

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μέθοδοι Σχεδιασμού Μεταλλικών Γεφυρών»

Μπόγρης Δημήτριος

A.M. : 4980

Επιβλέπουσα: Δρ. Παναγιώτα Κατσιμπίνη

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2024

## Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη εργασία.

Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Μπόγρη Δημήτριου που την εκπόνησε.

Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα Κατσιμπίνη Παναγιώτα για την καθοδήγησή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, και την οικογένειά μου για τη συμπαράστασή τους.

## Περίληψη

Η εξέλιξη στην τεχνολογία και την κατασκευή χαλύβδινων γεφυρών συνδέεται άμεσα με την αστική, περιφερειακή, οικονομική, και κοινωνική ανάπτυξη. Ως εκ τούτου, η μελέτη αυτή στοχεύει στη διερεύνηση των σύγχρονων μεθόδων σχεδιασμού και κατασκευής χαλύβδινων γεφυρών σε διάφορα επίπεδα, από το υλικό κατασκευής μέχρι τα πρότυπα σχεδίασης και τις σύγχρονες μεθόδους κατασκευής. Αρχικά γίνεται επισκόπηση της ιστορικής εξέλιξης του κλάδου της γεφυροποιίας σε σχέση με το υλικό, την τυπολογία, και τις μεθόδους κατασκευής τους, η οποία ακολουθείται από την ανάλυση του βασικού δομικού υλικού των χαλύβδινων γεφυρών, το χάλυβα και τις ιδιότητες του. Σε πρώτο στάδιο παρουσιάζονται ακόμη και άλλοι παράμετροι σχεδιασμού όπως οι φορτίσεις οι οποίες υφίστανται σε κάθε κατασκευή και οι τυπολογίες γεφυρών σε συνάρτηση με τα πλεονεκτήματα έχουν. Σε επόμενο στάδιο περιγράφεται η διαδικασία σχεδίασης που ακολουθείται για μια γέφυρα, ξεκινώντας από τον καθορισμό των κριτηρίων σχεδίασης και τον προσδιορισμό του τύπου μιας γέφυρας, αλλά και τη δομική ανάλυση των επιμέρους στοιχείων της, ακολουθούμενα από την περιγραφή των Αμερικάνικων και των Ευρωπαϊκών προτύπων σχεδίασης, AASHTO LFRD και Ευρωκώδικες. Παρουσιάζονται ακόμη πέντε παραδείγματα σύγχρονων χαλύβδινων γεφυρών, οι μέθοδοι σχεδίασης και κατασκευής που ακολουθήθηκαν κάθε φορά, και οι καινοτομίες ως προς τον σχεδιασμό και την κατασκευή της κάθε περίπτωσης. Τέλος, γίνεται συνοπτική παρουσίαση καινοτόμων υλικών που χρησιμοποιούνται σήμερα στις χαλύβδινες γέφυρες και των ιδιοτήτων τους, ενώ ακολουθεί μια σύντομη παρουσίαση ως προς την βιωσιμότητα και την πράσινη ανάπτυξη που αποτελούν πλέον βασικές παραμέτρους της διαδικασίας σχεδιασμού και κατασκευής γεφυρών.

## Λέξεις - Κλειδιά

Μεταλλικές γέφυρες, χάλυβας, τύποι γεφυρών, μέθοδοι σχεδιασμού, πρότυπα σχεδίασης, βιωσιμότητα

## **Abstract**

The development of steel bridge technology and construction is directly linked to urban, regional, economic and social development. Therefore, this study aims to investigate modern steel bridge design and construction methods at various levels, from steel as construction material to the current design standards and contemporary construction methods. Firstly, an overview of the historical development of the bridge-building industry in relation to the main building material, typology and construction methods, followed by the analysis of the main structural material of steel bridges, steel and its properties. In the first part, several design parameters are presented like the loads affecting each structure as well as bridge typologies and the advantages each one possesses. In the following part, the design process followed for a bridge design is described starting with the definition of design criteria and the determination of the bridge type, but also the structural analysis of its individual components, followed by a short analysis of the American and European design standards, AASHTO LFRD and Eurocodes. Moreover, five examples of contemporary steel bridges are presented, with the design and construction methods followed in each case, and the innovations in design and construction in each case. Finally, a brief presentation of new innovative materials used nowadays in steel bridges and their properties is given, followed by a brief analysis of sustainability and green development as the current focus that lead the design parameters in bridge design and construction.

## **Keywords**

Steel bridges, steel, bridge types, design methods, design standards, sustainability

# Περιεχόμενα

<b>Περίληψη</b> .....	<b>iv</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Περιεχόμενα</b> .....	<b>vi</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων</b> .....	<b>viii</b>
<b>1.0 Εισαγωγή</b> .....	<b>1</b>
1.1 Σύντομη επισκόπηση της σημασίας των γεφυρών από χάλυβα .....	1
1.2 Σκοπός Πτυχιακής Εργασίας .....	2
<b>2.0 Ιστορικό Υπόβαθρο</b> .....	<b>4</b>
2.1 Εξέλιξη των μεθόδων σχεδίασης γεφυρών από χάλυβα.....	4
2.2 Βασικές εξελίξεις και καινοτομίες στη σχεδίαση γεφυρών από χάλυβα .....	9
<b>3.0 Παράμετροι Σχεδίασης</b> .....	<b>12</b>
3.1 Επιβαρύνσεις   Δράσεις   Φορτία.....	12
3.2 Ο χάλυβας και οι ιδιότητές του .....	16
3.3 Δομικά Ζητήματα   Τύποι Γεφυρών .....	20
<b>4.0 Διαδικασία Σχεδίασης</b> .....	<b>28</b>
4.1 Προετοιμασία φάσης σχεδίασης   Καθορισμός Κριτηρίων   Προσδιορισμός Τύπου   Προσέγγιση Διαστάσεων.....	28
4.1.1 Γέφυρες με δοκούς .....	28
4.1.2 Γέφυρες Ζευκτών.....	32
4.1.3 Τοξωτές Γέφυρες.....	35
4.1.4 Καλωδιωτές Γέφυρες.....	37
4.1.5 Κρεμαστές Γέφυρες.....	40
4.2 Λεπτομερής Φάση Σχεδίασης   Δομική Ανάλυση.....	43

4.2.1	Κατάστρωμα .....	43
4.2.2	Κύριες Δοκοί .....	44
4.2.3	Σύνδεσμοι .....	45
4.2.4	Εφέδρανα .....	48
4.2.5	Βάθρα .....	49
4.3	Κώδικες και Πρότυπα Σχεδίασης .....	50
<b>5.0</b>	<b>Περιστατικά Μελέτης .....</b>	<b>53</b>
5.1	Εξέταση σημαντικών έργων γεφυρών από χάλυβα .....	53
5.1.1	Η γέφυρα Akashi-Kaikyō .....	53
5.1.2	Η γέφυρα Cheon-Sa .....	55
5.1.3	Η γέφυρα Millau .....	58
5.1.4	Η γέφυρα Russky .....	61
5.1.5	Η γέφυρα Chaotianmen .....	63
5.2	Παρουσίαση των μεθόδων σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκαν στα περιστατικά μελέτης .....	65
5.2.1	Ανάλυση μεθόδων σχεδίασης της γέφυρας Akashi-Kaikyō .....	65
5.2.2	Ανάλυση μεθόδων σχεδίασης της γέφυρας Cheon-Sa .....	70
5.2.3	Ανάλυση μεθόδων σχεδίασης της γέφυρας Millau .....	73
5.2.4	Ανάλυση μεθόδων σχεδίασης της γέφυρας Russky .....	78
5.2.5	Ανάλυση μεθόδων σχεδίασης της γέφυρας Chaotianmen .....	81
5.3	Διδάγματα και καινοτομίες από τα περιστατικά μελέτης .....	84
<b>6.0</b>	<b>Μελλοντικές τάσεις και καινοτομίες .....</b>	<b>86</b>
6.1	Προηγμένα υλικά στη σχεδίαση γεφυρών από χάλυβα .....	86
6.2	Προβληματισμοί για τη βιωσιμότητα και προκλήσεις για το μέλλον των γεφυρών από χάλυβα .....	91
<b>7.0</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>94</b>
<b>8.0</b>	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>97</b>

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.2.1	Η γέφυρα Golden Gate.....	3
Εικόνα 2.1.1	Η γέφυρα Forth .....	5
Εικόνα 2.1.2	Η γέφυρα Menai.....	6
Εικόνα 2.1.3	Η γέφυρα Theodor Heuss.....	7
Εικόνα 2.1.4	Η γέφυρα Brooklyn.....	7
Εικόνα 2.1.5	Η γέφυρα George Washington.....	8
Εικόνα 2.1.6	Η γέφυρα Akashi Kaikyō.....	8
Εικόνα 2.2.1	Η γέφυρα Foyle.....	9
Εικόνα 3.3.1	Η γέφυρα Marion .....	21
Εικόνα 3.3.2	Η γέφυρα Ikitsuki.....	22
Εικόνα 3.3.3	Η γέφυρα Xinguang .....	23
Εικόνα 3.3.4	Η καλωδιωτή γέφυρα Queensferry .....	24
Εικόνα 3.3.5	Η καλωδιωτή γέφυρα Husutong.....	25
Εικόνα 3.3.6	Η κρεμαστή γέφυρα 1915 Çanakkale Bridge.....	26
Εικόνα 3.3.7	Η κρεμαστή γέφυρα Great Belt East.....	27
Εικόνα 4.1.1	Κατασκευή γέφυρας με δοκούς στο Jesup, Νότια Αϊόβα.....	29
Εικόνα 4.1.2	Διαδικασία κατασκευής πλακοδοκών.....	30
Εικόνα 4.1.3	Τραπεζοειδής μεταλλική δοκός γέφυρας.....	31
Εικόνα 4.1.4	Γέφυρα ζευκτών στο Glenville, Δυτική Βιρτζίνια.....	33
Εικόνα 4.1.5	Πεζογέφυρα με ζευκτά στο Άμστερνταμ, Ολλανδία.....	34
Εικόνα 4.1.6	Γέφυρα σιδηροδρόμου με τοξωτό κατάστρωμα στο Chenab, Ινδία.....	36
Εικόνα 4.1.7	Η γέφυρα Luru.....	37
Εικόνα 4.1.8	Καλωδιωτή γέφυρα στον ποταμό Aare με παράλληλα καλώδια.....	38
Εικόνα 4.1.9	Καλωδιωτή γέφυρα Tatara με ημιακτινωτό τύπο διάταξης καλωδίων.....	39
Εικόνα 4.1.10	Γέφυρα στο Bear, Η.Π.Α. ....	41
Εικόνα 4.1.11	Κρεμαστή γέφυρα με 4 ανοίγματα Cheon-Sa, Νότια Κορέα.....	42
Εικόνα 4.2.1	Ανέγερση γέφυρας με μεταλλικό κατάστρωμα στη Βομβάη.....	43
Εικόνα 4.2.2	Γέφυρα με χαλύβδινες πλατύπελμες δοκούς στις Η.Π.Α.....	44
Εικόνα 4.2.3	Εγκάρσιοι σύνδεσμοι γεφυρών.....	46
Εικόνα 4.2.4	Σύνδεσμοι σε γέφυρα σιδηροδρόμου.....	47
Εικόνα 4.2.5	Τυπικό ελαστομερές εφέδρανο κάτω από μεταλλική δοκό.....	48



Εικόνα 4.2.6	Η χαλύβδινη γέφυρα Padma .....	49
Εικόνα 5.1.1	Η γέφυρα Akashi-Kaikyō στην Ιαπωνία.....	53
Εικόνα 5.1.2	Το κατάστρωμα της γέφυρας Akashi-Kaikyō.....	54
Εικόνα 5.1.3	Γενικό σχέδιο της γέφυρας Akashi-Kaikyō .....	55
Εικόνα 5.1.4	Η κρεμαστή γέφυρα Cheon-Sa με 3 πυλώνες.....	56
Εικόνα 5.1.5	Η γέφυρα Cheon-Sa και η ευρύτερη περιοχή .....	57
Εικόνα 5.1.6	Η γέφυρα Millau .....	58
Εικόνα 5.1.7	Οι πυλώνες της γέφυρας Millau.....	59
Εικόνα 5.1.8	Όψη της γέφυρας Millau.....	60
Εικόνα 5.1.9	Θέαση της γέφυρας Millau.....	60
Εικόνα 5.1.10	Η γέφυρα Russky .....	61
Εικόνα 5.1.11	Πλάγια όψη της γέφυρας Russky.....	62
Εικόνα 5.1.12	Η γέφυρα Chaotianmen.....	63
Εικόνα 5.1.13	Σχέδιο όψης της γέφυρας Chaotianmen.....	64
Εικόνα 5.2.1	Η κατασκευή της γέφυρας Akashi-Kaikyō .....	65
Εικόνα 5.2.2	Η μετατόπιση των θεμελιώσεων μετά το σεισμό στο Kobe .....	66
Εικόνα 5.2.3	Διαδικασία ανέγερσης της γέφυρας - κατασκευή καταστρώματος .....	66
Εικόνα 5.2.4	Εσωτερικό καταστρώματος γέφυρας Akashi-Kaikyō.....	67
Εικόνα 5.2.5	Τομή του κύριου καλωδίου της γέφυρας Akashi-Kaikyō.....	67
Εικόνα 5.2.6	Σύστημα μείωσης της υγρασίας των καλωδίων της γέφυρας Akashi-Kaikyō..	68
Εικόνα 5.2.7	Τομή καταστρώματος και όψεις πυλώνων της γέφυρας Akashi-Kaikyō .....	68
Εικόνα 5.2.8	Μοντέλο της γέφυρας Akashi-Kaikyō σε κλίμακα 1/100 πριν τη δοκιμασία σε τούνελ αέρα .....	69
Εικόνα 5.2.9	Διαδικασία ανάρτησης καλωδίων της γέφυρας Akashi-Kaikyō.....	69
Εικόνα 5.2.10	Κατασκευή καταστρώματος και σύνδεση καλωδίων .....	69
Εικόνα 5.2.11	Εγκατάσταση του βοηθητικού καλωδίου για την ανάρτηση των κύριων καλωδίων της γέφυρας από ελικόπτερο .....	69
Εικόνα 5.2.12	Κατασκευή καταστρώματος.....	69
Εικόνα 5.2.13	Άποψη της γέφυρας Cheon-Sa.....	70
Εικόνα 5.2.14	Σχέδια καλωδίων γέφυρας Cheon-Sa.....	71
Εικόνα 5.2.15	Μακέτα γέφυρας Cheon-Sa σε κλίμακα 1/180 .....	71
Εικόνα 5.2.16	Διαδικασία κατασκευής της γέφυρας Cheon-Sa.....	72
Εικόνα 5.2.17	Τομή κιβωτοειδούς δοκού γέφυρας Cheon-Sa .....	72
Εικόνα 5.2.18	Τοποθέτηση κιβωτοειδών δοκών της γέφυρας Cheon-Sa.....	73

Εικόνα 5.2.19 Άποψη της γέφυρας Millau.....	73
Εικόνα 5.2.20 Τυπική όψη πυλώνα – βάθρου.....	74
Εικόνα 5.2.21 Κατασκευή καταστρώματος γέφυρας.....	75
Εικόνα 5.2.22 Τομή καταστρώματος Millau Viaduct.....	75
Εικόνα 5.2.23 Τα τμήματα του καταστρώματος της Millau Viaduct.....	76
Εικόνα 5.2.24 Διάγραμμα κατασκευής της Millau Viaduct.....	76
Εικόνα 5.2.25 Κατασκευή γέφυρας Millau με προσωρινούς πυλώνες.....	77
Εικόνα 5.2.26 Σχέδιο της γέφυρας Russky.....	78
Εικόνα 5.2.27 Κατασκευή πυλώνων γέφυρας Russky.....	78
Εικόνα 5.2.28 Τοποθέτηση καλωδίων και προβολοδόμηση της γέφυρας Russky.....	79
Εικόνα 5.2.29 Τοποθέτηση ορθοτροπικών πλακών της γέφυρας Russky.....	80
Εικόνα 5.2.30 Άποψη της γέφυρας Russky.....	80
Εικόνα 5.2.31 Στάδια κατασκευής της γέφυρας Chaotianmen.....	81
Εικόνα 5.2.32 Λίγο πριν το τέλος της κατασκευής του τόξου της γέφυρας Chaotianmen.....	82
Εικόνα 5.2.33 Μοντέλα της γέφυρας Chaotianmen σε διάφορα στάδια κατασκευής που δοκιμάζονται σε σήραγγες αέρα.....	83
Εικόνα 6.1.1 Dragon’s Bridge, Rhyl, Βόρεια Ουαλία.....	87
Εικόνα 6.1.2 Η καλωδιωτή γέφυρα της λίμνης Dongting στην Κίνα.....	89
Εικόνα 6.1.3 Η κρεμαστή γέφυρα Yi Sun-sin, Νότια Κορέα.....	90

## 1.0 Εισαγωγή

### 1.1 Σύντομη επισκόπηση της σημασίας των γεφυρών από χάλυβα

Οι χαλύβδινες γέφυρες αποτελούν κρίσιμα στοιχεία της σύγχρονης υποδομής που χρησιμεύουν ως ζωτικοί σύνδεσμοι στα δίκτυα μεταφορών σε όλο τον κόσμο. Η κατασκευή τους απαιτεί λεπτομερή σχεδιασμό και ακριβή εκτέλεση για να διασφαλιστεί η ασφάλεια, η ανθεκτικότητα και η λειτουργικότητα. Αυτή η πτυχιακή εργασία διερευνά τις πολύπλευρες μεθόδους που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό μεταλλικών γεφυρών, εξετάζοντας τόσο τις παραδοσιακές όσο και τις σύγχρονες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν οι μηχανικοί για να αντιμετωπίσουν τις πολύπλοκες προκλήσεις που ενυπάρχουν στην κατασκευή γεφυρών.

Αποτελούν ζωτικούς κρίκους στα δίκτυα μεταφορών που στηρίζουν την αστική και την αγροτική κινητικότητα επιτρέποντας την απρόσκοπτη μετακίνηση, μειώνοντας έτσι τον χρόνο ταξιδιού και το λειτουργικό κόστος υποστηρίζοντας μεγάλους όγκους κυκλοφορίας. Μεγάλος είναι και ο οικονομικός αντίκτυπος των χαλύβδινων γεφυρών, ενισχύοντας τη συνδεσιμότητα βελτιώνουν το δίκτυο υποδομών και μεταφορών, προσελκύοντας επενδύσεις, τονώνοντας τον τουρισμό και προωθώντας την περιφερειακή ανάπτυξη και την επιχειρηματικότητα.

Σε σχέση με το χάλυβα σαν δομικό υλικό, οι βασικές ιδιότητές του, όπως η αντοχή, η ολκιμότητα, και η ανθεκτικότητα, τον καθιστούν ιδανικό υλικό για την κατασκευή γεφυρών. Οι χαλύβδινες γέφυρες μπορούν να σχεδιαστούν για να εκτείνονται σε μεγάλες αποστάσεις με ελάχιστες δομές στήριξης, επιτρέποντας ευέλικτα και προσαρμόσιμα σχέδια που μπορούν να φιλοξενήσουν ποικίλες συνθήκες εδάφους και περιβάλλοντος. Ακόμη, οι τεχνικές προκατασκευής, σε συνδυασμό με τις προόδους στην κατασκευαστική τεχνολογία, επιτρέπουν την ταχεία ανάπτυξη μεταλλικών γεφυρών, μειώνοντας τα χρονοδιαγράμματα και το κόστος των έργων.

Επιπλέον, η ανθεκτικότητα του χάλυβα το καθιστά το πλέον κατάλληλο υλικό για την κατασκευή γεφυρών, ιδιαίτερα σε σκληρά περιβάλλοντα. Οι χαλύβδινες γέφυρες μπορούν να αντέξουν σημαντικά δυναμικά φορτία, συμπεριλαμβανομένης της κυκλοφορίας οχημάτων, του ανέμου και της σεισμικής δραστηριότητας. Οι σωστά συντηρημένες χαλύβδινες γέφυρες έχουν

μεγάλη διάρκεια ζωής που μπορεί να υπερβεί και τον αιώνα, κάτι που είναι απαραίτητο για βιώσιμες υποδομές, ενώ η πρόοδος στην προστασία από τη διάβρωση και γενικότερα τις καιρικές συνθήκες, ενισχύουν περαιτέρω τη μακροζωία τους και μειώνουν το κόστος συντήρησης. Πέρα από τη λειτουργική τους χρησιμότητα, οι μεταλλικές γέφυρες είναι συνώνυμες με τη μηχανική ικανότητα και την υψηλή αισθητική, με την αναλογία αντοχής προς βάρος του υλικού να επιτρέπει καινοτόμα σχέδια και μεγάλα ανοίγματα που δεν θα ήταν εφικτά με χρήση άλλων υλικών.

Τέλος, ο ρόλος των χαλύβδινων γεφυρών στις υποδομές και τις μεταφορές είναι πολύπλευρος, καθώς δεν είναι μόνο ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση αποτελεσματικών και αξιόπιστων μεταφορών, αλλά διαδραματίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στην οικονομική ανάπτυξη, την καινοτομία στις κατασκευές και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

## **1.2 Σκοπός Πτυχιακής Εργασίας.**

Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι να παρέχει μια σε βάθος διερεύνηση των μεθοδολογικών πτυχών που εμπλέκονται στο σχεδιασμό των χαλύβδινων γεφυρών. Με έμφαση στις αρχές της δομικής μηχανικής και στις πρακτικές εκτιμήσεις, αυτή η εργασία επιδιώκει να αποσαφηνίσει τη συστηματική προσέγγιση που ακολουθούν οι μηχανικοί στην εννοιολόγηση, ανάλυση και υλοποίηση κατασκευών γεφυρών από χάλυβα.

Οι μεταλλικές γέφυρες προσφέρουν ευελιξία, ανθεκτικότητα, και οικονομική απόδοση στην ανάπτυξη υποδομών. Ως εκ τούτου, η πλήρης κατανόηση των μεθοδολογιών σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μεταλλικών γεφυρών είναι πρωταρχικής σημασίας για τους επίδοξους μηχανικούς και τους επαγγελματίες στον τομέα. Ερευνώντας τις περιπλοκές του σχεδιασμού των μεταλλικών γεφυρών, αυτή η εργασία προσπαθεί να προσδιορίσει τις βασικές αρχές και διαδικασίες που διέπουν τη δημιουργία αποτελεσματικών κατασκευών γεφυρών.

Η πτυχιακή αυτή εργασία επικεντρώνεται σε διάφορες πτυχές της μεθοδολογίας σχεδιασμού χαλύβδινων γεφυρών, ξεκινώντας από μια σύντομη ανάλυση στην ιστορική εξέλιξη της κατασκευής των χαλύβδινων γεφυρών και έπειτα παρουσιάζονται οι προκαταρκτικές εκτιμήσεις σχεδιασμού, όπως αναλύσεις φορτίσεων, επιλογή υλικού κατασκευής, τυπολογία γέφυρας και δομική διαμόρφωση γεφυρών. Στη συνέχεια γίνεται εκτενέστερη αναφορά στον

καθορισμό κριτηρίων σχεδίασης, τον προσδιορισμό τύπου γέφυρας και την κατά προσέγγιση διαστάσεων της που ακολουθείται από μια εκτενέστερη αναφορά στα στοιχεία που αποτελούν μια χαλύβδινη γέφυρα, όπως επίσης και στους κώδικες και τα πρότυπα σχεδίασης (Αμερικάνικα Πρότυπα AASHTO LFRD - Ευρωκώδικες) που θα πρέπει να διέπουν το σχεδιασμό της. Έπειτα, ακολουθεί η εξέταση και ανάλυση μεθόδων σχεδίασης για πέντε σημαντικές χαλύβδινες γέφυρες, παρουσιάζοντας τα διδάγματα και τις καινοτομίες που έφεραν στον κατασκευαστικό κλάδο. Τέλος, γίνεται αναφορά σε νέα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή χαλύβδινων γεφυρών προσφέροντας νέες σχεδιαστικές δυνατότητες στο μελετητή, κλείνοντας με τις νέες τάσεις που οδηγούν τα πρότυπα σχεδίασης και βασίζονται στον κύκλο ζωής μιας κατασκευής με όρους βιώσιμης ανάπτυξης.



*Εικόνα 1.2.1* Η γέφυρα Golden Gate, Από *Golden Gate Bridge*, του Nicolas Janberg, 24 Σεπτεμβρίου 2014, Structurae. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://structurae.net/en/media/229930-golden-gate-bridge> Copyright 2014 του Nicolas Janberg

## 2.0 Ιστορικό Υπόβαθρο

### 2.1 Εξέλιξη των μεθόδων σχεδίασης γεφυρών από χάλυβα

Η εξέλιξη των μεθόδων σχεδιασμού χαλύβδινων γεφυρών εκτείνεται σε αιώνες, αντανακλώντας τις εξελίξεις στην επιστήμη των υλικών, τις αρχές μηχανικής και τις τεχνικές κατασκευής. Η κατανόηση της ιστορικής εξέλιξης του σχεδιασμού της χαλύβδινης γέφυρας παρέχει πολύτιμες γνώσεις σχετικά με την πρόοδο της γνώσης της μηχανικής και την καινοτομία που οδηγεί το πεδίο αυτό.

Σε σχέση με τα υλικά κατασκευής των γεφυρών, ο χάλυβας άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως αντικαθιστώντας το ξύλο γύρω στο 1840, παρά το γεγονός ότι σίδηρος χρησιμοποιήθηκε για 1<sup>η</sup> φορά σε γέφυρα με αλυσίδες στον ποταμό Oder στην Πρωσία το 1734, ενώ ήδη από το 1840 είχαμε κατασκευή γέφυρας ζευκτών από σίδηρο στις ΗΠΑ (Xanthakos, 1994). Με το πέρασμα των δεκαετιών, οι μέθοδοι σχεδίασης και κατασκευής γεφυρών μεταβαίνει από τον εμπειρισμό στην υπολογιστική ανάλυση, κάτι που οδηγεί σε λιγότερες κατασκευαστικές αστοχίες και έτσι επιτυγχάνονται διαρκώς γεφυρώσεις με μεγαλύτερα ανοίγματα.

Στις ΗΠΑ, από το 1874 αντικαταστάθηκε η χρήση κατεργασμένου σιδήρου για κατασκευή γεφυρών με χάλυβα και έτσι οδηγηθήκαμε στην κατασκευή της 1<sup>ης</sup> τοξωτής γέφυρας από χάλυβα και την κατασκευή ουσιαστικά γεφυρών μεγαλύτερων ανοιγμάτων που βασίστηκε στην καλύτερη απόδοση του χάλυβα ως δομικό υλικό (Haifan, et al., 2011). Το 19ο αιώνα μπήκαν ακόμη οι αρχές κατασκευής γεφυρών, ενώ το 1847 δημοσιεύτηκε το 1<sup>ο</sup> σχετικό βιβλίο από τον Whipple που επικεντρωνόταν στην ανάλυση ζευκτών κατασκευών, με τον Culmann το 1866 να αναλύει περαιτέρω τις αρχές της προβολοδόμησης στην κατασκευή ζευκτών γεφυρών (Xanthakos, 1994).



Εικόνα 2.1.1 Η γέφυρα Forth, Από *The Forth Bridge*, του Ko Hon Chiu Vincent, 1 Ιουλίου 2015, UNESCO. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://whc.unesco.org/en/list/1485/> Copyright 2015 του Ko Hon Chiu Vincent

Επιπλέον, από το 1890 εγκαταλήφθηκε πλήρως η χρήση σιδήρου στη γεφυροποιία και υιοθετήθηκε η χρήση χάλυβα, αφού αναγνωρίστηκε η υπεροχή του σαν υλικό (Xanthakos, 1994), ενώ το 1890 στη Βρετανία, με τη μέθοδο της προβολοδόμησης, η οποία αποτελεί έως σήμερα μέθοδο κατασκευής γεφυρών μεγάλων ανοιγμάτων, κατασκευάστηκε η γέφυρα ζευκτών Forth, με άνοιγμα στα 521,2 μέτρα (Haifan, et al., 2011). Η Firth of Forth είναι σιδηροδρομική γέφυρα με κύριο βασικό υλικό το ρευστοπαγή χάλυβα, με κύριο φορέα δικτυωτή δοκό Gerber και ογκώδη δικτυώματα που ξεκινούν από τα βάθρα προς δύο κατευθύνσεις, ενώ στα βάθρα φτάνουν ύψος 105 μέτρα, με το ύψος να μειώνεται στο μέσο του αμφιέρειστου τμήματος του δικτυώματος και να φτάνει τα 12,5 μέτρα (Ερμόπουλος, 2008).

Μετάπειτα σε μια ακόμη γέφυρα ζευκτών, το 1909 στην Νέα Υόρκη, έχουμε την κατασκευή της γέφυρας Queensboro, με διαδοχικά ανοίγματα στα 143,17 + 360,4 + 192,15 + 300 + 140 μέτρα όπου για 1η φορά έχουμε τη χρήση χάλυβα χαμηλής κραματοποίησης με περιεκτικότητα σε νικέλιο 3%, το οποίο υλικό είχε αντοχή πάνω από 40% περισσότερη από τους τύπους χάλυβα που χρησιμοποιούνταν μέχρι στιγμής και σαν αποτέλεσμα οδήγησε σε οικονομία υλικού μειώνοντας σημαντικά το συνολικό βάρος της γέφυρας (Haifan, et al., 2011).



Εικόνα 2.1.2 Η γέφυρα Menai, Από *Menai Straits Bridge*, του Herrad Elisabeth Taubenheim, 18 Μαΐου 2008, Structurae. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://structurae.net/en/media/155216-menai-straits-bridge> Copyright 2008 του Herrad Elisabeth Taubenheim

Σε σχέση με τις κρεμαστές γέφυρες, από τις πρώτες υλοποιημένες είναι η γέφυρα Menai στην Αγγλία το 1826, η οποία κατασκευάστηκε περισσότερο λιγότερο βασισμένη σε υπολογισμούς και κυρίως διαισθητικά, και είχε ως καλώδια ανάρτησης άλυσσο από σφυρήλατο σίδηρο (Ερμόπουλος, 2008). Η 1<sup>η</sup> θεωρητική ανάλυση για τις κρεμαστές γέφυρες απαντάται το 1823 από τον Navier, όμως το βασικό δομικό πρόβλημα των προτάσεων αυτής της εποχής παρέμενε η επίτευξη της ακαμψίας τους (Xanthakos, 1994).

Το 1888 αναπτύχθηκε από τον Melan η «Θεωρία της καμπτικής παραμόρφωσης» (Deflection Theory), όσον αφορά τις κρεμαστές γέφυρες, ενώ το 1912 ο Moisseiff ήταν ο πρώτος που κατάφερε να εφαρμόσει τη θεωρία και να σχεδιάσει τη γέφυρα του Manhattan επιτυχώς (Haifan, et al., 2011). Με την ευρεία υιοθέτηση της θεωρία της καμπτικής παραμόρφωσης, από το 1926-1940 είχαμε πολλές κατασκευές νέων κρεμαστών γεφυρών στις ΗΠΑ, κυρίως λόγω της ευελιξίας που είχαν πλέον οι μηχανικοί όσον αφορά τη διατομή του καταστρώματος (Haifan, et al., 2011).





Εικόνα 2.1.3 Η γέφυρα Theodor Heuss, Από *Theodor Heuss Bridge*, του Nicolas Janberg, 11 Ιουλίου 2011, Structurae. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://structurae.net/en/media/184715-theodor-heuss-bridge> Copyright 2011 του Nicolas Janberg

Καλωδιωτές γέφυρες (με ευθύγραμμα καλώδια), κατασκευάζονται μετά το 2<sup>ο</sup> παγκόσμιο πόλεμο και κυρίως στην Ευρώπη, όπως η North στο Dusseldorf το 1958 με μέγιστο άνοιγμα τα 260 μέτρα, που έχει δύο ζεύγη μεμονωμένων πυλώνων, ύψους 40 μέτρων, με τον κάθε πυλώνα να συνδέεται με 6 καλώδια έκαστος σε κατάστρωμα κιβωτοειδούς διατομής ύψους 3,12 μέτρων (Ερμόπουλος, 2008). Βασικές τεχνολογίες που ανέπτυξαν και προώθησαν το συγκεκριμένο τύπο γέφυρας, είναι η ανάπτυξη της προέντασης, των σχετικών μεθόδων κατασκευής, της τεχνολογίας των καλωδίων και των επίπεδων κιβωτοειδών δοκών γεφυρών που ώθησαν τους Ευρωπαίους κυρίως μηχανικούς στην ευρεία χρήση τους (Haifan, et al., 2011).



Εικόνα 2.1.4 Η γέφυρα Brooklyn, Από *Brooklyn Bridge*, του Nicolas Janberg, 11 Ιουνίου 2016, Structurae. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://structurae.net/en/media/258637-brooklyn-bridge> Copyright 2016 του Nicolas Janberg



Εικόνα 2.1.5 Η γέφυρα George Washington, Από *George Washington Bridge*, του Nicolas Janberg, 9 Ιουνίου 2016, Structurae. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://structurae.net/en/media/258267-george-washington-bridge> Copyright 2016 του Nicolas Janberg

Βασικό χαρακτηριστικό σε σχέση με την ιστορική εξέλιξη των γεφυρών αποτελεί η επίτευξη διαρκώς μεγαλύτερων ανοιγμάτων. Από ανοίγματα των 30,65 μέτρων σε τοξωτές γέφυρες από χυτοσίδηρο, πλέον έχουμε χαλύβδινες γέφυρες ζευκτών με ανοίγματα άνω των 500 μέτρων, ενώ σε σχέση με τις κρεμαστές γέφυρες έχουμε φτάσει από ανοίγματα 468 μέτρων στη γέφυρα του Brooklyn, στην γέφυρα της Washington και την Golden Gate που ξεπερνούν σε άνοιγμα τα 1000 μέτρα, με το άνοιγμα της δεύτερης να είναι στα 1280 μέτρα, ενώ σήμερα τα ανοίγματα για κρεμαστές γέφυρες φτάνουν τα 1991 μέτρα, όπως στην περίπτωση της γέφυρας Akashi Kaikyō (Haifan, et al., 2011), τα οποία μάλιστα πρόσφατα ξεπεράστηκαν.



Εικόνα 2.1.6 Η γέφυρα Akashi Kaikyō, Από *Akashi Kaikyō Bridge*, του Shimasuki, 21 Απριλίου 2013, Structurae. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://structurae.net/en/media/353213-akashi-kaikyo-bridge> Copyright 2013 του Shimasuki

## 2.2 Βασικές εξελίξεις και καινοτομίες στη σχεδίαση γεφυρών από χάλυβα

Από το 1970, με την αύξηση της χρήσης των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των γλωσσών προγραμματισμού, έχουμε την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στον σχεδιασμό γεφυρών, ενώ με την ανάπτυξη λογισμικού, την εμπειρία και τη γνώση πάνω στις μεταβλητές φορτίσεις γεφυρών, πιο συγκεκριμένα των φορτίσεων ανέμων και των σεισμικών δονήσεων, οι μελετητές οδηγήθηκαν στο σχεδιασμό πιο ασφαλών, λειτουργικών και οικονομικά αποδοτικών κατασκευών (Haifan, et al., 2011). Καθ' όλη τη διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα, οι εξελίξεις στην επιστήμη των υλικών οδήγησαν στην ανάπτυξη χάλυβων υψηλής αντοχής και καινοτόμων κατασκευαστικών τεχνικών, οι οποίες διαδόθηκαν ταχύτατα και υιοθετήθηκαν παγκοσμίως. Η εκτεταμένη παραγωγή και χρήση του ανθρακούχου χάλυβα, των κραμάτων χάλυβα υψηλής απόδοσης, αλλά και του προεντεταμένου σκυροδέματος έφερε την επανάσταση στον σχεδιασμό και την κατασκευή χάλυβδινων γεφυρών, επιτρέποντας στους μηχανικούς να δημιουργήσουν ελαφρύτερες, πιο ανθεκτικές, με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και πιο οικονομικές κατασκευές.



Εικόνα 2.2.1 Η γέφυρα Foyle, Από *The Foyle Bridge - Londonderry*, του Kenneth Allen, 18 Ιανουαρίου 2006, Structurae. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://structurae.net/en/media/53473-the-foyle-bridge-londonderry> Copyright 2006 του Kenneth Allen

Ακόμη, η ανάπτυξη και η χρήση αισθητήρων, οι οποίοι ήδη από το 1987 άρχισαν να χρησιμοποιούνται στη Μεγάλη Βρετανία και πιο συγκεκριμένα στη γέφυρα Foyle, που κατέγραφε την καμπτική παραμόρφωση των κύριων δοκών λόγω φορτίσεων των οχημάτων και του αέρα, αποτέλεσαν τη βάση για πιο λειτουργικές και ανθεκτικές στο χρόνο κατασκευές (Haifan, et al., 2011). Επιπροσθέτως, μετά το 1990, η ανάπτυξη σύγχρονων προτύπων ασφάλειας και λειτουργικότητας των κατασκευών, και συγκεκριμένα των γεφυρών, όπως οι Ευρωκώδικες και ο AASHTO - Αμερικάνικος κώδικας, συνέβαλαν στην πρόληψη αστοχιών των κατασκευών και διατήρηση της λειτουργικότητάς τους λόγω διαφόρων τυχαίων, συχνών και/ή σπάνιων συμβάντων (Haifan, et al., 2011).

Ιστορικά η πρόοδος και η εξέλιξη στον κατασκευαστικό κλάδο είναι συνυφασμένη με κάποιου είδους καινοτομία είτε στον τρόπο κατασκευής, είτε στα δομικά υλικά, ενώ η γεφυροποιία κατακλύζεται κυρίως από το χάλυβα και το σκυρόδεμα σαν τα κύρια δομικά υλικά εδώ και δεκάδες χρόνια, με τους τύπους γεφυρών που κατασκευάζονται να έχουν παραμείνει οι ίδιοι εδώ και πάνω από 50 χρόνια. Ειδικά όσον αφορά τα νέα υλικά, οι εξελίξεις αφορούν κυρίως το χάλυβα, όπου έχουμε την δημιουργία νέων κραμάτων υψηλότερων αποδόσεων, τη χρήση εξαρτημάτων μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης και τη χρήση σύνθετων υλικών ινοπλισμένων πολυμερών (FRP & CFRP) στην κατασκευή γεφυρών λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής τους, και στην αναλογία αντοχής προς βάρος, οι οποίες σύμφωνα με τον Casas (2015) δεν μοιάζουν να οδηγούν σε σημαντικές εξελίξεις τον κλάδο.

Οι εξελίξεις που αναμένεται να υπάρξουν, μοιάζουν εφικτές, αλλά μικρότερης επίδρασης και κυριαρχούνται κυρίως από βελτιώσεις υπαρχόντων μεθόδων κατασκευής, ανάπτυξη νέων τύπων κραμάτων χάλυβα και σκυροδέματος που θα οδηγήσουν σε γέφυρες μεγαλύτερων ανοιγμάτων και μεγαλύτερης διάρκειας ζωής, σε εκτεταμένη προκατασκευή τμημάτων τους και καλύτερο έλεγχο της κατασκευής σε θέματα κόπωσης και λειτουργικότητας, αυξάνοντας άμεσα και έμμεσα το χρόνο ζωής της (Casas, 2015).

Σύμφωνα με την ιστορική εξέλιξη στις μεθόδους σχεδιασμού και κατασκευής χαλύβδινων γεφυρών και τις τάσεις που μοιάζουν να κυριαρχούν τα τελευταία χρόνια, μοιάζει να υπάρχει ένας βασικός επαναπροσδιορισμός των αρχών σχεδιασμού, ο οποίος φέρνει στο προσκήνιο τη διάρκεια ζωής, λειτουργικότητας και αντοχής της κατασκευής με όρους βιώσιμης ανάπτυξης. Με στόχο λοιπόν τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μιας κατασκευής τόσο κατά την ανέγερση όσο και κατά την λειτουργία της, επαναπροσδιορίζονται οι μέθοδοι σχεδιασμού

μέσω νέων υλικών κατασκευής. Εφευρίσκονται ακόμη νέοι τρόποι επίβλεψης της κατασκευής κατά τη διάρκεια λειτουργίας της, και έτσι οδηγούμαστε σε μια κατασκευή με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και λειτουργικότητα, όπως επίσης και με καλύτερη οικονομική απόδοση.

### 3.0 Παράμετροι Σχεδίασης

#### 3.1 Επιβαρύνσεις | Δράσεις | Φορτία

Οι δράσεις που εφαρμόζονται στις κατασκευές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις βασικούς τύπους που ορίζουν διαφορετικές καταστάσεις σχεδιασμού:

- Καταστάσεις διαρκείας, σε κανονική συνθήκη χρήσης μιας κατασκευής.
- Παροδικές καταστάσεις, οι οποίες συνήθως έχουν μικρή χρονική διάρκεια και διαδραματίζονται σε φάσεις κατασκευής, επιδιόρθωσης κτλ.
- Τυχηματικές καταστάσεις, σε περίπτωση κάποιου ατυχήματος, πρόσκρουσης, φωτιάς κτλ.
- Κατάσταση σεισμού, λόγω κυρίως σεισμικής καταπόνησης της κατασκευής (Ερμόπουλος, 2008).

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, EN 1991-2, οι δράσεις κυκλοφορίας στις γέφυρες, ανεξαρτήτως του τύπου της γέφυρας, αποτελούν μεταβλητές δράσεις ή/και δράσεις τυχηματικών καταστάσεων σχεδιασμού. Οι δράσεις πάνω στις κατασκευές σε συνδυασμό ή μη, μπορεί να οδηγήσουν την κατασκευή σε οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας, με τις πρώτες να οδηγούν σε κατάρρευση της κατασκευής ή τμημάτων της και τις δεύτερες σε μια μη λειτουργική κατασκευή για τους χρήστες.

Υπάρχουν διάφορες ταξινομήσεις σε σχέση με τις δράσεις που προαναφέρθηκαν, και ασκούνται σε κατασκευές. Οι δράσεις στις οποίες υποβάλλεται μια κατασκευή μπορεί να είναι άμεσες ή έμμεσες, όπως σημειακές φορτίσεις ή θερμικές παραμορφώσεις και υποχωρήσεις βάθρων λόγω γεωλογικών μεταβολών στην δεύτερη περίπτωση (Ερμόπουλος, 2008).

Ταυτόχρονα σε σχέση με το χρόνο άσκησής τους ταξινομούνται σε:

- Μόνιμες (G)  
πχ. το βάρος όλων των μελών της κατασκευής
- Μεταβλητές (Q)  
πχ. επιβαλλόμενα φορτία
- Τυχηματικές (A)  
πχ. συγκρούσεις οχημάτων (Ερμόπουλος, 2008).

Άλλες ταξινομήσεις γίνονται σε σχέση με τη θέση ή το σημείο που ασκούνται οι φορτίσεις και διακρίνονται σε καθορισμένες και ελεύθερες και ως προς τη φύση τους και κατατάσσονται σε στατικές ή δυναμικές, ενώ υπάρχουν και δράσεις που ανήκουν σε πάνω από μια κατηγορία, όπως οι έμμεσες που μπορεί να είναι μόνιμες ή μεταβλητές (Ερμόπουλος, 2008).

### Μόνιμα Φορτία

Σύμφωνα με τα Αμερικάνικα πρότυπα, για τον AASHTO (2020), ως μόνιμα φορτία ορίζονται «φορτία και δυνάμεις που είναι, ή υποτίθεται ότι είναι, είτε σταθερά μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής ή μεταβάλλονται μόνο μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα».

Για τον AASHTO (2020) ,οι μόνιμες φορτίσεις κατατάσσονται σε 10 διαφορετικούς τύπους φορτίων που άμεσα ή έμμεσα επιδρούν στο βάρος της κατασκευής ή την παραμορφώνουν.

1. Επιδράσεις δυνάμεων ερπυσμού (CR)
2. Καθοδικές δυνάμεις (DD)
3. Τα στατικά και μη, μέλη της κατασκευής (DC)
4. Το φορτίο επιφανειών και δευτερευόντων στοιχείων (DW)
5. Φορτίσεις από την οριζόντια δύναμη του εδάφους (EH)
6. Επιδράσεις δυνάμεων από συμβάντα κατά την κατασκευή (EL)
7. Φορτίσεις από γεωλογικές επιβαρύνσεις (ES)
8. Κατακόρυφη φόρτιση από το νεκρό φορτίο εκσκαφών (EV)
9. Δευτερεύουσες δυνάμεις σαν αποτέλεσμα οριακών καταστάσεων (PS)
10. Φορτίσεις από δυνάμεις παραμορφώσεων – συρρίκνωσης (SH)

Τα μόνιμα φορτία που δρουν σε διαφόρων τύπων γέφυρες, όπως σιδηροδρόμων και αυτοκινητοδρόμων, αποτελούνται από το βάρος όλων των μελών της κατασκευής, διαφόρων προσαρτημένων εξαρτημάτων, φινιρίσματος, κράσπεδων, φωτισμού και σηματοδότησης, αλλά και δικτύου φυσικού αερίου, νερού, ρεύματος και τηλεφώνου κλπ., είναι δηλαδή φορτία που παραμένουν σταθερά σε θέση και μέγεθος και σε βάθος χρόνου (Ellobody, 2023). Είναι ουσιαστικά όλα τα στατικά και μη, μέλη της κατασκευής.

### Μεταβλητά Φορτία

Σε σχέση με τα μεταβλητά φορτία που δρουν σε μια γέφυρα, οι κατηγοριοποιήσεις διαφέρουν ανά χώρα και οι εθνικοί κώδικες καθορίζουν πως θα λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της καταπόνησης ανά στοιχείο της γέφυρας κάθε φορά, σε κάθε περίπτωση όμως τα φορτία περιγράφουν τη μέγιστη δυνατή φόρτιση της εκάστοτε γέφυρας (Ellobody, 2023). Ο AASHTO (2020) ορίζει ως μεταβλητά φορτία «φορτία και δυνάμεις που μπορεί να ποικίλουν σε σύντομο χρονικό διάστημα σε σχέση με τη διάρκεια ζωής της κατασκευής», ενώ αναγνωρίζει 18 διαφορετικά είδη μεταβλητών φορτίων.

Σύμφωνα με τον AASHTO (2020), αυτά είναι:

1. Φορτίσεις από εκρήξεις (BL)
2. Φορτίσεις δυνάμεων πέδησης οχημάτων (BR)
3. Φυγόκεντρη δύναμη οχημάτων (CE)
4. Δύναμη σύγκρουσης οχημάτων (CT)
5. Δύναμη σύγκρουσης σκάφους (CV)
6. Φορτίο σεισμού (EQ)
7. Φορτίο τριβής (FR)
8. Φορτίο Πάγου (IC)
9. Επιτρεπόμενο δυναμικό φορτίο οχήματος (IM)
10. Φορτίο Οχημάτων (LL)
11. Προσαύξηση δυναμικού φορτίου (LS)
12. Φορτίο πεζών (PL)
13. Φορτίσεις λόγω διευθέτησης (SE)
14. Επιδράσεις δυνάμεων λόγω διαβάθμισης θερμοκρασίας (TG)



15. Επιδράσεις δυνάμεων λόγω θερμοκρασίας (TU)
16. Υδάτινη ροή και φόρτιση (WA)
17. Φορτίο ανέμου σε κινητό φορτίο (WL)
18. Φορτίο ανέμου στην κατασκευή (WS).

Βασική διαφοροποίηση των Αμερικάνικων Προτύπων σχεδίασης AASHTO, σε σχέση με τους Ευρωκώδικες, είναι η συμπερίληψη δράσεων που ορίζονται σαν τυχηματικές, αλλά και οι σεισμικές φορτίσεις στις μεταβλητές φορτίσεις που επιδρούν ή μπορεί να επιδράσουν σε μια κατασκευή. Ακόμη σαν οδηγίες-πρότυπο σχεδίασης οι φορτίσεις κόπωσης κατά τα Αμερικάνικα πρότυπα συμπεριλαμβάνονται στους συνδυασμούς φορτίσεων, ενώ κατά τον Ευρωκώδικα 1, EN 1991-2, 2003 όσον αφορά τις γέφυρες συγκεκριμένα, η κυκλοφορία σε αυτές οδηγεί σε φάσμα τάσεων που είναι πιθανόν να προκαλέσει κόπωση. Στο EN 1991-2, 2003 όμως αναφέρεται πως το φάσμα των τάσεων που αναπτύσσεται εξαρτάται από τη γεωμετρία, το είδος, και την απόσταση των οχημάτων μεταξύ τους, τα οποία ουσιαστικά συνθέτουν την κυκλοφορία και επιδρούν δυναμικά στη γέφυρα, αλλά και τα αξονικά φορτία που επιδρούν σε αυτήν. Τα κινητά φορτία αποτελούν ουσιαστικά τα κατακόρυφα φορτία που ασκούνται σε μια κατασκευή, που στην περίπτωση των γεφυρών, αποτελούν τα οχήματα που κινούνται σε αυτή και αντιμετωπίζονται ως στατικά φορτία, κάτι που σε περιπτώσεις γεφυρών μικρού και μεσαίου ανοίγματος αποτελεί και την πιο σημαντική φόρτιση που ασκείται στην κατασκευή (Mertz, 2022).

Κατά τον Ευρωκώδικα 1, EN 1991-2, οι δράσεις κυκλοφορίας είναι δράσεις πολλών συνιστωσών, και σε πεζογέφυρες, οδογέφυρες και σιδηροδρομικές γέφυρες αποτελούν συνδυασμό μεταβλητών δράσεων και τυχηματικών, ενώ όλες οι δράσεις κυκλοφορίας ανήκουν στην κατηγορία ελεύθερες δράσεις. Σε σχέση τώρα με τα φορτία κυκλοφορίας και πεζών σε συνδυασμό με τη δυναμική προσαύξηση κάθε φορά, σε κανονικές συνθήκες χρήσης, θα πρέπει σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 1, EN 1991-2, 2003 να λαμβάνονται υπόψη ως μεταβλητές δράσεις που μπορεί να είναι χαρακτηριστικές τιμές σύμφωνα με στατιστικές αναλύσεις, συχνές ή κατά προσέγγιση μόνιμες τιμές.

Τέλος σε σχέση με τις τυχηματικές καταστάσεις σχεδιασμού, στον Ευρωκώδικα 1, EN 1991-2, οι περιπτώσεις οδικών και σιδηροδρομικών ατυχημάτων, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο δομοστατικό σχεδιασμό σε περιπτώσεις που δεν υπάρχει η κατάλληλη προστασία. Οι

δράσεις για τυχηματικές καταστάσεις σχεδιασμού περιγράφονται στους Ευρωκώδικες και αντιπροσωπεύονται από διάφορα προσομοιώματα φόρτισης, ενώ το Εθνικό Προσάρτημα προσδιορίζει τις δυνάμεις πρόσκρουσης, παρότι υπάρχουν έργα που ενδέχεται να απαιτούν περαιτέρω αναλύσεις. Σε κάθε περίπτωση κατά το σχεδιασμό θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι κρίσιμες περιπτώσεις φόρτισης.

### 3.2 Ο χάλυβας και οι ιδιότητές του

Σαν υλικό, ο χάλυβας ορίζεται ως ένα κράμα σιδήρου, με ένα μικρό ποσοστό από άνθρακα και μαγγανίου και διαφόρων στοιχείων που χαρακτηρίζονται ως «ακαθαρσίες-αθέμητα στοιχεία», όπως θείο και φώσφορος, ενώ στο κράμα και άλλα στοιχεία μπορεί να προστίθενται για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος, όπως χαλκός, πυρίτιο, νικέλιο, χρώμιο, μολυβδαίνιο, βανάδιο, νιόβιο και ζirkόνιο (Ellobody, 2023). Η χημική σύσταση του χάλυβα και οι ποσοστώσεις στοιχείων μαζί με την ανάλογη θερμική κατεργασία, προσδίδουν στο κράμα τις κατάλληλες κάθε φορά ιδιότητες για να καλύπτεται πλήρως η προοριζόμενη χρήση του χάλυβα (ΤΕΕ, χ.η.).

Ο χάλυβας σαν υλικό έχει αρκετά πλεονεκτήματα στη χρήση του όπως:

- Υψηλή αντοχή σε σχέση με το ίδιο βάρος που δίνει τη δυνατότητα πολλών σχεδιαστικών επιλογών στο μελετητή.
- Ομοιογένεια που εξασφαλίζει την ακρίβεια της μελέτης εφαρμογής.
- Μεγάλη διάρκεια ζωής χωρίς αλλοιώσεις των ιδιοτήτων του, μετά από έλεγχο και συντήρηση.
- Ελαστικότητα, ιδιότητα που υπάρχει ακόμη και σε άσκηση υψηλών τάσεων.

- Ολκιμότητα δίνοντας στην κατασκευή τη δυνατότητα μεγάλων παραμορφώσεων, και επιμηκύνσεων πριν την τελική κατάσταση θραύσης, προλαμβάνοντας ουσιαστικά την αστοχία.
- Συγκολλησιμότητα.
- Αποτελεί βιομηχανικό προϊόν, χαρακτηριστικό που εξασφαλίζει την ποιότητα του, αλλά και την ταχύτητα ολοκλήρωσης μιας κατασκευής, και επισκευής – ενίσχυσης άλλων κατασκευών.
- Ανακυκλωσιμότητα. (Βάγιας, κ.ά, 2005)

Ταυτόχρονα ο χάλυβας παρουσιάζει και κάποια βασικά μειονεκτήματα σαν υλικό:

- Μικρή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Μικρή αντοχή σε θλίψη που ενδεχομένως οδηγεί σε συνθήκες αστάθειας και λυγισμού.
- Κόπωση υλικού λόγω φορτίσεων. (Βάγιας, κ.ά, 2005)

Η χημική σύσταση του χάλυβα είναι βέβαια αυτή που διαμορφώνει τις ιδιότητες του και κάποια από τα μειονεκτήματα του είναι δυνατόν να εξαλειφθούν. Παράλληλα, το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας ορίζει σαν χάλυβα, το κράμα σιδήρου (Fe) και άνθρακα (C) με περιεκτικότητα σε άνθρακα κάτω του 1,8%, ενώ τα άλλα στοιχεία που μπορεί να περιέχονται στο κράμα δεν ξεπερνούν σε ποσοστό το 5%, με τον άνθρακα και πάλι να προσδίδει τα κύρια χαρακτηριστικά κάθε τύπου χάλυβα, όπως η σκληρότητα και η εφελκυστική αντοχή, τα χαρακτηριστικά που ουσιαστικά το κάνουν να υπερτερεί σαν υλικό σε σχέση με το σκυρόδεμα, ελαττώνοντας όμως ταυτόχρονα την συνεκτικότητα και την πλαστιμότητα του κράματος (ΤΕΕ, χ.η.). Σήμερα ο δομικός χάλυβας περιέχει άνθρακα σε περιεκτικότητα 0,15%-0,29% (Βάγιας, κ.ά, 2005). Το ποσοστό άνθρακα στο κράμα καθορίζει τη συγκολλησιμότητα του χάλυβα αντιστρόφως ανάλογα, ενώ η ύπαρξη μαγγανίου (0,3%-0,8%) σε ανθρακούχους χάλυβες

ενισχύει τη συγκολλησιμότητα του χάλυβα που δεν υφίσταται, όταν ο χάλυβας περιέχει πάνω από 0,15% άνθρακα, ενώ ταυτόχρονα το μαγγάνιο προσδίδει ανθεκτικότητα και σκληρότητα σε ειδικά κράματα χάλυβα όπου βρίσκεται σε ποσοστό 12% και 15% (ΤΕΕ, χ.η.). «Αθέμητα στοιχεία» για το χάλυβα αποτελούν ο φωσφόρος και το θείο, γιατί επιδρούν αρνητικά στο κράμα, προσδίδοντάς του ψαθυρότητα και μαλακτότητα αντίστοιχα, ενώ για να πετύχουμε την ελάχιστη αρνητική επίδρασή τους στο χάλυβα θα πρέπει να βρίσκονται στο κράμα σε ποσοστά μικρότερα του 0,1% (ΤΕΕ, χ.η.). Έτσι, σύμφωνα με τις ιδιότητες που προσδίδουν στο κράμα τα στοιχεία που προστίθενται, επιλέγεται κάθε φορά ο κατάλληλος τύπος χάλυβα για κάθε μέλος της κατασκευής με στόχο τη διασφάλιση της αντοχής και της ανθεκτικότητας της συνολικής δομής.

Σε σχέση με το χάλυβα που χρησιμοποιείται στις γέφυρες, αυτός μπορεί να αποτελεί ανθρακούχο χάλυβα, υψηλής αντοχής, θερμικά επεξεργασμένο, θερμικά επεξεργασμένο ανθρακούχο και ανθεκτικό στις καιρικές συνθήκες, ενώ επιλέγεται σύμφωνα με τα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε φορά τύπου του, την αντοχή, ολκιμότητα, πλαστιμότητα, συγκολλησιμότητα, θραυστική αντοχή, και αντοχή στη διάβρωση και τις καιρικές συνθήκες (Ellobody, 2023). Ακόμη θα πρέπει να τονιστεί πως στην πραγματικότητα και οι ανοξείδωτοι χάλυβες δεν είναι απόλυτα ανθεκτικοί στη διάβρωση, παρότι κατασκευάζονται από κράμα χρωμίου με ελάχιστο ποσοστό 12%, και την προσθήκη νικελίου και μολυβδαινίου (ΤΕΕ, χ.η.).

Στην Ευρώπη, ο Σχεδιασμός Κατασκευών από Χάλυβα περιγράφεται στον Ευρωκώδικα 3, όπου ορίζονται οι γενικοί κανόνες για το σχεδιασμό κατασκευών από χάλυβα στο EN 1990, οι βασικές απαιτήσεις σχεδιασμό σε οριακές καταστάσεις ασφαλείας σε συνδυασμό δράσεων και φορτίσεων σύμφωνα με το EN 1990 και το EN 1991 και οι κανόνες αντοχής, λειτουργικότητας και ανθεκτικότητας που περιγράφονται στο EN 1993 (Ευρωκώδικας 3 - EN 1993-1-1, 2005).

Σύμφωνα με τα Ευρωπαϊκά πρότυπα στο EN 1993-1-1, οι απαιτήσεις ολκιμότητας του δομικού χάλυβα (S) θα πρέπει:

- $f_u / f_y \geq 1,15$   
ο λόγος της προδιαγεγραμμένης ελάχιστης διαρροής σε εφελκυσμό ως προς την προδιαγεγραμμένη ελάχιστη αντοχή διαρροής

- επιμήκυνση σε αστοχία να είναι μικρότερη του 15%  
με την επιμήκυνση με δοκίμιο μήκους  $5,65 \sqrt{A_0}$ ,  
με  $A_0$  την αρχική επιφάνεια διατομής.
- $\epsilon_u \geq 15\epsilon_y$ , όπου  $\epsilon_y$  η παραμόρφωση διαρροής ( $\epsilon_y = f_y / E$ ).  
όπου  $\epsilon_u$  η οριακή παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην οριακή διαρροή  $f_u$

Η τάση διαρροής του χάλυβα είναι μέγιστης σημασίας σχεδόν σε κάθε τύπου χαλύβδινες κατασκευές (AASHTO, 2020), ενώ σε σχέση με το χάλυβα που χρησιμοποιείται στις χαλύβδινες γέφυρες, ο ανθρακούχος χάλυβας φτάνει τάση διαρροής έως  $275 \text{ N/mm}^2$ , οι χάλυβες υψηλής αντοχής  $390 \text{ N/mm}^2$  και οι θερμικά επεξεργασμένοι ανθρακούχοι χάλυβες έχουν τάση διαρροής άνω από  $390 \text{ N/mm}^2$  (Ellobody, 2023).

Στο EN 1993-1-1 περιγράφεται η χρήση δομικού χάλυβα και καλύπτονται οι απαιτούμενες προδιαγραφές του μέχρι και χάλυβα αντοχής S460, ενώ επιπρόσθετοι κανόνες για χάλυβες υψηλότερων αντοχών μέχρι S760 περιγράφονται στο EN 1993-1-12. Χάλυβας S276 χρησιμοποιείται κυρίως για γέφυρες που προορίζονται για σιδηροδρόμους, όπου η κόπωση του υλικού και η σκληρότητα έχουν κυρίαρχη σημασία στο σχεδιασμό σε σχέση με την αντοχή σε εφελκυσμό (BCSA, 2010). Τέλος, χάλυβας S355 χρησιμοποιείται κατά κόρον σε γέφυρες οδικού δικτύου, καθώς προσφέρει την ιδανική σχέση στον μελετητή εφελκυστικής αντοχής, σκληρότητας, και οικονομίας, ενώ χάλυβες S420 και S460, συναντάμε σπάνια στη γεφυροποιία και κυρίως όταν θέλουμε να μειώσουμε το ίδιο βάρος της κατασκευής (BCSA, 2010).

Ο χάλυβας σε κάθε κατασκευή θα πρέπει να έχει αντοχή σε κρούση, ώστε να αποφεύγεται η ψαθυρή θραύση εφελκυσόμενων μελών στην ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας (Βάγιας, κ.ά, 2005). Η πιθανότητα για θραύση σε μεταλλικά στοιχεία, θεωρείται απειροελάχιστη στην περίπτωση των μεταλλικών γεφυρών, γιατί λαμβάνεται υπόψη σε περιπτώσεις όπου τα εφελκυσόμενα στοιχεία βρίσκονται σε χαμηλές θερμοκρασίες, ειδικά όταν ο χάλυβας έχει μεγαλύτερο πάχος και υπάρχουν εφελκυστικές δυνάμεις, ενώ οι φορτίσεις εφαρμόζονται αιφνίδια (BCSA, 2010).

Οι βασικοί συντελεστές υλικού που θα πρέπει να βασισθούν οι υπολογισμοί για δομικούς χάλυβες, όπως περιγράφονται στον Ευρωκώδικα - EN 1993-1-1 είναι οι εξής:

- μέτρο ελαστικότητας  $E=210.000 \text{ N/mm}^2$
- μέτρο διάτμησης  $G=E/2(1+\nu) \approx 81.000 \text{ N/mm}^2$
- λόγος Poisson στην ελαστική περιοχή  $\nu=0,3$
- συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής  $\alpha=12 \times 10^{-6}$  ανά  $^{\circ}\text{C}$  (για  $T \leq 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Τέλος, σε σχέση με το χάλυβα σαν δομικό υλικό θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό οι πιθανότητες διάβρωσης, τόσο ρωγμών λόγω τάσεων, όσο και σχισμών, οι κηλιδώσεις, οι απώλειες πάχους διατομής καθώς και η ενδεχόμενη γαλβανική και σημειακή διάβρωση, αλλά και η μηχανική αντοχή της κατασκευής σε περίπτωση φωτιάς (ΤΕΕ, χ.η.-2).

### 3.3 Δομικά Ζητήματα | Τύποι Γεφυρών

Κάθε δομικός τύπος γέφυρας κατέχει μια σειρά πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που τον καθιστά ιδανική ή μη επιλογή για κάθε περίπτωση. Σε σχέση με τη χρήση του χάλυβα, ως το βασικό δομικό υλικό γεφυρών, τα κύρια πλεονεκτήματά τους συνδέονται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του υλικού. Κύρια χαρακτηριστικά των χαλύβδινων γεφυρών αποτελούν η υψηλή αντοχή με το ελάχιστον βάρος που συνεπάγεται χαμηλό κόστος, η μεγάλη διάρκεια ζωής της κατασκευής, οι δυνατότητες γρήγορης επιδιόρθωσης, ο κύκλος ζωής του υλικού, η σχετική ασφάλεια που προσφέρει σαν υλικό λόγω της δυνατότητας μεγάλων παραμορφώσεων χωρίς αστοχία, η ομοιομορφία του υλικού σε κάθε μέλος-τμήμα της κατασκευής, αλλά και η δυνατότητα κατασκευής μεγάλων ανοιγμάτων με το μικρότερο κόστος που επιτυγχάνει ταυτόχρονα και υψηλή αισθητική, ενώ βασικό μειονέκτημα αποτελεί η σκωρίαση, πρόβλημα

που επιδέχεται πλέον διάφορες λύσεις μέσω συντήρησης, διάφορων συστημάτων αερισμού, γαλβανισμού κ.ά. (Ερμόπουλος, 2008).

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου γέφυρας κάθε φορά, του δομικού συστήματος και των μελών της, στηρίζεται κυρίως σε οικονομικά κριτήρια, τα οποία συμπεριλαμβάνουν αρκετούς παράγοντες εκτός από τη δομική συμπεριφορά, όπως το ίδιο κόστος του υλικού κατασκευής, τη διαθεσιμότητά του, τα έξοδα μεταφοράς, συναρμολόγησης και μετέπειτα συντήρησης της γέφυρας (White, 2022).

Σε σχέση με τη στατική συμπεριφορά της κατασκευής, την πιο «κατάλληλη» ταξινόμηση αποτελεί η κατηγοριοποίηση ανά μήκος ανοίγματος γέφυρας, καθώς έχει τη μεγαλύτερη επίδραση για τη στατική επάρκεια της κατασκευής (White, 2022), και ως αποτέλεσμα η επιλογή του καταλληλότερου τύπου είναι συνήθως μια συνάρτηση οικονομικών παραγόντων και ανοίγματος γέφυρας.



Εικόνα 3.3.1 Η γέφυρα Marion, Από *Marion Street Bridge - USA*, του Mark C. Scherzinger, 25 Απριλίου 2010, Structurae. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://structurae.net/en/media/162221-marion-street-bridge> Copyright 2010 του Mark C. Scherzinger

Γέφυρες με ανοίγματα έως τα 120 μέτρα, βασίζονται κυρίως σε σύστημα δοκών ή πλακοδοκών (White, 2022). Στις ΗΠΑ, τέτοιοι τύποι γέφυρας είναι συχνότεροι για ανοίγματα κάτω των 60 μέτρων, ενώ σε ανοίγματα, άνω των 90 μέτρων απαιτείται λεπτομερής σχεδιασμός συνδέσμων (Wright, 2022), κάτι που συνεπάγεται πιο χρονοβόρα διαδικασία ανέγερσης, σχεδιασμού και κόστους κατασκευής. Οι αναλογίες ανοίγματος – ύψος δοκών είναι πολύ σημαντικές για αυτόν τον τύπο γέφυρας. Ιδανική αναλογία, για γέφυρα με πλατύπελμες δοκούς τύπου «I», του συνολικού ύψους της διατομής  $D_{total}$  σε σχέση με το συνολικό μήκος ανοίγματος  $L$  είναι περίπου  $L/D_{total} = 25$ , και αυτό γιατί διατηρείται η ευελιξία της δομής ως προς τα κατακόρυφα φορτία (White, 2022). Σε σχέση με τις φορτίσεις, λόγω του μικρού τους σχετικά ανοίγματος, σε αυτόν τον τύπο γέφυρας τα κατακόρυφα φορτία είναι τα πιο σημαντικά για την κατασκευή και οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας (Mertz, 2022). Σε περιπτώσεις όπου οι γέφυρες υπόκεινται σε μεγαλύτερες φορτίσεις που προκαλούν στρέψη, επιλέγονται δοκοί κιβοτοειδών διατομών, στις οποίες μάλιστα ο λόγος  $L/D_{total}$  φτάνει το 40 (White, 2022).



Εικόνα 3.3.2 Η γέφυρα Ikitsuki, Από *Ikitsuki Bridge – Ιαπωνία*, του Sk01 / Panoramio, 4 Νοεμβρίου 2009, Structurae. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://structurae.net/en/media/251384-ikitsuki-bridgebridge> Copyright 2009 του Sk01 / Panoramio



Η διαδικασία ανέγερσης γεφυρών με ζευκτά είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, ειδικά σε σχέση με την κατασκευή γεφυρών με δοκούς και πλακοδοκούς και περισσότερο χρονοβόρα (Wright, 2022). Για την ανέγερση, ακόμη και σχετικά σχεδιαστικά απλών λύσεων, απαιτούνται τουλάχιστον δύο προσωρινοί πυλώνες για τη διευκόλυνση της διαδικασίας (Wright, 2022). Οι γέφυρες ζευκτών συμπεριφέρονται ουσιαστικά σαν μια ενιαία δοκός. Είναι ακόμη ιδιαίτερα αποτελεσματικά στη γεφύρωση μεγαλύτερων αποστάσεων λόγω του χαμηλού τους βάρους που επιτυγχάνεται μέσω των τριγωνισμών που σχηματίζουν τα μέλη τους και της αλληλεπίδρασης των μελών τους στις αξονικές τάσεις και συμπίεσεις (White, 2022). Λόγω επανάληψης είναι ιδιαίτερα οικονομικά από πλευράς υλικού κατασκευής, ενώ χρησιμοποιούνται κυρίως για γέφυρες σιδηροδρομικού δικτύου. Σήμερα οι γέφυρες ζευκτών αυτοκινητοδρόμων είναι συνήθως συνεχείς ή προβόλου, με τις δεύτερες να έχουν ενδιάμεσες στηρίξεις κύριο άνοιγμα τους και ένα κεντρικό τμήμα του κύριου ανοίγματος που αιωρείται μεταξύ αυτών των σημείων (White, 2022). Σαν δομή, έχουν στοιχεία που είναι κρίσιμα για τη στατική επάρκεια του συνόλου, ενώ γενικά δεν είναι πολύ ανθεκτικά έναντι του λυγισμού (Wright, 2022).



Εικόνα 3.3.3 Η γέφυρα Xinguang, Από *Xinguang Bridge*, του Wallace Lan, 25 Νοεμβρίου 2010, Structurae. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://structurae.net/en/media/212837-xinguang-bridge> Copyright 2010 του Wallace Lan

Οι τοξωτές γέφυρες αποτελούν ιδιαίτερα πολύπλοκες και ακριβές κατασκευαστικά επιλογές, καθώς λεπτομερής υπολογισμός απαιτείται κατά τη σχεδίαση, αλλά και την ανέγερσή τους. Από πλευράς αισθητικής, θεωρούνται από τις καλύτερες επιλογές τύπου γέφυρας. Στατικά, το τόξο μειώνει τις καμπτικές καταπονήσεις στην κατασκευή και αντιστέκεται σε φορτία μέσω αξονικής συμπίεσης στο τόξο (White, 2022). Μορφολογικά η συμπίεση εξισορροπείται είτε από μεγάλες οριζόντιες ωθήσεις στις θεμελιώσεις, είτε από έναν δεσμό - ελκυστήρα στα άκρα του τόξου (White, 2022). Σε σχέση με το κόστος ανέγερσης είναι αρκετά ακριβότερο από τις γέφυρες ζευκτών και δοκών, και η διαδικασία πιο πολύπλοκη καθώς απαιτούνται γερανοί για την κατασκευή, η οποία συνήθως ξεκινά από τα δύο άκρα της του τόξου και τμήματα του τόξου κατασκευάζονται σταδιακά, και ενώνονται στο τέλος της κατασκευής, μέσω διαδικασιών που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια (Wright, 2022). Ο πιο οικονομικός σχεδιασμός στην περίπτωση των τοξωτών γεφυρών, χαρακτηρίζεται από την αναλογία ανοίγματος – ύψους τόξου, καθώς το μεγαλύτερο ύψος απαιτεί μεγαλύτερα και βαρύτερα τμήματα που ανεβάζουν το κόστος ανέγερσης (Wright, 2022).



Εικόνα 3.3.4 Η καλωδιωτή γέφυρα Queensferry, Από *Queensferry Bridge*, του Tony Hisgett, 16 Νοεμβρίου 2021, Structurae. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://structurae.net/en/media/365422-queensferry-bridge> Copyright 2021 του Tony Hisgett

Όσον αφορά γέφυρες που το δομικό τους σύστημα στηρίζεται σε καλώδια, διακρίνουμε δύο κατηγορίες γεφυρών, τις καλωδιωτές και τις κρεμαστές. Η βασική τους διαφορά βρίσκεται στο σύστημα με το οποίο τα καλώδια στηρίζουν το κατάστρωμα, με τα βασικά καλώδια στις κρεμαστές γέφυρες να έχουν ένα σχετικά πιο ευλύγιστο σχήμα και για το λόγο αυτό η γεωμετρία του συστήματος να επηρεάζεται περισσότερο από τις μεταβλητές φορτίσεις (White, 2022). Σε σχέση με τις φορτίσεις, κρεμαστές γέφυρες επιλέγονται, όταν τα μόνιμα φορτία της γέφυρας είναι μεγαλύτερα και πιο σημαντικά για την κατασκευή, λόγω της σχεδιαστικής τους υπεροχής σε σχέση με των καλωδιωτών γεφυρών που επιλέγονται όταν τα δυναμικά φορτία είναι ισχυρότερα.

Οι καλωδιωτές γέφυρες γίνονται διαρκώς πιο δημοφιλής παγκοσμίως σαν επιλογή γεφύρωσης μεγαλύτερων ανοιγμάτων, με βασικότερη αιτία τις νέες μεθόδους ανέγερσής τους, κυρίως με την προβολοδόμηση που χρησιμοποιείται ευρέως τις τελευταίες δεκαετίες (Wright, 2022). Το σύστημα στις καλωδιωτές γέφυρες είναι ένα σύστημα με «αυτοαγκυρώσεις», με τα καλώδια να ασκούν θλιπτικές δυνάμεις στο κατάστρωμα, το οποίο είναι σχεδιασμένο ώστε να λαμβάνει μέρος των θλιπτικών δυνάμεις από τις δοκούς (White, 2022), ενώ η αναλογία του καταστρώματος – ανοίγματος γέφυρας είναι από 1/60 έως 1/80 (Podolny & Goodyear, 2011; White, 2022).



Εικόνα 3.3.5 Η καλωδιωτή γέφυρα Husutong, Από *Husutong Bridge*, του Mingshi Ng, 29 Ιουλίου 2021, Structurae. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://structurae.net/en/media/407138-husutong-bridge> Copyright 2021 του Mingshi Ng

Οι πυλώνες στις καλωδιωτές γέφυρες έχουν μεγάλο ύψος σε σχέση με το άνοιγμα, ενώ συνήθως κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα καθώς υπόκειται σε μεγάλα φορτία θλιπτικού λυγισμού λόγω των μεγάλων φορτίων που φέρουν (Wright, 2022). Οι θεμελιώσεις τους είναι αναλογικά αρκετά μεγάλες, ενώ με την ολοκλήρωση των πυλώνων, δεν είναι απαραίτητοι προσωρινοί πυλώνες για την διαδικασία ανέγερσης των καλωδίων, τα οποία προσαρμόζονται διαρκώς μέχρι την ολοκλήρωση της γέφυρας, λόγω της εναλλαγής των εφελκυστικών δυνάμεων που τους ασκούνται (Wright, 2022).



Εικόνα 3.3.6 Η κρεμαστή γέφυρα 1915 Çanakkale Bridge, Από 1915 Çanakkale Bridge, του Zafer, 27 Μαρτίου 2022, Structurae. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://structurae.net/en/media/378411-1915-canakkale-bridge> Copyright 2022 του Zafer

Κρεμαστές γέφυρες επιλέγονται κυρίως για γεφυρώσεις μεγαλύτερων ανοιγμάτων σε σχέση με τις καλωδιωτές, κυρίως γιατί έχουν σχεδιαστική υπεροχή στις μόνιμες φορτίσεις, οι οποίες είναι αυξάνονται ανάλογα με το άνοιγμα της γέφυρας (White, 2022). Οι αναλύσεις στη διαδικασία μελέτης και σχεδιασμού που γίνονται σε περιπτώσεις κρεμαστών γεφυρών οδηγούν συνήθως σε υπερεκτίμηση των φορτίσεων, των τάσεων και των παραμορφώσεων του

συστήματος, ενώ η αναλογία του συστήματος δοκών ή ζευκτών με το άνοιγμα της γέφυρας κυμαίνεται από 1/60 έως 1/70 (Podolny & Goodyear, 2011; White, 2022).



Εικόνα 3.3.7 Η κρεμαστή γέφυρα Great Belt East, Από *Great Belt East Bridge*, της Svenja Kramarczik, 29 Ιουνίου 2013, Structurae. Ανακτήθηκε 24 Αυγούστου 2024 από <https://structurae.net/en/media/221264-great-belt-east-bridge> Copyright 2013 της Svenja Kramarczik

Τέλος, η ανέγερση κρεμαστών γεφυρών είναι αρκετά πολυπλοκότερη διαδικασία σε σχέση με την ανέγερση καλωδιωτών γεφυρών και έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλο χρόνο κατασκευής. Στην περίπτωση των κρεμαστών γεφυρών, η γεωμετρία των κύριων καλωδίων ανάρτησης είναι μέγιστης σημασίας για τη στατική επάρκεια της κατασκευής και είναι αρκετά δύσκολο να διατηρηθεί κατά τη διαδικασία ανέγερσης, καθώς πρέπει να προσαρμόζονται διαρκώς σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα για να αποφευχθεί η άσκηση οριζόντιας φόρτισης στο άνω τμήμα των πυλώνων (Wright, 2022).

Οι τύποι γέφυρας που προαναφέρθηκαν και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους θα παρουσιαστούν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

## 4.0 Διαδικασία Σχεδίασης

### 4.1 Προετοιμασία φάσης σχεδίασης | Καθορισμός Κριτηρίων | Προσδιορισμός Τύπου | Προσέγγιση Διαστάσεων

Στο αρχικό στάδιο σχεδιασμού μιας γέφυρας επιλέγεται ο καταλληλότερος τύπος γέφυρας για την τοποθεσία. Η επιλογή του καταλληλότερου κάθε φορά τύπου είναι συνυφασμένη με το σχεδιασμό μιας οικονομικά αποδοτικής γέφυρας, ενώ θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν διάφοροι παράμετροι, όπως το μήκος του ανοίγματος, η κατασκευασσιμότητα, και η τοπογραφία της περιοχής (Wright, 2022).

Οι μεταλλικές γέφυρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τα διάφορα χαρακτηριστικά τους, τα κυριότερα των οποίων είναι η χρήση-προορισμός τους, η στατική μορφή των κυρίων δοκών, η μορφή των κυρίων δοκών, η θέση και ο αριθμός των καταστρωμάτων τους, τα είδη των συνδέσεών τους, η κλίση τους, η γεωμετρία τους, η προβλεπόμενη διάρκεια χρήσης τους και η κινητικότητα (Ερμόπουλος, 2008). Η κατηγοριοποίηση που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια γίνεται σύμφωνα με τη στατική τους μορφή, η οποία ανά περίπτωση είναι αυτή που καθορίζεται από το βασικό στοιχείο επιλογής του καταλληλότερου τύπου γέφυρας που είναι το άνοιγμα μεταξύ των βάθρων.

#### 4.1.1 Γέφυρες με δοκούς

Σε σχέση με τις μεταλλικές γέφυρες με κύριο φορέα δοκούς, η Αμερικάνικη Ένωση Χαλύβδινων Γεφυρών, ορίζει 3 κατηγορίες γεφυρών, αυτές με πλατύπελμες δοκούς «I», τις γέφυρες πλακοδοκών και τις γέφυρες με τραπεζοειδείς δοκούς.

- Γέφυρα με πλατύπελμες δοκούς

Οι χαλύβδινες γέφυρες χρησιμοποιούν κυρίως πλατύπελμες δοκούς «I» (W-shape) και συχνότερα για ανοίγματα έως 30 μέτρα, ή μερικές φορές, για συνεχή ανοίγματα έως περίπου 35 μέτρα, ενώ γενικά κατασκευάζονται σύνθετα με το κατάστρωμα της γέφυρας (Wright,

2022). Οι γέφυρες τέτοιου τύπου γίνονται λιγότερο πρακτικές σε ανοίγματα άνω των 120 μέτρων, μιας και χάνουν το πλεονέκτημα τους όσον αφορά το χαμηλό κόστος, επειδή οι δοκοί σε αυτά τα ανοίγματα απαιτούν στενότερες φλάντζες σε σχέση με το ύψος τους, και είναι λιγότερο αποτελεσματικοί στις πλευρικές καταπονήσεις (White, 2015).



Εικόνα 4.1.1 Κατασκευή γέφυρας με δοκούς στο Jesup, Νότια Αϊόβα, Από *Plate Girder and Rolled Beams are Common Superstructures for Short Span Bridges*, της Short Span Steel Bridge Alliance, 10 Μαρτίου 2013, Shortspansteelbridges. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από <https://www.shortspansteelbridges.org/products/rolled-beam-plate-girder/> Copyright 2020 της Short Span Steel Bridge Alliance

Βασικό πλεονέκτημα αυτού του τύπου δοκού αποτελεί η μεγάλη αντοχή στον εφελκυσμό (White, 2015). Οι γέφυρες πλατύπελμες δοκούς «I», έχουν ανά τετραγωνικό μεγαλύτερο βάρος από τις αντίστοιχες με πλακοδοκούς, και σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερο συνολικό βάρος της κατασκευής, αλλά το κόστος τους είναι χαμηλότερο από μιας αντίστοιχης γέφυρας με πλακοδοκούς, εξαιτίας της πολυπλοκότητας της κατασκευής και των συνδέσεών της, κάνοντας τις ελκυστικότερες σαν επιλογή κυρίως για γεφυρώσεις μικρότερων ανοιγμάτων (Wright, 2022). Βασικό μειονέκτημα του τύπου αυτού, είναι πως οι δοκοί μπορούν να χάσουν την αποτελεσματικότητά τους όταν απαιτείται μεγάλο κύρτωμα στην κατασκευή, έχουν οριζόντια καμπύλη, χρειάζονται πλάκες επικάλυψης, έχουν άνοιγμα άνω των 30 μέτρων ή απαιτείται μεγάλος χρόνος για την παράδοση του υλικού και την υλοποίηση του έργου (Wright, 2022). Παρά τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν η χρήση χάλυβα υψηλών αποδόσεων μας επιτρέπει να παρακάμψουμε πολλά από τα προαναφερθέντα ζητήματα και να εξετάσουμε ανά περίπτωση τη χρήση αυτού του τύπου γεφυρών (White, 2015). Σήμερα τις συναντάμε σε ανοίγματα από

30 έως περίπου 150 μέτρα λόγω της μεγάλης σχεδιαστικής ευελιξίας τους και παρά το γεγονός πως σε κάποια από τα μεγαλύτερα ανοίγματα δεν αποτελούν την πιο οικονομική επιλογή από πλευράς βάρους υλικού, παρέχουν οικονομικότερη λύση όσον αφορά το κόστος κατασκευής και ανέγερσης σε σύγκριση με τις γέφυρες ζευκτών και τις τοξωτές (Wright, 2022).

- Γέφυρα με πλακοδοκούς

Οι γέφυρες πλακοδοκών εξαιτίας της λιτότητας κατασκευής τους και της αποτελεσματικότητάς τους, αποτελούν τον πιο συχνό τύπο μεταλλικών γεφυρών, καθώς επιτρέπουν οδοστρώματα διαφορετικού πλάτους, ενώ μπορούν να έχουν και καμπύλη γεωμετρία σε επίπεδο κάτοψης (Wright, 2022).



Εικόνα 4.1.2 Διαδικασία κατασκευής πλακοδοκών, Από *Plate Girders*, της Indiana Group, Ιούλιος 2017, IndianaGroup. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από <http://www.indianagroup.com/plate-girders/> Copyright 2017 της Indiana Group

Σαν τύπος γέφυρας εφαρμόζεται σε ανοίγματα από 30 έως και άνω από 150 μέτρα (Wright, 2015). Σε αυτό τον τύπο, οι αποστάσεις μεταξύ των δοκών είναι πιο αποτελεσματικές μεταξύ 3,5-4 μέτρων, κάτι που ισχύει κυρίως στις γέφυρες με άνοιγμα άνω των 50 μέτρων, ενώ σε γέφυρες μικρότερων ανοιγμάτων το συνολικό βάρος του χάλυβα είναι σχετικά ανεξάρτητο της απόστασης μεταξύ των δοκών (Wright, 2022). Για να οριστούν οι αποστάσεις των δοκών σε



γέφυρες πλακοδοκών θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν στοιχεία, όπως το πάχος του καταστρώματος, ο αριθμός των εγκάρσιων πλαισίων, και το ύψος της υπερκατασκευής γιατί ορίζουν την επιλογή της δοκού και τις αποστάσεις σε αυτά τα μήκη και τελικά θα καθορίσουν το συνολικό βάρος του χάλυβα και κατ' επέκταση το συνολικό κόστος της κατασκευής (Wright, 2022). Ταυτόχρονα, όσο το μήκος του ανοίγματος αυξάνεται, οι γέφυρες με πλακοδοκούς δεν αποτελούν την ελαφρύτερη πλέον επιλογή, άρα και οικονομικότερη ως προς το υλικό επιλογή για τον μελετητή, αλλά έχουν μικρότερο κόστος παραγωγής και ανέγερσης σε σχέση με το κόστος των γεφυρών με ζευκτά και τόξα (Wright, 2015). Ακόμη στις γέφυρες πλακοδοκών, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά τη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής, ζητήματα σταθερότητας της δομής κατά την ανέγερση της γέφυρας, τα οποία μπορούν να επιλυθούν μέσω συνδέσμων (BCSA, 2010).

- Γέφυρα με τραπεζοειδείς δοκούς [Steel Tub Girder Bridges- σχήμα Π]

Οι γέφυρες με τραπεζοειδείς δοκούς αποτελούν ουσιαστικά μια γέφυρα με δοκούς, οι οποίες σε αντίθεση με τους άλλους τύπους μεταλλικών γεφυρών πολλαπλών δοκών μπορούν να έχουν περισσότερες σειρές ανοιγμάτων και μεγαλύτερη καμπυλότητα σε επίπεδο κάτοψης, ενώ είναι απλούστερες κατασκευαστικά σε σχέση με τις μεταλλικές γέφυρες ζευκτών, τοξωτών και καλωδιωτών και συναντώνται κυρίως σε μεγάλα οδικά δίκτυα αυτοκινητοδρόμων αποτελώντας μια ενδιάμεση λύση όσον αφορά την πολυπλοκότητα κατασκευής και σχεδιασμού (Wright, 2022).



Εικόνα 4.1.3 Τραπεζοειδής μεταλλική δοκός γέφυρας, Από *Save a Bundle with Tub Girders – Modern Steel Construction*, της Short Span Steel Bridge Alliance, Οκτώβριος 2023, Shortspansteelbridges. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από <https://www.shortspansteelbridges.org/save-a-bundle-with-tub-girders/> Copyright 2023 της Short Span Steel Bridge Alliance

Ουσιαστικά αποτελούν ξεχωριστή υποκατηγορία επειδή σχεδιαστικά υπερτερούν σε κατασκευές που περιλαμβάνουν καμπύλες, των γεφυρών με κιβωτοειδείς δοκούς όσον αφορά τη στρεπτική ακαμψία και αντοχή, δίνοντας παράλληλα τη δυνατότητα στο μελετητή χαράξεων με κλειστές καμπύλες. Παρόλο που οι γέφυρες με τραπεζοειδείς δοκούς είναι ακριβότερες σε σχέση με τις γέφυρες πλακοδοκών λόγω της πολυπλοκότερης γεωμετρίας τους, και του πιο εξειδικευμένου προσωπικού που απαιτείται για την κατασκευή τους, μπορούν να αποτελέσουν μια ανταγωνιστική επιλογή λόγω προσαρμοστικότητας τους (Wright, 2022).

#### **4.1.2 Γέφυρες Ζευκτών**

Τα ζευκτά λειτουργούν σαν δοκοί φέροντας φορτία, με διακριτά τμήματα, τα οποία δέχονται κυρίως αξονικές δυνάμεις (Wright, 2015). Τα μέλη ενός ζευκτού είναι διατεταγμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται τρίγωνα τα οποία λειτουργούν σαν σύνολο σχηματίζοντας ένα δομικό σύστημα (Wright, 2022). Οι γέφυρες ζευκτών είναι αποτελεσματικές στη γεφύρωση μεγαλύτερων αποστάσεων εξαιτίας του μικρού τους βάρους και των τριγωνισμών των στοιχείων τους, λόγω της πρωταρχικής δράσης των μελών τους στην αξονική τάση και συμπίεση (White, 2015). Τα δικτύωματα έχουν μέλη που θεωρούνται ως μέλη κρίσιμα για θραύση, ενώ πλέον η απλοποιημένη προσέγγιση κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού είναι να οριστούν όλα τα μέλη και τα μέλη τάνυσης δοκών που υποβάλλονται σε εναλλασσόμενες καταπονήσεις ως κρίσιμα μέλη για θραύση (Wright, 2022).

Οι γέφυρες ζευκτών σπάνια χρησιμοποιούνται για γεφυρώσεις αυτοκινητοδρόμων, ενώ επιλέγονται κυρίως για γέφυρες σιδηροδρόμων και πεζογέφυρες μεγάλων ανοιγμάτων (BCSA, 2010). Υπάρχουν 3 βασικοί τύποι ζευκτών. Στα ζευκτά καταστρώματος, όλο το ζευκτό βρίσκεται κάτω από το κατάστρωμα της γέφυρας, ενώ αυτή την περίπτωση οι δοκοί δαπέδου μπορεί να βρίσκονται ανάμεσα στις κορυφές των χορδών των ζευκτών ή να ακουμπούν πάνω από τα ζευκτά (Wright, 2022). Στην περίπτωση που οι δοκοί καταστρώματος ακουμπούν στο δικτύωμα, τα ζευκτά σαν επιλογή είναι ιδιαίτερος οικονομικά σε σχέση με το να περιβάλλουν τις δοκούς καταστρώματος, αφού ουσιαστικά εκμεταλλεύονται έτσι τη συνέχεια της δομής του ζευκτού (Wright, 2022).



Εικόνα 4.1.4 Γέφυρα ζευκτών στο Glenville, Δυτική Βιρτζίνια, Από *Glenville Truss Bridge*, της Bridges and Tunnels, Οκτώβριος 2023, Bridgestunnels. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από <http://bridgestunnels.com/location/glenville-truss-bridge/> Copyright 2023 της Bridges and Tunnels

Οικονομικά, οι γέφυρες ζευκτών είναι ασύμφορες για ανοίγματα κάτω των 135 μέτρων, λόγω της διαδικασίας ανέγερσής τους και των υλικών του καταστρώματος, ενώ οικονομικά αποδοτικές είναι για ανοίγματα άνω των 170 μέτρων μέχρι περίπου τα 230 μέτρα ανοιγμάτων και σε περιπτώσεις όπου έχουμε μεγαλύτερα ανοίγματα επιλέγονται πια καλωδιωτές γέφυρες. (Wright, 2022). Όσο πιο κοντά βρίσκονται μεταξύ τους τα ζευκτά, τόσο μειώνεται το μήκος τους, και επομένως το κόστος των πλευρικών πλαισίων στήριξης (Wright, 2015). Τα ζευκτά καταστρώματος είναι εφικτά όταν η κατακόρυφη απόσταση κάτω από τη γέφυρα δεν είναι περιορισμένη, ενώ οδηγούν σε πιο οικονομικές κατασκευές γιατί μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερα, αφού η γέφυρα είναι κάτω από το κατάστρωμα (Wright, 2015). Ακόμη, τα ζευκτά καταστρώματος είναι επίσης ευκολότερο να φαρδαινουν στο μέλλον, καθώς το κατάστρωμα είναι πάνω από αυτά, κάτι που περιορίζεται μόνο από τη δομική αντοχή του συστήματος η οποία βέβαια μπορεί να ενισχυθεί με την τροποποίηση ή την αντικατάσταση των δοκών δαπέδου και την ενίσχυση των μελών του δοκού (Wright, 2022).

Ο δεύτερος τύπος ζευκτών γεφυρώσεων είναι οι through truss bridges, όπου το κατάστρωμα της γέφυρας βρίσκεται στο κάτω τμήμα (πέλμα) του δικτυώματος. Τα δικτυώματα τέτοιου τύπου χρησιμοποιούνται κυρίως όταν δεν υπάρχει μεγάλη κατακόρυφη απόσταση κάτω από τη γέφυρα, ενώ σε αυτό τον τύπο δικτυωματικού φορέα είναι αδύνατη η διεύρυνση χωρίς την προσθήκη ενός δικτυώματος παράλληλου στα δύο αρχικά (Wright, 2022).



Εικόνα 4.1.5 Πεζογέφυρα με ζευκτά στο Άμστερνταμ, Ολλανδία, Από *The Python Bridge | Amsterdam*, της Bridges of Amsterdam, Αύγουστος 2022, Bridges.Cramberts. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από <https://bridges.cramberts.com/home/the-python-bridge-amsterdam/> Copyright 2022 της Bridges of Amsterdam

Ο τρίτος τύπος δικτυωματικής γεφύρωσης είναι ένας ενδιάμεσος τύπος (half-through truss bridge) όπου το κατάστρωμα βρίσκεται αρκετά ψηλά ώστε να μην χρησιμοποιηθεί εγκάρσιο στήριγμα πάνω από το κατάστρωμα (Wright, 2015). Θεωρείται ανέφικτο να σχεδιαστεί τέτοιος τύπος ζευκτού χωρίς κατακόρυφα μέλη, καθώς το κατάστρωμα θα πρέπει να στηρίζεται από διαγώνια μέλη μακριά από το αρθρώσεις και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σημαντικές τάσεις κάμψης στα μέλη του δικτύωματος και κυρίως στα διαγώνια μέλη που είναι αναποτελεσματικά ως προς την μεταφορά δυνάμεων κάμψης (Wright, 2022). Για να προσδώσουν μια πιο σύγχρονη αισθητική στις ΗΠΑ, προτιμώνται να μην χρησιμοποιούνται κατακόρυφα στοιχεία πλέον στα δικτύωματα και αυτός ο τύπος δικτυωματικής γεφύρωσης έχει περιοριστεί (Wright, 2022). Παρόλα αυτά, τα ζευκτά σαν επιλογή μπορούν να επωφεληθούν από την ανάπτυξη χάλυβα υψηλότερων αποδόσεων εκμεταλλευόμενα την υψηλότερη αντοχή και τη βελτιωμένη δυνατότητα συγκόλλησης του υλικού, καθιστώντας δυνατές σήμερα περισσότερες επιλογές στο σχεδιασμό γεφυρών με ζευκτά (White, 2015).

### 4.1.3 Τοξωτές Γέφυρες

Η μορφολογία του τόξου μειώνει τις καμπτικές δυνάμεις στην κατασκευή και αντιστέκεται στην αξονική καταπόνηση μέσω του ίδιου του τόξου, ενώ τοξωτές γέφυρες έχουμε παγκοσμίως για γεφυρώσεις ανοιγμάτων από 60 έως 550 μέτρα (Wright, 2015). Τα τόξα των γεφυρών μπορούν να έχουν είτε δικτυωτές είτε συμπαγείς νευρώσεις, με τα τόξα με συμπαγείς νευρώσεις να χρησιμοποιούνται κυρίως για γέφυρες μικρότερων ανοιγμάτων, ενώ τα τόξα με δικτύωματα προτιμώνται σε ανοίγματα άνω των 300 μέτρων ως οικονομικότερη επιλογή (Wright, 2022).

Οι τοξωτές γέφυρες μεταφέρουν φορτία με συνδυασμό, μέσω των δοκών, αξονικών δυνάμεων και προωθήσεων (Wright, 2015). Υπάρχουν διάφορες κατηγοριοποιήσεις για τις τοξωτές γέφυρες. Τα πραγματικά τόξα μεταφέρουν τις οριζόντιες συνιστώσες των ασκούμενων δυνάμεων σε αντιστηρίξεις οι οποίες επίσης αντιστέκονται σε κατακόρυφες φορτίσεις, ενώ οι γέφυρες με ελκυστήρα αυξάνουν ουσιαστικά τη δυνατότητα του τόξου στον εφελκυσμό με την προσθήκη ενός συνδετικού τμήματος στην αρχή και στο τέλος του τόξου (Wright, 2015). Ακόμη, οι τοξωτές γέφυρες θεωρούνται ως γέφυρες με τοξωτό κατάστρωμα (deck arch bridges), όταν ολόκληρο το τόξο βρίσκεται κάτω από το κατάστρωμα, οι τοξωτές γέφυρες με το σύνολο του τόξου άνω του καταστρώματος κατηγοριοποιούνται σαν τοξωτές γέφυρες με ελκυστήρα (tied arch bridges), και κατασκευάζονται με τον ελκυστήρα στο ύψος του

καταστρώματος, ενώ και στις δύο περιπτώσεις μπορούμε να έχουμε το κατάστρωμα σε ένα ενδιάμεσο ύψος σε σχέση με το τόξο (Wright, 2022). Τέλος, οι τοξωτές γέφυρες μπορεί να χρησιμοποιούν και καλώδια, παρόλα αυτά θεωρούμε, όπως θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια, μόνο δύο τύπους γεφυρών καλωδίων (Ερμόπουλος, 2008).



Εικόνα 4.1.6 Γέφυρα σιδηροδρόμου με τοξωτό κατάστρωμα στο Chenab, Ινδία, Από *Chenab Railway Bridge*, της Sakowski, 30 Σεπτεμβρίου 2023, Highestbridges. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από [https://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Chenab\\_River\\_Railway\\_Bridge](https://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Chenab_River_Railway_Bridge) Copyright 2023 της Sakowski

Οι γέφυρες με τόξα στο κατάστρωμα επιλέγονται κυρίως σε περιοχές με μεγάλο κατακόρυφο βάθος στο κέντρο της γέφυρας, και απότομη εναλλαγή ύψους, γιατί τα θεμέλια τότε μένουν σε χαμηλό βάθος, κάτι που θα ανέβαζε το συνολικό κόστος κατασκευής σε αντίθετη περίπτωση, ενώ οι τοξωτές γέφυρες με ελκυστήρα είναι πιο αποτελεσματικές σε περιπτώσεις που απαιτούνται βαθιά θεμέλια ή όπου πρέπει να υπάρχουν ψηλές προβλήτες για να επιτευχθεί το κατάλληλο διάκενο κάτω από τη γέφυρα, όπως ένα μεγάλο άνοιγμα για τη διέλευση ενός ποταμού (Wright, 2022). Ταυτόχρονα, οι γέφυρες με ελκυστήρα προσφέρουν τη δυνατότητα μεγαλύτερων ανοιγμάτων σε μήκος για πολλές και διαφορετικού τύπου φορτίσεις (White, 2015).

Οι τοξωτές γέφυρες έχουν παρόμοια καταστρώματα με αυτά των γεφυρών με ζευκτά, ενώ είναι σύνηθες λοιπόν να εφαρμόζεται σύστημα στοιβαγμένων δαπέδων προκειμένου να επωφεληθεί

κανείς από τη συνέχεια στις διαμήκεις δοκούς και να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των τεμαχίων που πρέπει να ανεγερθούν και να συναρμολογηθούν (Wright, 2022). Παρομοίως με τις γέφυρες με ζευκτά, οι τοξωτές γέφυρες με ελκυστήρα έχουν κάποια μέλη που θεωρούνται ως μέλη κρίσιμα για θραύση, αφού η αστοχία ενός τμήματος του ελκυστήρα θα οδηγούσε σε κατάρρευση της γέφυρας κάτι που με τη χρήση χάλυβα υψηλότερης απόδοσης μπορεί να αποφευχθεί, και οδήγησε στο να γίνει ξανά δημοφιλής αυτός ο τύπος γέφυρας σήμερα (Wright, 2015).



Εικόνα 4.1.7 Η γέφυρα Lupu, Από *Lupu Bridge*, του Nicolas Janberg, 19 Μαΐου 2009, Structurae. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/structures/lupu-bridge> Copyright 2009 του Nicolas Janberg

#### 4.1.4 Καλωδιωτές Γέφυρες

Οι καλωδιωτές γέφυρες άρχισαν να χρησιμοποιούνται όπως και οι κρεμαστές από τις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα, όμως λόγω έλλειψης τεχνογνωσίας όσον αφορά τη συμπεριφορά των υλικών και τη στατικότητα του φορέα που είχε σαν αποτέλεσμα καταρρεύσεις γεφυρών, έπαψαν να επιλέγονται σαν τύπος γεφυρών για αρκετά χρόνια σε αντίθεση με τις κρεμαστές γέφυρες (Ερμόπουλος, 2008). Σήμερα κατασκευάζονται για ανοίγματα από 60 μέτρα έως 1100

(συνήθως σε μικρά ανοίγματα για πεζογέφυρες), ενώ θεωρούνται οικονομικά συμφέρουσες για ανοίγματα άνω των 230 μέτρων (Wright, 2022).

Πλέον, οι καλωδιωτές γέφυρες επιλέγονται κυρίως όταν έχουμε μεγάλα ανοίγματα, κυρίως άνω των 800 μέτρων, ενώ σε περιπτώσεις με μεγαλύτερα ανοίγματα των 1100 μέτρων επιλέγονται σαν κατάλληλος τύπος γεφύρωσης, κρεμαστές γέφυρες (BCSA, 2010).



Εικόνα 4.1.8 Καλωδιωτή γέφυρα στον ποταμό Aare με παράλληλα καλώδια, Ελβετία, Από *Aarebrücke Grenchen-Arch*, του Nicolas Janberg, 25 Ιουλίου 2021, Structurae. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/structures/aarebrucke-grenchen-arch> Copyright 2021 του Nicolas Janberg

Οι καλωδιωτές γέφυρες έχουν ως βασικό δομικό στοιχείο τα καλώδια από χάλυβα υψηλής αντοχής. Υπάρχουν 4 χαρακτηριστικά συστήματα διάταξης καλωδίων σε αυτή την κατηγορία γεφυρών, το ακτινωτό (fan), το παράλληλο (harp), το ημιακτινωτό ή τροποποιημένο (modified fan) και το σύστημα αστέρος (star), (Ερμόπουλος, 2008). Η διάταξη των καλωδίων σε αυτές τις γέφυρες μπορεί ακόμη να είναι συμμετρική ή μη. Τα καλώδια στήριξης των γεφυρών αυτών, έχουν κλίση από τους πυλώνες στήριξης σε ακραίες δοκούς στο ύψος του καταστρώματος ή κάτω από αυτό, ενώ οι πυλώνες στήριξης είναι πολύ ψηλοί, με το ύψος να καθορίζεται σε συνάρτηση με το μήκος των ανοιγμάτων της γέφυρας και την κλίση των καλωδίων να



εξαρτάται από την μεγαλύτερη απόσταση που υποδεικνύει το ελάχιστο ύψος πυλώνα (Wright, 2022). Η πιο μικρή γωνία καλωδίου δεν μπορεί να είναι μικρότερη από περίπου 22 μοίρες με τον οριζόντιο άξονα, καθώς σε μικρότερες κλίσεις τα καλώδια είναι αναποτελεσματικά στη μεταφορά του κατακόρυφου φορτίου και πολύ υψηλές δυνάμεις θλίψεως ασκούνται στις δοκούς (Wright, 2022). Ο αριθμός των καλωδίων εξαρτάται από το άνοιγμα και το πλάτος της γέφυρας, το είδος των φορτίων, το ύψος των πυλώνων και την αισθητική του μελετητή, ενώ μικρότερος ή μεγαλύτερος αριθμός καλωδίων έχει ως αποτέλεσμα μεταβολές στις διατομές των καλωδίων, των πυλώνων και των δοκών, ενώ ζητήματα δημιουργούνται στις αγκυρώσεις και τη συνδεσμολογία (Ερμόπουλος, 2008).

Σε σχέση με τις κρεμαστές γέφυρες υπερτερούν στην ακαμψία, λόγω της διάταξης των καλωδίων, το κόστος, την ευκολία κατασκευής, ανέγερσης και συντήρησης και αεροδυναμικής ευστάθειας (Ερμόπουλος, 2008). Επειδή μπορούν να έχουν περισσότερα ανοίγματα, έχουμε περισσότερους πυλώνες στήριξης με ποικιλία μορφών. Σε σχέση με τους πύργους ανάρτησης των καλωδίων, αυτοί συναντώνται σε διάφορα σχήματα, με αυτούς σε σχήμα «Η» να κρίνονται ως οι πιο χρηστικοί, αφού επιτρέπουν τα καλώδια στήριξης να μπορούν να εγκατασταθούν σε κατακόρυφο επίπεδο ακριβώς πάνω από την ακραία δοκό που σε περίπτωση ενδεχόμενης καταστροφής τους, δεν θα εμποδίσουν την κυκλοφορία στη γέφυρα (Wright, 2022). Τέλος, οι πυλώνες στήριξης των καλωδιωτών γεφυρών με περισσότερα από τρία ανοίγματα, δέχονται μεγαλύτερες καμπτικές δυνάμεις από τα δυναμικά φορτία της γέφυρας (White, 2015).



Εικόνα 4.1.9 Καλωδιωτή γέφυρα Tatara με ημιακτινωτό τύπο διάταξης καλωδίων, Ιαπωνία, Από Tatara Bridge, της Inge Kanakaris-Wirtl, Μάρτιος 2015, Structurae. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/234644-tatara-bridge> Copyright 2015 της Inge Kanakaris-Wirtl

Συχνότερα έχουμε πυλώνες σε σχήμα «Α». Οι πυλώνες σε σχήμα «Α» έχουν κεκλιμένα πόδια που συναντώνται στην κορυφή του πυλώνα με τα καλώδια στήριξης να είναι συνήθως παράλληλα με την κλίση των άκρων του πυλώνα, ενώ οι αγκυρώσεις είναι πιο περίπλοκες αφού τέμνουν την ακραία δοκό υπό γωνία και εξαιτίας αυτού δεν είναι δυνατή η ακριβής επανάληψη της γεωμετρίας αγκύρωσης (Wright, 2022). Μια παραλλαγή των πυλώνων σε σχήμα «Α», αποτελούν οι πυλώνες σε αντίστροφο «Υ». Σε αυτή την περίπτωση, τα κεκλιμένα πόδια του πυλώνα συναντώνται πάνω από το οδόστρωμα, ενώ μια κατακόρυφη «κολώνα» εκτείνεται με τα καλώδια στήριξης στη συνέχεια αγκυρώνονται σε αυτή, ενώ και σε αυτή την παραλλαγή, κάθε καλώδιο στήριξης τέμνει τις ακραίες δοκούς σε ελαφρώς διαφορετική γωνία και έτσι δεν είναι δυνατή η ακριβής επανάληψη της γεωμετρίας αγκύρωσης (Wright, 2022).

Τέλος, σε σχέση με το σχήμα των πυλώνων, συναντώνται ακόμη και πυλώνες μονής στήλης που αποτελούνται από μία μόνο στήλη στο κέντρο της γέφυρας με ένα μόνο επίπεδο καλωδίων στήριξης κάτω από το κέντρο της γέφυρας, με τον τύπο καλωδίων να προσφέρει κάποια οικονομία στην εγκατάσταση και συντήρηση καλωδίων (Wright, 2022). Σε τυπικές περιπτώσεις καλωδιωτών γεφυρών, το ύψος του συνολικού καταστρώματος κυμαίνεται από 1/80 έως 1/60 του ανοίγματος της γέφυρας (Podolny & Goodyear, 2006; White, 2015).

#### **4.1.5 Κρεμαστές Γέφυρες**

Οι κρεμαστές γέφυρες είναι επίσης γέφυρες με ανάρτηση καλωδίων, αλλά χρησιμοποιούν διαφορετικό σύστημα από αυτό των καλωδιωτών γεφυρών. Ενώ και αυτές βασίζονται σε καλώδια υψηλής αντοχής χάλυβα ως κύρια δομικά στοιχεία, οι πυλώνες τους είναι μικρότεροι από εκείνους που απαιτούνται για καλωδιωτές γέφυρες, και είναι οικονομικότερες για πολύ μεγάλα ανοίγματα (Wright, 2022). Συχνότερα συναντάμε κρεμαστές γέφυρες που χρησιμοποιούν ένα σύστημα με εξωτερικά αγκυρωμένο καλώδιο ανάρτησης, ενώ τα κύρια καλώδια συνήθως βρίσκονται στα εξωτερικά άκρα της γέφυρας, με τα άκρα των κύριων καλωδίων ανάρτησης να είναι αγκυρωμένα είτε σε μεγάλα αντίβαρα, είτε απευθείας στο βάθρο στα άκρα της κατασκευής (Wright, 2022). Σε τέτοιου τύπου γέφυρες συναντώνται τρία ανοίγματα, ουσιαστικά με δύο πυλώνες, ενώ πολύ σπάνια έχουμε περισσότερα ανοίγματα και πυλώνες (Ερμόπουλος, 2008). Οι κρεμαστές γέφυρες δύο ή τεσσάρων ανοιγμάτων είναι σπάνιες, εξαιτίας των αυξημένων αξονικών δυνάμεων στην κορυφή των πυλώνων λόγω των

κινητών φορτίων της γέφυρας και των αυξημένων καμπτικών δυνάμεων που ασκούνται σε αυτούς (White, 2015).



Εικόνα 4.1.10 Γέφυρα στο Bear, Η.Π.Α., Από *The Bridges Around Bear Mountain, New York*, της Bridges and Tunnels, Φεβρουάριος 2023, Bridgestunnels. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από <http://bridgestunnels.com/2023/02/16/the-bridges-around-bear-mountain-new-york/> Copyright 2023 της Bridges and Tunnels

Στη δεκαετία του 1970, οι κρεμαστές γέφυρες επιλέγονταν μόνο για ανοίγματα άνω των 365 μέτρων, ενώ σήμερα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας πάνω στις γέφυρες δεν θεωρούνται οικονομικά αποδοτικές σε ανοίγματα κάτω από τα 900 μέτρα (Wright, 2022).

Τόσο το μέγεθος των καλωδίων όσο και το μέγεθος των δυνάμεων εφελκυσμού στα κύρια καλώδια ανάρτησης, καθορίζουν την κατακόρυφη ακαμψία της γέφυρας (Wright, 2022). Για να προσδιοριστεί η ακριβής γεωμετρία του καλωδίου ανάρτησης σε σχέση με τα μόνιμα φορτία που φέρει, θεωρούμε πως η κύρια δοκός και οι πυλώνες δεν δέχονται καμπτικές καταπονήσεις (Ερμόπουλος, 2008).

Οι κρεμαστές γέφυρες είναι γενικά πολύ ελαφριές σε σχέση με το μήκος του ανοίγματός τους, οδηγώντας σε δομές που μπορεί να είναι πολύ ευέλικτες, ενώ η κατακόρυφη ακαμψία είναι μια σύνθετη αλληλεπίδραση του μεγέθους τους, των αντοχών σε εφελκυσμό των κύριων καλωδίων

ανάρτησης, καθώς και του τύπου και της γεωμετρίας του καταστρώματος τους (Wright, 2022). Ταυτόχρονα, συχνά παρέχονται πλευρικές ενισχυτικές δοκοί κάτω από το κατάστρωμα για να αποφευχθεί η υπερβολική διέγερση της κατασκευής από δυναμικά φορτία (Wright, 2022).



Εικόνα 4.1.11 Κρεμαστή γέφυρα με 4 ανοίγματα Cheon-Sa, Νότια Κορέα, Από *Cheonsa Bridge*, του Glabb, 21 Οκτωβρίου 2022, Structurae. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 <https://structurae.net/en/structures/cheonsa-bridge> Copyright 2022 του Glabb

Η όλη γέφυρα στηρίζεται σε κατακόρυφα καλώδια ανά μικρά διαστήματα που συνδέονται στα άκρα των εγκάρσιων δοκών, καθώς και με τα κύρια καλώδια ανάρτησης. Σπανιότερα τα καλώδια μέσω των οποίων αναρτάται το κατάστρωμα από το κύριο καμπύλο καλώδιο, μπορεί να είναι και κεκλιμένα, εκτός από κατακόρυφα, σε κάθε περίπτωση όμως τα καλώδια αυτά βρίσκονται σε απόσταση 5-10 μέτρα μεταξύ τους (Ερμόπουλος, 2008). Ταυτόχρονα, επιχειρείται η κατασκευή ελαφρού καταστρώματος με στόχο τη μείωση του συνολικού μόνιμου φορτίου της κατασκευής (Wright, 2022). Σε σχέση με το φορτίο της κύριας δοκού, αυτό είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όλο το μήκος της γέφυρας, σε αντίθεση με αυτό των καλωδίων που μεταβάλλεται ανάλογα με το μήκος τους σε κάθε σημείο με το ελάχιστο στη μέση του ανοίγματος και τη μέγιστο κοντά στους πυλώνες, ενώ επειδή τα καλώδια είναι πολύ ελαφρύτερα των κυρίων δοκών, το συνολικό νεκρό φορτίο θεωρείται περίπου ομοιόμορφα κατανεμημένο (Ερμόπουλος, 2008).

## 4.2 Λεπτομερής Φάση Σχεδίασης | Δομική Ανάλυση

Ανεξάρτητα από τον τύπο γέφυρας που επιλέγεται κάθε φορά, υπάρχουν στοιχεία από τα οποία αποτελείται μια χαλύβδινη γέφυρα που συναντώνται σε κάθε τύπο. Τα στοιχεία αυτά είναι το κατάστρωμα, οι κύριες δοκοί ή αλλιώς φορείς, οι σύνδεσμοι, τα εφέδρανα και τα βάθρα (Ερμόπουλος, 2008).

### 4.2.1 Κατάστρωμα

Παρότι στις περισσότερες μεταλλικές γέφυρες το κατάστρωμα είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα, οι απαιτήσεις της εκάστοτε κατασκευής, του αρχικού κόστους, του κόστους κύκλου ζωής, της αντοχής, του ιδίου βάρους, του κατασκευαστή αλλά και το χρονοδιάγραμμα ολοκλήρωσης της κατασκευής πλέον υπάρχουν αρκετές βιώσιμες επιλογές όπως ξύλινα, μεταλλικά και καταστρώματα από αλουμίνιο, ορθοτροπικά καταστρώματα χάλυβα και καταστρώματα από σύνθετα πολυμερή (FRP & CFRP), με την επιλογή να εξαρτάται και από τον τύπο της γέφυρας κάθε φορά (Chavel, 2022).



Εικόνα 4.2.1 Ανέγερση γέφυρας με μεταλλικό κατάστρωμα στη Βομβάη, Ινδία, Από *What are Orthotropic steel bridge decks?*, της Constro facilitator, Μάιος 2023, Constrofacilitator. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από <https://constrofacilitator.com/what-are-orthotropic-steel-bridge-decks/> Copyright 2023 της Constro facilitator

Το κατάστρωμα αποτελεί το στοιχείο μιας γέφυρας στο οποίο ασκούνται το σύνολο των κινητών φορτίων και έπειτα μεταβιβάζονται μέσω αυτού στις κύριες δοκούς της κατασκευής, αποτελείται από το επίστρωμα και τις δοκούς καταστρώματος, ενώ σε αυτό μπορεί να υπάρχουν και άλλα στοιχεία, όπως το έρμα με την φέρουσα πλάκα σε περίπτωση που έχουμε κλειστό κατάστρωμα (Ερμόπουλος, 2008). Με τη σειρά τους, οι δοκοί καταστρώματος χωρίζονται σε μηκίδες και διαδοκίδες, με τις πρώτες να είναι παράλληλα προς τις κύριες δοκούς και τις δεύτερες να είναι κάθετα προς τις κύριες δοκούς της γέφυρας (Ερμόπουλος, 2008).

Όσον αφορά το κόστος σε σχέση με τη διαστασιολόγηση ενός μεταλλικού καταστρώματος, σε μια οικονομικά αποδοτική κατασκευή έχουμε συνήθως ύψος καταστρώματος σε αναλογία 1/20 του ανοίγματος, εξαιρουμένου του επιστρώματος, αλλά αυτό μπορεί να μειωθεί περίπου στο 1/30 του ανοίγματος αν χρειαστεί (BCSA, 2010).

#### 4.2.2 Κύριες Δοκοί



Εικόνα 4.2.2 Γέφυρα με χαλύβδινες πλατύπελμες δοκούς στις Η.Π.Α, Από *I-Girder Bridge*, της American Institute of Steel Construction, Σεπτέμβριος 2014, AISC. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από <https://www.aisc.org/modernsteel/news/2016/september/updated-i-girder-bridge-resource-available/> Copyright 2014 της American Institute of Steel Construction

Η πλειοψηφία των μεταλλικών γεφυρών είναι γέφυρες που έχουν ως κύριο φορέα τις δοκούς, είτε αυτές είναι γέφυρες πλατύπελμων δοκών, είτε πλακοδοκών, είτε γέφυρες τραπεζοειδών δοκών. Η επιλογή κάθε φορά του κατάλληλου τύπου δοκού εξαρτάται από τις διαστάσεις της ενίοτε μελέτης γεφύρωσης και την προτεινόμενη γεωμετρία κυρίως σε επίπεδο κάτοψης (Wright, 2022). Ο ρόλος του κύριου φορέα δεν ανήκει αποκλειστικά σε δοκούς, αλλά μπορεί να περιλαμβάνει και άλλα στοιχεία, όπως τα καλώδια στις περιπτώσεις καλωδιωτών και κρεμαστών γεφυρών.

Γενικά οι κύριες δοκοί ή κύριοι φορείς σε μια μεταλλική γέφυρα παραλαμβάνουν και μεταφέρουν το σύνολο των φορτίων που ασκούνται στην κατασκευή μέσω των εφεδράνων στα βάθρα (Ερμόπουλος, 2008).

### **4.2.3 Σύνδεσμοι**

Η λειτουργία των συνδέσμων σε μια γέφυρα στοχεύει στη διοχέτευση των φορτίων που ασκούνται στην κατασκευή μέσω της δημιουργίας ενός ενιαίου και ευσταθή φορέα (Ερμόπουλος, 2008). Ουσιαστικά οι σύνδεσμοι σε μια χαλύβδινη γέφυρα έχουν διπλό ρόλο, αφενός να ενισχύσει τη σταθερότητα των κύριων δοκών και να αυξήσει την αντοχή και την ακαμψία του όλου συστήματος (Helwig & Yura, 2022). Αποτελούν επίπεδους φορείς, που ενίοτε είναι πλαισιωτοί και άλλοτε δικτυωτοί, ενώ κατηγοριοποιούνται σε κύριους που έχουν με τη σειρά τους δύο υποκατηγορίες τους αντιανέμιους και τους εγκάρσιους και τους δευτερεύοντες που διακρίνονται σε συνδέσμους μηκίδων και τροχοπέδησης, με τους δευτερεύοντες να βρίσκονται σε σιδηροδρομικές γέφυρες (Ερμόπουλος, 2008).

Γενικά όσον αφορά τη γεωμετρία της ίδιας της γέφυρας, σε δοκούς γεφυρών που είναι γραμμικές, το σύστημα συνδέσμων χρησιμοποιείται κυρίως για να παρέχει ευστάθεια δημιουργώντας έμμεσα έναν ενιαίο φορέα, ενώ σε περιπτώσεις που έχουμε καμπύλες δοκούς σε κάτοψη, ο σχεδιασμός του συνόλου των συνδέσεων στοχεύει κυρίως στην αντιμετώπιση των δυνάμεων στρέψης και την πλευρική ακαμψία της κατασκευής (Helwig & Yura, 2022).

- Αντιανέμιος Σύνδεσμος

Ο αντιανεμικός σύνδεσμος είναι ένα οριζόντιο δικτύωμα που με τη σειρά του παραλαμβάνει οριζόντια φορτία που ασκούνται κάθετα στον άξονα της γέφυρας (Ερμόπουλος, 2008). Ο σύνδεσμος έχει άνοιγμα ίσο με το άνοιγμα των κύριων δοκών και ουσιαστικά χρησιμοποιεί κάποια από τα ήδη υπάρχοντα στοιχεία της κατασκευής όπως τα πέλματα των δοκών σαν πέλματα και σαν ορθοστάτες τις υπάρχοντες διαδοκίδες σε συνδυασμό με επιπρόσθετες διαγώνιες ράβδους σε σχήματα L, Π, ή ακόμη και δικτυωτές ανάλογα με το άνοιγμα, ενώ σε περιπτώσεις κλειστού καταστρώματος το ίδιο το κατάστρωμα λειτουργεί και σαν αντιανεμικός σύνδεσμος (Ερμόπουλος, 2008). Παρόλα αυτά, οι αντιανεμικοί σύνδεσμοι είναι απαραίτητοι σε όλες τις μεταλλικές γέφυρες πάνω από αυτοκινητοδρόμους, κυρίως αν το μέγιστο ύψος από τον αυτοκινητόδρομο είναι κάτω από 5,7 μέτρα, για τη διατήρηση της σταθερότητας, ακαμψίας και ασφάλειας της γέφυρας σε περίπτωση πρόσκρουσης οχημάτων σε αυτήν (BCSA, 2010).

- Εγκάρσιος Σύνδεσμος



Εικόνα 4.2.3 Εγκάρσιοι σύνδεσμοι γεφυρών, Από *Bracing systems*, του M.Sansom, 10 Ιουνίου 2012, SteelConstruction. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από [https://www.steelconstruction.info/Bracing\\_systems](https://www.steelconstruction.info/Bracing_systems) Copyright 2012 του M.Sansom

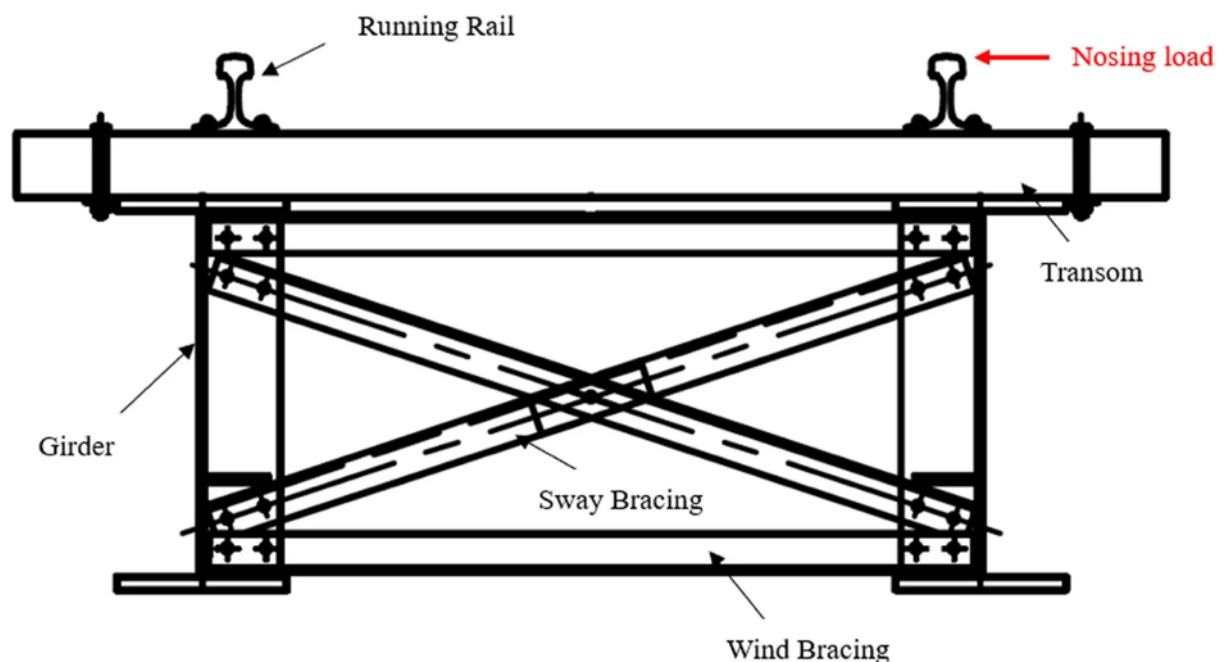
Ο εγκάρσιος σύνδεσμος είναι ένα κατακόρυφο δικτύωμα ή ανοιχτό ή κλειστό πλαίσιο που παρέχει εγκάρσια σύνδεση των κυρίων δοκών ενισχύοντας την ευστάθεια της κατασκευής, ενώ ταυτόχρονα παραλαμβάνει και μεταφέρει δυνάμεις από τους αντιανεμικούς συνδέσμους στα εφάδρανα (Ερμόπουλος, 2008). Παλαιότερα προτείνονταν οι εγκάρσιοι σύνδεσμοι να μην



τοποθετούνται σε απόσταση μεταξύ τους άνω των 7,5 μέτρων, ενώ μετά την έκδοση του AASHTO LRFD BDS το 1994 προτείνεται η κατά περίπτωση μελέτη της απόστασης μεταξύ των εγκάρσιων συνδέσμων (Helwig & Yura, 2022). Τα δικτύωμα σαν εγκάρσιος σύνδεσμος προτιμάται μιας και είναι οικονομικότερο και πιο απλό του πλαισίου κλειστού ή ανοιχτού (Ερμόπουλος, 2008).

- Σύνδεσμος Μηκίδων

Ο σύνδεσμος μηκίδων είναι ένας δευτερεύων σύνδεσμος που υπάρχει σε σιδηροδρομικές γέφυρες ανοιχτού καταστρώματος και παραλαμβάνει τις οριζόντιες πλευρικές δυνάμεις των συρμών και τις μεταφέρει στον αντιανέμιο σύνδεσμο μέσω των διαδοκίδων (Ερμόπουλος, 2008). Πρόκειται για ένα οριζόντιο δικτύωμα με πέλματα τις μηκίδες και άνοιγμα που ισούται του μήκους τους (Ερμόπουλος, 2008).



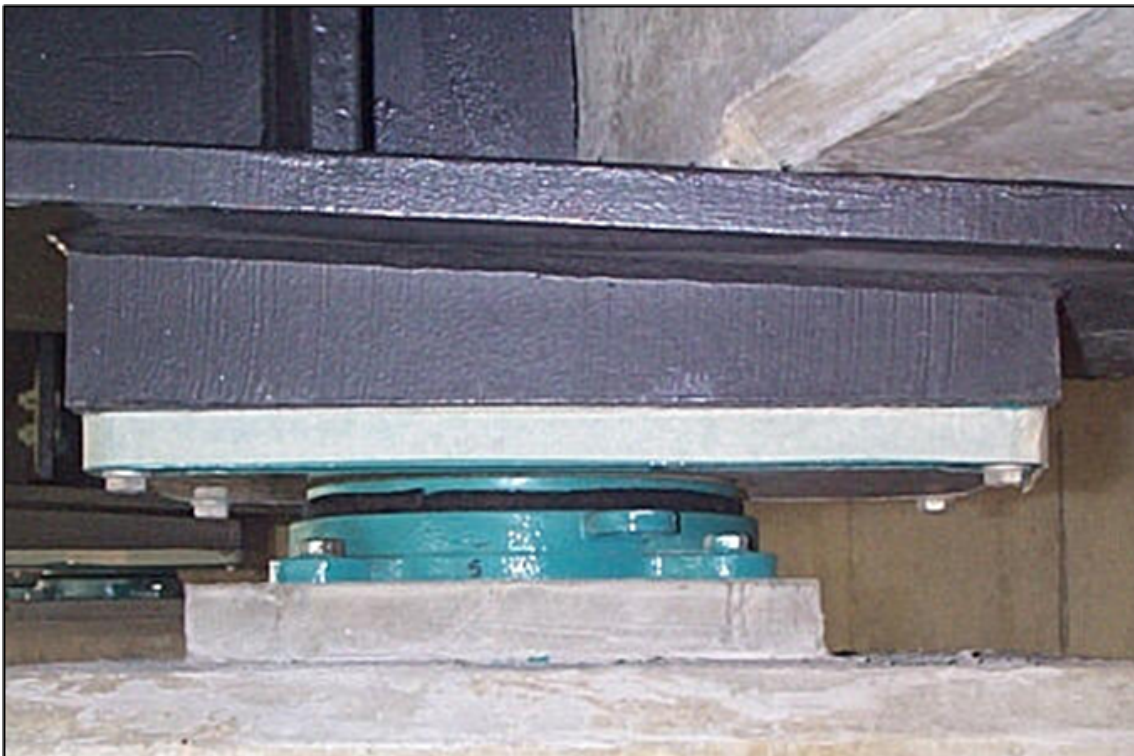
Εικόνα 4.2.4 Σύνδεσμοι σε γέφυρα σιδηροδρόμου, Από *Estimation of nosing load in existing railway transom top bridges based on field testing and finite element modelling*, των Alireza Ghiasi & Daniel Lee, 1 Ιουνίου 2024, SpringerOpen. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από <https://aben.springeropen.com/articles/10.1186/s43251-024-00125-5> Copyright 2024 των Alireza Ghiasi & Daniel Lee

- Σύνδεσμος Τροχοπέδησης

Ο σύνδεσμος τροχοπέδησης είναι ένα αμφιέριστο οριζόντιο δικτύωμα ανοίγματος ίσου με το μήκος της διαδοκίδας που βρίσκεται συνήθως σε σιδηροδρομικές γέφυρες με ανοιχτό κατάστρωμα, ενώ ο ρόλος του είναι να παραλάβει τις δυνάμεις που ασκούνται και να τις μεταφέρει στις κύριες δοκούς για αυτό βρίσκεται στα άκρα ή στο μέσο της γέφυρας (Ερμόπουλος, 2008).

#### 4.2.4 Εφέδρανα

Ο ρόλος των εφεδράνων είναι η μεταφορά των δυνάμεων που ασκούνται στη γέφυρα στα βάθρα. Υπάρχουν δύο κατηγορίες εφεδράνων, σταθερά και κινητά και βρίσκονται στα σημεία στήριξης των δοκών στα βάθρα (Ερμόπουλος, 2008). Όλα τα εφέδρανα πρέπει να μπορούν να αντικατασταθούν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής μιας γέφυρας και είναι κάτι που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά το σχεδιασμό (BCSA, 2010).



Εικόνα 4.2.5 Τυπικό ελαστομερές εφέδρανο κάτω από μεταλλική δοκό, Από *Bridge articulation and bearing specification*, του M.Sansom, 26 Ιουνίου 2012, SteelConstruction. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 από [https://www.steelconstruction.info/Bridge\\_articulation\\_and\\_bearing\\_specification](https://www.steelconstruction.info/Bridge_articulation_and_bearing_specification) Copyright 2012 του M.Sansom

Τα εφεδρανα χαλύβδινων γεφυρών μπορούν να χωριστούν σε 3 γενικούς τύπους: ελαστομερή εφεδρανα, υψηλού φορτίου πολλαπλών περιστροφών εφεδρανα (high-load, multi-rotational bearings) και μηχανικά εφεδρανα (Kaczinski, 2022). Η επιλογή του κατάλληλου τύπου εφεδρανου καθορίζεται κάθε φορά με βάση οικονομικών κριτηρίων (Kaczinski, 2022).

Όσον αφορά τον σχεδιασμό των εφεδράνων, στην περίπτωση των ελαστομερών, αποτελεί ευθύνη του εκάστοτε μηχανικού, ενώ στην περίπτωση επιλογής υψηλών φορτίων, πολλαπλών περιστροφών εφεδράνων, ο μηχανικός εκτελεί μόνο μια προκαταρκτική διαστασιολόγηση για τον επιμέρους υπολογισμό του ύψους και του χώρου όπου θα τοποθετηθεί το σύστημα έδρασης και το σχεδιαστικό κομμάτι πραγματοποιείται από τον κατασκευαστή, ο οποίος προχωρά σε λεπτομερή σχεδιασμό των εφεδράνων υψηλών φορτίων και πολλαπλών περιστροφών (Kaczinski, 2022).

#### 4.2.5 Βάθρα



Εικόνα 4.2.6 Η χαλύβδινη γέφυρα Padma, Από *Padma Bridge*, της Nahian Bin Shafiq, 18 Νοεμβρίου 2021, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/structures/padma-bridge/media> Copyright 2021 της Nahian Bin Shafiq

Υπάρχουν δύο κατηγορίες βάθρων τα ακρόβαθρα και τα μεσόβαθρα, τα οποία μεταφέρουν τις δυνάμεις που ασκούνται στη γέφυρα και έχουν παραλάβει από τα εφέδρανα στα θεμέλια της κατασκευής (Ερμόπουλος, 2008). Όσον αφορά το σχεδιασμό βάθρων υπάρχουν κάποια ζητήματα που θα πρέπει να ληφθούν προκαταβολικά υπόψιν, κυρίως όσον αφορά τα φορτία που δέχονται, κινητά και μόνιμα, τις κατασκευαστικές συνδέσεις, αλλά και την ίδια την τοπογραφία της περιοχής.

Αρχικά, τόσο το ύψος των υποστυλωμάτων ενός βάθρου, όσο και οι αναλογίες του, επηρεάζουν τη δυνατότητα μεταφοράς φορτίσεων στα θεμέλια και την αντοχή τους σε κάμψη (Coletti & Sheahan, 2022). Όσον αφορά το σχήμα των υποστυλωμάτων, η κατάλληλη επιλογή ποιότητας χάλυβα δίνει στο μελετητή περισσότερες σχεδιαστικές επιλογές σε σχέση με την αισθητική και τη λειτουργική τους απόδοση (BCSA, 2010). Άλλα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την κατασκευή των βάθρων, είναι η επιλογή υποστυλωμάτων συμπαγών ή μη, καθώς επηρεάζουν το σύνολο των μόνιμων φορτίων της κατασκευής, η απόσταση μεταξύ των ίδιων των υποστυλωμάτων, το άνω τμήμα-κεφαλή (cap) των βάθρων, αλλά και οι σύνδεσμοι της κατασκευής (Coletti & Sheahan, 2022).

### **4.3 Κώδικες και Πρότυπα Σχεδίασης**

Στην Ευρώπη, όσον αφορά το σχεδιασμό φερουσών κατασκευών, τα πρότυπα σχεδιασμού περιγράφονται και αναλύονται στους Ευρωκώδικες EN, οι οποίοι συντάχθηκαν από την Τεχνική Επιτροπή Ευρωκωδικών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Τυποποίησης CEN/TC 250 “Structural Eurocodes”, στην οποία συμμετείχαν εμπειρογνώμονες από όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι Ευρωκώδικες αποτελούν μια συλλογή από 10 κοινά αποδεκτά πρότυπα (EN 1990 - EN 1999) που αντικατέστησαν του υπάρχοντες εθνικούς κανονισμούς 34 Ευρωπαϊκών χωρών, ενώ μέχρι το 2026 αναμένεται να έχουν αντικατασταθεί από τους Ευρωκώδικες 2<sup>ης</sup> γενιάς (Köhler et al., 2023). Στην πραγματικότητα οι Ευρωκώδικες προσδιορίζουν και περιγράφουν τα πρότυπα για σχεδιαστικές λύσεις από πλευράς ασφάλειας.

Οι Ευρωκώδικες πραγματεύονται ζητήματα σε σχέση με τις δράσεις και τα φορτία που ασκούνται στις κατασκευές, το σχεδιασμό τους, τη διεκπεραίωσή τους και την επιθεώρηση και

τη συντήρησή τους σε βάθος χρόνου (Hanswille et al., 2010). Συγκεκριμένα, όσον αφορά τις μεταλλικές κατασκευές, ο Ευρωκώδικας 3 - EN 1993, παρέχει σχεδιαστικά πρότυπα για τον σχεδιασμό κατασκευών από χάλυβα και ο Ευρωκώδικας 4 - EN 1994, για τον σχεδιασμό σύμμεικτων κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα.

Ο Ευρωκώδικας 3 αποτελείται σε 6 Μέρη, με το 2<sup>ο</sup> Μέρος να αναλύει και να περιγράφει τα πρότυπα σχεδίασης μεταλλικών γεφυρών, ενώ τα υπόλοιπα μέρη έχει ευρεία θεματολογία που εκτείνεται από γενικούς κανόνες για κτήρια και κατασκευές στο 1<sup>ο</sup> Μέρος, μέχρι πιο ειδικά κατασκευαστικά ζητήματα όπως πρότυπα σχεδίασης για πύργους, ιστούς και καπνοδόχους στο 3<sup>ο</sup> Μέρος, σιλό, δεξαμενές και αγωγούς στο 4<sup>ο</sup> Μέρος, ενώ στο 5<sup>ο</sup> Μέρος αναλύονται τα πρότυπα κατασκευής πασσάλων, και τέλος στο 6<sup>ο</sup> Μέρος οι κατασκευές στήριξης γερανογεφυρών (Hanswille et al., 2010).

Το 2<sup>ο</sup> τμήμα του Ευρωκώδικα 3, EN 1993, περιγράφει τα πρότυπα για τη σχεδίαση μεταλλικών γεφυρών με βάση οριακές καταστάσεις ασφαλείας, ενώ συγκεκριμένα προσδιορίζει τις σχεδιαστικές απαιτήσεις για τα εφέδρανα, των συνδέσμων και των ορθοτροπικών πλακών (Hanswille et al., 2010). Σε σχέση με τις οριακές καταστάσεις αστοχίας περιγράφονται επίσης τα πρότυπα σε σχέση με την κατάλληλη επιλογή ποιότητας χάλυβα, και λεπτομέρειες διαφόρων στοιχείων της κατασκευής, όπως διατομών με στόχο την ευστάθεια, τη σταθερότητα και τη λειτουργικότητα μιας μελέτης, την αποτροπή της κατάρρευσης του έργου και της μείωση της κόπωσης του έργου καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του (Hanswille et al., 2010). Περιγράφονται επί της ουσίας οριακές καταστάσεις φόρτισης της κατασκευής, μιας και λόγω της φύσης της, μια γέφυρα επιδέχεται μεταβλητά φορτία και στον οριζόντιο και τον κατακόρυφο άξονα καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας της. Παρόλα αυτά, οι υπάρχοντες κώδικες σχεδίασης δεν λαμβάνουν υπόψιν τους την βέλτιστη οικονομική απόδοση και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των κατασκευών (Köhler et al., 2023).

Παρότι οι Ευρωκώδικες είναι διεθνώς αναγνωρισμένοι ως πρότυπα ασφάλειας των κατασκευών, διάφορες χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, έχουν διαμορφώσει και ακολουθούν δικά τους πρότυπα σχεδίασης. Σήμερα βρισκόμαστε στην 9<sup>η</sup> έκδοση των Αμερικάνικων προτύπων σχεδιασμού σύμφωνα με τη μέθοδο LRFD όσον αφορά τη σχεδίαση γεφυρών, η οποία εκδόθηκε το 2020. Τα Αμερικανικά πρότυπα για το σχεδιασμό γεφυρών χρησιμοποιούν τη μέθοδο LRFD (load-and-resistance factor design), μια σχεδιαστική μέθοδο που βασίζεται στα φορτία που επιδέχεται μια φέρουσα κατασκευή και την αντοχή της,

λαμβάνοντας ουσιαστικά υπόψιν τη μεταβλητότητα στη συμπεριφορά των δομικών στοιχείων (AASHTO, 2020). Η μέθοδος LRFD χρησιμοποιεί εκτεταμένα μεθόδους στατιστικής, αλλά παρουσιάζει και αναλύει τα αποτελέσματα με τρόπο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα από μελετητές και μηχανικούς (AASHTO, 2020).

Η βασική διαφορά των Αμερικάνικων προτύπων για το σχεδιασμό γεφυρών σε σχέση με τους Ευρωκώδικες, είναι πως ο κατάλληλος τύπος γέφυρας, τα μήκη ανοιγμάτων, και η επιλογή υλικών κατασκευής, προτείνονται σύμφωνα με το προβλεπόμενο κόστος (AASHTO, 2020), κάτι που δεν αναφέρεται στους Ευρωκώδικες της 1<sup>ης</sup> γενιάς. Ακόμη αναφορές γίνονται σε σχέση με το κόστος συντήρησης σε βάθος χρόνου της γέφυρας και τη διαθεσιμότητα των υλικών κατασκευής, τοποθεσίας, αποστολής υλικού, διαθέσιμου εργατικού δυναμικού και ενδεχόμενοι περιορισμοί κατά τη διαδικασία ανέγερσής της (AASHTO, 2020). Ακόμη λόγω διαφορών στη νομοθεσία, ο Αμερικάνικος κανονισμός σχεδίασης δίνει τη δυνατότητα εναλλακτικής επιλογής γέφυρας, όσον αφορά για παράδειγμα τον τύπο ή το υλικό στον ιδιοκτήτη με την προϋπόθεση όμως πως θα ακολουθηθούν οι ίδιες προδιαγραφές σε σχέση με την ασφάλεια, τη λειτουργικότητα, και την αισθητική αξία της γέφυρας (AASHTO, 2020). Για την τήρηση των προδιαγραφών σε θέματα αισθητικής μιας γέφυρας, διάφορα πρότυπα περιγράφονται σε σχέση με τις σχεδιαστικές αποφάσεις που πρέπει να λάβει ένας μελετητής, όσον αφορά την ίδια την κατασκευή, αλλά και τη σχέση της με τον περιβάλλοντα χώρο.

## 5.0 Περιστατικά Μελέτης

### 5.1 Εξέταση σημαντικών έργων γεφυρών από χάλυβα

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν 5 γέφυρες από χάλυβα που ανήκουν στην κατηγορία των «υπερκατασκευών», με κριτήρια τις διαστάσεις τους, την τοπογραφία ή τις συνθήκες και τον τρόπο κατασκευής τους.

#### 5.1.1 Η γέφυρα Akashi-Kaikyō

Η γέφυρα Akashi-Kaikyō ή αλλιώς γέφυρα των «μαργαριταριών» (Pearl Bridge), είναι μια κρεμαστή γέφυρα που βρίσκεται στο στενό του Akashi στην Ιαπωνία και εξυπηρετεί τη μεταφορά οχημάτων και επιβατών που προγενέστερα γίνονταν με πλοία από την επαρχία Kobe στο νησί Awaji (Yim, 2007). Η ανάγκη για την κατασκευή γέφυρας στην περιοχή έγινε εντονότερη έπειτα από τα δυστυχήματα που έγιναν με πλοία στην περιοχή, λόγω των ανέμων και της παλίρροιας που επικρατούν και στοίχησαν τη ζωή σε δεκάδες ανθρώπους τη δεκαετία του 1950 (Yim, 2007).



Εικόνα 5.1.1 Η γέφυρα Akashi-Kaikyō στην Ιαπωνία, Από *Akashi Kaikyo Bridge*, του 振, Δεκέμβριος 2005, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/222424-akashi-kaikyo-bridge> Copyright 2005 του 振

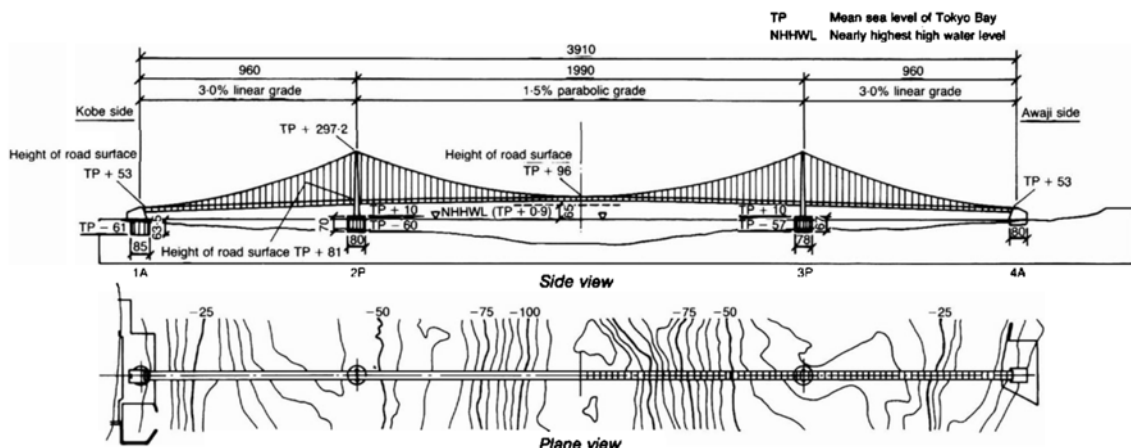
Πρόκειται για μια γέφυρα 3 ανοιγμάτων που από την έναρξη λειτουργίας της το 1998 μέχρι το 2022 αποτέλεσε την κρεμαστή γέφυρα με το μεγαλύτερο κεντρικό άνοιγμα στο κόσμο στα 1991 μέτρα έχοντας στο σύνολο της μήκος 3911 μέτρα (Yim, 2007), ενώ πλέον αποτελεί τη 2<sup>η</sup> μεγαλύτερη κρεμαστή γέφυρα στον κόσμο. Η κατασκευή της διήρκησε 10 χρόνια από το 1988 μέχρι το 1998 (Structurae, χ.η.-1). Αρχικά η γέφυρα επρόκειτο να συμπεριλάβει και δίκτυο σιδηροδρόμων έχοντας κεντρικό άνοιγμα τα 1780 μέτρα, όμως η οικονομική κατάρρευση των ιαπωνικών σιδηροδρόμων το 1980, οδήγησε στον σχεδιασμό γέφυρας που θα εξυπηρετεί μόνο το οδικό δίκτυο (Furuya & Tatsumi, 1994). Ταυτόχρονα, η περιοχή αποτελεί διεθνή θαλάσσια οδό και σύμφωνα με τον διεθνή κανονισμό θα έπρεπε η προτεινόμενη γέφυρα να έχει κεντρικό άνοιγμα τουλάχιστον 1500 μέτρα για να εξυπηρετεί με ασφάλεια τον διάπλου πλοίων τόσο κατά τη διάρκεια κατασκευής της όσο και κατά τη λειτουργία της, ενώ πλέον ξεπερνούν σε αριθμό τα 1400 πλοία καθημερινά (Furuya & Tatsumi, 1994). Έτσι σχεδιάστηκε η γέφυρα Akashi-Kaikyō με 6 αυτοκινητοδρόμους και μέγιστο όριο ταχύτητας διέλευσης τα 100km/h ενώ περαιτέρω περιορισμοί συνέβαλλαν στον προσδιορισμό του τελικού της ανοίγματος (Yim, 2007).



Εικόνα 5.1.2 Το κατάστρωμα της γέφυρας Akashi-Kaikyō, Από *Akashi Kaikyo Bridge*, της Inge Kanakaris-Wirtl, Απρίλιος 2015, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/234275-akashi-kaikyo-bridge> Copyright 2015 της Inge Kanakaris-Wirtl



Σε σχέση με το τελικό κεντρικό άνοιγμα της γέφυρας, και έχοντας σαν δεδομένο πως το στενό του Akashi πλησιάζει τα 4km σε μήκος, το μέγιστο βάθος του πυθμένα να φτάνει τα 110 μέτρα και την παλίρροια τα 4,5 m/s, σύμφωνα με μελέτες που προηγήθηκαν, οι μελετητές κατέληξαν σε προτάσεις με κεντρικά ανοίγματα κοντά στα 2000 μέτρα, κυρίως ανάμεσα σε 1950-2050 μέτρα κυρίως λόγω μικρότερου ενδεχόμενου κόστους κατασκευής (Furuya & Tatsumi, 1994). Σχετικά με το μέγεθος της γέφυρας, το μήκος στο κεντρικό άνοιγμα είναι 1990,80 μέτρα, με τα άλλα δύο ανοίγματα στα 960 και 960,30 μέτρα αντίστοιχα και το κατάστρωμα, ένα μεταλλικό χωροδικτύωμα να έχει φάρδος 35,50 μέτρα και ύψος 14 μέτρα (Structurae, χ.η.-1). Ακόμη, οι πυλώνες υψώνονται στα 297 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, το συνολικό βάρος του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε για τη γέφυρα φτάνει τους 195.100 τόνους (Kitagawa, 2004), και το συνολικό μήκος των συρμάτων των καλωδίων που χρησιμοποιήθηκαν είναι στα 300.000 km (Structurae, χ.η.-1).



Εικόνα 5.1.3 Γενικό σχέδιο της γέφυρας Akashi-Kaikyo, Από «Technical innovation for realization of Akashi-Kaikyo Bridge», των Nobuaki Furuya & Masaaki Tatsumi, Αύγουστος 1994. Στο *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, τ.104, σελ.286). Emerald Publishing. Copyright 1994 Nobuaki Furuya & Masaaki Tatsumi

### 5.1.2 Η γέφυρα Cheon-Sa

Η γέφυρα Cheon-Sa ή αλλιώς γέφυρα της Νέας Χιλιετίας (New Millennium Grand Bridge) είναι μια κρεμαστή γέφυρα 4 ανοιγμάτων που βρίσκεται στην Κορέα και αποτελεί την 1η εφαρμογή τέτοιου τύπου γέφυρας στη χώρα (Jung et al., 2010). Ουσιαστικά αποτελεί το πρώτο τμήμα μια γεφύρωσης νησιών στην περιοχή Sinan-gun στη Νότια Κορέα, συνολικού μήκους 7224 μέτρων , με την γέφυρα Cheon-Sa I, να καλύπτει ένα μήκος 1750 μέτρων (Structurae,

χ.η.- 2). Ολοκληρώθηκε το 2019, ενώ η κατασκευή της είχε ξεκινήσει το 2010 αποτελώντας αποκλειστικά τμήμα που οδικού δικτύου με δύο λωρίδες κυκλοφορίας (Structurae, χ.η.- 2). Μετά από συγκριτικές μελέτες με άλλους τύπους γεφυρών, όπως κρεμαστή με ένα κεντρικό άνοιγμα, αλλά και καλωδιωτή με παράλληλα καλώδια, επιλέχθηκε σαν τύπος, κρεμαστή γέφυρα με 4 ανοίγματα (Jung et al., 2010).



Εικόνα 5.1.4 Η κρεμαστή γέφυρα Cheon-Sa με 3 πυλώνες, Από *Cheonsa Bridge, the Only Marine Complex Bridge in Korea, Opened*, του DLENC, 11 Απριλίου 2019, DLENC. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από [https://www.dlenc.co.kr/eng/daelim/pr/NewsView.do?keyword=&searchword=&currentPage=1&cd\\_mnu=&idx=19989](https://www.dlenc.co.kr/eng/daelim/pr/NewsView.do?keyword=&searchword=&currentPage=1&cd_mnu=&idx=19989) Copyright 2019 του DLENC

Βασική προϋπόθεση για το σχεδιασμό της γέφυρας αποτέλεσε η κυκλοφορία στην περιοχή και η διέλευση τάνκερ κλάσης 320.000 DWT καθώς και τα μεγάλα φορτία ανέμου, ενώ ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στο αισθητικό κομμάτι του σχεδιασμού καθώς η περιοχή αποτελεί πόλο έλξης τουριστών (Jung et al., 2010).

Στη γέφυρα Cheon-Sa, τα δύο κεντρικά ανοίγματα έχουν μήκος 650 μέτρα έκαστο και τα δύο ακραία 225 μέτρα, ενώ το φάρδος της είναι στα 16,5 μέτρα, και το ύψος των κύριων δοκών στα 2,7 μέτρα, με τους πυλώνες της να είναι κατασκευασμένοι από οπλισμένο σκυρόδεμα (Structurae, χ.η.- 2). Λόγω των αισθητικών κριτηρίων που είχαν τεθεί για τη γέφυρα, τόσο ο κεντρικός, όσο και οι πλάγιοι πυλώνες, επιλέχθηκαν να έχουν σχήμα «H», με διαφορετικές βέβαια διαστάσεις, με τον κεντρικό να φτάνει τα 163,2 μέτρα ύψος και τους πλάγιους τα 150,4 μέτρα (Jung et al., 2010).



Εικόνα 5.1.5 Η γέφυρα Cheon-Sa και η ευρύτερη περιοχή, Από *Cheonsa Bridge*, του Dasan Consultants, 11 Απριλίου 2019, DASAN.93.CO. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <http://www.dasan93.co.kr/en/portfolio-item/saecheonnyeon-bridge/> Copyright 2019 του Dasan Consultants

Στις κρεμαστές γέφυρες πολλαπλών ανοιγμάτων, όπως στην περίπτωση της γέφυρας Cheon-Sa, βασικό πρόβλημα είναι η μείωση της κατακόρυφης μετατόπισης των κεντρικών ανοιγμάτων, λόγω της «σχετικά ελεύθερης» κλίσης του κεντρικού πυλώνα στήριξης προς το άνοιγμα που φέρει τα περισσότερα φορτία, καθώς τα καλώδια στα κεντρικά ανοίγματα έχουν μικρή δυνατότητα αντίστασης σε οριζόντιο άξονα στις κινήσεις του άνω τμήματος του πυλώνα (Jung et al., 2010).

Για τη μείωση της κατακόρυφης μετατόπισης των κεντρικών ανοιγμάτων θα πρέπει ο κεντρικός πυλώνας να έχει μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη από τους πυλώνες στην άκρη της γέφυρας, ενώ ταυτόχρονα να είναι αρκετά «άκαμπτος» στο κεντρικό του τμήμα, μιας και η διαφορά της οριζόντιας δύναμης του καλωδίου στην κορυφή του κεντρικού πυλώνα μπορεί να αυξηθεί σε σχέση με την αντίσταση τριβής σε περίπτωση που τα κινητά φορτία ασκούνται σε μόνο ένα από τα κύρια ανοίγματα και αυτό ενδεχομένως συνεπάγεται την ολίσθηση του καλωδίου, κάτι που μπορεί να συμβεί στο άνω τμήμα του κεντρικού πυλώνα (Jung et al., 2010).

### 5.1.3 Η γέφυρα Millau



Εικόνα 5.1.6 Η γέφυρα Millau, Από *Millau Viaduct*, του Jacques Mossot, Οκτώβριος 2007, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/95526-millau-viaduct> Copyright 2007 των CEVM Eiffage/Foster & Partners

Η γέφυρα στην ευρύτερη περιοχή της κοιλάδας του Millau στη Γαλλία κατασκευάστηκε το 2004, και αποτελεί μια καλωδιωτή γέφυρα με ημιακτινωτή διάταξη καλωδίων, συνολικού μήκους 2460 μέτρων, με συνεχόμενη κλίση 3,025% από το Βορά στο Νότο, ενώ αποτελεί αποκλειστικά τμήμα του αυτοκινητοδρόμου A75 Clermont Ferrand-Béziers (Martin et al., 2004). Η γέφυρα στο Millau είναι μια γέφυρα 8 συνεχόμενων ανοιγμάτων και 7 πυλώνων διαφορετικών υψών (Martin et al., 2004). Το συνολικό βάρος της γέφυρας είναι 290.000 τόνοι χάλυβα, το κατάστρωμα φτάνει τους 36.000 τόνους (Lin, 2022), ενώ τα καλώδια μόλις τους 1.500 τόνους χάλυβα (Buonomo et al., 2004).

Η πολύπλοκη τοπογραφία της περιοχής και οι έντονες εναλλαγές υψομέτρων οδήγησαν στη δημιουργία 7 πυλώνων διαφορετικών υψών, με τον ψηλότερο (P2) να φτάνει τα 244,96 μέτρα και τον μικρότερο (P7) τα 77,56 μέτρα, με τον P2 να αποτελεί και τον ψηλότερο που έχει κατασκευαστεί μέχρι τότε (Structurae, χ.η.- 3), ενώ το άνω τμήμα κάθε πυλώνα διαχωρίζεται στα δύο, σαν αντίστροφο «Y» (Martin et al., 2004). Το συνολικό φάρδος του καταστρώματος φτάνει τα 30,05 μέτρα, ενώ το ύψος του τα 4,20 μέτρα (Martin et al., 2004).

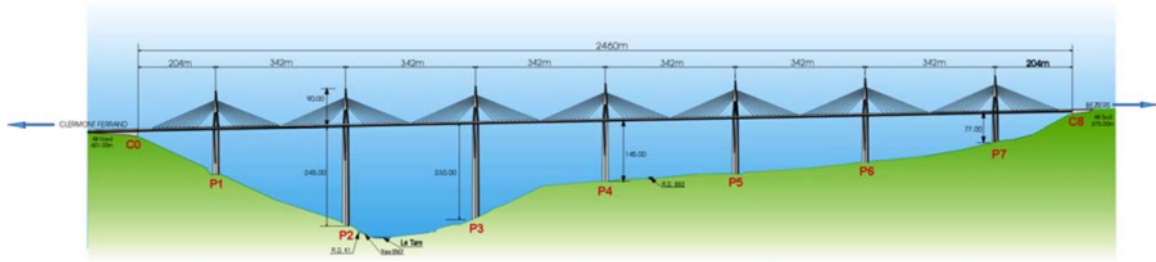


Εικόνα 5.1.7 Οι πυλώνες της γέφυρας Millau, Από *Millau Viaduct*, του Adrien Mortini, 10 Μαΐου 2005, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/57759-millau-viaduct> Copyright 2005 των CEVM Eiffage/Foster & Partners

Οι πυλώνες στη γέφυρα Millau βρίσκονται στο κέντρο της γέφυρας και καθένας τους συνδέεται με το κατάστρωμα με 22 καλώδια. Κάθε άνοιγμα της γέφυρας στηρίζεται από 11 ζεύγη καλωδίων σε ημιακτινωτή διάταξη σε μονή σειρά, ενώ κάθε καλώδιο αποτελείται από 45 έως 91 συρματόσχοινα T15s (strands), ανάλογα με τη θέση του σε σχέση με τον πυλώνα, με τα καλώδια που έχουν τα λιγότερα να βρίσκονται πλησιέστερα των πυλώνων, ενώ ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους είναι αντοχής σε εφελκυσμό 1860 MPa και είναι υπεργαλβανισμένος (Buonomo et al., 2004). Τα καλώδια έχουν ακόμη καλυφθεί με υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (PEHD) για την προστασία από την UV ακτινοβολία και μια ενδεχόμενη συστροφή από το συνδυασμό ανέμου και βροχής (Buonomo et al., 2004).

Ακόμη το κατάστρωμα και οι πυλώνες έχουν κατασκευαστεί αποκλειστικά από χάλυβα S355 και S460, ενώ τα βάθρα είναι κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα B60 και επιλέχθηκε κυρίως για τη μεγάλη διάρκεια ζωής του και λιγότερο για της μηχανικές του ιδιότητες

(Buonomo et al., 2004). Οπλισμένο σκυρόδεμα B35 χρησιμοποιήθηκε ακόμη σε άλλα στοιχεία της κατασκευής, όπως οι πλάκες θεμελίωσης και στηρίξεις (Martin et al., 2004).



Εικόνα 5.1.8 Όψη της γέφυρας Millau, Από «The design of the Millau Viaduct», του Martin et. al, Απρίλιος 2004, Στο *Concrete structures: the Challenge of Creativity*. Ανακτήθηκε 10 Ιουλίου, 2024, από <https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2018/05/Servant.pdf> Copyright 2004 των Martin et. al.

Παρά την εντυπωσιακή της αρχιτεκτονική για την οποία εργάστηκε το αρχιτεκτονικό γραφείο Foster & Partners και την κατασκευαστική της ακρίβεια, η χρησικότητά της είναι αμφισβητήσιμη σε σχέση με το οδικό δίκτυο, καθώς ο χρόνος μετακίνησης από τη μια πλευρά της στην άλλη, σε σχέση με την προηγούμενη διαδρομή, μειώθηκε μόλις κατά 10 περίπου λεπτά (Lin, 2022).



Εικόνα 5.1.9 Θέαση της γέφυρας Millau, Από *Millau Viaduct*, του Daniel Lavabre, 8 Απριλίου 2005, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/38203-millau-viaduct> Copyright 2005 των CEVM Eiffage/Foster & Partners

#### 5.1.4 Η γέφυρα Russky



Εικόνα 5.1.10 Η γέφυρα Russky, Από *Russky Bridge*, του Баяков Алексей Александрович, 11 Ιανουαρίου 2013, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/219665-russky-bridge> Copyright 2013 του Баяков Алексей Александрович

Η γέφυρα προς το νησί Russky στο Βλαντιβοστόκ της Ρωσίας ολοκληρώθηκε το 2012 και αποτελεί την καλωδιωτή γέφυρα με το μεγαλύτερο κεντρικό άνοιγμα στον κόσμο στα 1104 μέτρα, ενώ ακόμη έχει τους ψηλότερους πυλώνες και τα μακρύτερα καλώδια από όλες τις γέφυρες της κατηγορίας (Pirinato, 2022). Το συνολικό της μήκος φτάνει τα 1885,53 μέτρα, το φάρδος της είναι 21 μέτρα με 4 λωρίδες κυκλοφορίας και μπορεί να εξυπηρετήσει έως 50.000 οχήματα καθημερινά, ενώ το όλο σύστημα στα δύο μικρότερα ανοίγματα υποστηρίζεται από 8 βάθρα συμμετρικά τοποθετημένα στην γέφυρα (Ramadan & Ermoshin, 2022). Αν υπολογίσει κανείς τις πλευρικές μη προσβάσιμες ζώνες, το συνολικό φάρδος του καταστρώματος φτάνει τα 29,5 μέτρα, με χάλυβα να χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κατασκευή του κεντρικού ανοίγματος και να φτάνει τους 22.567 τόνους σε βάρος (Structurae, χ.η.- 4). Η καλωδιωτή γέφυρα αποτελεί τμήμα μιας μεγαλύτερης οδογέφυρας που συνδέει το νησί Russky και έχει συνολικό μήκος 3100 μέτρα, ενώ το ύψος των 2 πυλώνων της φτάνει τα 324 μέτρα με το μεγαλύτερο καλώδιο να είναι 580 μέτρα και το μικρότερο 136 μέτρα μήκος (Pirinato, 2022). Στα 3100 μέτρα μήκους της γεφύρωσης, υπάρχουν 11 συνολικά ανοίγματα με το μεγαλύτερο να είναι το κεντρικό άνοιγμα της καλωδιωτής γέφυρας στα 1104 μέτρα, και τα περιμετρικά της ανοίγματα να είναι ανοίγματα μήκους 60, 72 και 82 μέτρα συμμετρικά ως προς το κεντρικό της άνοιγμα (Chandramouli et al., 2023).

Η περιοχή έχει αρκετά σύνθετο ανάγλυφο και συνθήκες, με το κανάλι πλοήγησης να φτάνει έως και τα 50 μέτρα, και την γέφυρα και βρίσκεται εκτεθειμένη σε ακραίες καιρικές συνθήκες όπως θερμοκρασίες που κυμαίνονται από  $-31^{\circ}\text{C}$  έως  $37^{\circ}\text{C}$ , ανέμους με ταχύτητες μέχρι  $36\text{ m/s}$ , κύματα με ύψος έως 6 μέτρα, και πάγος που φτάνει και τα 0,70 μέτρα (Pirinato, 2022).



Εικόνα 5.1.11 Πλάγια όψη της γέφυρας Russky, Από *Russky Bridge*, του Martin Boswell, 11 Μαρτίου 2015, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/350923-russky-bridge> Copyright 2015 του Martin Boswell

Οι πυλώνες έχουν σχήμα «Α» και κατασκευάστηκαν με αυτοαναρριχώμενες φόρμες, για να υλοποιηθούν στον ελάχιστο δυνατό χρόνο (Pirinato, 2022). Για την κατασκευή των βάθρων της γέφυρας, όπως και των πυλώνων, χρησιμοποιήθηκε αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα τσιμέντου Πόρτλαντ B35, ανθεκτικό στο θειικό άλας για να αποτρέπει τη διάβρωση του σπλισμού (Pirinato, 2022). Ακόμη, οι πυλώνες φέρουν 84 καλώδια έκαστος, διατεταγμένα σε ημιακτινωτή διάταξη, με την απόσταση μεταξύ τους στο κεντρικό άνοιγμα να ορίζεται στα 24 μέτρα, κάτι που οδήγησε σε ύψος δοκού αγκύρωσής τους στα 3,20 μέτρα, το  $1/340$  δηλαδή του μήκους του κεντρικού ανοίγματος της γέφυρας ή αλλιώς το  $1/7,5$  της απόστασης μεταξύ των καλωδίων και των αγκυρώσεων (Ramadan & Ermoshin, 2022).



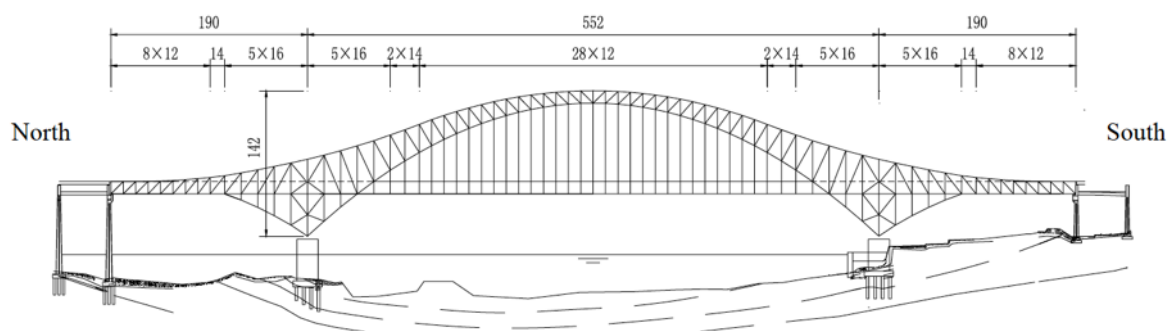
### 5.1.5 Η γέφυρα Chaotianmen

Η τοξωτή γέφυρα Chaotianmen βρίσκεται στο Chongqing στην Κίνα και διασχίζει τον ποταμό Yangtze, αποτελώντας μείζονος σημασίας σύνδεση για το οδικό και το σιδηροδρομικό δίκτυο της ευρύτερης περιοχής. Οι εργασίες κατασκευής της ξεκίνησαν το Δεκέμβριο του 2004, ενώ δόθηκε στην κυκλοφορία τον Απρίλιο του 2009 (Structurae, χ.η.- 5). Για την επιλογή του συγκεκριμένου τύπου γέφυρας και του ανοίγματός της στα 552 μέτρα συντέλεσαν διάφοροι παράγοντες, όπως η τοπογραφία της περιοχής, και η επίδραση της στο υπόλοιπο δίκτυο μεταφορών οδικό και σιδηροδρομικό, η αισθητική της σε σχέση με την αρχιτεκτονική γενικότερου περιβάλλοντος της περιοχής, η χρήση του ποταμού Yangtze από πλοία, αλλά και ο χρόνος ολοκλήρωσης της κατασκευής της (Wang, 2009).



Εικόνα 5.1.12 Η γέφυρα Chaotianmen, Από *Chaotianmen Bridge*, του Glabb, 28 Ιουλίου 2012, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/227081-chaotianmen-bridge> Copyright 2012 του Glabb

Η γέφυρα Chaotianmen έχει συνολικό μήκος 932 μέτρα, διπλό κατάστρωμα και συνολικά 3 ανοίγματα, με το κεντρικό να είναι 552 μέτρα και τα 2 πλευρικά στα 190 μέτρα, ενώ παράλληλα συνδέεται και με άλλες γεφυρώσεις με τη στεριά εκτός της τοξωτής κατασκευής (Structurae, χ.η.- 5). Τα δύο καταστρώματα βρίσκονται ενδιάμεσα του τόξου, ενώ ταυτόχρονα βάση κατηγοριοποίησης αποτελεί τοξωτή γέφυρα με ελκυστήρα, η οποία εκτός από τα δικτυώματα και το τόξο, έχει και καλώδια για τη στήριξη του κεντρικού της ανοίγματος. Το διπλό κατάστρωμα λειτουργεί ώστε να διαχωρίσει το οδικό και το σιδηροδρομικό δίκτυο. Το άνω κατάστρωμα έχει φάρδος 36 μέτρα, 6 λωρίδες κυκλοφορίας, και 2 πεζοδρόμια, ένα σε κάθε πλευρά, ενώ το κάτω κατάστρωμα περιλαμβάνει δύο σιδηροδρομικές γραμμές, και 2 πλευρικές διαβάσεις με φάρδος στα 7 μέτρα η καθεμία, βρίσκονται πλευρικά των σιδηροδρομικών γραμμών, οι οποίες είναι κατασκευασμένες αποκλειστικά για χαμηλού φορτίου μεταφορές, με συνολικό ύψος τα 13 μέτρα (Wang, 2009).



Εικόνα 5.1.13 Σχέδιο όψης της γέφυρας Chaotianmen, Από «Design & technology characteristics of main bridge of Chaotianmen Yangtze River Bridge», του Duan et. al, Οκτώβριος 2010, Στο 6th International Conference on Arch Bridges, Fuzhou, σελ. 07. Ανακτήθηκε 13 Ιουλίου, 2024, από [https://archbridges.fzu.edu.cn/\\_local/0/4A/45/62424EB4CDB7AC5A58B071C5FA7\\_4DAC1E42\\_73E56.pdf?e=.pdf](https://archbridges.fzu.edu.cn/_local/0/4A/45/62424EB4CDB7AC5A58B071C5FA7_4DAC1E42_73E56.pdf?e=.pdf) Copyright 2010 των Duan et. al.

Τα δύο πλευρικά τόξα συνδέονται με ζευκτά και έχουν απόσταση 29 μέτρα μεταξύ τους, με το ύψος από το κεντρικό σημείο του τόξου φτάνει τα 142 μέτρα, ενώ το ύψος από το κατάστρωμα στο ανώτερο τμήμα του τόξου φτάνει τα 128 μέτρα, με αναλογία απόστασης καταστρώματος – ανοίγματος τόξου να φτάνει τα 1/4,31 (Wang, 2009). Όσον αφορά το σχήμα του τόξου, το περίγραμμα της χαμηλότερης «χορδής» του τόξου περιγράφεται σε μια τετραγωνική παραβολή με μέγιστη άνοδο καμπύλης στα 128 μέτρα, ενώ το άνω τμήμα της συνεχίζεται ως τμήμα κύκλου ακτίνας 700 μέτρων στο άνω τμήμα του ανοίγματος των ζευκτών (Duan et al., 2010)

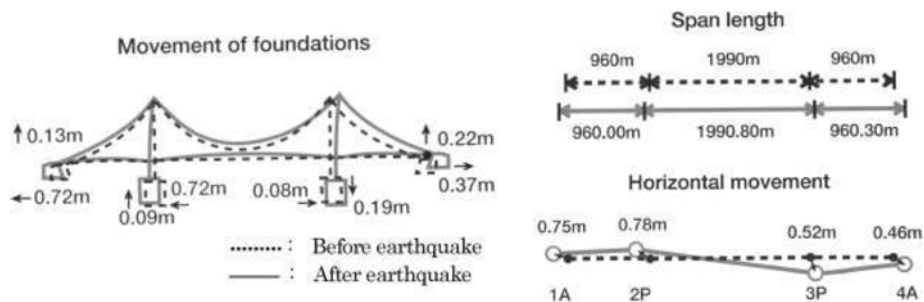
## 5.2 Παρουσίαση μεθόδων σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκαν στα περιστατικά μελέτης

### 5.2.1 Ανάλυση μεθόδων σχεδίασης της γέφυρας Akashi-Kaikyō

Στην περίπτωση της γέφυρας στο Akashi-Kaikyō είναι εμφανές πως ο σχεδιασμός της ήταν άμεσα εξαρτώμενος από τις διαθέσιμες και μη μεθόδους κατασκευής, όπως και το ενδεχόμενο κόστος κάθε επιλογής, λόγω της κλίμακας του έργου. Σε κρεμαστές γέφυρες, πριν από την υλοποίηση της γέφυρας Akashi-Kaikyō, η αντοχή των καλωδίων σε εφελκυσμό έφτανε τα 1550-1600 MPa, κάτι που στην προκειμένη περίπτωση θα ανέβαζε πολύ το κόστος κατασκευής λόγω της πολυπλοκότητας των δοκών καταστρώματος και της μεγάλης αύξησης του φάρδους των βάρων οδηγώντας τους μελετητές στη δημιουργία νέου τύπου καλωδίων, τα οποία έφτασαν σε αντοχή σε εφελκυσμό τα 1800 MPa, μειώνοντας έτσι το προβλεπόμενο κόστος ανέγερσης της γέφυρας (Kitagawa, 2004).



Εικόνα 5.2.1 Η κατασκευή της γέφυρας Akashi-Kaikyō, Από *Akashi-Kaikyo*, του 神戸市, 8 Δεκεμβρίου 1995, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/353211-akashi-kaikyo-bridge> Copyright 1995 του 神戸市



Εικόνα 5.2.2 Η μετατόπιση των θεμελιώσεων μετά το σεισμό στο Kobe, Από «Technology of the Akashi-Kaikyo bridge», του Kitagawa M., 2004, Στο *Structural control and health monitoring*, τ.11, σελ.90., Copyright 2004 του M. Kitagawa

Αρχικά το μήκος του κεντρικού ανοίγματος είχε σχεδιαστεί στα 1990 μέτρα και η κατασκευή της γέφυρας το 1988 ξεκίνησε με αυτή την προϋπόθεση, ενώ τα άλλα δύο ανοίγματα είχαν σχεδιαστεί στα 960 μέτρα έκαστο (Kitagawa, 2004). Κατά τη διάρκεια της κατασκευής της



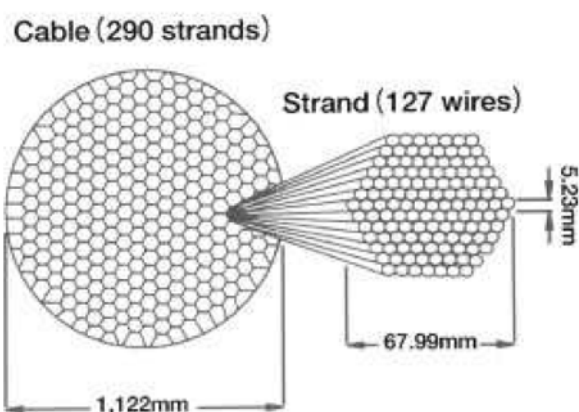
Εικόνα 5.2.3 Διαδικασία ανέγερσης της γέφυρας - κατασκευή καταστρώματος, Από *Steel Bridges in Japan*, του Nobutaka Yurioka, 1995, phase-trans.msm.cam.ac. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2004/Bridges/Bridges.html> Copyright 1995 του Nobutaka Yurioka

γέφυρας, το 1995, μετά το σεισμό στο Kobe τάξεως 7,2R, 2km μόλις μακριά από την περιοχή και ενώ οι σύνδεσμοι δεν είχαν τοποθετηθεί, προέκυψαν μετατοπίσεις στα βάθρα και τις αντιστηρίξεις τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα, ενώ κατόπιν μελετών έγιναν αλλαγές στην αρχική μελέτη ώστε να υλοποιηθεί το έργο, αλλαγές οι οποίες διαμόρφωσαν το τελικό μήκος της γέφυρας, με το κεντρικό άνοιγμα να διαμορφώνεται πλέον στα 1990,80 μέτρα, ενώ τα δύο πλάγια ανοίγματα να βρίσκονται στα 960 και 960,30 μέτρα αντίστοιχα (Kitagawa, 2004). Σαν αποτέλεσμα της αλλαγής του μήκους της γέφυρας, προέκυψαν αλλαγές στο μήκος και τις τοποθετήσεις των καλωδίων, αλλά και στις αγκυρώσεις της γέφυρας.

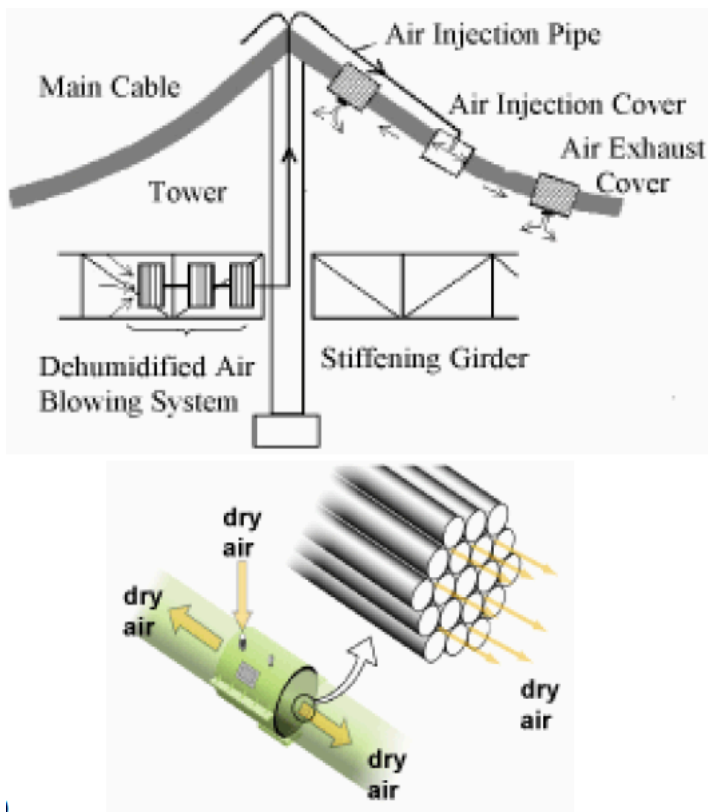


Εικόνα 5.2.4 Εσωτερικό καταστρώματος γέφυρας Akashi-Kaikyō, Από *Akashi-Kaikyo*, της Sonja Zlatovic, 30 Ιουλίου 2008, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/180436-akashi-kaikyo-bridge> Copyright 2008 της Sonja Zlatovic

Η αναλογία κρέμασης / μήκους ανοίγματος στις κρεμαστές γέφυρες αποτελεί βασικό κριτήριο σχεδιασμού και στην περίπτωση της γέφυρας Akashi-Kaikyō, ορίστηκε στο 1/10, σαν αποτέλεσμα των νεοαναπτυχθέντων καλωδίων αντοχής 1800 MPa, με τους πυλώνες να φτάνουν τα 297 μέτρα ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας, ύψος που είχε μειωθεί από το αρχικά προτεινόμενο 333 μέτρα που είχε υπολογιστεί με τη χρήση καλωδίων αντοχής 1600 MPa, ενώ ταυτόχρονα η γέφυρα έχει τη δυνατότητα διαστολής έως 2 μέτρα κατά τη διάρκεια της μέρας (Furuya & Tatsumi, 1994). Κάθε καλώδιο της γέφυρας φτάνει σε διάμετρο τα 1122 mm και αποτελείται από 290 συρματόσχοινα (strands), το καθένα από τα οποία αποτελείται με τη σειρά του από σύρματα 127 (wires) 5,23mm το καθένα (Kitagawa, 2004).



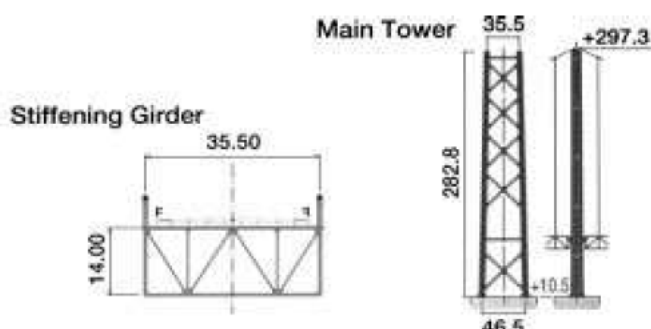
Εικόνα 5.2.5 Τομή του κύριου καλωδίου της γέφυρας Akashi-Kaikyō, Από «Technology of the Akashi-Kaikyō bridge», του Kitagawa M., 2004, Στο *Structural control and health monitoring*, τ.11, σελ.84., Copyright 2004 του M. Kitagawa



Εικόνα 5.2.6 Σύστημα μείωσης της υγρασίας των καλωδίων της γέφυρας Akashi-Kaikyo, Από «The Bridge Engineering Conference. Akashi Bridge», του Yim W.T., 27 Απριλίου 2007, Στο *Proceedings of Bridge Engineering 2 Conference 2007*. Ανακτήθηκε 13 Ιουλίου, 2024, από [http://www.ams.ir/jozavat/Shegeftiha/Chapter2/Yim\\_Akashi.pdf](http://www.ams.ir/jozavat/Shegeftiha/Chapter2/Yim_Akashi.pdf), Copyright 2007 του W.T. Yim

Οι αντίξοες συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή και κυρίως η υγρασία, μελετήθηκαν, ώστε να αποφευχθεί η διάβρωση σε κρίσιμα στοιχεία της κατασκευής και κυρίως στα κύρια καλώδια ανάρτησης της γέφυρας. Παρότι ο χάλυβας των συρμάτων (wires) είχε υποστεί γαλβανισμό, η έντονη υγρασία της περιοχής που ξεπερνούσε το 60% γύρω από τα καλώδια έπρεπε να μειωθεί στο 40% σύμφωνα με υπολογισμούς και για αυτό εγκαταστάθηκε στη γέφυρα σύστημα ξηρού αέρα με στόχο να μειώσει την υγρασία περιμετρικά των καλωδίων (Kitagawa, 2004).

Ακόμη, τόσο το ύψος των δύο πυλώνων κάτω από το νερό, όσο και η θεμελίωσή τους διαφοροποιούνταν σαν αποτέλεσμα της διαφορετικής γεωλογίας του εδάφους, με τη θεμελίωση του πυλώνα στην πλευρά του Kobe να φτάνει τα 85 μέτρα διάμετρο στα 61 μέτρα κάτω από



Εικόνα 5.2.7 Τομή καταστρώματος και όψεις πυλώνων της γέφυρας Akashi-Kaikyo, Από «Technology of the Akashi-Kaikyo bridge», του Kitagawa M., 2004, Στο *Structural control and health monitoring*, τ.11, σελ.76., Copyright 2004 του M. Kitagawa

την επιφάνεια της θάλασσας και να αποτελεί τη μεγαλύτερη θεμελίωση γέφυρας στον κόσμο (Yim, 2007). Για την υλοποίησή τους, αναπτύχθηκε νέος τύπος τσιμέντου, ο οποίος έδινε τη δυνατότητα στο μείγμα σκυροδέματος να μην ξεπερνά εσωτερικές θερμοκρασίες των 50°C, ώστε να αποφευχθούν ενδεχόμενες ρωγμές (Kitagawa, 2004).



Εικόνα 5.2.8 Μοντέλο της γέφυρας Akashi-Kaikyō σε κλίμακα 1/100 πριν τη δοκιμασία σε τούνελ αέρα, Από «The Bridge Engineering Conference. Akashi Bridge», του Yim W.T., 27 Απριλίου 2007, Στο *Proceedings of Bridge Engineering 2 Conference 2007*. Ανακτήθηκε 13 Ιουλίου, 2024, από [http://www.ams.ir/jozavat/Shegefuiha/Chapter2/Yim\\_Akashi.pdf](http://www.ams.ir/jozavat/Shegefuiha/Chapter2/Yim_Akashi.pdf), Copyright 2007 του W.T. Yim

Η γέφυρα έχει σχεδιαστεί ώστε να μπορεί να αντέξει σε σεισμούς 8,5 R και ανέμους που φτάνουν τα 286 km/h, ενώ η αεροδυναμική της συμπεριφορά εκτός από τους υπολογισμούς που έγιναν μέσω προγραμμάτων προσομοίωσης φορτίσεων, μελετήθηκε επιπλέον και με την κατασκευή μακέτας σε κλίμακα 1/100, όπου έγιναν δοκιμές σε τεχνητές ριπές αέρα (Yim, 2007).



Εικόνα 5.2.9 Διαδικασία ανάρτησης καλωδίων της γέφυρας Akashi-Kaikyō, Από «Technology of the Akashi-Kaikyō bridge», του Kitagawa M., 2004, Στο *Structural control and health monitoring*, τ.11, σελ.85., Copyright 2004 του M. Kitagawa



Εικόνα 5.2.10 Κατασκευή καταστρώματος και σύνδεση καλωδίων, Από «Technology of the Akashi-Kaikyō bridge», του Kitagawa M., 2004, Στο *Structural control and health monitoring*, τ.11, σελ.89., Copyright 2004 του M. Kitagawa

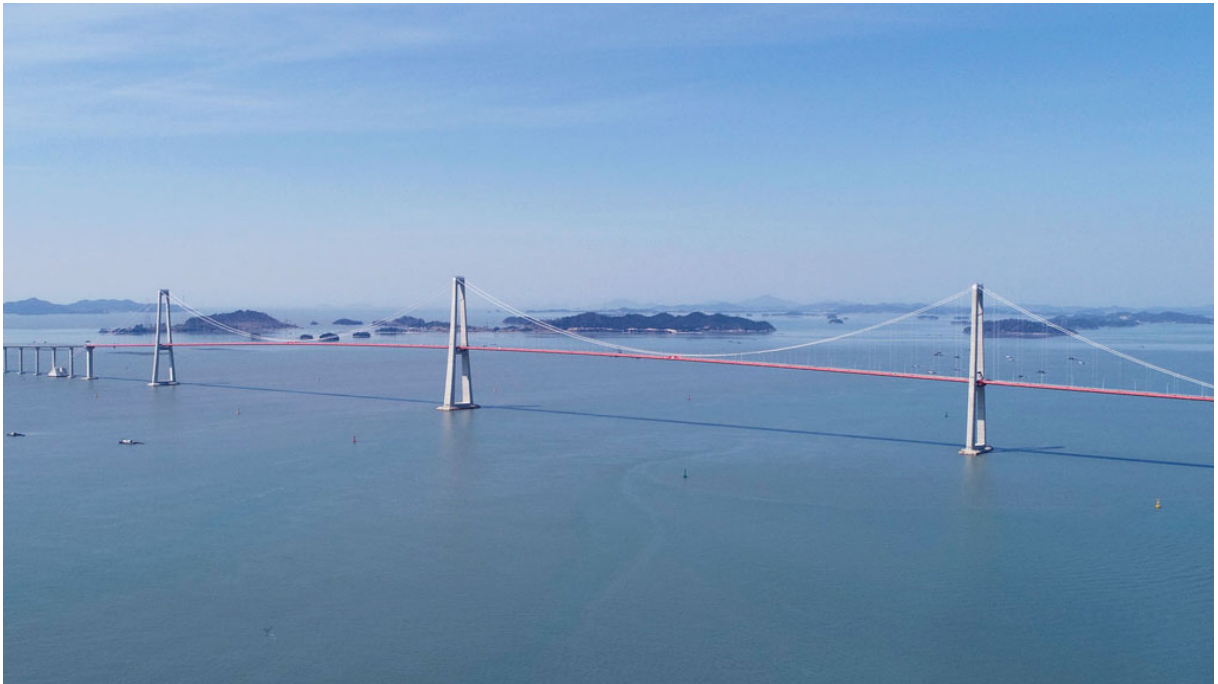


Εικόνα 5.2.11 Εγκατάσταση του βοηθητικού καλωδίου για την ανάρτηση των κύριων καλωδίων της γέφυρας από ελικόπτερο, Από «Technology of the Akashi-Kaikyō bridge», του Kitagawa M., 2004, Στο *Structural control and health monitoring*, τ.11, σελ.85., Copyright 2004 του M. Kitagawa



Εικόνα 5.2.12 Κατασκευή καταστρώματος, Από «Technology of the Akashi-Kaikyō bridge», του Kitagawa M., 2004, Στο *Structural control and health monitoring*, τ.11, σελ.89., Copyright 2004 του M. Kitagawa

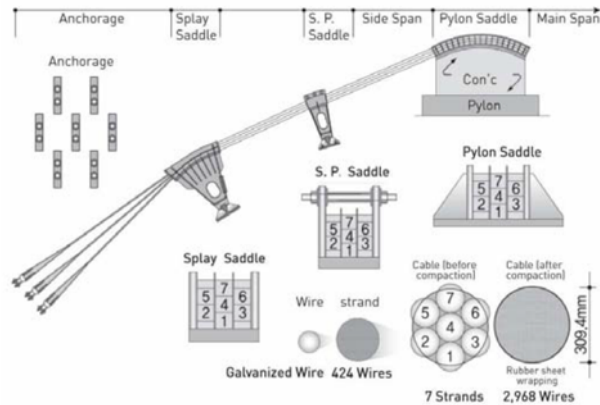
## 5.2.2 Ανάλυση μεθόδων σχεδίασης της γέφυρας Cheon-Sa



Εικόνα 5.2.13 Άποψη της γέφυρας Cheon-Sa, Από *Cheonsa Bridge*, του Dasan Consultants, 11 Απριλίου 2019, DASAN.93.CO. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <http://www.dasan93.co.kr/en/portfolio-item/saecheonnyeong-bridge/> Copyright 2019 του Dasan Consultants

Οι πυλώνες της γέφυρας Cheon-Sa είναι κατασκευασμένοι από οπλισμένο σκυρόδεμα, κάτι που δεν συναντάται συχνά σε κρεμαστές γέφυρες, ενώ για την υλοποίησή της χρησιμοποιήθηκαν καλώδια χάλυβα εφελκυστικής αντοχής 1960 MPa, τα οποία πρόσφατα αναπτύχθηκαν στη χώρα με στόχο να μειωθεί το βάρος του χάλυβα των καλωδίων κατά 6% και να μειωθούν οι ριπές ανέμου λόγω της μικρότερης πλέον επιφάνειάς τους (Jung et al., 2010). Στην συγκεκριμένη γέφυρα η ανάπτυξη τέτοιου τύπου καλωδίων ήταν μέγιστης σημασίας καθώς αυτό οδήγησε σε μείωση των επιβαρύνσεων των δυναμικών φορτίσεων που είναι εξορισμού πιο έντονες σε κρεμαστές γέφυρες. Κάθε καλώδιο αποτελείται από 7 συρματόσχοινα (strands), τα οποία με τη σειρά τους αποτελούνται από 424 σύρματα (wires) έκαστο, με την τελική τους διάμετρο να είναι στα 309,4 mm (Jung et al., 2010). Τα σύρματα της γέφυρας έχουν υποστεί γαλβανισμό, ενώ το συνολικό βάρος του κάθε κύριου καλωδίου ανάρτησης φτάνει τους 1847 τόνους (Kim, 2018).





Εικόνα 5.2.14 Σχέδια καλωδίων γέφυρας Cheon-Sa, Από «Practical Design of Continuous Two Main-span Suspension Bridge in Korea», των Jung et al., Σεπτέμβριος 2010, Στο *Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanised Areas*, σελ.286., Copyright 2010 του Jung et al.

Σχεδιαστικά οι κρεμαστές γέφυρες πολλαπλών ανοιγμάτων εμφανίζουν κάποια πλεονεκτήματα τα οποία ήταν και αυτά που οδήγησαν στην επιλογή του συγκεκριμένου τύπου για τη γέφυρα Cheon-Sa, και αυτά είναι η σχετικά καλύτερη αντίδραση της κατασκευής σε φορτίσεις ανέμου και η δυνατότητα μειωμένου μεγέθους αγκυρώσεων της (Kim, 2018). Σε σχέση με τον αεροδυναμικό σχεδιασμό της γέφυρας, τεστ σε τούνελ αέρα σε μακέτα όλης της γέφυρας κλίμακας 1/180 πραγματοποιήθηκαν και ταυτόχρονα έγιναν και δοκιμές σε διδιάστατα τμήματα τομής της γέφυρας, ενώ το σύνολο των τεστ πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις οδηγίες του «Design Guideline for Cable Supported Steel Bridge» (Jung et al., 2010). Η ταχύτητα ανέμου καθορίστηκε με περίοδο επαναφοράς τα 200 χρόνια στα 34,7 m/s σύμφωνα με στατιστικές μελέτες που έδιναν πιθανότητα μη υπέρβασης στο 60%, σύμφωνα με τα δεδομένα που υπήρχαν από εθνικό μετεωρολογικό σταθμό (Kim, 2018).

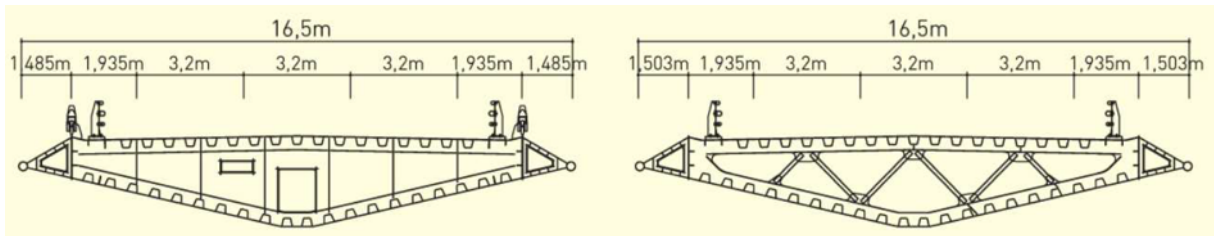


Εικόνα 5.2.15 Μακέτα γέφυρας Cheon-Sa σε κλίμακα 1/180, Από «Practical Design of Continuous Two Main-span Suspension Bridge in Korea», των Jung et al., Σεπτέμβριος 2010, Στο *Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanised Areas*, σελ.285., Copyright 2010 του Jung et al.



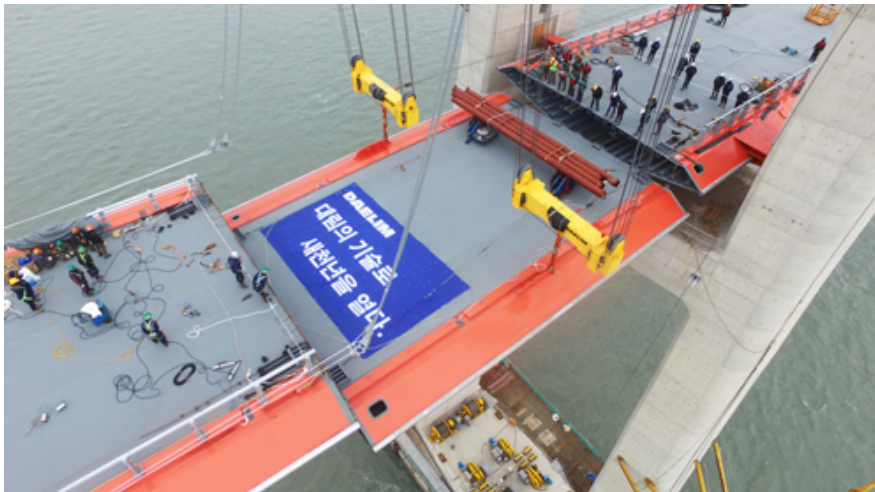
Εικόνα 5.2.16 Διαδικασία κατασκευής της γέφυρας Cheon-Sa, Από *Island Hopping*, του Jung-in Kim, 2018, Bridgeweb. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://www.bridgeweb.com/Island-hopping/4682> Copyright 2018 του Jung-in Kim

Για να διαπιστωθεί αν τα καλώδια ανάρτησης είχαν την απαιτούμενη γεωμετρία, πραγματοποιήθηκαν εργασίες προσαρμογής τους μετά την τοποθέτησή τους, έγιναν μετρήσεις με ακρίβεια στα συρματόσχοινα 1, 9 και 19, στην άκρη των πυλώνων, ενώ τα υπόλοιπα καλώδια προσαρμόστηκαν ανάλογα, με τη θερμοκρασία να καθορίζεται και να υπολογίζεται και στις 2 πλευρές του πυλώνα, ώστε να γίνει η σωστά η διόρθωση του μήκους τους (Kim, 2018).



Εικόνα 5.2.17 Τομή κιβωτοειδούς δοκού γέφυρας Cheon-Sa, Από «*Practical Design of Continuous Two Main-span Suspension Bridge in Korea*», των Jung et al., Σεπτέμβριος 2010, Στο *Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanised Areas*, σελ.285., Copyright 2010 του Jung et al.

Για τους συνδέσμους των δοκών έγιναν διάφορες μελέτες για την εξασφάλιση της αεροδυναμικής σταθερότητας της γέφυρας και κυρίως τη μείωση του βάρους των ίδιων των δοκών και έτσι επιλέχθηκε απλός τύπος δοκού κιβωτοειδούς διατομής, λόγω του μικρού φάρδους της γέφυρας, ο οποίος κατασκευάστηκε από χάλυβα HSB500 (Jung et al., 2010).



Εικόνα 5.2.18 Τοποθέτηση κιβωτοειδών δοκών της γέφυρας Cheon-Sa, Από *Island Hopping*, του Jung-in Kim, 2018, Bridgeweb. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://www.bridgeweb.com/Island-hopping/4682> Copyright 2018 του Jung-in Kim

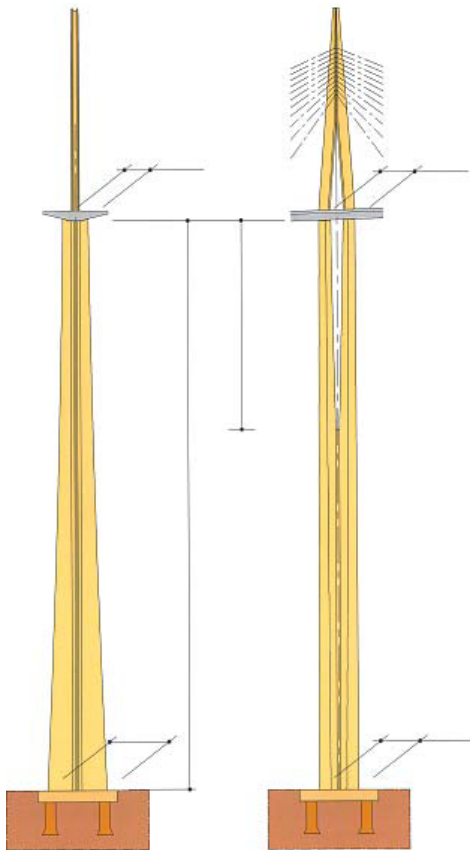
Οι καινοτομίες της γέφυρας Cheon-Sa, όπως το σχήμα των κιβωτοειδών δοκών, η χρήση χάλυβα HSB500 για την υλοποίησή τους, και η χρήση καλωδίων με αντοχή σε εφελκυσμό 1960MPa έκαναν δυνατή την υλοποίηση της κρεμαστής γέφυρας της Νέας Χιλιετίας με 4 ανοίγματα με το ελάχιστο κόστος (Jung et al., 2010).

### 5.2.3 Ανάλυση μεθόδων σχεδίασης της γέφυρας Millau



Εικόνα 5.2.19 Αποψη της γέφυρας Millau, Από *Millau Viaduct*, του Adrien Mortini, 19 Μαΐου 2008, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/113127-millau-viaduct> Copyright 2008 των CEVM Eiffage/Foster & Partners

Στην περίπτωση της γέφυρας Millau, η ευελιξία των διαδοχικών ανοιγμάτων σημαίνει ότι το άνω τμήμα του πυλώνα εκτρέπεται προς το άνοιγμα που φέρει τα περισσότερα φορτία, ενώ ταυτόχρονα οι πυλώνες και τα βάθρα συμβάλλουν έτσι στην αντίσταση της κατασκευής στη διαμήκη κάμψη (Martin et al., 2004).



Εικόνα 5.2.20 Τυπική όψη πυλώνα – βάθρου, Από «The design of the Millau Viaduct», των Martin et al., Απρίλιος 2004, Στο *Concrete structures: the challenge of creativity*. Ανακτήθηκε 10 Ιουλίου, 2024, από <https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2018/05/Servant.pdf> Copyright 2004 των Martin et al.

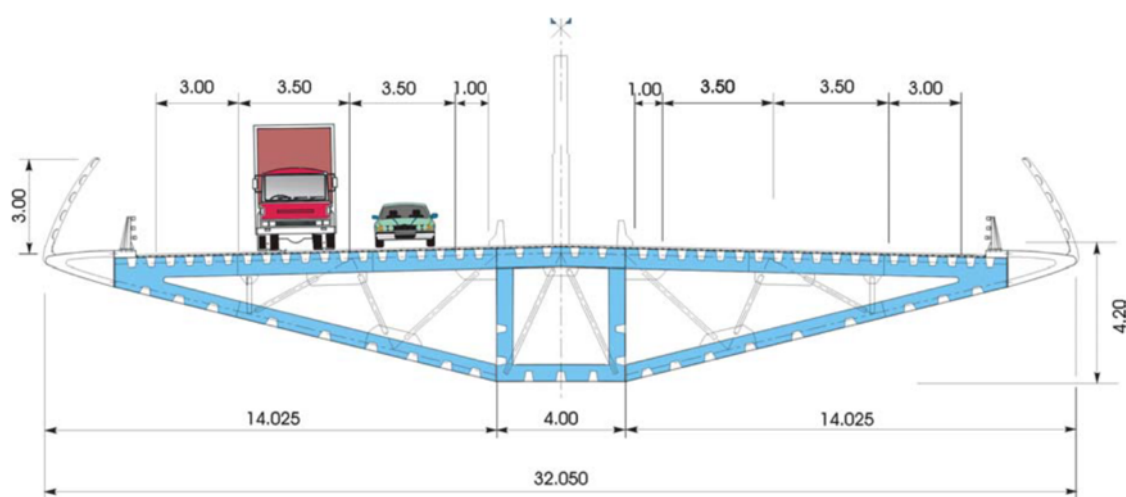
Η ακαμψία της κατασκευής ενισχύθηκε συνδέοντας το κατάστρωμα της γέφυρας με τους πυλώνες και τα βάθρα, καθώς η κατακόρυφη μετατόπιση μειώνεται στο άνοιγμα με τα περισσότερα φορτία, ενώ οι δυνάμεις που μεταδίδονται στα διπλανά ανοίγματα μειώνονται επίσης (Martin et al., 2004). Παρόλα αυτά η αλλαγή στη θερμοκρασία μπορεί να οδηγήσει σε οριζόντια μετατόπιση των βάθρων η οποία, όπως υπολογίστηκε, μπορεί να φτάνει και τα 0,60 μέτρα, κάτι που αντιμετωπίστηκε με το κατάστρωμα να συνδέεται στην αντίθετη κατεύθυνση ενδεχόμενης μετατόπισης και σε αλλαγή στο άνω μέρος στο σχήμα των βάθρων που χωρίστηκαν ουσιαστικά στα δύο στο άνω τους τμήμα, και ενώ το πρόβλημα βάση στατικής ανάλυσης δεν υπήρχε σε όλα τα βάθρα της κατασκευής η λύση για αισθητικούς λόγους εφαρμόστηκε σε όλα τα βάθρα (Buonomo et al., 2004). Οι θεμελιώσεις των βάθρων επίσης διαφέρουν λόγω της διαφορετικής γεωλογικής σύνθεσης του εδάφους (Buonomo et al., 2004).

Σε σχέση με τη διαστασιολόγηση του ίδιου του καταστρώματος της γέφυρας, ως προς την αντοχή και τη διατήρηση της φόρμας του, αυτή συνδέεται άμεσα με τα βάθρα και τους πυλώνες. Επιλέχθηκαν λοιπόν βάθρα και πυλώνες με τη μέγιστη δυνατή ακαμψία, κάτι που οδήγησε σε ένα σύστημα καταστρώματος λιγότερης αδράνειας και επομένως πιο λεπτού, και επιλέχθηκε κυρίως λόγω των σχετικά υψηλής εντάσεως ανέμων που πνέουν στην περιοχή (Martin et al., 2004). Οι αγκυρώσεις τώρα των καλωδίων είναι με τη σειρά τους ρυθμιζόμενες στο κατάστρωμά, και σταθερές στους πυλώνες (Buonomo et al., 2004).

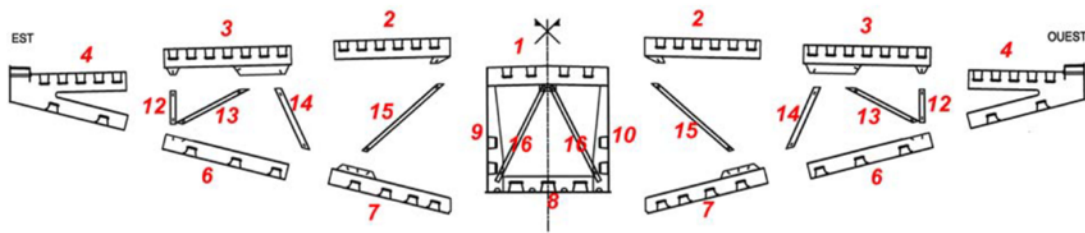


Εικόνα 5.2.21 Κατασκευή καταστρώματος γέφυρας, Από *Millau Viaduct*, των CEVM Eiffage / Foster and Partners, Οκτώβριος 2003, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/14296-millau-viaduct-under-constructionsource-unknown> Copyright 2003 των CEVM Eiffage / Foster and Partners

Για να κατασκευαστεί το κατάστρωμα, διαδοχικά τμήματα συνολικού μήκους 171 μέτρων συνδέονταν με σταδιακή προώθηση, μέχρι ουσιαστικά το άκρο της κατασκευής κάθε φορά να φτάσει το επόμενο βάθρο, είτε ήταν σταθερό είτε προσωρινό, για να εξυπηρετήσει την υλοποίηση της κατασκευής, ενώ σε αυτή την περίπτωση η τάση που αναπτύσσονταν στα καλώδια διαφέρει ανάλογα με τη απόσταση του πυλώνα και για αυτό χρησιμοποιήθηκαν και προσωρινά καλώδια περιμετρικά (Buonomo et al., 2004).

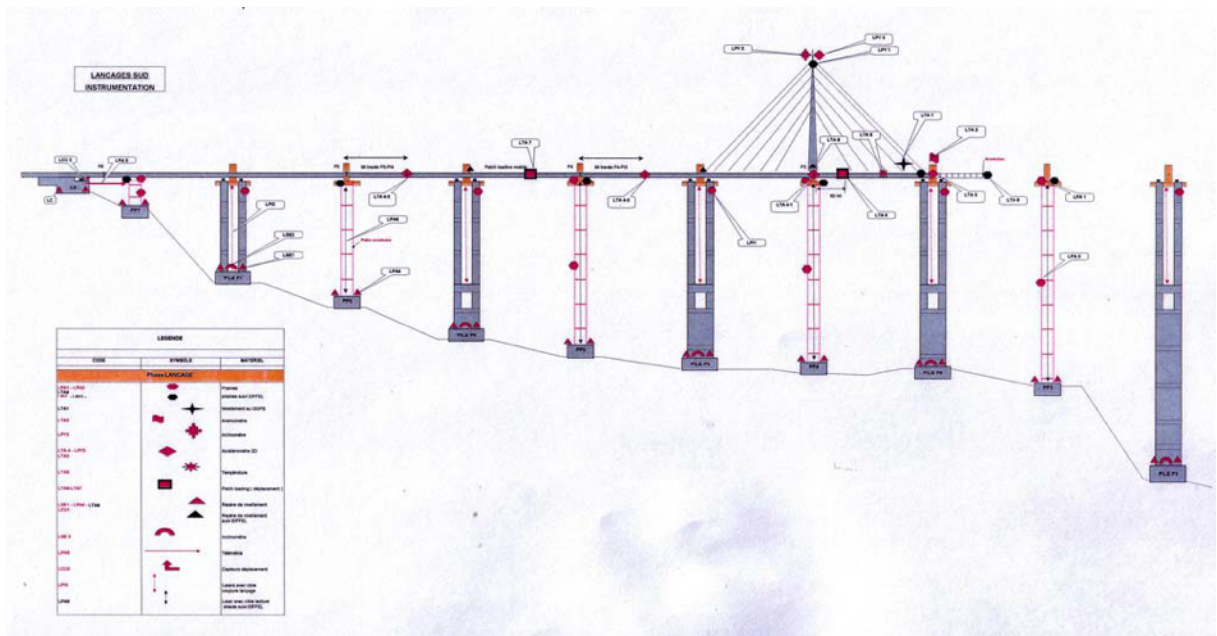


Εικόνα 5.2.22 Τομή καταστρώματος Millau Viaduct, Από «The design of the Millau Viaduct», των Martin et al., Απρίλιος 2004, Στο *Concrete structures: the challenge of creativity*. Ανακτήθηκε 10 Ιουλίου, 2024, από <https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2018/05/Servant.pdf> Copyright 2004 των Martin et al.



Εικόνα 5.2.23 Τα τμήματα του καταστρώματος της Millau Viaduct, Από «The design of the Millau Viaduct», των Martin et al., Απρίλιος 2004, Στο *Concrete structures: the challenge of creativity*. Ανακτήθηκε 10 Ιουλίου, 2024, από <https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2018/05/Servant.pdf> Copyright 2004 των Martin et al.

Το κατάστρωμα μεταφέρθηκε ουσιαστικά προκατασκευασμένο σε μορφή «πακέτου» (kit), σαν ένα «πολυγωνικής» διατομής χωροδικτύωμα με σκοπό να συναρμολογηθεί στο χώρο κατασκευής της γέφυρας, δημιουργώντας ένα συμμετρικό πολύγωνο που στο κέντρο αποτελούνταν από ένα πλαίσιο κιβωτοειδούς διατομής (4,00 μέτρα μήκος x 4,20 μέτρα ύψος) και δοκούς και συνδέσμους που θα δημιουργούσαν δύο πλευρικά συμμετρικά τριγωνικά δικτυώματα μήκους 11,90 μέτρα έκαστο που με τα πλευρικά προστατευτικά κιγκλιδώματα θα έφτανε το φάρδος της γέφυρας στα 32,05 μέτρα (Buonomo et al., 2004).



Εικόνα 5.2.24 Διάγραμμα κατασκευής της Millau Viaduct, Από «The design of the Millau Viaduct», των Martin et al., Απρίλιος 2004, Στο *Concrete structures: the challenge of creativity*. Ανακτήθηκε 10 Ιουλίου, 2024, από <https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2018/05/Servant.pdf> Copyright 2004 των Martin et al.

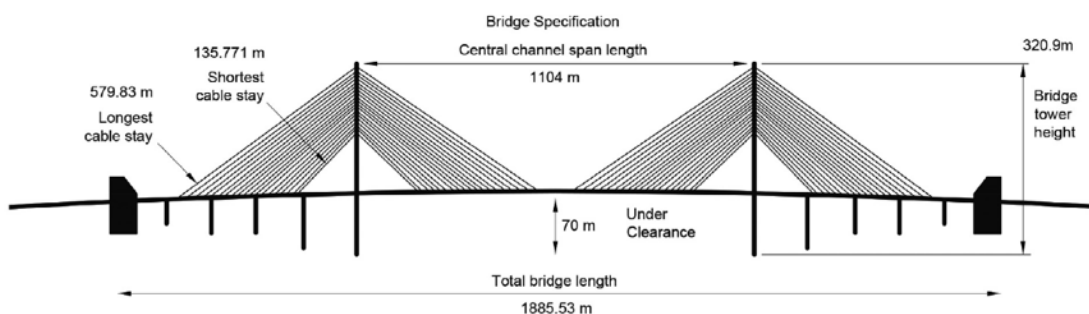
Λόγω του μεγάλου ύψους των βάθρων και της διαφοροποίησης του ύψους τους, μελέτες με τεχνητά τούνελ αέρα πραγματοποιήθηκαν και σε προσομοιώσεις της γέφυρας και σε αυτή την περίπτωση, ώστε να διαπιστωθεί η αεροδυναμική συμπεριφορά τόσο των επί μέρους στοιχείων της γέφυρας, αλλά και του συνόλου της και να εκτιμηθούν ενδεχόμενα ζητήματα ασφαλείας που μπορεί να προκύψουν σε ακραία καιρικά φαινόμενα (Buonomo et al., 2004).



Εικόνα 5.2.25 Κατασκευή γέφυρας Millau με προσωρινούς πυλώνες, Από *Millau Viaduct*, του Nicolas Janberg, 25 Οκτωβρίου 2003, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/14443-millau-viaduct> Copyright 2003 των CEVM Eiffage / Foster and Partners

Η κατασκευή της γέφυρας Millau παρότι πραγματοποιήθηκε σε μικρό διάστημα 3 χρόνων, εγκυμονούσε πολλούς κινδύνους λόγω του μεγάλου ύψους των πυλώνων και των ισχυρών ανέμων, παρότι πάντα υπήρχε στάση εργασιών όταν οι άνεμοι ξεπερνούσαν το όριο ασφαλείας των 70km/h, ενώ ταυτόχρονα χαρακτηρίζεται από εξαιρετική κατασκευαστική ακρίβεια η οποία επιτεύχθηκε με τη χρήση προηγμένων δορυφορικών συστημάτων, τα οποία μέχρι τη στιγμή της κατασκευής της δεν είχαν χρησιμοποιηθεί (Lin, 2022).

## 5.2.4 Ανάλυση μεθόδων σχεδίασης της γέφυρας Russky



Εικόνα 5.2.26 Σχέδιο της γέφυρας Russky, Από « Case study: the Russky bridge», του A.Pipinato, 2016, Στο *Innovative bridge design handbook*. σελ. 672. Copyright 2016 του A.Pipinato

Ο τύπος γέφυρας που επιλέχθηκε στην περίπτωση της γέφυρας Russky, υπερτερεί έναντι άλλων επιλογών καθότι προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα όπως, σημαντική αντοχή στις καιρικές συνθήκες, μικρότερο χρόνο ολοκλήρωσης της κατασκευής, η οποία σε αυτή την περίπτωση ολοκληρώθηκε σε μόλις 48 μήνες παρά τις αντίξοες καιρικές συνθήκες, χαμηλότερο σχετικά κόστος κατασκευής, πολλαπλές διατάξεις βάθρων, ενώ όσον αφορά ενδεχόμενα αισθητικά κριτήρια δίνει ακόμη τη δυνατότητα συμμετρικού σχεδιασμού (Chandramouli et al., 2023). Οι πυλώνες σε αυτή την περίπτωση είναι κατασκευασμένοι από οπλισμένο σκυρόδεμα σε σχήμα «Α», με το συνολικό τους ύψος να φτάνει τα 320,9 μέτρα και την απόσταση του καταστρώματος από τον πυθμένα της θάλασσας να είναι στα 70 μέτρα (Ramadan & Ermoshin, 2022).



Εικόνα 5.2.27 Κατασκευή πυλώνων γέφυρας Russky, Από *Russky Island Bridge*, της RusMost.ru, 1 Ιουλίου 2011, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/212199-russky-island-bridge> Copyright 2011 της RusMost.ru



Ο ημιακτινωτός τύπος διάταξης καλωδίων θεωρείται ιδανικός σε ένα συνεχές σύστημα γεφυρώσεων που υπόκειται κυρίως σε ομοιόμορφα φορτία (Ramadan & Ermoshin, 2022). Συνολικά τα καλώδια έχουν μήκος 54km και βάρος 3720 τόνους, ενώ είναι κατασκευασμένα από χάλυβα αντοχής σε εφελκυσμό 1860 MPa, με κάθε καλώδιο να είναι αποτελείται από 80 συρματόσχοινα που η εταιρία Freyssinet σχεδίασε και κατασκεύασε αποκλειστικά για αυτή την κατασκευή (Pirinato, 2022). Τα καλώδια που συνδέονται στα δύο μικρότερα ανοίγματα της γέφυρας, ουσιαστικά αποτελούν καλώδια αγκύρωσης και παίζουν σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια της κατασκευής, καθώς συνεισφέρουν στην σταθεροποίηση των πυλώνων, όταν στο κεντρικό άνοιγμα ασκούνται δυναμικά φορτία, ενώ όταν δυναμικά φορτία ασκούνται στα μικρότερα ανοίγματα ελαχιστοποιούνται οι φορτίσεις στα καλώδια αυτά, και την ίδια στιγμή είναι και τα καλώδια της κατασκευής με τις περισσότερες διακυμάνσεις τάσεων που τους ασκούνται (Ramadan & Ermoshin, 2022).



Εικόνα 5.2.28 Τοποθέτηση καλωδίων και προβολοδόμηση της γέφυρας Russky, Από *Russky Island Bridge*, της m03g, 10 Νοεμβρίου 2011, Structurae. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://structurae.net/en/media/212200-russky-island-bridge> Copyright 2011 της m03g

Για την αεροδυναμική ευστάθεια της γέφυρας και συγκεκριμένα για τη διατήρηση της ακεραιότητας των καλωδίων έχει εγκατασταθεί σύστημα (PSS) που προστατεύει από τη διείδυση του αέρα, μειώνοντας τις φορτίσεις του αέρα 25-30%, ενώ προστασία από υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE) για την ακτινοβολία UV και τις ακραίες θερμοκρασίες της περιοχής έχει ακόμη χρησιμοποιηθεί (Pirinato, 2022), όπως επίσης τα ίδια είχαν τεθεί νωρίτερα

σε διαδικασία γαλβανισμού για προστασία από τη διάβρωση (Chandramouli et al., 2023). Το κατάστρωμα αποτελείται από 103 ορθοτροπικές πλάκες, η καθεμία από τις οποίες έχει μήκος 12 μέτρα και φάρδος 26 και 2 μεταβατικές με μήκος 6 μέτρων η καθεμία, το συνολικό βάρος των οποίων φτάνει τους 23.000 τόνους (Pipinato, 2022).



Εικόνα 5.2.29 Τοποθέτηση ορθοτροπικών πλακών της γέφυρας Russky, Από « Case study: the Russky bridge», του A.Pipinato, 2016, Στο *Innovative bridge design handbook*. σελ. 678. Copyright 2011 της SK MOST Group

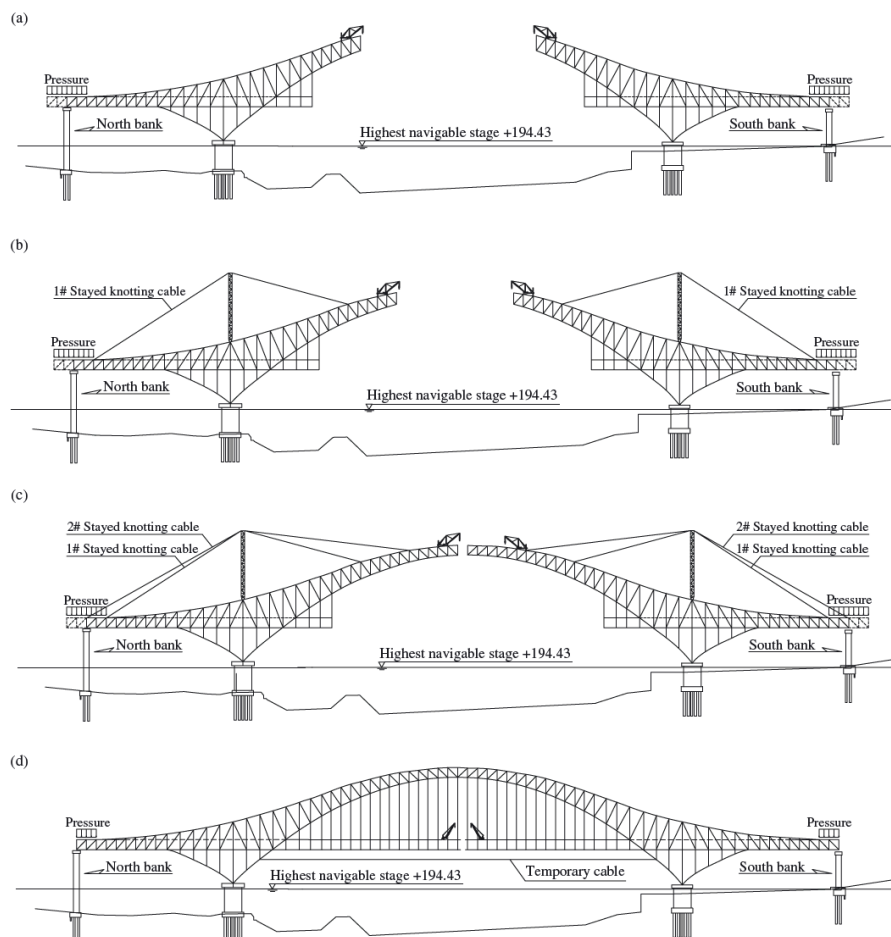
Επιπλέον, το κατάστρωμα σχεδιάστηκε σύμφωνα με αεροδυναμική ανάλυση και τη μετέπειτα δοκιμή μοντέλου προσομοίωσης σε τούνελ αέρα, ενώ είναι κατασκευασμένο από προκατασκευασμένο χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο κατασκευάζονταν και τοποθετούνταν επί τόπου, ενώ οι σύνδεσμοι που έχουν χρησιμοποιηθεί εξασφαλίζουν τη σταθερότητα της γέφυρας σε περίπτωση σεισμού έως 8,1R (Pipinato, 2022).



Εικόνα 5.2.30 Αποψη της γέφυρας Russky, Από « Case study: the Russky bridge», του A.Pipinato, 2016, Στο *Innovative bridge design handbook*. σελ. 673. Copyright 2011 της SK MOST Group

## 5.2.5 Ανάλυση μεθόδων σχεδίασης της γέφυρας Chaotianmen

Κάθε γέφυρα έχει διαφορετικές απαιτήσεις σχεδιασμού οι οποίες πολλές φορές είναι ανεξάρτητες των απαιτήσεων αστοχίας και ευστάθειας που ενδεχομένως οδηγούν σε υψηλότερο κόστος κατασκευής και αφορούν κυρίως την τοπογραφία της περιοχής και τους χρήστες της. Για να οριστεί το απαιτούμενο άνοιγμα της γέφυρας, σημαντικό ρόλο έπαιξε η ροή του νερού που στο βόρειο στήριγμα του τόξου θα έφτανε τα 4m/s και θα επηρέαζε σημαντικά τη στατική επάρκεια της κατασκευής σε περίπτωση ανοίγματος γύρω στα 400 μέτρα, αλλά και οι επισημάνσεις του λιμεναρχείου που ανέφεραν πως το νότιο κύριο βάθρο θα έπρεπε να είναι εκτός νερού όταν η στάθμη του ποταμού βρίσκεται στο χαμηλότερο επίπεδο, ουσιαστικά καθορίζοντας το άνοιγμα της γέφυρας στα 552 μέτρα (Wang, 2009).



Εικόνα 5.2.31 Στάδια κατασκευής της γέφυρας Chaotianmen, Από «Experimental Investigation on Wind-Resistant Behavior of Chaotianmen Yangtze River Bridge», των Wang et al., 2012, Στο *Experimental Techniques* (36). σελ. 28. Copyright 2012 των Wang et al.

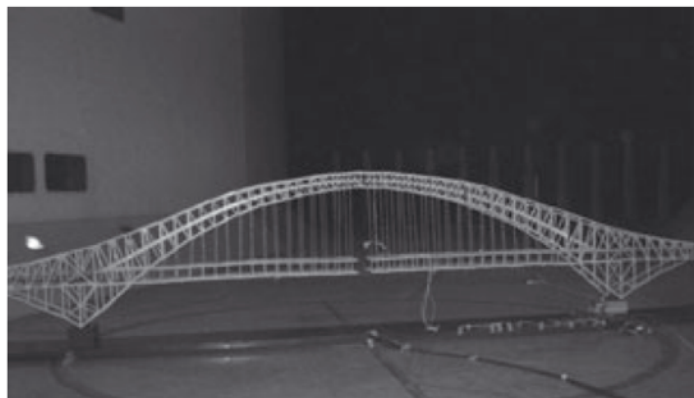
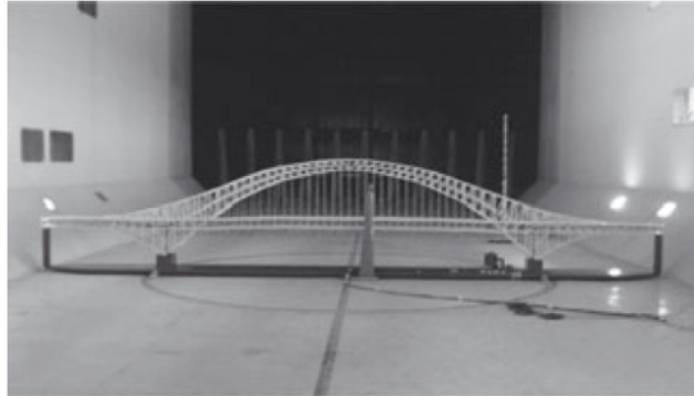
Το τόξο της γέφυρας Chaotianmen αποτελείται ουσιαστικά από ένα δικτύωμα. Το ζευκτό του τόξου έχει μέλη σε σχήμα «N», με το ύψος του να είναι στα 14 μέτρα στο μέσο του ανοίγματος, 73,13 μέτρα στα στηρίγματα του τόξου και 11,83 μέτρα στα ακραία βάθρα στα άκρα της κατασκευής, ενώ λόγω της μεγάλης διαφοράς στα ύψη κατά μήκος της γέφυρας, για αισθητικούς λόγους υπήρχαν 3 κατηγορίες μελών ζευκτών όσον αφορά το μήκος στα 12, 14 και 16 μέτρα (Duan et al., 2010). Τα κυριότερα τμήματα του ζευκτού έχουν κατασκευαστεί από χάλυβα Q420qD και Q370qD, ενώ χάλυβας Q345qD έχει χρησιμοποιηθεί για το κατάστρωμα και τους συνδέσμους της κατασκευής, με κάποια από τα τμήματα του ζευκτού να φτάνουν σε μήκος τα 41 μέτρα κατά μήκος του τόξου και κάποια να έχουν βάρος 81 τόνους, κάτι που συνεπάγεται μεγάλες δυσκολίες στη μεταφορά και την συναρμολόγηση της γέφυρας (Wang, 2009).



Εικόνα 5.2.32 Λίγο πριν το τέλος της κατασκευής του τόξου της γέφυρας Chaotianmen, Από «Design & technology characteristics of main bridge of Chaotianmen Yangtze River Bridge», των Duan et al., 2010, *ARCH'10 – 6th International Conference on Arch Bridges*, 11-13 Οκτωβρίου 2010, σελ 111. Ανακτήθηκε 13 Ιουλίου, 2024, από [https://archbridges.fzu.edu.cn/\\_local/0/4A/45/62424EB4CDB7AC5A58B071C5FA7\\_4DAC1E42\\_73E56.pdf?e=.pdf](https://archbridges.fzu.edu.cn/_local/0/4A/45/62424EB4CDB7AC5A58B071C5FA7_4DAC1E42_73E56.pdf?e=.pdf)  
Copyright 2010 των Duan et al.

Τέλος υπήρχαν αρκετές δυσκολίες που έπρεπε να ξεπεραστούν όσον αφορά το σχεδιασμό και την κατασκευή, ξεκινώντας από τον υπολογισμό των φορτίων, την ακριβή θέση των βάθρων της κατασκευής, την κατασκευή και μεταφορά κάποιων ογκωδών τμημάτων της γέφυρας και την ίδια τη συνδεσμολογία της γέφυρας, κάτι που γενικά είναι συχνό σε όλες τις τοξωτές γέφυρες, για την κατασκευή της οποίας μάλιστα χρησιμοποιήθηκαν προσωρινοί πυλώνες με καλώδια ανάρτησης για την σύνδεση των τμημάτων του τόξου (Wang, 2009).

Επιπλέον, η αεροδυναμική συμπεριφορά της γέφυρας μελετήθηκε τόσο σε φάση κατασκευής, αλλά και υλοποίησης με φυσικά μοντέλα σε κλίμακα 1/100 σε σήραγγες αέρα, αλλά και σε επιμέρους τμήματα - τομές της κατασκευής, ενώ οι δοκιμές έδειξαν πως φαινόμενα αστάθειας εμφανίζονται στην κατασκευή όταν ο άνεμος φτάνει τα 85m/s για όλα τα στάδια κατασκευής, αλλά και μετά την υλοποίηση της γέφυρας (Wang et al., 2012).



Εικόνα 5.2.33 Μοντέλα της γέφυρας Chaotianmen σε διάφορα στάδια κατασκευής που δοκιμάζονται σε σήραγγες αέρα, Από «Experimental Investigation on Wind-Resistant Behavior of Chaotianmen Yangtze River Bridge», των Wang et al., 2012, Στο *Experimental Techniques* (36). σελ.31. Copyright 2012 των Wang et al.

### 5.3 Διδάγματα και καινοτομίες από τα περιστατικά μελέτης

Οι «υπερκατασκευές» είναι συνυφασμένες με καινοτομίες και διαπιστώσεις, τόσο όσον αφορά τα υλικά κατασκευής, αλλά και τις διαδικασίες μελέτης και υλοποίησής τους. Αρχικά, εκτός της τοπογραφίας και της γεωλογικής σύνθεσης του χώρου, σε σχέση με το σχεδιασμό μιας γέφυρας όσον αφορά το άνοιγμα και το ελεύθερο ύψος, σημαντικό ρόλο παίζει το αν αποτελεί υδάτινη κυρίως οδό για πλοία, κάτι που επαναπροσδιορίζει το άνοιγμα μιας γέφυρας, όπως στην περίπτωση της Akashi-Kaikyō και της Cheon-Sa, αλλά και το ελεύθερο ύψος της διόδου, όπως στην τοξωτή γέφυρα Chaotianmen. Ταυτόχρονα, οι κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής επηρεάζουν τόσο την επιλογή του τύπου της γέφυρας, όπως η περίπτωση της γέφυρας Russky στη Ρωσία, του τύπου πυλώνα, όπως στην περίπτωση της Millau, αλλά και τα συστήματα διασφάλισης στατικής επάρκειας του βασικού φορέα, όπως των καλωδίων που για να αποφευχθεί η διάβρωση στη γέφυρα Akashi-Kaikyō εγκαταστάθηκε ειδικό σύστημα αέρα, ενώ στις γέφυρες Millau και Russky χρησιμοποιήθηκε υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο για την προστασία τους από ακτίνες UV.

Σε σχέση με τις διαδικασίες μελέτης και σχεδιασμού, θα πρέπει να τονιστεί πως σε όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις τεστ προσομοίωσης σε τούνελ αέρα με μοντέλα των γεφυρών σε μικρή κλίμακα, αλλά και τμημάτων τους, όπως στις περιπτώσεις της κρεμαστής γέφυρας με 4 ανοίγματα στο Cheon-Sa, της γέφυρας Millau και της τοξωτής γέφυρας Chaotianmen, χρησιμοποιήθηκαν για να διαπιστωθεί η αεροδυναμική ευστάθεια των προτεινόμενων υπερκατασκευών. Επιπλέον, τόσο η γέφυρα Akashi-Kaikyō, όσο και η γέφυρα Russky μελετήθηκαν ως προς την ευστάθεια και τις ενδεχόμενες παραμορφώσεις που θα είχε σε αυτές σεισμός άνω των 8,0 R, ένα ενδεχόμενο σπάνιο αλλά πιθανό λόγω των κοντινών ρηγμάτων που υπάρχουν.

Επιπλέον, όπως κυρίως διαπιστώνεται στην περίπτωση της γέφυρας Akashi-Kaikyō, πολλές φορές τα διαθέσιμα υλικά δεν επαρκούν για την υλοποίηση ενός έργου καθιστώντας το ασύμφορο οικονομικά ή και ανέφικτο στατικά, και οι μελετητές οδηγούνται στην δημιουργία νέων υλικών, όπως τα καλώδια με νέο τύπο χάλυβα εφελκυστικής αντοχής 1800 MPa που αναπτύχθηκε για τη συγκεκριμένη γέφυρα. Τόσο στην περίπτωση της γέφυρας Akashi-Kaikyō, όσο και στην γέφυρα Cheon-Sa, ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε για τα καλώδια έπαιξε σημαντικό ρόλο στην οικονομική απόδοση, αλλά και ευστάθεια της κατασκευής, με το χάλυβα

στη δεύτερη να φτάνει αντοχή σε εφελκυσμό τα 1960 MPa. Ταυτόχρονα, στις περιπτώσεις των γεφυρών Akashi-Kaikyō και Millau, είναι ξεκάθαρο το πλεονέκτημα της χρήσης καλωδίων για μεγάλες γεφυρώσεις σε σχέση με το βάρος του χάλυβα, καθώς το βάρος των καλωδίων και στις δύο περιπτώσεις είναι πολύ χαμηλό σε ποσοστό του συνολικού βάρους της γέφυρας.

Όσον αφορά τώρα το χρόνο κατασκευής των προαναφερθεισών περιπτώσεων μελέτης, φαίνεται πως οι νέες τεχνολογίες τον έχουν μειώσει σημαντικά, με μέγιστο τα 4 περίπου χρόνια, σημαντική διαφορά σε σχέση με τα 10 χρόνια που διήρκεσε η κατασκευή της γέφυρας Akashi-Kaikyō που ολοκληρώθηκε το 1998 στην Ιαπωνία και τα 9 χρόνια που διήρκεσε η κατασκευή της γέφυρας Cheon-Sa, η οποία βέβαια αποτελεί σχεδιαστική καινοτομία, αφού κρεμαστές γέφυρες με 4 ανοίγματα σπάνια κατασκευάζονται. Η ταχύτητα και η κατασκευαστική ακρίβεια για τις οποίες συνέβαλε η χρήση προηγμένων δορυφορικών συστημάτων γίνεται ιδιαίτερα σαφής στην περίπτωση της γέφυρας Millau, κυρίως λόγω του μεγάλου μήκους της γέφυρας και του ύψους των πυλώνων.

Τέλος, σε σχέση με την τελική επιλογή του τύπου της γέφυρας, σημαντικό ρόλο μοιάζει να παίζουν και τα αισθητικά κριτήρια που στην περίπτωση της γέφυρας στο Millau, οδήγησαν στο σχεδιασμό των πυλώνων, ενώ στην περίπτωση της γέφυρας Cheon-Sa, σε όλη τη σχεδιαστική της δομή, μιας και πρόκειται για μια περιοχή με μεγάλο τουριστικό ενδιαφέρον. Ενδιαφέρον έχει ωστόσο να αναγνώσει κανείς την αναγκαιότητα ύπαρξης ή μη της κάθε υπερκατασκευής που περιεγράφηκε προηγουμένως. Ενώ η ανάγκη κατασκευής της γέφυρας Akashi-Kaikyō ήταν επιτακτική, λόγω των δυστυχημάτων με πλοία που στοίχισαν δεκάδες ζωές στην περιοχή, σε καμία άλλη περίπτωση δεν υπάρχει τόσο έντονη ανάγκη ενός τόσο υψηλού κόστους έργου, με την περίπτωση της γέφυρας στο Millau να μοιάζει πιο διακριτή, λόγω της ελάχιστης μείωσης του χρόνου μετακίνησης για τα οχήματα στον οποίο συνέβαλε η ύπαρξή της που ήταν στα 10 περίπου λεπτά.

## 6.0 Μελλοντικές τάσεις και καινοτομίες

### 6.1 Προηγμένα υλικά στη σχεδίαση γεφυρών από χάλυβα

Νέα προηγμένα υλικά έχουν εμφανιστεί στην σχεδίαση και κατασκευή χαλύβδινων γεφυρών δίνοντας νέες δυνατότητες στον μελετητή. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η χρήση σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες και η χρήση χάλυβα εξαιρετικά υψηλής αντοχής στη γεφυροποιία.

- Σύνθετα Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRP) & Ενισχυμένα Πολυμερή με Ανθρακονήματα (CFRP)

Σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες (FRP) χρησιμοποιούνται στην κατασκευή γεφυρών από τη δεκαετία του 1970, ενώ στον κατασκευαστικό κλάδο σήμερα καταλήγει το 25% της παγκόσμιας παραγωγής FRP (Qureshi, 2023). Το βασικό πλεονέκτημα που προσφέρει στην κατασκευή γεφυρών η χρήση σύνθετων πολυμερών FRP είναι ο χρόνος ζωής της κατασκευής που αναμένεται στα 100 χρόνια και είναι διπλάσιος σε σχέση με τα 50 χρόνια ζωής (χωρίς μεγάλες απαιτήσεις συντήρησης) των χαλύβδινων γεφυρών και το πολύ χαμηλότερο βάρος (Ali et al., 2021).

Η χρήση FRP στην κατασκευή γεφυρών συναντάται σε 4 επίπεδα: (α) ενίσχυση σκυροδέματος με ινοπλισμένα πολυμερή FRP, (β) στην επισκευή και ενίσχυση υφιστάμενων γεφυρών, (γ) υβριδικές γέφυρες με τμήματα από συμβατικά (χάλυβα / σκυρόδεμα) και FRP υλικά και (δ) γέφυρες εξολοκλήρου κατασκευασμένες από FRP υλικά (all-FRP), (Qureshi, 2023).

Τα σύνθετα πολυμερή FRP που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή γεφυρών αποτελούνται συνήθως από ίνες γυαλιού και άνθρακα, ίνες αραμιδίου βρίσκονται συχνά σε καλώδια καλωδιακών γεφυρών, ενώ οι ίνες βασάλτη εξετάζονται σήμερα για χρήση στις γέφυρες, με τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, όπως ο πολυεστέρας να λειτουργούν ως πολυμερής μήτρες για να δώσουν σχήμα στις ίνες και προστασία από περιβαλλοντικές φθορές (Qureshi, 2023).



Τα ινοπλισμένα πολυμερή FRP προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην κατασκευή, όσον αφορά τη σχέση αντοχής-βάρους, μεγάλη ανθεκτικότητα στη διάβρωση και την καταπόνηση, προσφέροντας μια φιλική προς το περιβάλλον λύση σε σχέση με τα υλικά που χρησιμοποιούνται παραδοσιακά στην κατασκευή γεφυρών, λόγω του μεγάλου χρόνου ζωής τους (Ali et al., 2021). Παρά την εκτεταμένη χρήση τους κατά τις δεκαετίες του 1970 και 1980 στις οδικές γέφυρες και πεζογέφυρες, παρατηρείται μια μείωση στην χρήση τους της τελευταία δεκαετία στις οδικές γέφυρες, κυρίως λόγω του υψηλού τους κόστους (Qureshi, 2023). Λόγω του υψηλού κόστους του υλικού, FRP στην κατασκευή γεφυρών συναντάται πλέον σε σύμμεικτες κατασκευές σκυροδέματος / χάλυβα, σε στοιχεία της κατασκευής κυρίως σε δοκούς, καταστρώματα, καλώδια και μη φέροντα στοιχεία (Qureshi, 2023). Τα FRP αποτελούν υλικά που χρησιμοποιούνται ευρέως στην επιδιόρθωση γεφυρών, και κυρίως στην αναβάθμιση και βελτίωση γεφυρών από οπλισμένο σκυρόδεμα που δεν καλύπτουν πια τις απαιτήσεις ασφαλείας των κανονισμών (Ali et al., 2021), συμβάλλοντας έτσι στην αύξηση του χρόνου ζωής της κατασκευής και της μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Καθώς έχουν ακόμη την ιδιότητα να αυξάνουν την σεισμική απόκριση των σύμμεικτων γεφυρών από χάλυβα και σκυρόδεμα στις πλευρικές φορτίσεις, χρησιμοποιούνται συχνά σε 2η φάση μετασκευής των υποστυλωμάτων και των δοκών γεφυρών (Ali et al., 2021).



Εικόνα 6.1.1 Dragon's Bridge, Rhyl, Βόρεια Ουαλία, Από Rhyl Harbour Bridge, Rhyl, Wales, UK, του Gurit, Δεκέμβριος 2022, Gurit. Ανακτήθηκε 30 Ιουλίου 2024 από <https://www.gurit.com/rhyl-harbour-bridge-rhyl-wales-uk/> Copyright 2022 του Gurit

Πλέον συναντώνται κυρίως σε σύμμεικτες κατασκευές γεφυρών, προσφέροντας ταχύτητα κατασκευής, χαμηλό βάρος, αντοχή και διάρκεια ζωής στην κατασκευή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πεζογέφυρα – γέφυρα ποδηλάτων Dragon's Bridge, στο λιμάνι του Rhyl στη Βόρεια Ουαλία που κατασκευάστηκε το 2013. Πρόκειται για μια συμμετρική γέφυρα από FRP και ανοξείδωτο χάλυβα, η οποία ανυψώνεται κατά τη διάρκεια της μέρας για να επιτρέψει τον διάπλου πλοίων στο λιμάνι. Αποτελείται από έναν κεντρικό πυλώνα από ανοξείδωτο χάλυβα ύψους 50 μέτρων που συνδέεται με καλώδια με δύο συμμετρικά καταστρώματα μήκους 30 μέτρων (Qureshi, 2023). Τα καταστρώματα είναι κατασκευασμένα από FRPs που συνδυάζουν γυαλί και άνθρακα με έγχυση ρητίνης, ενώ έχουν καμπυλοειδές σχήμα σε κάτοψη και όψη, ζυγίζοντας το καθένα 10,6 τόνους (Qureshi, 2023). Στη συγκεκριμένη περίπτωση το χαμηλό βάρος των FRPs σε σχέση με το χάλυβα προσφέρει στην κατασκευή τη δυνατότητα ανύψωσης.

Η μεγάλη αντοχή και ανθεκτικότητα των FRP στη διάβρωση τα κάνει ιδανικά για χρήση σε καλωδιωτές γέφυρες, κυρίως σε περιβάλλοντα με θαλασσινό νερό (Xiong et al., 2014). Λόγω της αυξημένης τους αντοχής σε σχέση με τα υπόλοιπα σύνθετα ινοπλισμένα πολυμερή FRP, τα ενισχυμένα πολυμερή με ανθρακονήματα CFRP θεωρούνται πλέον τα πιο κατάλληλα για την κατασκευή καλωδίων σε καλωδιωτές γέφυρες (Xiong et al., 2014). Η υψηλή αντοχή, το μικρό βάρος, η αντοχή στη διάβρωση, την καταπόνηση, και τη χαμηλή χαλάρωση, δίνει σημαντικά πλεονεκτήματα στα CFRP σε σχέση με το χάλυβα σαν υλικά καλωδίων για γέφυρες μεγάλων ανοιγμάτων, έχοντας ωστόσο σαν κύριο μειονέκτημα την πολύ υψηλή τιμή τους σε σχέση με το χάλυβα (Liu et al., 2022). Παρά τη σημαντική διαφορά στο αρχικό κόστος κατασκευής, φαίνεται πως έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από το χάλυβα και λιγότερες απαιτήσεις συντήρησης σε βάθος χρόνου, καθιστώντας τα τελικά ανταγωνιστικά υλικά με οικονομικούς όρους (Liu et al., 2022). Η αντοχή σε εφελκυσμό των CFRP μπορεί να φτάσει τα 2500 MPa, την ίδια στιγμή που η πυκνότητά τους είναι 1600 kg/m<sup>3</sup>, το 20,4% της πυκνότητας του χάλυβα (Liu et al., 2022). Ταυτόχρονα πειράματα με CFRP σε σχέση με το αν το υλικό διατηρεί την αντοχή του σε εφελκυσμό σε βάθος χρόνου, απέδειξαν πως μετά από 100 χρόνια, τα CFRP έχουν το 90% της αρχικής τους αντοχής (Benmokrane et al., 2016; Liu et al., 2022), ενώ η πρώτη πρακτική χρήση των καλωδίων με ανθρακονήματα CFRP σε μια καλωδιωτή γέφυρα ήταν στην Tsukuba FRP Bridge, που ολοκληρώθηκε το 1996 στο Ibaraki της Ιαπωνίας (Liu et al., 2022).

- Χάλυβας Εξαιρετικά Υψηλής Αντοχής (UHSS)

Οι κρεμαστές γέφυρες χρησιμοποιούνται ευρέως για γεφυρώσεις μεγάλης κλίμακας, χιλιάδων μέτρων λόγω της ανώτερης στατικής και οικονομικής τους απόδοσης (Wang et al., 2022). Τα βασικά καλώδια, τα οποία φέρουν σχεδόν όλο το στατικό και δυναμικό φορτίο της κατασκευής, αποτελούν τον πιο σημαντικό στοιχείο μεταφοράς φορτίου σε μια κρεμαστή γέφυρα (Wang et al., 2022). Υπάρχουν σήμερα 31 γέφυρες με μήκος ανοιγμάτων πάνω από 1000 m παγκοσμίως, 28 είναι κρεμαστές γέφυρες, και όλες έχουν σαν κύρια καλώδια, τα οποία είναι κατασκευασμένα από χάλυβα εξαιρετικά υψηλής αντοχής (UHSS), (Wang et al., 2022).



Εικόνα 6.1.2 Η καλωδιωτή γέφυρα της λίμνης Dongting στην Κίνα, Από *New bridge over Dongting Lake on Haoji Railway line in C China's Hunan*, του Xinhua, 19 Σεπτεμβρίου 2019, [english.www.gov.cn](http://english.www.gov.cn). Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 [http://english.www.gov.cn/news/photos/201909/20/content\\_WS5d8493ebc6d0bcf8c4c13c16.html](http://english.www.gov.cn/news/photos/201909/20/content_WS5d8493ebc6d0bcf8c4c13c16.html) Copyright 2019 του Xinhua

Για κρεμαστές γέφυρες κλίμακας χιλιάδων μέτρων σε λειτουργία, όπως η γέφυρα του Στενού Akashi στην Ιαπωνία με κύριο άνοιγμα 1991 μέτρα χρησιμοποιήθηκε χάλυβας UHSS 1800 MPa, ενώ πιο πρόσφατα σε γέφυρες, όπως η γέφυρα Yi Sun-sin στο Νότια Κορέα και η γέφυρα της λίμνης Dongting στην Κίνα, ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε στα κύρια καλώδια έφτασε τα 1860 MPa (Wang et al., 2022), ενώ στη γέφυρα Cheon-Sa που περιγράφηκε στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο έφτασε τα 1960 MPa.



Εικόνα 6.1.3 Η κρεμαστή γέφυρα Yi Sun-sin, Νότια Κορέα, Από *Yi Sun-sin Bridge*, του Glabb, 23 Σεπτεμβρίου 2022, Structurae. Ανακτήθηκε 20 Ιουλίου 2024 [https://en.wikipedia.org/wiki/Yi\\_Sun-sin\\_Bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Yi_Sun-sin_Bridge) Copyright 2022 του Glabb

Σήμερα λόγω της τοπογραφίας του εδάφους συχνά απαιτούνται κρεμαστές γέφυρες με κύριο άνοιγμα άνω των 2000 μέτρων, τα οποία λόγω της δυσκολίας της κατασκευής πιο εξελιγμένων καλωδίων χάλυβα UHSS, περιορίζουν την περαιτέρω εξέλιξη στη μελέτη και κατασκευή κρεμαστών γεφυρών (Wang et al., 2022). Την ίδια στιγμή, στις γέφυρες που σχεδιάζονται σήμερα οι απαιτήσεις σε σχέση με το φορτίο είναι αυξημένες καθώς δεν αποτελούν μόνο τμήματα αυτοκινητοδρόμων πολλαπλών λωρίδων, αλλά και τμήμα του σιδηροδρόμου, αυξάνοντας άμεσα το νεκρό φορτίου που φέρουν οι κύριοι δοκοί (Wang et al., 2022). Με τους συμβατικούς τύπους χάλυβα, σε μια τέτοιου τύπου ενδεχόμενη κρεμαστή γέφυρα οι διατομές των βασικών καλωδίων θα έπρεπε να αυξηθούν, κάτι που θα δημιουργούσε ενδεχομένως φθορές στα βασικά καλώδια από χαλάρωση, συστροφή και διόγκωση τους κατά την ανέγερσή τους που θα οδηγούσε τελικά στην τοπική στέψη ή και κάμψη τους (Wang et al., 2022). Ακόμη, η απόδοσή τους σε σχέση με τη μεταφορά φορτίου θα μειωνόταν επιπλέον σαν επακόλουθο της μεγαλύτερης μεταφοράς φορτίου λόγω της αντίστασης στο ίδιο τους το βάρος (Wang et al., 2022). Ταυτόχρονα, η αύξηση της διατομής των κυρίως καλωδίων θα αύξανε τις απαιτήσεις άλλων στοιχείων της κατασκευής, η οποία θα επηρέαζε το τελικό κόστος και την κατασκευασιμότητα της (Wang et al., 2022). Ως εκ τούτου, είναι ζωτικής σημασίας για την περαιτέρω ανάπτυξη στο σχεδιασμό και την κατασκευή κρεμαστών γεφυρών, η ενίσχυση της

αντοχής σε εφελκυσμό των βασικών καλωδίων με την ταυτόχρονη μείωση της διατομής τους, κάτι που μοιάζει να επιτυγχάνεται αυτή τη στιγμή με τη κατασκευή τους από χάλυβα εξαιρετικά υψηλής αντοχής (Wang et al., 2022). Ένα από τα προβλήματα των κρεμαστών γεφυρών σε σχέση με τα καλώδιά τους είναι η μικρή αντοχή του υλικού στη φωτιά, τα οποία μετά την ανάφλεξή τους, έχουν την τάση να σπάνε. Αυτό το πρόβλημα μοιάζει να βελτιώνεται αισθητά με τη χρήση νέων καλωδίων από UHSS 1960 και 2060 MPa (Chen et al., 2024), κάτι που δείχνει την αναγκαιότητα για περαιτέρω έρευνα πάνω στους χάλυβες εξαιρετικά υψηλής αντοχής (UHSS).

## **6.2 Προβληματισμοί για τη βιωσιμότητα και προκλήσεις για το μέλλον των γεφυρών από χάλυβα**

Οι γέφυρες αποτελούν στοιχείο ζωτικής σημασίας για το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Υποδομών, ενώ λόγω της σημασίας τους στην πολιτική οικονομία, η απαίτηση για βιώσιμες, ουσιαστικά προηγμένες σε κατασκευαστικό επίπεδο, οικονομικά αποδοτικές, φιλικές προς το περιβάλλον και με μεγάλη διάρκεια ζωής κατασκευές είναι έντονη και διαρκής (Popa et al., 2018). Κατά τη διάρκεια του ερευνητικού έργου «Sustainable Steel-Composite Bridges in Built Environment RFCS (SBRI)», όπου συμμετείχαν ερευνητές από το Institute of Structural Design του Universität Stuttgart, το Universidade Coimbra, το Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux, τη BRISA Engenharia e Gestão SA και την ArcelorMittal, αναλύθηκαν χαλύβδινες σύνθετες οδικές γέφυρες μέσω μιας ολιστικής προσέγγισης που συνδυάζει την αξιολόγηση κύκλου ζωής, το κόστος του κύκλου ζωής, και τις αναλύσεις απόδοσης του κύκλου ζωής καταλήγοντας στην ανάγκη προώθησης του χάλυβα για την κατασκευή γεφυρών ως μια πράσινη επιλογή υλικού (Popa et al., 2018).

Οι βιώσιμες γέφυρες θα πρέπει να διακατέχονται από τα εξής χαρακτηριστικά: εξοικονόμηση πόρων και υλικών μέσα από τον σχεδιασμό της κατασκευής που θα επιτρέπει την εφ' όρου ζωής χρήση μιας γέφυρας τηρώντας τους κανόνες ασφαλείας σε σχέση με την χρόνια καταπόνηση των υλικών, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει υιοθετούν ευέλικτες ιδέες σχεδιασμού για την ενίσχυση και την προσαρμογή τους στις τροποποιημένες απαιτήσεις των χρηστών σε βάθος χρόνου (Kuhlmann et al., 2024), σε μια προσπάθεια μείωσης του περιβαλλοντικού

αποτυπώματος της κατασκευής. Οι γέφυρες σχεδιάζονται για να έχουν διάρκεια ζωής 100 ετών, κάτι το οποίο μπορεί να επιτευχθεί αν κατά το σχεδιασμό υπολογίσουμε τη φθορά και την καταπόνηση των υλικών σε βάθος χρόνου (Kuhlmann et al., 2024). Στο παρελθόν, οι γέφυρες σχεδιάζονταν με βασικό κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής, αλλά με όρους πράσινης ανάπτυξης θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το συνολικό χρονικό διάστημα λειτουργίας τους και το οικονομικό αντίκτυπο των σχεδιαστικών επιλογών σε σχέση με τις απαιτήσεις συντήρησης και επισκευής σε βάθος χρόνου (Kuhlmann et al., 2024). Η ενσωμάτωση της έννοια της Κυκλικής Οικονομίας μοιάζει σαν την κυρίαρχη πρόκληση τόσο στον σχεδιασμό και την κατασκευή γεφυρών, όσο και στο σύνολο του κατασκευαστικού τομέα στο μέλλον, κάτι που θα οδηγήσει σε αναζήτηση λύσεων σε σχέση με την διαχείριση των φυσικών πόρων, την ανακύκλωση των πρώτων υλών και την ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων και των εκπομπών ρύπων (Yanfeng et al., 2023). Σε όρους βιωσιμότητας, δηλαδή, η ανάλυση κύκλου ζωής θα πρέπει να συνδυάζει τον κύκλο ζωής μιας κατασκευής με βάση το περιβαλλοντικό αποτύπωμα (LCA), το συνολικό κόστος του κύκλου ζωής (LCC) και την απόδοση κύκλου ζωής (LCP) (Kuhlmann et al., 2024).

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μιας κατασκευής, συνδέεται άμεσα με τον τρόπο παραγωγής υλικών κατασκευής κάτι που δείχνει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα στη χρήση χάλυβα εξαιρετικής αντοχής και νέων σύνθετων πολυμερών υλικών, τα οποία θα αυξάνουν τη διάρκεια ζωής και λειτουργικότητας των γεφυρών έχοντας σαν στόχο τη μείωση των καταπονήσεων της κατασκευής (Kuhlmann et al., 2024). Ο οικονομικός αντίκτυπος της κατασκευής σε βάθος χρόνου φαίνεται επίσης να μπορεί να βελτιωθεί μέσω του σχεδιασμού και της επιλογής υλικών κατασκευής, που στην περίπτωση των μεταλλικών γεφυρών θα μείωνε τις καταπονήσεις του υλικού και την ανάγκη επιδιορθώσεων και αντικαταστάσεων τμημάτων της κατασκευής που διαφορετικά περίπτωση θα αύξανε τόσο το κόστος συντήρησης, όσο και το περιβαλλοντικό της αποτύπωμα (Kuhlmann et al., 2024).

Ακόμη, η έρευνα και η ανάπτυξη καινοτόμων υλικών με βελτιωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και υψηλότερη κατασκευαστική απόδοση, θα μπορούσε να βελτιώσει τις στατικές απαιτήσεις των χαλύβδινων γεφυρών και να καλύψει το κενό των πράσινων κατασκευαστικών επιλογών που σε συνδυασμό με τη διερεύνηση των αναδυόμενων κατασκευαστικών τεχνικών, όπως η τρισδιάστατη εκτύπωση και η προηγμένη προκατασκευής θα μπορούσαν να βελτιώσουν τις υπάρχοντες κατασκευαστικές πρακτικές (Yanfeng et al., 2023). Σήμερα, η χρήση χάλυβα υψηλής απόδοσης προσφέρει τη δυνατότητα μείωσης του βάρους του υλικού

κατασκευής σε γέφυρες, αποτελώντας ταυτόχρονα μια πιο πράσινη επιλογή για την κατασκευή (Skoglund et al., 2020). Παρόλα αυτά, παρά τις πολλά υποσχόμενες ιδιότητες του υλικού, σε σχέση με την κατασκευή γεφυρών, η χρήση του περιορίζεται λόγω της αντοχής του στην χρόνια καταπόνηση, η οποία δεν επηρεάζεται από την αύξηση της αντοχής διαρροής του (Skoglund et al., 2020). Επιπλέον, σε σχέση με το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα κατασκευών από χάλυβα διαφόρων αποδόσεων, οι ερευνητές τονίζουν τις μεγάλες διαφορές στις ενεργειακές απαιτήσεις κατά την επεξεργασία χάλυβα υψηλότερων αντοχών (Stroetmann, 2011; Lemma et al., 2020), αμφισβητώντας στην πραγματικότητα τη σύνδεση βάρους κατασκευής και χάλυβα υψηλής απόδοσης ως την πιο βιώσιμη κατασκευαστική επιλογή, σε σχέση με την επιλογή χάλυβα μικρότερης απόδοσης για την ίδια κατασκευή. Σε κάθε περίπτωση η ανακυκλωσιμότητα του χάλυβα του δίνει σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με άλλα υλικά κατασκευής γεφυρών όπως το σκυρόδεμα σε όρους πράσινων επιλογών, όσον αφορά την κατάληξη του ίδιου του υλικού μετά το τέλος ζωής της κατασκευής (Pora et al., 2018).

Τέλος, οι νέες στρατηγικές για το σχεδιασμό γεφυρών θα πρέπει να μπορούν να ανταπεξέλθουν στην αλλαγή των περιβαλλοντικών συνθηκών που φέρνει η Κλιματική Αλλαγή, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας, η εκτεταμένη ξηρασία, η αύξηση της στάθμης της θάλασσας και τα ακραία καιρικά φαινόμενα, ενώ σε όρους πάντα βιώσιμης ανάπτυξης, θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψιν μας τις κοινωνικές επιπτώσεις του ίδιου του έργου, αξιολογώντας τον κοινωνικό αντίκτυπο των γεφυρών και εστιάζοντας σε παράγοντες, όπως η προσβασιμότητα, η ένταξη και η ικανοποίηση της κοινότητας (Yanfeng et al., 2023).

## 7.0 Συμπεράσματα

Ιστορικά, ο χάλυβας αποτέλεσε το υλικό που οδήγησε σε επανάσταση στον κλάδο της γεφυροποιίας, οδηγώντας σε πιο ανθεκτικές και λειτουργικές γέφυρες, μεγαλύτερων επίσης ανοιγμάτων. Ο χάλυβας, το κύριο δομικό υλικό των χαλύβδινων γεφυρών, έχει διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ανάλογα με την περιεκτικότητα των στοιχείων που έχει το κράμα του, και κάθε φορά άλλος τύπος χάλυβα επιλέγεται ως κατάλληλος για κάθε στοιχείο της κατασκευής. Σε κάθε περίπτωση η ολκιμότητα, η ανθεκτικότητα, η συγκολλησιμότητα, και η ελαστικότητά του είναι χαρακτηριστικά που το καθιστούν ένα ιδανικό δομικό υλικό, παρά το γεγονός ότι μεταβάλλονται οι ιδιότητές του σύμφωνα με τη σύσταση του κράματός του, ενώ η μεγάλη διάρκεια ζωής του και η ανακυκλωσιμότητά του το κατατάσσουν ως ένα βιώσιμο υλικό. Το μικρό βάρος σε σχέση με την ακαμψία, και την αντοχή του, και ταυτόχρονα η τυποποίηση της παραγωγής του που εγγυάται την ποιότητα του, δίνει ακόμη πολλά σχεδιαστικά πλεονεκτήματα στο μελετητή τόσο από πλευρά στατικής επάρκειας, όσο και αισθητικής.

Βασικό στοιχείο για την επιλογή του κατάλληλου τύπου γέφυρας αποτελεί σε κάθε περίπτωση το άνοιγμα μεταξύ των πυλώνων, ενώ ανάλογα με την κάθε περίπτωση μπορεί η επιλογή αυτή να επηρεαστεί από τη διαθεσιμότητα υλικών, την τεχνογνωσία του κατασκευαστή, την τοπογραφία και το συνολικό περιβάλλον μιας περιοχής, αλλά και σύμφωνα με άλλα οικονομικά κριτήρια και κριτήρια βιωσιμότητας, τόσο κατά τη διαδικασία ανέγερσης μιας γέφυρας όσο και λειτουργίας της σε βάθος χρόνου. Από την αναλυτική παρουσίαση του κάθε τύπου γέφυρας και των επί μέρους στοιχείων της προέκυψε πως κάθε τύπος γέφυρας δεν μπορεί να εφαρμόζεται σε όλες τις περιπτώσεις, άλλοτε επειδή δεν πληρούνται οι απαιτήσεις αντοχής και λειτουργικότητας και άλλοτε επειδή είναι οικονομικά ασύμφορος. Ως εκ τούτου, για γέφυρες ανοιγμάτων άνω των 800 μέτρων, επιλέγονται πλέον γέφυρες αναρτώμενες από καλώδια, είτε καλωδιωτές με ευθύγραμμα καλώδια, είτε κρεμαστές για ακόμη μεγαλύτερα ανοίγματα, ενώ τοξωτές γέφυρες έχουμε συνήθως σε ανοίγματα άνω των 300 μέτρων και γέφυρες ζευκτών σε περιπτώσεις άνω των 170 μέτρων, με γέφυρες που βασίζονται σε δοκούς (ανεξαρτήτως τύπου δοκού) να έχουμε σε περιπτώσεις ανοιγμάτων κάτω των 150 μέτρων. Το άνοιγμα μιας γέφυρας και ο τύπος της, είναι ακόμη τα βασικά στοιχεία που επηρεάζουν και την διαστασιολόγηση και επιλογή σε σχέση με τα υλικά των επιμέρους στοιχείων μιας γέφυρας.



Οι απαιτήσεις για τον σχεδιασμό και την κατασκευή μιας γέφυρας, οφείλουν φυσικά να ακολουθούν τα σχεδιαστικά πρότυπα κάθε χώρας, τα οποία στις Ευρωπαϊκές χώρες ορίζονται από τους Ευρωκώδικες σε συνδυασμό με το Εθνικό Προσάρτημα που εκδίδεται για κάθε χώρα, και στις ΗΠΑ από τον AASHTO LFRD που καθορίζει τα Αμερικάνικα πρότυπα σχεδίασης. Στους κώδικες σχεδίασης καθορίζεται τόσο η ποιότητα και τα επιμέρους χαρακτηριστικά των δομικών υλικών για το εκάστοτε στοιχείο κάθε γέφυρας, όσο και οι φορτίσεις, μεταβλητές και μόνιμες που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κάθε φορά.

Επιπλέον, από την ανάλυση των γεφυρών – υπερκατασκευών, της κρεμαστής γέφυρας Akashi-Kaikyō και της Cheon-Sa, των καλωδιωτών γεφυρών Millau και Russky και της τοξωτής γέφυρας Chaotianmen, προκύπτει πως ο σχεδιασμός και η κατασκευή γεφυρών είναι συνυφασμένη της προόδου της τεχνολογίας υλικών. Αρχικά, αποδεικνύεται η ανωτερότητα του χάλυβα σαν δομικό υλικό, ειδικά για την κατασκευή γεφυρών μεγάλων ανοιγμάτων, ενώ ταυτόχρονα φαίνεται και η εξέλιξη που είχαμε στις ποιότητες του χάλυβα τα τελευταία χρόνια, οι οποίες οδήγησαν σε γέφυρες ανοιγμάτων κοντά στα 2000 μέτρα. Πιο συγκεκριμένα η ανάπτυξη καλωδίων πολύ μεγάλης αντοχής ήταν αυτός που κατέστησε εφικτή την ανέγερση των γεφυρών Akashi-Kaikyō και Millau, καθώς οι προγενέστεροι τύποι καλωδίων ήταν μικρότερων αντοχών και δεν είχαν τη δυνατότητα να μεταφέρουν τόσα φορτία. Επιπλέον, η δυνατότητα προκατασκευής στοιχείων των χαλύβδινων γεφυρών, όπως στην περίπτωση της τοξωτής γέφυρας Chaotianmen, και καινοτομίες με τα δορυφορικά συστήματα που ελαχιστοποιούν τις ενδεχόμενες αστοχίες κατά τη διάρκεια ανέγερσης χαλύβδινων γεφυρών μεγάλων ανοιγμάτων, όπως αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις περιπτώσεις της καλωδιωτής γέφυρας Millau και της Chaotianmen, δείχνουν την εξέλιξη στον κλάδο της γεφυροποιίας σε σχέση με τις διαδικασίες ανέγερσής τους.

Οι εξελίξεις ακόμη στην τεχνολογία των υλικών, προσέφεραν λύσεις ακόμη και σε βασικά μειονεκτήματα του χάλυβα που θα οδηγούσαν σε μείωση της αντοχής του λόγω αντίξοων καιρικών συνθηκών, όπως UV ακτινοβολίας και διάβρωσης, μέσω γαλβανισμού, συστημάτων αερισμού και επικάλυψης των χαλύβδινων καλωδίων με υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο, όπως στις περιπτώσεις των γεφυρών Akashi-Kaikyō, Millau και Russky. Εξελίξεις όμως δεν υπήρχαν μόνο στην τεχνολογία υλικών κατασκευής, αλλά και στις διαδικασίες ανέγερσης, κάτι που είναι εμφανές από την μείωση του χρόνου ανέγερσης των πιο πρόσφατα υλοποιημένων γεφυρών Chaotianmen, Millau και Russky, όπου φτάνει μόλις τα 4 χρόνια, ενώ ένα επίσης εντυπωσιακό στοιχείο είναι πως εκτός από την χρήση προγραμμάτων και ηλεκτρονικής

προσομοίωσης σε σχέση με τις φορτίσεις που δέχονται οι γέφυρες που αναλύθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν ακόμη και τούνελ αέρα σε φυσικά μοντέλα, ώστε να επιβεβαιωθεί η συμπεριφορά των προτεινόμενων κατασκευών σε συνθήκες υψηλών μεταβλητών φορτίων αέρα.

Όπως προκύπτει από τις αναφορές, χάλυβες υψηλότερης αντοχής έχουν κάνει πια εφικτές κατασκευές μεγαλύτερων διαστάσεων, ενώ νέα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών (FRP & CFRP), χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως στην γεφυροποιία, τόσο λόγω των ιδιοτήτων επιδιόρθωσης-συντήρησης που έχουν, όσο και για την κατασκευή λόγω του μικρού τους βάρους σε σχέση με την αντοχή τους. Το ίδιο βάρος των δομικών υλικών, και η αντοχή τους είναι άμεσα συνδεδεμένα με την τυπολογία μιας γέφυρας καθιστώντας εφικτές γέφυρες πολύ μεγάλων ανοιγμάτων με το μικρότερο κόστος ανέγερσης και διατήρησης. Σε σχέση με τα υλικά κατασκευής, τόσο τα νέα, όσο και τον ίδιο το χάλυβα, φαίνεται πλέον η επιλογή τους να εξαρτάται και από όρους βιωσιμότητας και κυκλικής οικονομίας. Ως εκ τούτου, ο χάλυβας σαν υλικό, δίνει τη δυνατότητα προσαρμογής στις σύγχρονες απαιτήσεις σχεδιασμού και κατασκευής, τόσο ως προς την δυνατότητα «αναβάθμισης» των ιδιοτήτων του, τη μεγάλη διάρκεια ζωής του, όσο και της διατήρησης των ιδιοτήτων του σε βάθος χρόνου με τη βοήθεια των ινοπλισμένων πολυμερών, που έχουν τη δυνατότητα «επιδιόρθωσης» του.

Τέλος, από την ανάλυση προκύπτει ότι οι σύγχρονες τάσεις στην κατασκευή χαλύβδινων γεφυρών καθορίζονται από οικονομικούς, κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι ωθούν τις εξελίξεις στην τεχνολογία υλικών, σχεδιασμού και ανέγερσης των σύγχρονων κατασκευών, ακολουθώντας πλέον τα πρότυπα της κυκλικής οικονομίας. Υπό αυτούς τους όρους, ο χάλυβας αποτελεί ένα υλικό που θα συνεχίσει να χρησιμοποιείται ευρέως για την κατασκευή γεφυρών και στο μέλλον, σαν αποτέλεσμα των πλεονεκτημάτων που παρέχει στο μελετητή σαν υλικό, ως προς σύλληψη, υλοποίηση και διατήρηση ενός έργου σε βάθος χρόνου.

## 8.0 Βιβλιογραφία

Βάγιας, Ι., Ερμόπουλος, Ι, Ιωαννίδης, Γ. (2005). *Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα*. Κλειδάριθμος.

Ερμόπουλος, Ι., (2008). *Σιδηρές και σύμμικτες γέφυρες – Ανάλυση και διαστασιολόγηση σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες 1 έως 8*, Κλειδάριθμος, Αθήνα.

Ευρωκώδικας 1 : Μέρος 2.0. Δράσεις - Φορτία κυκλοφορίας σε γέφυρες. (ΕΛΟΤ EN 1991-2, 2003)

Ευρωκώδικας 3 : Μέρος 1.1. Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα - Γενικοί Κανόνες και κανόνες για κτίρια. (ΕΛΟΤ EN 1993-1-1, 2005)

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας | ΤΕΕ, (χ.η.). *Ο χάλυβας ως υλικό*. Ανακτήθηκε 17 Ιουλίου, 2024, από [http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL\\_GUIDES/METAL\\_KATASK/me1\\_2t.htm#1.\\_Σύσταση](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me1_2t.htm#1._Σύσταση)

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας | ΤΕΕ, (χ.η.-2). *"ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 3" Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα*. Ανακτήθηκε 17 Ιουλίου, 2024, από [http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL\\_GUIDES/METAL\\_KATASK/me3\\_3t.htm#2.\\_Πρότυπα\\_σχετικά\\_με\\_τις\\_Μεταλλικές\\_Κατασκευές\\_\\_](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/METAL_KATASK/me3_3t.htm#2._Πρότυπα_σχετικά_με_τις_Μεταλλικές_Κατασκευές__)

Ali, H. T., Akrami, R., Fotouhi, S., Bodaghi, M., Saeedifar, M., Yusuf, M., & Fotouhi, M. (2021). Fiber reinforced polymer composites in bridge industry. *Structures (Oxford)*, 30, 774–785. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.092>

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (2020). *LRFD Bridge Design Specifications* (9th Edition), AASHTO, Washington, DC, USA.

British Constructional Steelwork Association (BCSA), (2010). *Steel bridges: A practical approach to design for efficient fabrication and construction*.

- Buonomo M., Servant, C., Virlogeux, M., Cremer, J.M., de Ville de Goyet, V., & Del Forno, J.Y. (2004). The design and the construction of the Millau Viaduct. *Steelbridge 2004: steel bridges extend structural limits, Proceedings of the International symposium on steel bridges 2004*. June 23-25, 2004, Millau, France. Ανακτήθηκε 10 Ιουλίου, 2024, από [http://cnrsm.fr/g01\\_dp/viaduc\\_millau\\_apk\\_44/01\\_greish/04\\_millau\\_steelbridge.pdf](http://cnrsm.fr/g01_dp/viaduc_millau_apk_44/01_greish/04_millau_steelbridge.pdf)
- Casas, R.J. (2015). The bridges of the future or the future of bridges?, *Frontiers in Built Environment*, 1(3), DOI: 10.3389/fbuil.2015.00003
- Chandramouli, K., Sree Naga Chaitanya, J., Sahera, S., & Sahil, S. (2023). A study on Russky Bridge. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 5(3), 1574-1576. <https://www.doi.org/10.56726/IRJMETS34457>
- Chavel, B., (2022). Bridge Deck Design (AISC Publication No. B917-22), *Steel Bridge Design Handbook*, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.
- Chen, W., Shen, R., Chen, X., Qi, D., & Yang, J. (2024). High-temperature mechanical properties and failure modes of UHSS wire for cable-supported bridge. *Journal of Constructional Steel Research*, 212, 108292. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108292>
- Coletti, D., & Sheahan, J., (2022). Substructure Design (AISC Publication No. B916-22), *Steel Bridge Design Handbook*, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.
- Duan, X., Xiao, X., & Xu, W. (2010). Design & technology characteristics of main bridge of Chaotianmen Yangtze River Bridge. *ARCH'10 – 6th International Conference on Arch Bridges*, Fuzhou, Κίνα, 11-13 Οκτωβρίου 2010, pp. 107-112. Ανακτήθηκε 13 Ιουλίου, 2024, από [https://archbridges.fzu.edu.cn/\\_local/0/4A/45/62424EB4CDB7AC5A58B071C5FA7\\_4DAC1E42\\_73E56.pdf?e=.pdf](https://archbridges.fzu.edu.cn/_local/0/4A/45/62424EB4CDB7AC5A58B071C5FA7_4DAC1E42_73E56.pdf?e=.pdf)
- Ellobody, E. (2023). *Finite element analysis and design of steel and steel-concrete composite bridges*. (2<sup>η</sup> έκδοση). Butterworth-Heinemann Publications.

- Furuya, N., & Tatsumi, M., (1994). Technical innovation for realization of Akashi-Kaikyo Bridge, *Structures and Buildings, Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 104(3), (pp. 285-296), <https://doi.org/10.1680/istbu.1994.26779>
- Haifan, X., Rucheng, X., Liping, X., Xuefei, S., Yaojun, G., Hongyi, W., Zhenyong, H., (2011). *Conceptual Design of bridges*. (1<sup>η</sup> έκδοση). China Communications Press.
- Hanswille, G., Hensen, W., Feldmann, M., Sedlace, G., (2010, October 4-6). Design of steel-bridges : Overview of key content of EN 1993-Eurocode 3 - Illustration of basic element design, *Workshop “Bridge Design to Eurocodes”*, Vienna, Austria, 2010. Ανακτήθηκε 11 Ιουλίου, 2024, από [https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2022-06/2010\\_Bridges\\_EN1993\\_GSedlacek.pdf](https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2022-06/2010_Bridges_EN1993_GSedlacek.pdf)
- Helwig, T., & Yura, J., (2022). Bracing System Theory and Design for I-Girders and Tub Girders (AISC Publication No. B913-22), *Steel Bridge Design Handbook*, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.
- Jung, J., Kim, J., Baek, J. & Choi, H. (2010). Practical Design of Continuous Two Main-span Suspension Bridge in Korea. IABSE Symposium. *Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanised Areas*, Βενετία, Ιταλία, 22-24 Σεπτεμβρίου 2010, (pp. 284-285), <https://doi.org/10.2749/222137810796024501>
- Kaczinski, M., (2022). Bearing Design (AISC Publication No. B915-22), *Steel Bridge Design Handbook*, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.
- Kim, J. (2018, 31 Μαΐου). *Island Hopping*. Bridgeweb. Ανακτήθηκε 25 Ιουλίου, 2024, από <https://www.bridgeweb.com/Island-hopping/4682>
- Kim Y. J. (2014). Repair of Deteriorated Bridge Substructures Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Composites. In *Advanced Composites in Bridge Construction and Repair* (pp. 265–286). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857097019.2.265>

- Kitagawa, M. (2004). Technology of the Akashi-Kaikyō bridge. *Structural control and health monitoring*, 11(2), 75-90. <https://doi.org/10.1002/stc.31>
- Köhler, J., Hingorani, R., Sørensen, J., (2023, July 9-13). Reliability level of the second generation of the Eurocodes - status and potential, *14th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP14)*, Dublin, Ireland, 2023. Ανακτήθηκε 10 Ιουλίου, 2024, από <http://hdl.handle.net/2262/103576>
- Kuhlmann, U., Arnim, M., Gölz, L., Hofmann, G., Knecht, W., Mönch, S., Pourostad, V., & Stempniewski, L. (2024). Steel and composite bridges – Enabling sustainable solutions. *Steel Construction : Design and Research*, 17(1), 1–10. <https://doi.org/10.1002/stco.202300035>
- Lemma, M. S., Gervásio, H., Pedro, J. O., Rigueiro, C., & da Silva, L. S. (2020). Enhancement of the life-cycle performance of bridges using high-strength steel. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(4), 772–786. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1662067>
- Lin, X. (2022). Construction Processes and Strategies of Millau Viaduct. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 18, 86-92. <https://doi.org/10.54097/hset.v18i.2579>
- Liu, Y., Gu, M., Liu, X., & Tafsirojjaman, T. (2022). Life-Cycle Cost Analysis of Long-Span CFRP Cable-Stayed Bridges. *Polymers*, 14(9), 1740. <https://doi.org/10.3390/polym14091740>
- Mertz, D. (2022). Loads and Load Combinations (AISC Publication No. B907-22), *Steel Bridge Design Handbook*, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.
- Martin, J.P., Servant, C., Clement, J.M., & Virlogeux, M. (2004). The design of the Millau Viaduct. *Concrete structures: the challenge of creativity, Proceedings of the fib Symposium 2004*. April 26 - 28, 2004, Avignon, France. Ανακτήθηκε 10 Ιουλίου, 2024, από <https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2018/05/Servant.pdf>

- Pipinato, A. (2016). Case study: the Russky bridge. *Innovative bridge design handbook*, (pp. 671-680). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823550-8.00032-9>
- Popa, N., Charlier, M., Tibolt, M., Rademacher, D., Ryjáček, P., Jehlicka, P., Wald, F., Kuhlmann, U., Pascual, A. M., Martins, N., Orcesi, A., Rigueiro, C., Seyoum Lemma, M., & Silva, L. S. (2018). Holistic approach to sustainability of bridges. *Steel Construction : Design and Research*, 11(3), 179–183. <https://doi.org/10.1002/stco.201800008>
- Qureshi, J. (2023). A Review of Fibre Reinforced Polymer Bridges. *Fibers*, 11(5), 40. <https://doi.org/10.3390/fib11050040>
- Ramadan, A. & Ermoshin, N. (2022). Method for investigating the reliability of structural elements of cable-stayed supports' anchorage: a case study of the Russky Bridge. *Transportation Research Procedia*. 63, 2887-2897.
- Skoglund, O., Leander, J., & Karoumi, R. (2020). Overview of Steel Bridges Containing High Strength Steel. *International Journal of Steel Structures*, 20(4), 1294–1301. <https://doi.org/10.1007/s13296-020-00360-2>
- Structurae, (χ.η.-1). *Akashi-Kaikyō Bridge*. Structurae. Ανακτήθηκε 12 Ιουλίου, 2024, από <https://structurae.net/en/structures/akashi-kaikyo-bridge>
- Structurae, (χ.η.-2). *Cheon-Sa Bridge*. Structurae. Ανακτήθηκε 12 Ιουλίου, 2024, από <https://structurae.net/en/structures/cheonsa-bridge>
- Structurae, (χ.η.-3). *Millau Viaduct*. Structurae. Ανακτήθηκε 12 Ιουλίου, 2024, από <https://structurae.net/en/structures/millau-viaduct>
- Structurae, (χ.η.-4). *Russky Bridge*. Structurae. Ανακτήθηκε 12 Ιουλίου, 2024, από <https://structurae.net/en/structures/russky-bridge>
- Structurae, (χ.η.-5). *Chaotianmen Bridge*. Structurae. Ανακτήθηκε 12 Ιουλίου, 2024, από

<https://structurae.net/en/structures/chaotianmen-bridge>

Wang, F. (2009). The Chaotianmen Bridge – An arch bridge with a new world record span of 552 m. *IABSE Workshop: Recent Major Bridges*, Shanghai, Κίνα, 11-12 Μαΐου 2009, pp. 250-255. Ανακτήθηκε 12 Ιουλίου, 2024, από <https://doi.org/10.2749/222137809796089304>

Wang, C. & Li, Z. & Yan, Z. & Xiao, Z. (2012). Experimental Investigation on Wind-Resistant Behavior of Chaotianmen Yangtze River Bridge. *Experimental Techniques*. 36, 26-38.

Wang, X., Wang, Y., Zhu, P., Zhang, X., Wang, H., & He, Y. (2022). Experimental and numerical investigations of UHSS wire main cables for suspension bridges. *Structures (Oxford)*, 38, 1582–1594. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.011>

White, D., (2015). *Steel Bridge Design Handbook: Structural Behavior of Steel* (Report No. FHWA-HIF-16-002 – Vol. 4), U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration Washington, USA.

White, D. (2022). Strength Behavior and Design of Steel (AISC Publication No. B904-22), *Steel Bridge Design Handbook*, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.

Wright, K., (2015). *Steel Bridge Design Handbook: Selecting the Right Bridge Type* (Report No. FHWA-HIF-16-002 - Vol. 5), U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration Washington, USA.

Wright, K., (2022). Selecting the Right Bridge Type (AISC Publication No. B905-22), *Steel Bridge Design Handbook*, American Institute of Steel Construction, Chicago, USA.

Xiong, W., Cai, C. S., & Xiao, R. C. (2014). The use of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites for cable-stayed bridges. In *Advanced Composites in Bridge Construction and Repair* (pp. 210–264). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1533/9780857097019.2.210>



Xanthakos, P. (1993). *Theory and design of bridges*. (1<sup>η</sup> έκδοση). John Wiley & Sons, Inc.

Yanfen, Y., Jiqing, D., & Aixia, L. (2023). Bridge Design and Construction Management from the Perspective of Sustainable Development. *Urban Studies and Public Administration*, 6(3), 35-42. <https://doi.org/10.22158/uspa.v6n3p35>

Yim, W. T., (2007, Απρίλιος 27). The Bridge Engineering Conference. Akashi Bridge. *Proceedings of Bridge Engineering 2 Conference 2007*. University of Bath, Bath, UK.  
Ανακτήθηκε 10 Ιουλίου, 2024, από  
[http://www.ams.ir/jozavat/Shegeftiha/Chapter2/Yim\\_Akashi.pdf](http://www.ams.ir/jozavat/Shegeftiha/Chapter2/Yim_Akashi.pdf)

