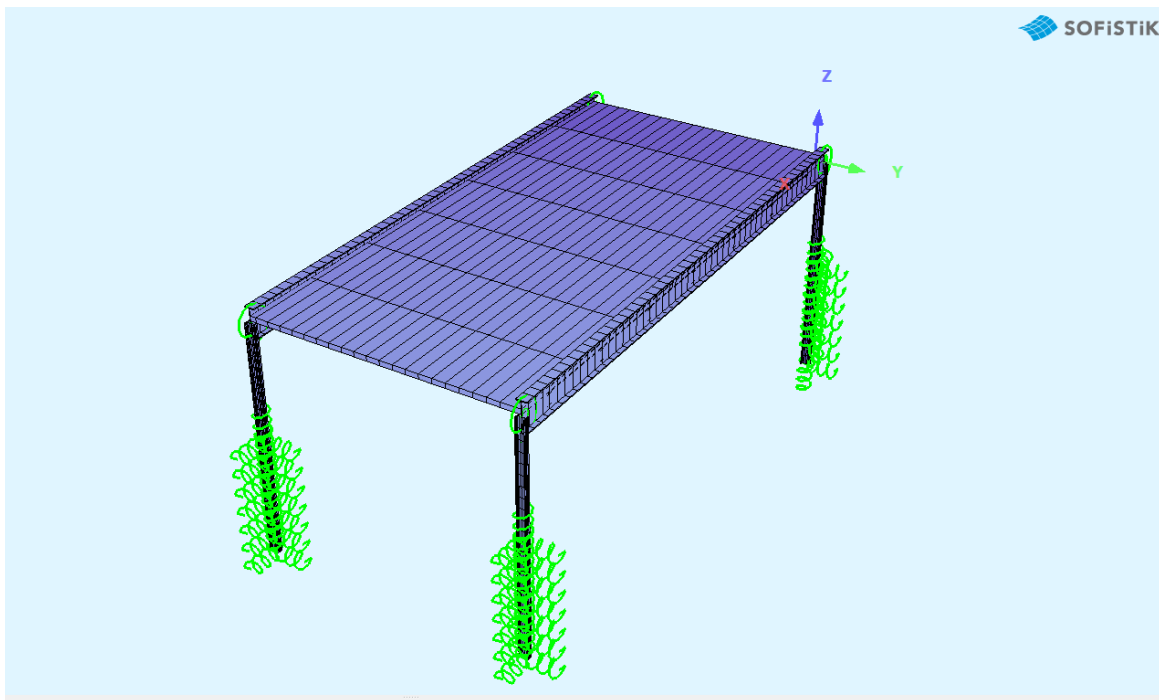




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Σχεδιασμός Οδικής Γέφυρας Ολόσωμα Συνδεδεμένης Με Τα Ακρόβαθρα



Χαράλαμπος Κουρεμένος

Επιβλέπων: Παύλος Θανόπουλος, Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2020
ΕΜΚ ΔΕ 2020 27

Copyright © Χαράλαμπος Κουρεμένος, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Charalampos Kouremenos, 2020

All Rights Reserved

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

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

Κουρεμένος Χ. Ν. (2020).
Σχεδιασμός οδικής γέφυρας ολόσωμα συνδεδεμένης με τα ακρόβαθρα
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2020 27
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,
Αθήνα.

Kouremenos C. N. (2020).
Design of a road traffic bridge with integral connection in the
abutments
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2020 27
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens,
Greece

Ευχαριστίες

Με το πέρας της διπλωματικής μου εργασίας και του συνόλου των σπουδών μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές μου για τις πολύτιμες γνώσεις που μου παρείχαν. Ένα μεγάλο ευχαριστώ θέλω να εκφράσω στον επιβλέποντα της εργασίας μου, Λέκτορα Παύλο Θανόπουλο για την καθοδήγηση του και τη μεγάλη του βοήθεια καθ' όλο το διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, καθώς και την εξειαστική επιτροπή: κ. Ιωάννη Βάγια, Καθηγητή και κ. Δημήτριο Βαμβάτσικο, Επίκουρο Καθηγητή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Σχεδιασμός οδικής γέφυρας ολόσωμα συνδεδεμένης με τα ακρόβαθρα

Κουρεμένος Χ. Ν. (Επιβλέπων: Θανόπουλος Π.)

Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η στατική ανάλυση μιας σύμμικτης γέφυρας με ολόσωμη σύνδεση στα ακρόβαθρα έτσι ώστε να λειτουργήσει ως άνω διάβαση αυτοκινητόδρομου. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζεται αρχικά η σχετική βιβλιογραφία πάνω στα θέματα των σύμμικτων και των ολόσωμων γεφυρών. Ο φορέας της γέφυρας σχεδιάστηκε στο λογισμικό CAD SOFiSTiK 2018 και πάνω του περάστηκαν τα κατάλληλα φορτία.

Σε επόμενη φάση αφού έγινε αναφορά σε σχετικές πηγές, έγινε μια προσομοίωση της αλληλεπίδρασης της κατασκευής με το έδαφος με τη χρήση ελατηρίων. Το σύστημα πασσάλου-ακρόβαθρου σχεδιάστηκε έτσι ώστε να παρουσιάζει χαμηλή ακαμψία. Το σύστημα ελέγχεται έπειτα με τους διάφορους συνδυασμούς των δράσεων σχεδιασμού για τις διαφορετικές εντατικές καταστάσεις και προκύπτουν οι τελικές διατομές. Μετά παρουσιάζεται η προτεινόμενη μέθοδος μεταφοράς και κατασκευής της γέφυρας.

Συμπεραίνεται τελικά ότι για γέφυρες μικρών ανοιγμάτων όπως η συγκεκριμένη θα ήταν πιο αποτελεσματικός ο σχεδιασμός με πασσάλους υψηλής ακαμψίας. Κλείνοντας παρατίθενται εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα.

Λέξεις κλειδιά: Ολόσωμη γέφυρα, σύμμικτη κατασκευή, ακρόβαθρα, πάσσαλοι, αλληλεπίδραση κατασκευής-εδάφους

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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2020 27

Design of a road traffic bridge with integral connection in the abutments

Kouremenos C. N. (supervised by Thanopoulos P.)

Abstract

The aim of this diploma thesis is to design and perform static analysis of a composite bridge with integral connection in the abutments to operate as a motorway crossing.

In order to complete the aforementioned task, the relevant sources on the subject of composite and integral bridges are presented. The model of the bridge was designed in CAD SOFiSTiK 2018 software and the appropriate loads were passed on it.

Furtheron, after reference was made to relevant sources, a simulation of the interaction of the structure with the surrounding soil was held, with the use of springs. The abutment-pile system was designed to show low modulus. The system is then controlled with the different load combinations for different states and the final cross-sections are obtained. Then, the proposed method of transportation and construction of the bridge is presented.

Finally, it is concluded that for short span bridges, such as this one, high modulus piles would be more effective.

In closing, suggestions are given for further research.

Keywords: integral bridge, composite construction, abutments, piles, soil – structure interaction

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Τύποι και κατηγορίες γεφυρών	11
1.2 Προβλήματα συντήρησης γεφυρών μικρού ανοίγματος	16
1.3 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί των ολόσωμων γεφυρών	17
1.4 Αντικείμενο και στόχος της εργασίας.....	19
1.5 Δομή της εργασίας	19
2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	21
2.1 Ολόσωμες γέφυρες	21
2.2 Κατηγοριοποίηση με βάση τη θεμελίωση.....	23
2.3 Θεμελίωση με πασσάλους	26
2.4 Σύμμικτη κατασκευή	28
2.5 SOFiSTiK	33
3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΟΡΕΑ.....	35
3.1 Περιγραφή.....	35
3.2 Στατική λειτουργία	37
3.3 Δομικά υλικά.....	37
3.4 Μόρφωση φορέα	39
3.5 Αλληλεπίδραση κατασκευής - εδάφους	40
3.5.1 Πάσσαλοι – έδαφος	42
3.5.2 Ακρόβαθρα – έδαφος	45
3.5.3 Επιλεχθείσα μέθοδος.....	48
4 ΔΡΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	50
4.1 Μόνιμες δράσεις	50
4.2 Μεταβλητές δράσεις	50
4.2.1 Φορτία κυκλοφορίας Q	51
4.2.2 Θερμικές δράσεις	53
4.2.3 Άνεμος W.....	56
4.3 Τυχηματικές δράσεις.....	59
4.4 Σεισμικές δράσεις	59
5 ΠΡΟΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ	63
6 ΕΛΕΓΧΟΙ.....	70
6.1 Έλεγχοι σε ΟΚΑ.....	70
6.1.1 Κύρια δοκός.....	70
6.1.2 Διαδοκίδα.....	72
6.1.3 Πάσσαλος.....	73
6.2 Έλεγχοι σε ΟΚΛ.....	75
6.2.1 Κύρια δοκός.....	76
6.2.2 Διαδοκίδα.....	77
6.2.3 Πάσσαλος.....	77
6.3 Διατμητική σύνδεση	77

6.3.1	Γενικά.....	77
6.3.2	ΟΚΑ.....	79
6.3.3	ΟΚΛ.....	81
6.4	Έλεγχοι σε κόπωση.....	82
7	ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.....	85
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	87
9	ΕΙΣΗΓΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	89
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	90

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.- Γέφυρα σε δοκούς (<i>beam bridge</i>).....	12
Σχήμα 2.- Γέφυρα με δικτύωμα (<i>truss bridge</i>).....	13
Σχήμα 3.- Τοξωτή γέφυρα (<i>arch bridge</i>) Τσακώνας.....	14
Σχήμα 4.- Καλωδιωτή γέφυρα (<i>cable stayed bridge</i>) Øresund.....	15
Σχήμα 5.- Κρεμαστή γέφυρα (<i>suspension bridge</i>) Golden gate.....	16
Σχήμα 6.- Τυπική ολόσωμη γέφυρα ενός ανοίγματος (Pak, Bigelow, & Feldman, 2017).....	22
Σχήμα 7.- Γέφυρα με τυπικό ακρόβαθρο βαρύτητας	25
Σχήμα 8.- Γέφυρα με U - ακρόβαθρο	25
Σχήμα 9.- Γέφυρα με ακρόβαθρο ανοικτού τύπου	26
Σχήμα 10.- Ολόσωμη γέφυρα με κεκλιμένα ακρόβαθρα (Feldmann, et al., 2012)	28
Σχήμα 11.- Τυπική διατομή φορέα ανωδομής σύμμικτης οδικής γέφυρας (Βάγιας, Ηλιόπουλος, & Θανόπουλος, Σχεδιασμός Σύμμικτων Γεφυρών από Χάλυβα και Οπλισμένο Σκυρόδεμα, 2016).....	29
Σχήμα 12.- Γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου (Χαρίλαος Τρικούπης)	30
Σχήμα 13.- Όψη της γέφυρας	35
Σχήμα 14.- Διατομή της γέφυρας.....	36
Σχήμα 15.- Λεπτομέρεια για διαστάσεις πεζοδρομίου και στηθαίου οχημάτων και πεζών (ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ & ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ, 2001).....	36
Σχήμα 16.- Συνολική εικόνα του προσομοιώματος	40
Σχήμα 17.- Προσομοίωση αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής σε ολόσωμη γέφυρα με πέδιλα (αριστερά) και πασσάλους (δεξιά) (Masrilayanti, 2013)	41
Σχήμα 18.- Σύνδεση με τη μέθοδο INTAB (<i>INTegral Abutment Bridge</i>) (Feldmann, et al., 2012)	43
Σχήμα 19.- Οι δύο μέθοδοι εφαρμογής ελατηρίων σε πασσάλους θεμελίωσης (Feldmann, et al., 2012)	45
Σχήμα 20.- Ολόσωμο ακρόβαθρο πλήρους ύψους με μονή σειρά πασσάλων (Rhodes).....	46
Σχήμα 21.- Μέθοδος οπλισμένης γης	48
Σχήμα 22.- Ανάλυση θερμοκρασιακού προφίλ σε 4 συνιστώσες: ΔT_N , ΔT_{MY} , ΔT_{MZ} και ΔT_E	54
Σχήμα 23.- Σχέση μεταξύ $T_{e,min}$, $T_{e,max}$ και T_{min} , T_{max}	55
Σχήμα 24.- Συντελεστής δύναμης $c_{fx,0}$ για γέφυρες.....	59
Σχήμα 25.- 1 ^η ιδιομορφή.....	61
Σχήμα 26.- 2 ^η ιδιομορφή.....	62
Σχήμα 27.- Γραμμή επιρροής της ροπής στο άνοιγμα	65
Σχήμα 28.- Γραμμή επιρροής της ροπής στο άνοιγμα για Q_{UDL}	65
Σχήμα 29.- Γραμμή επιρροής της ροπής στο άνοιγμα για Q_{TS}	66
Σχήμα 30.- Γραμμή επιρροής της τέμνουσας στην στήριξη για Q_{UDL}	66
Σχήμα 31.- Γραμμή επιρροής της τέμνουσας στην στήριξη για Q_{TS}	67
Σχήμα 32.- Διατομή σύμμικτης διαδοκίδας.....	68
Σχήμα 33.- Διατομή κύριας δοκού.....	71

Ευρετήριο Πινάκων

<i>Πίνακας 1.- Χαρακτηριστικές τιμές σκυροδέματος ποιότητας C30/37</i>	<i>38</i>
<i>Πίνακας 2.- Ιδιότητες δομικού χάλυβα για έλαση εν θερμώ (EN 1993-1-1 3.2.3, Πιν. 3.1).....</i>	<i>38</i>
<i>Πίνακας 3.- Μόνιμες δράσεις</i>	<i>50</i>
<i>Πίνακας 4.- Μεταβλητές δράσεις.....</i>	<i>50</i>
<i>Πίνακας 5.- Αριθμός και πλάτος ονομαστικών λωρίδων (Βάγιας, Ηλιόπουλος, & Θανόπουλος, Σχεδιασμός Σύμμικτων Γεφυρών από Χάλυβα και Οπλισμένο Σκυρόδεμα, 2016).....</i>	<i>51</i>
<i>Πίνακας 6.- Πρότυπη φόρτιση 1 (LM1) (Βάγιας, Ηλιόπουλος, & Θανόπουλος, Σχεδιασμός Σύμμικτων Γεφυρών από Χάλυβα και Οπλισμένο Σκυρόδεμα, 2016).....</i>	<i>52</i>
<i>Πίνακας 7.- Κατηγορίες εδαφών για φόρτιση ανέμου</i>	<i>57</i>
<i>Πίνακας 8.- Χαρακτηριστικά διατομής κύριας δοκού.....</i>	<i>71</i>
<i>Πίνακας 9.- Διαστάσεις του οχήματος κόπωσης της πρότυπης φόρτισης 3 (FLM3) (Βάγιας, Ηλιόπουλος, & Θανόπουλος, Σχεδιασμός Σύμμικτων Γεφυρών από Χάλυβα και Οπλισμένο Σκυρόδεμα, 2016).....</i>	<i>83</i>

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Τύποι και κατηγορίες γεφυρών

Η **γέφυρα** είναι μία αρχιτεκτονική ή τεχνική κατασκευή με την οποία επιτυγχάνεται ζεύξη δύο ή περισσότερων σημείων υπεράνω μεσολαβούντος εμποδίου (φυσικού ή τεχνικού) (Wikipedia, n.d.). Τα συνήθη εμπόδια που γεφυρώνονται είναι εδαφικές κοιλότητες, υδάτινες επιφάνειες, άξονες κυκλοφορίας, κ.τ.λ. Από την αρχαιότητα ο άνθρωπος θέλησε να βρει τρόπους να υπερπηδήσει τα εμπόδια στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον του. Διαχρονικά θεωρούνται από τις πλέον εντυπωσιακές ανθρώπινες κατασκευές και χρησιμοποιούν τις πλέον σύγχρονες τεχνολογίες που έχουν να επιδείξουν η επιστήμη του πολιτικού μηχανικού και η επιστήμη των υλικών. Από απλές γέφυρες από κορμούς δέντρων, περάσαμε σε περίτεχνες λίθινες και πλίνθινες τοξωτές γέφυρες, πολλές εκ των οποίων έχουν αντέξει στο πέρασμα των αιώνων, και τελικά μετά τη βιομηχανική επανάσταση και την ευρεία διαθεσιμότητα του χάλυβα φτάσαμε στη σημερινή εποχή της μικτής χρήσης σκυροδέματος και χάλυβα στη γεφυροποιία. Ο συνδυασμός αυτών των δύο υλικών έχει φέρει επανάσταση στον τομέα και έχει επιτρέψει την ζεύξη πολύ μεγαλύτερων ανοιγμάτων.

Οι σύγχρονες γέφυρες κατηγοριοποιούνται σε 5 βασικές κατηγορίες με βάση τη στατική τους λειτουργία. Αυτές είναι οι δοκιδωτής μορφής, οι μορφής δικτυώματος, οι αψιδωτές, οι καλωδιωτές και οι κρεμαστές γέφυρες:

Η δοκιδωτή γέφυρα (beam bridge) είναι ένας από τους απλούστερους τύπους γεφυρών. Εξαιρετικό παράδειγμα η βασική γέφυρα η φτιαγμένη από κορμούς δέντρων. Αποτελείται από μια οριζόντια δοκό που στηρίζεται σε κάθε άκρο σε ένα βάθρο. Το βάρος της δοκού μεταφέρεται προς τα κάτω (στηρίζεται) στις στηρίξεις. Όσο περισσότερο απέχουν οι στηρίξεις μεταξύ τους, τόσο αυξάνουν οι ροπές, κάτι που απαιτεί όλο και μεγαλύτερες διατομές. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο

οι γέφυρες δοκών (beam bridges) σπανίως υπερβαίνουν τα 80 μέτρα ανά άνοιγμα.



Σχήμα 1.- Γέφυρα σε δοκούς (beam bridge)

Η γέφυρα με δικτύωμα υπάρχει εδώ και αιώνες και είναι μια φέρουσα δομή που ενσωματώνει ένα στήριγμα σε έναν πολύ αποτελεσματικό αλλά πολύ απλό σχεδιασμό. Υπάρχουν μια σειρά από διαφορετικές παραλλαγές της, αλλά όλες περιλαμβάνουν τριγωνικά τμήματα. Αυτά τα τμήματα είναι μια σειρά από ευθείες, καλύβδινες ράβδους. Ο ρόλος αυτών των τριγωνικών στοιχείων είναι σημαντικός επειδή παραλαμβάνουν αποτελεσματικά την θλίψη και τον εφελκυσμό για να δημιουργήσουν μια τεταμένη κατασκευή ικανή να παραλάβει δυναμικά φορτία. Αυτό το μίγμα θλίψης και εφελκυσμού εξασφαλίζει τη διατήρηση της δομής της γέφυρας και το κατάστρωμα δεν κινδυνεύει ακόμη και σε περίπτωση σχετικά ισχυρών ανέμων.



Σχήμα 2.- Γέφυρα με δικτύωμα (truss bridge)

Οι τοξωτές γέφυρες βασίζονται σε μια πολύ απλή ιδέα αλλά πολύ αποτελεσματική: το φορτίο που ασκείται πάνω σε ένα τόξο θα μεταφερθεί μέσω θλίψης δια του τόξου στο υποκείμενο έδαφος στο οποίο θεμελιώνεται. Γι' αυτό το λόγο υπάρχουν εδώ και χιλιάδες χρόνια, από τα ρωμαϊκά χρόνια. Τότε χτιζονταν με πέτρες, ενώ τώρα είναι κατασκευασμένες από χάλυβα και σκυρόδεμα και μπορούν να καλύπτουν ανοίγματα και πάνω από 500 μέτρα.

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι τοξωτών γεφυρών αλλά όλες έχουν κάποια βασικά κοινά στοιχεία. Κάθε γέφυρα έχει ακρόβαθρα (abutments), τα οποία χρησιμοποιούνται για τη στήριξη της καμπύλης δομής του τόξου. Ο πιο κοινός τύπος τοξωτής γέφυρας ανά τα χρόνια είναι μια μεγάλου μήκους γέφυρα που αποτελείται από πολλές αψίδες. Η πλευρική πίεση που δημιουργείται από το άνοιγμα της αψίδας μεταφέρεται στα ακρόβαθρα (abutments). Είναι επομένως απαραίτητο αυτά τα μέρη της γέφυρας να παραμένουν συμπαγή, άθικτα και καλά θεμελιωμένα.. Μπορεί να μεταφέρει τα πάντα, από πεζούς έως

σιδηροδρόμους. Τέλος σε μικρά ανοίγματα, ειδικά για πεζογέφυρες πάνω από μεγάλους οδικούς άξονες, ενδείκνυται για προκατασκευή και μεταφορά σε ένα ενιαίο τμήμα του καταστρώματος μειώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο δραστικά τους χρόνους κατασκευής.



Σχήμα 3.- Τοξωτή γέφυρα (arch bridge) Τσακώνας

Η καλωδιωτή γέφυρα βασίζεται σε πύργους / πυλώνες οι οποίοι είναι το φέρον στοιχείο της κατασκευής. Καλώδια συνδέουν τους πυλώνες με το κατάστρωμα από κάτω. Είτε κατευθύνονται από την κορυφή των πύργων είτε από διαφορετικά σημεία καθ' ύψος της στήλης. Όταν συνδέονται σε διαφορετικά σημεία της στήλης, δημιουργείται ένα μοτίβο ανεμιστήρα. Αυτό είναι το χαρακτηριστικό που δημιουργεί την κλασική εικόνα των γεφυρών αυτών. Έτσι το κατάστρωμα ουσιαστικά αναρτάται από τους πύργους.

Αυτός ο τύπος κατασκευής τείνει να χρησιμοποιείται για ζεύξη αποστάσεων μεγαλύτερων από εκείνες που επιτυγχάνονται με τις

προαναφερθείσες μεθόδους αλλά μικρότερων από ότι με μια καλωδιωτή γέφυρα. Ένα από τα κύρια ζητήματα αυτού του τύπου γέφυρας είναι ότι η κεντρική σύνδεση των καλωδίων μπορεί να ασκήσει οριζόντια πίεση στο κατάστρωμα. Επομένως, η κατασκευή του καταστρώματος πρέπει να ενισχυθεί για να αντέξει αυτές τις οριζόντιες πιέσεις και να μην εμφανίσει προβλήματα λυγισμού.



Σχήμα 4.- Καλωδιωτή γέφυρα (cable stayed bridge) Øresund

Η δομή μιας στερεοτυπικής κρεμαστής γέφυρας (suspension bridge) φαίνεται πολύ απλή αλλά ο σχεδιασμός είναι εξαιρετικά αποτελεσματικός. Το κατάστρωμα της γέφυρας είναι το φέρον στοιχείο της κατασκευής. Αυτό συγκρατείται στη θέση του από κάθετες αναρτήσεις που στηρίζουν τα καλώδια. Τα καλώδια ανάρτησης εκτείνονται πέρα από κάθε πλευρά της γέφυρας και αγκιστρώνονται σταθερά στο έδαφος. Εξαρτάται από το μέγεθος της γέφυρας, αλλά χρειάζεται η εγκατάσταση αρκετών πύργων για να στηρίξουν τα καλώδια ανάρτησης. Κάθε φορτίο που εφαρμόζεται στη γέφυρα μετατρέπεται σε εφελκυσμό στα καλώδια

ανάρτησης που αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της κατασκευής. Δεδομένου ότι υπάρχει κάποιος τζόγος (“give”) στα καλώδια ανάρτησης, αυτό μπορεί να μεταφραστεί σε ελαφρά, αλλά μετρούμενη, κίνηση της γέφυρας σε δύσκολες καιρικές συνθήκες.

Οι κρεμαστές γέφυρες μπορούν να γεφυρώσουν κενά μέχρι και 2000 μέτρα, πολύ μεγαλύτερα από κάθε άλλο είδος γέφυρας. Οι περισσότερες κρεμαστές γέφυρες έχουν και ένα σύστημα δικτυώματος κάτω από το κατάστρωμα για να αντιστέκονται σε κάμψη και στρέψη.



Σχήμα 5.- Κρεμαστή γέφυρα (suspension bridge) Golden gate

1.2 Προβλήματα συντήρησης γεφυρών μικρού ανοίγματος

Η συντριπτική πλειοψηφία των γεφυρών στη χώρα μας, συμπεριλαμβανομένων των γεφυρών μικρών ανοιγμάτων, περιέχουν κάποιου είδους αρμό διαστολής στα άκρα τους. Επίσης ικανός αριθμός αυτών στηρίζεται σε ελαστομεταλλικά εφέδρανα είτε μόνο στα ακρόβαθρα

είτε και στα ακρόβαθρα και στα μεσόβαθρα. Αυτά τα κατασκευαστικά στοιχεία φθείρονται πολύ πιο γρήγορα από την υπόλοιπη κατασκευή. Παράλληλα αποτελούν ένα κρίσιμο τμήμα της ασφαλούς λειτουργίας της γέφυρας. Επομένως πρέπει να ελέγχονται και να αντικαθίστανται συχνά.

Η απουσία εθνικού μητρώου υποδομών, μέχρι και τη στιγμή που γραφόταν το παρόν, που να καταγράφει πλήρως την κατάσταση των πολυάριθμων γεφυρών τέτοιου είδους στη χώρα μας, δυσχεραίνει έτι περαιτέρω την προσπάθεια συντήρησής τους.

Ακόμα όμως και η δημιουργία του μητρώου δεν αποτελεί πανάκεια για το θέμα συντήρησης των, βάσει υπολογισμών, περίπου 6000 γεφυρών άνω των 6 μέτρων στη χώρα μας. Ένα πολύ μεγάλο ποσοστό αυτών χρήζει άμεσων επισκευών.

1.3 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί των ολόσωμων γεφυρών

Τα **πλεονεκτήματα** των ολόσωμων γεφυρών έναντι των απλών γεφυρών είναι τα εξής:

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των ολόσωμων γεφυρών είναι ότι ελαχιστοποιείται η χρήση αρμών διαστολής και εφεδράνων τα οποία είναι πολύ ακριβά και μπορούν να αυξήσουν το αρχικό κόστος κατασκευής.

Επίσης, οι ολόσωμες γέφυρες, σε αντίθεση με τις συμβατικές γέφυρες, δεν απαιτούν συντήρηση ανά τακτά χρονικά διαστήματα με προφανή οικονομικά οφέλη στη διάρκεια ζωής της γέφυρας. Τα ελαστομερή ρουλεμάν μπορούν να σχιστούν και να σπάσουν λόγω απρόβλεπτων κινήσεων, ή να μετακινηθούν από τη θέση τους λόγω πρόσκρουσης, κάτι που είναι ένα σύνηθες πρόβλημα στις συμβατικές γέφυρες. Επίσης, πιθανή δυσλειτουργία των εφεδράνων θα οδηγούσε σε απότομη αστοχία της κατασκευής.

Δεδομένου ότι το κατάστρωμα και τα βάθρα είναι μονολιθικά χυτευμένα, η μέθοδος της ολόσωμης κατασκευής οδηγεί σε μειωμένους χρόνους κατασκευής.

Η ολόσωμη σύνδεση στα ακρόβαθρα οδηγεί στη δημιουργία υπερστατικού συστήματος κάτι που μειώνει τη ροπή στο άνοιγμα και επιτρέπει το σχεδιασμό λεπτότερων διατομών που είναι και από οικονομικής και από αισθητικής πλευράς προτιμητέες.

Τέλος, η ποιότητα κύλισης των οχημάτων πάνω σε μια ολόσωμη γέφυρα είναι αισθητά βελτιωμένη καθώς δεν υπάρχουν αρμοί διαστολής.

Ακολουθούν ορισμένοι **περιορισμοί** που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό ολόσωμων γεφυρών:

Οι ολόσωμες γέφυρες δεν είναι κατάλληλες σε ζώνες όπου υπάρχει πιθανότητα διαστολής/συστολής άνω των 50 mm κατά τη διάρκεια διακυμάνσεων της θερμοκρασίας.

Δεν προτιμώνται όταν το υπέδαφος ή τα επικώματα είναι χαμηλής αντοχής.

Η γεωμετρία της γέφυρας και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή παίζουν βασικό ρόλο στην περίπτωση των ολόσωμων γεφυρών. Είναι υπεύθυνα για τις μετατοπίσεις που θα εμφανιστούν στην γέφυρα.

Υπάρχει μια πιθανότητα σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στους πασσάλους λόγω των μεγάλων δυνάμεων που δημιουργούνται από τη διαστολή και τη συστολή του φορέα. Αυτές οι εντάσεις οδηγούν σε μείωση της αξονικής φέρουσας ικανότητας των πασσάλων. Τα θεμέλια θα πρέπει να σχεδιαστούν λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω.

Τα ολόσωμα συνδεδεμένα ακρόβαθρα κρίνονται γενικά κατάλληλα για γέφυρες μήκους έως 40 m για γέφυρες χαλύβδινων δοκών, και μέχρι 50 m για γέφυρες δοκών από σκυρόδεμα.

Αν υπάρχει καμπυλότητα στην οριζοντιογραφική χάραξη της γέφυρας ή αυτή είναι λοξή ως προς τον πτερυγότοικο, η ώθηση των γαιών ενδέχεται να στρίψει το κατάστρωμα στο οριζόντιο επίπεδο. Για αυτό στις ολόσωμες γέφυρες οι γωνίες λοξότητας περιορίζονται κάτω των 30° και οι καμπυλόγραμμες χαράξεις αποφεύγονται.

1.4 Αντικείμενο και στόχος της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η καταγραφή και ανάλυση των διαθέσιμων μελετών πάνω στο θέμα της ολόσωμης σύνδεσης μιας γέφυρας με τα ακρόβαθρα της, έτσι ώστε εν συνεχεία να σχεδιαστεί μια σύμμικτη οδική γέφυρα με ολόσωμη σύνδεση στα ακρόβαθρα.

Η γέφυρα αυτή θα πρέπει επίσης να πληρεί ορισμένες προϋποθέσεις κυκλοφοριακού φόρτου. Στα πλαίσια της ανωτέρω διερεύνησης ο φορέας που τελικά επελέγη καταπονήθηκε υπό κάποιες δράσεις σχεδιασμού και προέκυψαν οι τελικές διατομές.

Ο στόχος της είναι η καταγραφή των βημάτων υπολογισμού μιας τυπικής οδικής σύμμικτης γέφυρας με ολόσωμη σύνδεση στα ακρόβαθρα της και παράλληλα ο υπολογισμός του συγκεκριμένου παραδείγματος.

1.5 Δομή της εργασίας

Η διπλωματική εργασία είναι διαρθρωμένη σε κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγική ανάλυση του διερευνώμενου θέματος και συγκεκριμένα αναφέρονται το αντικείμενο και ο στόχος της εργασίας και το παρόν υποκεφάλαιο που αφορά στη διάρθρωση της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο (Βιβλιογραφική Ανασκόπηση) παρουσιάζονται οι ολόσωμες γέφυρες στις διάφορες εκδοχές τους και καταγράφονται οι διαφορετικοί τρόποι θεμελίωσης. Στη συνέχεια αναλύονται ορισμένες τεχνολογίες που αξιοποιούνται στην υπό ανάλυση γέφυρα, όπως η σύμμικτη κατασκευή, η θεμελίωση με πασσάλους και το πρόγραμμα στατικής ανάλυσης και σχεδιασμού SOFiSTiK.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αρχικά ο φορέας της γέφυρας, η στατική του λειτουργία και τα δομικά υλικά που θα χρησιμοποιηθούν. Ύστερα επιχειρείται η δημιουργία του στατικού προσομοιώματος της κατασκευής, καθώς και η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης της κατασκευής με το έδαφος.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει τις δράσεις σχεδιασμού και τους συνδυασμούς τους που θα εφαρμοστούν στον τελικό έλεγχο της κατασκευής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μια πρώτη διαστασιολόγηση της διαδοκίδας με βάση τα φορτία που ενεργούν πάνω της.

Το έκτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην ανάλυση των διαφόρων ελέγχων που γίνονται στη γέφυρα για να βεβαιωθεί η επάρκεια της.

Στο έβδομο παρουσιάζεται η προτεινόμενη μέθοδος κατασκευής.

Τέλος παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν μέσα από αυτήν την εργασία, οι εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Μετά από έρευνα στο αντικείμενο βρέθηκε ότι οι βιβλιογραφικές αναφορές ελληνικών πηγών στο θέμα είναι από ελάχιστες έως ανύπαρκτες. Η βιβλιογραφία προέρχεται από τις χώρες της Γερμανίας, του Ηνωμένου Βασιλείου, των ΗΠΑ και του Καναδά. Επίσης μεμονωμένα άρθρα έχουν δημοσιευθεί από Ινδούς και Κινέζους ακαδημαϊκούς. Ως εκ τούτου μετά από μελέτη της ξένης βιβλιογραφίας, επιχειρείται σε αυτό το κεφάλαιο η συνοπτική παρουσίαση των ολόσωμων γεφυρών και των συναφών τεχνολογιών που αξιοποιήθηκαν για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

2.1 Ολόσωμες γέφυρες

Στην ελληνική βιβλιογραφία εντοπίζονται δύο αποδόσεις του integral bridge, όπως είναι ο αγγλικός της όρος. Αυτές είναι η «ολόσωμη» γέφυρα και η «ενσωματωμένη». Σε αυτήν την εργασία υιοθετείται η πρώτη ονομασία.

Όπως υποδηλώνει το ίδιο το όνομα, περιγράφεται μια μονολιθική κατασκευή χωρίς επιμέρους ξεχωριστά τμήματα και μπορεί να οριστεί ως «μια γέφυρα χωρίς αρθρώσεις διαστολής ή εφέδρανα και όπου το κατάστρωμα είναι συνεχές σε όλο το μήκος της γέφυρας». Οι ολόσωμες γέφυρες αναφέρονται επίσης ως γέφυρες με ολόσωμη σύνδεση στα ακρόβαθρα, γέφυρες με λιγότερες συνδέσεις, και γέφυρες άκαμπτων πλαισίων.

Η έννοια της ολόσωμης γέφυρας είναι βασισμένη στη θεωρία ότι λόγω της απουσίας εφεδράνων που περιορίζουν τη μετακίνηση του καταστρώματος, είναι πιθανό να αναπτυχθούν δυνάμεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών. Και αυτές οι δυνάμεις μεταφέρονται στην υποκατασκευή μέσω μιας άκαμπτης σύνδεσης μεταξύ της υπερκατασκευής και της υποκατασκευής. Στις ολόσωμες γέφυρες πέρα από τα δυναμικά φορτία, θα πρέπει να δίνεται εξίσου μεγάλη σημασία και στα θερμικά φορτία λόγω των περιορισμών στην μετατόπιση του καταστρώματος της γέφυρας.

Η μέθοδος της ολόσωμης σύνδεσης έχει αποδειχθεί οικονομική στην αρχική κατασκευή για ένα ευρύ φάσμα μηκών καθώς επίσης και τεχνικά επιτυχής στην εξάλειψη των προβλημάτων λόγω των αρμών διαστολής και των εφεδράνων. Από την άλλη είναι ευαίσθητη σε διάφορα προβλήματα που αποδεικνύονται γεωτεχνικής φύσης. Αυτά οφείλονται ενδεχομένως σε έναν σύνθετο μηχανισμό αλληλεπίδρασης με τη δομή του εδάφους που περιλαμβάνει τη σχετική μετακίνηση μεταξύ των πυλώνων της γέφυρας και του τριγύρω τους εδάφους.



Σχήμα 6.- Τυπική ολόσωμη γέφυρα ενός ανοίγματος (Pak, Bigelow, & Feldman, 2017)

Σε αυτήν την εργασία, η ολόσωμη γέφυρα, που είναι μια σύμμικτη πλάκα δοκών από χάλυβα και καταστρώματος από σκυρόδεμα, αναπτύσσεται για να μελετηθεί με τη χρήση του κατάλληλου λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων.

Η ανάλυση μιας ολόσωμης γέφυρας διαφέρει από εκείνη άλλων γεφυρών καθώς τα βάθρα είναι άκαμπτα συνδεδεμένα με την υπερκατασκευή. Οι οριζόντιες δυνάμεις και μετακινήσεις μεταφέρονται από την υπερκατασκευή στα βάθρα και έπειτα στους πασσάλους θεμελίωσης. Ως εκ τούτου, οι πάσσαλοι, που αλληλεπιδρούν με το υπέδαφος, δεν φορτίζονται μόνο από κάθετες δυνάμεις, αλλά και από διάτμηση και κάμψη όπως και επιβαλλόμενες μετακινήσεις και στροφές. Επιπλέον, τα βάθρα αλληλεπιδρούν με την εδαφοπλήρωση, προκαλώντας έναν πρόσθετο περιορισμό στην κατασκευή.

Οι συστολές και οι διαστολές που στις απλές γέφυρες παραλαμβάνονται από τα ακρόβαθρα και τους αρμούς διαστολής, στην περίπτωση των ολόσωμων γεφυρών οδηγούν στην επιβολή κυκλικών οριζόντιων φορτίων στα ακρόβαθρα. Αυτό με τη σειρά του αυξάνει σημαντικά την αλληλεπίδραση της κατασκευής με το έδαφος και μπορεί να επιφέρει υπέρμετρες εδαφικές πιέσεις πίσω από τα ακρόβαθρα καθώς και πιθανή αστοχία του εδάφους και της κατασκευής.

2.2 Κατηγοριοποίηση με βάση τη θεμελίωση

Το ακρόβαθρο της γέφυρας ανήκει σε ένα σύστημα στήριξης. Ο σκοπός του ακρόβαθρου είναι να καταναίμει το βάρος της υπερκατασκευής στα θεμέλια και παράλληλα να συνδέσει το κατάστρωμα με ένα επίχωμα.

Τα ακρόβαθρα των γεφυρών συνδέουν το κατάστρωμα, ή την επιφάνεια της γέφυρας, στο έδαφος και επιτρέπουν την υποστήριξη του βάρους της, τόσο στην οριζόντια όσο και στην κάθετη κατεύθυνση. Σε μικρού μήκους γέφυρες, το ακρόβαθρο που βρίσκεται σε κάθε άκρο της συνδέεται με το επίχωμα, μερικές φορές μαζί με ένα τείχος συγκράτησης. Μακρύτερες γέφυρες αποτελούνται από πρόσθετα βάθρα που τοποθετούνται κατά μήκος της γέφυρας για να παρέχουν την απαραίτητη στήριξη σε ομοιόμορφα διαστήματα και τα οποία καλούνται μεσόβαθρα. Παρέχουν στήριξη στην κάθετη κατεύθυνση. Η επιλογή του ακρόβαθρου βασίζεται στο χώρο του έργου, τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της τοποθεσίας της γέφυρας και τον προϋπολογισμό του έργου.

Τμήματα ακρόβαθρου:

Τράπεζα έδρασης: Αυτό το οριζόντιο ράφι παρέχει στήριγμα στο κατάστρωμα της γέφυρας και βρίσκεται δίπλα ή στην κορυφή ενός ακρόβαθρου. Αν υπάρχει επίχωμα, αυτή θα το συγκρατήσει στη θέση του.

Πτερυγότοιχοι: Αυτοί βρίσκονται σε ακρόβαθρα που συνδέονται με το επίχωμα. Είναι είδος κοντού τοίχου αντιστήριξης που μπορεί να αντισταθεί στη διάβρωση.

Οπισθότοιχος: Περιλαμβάνεται σε ακρόβαθρα που συνδέονται με επίχωμα. Αυτό βρίσκεται πάνω από την τράπεζα έδρασης για να δώσει ένα οριζόντιο στήριγμα στο κατάστρωμα της γέφυρας και παράλληλα να ελαχιστοποιήσει τη διάβρωση στο σημείο σύνδεσης αποκόπτοντας την επαφή με το επίχωμα και πιθανά ύδατα κατά συνέπεια.

Πάσσαλος: Ο πάσσαλος ενός ακρόβαθρου μπορεί είτε να ανήκει σε έναν κάθετο τοίχο που ενώνει την τράπεζα έδρασης με το πέδιλο είτε σε μια σειρά από στύλους για την εκπλήρωση του ίδιου στόχου. Σε ένα επίχωμα, ο πάσσαλος σαν τμήμα ενός πασσαλότοιχου παράγει έναν τοίχο συγκράτησης.

Πέδιλο: Αυτό το μέρος ενός ακρόβαθρου ενώνει το κάθετο, φέρον τμήμα του ακρόβαθρου με το έδαφος και είναι συνήθως κάτω από το έδαφος. Αποτελείται από μια οριζόντια επιφάνεια, μερικές φορές πλατύτερη από τη γέφυρα, έτσι ώστε να διαμοιράζει το βάρος της γέφυρας σε μεγαλύτερη επιφάνεια.

Οι ακόλουθοι τύποι ακρόβαθρων συναντώνται συνήθως:

Το τυπικό ακρόβαθρο βαρύτητας χρησιμοποιείται συχνά και αποτελείται από την τράπεζα έδρασης, τον οπισθότοιχο, το πέδιλο, και τους πτερυγότοιχους που συγκρατούνε το επίχωμα. Κανονικά, οι πτερυγότοιχοι τοποθετούνται παράλληλα με την τράπεζα έδρασης, όπως στην παρακάτω εικόνα, ή σε μια μικρή, οπίσθια γωνία προς το επίχωμα.



Σχήμα 7.- Γέφυρα με τυπικό ακρόβαθρο βαρύτητας

Το U- ακρόβαθρο είναι ένας τύπος ακρόβαθρου που διαφέρει από το ακρόβαθρο βαρύτητας ως προς τη γωνία των πτερυγότοιχων. Αυτοί τοποθετούνται σε κάθετη γωνία προς την τράπεζα έδρασης της γέφυρας, και επεκτείνονται γύρω από το ανάχωμα και μακριά από τη γέφυρα.



Σχήμα 8.- Γέφυρα με U - ακρόβαθρο

Τα ακρόβαθρα ανοικτού τύπου (spill-through) συνήθως υποστηρίζουν τη γέφυρα κατά διαστήματα σε όλο το άνοιγμα της. Το κατάστρωμα στηρίζεται σε μια δοκό που υποστηρίζεται από τις κολώνες ή έναν κοντό τοίχο χωρίς οποιουδήποτε περυγότοιχους ή έναν οπισθότοιχο για να κρατήσει το επίχωμα. Το νερό ή και οδοί μπορούν να περάσουν ανάμεσα στα στηρίγματα. Το ύψος του υποστυλώματος διαφέρει για να ρυθμίζεται η απόσταση μεταξύ της επίπεδης γέφυρας και της ερυθράς του εδάφους από κάτω.



Σχήμα 9.- Γέφυρα με ακρόβαθρο ανοικτού τύπου

2.3 Θεμελίωση με πασσάλους

Το σύστημα ακρόβαθρου – πασσάλων σχεδιάζεται γενικά με δύο τρόπους:

1. Χαμηλή ακαμψία πασσάλων / χαμηλός βαθμός συγκράτησης (restraint):

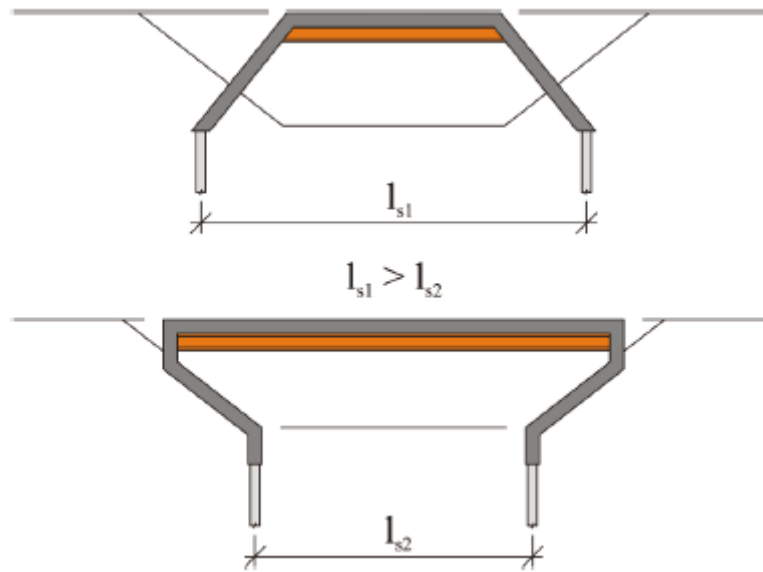
Ιδίως στις ΗΠΑ, τα ακρόβαθρα και τα υποστυλώματα υποστηρίζονται από μονές σειρές εύκαμπτων χαλύβδινων πασσάλων και η γέφυρα μπορεί να

θεωρηθεί ως ένα συνεχές πλαίσιο. Καθώς τα υποστυλώματα είναι αρκετά εύκαμπτα, η συνεχής ανωδομή μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει απλές ή αρθρωτές στηρίξεις. Συνεπώς, εκτός από το σχεδιασμό της συνέχειας των συνδέσεων στα ακρόβαθρα και τα υποστυλώματα, η δράση του πλαισίου μπορεί να αγνοηθεί κατά την ανάλυση της ανωδομής για επιβαλλόμενα σταθερά ή κινητά φορτία. Επιπλέον, καθώς μεταφέρονται μόνο μικρές ροπές μέσω της γωνίας του ακρόβαθρου, ο σχεδιασμός αυτής της λεπτομέρειας γίνεται απλός. Το κύριο πλεονέκτημα στη μέθοδο αυτήν, είναι εν τέλει η απουσία εφεδράνων και αρμών.

2. Υψηλή ακαμψία πασσάλων / υψηλός βαθμός συγκράτησης (restraint)

Όσο πιο «στενή/λεπτή» πρόκειται να κατασκευαστεί η ανωδομή, τόσο μεγαλύτερη ακαμψία πρέπει να διαθέτει το σύστημα της υποκατασκευής. Προκειμένου να αυξηθεί η γωνιακή ροπή της γέφυρας και να μειωθεί η ροπή ανοίγματος, το κατάστρωμα συγκρατείται εν μέρει από τα άκαμπτα κάθετα μέλη. Αυτή η έννοια του πλαισίου χρησιμοποιείται ευρέως στην Ευρώπη, απαιτώντας άκαμπτους πασσάλους από σκυρόδεμα. Στις γέφυρες με μικρά και μεσαία ανοίγματα, το κύριο πλεονέκτημα είναι η λεπτή ανωδομή και η απουσία της μεσαίας στήριξης. Μια τυπική ολόσωμη γέφυρα με ακρόβαθρα έχει ένα άνοιγμα και μπορεί να στηριχτεί σε πασσάλους ή σε πέδιλα. Ιδιαίτερα στην περίπτωση μεγάλων ανοιγμάτων, η θεμελίωση με πασσάλους προτιμάται λόγω της μεγαλύτερης οριζόντιας ευκαμψίας τους, καθώς οι δυνάμεις περιορισμού λόγω θερμοκρασίας και στηρίξεων μπορούν να απορροφηθούν αποτελεσματικότερα από εύκαμπτες κατασκευές.

Για λόγους αισθητικής, αλλά και για τη βελτιστοποίηση της ορατότητας για την κυκλοφορία, τα ακρόβαθρα συχνά σχεδιάζονται με κεκλιμένες όψεις. Η κλίση των ακρόβαθρων προς τα πίσω δημιουργεί αποτελεσματικά μια μικρότερη ροπή μεσαίου ανοίγματος, καθώς η ανωδομή διαστασιολογείται για άνοιγμα l_{s2} . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ανωδομή να είναι πολύ λεπτή οπτικά.



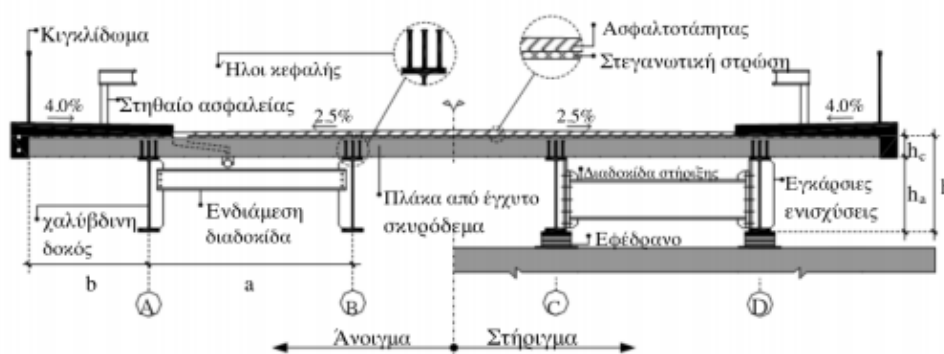
Σχήμα 10.- Ολόσωμη γέφυρα με κεκλιμένα ακρόβαθρα (Feldmann, et al., 2012)

Στην περίπτωση κατασκευών πολλαπλών ανοιγμάτων, πρέπει να υπάρχει βαθιά θεμελίωση για τα βάθρα γενικά και ιδιαίτερος για τα ακρόβαθρα. Εναλλακτικά, τα μεσόβαθρα μπορούν να διαχωριστούν από την ανωδομή με εφέδρανα, με αποτέλεσμα μια ημι-ολόσωμη κατασκευή, παρόλο που σε ορισμένες περιπτώσεις αυτό το είδος συστήματος εφεδράνων είναι λιγότερο αποτελεσματικό. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ημι-ολόσωμων γεφυρών, υψηλές δυνάμεις τροχοπέδησης λόγω κυκλοφορίας συρμών μπορούν να απορροφηθούν μόνο από τους πασσάλους. Στην περίπτωση των πλήρως ολόσωμων γεφυρών, οι δυνάμεις τροχοπέδησης μεταφέρονται απευθείας από το σύστημα των πασσάλων όπου στηρίζεται το ακρόβαθρο στο επίκωμα και στο υπέδαφος (Pak, Bigelow, & Feldman, 2017).

2.4 Σύμμικτη κατασκευή

Η χρήση σύμμικτων φορέων ανωδομής είναι μια μέθοδος με ευρεία εφαρμογή διεθνώς. Στη γεφυροποιία εφαρμόζεται παγκοσμίως εδώ και χρόνια ενώ τελευταία εφαρμόζεται και στην Ελλάδα. Με τον όρο σύμμικτες γέφυρες κάλυβα – σκυροδέματος νοούνται οι φορείς γεφυρών που

συνδυάζουν τα δύο εν λόγω υλικά, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με τρόπο τέτοιο ώστε να επιτυγχάνεται η συνεργασία τους. Βασική και κυριότερη διαφορά τους από τις γέφυρες από χάλυβα αποτελεί η μόρφωση της πλάκας καταστρώματος. Στην περίπτωση των χαλύβδινων γεφυρών το κατάστρωμα μορφώνεται ως ορθότροπη πλάκα, ενώ σε αυτή των σύμμικτων γεφυρών το κατάστρωμα μορφώνεται ως πλάκα σκυροδέματος, που συνεργάζεται με το χαλύβδινο φορέα μέσω διατμητικών συνδέσμων.



Σχήμα 11.- Τυπική διατομή φορέα ανωδομής σύμμικτης οδικής γέφυρας (Βάγιας, Ηλιόπουλος, & Θανόπουλος, Σχεδιασμός Σύμμικτων Γεφυρών από Χάλυβα και Οπλισμένο Σκυρόδεμα, 2016)

Τα τελευταία χρόνια, οι σύμμικτες γέφυρες προτιμώνται έναντι των χαλύβδινων γεφυρών και των γεφυρών από σκυρόδεμα, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Τα εν λόγω οφέλη οφείλονται κυρίως στη συνεργασία των δύο υλικών. Αυτά των σύμμικτων γεφυρών σχετίζονται κυρίως με την επίτευξη διατομών υψηλών αντοχών, οι οποίες είναι λεπτότερες, και με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζουν μικρότερα ίδια βάρη της τάξεως του 50 ÷ 60% σε σύγκριση με τις γέφυρες οπλισμένου σκυροδέματος. Κατά συνέπεια, οι σεισμικές απαιτήσεις είναι μειωμένες και επομένως οι απαιτήσεις της υποδομής (θεμελιώσεις, βάθρα κλπ.) είναι επίσης μειωμένες. Επιπλέον τα κόστη κατασκευής συγκριτικά με τις χαλύβδινες γέφυρες είναι μικρότερα.

Η μεγάλη ταχύτητα ανέγερσης αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των σύμμικτων γεφυρών, γεγονός το οποίο έχει ιδιαίτερη βαρύτητα για τη σημερινή εποχή. Μάλιστα, η ανάπτυξη και η υιοθέτηση της προκατασκευής συμβάλλουν στο να αυξάνεται ακόμη περισσότερο η ταχύτητα ανέγερσης. Τα τμήματα της πλάκας σκυροδέματος αλλά και μεγάλο μέρος από τα καλύβδινα τμήματα προκατασκευάζονται σε εργοστασιακούς χώρους, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα να φθάνουν έτοιμα στο εργοτάξιο και να μειώνεται με τον τρόπο αυτό ο χρόνος κατασκευής. Έτσι, επιτυγχάνονται αυξημένοι ποιοτικοί στόχοι (μεγαλύτερη αντοχή πλακών σκυροδέματος λόγω χρήσης σκυροδεμάτων υπερυψηλής αντοχής), ενώ τα έργα αποκτούν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μέσω της σωστής συντήρησης. (Ταϊρης, 2019)

Πέραν των πλεονεκτημάτων που σχετίζονται αποκλειστικά με τη φέρουσα λειτουργία, οι φορείς σύμμικτων γεφυρών κυριαρχούν και στην αισθητική. Αξιοσημείωτο παράδειγμα όπου συνδυάζονται αισθητική και λειτουργικότητα αποτελεί η σύμμικτη γέφυρα Ρίου Αντιρρίου στην Ελλάδα.



Σχήμα 12.- Γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου (Χαρίλαος Τρικούπης)

Η ανάπτυξη των σύμμικτων γεφυρών τα τελευταία χρόνια ευνοήθηκε από πληθώρα παραγόντων. Εν συντομία οι παράγοντες αυτοί αναφέρονται παρακάτω:

- Η αυτοματοποίηση της παραγωγής και η προκατασκευή του χαλύβδινου σκελετού καθώς και των πλακών σκυροδέματος οδήγησαν στην εξοικονόμηση του χρόνου υλοποίησης της κατασκευής με ταυτόχρονη βελτίωση της ποιότητας.
- Στα πλαίσια της αειφόρου ανάπτυξης, ο χάλυβας – που είναι 100% ανακυκλώσιμος - αποτελεί πλέον την πιο οικολογική επιλογή υλικού δόμησης.
- Η παραγωγή χαλύβων υψηλής αντοχής – όπως ο χάλυβας S460 - και η παρασκευή ελασμάτων μεγάλου και μεταβλητού πάχους πλέον επιτρέπεται λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας.
- Τα εξελιγμένα υλικά αντιδιαβρωτικής προστασίας, με σωστή εφαρμογή, προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στις κατασκευές συγκριτικά με το παρελθόν.
- Ο νέος ευρωπαϊκός κανονισμός, Ευρωκώδικας 4, αντιμετωπίζει με πληρότητα την ανάλυση και διαστασιολόγηση σύμμικτων φορέων.

Συνοπτικά τα οφέλη της χρήσης σύμμικτων φορέων ανωδομής στη γεφυροποιία είναι τα ακόλουθα:

- Η εκμετάλλευση της υψηλής εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα και της υψηλής θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος έχει ως αποτέλεσμα ελαφρές κατασκευές με υψηλό αισθητικό αποτέλεσμα.
- Η χρήση οπλισμένου σκυροδέματος έχει ως αποτέλεσμα την υψηλή ανθεκτικότητα των καταστρωμάτων των γεφυρών.
- Καλύτερη συμπεριφορά σε ακραίες καιρικές συνθήκες (π.χ. παγετός) συγκριτικά με τις μεταλλικές γέφυρες.
- Έχουν μικρότερο βάρος φορέα ανωδομής και συνεπώς μικρότερες απαιτήσεις σε βάθρα και θεμελίωση συγκριτικά με τις γέφυρες σκυροδέματος.

- Με τη χρήση μηχανοποιημένων μεθόδων κατασκευής μπορούν να γεφυρώσουν πολύ μεγάλα ανοίγματα.

Από την άλλη, ένα βασικό μειονέκτημα των σύμμικτων φορέων αποτελεί η ευαισθησία του χάλυβα σε οξείδωση. Άμεσο αποτέλεσμα αυτής αποτελεί η αύξηση του κόστους συντήρησης της κατασκευής.

Η οριστική επιλογή του υλικού και του είδους του φορέα είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί χωρίς την εξέταση ορισμένων παραγόντων. Οι βασικότεροι από τους εν λόγω παράγοντες είναι:

- Φυσικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής (τοπογραφικά, γεωλογικά χαρακτηριστικά, έδαφος θεμελίωσης, υδρολογικά στοιχεία, σεισμολογικά χαρακτηριστικά, καιρικές συνθήκες, κλπ.).
- Σκοπός του έργου (είδος και πυκνότητα κυκλοφορίας, μελλοντική πρόβλεψη, ταχύτητα ανέγερσης, διάρκεια ζωής, αισθητικές απαιτήσεις κλπ.).
- Τοπικές συνθήκες (δυνατότητα πρόσβασης, προβλήματα κατασκευής, εργατοτεχνικό προσωπικό κλπ.).

Μετά τη μελέτη των συνιστώσων που αναφέρθηκαν παραπάνω και λαμβάνοντας υπόψη τον οικονομικό παράγοντα, προσδιορίζεται η βέλτιστη λύση.

Για τους παραπάνω λόγους, οι σύμμικτες κατασκευές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σήμερα στη γεφυροποιία. Η ανάπτυξη σύμμικτων γεφυρών σε Ευρώπη και Αμερική έχει αρχίσει εδώ και αρκετά χρόνια. Παρόλα αυτά η εφαρμογή τους στην Ελλάδα είναι ακόμη περιορισμένη. Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί μία προσπάθεια εισαγωγής τους στα ελληνικά δεδομένα και πλέον συναντώνται κάποιες σύμμικτες γέφυρες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν:

- Η τοξωτή γέφυρα της Τσακώνας που έχει αποτελέσει επικέντρου διεθνούς προσοχής
- Η γέφυρα του Λάδωνα
- Η καλωδιωτή γέφυρα Ρίου – Αντιρρίου, που όπως αναφέρθηκε παραπάνω αποτελεί την πλέον αξιοσημείωτη κατασκευή σύμμικτης γέφυρας στον Ελλαδικό χώρο.

2.5 SOFiSTiK

Για την μελέτη χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SOFiSTiK 2018 - Student edition, ενώ τα σχέδια και η ρεαλιστική απεικόνιση του έργου έγιναν με χρήση των προγραμμάτων AutoCAD και SketchUp αντίστοιχα.

Η σειρά προγραμμάτων SOFiSTiK είναι ένα δυναμικό και αξιόπιστο πακέτο ανάλυσης και διαστασιολόγησης, γερμανικής καταγωγής, στηρίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και διατίθεται στην ελληνική αγορά από το 1990. Λόγω της αξιοπιστίας του και των πολλών δυνατοτήτων του είναι πλέον ευρέως γνωστό στους Έλληνες μηχανικούς. Σήμερα μεγάλο ποσοστό των μελετών εφαρμογής των προεντεταμένων γεφυρών στην Ελλάδα έχει γίνει με τα προγράμματα SOFiSTiK. Παρέχονται απεριόριστες δυνατότητες για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που συναντά ο μελετητής στο μεγαλύτερο φάσμα εφαρμογών και ειδικά στη γεφυροποιία. Πρόκειται για μία σειρά προγραμμάτων που συνεργάζονται όλα μεταξύ τους κάτω από μία κοινή βάση δεδομένων. (SOFiSTiK Hellas A.E., 2005)

Υπάρχουν προγράμματα γραφικής επεξεργασίας και εισαγωγής δεδομένων (preprocessing), προγράμματα γραφικής αξιολόγησης αποτελεσμάτων και διαχείρισης εκτυπώσεων (post-processing) και προγράμματα σχεδίασης κατασκευαστικών σχεδίων (εφαρμογές σε περιβάλλον AutoCAD).

Στο πρόγραμμα υπάρχει βιβλιοθήκη υλικών σκυροδέματος, χάλυβα και ξύλου, σύμφωνα με πολλούς κανονισμούς: παλιούς γερμανικούς (DIN 1045,4227) νέους (DIN 1045-1, Fachberichte), Ευρωκώδικες (EC2), ελβετικούς, αυστριακούς, βρετανικούς, γαλλικούς, ισπανικούς, ιταλικούς, ινδικούς, αμερικανικούς κ.α. Τα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων των υλικών μπορούν να είναι διαφορετικά για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας και να εξαρτώνται από τη θερμοκρασία.

Δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των υλικών σε ένα φορέα ή στην ίδια διατομή. Μη γραμμικές ιδιότητες υλικών μπορούν να ληφθούν

κατ' ευθείαν από τους κανονισμούς ή να δοθούν ιδιαίτερες από τον χρήστη.

Περιλαμβάνονται τυπικές διατομές, όπως ορθογωνικές, πλακοδοκοί, κυκλικές, καθώς και κιβωτοειδείς, σύμμικτες, λεπτότοιχες. Υπολογίζονται ελαστικά και πλαστικά μεγέθη της διατομής, καθώς και μεγέθη για τον υπολογισμό των αξονικών και διατμητικών τάσεων. Ιδιαίτερα, οι σύμμικτες διατομές μπορούν να αποτελούνται από οποιοδήποτε συνδυασμό τμημάτων οπλισμένου σκυροδέματος, προεντεταμένου σκυροδέματος και χάλυβα. Πρακτικά δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στον αριθμό των διατομών που δέχεται το πρόγραμμα.

Γενικά, για την ανάλυση γεφυρών, χρησιμοποιούνται τα συστήματα:

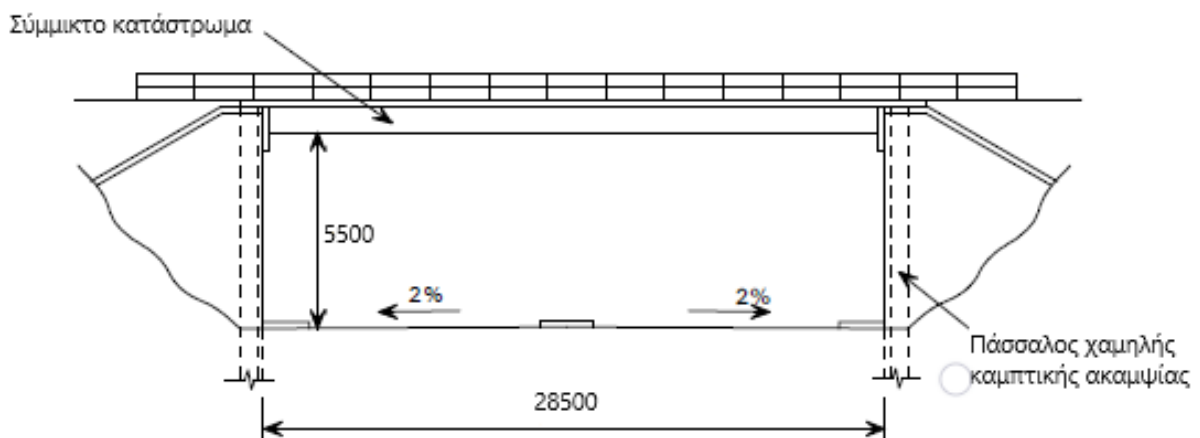
- Γραμμικοί φορείς με χρήση ραβδωτών στοιχείων.
- Επιφανειακοί φορείς (πλάκες) με χρήση επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων.
- Μικτά συστήματα ραβδωτών και επιφανειακών πεπερασμένων στοιχείων.
- Σύμμικτοι φορείς.

3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΟΡΕΑ

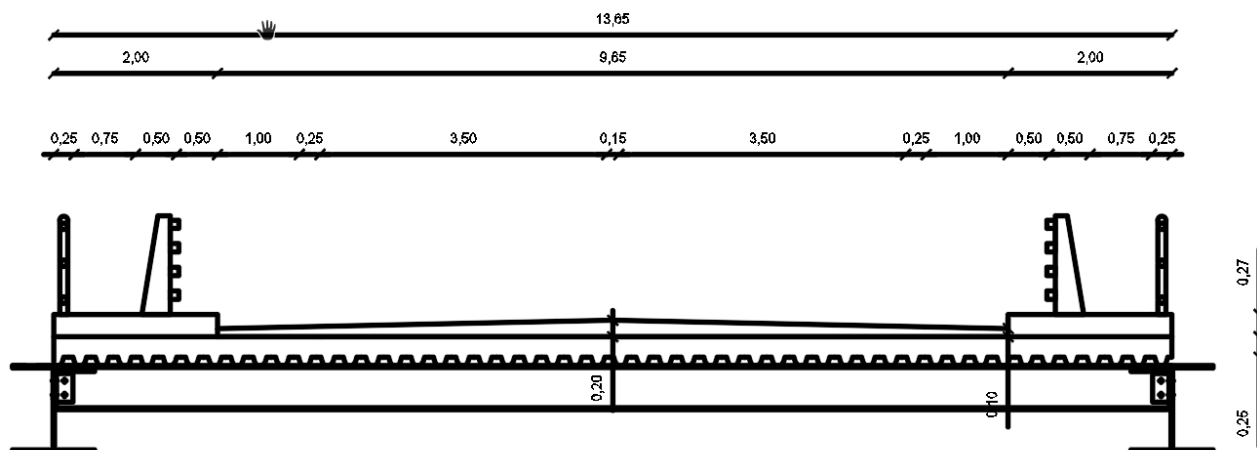
Η γέφυρα σχεδιάζεται με στόχο να παρέχει αρκετό ελεύθερο χώρο από κάτω της για την ελεύθερη λειτουργία ενός αυτοκινητοδρόμου διατομής 2+1 λωρίδων ανά κατεύθυνση κυκλοφορίας. Επίσης θεωρείται ότι βρίσκεται στο χώρο της Δυτικής Μακεδονίας και ότι πρόκειται να αποτελέσει τμήμα του μελλοντικού βόρειου άκρου του αυτοκινητοδρόμου Ε65.

3.1 Περιγραφή

Η γέφυρα θα αποτελέσει άνω διάβαση πάνω από αυτοκινητόδρομο κατηγορίας Α Ι και πρότυπης διατομής α4ης. Η οδός που θα διέρχεται από τη γέφυρα είναι επαρχιακή οδός που ενώνει κοντινές περιοχές και έτσι επιλέχθηκε η κατηγορίας οδού Α ΙΙΙ. Από τις Οδηγίες Μελέτης Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ) λαμβάνεται η πρότυπη διατομή γ2 που καλύπτει τις κυκλοφοριακές ανάγκες. Το συνολικό άνοιγμα της είναι 28.5 m.

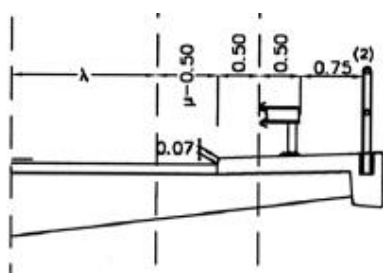


Σχήμα 13.- Όψη της γέφυρας



Σχήμα 14.- Διατομή της γέφυρας

Το σύμμικτο κατάστρωμα της γέφυρας πατάει πάνω σε καλυβδόφυλλο. Το πλάτος της γέφυρας είναι 13,65 m. Το οδοστρώμα έχει συνολικό πλάτος 9,65 m, αποτελείται από δύο λωρίδες κυκλοφορίας πλάτους 3,5 m, και έχει διαμορφωθεί με αμφίπλευρη κλίση 2% της ασφάλτου για λόγους απορροής των υδάτων.



Δ7. σε γέφυρα με πεζοδρόμιο

Σχήμα 15.- Λεπτομέρεια για διαστάσεις πεζοδρομίου και στηθαίου οχημάτων και πεζών (ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ & ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ, 2001)

Στις δύο πλευρές του οδοστρώματος βρίσκεται πεζοδρόμιο συνολικού πλάτους 2m σε υπερυψωμένη από το δρόμο θέση. Επίσης εκεί είναι τοποθετημένα κατάλληλα μεταλλικά στηθαία οχημάτων και κιγκλιδώματα για τους πεζούς χρήστες της γέφυρας.

3.2 Στατική λειτουργία

Τα χαλυβδόφυλλα τοποθετούνται αμφιέριστα επί των διαδοκίδων με άμεση έδραση επί του πέλματος της διαδοκίδας. Στερεώνονται με κατάλληλες βίδες και με αυτόν τον τρόπο προσφέρουν και πλευρική εξασφάλιση στη σιδηροδοκό κατά τη φάση της κατασκευής.

Τα φορτία κυκλοφορίας, τα οποία ασκούνται στην επιφάνεια του καταστρώματος από την διέλευση πεζών και οχημάτων, παραλαμβάνονται σε πρώτη φάση από την πλάκα του καταστρώματος. Η πλάκα του καταστρώματος μεταφέρει τα φορτία αυτά στις διαδοκίδες υπό μορφή γραμμικά κατανεμημένου φορτίου. Η πλάκα του καταστρώματος συνδέεται με τις διαδοκίδες μέσω διατμητικών ήλων, συγκολλημένων στο άνω πέλμα της διαδοκίδας. Αυτοί συμβάλλουν αφενός στην παραλαβή της διάτμησης, που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια μεταξύ χαλύβδινης διατομής και σκυροδέματος, και αφετέρου εμποδίζουν τη σχετική ολίσθηση μεταξύ των δύο αυτών στοιχείων, με αποτέλεσμα να εξασφαλίζουν την κοινή σύμμικτη λειτουργία.

Οι διαδοκίδες στηρίζονται στα άκρα τους στις κύριες δοκούς και λειτουργούν αμφιέριστα. Οι διαδοκίδες παραλαμβάνουν μόνο θετικές ροπές και έτσι αξιοποιείται πλήρως η σύμμικτη διατομή του καταστρώματος, καθώς το σκυρόδεμα βρίσκεται μόνιμα υπό θλίψη. Οι κύριες δοκοί και οι διαδοκίδες συνδέονται σε ισοσταθμία με κατάλληλη σύνδεση μέσω γωνιακών.

Το συνολικό βάρος του καταστρώματος και των φορτίων κυκλοφορίας του παραλαμβάνεται από τα ακρόβαθρα.

3.3 Δομικά υλικά

- Σκυρόδεμα

Για τις σύμμικτες γέφυρες σύμφωνα με τον EN 1994-2 χρησιμοποιούνται κατηγορίες σκυροδέματος από C20/25 έως C60/75. Για τη συγκεκριμένη γέφυρα επιλέχθηκε σκυρόδεμα καταστρώματος C30/37 με τις παρακάτω ιδιότητες:

Πίνακας 1.- Χαρακτηριστικές τιμές σκυροδέματος ποιότητας C30/37

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	f_{ck}	f_{cm}	f_{ctm}	E_{cm}	α_t	ν	γ_c	$\gamma_{c,w}$
	MPa	MPa	MPa	GPa	/°C		kN/m ³	kN/m ³
C30/37	30	38	2.9	32	10 ⁻⁵	0.2	25	26

Θλιπτική αντοχή σχεδιασμού σκυροδέματος: $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,5} = \frac{30}{1,5} = 20 \text{ MPa}$

Για μακροχρόνιες επιδράσεις φορτίσεων:

$$f_{cd} = 0,85 \cdot \frac{f_{ck}}{1,5} = 0,85 \cdot \frac{30}{1,5} = 17 \text{ MPa}$$

- Ασφαλτικές στρώσεις

Το ειδικό βάρος των ασφαλτικών στρώσεων θεωρείται ίσο με:

$$\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$$

- Δομικός Χάλυβας

Η κατηγορία χάλυβα που χρησιμοποιείται συνήθως σε γέφυρες είναι η S355 και για το λόγο αυτό επιλέχθηκε αυτή η κατηγορία και για την παρούσα γέφυρα.

Πίνακας 2.- Ιδιότητες δομικού χάλυβα για έλαση εν θερμώ (EN 1993-1-1 3.2.3, Πιν. 3.1)

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΧΑΛΥΒΑ	Πάχος στοιχείου t			
	t ≤ 40		40mm < t ≤ 80mm	
	f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_y (MPa)	f_u (MPa)
S355	355	510	335	490

ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΧΑΛΥΒΑ	E_{cm}	α_t	ν	γ_c
	GPa	/°C		kN/m ³
S355	210	10 ⁻⁵	0.3	78.5

Όριο διαρροής σχεδιασμού: $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,0} = 355 \text{ MPa}$

- Χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος

Για την πλάκα σκυροδέματος επιλέγεται χάλυβας οπλισμού B500C με νευρώσεις με όριο διαρροής σχεδιασμού:

$$f_{sd} = \frac{f_{ys}}{1,15} = 435 \text{ MPa}, \text{ όπου } f_{ys}=500 \text{ MPa.}$$

- Χάλυβες χαλυβδόφυλλων

Η ποιότητα χάλυβα του χαλυβδόφυλλου που χρησιμοποιείται είναι S 320 GD+Z, $f_{yp}=320 \text{ MPa}$, όπου η τάση σχεδιασμού των ανωτέρω καλύβων δίνεται από τη σχέση

$$\rightarrow f_{yp,d}=f_{yp}/1.0$$

- Διατμητικοί ήλοι

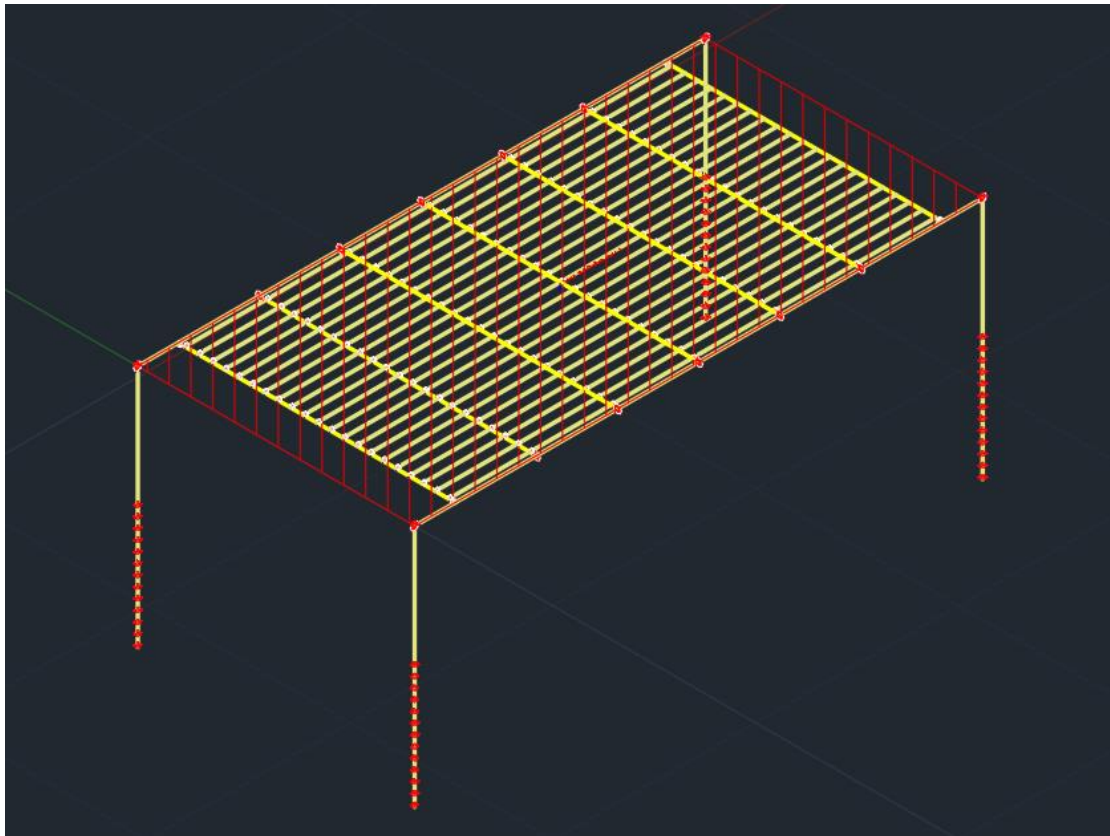
Για τους διατμητικούς ήλους επιλέγεται πάλι ποιότητα χάλυβα S355.

3.4 Μόρφωση φορέα

Προσομοίωμα γέφυρας

Αρχικά μορφώνεται ο φορέας σε γραφικό περιβάλλον AutoCAD, μέσω ενός plugin που λέγεται SOFiPLUS-X. Στα επιμέρους ραβδωτά στοιχεία ορίζονται διατομές, σύμμικτες είτε τυποποιημένες, καθώς και οι συνοριακές συνθήκες. Στη συνέχεια εφαρμόζονται οι συνθήκες στήριξης και τα φορτία. Αφού ολοκληρωθεί η μόρφωση, ο φορέας εισάγεται στο πρόγραμμα SSD (SOFiSTiK Structural Desktop), στο οποίο γίνεται η ανάλυση και προκύπτουν όλα τα εντατικά μεγέθη.

Για τη γέφυρα, όλα τα μέλη προσομοιώνονται με γραμμικά στοιχεία, στα οποία έχουν οριστεί οι διατομές και οι συνοριακές συνθήκες. Επίσης ορίζονται οι συνθήκες στήριξης. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται μια συνολική εικόνα του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε. Διακρίνονται τα ραβδωτά στοιχεία, τα ελατήρια και οι συνδέσεις.



Σχήμα 16.- Συνολική εικόνα του προσομοιώματος

Για την προσομοίωση του καταστρώματος χρησιμοποιήθηκαν γραμμικά δομικά στοιχεία (structural elements). Το κατάστρωμα προσομοιώνεται ως σύμμικτη διατομή, με πλάκα πλάτους 4m και διαδοκίδα HEA 700.

Τα υποστυλώματα, υπό μορφή πασσάλων, όπως και η αλληλεπίδραση τους με το έδαφος θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

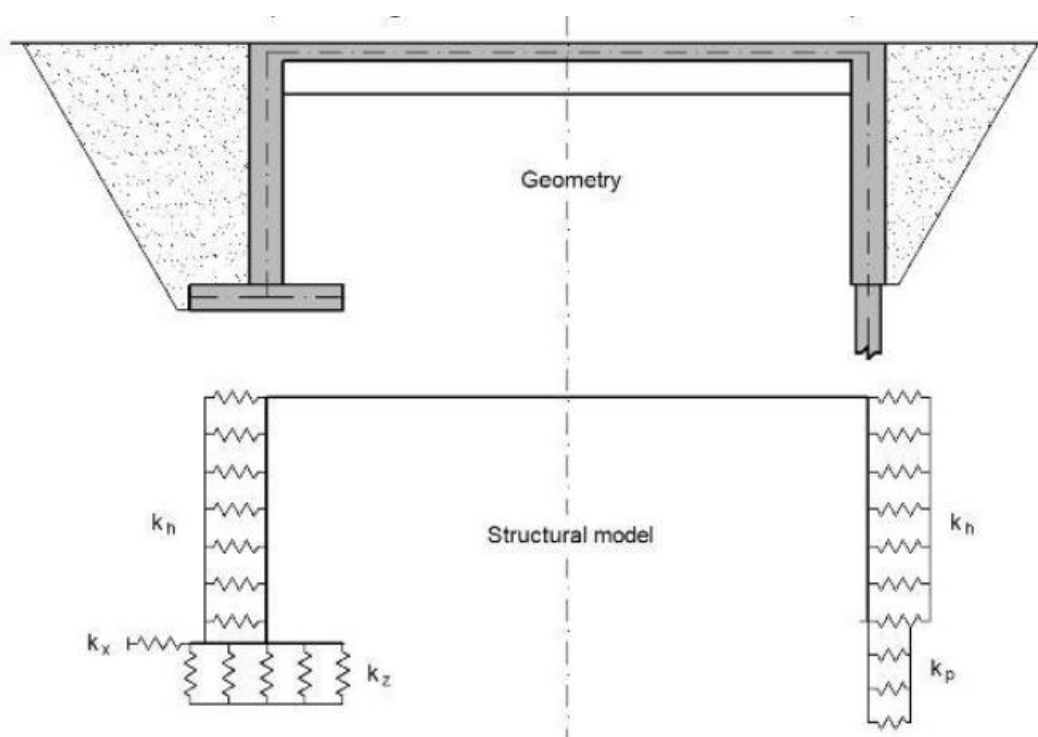
3.5 Αλληλεπίδραση κατασκευής - εδάφους

Η συμπεριφορά της δομής της γέφυρας είναι πιθανό να αλλάζει με την αλληλεπίδραση μεταξύ της δομής της γέφυρας, της θεμελίωσης της και του περιβάλλοντος εδαφολογικού μέσου. Αφού η συμπεριφορά της ολόσωμης γέφυρας σχετίζεται με τα δομικά της μέρη καθώς και με το εδαφολογικό της μέσο, είναι πολύ σημαντικό να βεβαιωθούν οι

κατάλληλες παράμετροι του εδάφους και έτσι να αναπαρασταθεί η συμπεριφορά του.

Η μη γραμμικότητα, η ανομοιογένεια και η ανισοτροπική συμπεριφορά του εδάφους οδηγεί σε μία σύνθετη συμπεριφορά που πρέπει να συνοψολογιστεί στην προσομοίωση. Επομένως οι εδαφικές ιδιότητες πρέπει να μοντελοποιηθούν ως “εδαφικές ελαστικές σταθερές” για να λάβουν υπόψιν την ευκαμψία και τη ακαμψία του εδάφους.

Για τη μελέτη αυτή επιλέγονται πλευρικά φορτιζόμενοι πάσσαλοι μονής σειράς. Η πλευρική αντίσταση του εδάφους βοηθάει στη μεταφορά των πλευρικών φορτίων στο περιβάλλον έδαφος. Στην περίπτωση πλευρικής φόρτισης των πασσάλων, ο πάσσαλος στην προσπάθεια του να μετατοπιστεί στην κατεύθυνση της φόρτισης καταλήγει να στρέφεται. Η πίεση που πασσάλου έναντι του εδάφους δημιουργεί διατμητικές τάσεις και καταπονεί το έδαφος το οποίο αντιστέκεται στην κίνηση του πασσάλου.



Σχήμα 17.- Προσομοίωση αλληλεπίδρασης εδάφους – κατασκευής σε ολόσωμη γέφυρα με πέδιλα (αριστερά) και πασσάλους (δεξιά) (Masrilyanti, 2013)

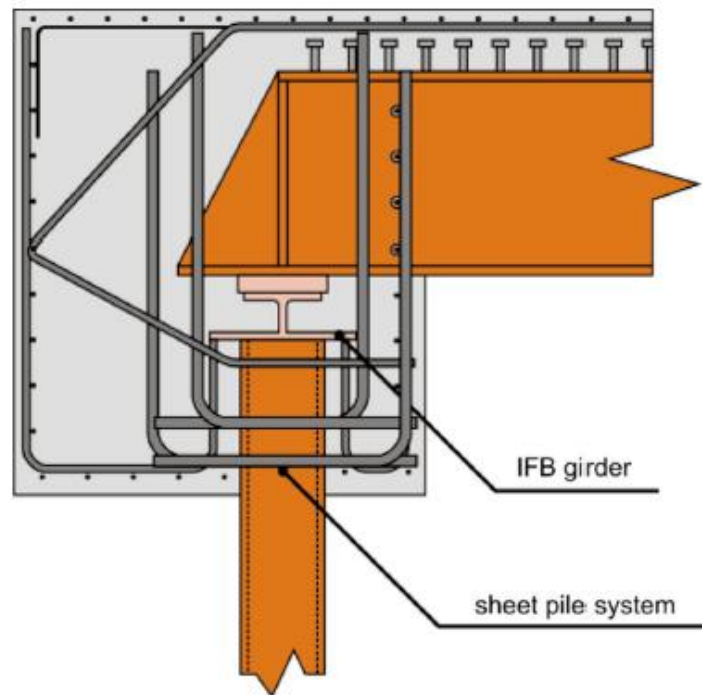
3.5.1 Πάσσαλοι – έδαφος

Η επιλογή ενός επαρκούς συστήματος πασσάλων θεμελίωσης συνδέεται σε μεγάλο βαθμό με την επιλεγμένη μέθοδο σχεδιασμού. Στις ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο και τη Σουηδία, προτιμώνται πάσσαλοι με χαμηλή καμπτική ακαμψία για την ελαχιστοποίηση των καμπτικών επιδράσεων λόγω πλευρικών κινήσεων και περιστροφών των ακροβάθρων. Επομένως, οι πάσσαλοι μορφής Η αποτελούν την πρώτη επιλογή για ολόσωμες γέφυρες στις ΗΠΑ, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για γέφυρες μεγαλύτερου μήκους. Σήμερα, προσανατολίζονται ως επί το πλείστον για κάμψη του αδύναμου άξονα για την ελαχιστοποίηση των τάσεων στα ακρόβαθρα και για να διασφαλιστεί ότι δεν θα εμφανιστεί τοπικός λυγισμός στα πέλαματα, ακόμη και αν το έδαφος δεν στηρίζει πλευρικά τον πάσσαλο.

Επιπρόσθετα, οι υπερμεγέθεις προδιάτρητες τρύπες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της οριζόντιας αντίστασης σε πλευρικές μετατοπίσεις στην κεφαλή των πασσάλων. Αυτές οι οπές γεμίζουν με υλικό χαμηλής ακαμψίας που περιβάλλει την κεφαλή των πασσάλων. Παραδείγματα χαλαρών υλικών που χρησιμοποιούνται είναι τα κονιάματα άμμου και μπετονίτη. Έχει χρησιμοποιηθεί επίσης και συμπίεσιμος αφρός. Μια μελέτη στις ΗΠΑ από τις αρχές της δεκαετίας του 1980 έδειξε ότι μόνο τέσσερις από τις 29 πολιτείες που κατασκευάζουν ολόσωμες γέφυρες συνηθίζουν να χρησιμοποιούν προδιάτρητες τρύπες. Μια έρευνα από το 2000 δείχνει ότι σε 12 από τις 30 πολιτείες απαιτείται πλέον η χρήση προδιάτρητων τρυπών. Με βάση τις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σε πιλοτική γέφυρα που κατασκευάστηκε από την κατασκευαστική εταιρεία «Ramböll Sverige AB» στον ποταμό Leduen στη Σουηδία, το όφελος των προδιάτρητων τρυπών θα μπορούσε να αποδειχθεί και στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος INTAB.

Στη Γερμανία προτιμώνται οι πάσσαλοι υψηλής καμπτικής ακαμψίας, ώστε να αυξηθεί η γωνιακή ροπή της γέφυρας, να μειωθεί η ροπή ανοίγματος και να αποφευχθεί η μεσαία στήριξη, ενώ οι πάσσαλοι σκυροδέματος είναι αρκετά συνηθισμένοι. Σε γενικές γραμμές, μπορούν

να ταξινομηθούν ως προκατασκευασμένοι ή επιτόπου έγχυτοι πάσσαλοι, με τους προκατασκευασμένους πασσάλους να είναι είτε οπλισμένοι είτε προεντεταμένου σκυροδέματος.



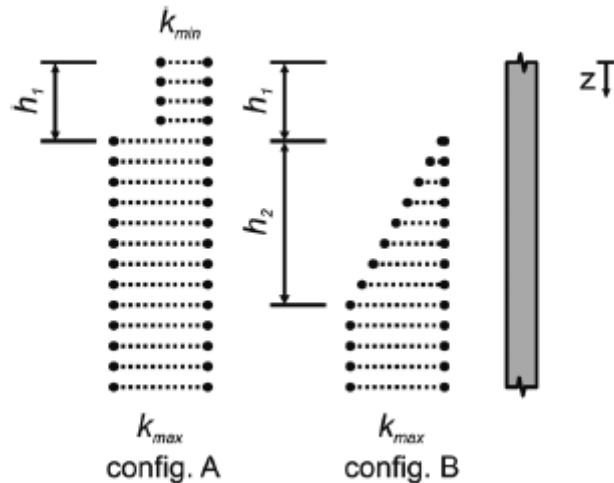
Σχήμα 18.- Σύνδεση με τη μέθοδο INTAB (INTEGRAL Abutment Bridge)
(Feldmann, et al., 2012)

Η ποιότητα τους ελέγχεται, για παράδειγμα, από δοκιμές δυναμικής φόρτισης ή δοκιμές επάρκειας. Οι πάσσαλοι και οι κεφαλές πασσάλων συνδέονται μέσω οπλισμού για να σχηματίσουν μια μονολιθική κατασκευή. Οι πασσαλότοιχοι (sheet pile) ως τμήματα της θεμελίωσης παραμένουν μια λιγότερο κοινή εναλλακτική λύση. Μπορούν να ληφθούν υπόψη εάν ο πασσαλότοιχος πρέπει να κατασκευαστεί ούτως ή άλλως. Σε αυτή την περίπτωση ο υφιστάμενος πασσαλότοιχος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σύστημα πασσάλων για την ολόσωμη γέφυρα στήριξης, αποφεύγοντας την πρόσθετη έμπηξη πασσάλων. Λόγω της υψηλής ακαμψίας του πασσαλότοιχου, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά την κατασκευή της σύνδεσης πασσαλότοιχου (sheet pile) - ακρόβαθρου. Αφενός, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί η ολίσθηση μεταξύ πασσαλότοιχου και ακρόβαθρου, για παράδειγμα εγκαθιστώντας κάθετους κοχλίες (vertical

studs) συγκολλημένους στον πασσαλότοιχο. Αφετέρου, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο πρόβλημα της ρηγματώσης σκυροδέματος εντός της περιοχής του πασσαλότοιχου. Μελέτες έχουν δείξει ότι ένας περιορισμός της τάξης του 50% έχει την πιο ευεργετική επίδραση στην επιλογή κυλινδρικών δοκών για τη σύμμικτη ανωδομή, ενώ για υψηλότερους βαθμούς συγκράτησης, ο σχεδιασμός του πλάτους ρωγμών στις στηρίξεις καθίσταται προβληματικός όταν δεν χρησιμοποιούνται χοανοειδείς ενώσεις ακρόβαθρου - πλάκας (tapered haunches).

Για σκοπούς σχεδιασμού, το έδαφος που περιβάλλει τους πασσάλους μπορεί να αναπαρασταθεί με ελατήρια που εφαρμόζονται στους πασσάλους σε περιοχές όπου αναμένεται επαρκής πλευρική στήριξη από το έδαφος που τους περιβάλλει. Για την αναπαραγωγή της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του εδάφους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μη-γραμμικά ελατήρια. Στην περίπτωση αυτή, η μέθοδος p-y είναι μια εμπειρική μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως, με την πίεση του εδάφους p να θεωρείται μη γραμμική συνάρτηση της παραμόρφωσης πασσάλου y. Ουσιαστικά, η μέθοδος περιλαμβάνει την εισαγωγή μιας σειράς καμπυλών p-y για την αναπαράσταση της πραγματικής συμπεριφοράς του εδάφους λαμβάνοντας υπόψη τη μη γραμμικότητα του συντελεστή περιορισμένου εδάφους $E_{s,k}$ με βάση τη γεωτεχνική έρευνα. Ωστόσο, λόγω μη γραμμικότητας, η μέθοδος αυτή δεν επιτρέπει την υπέρθεση συνδυασμών φόρτισης (superposition of load cases). Επομένως, η εφαρμογή γραμμικών ελατηρίων είναι μια παραλλαγή που χρησιμοποιείται συχνά. Σε αυτή την περίπτωση, η πιθανή κατανομή των σταθερών του ελατηρίου σε βάθος μειώνεται σε δύο περιπτώσεις (A: πυκνό έδαφος, B: χαλαρό έδαφος), οι οποίες εξετάζονται ξεχωριστά λαμβάνοντας υπόψη τα ανώτερα και κατώτερα όρια του συντελεστή αντίδρασης εδάφους θεμελίωσης k_s ή E_s όπως δίνεται από τη γεωλογική έρευνα:

- Πυκνό έδαφος: διάταξη (config.) A: 0 – 1 m: $k_{s,min}$
1 m – βάση: $k_{s,max}$
- Χαλαρό έδαφος: διάταξη (config.) B: 1–5 m: 0 - $k_{s,max}$,
5 m – βάση: $k_{s,max}$



Σχήμα 19.- Οι δύο μέθοδοι εφαρμογής ελατηρίων σε πασσάλους θεμελίωσης
(Feldmann, et al., 2012)

Αν δεν δίνεται ο συντελεστής αντίδρασης του εδάφους θεμελίωσης, μπορεί να υπολογιστεί με την ακόλουθη εξίσωση με βάση τη διάμετρο του πασσάλου D_s (για $D_s > 1.00$ m, $D_s = 1.00$ m) (Pak, Bigelow, & Feldman, 2017):

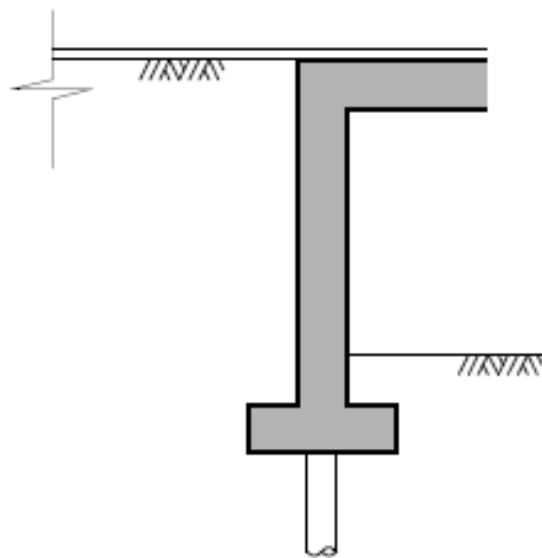
$$k_{s,k} = \frac{E_{s,k}}{D_s}$$

Οι έννοιες που παρουσιάζονται περιγράφουν την εξέταση του υπεδάφους σε μια στατική ανάλυση. Ωστόσο, μια δυναμική ανάλυση της ανωδομής απαιτεί επίσης γνώση της δυναμικής αντίδρασης του εδάφους, η οποία με τη σειρά της βασίζεται σε δυναμικές ιδιότητες του εδάφους που μετρώνται επιτόπου και περιλαμβάνουν όλους τους περιβαλλοντικούς παράγοντες τη στιγμή της δοκιμής (Feldmann, et al., 2012).

3.5.2 Ακρόβαθρα – έδαφος

Για να ληφθεί υπόψη η αλληλεπίδραση εδάφους - ακρόβαθρου για τους στατικούς υπολογισμούς, πρέπει να επιλεγεί μια διαφορετική προσέγγιση. Η χρήση γραμμικών ελατηρίων που αντιπροσωπεύουν την επίκωση δεν είναι δυνατή σε αυτή την περίπτωση, καθώς:

- οι παραμορφώσεις είναι πολύ μεγάλες, γεγονός που απαιτεί τη χρήση μη γραμμικών ελατηρίων τουλάχιστον στο άνω μέρος του ακρόβαθρου για μετατοπίσεις τοίχων $v_h > v_{passive}$, 50% (παρόλο που τα εν λόγω μη γραμμικά ελατήρια έρχονται σε αντίθεση με την αρχή της υπέρθεσης φόρτισης) και
- το έδαφος στηρίζει μόνο το ακρόβαθρο από τη μία πλευρά, επομένως οι δυνάμεις στα ελατήρια μπορεί να γίνουν αρνητικές, απαιτώντας σε κάθε περίπτωση μη γραμμικά ελατήρια. Συνεπώς, το έδαφος αντιπροσωπεύεται γενικά από μια εξωτερική φόρτιση. Το ίδιο βάρος της στερεοποιημένης επίκωσης οδηγεί σε οριζόντια συνιστώσα ώθησης γαιών q_h (ώθηση γαιών σε κατάσταση ηρεμίας).



Σχήμα 20.- Ολόσωμο ακρόβαθρο πλήρους ύψους με μονή σειρά πασσάλων
(Rhodes)

Το φορτίο αυτό αυξάνεται από τις παραμορφώσεις που προκαλούνται λόγω θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού (ώθηση γαιών κατά τους θερινούς μήνες) και μειώνεται το χειμώνα (ώθηση γαιών κατά τους χειμερινούς μήνες). Το φορτίο "σε ηρεμία" ορίζεται ως "πλευρική ώθηση γαιών λόγω επιφόρτισης". Τα φορτία κατά τη διάρκεια των θερινών αλλά

και των χειμερινών μηνών είναι μικτά φορτία, ενώ τα πρόσθετα στοιχεία (D ώθηση γαιών τους θερινούς μήνες, D ώθηση γαιών τους χειμερινούς μήνες) αντιπροσωπεύουν «άλλη μεταβλητή δράση» που προκαλείται από τη φόρτιση λόγω θερμοκρασίας. Για να επιτραπεί η συνεπής εφαρμογή των συντελεστών ασφαλείας, το «χειμερινό» και το «θερινό» φορτίο διαχωρίζονται στο μόνιμο φορτίο «σε ηρεμία» ($g_{G, sup, ULS} = 1,35$, $g_{G, inf, ULS} = 1,0$) και στο πρόσθετο φορτίο «D ώθηση γαιών κατά τους θερινούς μήνες» και «D ώθηση γαιών κατά τους χειμερινούς μήνες» ($g_{Q, sup, ULS} = 1,5$, $g_{Q, inf, ULS} = 0$) Οι πρόσθετες φορτίσεις μπορούν να συνδυαστούν με τις «ΔΤ καλοκαιριού» και «ΔΤ χειμώνα» για τη μείωση του αριθμού των συνδυασμών φορτίου, καθώς οι εσωτερικές δυνάμεις και παραμορφώσεις που προκαλούνται από τις φορτίσεις αυτές είναι επαρκώς ομοπαράλληλες. Η ώθηση γαιών «σε ηρεμία» προσδιορίζεται σύμφωνα με το EN 1997-1:

$$q_0(z) = \sigma_0(z) = K_0 \cdot \gamma_{soil} \cdot z$$

Η ώθηση γαιών που αυξάνεται όσο αυξάνεται και το βάθος z , υπολογίζεται με βάση το συντελεστή ώθησης γαιών σε ηρεμία K_0 (σύμφωνα με το Παράρτημα Α του DIN EN 1997), το βάρος του εδάφους γ_{soil} . (Pak, Bigelow, & Feldman, 2017).



Σχήμα 21.- Μέθοδος οπλισμένης γης

3.5.3 Επιλεχθείσα μέθοδος

Για το σχεδιασμό του συστήματος επιχειρείται μια μίξη μεθόδων κατασκευής.

Το ακρόβαθρο θα είναι τύπου βαρύτητας αλλά παρότι το κατάστρωμα της γέφυρας θα ενώνεται με το επίχωμα, δεν θα συμπεριλαμβάνει πτερυγότοιχο. Η ανάγκη όμως περιορισμού του εδάφους και η συγκράτηση του μακριά από τον υποκείμενο αυτοκινητόδρομο παραμένει. Έτσι, αντί του πτερυγότοιχου επιλέγεται η λύση της οπλισμένης γης. Κατά αυτόν τον τρόπο γίνεται εξοικονόμηση σε σκυρόδεμα αποφεύγοντας της κατασκευή του πτερυγότοιχου.

Το ακρόβαθρο θα συνδέει τις κύριες δοκούς με τα υποστυλώματα με τη μέθοδο INTAB που προαναφέρθηκε. Έτσι θα εξασφαλίζεται η ολόσωμη σύνδεση τους. Για τον πάσσαλο επιλέγεται η μέθοδος που ακολουθείται στις ΗΠΑ. Ο πάσσαλος θα είναι δηλαδή μορφής Η και θα τοποθετείται σε υπερμεγέθη προδιάτρητη τρύπα ώστε να μειωθεί η οριζόντια αντίσταση του εδάφους σε μετακινήσεις του πασσάλου κοντά στην κεφαλή του. Στη συνέχεια εμπηγνύεται ο πάσσαλος συνολικού μήκους 12 m με τον ισχυρό

άξονα κάθετα στην διεύθυνση της γέφυρας. Η τρύπα γεμίζεται έπειτα με κατάλληλα υλικό χαμηλής αντίστασης όπως Styrofoam. Αυτή η τρύπα θα είναι για τα πρώτα 5.5 m γιατί εκεί θα βοηθάει. Ο λόγος που δεν συνεχίζει και πιο βαθιά η τρύπα είναι ότι ο πάσσαλος χρειάζεται να έχει επαφή με το περιβάλλον έδαφος για να αναπτύξει πλευρική τριβή και να μπορέσει να φέρει το βάρος της γέφυρας.

Εφόσον δεν υπάρχουν γεωτεχνικές μελέτες για το έδαφος, θα ληφθούν τυχαίες εδαφικές σταθερές. Τα πρώτα 5.5 m θεωρείται ότι είναι συμπιεσμένη άργιλος, αφού πρόκειται για το τεχνητό επίκωμα που θα έχει συμπιεστεί για να υποστηρίξει την οδική κυκλοφορία πάνω του. Το υποκείμενο στρώμα θεωρείται πως είναι χαλαρή άμμος. Τα μέτρα ελαστικότητας των δύο στρώσεων είναι $E = 60 \text{ MPa}$ και $E = 15 \text{ MPa}$ αντίστοιχα.

Η αλληλεπίδραση με το έδαφος θα προσομοιωθεί με τη χρήση ελατηρίων. Αυτά τοποθετούνται ανά 1 m. Επειδή όμως ο πάσσαλος είναι μέσα στην υπερμεγέθη τρύπα για τα πρώτα 5.5 m, αμελούνται εκεί τα ελατήρια. Σε αυτό το τμήμα όμως ο πάσσαλος δέχεται ωθήσεις γαιών που υπολογίζονται με τον τύπο για τις ωθήσεις γαιών σε ηρεμία.

4 ΔΡΑΣΕΙΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

4.1 Μόνιμες δράσεις

Ως μόνιμες νοούνται οι δράσεις που υφίστανται μικρές μεταβολές κατά την περίοδο αναφοράς.

Πίνακας 3.- Μόνιμες δράσεις

Σύμβολο	Περιγραφή	Είδος
G1	Ίδια βάρη φορέα (δομικός κάλυβας, οπλισμός, σκυρόδεμα κ.λ.π.)	Άμεση
G2	Λοιπά μόνιμα (ασφαλτικές στρώσεις, στηθαία ασφαλείας, κιγκλιδώματα πεζών, παραπέτα κ.λ.π.)	Άμεση
C	Ερπυσμός	Έμμεση
S	Συστολή ξήρανσης	Έμμεση

4.2 Μεταβλητές δράσεις

Μεταβλητές είναι οι δράσεις οι οποίες έχουν μικρή χρονική διάρκεια και μεταβάλλονται σημαντικά κατά τη διάρκεια ζωής του έργου.

Πίνακας 4.- Μεταβλητές δράσεις

Σύμβολο	Περιγραφή	Είδος
Q	Φορτία κυκλοφορίας και φορτία πεζοδρομίων	Άμεση
T	Θερμοκρασία (ομοιόμορφη, ανομοιόμορφη)	Άμεση
W	Άνεμος (φορτισμένη, αφόρτιστη γέφυρα)	Άμεση
Dc	Αντικατάσταση αναρτήρων	Έμμεση

4.2.1 Φορτία κυκλοφορίας Q

- Υποδιαίρεση οδοστρώματος σε ονομαστικές λωρίδες

Το πλάτος του οδοστρώματος w μετράται μεταξύ των εσωτερικών ορίων των στηθαιών ασφαλείας. Το πλάτος w υποδιαιρείται σε ονομαστικές λωρίδες, το πλάτος w_1 και ο αριθμός n_1 των οποίων δίνεται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 5.- Αριθμός και πλάτος ονομαστικών λωρίδων (Βάγιας, Ηλιόπουλος, & Θανόπουλος, Σχεδιασμός Σύμμικτων Γεφυρών από Χάλυβα και Οπλισμένο Σκυρόδεμα, 2016)

Πλάτος οδοστρώματος w	Αριθμός ονομαστικών λωρίδων	Πλάτος ονομαστικής λωρίδας w_1	Πλάτος εναπομένουσας επιφάνειας
$w < 5,4 \text{ m}$	$n_1 = 1$	3 m	$w - 3 \text{ m}$
$5,4 \text{ m} \leq w < 6 \text{ m}$	$n_1 = 2$	$\frac{w}{2}$	0
$6 \text{ m} \leq w$	$n_1 = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right)$	3 m	$w - 3 \times n_1$

ΣΗΜΕΙΩΣΗ Για παράδειγμα, για πλάτος οδοστρώματος ίσο με 11m, $n_1 = \text{Int}\left(\frac{w}{3}\right) = 3$, και το πλάτος της εναπομένουσας επιφάνειας είναι $11 - 3 \times 3 = 2\text{m}$.

Επομένως, για το υπό μελέτη οδόστρωμα πλάτους 9.65 m ($w > 6 \text{ m}$), ο αριθμός ονομαστικών λωρίδων θα είναι $n_1 = 3$ και το πλάτος της εναπομένουσας επιφάνειας ($w - 3n_1$) είναι 0.65 m.

- Κατακόρυφα φορτία

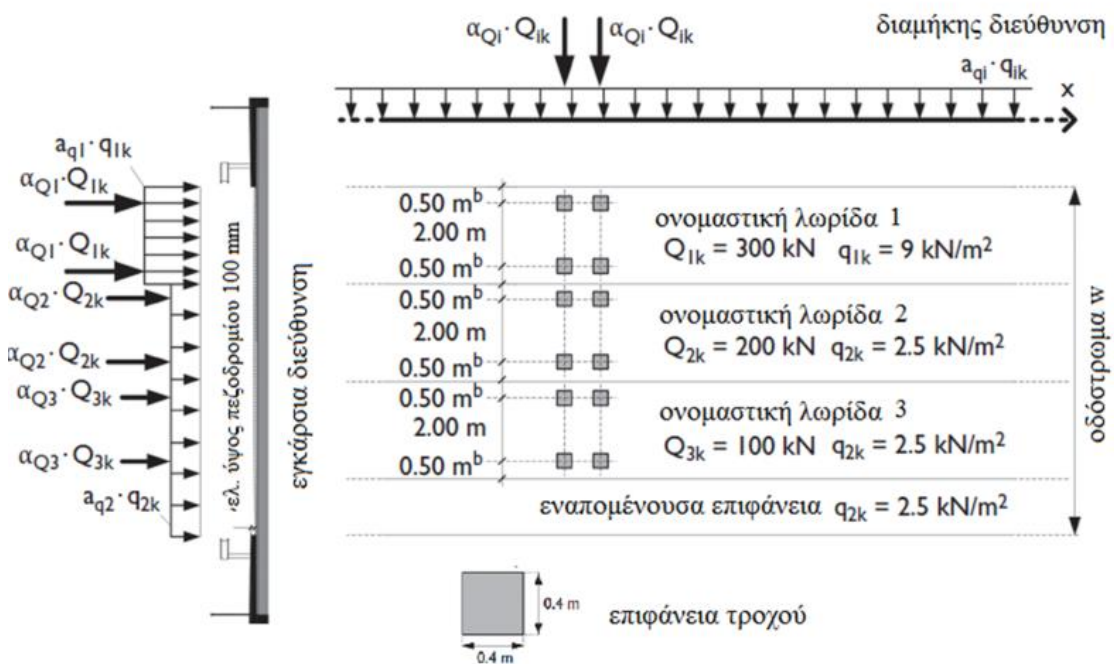
Τα φορτία κυκλοφορίας ως μεταβλητές δράσεις τοποθετούνται στη δυσμενέστερη θέση, πράγμα που σημαίνει ότι τοποθετούνται κατά τη

διαμήκη και εγκάρσια έννοια μόνο σε περιοχές που οι γραμμές επιρροής των εντατικών μεγεθών ή των παραμορφώσεων έχουν θετικό ή αρνητικό πρόσημο. Η τρέχουσα κυκλοφορία σύμφωνα με τον EN1991-2 καλύπτεται από πρότυπες φορτίσεις (Load Models – LM). Οι πρότυπες φορτίσεις ισχύουν για φορτιζόμενα μήκη έως 200 m και άρα καλύπτουν την εν λόγω γέφυρα.

Χρησιμοποιείται η πρότυπη φόρτιση 1 (LM1) που είναι κατάλληλη τόσο για τοπικούς όσο και για καθολικούς ελέγχους. Καλύπτει τις περισσότερες επιρροές της κυκλοφορίας φορτηγών και επιβατηγών αυτοκινήτων. Αποτελείται από δύο επιμέρους συστήματα:

- Διαξονικά συγκεντρωμένα φορτία TS (tandem system) μεγέθους $\alpha_{Qi} \cdot Q_k$ ανά άξονα, όπου $\alpha_{Qi} = 0.9$
- Ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία UDL, μεγέθους $\alpha_{qi} \cdot q_k$, όπου $\alpha_{qi} = 1$

Πίνακας 6.- Πρότυπη φόρτιση 1 (LM1) (Βάγιας, Ηλιόπουλος, & Θανόπουλος, Σχεδιασμός Σύμμικτων Γεφυρών από Χάλυβα και Οπλισμένο Σκυρόδεμα, 2016)



Τα κατακόρυφα φορτία πεζοδρομίων τοποθετούνται σε συνδυασμό με τα φορτία κυκλοφορίας και περιλαμβάνουν ένα ομοιόμορφα καταναμημένο φορτίο $q_{fk,comb} = 3kN/m^2$.

❖ Οριζόντιες δυνάμεις

Στις οριζόντιες δυνάμεις περιλαμβάνονται οι δυνάμεις πέδησης και επιτάχυνσης. Λόγω ευθύγραμμης χάραξης του φορέα δεν εμφανίζονται φυγόκεντρες δυνάμεις.

Η δύναμη πέδησης είναι μια διαμήκης δύναμη που δρα στο επίπεδο της επίστρωσης του οδοστρώματος και μεταφέρεται στα εφάδρανα. Η χαρακτηριστική τιμή της δύναμης πέδησης Q_{lk} για ολόκληρο το πλάτος του οδοστρώματος είναι ίση με:

$$Q_{lk} = 0.6 \cdot a_{Q1} \cdot (2 \cdot Q_{1k}) + 0.10 \cdot a_{q1} \cdot q_{1k} \cdot w_1 \cdot L$$

όπου $Q_{1k} = 300 kN$ και $180 \cdot a_{Q1} \leq Q_{lk} \leq 900 kN$

$$\text{Άρα } Q_{lk} = 401 kN$$

Αυτή η δύναμη ασκείται κατά μήκος του άξονα οποιασδήποτε λωρίδας.

Οι δυνάμεις επιτάχυνσης είναι ίσες και αντίθετες των δυνάμεων πέδησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εφαρμόζονται δυνάμεις $\pm Q_{lk}$ που καλύπτουν και τις δύο περιπτώσεις.

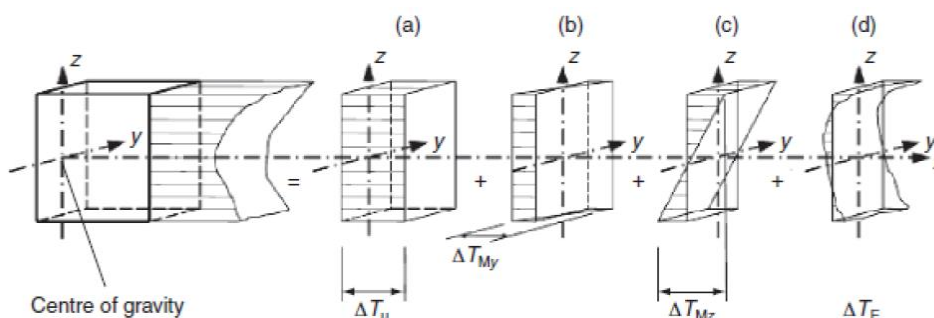
4.2.2 Θερμικές δράσεις

Η συστολή και η διαστολή των γεφυρών από σκυρόδεμα παραλαμβάνεται με εφάδρανα και αρμούς διαστολής στην περίπτωση συστήματος απομονωμένης γέφυρας. Ωστόσο, έχει ως αποτέλεσμα την επιβολή κυκλικού οριζόντιου φορτίου στο ακρόβαθρο σε περίπτωση ολόσωμης γέφυρας. Αυτό με τη σειρά του προκαλεί εξαιρετικά υψηλότερο SSI (soil – structure interaction), γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε υπέρμετρες ωθήσεις γαιών πίσω από τα ακρόβαθρα και επιπλέον σε πιθανή αστοχία του εδάφους και της κατασκευής.

Σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των κινητών φορτίων σε απομονωμένες γέφυρες, στο μέγεθος των θερμικών φορτίων πρέπει να

δοθεί ίση σημασία, δεδομένου ότι υπάρχει περιορισμός για την κίνηση του φορέα της γέφυρας και ως εκ τούτου πρέπει να ληφθούν υπόψη πολύπλοκοι υπολογισμοί με λεπτομέρειες των εγγενών τάσεων.

Η εξέταση των θερμοκρασιακών επιρροών γίνεται με βάση σχετικές διατάξεις που περιλαμβάνονται στον EN1991-1-5, παράγραφος 6, και με πρόσθετα στοιχεία που περιλαμβάνονται στο Εθνικό Προσάρτημα. Αυτές χωρίζονται σε 4 ανεξάρτητες συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα ΔT_N κατανέμεται ομοιόμορφα στο ύψος της διατομής προκαλώντας διαμήκεις παραμορφώσεις. Οι συνιστώσες ΔT_{MY} και ΔT_{MZ} προκαλούν στροφές ως προς τον ισχυρό και ασθενή άξονα της διατομής αντίστοιχα. Η τελευταία συνιστώσα ΔT_E αντιπροσωπεύει το μη γραμμικό τμήμα του θερμοκρασιακού προφίλ και μπορεί να προκαλέσει παραμορφώσεις εκτός επιπέδου.



Σχήμα 22.- Ανάλυση θερμοκρασιακού προφίλ σε 4 συνιστώσες: ΔT_N , ΔT_{MY} , ΔT_{MZ} και ΔT_E

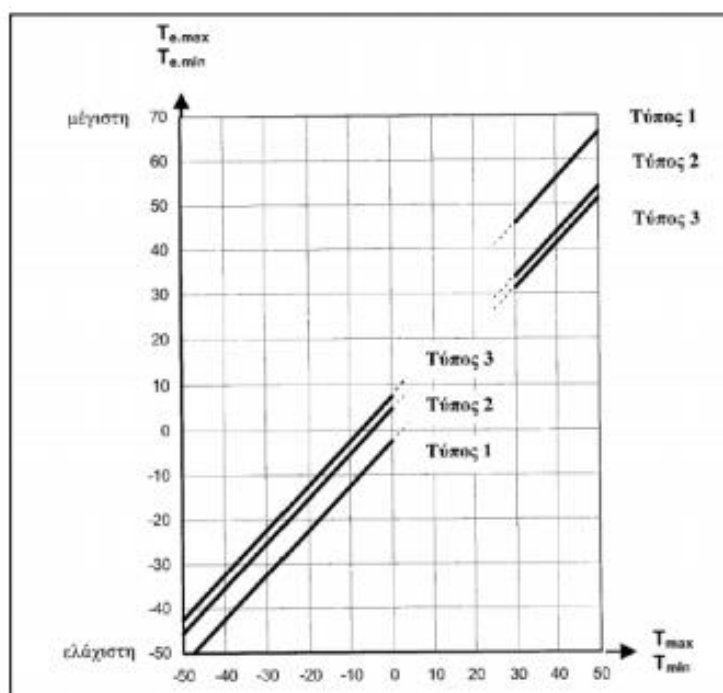
Για τη θέση του έργου λαμβάνονται χαρακτηριστικές τιμές για την ελάχιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος υπό σκιά (T_{min}) και τη μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος υπό σκιά (T_{max}) από ισοθερμικές καμπύλες. Οι χαρακτηριστικές αυτές τιμές θα πρέπει να αντιστοιχούν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος υπό σκιά στο μέσο επίπεδο της στάθμης της θάλασσας μιας επίπεδης περιοχής με ετήσια πιθανότητα υπέρβασης 0,02.

Λαμβάνουμε για την περιοχή της Δυτικής Μακεδονίας ότι οι θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ $T_{min}=-20^{\circ}\text{C}$ και $T_{max}=+45^{\circ}\text{C}$ και ότι η θερμοκρασία της γέφυρας είναι $T_0=10^{\circ}\text{C}$. Η συνιστώσα ομοιόμορφης

θερμοκρασίας εξαρτάται από την ελάχιστη και τη μέγιστη θερμοκρασία που θα αναπτυχθεί σε μια γέφυρα. Εξ αυτών προκύπτει ένα εύρος ομοιόμορφων θερμοκρασιακών μεταβολών, που έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή μήκους των μελών ενός μη παρεμποδιζόμενου φορέα.

Συνιστώσα ομοιόμορφης θερμοκρασίας ΔT_N

Προσδιορίζονται η ελάχιστη και η μέγιστη συνιστώσα ομοιόμορφης γέφυρας ($T_{e,min}$) και ($T_{e,max}$) από τον παρακάτω πίνακα :



Σχήμα 23.- Σχέση μεταξύ $T_{e,min}$, $T_{e,max}$ και T_{min} , T_{max}

Χρησιμοποιείται η καμπύλη για τον Τύπο 2, που αναφέρεται σε σύμμικτο κατάστρωμα. Επομένως, λαμβάνουμε τις τιμές $T_{e,min} = -15^\circ\text{C}$ και $T_{e,max} = 45^\circ\text{C}$.

Για συστολή η χαρακτηριστική τιμή του μέγιστου εύρους της συνιστώσας της ομοιόμορφης θερμοκρασίας της γέφυρας $\Delta T_{N,exp}$ θα πρέπει να λαμβάνεται από τη σχέση $\Delta T_{N,con} = T_o - T_{e,min}$ και για διαστολή η χαρακτηριστική τιμή του μέγιστου εύρους της συνιστώσας της ομοιόμορφης θερμοκρασίας της γέφυρας $\Delta T_{N,exp}$, θα πρέπει να λαμβάνεται από τη σχέση $\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_o$.

Άρα, $\Delta T_{N,con} = 15 - (-15) = 30^{\circ}\text{C}$ και $\Delta T_{N,exp} = 50 - 10 = 40^{\circ}\text{C}$ τα οποία θα εφαρμοθούν σε όλον το φορέα.

Συνιστώσα θερμοκρασιακής διαφοράς ΔT_M

Η συνιστώσα αυτή λαμβάνει υπ' όψιν την ανομοιόμορφη θερμοκρασιακή μεταβολή των μελών της γέφυρας. Περιλαμβάνει μια συνιστώσα γραμμικώς μεταβαλλόμενης διαφοράς θερμοκρασίας ως προς τον οριζόντιο άξονα, μια παρόμοια συνιστώσα ως προς τον κατακόρυφο άξονα και μία μη γραμμική συνιστώσα θερμοκρασίας που προκαλεί αυτεντατική κατάσταση. Από αυτές τις συνιστώσες, μόνο η πρώτη λαμβάνεται υπ' όψιν στο σχεδιασμό γεφυρών. Σύμφωνα με αυτήν, ΔT_M είναι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της άνω και κάτω επιφάνειας του φορέα. Εξετάζονται δύο τιμές, η $\Delta T_{M,heat}$, εάν είναι η άνω επιφάνεια θερμότερη από την κάτω, και η $\Delta T_{M,cool}$ εάν ισχύει το αντίθετο.

Για τις σύμμικτες γέφυρες λαμβάνουμε τις τιμές $\Delta T_{M,heat}=15^{\circ}\text{C}$ και $\Delta T_{M,cool}=-18^{\circ}\text{C}$ για το κατάστρωμα και $\Delta T_{M,heat}=18^{\circ}\text{C}$ και $\Delta T_{M,cool}=-13^{\circ}\text{C}$

Συνδυασμός ΔT_N και ΔT_M

Σε ολόσωμες γέφυρες, οι θερμοκρασιακές συνιστώσες συνδυάζονται και θεωρούνται ως ενιαία δράση ως εξής:

$$\Delta T_{M,heat} \text{ (ή } \Delta T_{M,cool}) + \omega_N \cdot \Delta T_{N,exp} \text{ (ή } \Delta T_{N,con})$$

ή

$$\omega_M \cdot \Delta T_{M,heat} \text{ (ή } \Delta T_{M,cool}) + \Delta T_{N,exp} \text{ (ή } \Delta T_{N,con})$$

Κάθε συνδυασμός θεωρείται ως μία δράση και εξετάζεται ο δυσμενέστερος συνδυασμός και είναι $\omega_N = 0.35$ και $\omega_M = 0.75$

4.2.3 Άνεμος W



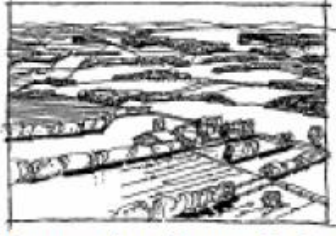

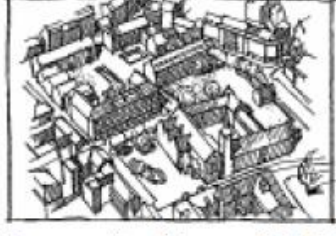
Η δράση του ανέμου καταπονεί το φορέα οριζόντια. Ο άνεμος ασκείται ως γραμμικά κατανεμημένο φορτίο στις κύριες δοκούς. Η διαδικασία που ακολουθείται προκύπτει από τον Ευροκώδικα.

Ως βασική ταχύτητα ανέμου επιλέγεται $v_{b,0}=27$ m/s, καθώς δεν βρισκόμαστε σε νησί ή κοντά σε παράλια και c_{dir}, c_{seas} λαμβάνονται ίσα με τη μονάδα.

Άρα η βασική ταχύτητα ανέμου $v_b = c_{dir} * c_{seas} * v_{b,0} = 27$ m/s

Επίσης, επιλέγεται Κατηγορία Εδάφους I $\rightarrow z_0=0.01$ m , $z_{min}=1$ m , $z_{II}=0.05$, $z_{max}=200$ m

Πίνακας 7.- Κατηγορίες εδαφών για φόρτιση ανέμου

 <p>Κατηγορία εδάφους 0: Θάλασσα, παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα</p>	 <p>Κατηγορία εδάφους I: Λίμνες ή περιοχή με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια</p>
 <p>Κατηγορία εδάφους II: Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτήρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων</p>	 <p>Κατηγορία εδάφους III: Περιοχή με κανονική κάλυψη από βλάστηση ή από κτήρια ή από μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση)</p>
 <p>Κατηγορία εδάφους IV: Περιοχή στην οποία τουλάχιστον το 15 % της επιφάνειας καλύπτεται με κτήρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15 m</p>	

Ο συντελεστής ταχύτητας, $c_r(z)$ δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

Ενώ το $c_0=1$ (απλοποιητικά)

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \text{ όπου } k_r = 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07}$$

Ακόμη, η μέση ταχύτητα δίνεται ως: $v_m = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$

Ενώ η ένταση των στροβιλισμών $I(z)$ και ο συντελεστής έκθεσης $c_e(z)$ αντίστοιχα δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$I_v(z) = \frac{1}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \& \quad c_e(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot (1 + 7 \cdot I_r(z))$$

Τέλος, η πίεση του ανέμου επί του εκάστοτε μέλους είναι:

$$q = q_b \cdot c_e(z), \text{ όπου } q_b = \frac{\rho \cdot v_b^2}{2} \text{ με } \rho = 1,25 \text{ kg/m}^3 \text{ (πυκνότητα αέρα)}$$

- **Κατάστρωμα:**

Ύψος αναφοράς του καταστρώματος ορίζουμε την απόσταση του καταστρώματος από το έδαφος $\rightarrow z_e = 5.5\text{m}$

$$k_r = 0.19 \cdot \left(\frac{0.01}{0.05}\right)^{0.07} = 0.17 \quad \rightarrow \quad c_r(5.5) = 0.17 \cdot \ln\left(\frac{5.5}{0.01}\right) = 1.07$$

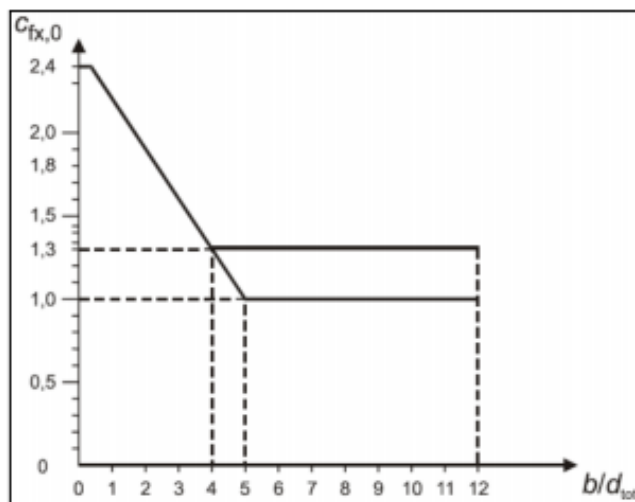
$$v_m = 1.07 \cdot 1 \cdot 27 = 28.89 \text{ m/s}$$

$$I_v(5.5) = \frac{1}{1 \cdot \ln\left(\frac{5.5}{0.01}\right)} = 0.1585 \quad \& \quad c_e(5.5) = 1.07 \cdot 1 \cdot (1 + 7 \cdot 0.1585) = 2.2572$$

$$q_b = \frac{1,25 \cdot 27^2}{2} = 455.625 \text{ N/m}^2$$

$$\text{Άρα } q = 455.625 \cdot 2,2572 = 1028.44 \text{ N/m}$$

- Η τελική γραμμική πίεση δίνεται από τη σχέση : $q_i = c_{f_{x,0}} \cdot d_i \cdot q$



Σχήμα 24.- Συντελεστής δύναμης $c_{fx,0}$ για γέφυρες

Επίσης, για το εκάστοτε μέλος ορίζεται ο συντελεστής $c_{fx,0}$ από τον πάνω πίνακα.

Για τη δοκό (κατάστρωμα) :

$$\left. \begin{array}{l} b_{\text{καταστρώματος}}=13,65\text{m} \\ d_{\text{δοκού}}= 1.0\text{m} \\ d_{\text{πλάκας}}=0.30 \text{ m} \\ d_{\text{οχημάτων}}=3.00 \text{ m} \\ d_{\text{tot}} = 4.30 \text{ m} \end{array} \right\} \quad b/d_{\text{tot}} = 3.17 \longrightarrow c_{fx,0} = 1.55$$

Άρα η τελική πίεση είναι:

$$q_{\text{δοκού}} = 1.55 \cdot 4.3 \cdot 1.03 = 6.87 \text{ kN/m}$$

4.3 Τυχηματικές δράσεις

Οφείλονται σε πρόσκρουση οχημάτων όπως δίνονται στο EN 1991-2.

Άλλες τυχηματικές δράσεις δίνονται στο EN 1991-1-7.

4.4 Σεισμικές δράσεις

Περιγράφονται στους Ευρωκώδικες Αντισεισμικού Σχεδιασμού EN 1998-1 και EN 1998-2.

Η σεισμική δύναμη προσδιορίζεται από το φάσμα απόκρισης (EK8). Ο αντισεισμικός σχεδιασμός της εν λόγω γέφυρας γίνεται σύμφωνα με τον EK8, Μέρος 2, όπου οι σεισμικές δράσεις αναλαμβάνονται κυρίως από τα ακρόβαθρα (μέσω εφεδράνων) και ο έλεγχος γίνεται για ελαστική συμπεριφορά ($q=1$).

Η γέφυρα θα πρέπει να διατηρεί την ακεραιότητα της και επομένως οι βλάβες των μελών που αναλαμβάνουν τις σεισμικές δράσεις απαιτείται να είναι περιορισμένες και εύκολα επιδιορθώσιμες.

Η γέφυρα βρίσκεται σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II, με κατηγορία εδάφους B, ενώ επιλέγεται Κατηγορία σπουδαιότητας II.

Συνεπώς, προκύπτουν οι παρακάτω παράμετροι/συντελεστές:

α_{gr}	γ	α_g	T_B	T_C	T_D	S
0.24g	1.00	2.4	0.15	0.50	2.50	1.20

Ο προσδιορισμός της μάζας γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν το σύνολο των μόνιμων φορτίων της γέφυρας με τις χαρακτηριστικές τιμές τους, καθώς και τις οιονεί μόνιμες τιμές των μεταβλητών δράσεων με τιμή $\psi_{21} \cdot Q_{1k}$.

Σε περίπτωση γεφυρών με βαρεία κυκλοφορία, ο συντελεστής συμμετοχής ψ_{21} λαμβάνεται για οδικές γέφυρες $\psi_{21}=0.2$. Ο συντελεστής ψ_{21} εφαρμόζεται στο ομοιόμορφο φορτίο του Μοντέλου Φόρτισης 1 (LM1). Το προκύπτον πρόσθετο φορτίο μπορεί να κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη τη γέφυρα. Ενδείκνυται ο συντελεστής συμπεριφοράς να λαμβάνεται ίσος με μονάδα, $q=1.0$, δηλαδή ελαστική συμπεριφορά.

Με τη βοήθεια του προγράμματος SOFiSTiK υπολογίστηκε η μάζα της γέφυρας που ισούται με $m=509.417$ tn .

Ο σεισμικός συνδυασμός σχεδιασμού των αποτελεσμάτων των δράσεων δίνεται από την σχέση: $E_d=G_k + A_{Ed} + \psi_{21} \cdot Q_{1k}$

Όπου:

G_k : οι χαρακτηριστικές τιμές των μόνιμων φορτίων

A_{Ed} : ο δυσμενέστερος συνδυασμός σεισμικών δράσεων

Q_{1k} : η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου κυκλοφορίας

ψ_{21} : συντελεστής συμμετοχής

Τέλος, τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούνται, ώστε να εξασφαλίζεται όλκιμη συμπεριφορά του φορέα είναι τα ακόλουθα:

- Έλεγχος αντοχής χαλύβδινων ή σύμμικτων μελών – Ικανοτικός έλεγχος.
- Εξασφάλιση ολκιμότητας

- Έλεγχοι μετακινήσεων
- Εφέδρανα και σεισμικοί σύνδεσμοι

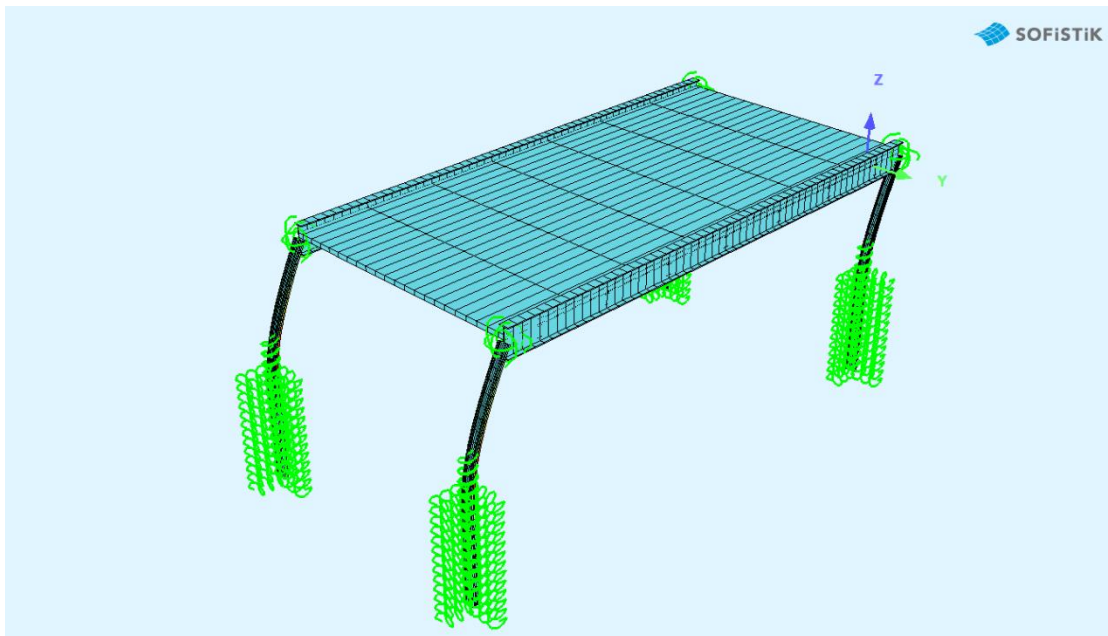
Σχεδιασμός στο SOFiSTiK

Εφαρμόζοντας τη σεισμική δράση για τον συνδυασμό $G+0,2*Q$, για σεισμό και στις δύο διευθύνσεις, με απόσβεση $\zeta=5\%$, προκύπτει:

1η Ιδιομορφή

$$f_1=0.20 \text{ Hz} \rightarrow T_1=5 \text{ sec}$$

$M_{\text{eff}} = 99,06\% > 90\%$ άρα η 1η ιδιομορφή αρκεί για σεισμό κατά X

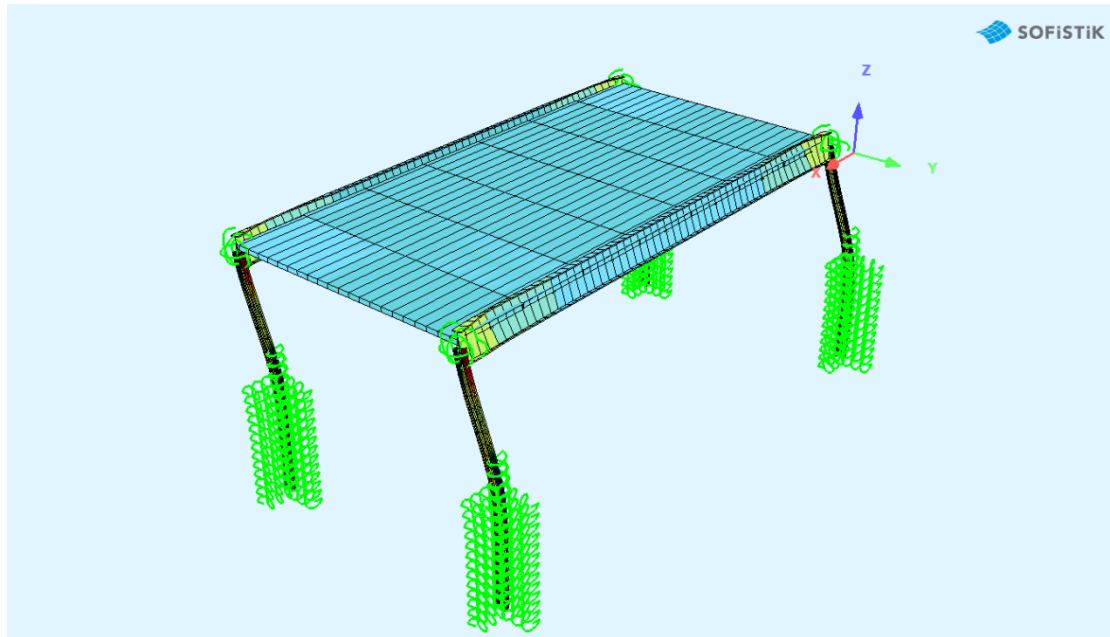


Σχήμα 25.- 1η ιδιομορφή

2η Ιδιομορφή

$$f_1=0.69 \text{ Hz} \rightarrow T_1=1.45 \text{ sec}$$

$M_{\text{eff}} = 98,96\%$ άρα η 2η ιδιομορφή αρκεί για σεισμό κατά Y



Σχήμα 26.- 2^η ιδιομορφή

Επίσης, το SOFiSTiK δίνει τα εξής αποτελέσματα:

$$P_x = 1199.4 \text{ kN}$$

$$P_y = 1199.4 \text{ kN}$$

Υπό το σεισμικό συνδυασμό, ελέγχουμε αν κάποια διατομή διαρρέει.

Όλες όμως περνούν τους ελέγχους, καθώς στην ΟΚΑ έχουμε κρισιμότερες εντάσεις.

5 ΠΡΟΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ

Η προδιαστασιολόγηση αφορά μια αρχική εκτίμηση του μεγέθους των δοκών, καθώς δεν χρειάζεται καθολική ανάλυση για τα εντατικά μεγέθη που του ασκούνται. Τα μεγέθη που προκύπτουν δεν θα αλλάξουν σημαντικά κατά την καθολική ανάλυση και παράλληλα θα είναι μια πρώτη επιβεβαίωση ότι το μοντέλο δίνει αληθοφανή αποτελέσματα.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, το στατικό σύστημα των δοκών είναι αμφιέριστο καθώς αυτές συνδέονται αμφιαρθρωτά στα ακρόβαθρα. Επομένως, για την προδιαστασιολόγηση τους αρκεί να βρούμε ένα συνεργαζόμενο πλάτος της πλάκας σκυροδέματος στο οποίο θα κατανείμουμε ομοιόμορφα τα φορτία και έτσι θα επιλυθούν ως αμφιέριστες δοκοί.

Η επίλυση θα γίνει ξεχωριστά για τις εσωτερικές και τις εξωτερικές δοκούς λόγω των διαφορετικών φορτίων που παραλαμβάνουν.

Οι διαδοκίδες τοποθετούνται ανά 4 m, επομένως το πλάτος επιρροής των φορτίων από το βάρος της πλάκας είναι 4 m.

Τα **μόνιμα** φορτία επί της διαδοκίδας :

- $g_{\text{πλάκας}} = 25 \cdot 0,3 = 7,5 \text{ kN/m}^2$

Το συμπαγές πάχος πλάκας είναι 25 cm και το ισοδύναμο πάχος λόγω πτυχώσεων είναι 5 cm.

- $g_{\text{χαλυβδόφυλλου}} = 0,175 \text{ kN/m}^2$
- $g_{\text{πεζοδρ}} = 25 \cdot 0,27 = 6,75 \text{ kN/m}^2$
- $g_{\text{ασφαλτικών}} = 24 \cdot 0,1 = 2,4 \text{ kN/m}^2$
- $g_{\text{εξομάλυνσης}} = 0,5 \text{ kN/m}^2$
- $P_{\text{στηθαίου_αναχ}} = 1 \text{ kN/m}$
- $P_{\text{στηθαίου_πεζ}} = 0,5 \text{ kN/m}$

Τα **κινητά** φορτία επί της διαδοκίδας :

- TS : 4x135 kN
4x90 kN
4x45 kN
- UDL : 9 kN/m²
2,5 kN/m²
3 kN/m² πεζοδρομίων

Στη συνέχεια γίνεται η γραμμή επιρροής της ροπής στο μέσο του ανοίγματος της διαδοκίδας και της τέμνουσας στην άκρη της διαδοκίδας και τοποθετούνται τα φορτία στις δυσμενέστερες θέσεις.

Προκύπτουν οι ροπές στο άνοιγμα λόγω μονίμων φορτίων:

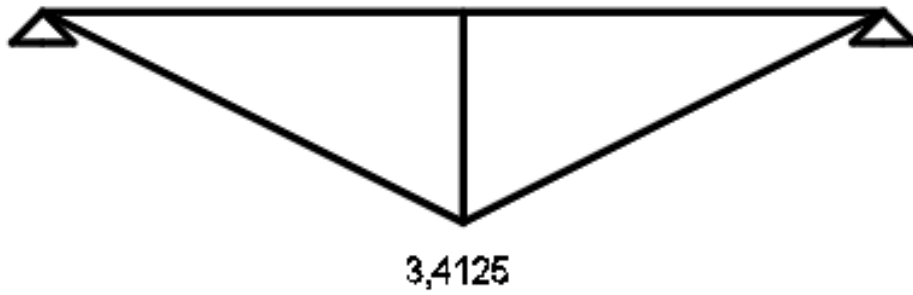
- $M_{g_{\pi\lambda}} = 0,5 \cdot 7,5 \cdot 3,4125 \cdot 13,65 \cdot 4 = 698,71 \text{ kNm}$
- $M_{g_{\chi\alpha\lambda\nu\beta\delta}} = 0,5 \cdot 0,175 \cdot 3,4125 \cdot 13,65 \cdot 4 = 16,3 \text{ kNm}$
- $M_{g_{\text{πεζοδρ}+\text{γασφ}}} = \left[2 \cdot (2 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 6,75) + 2 \cdot \left(\frac{1+3,4125}{2} \cdot 4,825 \cdot 2,4 \right) \right] \cdot 4 = 258,39 \text{ kNm}$
- $M_{g_{\xi\omicron\mu}} = 0,5 \cdot 0,5 \cdot 3,4125 \cdot 13,65 \cdot 4 = 46,58 \text{ kNm}$
- $M_{\sigma\tau\eta\theta,\omicron\chi\eta\mu} = (1 \cdot 1 + 1 \cdot 1) \cdot 4 = 8 \text{ kNm}$

$$M_G = 698,71 + 16,3 + 258,39 + 46,58 + 8 = 1027,98 \text{ kNm}$$

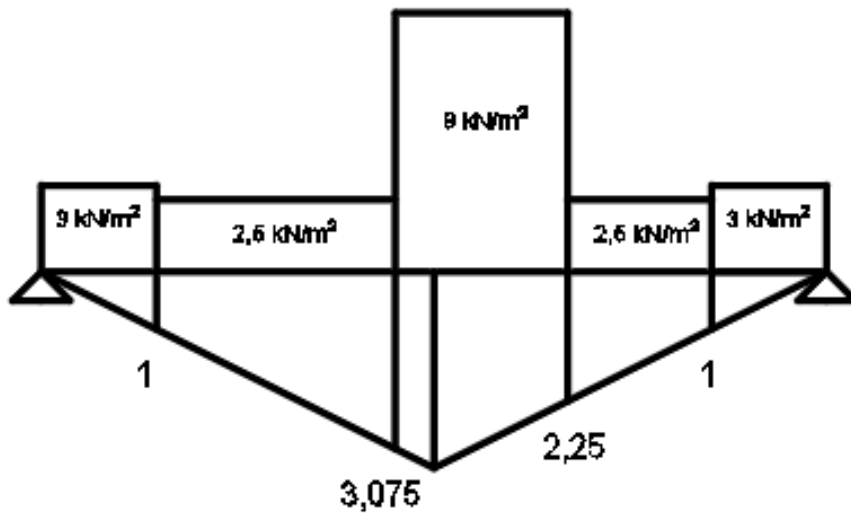
Και οι ροπές στο άνοιγμα λόγω κινητών:

- $M_{UDL} = \left[4,15 \cdot 2,5 \cdot \frac{3,075+1}{2} + 2,5 \cdot 2,5 \cdot \frac{1+2,25}{2} + 0,675 \cdot 9 \cdot \frac{3,075+3,4125}{2} + 2,325 \cdot 9 \cdot \frac{3,4125+2,25}{2} + 2 \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 3 \right] \cdot 4 = 465 \text{ kNm}$
- $M_{TS} = 90 \cdot (1,825 + 2,825) + 135 \cdot (3,325 + 2,5) + 45(2 + 1) = 1339,87 \text{ kNm}$

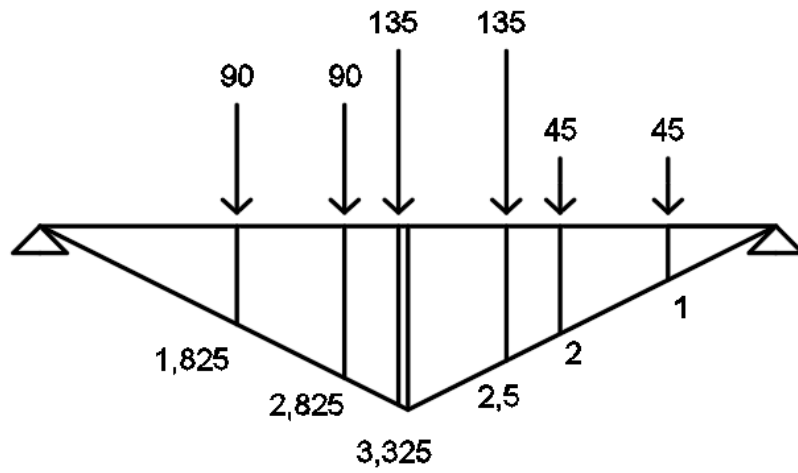
$$M_Q = 465 + 1339,87 = 1804,87 \text{ kNm}$$



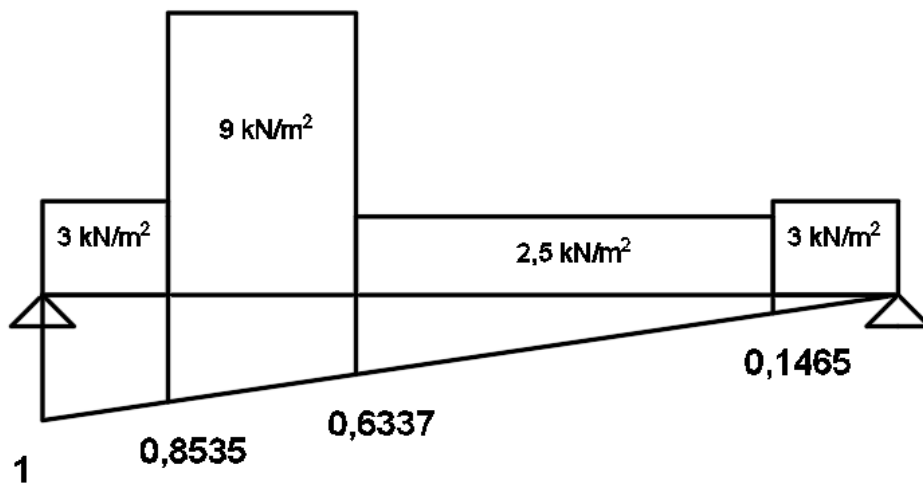
Σχήμα 27.- Γραμμή επιρροής της ροπής στο άνοιγμα



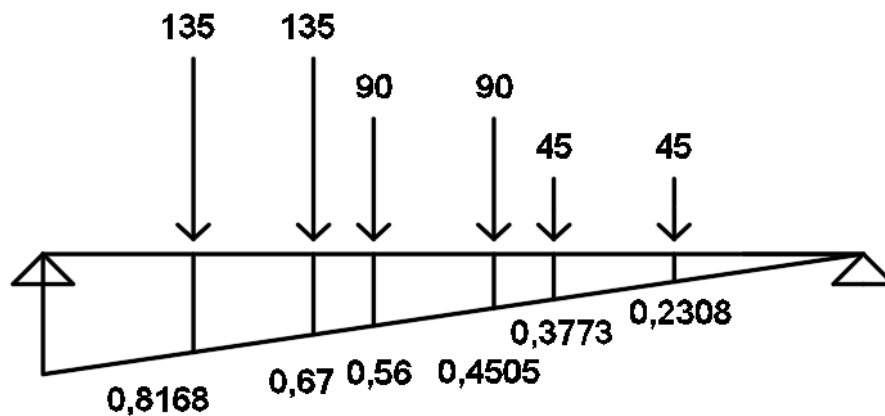
Σχήμα 28.- Γραμμή επιρροής της ροπής στο άνοιγμα για Q_{UDL}



Σχήμα 29.- Γραμμή επιρροής της ροπής στο άνοιγμα για Q_{TS}



Σχήμα 30.- Γραμμή επιρροής της τέμνουσας στην στήριξη για Q_{UDL}



Σχήμα 31.- Γραμμή επιρροής της τέμνουσας στην στήριξη για Q_{Ts}

Η συνολική ροπή που προκύπτει τελικώς από την προδιαστασιολόγηση είναι :

$$M_{Ed} = \gamma_G * M_G + \gamma_Q * M_Q = 3824,35 \text{ kNm}$$

και η συνολική τέμνουσα στη στήριξη είναι :

$$V_G = 337.5 \text{ kN}$$

$$V_Q = 449.23 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 1062.08 \text{ kN}$$

Η διαστασιολόγηση της διαδοκίδας έγινε ως εξής : $\gamma_G * M_G + \gamma_Q * M_Q$

Αρχικά, διαστασιολογήθηκε ο κορμός, ώστε να αντέχει τη δρώσα τέμνουσα. Η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων έγινε με υπολογισμούς στο Excel.

Αναλυτικότερα, θεωρείται ο κορμός της διαδοκίδας ως μία πλάκα μήκους $a = 13,65 \text{ m}$, ύψους $h_w = 58,2 \text{ cm}$ και πάχους $t_w = 1,45 \text{ cm}$ ($\frac{a}{h_w} = 23,45 > 1$)

Ο συντελεστής κύρτωσης υπολογίζεται $k_\tau = 5,34 + 4 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 = 5,34$.

Βρίσκουμε το λόγο $\frac{h_w}{t_w} = 40,14 > \frac{31}{1,2} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau} = 48,6$ οπότε απαιτείται έλεγχος κύρτωσης στον κορμό. Για τον υπολογισμό αγνοούμε τη συνεισφορά των πελμάτων στην αντοχή του κορμού σε τέμνουσα. Υπολογίζουμε την τάση

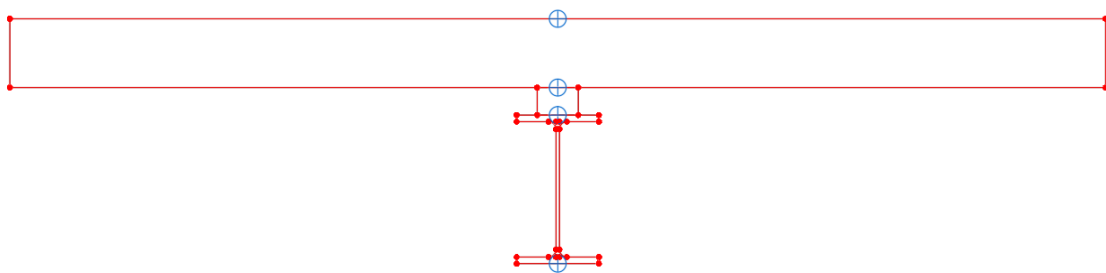
αναφοράς $\sigma_E = 189800 \cdot \left(\frac{t_w}{h_w}\right)^2 = 117,81 \text{ MPa}$. Η κρίσιμη τάση κύρτωσης είναι : $\tau_{cr} = k_\tau \cdot \sigma_E = 629,97 \text{ MPa}$. Η ανηγμένη λυγηρότητα του κορμού : $\lambda_w = 0,76 \cdot \sqrt{\frac{355}{\tau_{cr}}} = 0,5705$, οπότε $x_w = \frac{0,83}{\lambda_w} = 1,455$.

Έτσι προκύπτει :

$$V_{b,Rd} = \min\{V_{bw}; V_{pl}\} = \min\left\{x_w \cdot h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot 1.1}; h_w \cdot t_w \cdot \frac{f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot 1.1}\right\} = 1729,65 \text{ kN} > V_{ed}$$

Στη συνέχεια, διαστασιολογήθηκε το κάτω πέλμα. Βρέθηκε η ροπή που παραλαμβάνει ο κορμός, και η υπόλοιπη ροπή παραλαμβάνεται ως ζεύγος δυνάμεων με εφελκυσμό στο κάτω πέλμα και θλίψη στο σκυρόδεμα.

Τέλος, διαστασιολογήθηκε το άνω πέλμα ώστε να παραλαμβάνει τα φορτία σκυροδέτησης στη φάση κατασκευής, για να αποφευχθεί ο λυγισμός του στη φάση αυτή. Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ισοδύναμης ράβδου, όπου ελέγχεται σε λυγισμό μια ισοδύναμη ράβδος, που αποτελείται από το άνω πέλμα και το 1/3 του κορμού. Προκύπτει $N_{b,Rd} = 3360,73 \text{ kN} > N_{Ed} = 931,07 \text{ kN}$ οπότε και το άνω πέλμα επαρκεί στη φάση σκυροδέτησης.



Σχήμα 32.- Διατομή σύμμικτης διαδοκίδας

Προκύπτει διατομή διαδοκίδας με τα εξής χαρακτηριστικά:

	Άνω πέλμα	Κορμός	Κάτω πέλμα
b (cm)	30	1.45	30
h (cm)	2,7	58,2	2,7

Με συνολικό εμβαδόν $A_a = 260 \text{ cm}^2$.

Η πλάκα σκυροδέματος είναι μέσου πάχους 30 cm και καθαρού πάχους 25 cm με ύψος καλυβδόφυλλου 15 cm.

Το ενεργό πλάτος της πλάκας σκυροδέματος που συνεισφέρει στη σύμμικτη λειτουργία της διατομής είναι $b_{eff} = \frac{L_{\text{διαδοκ}}}{4} = \frac{1350}{4} = 337,5 \text{ cm}$.

	Πλάκα σκυροδέματος	Κενό καλυβδόφυλλου
b (cm)	337,5	20
h (cm)	25	15

Στο άνοιγμα, οι εσωτερικές δυνάμεις προκύπτουν για πλήρη πλαστικοποίηση :

$$F_a = A_a f_{yd} = 9230 \text{ kN και}$$

$$F_c = A_c f_{cd} = 14343,75 \text{ kN}$$

δηλαδή $F_c > F_a$ οπότε η καλύβδινη διατομή εφελκύεται ολόκληρη και έτσι ανήκει στην κατηγορία 1, με πλαστική αντοχή στο άνοιγμα $M_{pl,Rd} = 5613,5 \text{ kNm} > M_{Ed}$ οπότε επαρκεί σε ροπή.

6 ΕΛΕΓΧΟΙ

6.1 Έλεγχοι σε ΟΚΑ

Η οριακή κατάσταση αστοχίας δίνει τους συνδυασμούς φόρτισης που θα ληφθούν υπ' όψιν κατά τη διαστασιολόγηση ώστε να αντλήσουμε τα μέγιστα εντατικά μεγέθη που θα ασκηθούν στο φορέα. Οι συνδυασμοί αυτοί είναι :

- $1,35G + S + 1,35Q + 0,6 \cdot 1,5 \cdot \Delta T_M + 0,6 \cdot 1,5 \cdot W$
- $1,35G + S + 1,35(0,75 \cdot Q_{TS} + 0,4 \cdot Q_{UDL}) + 0,6 \cdot 1,5 \cdot W + 1,5 \cdot T$
- $1,35G + S + 1,35(0,75 \cdot Q_{TS} + 0,4 \cdot Q_{UDL}) + 0,6 \cdot 1,5 \cdot T + 1,5 \cdot W$
- $1,35G + S + 1,5 \cdot W + 0,6 \cdot 1,5 \cdot T$

Όπου G: Ίδια βάρη και πρόσθετα μόνιμα φορτία

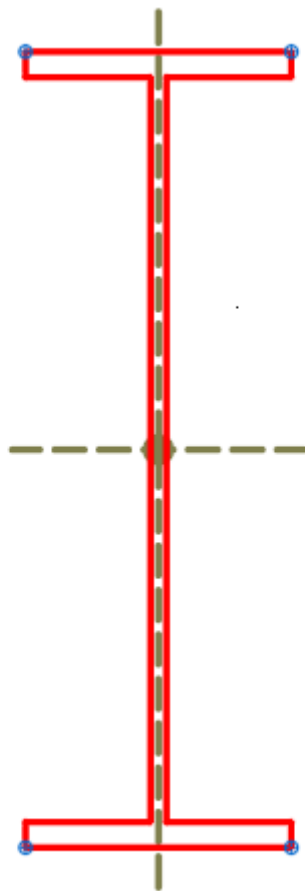
Q: Φορτία κυκλοφορίας (όπου τίθενται σε διάφορες θέσεις του καταστρώματος ώστε να προκύψει η δυσμενέστερη θέση τους)

ΔT : οι θερμοκρασιακές μεταβολές που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο

W_{tr} : ανεμοπίεση σε φορτισμένη γέφυρα

6.1.1 Κύρια δοκός

Για τη διατομή της δοκού του άνω καταστρώματος επιλέχθηκε συγκολλητή διατομή με τα εξής χαρακτηριστικά :



Σχήμα 33.- Διατομή κύριας δοκού

Πίνακας 8.- Χαρακτηριστικά διατομής κύριας δοκού

h (mm)	1300
b_f (mm)	600
t_w (mm)	21
t_f (mm)	40
h_w (mm)	1220
A (cm²)	736.2
A_v (cm²)	307.44
W_{p1,y} (cm³)	38054.1

Η διατομή αυτή προκύπτει κατηγορία 1, επομένως γίνονται πλαστικοί έλεγχοι. Βρίσκεται πάντα υπό συνεχή εφελκυσμό και δεν κινδυνεύει από καθολικό λυγισμό, οπότε ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

$$\begin{aligned} \circ M_{pl,Rd} &= \frac{f_{yd} \cdot W_{pl,y}}{\gamma_M} = \frac{35,5 \cdot 38054,1}{1 \cdot 100} = 13509,21 \text{ kNm} \\ \circ V_{pl,Rd} &= \frac{A_v \cdot f_{yd}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_M} = \frac{307,44 \cdot 35,5}{\sqrt{3} \cdot 1} = 6301,27 \text{ kN} > V_{Ed} = 2598,3 \text{ kN} \end{aligned}$$

Αλληλεπίδραση τέμνουσας – κάμψης

$$V_{Ed} < 0,5 \cdot V_{pl} = 3150 \text{ kN}$$

Επομένως η ροπή δεν χρειάζεται απομείωση λόγω τέμνουσας.

Αλληλεπίδραση αξονικής – κάμψης

Επειδή

$$N_{Ed} = 363,3 \text{ kN} < \min \left\{ 0,25 \cdot N_{pl} ; \frac{0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_{yd}}{\gamma_{M_0}} \right\} = 4547,55 \text{ kN} \text{ δε θα υπάρξει}$$

απομείωση στην ροπή αντοχής $M_{pl,y,Rd}$.

6.1.2 Διαδοκίδα

Η διαδοκίδα είναι ισοστατικός φορέας και τα φορτία της δεν αλλάζουν ανάλογα με τη διαστασιολόγηση των υπόλοιπων μελών του φορέα.

Επομένως, εφόσον και η προδιαστασιολόγηση έγινε με έλεγχο ΟΚΑ, τότε αυτή θα είναι και η τελική διαστασιολόγηση. Αυτό δικαιολογείται και από το SoFiSTik που μας δίνει $M_{Ed} = 5004,67 \text{ kNm} < M_{pl} = 5613,5 \text{ kNm}$. Άρα η διατομή ΗΕΑ 700 που έχει επιλεγεί επαρκεί.

6.1.3 Πάσσαλος

Σαν πρώτο έλεγχο στην ΟΚΑ οι εσωτερικές δυνάμεις και ροπές από την καθολική ανάλυση συγκρίνονται με την αντίσταση που υπολογίζεται από έναν σχετικό κώδικα (π.χ. EN 1993-2, CEN 2009d). Αν η επιβεβαίωση είναι ανεπιτυχής, όπως θα είναι σε γέφυρες που δεν είναι πολύ κοντές και με καταπονήσεις διαρροής στους πασσάλους, θα πρέπει να γίνει ένας πιο αναλυτικός έλεγχος όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

Η διατομή των πασσάλων πρέπει να είναι κατηγορίας 1 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα (EN 1993-1-1 CEN 2008) ώστε να μπορεί να σχηματίσει πλαστική άρθρωση. Για χαλύβδινους πασσάλους μορφής Η τα πέλματα πρέπει να πληρούν την εξής προϋπόθεση:

$$\frac{c}{t} \leq 9 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Και ο κορμός θα πρέπει να πληροί το εξής:

όπου c είναι το προεξέχων πέλμα ή το βάθος του κορμού αφαιρώντας την ακτίνα συναρμογής και το πάχος t του πέλματος.

$$\frac{c}{t} \leq 72 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Για έναν στρογγυλό πάσσαλο, η αντίστοιχη σχέση είναι:

$$\frac{D}{t} \leq 50 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Όπου D είναι η εξωτερική διάμετρος και t το πάχος του πασσάλου.

Η ανάλυση στην ΟΚΑ γίνεται ιδανικά σε έναν μεμονωμένο πάσσαλο. Επιπτώσεις λόγω ομάδας πασσάλων είναι αμελητέες αν η απόσταση μεταξύ των πασσάλων υπερβαίνει το 3D (Svahn et. al. 2006) εγκάρσια στο πλευρικό φορτίο. Οι πάσσαλοι τοποθετούνται σε μονή σειρά έτσι ώστε να μην υπάρχουν συνέπειες λόγω ομάδας πασσάλων στην διαμήκη διεύθυνση της γέφυρας. Για δυνάμεις που ενεργούν εγκάρσια στη διεύθυνση της γέφυρας οι επιπτώσεις από ομάδα πασσάλων δεν είναι απαραίτητες αν η απόσταση μεταξύ των διπλανών πασσάλων υπερβαίνει τα 8D και εν προκειμένω είναι αρκετά μεγαλύτερη (13,65 m).

Ο πάσσαλος θα υποβληθεί σε μια ροπή στην κεφαλή του πασσάλου επειδή είναι πακτωμένος στο ακρόβαθρο. Η ροπή δεν μπορεί να υπερβαίνει την πλαστική ροπή αντοχής (με αξονικό φορτίο να συνυπολογίζεται με τρόπο που εξηγείται παρακάτω). Για τον υπολογισμό της αντίστασης στην ΟΚΑ μπορεί να εφαρμοστεί το ακόλουθο μοντέλο (Peturson, 2015):

- Το μοντέλο του πασσάλου έχει άρθρωση στην κορυφή. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται με αρχικές ατέλειες αν ισχύει το κάτωθι:

$$\frac{N_{cr}}{N_d} < 15$$

- Γραμμικά ελατήρια τοποθετούνται κατά μήκος του πασσάλου ανά 1D. Οι ακαμψίες των ελατηρίων υπολογισμένες για την καθολική ανάλυση πολλαπλασιάζονται με σχετικό συντελεστή.
- Ο πάσσαλος φορτίζεται στην κεφαλή ταυτόχρονα με τρία φορτία: 1) αξονική δύναμη σχεδιασμού, 2) επιβαλλόμενη μετατόπιση και 3) μια ροπή τόσο μεγάλη όσο η πλήρης πλαστική ροπή. Η πλήρης πλαστική ροπή υπολογίζεται παίρνοντας υπ' όψιν την αξονική δύναμη που ενεργεί παράλληλα αφαιρώντας την περιοχή N_d/f_y από τη διατομή. Η αξονική δύναμη και η επιβαλλόμενη μετατόπιση βρίσκονται από την καθολική ανάλυση. Οι στροφές και οι διατμητικές δυνάμεις δεν χρησιμοποιούνται.
- Αν η υπολογισθείσα εδαφική πίεση είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη εδαφική πίεση, p_u , οπουδήποτε κατά μήκος του πασσάλου,

οι ακαμψίες των ελατηρίων μειώνονται σε αυτά τα σημεία. Αυτή είναι μια επαναληπτική διαδικασία που ακολουθείται μέχρις ότου η υπολογισθείσα εδαφική πίεση να ισούται με p_u .

- Οι ροπές δεύτερης τάξης για διατομές κάτω από την κεφαλή υπολογίζονται και ελέγχονται. Η ροπή για κάθε διατομή κατά μήκος του πασσάλου πρέπει να είναι μικρότερη από την πλαστική ροπή που δρα στην κεφαλή του πασσάλου.

Αρχικές ατέλειες δεν υπάρχουν και άρα ο πάσσαλος ελέγχεται σε θλίψη και κάμψη συνυπολογίζοντας τις οριζόντιες μετατοπίσεις.

6.2 Έλεγχοι σε ΟΚΛ

Η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας δίνει τους συνδυασμούς φόρτισης που δρουν κατά κύριο λόγο στη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της κατασκευής και εντείνουν τον φορέα όσο αυτός αξιοποιείται. Οι συνδυασμοί αυτοί είναι :

- $G + S + Q + 0.6 \cdot T + 0.6 \cdot W_{tr}$
- $G + S + 0.75 \cdot Q_{TS} + 0.4 \cdot Q_{UDL} + 0.6 \cdot W + T$
- $G + S + 1,35(0.75 \cdot Q_{TS} + 0.4 \cdot Q_{UDL}) + W + 0.6 \cdot T$
- $G + S + W + 0.6 \cdot T$

Στην κατάσταση αυτή οι έλεγχοι αποσκοπούν στον περιορισμό των τάσεων του δομικού χάλυβα, του οπλισμού και του σκυροδέματος. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται υπερβολικές παραμορφώσεις και ρηγματώσεις οι οποίες μειώνουν την αισθητική και την αίσθηση ασφάλειας στους χρήστες.

Η ρηγμάτωση στην πλάκα σκυροδέματος είναι αναπόφευκτη όταν το σκυρόδεμα ως πέλμα της σύμμικτης δοκού εφελκύεται. Ελέγχεται κατά τη λειτουργία της ως πλάκα σαν διατομή οπλισμένου σκυροδέματος σύμφωνα με τις διατάξεις του EN1992-1-1. Για να περιοριστεί η

ρηγμάτωση τοποθετείται ελάχιστος οπλισμός ρηγμάτωσης στην πλάκα ώστε να αποφευχθεί η διαρροή του υπόλοιπου οπλισμού.

Για τον περιορισμό των παραμορφώσεων γίνεται και έλεγχος των βελών που αναπτύσσονται στην κατασκευή. Ο έλεγχος αυτός δεν γίνεται με τους συνδυασμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω διότι αυτό θα ήταν υπερβολικά δυσμενές. Αντίθετα, χρησιμοποιείται ένας άλλος συνδυασμός που λαμβάνει υπ' όψιν τα μόνιμα και πρόσθετα μόνιμα φορτία και το 50% των συχνών κινητών φορτίων. Αναλυτικά, ο συνδυασμός αυτός είναι :

- $G + 0.5 \cdot Q$

Το συνολικό βέλος που προκύπτει μπορεί να περιοριστεί με την πρόβλεψη αντιβέλους κατά την κατασκευή της γέφυρας. Οι Ευρωκώδικες δεν προδιαγράφουν οριακές τιμές βελών σε αντίθεση με τον Αμερικανικό Κανονισμό που προβλέπει ότι τα τελικά βέλη μετά τον συνυπολογισμό του αντιβέλους πρέπει να είναι μικρότερα από $L/1000$, όπου L το άνοιγμα της γέφυρας. Στην περίπτωση μας, το τελικό βέλος πρέπει να είναι μικρότερο από :

$$\frac{L}{1000} = \frac{28.5}{1000} = 0.028m = 2.8cm$$

6.2.1 Κύρια δοκός

Για τον έλεγχο τάσεων στην κύρια δοκό έγινε περιβάλλουσα τάσεων, όπου εφαρμόστηκαν τα κινητά TS στο άνω κατάστρωμα όσο πλησιέστερα γίνεται στην άκρη του καταστρώματος.

Περιβάλλουσα τάσεων von Mises στην άνω κύρια δοκό σε ΟΚΛ

$$\sigma_{\text{von Mises}} = 267.1 \text{ MPa} < 355 \text{ MPa}$$

Άρα η διατομή επαρκεί σε ΟΚΛ.

6.2.2 Διαδοκίδα

Για τον έλεγχο τάσεων στη διαδοκίδα, τα φορτία TS τοποθετούνται όσο το δυνατόν πιο κεντρικά στο κατάστρωμα, με το μεγαλύτερο TS να τοποθετείται ανάμεσα στα μικρότερα.

Περιβάλλουσα τάσεων von Mises στις διαδοκίδες σε ΟΚΛ

Προκύπτει $\sigma_{\text{von Mises}} = 23.2 \text{ MPa} < 355 \text{ MPa}$, επομένως και η διατομή της διαδοκίδας επαρκεί σε ΟΚΛ.

6.2.3 Πάσσαλος

Θεωρείται ότι δεν χρειάζεται να γίνουν έλεγχοι σε ΟΚΛ των πασσάλων. Οι έλεγχοι κόπωσης επαρκούν για να βεβαιώσουν ότι οι εντάσεις δεν θα προκαλέσουν καθόλου ρωγμές στους πασσάλους. Καμία πρόσθετη μετατόπιση της υπερκατασκευής δεν θα συμβεί λόγω κάμψης των πασσάλων όσο αυτός είναι λεπτής διατομής.

6.3 Διατμητική σύνδεση

6.3.1 Γενικά

Βασική προϋπόθεση για τη σύμμικτη λειτουργία των διατομών είναι η συνεργασία της χαλύβδινης δοκού και της πλάκας σκυροδέματος ώστε να παραλαμβάνεται η διαμήκης διάτμηση. Η διαμήκης διάτμηση προκαλείται από τις τέμνουσες δυνάμεις. Οι τέμνουσες δυνάμεις γενικά προκαλούν δύο είδη διατμήσεων :

- Την κατακόρυφη και
- Την διαμήκη

Η κατακόρυφη διάτμηση παραλαμβάνεται από τον κορμό της καλύβδινης δοκού, ενώ η διαμήκης παραλαμβάνεται από μηχανικά μέσα, τα οποία ονομάζονται διατμητικοί σύνδεσμοι. Υπάρχουν πολλά είδη διατμητικών συνδέσμων, όμως ο EN 1994-2 καλύπτει με κανονισμούς κυρίως τους διατμητικούς ήλους κεφαλής. Είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος διατμητικών συνδέσμων που χρησιμοποιείται στην πράξη, λόγω της ευκολίας της τοποθέτησής τους και του τρόπου κατασκευής τους. Οι ήλοι αυτοί διαθέτουν στην κορυφή τους μια κεφαλή, η οποία έχει σκοπό να εμποδίσει την ανύψωση της πλάκας σκυροδέματος που θα οδηγήσει σε αποκόλληση της από τη σιδηροδοκό.

Στις σύμμικτες γέφυρες, σύμφωνα με τον EN 1994-2 απαιτείται πλήρης διατμητική σύνδεση, που σημαίνει ότι δεν επιτρέπεται σχετική ολίσθηση στη διεπιφάνεια σκυροδέματος και χάλυβα. Σε περίπτωση που τοποθετηθούν λιγότεροι ήλοι από αυτούς που απαιτούνται σε πλήρη διατμητική σύνδεση, το σκυρόδεμα ολισθαίνει σε σχέση με τη σιδηροδοκό.

Οι ήλοι οφείλουν να είναι όλκιμοι επομένως υπάρχουν συγκεκριμένες προδιαγραφές για το λόγο ύψους προς διάμετρο κορμού, που πρέπει να είναι τουλάχιστον 3. Η διάμετρος του ήλου επίσης δεν πρέπει να υπερβαίνει κατά 2,5 φορές το πάχος του πέλματος της δοκού πάνω στο οποίο συγκολλάται. Οι ήλοι ελέγχονται στις ακόλουθες καταστάσεις:

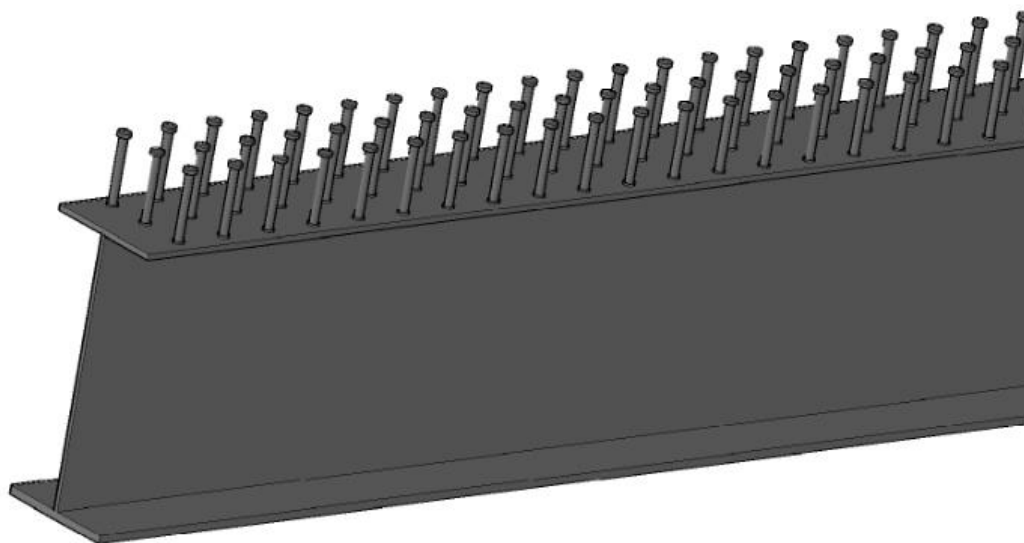
- Οριακή κατάσταση αστοχίας
- Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

Για τον προσδιορισμό του πλήθους και της διάταξης των διατμητικών ήλων, ακολουθείται η εξής διαδικασία υπολογισμών:

- Προσδιορίζεται αρχικώς η διαμήκης διάτμηση στη διεπιφάνεια σκυροδέματος και σιδηροδοκού
- Επιλέγεται η γεωμετρία των ήλων και υπολογίζεται η αντοχή τους
- Για πλήρη διατμητική σύνδεση προσδιορίζεται ο απαιτούμενος αριθμός ήλων με βάση την αντοχή τους και τη δεδομένη διαμήκη διάτμηση

- Κατανέμονται οι ήλοι κατά μήκος της δοκού

Πριν τους υπολογισμούς θα πρέπει να διευκρινιστεί ποιος τύπος ανάλυσης θα επιλεγεί. Οι τύποι ανάλυσης είναι δύο ειδών : πλαστική και ελαστική. Στις γέφυρες όμως δεν επιτρέπεται να γίνει πλαστική ανάλυση επομένως καταλήγουμε σε ελαστική.



Σχήμα 34.- Διατμητικοί ήλοι συγκολλημένοι στο άνω πέλμα της σιδηροδοκού

6.3.2 ΟΚΑ

Για τον υπολογισμό της διατμητικής ροής πρέπει να δούμε αν υπάρχει ελαστική ή ελαστοπλαστική συμπεριφορά, ανάλογα με την τιμή της M_{Ed} . Στη διαδοκίδα έχει υπολογιστεί $M_{Ed} = 5004,67 \text{ kNm}$. Για τον υπολογισμό της $M_{el,Rd}$ έχουμε:

$$n = \frac{Ea}{Ecm} = 6,56$$

$$S = 19385,31 \text{ cm}^3$$

$$\frac{Ac}{n} = 1285,7 \text{ cm}^2$$

$$A_e = 1532,1 \text{ cm}^2$$

$$z_e = 27,58 \text{ cm}$$

$$I_e = 1017185 \text{ cm}^4$$

$$W_{a,u} = 15380 \text{ cm}^3$$

$$W_{c,o} = 242055 \text{ cm}^3$$

$$M_{el,Rd} = \min\{W_{a,u}f_{yd} ; W_{c,o}f_{cd}\} = 5459,9 \text{ kNm}$$

Προκύπτει $M_{el,Rd} > M_{Ed}$ επομένως έχουμε ελαστική συμπεριφορά, και η διατμητική ροή προκύπτει από τη σχέση $\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} \cdot S}{I_e}$, όπου $V_{Ed} = 1063 \text{ kN}$ η διατμητική δύναμη στα άκρα της διαδοκίδας.

Λόγω της ελαστικής συμπεριφοράς δεν εμφανίζονται διατομές με ελαστοπλαστική συμπεριφορά στη ΟΚΑ για τη $M_{ed} = 5004,67 \text{ kNm}$. Επομένως οι ήλοι μπορούν να μπουν ομοιόμορφα κατά μήκος της δοκού, χωρίς να χρειάζεται πυκνωση σε κάποια σημεία. Επιλέγουμε ήλους $\Phi 22$ ώστε να έχουν μεγάλη αντοχή. Για το ύψος τους, εξαντλούμε την επικάλυψη, θεωρώντας την $c = 30 \text{ mm}$, και σύμφωνα με τους ήλους του εμπορίου που καλύπτουν τις απαιτήσεις ολκιμότητας επιλέγεται ύψος 250 mm .

Η αντοχή των ήλων προσδιορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\bullet P_{Rd1} = 0,8 \cdot f_u \cdot \frac{\left(\pi \cdot \frac{d^2}{4}\right)}{\gamma_{M2}} = 109,48 \text{ kN}$$

$$\bullet P_{Rd2} = 0,29 \cdot a \cdot d^2 \cdot \frac{\sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_v} = 110,02 \text{ kN}$$

Όπου, P_{Rd1} η αντοχή του ήλου σε διάτμηση

P_{Rd2} η αντοχή του ήλου σε σύνθλιψη άντυγας

d η διάμετρος του ήλου

$$a=1 \text{ για } \frac{h}{d} > 4$$

Η τελική αντοχή προκύπτει ως η ελάχιστη των δύο παραπάνω, οπότε $P_{Rd} = 109,48 \text{ kN}$ για την ΟΚΑ.

Υπολογίζεται η διατμητική ροή με βάση τη σχέση $\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} \cdot S}{I_e} =$

$18,6 \text{ kN/cm}$. Τοποθετώντας 3 ήλους σε κάθε διατομή, η απόσταση που

θα μπουν στη διαμήκη έννοια της διαδοκίδας είναι $s = \frac{P_{Rd}}{\tau_{Ed}} = 16,2cm$,
 οπότε τοποθετούμε 3Φ22/16 σε όλο το μήκος της.

Επιλέγουμε τις εγκάρσιες και διαμήκεις αποστάσεις των ήλων σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$mine_l = 5 \cdot d = 110 \text{ mm}$$

$$maxe_l = \min\{h_{\pi\lambda} \cdot 4 ; 800mm\} = 800 \text{ mm}$$

$$mine_\tau = 4 \cdot d = 88 \text{ mm}$$

$$mine_\tau = 25 \text{ mm από την άκρη του πέλματος}$$

$$maxe_\tau = 9 \cdot \varepsilon \cdot t_{fu} = 234 \text{ mm}$$

Από τους παραπάνω περιορισμούς η διαμήκης απόσταση 110 mm που επιλέξαμε καλύπτεται. Για την εγκάρσια απόσταση μεταξύ των ήλων επιλέγουμε $e_\tau = 100 \text{ mm}$ που καλύπτεται από τους περιορισμούς.

Πρέπει να σημειωθεί πως οι ήλοι θα συγκολληθούν απ' ευθείας στο άνω πέλμα της δοκού από το εργοστάσιο, αφού το καλυβδόφυλλο διακόπτεται ανάμεσα στις διαδοκίδες, δηλαδή είναι αμφιέρειστο. Επομένως, δεν τίθεται θέμα απομείωσης της αντοχής των ήλων λόγω συγκόλλησης στο καλυβδόφυλλο, αφού κάτι τέτοιο δεν θα συμβεί. Οπότε, η τελική αντοχή σε ΟΚΑ είναι σε κάθε διατομή $P_{Rd} = \frac{100}{16} \cdot 3 \cdot 109,48 = 2052,75 \text{ kN} > V_{ed} = 1063 \text{ kN}$ άρα οι ήλοι επαρκούν σε ΟΚΑ.

6.3.3 ΟΚΑ

Στην Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας, η διαμήκης διάτμηση είναι χωρίς το συντελεστή 1,35, επομένως $V_{Ed} = \frac{1063}{1,35} = 787,4 \text{ kN}$ και $\tau_{Ed} = 13,8 \text{ kN/cm}$ και η αντοχή των ήλων ελέγχεται με το 75% της αντοχής στην ΟΚΑ. Οπότε, είναι $P_{Rd} = 0,75 \cdot 2052,75 = 1539,56 \text{ kN}$. Άρα οι ήλοι που υπολογίστηκαν σε ΟΚΑ επαρκούν και για ΟΚΛ.

6.4 Έλεγχοι σε κόπωση

Κόπωση ονομάζεται η διαδικασία συσσώρευσης βλαβών σε ένα στοιχείο σε μεγάλο βάθος χρόνου. Η κόπωση εμφανίζεται όταν το στοιχείο υποβάλλεται σε επαναληπτική φόρτιση με αποτέλεσμα να εμφανίζονται και σταδιακά να διευρύνονται ρωγμές. Το στοιχείο αστοχεί εν τέλει όταν η ρωγμή που έχει δημιουργηθεί είναι τόσο μεγάλη που η υπολειπόμενη καθαρή διατομή δεν μπορεί να παραλάβει πλέον τα επιβαλλόμενα φορτία.

Η κόπωση είναι ένα τοπικό φαινόμενο που εμφανίζεται κυρίως σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων. Οι οδικές γέφυρες και συγκεκριμένα γέφυρες μικρών και μεσαίων ανοιγμάτων, όπως και η υπό μελέτη γέφυρα, είναι ιδιαίτερα επιρρεπής σε κόπωση, αφενός λόγω του μεγάλου αριθμού επαναληπτικών φορτίσεων, αφετέρου εξ' αιτίας του μεγάλου λόγου κινητών προς μόνιμων φορτίων. Οι διατάξεις του Ευρωκώδικα απαιτούν επομένως ενδελεχή έλεγχο πολλών περιοχών της γέφυρας σε κόπωση.

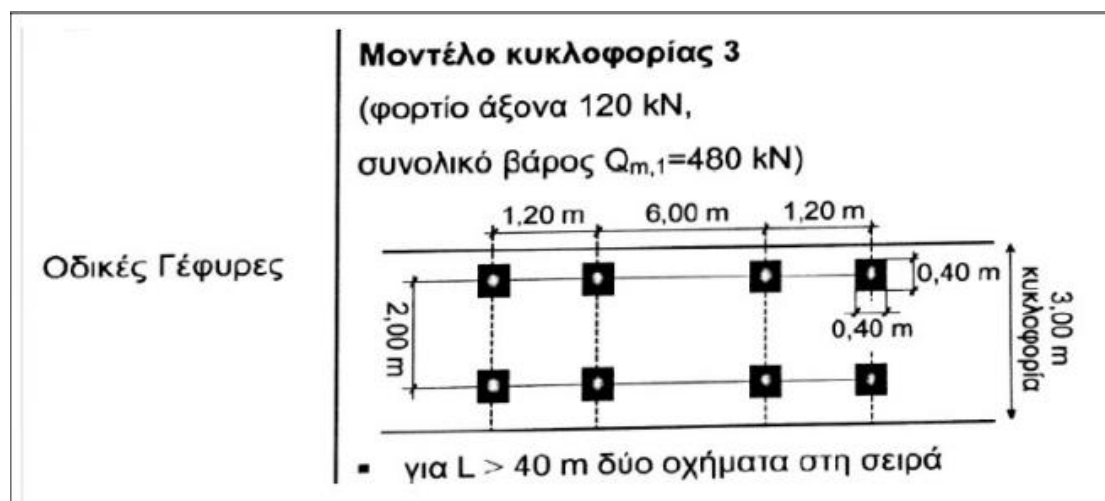
Η αντοχή σε κόπωση εξαρτάται από το εύρος τάσεων και τους κύκλους φόρτισης N και όχι από το όριο διαρροής του υλικού. Οι καμπύλες κόπωσης $S-N$ συνδέουν το εύρος τάσεων με τους κύκλους φόρτισης. Τα εύρη τάσεων σε ένα σημείο υπολογίζονται ως η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τάσης. Επειδή μια πραγματική κατασκευή έχει μεταβλητό εύρος τάσεων, προκειμένου να υπολογιστεί η αντοχή σε κόπωση, απαιτείται η μετατροπή των κύκλων σε ισοδύναμες φορτίσεις σταθερού εύρους. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος που ακολουθείται είναι η μέθοδος δεξαμενής (reservoir method).

Όπως προαναφέρθηκε, η κόπωση είναι ένα τοπικό φαινόμενο και ως εκ τούτου η αντοχή σε αυτήν εξαρτάται από τον τρόπο διαμόρφωσης των κατασκευαστικών λεπτομερειών. Γι' αυτό το λόγο ο Ευρωκώδικας (EN 1993-1-9) δίνει μία λίστα με τις συνηθέστερες κατηγορίες λεπτομερειών. Για αυτές δίνονται οι καμπύλες κόπωσης για ορθές και διατμητικές τάσεις. Ο Ευρωκώδικας ονοματίζει τις λεπτομέρειες με τον αριθμό που παίρνει το εύρος τάσεων τους για $N_C = 2 \cdot 10^6$ (2 εκατομμύρια) κύκλους.

Πρότυπη φόρτιση για έλεγχο σε κόπωση

Ο EN 1991-2 προτείνει για έλεγχο σε κόπωση μια απλοποιημένη μέθοδο που βασίζεται σε ένα πρότυπο όχημα κόπωσης. Αυτή η μέθοδος είναι η πρότυπη φόρτιση κόπωσης 3 (FLM3) και προβλέπει ένα όχημα με φορτίο άξονα 120 kN και συνολικό βάρος 480 kN , το οποίο κινείται στο μέσον των ονομαστικών λωρίδων, με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύψουν μέγιστες και ελάχιστες εντάσεις. Για τη γέφυρα αυτή μήκους $28,5\text{ m}$, ο υπολογισμός γίνεται χωρίς την ταυτόχρονη διέλευση ενός δεύτερου οχήματος αφού αυτό θεωρείται ότι βρίσκεται σε απόσταση 40 m από το πρώτο (μεγαλύτερη από το συνολικό μήκος της γέφυρας) και με το 30% του βάρους του.

Πίνακας 9.- Διαστάσεις του οχήματος κόπωσης της πρότυπης φόρτισης 3 (FLM3) (Βάγιας, Ηλιόπουλος, & Θανόπουλος, Σχεδιασμός Σύμμικτων Γεφυρών από Χάλυβα και Οπλισμένο Σκυρόδεμα, 2016)



Ο έλεγχος σε κόπωση γίνεται ξεχωριστά για τον δομικό χάλυβα, για το σκυρόδεμα και τους διατμητικούς ήλους.

Για το δομικό χάλυβα, ο έλεγχος γίνεται για το φορτίο κόπωσης συν τα φορτία του χαρακτηριστικού συνδυασμού ΟΚΛ. Στα δικτυώματα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και οι δευτερογενείς ροπές, δηλαδή οι κόμβοι δεν θα

θεωρούνται αμφιαρθρωτοί κατά την ανάλυση. Στον απλοποιημένο έλεγχο υπολογίζεται ένας συντελεστής λ που πολλαπλασιαζόμενος με το εύρος τάσεων δίνει το τελικό εύρος τάσεων με το οποίο υπολογίζεται η αντοχή σε κόπωση.

$$\Delta\sigma_{E2} = \lambda \cdot |\sigma_{max,f,Ed} - \sigma_{min,f,Ed}|, \text{ για ορθές τάσεις και}$$

$$\Delta\tau_{E2} = \lambda \cdot |\tau_{max,f,Ed} - \tau_{min,f,Ed}|, \text{ για διατμητικές τάσεις.}$$

Ο συντελεστής λ ονομάζεται συντελεστής ισοδύναμης βλάβης και υπολογίζεται από το γινόμενο ορισμένων σημαντικών παραγόντων κόπωσης και έχει μέγιστη τιμή που είναι συνάρτηση του ορίου κόπωσης N_D . Για την ακρίβεια ισχύει :

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \leq \lambda_{max}$$

όπου : λ_1 = συντελεστής για το μήκος της κρίσιμης γραμμής επιρροής

λ_2 = συντελεστής για τον όγκο κυκλοφορίας

λ_3 = συντελεστής για την διάρκεια ζωής της γέφυρας

λ_4 = συντελεστής για την κυκλοφορία σε άλλες λωρίδες

Ο έλεγχος σε κόπωση γίνεται εν τέλει με τη σχέση :

$$\gamma_{Ef} \cdot \Delta\sigma_{E2} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}$$

$$\gamma_{Ef} \cdot \Delta\tau_{E2} \leq \frac{\Delta\tau_c}{\gamma_{Mf,v}}$$

όπου $\gamma_{Ef} = 1$ για τα φορτία,

$\gamma_{Mf} = 1.35$ για αντοχή των μελών για ορθές τάσεις και

$\gamma_{Mf,v} = 1$ για αντοχή των μελών για διατμητικές τάσεις

Για τους διατμητικούς ήλους, ο έλεγχος κόπωσης είναι παρόμοιος με αυτόν του δομικού χάλυβα και βασίζεται σε εύρη διατμητικών τάσεων τα οποία αντίστοιχα πολλαπλασιάζονται με έναν συντελεστή ισοδύναμης βλάβης λ_v .

Για το σκυρόδεμα, γίνεται έλεγχος κόπωσης μόνο όταν η διατομή είναι αρηγμάτωτη και το σκυρόδεμα βρίσκεται σε θλίψη. Η αντοχή του σε κόπωση εξαρτάται από την ηλικία του σε μέρες κατά την πρώτη φόρτιση και από τον τρόπο πήξης του.

7 ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Όλα τα τμήματα της κατασκευής μεταφέρονται μέσω αυτοκινητοδρόμου οπότε είναι δυνατή η χρήση πολύ μεγάλων φορτηγών οχημάτων με ευκολία. Έτσι οι κύριες δοκοί φτάνουν ενιαίες στο σημείο πάνω σε 3 – αξονική τηλεσκοπική πλατφόρμα. Μετά καταφτάνουν σε μικρότερα φορτηγά για λόγους οικονομίας οι διαδοκίδες με τις συνδέσεις τους έτοιμες από το εργοστάσιο. Και τέλος τα καλυβδόφυλλα.

Επίσης όλα τα μεταλλικά μέλη που φτάνουν στο εργοτάξιο έχουν βαφτεί ήδη από το εργοστάσιο με πυράντοχη βαφή που τα προστατεύει σε περίπτωση που κάποιο όχημα στον υποκείμενο αυτοκινητόδρομο αναφλεγεί κάτω από τη γέφυρα.

Η σειρά των κατασκευαστικών εργασιών είναι η εξής:

- Πρώτα δημιουργείται το επίχωμα παράλληλα με τη διάταξη οπλισμένης γης που το συγκρατεί από το να καταρρεύσει πάνω στον αυτοκινητόδρομο.
- Έπειτα ανοίγονται οι τρύπες για τους πασσάλους και εμπηγνύονται οι πάσσαλοι.
- Μετά χυτεύεται σε πρώτη φάση το κάτω μέρος του ακρόβαθρου που λειτουργεί σαν τράπεζα έδρασης.
- Μορφώνεται στο χώρο του εργοταξίου το κατάστρωμα, αποτελούμενο από τις κύριες δοκούς, τις διαδοκίδες και τα καλυβδόφυλλα.
- Με ειδικά ανυψωτικά μηχανήματα ανυψώνεται ολόκληρος ο μεταλλικός σκελετός ενιαία και αφήνεται να πατήσει πάνω στα ακρόβαθρα όπου έχουν διαμορφωθεί ειδικές κατασκευαστικές διατάξεις. Έτσι ελαχιστοποιείται η όχληση στην λειτουργία του αυτοκινητοδρόμου, καθώς οι εργασίες ανύψωσης μπορεί να απαιτήσουν έως και λιγότερο από μια μέρα διακοπής της κυκλοφορίας.

- Χυτεύεται το κατάστρωμα της γέφυρας πάνω στα καλυβδόφυλλα και διαμορφώνεται η τελική επιφάνεια της.
- Τέλος χυτεύεται το άνω μέρος του ακρόβαθρου και διαμορφώνεται πλέον η ολόσωμη σύνδεση.

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι σύμμικτες γέφυρες με ολόσωμη σύνδεση στα ακρόβαθρα συνδυάζουν πολλά συγκεκριμένα πλεονεκτήματα. Είναι στιβαρές κατασκευές που δεν χρειάζονται εφάδρανα και αρμούς διαστολής. Αν μορφωθούν με μεγάλο βαθμό περιορισμού, είναι δυνατή η κατασκευή πολύ λεπτών υπερκατασκευών χωρίς παράλληλα καμία ανάγκη για ενδιάμεση στήριξη.

Αν μορφωθούν με χαμηλή βαθμό περιορισμού όπως εν προκειμένω, το κατάστρωμα λειτουργεί πρακτικά αμφιέριστα καθώς οι ροπές που μεταφέρονται στα υποστυλώματα είναι αμελητέα. Οι μεταλλικοί πάσσαλοι που χρησιμοποιήθηκαν έχουν μεγάλο περιθώριο μετακίνησης ειδικά με τον τρόπο τοποθέτησης που επελέγη. Αυτοί τοποθετήθηκαν με τον ισχυρό άξονα κάθετα στη διεύθυνση της γέφυρας και μέσα σε προδιάρτητη υπερμεγέθη τρύπα.

Εν τέλει οι οριζόντιες δυνάμεις, λόγω θερμοκρασιακών επιρροών, δυνάμεων πέδησης-επιτάχυνσης και άλλων, που ενεργούν στη γέφυρα δεν είναι και τόσο μεγάλες. Αυτό συμβαίνει λόγω του μικρού της μήκους. Ως εκ τούτου συμπαιρένεται ότι πιθανότατα θα ήταν προτιμότερη η επιλογή πασσάλων υψηλής ακαμψίας για τη συγκεκριμένη γέφυρα. Με αυτόν τον τρόπο θα γινόταν πιο οικονομικός σχεδιασμός των διατομών.

Η διάταξη που υλοποιήθηκε θα ήταν πιο αποτελεσματική σε μεγαλύτερου μήκους γέφυρες με σημαντικά μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις.

Το είδος της γέφυρας με πασσάλους υψηλής ακαμψίας έχει αρχίσει και γίνεται πολύ δημοφιλές για διαβάσεις αυτοκινητοδρόμων στη Γερμανία. Αυτός είναι ένας ρόλος στον οποίο μπορεί να πρωταγωνιστήσει και στη χώρα μας, τώρα που πλέον έχει ολοκληρώσει το βασικό δίκτυο αυτοκινητοδρόμων της και η ανάγκη για άνω διαβάσεις είναι αρκετά αυξημένη.

Γενικά, η κατασκευή της είναι εύκολη, οικονομική λόγω μειωμένων διατομών και μη χρησιμοποίησης εφεδράνων και αρμών διαστολής, πολύ

γρήγορη ειδικά όσον αφορά την εργοταξιακή κατάληψη του χώρου και με ελάχιστη παρεμπόδιση της υπάρχουσας κυκλοφορίας κατά την κατασκευή.

Ωστόσο, πρέπει να λαμβάνονται αναλυτικά υπόψιν οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του εδάφους και της κατασκευής. Προτού ξεκινήσουν οι στατικές μελέτες πρέπει να έχει προηγηθεί γεωτεχνική έρευνα του σημείου.

9 ΕΙΣΗΓΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Σαν συνέχεια αυτής της εργασίας μπορούν να γίνουν έρευνες σε σχέση με τα παρακάτω:

- Συλλογή και επεξεργασία δεδομένων για μεγάλη χρονική περίοδο ούτως ώστε να ελεγχθεί σε κόπωση λόγω κυκλικής φόρτισης από θερμοκρασιακές μεταβολές. Το σκυρόδεμα στην κορυφή του πασσάλου επηρεάζεται από την κυκλική φύση της φόρτισης και πρέπει να ελεγχθεί.
- Εύρεση ενός μοντέλου (αλγόριθμου) που να υπολογίζει τις εντάσεις και να προτείνει τις κατάλληλες διαμορφώσεις ώστε να επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της χρήσης των υλικών στην κατασκευή.
- Πιο ενδελεχής έρευνα πάνω στην εγκάρσια συμπεριφορά των πασσάλων όπως και στα χαρακτηριστικά της κίνησης τους όταν βρίσκονται μέσα σε υπερμεγέθη τρύπα.
- Τέλος χρήσιμη θα ήταν μια πιο πλήρης καταγραφή των κατασκευαστικών λεπτομερειών της ολόσωμης σύνδεσης σε ένα ακρόβαθρο και οι συνακόλουθοι υπολογισμοί.

10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Bhavya, R., Usha, N. K., & Jahardhan, C. (2017, September). Study on Integral Bridge with Composite deck for IRC Standards. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, σ. 6.
2. Collin, P., Veljkovic, M., & Petursson, H. (2006). *International workshop on the bridges with integral abutments*. Lulea: Lulea University of Technology.
3. Feldmann, M., Naumes, J., Pak, D., Veljkovic, M., Eriksen, J., Popa, N., . . . Seidl, G. (2012). *Economic and durable design of composite bridges with integral abutments (INTAB+)*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
4. Iqbal, H., & Dino, B. (1999). *Ontario Ministry of Transportation, Bridge Office*. Ανάκτηση από <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1165748.pdf>
5. Lan, C., Briseghella, B., Fenu, L., Xue, J., & Zordan, T. (2017, November 21). The optimal shapes of piles in integral abutment bridges. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, σ. 18.
6. Masrilayanti. (2013). *The Behaviour of Integral Bridges under Vertical and Horizontal Earthquake Ground Motion*. School of Science, Computing and Engineering, University of Salford, United Kingdom.
7. Pak, D., Bigelow, H., & Feldman, M. (2017). Design of composite bridges with integral abutments. Germany.
8. Peturson, H. (2015, October). Design of Steel Piles for Integral Abutment. Lulea, Sweden. Ανάκτηση από <http://www.diva-portal.org/smash/search.jsf?dswid=9123>
9. Rhodes, S. (n.d.). *Integral Bridges and the Modeling of Soil - Structure Interaction*. Ανάκτηση από https://www.lusas.com/papers/Integral_bridges_and_the_modelling_of_ssi_lusas_archive_rev_4.pdf
10. SOFiSTiK Hellas A.E. (2005, Αύγουστος). Ανάκτηση από http://www.sofistik.gr/fileadmin/user_upload/buildings_general.pdf
11. Spyrakos, C. C. (1990, January). Assessment of SSI on the longitudinal seismic response of short span bridges. *Engineering Structures*, σσ. 60-66.
12. Tasiopoulou, P., Smyrnou, E., Bal, I., & Gazetas, G. (2012). Bridge pile-abutment-deck interaction in laterally spreading ground: Lessons from Christchurch. *15 WCEE* (σ. 9). Lisbon: 2012.
13. Way, J., & Yandzio, E. (1997). *Integral Steel Bridge: Design of a Single-Span Bridge - Worked Example*. Ascot: The Steel Construction Institute.

14. *Wikipedia*. (n.d.). Ανάκτηση από <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%AD%CF%86%CF%85%CF%81%CE%B1>
15. Αναγνωστόπουλος, Α. Γ., & Παπαδόπουλος, Β. Π. (2011). *Επιφανειακές Θεμελιώσεις και Θεμελιώσεις με Πασσάλους*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών.
16. Βάγιας, Ι. (2010). *Σύμμικτες Κατασκευές από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα*. Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
17. Βάγιας, Ι., & Ηλιόπουλος, Α. (2006). *Σύμμικτες Γέφυρες*. Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
18. Βάγιας, Ι., Ηλιόπουλος, Α., & Θανάπουλος, Π. (2016). *Σχεδιασμός Σύμμικτων Γεφυρών από Χάλυβα και Οπλισμένο Σκυρόδεμα*. 2016: Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
19. Καραβεζύρογλου - Βέμπερ, Μ. (2013). *Στοιχεία Υπολογισμού και Διαμόρφωσης Ολόσωμων Κατασκευών*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
20. Μιχάλτσος, Γ. Θ. (2005). *Προβλήματα Δυναμικής των Σιδηρών Γεφυρών*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμεών.
21. Παντουβάκης, Μ. (2012). *Διαχείριση Τεχνικών Έργων*. Αθήνα.
22. Ταΐρης, Α. (2019). *Διερεύνηση εναλλακτικής ανακατασκευής καταστρώματος υφιστάμενης γέφυρας από Ο/Σ με χρήση σύμμικτου φορέα καταστρώματος*. Θεσσαλονίκη.
23. Τέγος, Α. Ι. (2007). *Ολόσωμες Γέφυρες*. Θεσσαλονίκη: Τσιαρτσιάνης Αθ. & ΣΙΑ ΟΕ.
24. ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ & ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ, Γ. Γ. (2001). Οδηγός Μελετών Οδικών Έργων (ΟΜΟΕ). *Τεύχος 2: Διατομές (ΟΜΟΕ - Δ)*.
25. ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ & ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ, ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ, ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΜΕΛΕΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ. (2007, Ιούνιος). <http://portal.tee.gr/>. Ανάκτηση από http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/EKDILOSEIS_P/H_YPERLINKS/ANTISEISMIKH.pdf