm (max $M_z= 1786$ kNm & min $M_z=-2960$ kNm)



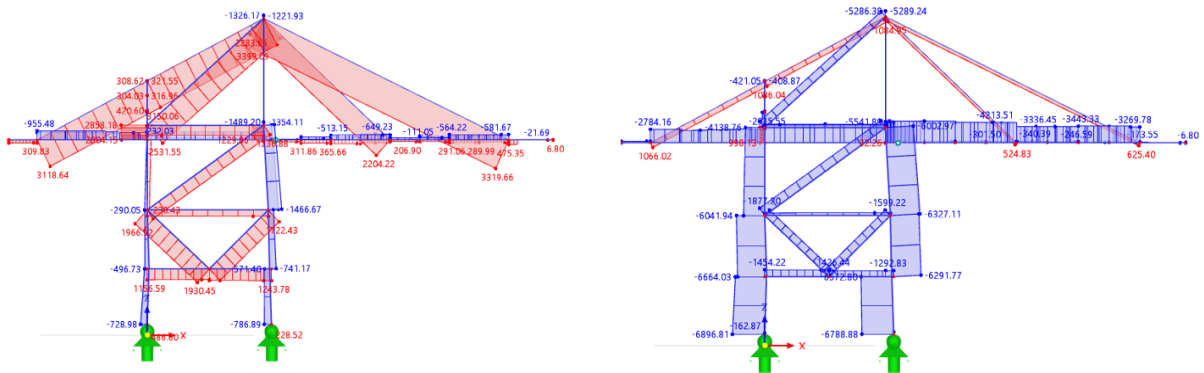
Εικόνα 6-10: Παραμορφώσεις κατά τον κατακόρυφο z άξονα σε mm (max $u_z= 355,4$ mm)

Παρατηρούνται σημαντικά βέλη στους ελκυστήρες του οπίσθιου τμήματος του γερανού. Η διατομή που επιλέχθηκε είναι ίδια με αυτήν της κατασκευάστριας εταιρείας. Τα συγκεκριμένα μέλη έχουν αρκετά μικρή ροπή αδράνειας I_y και έτσι αναπτύσσονται σημαντικά βέλη κάμψης σε κάθε υπό-τμήμα μήκους 36 m.

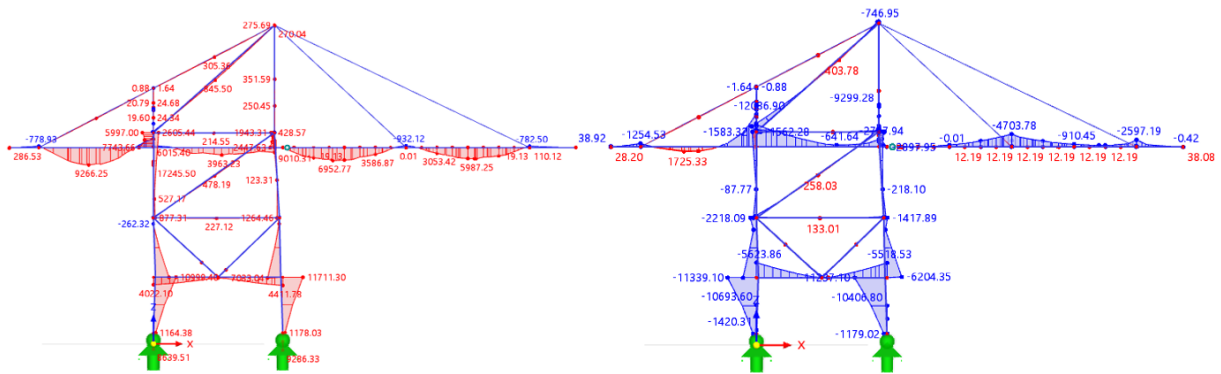
Γενικό σχόλιο

Λόγω του γεγονότος ότι ο φορέας αποτελείται από μεγάλο αριθμό μελών, για την όσο το δυνατό καλύτερη ευκρίνεια των αποτελεσμάτων των εντατικών μεγεθών που κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν, σε κάποιες εικόνες αποτελεσμάτων επιλέχθηκε να γίνει εστίαση μόνο σε συγκεκριμένα μέλη και όχι στο σύνολο του φορέα.

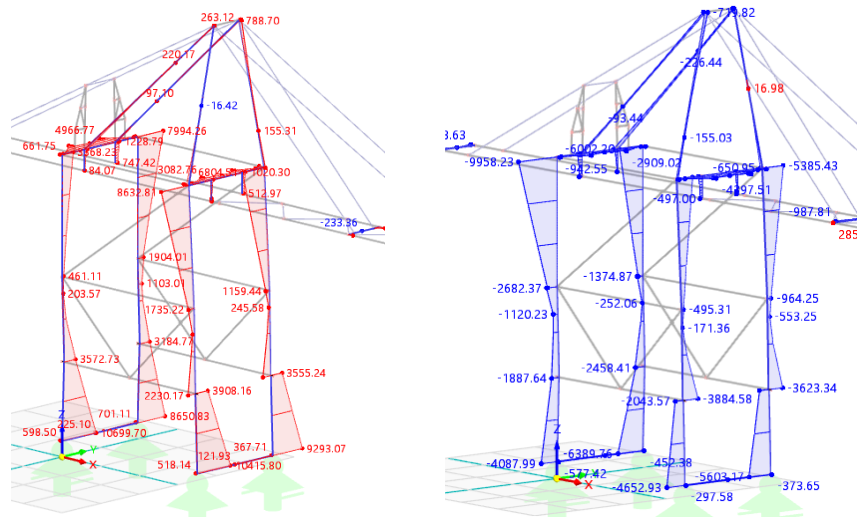
Αποτελέσματα περιβάλλουσας συνδιασμών A, B & C εντός λειτουργίας



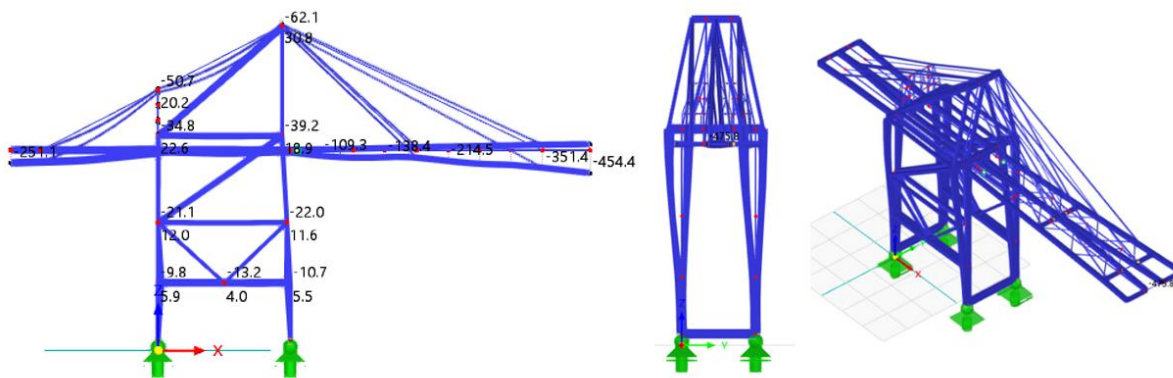
Εικόνα 6-11: Αριστερά μέγιστες & δεξιά ελάχιστες τιμές αξονικών δυνάμεων N σε kN
(max N = 1084 kN & min N = -6896 kN)



Εικόνα 6-12: Αριστερά μέγιστες & δεξιά ελάχιστες τιμές καμπτικών ροών M_y σε kNm
(max M_y = 17245 kNm, min M_y = -12086 kNm)



Εικόνα 6-13: Αριστερά μέγιστες & δεξιά ελάχιστες τιμές καμπτικών ροών M_z
(max M_z = 10699 kNm & min M_z = -9958 kNm)

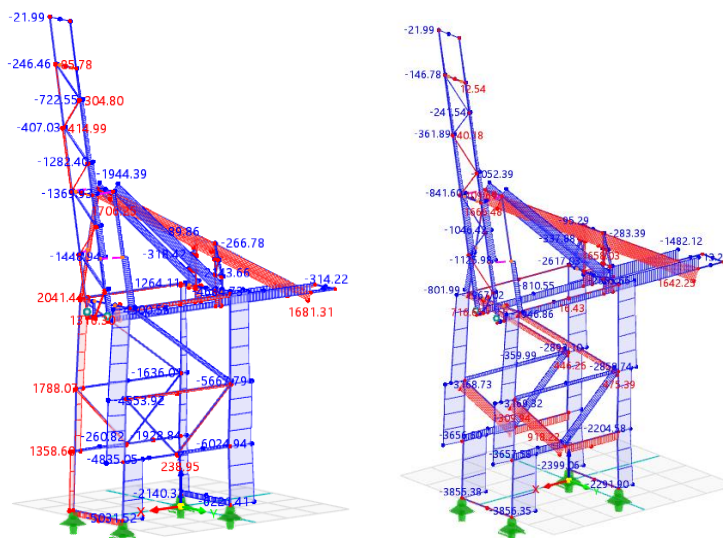


Εικόνα 6-14: Αριστερά περιβάλλουσα βυθίσεων u_z σε mm, κεντρικά & δεξιά περιβάλλουσα μετακινήσεων u_y σε mm A, B & C συνδυασμών ($\max u_z=454$ mm & $\max u_y= 478$ mm)

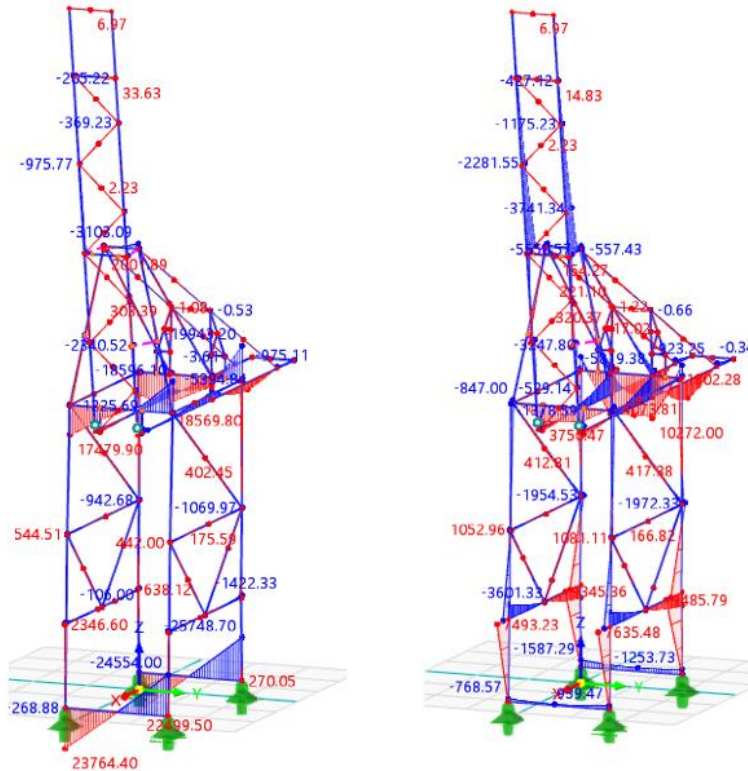
Οι δύο παραμορφωσιακές τιμές αντιστοιχούν σε παραμορφώσεις ίσες με L/180 για τις κατακόρυφες βυθίσεις & L/170 για τις πλευρικές παραμορφώσεις. Είναι γεγονός πως παρατηρούνται αρκετά μεγάλες παραμορφώσεις συγκριτικά με τα συνήθη έργα πολιτικού μηχανικού. Όμως θα πρέπει να τονιστεί πως αυτά τα μεγέθη παρότι αφορούν παραμορφώσεις, προέκυψαν από συνδυασμούς σε ΟΚΑ. Στο πρότυπο EN 13001 δεν καθορίζονται συνδυασμοί λειτουργικότητας. Συνεπώς, η αξιολόγηση των βελών έγινε δυσμενώς βάσει συνδυασμών σε ΟΚΑ. Επιπροσθέτως, στην αξιολόγηση των βελών θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το αρκετά εύκαμπτο στατικά σύστημα του φορέα εν όλω και ιδίως των δοκών κύλισης που πλευρικά πρακτικώς συμπεριφέρεται ως πρόβολος μήκους περίπου 80 m. Όσον αφορά τα κατακόρυφα βέλη, η τιμή 478 mm είναι η μέγιστη που παρατηρείται στην κατασκευή και οφείλεται στη μεγάλη βύθιση που παρουσιάζεται στην άκρη του πρόσθιου τμήματος των δοκών κύλισης. Το τελευταίο τμήμα της δοκού κύλισης που βρίσκεται αμέσως μετά τον κόμβο σύνδεσης δοκών κύλισης - εξωτερικών ελκυστήρων, συμπεριφέρεται ως πρόβολος μήκους 12,5 m. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα βέλη από τον κόμβο σύνδεσης ελκυστήρων-δοκών μέχρι το ακραίο τμήμα να αυξάνονται ραγδαία από 351 mm σε 455,3 mm. Εάν κρινόταν επιθυμητή η μείωση των βελών κατά τον άξονα z, αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με χρήση αντιβέλους, πρακτική που συχνά εφαρμόζεται σε έργα γεφυροποιίας.

6.2.2 Μοντέλο σε κατάσταση εκτός λειτουργίας

Αποτελέσματα συνδυασμού C2 (θύελλα)

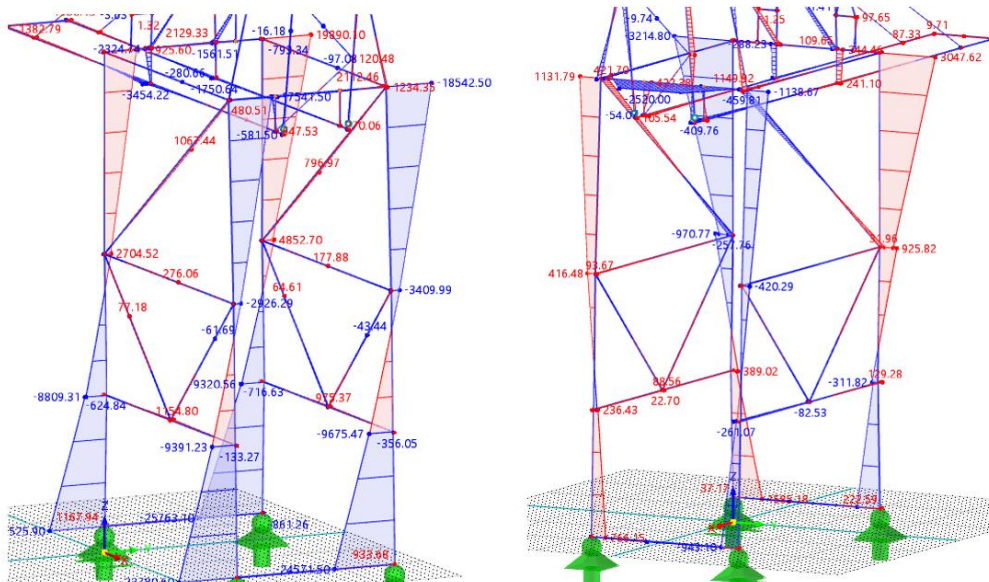


Εικόνα 6-15: Αριστερά & δεξιά N σε kN συνδυασμών C2 για σφοδρές ανεμοφορτίσεις κατά y & x αντίστοιχα (Αριστερά $\max N= 2041$ kN, $\min N=-6221$ kN & δεξιά $\max N= 1666$ kN, $\min N=-3856$ kN)



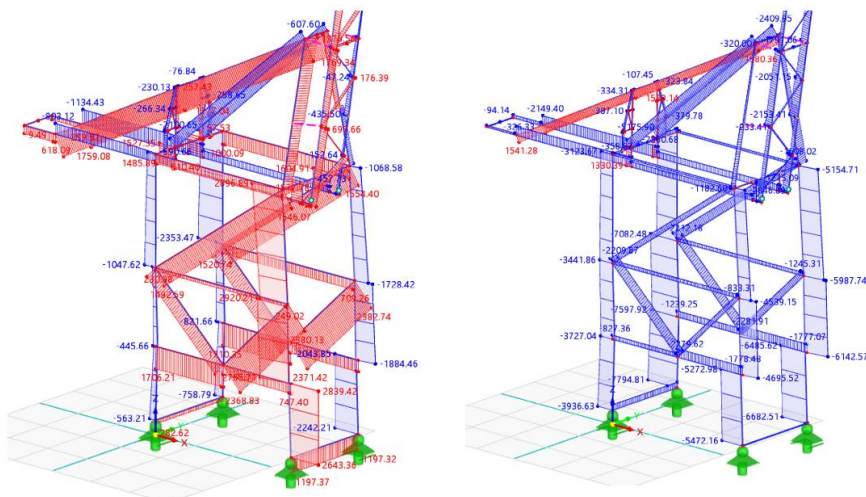
Εικόνα 6-16: Αριστερά & δεξιά M_y σε kNm συνδυασμών C2 για σφοδρές ανεμοφορτίσεις κατά y & x αντίστοιχα
(Αριστερά $\max M_y=23764$ kNm, $\min M_y=-25748$ kNm & δεξιά $\max M_y= 10272$ kNm, $\min M_y=-5819$ kNm)

Τα διαγράμματα καμπτικών ροών εστιάζονται στα υποστυλώματα καθώς εκεί αναπτύσσονται αξιόλογες καμπτικές ροές.

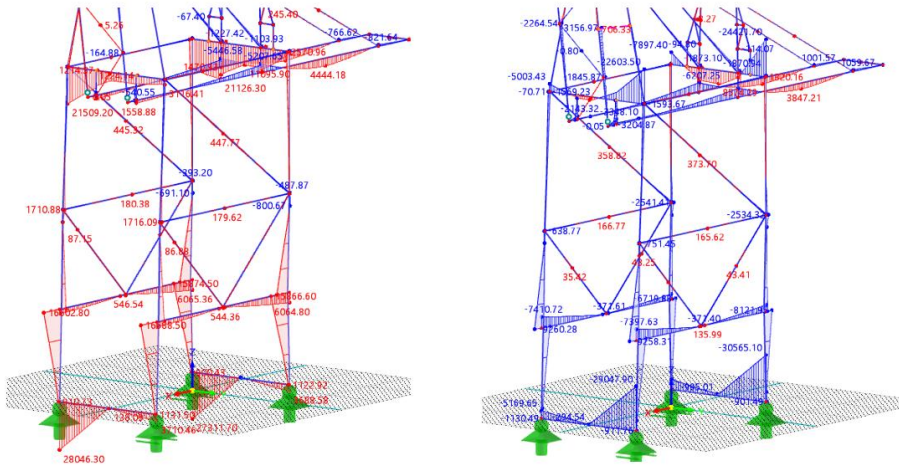


Εικόνα 6-17: Αριστερά & δεξιά M_z σε kNm συνδυασμών C2 κατά y αριστερά & κατά x δεξιά
(Αριστερά $\max M_z=19890$ kNm, $\min M_z=-25763$ kNm & δεξιά $\max M_z= 3047$ kNm, $\min M_z=-3214$ kNm)

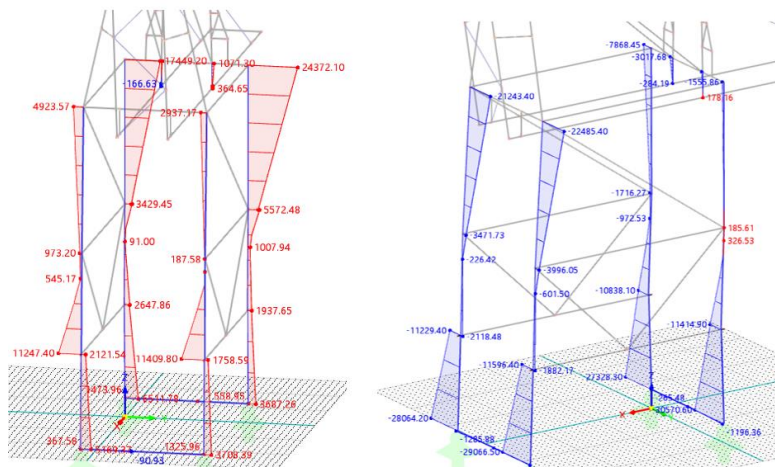
Περιβάλλουσα εκτός λειτουργίας



Εικόνα 6-18: Αριστερά & δεξιά μέγιστες & ελάχιστες N σε kN
(Αριστερά max N= 2920 kN, min N=-2353 kN & δεξιά max N=1599 kN min N=-7794 kN)



Εικόνα 6-19: Αριστερά & δεξιά μέγιστες & ελάχιστες τιμές My σε kNm
(Αριστερά max My=28046 kNm min My=-5446 kNm & δεξιά max My=8574 kNm min My=-30565 kNm)



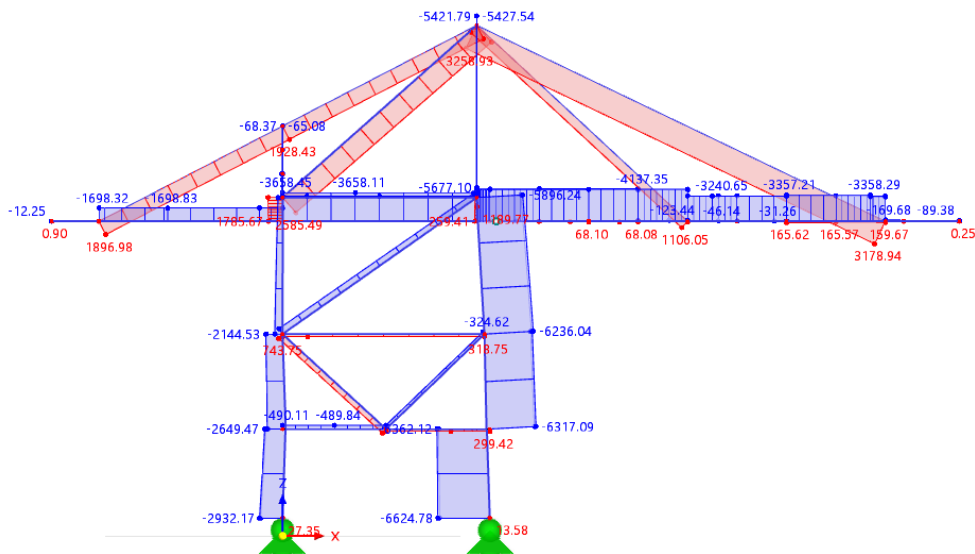
Εικόνα 6-20: Αριστερά & δεξιά μέγιστες & ελάχιστες τιμές Mz σε kNm
(Αριστερά max Mz= 24372 kNm min Mz=-166.3 kNm & δεξιά max Mz= 326 kNm min Mz=-30570 kNm)

6.3 Αποτελέσματα μη γραμμικών αναλύσεων με ατέλειες

6.3.1 Μοντέλο σε κατάσταση λειτουργίας

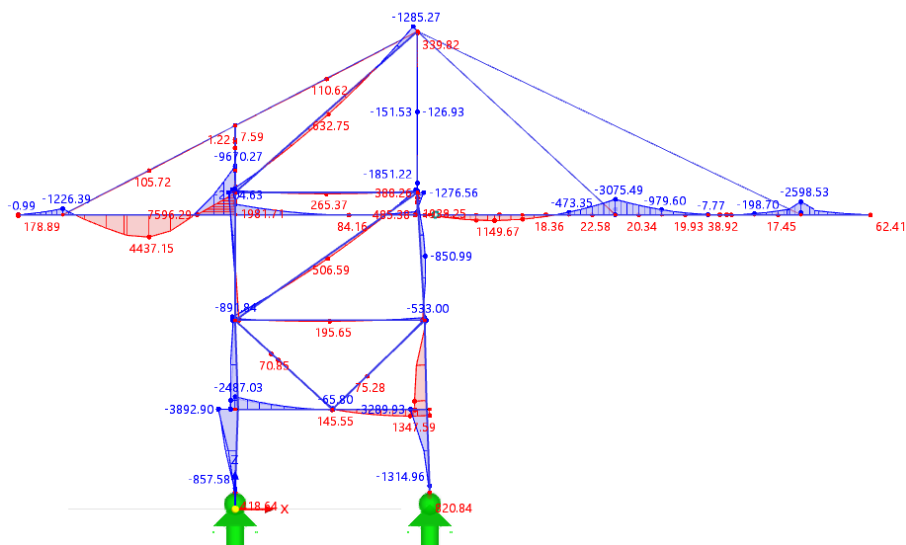
Όπως προαναφέρθηκε, επιβλήθηκαν τοπικές & καθολικές ατέλειες. Εξετάστηκαν διάφοροι συνδυασμοί των 2 ειδών των ατελειών προκειμένου να διαπιστωθεί ποιος συνδυασμός έχει τη δυσμενέστερη επιρροή στις καμπτικές ροπές των μελών του γερανού.

Αποτελέσματα συνδυασμού A1 με τα E/K στη θέση 16

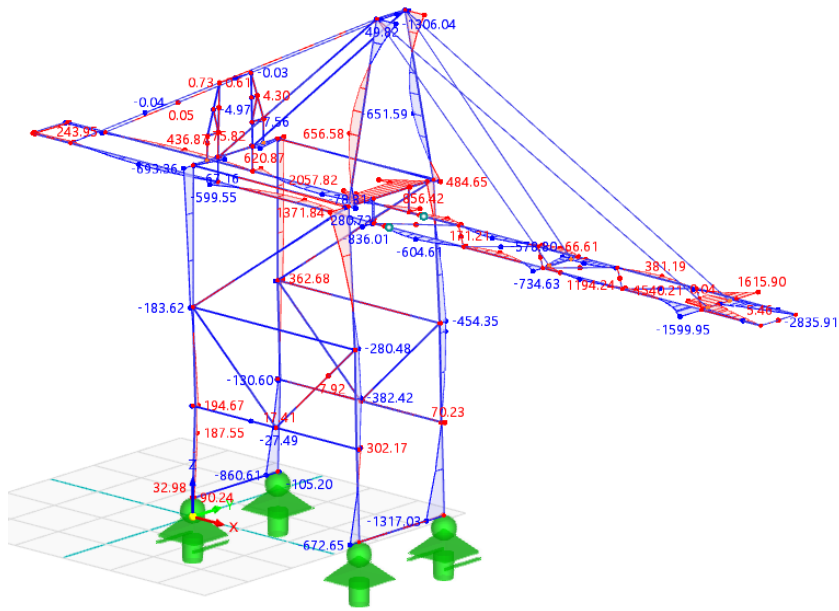


Εικόνα 6-21: Αξονικές δυνάμεις N σε kN (max N= 3258 kN & min N= -6624 kN)

Παρατηρείται μια μικρή αύξηση των αξονικών δυνάμεων σε σχέση με τη γραμμική ανάλυση στην Εικόνα 6-7.



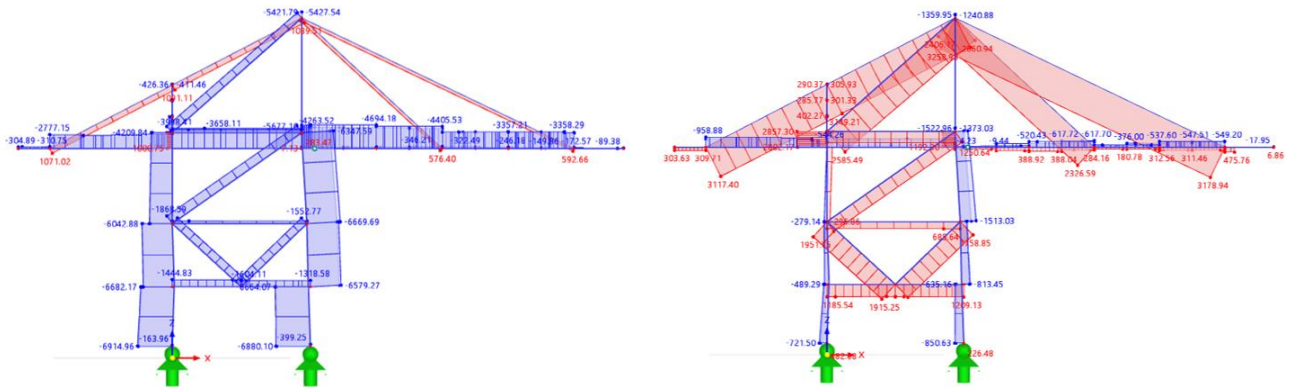
Εικόνα 6-22: Καμπτικές ροπές M_y σε kNm (max $M_y=7596$, min $M_y=-9670$ kNm)



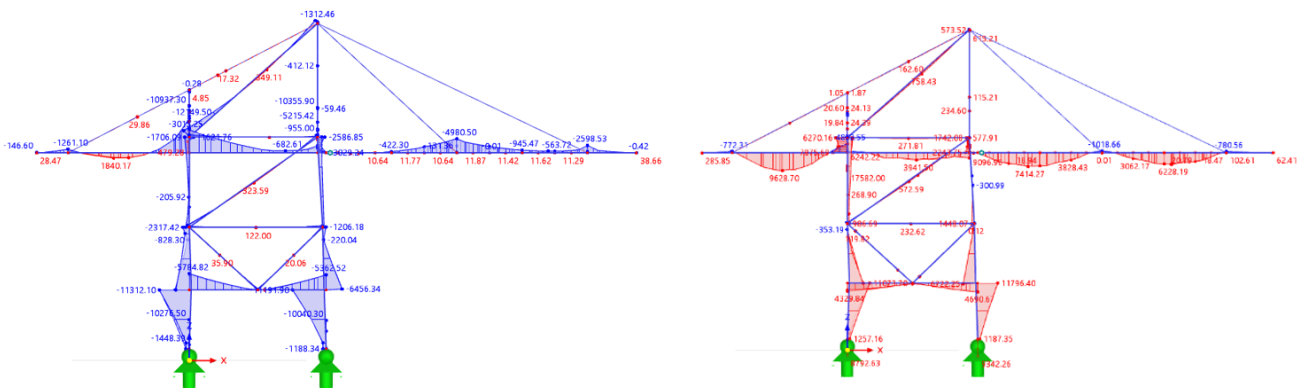
Εικόνα 6-23: Καμπτικές ροπές M_z σε kNm (max $M_z = 2057$ kNm, min $M_z = -2835$ kNm)

Όσον αφορά τις μετακινήσεις κατά τον άξονα z δεν παρουσιάζονται ιδιαίτερες διαφοροποιήσεις σε σχέση με αυτές που φαίνονται στην Εικόνα 6-10.

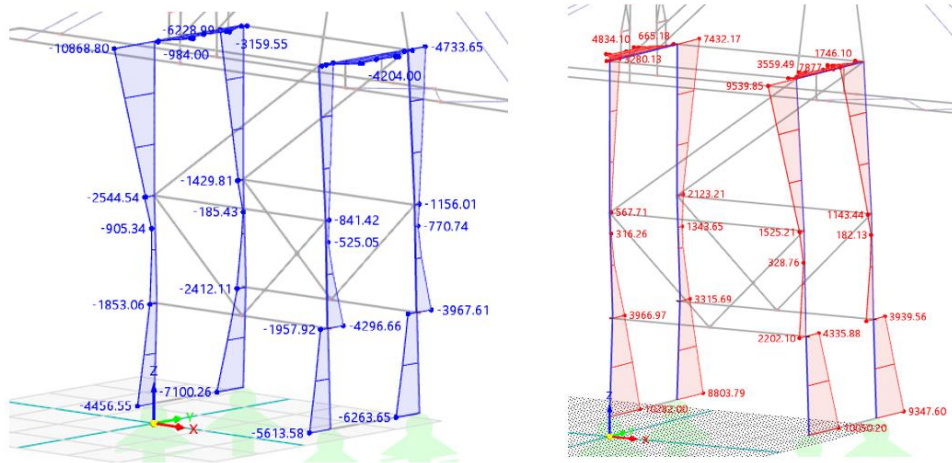
Περιβάλλουσα συνδυασμών A, B & C



Εικόνα 6-24: Αριστερά ελάχιστες & δεξιά μέγιστες τιμές N σε kN.
(Αριστερά min N=-6914 kN & δεξιά max N=3258 kN)

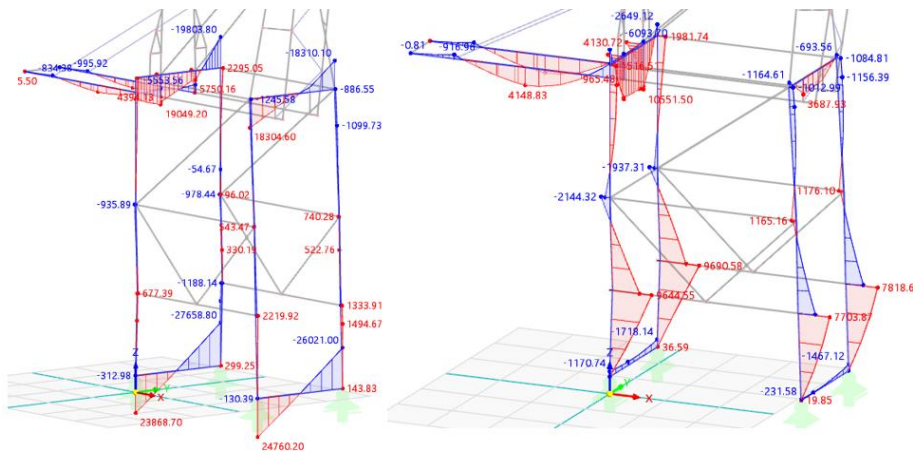


Εικόνα 6-25: Αριστερά ελάχιστες & δεξιά μέγιστες τιμές M_y σε kNm
(Αριστερά min $M_y = -12149$ kNm & δεξιά max $M_y = 17582$ kNm)

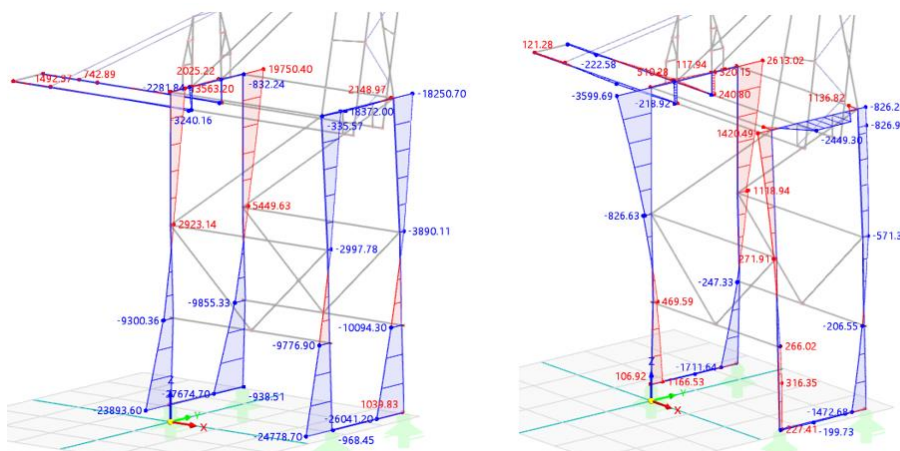


Εικόνα 6-26: Αριστερά ελάχιστες δεξιά μέγιστες τιμές M_z σε kNm.
(Αριστερά $\min M_z = -10868$ kNm & δεξιά $\max M_z = 10282$ kNm)

6.3.2 Μοντέλο σε κατάσταση εκτός λειτουργίας

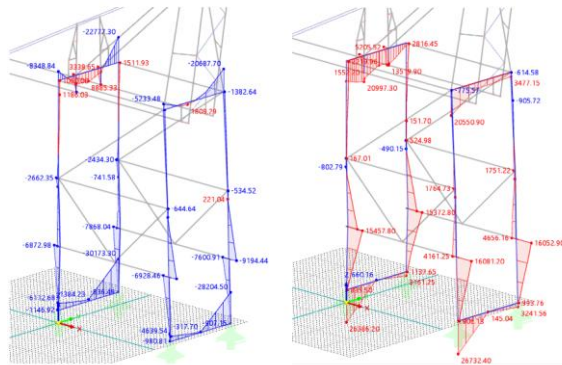


Εικόνα 6-27: M_y για άνεμο στις διευθύνσεις y & x συνδυασμού C2 αριστερά & δεξιά αντίστοιχα
(Αριστερά $\max M_y = 24760$ kNm, $\min M_y = -27668$ kNm & δεξιά $\max M_y = 10551$ kNm, $\min M_y = -6093$ kNm)

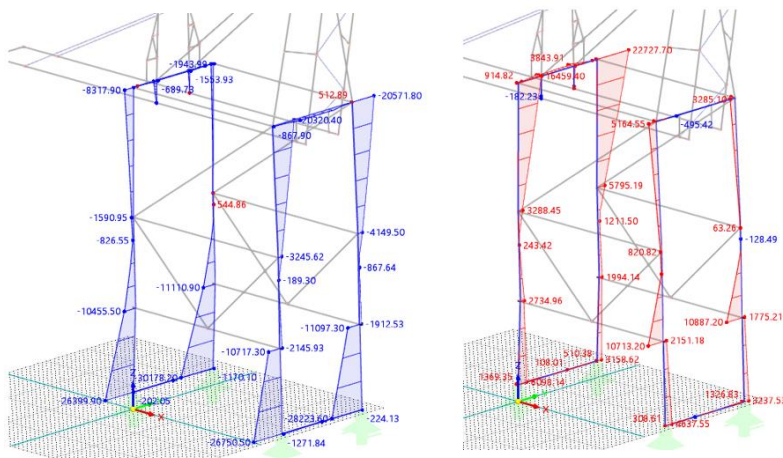


Εικόνα 6-28: M_z για άνεμο στις διευθύνσεις y & x συνδυασμού C2 αριστερά & δεξιά αντίστοιχα
(Αριστερά $\max M_z = 19750$ kNm, $\min M_z = -27674$ kNm & δεξιά $\max M_z = 2613$ kNm, $\min M_z = -3599$ kNm)

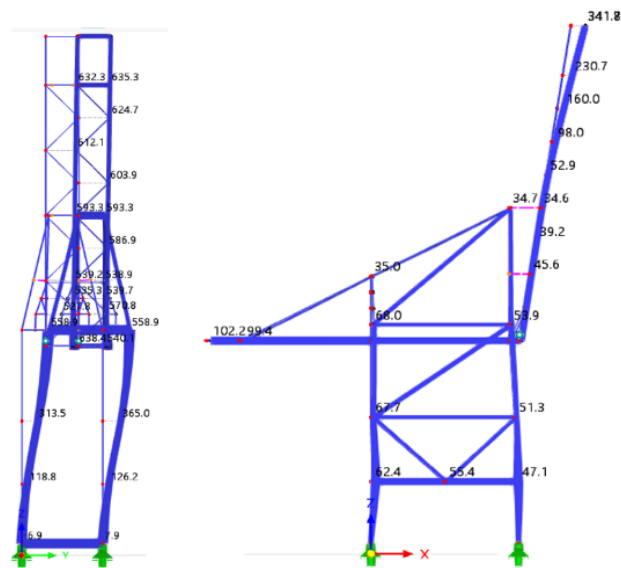
Περιβάλλουσα συνδυασμών εκτός λειτουργίας



Εικόνα 6-29: Αριστερά ελάχιστες & δεξιά μέγιστες τιμές M_y σε kNm (Αριστερά $\min M_y = -30173$ kNm & δεξιά $\max M_y = 26732$ kNm)



Εικόνα 6-30: Αριστερά ελάχιστες & δεξιά μέγιστες τιμές M_z σε kNm ($\min M_z = -30178$ kNm & δεξιά $\max M_z = 22727$ kNm)



Εικόνα 6-31: Μετακινήσεις u_y & u_x σε mm αριστερά και δεξιά αντίστοιχα για σφοδρές ανεμοφορτίσεις συνδυασμού C2 κατά τις 2 διευθύνσεις ($\max u_y = 653$ mm & $u_x = 341,2$ mm)

Παρατηρούνται αρκετά μεγάλα βέλη λόγω των σφοδρών ανεμοφορτίσεων κυρίως κατά τον άξονα γ . Αυτό συμβαίνει αφενός λόγω των ιδιαίτερα υψηλών ταχυτήτων ανεμοθύελλας που θεωρήθηκαν στην υποενότητα 4.4.2 αφετέρου λόγω του αδύναμου στατικού συστήματος του φορέα ειδικά κατά τη διεύθυνση γ . Στην συγκεκριμένη διεύθυνση τα 4 υποστυλώματα μήκους 57 m ενώνονται μεταξύ τους με οριζόντιες δοκούς μονάχα στην κορυφή και στη βάση τους, χωρίς κανένα άλλο μέλος να συνδέει τα 2 αυτά μέλη. Κατά τη συγκεκριμένη διάσταση θα πρέπει να μην παρεμβάλλεται κάποιο ενδιάμεσο εμπόδιο λόγω της απαίτησης για ανεμπόδιστη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων.

Στη σφοδρή ανεμοφόρτιση -περιόδου επαναφοράς 50 ετών- κατά τον άξονα γ στην κορυφή του πλαισίου των υποστυλωμάτων η μετακίνηση στη διεύθυνση γ ισούται με περίπου 559 mm, τιμή που αντιστοιχεί σε σχεδόν L/100. Στην περίπτωση που θεωρηθούν οι συγκεκριμένες μετακινήσεις μη αποδεκτές θα μπορούσε να διερευνηθεί η δυνατότητα αύξησης των αδρανειακών χαρακτηριστικών υποστυλωμάτων, αλλά η συγκεκριμένη ενέργεια χρήζει περαιτέρω διερεύνησης, δεδομένου ότι η αύξηση των εξωτερικών διαστάσεων των μελών συνεπάγεται την αύξηση της προσήνεμης επιφάνειας άρα και των φορτίων ανέμου.

6.4 Ιδιομορφικές αναλύσεις

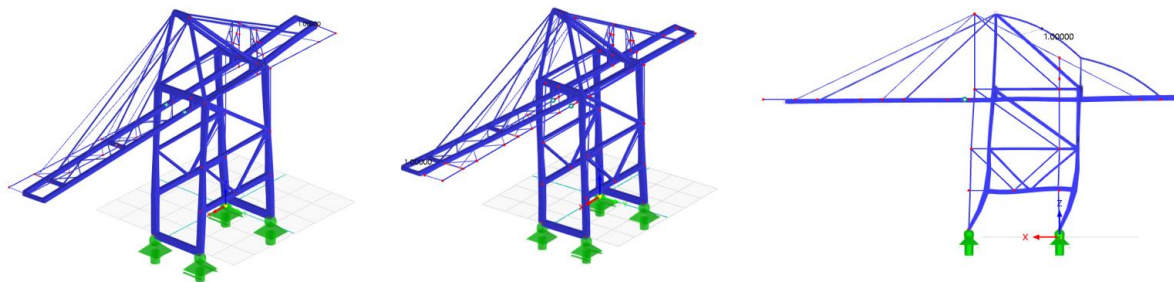
Ενεργοποιήθηκε η εύρεση των 25 πρώτων ιδιομορφών του φορέα τόσο στο εντός λειτουργίας όσο και στο εκτός λειτουργίας μοντέλο. Πέραν της δεδομένης διαφορετικής γεωμετρίας των 2 μοντέλων παρουσιάζεται διαφοροποίηση και στις σεισμικές μάζες που συμμετέχουν στην ιδιομορφική ανάλυση. Στο εντός λειτουργίας μοντέλο το φορτίο οφειλόμενο στο βάρος του φορείου και των εμπορευματοκιβωτίων εξετάστηκε σε 3 σημεία, στις θέσεις 1, 10 & 16 ενώ στο εκτός λειτουργίας μοντέλο τέθηκε μόνο το φορτίο του φορείου & του μέσου μεταφοράς στη θέση 1, καθώς αυτή κρίθηκε ως η θέση που αυτά τοποθετούνται όταν ο γερανός δε λειτουργεί.

Ιδιομορφές μοντέλου σε κατάσταση λειτουργίας

Πίνακας 6-1: 10 πρώτες ιδιοπερίοδοι και ποσοστά ιδιομορφικών μαζών

Αριθμός ιδιομορφής	T (s)	Ποσοστό ιδιομορφικής μάζας κατά x (%)	Ποσοστό ιδιομορφικής μάζας κατά γ (%)
1	3,83	0,00	24,72
2	3,22	0,00	56,07
3	1,35	92,99	0,00
4	1,31	0,01	4,77
5	0,97	0,13	0,00
6	0,85	0,00	0,11
7	0,85	0,00	0,00
8	0,85	0,00	0,03
9	0,85	0,07	0,00
10	0,83	0,00	0,00
Άθροισμα (%)		93,2	85,7

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα μέχρι την 10^η ιδιομορφή έχει ενεργοποιηθεί το 93,2% της μάζας κατά τη διεύθυνση x αλλά το 85,7% κατά τη διεύθυνση γ , ποσοστό χαμηλότερο του 90%. Για το λόγο αυτό, ενεργοποιήθηκαν 25 ιδιομορφές και έτσι το απαιτούμενο ποσοστό για την εύρεση των σεισμικών φορτίων με την εφαρμογή της μεθόδου της επαλληλίας των ιδιομορφών ικανοποιήθηκε. Παρατίθενται οι πρώτες 3 ιδιομορφές του γερανού.



Εικόνα 6-32: 3 πρώτες ιδιομορφές

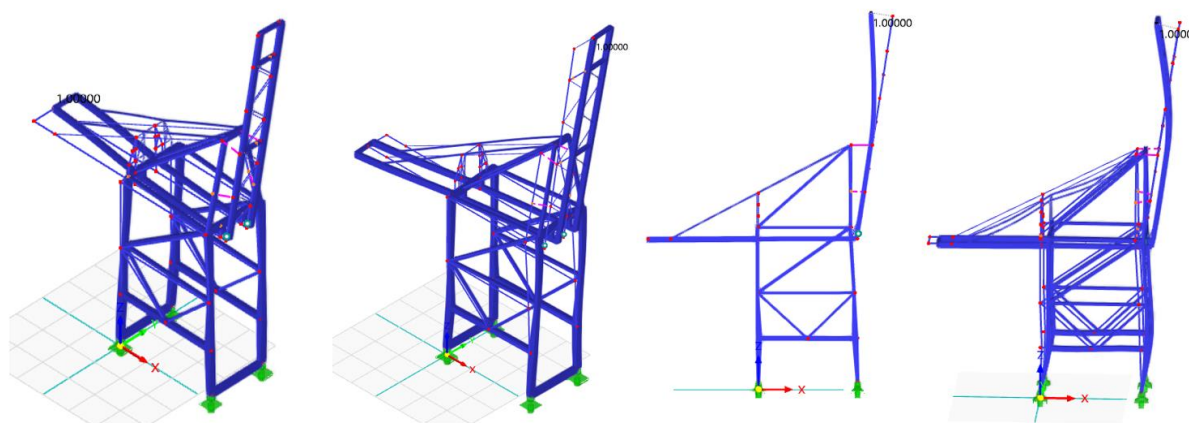
(αριστερά) 1^η ιδιομορφή 3,83 s, (κέντρο) 2^η ιδιομορφή 3,22 s & (δεξιά) 3^η ιδιομορφή 1,35 s

Ιδιομορφές μοντέλου σε κατάσταση εκτός λειτουργίας

Πίνακας 6-2: 10 πρώτες ιδιοπερίοδοι και ποσοστά ιδιομορφικών μαζών

Αριθμός ιδιομορφής	T (s)	Ποσοστό ιδιομορφικής μάζας κατά x (%)	Ποσοστό ιδιομορφικής μάζας κατά y (%)
1	3,34	0,00	61,41
2	2,29	0,00	22,01
3	1,63	25,55	0,00
4	1,18	67,14	0,00
5	0,96	0,00	0,81
6	0,85	0,00	0,06
7	0,85	0,00	0,00
8	0,85	0,13	0,00
9	0,85	0,00	0,06
10	0,80	0,05	0,00
Άθροισμα		92,9	84,4

Όμοια με προηγούμενως, ενεργοποιήθηκαν 25 ιδιομορφές και παρατηρήθηκε πως οριακά συμπληρώθηκε το ποσοστό του 90% για τη μάζα στη διεύθυνση y.



Εικόνα 6-33: 4 πρώτες ιδιομορφές μοντέλου στην κατάσταση εκτός λειτουργίας (μέτρηση ιδιομορφών από τα αριστερά προς τα δεξιά) 1^η ιδιομορφή 3,34 s, 2^η ιδιομορφή 2,29 s, 3^η ιδιομορφή 1,63 s & 4^η ιδιομορφή 1,18 s

6.5 Διαπιστώσεις από τις γραμμικές και μη γραμμικές αναλύσεις με αρχικές ατέλειες

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των γεωμετρικά μη γραμμικών αναλύσεων με αρχικές ατέλειες παρατηρήθηκε μια αύξηση των καμπτικών ροπών στα περισσότερα μέλη. Γενικώς, με την προσθήκη τοπικών & καθολικών ατελειών εμφανίζεται αύξηση της τιμής των M_y & M_z όταν τα μέλη εντείνονται σημαντικά αξονικά, καθώς για τις τοπικές ατέλειες, το εφαρμοζόμενο φορτίο κάθετο στο διαμήκη άξονα του κάθε μέλους, αλλά και τα 2 επικόμβια φορτία εξαρτώνται από τη δρώσα αξονική δύναμη N_{Ed} όπως εξηγείται στην υποενότητα 5.4.2. Ένα παράδειγμα που αναδεικνύει το βαθμό της επίδρασης της αξονικής δύναμης N_{Ed} αποτελούν τα 2 κεκλιμένα μέλη στο πρόσθιο τμήμα του γερανού (ομάδα 10) στην Εικόνα 4-14. Πρόκειται για μέλη τα οποία κατά τις γραμμικές αναλύσεις δείχθηκε πως αναπτύσσουν μέγιστη θλίψη ίση με περίπου 5300 kN με σχεδόν μηδενική ανάπτυξη καμπτικών ροπών στην κατάσταση λειτουργίας. Η μη γραμμική ανάλυση με αρχικές ατέλειες έδειξε ότι λόγω κυρίως της προσθήκης των ατελειών τύπου bow, η καμπτική ροπή M_z για το συνδυασμό που εξετάστηκε στην Εικόνα 6-7 από αμελητέα λαμβάνει πλέον τιμή περί τα 650 kNm. Σε μέλη που δεν καταπονούνται ιδιαίτερα από αξονικές δυνάμεις δεν παρατηρείται αξιόλογη αύξηση των ροπών.

Η επίδραση των καθολικών ατελειών κρίνεται ως μικρή. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο σχετικά μεγάλο ύψος των υποστυλωμάτων (57 m). Το μεγάλο αυτό ύψος επηρεάζει αρκετά το μέγεθος του συγκεκριμένου τύπου ατελειών καθώς ο συντελεστής a_H εξαρτάται άμεσα από το ύψος. Όσο πιο μεγάλο το ύψος, τόσο μειώνεται η τιμή του συγκεκριμένου συντελεστή. Στις παλαιότερες διατάξεις του EN 1993-1-1 επιβαλλόταν το κατώτατο όριο 2/3 του συντελεστή. Όμως, βάσει των νέων διατάξεων δεν προβλέπεται κάτω φράγμα στο συντελεστή, με αποτέλεσμα να προκύψουν αρκετά μικρότερες τιμές γωνίας φ όπως αυτές στην υποενότητα 5.4.2.

Τέλος, η επιρροή της γεωμετρικά μη γραμμικής ανάλυσης με αρχικές ατέλειες προσαυξάνει τις καμπτικές ροπές αλλά η συγκεκριμένη προσαύξηση δεν κρίνεται ως ιδιαίτερα σημαντική και καταλυτική.

7 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΛΩΝ ΚΑΙ ΛΟΙΠΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ

7.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο καλύπτονται οι κανονιστικοί έλεγχοι επάρκειας διατομών, μελών αλλά & ευστάθειας. Η διαστασιολόγηση του φορέα έγινε με χρήση των κανονισμών EN 13001-3-1:2012, του FprEN 1993-1-1:2022, του EN 1993-1-5:2006 & EN 1993-1-1:2005. Θα πρέπει να αναφερθεί πως στο πρότυπο EN 15011:2011 δεν προβλέπεται κάποια ειδικότερη διάταξη για τον έλεγχο επάρκειας διατομών & μελών. Η διαστασιολόγηση του φορέα έγινε με 2 διαφορετικές μεθόδους. Τέλος, στην υποενότητα 7.4 του συγκεκριμένου κεφαλαίου ο γερανός ελέγχεται έναντι ανατροπής.

7.2 Μεθοδολογία & τυπολόγιο ελέγχου επάρκειας διατομών και μελών

Η 1^η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η συνηθέστερη που ακολουθείται στη διαστασιολόγηση μεταλλικών κατασκευών κατά την οποία τα εντατικά μεγέθη προέκυψαν με απλή στατική ανάλυση 1^{ης} τάξης (geometrically & material linear). Στη συνέχεια, με γνωστή την εντατική κατάσταση πραγματοποιήθηκε έλεγχος διατομών, δηλαδή έλεγχος σε ορθές, διατμητικές & von Mises τάσεις κατά το πρότυπο EN 13001-3-1:2012. Τέλος, καθορίστηκαν τα μήκη λυγισμού και ελέγχθηκε η επάρκεια μελών.

Η 2^η μέθοδος που ακολουθήθηκε είναι η μέθοδος M5 όπως αυτή ορίζεται στο κανονιστικό κείμενο FprEN 1993-1-1:2022. Κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο εάν:

- ληφθούν υπόψη όλα τα εντός & εκτός επιπέδου φαινόμενα 2^{ας} τάξης, συμπεριλαμβανομένων και των στρεπτικών φαινομένων
- συμπεριληφθούν οι καθολικές αλλά και οι τοπικές ατέλειες στην ανάλυση του φορέα
- τα εντατικά μεγέθη προσδιοριστούν λαμβανομένων υπόψη και των φαινομένων 2^{ας} τάξεως
- τεθεί ο συντελεστής γ_{M1} στη θέση του γ_{M0}

τότε: είναι δυνατό να παραλειφθεί ο έλεγχος μελών κατά την παράγραφο 8.3 του FprEN 1993-1-1:2022.

Η τελευταία εκ των 2 μεθόδων παρουσιάζει το σημαντικό πλεονέκτημα της δυνατότητας απαλλαγής από ελέγχους μελών. Οι συγκεκριμένοι έλεγχοι απαιτούν τον καθορισμό μηκών λυγισμού, ο οποίος ενέχει αρκετές αβεβαιότητες λόγω του αρκετά ασυνήθιστου στατικού συστήματος.

7.2.1 Έλεγχοι διατομών

Κατά την παράγραφο 5.3 του EN 13001-3-1:2012, σε κάθε υπό μελέτη μέλος θα πρέπει να ικανοποιείται η Εξ.(7-1).

$$\sigma_{Sd} \leq f_{Rd\sigma} \quad \& \quad \tau_{Sd} \leq f_{Rd\tau} \quad (7-1)$$

όπου

σ_{Sd} & τ_{Sd} οι τάσεις σχεδιασμού, αντί των οποίων θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τάσεις von Mises

$f_{Rd,\sigma}$ & $f_{Rd,\tau}$ οι οριακές τάσεις σχεδιασμού, αντί των οποίων όταν ο έλεγχος πραγματοποιείται με τις von Mises τάσεις τίθεται το όριο $f_{Rd,\sigma}$.

Στην περίπτωση ύπαρξης τάσεων $\sigma_{Sd,x}$ & $\sigma_{Sd,y}$ και μη χρησιμοποίησης von Mises τάσεων θα πρέπει επιπρόσθετα να δειχθεί:

$$\left(\frac{\sigma_{Sd,x}}{f_{Rd\sigma,x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{Sd,y}}{f_{Rd\sigma,y}}\right)^2 - \frac{\sigma_{Sd,x} * \sigma_{Sd,y}}{f_{Rd\sigma,x} * f_{Rd\sigma,y}} + \left(\frac{\tau_{Sd}}{f_{Rd\tau}}\right)^2 \leq 1 \quad (7-2)$$

Οι οριακές τάσεις σχεδιασμού θα πρέπει να υπολογίζονται βάσει:

$$f_{Rd} = f(f_k, \gamma_R) \quad \text{ή} \quad F_{Rd} = f(F_R, \gamma_R)$$

όπου

f_k ή F_k : οι χαρακτηριστικές τιμές

γ_R : ο συνολικός συντελεστής αντίστασης υπολογιζόμενος ως το γινόμενο του γενικού συντελεστή αντίστασης $\gamma_m = 1,1$ με τον ειδικό συντελεστή αντίστασης γ_s .

Ειδικότερα, όσον αφορά τις ορθές & διατμητικές τάσεις θα πρέπει να υπολογίζονται βάσει της Εξ.(7.3)

$$f_{Rd\sigma} = \frac{f_y}{\gamma_{Rm}} \quad \& \quad f_{Rd\tau} = \frac{f_y}{\gamma_{Rm} * \sqrt{3}} \quad (7-3)$$

όπου

γ_{Rm} : το γινόμενο του γενικού συντελεστή αντίστασης $\gamma_m = 1,1$ με τον ειδικό συντελεστή αντίστασης γ_{sm} .

Ο ειδικός συντελεστής αντίστασης υλικού γ_{sm} προκύπτει σύμφωνα με τα παρακάτω:

– για μη ελασμένους χάλυβες $\gamma_{sm} = 0,95$.

Για ελασμένα υλικά:

– $\gamma_{sm} = 0,95$ στο επίπεδο της έλασης

– $\gamma_{sm} = 0,95$ για θλιπτικές & διατμητικές τάσεις

– $\gamma_{sm} = 1,0$ για πάχη μικρότερα από 15 mm ή ποιότητας υλικού κατηγορίας Z25 & υψηλότερης σύμφωνα με το πρότυπο EN 10164:2004

– $\gamma_{sm} = 1,16$ για ποιότητα υλικού κατηγορίας Z15 σύμφωνα με το πρότυπο EN 10164:2004

- $\gamma_{sm}=1,34$ για υλικά χωρίς κατηγοριοποίηση ποιότητας σύμφωνα με το πρότυπο EN 10164:2004 αλλά υπό την προϋπόθεση συμμόρφωσης στις απαιτήσεις της κατηγορίας S2 & E3 του προτύπου EN 10160:1999
- $\gamma_{sm}=1,50$ για υλικά χωρίς κατηγοριοποίηση ποιότητας μέσω του πάχους των ελασμάτων.

Πλακοειδής απόσχιση

Η πλακοειδής απόσχιση είναι δυνατόν να συμβεί κατά την εφελκυστική καταπόνηση ενός ελάσματος κατά την έννοια του πάχους, φαινόμενο οφειλόμενο στη διαδικασία παραγωγής του χάλυβα που συνδέεται με την ανάπτυξη ρωγμών κατά την ανάπτυξη υψηλών, εγκάρσιων εφελκυστικών τάσεων και την ύπαρξη συγκολλησεων. Η τάση των ελασμάτων προς πλακοειδή απόσχιση ελέγχεται με δοκιμή υπερήχων. Για να αποφευχθεί το συγκεκριμένο φαινόμενο επιλέγεται η κατάλληλη μεταλλουργική σύνθεση του χάλυβα (Βάγιας κ.α., 2016). Επιλέχθηκε υλικό S355J2+N+Z25, άρα σύμφωνα με τα παραπάνω ο κατάλληλος συντελεστής είναι $\gamma_{sm}=1,0$.

7.2.2 Έλεγχος έναντι τοπικού λυγισμού μη ενισχυμένων μελών

Ο έλεγχος διατομών είναι κατ' ουσία έλεγχος τάσεων απαιτώντας έτσι ο χάλυβας να παραμένει στην ελαστική περιοχή. Αυτή η απαίτηση είναι ανεξάρτητη της κατηγοριοποίησης των διατομών στις κατηγορίες 1 έως 4 βάσει των οποίων κατά EN 1993-1-1 καθορίζεται το αν θα πραγματοποιηθούν ελαστικοί ή πλαστικοί έλεγχοι. Ωστόσο, η κατηγοριοποίηση των διατομών πραγματοποιήθηκε προκειμένου να διαπιστωθεί η κατηγορία των μελών, με σκοπό να ελεγχθεί εάν οι διατομές είναι ικανές να αναπτύξουν το όριο διαρροής του χάλυβα f_y . Συγκεκριμένα ελέγχθηκε αν οι διατομές ανήκουν στην κατηγορία 3 ή 4 όπως αυτές ορίζονται στον EN 1993-1-1 σύμφωνα με την Εικόνα 7-1.

Internal compression parts			
Key 1 Axis of bending			
	Part subject to bending	Part subject to compression	Part subject to bending and axial force
Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 1	$c/t \leq 72 \epsilon$	$c/t \leq 28 \epsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{126 \epsilon}{5,5 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36 \epsilon}{\alpha_c}$
Class 2	$c/t \leq 83 \epsilon$	$c/t \leq 34 \epsilon$	when $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{188 \epsilon}{6,53 \alpha_c - 1}$ when $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5 \epsilon}{\alpha_c}$
Stress distribution in parts (compression positive)			
Class 3	$c/t \leq 121 \epsilon$	$c/t \leq 38 \epsilon$	when $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{38 \epsilon}{0,608 + 0,343 \psi + 0,049 \psi^2}$ when $\psi \leq -1^a$: $\frac{c}{t} \leq 60,5 \epsilon (1 - \psi)$

Εικόνα 7-1: Κατηγοριοποίηση διατομών σύμφωνα με το λόγο c/t

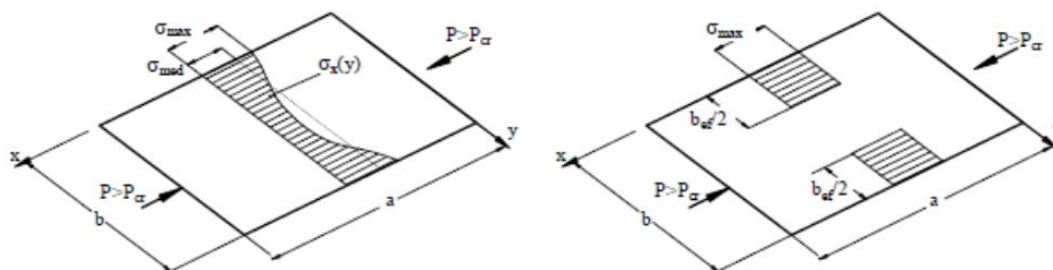
Στην κατασκευή χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά κλειστές συγκολλητές ορθογωνικές διατομές με αρκετά μεγάλους λόγους c/t . Έτσι, πολλές κατατάχθηκαν ως κατηγορία 4 με αποτέλεσμα να καταστεί αδύνατο για τις διατομές αυτές να προσεγγίσουν το όριο διαρροής του υλικού, καθώς θα είχε προηγηθεί κύρτωση, δηλαδή τοπικός λυγισμός. Ο τοπικός λυγισμός συνδέεται με παραμορφώσεις εκτός επιπέδου, λόγω των οποίων τα φαινόμενα του κορμού ή πελμάτων της διατομής έχουν πλακοειδή συμπεριφορά.

Παραδείγματος χάρη, η αρνητική ροπή μιας κιβωτοειδούς διατομής μιας σύμμικτης γέφυρας προκαλεί θλιπτικές τάσεις εντός επιπέδου στο κάτω πέλμα του κιβωτίου με συνέπεια την ανάπτυξη εκτός επιπέδου παραμορφώσεων. (Βάγιας κ.α., 2016). Έτσι, προς αποφυγή αυτού του φαινομένου διατάχθηκαν τόσο διαμήκεις όσο και εγκάρσιες ενισχύσεις στα περισσότερα μέλη του γερανού, όπως θα φανεί στη συνέχεια. Στα λοιπά μήκη τέθηκαν μόνο εγκάρσιες ενισχύσεις ανά αραιές αποστάσεις. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του συγκεκριμένου κεφαλαίου χρησιμοποιήθηκαν οι διατάξεις του EN 1993-1-5:2006 που αφορούν τον έλεγχο σε κύρτωση. Επειδή ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε τόσο σε μέλη με διαμήκεις ενισχύσεις όσο και χωρίς, χρησιμοποιήθηκαν και οι 2 μέθοδοι που προτείνει το εν λόγω μέρος του Ευρωκώδικα 3. Στους κορμούς των μη διαμήκως ενισχυμένων μελών πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της αντοχής διατμητικής κύρτωσης χ_w .

Η μέθοδος ενεργού πλάτους εφαρμόζεται υπό τις ακόλουθες 5 προϋποθέσεις:

- τα φαντώματα είναι ορθογωνικά
- τα πέλματα είναι παράλληλα
- δεν υπάρχουν λοξές ενισχύσεις
- η διάμετρος πιθανής μη ενισχυμένης οπής δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει το 5% του πλάτους του φαντώματος
- δε συμβαίνει κύρτωση προερχόμενη από τα πέλματα.

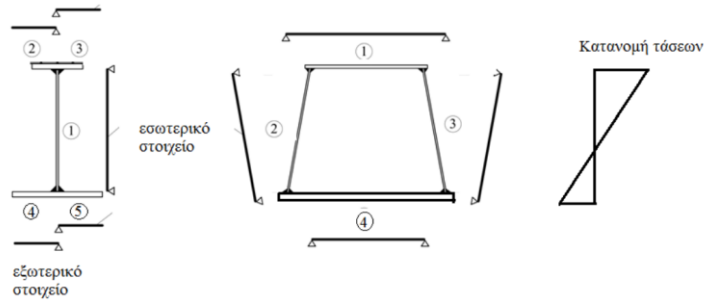
Η κατανομή των τάσεων μιας αρχικά θλιβόμενης πλάκας δεν παραμένει σταθερή μετά την κύρτωση, δηλαδή πραγματοποιείται μια ανακατανομή τάσεων από τις εύκαμπτες προς τις δύσκαμπτες περιοχές του φαντώματος. Έτσι, η ανομοιόμορφη κατανομή αντικαθίσταται από μια ομοιόμορφη κατανομή αλλά σε ένα μειωμένο πλάτος b_{eff} με την περιοχή $b-b_{eff}$ να θεωρείται ανενεργή.



Εικόνα 7-2: Ανομοιόμορφη κατανομή τάσεων σε πλάτος b & κατανομή τάσεων σε περιοχές πλάτους $b_{eff}/2$

(από Βάγιας κ.α., 2016)

Για τον υπολογισμό του ενεργού πλάτους b_{eff} αρχικά τα επιμέρους φαντώματα κάθε διατομής κατατάσσονται σε εσωτερικά & εξωτερικά σύμφωνα με την Εικόνα 7-3. Όπως προαναφέρθηκε το σύνολο των διατομών του γερανού είναι κλειστές διατομές, συνεπώς όλα τα στοιχεία κατατάχθηκαν ως εσωτερικά.



Εικόνα 7-3: Κατάταξη φατνωμάτων σε εσωτερικά & εξωτερικά

(από Βάγιας κ.α., 2016)

Με γνωστή την κατανομή των τάσεων από το λογισμικό RFEM 6 που εκφράζεται με το συντελεστή $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ αναλόγως του εάν το φάτνωμα είναι εσωτερικό ή εξωτερικό, υπολογίζεται η τιμή του συντελεστή k_σ , ώστε να προσδιοριστεί στη συνέχεια η τιμή της ανηγμένης λυγηρότητας όπως φαίνεται σύμφωνα με την Εξ.(7-4) και τον τελικό συντελεστή ρ .

Πίνακας 7-1: Υπολογισμός συντελεστή k_σ εσωτερικών στοιχείων

Stress distribution (compression positive)			Effective ¹⁾ width b_{eff}			
			$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$			
			$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$			
			$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$			
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} - 1 > \psi \geq -3 \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$
Buckling factor k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{b^* / t}{28,4 \cdot \epsilon^* \cdot \sqrt{k_\sigma}} \tag{7-4}$$

όπου

b^* : το κατάλληλο πλάτος αναλόγως της γεωμετρίας της διατομής σύμφωνα με την παράγραφο 4.4 EN 1993-1-5:2006

ϵ : η παράμετρος υλικού ίση με 0,81 για χάλυβα ποιότητας S355

t : το πάχος του φατνώματος.

- internal compression elements:

$$\rho = 1,0 \quad \text{for } \overline{\lambda}_p \leq 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \psi}$$

$$\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,055 (3 + \psi)}{\overline{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{for } \overline{\lambda}_p > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \psi}$$
- outstand compression elements:

$$\rho = 1,0 \quad \text{for } \overline{\lambda}_p \leq 0,748$$

$$\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,188}{\overline{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \quad \text{for } \overline{\lambda}_p > 0,748$$

Εικόνα 7-4: Υπολογισμός συντελεστή ρ συναρτήσεως της ανηγμένης λυγηρότητας

$$A_{\text{eff}} = \rho * A \quad (7-5)$$

όπου

ρ : ο απομειωτικός συντελεστής εμβαδού

A : το εμβαδό της διατομής.

Βάσει της νέας απομειωμένης διατομής υπολογίζονται τα νέα αδρανειακά χαρακτηριστικά I_{effy} , I_{effz} , W_{effy} & W_{effz} . Όταν το κέντρο βάρους της ενεργού διατομής είναι μετατοπισμένο κατά e_N , αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

7.2.3 Αντοχή τεμνουσών δυνάμεων μη ενισχυμένων μελών κατά τη διαμήκη έννοια

Ο έλεγχος σε τέμνουσα δοκών που δε διαθέτουν διαμήκεις ενισχύσεις έγινε εκτός του RFEM 6. Ο έλεγχος αντοχής σε τέμνουσα προκύπτει σύμφωνα με την Εξ. (7-6). Απλουστευτικά και υπέρ της ασφαλείας ελήφθη υπόψη μόνο η τέμνουσα αντοχής του κορμού. Αρχικά, υπολογίζεται το πηλίκο h_w/t_w και συγκρίνεται με το λόγο $72/\eta * \epsilon$ σύμφωνα με την Εξ. (7-7).

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta * f_{yw} * h_w * t}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}} \quad (7-6)$$

όπου

$V_{bw,Rd}$: η δύναμη αντίστασης σε τέμνουσα του κορμού

$V_{bf,Rd}$: η δύναμη αντίστασης σε τέμνουσα των πελμάτων

η : ο συντελεστής υλικού 1,2 για χάλυβες έως S460 & 1,0 για χάλυβες ανώτερης ποιότητας

f_{yw} : το όριο διαρροής του κορμού

h_w : το ύψος του κορμού

t_w : το πάχος του κορμού.

$$\frac{h_w}{t_w} \leq \frac{72 * \epsilon}{\eta} \quad (7-7)$$

Σε αναλογία με τις ορθές τάσεις υπολογίζεται η ανηγμένη λυγηρότητα διατμητικών τάσεων, όπου για μεγάλη απόσταση εγκάρσιων ενισχύσεων προκύπτει σύμφωνα με την Εξ. (7-8).

$$\overline{\lambda}_w = \frac{b}{86,4 * t * \epsilon} \quad (7-8)$$

Τέλος, βάσει του παρακάτω πίνακα υπολογίστηκε ο συντελεστής χ_w συναρτήσει του όρου $\bar{\lambda}_w$ και των άκαμπτων ή εύκαμπτων ακραίων ενισχύσεων.

Πίνακας 7-2: Καθορισμός συντελεστή χ_w

	Rigid end post	Non-rigid end post
$\bar{\lambda}_w < 0,83/\eta$	η	η
$0,83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83/\bar{\lambda}_w$	$0,83/\bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37/(0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83/\bar{\lambda}_w$

7.2.4 Έλεγχος έναντι κύρτωσης μελών με διαμήκεις ενισχύσεις

Οι n διαμήκεις ενισχύσεις χωρίζουν το ενισχυμένο φάτνωμα σε $n+1$ μη ενισχυμένα υποφατνώματα. Με την τοποθέτηση διαμήκων & εγκάρσιων ενισχύσεων η κρίσιμη τάση των φατνωμάτων αυξάνεται. Υπάρχουν 2 είδη διαμήκων ενισχύσεων, οι ανοιχτές και οι κλειστές. Οι κλειστές ενισχύσεις παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης δυστρεψίας σε σχέση με τις ανοιχτού τύπου ενισχύσεις. Οι εγκάρσιες είναι ισχυρότερες από τις διαμήκεις ενισχύσεις και τοποθετούνται σε απόσταση a μεταξύ τους ενώ έχουν για κατασκευαστικούς λόγους διατομή T διαθέτοντας ανοίγματα, προκειμένου να διέρχονται οι διαμήκεις ενισχύσεις. Ακολουθεί η μεθοδολογία υπολογισμού της επάρκειας έναντι κύρτωσης ενός φατνώματος με πολλές ισαπέχουσες διαμήκεις ενισχύσεις υπό την προϋπόθεση πως ο λόγος των ακραίων τάσεων ψ είναι μεγαλύτερος της μονάδας αλλά και ο λόγος της απόστασης των εγκάρσιων ενισχύσεων προς το πλάτος του υπό μελέτη φατνώματος είναι μεγαλύτερος του 0,5.



Εικόνα 7-5: Φάτνωμα με 3 τραπεζοειδείς ενισχύσεις

Έλεγχος υποφατνωμάτων

Αρχικά, ελέγχεται η κατηγορία των υποφατνωμάτων που ορίζονται μεταξύ των διαμήκων ενισχύσεων. Υπολογίζεται ο λόγος c/t όπου c & t το πλάτος & πάχος του υπό μελέτη υποφατνώματος αντίστοιχα. Ελέγχεται δηλαδή η κατηγορία του για θλίψη. Αν $c/t \leq 38 \cdot \epsilon$ τότε δεν υπάρχει απομείωση αντοχής λόγω κύρτωσης. Στην περίπτωση που δεν ικανοποιείται η παραπάνω ανισότητα τότε θα πρέπει να ακολουθηθεί η εξής διαδικασία.

Υπολογισμός της τάσης αναφοράς

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{b}{t}\right)^2} = 19800 \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (7-9)$$

όπου

ν : ο λόγος Poisson ίσος με 0.3

b : το πλάτος του υποφατνώματος

t : το πάχος του υποφατνώματος.

Έπειτα, υπολογίζεται η κρίσιμη τάση κύρτωσης έναντι ορθών τάσεων.

$$\sigma_{cr,p} = \kappa_{\sigma} \cdot \sigma_e \quad (7-10)$$

όπου

κ_{σ} : ο συντελεστής κύρτωσης έναντι ορθών τάσεων

σ_e : η κρίσιμη τάση κύρτωσης.

Υπολογισμός ανηγμένης λυγηρότητας

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,p}}} \quad (7-11)$$

όπου

f_y : το όριο διαρροής του υλικού

$\sigma_{cr,p}$: η κρίσιμη τάση κύρτωσης.

Απομειωτικός συντελεστής ρ

Για εσωτερικά φατνώματα

$$\rho = 1, \text{ για } \bar{\lambda}_p \leq 0.673 \quad (7-12)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2}, \text{ για } \bar{\lambda}_p > 0,673 \text{ και } (3 + \psi) \geq 0$$

Έλεγχος φατνώματος-συμπεριφορά πλάκας

Όπως προαναφέρθηκε, το υπό μελέτη φάτνωμα έχει 3 διαμήκεις ενισχύσεις. Συνεπώς, ακολουθήθηκε η διαδικασία υπολογισμού που προβλέπει ισαπέχουσες ενισχύσεις που θεωρούνται ως μια ορθότροπη πλάκα.

Αρχικά, υπολογίζεται ο λόγος a που αναφέρθηκε προηγουμένως. Στη συνέχεια, υπολογίζεται το εμβαδό της μη ενισχυμένης πλάκας A_p και των ενισχύσεων ΣA_{sl} αλλά και οι ροπές αδράνειας της ενισχυμένης και μη πλάκας I_{sl} & I_p αντίστοιχα.

Εμβαδό μη ενισχυμένης πλάκας

$$A_p = b \cdot t \quad (7-13)$$

όπου

b : το πλάτος του φατνώματος

t : το πάχος του φατνώματος.

Η ροπή αδράνειας της μη ενισχυμένης πλάκας υπολογίζεται ως εξής:

$$I_p = \frac{b \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = \frac{b \cdot t^3}{10,92} \quad (7-14)$$

Με γνωστά τα παραπάνω μεγέθη υπολογίζονται οι συντελεστές γ & δ σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις.

$$\gamma = \frac{I_{sl}}{I_p} \text{ \& \ } \delta = \frac{\Sigma A_{sl}}{A_p} \quad (7-15)$$

όπου

I_{sl} : η ροπή αδράνειας ενισχυμένης πλάκας

I_p : η ροπή αδράνειας πλάκας.

Έπειτα, υπολογίζεται η τιμή $\kappa_{\sigma,p}$ και η κρίσιμη τάση κύρτωσης.

$$\kappa_{\sigma,p} = \frac{2 \cdot ((1+\alpha^2) + \gamma - 1)}{\alpha^2 \cdot (\psi+1) \cdot (1+\delta)} \quad \text{για } \alpha \leq \sqrt[4]{\gamma} \quad (7-16)$$

$$\kappa_{\sigma,p} = \frac{4 \cdot (1 + \sqrt{\gamma})}{(\psi+1) \cdot (1+\delta)} \quad \text{για } \alpha \geq \sqrt[4]{\gamma}$$

Κρίσιμη τάση κύρτωσης

$$\sigma_{cr,p} = \kappa_{\sigma} \cdot \sigma_e \quad (7-17)$$

Τέλος, υπολογίζεται η ανηγμένη λυγηρότητα και συγκρίνεται με την Εξ. (7-12) όπου και υπολογίζεται ο συντελεστής ρ_ρ .

Συμπεριφορά υποστυλώματος

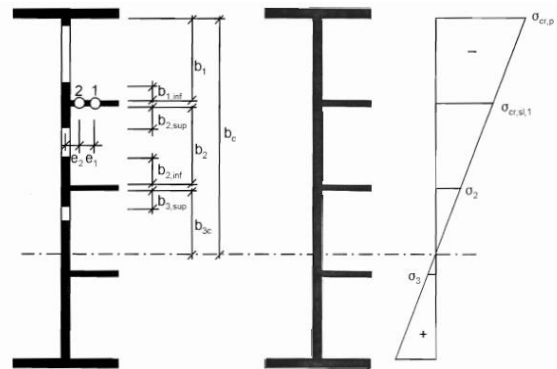
Όταν ο λόγος των πλευρών είναι αρκετά μικρός, δηλαδή $\alpha < 1$ ή όταν η πλάκα διαθέτει ισχυρές διαμήκεις ενισχύσεις, η επιρροή του εγκάρσιου εφελκυσμού δηλαδή της μεταλυγισμικής αντοχής της πλάκας αδυνατίζει σημαντικά. Έτσι, η πλάκα συμπεριφέρεται ως υποστύλωμα, δηλαδή χάνει τις διαμήκεις ενισχύσεις της. (Βάγιας κ.α., 2016)

Ενισχυμένες πλάκες

Η πλέον θλιβόμενη ενίσχυση θεωρείται ως αρθρωτά στηριζόμενη ράβδος υπό θλίψη. Αρχικά υπολογίζεται το εμβαδό $A_{sl,1}$ και η ροπή αδράνειας $I_{sl,1}$ της πλήρους διατομής μιας ενίσχυσης λαμβάνοντας υπόψη συνεργαζόμενη πλάκα σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα και εικόνα.

Πίνακας 7-3: Πλάτη b_1 , b_2 & b_3

	width for gross area	width for effective area according to Table 4.1	condition for ψ_i
$b_{1,inf}$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} b_1$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} b_{1,eff}$	$\psi_1 = \frac{\sigma_{cr,sl,1}}{\sigma_{cr,p}} > 0$
$b_{2,sup}$	$\frac{2}{5-\psi_2} b_2$	$\frac{2}{5-\psi_2} b_{2,eff}$	$\psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,sl,1}} > 0$
$b_{2,inf}$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} b_2$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} b_{2,eff}$	$\psi_2 > 0$
$b_{3,sup}$	$0,4 b_{3c}$	$0,4 b_{3c,eff}$	$\psi_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} < 0$



Εικόνα 7-6: Επεξήγηση συμβολισμών διπλανού πίνακα

Με βάση τα παραπάνω, υπολογίστηκε η τάση Euler της πλέον θλιβόμενης ενίσχυσης θεωρούμενης ως αρθρωτά στηριζόμενη ράβδος υπό θλίψη ως εξής:

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl} \cdot a^2} \quad (7-18)$$

όπου

E: το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

$I_{sl,1}$: η ροπή αδράνειας της διατομής της ενίσχυσης συμπεριλαμβανομένης μιας συνεργαζόμενης πλάκας που καθορίζεται από τα παραπάνω

$A_{sl,1}$: το εμβαδό πλήρους διατομής ενίσχυσης, συμπεριλαμβανομένης μιας συνεργαζόμενης πλάκας που καθορίζεται από τα παραπάνω

a : η απόσταση των εγκάρσιων νευρώσεων.

Υπολογισμός μέγιστης θλιπτικής τάσης

Η τάση $\sigma_{cr,c}$ υπολογίζεται κατά τα παρακάτω.

$$\sigma_{cr,c} = \frac{b_c}{b_{sl,1}} * \sigma_{cr,sl} \quad (7-19)$$

όπου

b_c : η απόσταση του ουδέτερου άξονα από το πλέον θλιβόμενο άκρο του φαντώματος

$b_{sl,1}$: η απόσταση του ουδέτερου άξονα από την ενίσχυση.

Έπειτα, ορίζεται η παράμετρος ξ και η ανηγμένη λυγηρότητα σύμφωνα με τα παρακάτω.

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1 \quad \text{με } 0 \leq \xi \leq 1 \quad (7-20)$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_{A,c} * f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad (7-21)$$

όπου

$\beta_{A,c}$ ο μειωτικός συντελεστής εξαρτώμενος από την κατηγορία των ενισχύσεων. Για κατηγορίες 1,2 & 3 $\beta_{A,c} = 1$, ενώ για ενισχύσεις κατηγορίας 4, $\beta_{A,c} = \frac{A_{sl,1,eff}}{A_{sl,1}}$ με το μέγεθος $A_{sl,1,eff}$ να αφορά την ενεργό διατομή της ενίσχυσης.

Οι υπόλοιποι συμβολισμοί έχουν αναφερθεί προηγουμένως.

Με γνωστή την ανηγμένη λυγηρότητα υπολογίζεται ο συντελεστής Φ κατά τα παρακάτω:

$$\Phi = 0.5 * (1 + \alpha_e * (\bar{\lambda}_c - 0.2)) + \bar{\lambda}_c^2 \quad (7-22)$$

όπου

$\bar{\lambda}_c$: η ανηγμένη λυγηρότητα

α_e : ο συντελεστής καμπύλης λυγισμού που υπολογίζεται ως εξής:

για ενισχυμένες πλάκες

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0.09}{i/e} \quad (7-23)$$

όπου

i : η ακτίνα αδράνειας της πλέον θλιβόμενης ενίσχυσης, υπολογιζόμενη ως εξής:

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl,1}}{A_{sl,1}}} \quad (7-24)$$

e : η ελάχιστη τιμή των αποστάσεων μεταξύ:

- των κ.β. της μεμονωμένης ενίσχυσης και της διατομής υποστυλώματος (ενίσχυση & συνεργαζόμενη πλάκα)
- της απόστασης μεταξύ των κ.β. της πλάκας και της διατομής υποστυλώματος (ενίσχυση & συνεργαζόμενη πλάκα).

Με γνωστή πλέον την τιμή του συντελεστή Φ , υπολογίζεται ο μειωτικός συντελεστής χ_c βάσει των καμπύλων λυγισμού ως εξής:

$$\chi_c = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_c^2}} \leq 1 \quad (7-25)$$

Τέλος, με υπολογισμένες τις τιμές ρ_r , χ_c & ξ υπολογίζεται ο συντελεστής ρ_c , συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη συμπεριφορά υποστυλώματος.

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) * \xi * (2 - \xi) + \chi_c \quad (7-26)$$

Άρα, η τελική αντοχή προκύπτει ως εξής:

$$\sigma_{Rd} = \frac{\rho_c * f_y}{\gamma_{M1}} \quad (7-27)$$

7.2.5 Έλεγχος έναντι διατμητικής κύρτωσης μελών με διαμήκεις ενισχύσεις

Για ενισχυμένες πλάκες ο έλεγχος σε κύρτωση παραλείπεται όταν ικανοποιείται η παρακάτω ανίσωση.

$$\frac{h_w}{t} < 28,5 * \epsilon * \sqrt{k_\tau} \quad (7-28)$$

όπου

h_w : το ύψος κορμού

t : το πάχος κορμού

ϵ : η παράμετρος υλικού ίση με 0,81 για χάλυβα S355

k_τ : ο συντελεστής διατμητικής κύρτωσης, εξαρτώμενος από το λόγο a . Αναλυτικότερα:

$$k_\tau = 5,34 + \frac{4}{\alpha^2} + k_{\tau,st} \quad \text{για } \alpha \geq 1 \quad (7-29)$$

$$k_\tau = 4 + \frac{5,34}{\alpha^2} + k_{\tau,st} \quad \text{για } \alpha \leq 1$$

Ο συντελεστής $k_{\tau,st}$ προκύπτει σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις.

$$k_{\tau,st} = \frac{9}{\alpha^2} * \sqrt[4]{\left(\frac{\sum I_{st}}{t^3 * b}\right)^3} \geq \frac{2,1}{t} * \sqrt[3]{\frac{\sum I_{st}}{b}} \quad \text{για 3 ή περισσότερες ενισχύσεις ή 2 ενισχύσεις & } \alpha \geq 3 \quad (7-30)$$

$$k_{\tau,st} = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 * \sum I_{st}}{a^2} / (t^3 * b) + 2,2 * \sqrt[3]{\frac{\sum I_{st}}{t^3 * b}} \quad \text{για 1 ή 2 ενισχύσεις και } \alpha \leq 3$$

όπου

I_{st} : η ροπή αδράνειας της διατομής μιας ενίσχυσης συμπεριλαμβανομένης μιας συνεργαζόμενης πλάκας επί πλάτους $15 * \epsilon * t$ εκατέρωθεν της ενίσχυσης.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως στη διαστασιολόγηση που ακολουθεί, επιλέχθηκε χάριν απλοποίησης από το σύνολο των μελών που διαθέτουν διαμήκεις ενισχύσεις, να ελεγχθεί έναντι κύρτωσης το φάτνωμα που θεωρήθηκε ως δυσμενέστερο. Στο φάτνωμα που ελέγχθηκε έναντι κύρτωσης, υπολογίστηκε ο συντελεστής ρ_r με τον οποίο μειώθηκε η αντοχή σε ορθές τάσεις. Σχετικά με την επάρκεια έναντι διατμητικής κύρτωσης αποδείχθηκε όπως θα φανεί στη συνέχεια πως δίνεται η δυνατότητα απαλλαγής του ελέγχου. Θα πρέπει να καταστεί σαφές, πως παρότι το φάτνωμα που ελέγχθηκε θεωρήθηκε ως το δυσμενέστερο όλων, σε μια πραγματική μελέτη θα ήταν απαραίτητος ο έλεγχος κάθε φατνώματος και υποφατνώματος του φορέα ώστε να υπάρχει βεβαιότητα αποφυγής του φαινομένου της κύρτωσης.

7.2.6 Έλεγχος μελών

Οι έλεγχοι μελών καλύπτονται στην παράγραφο 8 του EN 13001-3-1:2012. Στο συγκεκριμένο κανονιστικό πρότυπο καλύπτεται μόνο η περίπτωση του καμπτικού λυγισμού. Αναφέρεται πως για άλλα πιθανά φαινόμενα εκδήλωσης λυγισμού, όπως ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός θλιβόμενων μελών ή ο λυγισμός κελυφών, θα πρέπει να αναζητούνται πληροφορίες από τη βιβλιογραφία.

Ο έλεγχος σε καμπτικό λυγισμό καλύπτεται με όμοιο τρόπο όπως στον EN 1993-1-1:2005 με τη διαφορά της διαφορετικής ονομασίας κάποιων συμβόλων. Για το λόγο αυτό τόσο για τον έλεγχο σε καμπτικό λυγισμό όσο όμως και για τους ελέγχους μελών έναντι πλευρικού-στρεπτικού λυγισμού θα ακολουθηθεί η διαδικασία όπως προβλέπεται στο κανονιστικό κείμενο EN 1993-1-1:2005.

Καμπτικός λυγισμός

Αρχικά βάσει του L_{cr} ανά εξεταζόμενη διεύθυνση, της ακτίνας αδράνειας i και της ποιότητας του υλικού υπολογίζεται η ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}$. Στη συνέχεια, επιλέγεται η κατάλληλη καμπύλη λυγισμού. Τέλος, ακολουθεί ο υπολογισμός του συντελεστή χ είτε αναλυτικά είτε γραφικά με χρήση του διαγράμματος στην Εικόνα 7-9.

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd} \quad \text{με} \quad N_{b,Rd} = \begin{cases} \frac{\chi \cdot f_y \cdot A}{\gamma_{M1}} & \text{για διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3} \\ \frac{\chi \cdot f_y \cdot A_{eff}}{\gamma_{M1}} & \text{για διατομές κατηγορίας 4} \end{cases}$$

$$\text{Μειωτικός συντελεστής λυγισμού: } \chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad \text{με} \quad \Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

Ο συντελεστής στελαιών α που αντιστοιχεί στην ανάλογη καμπύλη λυγισμού θα λαμβάνεται από τον ακόλουθο πίνακα (EN1993-1-1 Πίν. 8.2).

Καμπύλη λυγισμού	a ₀	a	b	c	d
Συντελεστής στελαιών α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 1, 2, 3}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{\sqrt{A_{eff}/A}}{\lambda_1} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 4}$$

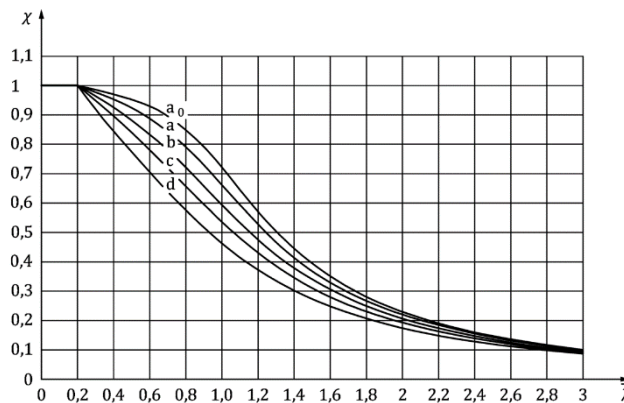
$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{cr}^2} \quad \lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \cdot \epsilon \quad \epsilon = \sqrt{235/f_y} \quad i = \sqrt{I/A}$$

Αν $\bar{\lambda} \leq 0,2$ ή $N_{Ed}/N_{cr} \leq 0,04$ δε χρειάζεται έλεγχος έναντι καμπτικού λυγισμού

Εικόνα 7-7: Τυπολόγιο ελέγχου έναντι καμπτικού λυγισμού

Διατομή	Όριο	Λυγισμός περί τον άξονα	Καμπύλη λυγισμού	Σ460 έως και Σ700	
Ελαστές Διατομές		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$ $z-z$	a	a ₀
		$h/b \leq 1,2$	$t_f > 40 \text{ mm}$ $t_f \leq 100 \text{ mm}$ $z-z$	b c	a b
Συγκολλητές T-διατομές		$t_f \leq 40 \text{ mm}$	$y-y$ $z-z$	b c	b c
		$t_f > 40 \text{ mm}$	$y-y$ $z-z$	c d	c d
Καλές Διατομές		Εν θερμό ελαση		Κάθε	a
		Ψυχρή ελαση		Κάθε	c
Συγκολλητές αβλαβείς Διατομές		Γενικά (εκτός των κατωτέρω)		Κάθε	b
		Μεγάλα πάχη ραφής: $a > 0,5 \cdot t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$		Κάθε	c
U-, T- και ομογενείς Διατομές				Κάθε	c
L-διατομές		Ελαστές		Κάθε	b
		Συγκολλητές		Κάθε	c

Εικόνα 7-8: Επιλογή καμπύλης λυγισμού



Εικόνα 7-9: Καμπύλες λυγισμού

7.2.7 Αντοχή μελών έναντι πλευρικού-στρεπτικού λυγισμού

Όμοια με τον καμπτικό λυγισμό, η αντοχή υπολογίζεται μέσω ενός μειωτικού συντελεστή χ_{LT} . Αρχικά, γίνεται κατάταξη της διατομής για να διαπιστωθεί σε ποια από τις 4 κατηγορίες ανήκει. Οι πρώτες 2 κατηγορίες επιτρέπουν τον πλαστικό σχεδιασμό δηλαδή τη θεώρηση του W_{pl} σε αντίθεση με την κατηγορία 3, κάτι το οποίο δεν είναι επιτρεπτό. Στις διατομές κατηγορίας 4 θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ενεργά (effective) της χαρακτηριστικά. Στη συγκεκριμένη μελέτη στην ουσία έγινε έλεγχος, ώστε να διαπιστωθεί εάν οι διατομές ανήκουν στην κατηγορία 3 ή 4 και όχι στην κατηγορία 1 ή 2 καθώς ο σχεδιασμός απαιτείται να είναι ελαστικός. Μετά την επιλογή της κατάλληλης καμπύλης λυγισμού υπολογίζεται η ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}_{LT}$ αφού προηγηθεί ο υπολογισμός της κρίσιμης ροπής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού. Θα πρέπει να σημειωθεί πως αν $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,2$ ή $M_{Ed}/M_{cr} \leq 0,04$ δε χρειάζεται έλεγχος έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, αλλά και ότι κλειστές διατομές πρότυπες ή συγκολλητές μπορεί να θεωρηθεί εξ' ορισμού πως είναι μη ευπαθείς έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού, κάτι που επιβεβαιώθηκε και από τα αποτελέσματα του λογισμικού.

$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$$

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot f_y \cdot W_y}{\gamma_{M1}}$$

Κατηγορία	1 ή 2	3	4
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$

$$\text{Μειωτικός συντελεστής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού: } \chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1,0$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

Ο συντελεστής σταθερών α_{LT} που αντιστοιχεί στην ανάλογη καμπύλη λυγισμού θα λαμβάνεται από τον ακόλουθο πίνακα (EN1993-1-1 Πίν. 8.2).

Καμπύλη λυγισμού	a	b	c	d
Συντελεστής σταθερών α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Επιλογή καμπύλης λυγισμού (EN1993-1-1 Πίν. 8.4):

Διατομή	Όρια	Καμπύλη λυγισμού
Ελατές διατομές I	$h/b_{min} \leq 2$	a
	$h/b_{min} > 2$	b
Συγκολλητές διατομές I	$h/b_{min} \leq 2$	c
	$h/b_{min} > 2$	d
b_{min} : πλάτος μικρότερου πέλματος, ανεξάρτητα αν θλίβεται ή εφελκύεται		
Άλλες διατομές	-	d

Ανηγμένη λυγηρότητα:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{W_y \cdot f_y / M_{cr}}$$

Εικόνα 7-10: Τυπολόγιο ελέγχου έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού

Όπως θα αποδειχθεί και στη συνέχεια, κρίσιμος ήταν ο έλεγχος σε ταυτόχρονη θλίψη & κάμψη περί τους 2 άξονες, έλεγχος που πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την παράγραφο 8.3.3 του EN 1993-1-1:2005. Οι συντελεστές αλληλεπίδρασης k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} & k_{zz} υπολογίζονται σύμφωνα με τους ακόλουθους πίνακες.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

Εικόνα 7-11: Ανισώσεις ελέγχου

Πίνακας 7-4: Επιλογή A, W_y, W_z & ΔM_y & ΔM_z

Κατηγορία	1	2	3	4
A _i	A	A	A	A _{eff}
W _y	W _{pl,y}	W _{pl,y}	W _{el,y}	W _{eff,y}
W _z	W _{pl,z}	W _{pl,z}	W _{el,z}	W _{eff,z}
ΔM _{y,Ed}	0	0	0	e _{N,y} · N _{Ed}
ΔM _{z,Ed}	0	0	0	e _{N,z} · N _{Ed}

Πίνακας 7-5: Συντελεστές αλληλεπίδρασης

Πλαστικές ιδιότητες διατομής Κατηγορία 1, 2 ή 3 (με ελαστοπλαστικό W _{εφ})	Ελαστικές ιδιότητες διατομής Κατηγορία 3 (με W _{ελ}) ή 4
Για $\bar{\lambda}_y < 1,0$: $k_{yy} = C_{my} \cdot [1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \eta_y]$	Για $\bar{\lambda}_y < 1,0$: $k_{yy} = C_{my} \cdot [1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \cdot \eta_y]$
Για $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$: $k_{yy} = C_{my} \cdot [1 + 0,8 \cdot \eta_y]$	Για $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$: $k_{yy} = C_{my} \cdot [1 + 0,6 \cdot \eta_y]$
$k_{yz} = 0,6 \cdot k_{zz}$ (βλ. Πίν. 8.8)	$k_{yz} = k_{zz}$ (βλ. Πίν. 8.8)

Πίνακας 7-6: Συντελεστές ισοδ. ροής

Διάγραμμα ροής	Περιοχή	C _{my} και C _{mz} και C _{ηLT}	
		Ομοιόμορφο φορτίο	Συγκεντρωμένο φορτίο
ψM	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4 \cdot \psi \geq 0,4$	
ψM_h $\alpha_s = M_s / M_h$	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8 \cdot \alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8 \cdot \alpha_s \geq 0,4$
ψM_h $\alpha_h = M_h / M_s$	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi < 0$	$0,1 \cdot (1 - \psi) - 0,8 \cdot \alpha_h \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$-0,2 \cdot \psi - 0,8 \cdot \alpha_h \geq 0,4$
	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05 \cdot \alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,90 + 0,10 \cdot \alpha_h$
	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05 \cdot \alpha_h \cdot (1 + 2 \cdot \psi)$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$-1 \leq \psi < 0$	$0,90 - 0,10 \cdot \alpha_h \cdot (1 + 2 \cdot \psi)$

Για μέλη με λυγισμό από μετάθεση ο συντελεστής ισοδύναμης ομοιόμορφης ροής πρέπει να λαμβάνεται C_{my} = 0,9 ή C_{mz} = 0,9 αντίστοιχα.
Τα C_{my}, C_{mz} και C_{ηLT} πρέπει να λαμβάνονται σύμφωνα με το διάγραμμα ροών μεταξύ των αντίστοιχων πλευρικά στρεφόμενων σημείων ως εξής:

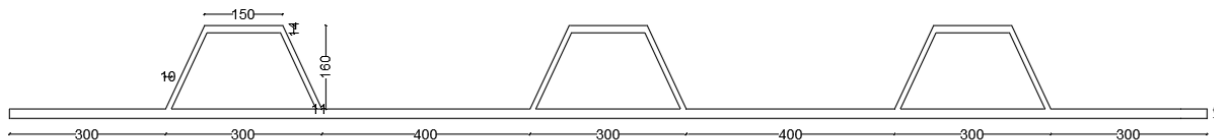
συντελεστής ροής	άξονας κάμψης	σημεία εσφαλίζόμενα κατά τη διεύθυνση
C _{my}	y-y	z-z
C _{mz}	z-z	y-y
C _{ηLT}	y-y	y-y

Πίνακας 7-7: Συντελεστές αλληλεπίδρασης

Συντελεστές αλληλεπίδρασης	Τύπος διατομών	Πλαστικές ιδιότητες διατομής Κατηγορία 1, 2 ή 3 (με ελαστοπλαστικό W _{εφ})	Ελαστικές ιδιότητες διατομής Κατηγορία 3 (με W _{ελ}) ή 4
k _{xy}	μη ευπαθείς έναντι ΣΚΛ	$k_{xy} = 0,6 \cdot k_{yy}$ (βλ. Πίν. 8.7)	$k_{xy} = 0,8 \cdot k_{yy}$ (βλ. Πίν. 8.7)
	ευπαθείς έναντι ΣΚΛ	Για $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{xy} = 1 - \frac{0,1 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \eta_z}{C_{ηLT} - 0,25}$ Αλλά: $k_{xy} \leq 0,6 + \bar{\lambda}_z$ για $\bar{\lambda}_z < 0,4$ Για $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{xy} = 1 - \frac{0,1 \cdot \eta_z}{C_{ηLT} - 0,25}$	Για $\bar{\lambda}_y < 1,0$: $k_{xy} = 1 - \frac{0,05 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \eta_z}{C_{ηLT} - 0,25}$ Για $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$: $k_{xy} = 1 - \frac{0,05 \cdot \eta_z}{C_{ηLT} - 0,25}$
k _{yz}	διατομές I	Για $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{yz} = C_{mz} \cdot [1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \eta_z]$ Για $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{yz} = C_{mz} \cdot (1 + 1,4 \cdot \eta_z)$	Για $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{yz} = C_{mz} \cdot (1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \eta_z)$ Για $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{yz} = C_{mz} \cdot (1 + 0,6 \cdot \eta_z)$
	κοίλες κυκλικές, ορθογωνικές ή ελλειπτικές διατομές	Για $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{yz} = C_{mz} \cdot [1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot \eta_z]$ Για $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{yz} = C_{mz} \cdot (1 + 0,8 \cdot \eta_z)$	Για $\bar{\lambda}_z < 1,0$: $k_{yz} = C_{mz} \cdot (1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_z \cdot \eta_z)$ Για $\bar{\lambda}_z \geq 1,0$: $k_{yz} = C_{mz} \cdot (1 + 0,6 \cdot \eta_z)$

Έλεγχος σε κύρτωση δυσμενέστερου φατνώματος

Χάρην απλοποίησης, λόγω των αρκετών διαφορετικών φατνωμάτων στο μεταλλικό γερανό, ελέγχθηκε το δυσμενέστερο φάτνωμα που φαίνεται στην Εικόνα 7-12 για ομοιόμορφη θλίψη. Θεωρήθηκαν τραπεζοειδείς ενισχύσεις ύψους 160 mm με τους κορμούς να έχουν πάχος 10 mm και το άνω πέλμα να έχει πάχος 14 mm. Όπως θα φανεί και στις διατομές παρακάτω οι διαμήκειες ενισχύσεις δεν τοποθετήθηκαν σε απόσταση μεγαλύτερη των 400 mm.



Εικόνα 7-12: Φάτνωμα ελέγχου

Έλεγχος κάτω πέλματος μεταξύ τραπεζοειδών ενισχύσεων:

$$\frac{b}{t} = 10,7 < 38 * \varepsilon = 22,2 \quad (\text{δεν είναι κατηγορίας 4})$$

Έλεγχος άνω πέλματος τραπεζοειδών ενισχύσεων:

$$b = 145 \text{ mm}, \text{ πάχος } 14 \text{ mm}$$

$$\frac{b}{t} = 10,7 < 38 * \varepsilon = 30,78 \quad (\text{δεν είναι κατηγορίας 4})$$

Έλεγχος κορμού τραπεζοειδών ενισχύσεων:

$$\frac{b}{t} = 17,6 < 38 * \varepsilon = 22,2 \quad (\text{δεν είναι κατηγορίας 4})$$

Συνεπώς, $\rho = 1$.

Συμπεριφορά ορθότροπης πλάκας (η διαδικασία υπολογισμού περιγράφεται στην υποενότητα 7.2.4).

Πίνακας 7-8: Έλεγχος συμπεριφοράς πλάκας (μέρος Α')

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Μειωτικός συντελεστής	ρ	1,0	-
Εμβαδό πλάκας χωρίς ενισχύσεις	A_p	41400	mm ²
Εμβαδό ενισχύσεων	A_{sl}	16250	mm ²
Συνολικό εμβαδό	A	57650	mm ²
Κέντρο βάρους πλάκας+ενισχύσεων	e_x	41,2	mm
Ροπή αδράνειας πλάκας + ενισχύσεων	I_x	195759544	mm ⁴
		19576,0	cm ⁴
Ροπή αδράνειας πλάκας χωρίς ενισχύσεις	I_p	1228352	mm ⁴
		122,84	cm ⁴
Συντελεστής	ψ	1,00	-
Συντελεστής	γ	159,4	-
Συντελεστής	δ	0,39	-
Λόγος	a	1500	mm
Πλάτος φατνώματος	b	2300	mm
Λόγος απόστασης εγκάρσιων ενισχύσεων προς μήκος φατνώματος	a	0,65	-
Μέγεθος	$\gamma^{0,25}$	3,55	-
Συντελεστής κύρτωσης	$K_{\sigma,p}$	270,8	-
Τάση αναφοράς	$\sigma_{r,E}$	1,16	kN/cm ²

Πίνακας 7-9: Έλεγχος συμπεριφοράς πλάκας (μέρος Β')

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Κρίσιμη τάση κύρτωσης	$\sigma_{cr,p}$	315,2	kN/cm ²
Μειωτικός συντελεστής	$\beta_{A,c}$	1,0	-
Ανηγγμένη λυγηρότητα	$\bar{\lambda}_p$	0,336	-
Συντελεστής	ρ_p	1,0	-

Άρα, ο μειωτικός συντελεστής ρ_p συμπεριφοράς πλάκας ισούται με 1.

Συμπεριφορά υποστυλώματος

Πίνακας 7-10: Έλεγχος συμπεριφοράς υποστυλώματος

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Λόγος τάσεων	ψ_1	1	-
	ψ_2	1	-
Πλάτη συνεργαζόμενης πλάκας εκατέρωθεν κορμών ενισχύσεων	$b_{1,inf}$	20	cm
	$b_{2,inf}$	17,5	cm
Πλάτος συνεργαζόμενης πλάκας	b_{eff}	75	cm
Εμβαδό συνολικής διατομής ενίσχυσης	A_{sl}	170	cm ²
Ακτίνα αδράνειας	i	6	cm
Τάση Euler ενίσχυσης	$\sigma_{cr,sl}$	317	kN/cm ²
Κρίσιμη τάση λυγισμού φατνώματος	$\sigma_{cr,c}$	339	kN/cm ²
Κρίσιμη τάση κύρτωσης	$\sigma_{cr,p}$	315	kN/cm ²
Ανηγγμένη λυγηρότητα	λ_c	0,32	-
Μήκος e	e	5,1	cm
Συντελεστής ατελειών	a_e	0,48	-
Συντελεστής	Φ	0,57	-
Μειωτικός συντελεστής	χ_c	0,97	-
Συντελεστής	ξ	0,04	cm
Συνολικός μειωτικός συντελεστής	ρ_c	0,97	-

Έλεγχος σε διατμητική κύρτωση ενισχυμένων δοκών

Πίνακας 7-11: Έλεγχος σε διατμητική κύρτωση ενισχυμένων δοκών

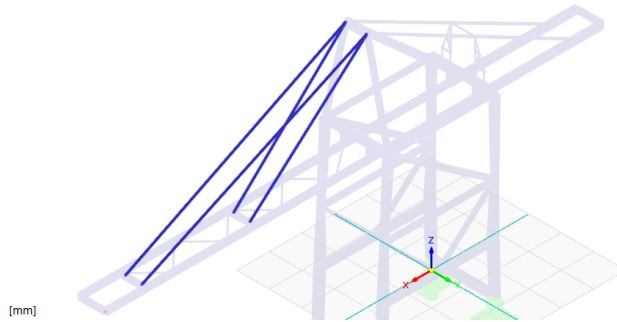
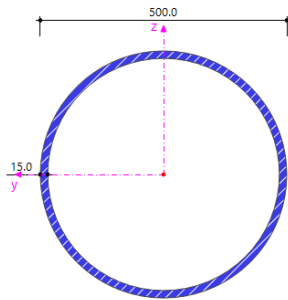
Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Πλάτος εκατέρωθεν ενίσχυσης	$15 \cdot \epsilon \cdot t$	21,9	cm
Ροπή αδράνειας ενίσχυσης	I_{st}	5641	cm ⁴
Συνολική ροπή αδράνειας ενισχύσεων	ΣI_{st}	16922	cm ⁴
Λόγος	α	0,7	-
Συντελεστής	$K_{r,st}$	141,6	-
Συντελεστής διατμητικής κύρτωσης	k_T	158	-
Ύψος κορμού	h_w	2300,0	-
Πάχος κορμού	t_w	18,0	-
Λόγος κορμού προς πάχος	h_w/t_w	127,8	-
Έλεγχος για κύρτωση	$31 \cdot \epsilon \cdot k_T^{1/2}$	263,2	-

7.3 Διαστασιολόγηση φορέα πλην κόπωσης

7.3.1 Ελκυστήρες πρόσθιου τμήματος

Στο πρόσθιο τμήμα της δοκού κύλισης θεωρήθηκαν ίδιες διατομές και για τους 2 ελκυστήρες. Όπως προαναφέρθηκε προσομοιώθηκαν ως στοιχεία που παραλαμβάνουν μόνο αξονική δύναμη. Παρ' όλα αυτά, επειδή οι ελκυστήρες δεν είναι κατακόρυφοι αλλά υπό κλίση, παρουσιάζεται κάμψη λόγω του ίδιου βάρους τους. Θεωρήθηκε πως το μεγαλύτερο τμήμα των ελκυστήρων έχει μήκος 30 m.

Ελκυστήρας πρόσθιου τμήματος δοκού κύλισης



Εικόνα 7-13: Διατομή ελκυστήρα σε mm

Εικόνα 7-14: Ελκυστήρες πρόσθιου τμήματος

Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του μεγαλύτερου ελκυστήρα και της οριζόντιας δοκού κύλισης είναι 25,3°.

Χρησιμοποιήθηκε κυκλική διατομή 500x15.

Βάρος ανά μέτρο μήκους διατομής: $W=179,6 \text{ kg/m}$

Καμπτική ροπή συνιστώσας του ίδιου βάρους της διατομής κάθετη στο διαμήκη άξονα του μέλους: $M=162,0 \text{ kNm}$

Ελαστική ροπή αντίστασης διατομής: $W_{el,y}=2689,98 \text{ cm}^3$

Τάσεις προερχόμενες από την κάμψη της διατομής στις ακραίες ίνες:

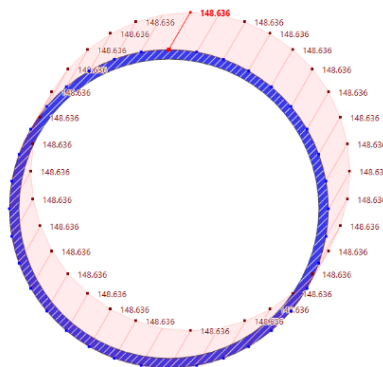
$$\sigma = \pm \frac{M}{W} = \pm \frac{162 \cdot 100 \text{ kNmcm}}{2689,98 \text{ cm}^3} = \pm 6,02 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = \pm 60,2 \text{ MPa}$$

1^ο σενάριο ελέγχου

Το 1^ο σενάριο ελέγχου αφορά τον έλεγχο για το συνδυασμό που παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες εφελκυστικές τάσεις στις οποίες προστίθενται και οι τάσεις λόγω της κάμψης.

Από το λογισμικό RFEM 6 προκύπτει μέγιστη σταθερή εφελκυστική ορθή τάση ίση με 148,6 MPa.

Επειδή για το συγκεκριμένο συνδυασμό το ίδιο βάρος του γερανού είναι πολλαπλασιασμένο με $\phi_1 \cdot 1,22 = 1,34$, τότε και οι τάσεις πολλαπλασιάζονται με τον ίδιο αριθμό, δηλαδή γίνονται $\pm 80,26 \text{ MPa}$.



Εικόνα 7-15: Εφελκυστικές τάσεις ελκυστήρα σε MPa (δίχως την κάμψη λόγω ι.β.)

Άρα, η τάση της κάτω ίνας προκύπτει ως εξής:

$$\text{Κάτω ίνα: } \sigma_u = 148,6 \text{ MPa} + 80,3 \text{ MPa} = 228,9 \text{ MPa} < 355 \text{ MPa} / 1,1 = 322,7 \text{ MPa (71\%)}$$

2^ο σενάριο ελέγχου

Στο σενάριο αυτό δεν ελέγχεται η μέγιστη τιμή των τάσεων αλλά η ελάχιστη. Τούτο συμβαίνει καθώς κρίνεται σκόπιμο να διαπιστωθεί για την ελάχιστη εφελκυστική τάση της κάτω ίνας, δηλαδή για το συνδυασμό που εμφανίζεται ο ελάχιστος εφελκυσμός, ποια είναι η τιμή της μέγιστης θλιπτικής τάσης της άνω ίνας.

Γενικώς η τάση μειώνεται σημαντικά όταν το φορείο με τα E/K βρίσκεται στο πίσω τμήμα της δοκού κύλισης. Η ελάχιστη εφελκυστική τάση στον υπό μελέτη ελκυστήρα είναι ίση με 27,3 MPa.

Για το συνδυασμό εκείνο, το ίδιο βάρος πολλαπλασιάζεται με 0,855 άρα $0,855 * 60,2 = 51,5 \text{ MPa}$

Άρα, οι ακραίες τάσεις προκύπτουν ως εξής:

$$\text{Άνω ίνα: } \sigma_o = 27,3 \text{ MPa} - 51,5 \text{ MPa} = -24,2 \text{ MPa}$$

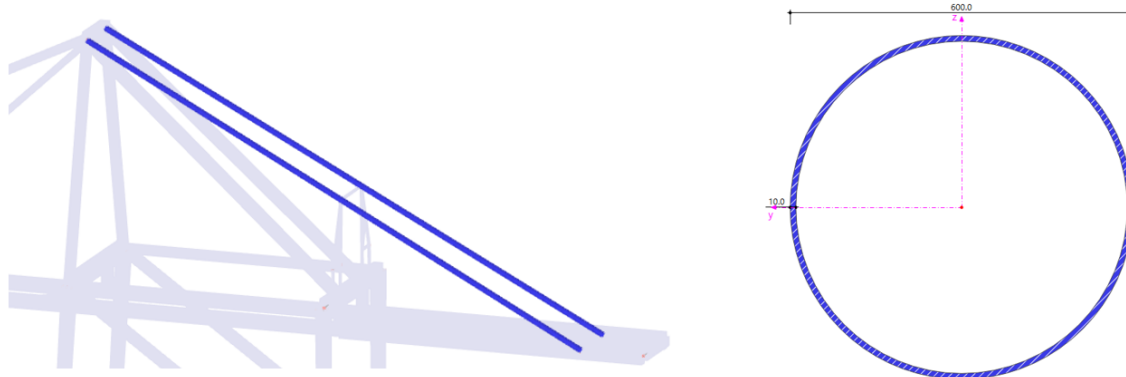
$$\text{Κάτω ίνα: } \sigma_u = 27,3 \text{ MPa} + 51,5 \text{ MPa} = 78,8 \text{ MPa.}$$

Συνεπώς, ένα μέρος (μικρό) της δοκού βρίσκεται υπό θλίψη. Θα μπορούσε να εξεταστεί έλεγχος στρεπτοκαμπτικού λυγισμού στο τμήμα μήκους 30 m αλλά στη συγκεκριμένη μελέτη αυτό αμελείται, καθώς η διατομή είναι μη ευπαθής σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό επειδή είναι κλειστή, θλιπτικές δυνάμεις δεν υπάρχουν ($N_{Ed} > 0$) άρα και στο συνδυαστικό έλεγχο θλίψης & κάμψης στην ουσία θα υπήρχε μόνο ο όρος της κάμψης με την M_{Ed} να είναι πολύ μικρότερη της M_{el} . Για τους παραπάνω λόγους, ο έλεγχος αμελείται. Διατμητικές τάσεις δεν υπάρχουν. Έτσι, αρκεί ο έλεγχος ορθών τάσεων.

7.3.2 Ελκυστήρες οπίσθιου τμήματος

Στους ελκυστήρες του οπίσθιου τμήματος δεν απαιτείται η εύρεση των ορθών τάσεων λόγω κάμψης εκτός του προγράμματος RFEM 6. Αυτό συμβαίνει επειδή τα συγκεκριμένα μέλη έχουν εισαχθεί ως καμπτόμενα, συνεπώς είναι δυνατό να υπολογιστούν οι τάσεις λόγω της κάμψης οφειλόμενης στο ι.β.

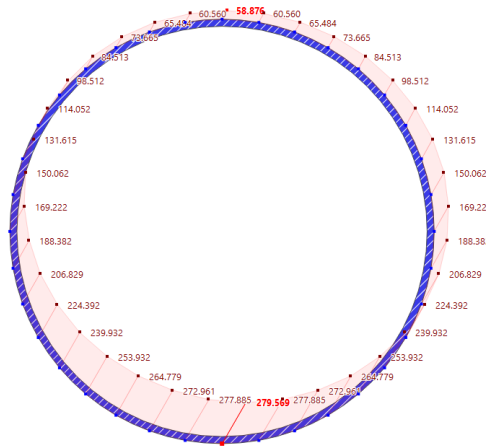
Θα αναζητηθούν και εδώ τα 2 σενάρια μέγιστης και ελάχιστης εφελκυστικής τάσης της κάτω ίνας προκειμένου να διαπιστωθεί εάν και σε τι βαθμό θλίβεται η άνω ίνα.



Εικόνα 7-16: Αριστερά οπίσθιοι ελκυστήρες & δεξιά διατομή οπίσθιων ελκυστήρων σε mm

1^ο σενάριο ελέγχου

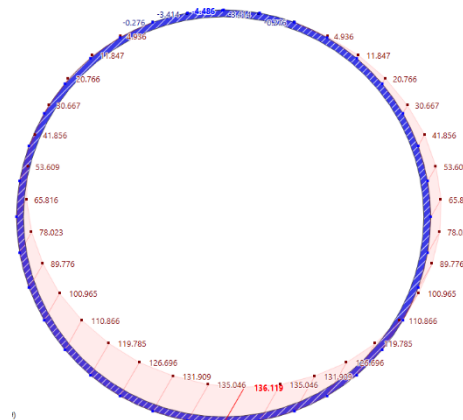
Στην Εικόνα 7-17 ακολουθεί η κατανομή του κρισιμότερου συνδυασμού ορθών τάσεων.



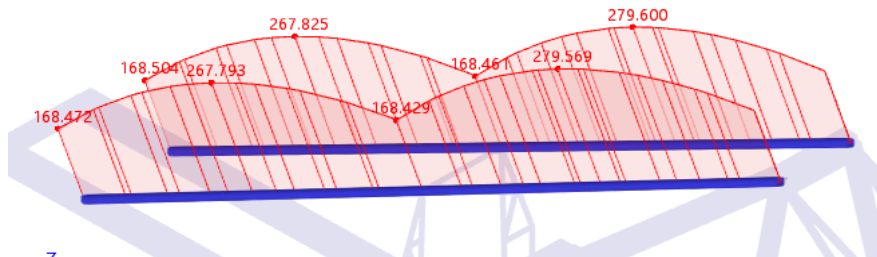
Εικόνα 7-17: Κατανομή ορθών τάσεων σε MPa

Η μέγιστη ορθή τάση είναι ίση με 197,1 MPa.

Άρα $\sigma_u = 279,57 \text{ MPa} < 355 \text{ MPa} / 1,1 = 322,7 \text{ MPa} (80,4\%)$,

2^ο σενάριο

Εικόνα 7-18: Κατανομή ορθών τάσεων σε MPa συνδυασμού με τη μικρότερη ορθή τάση στην κάτω ίνα
Οι διατμητικές τάσεις είναι σχεδόν μηδενικές.

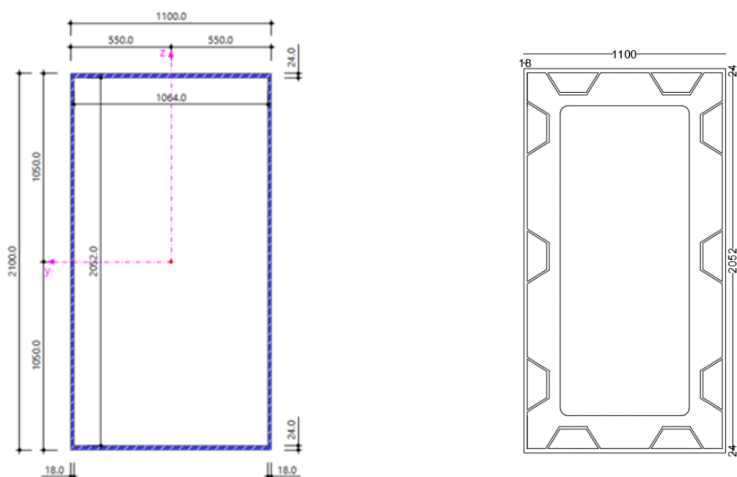


Εικόνα 7-19: Μεταβολή μέγιστων ορθών τάσεων σε MPa τάσεων κατά μήκος των οπίσθιων ελκυστήρων

7.3.3 Οπίσθιο τμήμα δοκού κύλισης

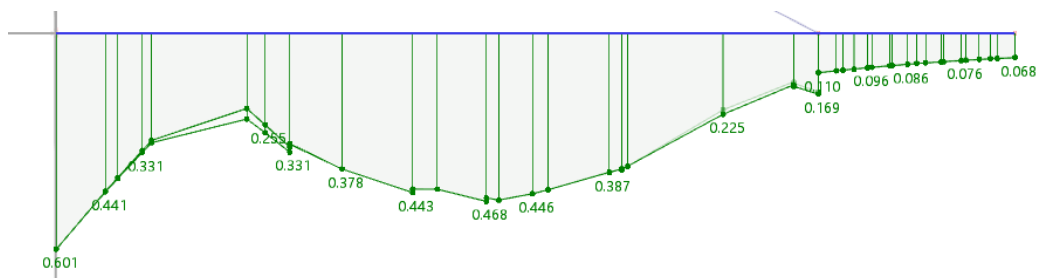
Η δοκός δίχως ενισχύσεις κατατάσσεται στην κατηγορία 4. Τοποθετήθηκαν διαμήκεις ενισχύσεις αλλά και εγκάρσιες όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-20. Με την προσθήκη ενισχύσεων και σύμφωνα με το μειωτικό συντελεστή του δυσμενέστερου φαινόμενου θεωρήθηκε απλουστευτικά πως $\rho_x=0,97$, δηλαδή ότι το όριο διαρροής του χάλυβα μειώθηκε κατά 3%. Παρότι τοποθετήθηκαν διαμήκεις ενισχύσεις τόσο στα πέλματα όσο και στους κορμούς, θεωρήθηκε πως πέρα από τη συνεισφορά αυτών έναντι κύρτωσης δεν συνεισφέρουν στην παραλαβή εντατικών μεγεθών. Συνεπώς, τα πάχη των πελμάτων δεν αυξήθηκαν κατά $\Sigma A_{sl}/b_{flange}$. Λόγω της δυνατότητας της δοκού του πρόσθιου τμήματος να ανασκηωθεί, δεν υπάρχει συνέχεια των διαμήκων ενισχύσεων σε όλο το μήκος της δοκού κύλισης και έτσι συντηρητικά οι ενισχύσεις δεν ελήφθησαν υπόψη.

Η δοκός ελέγχεται ως κατηγορία 3 με ελαφρώς μειωμένο όριο διαρροής ($0,97 \cdot f_y$). Όπως φάνηκε παραπάνω, ο έλεγχος σε διατμητική κύρτωση μπορεί να παραληφθεί, συνεπώς $\chi_w=1$. Τοποθετήθηκαν τραπεζοειδείς ενισχύσεις ύψους 160 mm με πάχος κορμών 10 mm και πάχος άνω πέλματος ίσο με 14 mm. Τέλος, τοποθετήθηκαν επαρκώς άκαμπτες εγκάρσιες ενισχύσεις ανά την πυκνή απόσταση των 150 cm όπως έγινε και σε όλα τα μέλη τα οποία ενισχύθηκαν με διαμήκεις ενισχύσεις.

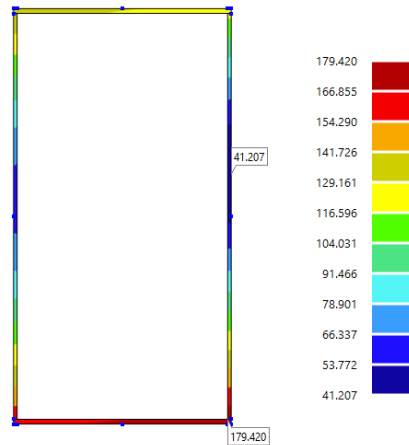


Εικόνα 7-20: Αριστερά προσομοίωμα & δεξιά πραγματική διατομή σε mm

Έλεγχος διατομής και μέλους με εντατικά μεγέθη από γραμμικές αναλύσεις.



Εικόνα 7-21: Μέγιστες von Mises τάσεις σε MPa κατά μήκος του οπίσθιου τμήματος της δοκού κύλισης



Εικόνα 7-22: Μέγιστες τάσεις von Mises σε ΜΡα

Έλεγχος τάσεων von Mises

$$\eta_{\text{von,Mises}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\gamma_{Rm}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\gamma_{Rm}}\right)^2} = 0,601 < 1$$

Έλεγχοι μελών

Σημαντική παράμετρος στον έλεγχο των μελών είναι ο καθορισμός των μηκών λυγισμού κάθε τμήματος. Στο συγκεκριμένο μέλος το μήκος λυγισμού καθορίστηκε από ανάλυση τύπου LBA με την εφαρμογή 2 αξονικών φορτίων στο οπίσθιο τμήμα της δοκού κύλισης.

Με βάση τα παραπάνω αλλά και του τυπολογίου στην υποενότητα 7.2.6 $\chi_y = 0,34$ & $\chi_z = 0,34$.

$$\eta_y = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,y,Rd}} = 0,217 \quad \& \quad \eta_z = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,z,Rd}} = 0,215$$

Ο έλεγχος ταυτόχρονης θλίψης και κάμψης περιγράφεται στην υποενότητα 7.2.6.

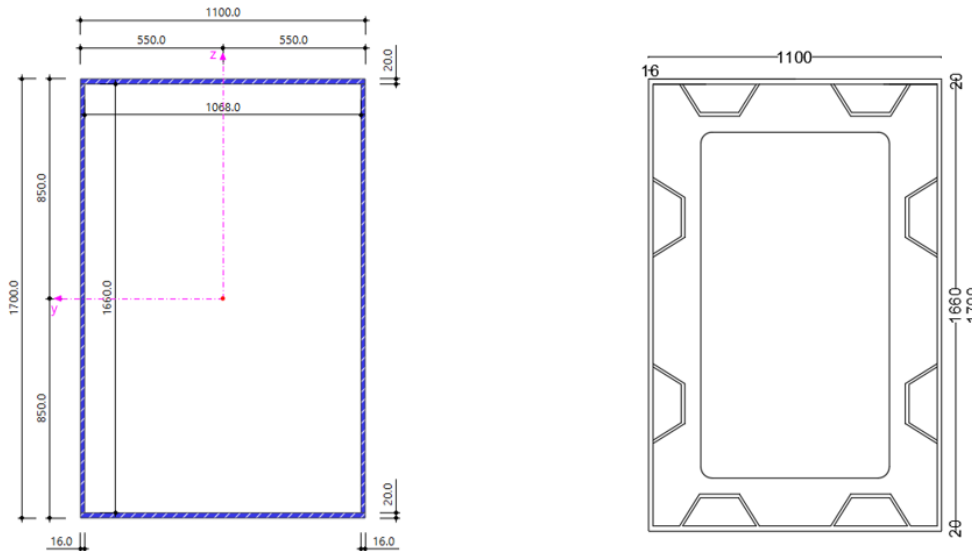
Έλεγχος ταυτόχρονης θλίψης & κάμψης περί τους 2 άξονες.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,194 + 0,481 + 0,090 = 0,765 < 1$$

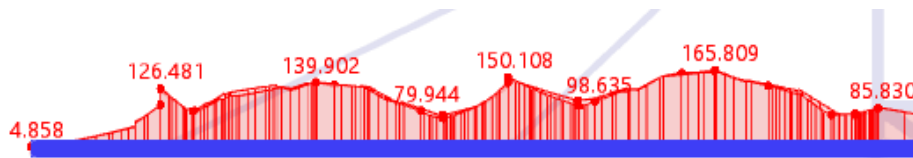
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,192 + 0,426 + 0,090 = 0,708 < 1$$

7.3.4 Πρόσθιο τμήμα δοκού κύλισης

Η δοκός χωρίς ενισχύσεις κατατάσσεται στην κατηγορία 4. Τοποθετήθηκαν διαμήκειες ενισχύσεις αλλά και εγκάρσιες όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-23 και έγιναν οι ίδιες θεωρήσεις με το οπίσθιο τμήμα της δοκού κύλισης. Τοποθετήθηκαν οι τραπεζοειδείς ενισχύσεις ύψους 160 mm με κορμούς 10 mm & άνω πέλμα 14 mm αλλά και εγκάρσιες ενισχύσεις πάχους 20 mm ύψους 1660 mm και πλάτους 200 mm ανά 1,5 m θεωρούμενες ως επαρκώς άκαμπτες.



Εικόνα 7-23: (Αριστερά) προσομοίωμα & (δεξιά) πραγματική διατομή σε mm



Εικόνα 7-24: Μέγιστες von Mises τάσεις σε MPa κατά μήκος του πρόσθιου & κεντρικού τμήματος της δοκού κύλισης

Έλεγχος τάσεων von Mises

$$\eta_{\text{von,Mises}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2} = 0,545 < 1$$

Έλεγχος μελών

Εκτελέστηκαν αναλύσεις τύπου LBA, με τα μήκη λυγισμού να λαμβάνουν τιμές ως εξής:

$$L_{cr,y} = 50 \text{ m} \ \& \ L_{cr,z} = 57 \text{ m}$$

Με βάση τα παραπάνω αλλά και του τυπολογίου στην υποενότητα 7.2.6, $\chi_y = 0,63$ & $\chi_z = 0,31$

$$\eta_y = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,y,Rd}} = 0,221 \ \& \ \eta_z = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,z,Rd}} = 0,447$$

Έλεγχος ταυτόχρονης θλίψης & κάμψης περί τους 2 άξονες.

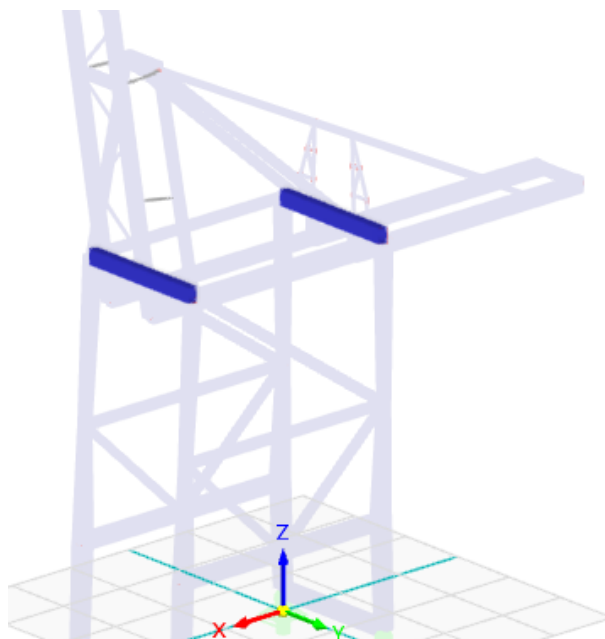
$$\frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1} \chi_{y^*} N_{Rk}} + k_{yy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} * \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,138 + 0,474 + 0,007 = 0,619 < 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1} \chi_{z^*} N_{Rk}} + k_{zy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} * \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,279 + 0,456 + 0,007 = 0,731 < 1$$

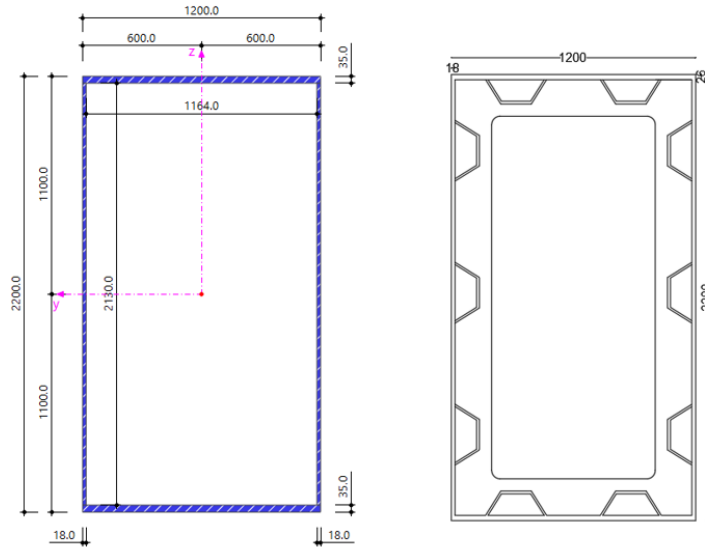
7.3.5 Άνω δοκοί πλαισίων διεύθυνσης γ

Τα συγκεκριμένα μέλη επιτελούν 2 σημαντικούς ρόλους. Αφενός μεταβιβάζουν στα 4 υποστυλώματα του γερανού τα φορτία της κατασκευής, αφετέρου ενώνουν τα υποστυλώματα μεταξύ τους στη διεύθυνση γ. Έτσι, επιτυγχάνεται η απόκτηση δυσκαμψίας στην ασθενή αυτή διεύθυνση καθώς δεν γινόταν να τοποθετηθούν σύνδεσμοι δυσκαμψίας. Η δοκός εμφανίζει σαφώς μεγαλύτερες καταπονήσεις στο μοντέλο εκτός λειτουργίας του γερανού και ιδιαίτερα στην ανεμοθύελλα κατά τη διεύθυνση γ.

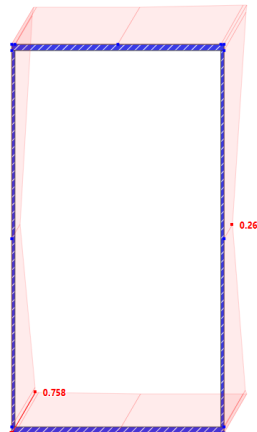
Ομοίως με παραπάνω, οι δοκοί χωρίς ενισχύσεις κατατάσσονται στην κατηγορία 4. Σε αντίθεση με τις δοκούς κύλισης γίνεται η θεώρηση πως οι ενισχύσεις είναι συνεχείς. Άρα, ελήφθησαν υπόψη με τροποποίηση του πάχους μόνο των πελμάτων, καθώς στη βιβλιογραφία αναφέρεται πως τα πάχη των κορμών δεν αυξάνονται, καθώς θεωρείται πως συνεισφέρουν μόνο στην προστασία έναντι κύρτωσης και όχι στην παραλαβή των εντατικών μεγεθών (Βάγιας κ.α., 2016). Συνεπώς, τα πάχη των πελμάτων αυξήθηκαν κατά $A_{sl}/b_{flange} \approx 9$ mm και έτσι η πραγματική διατομή συγκριτικά με τη διατομή που προσομοιώθηκε στο μοντέλο παρουσιάζει διαφορά ως προς τα πάχη των πελμάτων. Η δοκός που παρουσιάζεται στη συνέχεια είναι αυτή στο δεξί μέρος στην Εικόνα 7-25.



Εικόνα 7-25: Άνω δοκοί πλαισίων διευθ. γ



Εικόνα 7-26: Αριστερά προσομοίωμα με αυξημένο πάχος πελμάτων & δεξιά πραγματική διατομή σε mm



Εικόνα 7-27: Μέγιστη κατανομή τάσεων von Mises ανηγμένη στη μονάδα

$$\eta_{\text{von,Mises}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{Rm}}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{Rm}}}\right)^2} = 0,758 < 1$$

Έλεγχοι μελών

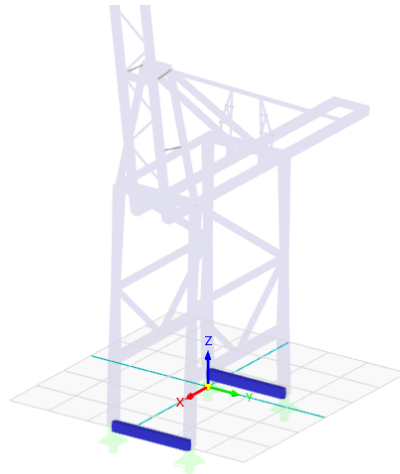
Ως δοκοί παρουσιάζουν αμελητέες αξονικές δυνάμεις, συνεπώς θα δειχθεί μόνο ο συνδυασμένος έλεγχος θλίψης & κάμψης που στην ουσία είναι έλεγχος σε κάμψη.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_{y^*} N_{Rk}} + k_{yy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} * \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,017 + 0,708 + 0,209 = 0,931 < 1$$

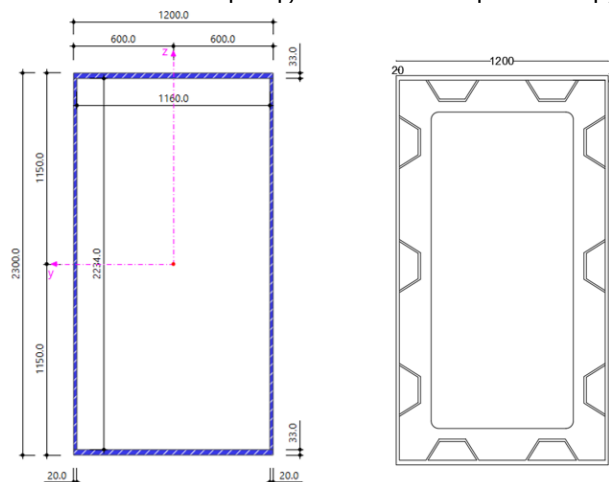
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_{z^*} N_{Rk}} + k_{zy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} * \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,016 + 0,706 + 0,209 = 0,933 < 1$$

7.3.6 Δοκοί βάσης πλαισίων διεύθυνσης γ

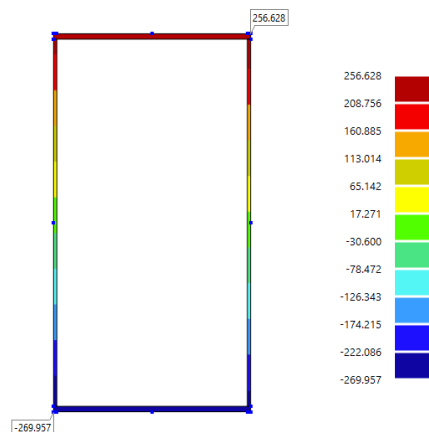
Όμοια με το μέλος που εξετάστηκε προηγουμένως, οι δοκοί στη βάση των πλαισίων κατά τη διεύθυνση γ προσδίδουν την απαραίτητη δυσκαμψία στο σχετικά αδύναμο στατικό σύστημα κατά τη συγκεκριμένη διεύθυνση. Επίσης, παρατηρήθηκε πως καταπονούνται σχεδόν εξ ολοκλήρου καμπτικά. Τοποθετήθηκαν και εδώ εγκάρσιες ενισχύσεις ανά 1,5 m, όπως και τραπεζοειδείς διαμήκειες ενισχύσεις όμοιες με αυτές που τοποθετήθηκαν παραπάνω, οι οποίες ελήφθησαν υπόψη με την ανάλογη αύξηση του πάχους μόνο όμως των πελμάτων.



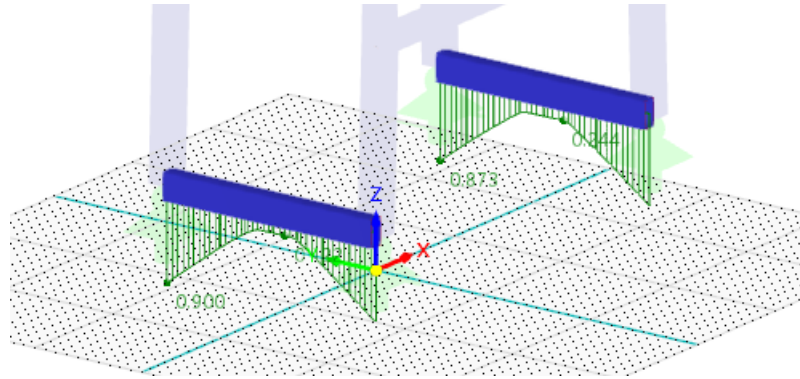
Εικόνα 7-28: Δοκοί βάσης πλαισίων κατά τη διεύθυνση γ



Εικόνα 7-29: Αριστερά προσομοίωμα με αυξημένο πάχος πελμάτων & δεξιά πραγματική διατομή σε mm



Εικόνα 7-30: Μέγιστες τάσεις von Mises σε MPa



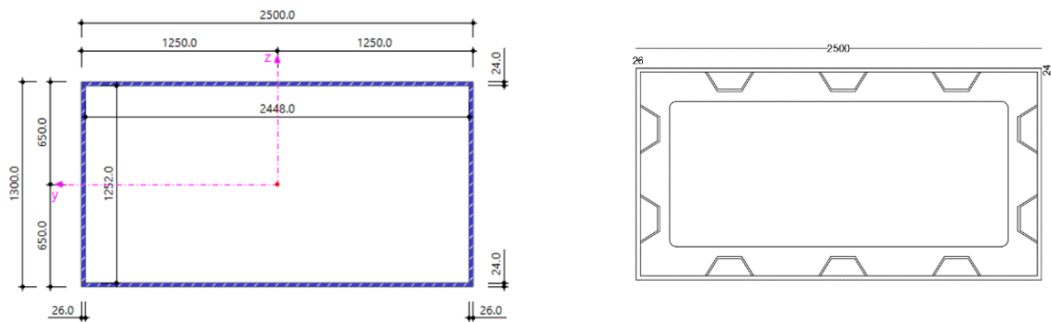
Εικόνα 7-31: Μέγιστος συντελεστής von Mises τάσεων κατά μήκος των μελών

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_{yT} \cdot N_{Rk}} + k_{yy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} * \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,022 + 0,844 + 0,071 = 0,933 < 1$$

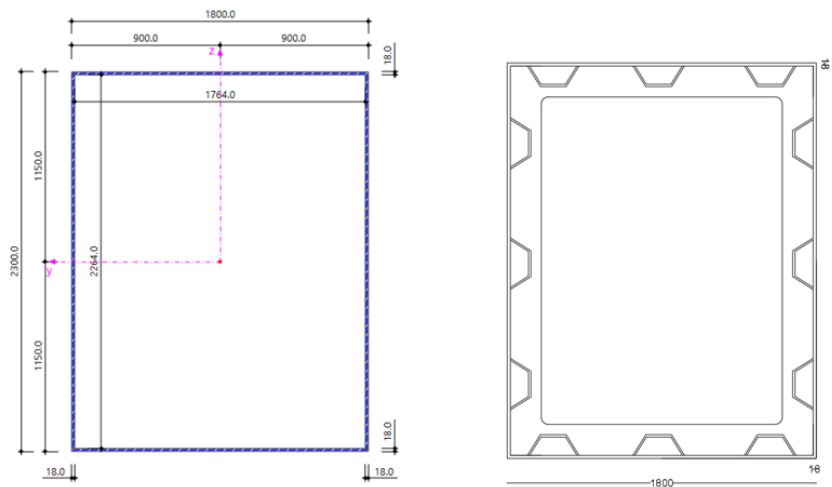
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_{zT} \cdot N_{Rk}} + k_{zy} * \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} * \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,024 + 0,841 + 0,071 = 0,933 < 1$$

7.3.7 Υποστυλώματα

Τα υποστυλώματα είναι μέλη μεταβλητού πάχους και εξωτερικών διαστάσεων. Τοποθετήθηκαν νευρώσεις αλλά δεν ακολουθήθηκε η πρακτική της προσαύξησης του πάχους. Αφού η ανάλυση είναι τύπου GNIA ακολουθώντας τη μέθοδο M5 του κανονισμού απαιτείται μόνο έλεγχος τάσεων von Mises.

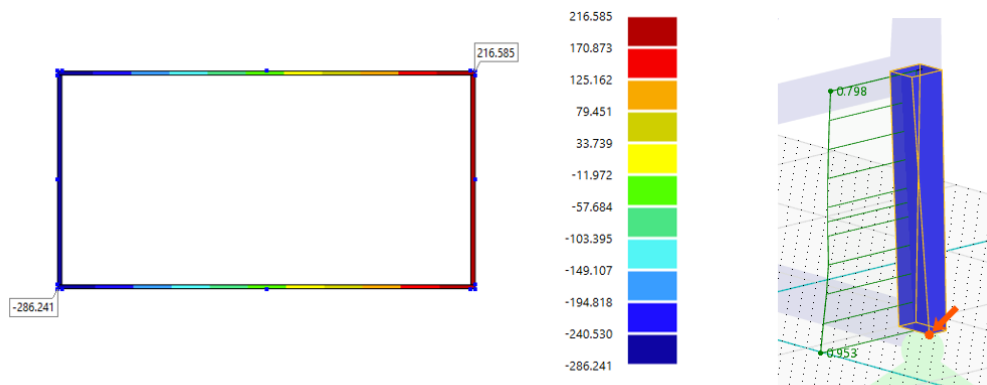


Εικόνα 7-32: Κάτω άκρο κάτω υποστυλώματος σε mm



Εικόνα 7-33: Διατομή άνω άκρου κάτω υποστυλώματος σε mm

Τάσεις von Mises στο υποστυλώμα από GNIA



Εικόνα 7-34: Αριστερά von Mises τάσεις δυσμενέστερης διατομής σε MPa & δεξιά κατά μήκος του τμήματος του υποστυλώματος ανηγμένες στη μονάδα

$$\eta_{\text{von,Mises}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2} = 0,953 < 1$$

Η κρίσιμη διατομή είναι αυτή της βάσης του υποστυλώματος λόγω των πολύ μεγάλων καμπτικών ροπών από τους ανέμους σε κατάσταση θύελλας, με αποτέλεσμα η διατομή (χωρίς να ληφθούν υπόψη οι ενισχύσεις) να επαρκεί οριακά. Λόγω των τόσο μεγάλων καμπτικών ροπών ο κόμβος στη βάση αναμένεται να ενισχυθεί σημαντικά. Παρόλα αυτά, η διατομή διατηρεί σε όλο το μήκος της έναν αρκετά ικανοποιητικό συντελεστή αξιοποίησης.

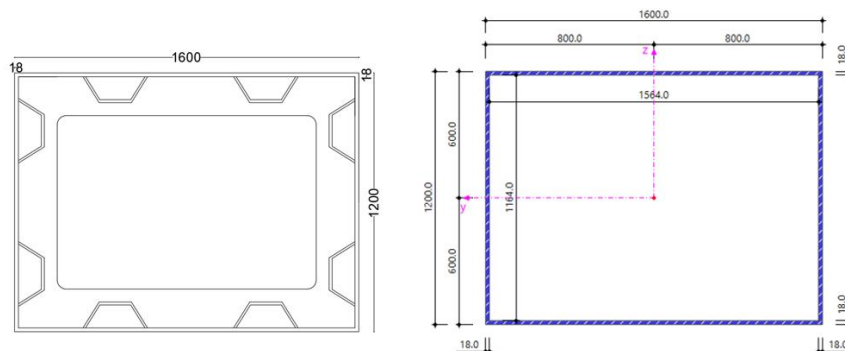
Για συγκριτικούς και μόνο λόγους από τη γραμμική ανάλυση προκύπτει πως για τον ίδιο συνδυασμό που εμφανίζεται η παραπάνω τάση αλλά και το ίδιο σημείο υπολογισμού τάσεων (stress point):

$$\eta_{\text{von,Mises}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_{Rm}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_{Rm}}\right)^2} = 0,907 < 1$$

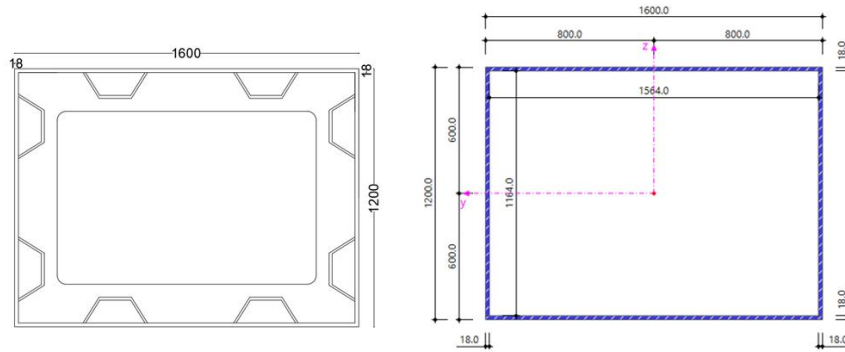
Συνεπώς, υπάρχει μια αύξηση στις von Mises τάσεις αλλά όχι ιδιαίτερα σημαντική.

Ενδιάμεσο τμήμα

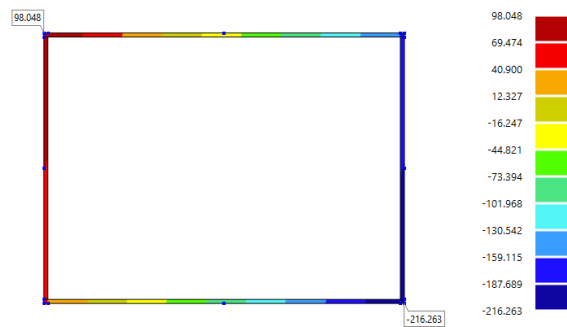
Ίδια μεθοδολογία ακολουθήθηκε και στο ενδιάμεσο τμήμα των υποστυλωμάτων. Στο κάτω άκρο του θεωρήθηκε η διατομή στην Εικόνα 7-33 ενώ στο άνω άκρο τέθηκε η διατομή που φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 7-35: Διατομή κάτω άκρου ενδιάμεσου υποστυλώματος σε mm



Εικόνα 7-36: Διατομή άνω άκρου ενδιάμεσου υποστυλώματος σε mm

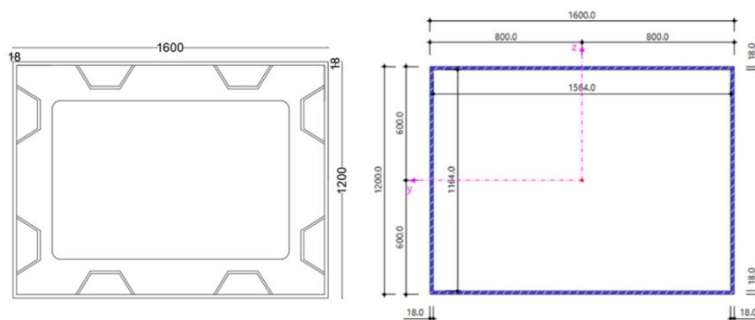


Εικόνα 7-37: Μέγιστες ορθές τάσεις σε MPa

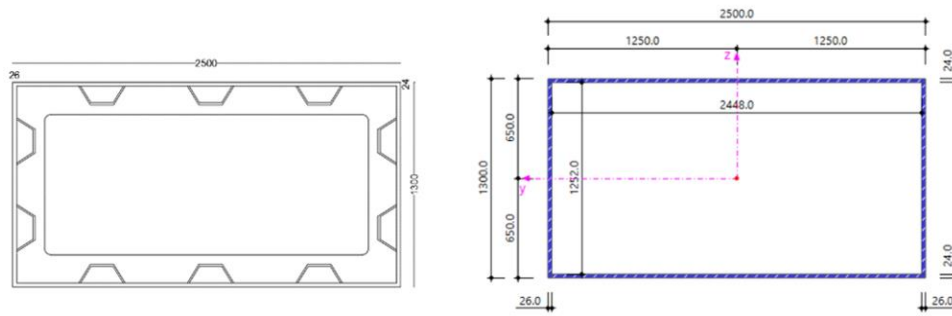
$$\eta_{\text{von,Mises}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M1}}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M1}}}\right)^2} = 0,721 < 1$$

Ανώτερο τμήμα υποστυλώματος

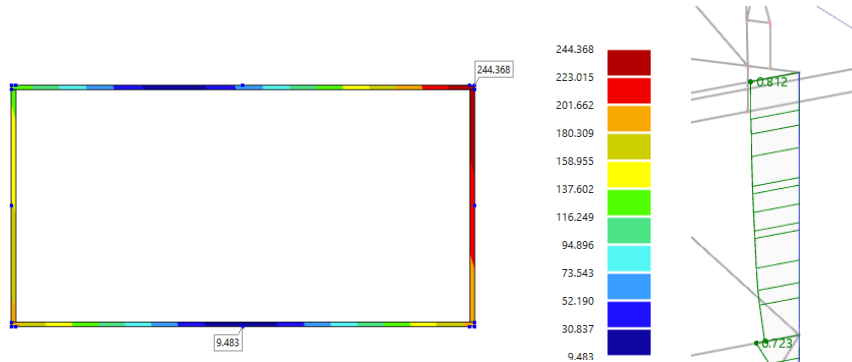
Ομοίως με τα παραπάνω τμήματα των υποστυλωμάτων, και αυτά τα μέλη είναι μεταβλητών εξωτερικών διαστάσεων αλλά και πάχους. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται οι διατομές του κάτω και άνω άκρου τους, με τη μεταβολή των διαστάσεών τους να είναι γραμμική.



Εικόνα 7-38: Διατομή κάτω άκρου ανώτερου τμήματος υποστυλώματος σε mm



Εικόνα 7-39: Διατομή άνω άκρου ανώτερου τμήματος υποστυλώματος σε mm

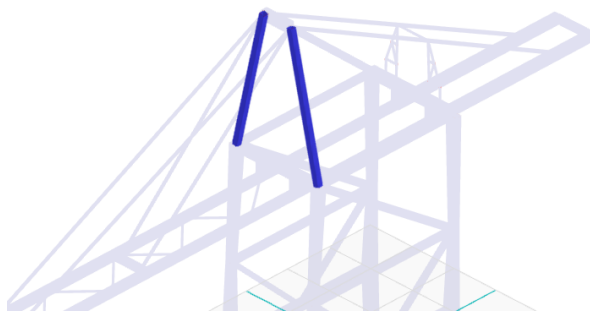


Εικόνα 7-40: Αριστερά μέγιστες von Mises τάσεις σε MPa & δεξιά μέγιστος συντελεστής αξιοποίησης σε von Mises τάσεις κατά μήκος του μέλους

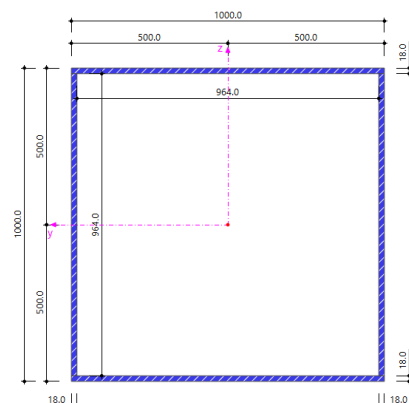
Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα ο μέγιστος συντελεστής αξιοποίησης βάσει της GNIA είναι ίσος με 0,812, με το μέλος να κρατά παρόμοια τιμή συντελεστή στο μεγαλύτερο τμήμα του μήκους του.

7.3.8 Άνω κεκλιμένα υποστυλώματα (1)

Τα άνω κεκλιμένα υποστυλώματα μεταβιβάζουν τα φορτία από τους ελκυστήρες στα κύρια υποστυλώματα του γερανού.



Εικόνα 7-41: Άνω κεκλιμένα υποστυλώματα (1)



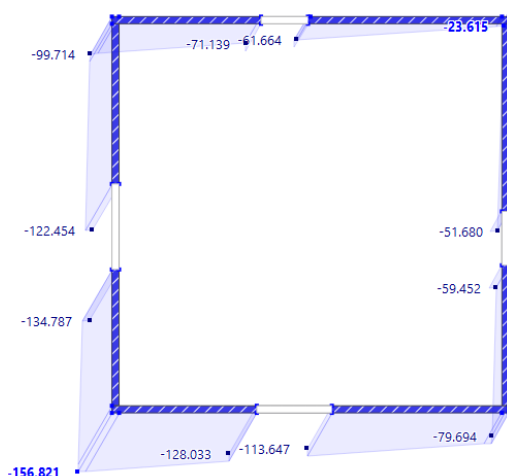
Εικόνα 7-42: Διατομή σε mm άνω κεκλιμένων υποστυλωμάτων (1)

Έλεγχος διατομής και μέλους με εντατικά μεγέθη από γραμμικές αναλύσεις.

Η διατομή είναι κατηγορίας 4. Δε διαθέτει διαμήκεις ενισχύσεις, συνεπώς η εύρεση των ενεργών της χαρακτηριστικών (A_{eff} & I_{eff}) έγινε με τη μέθοδο μειωμένου πλάτους, με την διαδικασία υπολογισμού της να παρουσιάζεται στην υποενότητα 7.2.2.

Έλεγχος διατομής

Ελέγχονται οι von Mises τάσεις για το δυσμενέστερο συνδυασμό όλων. Οι δυσμενέστερες ορθές τάσεις φαίνονται στην Εικόνα 7-43.



Εικόνα 7-43: Δυσμενέστερες ορθές τάσεις σε MPa

Βάσει του τυπολογίου που αναλύθηκε στην υποενότητα 7.2.3 υπολογίζεται ο συντελεστής χ_w .

Πίνακας 7-12: Έλεγχος σε διατμητική κύρτωση

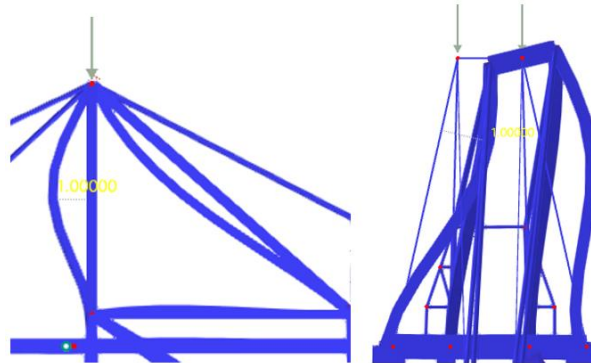
Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Απόσταση εγκάρσιων ενισχύσεων	a	8000	mm
Ύψος κορμού	h_w	1000	mm
Πάχος κορμού	t_w	18	mm
Λόγος	h_w/t_w	55,6	-
Συντελεστής ϵ	ϵ	0,81	-
Λόγος	α	8	-
Συντελεστής	k_{st}	0	-
Συντελεστής διατμητικής κύρτωσης πλάκας	k_T	5,40	-
Τάση αναφοράς	σ_E	61	MPa
Κρίσιμη τάση κύρτωσης	τ_{cr}	332	MPa
Ανηγμένη λυγηρότητα κορμού	λ_{wbar}	0,786	-
Μειωτικός συντελεστής	χ_w	1,00	-

Αφού $\chi_w=1$ τότε ο έλεγχος σε τάσεις von Mises είναι:

$$\sigma_{\text{von,Mises}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\gamma_{Rm}}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot \gamma_{Rm}}\right)^2} = 0,50 < 1$$

Έλεγχοι μελών

Χρησιμοποιήθηκαν αναλύσεις LBA για τον προσδιορισμό των μηκών λυγισμού των συγκεκριμένων μελών. Διαπιστώθηκε πως περί τον έναν άξονα τα μέλη λυγίζουν με την ιδιομορφή να είναι τύπου bow ενώ περί τον άλλο άξονα λυγίζουν με ιδιομορφή sway όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-44.



Εικόνα 7-44: Ιδιομορφές λυγισμού

Περί τον άξονα y που αφορά την ιδιομορφή τύπου bow τέθηκε υπέρ της ασφαλείας $L_{cr,z}=0,7*L$, αντί $0,5*L$. Όπως φαίνεται και στο αριστερό τμήμα της παραπάνω εικόνας παρότι το άνω άκρο του μέλους έχει θεωρηθεί ως πάκτωση, φαίνεται να μη λειτουργεί ως τέτοια. Έτσι, έγινε η θεώρηση μήκους λυγισμού ενός μέλους με πάκτωση & άρθρωση στα 2 άκρα του, δηλαδή $0,7*L$.

Περί τον άξονα z το μέλος λυγίζει ως υποστύλωμα μεταθετού πλαισίου. Ακολουθήθηκε η μεθοδολογία που προτείνεται στον κανονισμό ENV1993-1-1/1992 σχ. E.2.2 & E.2.3.b και προκύπτει πως $L_{cr,y}=1,0*L$.

Έλεγχοι μελών

Καμπτικός λυγισμός περί τον y άξονα

Με βάση τα παραπάνω αλλά και τη διαδικασία υπολογισμού στην υποενότητα 7.2.6, η τιμή του μειωτικού συντελεστή χ_y ισούται με 0,71.

Ο λόγος αξιοποίησης του μέλους έναντι καμπτικού λυγισμού περί τους 2 άξονες δίνεται παρακάτω:

$$\eta_y = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,y,Rd}} = 0,472 \quad \& \quad \eta_z = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,z,Rd}} = 0,392$$

Η μεγαλύτερη τιμή των παραπάνω συνδυασμών προκύπτει για το συνδυασμό A1 για E/K στη θέση 16.

Παρατηρείται δηλαδή, όπως είναι αναμενόμενο πως περί τον y άξονα ο έλεγχος είναι κρίσιμότερος, καθώς περί το συγκεκριμένο άξονα το μήκος λυγισμού είναι μεγαλύτερο.

Έλεγχος ταυτόχρονης θλίψης & κάμψης περί τους 2 άξονες.

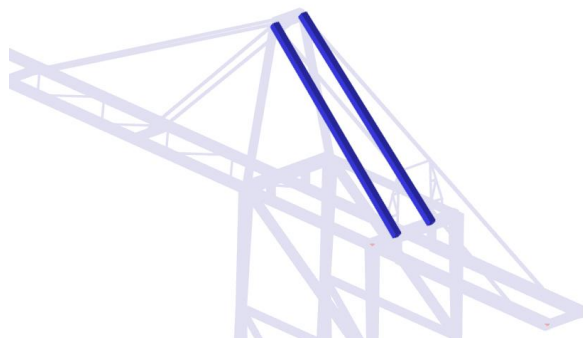
Ο έλεγχος ταυτόχρονης θλίψης και κάμψης περιγράφεται στην υποενότητα 7.2.6.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,362 + 0,079 + 0,177 = 0,618 < 1$$

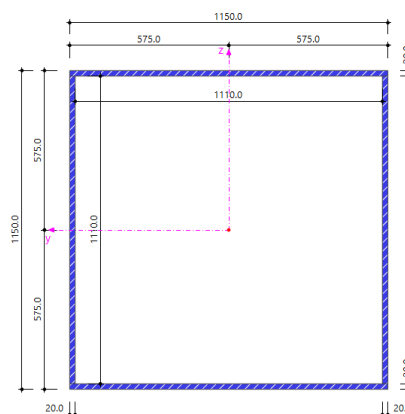
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,303 + 0,066 + 0,177 = 0,547 < 1$$

Ο δυσμενέστερος συντελεστής αξιοποίησης είναι ο έλεγχος σε κάμψη περί τον άξονα y με συντελεστή αξιοποίησης 0,618.

7.3.9 Άνω κεκλιμένα υποστυλώματα (2)

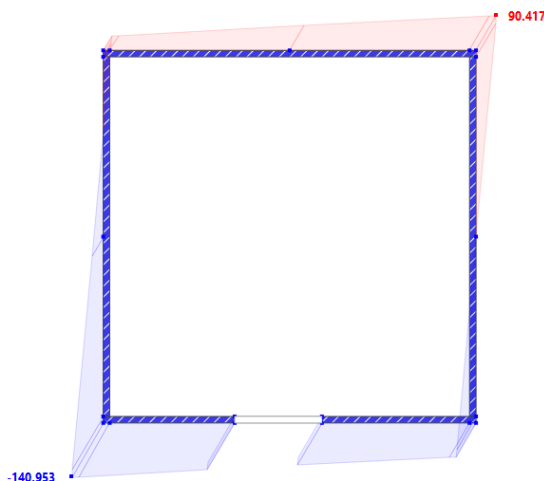


Εικόνα 7-46: Άνω κεκλιμένα υποστυλώματα (2)



Εικόνα 7-45: Διατομή σε mm άνω κεκλιμένων υποστυλωμάτων (2)

Η διατομή είναι κατηγορίας 4. Ο υπολογισμός των αδρανειακών χαρακτηριστικών γίνεται με τη μέθοδο του ενεργού πλάτους,



Εικόνα 7-47: Δυσμενέστερες ορθές τάσεις σε MPa

Ο συντελεστής χ_w ισούται με 1.

Μέγιστη ορθή τάση: -140,9 MPa

Διαμητική τάση: 3,1 MPa

$$\eta_{\text{von,Mises}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\gamma_{Rm} f_y}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \gamma_{Rm} f_y}\right)^2} = 0,45 < 1$$

Ομοίως με προηγούμενως, χρησιμοποιήθηκαν αναλύσεις τύπου LBA για τον προσδιορισμό των μηκών λυγισμού των συγκεκριμένων μελών με την ίδια λογική να ακολουθείται.

Καμπτικός λυγισμός περί τον γ άξονα

Βάσει των παραπάνω αλλά και του τυπολογίου στην υποενότητα 7.2.6 $\chi_y=0,48$ ενώ $\chi_z=0,74$.

$$\eta_y = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,y,Rd}} = 0,129 \quad \& \quad \eta_z = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,z,Rd}} = 0,092$$

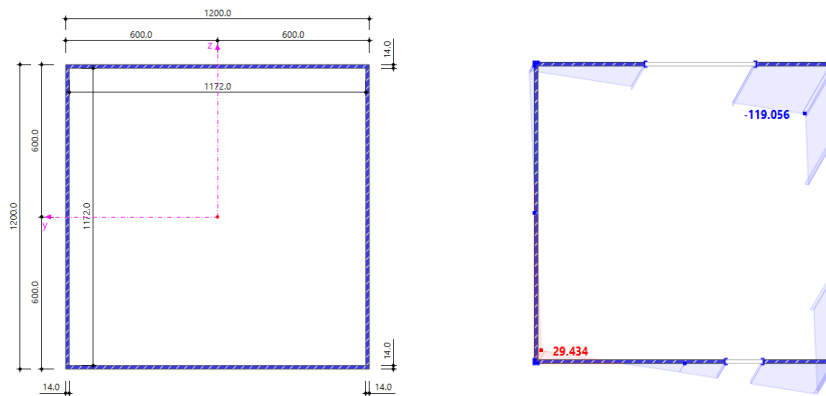
Ο έλεγχος ταυτόχρονης θλίψης και κάμψης

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} * \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} * \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} = 0,085 + 0,426 + 0,171 = 0,682 < 1$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z * N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} * \frac{\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} * M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} * \frac{\frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} = 0,061 + 0,404 + 0,171 = 0,636 < 1$$

7.3.10 Σύνδεσμοι δυσκαμψίας (1)

Οι διαγώνιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας διατάσσονται μόνο κατά τη διεύθυνση x του γερανού, προσδίδοντας του την απαραίτητη δυσκαμψία κατά αυτή τη διεύθυνση, όπως άλλωστε φαίνεται και από τις ιδιομορφικές αναλύσεις. Δε διαθέτουν διαμήκειες ενισχύσεις, ανήκουν στην κατηγορία 4 και ως εκ τούτου εφαρμόστηκε η μέθοδος του ενεργού πλάτους όπως περιγράφεται στην υποενότητα 7.2.2. Η διατομή των μελών αυτών φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 7-48: Αριστερά διατομή διαγώνιων συνδέσμων δυσκαμψίας & δεξιά κατανομή μέγιστων ορθών τάσεων σε MPa

Μέγιστη ορθή τάση: -119,05 MPa

Διαμητική τάση για υπολογισμό τάσεων von Mises: 12,26 MPa

Ο συντελεστής χ_w ισούται με 0,72.

$$\eta_{\text{von,Mises}} = \sqrt{\left(\frac{\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}}{\gamma_{Rm}}\right)^2 + 3 * \left(\frac{\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w * f_y}}{\gamma_{Rm}}\right)^2} = 0,389 < 1$$

Έλεγχοι μελών

Λόγω του αρκετά μεγάλου μήκους τους οι έλεγχοι μελών αναμένεται να είναι αρκετά κρισιμότεροι από τον παραπάνω έλεγχο τάσεων.

Οι λόγοι αξιοποίησης του μέλους έναντι καμπτικού λυγισμού περί τους 2 άξονες είναι οι εξής:

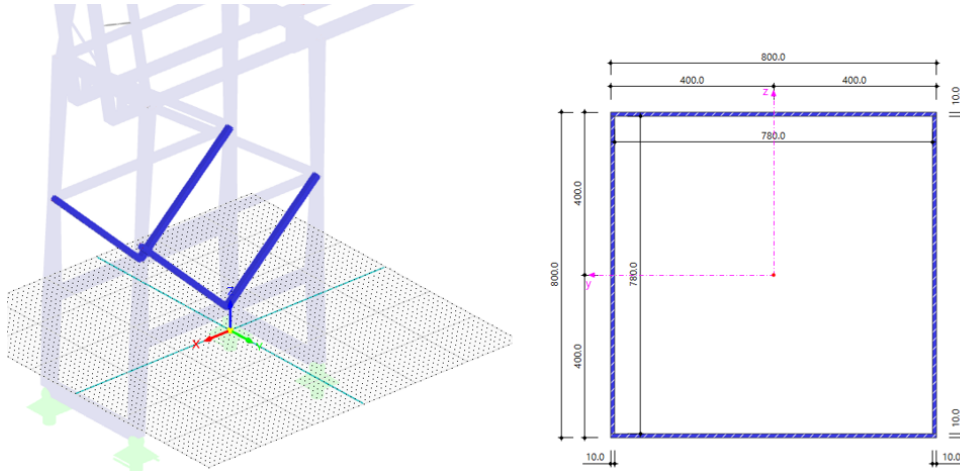
$$\eta_y = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,y,Rd}} = 0,178 \quad \& \quad \eta_z = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,z,Rd}} = 0,178$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,174 + 0,207 + 0,260 = 0,641 < 1$$

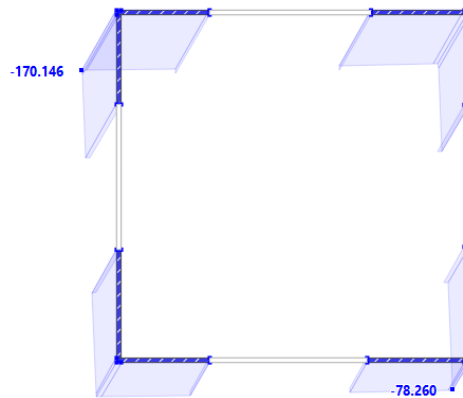
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,174 + 0,194 + 0,260 = 0,628 < 1$$

7.3.11 Σύνδεσμοι δυσκαμψίας (2)

Οι κεντρικοί σύνδεσμοι δυσκαμψίας επιτελούν το ίδιο έργο με τα μέλη που αναλύθηκαν στην υποενότητα 7.3.9. Ομοίως με προηγούμενως ούτε σε αυτά τα μέλη τοποθετήθηκαν διαμήκεις ενισχύσεις. Η διατομή είναι κι αυτή κατηγορίας 4 και εφαρμόστηκε η μέθοδος απομειωμένου πλάτους.



Εικόνα 7-49: Σύνδεσμοι δυσκαμψίας αριστερά & διατομή σε mm δεξιά



Εικόνα 7-50: Κατανομή ορθών τάσεων σε MPa στη δυσμενέστερη διατομή

Οι διατμητικές τάσεις για τον υπολογισμό των von Mises τάσεων είναι αμελητέες.

$$\eta_{\text{von,Mises}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{\chi_w \cdot f_y}\right)^2} = 0,526 < 1$$

$$\eta_y = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,y,Rd}} = 0,452 \quad \& \quad \eta_z = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,z,Rd}} = 0,452$$

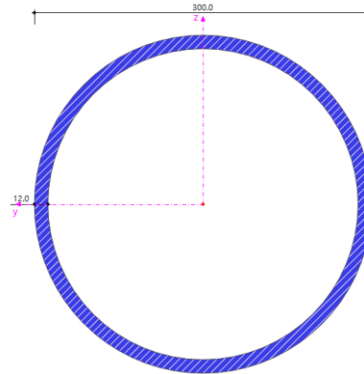
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,176 + 0,208 + 0,276 = 0,659 < 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,176 + 0,196 + 0,276 = 0,647 < 1$$

Αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχει μια σημαντική διαφορά στους πρώτους όρους των 2 τελευταίων ελέγχων. Αυτό συμβαίνει διότι η μεγιστοποίηση της συνεισφοράς στις 2 παραπάνω ανισώσεις δε συμβαίνει για τον ίδιο συνδυασμό μεγιστοποίησης της καμπτικής ροπής.

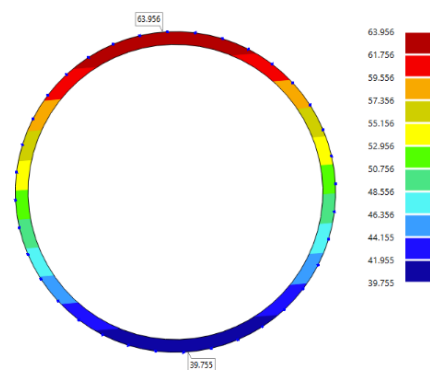
7.3.12 Δικτύωση δοκού κύλισης

Η διατομή που χρησιμοποιήθηκε για την πλευρική εξασφάλιση των μελών φαίνεται στην Εικόνα 7-51.



Εικόνα 7-51: Διατομή δικτύωσης δοκού κύλισης

Ακολουθούν οι δυσμενέστερες von Mises εκ του συνόλου των ράβδων που τέθηκαν στο γερανό.



Εικόνα 7-52: Μέγιστες von Mises τάσεις σε MPa

Έλεγχοι μελών

Καμπτικός λυγισμός

$$\eta_y = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,y,Rd}} = 0,4272 \quad \& \quad \eta_z = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,z,Rd}} = 0,427$$

Συνδυασμός θλίψης και κάμψη περί τους 2 άξονες

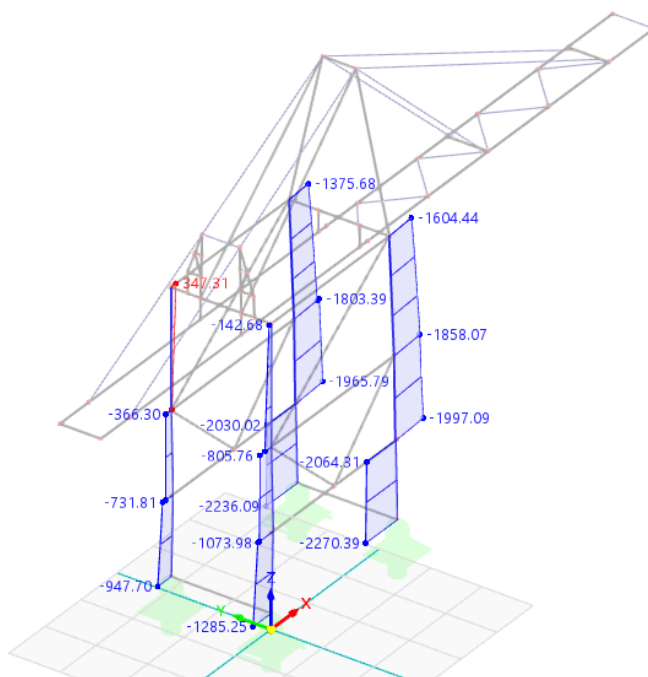
$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,427 + 0,017 + 0,057 = 0,501 < 1$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = 0,427 + 0,014 + 0,057 = 0,498 < 1$$

Όπως ήταν αναμενόμενο τα συγκεκριμένα μέλη καταπονούνται κυρίως αξονικά. Έτσι, ο έλεγχος συνδυασμένης θλίψης & κάμψης δίνει συντελεστές αξιοποίησης πλησίον αυτών του καμπτικού λυγισμού.

7.4 Έλεγχος ανατροπής του γερανού

Εξετάστηκαν οι περιπτώσεις ανεμοφόρτισης σε κατάσταση λειτουργίας αλλά και σε κατάσταση εκτός λειτουργίας. Ικανή συνθήκη για τη διασφάλιση της ευστάθειας του γερανού σε λειτουργία κρίθηκε η συνεχής θλιπτική καταπόνηση της βάσης του γερανού. Πράγματι, αυτή η προϋπόθεση ικανοποιήθηκε. Κρίνεται σκόπιμο να επαναληφθεί ότι ο έλεγχος ευστάθειας του γερανού πραγματοποιήθηκε βάσει των συνδυασμών φόρτισης έναντι ανατροπής με διαφορετικούς επιμέρους συντελεστές από εκείνους που χρησιμοποιήθηκαν στη διαστασιολόγηση του φορέα. Ακολουθεί η περιβάλλουσα των αξονικών δυνάμεων για την κατάσταση λειτουργίας.



Εικόνα 7-53: Μέγιστες τιμές περιβάλλουσας αξονικών δυνάμεων σε kN

Από την παραπάνω εικόνα εξάγεται το συμπέρασμα πως υπάρχει ασφάλεια έναντι ανατροπής για τις συνήθεις ανεμοφορτίσεις. Όταν όμως ο γερανός φορτιστεί υπό σφοδρούς ανέμους (κατάσταση θύελλας) είναι αδύνατο να μπορεί να υπάρξει ταυτόχρονη θλίψη και στα 4 σημεία στήριξης. Έτσι, όταν ο γερανός τίθεται εκτός λειτουργίας, λαμβάνονται τα εξής μέτρα ασφαλείας:

- η δοκός κύλισης ανυψώνεται
- ο γερανός προσδένεται με το ακλόνητο δάπεδο του προβλήτα μέσω των συνδέσμων ασφαλείας (tie-downs) σε κάθε γωνία, σύνδεσμοι οι οποίοι περιγράφονται στην υποενότητα 2.5.
- ο γερανός ασφαρίζεται με ειδικά μέλη (stowage pins) που βρίσκονται στο μέσο των μικρών πλευρών του γερανού. Κατά μήκος του προβλήτα υπάρχουν θέσεις υποδοχής, ώστε όταν τα μέλη αυτά «χαμηλώσουν» να εισέλθουν στις υποδοχές, δρώντας έτσι ως μια ακόμη δικλείδα ασφαλείας.

8 ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΚΟΠΩΣΗΣ

8.1 Γενικά

Κόπωση ονομάζεται μια διαδικασία συσσώρευσης βλάβης σε ένα στοιχείο υποβαλλόμενο σε επαναληπτική φόρτιση κατά την οποία σχηματίζονται και σταδιακά διευρύνονται ρωγμές. Όταν η ρωγμή διευρυνθεί τόσο, ώστε η παραμένουσα καθαρή διατομή να μη μπορεί να παραλάβει τα ασκούμενα φορτία, επέρχεται η αστοχία. Συνήθεις περιοχές που εμφανίζεται κόπωση είναι περιοχές συγκέντρωσης τάσεων όπως απότομες αλλαγές διατομής, διάνοιξη οπών για κοχλιώσεις, περιοχές συγκολλήσεων με παραμένουσες τάσεις & μεταλλουργικές μεταβολές (Βάγιας κ.α., 2016). Ο έλεγχος έναντι κόπωσης καλύπτεται στα ευρωπαϊκά πρότυπα EN 13001-1:2015 στην παράγραφο 4 & EN 13001-3-1:2012 στην παράγραφο 6. Η κόπωση δεν εξαρτάται από το όριο διαρροής του χάλυβα αλλά από τη διακύμανση των τάσεων και τους κύκλους φόρτισης N.

Το εύρος τάσεων ορίζεται ως εξής:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (8-1)$$

όπου

σ_{\max} : η μέγιστη τάση

σ_{\min} : η ελάχιστη τάση.

Ως ιστορία τάσεων stress history ορίζεται η αριθμητική αναπαράσταση όλης της διακύμανσης των τάσεων σημαντικών για κόπωση. Ο έλεγχος θα πρέπει να πραγματοποιείται για συνδυασμούς φορτίσεων που αναμένονται να εμφανιστούν συχνά στη ζωή του έργου. Έτσι, συνήθως μόνον τα συνήθη φορτία λαμβάνονται υπόψη, με τα περιστασιακά και τα σπάνια να αμελούνται. Σε κάποιους γερανούς τα περιστασιακά φορτία π.χ. οι άνεμοι σε κατάσταση λειτουργίας, συμβαίνουν τόσο συχνά ώστε να χρειάζεται να ληφθούν υπόψη. Στο συγκεκριμένο τύπο γερανού κρίθηκε σκόπιμο να συμπεριληφθούν οι συνδυασμοί κατηγορίας B. Όπως εξηγείται στην υποενότητα 4.5.3, στους συνδυασμούς τίθεται $\gamma_p=1$ με τους επιμέρους δυναμικούς συντελεστές ψ να λαμβάνουν ίδιες τιμές με αυτές του κεφάλαιου 4 της παρούσας εργασίας. Στα παραρτήματα D & H του εν λόγω προτύπου βρίσκονται οι πίνακες των κατασκευαστικών λεπτομερειών με τις τιμές των χαρακτηριστικών αντοχών σε κόπωση $\Delta\sigma_c$ & $\Delta\tau_c$. Στις τιμές αυτές περιλαμβάνονται:

- οι τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων λόγω της μορφής του κόμβου και της γεωμετρίας της συγκόλλησης
- το μέγεθος και η μορφή των αποδεκτών ασυνεχειών
- η διεύθυνση των τάσεων
- οι μεταλλουργικές συνθήκες
- σε κάποιες περιπτώσεις, οι διαδικασίες συγκόλλησης και οι διαδικασίες βελτίωσης μετά τη συγκόλληση.

Συγκεντρώσεις τάσεων διαφορετικού είδους από τις προαναφερόμενες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη με κατάλληλους συντελεστές συγκέντρωσης τάσεων. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα οι αντοχές σε κόπωση να προσδιοριστούν πειραματικά σύμφωνα με την παράγραφο 6.2.3 του EN 13001-3-1:2012 ή ακόμη και να παρθούν από άλλες αναγνωρισμένες κανονιστικές διατάξεις που διέπονται από τις ίδιες αρχές με το συγκεκριμένο πρότυπο.

8.2 Εκτέλεση ελέγχου έναντι κόπωσης κατά EN 13001-3-1

Για την εκτέλεση του ελέγχου κόπωσης θα πρέπει να υπολογιστεί η συνολική φθορά προκαλούμενη από τους κύκλους τάσεων μεταβλητού εύρους ($\Delta\sigma$ ή ΔT). Στο εν λόγω πρότυπο ο συντελεστής φθοράς Palmgren-Miner περιγράφεται μέσω της παραμέτρου ιστορίας τάσεων (stress history parameter). Η παράμετρος ιστορίας τάσεων s θεωρείται ανεξάρτητη από τη μέση τάση (mean-stress) και έτσι η αντοχή σε κόπωση βασίζεται μόνο στο εύρος των τάσεων. Σε μη συγκολλητές λεπτομέρειες το ενεργό εύρος των τάσεων θα πρέπει να λογίζεται ως το άθροισμα του 60% της θλιπτικής τάσης με την εφελκυστική τάση όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση.

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - 0.6 \cdot \sigma_{\min} = \sigma_{\max} + 0.6 \cdot |\sigma_{\min}| \quad (8-2)$$

Επίσης, ορίζεται ο συντελεστής αντίστασης κόπωσης γ_{mf} με σκοπό την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας της αντοχής σε κόπωση αλλά και της πιθανής συνέπειας μιας αστοχίας που οφείλεται στη κόπωση. Ο συγκεκριμένος συντελεστής θεωρείται ξεχωριστά για κάθε λεπτομέρεια. Ως ασφαλή (fail-safe) δομικά στοιχεία θεωρούνται εκείνα που η αστοχία τους δε συνεπάγεται την αστοχία ολόκληρου του φορέα ή την πτώση του υπό ανύψωση αντικειμένου. Τέλος, εξετάζεται και η πρόσβαση στην υπό μελέτη κατασκευαστική λεπτομέρεια.

Πίνακας 8-1: Επιλογή συντελεστή γ_{mf}

γ_{mf}			
Accessibility	Fail-safe components	Non fail-safe components	
		without hazards for persons	with hazards for persons
Accessible joint detail	1,0	1,10	1,20
Joint detail with poor accessibility	1,05	1,15	1,25

Η χαρακτηριστική αντοχή σε κόπωση μιας κατασκευαστικής λεπτομέρειας χαρακτηρίζεται από την τιμή $\Delta\sigma_c$, όπου εκφράζει την αντοχή σε κόπωση για $2 \cdot 10^6$ κύκλους υπό σταθερό εύρος τάσεων.

Η παράμετρος ιστορίας τάσης s_m υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση.

$$s_m = v \cdot k_m \quad (8-3)$$

όπου

v : ο σχετικός συνολικός αριθμός εμφάνισης του εύρους τάσεων

k_m : ο συντελεστής φάσματος τάσης εξαρτώμενος από τον αριθμό m υπολογιζόμενος από την Εξ.(8-4).

$$k_m = \sum \left(\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\hat{\sigma}} \right)^m * \frac{n_i}{N_t} \quad (8-4)$$

όπου

$\Delta\sigma_i$: το εύρος τάσης i

$\Delta\hat{\sigma}$: το μέγιστο εύρος τάσης

n_i : ο αριθμός εμφάνισης του εύρους τάσης i

N_t : ο συνολικός αριθμός εμφάνισης των εύρων τάσης στη διάρκεια της ζωής του έργου

N_{ref} : οι κύκλοι τάσεων αναφοράς

m : η κλίση του διαγράμματος $\log\Delta\sigma$ - $\log N$ του υπό έλεγχο στοιχείου.

Ο έλεγχος σε κόπωση μπορεί να παραλείπεται εφόσον η τιμή της παραμέτρου s είναι μικρότερη από 0,001 και το όριο διαρροής του χάλυβα είναι μικρότερο ή ίσο με 500 MPa.

Για να ικανοποιείται ο έλεγχος έναντι κόπωσης θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση

$$\Delta\sigma_{Sd} \leq \Delta\sigma_{Rd} \quad (8-5)$$

όπου

$\Delta\sigma_{Sd}$: η μέγιστη τιμή του εύρους τάσεων, ίση με $\Delta\hat{\sigma}$

$\Delta\sigma_{Rd}$: το οριακό εύρος τάσεων σχεδιασμού.

Η ίδια εξίσωση ισχύει και για τις διατμητικές τάσεις όπου απλώς το σύμβολο σ αντικαθίσταται με το σύμβολο τ .

Αξίζει να σημειωθεί πως πέρα από τη συγκεκριμένη μέθοδο που αναλύεται στο παραπάνω τυπολόγιο υπάρχει μια ακόμη μεθοδολογία που προτείνεται στην παράγραφο 6.5.3 του EN 13001-3-1:2012. Ονομάζεται μέθοδος της κατηγορίας S "Use of class S" και δε θα αναφερθεί στο παρόν κείμενο καθώς ακολουθείται η αναλυτικότερη διαδικασία που αυτό προτείνει.

Το οριακό εύρος τάσεων σχεδιασμού υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$\Delta\sigma_{Rd} = \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{mf} * \sqrt{s_m}} \quad (8-6)$$

όπου

$\Delta\sigma_c$: η χαρακτηριστική αντοχή σε κόπωση

γ_{mf} : ο συντελεστής αντίστασης κόπωσης (Πίνακας 8-1)

m : η κλίση του διαγράμματος $\log\Delta\sigma$ - $\log N$ του υπό έλεγχο στοιχείου

s_m : η παράμετρος ιστορίας τάσης σύμφωνα με την Εξ.(8.3).

Έλεγχος σε ορθές και διατμητικές τάσεις

Εκτός από το ξεχωριστό έλεγχο ορθών και διατμητικών τάσεων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και ο ταυτόχρονος συνδυασμός τους.

$$\left(\frac{\Delta\sigma_{sd}}{\Delta\sigma_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\tau_{sd}}{\Delta\tau_{Rd}}\right)^2 \leq 1 \quad (8-7)$$

όπου

$\Delta\sigma_{Rd}$: το οριακό εύρος τάσεων σχεδιασμού ορθών τάσεων

$\Delta\tau_{Rd}$: το οριακό εύρος τάσεων σχεδιασμού διατμητικών τάσεων

$\Delta\sigma_{sd}$: η μέγιστη τιμή του εύρους ορθών τάσεων, ίση με $\Delta\delta$

$\Delta\tau_{sd}$: η μέγιστη τιμή του εύρους διατμητικών τάσεων, ίση με $\Delta\hat{\tau}$.

Μέθοδος Rainflow

Όπως προαναφέρθηκε, στις περισσότερες πραγματικές κατασκευές, όπως ισχύει άλλωστε και για τον υπό μελέτη γερανό, η φόρτιση είναι μεταβλητού εύρους. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ιστορίας τάσεων s_m απαιτείται η μετατροπή αυτών των μεταβλητών τάσεων σε ισοδύναμες φορτίσεις σταθερού εύρους. Ακολουθήθηκε η μέθοδος Rainflow, με την οποία προκύπτει το ιστογράμμα των τάσεων που δίνει τον αριθμό κύκλων n_i , οι οποίοι αντιστοιχούν σε εύρη τάσεων $\Delta\sigma_i$.

Εκ του συνόλου των μεθόδων που είναι γνωστές, η μέθοδος Rainflow θεωρείται η πιο διαδεδομένη. Αναπτύχθηκε από τον Tatsuo Endo το 1968, με τη μέθοδο να μεταφράζεται στην αγγλική γλώσσα το 1974. Το όνομά της είναι εμπνευσμένο από τις Ιαπωνικές παγόδες,

Η μέθοδος βασίζεται στους εξής κανόνες (Μπούρχας, 2015):

- 1) Η χρονοϊστορία σχεδιάζεται έτσι ώστε να ξεκινά και να ολοκληρώνεται από/στο σημείο με τη μέγιστη τιμή.
- 2) Η ροή ξεκινά σε κάθε αναστροφή και συνεχίζεται εκτός αν συμβεί κάποιο από τα ακόλουθα:
 - η ροή ξεκινά από ένα τοπικό μέγιστο (peak) και πέφτει απέναντι από ένα νέο τοπικό μέγιστο το οποίο έχει τιμή μεγαλύτερη από αυτή του σημείου που εκκίνησε η ροή
 - η ροή ξεκινά από ένα τοπικό ελάχιστο (valley) και πέφτει απέναντι από ένα νέο τοπικό ελάχιστο με μεγαλύτερη απόλυτη τιμή από αυτή του σημείου που εκκίνησε η ροή
 - η ροή συναντά στην πορεία της μια προηγούμενη ροή.

8.2.1 Θεώρηση συνήθους κίνησης

Ως τυπική κίνηση του γερανού (task) θεωρήθηκε η κίνησή του χωρισμένη στα εξής 4 επιμέρους στάδια:

- 1) το φορείο βρίσκεται στη θέση 1 του οπίσθιου τμήματος και ξεκινά την κίνηση προς τη θέση 16 (πρόσθιο τμήμα) με την αρπάγη (spreader) αναρτημένη
- 2) το φορείο & το μέσο μεταφοράς έχει φτάσει στη θέση 16 και τα εμπορευματοκιβώτια ανυψώνονται
- 3) τα εμπορευματοκιβώτια με το φορείο και το μέσο γυρνούν προς τη θέση 1
- 4) το φορείο καθυψώνει στο έδαφος τα υπό μεταφορά εμπορευματοκιβώτια.

Για κάθε λεπτομέρεια που μελετήθηκε έναντι κόπωσης θεωρήθηκε πως στη ζωή του έργου συμβαίνει μόνο 1 τυπική κίνηση (task) που αντικατοπτρίζει μια στήλη εκ των A & B συνδυασμών του πίνακα συνδυασμών φορτίσεων για έλεγχο κόπωσης στην υποενότητα 4.5.4. Έτσι, στην ουσία κάθε ιστορία τάσεων προκύπτει από $16*2+1=33$ καταγραφές.

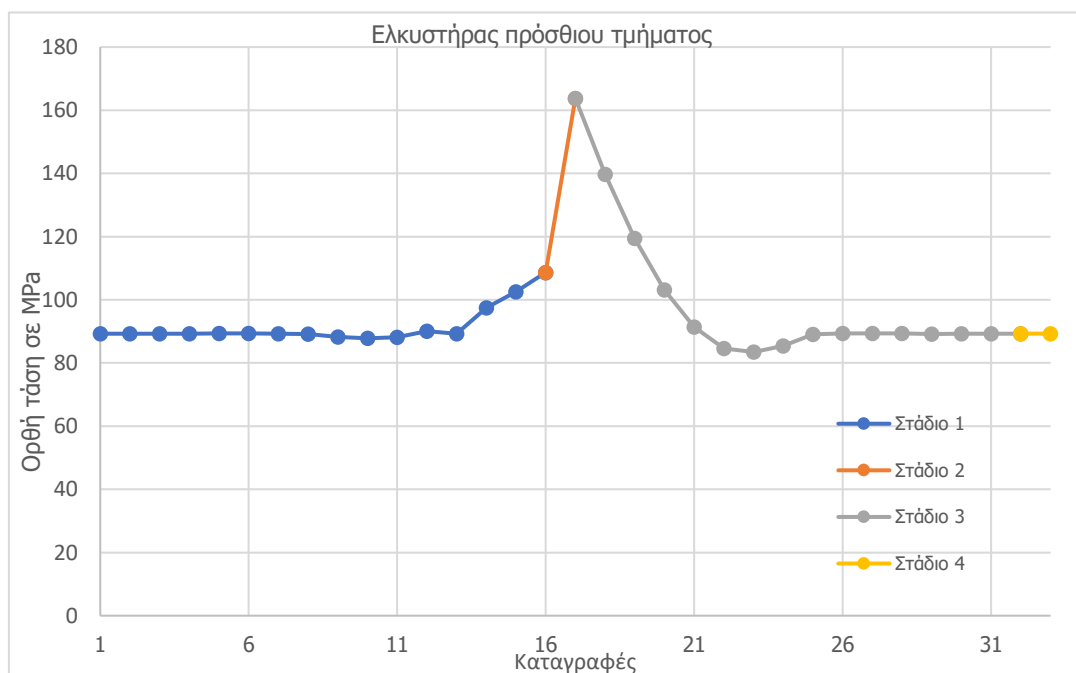
Σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα που βρίσκεται στο παράρτημα A του EN 15011:2011, ο λιμενικός γερανός ανήκει στην κατηγορία U_6-U_8 . Συνεπώς, θα πρέπει να σχεδιαστεί για $4*10^6$ κύκλους.

Πίνακας 8-2: Καθορισμός κατηγοριών U

No.	Type of operation	U-class
1	Hand powered cranes	U ₀ – U ₂
2	Assembly and maintenance cranes, intermittent operation	U ₁ – U ₃
3	Workshop cranes in general, hook service	U ₂ – U ₅
4	Factory and warehouse cranes, intermittent operation	U ₂ – U ₅
5	Warehouse cranes, continuous operation	U ₅ – U ₈
6	Paper mill cranes in process operation	U ₃ – U ₅
7	Shipbuilding cranes, hook service	U ₂ – U ₅
8	Cranes in steel production processes	U ₄ – U ₆
9	Terminal cranes, rubber tyred or rail mounted	U ₅ – U ₇
10	Ship to shore container cranes	U ₆ – U ₈
11	Unloading cranes, grabbing or magnet service	U ₆ – U ₈
12	Scrap-yard cranes, grabbing or magnet service	U ₆ – U ₈
13	Waste handling cranes in grabbing service	U ₅ – U ₈

8.2.2 Έλεγχος πρόσθιου ελκυστήρα

Το πρώτο μέλος που ελέγχθηκε σε κόπωση ήταν ο μακρύτερος ελκυστήρας του πρόσθιου τμήματος της δοκού κύλισης του γερανού όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-14. Όπως αναλύεται στην υποενότητα 7.3.1 η τάση λόγω του ι.β. των ελκυστήρων υπολογίστηκε εκτός RFEM 6. Με όμοιο τρόπο οι τάσεις υπολογίστηκαν και σε αυτή την περίπτωση.



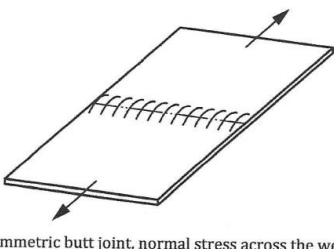
Εικόνα 8-1: Καταγραφή τάσεων στον ελκυστήρα

Το παραπάνω διάγραμμα μετατρέπεται έτσι ώστε να ξεκινά από το σημείο που η τάση έχει τη μέγιστη της τιμή. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο Rainflow προκύπτουν τα παρακάτω εύρη τάσεων $\Delta\sigma$ και οι κύκλοι n_i με εύρη μεγαλύτερα από το εύρος $\Delta\sigma_L$.

Πίνακας 8-3: Εύρη τάσεων, κύκλοι και συντελεστές k_{mi} για έλεγχο κόπωσης

Εύρος τάσεων $\Delta\sigma$ (MPa)	Συνολικοί κύκλοι	k_{mi}
81	0,5	0,500
81	0,5	0,500

Ο συντελεστής γ_{mf} ισούται με 1,25 αφού θεωρήθηκε πως η λεπτομέρεια είναι τύπου non fail-safe και με περιορισμένη πρόσβαση. Επιλέχθηκε η λεπτομέρεια 3.1, δηλαδή έγινε έλεγχος σε ορθή τάση κάθετα στη συνεχή συγκόλληση κατηγορίας B*.

$\Delta\sigma_c$ $\Delta\tau_c$ N/mm ²	Constructional detail
m = 3	 <p>Symmetric butt joint, normal stress across the weld</p>
140	Butt weld, quality level B*

Εικόνα 8-2: Κατηγορία λεπτομέρειας

Πίνακας 8-4: Έλεγχος σε κόπωση

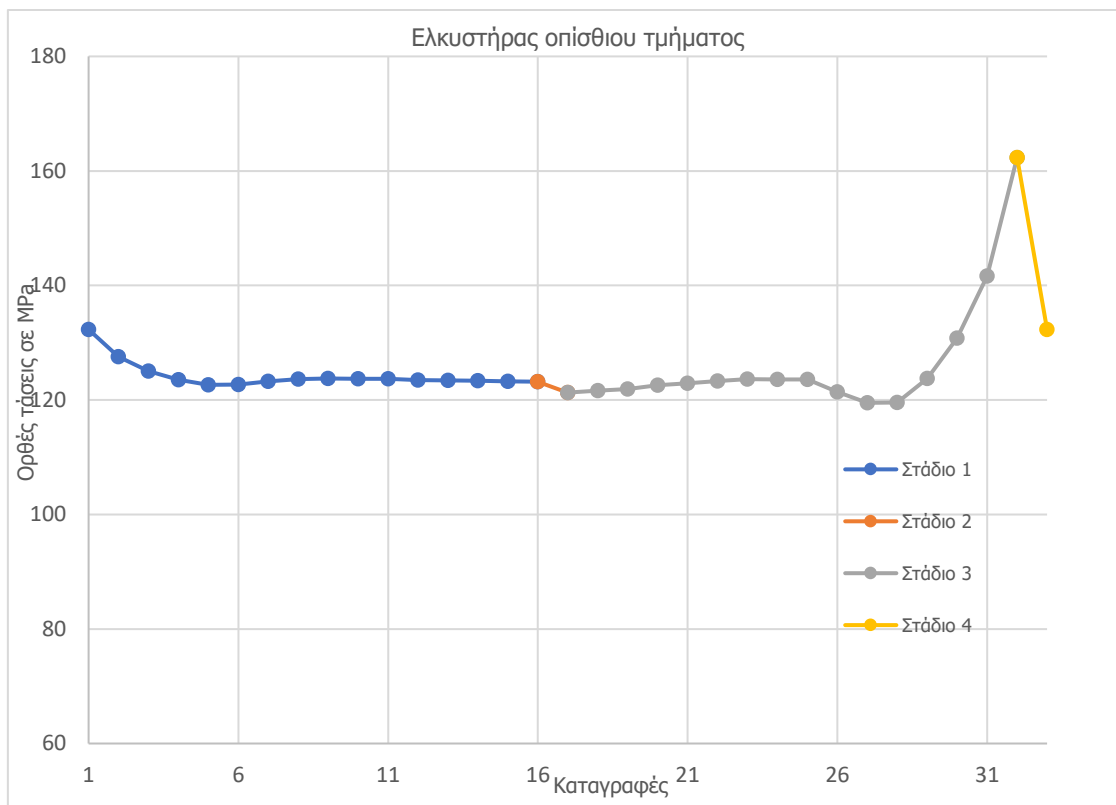
Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Αριθμός αναφοράς κύκλων τάσεων	N_{ref}	2000000	-
Κύκλοι τάσεων σχεδιασμού	C	4000000	-
Συνολικός αναμενόμενος αριθμός εύρους τάσεων στη ζωή του έργου	N_t	4000000	-
Μέγιστο εύρος τάσεων	$\Delta\sigma^*$	81	MPa
Σταθερά κλίσης καμπύλης $\log\Delta\sigma$ - $\log\log N$	m	3	-
Συντελεστής φάσματος τάσεων	k_m	1,00	-
Συνολικός σχετικός αριθμός εύρους τάσεων	v	2	-
Παράμετρος ιστορίας τάσεων	s	2,00	-
Χαρακτηριστική αντοχή σε κόπωση	$\Delta\sigma_c$	140	MPa
Ειδικός συντελεστής ασφαλείας κόπωσης	γ_{mf}	1,25	-
Μέγιστο εύρος τάσεων	$\Delta\sigma_{sd}$	81	MPa
Οριακό εύρος τάσεων σχεδιασμού	$\Delta\sigma_{Rd}$	89	MPa

Συνεπώς, ο ελκυστήρας επαρκεί έναντι κόπωσης με $\Delta\sigma_{sd}=81$ MPa & $\Delta\sigma_{Rd}=89$ MPa.

Διατμητικές τάσεις δεν υπάρχουν συνεπώς δεν εκτελείται ο ταυτόχρονος έλεγχος ορθών & διατμητικών τάσεων.

8.2.3 Έλεγχος οπίσθιου ελκυστήρα

Το δεύτερο σημείο που ελέγχθηκε σε κόπωση ήταν ο ελκυστήρας του πρόσθιου τμήματος της δοκού κύλισης του γερανού όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-16.



Εικόνα 8-3: Καταγραφές τάσεων για εκτέλεση μεθόδου Rainflow

Ακολουθεί ο πίνακας με τα εύρη τάσεων όπως αυτά υπολογίστηκαν από τη μέθοδο Rainflow αφού εφαρμόστηκε ο κανόνας 1.

Πίνακας 8-5: Εύρη τάσεων, κύκλοι & συντελεστές k_{mi}

Εύρος τάσεων $\Delta\sigma$ (MPa)	Συνολικοί κύκλοι	k_{mi}
41	0,5	0,500
41	0,5	0,500

Παρατηρούνται αρκετά μικρά εύρη τάσεων $\Delta\sigma_i$. Μάλιστα είναι κατώτερα από το εύρος τάσης $\Delta\sigma_L$. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται πως $\Delta\sigma_L=0.405\Delta\sigma_c$ και πως εύρη τάσεων κατώτερα από $\Delta\sigma_L$ δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Όμως στη συγκεκριμένη περίπτωση όλα τα εύρη είναι μικρότερα από το συγκεκριμένο όριο. Συνεπώς, μάλλον μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως ο ελκυστήρας του οπίσθιου τμήματος δεν κινδυνεύει έναντι κόπωσης, όπως και δείχθηκε στη συνέχεια παρότι ο έλεγχος ίσως θα μπορούσε να σταματήσει εδώ. Όμοια με παραπάνω ο συντελεστής γ_{mf} θεωρήθηκε ίσος με 1,25 καθώς έγινε η επιλογή της ίδιας λεπτομέρειας.

Πίνακας 8-6: Έλεγχος σε κόπωση

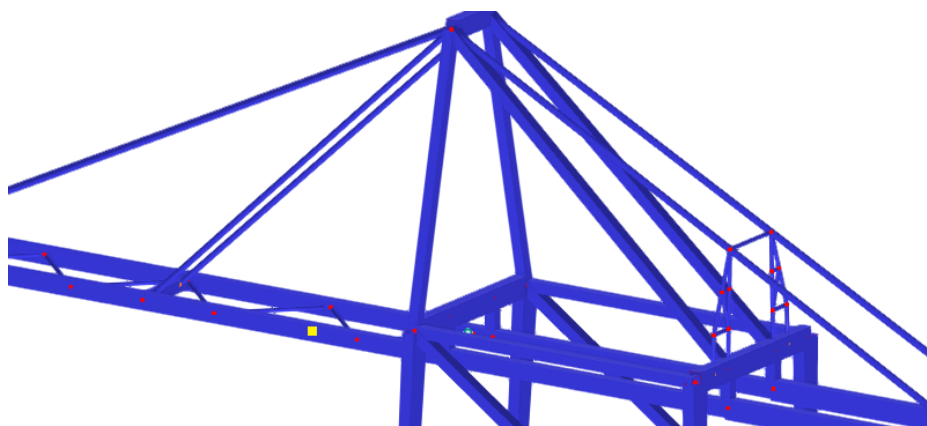
Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Αριθμός αναφοράς κύκλων τάσεων	N_{ref}	2000000	-
Κύκλοι τάσεων σχεδιασμού	C	4000000	-
Συνολικός αναμενόμενος αριθμός εύρους τάσεων στη ζωή του έργου	N_t	4000000	-
Μέγιστο εύρος τάσεων	$\Delta\sigma^*$	41	MPa
Σταθερά κλίσης καμπύλης $\log\Delta\sigma-\log\log N$	m	3	-
Συντελεστής φάσματος τάσεων	k_m	1,00	-
Συνολικός σχετικός αριθμός εύρους τάσεων	v	2	-
Παράμετρος ιστορίας τάσεων	s	2,00	-
Χαρακτηριστική αντοχή σε κόπωση	$\Delta\sigma_c$	140	MPa
Ειδικός συντελεστής ασφαλείας κόπωσης	γ_{mf}	1,25	-
Μέγιστο εύρος τάσεων	$\Delta\sigma_{sd}$	41	MPa
Οριακό εύρος τάσεων σχεδιασμού	$\Delta\sigma_{Rd}$	79	MPa

Συνεπώς, ο ελκυστήρας επαρκεί έναντι κόπωσης με $\Delta\sigma_{sd}=41$ MPa & $\Delta\sigma_{Rd}=79$ MPa

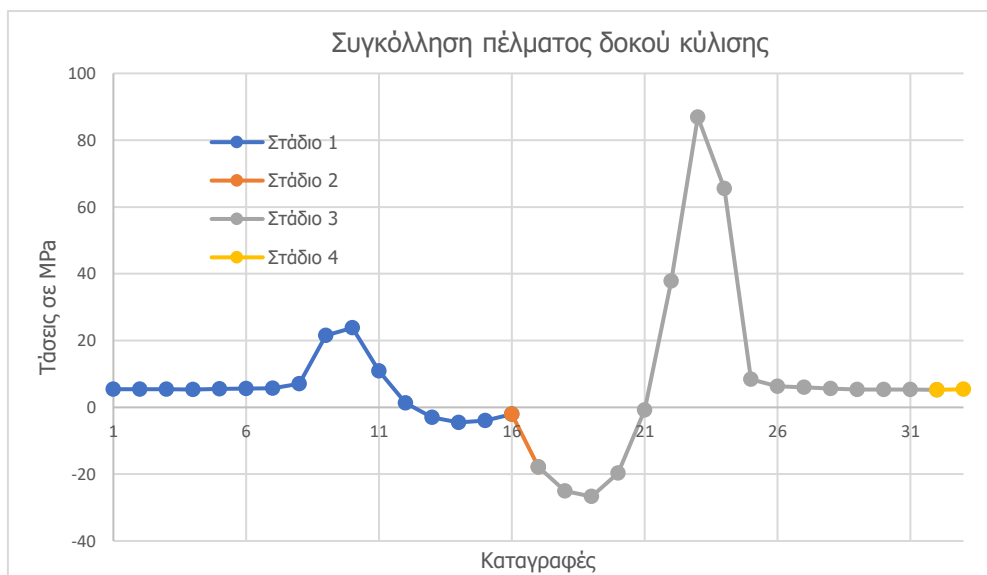
Διατμητικές τάσεις ναι μεν υπάρχουν αλλά κρίνονται ως αμελητέες. Συνεπώς, δεν εκτελείται ο ταυτόχρονος έλεγχος ορθών & διατμητικών τάσεων.

8.2.4 Έλεγχος συγκόλλησης κάτω πέλματος δοκού κύλισης

Ένα ακόμη σημείο που ελέγχθηκε ήταν η συγκόλληση του κάτω πέλματος του κάτω του πρόσθιου τμήματος της δοκού κύλισης. Από την καταγραφή της μεταβολής των τάσεων κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του έργου του γερανού, φαίνεται πως όταν το φορείο δεν είναι επαρκώς κοντά στο υπό εξέταση σημείο (stress point) η τάση είναι αξιοσημείωτα μικρή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στη διατομή του πρόσθιου τμήματος της δοκού κύλισης κυριαρχεί η θλίψη εισηγμένη στη διατομή από τους ελκυστήρες. Σε συνδυασμό με το ότι το σημείο υπολογισμού των τάσεων (stress point) αφορά το κάτω πέλμα της δοκού που εφελκύεται λόγω του ίδιου βάρους της δοκού, οι 2 τάσεις σχεδόν αλληλοαναιρούνται με αποτέλεσμα να προκύπτει η τόσο μικρή τάση (5 με 6 MPa). Όταν όμως το φορείο προσεγγίσει την περιοχή αυτή, τότε η τάση αυξάνεται σημαντικά όπως φαίνεται στην Εικόνα 8-5. Επιλέχθηκε η λεπτομέρεια 3.7 του πίνακα D3 του EN 13001-3-1:2012 με συγκόλληση κατηγορίας B.



Εικόνα 8-4: Σημείο ελέγχου δοκού κύλισης (σημείο με κίτρινη σήμανση)



Εικόνα 8-5: Καταγραφές τάσεων για εκτέλεση μεθόδου Rainflow

Εφαρμόζοντας τους κανόνες της μεθόδου Rainflow προκύπτει πως θα ληφθεί υπόψη μόνο $0,5+0,5=1$ κύκλος τάσης με εύρος 114 MPa, ενώ οι κύκλοι με μικρά εύρη τάσεων δε λαμβάνονται υπόψη.

Πίνακας 8-7: Εύρη τάσεων, κύκλοι & συντελεστές k_{mi}

Εύρος τάσεων $\Delta\sigma$ (MPa)	Συνολικοί κύκλοι	k_{mi}
114	1	1,0

Πίνακας 8-8: Πίνακας ελέγχου μεθόδου Rainflow

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Αριθμός αναφοράς κύκλων τάσεων	N_{ref}	2000000	-
Κύκλοι τάσεων σχεδιασμού	C	4000000	-
Συνολικός αναμενόμενος αριθμός εύρους τάσεων στη ζωή του έργου	N_t	4000000	-
Μέγιστο εύρος τάσεων	$\Delta\sigma^*$	114	MPa
Σταθερά κλίσης καμπύλης $\log\Delta\sigma-\log\log N$	m	3	-
Συντελεστής φάσματος τάσεων	k_m	1,00	-
Συνολικός σχετικός αριθμός εύρους τάσεων	ν	2	-
Παράμετρος ιστορίας τάσεων	s	2,00	-
Χαρακτηριστική αντοχή σε κόπωση	$\Delta\sigma_c$	180	MPa
Ειδικός συντελεστής ασφαλείας κόπωσης	γ_{mf}	1,25	-
Μέγιστο εύρος τάσεων	$\Delta\sigma_{sd}$	114	MPa
Οριακό εύρος τάσεων σχεδιασμού	$\Delta\sigma_{Rd}$	114	MPa

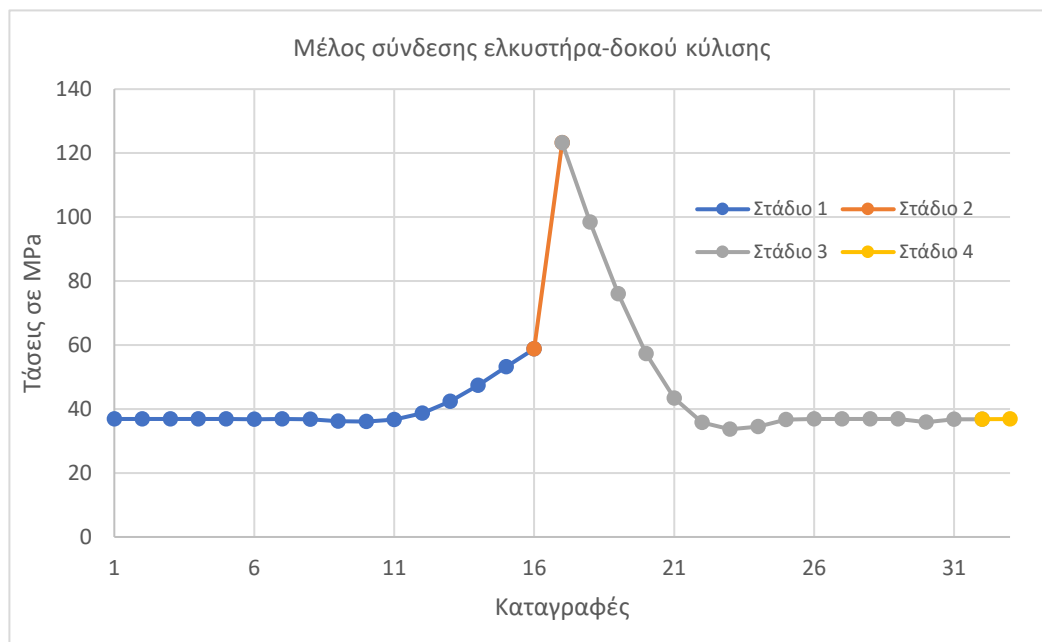
Παρατηρείται πως υπάρχει οριακή επάρκεια/ανεπάρκεια. Οι διατμητικές τάσεις δεν ελέγχθηκαν διότι παρουσίασαν μηδαμινή διακύμανση. Θα πρέπει να αναφερθεί πως η θεώρηση ότι ο γερανός καταπονείται μόνο από το δυσμενέστερο συνδυασμό είναι μια αρκετά συντηρητική προσέγγιση. Αυτό συμβαίνει διότι από τους 4 εκατομμύρια κύκλους, δεν αναμένεται όλοι να αφορούν τον υπό μελέτη δυσμενέστερο συνδυασμό αλλά θα αφορούν και άλλους που είναι ευμενέστεροι, δηλαδή συνδυασμούς με χαμηλότερες διακυμάνσεις τάσεων.

8.2.5 Έλεγχος μέλους σύνδεσης ελκυστήρων-δοκού κύλισης

Το τελευταίο σημείο που ελέγχθηκε έναντι κόπωσης είναι το μέλος μέσω του οποίου μεταβιβάζονται οι θλιπτικές δυνάμεις στη δοκό κύλισης. Ελέγχθηκε η συγκόλληση κατηγορίας Β του άνω πέλματος στο μέσο της δοκού μήκους 8 m με ίδιο $\Delta\sigma_c$ με παραπάνω (λεπτομέρεια 3.7).



Εικόνα 8-6: Μέλος σύνδεσης ελκυστήρων δοκού-κύλισης (σημείο με κίτρινη σήμανση)



Εικόνα 8-7: Καταγραφή ιστορίας τάσεων

Εφαρμόζοντας τους κανόνες της μεθόδου Rainflow προκύπτουν οι τιμές του παρακάτω πίνακα με τις οποίες θα γίνει ο έλεγχος σε κόπωση.

Πίνακας 8-9: Εύρη τάσεων, κύκλοι & συντελεστές k_{mi}

Εύρος τάσεων $\Delta\sigma$ (MPa)	Συνολικοί κύκλοι	k_{mi}
88	0,5	0,483
89	0,5	0,5

Πίνακας 8-10: Πίνακας ελέγχου μεθόδου Rainflow

Μέγεθος	Συμβολισμός	Τιμή	Μονάδες
Αριθμός αναφοράς κύκλων τάσεων	N_{ref}	2000000	-
Κύκλοι τάσεων σχεδιασμού	C	4000000	-
Συνολικός αναμενόμενος αριθμός εύρους τάσεων στη ζωή του έργου	N_t	4000000	-
Μέγιστο εύρος τάσεων	$\Delta\sigma^*$	89	MPa
Σταθερά κλίσης καμπύλης $\log\Delta\sigma-\log\log N$	m	3	-
Συντελεστής φάσματος τάσεων	k_m	0,98	-
Συνολικός σχετικός αριθμός εύρους τάσεων	v	2	-
Παράμετρος ιστορίας τάσεων	s	1,967	-
Χαρακτηριστική αντοχή σε κόπωση	$\Delta\sigma_c$	180	MPa
Ειδικός συντελεστής ασφαλείας κόπωσης	γ_{mf}	1,25	-
Μέγιστο εύρος τάσεων	$\Delta\sigma_{sd}$	89	MPa
Οριακό εύρος τάσεων σχεδιασμού	$\Delta\sigma_{Rd}$	115	MPa

Συνεπώς, ο ελκυστήρας επαρκεί έναντι κόπωσης με $\Delta\sigma_{sd}=89$ MPa & $\Delta\sigma_{Rd}=180$ MPa. Στο συγκεκριμένο σημείο της δοκού δεν υπάρχει αξιόλογη μεταβολή διατμητικών τάσεων. Αυτό συμβαίνει διότι επιλέχθηκε προς έλεγχο έναντι κόπωσης ηθελημένα σημείο στο μέσο της δοκού, ώστε να βρίσκεται σε απόσταση από τον κόμβο σύνδεσης των ελκυστήρων, δεδομένου ότι η περιοχή πιθανολογείται ότι θα ενισχυθεί τοπικά σημαντικά.

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο υπό μελέτη γερανός πρόκειται για μια κατασκευή που εμφανίζει σημαντική απόκλιση ως προς τη δυσκαμψία της περί τους 2 άξονες. Περί τη διεύθυνση κάθετη στο διαμήκη άξονα της κατασκευής ο φορέας είναι επαρκώς δύσκαμπτος, κάτι που επιβεβαιώνεται από τις ιδιομορφικές αναλύσεις αλλά και από τις μέγιστες μετακινήσεις που προκύπτουν υπό σφοδρούς ανέμους. Αντίθετα, περί το διαμήκη άξονα της κατασκευής το στατικό σύστημα είναι εμφανώς πιο εύκαμπτο με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη ενδοσιμότητα σε μετακινήσεις. Τούτο συμβαίνει λόγω της απαίτησης η συγκεκριμένη πλευρά να είναι ελεύθερη εμποδίων με σκοπό την απρόσκοπτη μετακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων.

Στα περισσότερα μέλη και ειδικότερα στα υποστυλώματα, για τα οποία η ανάγκη εκτέλεσης μη γραμμικών αναλύσεων γεωμετρίας με αρχικές ατέλειες κρίθηκε ως επιτακτική, η επιβολή αρχικών ατελειών στο φορέα είχε μειωμένη επιρροή ως προς την αύξηση των von Mises τάσεων. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός πως παρότι εμφανίζονται αρκετά υψηλές τάσεις κατά μήκος των υποστυλωμάτων, αυτές προέρχονται σε πολύ μεγάλο βαθμό από καμπτικές ροπές παρά από την αξονική θλίψη, που κατ' απόλυτη τιμή είναι μεν υψηλή αλλά για τα γεωμετρικά & αδρανειακά χαρακτηριστικά των διατομών εμφανίζονται σχετικώς μικρές θλιπτικές τάσεις. Συνεπώς, αφού η επίδραση των ατελειών είναι άμεσα εξαρτώμενη από τις αξονικές δυνάμεις στα μέλη, η μικρή επίδραση κρίνεται ως αναμενόμενη.

Γενικώς, τα μέλη του φορέα εμφανίζουν απόκλιση όσον αφορά την κρίσιμη δράση ως προς την οποία πραγματοποιείται η διαστασιολόγησή τους. Οι παράγοντες που καθόρισαν το σχεδιασμό των μελών του φορέα ήταν ο σφοδρός άνεμος, τα φορτία από την κίνηση των εμπορευματοκιβωτίων αλλά και η κόπωση. Παρατηρήθηκε πως η δράση που κατ' ουσία καθόρισε τη διαστασιολόγηση των υποστυλωμάτων είναι η σφοδρή ανεμοφόρτιση, η οποία προκάλεσε υψηλές καμπτικές ροπές και κατ' επέκταση τάσεις. Αντίθετα, όσον αφορά τα μέλη της δοκού κύλισης καθοριστική ήταν η επίδραση της κίνησης των εμπορευματοκιβωτίων αλλά και η κόπωση προκαλούμενη από την αυξημένη απαίτηση σε κύκλους φόρτισης του γερανού. Συχνά παρατηρείται να είναι επιθυμητή η αύξηση της ανυψωτικής ικανότητας των γερανών τύπου STS (crane upgrade). Ενώ αναμένεται μια λελογισμένη αύξηση της ανυψωτικής ικανότητας να μπορεί να ικανοποιήσει τους ελέγχους επάρκειας διατομών & μελών πλην κόπωσης, ο έλεγχος σε κόπωση είναι πιθανό να φανεί κρίσιμότερος αλλά και αποτρεπτικός παράγοντας.

Τα μέλη των ελκυστήρων του πρόσθιου τμήματος έχουν πολύ σημαντική επίδραση στο εύρος των κατακόρυφων μετακινήσεων. Επίσης, διαπιστώθηκε πως το ποσοστό αξιοποίησης έναντι κόπωσης είναι υψηλότερο από αυτό του ελέγχου διατομής, κάτι που ενδυναμώνει την ισχύ του προηγούμενου

συμπεράσματος, ενώ μια αύξηση του πάχους του ελκυστήρα -με ταυτόχρονη αύξηση και του ύψους του για μεγαλύτερη ροπή αδράνειας- αναμένεται να δράσει ευεργετικά στη μείωση των κατακόρυφων βελών.

10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βάγιας Ι., Ηλιόπουλος Α., Θανόπουλος Π. (2016), «Σχεδιασμός Σύμμικτων Γεφυρών από Χάλυβα και Οπλισμένο Σκυρόδεμα» Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα
2. Γαντές Χ. (2016) «Μη Γραμμική Συμπεριφορά των Κατασκευών-Έμφαση στις Μεταλλικές Κατασκευές». Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, Αθήνα
3. Μπάσμπας Σ. (2013) «Εισαγωγή στην Οικονομική των Μεταφορών». Ανοιχτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα Α.Π.Θ.
4. Μπούρχας Κ. (2015) "Διερεύνηση συγκολλητού κόμβου από χάλυβα υπό σεισμικές καταπονήσεις
5. Τσιτσάμης, Δ. Σ. (2010). Σταθμοί εμπορευματοκιβωτίων λιμένων: προσομοιωτικά μοντέλα και αλγόριθμοι βελτιστοποίησης.
6. Bartošek, A., & Marek, O. (2013). Quay cranes in container terminals. Transactions on Transport Sciences, 6(1), 9-18
7. Bhimani & Soderberg (2006). Crane Loads & Wharf Structure Design: Putting the Tow Together. AAPA Facilities Engineering Seminar January 2006 – Jacksonville, Florida, USA
8. Detail of skidding system and STS crane <https://www.energyfacts.eu/fagioli-installs-sts-crane-at-quetzal-terminals-in-guatemala/>
9. de Vette, B. J. (2011). Analysis of snag loads in a ship-to-shore crane.
10. Digiesi, S., Facchini, F., & Mummolo, G. (2019). Dry port as a lean and green strategy in a container terminal hub: A mathematical programming model. Management and Production Engineering Review, 10(1)

11. EN 10025-2:2004, Hot rolled products of structural materials-Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels
12. EN 10025-3:2004, Hot rolled products of structural materials-Part 2: Technical delivery conditions for normalized rolled weldable fine grain structural steels
13. EN 10025-3:2004, Hot rolled products of structural steels-Part 6: Technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition
14. EN 10088-2:2014, Stainless steels-Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes
15. EN 10149-2:2013, Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming- Part 2: Delivery conditions for thermomechanically rolled steels
16. EN 10149-3:2013, Hot-rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming-Part 3: Delivery conditions for normalized or normalized rolled steels
17. EN 10164:2004: Steel products with improved deformation properties perpendicular to the surface of the product - Technical delivery conditions
18. EN 12385-4-2002+A1:2018: Steel wire ropes-Safety-Part 4: Stranded ropes for general lifting applications
19. EN 13001-2:2021 Crane safety-General design-Part 2: Load actions
20. EN 13001-3-1:2012 Crane-General Design-Part 3-1: Limit States and proof of competence of steel structures
21. EN 15011:2011 Cranes-Bridge and gantry cranes
22. EN 1991-1-4:2006 Eurocode 1: Actions on structures-Part 1-4: General actions-Wind actions
23. EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings
24. EN 1993-1-5:2006 Eurocode 3-Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements
25. EN 1998-1:2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings
26. F.E.M. 1000.1 3rd Edition Revised 1998.10.01: Rules for the design of hoisting of appliances
27. FprEN 1993-1-1:2022 Eurocode 3-Design of steel structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings

28. ISO 898-1:2013, Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel-Part 1: Bolts, screws and studs with specified property classes-Coarse thread and fine pitch thread
29. Oudshoorn, A. D. (2013). Cost reduction of Ship-To-Shore container gantry cranes for the Asia-Pacific market.
30. Rasch, T. (2022). Wind loading of STS cranes: Investigating improved calculation methods
31. Red Sea Gateway Terminal <https://rsgt.com/>
32. Review of Maritime Transport 2019 UNCTAD, 2019. https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2019_en.pdf, 5.
33. Ship-to-Shore-crane <https://www.konecranes.com/port-equipment-services/container-handling-equipment/konecranes-ship-to-shore-cranes>
34. South China Morning Post <https://www.scmp.com/business/china-business/article/3180772/shanghai-reopening-worlds-biggest-port-reaps-benefits>
35. The American Society of Mechanical Engineers (1983) "The PACECO Container Crane"
36. THPA-STSTechnical Specifications, Technical Specification Quayside Container Cranes Single-Hoist Twin-Lift for THPA
37. Varieties, sizes and carrying capacity of shipping containers <https://star-shine-shipping.com/en/manual/types-of-containers.html>
38. World Shipping Council The top 50 container ports <https://www.worldshipping.org/top-50-ports>