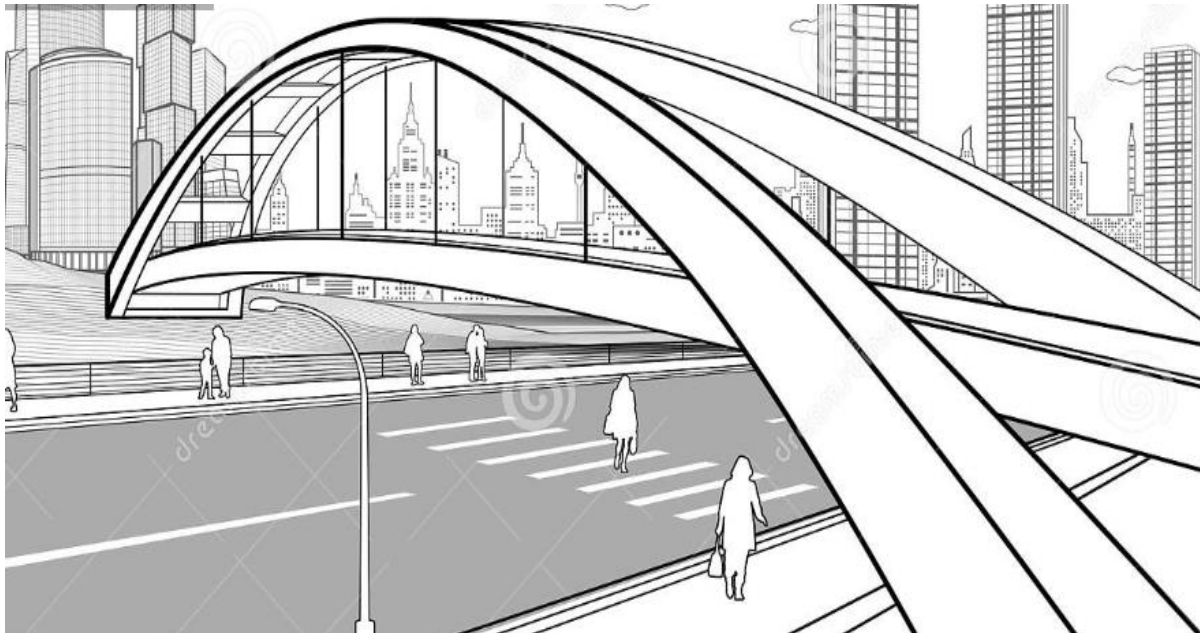




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών



Σχεδιασμός Τοξωτής Πεζογέφυρας στη Βούλα



Διπλωματική Εργασία
Βαρβάρα Ι. Σκούρτη

EMK ΔΕ 2021 25

Επιβλέπων: Παύλος Θανόπουλος
Αθήνα, Νοέμβριος 2022

Copyright © Βαρβάρα Σκούρτη, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Varvara Skourti, 2022

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.

Copyright © Varvara Skourti, 2022

All Rights Reserved

Σκούρτη Β. Ι. (2022)
Σχεδιασμός Τοξωτής Πεζογέφυρας στη Βούλα
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2021/25
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Skourti V. I. (2022).
Design of tied-arch footbridge at Voula
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2021/25
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε το χρονικό διάστημα μεταξύ 2021 έως 2022 στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας στον τομέα Μεταλλικών Κατασκευών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών, για την ολοκλήρωση της οποίας οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα:

Τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Παύλο Θανόπουλο για την ανάθεση του θέματος της διπλωματικής, δίνοντάς μου την δυνατότητα να ασχοληθώ με την μελέτη μίας τόσο ενδιαφέρουσας κατασκευής. Τον ευχαριστώ θερμά για την πολύτιμη υποστήριξη, τις παραγωγικές υποδείξεις του, την εκτίμηση που μου έδειξε και το πολύ καλό κλίμα συνεργασίας συμβάλλοντας τα μέγιστα για την κατάρτιση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακόμη ευχαριστώ τους φίλους και συμφοιτητές μου για την στήριξη και την πολύτιμη βοήθειά τους με κάθε τρόπο καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω με όλη μου την καρδιά τους γονείς και την αδερφή μου Έλενα που με υπομονή και κουράγιο προσέφεραν την απαραίτητη ηθική συμπαράσταση σε όλα τα χρόνια της φοίτησής μου.

Ευχαριστώ άπαντες για την εμπιστοσύνη τους.

Αφιέρωση

Η παρούσα διπλωματική είναι αφιερωμένη στην εκλιπούσα γιαγιά μου Βαρβάρα.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΜΚ ΔΕ 2021/25

Σχεδιασμός Τοξωτής Πεζογέφυρας στη Βούλα

Βαρβάρα Σκούρτη

Επιβλέπων: Παύλος Θανόπουλος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αναβάθμιση μιας περιοχής γεννά νέες ανάγκες για την ασφαλή και ταχύτερη διέλευση αστικής οδού, ώστε να εξυπηρετείται κάθε ομάδα ανθρώπων. Εξ αυτού πραγματώνεται η μελέτη για την κατασκευή μεταλλικής πεζογέφυρας, τοξωτού τύπου συμβάλλοντας ταυτόχρονα στην περιβαλλοντική αισθητική της παραλιακής Λεωφόρου Ποσειδώνος, στην περιοχή της Βούλας.

Πρωτίστως παρατίθεται η πολυχρηστικότητα του χάλυβα, ανάλογα με τη χημική του σύσταση και τον κλάδο που προορίζεται, με τα πλεονεκτήματά του να τον καθιστούν θεμελιώδες υλικό στην γεφυροποιία. Έπειτα αναφέρονται τα κριτήρια για τα είδη γεφυρών καθώς και τα επιμέρους δομικά μέλη.

Εν συνεχεία καθορίζεται η γεωμετρία του φορέα και υπολογίζονται τα φορτία και οι δυνάμεις για τους συνδιασμούς των οριακών καταστάσεων. Για την προσομοίωση χρησιμοποιείται το λογισμικό SOFiSTiK, ώστε να γίνουν οι ελαστικές αναλύσεις και οι έλεγχοι μελών και επάρκειας διατομών σε όρους τάσεων.

Ακολουθώς εξετάζεται η δυναμική συμπεριφορά της πεζογέφυρας σε περιοδική φόρτιση κατά τη διέλευση των πεζών, από την οποία προέκυψαν αμελητέες επιταχύνσεις. Τα επιμέρους μέλη του φορέα συνδέονται συγκολλητά μεταξύ τους, ενώ για τους αναρτήρες τοποθετούνται κομβοελάσματα. Ακόμη για τον υφιστάμενο φορέα έγινε επιλογή σφαιρικών εφεδράνων και διαμορφώθηκε μεταλλικός αρμός για την ασφαλή εκτόνωσή του.

Τέλος αναφέρονται επιγραμματικά τα στάδια κατασκευής για την διαμόρφωση του φορέα και προσμετράται προσεγγιστικά το κόστος για την υλοποίησή του.



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



DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2021/25

Design of tied-arch footbridge at Voula

Varvara Skourti

Supervisor: Pavlos Thanopoulos

ABSTRACT

The upgrading of an area creates new needs for safe and faster urban road crossing, so that every group of people can be served. Hence the study for the construction of a steel pedestrian bridge, tied-arch type, while upgrading the environmental aesthetics of the coastal Poseidonos Avenue, in the area of Voula.

Above all, the versatility of steel is listed, depending on its chemical composition and the sector it is intended for, with its advantages making it a fundamental material in bridge construction.

Then the geometry of the vector was determined and the loads and forces for the combinations of limit states were calculated. For the simulation, the SOFiSTiK software was used, in order to perform the elastic analyses and the checks of members and adequacy of cross-sections in terms of stresses (von Mises stress).

Subsequently, the vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading was examined, from which negligible accelerations were derived. The individual members of the carrier are welded to each other, while for the hangers are used connection plates. In addition, for the existing body, spherical bearings were selected and a metal joint was formed for its safe expansion.

Finally, the stages of construction for the configuration of the organization are briefly mentioned and the approximate cost for its implementation is counted.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Contents

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1.	Χάλυβας	1
1.2.	Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Χάλυβα	1
1.3.	Είδη Γεφυρών	2
1.4.	Μεταλλικές Πεζογέφυρες	4
1.5.	Δομικά Μέλη	5
2	ΜΟΡΦΩΣΗ ΦΟΡΕΑ	7
2.1.	Περιγραφή του έργου	7
2.2.	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πεζογέφυρας	8
2.3.	Ποιότητα υλικών και παραδοχές	10
3	ΔΡΑΣΕΙΣ	11
3.1	Εισαγωγή	11
3.2.	Μόνιμες Δράσεις	12
3.3.	Μεταβλητές Δράσεις	12
3.3.1.	Κατακόρυφα Φορτία σε Πεζογέφυρες	12
3.3.2.	Οριζόντια Φορτία σε Πεζογέφυρες	13
3.4.	Χιόνι	13
3.5.	Δράσεις Ανέμου	13
3.5.1.	Δεδομένα ανέμου	14
3.5.2.	Καλώδια	17
3.5.3.	Κατάστρωμα	22
3.6.	Υπολογισμός Φορτίων Ανέμου	26
3.6.1.	Καλώδια	27
3.6.2.	Τόξα	27
3.6.3.	Κατάστρωμα	27
3.7.	Θερμοκρασιακές Μεταβολές	28
3.7.1	Ομοιόμορφη συνιστώσα της θερμοκρασίας	30
3.7.2.	Γραμμική συνιστώσα της θερμοκρασίας	32
3.8.	Τυχηματικές δράσεις	32
3.9.	Σεισμικότητα	32
4	ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ	35
4.1.	Εισαγωγή	35

4.2.	Οριακές Καταστάσεις Αστοχίας - ΟΚΑ (ULS)	36
4.3.	Οριακές Καταστάσεις Λειτουργικότητας - ΟΚΛ (SLS).....	37
4.4.	Συνδυασμοί φορτίσεων	38
5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ.....	41
5.1.	Μοντελοποίηση στοιχείων στο SOFiSTiK.....	41
5.2.	Προσομοίωμα πεζογέφυρας.....	43
5.3.	Κατάταξη και αντοχή διατομών	45
5.4.	Προένταση καλωδίων.....	46
5.4.1.	Ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας	46
5.4.2.	Υπολογισμός προεντάσεως καλωδίων ανάρτησης	46
5.4.3.	Έλεγχος καλωδίων	50
5.5.	Έλεγχοι τάσεων	52
5.6.	Έλεγχοι ευστάθειας.....	55
5.6.1.	Τόξα.....	55
5.6.2.	Διαδοκίδες.....	61
5.7.	Έλεγχοι βελών.....	62
6	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΑ ΠΕΖΩΝ.....	63
6.1.	Εισαγωγή	63
6.2.	Ιδιοσυχνότητες πεζογέφυρας	63
6.3.	Μελέτη δυναμικής απόκρισης πεζογέφυρας.	66
7	ΕΦΕΔΡΑΝΑ	75
8.1.	Εισαγωγή	75
8.2.	Σφαιρικά εφέδρανα	75
8.3.	Διαστασιολόγηση εφεδράνων	77
8.4.	Αρμοί	81
8	ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ	83
8.1.	Εισαγωγή	83
8.2.	Συγκολλήσεις.....	83
8.3.	Συνδέσεις με κοχλίες.....	86
9	ΦΑΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ	89
9.1.	Φάσεις κατασκευής	89
9.2.	Κοστολόγηση.....	91
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	92

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Χάλυβας

Ο χάλυβας είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα βιομηχανικά υλικά μετά την πέτρα και το ξύλο. Η σύσταση του χάλυβα δίνει εντελώς διαφορετικές ιδιότητες και άρα προσδιορίζεται για διαφορετικές χρήσεις σε πολλούς κλάδους όπως την αρχιτεκτονική, την ναυπηγική μέχρι και την κατασκευή χειρουργικών εργαλείων. Επομένως ταξινομείται ανάλογα με την χημική του σύσταση, την κατεργασία του και τέλος την χρήση του. Συγκεκριμένα ως προς τη χημική τους σύσταση, οι χάλυβες διακρίνονται σε κοινούς ή ανθρακούχους και σε κραματωμένους. Ως προς την κατεργασία τους ταξινομούνται σε χάλυβες διαμόρφωσης και χυτοχάλυβες ενώ ως προς τη χρήση τους διακρίνονται σε χάλυβες κατασκευών, ανοξείδωτους με υψηλής περιεκτικότητας χρωμίου ($Cr > 11\%$) εξαιρετικής αντοχής σε οξειδωση για να κατασκευαστούν σωλήνες, αντιδραστήρες, ιατρικά εργαλεία και είδη οικιακής χρήσης, εργαλείοχάλυβες για την κατασκευή εργαλείων κοπής ή διαμόρφωσης και τέλος χάλυβες ηλεκτρομαγνητικών εφαρμογών, για την κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών ηλεκτρικών γεννητριών, μονίμων μαγνητών κ.α. Η πρώτη χώρα σε παραγωγή χάλυβα είναι η Κίνα, ενώ στην Ελλάδα η παραγωγή (περίπου 2,5 εκατ. τόνοι ετησίως) προέρχεται από την ανάτηξη παλαιοσιδήρου (scrap) και προορίζεται κυρίως για την παραγωγή μπετόβεργας.

Οι χάλυβες μπορεί να είναι όλκιμοι ή ψαθυροί, όταν έχουν υψηλή περιεκτικότητα π.χ. σε άνθρακα. Οι μεν όλκιμοι διαρρέουν γρήγορα και ταυτόχρονα παραμορφώνονται σημαντικά μέχρι να σπάσουν, οι δε ψαθυροί αντέχουν περισσότερο, αλλά μετά τη διαρροή ακολουθεί σχεδόν αμέσως η θραύση.

1.2. Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Χάλυβα

Πλεονεκτήματα:

- Μεγάλη δυσκαμψία και υψηλή αναλογία αντοχής προς ίδιο βάρος, πράγμα το οποίο επιτρέπει τη ζεύξη μεγάλων ανοιγμάτων, την οικονομία χώρου και υλικού εφόσον δύναται η διαμόρφωση λεπτών διατομών, άρα σχετικά μικρού νεκρού βάρους και συνεπώς οικονομικότερης θεμελίωσης. Επιπρόσθετα το μικρό βάρος οδηγεί στην ανάπτυξη μικρών αδρανειακών δυνάμεων.
- Ομογένεια υλικού, δηλαδή ίδια σύσταση και σταθερά μηχανικά χαρακτηριστικά σε κάθε στοιχειώδη μάζα, εξασφαλίζοντας ακρίβεια στις παραδοχές ανάλυσης και τον υπολογισμό των αντοχών.

- Ολκιμότητα/Πλαστιμότητα, δηλαδή αντοχή σε μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς να επέρχεται θραύση ακαριαία, ήτοι ψαθυρότητα, αλλά τοπική διαρροή σε θέσεις συγκέντρωσης υψηλών τάσεων με αποτέλεσμα την ανακατανομή της έντασης και δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας σε περιοχές υψηλής σεισμικής δράσης.
- Ταχύτητα ανέγερσης, με τη χρήση προκατασκευασμένων τυπικών διατομών και τη δυνατότητα απευθείας τοποθέτησης και συναρμολόγησής τους στο εργοτάξιο, συνεπώς και μικρό κόστος εργασίας.
- Τυποποίηση παραγωγής, σαν βιομηχανικό προϊόν με εξασφάλιση ποιοτικού ελέγχου.
- Εύκολη αποκατάσταση βλαβών, ενίσχυση/επέκταση και τροποποίηση υφιστάμενων κατασκευών, σε μικρό χρόνο.
- Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης.

Μειονεκτήματα:

- Μεγάλο κόστος πρώτης ύλης
 - Υψηλές θερμοκρασίες μειώνουν γρήγορα και αρκετά την αντοχή του χάλυβα, εξ' αυτού απαιτείται πυροπροστασία, όπως και τυχόν χαλύβδινα κουφώματα σε κτίρια πρέπει να διαθέτουν επαρκή πυρόσβεση.
- Ευαισθησία σε λυγισμό.
- Απαιτηση συντήρησης, λόγω διάβρωσης. Βέβαια η εφαρμογή στεγανών και ανθεκτικών υλικών μπορεί να εξαλείψει αυτό το πρόβλημα.
- Ευαισθησία σε κόπωση, δηλαδή σε μεγάλο αριθμό κύκλων επαναλαμβανόμενης φόρτισης.
- Ειδικό υπολογισμό συνδέσεων σε κόμβους.
- Λιγότερη τεχνογνωσία στην Ελλάδα

1.3. Είδη Γεφυρών

Γενικά οι παράγοντες που εξετάζονται προκειμένου να επιλεγεί το καταλληλότερο φέρον σύστημα για μία γέφυρα είναι:

- Το τοπογραφικό ανάγλυφο
- Τα γεωλογικά και εδαφομηχανικά χαρακτηριστικά
- Η μέθοδος κατασκευής
- Η τεχνογνωσία και τα διατιθέμενα υλικά
- Η τεχνολογία των υλικών

Με βάση τα ανωτέρω τελικώς καθορίζεται το μήκος, τα ανοίγματα και το ύψος του φορέα. Η κατηγοριοποίηση των γεφυρών ποικίλει ως προς τη χρήση, τη διατομή, το στατικό σύστημα, το υλικό κατασκευής, τη μέθοδο κατασκευής, τη μορφή της κάτοψης, τη δυνατότητα μετακίνησης ακόμη και τη θέση του καταστρώματος. Ακολουθούν ορισμένες εξ αυτών, τελείως ενδεικτικές, είτε με βάση τη γεωμετρία είτε με βάση το στατικό σύστημα:

Αμφιέριστες Γέφυρες

Οι αμφιέριστες επιλέγονται για μικρές έως μεσαίων ανοιγμάτων γέφυρες και αποτελούν το απλούστερο στατικό σύστημα. Προτιμώνται σε εδάφη περιορισμένης αντοχής (κίνδυνος καθίζησης), στην φάση προκατασκευής και σε αστικές περιοχές όπου απαιτείται ταχύς ανέγερση. Η πλάκα σκυροδέματος αναλαμβάνει μόνον θλίψη, κάτι που δεν επιτρέπει την ανακατανομή της έντασης.

Ωστόσο λόγω του συστήματος, δεν δημιουργούνται εντάσεις έμμεσων δράσεων όπως ερπυσμό, συστολή ξήρανσης, θερμοκρασιακές μεταβολές κ.τ.λ. Απαιτούν μεγάλο πλάτος έδρασης, διότι κινδυνεύουν από πτώση σε περίπτωση δυναμικής φόρτισης είτε από ταλαντώσεις είτε από παραμορφώσεις. Πρέπει να τοποθετούνται περισσότερα εφέδρανα και αρμοί συστολής-διαστολής, όπου βέβαια μπορεί να αποκατασταθεί η συνέχεια με πλάκες ή άλλους τρόπους.

Συνεχείς Γέφυρες

Σε αντίθεση με τις αμφιέριστες, οι συνεχείς γέφυρες επιτρέπουν την ανακατανομή της έντασης, με τη χρήση μεταβλητού πάχους διατομή. Είναι πιο δύσκαμπτες και εξ' αυτού δεν μπορούν να παραλάβουν τεκτονικές μετακινήσεις ή καθιζήσεις. Λόγω των φορτίων κυκλοφορίας, στην εσωτερικής στήριξη αναπτύσσονται αρνητικές ροπές οι οποίες προκαλούν ρηγματώσεις, εξαιτίας εφελκυσμού, στην πλάκα σκυροδέματος. Για πολλαπλά ανοίγματα, το μήκος των ακραίων τμημάτων αποτελούν το 80% του τυπικού ανοίγματος L, ώστε να εξισώνονται οι αρνητικές και θετικές ροπές αλλά και τα βέλη λόγω ιδίου βάρους. Σε μεγάλα ανοίγματα η σκυροδέτηση της γίνεται σε φάσεις, ώστε το τμήμα των αρνητικών ροπών να είναι μικρό, είτε σκυροδετούνται πρώτα τα ανοίγματα και έπειτα οι εσωτερικές στηρίξεις. Βέβαια η σταδιακή σκυροδέτηση απαιτεί περισσότερες αναλύσεις εφόσον το στατικό σύστημα και οι εντάσεις που αναπτύσσονται στο φορέα λόγω των μόνιμων φορτίων είναι διαφορετικές. Οι εντάσεις των επιμέρους σταδίων ανακατανέμονται χρονικά λόγω ερπυσμού.

Τοξωτές Γέφυρες

Τα κύρια στοιχεία μίας τοξωτής γέφυρας είναι τα τόξα, οι κύριες δοκοί, οι διαδοκίδες, η πλάκα καταστρώματος και οι αναρτήρες. Διακρίνονται σε δύο είδη φορέων, στα καθαρά τόξα για τυπικά ανοίγματα 150-500m και στα τόξα με ελκυστήρα για ανοίγματα 50-250m και. Στην τελευταία περίπτωση η ώθηση του τόξου παραλαμβάνεται από την κύρια δοκό-ελκυστήρα, ώστε να διαμορφώνεται ένας ισοστατικός φορέας. Οι κύριες δοκοί συμπεριφέρονται ως συνεχείς δοκοί επί ελαστικών στηρίξεων που προσφέρουν οι αναρτήρες και συνδέονται μεταξύ τους με τις διαδοκίδες.

Καλωδιωτές γέφυρες

Η ιδέα της καλωδιωτής γέφυρας προέρχεται από τις κρεμαστές γέφυρες. Είναι ιδανικές για μεγάλες αποστάσεις και τα κριτήρια σχεδιασμού (ασφάλεια, αντοχή, λειτουργικότητα) καλύπτονται με οικονομική κατασκευή. Αποτελεί οικονομική επιλογή για ανοίγματα 150-600 m, ενώ μπορούν να ξεπεράσουν και τα 1000m. Αποτελείται από πολλούς πυλώνες, όπου μεταφέρονται τα φορτία του καταστρώματος μέσω των λοξών καλωδίων.

Δικτυωτές Γέφυρες

Χρησιμοποιούνται κυρίως για το σιδηροδρομικό δίκτυο της Ελλάδας, μιας που η κατασκευή του είναι απλή αλλά μεγάλης ακαμψίας λόγω μεγάλου ύψους της δικτυωτής δοκού. Το μικρό βάρος αποτελεί πλεονέκτημα για την φάση της ανέγερσης ολόκληρων φατνωμάτων. Επιδιώκεται κλίση 45 μοιρών, με μέγιστη ανεκτή κλίση 60 μοίρες.

Πλωτές Γέφυρες

Εύκολες και φτηνές στην κατασκευή τους με προσωρινό συνήθως χαρακτήρα, πλην περιπτώσεων μόνιμων κατασκευών με ένα τουλάχιστον κινητό τμήμα για τη διασφάλιση της ναυσιπλοΐας. Απουσιάζει μερικώς η σταθερότητα, σε σχέση με τις άλλες τύπου γέφυρες διότι το κατάστρωμα στηρίζεται σε πλωτά μέσα, έκαστο αγκυρωμένο στο βυθό, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με τρόπο ώστε να εξασφαλίζονται σχετικές μετακινήσεις.

1.4. Μεταλλικές Πεζογέφυρες

Οι γέφυρες πέραν ότι σαφώς εξυπηρετούν στη ζεύξη δύο σημείων, η επικοινωνία των οποίων θα ήταν δυσχερής ή και αδύνατη, αποτελούν κόσμημα σε ένα τοπίο και δη αστικό. Συνηθισμένα εμπόδια που απαιτούν τη γεφύρωσή τους είναι συγκοινωνιακοί άξονες, εδαφικές ανωμαλίες, ποτάμια ή και σύζευξη πολυώροφων κτιρίων κ.α., επιτρέποντας την κυκλοφορία πεζών, τη ροή αερίου, νερού ή άλλων υλικών μέσω αγωγών ή τη διέλευση οχημάτων ή τρένων. Η ανάγκη της παρουσίας τους εμφανίζεται προϊστορικά, ενώ μάλιστα ορισμένες συνυφαινονται με ανθρωποθυσίες και θρύλους. Ειδικά οι πεζογέφυρες έχουν λεπτό κατάστρωμα σε σχέση με τις υπόλοιπες, αποτελούμενο από χάλυβα ή ξύλο και ορισμένες φορές από σκυρόδεμα προσφέροντας διαφραγματική λειτουργία. Μερικά παραδείγματα παρατίθενται στα Σχήμα 1-1 και Σχήμα 1-2.



Σχήμα 1-1 Πεζογέφυρα στο Prince's Island Park, στην πόλη Κάλγκαρι της Αλμπέρτα του Καναδά

Αποτέλεσε πρόταση για τη σύνδεση του αστικού πάρκου και της Eau Claire νότια του ποταμού Bow, προκειμένου να αντικαταστήσει την ήδη υπάρχουσα από το 1968 Jaiwur Bridge, η οποία λόγω διαβρώσεων από την παρουσία άλατος, παρουσίασε πρόωρη φθορά. Η ανάγκη εμφανίστηκε πρώτη φορά σε ετήσια επιθεώρηση το 2012 και το Δεκέμβριο του 2019 έκλεισε για την οριστική αντικατάστασή της. Παρότι πληρούσε άριστα τις προδιαγραφές, η πρόταση δεν έγινε δεκτή λόγω κόστους.



Σχήμα 1-2 Γέφυρα Berkeley I-80 στην Καλιφόρνια

Τέθηκε σε λειτουργία το Φεβρουάριο του 2002, με άνοιγμα 85 μέτρα για να επιτρέψει την πρόσβαση των πεζών, ποδηλατών και χρηστών αναπηρικών αμαξιδίων στην Μαρίνα του Berkeley, το κρατικό πάρκο Eastshore και την πόλη. Το κόστος ανήλθε στα 6,4 εκατομμύρια δολάρια πληρώνοντας τους Αμερικανικούς κανονισμούς για άτομα με Αναπηρίες του 1990. Προηγουμένως τα αναπηρικά αμαξίδια είχαν μόνη προσβάσιμη διαδρομή μία κάτω διάβαση, απομακρυσμένη από το σημείο, ως εκ τούτου σήμερα έχει αυξήσει σημαντικά την εξυπηρέτηση των χρηστών.

1.5. Δομικά Μέλη

Κατάστρωμα

Χαρακτηρίζεται το δομικό στοιχείο, το οποίο μεταβιβάζει τα φορτία της κατακόρυφης και οριζόντιας διεύθυνσης, στον κύριο φορέα ή τις κύριες δοκούς. Αποτελείται από τις διαδοκίδες, οι οποίες τοποθετούνται κατά τον διαμήκη άξονα του καταστρώματος και τις μηκίδες κάθετα στις προηγούμενες ώστε να σχηματίζεται εσχάρα δοκών για την αποτελεσματικότερη συμπεριφορά του καταστρώματος.

Κύριες Δοκοί

Είναι από τα πρωτεύοντα στοιχεία που πρέπει να παραλάβουν τα φορτία του καταστρώματος, μέσω των διαδοκίδων και αναλαμβάνουν να μεταφέρουν τη φόρτιση σε βάθρα/πυλώνες, είτε απευθείας είτε μέσω καλωδίων ή άλλων στοιχείων.

Βάθρα

Μεταφέρουν όλα τα φορτία που δέχεται ο φορέας, συνήθως μέσω εφεδράνων, στη θεμελίωση και στηρίζουν το φορέα. Διακρίνονται σε μεσόβαθρα και ακρόβαθρα, ανάλογα με τη θέση τους. Τα ακρόβαθρα παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό των οριζόντιων φορτίων και τα κατακόρυφα κυρίως τα κατακόρυφα φορτία. Μάλιστα, σε περίπτωση ανωμαλίας εδάφους και ανάγκης διαμόρφωσης μεγάλου ύψους μεσοβάθρων, σχεδιάζονται με μικρότερη από τα ακρόβαθρα δυσκαμψία, προκειμένου να παραληφθεί η οριζόντια μετακίνηση σε περίπτωση σεισμού.

Τα μεταλλικά βάθρα αποτελούνται από:

- Κατακόρυφους στύλους, οι οποίοι λόγω ύψους είναι ευπαθείς σε λυγισμό.
- Κατακόρυφους συνδέσμους, προκειμένου να παραλάβουν τα οριζόντια φορτία της ανωδομής.
- Κεφαλοδοκούς, οι οποίες παραλαμβάνουν κυρίως τις αξονικές θλιπτικές δυνάμεις του σεισμού.

Ακολουθούν τα είδη της σύνδεσης των βάθρων, τα οποία έχουν τεράστια σημασία για τη σεισμική επιτελεσματικότητα της γέφυρας.

- Μονολιθική σύνδεση, προσφέρει, λόγω αυξημένης υπερστατικότητας, "απόθεμα" αντοχής και ακαμψίας, δίνοντας παράλληλα δυνατότητα για σχηματισμό πλαστικής άρθρωσης σε δύο θέσεις, πόδια και κεφαλή. Βέβαια, κάτι τέτοιο προκαλεί αύξηση εντάσεως στο κατάστρωμα, όπου απαγορεύεται ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων, όπως και εντάσεις υπό επιβαλλόμενες παραμορφώσεις. Επίσης στη διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση προσφέρει πλαισιακή λειτουργία.

- Παρεμβολή εφεδράνων, δεν επιτρέπουν το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων και λόγω διαχωρισμού βάθρου και ανωδομής, επιμηκύνεται η ιδιοπερίοδος της γέφυρας μειώνοντας έτσι στις περισσότερες περιπτώσεις την απόκριση, ανάλογα με το φάσμα σχεδιασμού. Η χρήση τους επιτρέπει τον καθορισμό των θέσεων και τους τρόπους παραλαβής της σεισμικής έντασης. Σαφώς υπάρχει κίνδυνος πτώσης σε περίπτωση αποχωρισμού καταστρώματος και βάθρων.

Σύνδεσμοι Δυσκαμψίας

Αποτελούν επίπεδους φορείς μορφής δικτυώματος ή πλαισίου, οι οποίοι όντας οριζόντιοι, παραλαμβάνουν τα οριζόντια φορτία που δρουν στο κατάστρωμα και τα μεταφέρουν στους αντίστοιχους κατακόρυφους συνδέσμους, ώστε να μεταφερθούν στα θεμέλια. Πολύ σημαντική είναι η συμμετοχή τους στην ευστάθεια του φορέα στη φάση λειτουργίας και κατασκευής για την αποφυγή του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού των δοκών, μειώνοντας αρκετά το μήκος λυγισμού τους.

Εφεδράνα

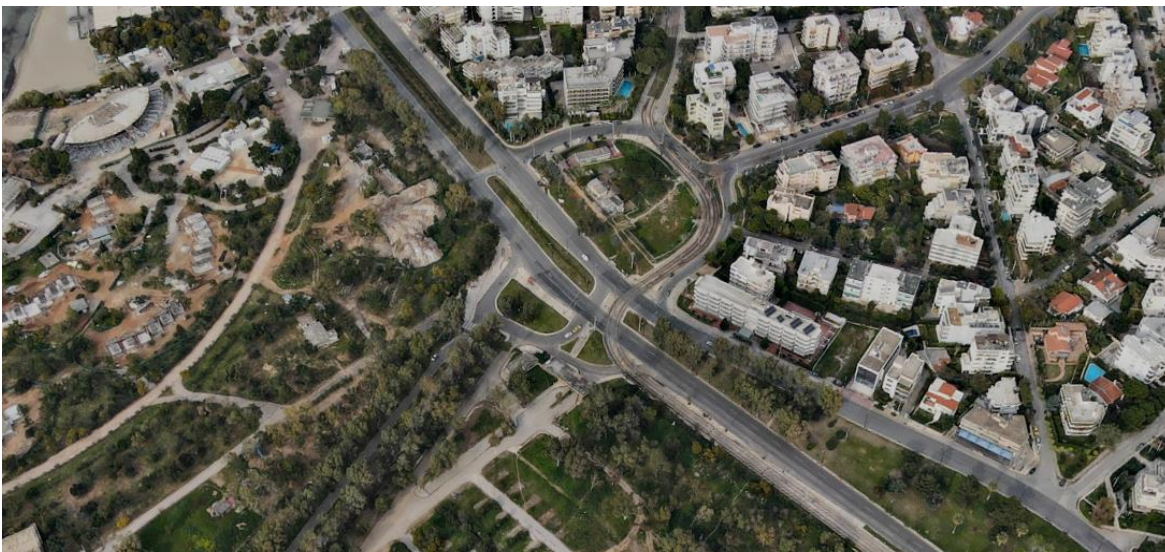
Εξασφαλίζουν τις τοπικές και διαφορικές μετακινήσεις και παραμορφώσεις του καταστρώματος σε σχέση με τα βάθρα. Διακρίνονται σε σταθερά και κινητά, ανάλογα με το αν επιτρέπουν οριζόντιες μετακινήσεις και σε κάθε περίπτωση επιτρέπουν την περιστροφή γύρω από κατακόρυφο και οριζόντιο επίπεδο.

2 ΜΟΡΦΩΣΗ ΦΟΡΕΑ

2.1. Περιγραφή του έργου

Μελετάται μεταλλική πεζογέφυρα ανοίγματος 42 μέτρων, σε σημείο βασικού άξονα του Λεκανοπεδίου της Αττικής, επί της Λεωφόρου Ποσειδώνος στο ύψος του ΠΙΚΠΑ, στην περιοχή της Βούλας. Η αρχή σχεδιασμού αφορά στην εξυπηρέτηση ατόμων σε δρόμο ταχείας κυκλοφορίας, στα πλαίσια αναβάθμισης και αναδόμησης της Αθηναϊκής Ριβιέρας σε πρωτότυπο τουριστικό θέρετρο μεγάλης έκτασης και σημείο αναφοράς για την περιοχή. Το συγκεκριμένο έργο θα συμβάλει στην βελτίωση λειτουργικότητας, ασφάλειας και αισθητικής καλύπτοντας τις ανάγκες που θα δημιουργηθούν από την αυξημένη επισκεψιμότητα στο σημείο, προσφέροντας ασφαλή διάβαση του αυτοκινητοδρόμου, εύκολη πρόσβαση στις εγκαταστάσεις αλλά και στα μέσα μαζικής μεταφοράς.

Στα Σχήμα 2-1 και Σχήμα 2-2 παρουσιάζεται η τοποθεσία.



Σχήμα 2-1 Τοποθεσία κατασκευής πεζογέφυρας.



Σχήμα 2-2 Περιβάλλον χώρος πεζογέφυρας

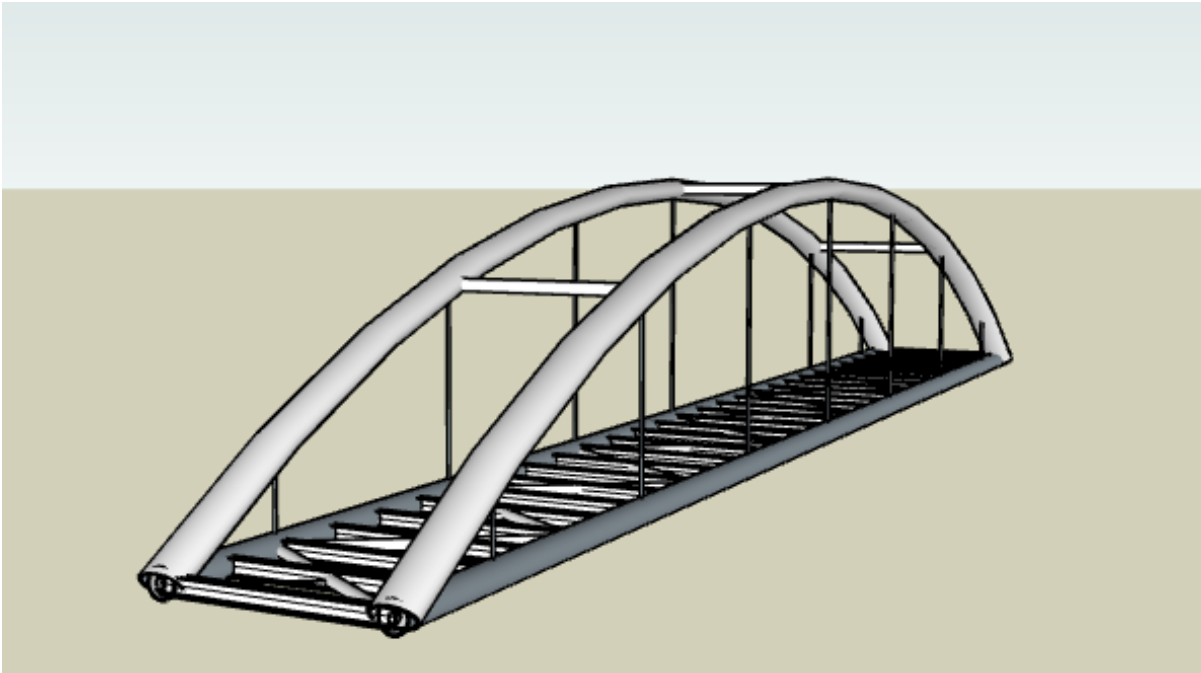
2.2. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πεζογέφυρας

Η πρόσβαση στο κατάστρωμα πραγματοποιείται για τους πεζούς με σκάλα πλάτους τεσσάρων μέτρων και για τους ποδηλάτες και χρήστες αναπηρικών αμαξιδίων με ανελκυστήρα, η μελέτη των οποίων ωστόσο δε θα αναλυθεί στην παρούσα διπλωματική.

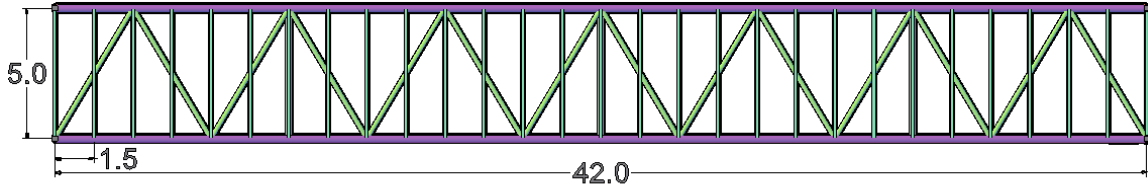
Η γέφυρα θα αποτελείται συνολικά από:

- 2 κατακόρυφα παραβολικά τόξα συνολικού μήκους 45 μέτρων και μέγιστους ύψους 7 μέτρων
- 2 κύριες δοκούς
- 14 καλώδια
- 29 διαδοκίδες μήκους 5 μέτρων, τοποθετημένων ανά 1.5 μέτρα
- ξύλινο κατάστρωμα
- 7 οριζόντιοι σύνδεσμοι μορφής Λ
- 3 αντιανέμια

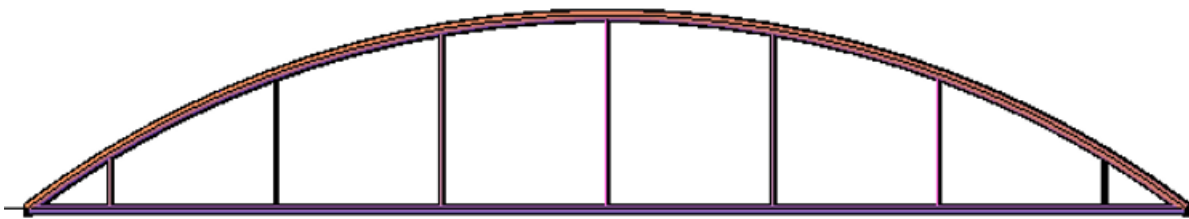
Για την ευνοϊκή μορφολογία του φορέα, επιλέγεται συμμετρικό σύστημα, σε κάτοψη και όψη, χωρίς κατασκευαστικές εκκεντρότητες. Εξασφαλίζεται καλή συνεργασία των δομικών στοιχείων με μεγάλες διαφορές δυσκαμψίας και των ισχυρών οριζόντιων και ασθενών κατακόρυφων στοιχείων, αποφεύγοντας σημαντική λυγηρότητα στα μέλη. Ο φορέας εδράζεται επί τεσσάρων στηρίξεων, ήτοι δύο πακτώσεις και δύο κυλίσεις (με ελευθερία κίνησης στη διαμήκη διεύθυνση). Το παρόν στατικό σύστημα επιτρέπει την μετακίνηση του φορέα λόγω άμεσων και έμμεσων φορτίσεων, εντός επιτρεπόμενων ορίων.



Σχήμα 2-3 Φωτορεαλιστική απεικόνιση πεζογέφυρας.



Σχήμα 2-4 Κάτοψη πεζογέφυρας



Σχήμα 2-5 Όψη πεζογέφυρας

2.3. Ποιότητα υλικών και παραδοχές

Τα δομικά υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της γέφυρας είναι:

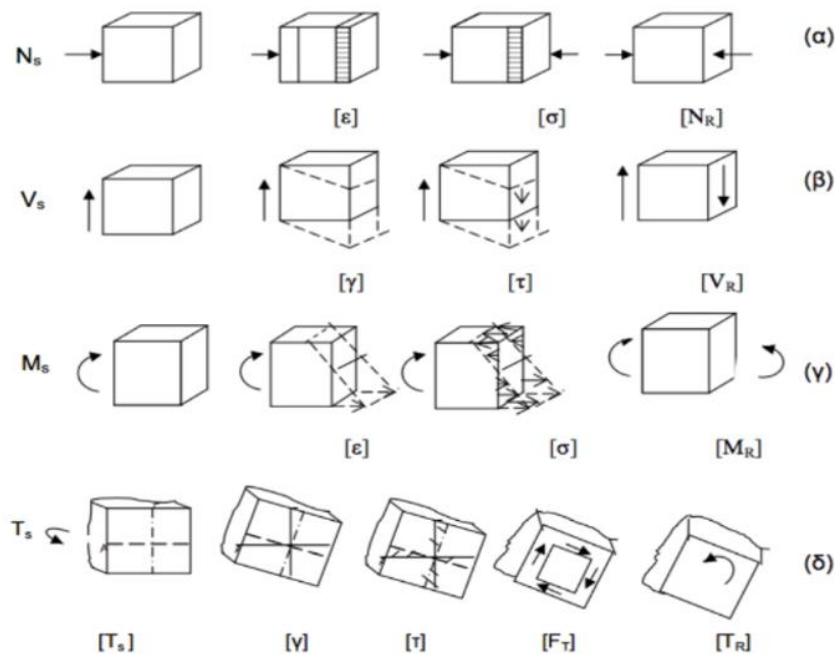
- ✓ Δομικός Χάλυβας S275
 - Μέτρο ελαστικότητας: $E = 210 \text{ GPa}$
 - Ειδικό βάρος: $\gamma = 78.5 \text{ kN/m}^3$
 - Σταθερά Poisson $\nu = 0.3$
 - Όριο διαρροής: $f_y = 275 \text{ MPa}$
 - Εφελκυστική αντοχή: $f_u = 430 \text{ MPa}$

- ✓ Χάλυβας Προέντασης Y1570C
 - Ενεργό μέτρο ελαστικότητας: $E = 160 \text{ GPa}$
 - Ειδικό βάρος: $\gamma = 78.5 \text{ kN/m}^3$
 - Σταθερά Poisson $\nu = 0.3$
 - Όριο διαρροής: $f_y = 1300 \text{ MPa}$
 - Εφελκυστική αντοχή: $f_u = 1570 \text{ MPa}$

3 ΔΡΑΣΕΙΣ

3.1 Εισαγωγή

Δράσεις ονομάζονται οι εξωτερικές καταπονήσεις, λόγω επενέργειας δυνάμεων, σε έναν φορέα ο οποίος σχεδιάζεται, μελετάται και κατασκευάζεται με τρόπο οικονομικό παραμένοντας ασφαλής σε όλη τη διάρκεια της ζωής του χωρίς να χάνει την ευστάθεια ή αντοχή του. Εξ αυτών προκαλούνται ορθές τάσεις που δρουν κάθετα στην επιφάνεια φόρτισης και οφείλονται συγκεκριμένα σε καμπτικές ροπές και αξονικά φορτία καθώς και διατμητικές τάσεις που δρουν παράλληλα στην επιφάνεια φόρτισης και οφείλονται σε στρεπτικές ροπές και διατμητικές δυνάμεις.



Σχήμα 3-1 Ορθές παραμορφώσεις, τάσεις, εσωτερικές δυνάμεις και εσωτερικά μεγέθη για: α) Αξονική, β) Διατμητική, γ) Καμπτική, δ) Στρεπτική καταπόνηση

Η θέση, η γεωμετρία και η χρήση του έργου καθορίζουν τις δράσεις που πρέπει ο μηχανικός να λάβει υπόψη, βάσει τι προβλέπει ο Ευρωκώδικας. Σκοπός είναι να γίνει η μελέτη και ανάλυση της κατασκευής, προσαυξάνοντας τα φορτία με κατάλληλους συντελεστές ασφαλείας, ώστε με σωστή διαστασιολόγηση των στοιχείων τα φορτία να παραλαμβάνονται από τα μέλη και να μεταφέρονται ομαλά στο έδαφος. Οι δράσεις κατηγοριοποιούνται ανάλογα με:

- Χρονική διακύμανση, σε μόνιμες (ίδιο βάρος, προένταση, παραμορφώσεις, συστολή ξήρανσης, διαφορικές καθιζήσεις), μεταβλητές (φορτία κυκλοφορίας L , ανέμου W , χιονιού S και θερμικές δράσεις T) και τυχηματικές (έκρηξη, πρόσκρουση οχήματος και πυρκαγιά)
- Προέλευση, σε άμεσες και έμμεσες (θερμοκρασία)
- Χωρική διακύμανση, σταθερές και ελεύθερες
- Φύση απόκρισης, σε στατικές και δυναμικές φορτίσεις.

Στον EN1991-2 προσδιορίζονται οι δράσεις που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για το σχεδιασμό γεφυρών, οδικών, σιδηροδρομικών και πεζογεφυρών.

3.2. Μόνιμες Δράσεις

Είναι οι κατακόρυφες δράσεις με πρακτικά άπειρο χρόνο εφαρμογής στο φορέα, με αμελητέα διαφοροποίηση σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Περιλαμβάνει:

- Ίδιο βάρος σιδηροδοκών με $78,5\text{kN/m}^3$, προσαυξημένο κατά 10% ώστε να ληφθεί υπόψη πρόσθετο βάρος ελασμάτων κατά EC1.
- Για δαπέδου από πίνακες τεχνικού φυλλαδίου CTS με ξύλο υψηλής αντοχής για εξωτερικούς χώρους (FSC) με ειδικό βάρος 800kg/m^3 (8kN/m^3) και πάχος 7cm. Βάρος ξύλινου καταστρώματος 0.56kN/m^2 επιφανειακά.
- Βάρος κιγκλιδωμάτων με γραμμική κατακόρυφη φόρτιση κύριων δοκών 1kN/m .
- Δυνάμεις προέντασης καλωδίων κατά την ανέγερση, οι οποίες ασκούνται αρχικά σε μικρό ποσοστό έως και την εξ' ολοκλήρου δράση των κινητών φορτίων.

3.3. Μεταβλητές Δράσεις

3.3.1. Κατακόρυφα Φορτία σε Πεζογέφυρες

Ορίζονται τρία μοντέλα φόρτισης για τους ελέγχους οριακής κατάστασης, με τις ακόλουθες χαρακτηριστικές τιμές:

- Ομοιόμορφο διανεμημένο φορτίο ανθρωποσυνωστισμού για διαμήκη και εγκάρσια φόρτιση και σε δυσμενή επιφάνεια επιρροής, ίσο με $q_{fk} = 5\text{kN/m}^2$ (κατηγορία γέφυρας C3-C5).

Σημειωτέων, για μεμονωμένο άνοιγμα γέφυρας $10\text{m} < L_{sj} < 210\text{m}$, ισχύει $2.5\text{kN/m}^2 < q_{fk} = 2.0 + 120 / (L_{sj} + 30) < 5.0\text{kN/m}^2$ (δε θα ληφθεί υπόψη υπέρ της ασφαλείας).

Εν γένει τα φορτία κυκλοφορίας ποδηλάτων είναι πολύ μικρότερα από τα αντίστοιχα κυκλοφορίας πεζών.

- Συγκεντρωμένο φορτίο $Q_{f_{wk}} = 10\text{kN}$, το οποίο δρά σε επιφάνεια $0.10 \times 0.10\text{ m}^2$ για τοπικούς ελέγχους, δε θα χρειαστεί να ληφθεί υπόψη.

- Όχημα εξυπηρέτησης Q_{serv} (συντήρησης ή άλλης χρήσης νοσοκομειακό ή πυροσβεστικό), το οποίο προκαλεί κατακόρυφες και οριζόντιες δυνάμεις. Ωστόσο δε θα εφαρμοστεί στην συγκεκριμένη πεζογέφυρα, εφόσον δεν είναι δυνατή η πρόσβαση οχήματος στο κατάστρωμα.

3.3.2. Οριζόντια Φορτία σε Πεζογέφυρες

Ορίζεται χαρακτηριστική τιμή Q_{fik} που δρα ταυτόχρονα με την αντίστοιχη κατακόρυφη, αλλά είναι οριζόντια κατά μήκος του άξονα της γέφυρας, στο επίπεδο του καταστρώματος. Υπολογίζεται ως μεγαλύτερη του 10% του συνολικού ομοιόμορφα διανεμημένου φορτίου ή 60% του συνολικού βάρους του οχήματος συντήρησης.

Επομένως $Q_{fik} = 0.10 \times 5.0 \text{ kN/m}^2 = 0.5 \text{ kN/m}^2$, για τύπο φόρτισης gr1.

Σημείωση: Συνιστάται η τοποθέτηση συστημάτων συγκράτησης σε κατάλληλες αποστάσεις για την αποφυγή σύγκρουσης οχημάτων κάτω από την πεζογέφυρα, στα ακρόβαθρα και σκάλες, κατά τις οποίες αναπτύσσονται οριζόντιες δυνάμεις. Για τα ακρόβαθρα πάνω στα οποία στηρίζεται ο φορέας, συνιστώνται οι ακόλουθες ελάχιστες τιμές:

- α) Δύναμη κρούσης: 1000 kN στην κατεύθυνση της διαδρομής του οχήματος ή 500 kN κάθετα σε αυτήν κατεύθυνση;
- β) Ύψος από το επίπεδο της γειτονικής επιφάνειας του εδάφους: 1,25 m.

3.4. Χιόνι

Τα φορτία χιονιού ανάλογα με την περιοχή σχεδιασμού συγκαταλέγονται στα χρονικώς μεταβλητά αλλά σταθερά στο χώρο, φορτία ή και σε ακραίες περιπτώσεις θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν και τυχηματικά, με περίοδο επαναφοράς στις γέφυρες τα 100 έτη. Ως δράση του χιονιού λογίζεται το ίδιο βάρος του, το οποίο έχει συσσωρευθεί είτε από ελεύθερη πτώση είτε έχει παρασυρθεί φυσικά ή τεχνητά. Διαφοροποιούνται περιοχές σε 3 ζώνες στην Ελλάδα, με την κάθε μία να αντιστοιχεί διαφορετικό φορτίο χιονιού.

Στην Ελλάδα λαμβάνεται υπόψη η ταυτόχρονη επίδραση χιονιού και μεταβλητών δράσεων. Ωστόσο στην προκειμένη περίπτωση, η πεζογέφυρα είναι ανοιχτή, οπότε ο συνδυασμός αυτός παραβλέπεται.

3.5. Δράσεις Ανέμου

Είναι από τις σημαντικότερες καταπονήσεις που δέχεται κάθε φορέας, καθόσον έχει διαφορετική ένταση, διεύθυνση και ταχύτητα κάθε στιγμή ανάλογα με τη γεωγραφική θέση, ανάγλυφο εδάφους, μέγεθος και σχήμα κατασκευής και κλίση προσπίπτουσας επιφάνειας. Τα φορτία ανέμου εφαρμόζονται σε κτήρια και τεχνικά έργα με ύψος μέχρι 200m και στην συγκεκριμένη περίπτωση σε γέφυρες ανοίγματος μέχρι 200 m.

Ως δράση ανέμου επί των κατασκευών ορίζεται η πίεση λόγω της ανάσχεσης της ροής του ανέμου, από την οποία προκύπτει δύναμη κάθετη ως προς την προσβαλλόμενη επιφάνεια. Λογίζεται ως μεταβλητή ελεύθερη δράση και η συνολική απόκριση της κατασκευής και στοιχείων, προκύπτει από επαλληλία της βασικής συνιστώσας, που ενεργεί ως οιονεί στατική και της συντονιστικής συνιστώσας που ενεργεί ως δυναμική, με την τελευταία συνήθως να αγνοείται διότι στις περισσότερες κατασκευές είναι μικρή.

Σε τοξωτή γέφυρα απαιτείται αναλυτικός υπολογισμός των φορτίων ανέμου στα επιμέρους στοιχεία και εν συνεχεία η επαλληλία αυτών, σε κάθε διεύθυνση. Σε περίπτωση που ο άνεμος σαρώνει παράλληλα στην επιφάνεια, αναπτύσσεται τριβή, η οποία ορισμένης φορές είναι σημαντική.

3.5.1. Δεδομένα ανέμου

Μέση ταχύτητα ανέμου

Η τοπογραφία και η τραχύτητα του εδάφους καθορίζουν έναν σημαντικό παράγοντα, τη μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z από την επιφάνεια εδάφους. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (ΠΜΟ), για να είναι συγκρίσιμες οι ταχύτητες του ανέμου, πρέπει οι μετρήσεις της ταχύτητας να γίνονται υπό παρόμοιες πάντα συνθήκες:

- ✓ το όργανο μετρήσεων να είναι σε ύψος 10m από το έδαφος
- ✓ το έδαφος να είναι χωρίς εμπόδια, τραχύτητας II
- ✓ να υπολογίζεται ως μέση τιμή δεκαλέπτου

Υπολογίζονται η μέση ταχύτητα ανέμου ως:

$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o \cdot v_b$	(3 – 1)
---------------------------------------	---------

Όπου:

- $c_o(z)$ συντελεστής ανάγλυφου του εδάφους (προτείνεται η τιμή 1.0 όταν λαμβάνεται υπόψη)
- v_b βασική ταχύτητα ανέμου
- $c_r(z)$ ο συντελεστής τραχύτητας, λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητότητα της μέσης ταχύτητας του ανέμου λόγω ύψους z και λόγω τραχύτητας του εδάφους της προσήνεμης περιοχής (πυκνότητα εμποδίων, λαμβάνεται ίσο με 1.18).

Ο προσδιορισμός του βασίζεται σε λογαριθμική κατανομή και δίνεται στις ακόλουθες σχέσεις

$c_r(z) = k_r(z) \cdot \ln \frac{z}{z_0} \text{ για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$	(3 – 2)
$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \text{ για } z \leq z_{\min}$	(3 – 3)

Όπου k_r ο συντελεστής εδάφους που εξαρτάται από το μήκος τραχύτητας z_0 και δίνεται από τον τύπο

$k_r = 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0.07}$	(3 – 4)
---------------------------------------------------------------	---------

Καθορίζονται οι τιμές παραμέτρων βάσει του Πίνακα 3-1.

$z_{0, II} = 0.05 \text{ m}$ (κατηγορία εδάφους II)

$z_{\min} = 1 \text{ m}$

$z_{\max} = 200 \text{ m}$, εκτός αν ορίζεται διαφορετικά από το Εθνικό Προσάρτημα.

Πίνακας 3-1 Προτεινόμενες τιμές του λ για κυλίνδρους, πολυγωνικές διατομές, ορθογωνικές διατομές, διατομές με αιχμηρές γωνίες και δικτυωτές κατασκευές.

Κατηγορία εδάφους	z ₀ (m)	z _{min} (m)
0 Θαλάσσια ή παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα	0,003	1
I Λίμνες ή επίπεδες και οριζόντιες περιοχές με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια	0,01	1
II Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασιδί και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτήρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων	0,3	2
III Περιοχή με κανονική κάλυψη βλάστησης ή με κτίρια ή με μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση)	0,3	5
IV Περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15 m.	1,0	10

- Η βασική ταχύτητα ανέμου:

$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,o}$	$(3 - 5)$
------------------------------------------------	-----------

Όπου:

- $v_{b,o}$ η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή η μέση ταχύτητα ανέμου διάρκειας 10 λεπτών⁽¹⁾ με ετήσια πιθανότητα υπέρβασης 0.2 (μέση περίοδο επαναφοράς τα 50 έτη⁽²⁾), ανεξάρτητα από τη διεύθυνση του ανέμου σε ύψος 10 m από επίπεδη ανοιχτή περιοχή εδάφους (βλ. Σχήμα 1)
- c_{dir} ο συντελεστής διεύθυνσης (προτείνεται η τιμή 1.0)
- c_{season} ο εποχικός συντελεστής (προτείνεται η τιμή 1.0)



Σχήμα 3-2 Χάρτης θεμελιώδους βασικής ταχύτητας ανέμου από Εθνικό Προσάρτημα

Η μέση ταχύτητα ανέμου 10 λεπτών με ετήσια πιθανότητα υπέρβασης p , προκύπτει για v_b πολλαπλασιασμένη με παράγοντα πιθανότητας:

$$c_{prob} = \left(\frac{1 - K \cdot \ln(-\ln(1-p))}{1 - K \cdot \ln(-\ln(0.98))} \right)^n \quad (3-6)$$

Όπου:

- K είναι η παράμετρος σχήματος ανάλογα με το συντελεστή διακύμανσης της κατανομής ακραίας τιμής (προτείνεται τιμή 0.2)
- n έτη (προτείνεται 0.5)

(1) Καθώς η ταχύτητα του ανέμου είναι χρονικά μεταβαλλόμενη, σημαντική είναι η διάρκεια στην οποία γίνεται η παρατήρηση. Όσο μικρότερη είναι η διάρκεια, τόσο μεγαλύτερες ριπές ανέμου καταγράφονται.

(2) Η σχέση που συνδέει την ετήσια πιθανότητα υπέρβασης p και τη μέση περίοδο επαναφοράς T , είναι $T = \frac{1}{1-p}$ και γενικότερα για n έτη, είναι $T = \frac{n}{1-\ln(1-p)}$.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1991-1-6 προτείνονται μικρότερες περίοδοι επαναφοράς για σύντομες φάσεις εκτέλεσης, λόγω μεγαλύτερης αξιοπιστίας μετεωρολογικών προβλέψεων.

Η πίεση αιχμής υπολογίζεται:

$q_p(z_e) = [1 + 7I_v(z)] \rho \cdot v_m^2(z) \cdot \frac{1}{2} = c_e \cdot q_b$	(3 – 7)
$q_b = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2$	(3 – 8)

- $c_e(z)$ ο συντελεστής έκθεσης εξαρτώμενος από το έδαφος (τραχύτητα και ύψος) και την ένταση των στροβιλισμών, ως:

$c_e(z) = [1 + 7I_v(z)] \cdot c_r(z) \cdot c_0(z)$	(3 – 9)
----------------------------------------------------	---------

- Με ένταση στροβιλισμού $I_v(z_e)$

$a) I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{[c_0(z) \cdot \ln \frac{z}{z_0}]} \text{ για } z_{min} \leq z \leq z_{max}$	(3 – 10)
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------

$b) I_v(z) = I_v(z_{min}) \text{ για } z \leq z_{min}$	(3 – 11)
--------------------------------------------------------	----------

- $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ η πυκνότητα του αέρα
- c_0 συντελεστή που λαμβάνει υπόψη τα μορφολογικά όροι. (Λαμβάνεται 1.00)
- c_{sd} δυναμικό συντελεστή, προκειμένου να ληφθούν υπόψη φαινόμενα κλίμακας και δυναμικά φαινόμενα.

Ο τροποποιητικός συντελεστής μεγέθους c_s λαμβάνει υπόψη ότι η πίεση αιχμής δεν αναπτύσσεται ταυτόχρονα σε ολόκληρη την προσβαλλόμενη επιφάνεια ενώ ο τροποποιητικός δυναμικός συντελεστής c_d λαμβάνει υπόψη τη δυναμική απόκριση της κατασκευής, λόγω στροβιλισμού. Για γέφυρες δίδεται τύπος στον EN1991-1-4 §6.3. (θα ληφθεί 1.00)

3.5.2. Καλώδια

Οι κυκλικές διατομές εξαρτώνται από τον αριθμό Reynolds,

$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{v}$	(3 – 12)
---------------------------------	----------

Όπου,

- b η διάμετρος της διατομής
- $v(z_e)$ η ταχύτητα αιχμής του ανέμου, ίση με

$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}}$	(3 – 13)
---------------------------------------	----------

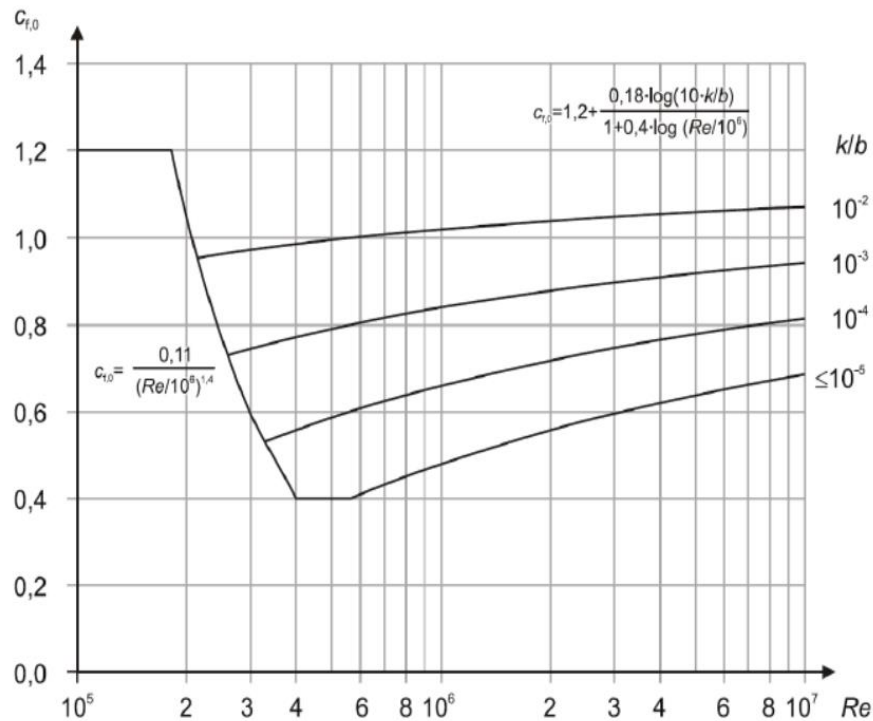
- ν κινηματικό ιξώδες του αέρα ίσο με $15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Ο συντελεστής δύναμης c_f για ένα κυκλικό κύλινδρο πεπερασμένου μήκους, προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$c_f = c_{f,o} \cdot \psi_\lambda \cdot \kappa$	(3 – 14)
-------------------------------------------------	----------

Όπου,

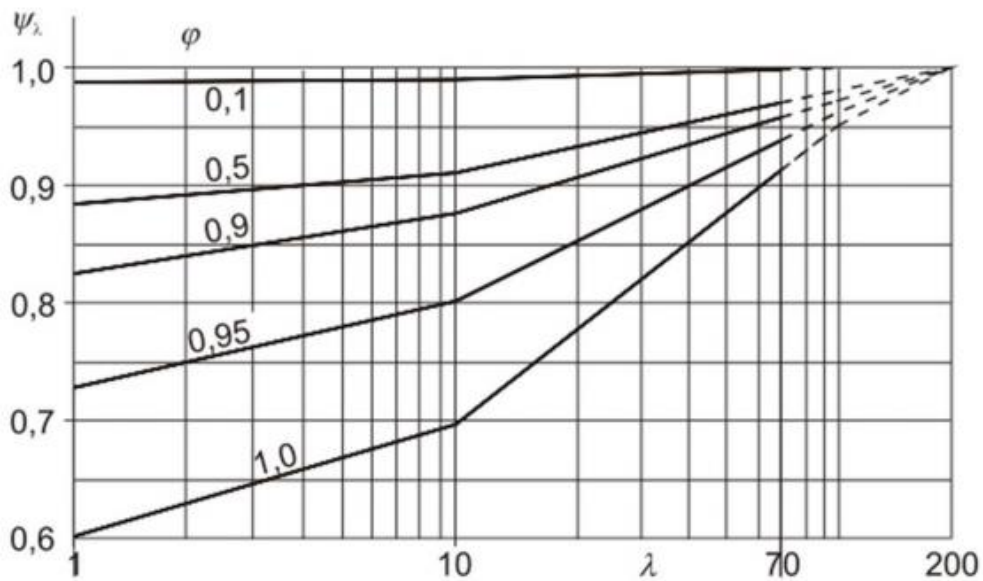
- $c_{f,o}$ ο συντελεστής δύναμης κυλίνδρων χωρίς ροή ελεύθερων άκρων
- ψ_λ ο συντελεστής επίδρασης άκρων



Σχήμα 3-3 Συντελεστής δύναμης $c_{f,o}$ κυκλικών κυλίνδρων χωρίς ροή ελεύθερων άκρων συναρτήσει του αριθμού Re για διάφορες τιμές της ισοδύναμης τραχύτητας k/b .

Πίνακας 3-2 Ισοδύναμη τραχύτητα επιφάνειας k για κάθε τύπο επιφάνειας.

Τύπος επιφάνειας	Ισοδύναμη τραχύτητα k (mm)	Τύπος επιφάνειας	Ισοδύναμη τραχύτητα k (mm)
Γυαλί	0,0015	Λείο σκυρόδεμα	0,2
Στιλβωμένο μέταλλο	0,002	Πλανισμένο ξύλο	0,5
Λεπτή βαφή	0,006	Τραχύ σκυρόδεμα	1,0
Βαφή με ψεκασμό	0,02	Τραχύ προιονισμένο ξύλο	2,0
Στιλπνός χάλυβας	0,05	Σκουριά	2,0
Χυτοσίδηρος	0,2	Τούβλα	3,0
Γαλβανισμένος χάλυβας	0,2		

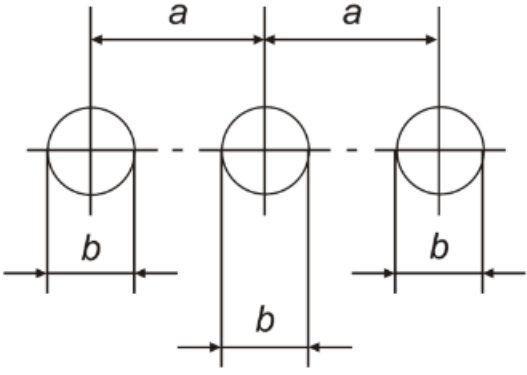
Σχήμα 3-4 Μειωτικός συντελεστής λυγηρότητας ψ_λ συναρτήσει της λυγηρότητας λ και του συντελεστής πληρότητας ϕ .

Πίνακας 3-3 Προτεινόμενες τιμές του λ για κυλίνδρους, πολυγωνικές διατομές, ορθογωνικές διατομές, διατομές με αιχμηρές γωνίες και δικτυωτές κατασκευές.

No.	Θέση της κατασκευής, άνεμος κάθετα στο επίπεδο της σελίδας	Ενεργός λυγηρότητα λ
1		<p>Για πολυγωνικές, ορθογωνικές και διατομές με αιχμηρές γωνίες:</p> <p>για $l \geq 50$ m, $\lambda = 1,4 l/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο</p>
2		<p>για $l < 15$ m, $\lambda = 2 l/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο</p> <p>Για κυκλικούς κυλίνδρους:</p> <p>για $l \geq 50$, $\lambda = 0,7 l/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο</p>
3		<p>για $l < 15$ m, $\lambda = l/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μικρότερο</p> <p>Για ενδιάμεσες τιμές του l, θα χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή</p>
4		<p>για $l \geq 50$ m $\lambda = 0,7 l/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μεγαλύτερο</p> <p>για $l < 15$ m, $\lambda = l/b$ ή $\lambda = 70$, όποιο είναι μεγαλύτερο</p> <p>Για ενδιάμεσες τιμές του l, θα χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή</p>

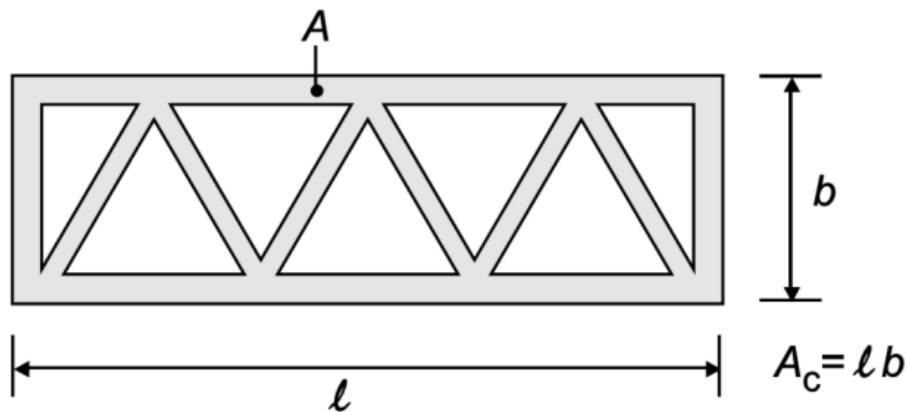
Πίνακας 3-4 Συντελεστής κ για κατακόρυφους κυλίνδρους εν σειρά.

a/b	κ
$a/b < 3,5$	1,15
$3,5 < a/b < 30$	$\kappa = \frac{210 - \frac{a}{b}}{180}$
$a/b > 30$	1,00



Ο συντελεστής πληρότητας φ ορίζεται ως ο λόγος των προβαλλομένων επιφανειών των μελών προς το συνολικό περίγραμμα.

$\varphi = \frac{A}{A_c}$	(3 – 15)
---------------------------	----------



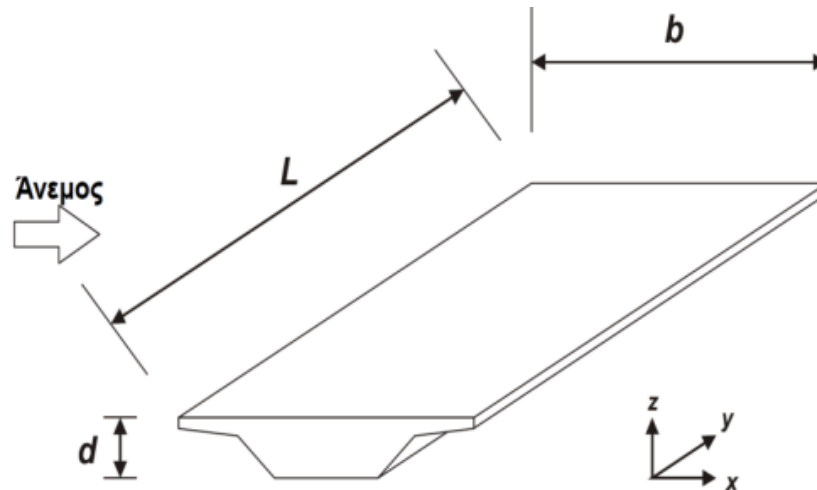
Σχήμα 3-5 Συνολικό περίγραμμα για τον προσδιορισμό του συντελεστή πληρότητας φ.

Η εξωτερική δύναμη του ανέμου σε μέλη υπολογίζεται κατανομημένη κατά μήκος των μελών:

$w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot b$	(3 – 13)
------------------------------------------------	----------

3.5.3. Κατάστρωμα

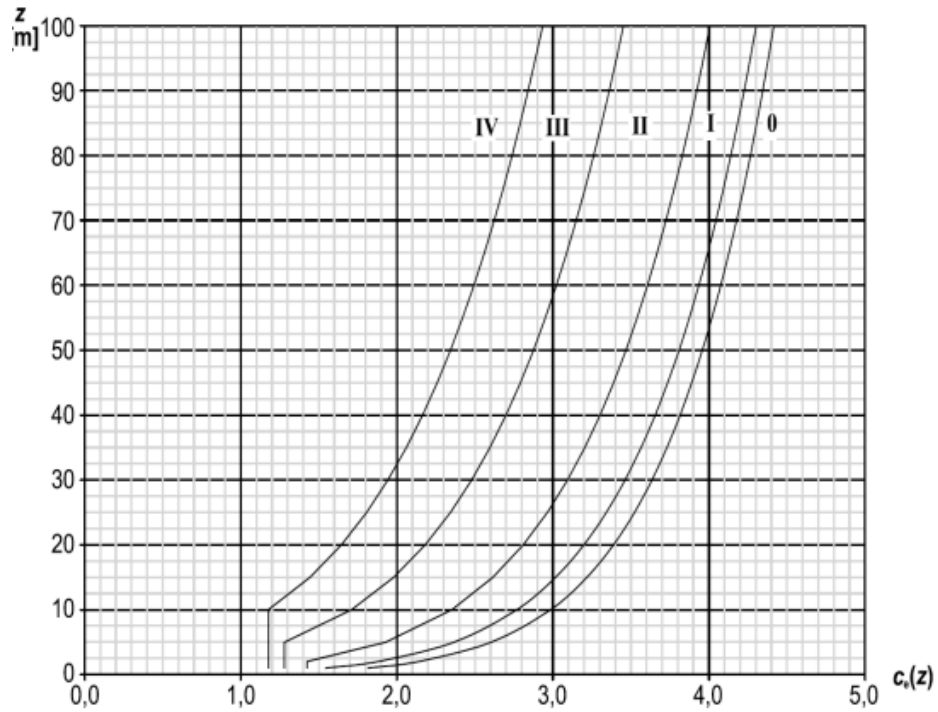
Οι δράσεις ανέμου στο κατάστρωμα της γέφυρας δημιουργούν δυνάμεις σε x , y και z , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-6, με x τον άξονα παράλληλο με το πλάτος του καταστρώματος, y τον άξονα παράλληλο με το μήκος του καταστρώματος και z ο κατακόρυφος στο επίπεδο του καταστρώματος άξονας. Σε περίπτωση σημαντικών και δυσμενών δυνάμεων λόγω πνοής ανέμου, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ως δρώσες ταυτόχρονα.



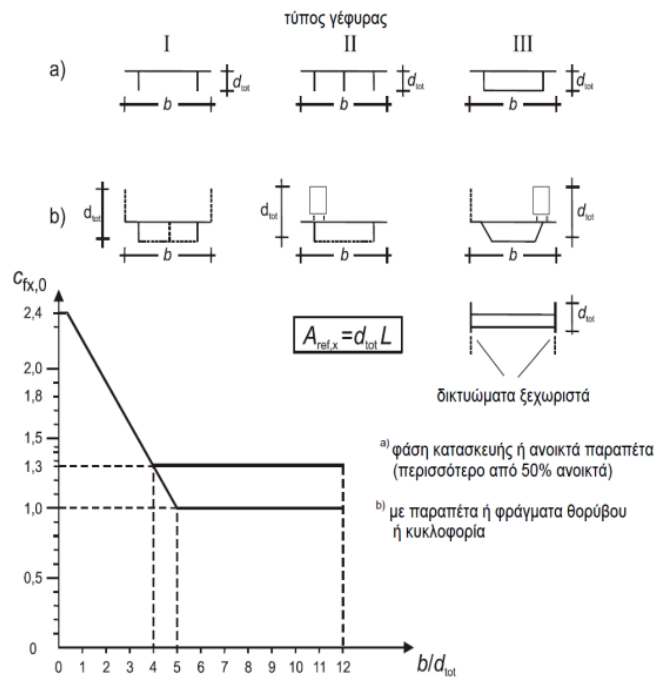
Σχήμα 3-6 Διευθύνσεις δράσεων ανέμου.

Συντελεστής δύναμης στη διεύθυνση x (Γενική μέθοδος)

Ο συντελεστής δύναμης $c_{fx,0}$ προκύπτει από μετρήσεις χωρίς τη ροή ελεύθερων άκρων μακριά από το έδαφος. Για γωνία κλίσης ανέμου που υπερβαίνει τις 10° , λόγω κλίσης εδάφους ως προς τη διεύθυνση του ανέμου, ο συντελεστής $c_{fx,0}$ εξαγεται από ειδική μελέτη. Επιπρόσθετα λόγω του ότι η ροή του ανέμου παρεκκλίνει πάνω και κάτω από το κατάστρωμα, δε λαμβάνεται υπόψη μειωμένη αντίσταση της ροής του αέρα γύρω από τα άκρα. Επομένως ο συντελεστής επίδρασης άκρων ψ_l λαμβάνεται μονάδα.



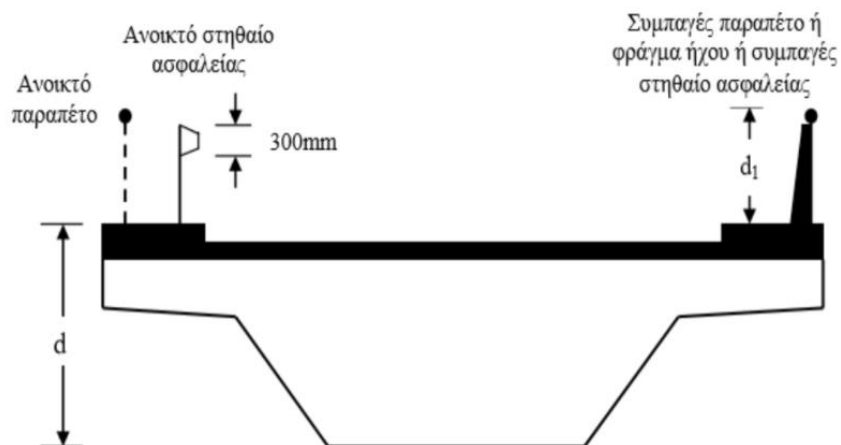
Σχήμα 3-7 Διάγραμμα συντελεστή έκθεσης $c_e(z_e)$ συναρτήσει του ύψους z από το έδαφος και της κατηγορίας εδάφους.



Σχήμα 3-8 Υπολογισμός συντελεστή δύναμης $c_{r,0}$ συναρτήσει του λόγου b/d_{tot} .

Πίνακας 3-5 Ύψος επίδρασης ανέμου για τον υπολογισμό $A_{ref,x}$.

Σύστημα στηθαίου ασφαλείας	Σε μια πλευρά	Και στις δυο πλευρές
Ανοικτό παραπέτο ή ανοικτό στηθαίο ασφαλείας	$d + 0,3m$	$d + 0,6m$
Συμπαγές παραπέτο ή συμπαγές στηθαίο ασφαλείας	$d + d_1$	$d + 2d_1$
Ανοικτό παραπέτο και ανοικτό στηθαίο ασφαλείας	$d + 0,6m$	$d + 1,2m$

Σχήμα 3-9 Προσδιορισμός ύψους αναφοράς για τον υπολογισμό του $A_{ref,x}$.Δυνάμεις ανέμου στο κατάστρωμα σε κατάστρωμα γεφυρών στη διεύθυνση x – Απλοποιητική μέθοδος

Η δύναμη του ανέμου, εφόσον δεν απαιτείται διαδικασία δυναμικής απόκρισης, υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho \cdot v_b^2 \cdot C \cdot A_{ref,x} \quad (3 - 16)$$

Όπου:

- v_b η βασική ταχύτητα του ανέμου
- $C = C_e \cdot C_{f,x}$ ο συντελεστής φορτίου ανέμου
- $A_{ref,x}$ η επιφάνεια αναφοράς
- ρ η πυκνότητα

Πίνακας 3-6 Τιμές συντελεστή δύναμης C για γέφυρες σε έδαφος κατηγορίας II.

b/d_{tot}	$z_e \leq 20$ m	$z_e = 50$ m
$\leq 0,5$	6,7	8,3
$\geq 4,0$	3,6	4,5

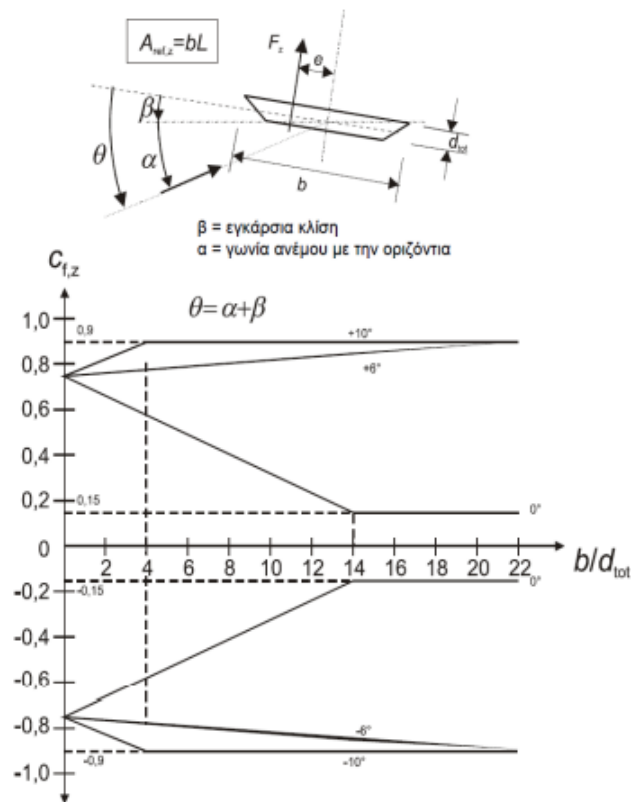
ΣΗΜΕΙΩΣΗ Αυτός ο πίνακας βασίζεται στις παρακάτω παραδοχές:
 -κατηγορία εδάφους II
 -συντελεστής δύναμης $c_{f,x}$ σύμφωνα με το 8.3.1 (1) του EC1 μέρος 1-4
 - $c_o = 1,0$
 - $k_1 = 1,0$
 Για ενδιάμεσες τιμές του b/d_{tot} , και του z_e μπορεί να χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή.

Δρώσες δυνάμεις ανέμου στο κατάστρωμα σε κατάστρωμα γεφυρών στη διεύθυνση y – Απλοποιητική μέθοδος

Εάν θεωρείται απαραίτητο οι διακήμες δυνάμεις του ανέμου στη διεύθυνση y πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ως το 25 % των δυνάμεων ανέμου της διεύθυνσης x .

Δρώσες δυνάμεις ανέμου στο κατάστρωμα σε κατάστρωμα γεφυρών στη διεύθυνση z – Απλοποιητική μέθοδος

Ο συντελεστής δύναμης $c_{f,z}$ αφορά τη δράση του ανέμου στο κατάστρωμα της γέφυρας στη διεύθυνση z προς τα πάνω και προς τα κάτω και δε συνυπολογίζεται με λοιπούς συντελεστές για την κατακόρυφη ταλάντωση του καταστρώματος. Στην αεροδυναμική λαμβάνεται ίσος με ± 0.9 για να λαμβάνει υπόψη την επιρροή τυχόν εγκάρσιας κλίσης του καταστρώματος, της κλίσης του εδάφους και των διακυμάνσεων της γωνίας διεύθυνσης του ανέμου με το κατάστρωμα λόγω στροβιλισμού. Διαφορετικά υπολογίζεται από το Σχήμα 3-10, όπου το ύψος d_{tot} θα αφορά το ύψος του καταστρώματος, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η κυκλοφορία και ο εξοπλισμός της γέφυρας ενώ για επίπεδο οριζόντιο έδαφος η γωνία α με το οριζόντιο επίπεδο λαμβάνεται $\pm 5^\circ$ λόγω στροβιλισμού. Το τελευταίο ισχύει και για έδαφος με λόφους όταν το κατάστρωμα της γέφυρας βρίσκεται τουλάχιστον 30m πάνω από το έδαφος και έχει σημαντική επίδραση αν η δύναμη που προκύπτει είναι ίδιας τάξης μεγέθους με το νεκρό φορτίο.



Σχήμα 3-10 Υπολογισμός συντελεστής δύναμης $c_{f,z}$ για γέφυρες με κλίση και άνεμο υπό κλίση.

Όπου επιφάνεια $A_{ref,z} = b \cdot l$ η επιφάνεια της κάτοψης, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής επίδρασης άκρων και ύψος αναφοράς ίδιο με του $c_{f,x}$. Σε άλλη περίπτωση η εκκεντρότητα της δύναμης στη διεύθυνση x μπορεί να ληφθεί ίση με $e = b/4$.

3.6. Υπολογισμός Φορτίων Ανέμου

Δεδομένων της γεωμετρίας, των διατομών και των διαστάσεων των μελών, υπολογίζονται τα φορτία ανέμου τα οποία εντάσσονται στο προσομοίωμα με τις υπόλοιπες δράσεις.

Η περιοχή της Βούλας βρίσκεται εντός 10km από την ακτή, για θεμελιώδη ταχύτητα ανέμου $v_{b,0} = 33\text{m/s}$, προκύπτει βασική ταχύτητα ανέμου $v_b = 33\text{m/s}$, για κατηγορία εδάφους 0, παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα.

Εν συνεχεία για:

- συντελεστή ανάγλυφου εδάφους $c_0 = 1$
- συντελεστής τραχύτητας $c_f = k_f \cdot \ln \frac{13}{0,003} = 1.30$
- συντελεστής εδάφους, κατηγορίας 0, δίνει $k_f = 0.19 \cdot (0,003/0,05)^{0.07} = 0.1560$

Δίνουν μέση ταχύτητα ανέμου, $v_m = 1.186 \cdot 33 = 39.14\text{m/s}$

3.6.1. Καλώδια

Για τα καλώδια υπολογίζονται οι κατάλληλοι συντελεστές καθώς και ο αριθμός Reynolds, ως ακολούθως:

$$Re = b \cdot v(z_e) / \nu = 101426 \text{ και } c_{f,o} = 3.00$$

Για πίεση αιχμής $q_p = 2.14 \text{ kN/m}^2$ και ταχύτητα αιχμής $v = 58.51 \text{ m/s}$

Δεδομένα:

- $c_f = 3.00 \cdot 0.92 = 3.24$ ο συντελεστής δύναμης
- $\psi_\lambda = 0.92$ (Σχήμα 3-5 και Πίνακας 3-3), για $\phi = 1$ και $\lambda = 70$
- Κατανεμημένη δύναμη ανέμου $w = 1 \cdot 3.24 \cdot 2.14 \cdot 0.026 = 0.153 \text{ kN/m}$

3.6.2. Τόξα

Οι συντελεστές που προκύπτουν για τον άνεμο στο τόξο είναι:

- $Re = b \cdot v(z_e) / \nu = 1.2 \cdot 10^6$
- $\Psi_\lambda = 0.92$, για $\phi = 1$ και $\lambda = 70$
- $k/b = 0.05 / 323.9 = 0.00015$
- $c_{f,o} = 0.7$
- $C_f = 0.7 \cdot 0.92 = 0.644$

$$\text{Κατανεμημένη δύναμη ανέμου } w = 1 \cdot 0.644 \cdot 2.14 \cdot 0.3239 = 0.44 \text{ kN/m}$$

3.6.3. Κατάστρωμα

- Κατά x

Για $A_{ref,x} = 42 \cdot 0.873 = 36.67 \text{ m}^2$ η επιφάνεια αναφοράς, από $c_{f,x0} = 2.40$ για ανοιχτό παραπέτο ή ανοικτό στηθαίο ασφαλείας και στις δύο πλευρές $d = 0.273 + 0.6 = 0.873 \text{ m}$.

Τελικά η δύναμη του ανέμου, θα είναι $F_w = 0.5 \cdot 0.00125 \cdot 33^2 \cdot 5.94 \cdot 36.67 = 148.2 \text{ kN}$

Για δεδομένα:

- $C = 5.94$ ο συντελεστής φορτίου ανέμου $c_{f,x} = 2.20$ και $c_e = 2.70$
- ρ η πυκνότητα του αέρα

Κατανέμεται ως γραμμικό φορτίο ίσο με $w_x = \frac{148.2}{42} = 3.59 \text{ kN/m}$.

- Κατά y

Ο άνεμος λαμβάνεται διαμήκως ως $w_y = 0.25 \cdot 3.59 = 0.90 \text{ kN/m}$, δηλαδή ως 25% της δύναμης κατά τον εγκάρσιο άξονα x για ολόσωμες δοκούς.

ο Κατά z

Απλοποιητικά για 10° λαμβάνεται $C_{f,z}=0,9$ ενώ επιφάνεια αναφοράς υπολογίζεται $A_{ref,z}=42 \cdot 5=210\text{m}^2$.

Ομοιοτρόπως για $C=2.43$ η δύναμη προκύπτει:

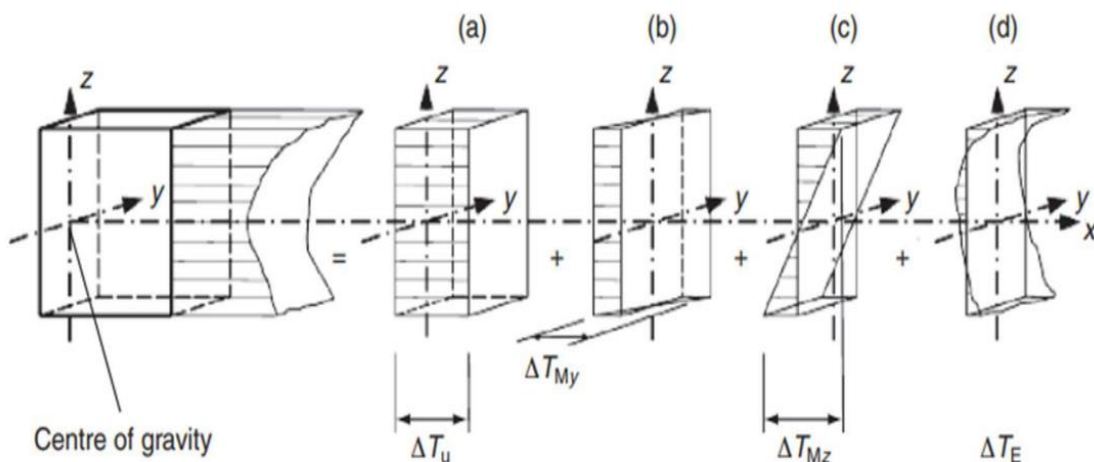
$$F_w=0.5 \cdot 0.00125 \cdot 33^2 \cdot 2.43 \cdot 210= \pm 348\text{kN και } 1.66\text{kN/m}^2$$

$$\text{(κατανεμημένα } w_z=\frac{348}{5 \cdot 28}= \pm 2.50\text{kN/m σε κάθε διαδοκίδα.)}$$

3.7. Θερμοκρασιακές Μεταβολές

Οι θερμικές δράσεις στις γέφυρες οι οποίες οφείλονται σε ημερήσιες ή εποχικές κλιματολογικές θερμοκρασιακές μεταβολές, πλην τη δράση της πυρκαγιάς, πρέπει να προσδιορίζονται για κάθε κατάσταση σχεδιασμού. Κατατάσσονται στις έμμεσες μεταβλητές και ελεύθερες δράσεις και οδηγούν στις ανάπτυξη τάσεων στην κατασκευή, στην προσπάθειά της να αντισταθεί στην παραμόρφωση που της επιβάλλεται από τις μεταβολές των πεδίων θερμοκρασίας σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

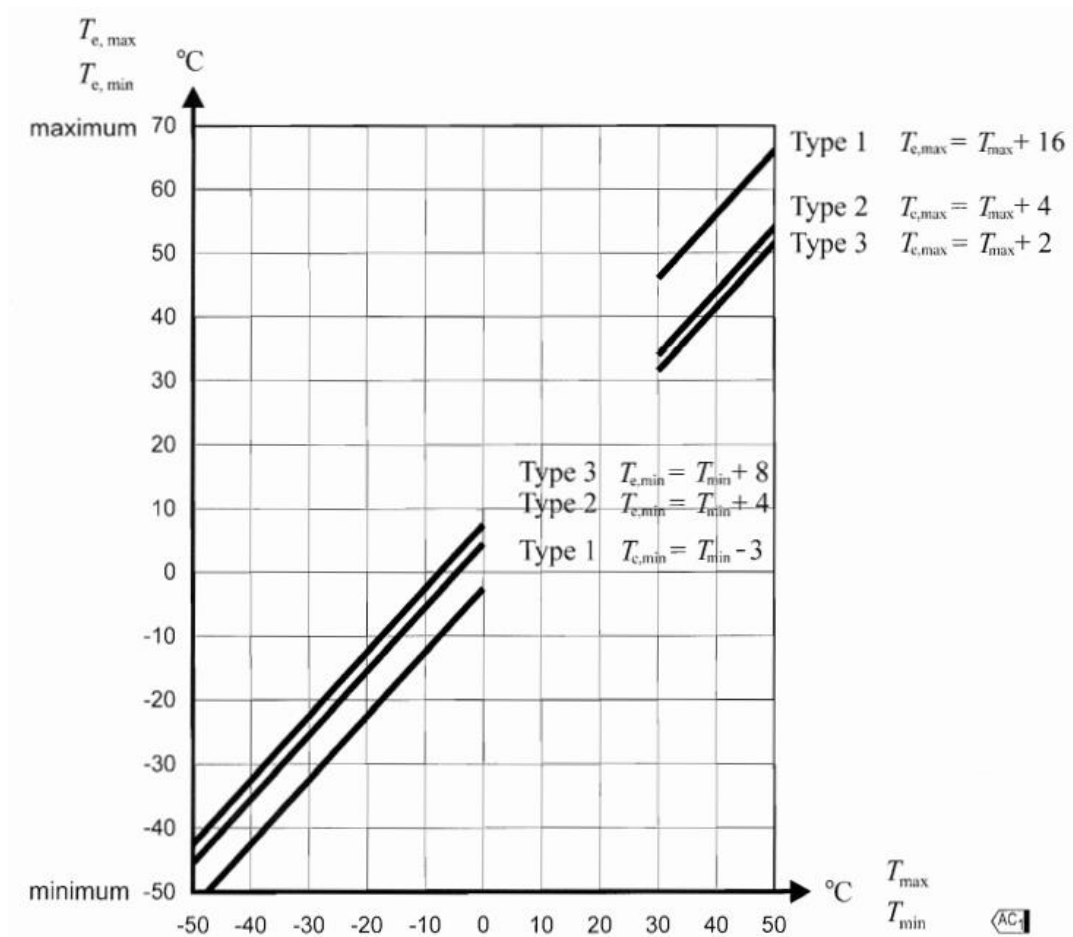
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-11, Σχήμα 3-11 Απεικόνιση συνιστωσών της θερμοκρασιακής κατανομής. (α) γραμμική συστολή-διαστολή, (b) περί y-y, (c) περί z-z (d) σύστημα αυτοισσόροπων τάσεων εξαιτίας των οποίων δεν αναπτύσσονται εντατικά μεγέθη.η κατανομή της θερμοκρασίας σε ένα μεμονωμένο δομικό στοιχείο αναλύεται σε μία συνιστώσα ομοιόμορφης κατανομής, σε μία γραμμική περί y-y, σε μία γραμμική περί z-z και σε μία μη γραμμική, με την τελευταία να είναι ορισμένες φορές πιο κρίσιμη από τις γραμμικές διότι υπάρχει κίνδυνος πρόωρης ρηγματώσης ή διαρροής, λόγω ανάπτυξης παραμενουσών τάσεων (με δυσχερή υπολογισμό αυτών λόγω μη γραμμικών επιρροών).



Σχήμα 3-11 Απεικόνιση συνιστωσών της θερμοκρασιακής κατανομής. (a) γραμμική συστολή-διαστολή, (b) περί γ-γ, (c) περί z-z (d) σύστημα αυτοισσόροπων τάσεων εξαιτίας των οποίων δεν αναπτύσσονται εντατικά μεγέθη.

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι χαρακτηριστικές τιμές των θερμοκρασιακών μεταβολών, υπάρχουν τρεις ομάδες καταστρωμάτων των γεφυρών:

- Κατηγορία 1. Χαλύβδινο δάπεδο επί κιβωτοειδών ή ανοικτών δοκών ή δικτυωτών δοκών από χάλυβα.
Για αυτήν την κατηγορία οι μέγιστες τιμές μπορούν να απομειωθούν κατά 3°C.
- Κατηγορία 2. Δάπεδο από σκυρόδεμα επί κιβωτοειδών ή ανοικτών δοκών ή δικτυωτών δοκών από χάλυβα.
- Κατηγορία 3. Δάπεδο από σκυρόδεμα επί ανοικτών ή κιβωτοειδών δοκών από σκυρόδεμα.



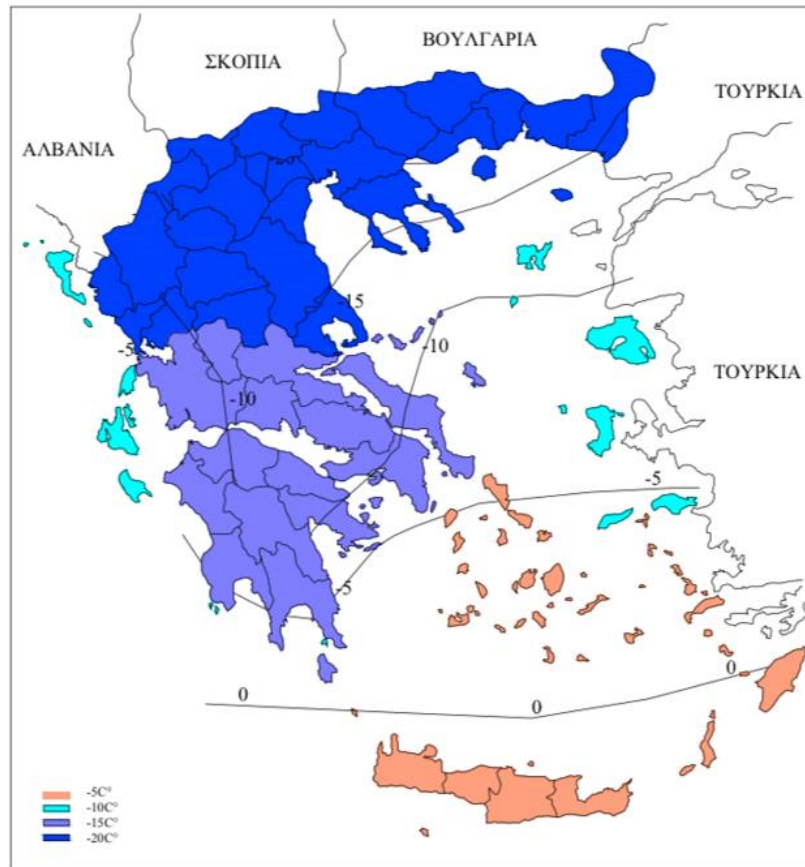
Σχήμα 3-12 Οι τιμές $T_{min,max}$ αντιστοιχούν σε θερμοκρασία αέρα υπό σκιά (περίοδο επαναφοράς 50 έτη) και $T_{e,min,max}$ σε ομοιόμορφη θερμοκρασία γέφυρας, για ημερήσιο εύρος θερμοκρασιών 10°C.

3.7.1 Ομοιόμορφη συνιστώσα της θερμοκρασίας

Από εθνικούς ισοθερμικούς χάρτες (Σχήμα 3-13 και Σχήμα 3-14), λαμβάνονται η ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία αέρα υπό σκιά, που προκύπτουν από αναγωγή στη στάθμη της θάλασσας και περίοδο επανάληψης 50 ετών. Η ομοιόμορφη συνιστώσα προσδιορίζεται ως διαφορά ενεργούς και της αρχικής του θερμοκρασίας T_0 .



Σχήμα 3-13 Χάρτης μέγιστων θερμοκρασιών αέρα υπό σκιά T_{max}



Σχήμα 3-14 Χάρτης ελάχιστων θερμοκρασιών αέρα υπό σκιά T_{min} .

Χαρακτηριστικές τιμές μέγιστης διακύμανσης της ενεργούς θερμοκρασίας συστολής και διαστολής αντίστοιχα, προκύπτουν:

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min}$$

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0$$

Για τις αναγκες της εργασίας ληφθηκε προσεγγιστικά:

$$\max \Delta T_N = +25^\circ\text{C}$$

$$\min \Delta T_N = -25^\circ\text{C}$$

3.7.2. Γραμμική συνιστώσα της θερμοκρασίας

Σύμφωνα με τη Μέθοδο 1, η γραμμική συνιστώσα της θερμοκρασίας είναι αποτέλεσμα θέρμανσης και ψύξης του καταστρώματος σε μία ορισμένη χρονική περίοδο, κατά την οποία εμφανίζεται μία μέγιστη $\Delta T_{M,heat}$ και μία μέγιστη $\Delta T_{M,cool}$ μεταβολή θερμοκρασίας.

Πίνακας 3-7 Συνιστώμενες τιμές της γραμμικής συνιστώσας της θερμοκρασιακής διαφοράς.

Τύπος καταστρώματος	Άνω επιφάνεια θερμότερη από την κάτω	Κάτω επιφάνεια θερμότερη από την άνω
	$\Delta T_{M,heat}$ (°C)	$\Delta T_{M,cool}$ (°C)
Τύπος 1: Χαλύβδινο κατάστρωμα	18	13
Τύπος 2: Σύμμικτο κατάστρωμα	15	18
Τύπος 3: Κατάστρωμα από Ω.Σ.: - κιβωτοειδής διατομή	10	5
- δοκός	15	8
- πλάκα	15	8

ΣΗΜΕΙΩΣΗ 1: Οι τιμές που δίνονται στον πίνακα αντιπροσωπεύουν άνω οριακές τιμές της γραμμικής συνιστώσας της θερμοκρασιακής διαφοράς για αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις γεωμετρίας γεφυρών.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ 2: Οι τιμές που δίνονται στον πίνακα βασίζονται σε πάχος επιφανειακής στρώσης 50mm για οδογέφυρες και σιδηροδρομικές γέφυρες. Για διαφορετικού πάχους επιφανειακές στρώσεις οι τιμές αυτές θα πολλαπλασιάζονται με τον συντελεστή k_{sur} . Συνιστώμενες τιμές για τον k_{sur} δίνονται στον Πίνακα 6.2.

3.8. Τυχηματικές δράσεις

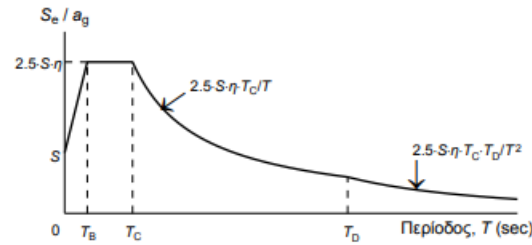
Ο Ευρωκώδικας EN1991-1-7 [15] περιγράφει δράσεις λόγω πρόσκρουσης οχημάτων, εκρήξεων, η καθίζηση εδάφους, ανεμοστρόβιλοι, τυχόν κατολισθήσεις κλπ.

Λαμβάνονται υπόψη εφόσον εκτιμάται ότι είναι πιθανή η εμφάνισή τους. Ωστόσο στα πλαίσια της διπλωματικής αγνοούνται οι τυχηματικές δράσεις, θεωρώντας ότι τοποθετούνται προστατευτικές νησίδες για την ασφάλεια των ακροβάθρων προς αποφυγήν τυχόν πρόσκρουσης οχήματος.

3.9. Σεισμικότητα

Η Ελλάδα, ούσα σεισμογενής χώρα, υποδιαιρείται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας και οφείλει να εφαρμόζει τον κανονισμό, ελέγχοντας τη συμπεριφοράς των κατασκευών σε ενδεχόμενο σεισμού. Η σεισμική κίνηση του εδάφους και άρα της στηρίξεως της κατασκευής, προκαλεί εναλλασσόμενες επιταχύνσεις $a_g(t)$ και εξ' αυτών αναπτύσσονται αδρανειακές δυνάμεις στα υλικά σημεία, επί της κατασκευής. Αυτή η δυναμική φόρτιση είναι αδύνατον να αμεληθεί και πρέπει τελικά ο φορέας να την παραλάβει με ασφάλεια. Οι οριζόντιες κινήσεις σε διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση είναι σημαντικότερες ενώ δευτερευούσης σημασίας αποτελεί η κατακόρυφη συνιστώσα της αδρανειακής δύναμης. Οι γέφυρες σχεδιάζονται ελαστικά (Συντελεστής συμπεριφοράς $q=1$), ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε βλάβη κατά το σεισμό σχεδιασμού, θεωρώντας ότι στην πραγματικότητα τα μέλη παρουσιάζουν ελαστική συμπεριφορά.

Ελαστικό φάσμα απόκρισης (S_e =ελαστική φασματική επιτάχυνση)



$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2.5 - 1) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_B$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \quad \text{για } T_B \leq T \leq T_C$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C}{T} \quad \text{για } T_C \leq T \leq T_D$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \quad \text{για } T_D \leq T \leq 4 \text{ sec}$$

όπου:

$$a_g = \gamma_i \cdot a_{gR}$$

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{\zeta + 5}} \geq 0.55 = \text{συντελεστής απόσβεσης (το } \zeta \text{ τίθεται επί τοις εκατό)}$$

S = συντελεστής εδάφους

Σχήμα 3-15 Ελαστικό φάσμα απόκρισης οριζώντιας σεισμικής δράσεις για απόσβεση $\zeta=5\%$.

Εφαρμόζεται η Μέθοδος Φασματικής Απόκρισης και τελικώς με τη μέθοδο επαλληλίας ιδιομορφικών αποκρίσεων CQC, προτιμότερη για χωρικά συστήματα, για την εκτίμηση των μέγιστων των ιδιομορφικών αποκρίσεων.

Σεισμολογικά χαρακτηριστικά:

- Κατηγορία εδάφους B, $T_B = 0.15\text{sec}$, $T_C = 0.40\text{sec}$, $T_D = 2.50\text{sec}$ και συντελεστή εδάφους $S = 1.00$
- Κατηγορία σπουδαιότητας II, $\gamma_i = 1.00$ για συνήθεις γέφυρες
- Ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας Z_1 , $a_{gR} = 0.16g$
- Απόσβεση $\zeta = 2\%$ για συγκολλητές συνδέσεις.

Το φάσμα την κατακόρυφης επιτάχυνσης προκύπτει από το φάσμα της οριζώντιας επιτάχυνσης πολλαπλασιάζοντάς την επί 0.9.

4 ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

4.1. Εισαγωγή

Ένας φορέας δεν εκπληρώνει τον σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκε εάν βρεθεί σε οριακή κατάσταση, όπου παύει να εκπληρώνει ένα από τα κριτήρια αντοχής ή λειτουργικότητας του.

Οι απαιτήσεις ως προς το σχεδιασμό αφορούν την ασφάλεια, την ανθεκτικότητα και την λειτουργικότητα, καθορίζοντας σωστή γεωμετρία, επιλογή υλικών, σωστή προσομοίωση και συνδυασμό δράσεων για τον έλεγχο και ανάλυση του φορέα.

Για κάθε κατασκευή πρέπει να πραγματοποιούνται έλεγχοι σε οριακές καταστάσεις αστοχίας ΟΚΑ (ultimate limit states) και λειτουργικότητας ΟΚΛ (serviceability limit states), σύμφωνα με τις ακόλουθες καταστάσεις σχεδιασμού:

- Καταστάσεις σχεδιασμού με διάρκεια (persistent situations), για συνθήκες κανονικής χρήσης.
- Παροδικές καταστάσεις σχεδιασμού (transient), για προσωρινές συνθήκες που επιβάλλονται στον φορέα (π.χ. Ανέγερση, επισκευή).
- Τυχηματικές καταστάσεις σχεδιασμού (accidental), για εξαιρετικές συνθήκες όπως έκρηξη, πυρκαγιά, πρόσκρουση.
- Καταστάσεις σχεδιασμού έναντι σεισμού (seismic), για συνθήκες επιβολής σεισμικής καταπόνησης.

Η θέση, η γεωμετρία και το είδος της κατασκευής καθορίζουν τους συντελεστές συνδυασμού ψ , για κάθε μία από τις οριακές καταστάσεις, με τους οποίους πολλαπλασιάζονται οι διάφορες χαρακτηριστικές τιμές των δράσεων.

Για τον έλεγχο μιας κατάστασης αστοχίας χρησιμοποιούνται οι αντιπροσωπευτικές τιμές μίας δράσης F_{ref} , η οποία προσδιορίζεται ως μέση τιμή, ανώτερη ή κατώτερη τιμή μπορεί να είναι και χαρακτηριστική τιμή F_k ή μία συνοδευτική τιμή ψF_k .

4.2. Οριακές Καταστάσεις Αστοχίας - ΟΚΑ (ULS)

Οι ΟΚΑ αντιστοιχούν στη μέγιστη φέρουσα ικανότητα – αντοχή του φορέα, αποφεύγοντας μηχανισμούς κατάρρευσης, απώλεια στατικής ισορροπίας ενός στοιχείου ή μέλους της κατασκευής, αστοχία λόγω κόπωσης, με κίνδυνο τις ανθρώπινες ζωές και πλαστικές παραμορφώσεις χωρίς θραύση.

Διακρίνονται στις ακόλουθες υποπεριπτώσεις:

- EQU: Απώλεια στατικής ισορροπίας του φορέα ή οποιουδήποτε μέρους του θεωρούμενα ως άκαμπτα σώματα, έλεγχοι εφεδράνων και των αγκυρίων τους έναντι ανύψωσης
- STR: Αστοχία ανωδομής αναφερόμενη στην αντοχή διατομών και συνδέσεων, στην ευστάθεια των μελών και στην αντοχή της διατμητικής σύνδεσης (πλην γεωτεχνικών δράσεων)
- FAT: Αστοχία λόγω κόπωσης του φορέα ή δομικών μελών ή και άλλων επιδράσεων που εξαρτώνται από το χρόνο
- GEO: Αστοχία θεμελίωσης ή εδάφους

Οι συνδυασμοί σχεδιασμού στην ΟΚΑ (εξαιρουμένης της κόπωσης) είναι:

- Για καταστάσεις διάρκειας ή παροδικές (persistent and transient situations)

$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_p P_k + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Qi} \psi_{oi} Q_{ki}$	(4 – 1)
----------------------------------------------------------------------------------------------------	---------

- Για τυχηματικές καταστάσεις (accidental)

$\sum_{j \geq 1} \gamma_{GAj} G_{kj} + \gamma_{pA} P_k + A_d + \psi_{11} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{2i} Q_{ki}$	(4 – 2)
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------

- Για καταστάσεις σεισμού (seismic)

$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + A_{Ed} + \sum_{i > 1} \psi_{2i} Q_{ki}$	(4 – 3)
-------------------------------------------------------------------------	---------

Περιγραφή των παραπάνω συνδυασμών:

- (+) συνδυασμό δράσεων και όχι αλγεβρική ή γεωμετρική άθροιση αυτών
- G_{kj} είναι η χαρακτηριστική τιμή των μόνιμων δράσεων με ένα εύρος διακύμανσης τιμών 5% έως 10% το πολύ κατά τη διάρκεια ζωής σχεδιασμού του φορέα
- P_k είναι η χαρακτηριστική τιμή της προέντασης, η οποία θεωρείται μόνιμη και προκαλείται από ελεγχόμενες δυνάμεις ή και ελεγχόμενες παραμορφώσεις στον φορέα (Ανώτερη τιμή $G_{k,sup}$ και κατώτερη $G_{k,inf}$, με μία μέση τιμή P_m συναρτηθεί του χρόνου)
- Q_{ki} είναι η χαρακτηριστική τιμή της μεταβλητής δράσης i , λαμβάνοντας την ανώτερη τιμή με προσδοκώμενη πιθανότητα μη υπέρβασης ή αντιστρόφως.
- A_d είναι η τιμή σχεδιασμού της τυχηματικής δράσης (ξεχωριστή για κάθε έργο)
- A_{Ed} είναι η τιμή σχεδιασμού της σεισμικής δράσης για κάθε έργο
- γ_{Gj} , γ_{GAj} είναι οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας για τη μόνιμη δράση j
- γ_p , γ_{pA} είναι οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας για την προένταση
- γ_{Qi} είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για τη μεταβλητή δράση i
- γ_i είναι ο συντελεστής σπουδαιότητας
- ψ_{0i} , ψ_1 , ψ_2 είναι συντελεστές συνδυασμού (ή συμμετοχής) των μεταβλητών δράσεων

Ο συντελεστής σπουδαιότητας (γ_i) της κατασκευής αντιστοιχεί στις κατηγορίες σπουδαιότητας στις οποίες κατατάσσονται οι κατασκευές, ενώ οι συντελεστές συνδυασμού ψ_i των μεταβλητών δράσεων, χρησιμοποιούνται προκειμένου να ληφθεί υπόψη η μειωμένη πιθανότητα για ταυτόχρονη συνύπαρξη των πλέον δυσμενών τιμών των διαφόρων ανεξάρτητων δράσεων. Ενώ στους συνδυασμούς δεν συνυπολογίζονται δράσεις οι οποίες δεν είναι δυνατόν να εμφανιστούν ταυτόχρονα.

Τελικώς ελέγχεται κάθε ΟΚΑ ή υπερβολική παραμόρφωση μίας διατομής, στοιχείου ή σύνδεσης, ώστε:

$E_d \leq R_d$	(4 – 4)
----------------	---------

όπου E_d η τιμή σχεδιασμού δράσεων και R_d η τιμή σχεδιασμού της αντίστοιχης αντοχής.

Η ανίσωση εφαρμόζεται για τα επιμέρους στοιχεία ή το σύνολο της κατασκευής και θεωρείται συμβολική.

4.3. Οριακές Καταστάσεις Λειτουργικότητας - ΟΚΛ (SLS)

Οι ΟΚΛ διέπουν την κανονική χρήση και σχετίζονται με αισθητικούς και ψυχολογικούς παράγοντες, την άνεση των χρηστών κατά τη λειτουργία του φορέα, όπως ταλαντώσεις, ρηγματώσεις ή υπέρβαση τάσεων, βέλη και εν γένει μεγάλες παραμορφώσεις ή μετακινήσεις που προκαλούν βλάβες στα στοιχεία πλήρωσης.

Ομοίως οι συνδυασμοί σχεδιασμού είναι:

Χαρακτηριστικός (σπάνιος) συνδυασμός (characteristic (rare) combination)

$\Sigma G_{kj} + P_k + Q_{k1} + \Sigma \psi_{oi} Q_{ki}$	(4 – 5)
----------------------------------------------------------	---------

- Συχνός συνδυασμός (frequent combination)

$\Sigma G_{kj} + P_k + \psi_{11} Q_{k1} + \Sigma \psi_{2i} Q_{ki}$	(4 – 6)
--------------------------------------------------------------------	---------

- Ημιμόνιμος συνδυασμός (quasi-permanent situation)

$\Sigma G_{kj} + P_k + \psi_{11} Q_{k1} + \Sigma \psi_{2i} Q_{ki}$	(4 – 7)
--------------------------------------------------------------------	---------

Με τον ίδιο τρόπο ελέγχεται κάθε ΟΚΛ, ώστε:

$E_d \leq C_d$	(4 – 8)
----------------	---------

όπου E_d η τιμή σχεδιασμού δράσεων στα πλαίσια λειτουργικών κριτηρίων και C_d η οριακή τιμή σχεδιασμού για το κριτήριο λειτουργικότητας.

4.4. Συνδυασμοί φορτίσεων

Με τους παραπάνω συντελεστές συνδυασμού ψ για πεζογέφυρες, εφαρμόζονται οι ακόλουθοι συνδυασμοί φόρτισης:

Πίνακας 4-1 Συντελεστές συνδυασμού ψ σε πεζογέφυρες.

Δράση	Σύμβολο	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Φορτία κυκλοφορίας	gr1	0,40	0,40	0
	$Q_{f,sk}$	0	0	0
	gr2	0	0	0
Δράσεις ανέμου	$F_{\overline{w}}$	0,3	0,2	0
Θερμικές δράσεις	T_k	0,6 ¹⁾	0,6	0,5
Φορτία χιονιού	Q_{sk} (κατά την εκτέλεση)	0,8	-	0
Φορτία κατασκευής	Q_c	1,0	-	1,0

1) Η συνιστώμενη τιμή ψ_0 για θερμικές δράσεις μπορεί στις περισσότερες περιπτώσεις να μειωθεί σε 0 για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας EQU, STR και GEO. Βλέπε επίσης τους Ευρωκώδικες σχεδιασμού.

- ψ_0 είναι συντελεστές συνδυασμού (ή συμμετοχής) των μεταβλητών δράσεων για ΟΚΑ και μη-αναστρέψιμες ΟΚΛ
- ψ_{1i} για ΟΚΑ και αναστρέψιμες ΟΚΛ
- ψ_{2i} για τυχηματικές δράσεις σε ΟΚΑ και αναστρέψιμες ΟΚΛ

• ΟΚΑ

Βασικοί συνδυασμοί

1. $1.35G+1.00P+1.35Q$
2. $1.35G+1.00P+1.35Q\pm 1.50\cdot 0.3W_{x,y,z}$
3. $1.35G+1.00P+1.35Q+1.50\cdot 0.6T$
4. $1.35G+1.00P+1.50W_z+1.35\cdot 0.40Q$ (άνεμος προς τα κάτω)
5. $1.35G+1.00P+1.50T+1.35\cdot 0.4Q$

Σεισμικός συνδυασμός

1. $1.00G+1.00P+0.5T+A_{Ed}$
2. $1.00G+1.00P+0.2Q+A_{Ed}$

• ΟΚΛ

Χαρακτηριστικοί συνδυασμοί

1. $1.00G+1.00P+1.00Q+0.30W_{x,y,z}$
2. $1.00G+1.00P+1.00Q+0.60T$
3. $1.00G+1.00P+1.00W_{x,y,z}+0.40Q$

Συχνοί συνδυασμοί

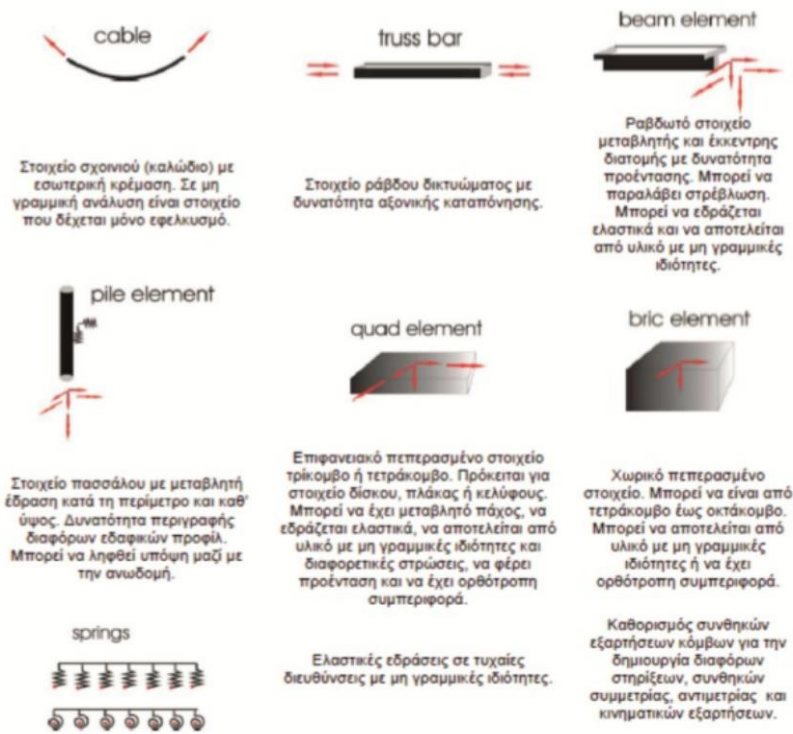
4. $1.00G+1.00P+0.40Q+0.50T$
5. $1.00G+1.00P+0.20W+0.50T$

5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ

5.1. Μοντελοποίηση στοιχείων στο SOFiSTiK

Με το Sofistik παρέχεται η δυνατότητα για στατική ή δυναμική ανάλυση για τη διαστασιολόγηση φορέα, ακολουθώντας σειρά προγραμμάτων που χρησιμοποιούν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, δίνοντας αξιόπιστα αποτελέσματα σε σύνθετα μοντέλα. Είναι γερμανικής προέλευσης και ανήκει στην εταιρεία SOFiSTiK AG. Περιλαμβάνει προγράμματα σχεδιαστικά (Soficad, AutoCAD) και ανάλυσης-διαστασιολόγησης για κτίρια, θεμέλια, γέφυρες, σήραγγες, φράγματα, μεταλλικές-σύμμικτες κατασκευές. Περιέχει βιβλιοθήκη υλικών και διατομών, βάσει κανονισμών λαμβάνοντας υπόψη ακόμη και τη μη γραμμικότητα των υλικών, ανάλογα με την απαίτηση. Η μοντελοποίηση πραγματοποιείται με τα στοιχεία που περιλαμβάνει το πρόγραμμα, ως ακολούθως:

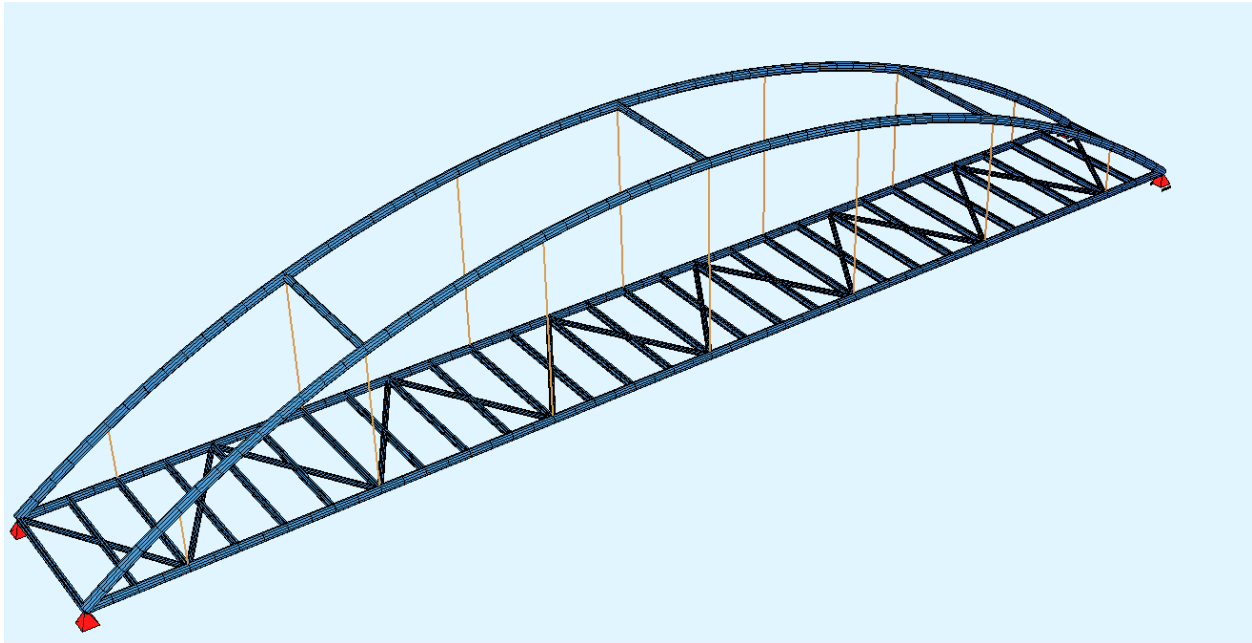
- Cable Element
- Truss Element
- Beam Element
- Pile Element
- Quad Element
- Bric Element



Σχήμα 5-1 Μοντελοποίηση στοιχείων

5.2. Προσομοίωμα πεζογέφυρας

Για την προσομοίωση μέσω του προγράμματος SSD(Sofistik Structural Design), αρχικά ορίζονται η ποιότητα των υλικών, και οι διατομές (τυποποιημένες και μη) για κάθε δομικό μέλος. Εισάγεται γραφικά σε περιβάλλον AutoCAD, μέσω του SOFiPLUS-X και ορίζονται οι ιδιότητες των δομικών στοιχείων και σημείων. Εν συνεχεία ορίζονται οι δράσεις και εφαρμόζονται στα μέλη για κάθε διεύθυνση, για τις οποίες θα γίνει ανάλυση και θα προκύψουν τα εντατικά μεγέθη για κάθε συνδυασμό δράσεων. Οι εγκάρσιες διαδοκίδες, οι διαμήκεις δοκοί, τα τόξα, τα αντιανέμια και οι χιαστοί σύνδεσμοι προσομοιώθηκαν με ραβδωτά στοιχεία και τα καλώδια ως cable elements. Σχήμα 5-2



Σχήμα 5-2 Απεικόνιση προσομοιώματος στο πρόγραμμα SSD.

5.3. Κατάταξη και αντοχή διατομών

Η κατάταξη κάθε διατομής καθορίζεται από τη γεωμετρία της και τον τύπο φόρτισης που της επιβάλλεται και σχετίζεται με προβλήματα ευστάθειας σε μερικώς ή πλήρως θλιβόμενες διατομές. Τυχόν πλαστική ανακατανομή μεταξύ των διατομών πραγματοποιείται μόνο εφόσον δεν εμφανίζεται πρώιμος τοπικός λυγισμός, ο οποίος θα προκαλούσε μείωση της ικανότητας ανάληψης φορτίων. Η δημιουργία πλαστικού μηχανισμού προϋποθέτει τη διάθεση επαρκούς στρωφικής ικανότητας των διατομών, δηλαδή ακραίες ίνες είναι ικανές να αναλάβουν μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς μείωση της αντοχής τους, ώστε να σχηματίζονται διαδοχικά οι πλαστικές αρθρώσεις στο μέλος.

Η κατηγορία στην οποία ανήκει μία διατομή ορίζεται με την λιγότερο ευμενή κατηγορία διατομής που προκύπτει για τα επιμέρους θλιβόμενα μέρη της, λόγω αξονικής ή καμπτικής ροπής, από το λόγο πλάτους προς πάχος c/t , σύμφωνα με πίνακες του κανονισμού.

Ακολουθούν οι κατηγορίες διατομών:

- Διατομές κατηγορίας 1: σχηματίζουν πλαστική άρθρωση με επαρκή στρωφική ικανότητα, σύμφωνα με την πλαστική ανάλυση, χωρίς μείωση της αντοχής τους.
- Διατομές κατηγορίας 2: αναπτύσσουν την πλαστική ροπή αντοχής τους, με περιορισμένη στρωφική ικανότητα λόγω τοπικού λυγισμού.
- Διατομές κατηγορίας 3: υποθέτοντας ελαστική κατανομή τάσεων στη διατομή, η ακραία θλιβόμενη ίνα του χαλύβδινου μέλους φτάνει το όριο διαρροής, αλλά δεν αναπτύσσεται η πλαστική ροπή αντοχής, λόγω τοπικού λυγισμού.
- Διατομές κατηγορίας 4: ο τοπικός λυγισμός συμβαίνει πριν ακόμη αναπτυχθεί η τάση διαρροής στη διατομή.

Η διαστασιολόγηση για τα μέλη της πεζογέφυρας:

- Κύριες δοκοί (CHS273X20) *Κατηγορίας 1*
Κάμψη και εφελκυσμός $d/t=16.65 \leq 50 \varepsilon^2 = 50 \cdot 0.858 = 42.5$
- Διαδοκίδες (IPE240) *Κατηγορίας 2*
 - a) Κορμός σε κάμψη: $c/t=190/6.2=30.64 \leq 38 \cdot 0.92 = 34.96$ *Κατηγορίας 2*
 - b) Πέλμα σε θλίψη: $c/t=\frac{\frac{120-6.2}{2}-15}{9.8} = 4.28 \leq 9 \cdot 0.92 = 8.28$ *Κατηγορίας 1*
- Σύνδεσμοι μορφής Λ (CHS168.3X8) *Κατηγορίας 1*
Θλίψη και εφελκυσμό $d/t=21.04 \leq 42.5$
- Τόξα (CHS323.9X25) *Κατηγορίας 1*
Κάμψη και θλίψη $d/t=12.96 \leq 42.50$
- Αντιανέμια (CHS244.5X8) *Κατηγορίας 1*
Κάμψη και θλίψη $d/t=30.56 \leq 42.50$

Αφού έγινε η προσομοίωση του φορέα στο πρόγραμμα, σύμφωνα με το προηγούμενο κεφάλαιο και εν συνεχεία κατηγοριοποίηση διατομών, έγινε ελαστικός έλεγχος διατομών, αποκλείοντας τυχόν πλαστικοποίηση, ακόμη και για τις διατομές κατηγορίας 1, 2. Για την αποφυγή διαρροής στις ίνες τις διατομής, εφαρμόζεται το κριτήριο Von Mises για ομογενή και ισότροπα υλικά, ως εξής:

$\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{z,Ed}^2 + \sigma_{x,Ed} \cdot \sigma_{z,Ed} + 3\tau_{Ed}^2 \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$	(5 – 1)
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------

5.4. Προένταση καλωδίων

Τα καλώδια ανάρτησης έχουν μηδενική δυσμησία και μεταβλητό μέτρο ελαστικότητας εξαιτίας των διάκενων μεταξύ των κλώνων. Πρακτικά τα συρματόσχοινα παραμορφώνονται ελαστικά και παράλληλα συμπύσσονται, οπότε συνολικά έχουν μη γραμμική συμπεριφορά. Αναρτούν το κατάστρωμα, μεταφέροντας υψηλά αξονικά φορτία εφελκυσμού στα τόξα ώστε να καταλήξουν στις στηρίξεις. Σημαντικό ρόλο έχουν επίσης για την εισαγωγή αντιβέλους στο φορέα, ικανοποιώντας τα κριτήρια λειτουργικότητας. Επιδρούν σημαντικά στο μητρώο ακαμψίας του φορέα, για το σχεδιασμό έναντι δυναμικής φόρτισης, με πολύ μικρή ωστόσο συμμετοχή στο μητρώο μάζας.

5.4.1. Ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας

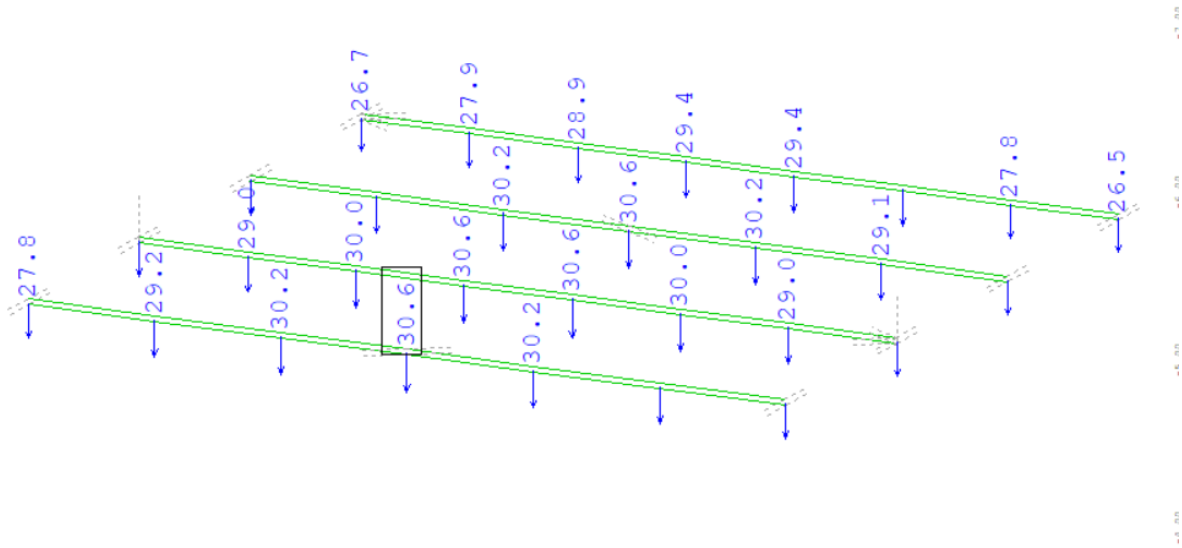
Λόγω ιδίου βάρους τα καλώδια, πλην των κατακόρυφων, εμφανίζουν μη γραμμική συμπεριφορά η οποία εκφράζεται με τη μέθοδο μειωμένου μέτρου ελαστικότητας στη γραμμική ανάλυση βάσει EN1993 1-11 §5.4:

$E_t = \frac{E}{1 + \frac{w^2 l^2 E}{12\sigma^3}}$	(5 – 2)
----------------------------------------------------	---------

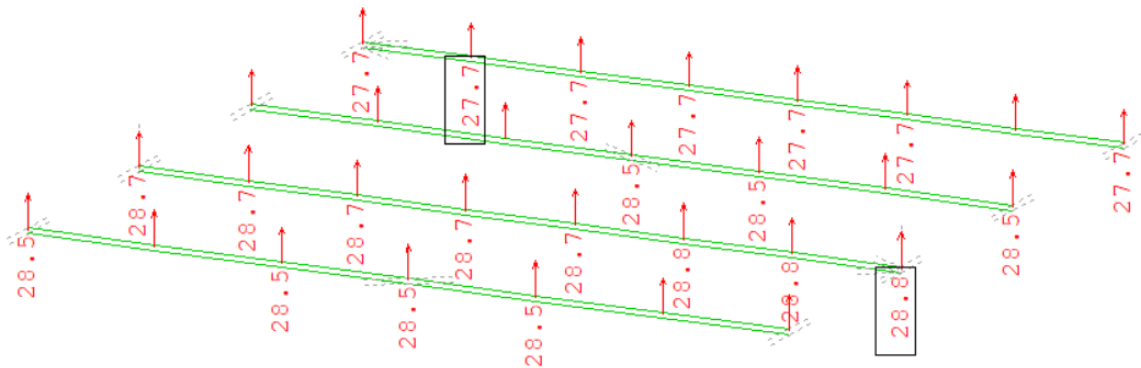
- E_t το μειωμένο μέτρο ελαστικότητας
- E το αρχικό μέτρο ελαστικότητας
- w ο συντελεστής βάρους
- l η οριζόντια προβολή του μήκους των καλωδίων (μηδέν)
- σ η τάση που αναπτύσσεται στα καλώδια από μία φόρτιση

5.4.2. Υπολογισμός προεντάσεως καλωδίων ανάρτησης

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων προεντάσεως, πραγματοποιούνται δοκιμές ώστε να εισαχθεί αντίβελος ίσο με τα μόνιμα και μέρος κινητών φορτίων. Μέρος της προέντασης που εισήχθη χάνεται όταν αφαιρούνται οι στηρίξεις διότι πλέον ο φορέας παραμορφώνεται κανονικά.



Σχήμα 5-3 Βυθίσεις καταστρώματος λόγω μόνιμων και κινητών (G+0.20Q).



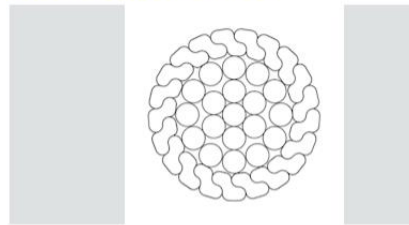
Σχήμα 5-4 Αντιβέλος από την δύναμη προέντασης.

Ύστερα από επαναληπτικές διαδικασίες για τις παραπάνω τελικές δυνάμεις προέντασης επιλέχτηκαν καλώδια PV-60, διαμέτρου $b=26\text{mm}$, της εταιρείας PFEIFER, full locked cables/VVS-1 κατάλληλα στις κατασκευές γεφυρών για προστασία διάβρωσης πυρήνα, με προσαρμοζόμενα στηρίγματα στα άκρα των καλωδίων type 710 της PFEIFER, για λόγους ευκολίας συναρμολόγησης.

Größe size	Charakt. Bruchkraft charact. breaking load $Z_{B,k}$ DIN 18800* kN	Grenzzugkraft limit tension $Z_{R,d}$ DIN 18800 kN	Metall. Querschnitt metallic cross section ca./approx. mm ²	Gewicht weight ca./approx. kg/m	Konstruktion construction **	Seil-Neandurchmesser nomln. strand dia. d_s mm
PV 40	405	245	281	2,4	VVS-1	21
PV 60	621	376	430	3,6	VVS-1	26
PV 90	916	555	634	5,3	VVS-2	31
PV 115	1170	709	808	6,8	VVS-2	35
PV 150	1520	921	1060	8,9	VVS-2	40
PV 195	1930	1170	1340	11,2	VVS-2	45
PV 240	2380	1442	1650	13,8	VVS-2	50
PV 300	3020	1830	2090	17,2	VVS-3	55

Σχήμα 5-5 Χαρακτηριστικά καλωδίων PV της Pfeifer

Locked Cable - VVS1



Technical infos


Average fill factor
0,83

average spinning loss factor
0,9

Rope diameter tolerance
0 / +3%

Σχήμα 5-6 Full locked cables

PV Typ 710



Τεχνische Daten

Material:
Gabelkopf mit Vergusschülse: Stahlguss
Gewindestab: Vergütungsstahl

Korrosionsschutz:
Gabelkopf mit Vergusschülse: feuerverzinkt
Gewindestab: Zink/Nickel-beschichtet

Seilverguss:
gemäß Zulassung ETA-11/0160

Anschlussblech:
S355


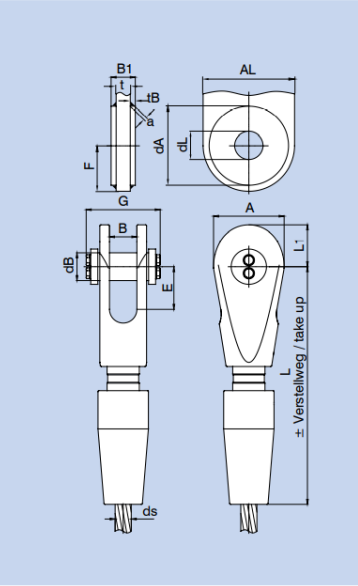
Technical Data

Material:
Fork Connector with Socket: Cast steel
Threaded Bar: Tempering Steel

Corrosion Protection:
Fork Connector, Socket: hot dip galvanised
Threaded Bar: Zinc/Nickel-coated

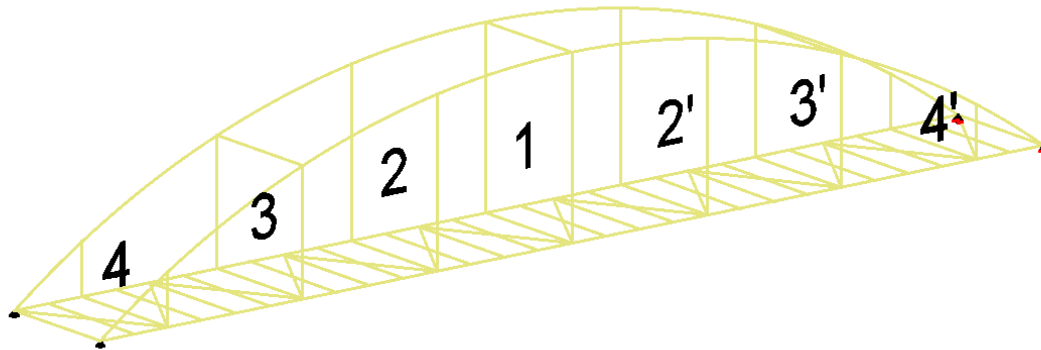
Socketing:
According to technical approval ETA-11/0160

Connecting plate:
S355

Größe size	min.		max.		max.		min.		Verstellweg take up		Ges.-Gewicht* tot.-weight		max.						
	A	B	B ₁	B ₁	d _B	d _L	E	G	L ₁	L	AL	t	t _B	F	d _A	a	± mm	kg	d _s mm
PV 40	93	35	29	31	39	42	57	108	57	359	110	20	5	62	100	3	±32	9	21

Σχήμα 5-7 Χαρακτηριστικά στηριγμάτων Type 710



Σχήμα 5-8 . Αρίθμηση καλωδίων προέντασης

Πίνακας 5-1 Δυνάμεις προέντασης.

Καλώδια	1	2-2'	3-3'	4-4'
Δύναμη προέντασης (kN)	304	277	199	75

5.4.3. Έλεγχος καλωδίων

Για τον έλεγχο των καλωδίων σε ΟΚΛ αρκεί :

$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1$	(5 – 3)
--------------------------------	---------

Όπου F_{Ed} η αξονική δύναμη σχεδιασμού και F_{Rd} η δύναμη από την τάση αντοχής

- Για τον υπολογισμό της δύναμης αντοχής εφαρμόζεται ο τύπος

$F_{Rd} = \min\left(\frac{F_{uk}}{1,5 \cdot \gamma_R}; \frac{F_k}{\gamma_R}\right)$	(5 – 4)
-------------------------------------------------------------------------------------	---------

$\gamma_R=1.00$ συντελεστής απομείωσης καμπτικής αντοχής λόγω αγκύρωσης

Για καλώδια τύπου B:

- $F_k = F_{0.2k}$ χαρακτηριστική τιμή αντοχής θραύσης με πιθανότητα υπέρβασης 0.2%
- $F_{uk} = F_{min} \cdot k_e$ χαρακτηριστική δύναμη θραύσης, όπου k_e συντελεστής απωλειών (λαμβάνεται συντηρητικά 0.8
- Σύμφωνα με τον EN 12385-2

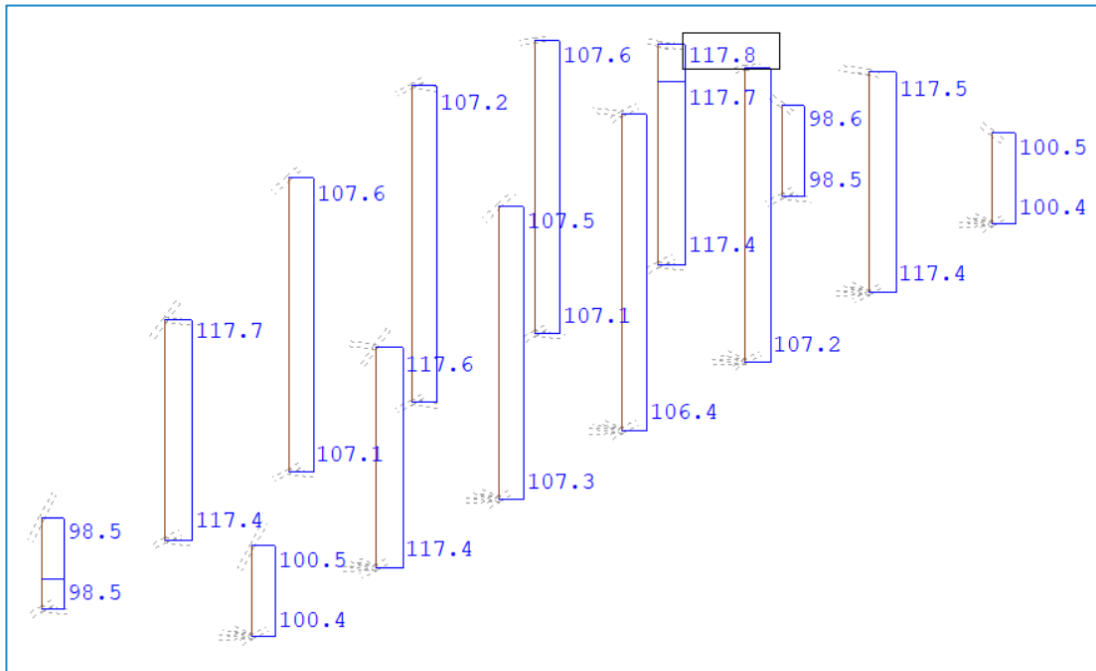
$F_{min} = \frac{K \cdot d^2 \cdot R_r}{1000}$	(5 – 5)
------------------------------------------------	---------

- d , ονομαστική διάμετρος καλωδίου
- R_r βαθμός καλωδίου θραύσης (MPa), ως απαίτηση φορτίου θραύσης
- K η ελάχιστη δύναμη θραύσης λόγω ελικοειδούς πλέξης, υπολογίζεται:

$K = \frac{\pi \cdot f \cdot k}{4}$	(5 – 6)
-------------------------------------	---------

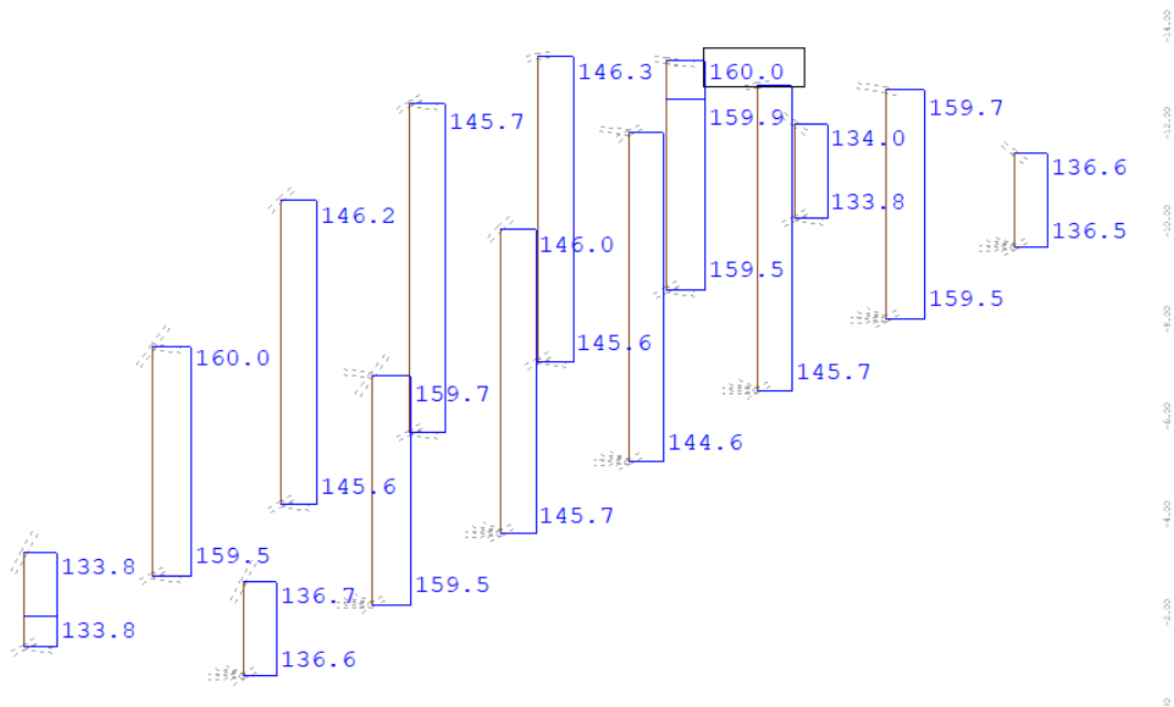
- k συντελεστής απωλειών λόγω κατασκευαστικής διάταξης
- f συντελεστής πλήρωσης, ως λόγος αθροίσματος ονομαστικών εμβαδών διατομών συρματόσχοινων σε ένα καλώδιο (A) προς το συνολικό εμβαδόν διατομής του καλωδίου (A_u) από την ονομαστική διάμετρο

Για περικλειστα καλώδια το μέγιστο όριο θραύσης είναι $f_u=1570$ Mpa και για τα επιλεγμένα καλώδια η δύναμη αντοχής από του πίνακες της εταιρείας ισούται με $F_{Rd}=376$ kN. Η δυσμενέστερη φόρτιση για ελέγχους SLS και ULS προέκυψε για τη γέφυρα πλήρως φορτισμένη με μόνιμα και κινητά με ταυτόχρονη επίδραση του ανέμου.



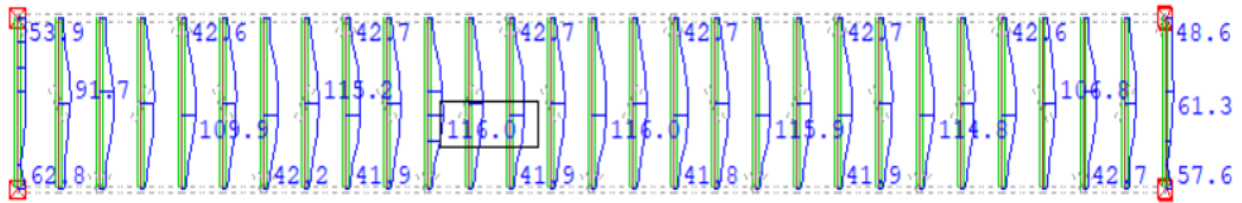
Σχήμα 5-9 Μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις σε SLS.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη δύναμη είναι $F_{SLS}=0.45 \cdot F_k$, ήτοι 280kN και για $268\text{MPa} < 636\text{MPa}$

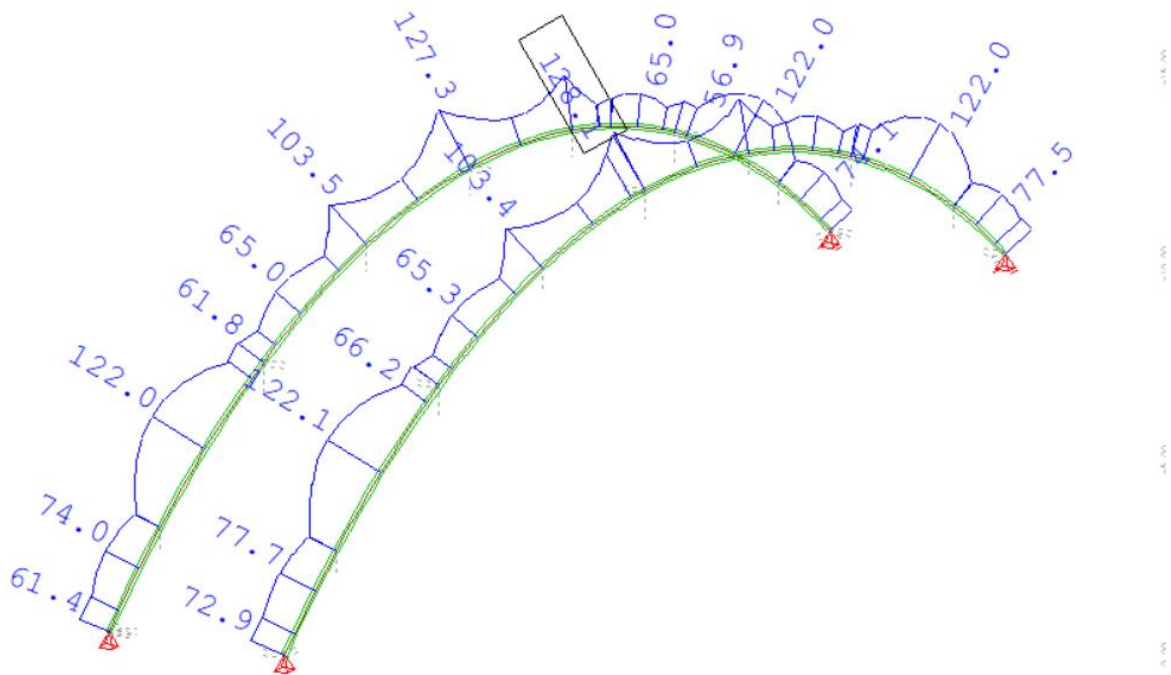


Σχήμα 5-10 Μέγιστες εφελκυστικές δυνάμεις σε ULS.

Ο έλεγχος γίνεται σε όρους τάσεων ώστε $\sigma_{Ed} < \sigma_{Rd}$, δηλ. $364\text{MPa} < 854\text{MPa}$.



Σχήμα 5-12 Τάσεις von mises (MPa) σε διαδοκίδες.

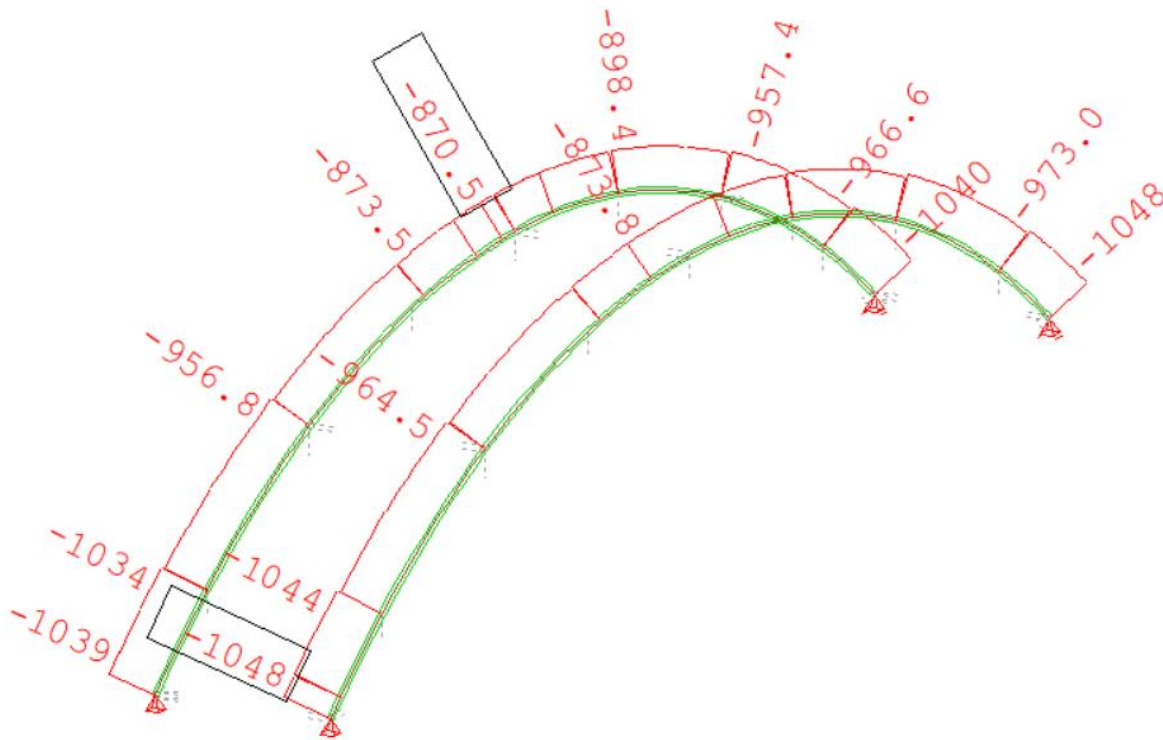


Σχήμα 5-13 Τάσεις von mises (MPa) σε κατακόρυφα τόξα.

5.6. Έλεγχοι ευστάθειας

Οι έλεγχοι μελών είναι εξίσου σημαντικοί για την ασφαλή λειτουργία του φορέα. Μάλιστα για τις τοξωτές γέφυρες οι αξονικές δυνάμεις συνήθως είναι λιγότερο δυσμενείς σε επίπεδο διατομής απ' ό τι μέλους. Επομένως για τα τόξα θα εξετασθεί η ευστάθειά τους εντός και εκτός επιπέδου ακολουθώντας τη μεθοδολογία εύρεσης κρίσιμου φορτίου λυγισμού αλλά και με τη ιδιομορφική ανάλυση (Buckling Eigenvalues) για τη δυσμενέστερη ιδιομορφή που προκύπτει από το λογισμικό, ενώ τυπικά θα ελεγχθούν οι διαδοκίδες έναντι λυγισμού.

5.6.1. Τόξα



Σχήμα 5-15 Διάγραμμα αξονικών N_{Ed} .

ΕΝΤΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ

- Κρίσιμο φορτίο λυγισμού

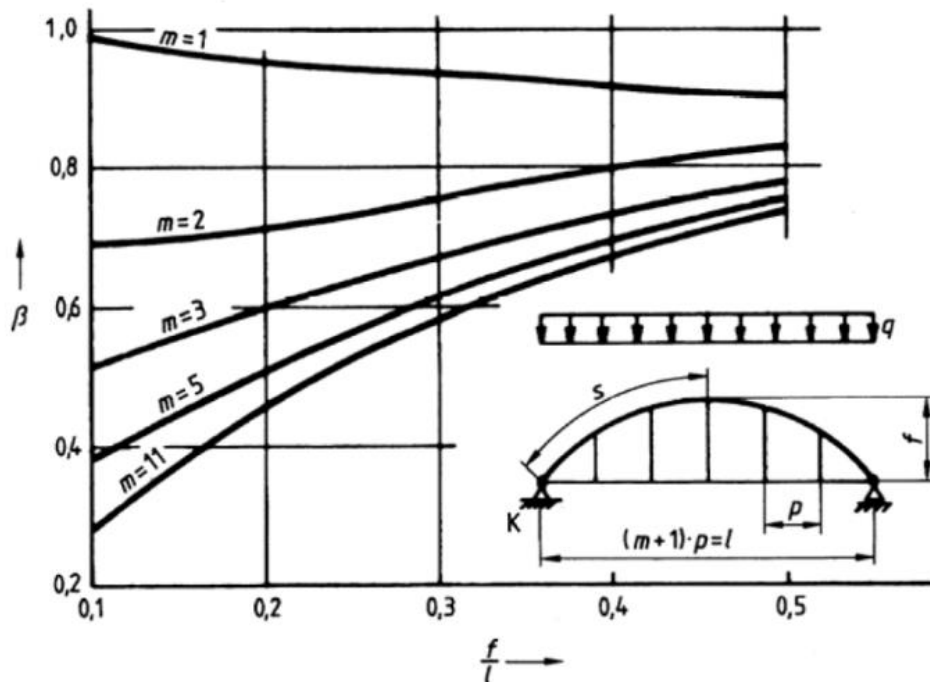
Το κρίσιμο φορτίο N_{cr} ενός τόξου εντός επιπέδου, αμελώντας την επιρροή των παραμορφώσεων λόγω αξονικών δυνάμεων, δίνεται από τη σχέση:

$N_{cr} = \left(\frac{\pi}{\beta \cdot s} \right)^2 EI_y$	(5 – 7)
------------------------------------------------------------	---------

Όπου:

- ο Ε μέτρο ελαστικότητας υλικού
- ο I_y ροπή αδράνειας της διατομής
- ο π μαθηματική σταθερά ίση με 3.14
- ο β συντελεστής λυγισμού για τοξωτά μέλη με ελκυστήρες
- ο S μέγιστο μήκος τόξου που δεν είναι πλευρικά εξασφαλισμένο.

Για την περίπτωση τόξων με οριζόντιο ελκυστήρα μεταξύ των στηρίξεων και ενδιάμεσους αναρτήρες, ο συντελεστής β υπολογίζεται από το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 5-16 Συντελεστής β για τόξα με ελκυστήρα.

Εφαρμόζοντας τον παραπάνω τύπο για $s=10.27\text{m}$, $p=6.00\text{m}$, $f=7.00\text{m}$, $l=42\text{m}$ και $m=6$.

Για $\frac{f}{l} = 0.17$ προκύπτει $\beta=0.43$ και $N_{cr} = \left(\frac{\pi}{0.43 \cdot 1027}\right)^2 \cdot 21000 \cdot 53959 = 28028\text{kN}$.



- Ακαριαίος λυγισμός (snap-through buckling)

Γίνεται έλεγχος και για ακαριαίο λυγισμό snap-through buckling σε τόξα με μικρό λόγο f/l , προκειμένου να μη λάβει χώρα ακαριαίος λυγισμός. Πρέπει να ικανοποιείται η σχέση:

$l \cdot \sqrt{\frac{EA}{12EIy}} > K$	(5 - 7)
---------------------------------------	---------

Όπου K δίνεται από τον πίνακα:

Πίνακας 5-2 Συντελεστής K για ακαριαίο λυγισμό.

	f/l	0,05	0,075	0,10	0,15	0,20
	K	35	23	17	10	8
		319	97	42	13	6

Για $f/l=0.17$ προκύπτει $K=10.20$ και άρα

$$4200 \cdot \sqrt{\frac{21000 \cdot 235}{12 \cdot 21000 \cdot 26400}} = 114.4 > K = 10.20$$

Επομένως δεν υπάρχει κίνδυνος ακαριαίου λυγισμού.

ΕΚΤΟΣ ΕΠΙΠΕΔΟΥ

- Κρίσιμο φορτίο λυγισμού

Το κρίσιμο φορτίο Euler εκτός επιπέδου, αμελώντας την επιρροή των παραμορφώσεων λόγω αξονικών δυνάμεων υπολογίζεται ως ακολούθως:

$N_{cr} = \left(\frac{\pi}{\beta \cdot l}\right)^2 EI_z$	(5 – 8)
----------------------------------------------------------	---------

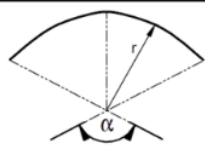
Ο συντελεστής β λαμβάνεται ίσος με $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$, όπου:

- β_1 συντελεστής λυγισμού για κατακόρυφο ομοιόμορφο φορτίο και δεσμευμένα άκρα τόξου εγκάρσιως
- β_2 συντελεστής λυγισμού για αλλαγή διεύθυνσης του φορτίου κατά τον πλευρικό λυγισμό.

Πίνακας 5-3 Συντελεστής β_1 για λυγισμό εκτός επιπέδου.

f/ℓ	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	
I_z constant	0,50	0,54	0,65	0,82	1,07	
I_z varies $I_z(\alpha_B) = \frac{I_{z,0}}{\cos \alpha_B}$	0,50	0,52	0,59	0,71	0,86	

Πίνακας 5-4 Συντελεστής β_2 για λυγισμό εκτός επιπέδου.


Loading	β_2	Comments
conservative (The deck is fixed to the top of the arch)	1	 q total load q _H load part transmitted by hangers q _{St} load part transmitted by posts
by hangers	$1 - 0,35 \frac{q_H}{q}$	
by posts	$1 - 0,45 \frac{q_{St}}{q}$	

Για I_z σταθερό λαμβάνεται $\beta_1=0.61$ $\beta_2=0.65$. Προκύπτει $\beta=0.40$

Άρα $N_{cr} = \left(\frac{\pi}{0.40 \cdot 4200}\right)^2 \cdot 21000 \cdot 26400 = 1936.7 kN$ και $\lambda = \sqrt{\frac{235 \cdot 27,5}{1936.7}} = 1.83$

Για κοίλη διατομή ψυχρής έλασης και ποιότητα χάλυβα S275, προκύπτει καμπύλη λυγισμού c και συντελεστής ατελειών $a=0.49$.

Πίνακας 5-5 Επιλογή καμπύλης λυγισμού.

Cross section	Limits	Buckling about axis	Buckling curve	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
	hot finished	any	a	a ₀
	cold formed	any	c	c

Πίνακας 5-6 Επιλογή συντελεστή ατελειών.

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

Από τα παραπάνω προκύπτει $\Phi=0.5 \cdot [1 + a \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2] = 2.58$ και $\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}} = 0.22$

Τελικά $N_b, r_d = \chi \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 1333.62 kN > N_{ed} = 1048 kN$

Εναλλακτικός έλεγχος ευστάθειας τόξων με τη Γενική μέθοδο

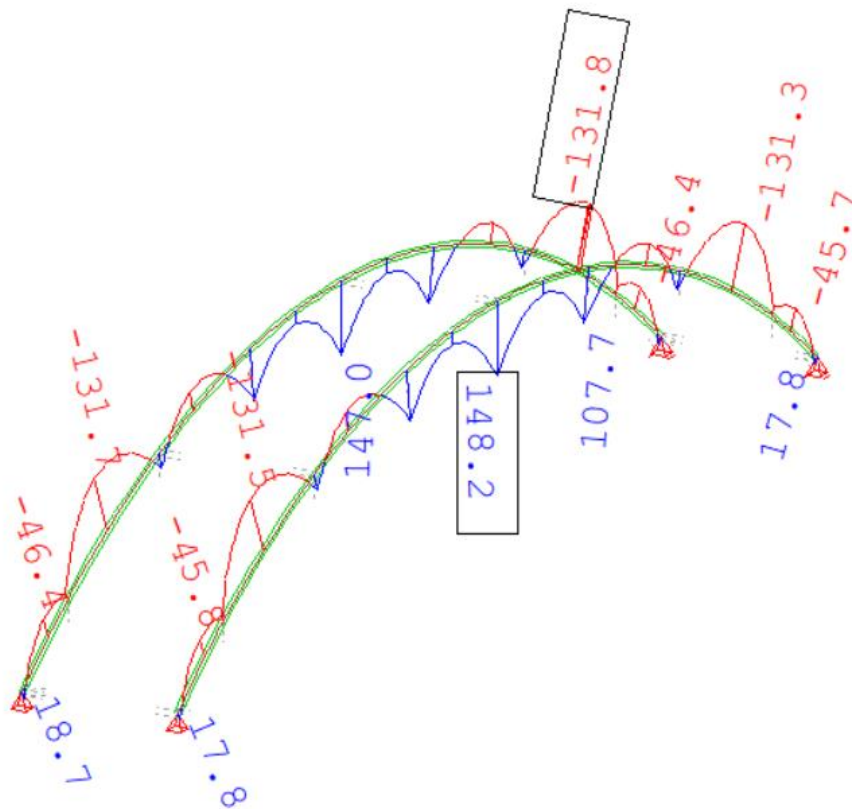
Για τον έλεγχο ευστάθειας τόξων, ακολουθείται η Γενική μέθοδος.

Αρκεί να πληρείται η σχέση:

$\frac{\chi_{op} \cdot \alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} \geq 1, \text{ για } \lambda_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr,op}}}$	(5 – 9)
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------

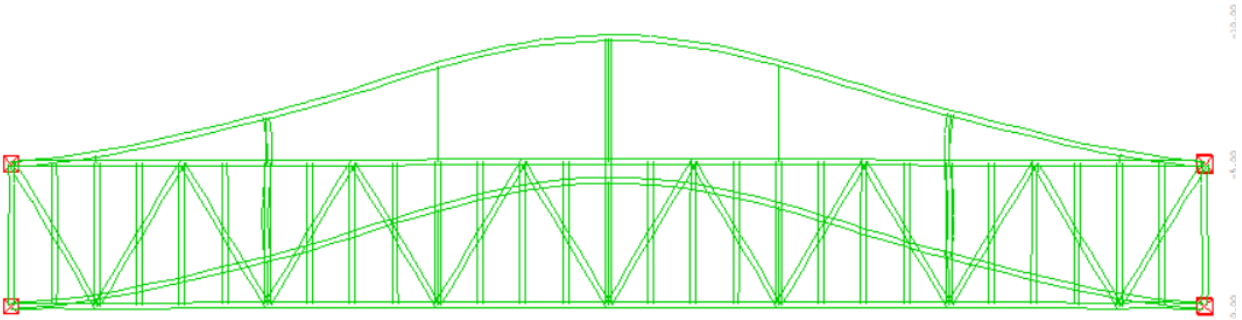
- χ_{op} μειωτικός συντελεστής στρεπτοκαμπτικού λυγισμού
- $\alpha_{cr,op}$ συντελεστής ελάχιστου κρίσιμου φορτίου χωρίς να λαμβάνει υπόψη καμπτικό λυγισμό
- $\alpha_{ult,k}$ ελάχιστος μεγεθυντικός συντελεστής χωρίς να λαμβάνει υπόψη στρεπτικό λυγισμό

$\frac{1}{\alpha_{ult,k}} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}}$	(5 – 10)
--------------------------------------------------------------------------------	----------

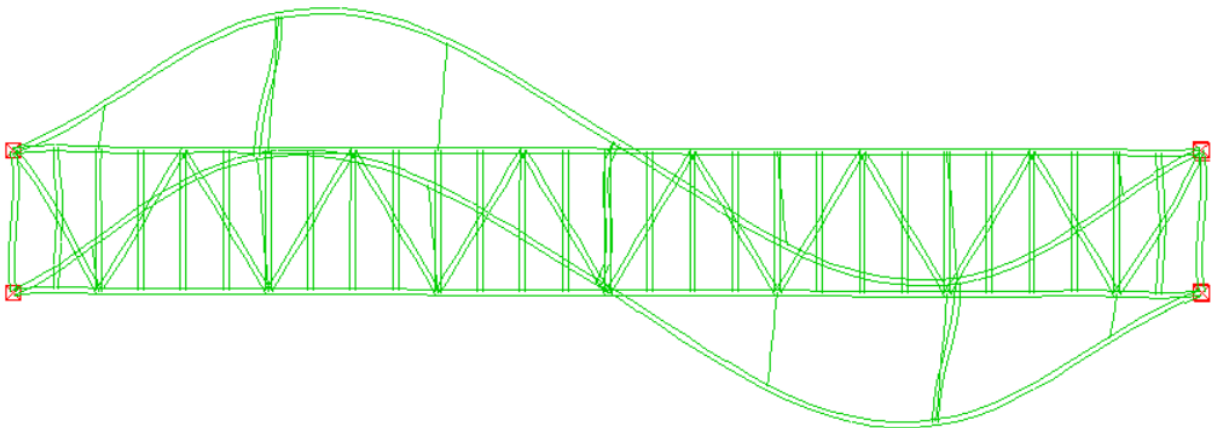


Σχήμα 5-17 Καμπτικές ροπές M_y των τόξων

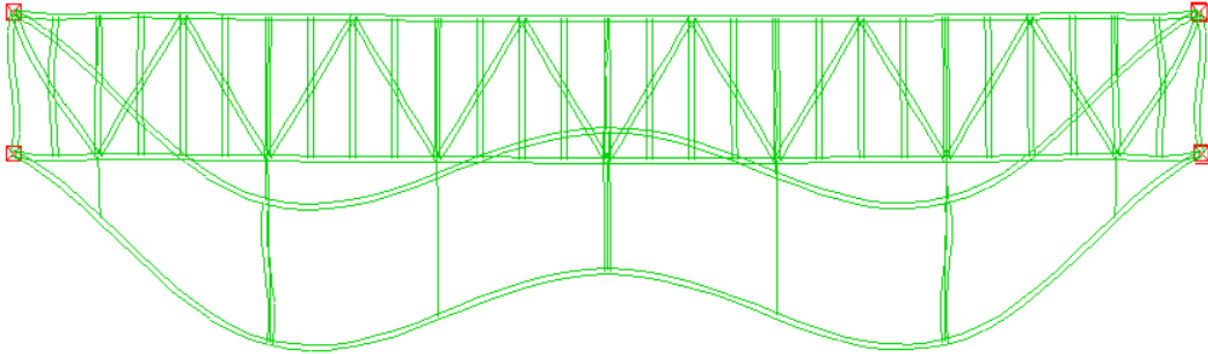
Από την ιδιομορφική ανάλυση προέκυψαν συνολικά μία πλευρική και μία καμπτική παραμορφωσιακή κατάσταση για τα τόξα.



Σχήμα 5-18 Παραμορφωσιακή κατάσταση 1^{ης} ιδιομορφής λυγισμού $\alpha_{cr,op}=16.44$.



Σχήμα 5-19 Παραμορφωσιακή κατάσταση 2^{ης} ιδιομορφής λυγισμού $\alpha_{cr,op}=17.32$.



Σχήμα 5-20 Παραμορφωσιακή κατάσταση 3^{ης} ιδιομορφής λυγισμού $a_{cr,op}=28.05$.

$$\text{Για } N_{Rk} = \frac{235 \cdot 27.5}{1.00} = 6462.5 \text{ kN και } M_{Rk} = \frac{1630 \cdot 27.5}{1.00} = 44825 \text{ kN}$$

Ο έλεγχος γίνεται για την 1^η ιδιομορφή εντατικά μεγέθη στο μέσον:

$$\begin{aligned} \checkmark \quad \frac{1}{\alpha_{ult,k}} &= \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{Rk}} \rightarrow \alpha_{ult,k} = 7.24 \\ \checkmark \quad \lambda_{op} &= 0.66 \\ \checkmark \quad \Phi &= 0.83 \\ \checkmark \quad \chi_{op} &= 0.74 \end{aligned}$$

Από την Εξ. (5-9) $0.74 \geq \frac{\gamma_{M1}}{\alpha_{ult,k}} = 0.15$, πληρείται το κριτήριο.

5.6.2. Διαδοκίδες

- Έλεγχο σε πλευρικό λυγισμό λόγω κάμψης

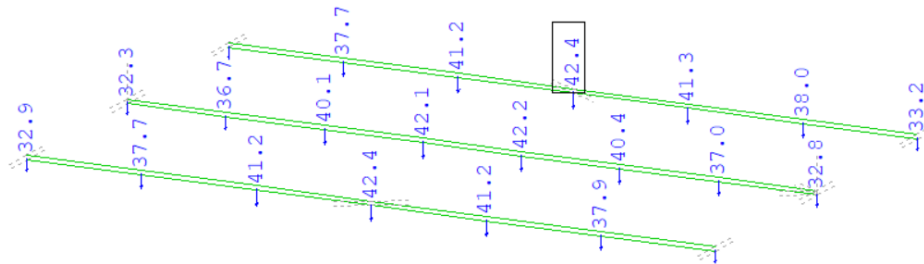
Μέγιστη ροπή κάμψης $M_{Ed}=37.5 \text{ kNm}$ στη μεσαία διαδοκίδα από το δυσμενέστερο συνδυασμό με τη συμμετοχή ανέμου. Εφαρμόζοντας τη διαδικασία ελέγχου σε πλευρικό λυγισμό με τα εξής δεδομένα:

- $M_{cr}=64.90 \text{ kNm}$, $\frac{37.5}{64.90} = 0.58 > 0.04$
- $\lambda_{LT}=1.17$
- $\alpha_{LT}=0.21$
- $\Phi_{LT}=1.28$
- $\chi_{LT}=0.56 \leq 1$

προκύπτει $M_{b,Rd}=45.36 \text{ kNm}$

5.7. Έλεγχοι βελών

Ο έλεγχος βελών γίνεται στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας σύμφωνα με τον EC3, για όλα τα μέλη του καταστρώματος. Η ανάλυση έγινε στο λογισμικό SOFiSTiK προέκυψαν οι μέγιστες βυθίσεις από το συνδυασμό $1.00G+1.00P+1.00Q+0.30W$.



Σχήμα 5-21 Μέγιστες βυθίσεις διαδοκίδων στο μέσον του καταστρώματος.

Η μέγιστη σχετική βύθιση είναι ίση με $42.2 - 32.3 = 9.90\text{mm} = \frac{L}{505}$ και άρα αποδεκτή.

6 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΑ ΠΕΖΩΝ

6.1. Εισαγωγή

Τα δυναμικά φορτία είναι εκείνα των οποίων η ένταση ή και η θέση μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου, κάτι που ισχύει μερικώς και για τα στατικά φορτία καθόσον αρχικά έχουν μηδενική τιμή και με αμελητέες αναπτυσσόμενες επιταχύνσεις φτάνουν την τελική τιμή, εφόσον φυσικά ο χρόνος επιβολής είναι μεγαλύτερος της ιδιοπεριόδου. Διακρίνονται σε ντετερμινιστικά εάν η χρονική μεταβολή είναι γνωστή σε όλη τη διάρκεια της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής και στοχαστικά εφόσον η χρονική μεταβολή μπορεί να προσδιοριστεί με στοχαστικές μεθόδους.

Οι περιοδικές φορτίσεις σε μεγάλες και δύσκαμπτες κατασκευές έχουν μικρή επιρροή στη δυναμική απόκριση. Μία πεζογέφυρα με μεγάλο άνοιγμα και μικρή μάζα, αποκτά μεγάλη ευκαμψία και μεγάλη ιδιοπερίοδο, με μεγάλη ευαισθησία σε δυναμικά φαινόμενα. Επομένως θα πρέπει να εξετάζεται η περίπτωση της συχνότητας της εξαναγκασμένης ταλάντωσης λόγω διέλευσης πεζών να ταυτίζεται με μία από τις μικρές συχνότητες της γέφυρας, ώστε να αποφεύγονται μεγάλες παραμορφώσεις ή και ανησυχητικά εντατικά μεγέθη.

Ένας πεζός διelaύνει ασκώντας περιοδική δύναμη με συχνότητα 1.6 – 2.4Hz. Συμβατικά θα λέγαμε ότι η ιδιοσυχνότητα ανεμπόδιστης διέλευσης πλήθους, περιγράφεται από την κανονική κατανομή με μέση τιμή 2Hz και τυπική απόκλιση 0.20Hz, ενώ από πρόσφατες μελέτες προκύπτουν ακόμη μικρότερες μέσες συχνότητες. Ομοίως ομάδα με άτομα που τρέχει, διασχίζει μία πεζογέφυρα με συχνότητα 2-3.5Hz, προκαλώντας κυρίως ενόχληση στους υπόλοιπους πεζούς και όχι τόσο κίνδυνο για το φαινόμενο συντονισμού, λόγω της μικρής διάρκειας, εξαιρουμένων περιπτώσεων όπως αγώνα δρόμου, όπου το πλήθος των συμμετεχόντων είναι πιο πυκνό και η διάρκεια του αγώνα μικρή.

6.2. Ιδιοσυχνότητες πεζογέφυρας

Σύμφωνα με τον τεχνικό οδηγό SETRA [21], ο κίνδυνος συντονισμού της πεζογέφυρας προσδιορίζεται από εύρος συχνοτήτων σε οριζόντια, κατακόρυφη και εγκάρσια διεύθυνση. Εν συνεχεία, καθορίζεται και το επίπεδο άνεσης των πεζών από τις επιταχύνσεις που θα προκύψουν σε εγκάρσια και οριζόντια διεύθυνση.

- Εύρος 1 αφορά μέγιστο κίνδυνο συντονισμού
- Εύρος 2 αφορά μέτριο κίνδυνο συντονισμού
- Εύρος 3 αφορά χαμηλό κίνδυνο συντονισμού
- Εύρος 4 αφορά αμελητέο κίνδυνο συντονισμού

Στους πίνακες των Σχήμα 6-1 και Σχήμα 6-2 προσδιορίζονται τα εύρη συχνοτήτων για τα οποία η γέφυρα κατηγοριοποιείται σε κίνδυνο συντονισμού.

Frequency	0	0.3	0.5	1.1	1.3	2.5
Range 1						
Range 2						
Range 3						
Range 4						

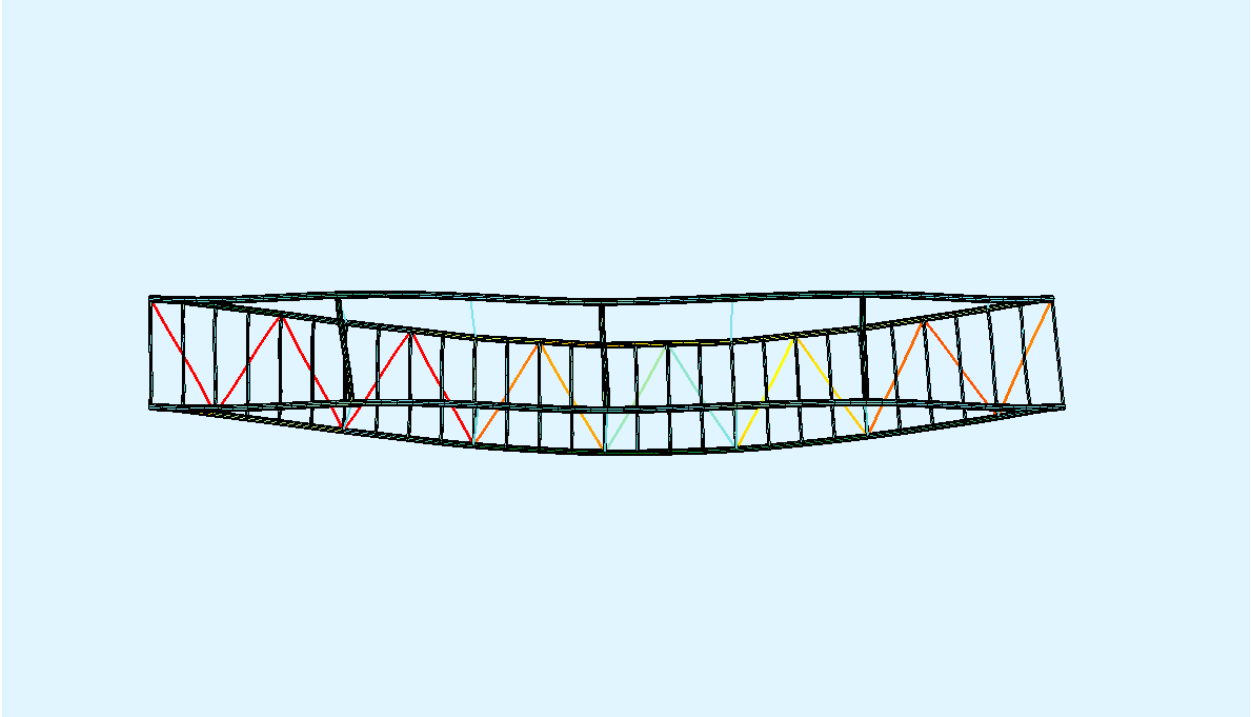
Σχήμα 6-1 Εύρη ιδιοσυχνοτήτων για εγκάρσιες ταλαντώσεις.

Frequency	0	1	1.7	2.1	2.6	5
Range 1						
Range 2						
Range 3						
Range 4						

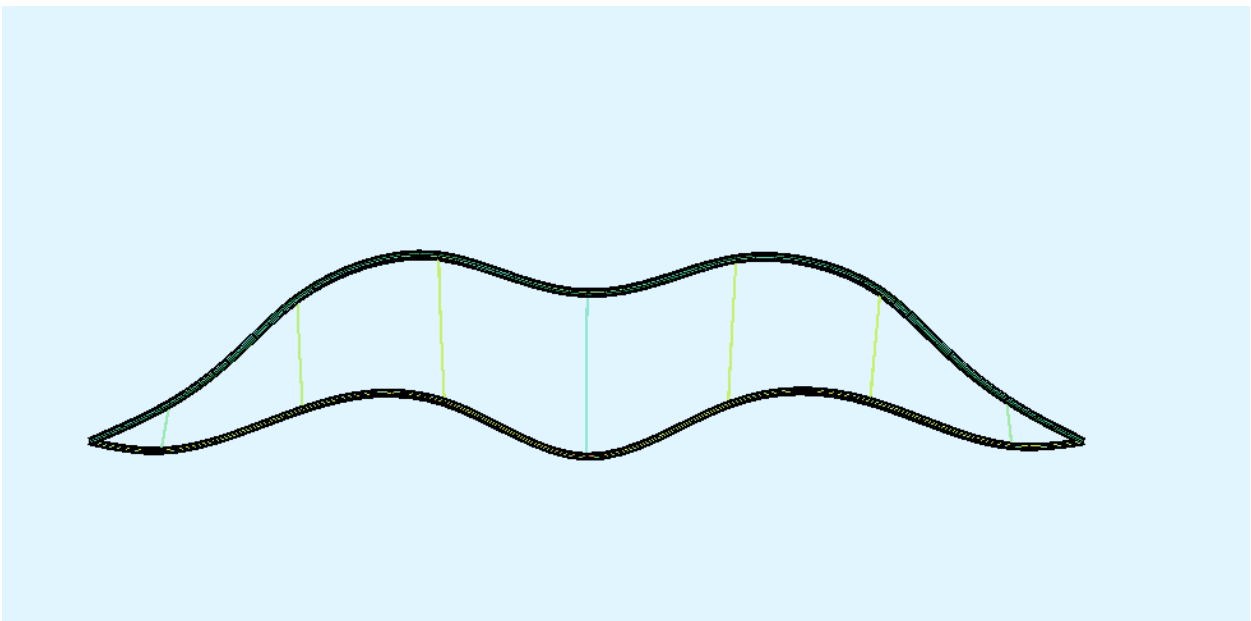
Σχήμα 6-2 Εύρη ιδιοσυχνοτήτων για κατακόρυφες και διαμήκεις ταλαντώσεις.

Στις ακόλουθες κατηγορίες γεφυρών I έως και III, απαιτείται η εύρεση των ιδιομορφών στις τρεις διευθύνσεις, για την περίπτωση της αφόρτιστης γέφυρας και την περίπτωση παρουσίας πεζών, φορτίου 0.7kN/m^2 .

Για λόγο απόσβεσης $\xi=0.2\%$, προέκυψε η θεμελιώδης ιδιομορφή στην εγκάρσια διεύθυνση με ιδιοσυχνότητα $f_1=1.64\text{Hz}$. Η κύρια κατακόρυφη, με κίνδυνο ανύψωσης καταστρώματος αντιστοιχεί σε ιδιοσυχνότητα $f_2=1.73\text{Hz}$.



Σχήμα 6-3 Θεμελιώδης ιδιομορφή στην εγκάρσια διεύθυνση σε κάτοψη (38%).



Σχήμα 6-4 Ιδιομορφή στην κατακόρυφη διεύθυνση σε όψη (40%).

Η θεμελιώδης ιδιομορφή αντιστοιχεί στην χαμηλή περιοχή συντονισμού, ενώ η κύρια κατακόρυφη, $f_2=1.73\text{Hz}$ στην πιο επικίνδυνη περιοχή συντονισμού.

6.3. Μελέτη δυναμικής απόκρισης πεζογέφυρας.

Οι πεζογέφυρες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το φόρτο της κυκλοφοριακής ροής, ως εξής:

- Κατηγορία IV, γέφυρες που χρησιμοποιούνται σπάνια
- Κατηγορία III, γέφυρες που διασχίζουν περιστασιακά μεγάλες ομάδες ατόμων
- Κατηγορία II, γέφυρες που ενώνουν κατοικημένες περιοχές με έντονη κυκλοφορία
- Κατηγορία I γέφυρες που χρησιμοποιούνται συχνά από πυκνά πλήθη

Η τοξωτή πεζογέφυρα στην παρούσα διπλωματική, λόγω της τοποθεσίας της προσδιορίζεται ως τυπικής χρήσης και επομένως λαμβάνεται κατηγορίας III.

		Load cases to select for acceleration checks		
Traffic	Class	Natural frequency range		
		1	2	3
Sparse	III	Case 1	Nil	Nil
Dense	II		Case 1	Case 3
Very dense	I	Case 2	Case 2	Case 3

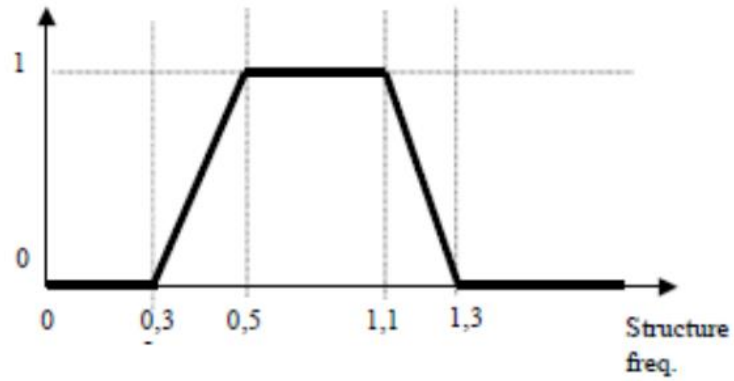
Class	Density d of the crowd
III	0.5 pedestrians/m ²
II	0.8 pedestrians/m ²

Σχήμα 6-5 Περιπτώσεις φορτίων για τον έλεγχο επιταχύνσεων.

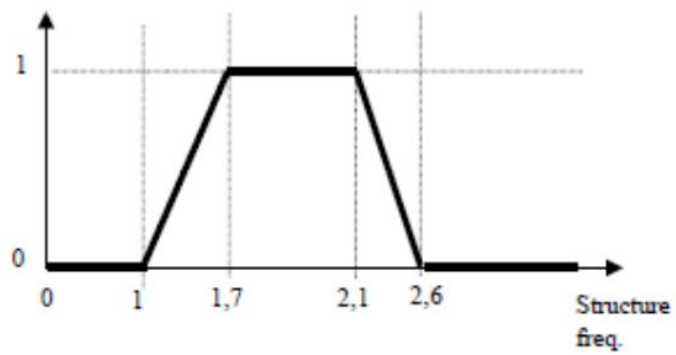
Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα προσδιορίζεται η περίπτωση ελέγχου που απαιτείται, ανάλογα με το εύρος ιδιοσυχνότητας που αντιστοιχεί στην πεζογέφυρα και ακολούθως την πυκνότητα του πλήθους.

Για την περίπτωση που εξετάζεται, η κύρια κατακόρυφη ιδιομορφή απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση ως Case1, με δεδομένα:

- $d = 0.5 \text{ ped/m}^2$
- $N = L \cdot b \cdot d = 105 \text{ pedestrians}$ που συμμετέχουν στη φόρτιση της πεζογέφυρας
- Προτείνεται $\xi = 0.4\%$ για τους ελέγχους SLS
- Ισοδύναμοι πεζοί $N_{\text{eff}} = 10.8 \cdot \sqrt{N} \cdot \xi = 7$
- μειωτικός συντελεστής $\psi = 1$



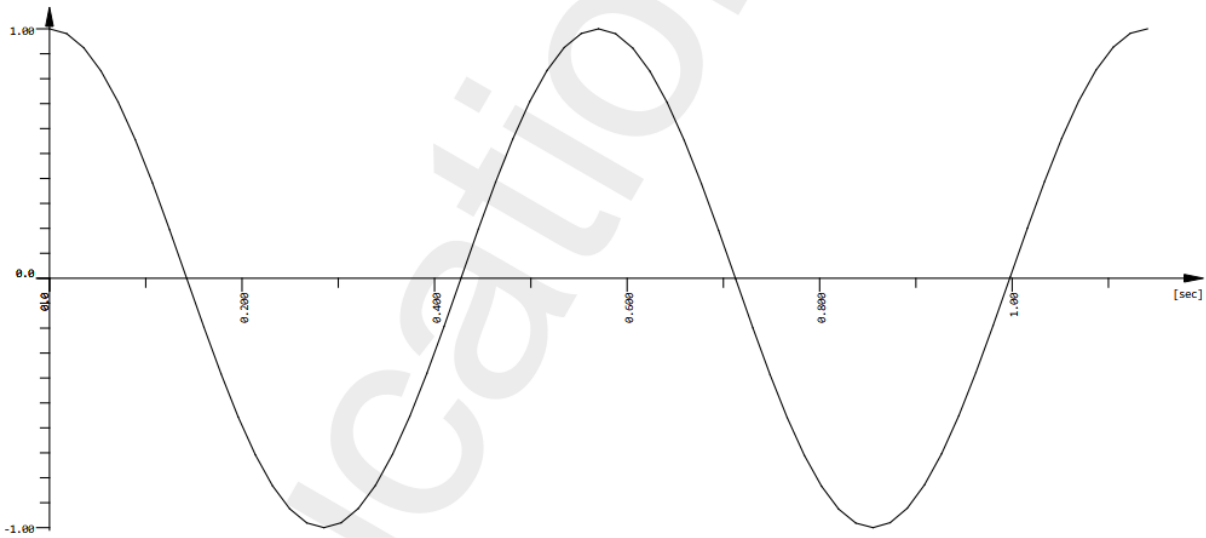
Σχήμα 6-6 Μειωτικός συντελεστής ψ για εγκάρσιες ταλαντώσεις.



Σχήμα 6-7 Μειωτικός συντελεστής ψ για κατακόρυφες και διαμήκειες ταλαντώσεις.

Το ισοδύναμο δυναμικό φορτίο ισούται με $q_{\text{vert}}(t) = 1 \cdot 0.5 \cdot 280 \cdot \cos(2\pi f_{\text{vert}}t) \cdot 10.8 \cdot \sqrt{\frac{0.004}{105}} = 9.33 \cos(3.48\pi t)$ N/m^2 με μέγιστη τιμή φορτίου 9.33 N/m^2 και συχνότητα 3.48 rad/sec .

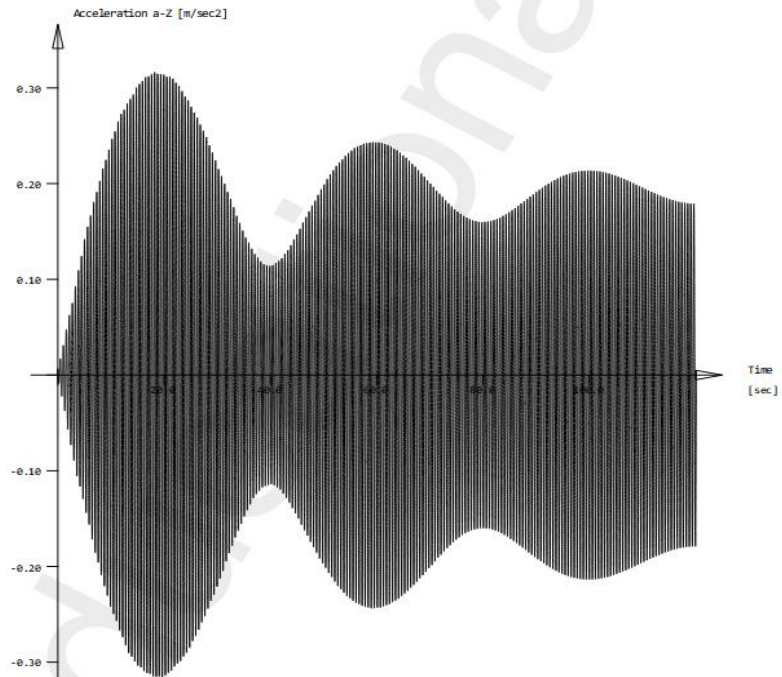
Η επιβολή του φορτίου έγινε μέσω του υποπρογράμματος DYNΑ, σε περιβάλλον Text Editor, για χρονοίστορία 120sec και βήμα 0.001sec για την ένατη διαδοκίδα (κόμβος 1234) και το μέσον του τρίτου καλωδίου (κόμβος 1455), όπου εμφανίστηκαν μεγάλες τιμές επιταχύνσεων.



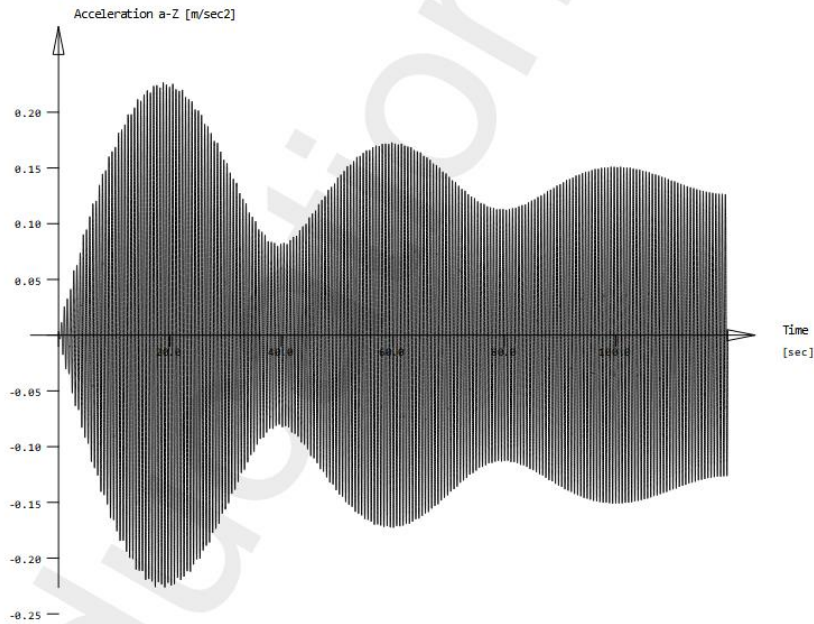
Σχήμα 6-8 Συνημιτονοειδής συνάρτηση επιβολής φορτίου.

Πίνακας 6-1 Κώδικας κατακόρυφης ταλάντωσης.

```
+PROG SOFILOAD urs:28.1
LC NO 1020 FACT 1 TYPE NONE
COPY NO1010 FACT 1
FUNC T 0.57 F 1 T1 0.57*3/4 TMIN 0 TMAX 120
END
+PROG DYNA urs:20
HEAD 0.5 PEDESTRIANS/M2
ECHO OPT FULL
PAGE LINE 9999
CTRLOPT STYP VAL 2
EIGE 25 TYPE REST LC 2001
MODD D 0.002
STEP N120000 DT 0.001
LC NO 1020 FACT 1
HISTTYPE A-Y FROM 1234 TO 1455 INC 221 LCST 1
HISTTYPE A-Z FROM 1234 TO 1455 INC 221 LCST 2
END
+PROG DYNR urs:29.2
HEAD RESULTS
PAGE LANO 1
HIST LCS 1 TYPE A-Y NO1 1234 TMIN 0 TMAX 120 TITL "ACCELERATION A-Y NODE 1234"
HIST LCS 1 TYPE A-Y NO1 1455 TMIN 0 TMAX 120 TITL "ACCELERATION A-Y NODE 1455"
HIST LCS 2 TYPE A-Z NO1 1234 TMIN 0 TMAX 120 TITL "ACCELERATION A-Z NODE 1234"
HIST LCS 2 TYPE A-Z NO1 1455 TMIN 0 TMAX 120 TITL "ACCELERATION A-Z NODE 1455"
END
```



Σχήμα 6-9 Κατακόρυφες επιταχύνσεις του κόμβου 1234 (m/s^2) για $T=120sec$ και $dT=0.001sec$.



Σχήμα 6-10 . Κατακόρυφες επιταχύνσεις του κόμβου 1455 (m/s^2) για $T=120sec$ και $dT=0.001sec$.

Οι παραπάνω ιδιομορφές που προέκυψαν διερευνήθηκαν περαιτέρω ως προς το επίπεδο άνεσης πεζών και προέκυψαν εντός επιτρεπόμενου εύρους τιμών, σύμφωνα με τους ακόλουθους πίνακες και συγκεκριμένα για τη μέγιστη επιτάχυνση $0.32\text{m/s}^2 < 0.5\text{m/s}^2$, με ανεπαίσθητες επιταχύνσεις.

- Εύρος 1, με ανεπαίσθητες επιταχύνσεις
- Εύρος 2, για ελάχιστα αισθητές επιταχύνσεις
- Εύρος 3, για αντιληπτές από του χρήστες αλλά ανεκτές επιταχύνσεις

Πίνακας 6-2 Εύρη επιταχύνσεων σε κατακόρυφη διεύθυνση (m/s^2).

Acceleration ranges	0	0.5	1	2.5
Range 1	Max			
Range 2		Mean		
Range 3			Min	
Range 4				

Επιταχύνσεις άνω των 2.5m/s^2 δεν γίνονται αποδεκτές.

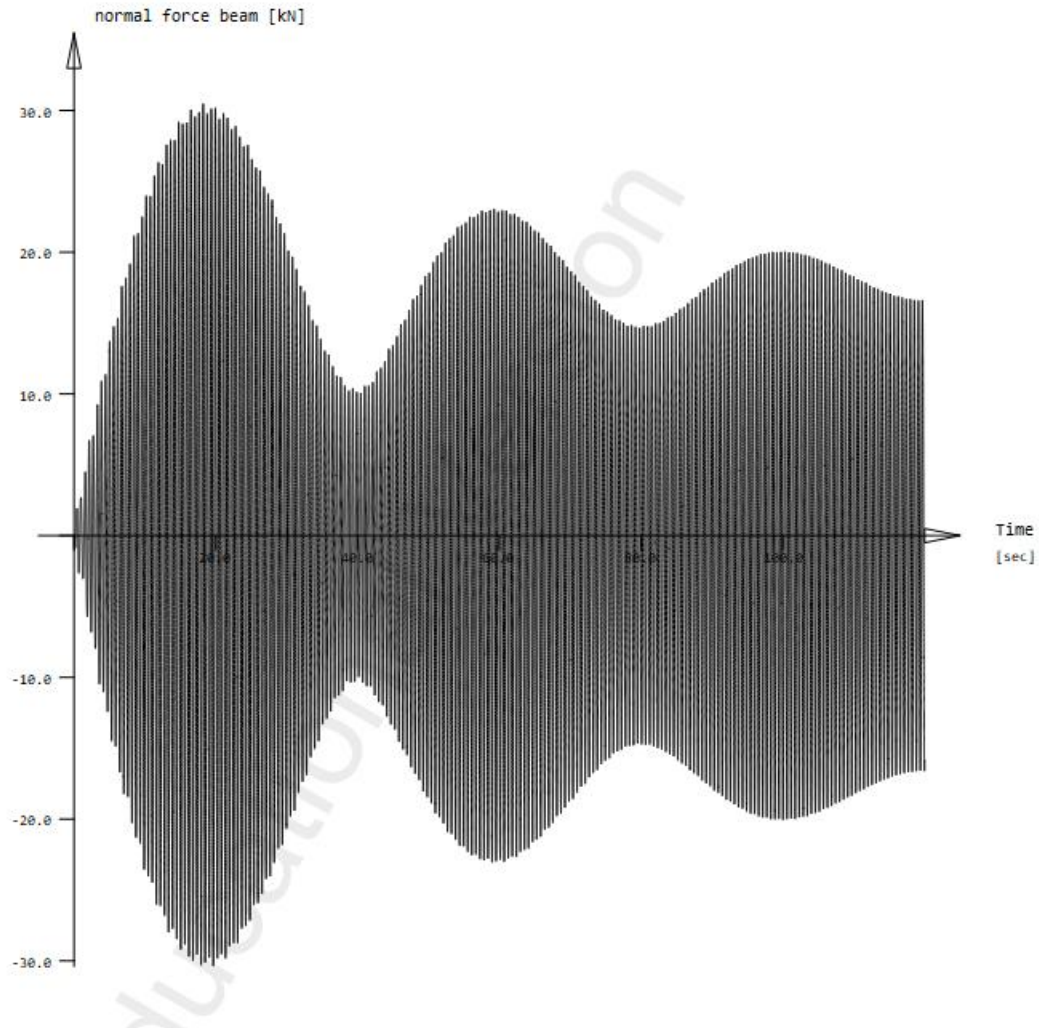
Πίνακας 6-3 Εύρη επιταχύνσεων σε οριζόντια διεύθυνση (m/s^2).

Acceleration ranges	0	0.1	0.15	0.3	0.8
Range 1	Max				
Range 2			Mean		
Range 3				Min	
Range 4					

Στην οριζόντια διεύθυνση υπάρχει περιορισμός σε κάθε περίπτωση για 0.10m/s^2 , προς αποφυγήν του φαινομένου "lock-in", κατά το οποίο ένα πλήθος κινείται με τυχαίες συχνότητες γύρω από μία μέση τιμή έως ότου επέρχεται αναγκαστικός συγχρονισμός και προκαλούνται εγκάρσιες ταλαντώσεις μεγάλου εύρους τιμών, με την απόσβεση ταυτόχρονα να μειώνεται και σταδιακά να αποκτά συχνότητα ίδια με της πεζογέφυρας. Το φαινόμενο αυτό ήταν άγνωστο στους επιστήμονες κατά το παρελθόν και μελετήθηκε όταν εμφανίστηκε σε γέφυρες στο Παρίσι και το Λονδίνο. Οπότε και έκτοτε χρειαζόταν οι πεζογέφυρες να υποβληθούν σε ενδελεχείς δοκιμές, προτού τεθούν σε λειτουργία, όπως η πεζογέφυρα Solférino και η Millenium. Στην γέφυρα που μελετάται η μέγιστη εγκάρσια επιτάχυνση στους ίδιους κόμβου προέκυψε 0.01m/s^2 , επομένως δεν υπάρχει κίνδυνος να εμφανιστεί το φαινόμενο του "lock-in".

Πίνακας 6-4 Κώδικας αξονικής δύναμης.

```
+PROG SOFILOAD urs:28.1
LC NO 1020 FACT 1 TYPE NONE
COPY NO 1010 FACT 1
FUNC T 0.57 F 1 T1 0.57*3/4 TMIN 0 TMAX 120
END
+PROG DYNA urs:20
HEAD 0.5 PEDESTRIANS/M2
ECHO OPT FULL
PAGE LINE 9999
CTRL OPT STYP VAL 2
EIGE 25 TYPE REST LC 2001
MODD D 0.002
STEP N 120000 DT 0.001
LC NO 1020 FACT 1
HIST TYPE N FROM 30001 TO 30060 INC 1 LCST 1
END
+PROG DYNR urs:29.2
HEAD RESULTS
PAGE LANO 1
HIST LCS 1 TYPE N NO1 30015 TMIN 0 TMAX 120 TITL "BEAM 30015"
HIST LCS 1 TYPE N NO1 30030 TMIN 0 TMAX 120 TITL "BEAM 30030"
END
```



Σχήμα 6-11 Αξονική δύναμη στο τόξο για περιοδική φόρτιση με $T=120\text{sec}$ και $dT=0.001\text{sec}$.

Παρατήρηση: Η αξονική δύναμη που προκαλείται λόγω του μικρού δυναμικού φορτίου δίνει μικρότερη τιμή, ίση με 30kN συγκριτικά με τα 400kN που αναπτύσσονται λόγω αποκλειστικά κινητού φορτίου (5kN/m^2).

7 ΕΦΕΔΡΑΝΑ

8.1. Εισαγωγή

Τα εφέδρανα είναι μηχανικά στοιχεία τα οποία επιτρέπουν σχετικές μετακινήσεις και στροφές στις θέσεις στις οποίες τοποθετούνται, εφόσον αυτές δεν παρεμποδίζονται με κατασκευαστικά μέτρα. Αναλαμβάνουν να μεταφέρουν τα κατακόρυφα και οριζόντια φορτία που δρουν στο φορέα, στα βάθρα. Επιτρέπουν μετακινήσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών ή άμεση φόρτιση της γέφυρας.

Τύποι εφεδράνων:

- Ελαστομεταλλικά εφέδρανα
- Σφαιρικά εφέδρανα
- Εφέδρανα δοχείου
- Κυλινδρικά εφέδρανα

Εφέδρανα:

- Σταθερά
- Κινητά στην διαμήκη ή εγκάρσια διεύθυνση
- Κινητά και στις δύο διευθύνσεις

Παραλαβή:

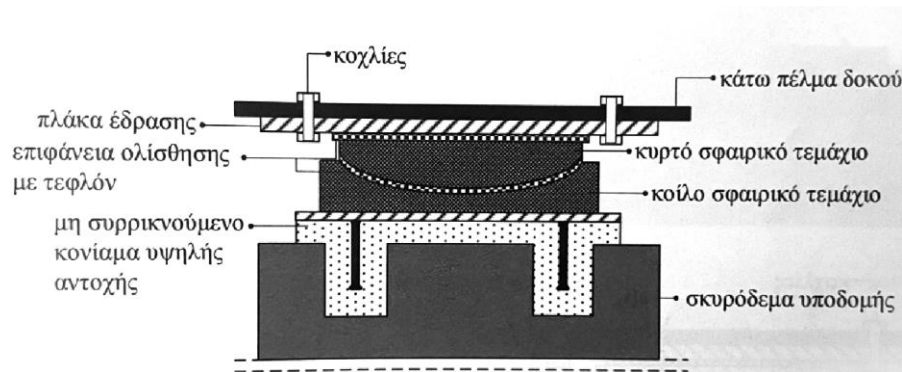
- Θλιπτικών δυνάμεων
- Θλιπτικών και εφελκυστικών δυνάμεων (upliftrestrain)

8.2. Σφαιρικά εφέδρανα

Η στήριξη του φορέα στα ακρόβαθρα γίνεται μέσω εφεδράνων σφαιρικού τύπου, τοποθετούμενα ανά δύο σε κάθε ακρόβαθρο, δεσμεύοντας μόνο τις κατακόρυφες μετακινήσεις. Αποτελούνται από τρία βασικά τμήματα:

- Μία πλάκα έδρασης, ώστε τα φορτία της ανωδομής να μεταφέρονται στο εφέδρανο
- Ένα κυρτό σφαιρικό τεμάχιο, που προσφέρει μία επίπεδη άνω επιφάνεια από τεφλόν και επιτρέπει την ολίσθηση μεταξύ τεμαχίου και πλάκας έδρασης και μία κυρτή κάτω επιφάνεια από τεφλόν που επιτρέπει τη στροφή.
- Ένα κοίλο σφαιρικό τεμάχιο για τη μεταφορά του φορτίου στην υποδομή.

Έτσι οι ελεύθερες μετακινήσεις και στροφές επιτυγχάνονται μέσω δύο ανεξάρτητων ολισθήσεων, μίας μεταξύ της πλάκας έδρασης και του κυρτού σφαιρικού τεμαχίου και μίας μεταξύ του κυρτού και του κοίλου σφαιρικού τεμαχίου.



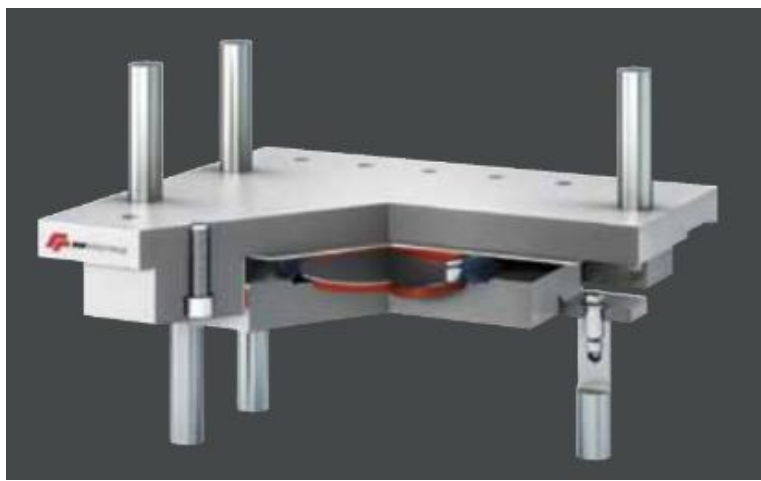
Σχήμα 7-1 Διατομή σφαιρικού εφεδράνου

Η παραλαβή των φορτίων γίνεται στη διαμήκη διεύθυνση από το ένα ακρόβαθρο ενώ στην εγκάρσια διεύθυνση και από τα δύο ακρόβαθρα. Τα εφεδράνα που επιλέχτηκαν είναι της εταιρείας FIPMEC – Type SFEROPOLO, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Ο σχεδιασμός τους ακολουθεί τις προδιαγραφές των EN1337-7 (Spherical and cylindrical), AASHTO και άλλων κανονισμών.
- Μέγιστη επιτρεπόμενη περιστροφή 2%.
- Θερμοκρασίες περιβάλλοντος από -50° έως +70°.
- Τα επιμέρους μέρη κατασκευάζονται από ποιότητα χάλυβα S355 σύμφωνα με τον EN 10025-2.
- Ανοξειδωτος χάλυβας X5CrNiMo σύμφωνα με το EN 10088-2, ελάχιστου πάχους συρόμενων επιφανειών 2,5mm.
- Φύλλα SMF (πολυαιθυλένιο εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους), από υλικό χαμηλού συντελεστή τριβής, μέγιστης επιτρεπόμενης στροφής $\pm 0,010$ rad και ελάχιστου πάχους 8mm.
- Η προεξοχή από την εσοχή και το συνολικό πάχος του φύλλου SMF, είναι σύμφωνα με την ETA 09/0226.
- Το υλικό χαμηλής τριβής για πλευρικούς οδηγούς αποτελείται από CM1 σύμφωνα με το EN 1337-2 ή λωρίδες SMF χωρίς τρύπες, ανάλογα με τις ανάγκες οριζόντιων μετακινήσεων.



Σχήμα 7-2 Spheropol fixed type (SF).

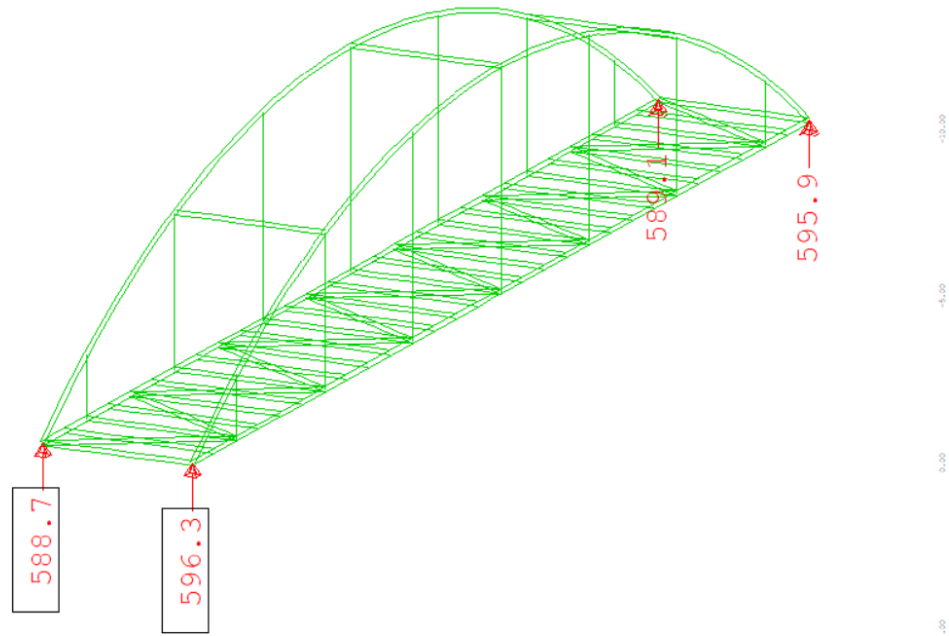


Σχήμα 7-3 Spheropol guided sliding type (SU-SU*).

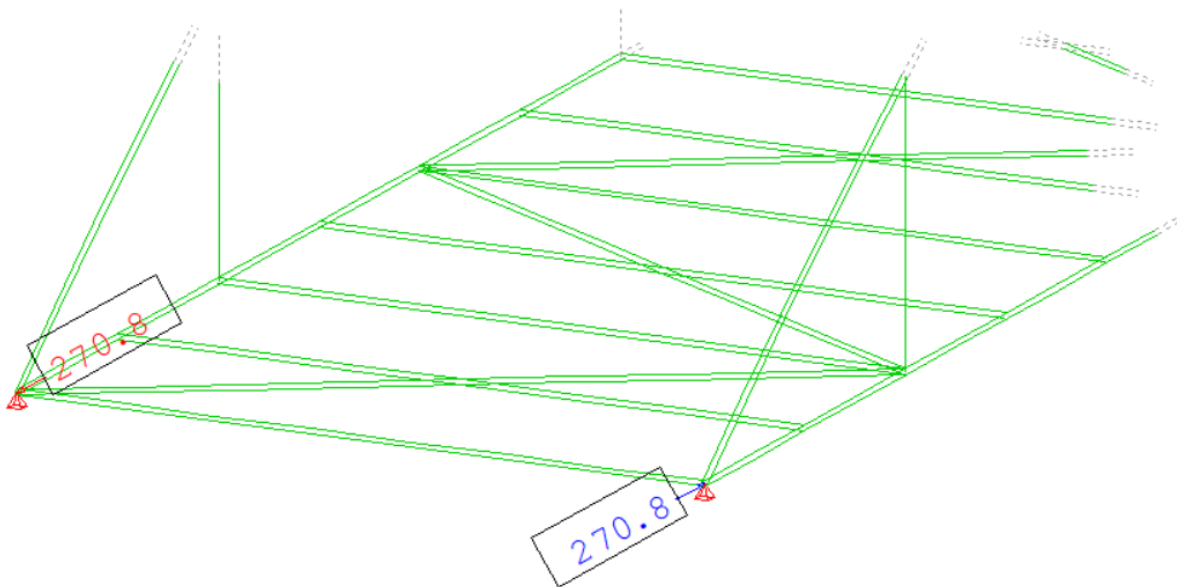
8.3. Διαστασιολόγηση εφεδράνων

Σύμφωνα με το στατικό μοντέλο, επιλέγονται για κάθε ακρόβαθρο, εφέδρανα ανά δύο με ελευθερία κίνησης στη διαμήκη διεύθυνση (SU) και δέσμευση της κίνησης εγκάρσιως και δύο σταθερά εφέδρανα (SF).

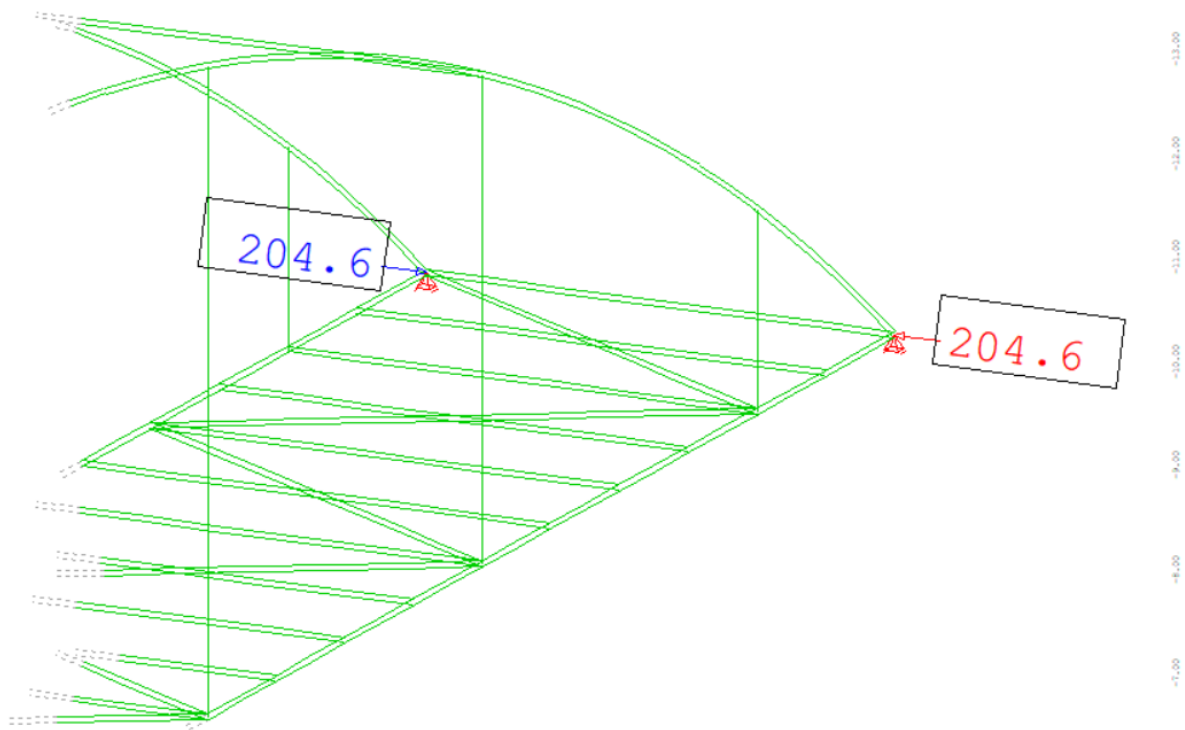
Η διαστασιολόγηση γίνεται ώστε για $N_{sd,ULS}$ να ισχύουν $N_{sd,SLS} = N_{sd,ULS}/1.4$, για ελάχιστη στροφική $r_{min} = 0.3 \cdot r_{SLS}$ και στροφή από μόνιμα φορτία $r_{perm} = 0.6 \cdot r_{SLS}$



Σχήμα 7-4 Μέγιστη κατακόρυφη δύναμη για συνδυασμό $1.35G+1.00P+1.35Q+0.45W$.



Σχήμα 7-5 Μέγιστη οριζόντια δύναμη για συνδυασμό $1.35G+1.00P+1.50W+0.54Q$.



Σχήμα 7-6 Μέγιστη οριζόντια δύναμη για συνδυασμό $1.35G+1.00P+1.50T+0.54Q$.

Στις θέσεις στηρίξεων προκύπτει από την περιβάλλουσα δυνάμεων:

- $N_{ULS}=596.3\text{kN}$
- $N_{SLS}=438.2\text{ kN}$
- $V_{ULS,x}=270.8\text{ kN}$
- $V_{ULS,y}=204.6\text{kN}$
- $r_{\max}=2.23\text{mrad}$

Για εφέδρανα και αρμούς διαστολής, εάν δεν καθορίζεται διαφορετικά από διατάξεις, το Εθνικό Προσάρτημα προτείνει μέγιστη διακύμανση ομοιόμορφων θερμοκρασιών $(\Delta T_{N,con}+ 20)^\circ\text{C}$ και $(\Delta T_{N,exp}+ 20)^\circ\text{C}$. Εάν καθορίζονται οι θερμοκρασίες κατά την περίοδο τοποθέτησης οι συνιστώμενες τιμές είναι $(\Delta T_{N,con}+ 10)^\circ\text{C}$ και $(\Delta T_{N,exp}+ 10)^\circ\text{C}$.

Συνολική επιμήκυνση λόγω θερμοκρασιακής διαστολής:

$$\Delta T_N = 45^\circ\text{C}, \text{ ίση με } \Delta l_{N,bear} = \alpha \cdot \Delta T_N \cdot L = 1.2 \cdot 10^{-5} \cdot 45 \cdot 42000 = 22.68\text{mm}$$

Bearings of fixed type series SF, horizontal load **up to 10% vertical load**.

SF
NORMAL

mark	N _{SLS}	N _{ULS}	V _{ULS}	base	upper	height	weight
	(kN)	(kN)	(kN)	øD _b (mm)	øB (mm)	H (mm)	
SF 100-10	714	1000	100	210	210	87	19
SF 200-20	1429	2000	200	280	280	101	41
SF 300-30	2143	3000	300	330	330	105	60
SF 400-40	2857	4000	400	380	380	113	86
SF 500-50	3571	5000	500	420	420	132	126
SF 600-60	4286	6000	600	460	460	140	163

Σχήμα 7-7 Χαρακτηριστικά σταθερών σφαιρικών εφεδράνων.

Bearings of unidirectional sliding type series SU, horizontal load **up to 10% Maximum vertical load**.

SU
NORMAL

N _{SLS}	N _{ULS}	V _{ULS}	mark	base	upper					height	weight	Δw/ ±50 mm
					B x L							
					/100	/200	/300	/400	/500			
(kN)	(kN)	(kN)		øD _b (mm)	± 50 mm (mm)	± 100 mm (mm)	± 150 mm (mm)	± 200 mm (mm)	± 250 mm (mm)	H (mm)	(kg)	(kg)
714	1000	100	SU 100/xxx-10	210	240x370	240x470	240x570	240x670	240x770	120	40	5
1429	2000	200	SU 200/xxx-20	280	290x410	290x510	290x610	290x710	290x810	135	67	6
2143	3000	300	SU 300/xxx-30	330	330x480	330x580	330x680	330x780	330x880	144	96	7
2857	4000	400	SU 400/xxx-40	380	380x520	380x620	380x720	380x820	380x920	147	127	8
3571	5000	500	SU 500/xxx-50	420	430x550	430x650	430x750	430x850	430x950	165	177	11
4286	6000	600	SU 600/xxx-60	460	460x590	460x690	460x790	460x890	460x990	169	211	12
5000	7000	700	SU 700/xxx-70	500	500x630	500x730	500x830	500x930	500x1030	182	273	15

Σχήμα 7-8 . Χαρακτηριστικά σφαιρικών εφεδράνων καθοδηγούμενων σε μία διεύθυνση.

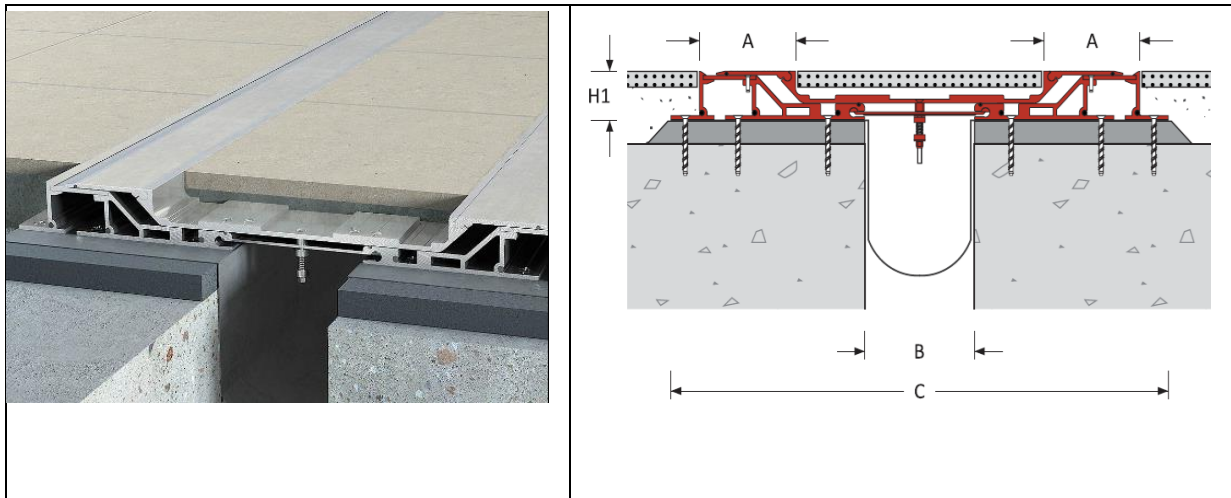
Επιλέγονται σταθερά εφέδρανα SF300-30 και SU 300/100-30 καθοδηγούμενα σε μία διεύθυνση, ώστε $N_{sd,ULS}=3000kN, N_{sd,SLS}=N_{sd,ULS}/1.4=2143kN$ και $LM=\pm 50mm$. [30]

8.4. Αρμοί

Εξαιτίας θερμοκρασιακών μεταβολών ή χρόνιων παραμορφώσεων και λοιπών οριζόντιων μετακινήσεων λόγω σεισμού ή ανέμου, η γέφυρα υπόκειται σε συστολοδιαστολές. Έτσι κατά τη διάρκεια της ζωής της αλλά και βραχυπρόθεσμα το μήκος της δεν παραμένει ίδιο αλλά μεταβάλλεται στα άκρα της, μεταξύ καταστρώματος και ακροβάθρων. Προκειμένου η γέφυρα να μετακινηθεί ανεμπόδιστα, προβλέπονται στα άκρα της αρμοί. Η μελέτη και κατασκευή τους, γίνεται σύμφωνα οδηγίες της Ευρωπαϊκής Τεχνικής Έγκρισης ETA, τηρώντας τις προδιαγραφές. Γενικά οι αρμοί διαστολής πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Να επιτρέπουν την ελεύθερη μετακίνηση των άκρων την γέφυρας
- Να εξασφαλίζουν υδατοστεγανότητα
- Να μην παράγουν θόρυβο κατά τη διέλευση
- Να είναι εύκολα αντικαταστάσιμοι
- Να έχουν επαρκή διάρκεια ζωής

Για την μέγιστη μετακίνηση που υπολογίστηκε, διαμορφώνεται κατάλληλος μεταλλικός αρμός, της εταιρείας vexcolt [31] τύπου seismatec 400-A01/A02, με επιτρεπόμενη μετακίνηση 100mm ($\pm 50\text{mm}$), ώστε σε περίπτωση σεισμού το κεντρικό τεμάχιο να ανυψώνεται και τα πλαϊνά πλαίσια να περιστρέφονται και έτσι παρέχεται ασφαλής έξοδος σε άτομα με κινητικές δυσκολίες, όπως προβλέπεται από τον Αμερικανικό νόμο Αναπήρων (American Disabilities Act).



Σχήμα 7-9 Μεταλλικός αρμός εταιρείας vexcolt τύπου seismatec 400-A01/A02

8 ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

8.1. Εισαγωγή

Μία μεταλλική κατασκευή αποτελείται από επιμέρους προκατασκευαστικά τμήματα, τα οποία μεταφέρονται στο έργο και συνδέονται μεταξύ τους. Κάθε προκατασκευασμένο τμήμα αποτελείται από επιμέρους στοιχεία, συνδεδεμένα μεταξύ τους. Με τις συνδέσεις αφενός διαμορφώνονται τα επιμέρους στοιχεία και τα προκατασκευασμένα τμήματα αλλά και αποκαθίσταται η συνέχειά τους. Οι θέσεις αποκατάστασης συνέχειας ή σύνδεσης μελών ονομάζονται κόμβοι. Οι συνδέσεις διακρίνονται σε:

- Απλές συνδέσεις, για τη μεταφορά δυνάμεων χωρίς σημαντικές ροπές
- Συνδέσεις ροπής, για μεταφορά δυνάμεων και ροπών
- Συνδέσεις πλήρους αντοχής για ροπή αντοχής μεγαλύτερη της αντίστοιχης των συνδεόμενων μελών
- Συνδέσεις μερικής αντοχής για ροπή αντοχής μικρότερη της αντίστοιχης των συνδεόμενων μελών

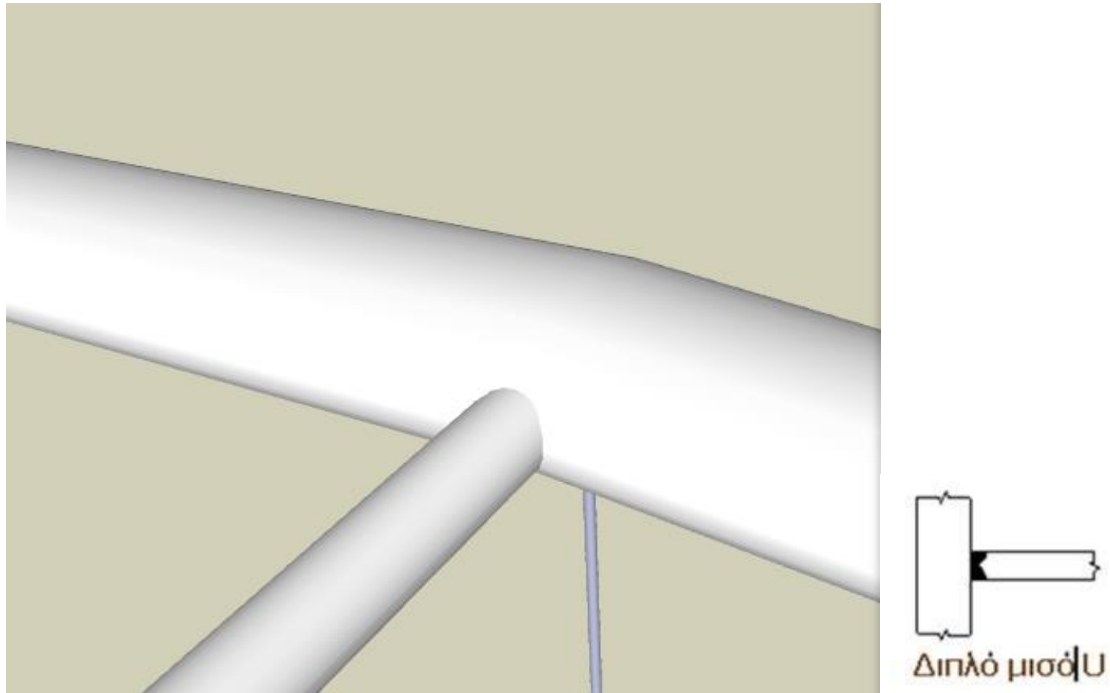
8.2. Συγκολλήσεις

Με τις συγκολλήσεις εξασφαλίζεται η μονολιθικότητα μεταξύ των συνδεόμενων τμημάτων και πραγματοποιούνται με ραφές, οι οποίες διακρίνονται σε εσωραφές, πλήρους και μερικής διείσδυσης, χωρίς να μεταφέρουν ροπές και εφελκυστικές δυνάμεις κάθετες στη διεύθυνση της ραφής, εξωραφές, ραφές πλήρωσης οπής ή σχισμής, για τη μεταφορά διατμητικών δυνάμεων προς αποφυγή τοπικού λυγισμού και ψευδο-εσωραφές. Για ελάσματα πάχους τουλάχιστον 4mm και κοιλοδοκούς 2.5mm και άνω εφαρμόζονται οι διατάξεις του EN1993-1-8, ενώ για μικρότερα πάχη ακολουθείται το πρότυπο EN1993-1-3. Η αντοχή σχεδιασμού εσωραφής πλήρους διείσδυσης πρέπει να λαμβάνεται ίση με την αντοχή σχεδιασμού του ασθενέστερου εκ των συνδεόμενων μελών, υπό προϋποθέσεις.

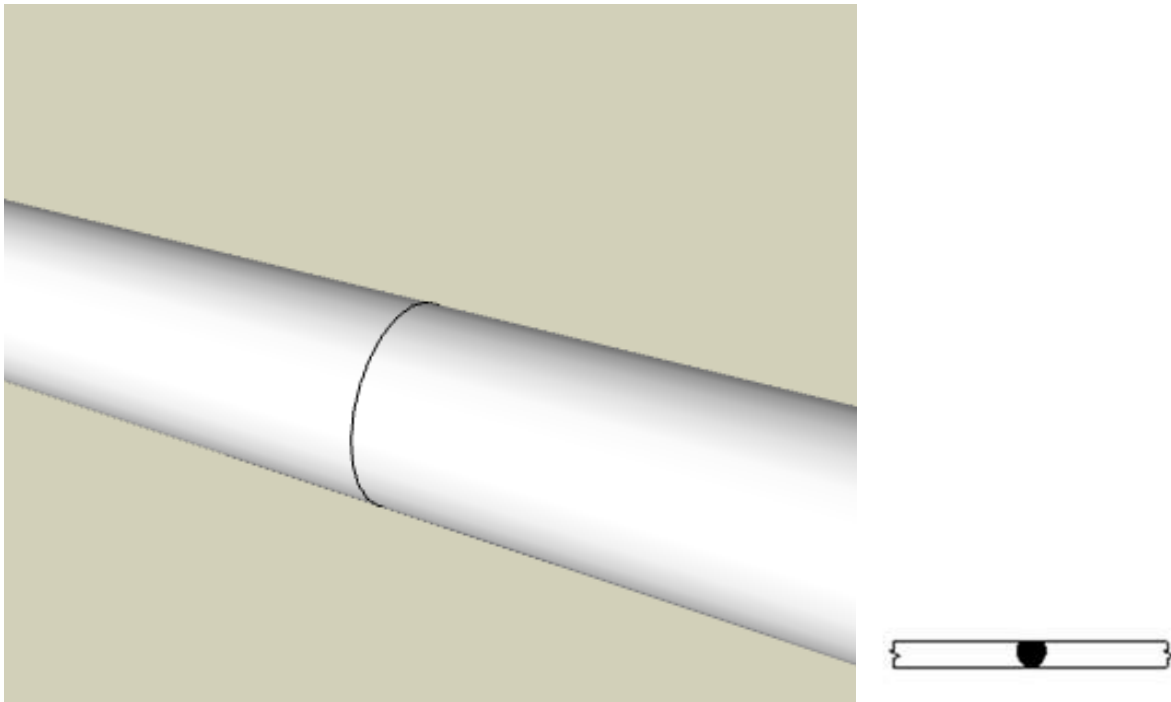
Οι έλεγχοι της συγκόλλησης προβλέπονται στην ευρωπαϊκή προδιαγραφή ΕΛΟΤ EN 719 και γίνεται από πιστοποιημένο προσωπικό. Η επιθεώρηση των συγκολλήσεων γίνεται με ΜΚΕ και συνήθως είναι:

- Οπτικός έλεγχος (ΕΛΟΤ EN 13018)
- Δοκιμή μαγνητικών σωματιδίων (ΕΛΟΤ EN 1290 έως 1291/A1)
- Δοκιμή διεισδυτικών υγρών (ΕΛΟΤ EN 571-1, 1289, 1298/A1)
- Δοκιμή υπερήχων (ΕΛΟΤ EN 1714, 1714/A1)
- Ακτινοσκόπηση με ακτίνες Χ ή γάμμα, δεν εφαρμόζεται σε εργοταξιακούς χώρους

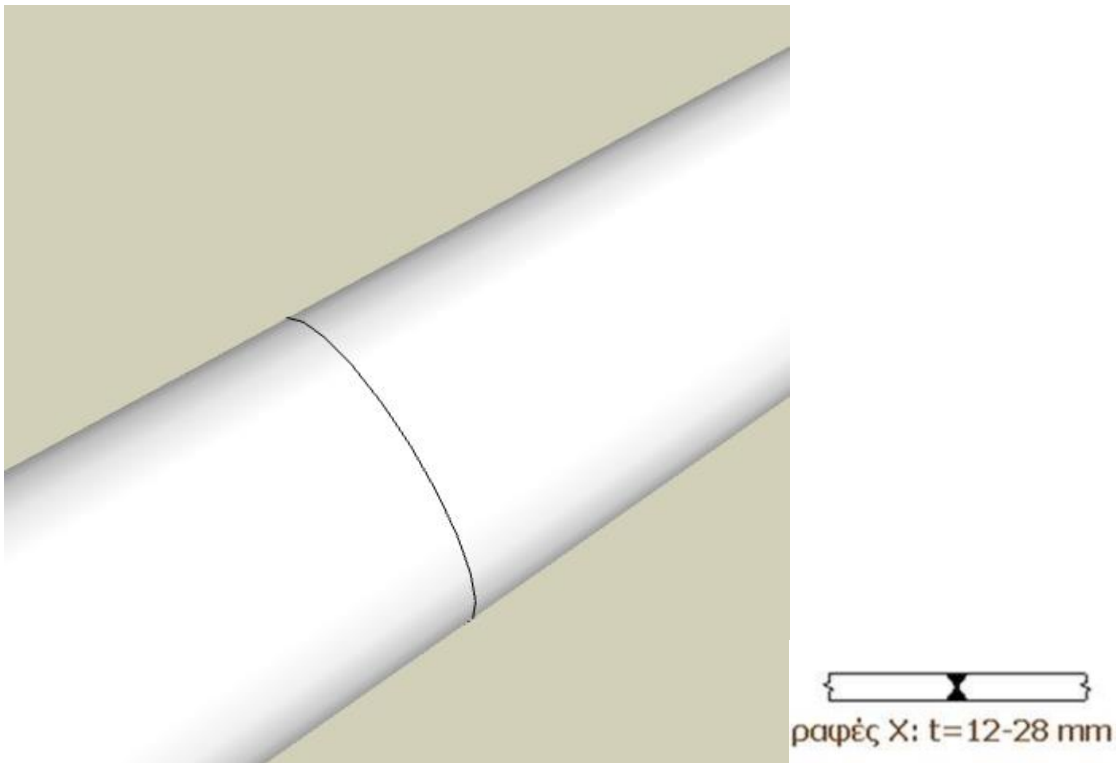
Σε κάθε μία από τις παραπάνω μεθόδους ελέγχου, αντιστοιχεί ένα μέγεθος αναγνωρίσιμου σφάλματος. Πέραν του οπτικού ελέγχου που εφαρμόζεται στα κτιριακά έργα, οι άλλοι τύποι ελέγχων εφαρμόζονται για αυξημένες απαιτήσεις επίδοσης και εργοταξιακές συγκολλήσεις. Η ΜΚΕ γίνονται τουλάχιστον 16 ώρες μετά το πέρας των εργασιών ή 40 ώρες για εσωραφές πάχους μεγαλύτερου των 40mm.



Σχήμα 8-1 Ένωση τόξων με εγκάρσιες ενώσεις με εσωραφή.



Σχήμα 8-2 Αποκατάσταση συνέχεια τόξων με εσωραφή πλήρους διείσδυσης τύπου U.



Σχήμα 8-3 Αποκατάσταση συνέχειας κύριων δοκών.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΞΩΤΗΣ ΠΕΖΟΓΕΦΥΡΑΣ ΣΤΗ ΒΟΥΛΑ

8.3. Συνδέσεις με κοχλίες

Η ποιότητα του χάλυβα κοχλιών είναι καλύτερης ποιότητας από τον χάλυβα των ελασμάτων. Σκοπός της κοχλίωσης είναι να παραλάβει διατμητική ή/και εφελκυστική δύναμη. Ανάλογα με την κατηγορία, οι κοχλιώσεις ελέγχονται ως ακολούθως:

- Κατηγορία A για απλές διατεμνόμενες
Διάτμηση κορμού
Σύνθλιψη άντυνας οπών
- Κατηγορία D για εφελκυστικούς κοχλίες
Εφελκυσμό κορμού
Διάτρηση ελάσματος

Πραγματοποιείται συνδιασμός ελέγχων για ταυτόχρονη διάτμηση και εφελκυσμό.

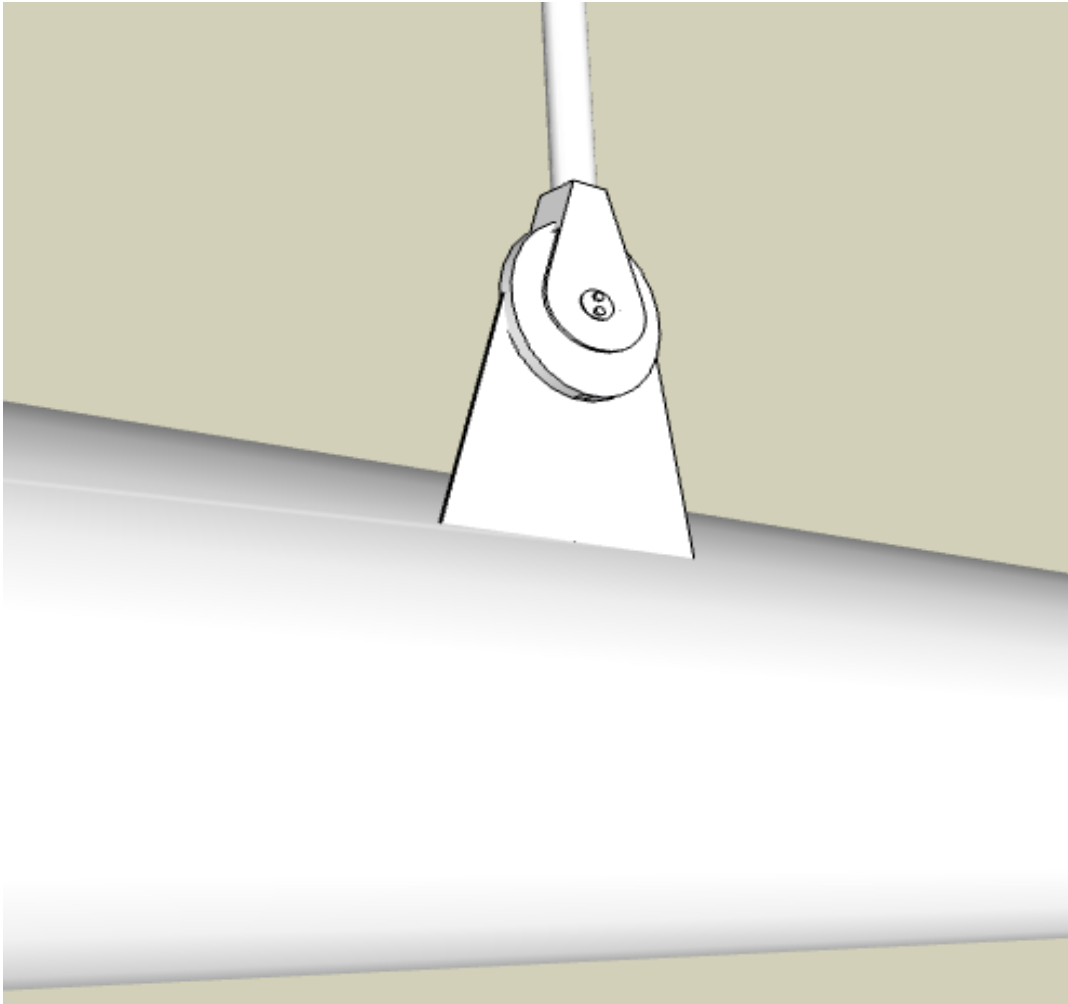
$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4F_{t,rd}} \leq 1.00$	(9 – 1)
----------------------------------------------------------------------	---------

Όπου:

- $F_{v,Ed}$ διατμητική δύναμη που ασκείται στον κοχλία
- $F_{t,Ed}$ εφελκυστική δύναμη που ασκείται στον κοχλία
- $F_{v,rd}$ διατμητική αντοχή του κοχλία
- $F_{t,rd}$ εφελκυστική αντοχή του κοχλία

Σε γέφυρες επιβάλλεται η χρήση προεντεταμένων κοχλιών, ώστε οι κοχλιωτές συνδέσεις να είναι ανθεκτικές σε ολίσθηση, αναπτύσσοντας δυνάμεις τριβής μεταξύ των ελασμάτων απαγορεύοντας έτσι τη σχετική μετακίνησή τους. Ελέγονται σε:

- Κατηγορία B σε ΟΚΛ
Ολίσθηση ελασμάτων
Διάτμηση κορμού
Σύνθλιψη άντυνας
- Κατηγορία σε ΟΚΑ
Ολίσθηση ελασμάτων
Σύνθλιψη άντυνας οπών
Διάτμηση κορμού

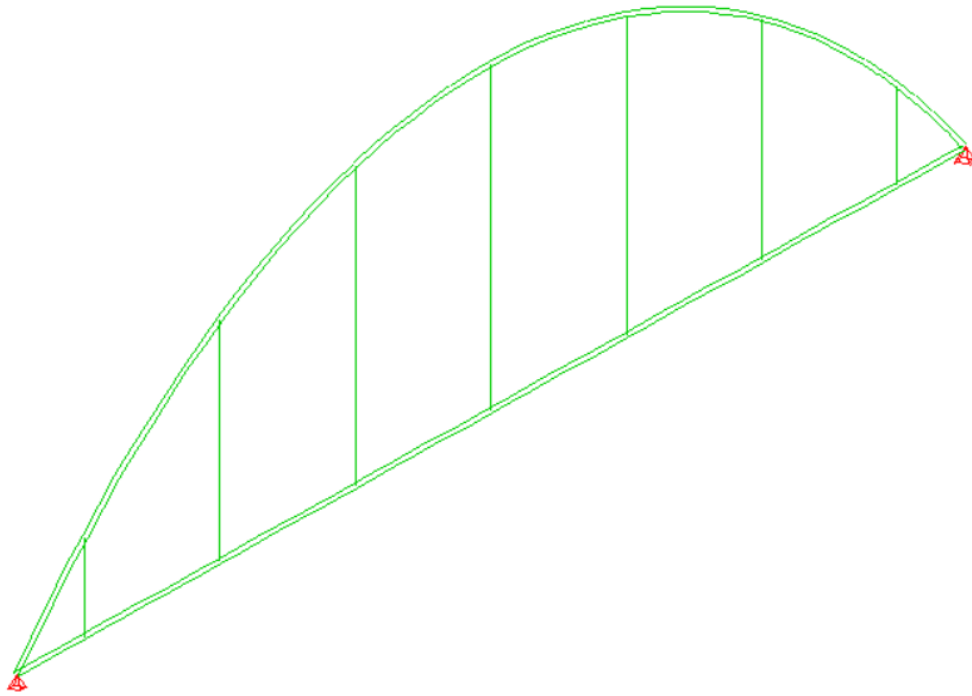


Σχήμα 8-4 Κομβοέλασμα για τη σύνδεση των αναρτήρων με τις κύριες δοκούς.

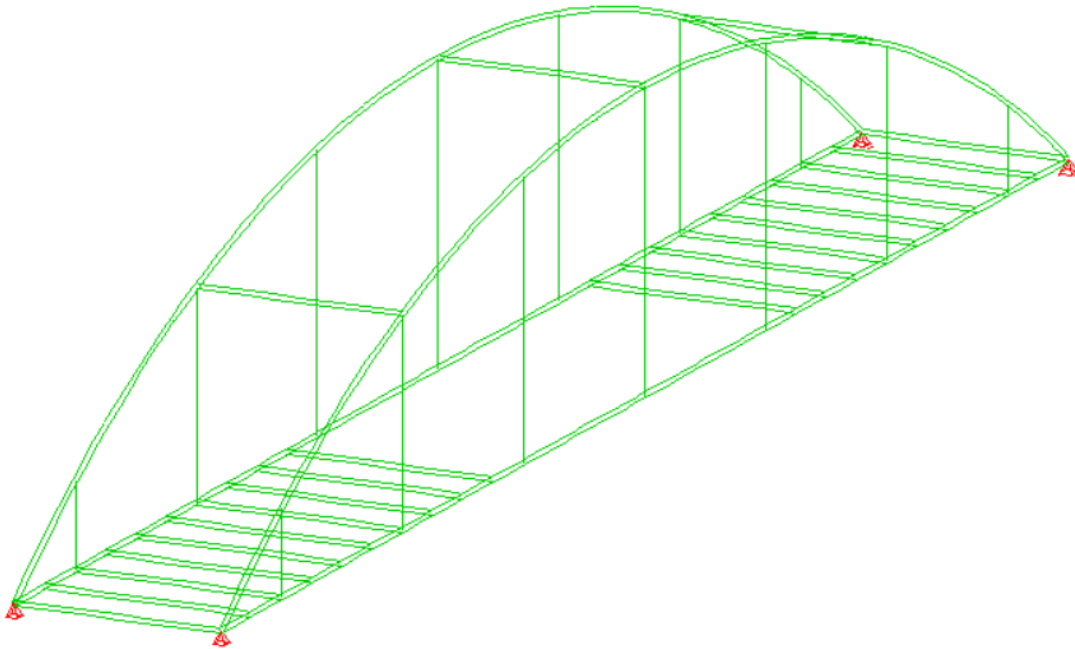
9 ΦΑΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗ

9.1. Φάσεις κατασκευής

Η κατασκευή θα γίνει σε κατάλληλα διαμορφωμένο χώρο, δίπλα από τη θέση του έργου, όπου θα μεταφερθούν τα μέλη ολόκληρά ή τμηματικά και με κατάλληλα μηχανήματα θα ανεγερθεί και θα τοποθετηθεί στις θέσεις στηρίξεων. Αρχικά διαμορφώνονται οι κύριες δοκοί, με κάθε μία να αποτελείται από τέσσερά τμήματα μέγιστου μήκους 12m, ώστε να είναι εύκολη η μεταφορά τους. Τα επιμέρους τμήματα πρέπει να συγκολληθούν μεταξύ τους, ενώ συγκρατούνται σε συγκεκριμένες θέσεις. Εν συνεχεία, κάθε ένα από τα τόξα συγκολλάται με κάθε κύρια δοκό, ώστε να τοποθετηθούν τα καλώδια, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 9-1. Στο Σχήμα 9-2. παρουσιάζονται τα δύο διαμορφωμένα τμήματα της γέφυρας με τα αντιανέμια και τις διαδοκίδες να προστίθενται σταδιακά. Ολοκληρωμένη πλέον η πεζογέφυρα, με τη βοήθεια γερανού ανεγείρεται και σταθεροποιείται στα εφέδρανα των ακροβάθρων και υπόκειται σε ελέγχους προτού τεθεί σε λειτουργία.



Σχήμα 9-1 Διαμόρφωση έκαστου τμήματος στη φάση συναρμολόγησης.



Σχήμα 9-2 Σταδιακή τοποθέτηση διαδοκίδων.

9.2. Κοστολόγηση

Η κοστολόγηση είναι ένα αριθμητικό μέγεθος, που αντιπροσωπεύει τα ποσά που επενδύθηκαν για την απόκτηση υλικών ή άυλων αγαθών και υπηρεσιών, με σκοπό τη χρησιμοποίησή τους για την πραγματοποίηση εσόδων ή κάλυψης κοινωνικών αναγκών. Για την επιτυχημένη διαχείριση του κόστους της κατασκευής, πρέπει να γίνει προγραμματισμός των πόρων, εκτίμηση και προϋπολογισμός κόστους και έλεγχος αυτού. Σκοπός είναι να γίνει εκτίμηση του κόστους για την κατάρτιση ενός προϋπολογισμού, ώστε να ολοκληρωθεί το έργο εντός χρονικών ορίων. Ο προϋπολογισμός απεικονίζει την οικονομική εξέλιξη του μεγέθους του έργου και το χρονοδιάγραμμα, αναλύοντας τις εργασίες ανά κατηγορία κόστους και χρονικό προγραμματισμό. Εφαρμόζεται η μέθοδος μοναδιαίας ποσότητας υπολογίζοντας το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ποσότητας, επί τη συνολική ποσότητα που απαιτείται από ένα στοιχείο στα πλαίσια κατασκευής του έργου. Τυχόν καταστάσεις κινδύνου αντιμετωπίζονται ως πρόσθετο ποσοστιαίο κόστος επί της κατασκευής.

A/A	Είδος εργασίας	Μονάδα	Ποσότητα	Τιμή (€)	Δαπάνη (€)
1	Δομικός χάλυβας (προμήθεια και τοποθέτηση μελών)	ton	35	5.000	175.000
2	Καλώδια (προμήθεια και τοποθέτηση/προένταση)	ton	0.24	10.000	2.400
3	Σφαιρικά Εφέδρανα fixed (προμήθεια και τοποθέτηση)	nr	2	15.000	30.000
4	Σφαιρικά εφέδρανα guided (προμήθεια και τοποθέτηση)	nr	2	25.000	50.000
5	Αρμοί (προμήθεια και τοποθέτηση)	m	5	450	2.250
6	Ξύλινο δάπεδο	m ²	210	250	52.500

Σχήμα 9-3 Κόστος υλικών κατασκευής.

10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (1999). «Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος ΙΙ». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
2. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005α). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, 2η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
3. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ., (2005β). «Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος Ι». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
4. Βάγιας Ι., Ηλιόπουλος Α., Θανάπουλος Π. (2016). «Σχεδιασμός σύμμικτων γεφυρών από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
5. Διπλωματική Εργασία: «Σχεδιασμός Μεταλλικής Δικτυωτής Πεζογέφυρας», Βασίλειος Βαρσαμογιάννης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Αθήνα 2019
6. Διπλωματική Εργασία : «Σχεδιασμός Τοξωτής Μεταλλικής Οδικής Γέφυρας με Σύμμικτο Κατάστρωμα», Χρήστος Τασιούλας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Αθήνα 2012
7. Διπλωματική Εργασία : «Μελέτη Μεταλλικής Πεζογέφυρας», Ιάσων Βαρδακούλιας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Δομοστατικής, Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Αθήνα 2012.
8. EN1337-7-2004, Ευρωκώδικας: Structural bearings, part 7 to 11, CEN,2000 to 2006
9. EN1990, Ευρωκώδικας: Βάσεις σχεδιασμού, CEN, Βρυξέλλες, Απρίλιος 2002
10. EN1991-1-1, Ευρωκώδικας 1: Γενικές δράσεις, Μέρος 1-1: Γενικές δράσεις – Πυκνότητες, ίδιον βάρος, επιβαλλόμενα φορτία σε κτήρια, CEN, Βρυξέλλες, Απρίλιος 2002.
11. EN1991-1-5, Ευρωκώδικας 1: Γενικές δράσεις, Μέρος 1-5: Γενικές δράσεις – Θερμικές Δράσεις, CEN, Βρυξέλλες, Νοέμβριος 2003.
12. EN1991-1-6, Ευρωκώδικας 1: Γενικές δράσεις, Μέρος 1-6: Γενικές δράσεις – Δράσεις κατά τη διάρκεια της Κατασκευής, CEN, Βρυξέλλες, Ιούνιος 2005.
13. EN1991-2, Ευρωκώδικας 1: Γενικές δράσεις, Μέρος 2: Φορτία κυκλοφορίας σε γέφυρες, CEN, Βρυξέλλες, Σεπτέμβριος 2003. 8.
14. EN1991-1-4, Ευρωκώδικας 1: Γενικές Δράσεις – Δράσεις ανέμου, CEN, Βρυξέλλες, Απρίλιος 2005.
15. EN1991-1-7: Ευρωκώδικας 1: Γενικές Δράσεις, Μέρος 1-7: Γενικές Δράσεις – Τυχηματικές Δράσεις, CEN, Βρυξέλλες, Ιούλιος 2006.
16. EN1993-1-1: Ευρωκώδικας 3: Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα, Μέρος 1: Γενικοί Κανόνες και Κανόνες για Κτίρια, CEN, Βρυξέλλες, Μάιος 2005.
17. EN1993-2: Ευρωκώδικας 3: Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα, Μέρος 2: Χαλύβδινες γέφυρες, CEN, Βρυξέλλες, Οκτώβριος 2006.

18. EN 1993-1-11: Ευρωκώδικας 3: Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα, Μέρος 11: Σχεδιασμός κατασκευών από εφελκυσόμενα στοιχεία, CEN, Βρυξέλλες, Οκτώβριος 2006
19. EN1998-1, Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός σχεδιασμός, Μέρος 1: Μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια, CEN, Βρυξέλλες, Δεκέμβριος 2004.
20. EN1998-2, Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός σχεδιασμός, Μέρος 2: Γέφυρες, CEN, Αύγουστος 2005
21. Footbridges, Technical guide, Setra, 2006
22. EN12385-2, European Standard: Steel wire ropes – Safety – Part 2: Definitions, designation and classification, CEN; Brussels, March 2008.
23. Vamvatsikos D., Cornell C.A. (2002). "Incremental Dynamic Analysis." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31(3), 491–514.
24. Vamvatsikos D., Cornell C.A. (2004). "Applied Incremental Dynamic Analysis." Earthquake Spectra, 20(2), 523–553.
25. Vamvatsikos D., Fragiadakis M. (2010). "Incremental Dynamic Analysis for seismic performance uncertainty estimation." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 39(2), 141–163
26. [SteelConstruction.info "Tied-arch bridges",2022](#)
27. [Pedestrian bridge at Prince's Island Park, Canada,2022](#)
28. [Wikipedia "Berkeley I-80 bridge",2022](#)
29. [Κατάλογος ξύλινου δαπέδου CTS are specialists in the Design, Manufacture and Installation of Bridges, Footbridges, Boardwalks, Lockgates and Decking.](#)
30. [Structural Bearings | FIP MEC S.r.l.](#)
31. [Vexcolt | Expansion Joints | Movement Joints | Control Joints](#)
32. [Sofistik FEA manual 2022](#)