

## Σχεδιασμός Γέφυρας Συρμού Monorail



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## Σπυρίδων Π. Θεοδωρόπουλος

Επιβλέπων: Ιωάννης Βάγιας

Αθήνα, Μάρτιος 2016 ΕΜΚ ΔΕ 2016/04

Θεοδωρόπουλος Σ. Π. (2016). Σχεδιασμός Γέφυρας Συρμού Monorail Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2016/04 Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Theodoropoulos S. P. (2016). Design of Monorail Bridge Diploma Thesis EMK ΔE 2016/04 Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

# Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	1
Abstract	2
Ευχαριστίες	3
<ol> <li>Εισαγωγή</li> <li>1.1. Γενικά στοιχεία του έργου</li> <li>1.2.Εισαγωγικά στοιχεία συρμών τύπου monorail</li> <li>1.3 Χάραξη τμήματος που ασχολείται η συγκεκριμένη εργασία</li> <li>1.4 Στοιχεία κατά μήκος της δοκού</li> </ol>	5 7 9 .13
<ol> <li>Φορτία σχεδιασμού εντατικών μεγεθών</li> <li>2.1 Εισαγωγή</li> <li>2.2 Δράσεις υπολογισμού</li> <li>2.3 Εύρεση δυναμικού συντελεστή επιβάρυνσης (impact factor – I)</li> <li>2.4 Προδιαστασιολόγηση κύριας δοκού</li> <li>2.5 Συμπεράσματα</li></ol>	21 21 22 31 34 .37
<ol> <li>Έλεγχοι σε οριακή κατάσταση αστοχίας (OKA)</li> <li>3.1 Εισαγωγή</li> <li>3.2 Συνδυασμοί οριακής κατάστασης αστοχίας</li> <li>3.3 Διαστασιολόγηση και έλεγχοι έναντι κάμψης της κύριας δοκού</li> <li>3.4 Έλεγχοι κύριας δοκού έναντι τέμνουσας</li> <li>3.5 Έλεγχος σε στρέψη</li> <li>3.6 Έλεγχος τάσεων von Mises - Συμπεράσματα</li> </ol>	39 39 40 52 59 72 74
<ul> <li>4. Έλεγχοι σε κόπωση</li> <li>4.1 Εισαγωγή</li> <li>4.2 Κανονιστικές διατάξεις για έλεγχο σε κόπωση του ΕΚ-3</li> <li>4.3 Αντοχή και διάρκεια ζωής κύριας δοκού σε κόπωση</li> </ul>	.77 .77 .78 .82
5 Έλεγχος σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας 5.1 Εισαγωγή 5.2 Έλεγχος βελών κύριας δοκού	. 85 . 85 . 85
<ul> <li>6. Επιλογή εφεδράνων και σύνδεσή τους με τον κύριο φορέα</li> <li>6.1 Εισαγωγή</li> <li>6.2 Διαστασιολόγηση εφεδράνων</li> <li>6.3 Διαστασιολόγηση ελάσματος σύνδεσης</li></ul>	. 89 . 89 . 94 100 104

7. Συμπεράσματα	
8. Βιβλιογραφία	
Παράρτημα Α – Κύρτωση	
Παράρτημα Β – Κόπωση	

#### ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

#### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΕΜΚ ΔΕ 2016/04

#### Σχεδιασμός γέφυρας συρμού monorail

Θεοδωρόπουλος Σ. Π. (Επιβλέπων: Βάγιας Ι.)

#### Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο σχεδιασμός τμήματος γέφυρας πολλαπλών ανοιγμάτων συρμού τύπου monorail. Η ιδέα βασίζεται σε πραγματικό έργο που έχει κατασκευαστεί σε αναπτυσσόμενη χώρα της Μέσης Ανατολής. Στόχος της διπλωματικής είναι να κατασκευαστεί φορέας σιδηροδοκού μόνο απο χάλυβα ώστε να επιτευχθεί η γρήγορη ανέγερση του σε συγκεκριμένα τμήματα, που λόγω ύπαρξης οδικού δικτύου στο χώρο του έργου δεν έχουμε περιθώρια μεγάλης σε διάρκεια διακοπής της κυκλοφορίας.

Αρχικά γίνεται μια συνοπτική περιγραφή του έργου και ιδιαίτερα των συρμών, που αποτελούν σύγχρονου τύπου τρένα ιδιαίτερα μεγάλης ταχύτητας. Παρακάτω παρουσιάζεται η γεωμετρική χάραξη της γέφυρας και μια φωτορεαλιστική απεικόνιση που έγινε μέσω του AutoCAD 2014.

Στη συνέχεια γίνεται μία περιγραφή, του προγράμματος προσομοίωσης (SOFiSTiK) με το οποίο έγιναν οι αναλύσεις των εντατικών μεγεθών καθώς και του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (Adina) όπου πήραμε πιο λεπτομερή απεικόνιση κάποιων κρίσιμων για τη ζωή του έργου στοιχείων του φορέα, η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την μόρφωση του προσομοιώματος και τέλος η παρουσίασή του.

Οι δράσεις υπολογισμού καθορίστηκαν βάση υπάρχοντος μελέτης. Περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού των φορτίων υπολογισμού για μόνιμα φορτία δοκού, κινητά φορτία απ τον συρμό του τρένου, άνεμο, θερμοκρασιακές μεταβολές και διαφορική καθίζηση των βάθρων.

Έπειτα γίνεται ο έλεγχος για τους συνδυασμούς σε ΟΚΑ και ΟΚΛ της γέφυρας σύμφωνα με τον ACI-358 των διατομών που επιλέχθηκαν για την κύρια δοκό καθώς και των βελών κάμψης, ενώ για τον έλεγχο σε κόπωση προτιμήθηκαν οι διατάξεις που ορίζει ο Ευρωκώδικας 3. Ακολουθεί η επιλογή ελαστομεταλλικών εφεδράνων τύπου pot bearings και ο τρόπος σύνδεσης με την κύρια δοκό.

Λόγω του μεγάλου ύψους που βρίσκεται το έργο υπολογίζεται από διάταξη του ACI-358 ένας δυναμικός συντελεστής που επιβαρύνει όλα τα κινητά φορτία στην κύρια δοκό για τους παραπάνω συνδυασμούς ελέγχου.

Τέλος παρουσιάζονται ποιοτικά σε τρισδιάστατη σχεδίαση κάποιες χαρακτηριστικές λεπτομέρειες συνδέσεων της υπό μελέτης γέφυρας.

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

#### DIPLOMA THESIS EMK ΔE 2016/04

#### **Design of Monorail Bridge**

Theodoropoulos S. P. (Supervised by Vayas I.)

#### Abstract

The subject of this study is the design of a part of a multiple-exposures rail bridge of monorail type. The idea relies on a real construction in a developing country in Middle East. The objective of the dissertation is the construction of an ironbeam carrier made only of steel so that it enables its rapid erection at specific parts, where there is limited scope of interrupting the traffic due to the existence of road networks.

At first, there is a brief description of the construction, especially of the rails which are modern high-speed trains. Then a presentation of the geometric design of the bridge follows as well as its photorealistic depiction via AutoCAD 2014.

Additionally, there is a description of the simulator programme (SOFiSTiK) through which we handled all the analyses of the internal forces as well as the software of finite elements (Adina) where a more detailed depiction of some crucial parts of the carrier were captured, the process for the information of the simulator and lastly its presentation.

The measurements were defined based on an existing research. There is a description of the process of the load measurements regarding the permanent beam cargo, mobile cargo from the railway of the train, wind, temperature transitions and differential settlement of the pedestal.

Furthermore, there is the checking/control of the ultimate limit state and limit functionality mode combinations of the bridge which proceeded according to ACI-358 of the segmentations opted for the main beam including the abatement arrows, while the checking of fatigue proceeded according to the parameters of the Eurocode 3. Then there is the choice of elastic-metallic structural bearings of pot bearings type and their junction with the main beam. Due to the big height of the construction a dynamic factor, which charges all the mobile loads at the main beam for all the aforementioned control combinations, is calculated by a parameter of the ACI-358.

Last but not least, there is a qualitative presentation in 3D design of some characteristic details in the junctions of the main beam under the prism of the bridge study.

## Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην προσπάθεια αυτή.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον καθηγητή μου και επιβλέποντα της εργασίας μου κ. Βάγια για την βοήθεια και την υποστήριξη που μου πρόσφερε σε όλα τα βήματα της εργασίας μου. Η εμπειρία του ήταν πολύτιμη στα προβλήματα που αντιμετώπισα και στην ολοκλήρωση αυτού του έργου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τους φίλους μου οι οποίοι ήταν δίπλα μου σε όλη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας και βοήθησαν ώστε αυτό το διάστημα να είναι ευχάριστο και δημιουργικό.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τον πατέρα μου για την παρότρυνση να ασχοληθώ με το επάγγελμα του Πολιτικού Μηχανικού, την μητέρα μου και τον αδερφό μου Δημήτρη για την συνεχή υποστήριξη και βοήθεια σε όλη τη διάρκεια της εργασίας.

## 1. Εισαγωγή

#### 1.1. Γενικά στοιχεία του έργου

Η αφορμή για το αντικείμενο που πραγματεύεται η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έγινε απο πραγματικό έργο που πραγματοποιήθηκε σε αναπτυσσόμενη χώρα της Μ. Ανατολής. Το έργο αυτό είναι η κατασκευή γέφυρας συρμού monorail το οποίο έχει το πλεονέκτημα ότι αφού βρίσκεται υπερυψωμένο πάνω απ' το έδαφος δεν επιβαρύνει καθόλου το υπόλοιπο συγκοινωνιακό ιστό της περιοχής. Όσον αφορά τον τρόπο χάραξης έχει επιλεγεί να συνδέει το κέντρο αυτής της περιοχής σε μια κλειστή χάραξη ώστε να περνάει απ' τα πιο σημαντικά σημεία της περιοχής. Όσον αφορά τα δομικά στοιχεία το έργο αποτελείται από την κύρια δοκό, ελάσματα και συνδέσεις στις στηρίξεις τα οποία μεταβιβάζουν τις δυνάμεις στα εφέδρανα και τα βάθρα ανύψωσης και αγκύρωσης αυτών. Η δοκός στο μεγαλύτερο ποσοστό της είναι κατασκευασμένη από σκυρόδεμα ώστε να ανταποκρίνεται στις αυξημένες απαιτήσεις σε ροπή αδράνειας και αντοχής λόγω της συμβολής του ίδιου βάρους του. Η ροπή αδράνειας αυτή χρειάζεται για να παραλαμβάνει τα μεγάλα και σημαντικά για την κατασκευή και τη ζωή του έργου εντατικά μεγέθη, όπως η στρέψη των συγκεκριμένων τμημάτων του κύριου φορέα. Γι αυτό το λόγο επιλέγεται η λύση τα τμήματα αυτά να είναι μόνο από χάλυβα ο οποίος διαθέτει το χαρακτηριστικό του μικρού ίδιου βάρους για να μας δώσει της αντοχές που μας δίνει μια αντίστοιχη διατομή από σκυρόδεμα. Όμως σ' αυτό το σημείο εισάγεται ένα άλλο υλικό το οποίο μας αλλάζει κατά πολύ τις υπεραντοχές που μας πρόσφερε η διατομή από σκυρόδεμα.

Όσον αφορά τον σκοπό της συγκεκριμένης εργασίας, αναφέρθηκε ότι η κύρια δοκός γενικά αποτελείται το μεγαλύτερο μέρος της από σκυρόδεμα, όμως υπάρχουν τμήματα τα οποία λόγω της ιδιαιτερότητας της θέσης τους πρέπει να κατασκευαστούν από χάλυβα. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν τέσσερα σημεία σε όλη τη χάραξη τα οποία βρίσκονται πάνω απο κεντρικές αρτηρίες του οδικού δικτύου της συγκεκριμένης πόλης και χρείζουν ιδιαίτερης μελέτης κατά την κατασκευή του έργου. Επομένως άμεσα δημιουργείται το πρόβλημα ότι δεν θα μπορούσε λόγω κυκλοφοριακής συμφόρησης να γίνει μακροχρόνια διακοπή του δικτύου για την τοποθέτηση δοκού σκυροδέματος στα σημεία αυτά κάτι που γενικά απαιτείται σε τέτοιου είδους κατασκευές. Με άλλα λόγια δημιουργείται η ανάγκη αφού δημιουργήσουμε την ισοδύναμη χαλύβδινη διατομή, να την ενισχύσουμε με συγκεκριμένο τρόπο σε όποια σημεία κρίνεται απαραίτητο, απ' τα αντίστοιχα εντατικά μεγέθη που θα προκύψυν, ώστε να επαρκεί έναντι όλων των ελέγχων και χωρίς να επηρρεάζει επ' ουδενί την ζωή στο σύνολο του έργου για τα πρότυπα και τις συνθήκες που επιλέχθηκαν κατά το σχεδιασμό. Επιπλέον θα πρέπει να γίνει ξεχωριστή μελέτη των εφεδράνων και των ελασμάτων σύνδεσής τους με την κύρια δοκό, ώστε να αποφευχθεί η εμφάνιση εφελκυστικών δυνάμεων σ' αυτά, κάτι που θα ήταν καταστροφικό για τη στατικότητα του έργου στα σημεία σύνδεσης. Στην περίπτωση που δεν μπορούμε να αποφύγουμε τον εφελκυσμό να γίνει πρόβλεψη για αγκύρια που θα εδράζονται στα υπερυψωμένα βάθρα μέσω των εφεδράνων και θα τον παραλαμβάνουν πλήρως, ανακουφίζοντας ταυτόχρονα τα εφέδρανα που σε διαφορετική περίπτωση θα υπόκεινταν σε εκτεταμένες βλάβες. Προσοχή θα πρέπει να δοθεί και στα ελάσματα σύνδεσης ώστε να μπορούν με ασφάλεια να παραλαμβάνουν την ένταση, είτε πρόκειται για τέμνουσα είτε για ροπή και να την μεταδίδουν απ' την κύρια δοκό προς τα εφέδρανα που θα επιλεγούν ώστε να μην υπάρξουν βλάβες σε κανένα σημείο της ροής αυτής των τάσεων. Αυτό είναι σημαντικό καθώς μια τέτοια βλάβη θα αποτελούσε αίτιο αστοχίας της κατασκευής και εκτός της ασφάλειας του έργου θα κινδύνευαν και ανθρώπινες ζωές, και προφανώς μια πιθανή αποκατάσταση εφεδράνου πριν απ' το προβλεπόμενο θα ανέβαζε σημαντικά και το κόστος του έργου κάτι που για την κατασκευάστρια εταιρία είναι αποφευκταίο.

Το έργο έχει ως σκοπό τον εκσυγχρονισμό σύφωνα με τα διεθνή πρότυπα, της αναπτυσσόμενης περιοχής, καθώς και την εύκολη και γρήγορη μετακίνηση πολιτών και αγαθών. Έχει σχεδιαστεί με στόχο την εξυπηρέτηση 3000 επιβατών ανά ώρα, αριθμός σημαντικός για την συγκεκριμένη περιοχή η οποία τώρα κατασκευάζεται και είναι πολλά υποσχόμενη για το μέλλον ολόκληρης της χώρας. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η σύνδεση της πόλης με κύριες πύλες εισόδου της χώρας, όπως είναι το αεροδρόμιο της εκεί περιοχής, καθώς και η συνολική χάραξη του έργου σε όλο το εύρος του που όπως ειπώθηκε και παραπάνω είναι κλειστής χάραξης και συνδέεται στο επίπεδο του εδάφους με άλλα έργα όπως μετρό και γενικά το υπόλοιπο συγκοινωνιακό δίκτυο. Επιπλέον στη φωτογραφία φαίνονται και οι επεκτάσεις του συκεκριμένου έργου με διαφορετικό χρώμα στο σχέδιο κάτι που υποδεικνύει ότι η μελέτη θα πρέπει να γίνει με μεγάλο χρονικό ορίζοντα ώστε να καλύπτει την προβλεπόμενη ζωή του έργου



6

## 1.2.Εισαγωγικά στοιχεία συρμών τύπου monorail

Οι συρμοί αυτοί αποτελούν ένα είδος τρένου σύγχρονου τύπου που κατασκευάζονται για μετακίνηση αγαθών και πολιτών εντός των πόλεων και συμβάλλουν σημαντικά στον εκσυγχρονισμό των περιοχών αυτών καθώς καθιστούν αμεσώτερη και ευκολότερη πρόσβαση στο εμπορικό κέντρο και τις υπηρεσίες. Ο σχεδιασμός του συγκεκριμένου συρμού έγινε για μέγιστη ταχύτητα 80χλμ/ώρα. Αυτό αποφασίστηκε μετά από μελέτες για τις ανάγκες της περιοχής, αλλά και άλλων εντατικών μεγεθών που επιρρεάζουν σημαντικά, όπως ο άνεμος. Ιδιατερότητά τους είναι ότι εδράζονται μόνο σε μία κύρια δοκό (Εικόνα 2) για να στηριχθούν με αποτέλεσμα να απαιτεί ξεχωριστές προδιαγραφές και μελέτες η κατασκευή ενός τέτοιου έργου. Κυρίως προσοχή θα πρέπει να δοθεί στις στροφές του συρμού που επιδρούν οι οριζόντιες δυνάμεις και εκεί εξαιτίας αυτής της μίας δοκού που εδράζεται, δεν μας επιτρέπει να έχουμε άνεση, όσον αφορά την ανάπτυξη μεγάλης ταχύτητας, καθώς κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε εκτροπή του και σε ολέθρια αποτελέσματα για την ασφάλεια του έργου και των επιβατών που μετακινούνται με τον συρμό. Οι συρμοί αποτελούνται κυρίως από αλουμίνιο και σίδερο ενώ παρέχουν ανέσεις σύμφωνα με τις τελευταίες προδιαγραφές όλων των έργων τέτοιου είδους στους συρμούς τους. Οι πόρτες εισόδου-εξόδου είναι συρόμενες ώστε να υπάρχει ευκολότερη και γρηγορότερη πρόσβασηαποβίβαση των επιβατών.



Σχ. 1.2: Συρμός τύπου monorail πάνω στην κύρια δοκό από σκυρόδεμα

Οι συρμοί δεν είναι όλοι ίδιου μεγέθους αφού κάθε φορά ο αριθμός των βαγονιών θα ποικίλει. Οι συρμοί που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία ήταν 2, 4 και 6 βαγονιών ο μεγαλύτερος με ποικίλες φορτίσεις ανάλογα των αριθμό των επιβατών. Ένα ακόμα γνώρισμά τους είναι ότι γενικά μεταφέρουν μικρά κατακόρυφα φορτία στην κύρια δοκό σε σχέση με αυτά που αναπτύσσονται λόγω ανέμου ή φυγόκεντρου (στις στροφές μόνο) και αυτό συμβαίνει γιατί είναι σε μεγάλο υψόμετρο απ' το έδαφος. Σ' αυτό βέβαια συμβάλλουν και οι μεγάλες ταχύτητες που αναπτύσσουν κατά την κίνησή του. Οι συρμοί που επιλέχθηκαν για το συγκεκριμένο έργο είναι σύγχρονοι με διευρυμένη καμπίνα, ελαφριοί στην κατασκευή τους με έμφαση στον αεροδυναμικό σχεδιασμό, σύμφωνα με τις τελευταίες εξελίξεις της τεχνολογίας. Επιπλέον η κίνηση των συρμών βασίζεται σε προηγμένης τεχνολογίας σύστημα έναρξης-παύσης λέιτουργίας, κάτι που καθιστά το έργο ακόμη πιο ασφαλές και αξιόπιστο. Το κάθε βαγόνι αποτελεί κορυφαίο επίτευγμα άνεσης και ασφάλειας, εξοπλισμένο μεταξύ των άλλων με air condition και κάμερες ασφαλείας για τους επιβάτες. Ο εξοπλισμός έλξης περιλαμβάνει ελέγχους Mitrac TM 600PW και κινητήρες με μόνιμους μαγνήτες.

Άξιο αναφοράς είναι το πόσο άνετα και ευρύχωρα είναι τα βαγόνια που επιλέχθηκαν για ένα όσο το δυνατόν πιο κοντά στις σύγχρονες προδιαγραφές έργο. Μάλιστα έγινε ξεχωριστός σχεδιασμός των βαγονιών για το συγκεκριμένο έργο, ώστε να γίνεται καλύτερη εφαρμοφή αυτών πάνω στην κύρια δοκό.

Πιο αναλυτικά παρατίθεντε οι διαστάσεις τους στον ακόλουθο πίνακα και τα στοιχεία αυτών στο σύνολό τους για την κάθε κατάσταση που μπορεί να υπάρξει κατά τη λειτουργία τους.



Σχ. 1.3:Όψη συρμού σε τμήμα όπου η δοκός αποτελείται από σκυρόδεμα



Σχ 1. 4: Σημερινή εικόνα του έργου

Description	Single Car
Width Overall, with doors open (static)	3162 mm
Width Overall, with doors closed (static)	2946 mm
Height top of roof (including antenna) above top of beam	3107 mm
Guidebeam width	690 mm
Top of guidebeam to top of finished floor	450 mm
Distance from Vehicle Center of Gravity to Top of Guidebeam for AW0	800 mm
Distance from Vehicle Center of Gravity to Top of Guidebeam for AW3/AW4	1055 mm

Πιν. 1.1: Διαστάσεις κάθε βαγονιού ανά συρμού

## 1.3 Χάραξη τμήματος που ασχολείται η συγκεκριμένη εργασία

Το τμήμα που ασχολείται η παρούσα εργασία είναι συνολικού μήκους 142,50m. Αποτελείται από 4 ανοίγματα των οποίων το μήκος κυμαίνεται από 25 έως 50 μέτρα ενώ αξιοσημείωτη είναι η μεγάλη καμπύλη (στροφή) που υπάρχει στο δεύτερο άνοιγμα. Αυτή η ιδιαιτερότητα καθιστά ακόμα πιο δύσκολο το σχεδιασμό μιας δοκού μόνο από χάλυβα, αφού πρέπει να γίνει εύρεση τρόπου, ώστε να υπάρξει ικανοποιητική δυσκαμψία εκεί για την παραλαβή των εκτός επιπέδου εντατικών μεγεθών. Το τμήμα αυτό είναι το δυσμενέστερο εξ' αιτίας της απότομης λόγω μικρής καμπυλότητας αλλά και του μεγάλου μήκους, στροφής από τα τέσσερα τμήματα του έργου που απαιτείται η εφαρμογή μόνο χαλύβδινης διατομής και γι' αυτό χρήζει ακόμα μεγαλύτερης μελέτης απ' τα υπόλοιπα. Επιπλέον επιβαρυντικό είναι όπως και σε όλα τα τμήματα αυτά η αυξημένη κυκλοφορία ιδιαίτερα τις ώρες αιχμής στο οδικό δίκτυο που είναι στο επίπεδο του εδάφους. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να προβλεφθεί, ώστε τόσο η κατασκευή των βάθρων, αλλά ιδιαίτερα η εφαρμογή της δοκού να γίνει νυχτερινές ώρες. Αυτό θα πρέπει να γίνει όχι μόνο για λόγους συμφώρησης της κυκλοφορίας, αλλά και για λόγους ασφαλείας του εργοταξίου που σ αυτή την περίπτωση πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί καθώς αυτό είναι στην καρδιά μιας σύγχρονης πόλης με μεγάλη δραστηριότητα απ' τους πολίτες.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται με σαφήνεια η χάραξη του τμήματος που μελετήθηκε και τα ακριβή μήκη των τμημάτων των ανοιγμάτων σαν μια καμπύλη χάραξης, όπως σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα AutoCad. Οι συμβολισμοί των ανοιγμάτων R1, R2, R3, R4, θα διατηρηθούν σε όλη την έκταση της παρούσας εργασίας για ευκολότερη κατανόηση. Για την ακρίβεια της χάραξης στηριχθήκαμε σε προσχέδιο του συγκεκριμένου έργου, ώστε να έχουμε ρεαλιστική, όσο το δυνατόν απεικόνιση της δοκού, στη μεταφορά της χάραξης αυτής από το πρόγραμμα σχεδίασης στο στατικό προγραμμα μελέτης που θα γίνει η προσομοίωση του έργου και των φορτίων. Ως κατ' επέκταση αυτού θα μας δώσει και τα πραγματικά δρώντα εντατικά μεγέθη για να διαστασιολογήσουμε με ορθό τρόπο τη δοκό,



Σχ. 1.5: Χάραζη τμήματος μελέτης

ώστε να επαρκεί σε κάθε είδους φόρτιση που επιβάλλεται απ' τον κανονισμό. Στο δεύτερο σχήμα παραθέτεται η συνολική χάραξη, η οποία είναι κλειστού τύπου, του έργου και με διαφοριτικό χρώμα το τμήμα που μελετήθηκε στην παρούσα μελέτη. Αυτό που μπορεί να προσέξει εύκολα κανείς είναι η κεντρική αρτηρία που όπως εχει αναφερθεί είναι και αυτό που εισάγει την ανάγκη της σιδερένιας δοκού στο τμήμα αυτό. Επιπλέον φαίνεται, ότι το έργο σαρώνει όλη την συγκεκριμένη πόλη κάτι που δείχνει τη σπουδαιότητά του και τον εκσυγχρονισμό που προσφέρει σε όλη την περιοχή για τους πολίτες της.



Σχ. 1.6: Τμήμα μελέτης απ' το συνολικό

Η μελέτη της γέφυρας του συγκεκριμένου τμήματος του έργου έγινε με το λογισμικό sofistik. Αρχικά μεταφέρθηκε η χάραξη απ' τό σχεδιαστικό πρόγραμμα, ώστε να έχουμε έναν "οδηγό" για την μετέπειτα επεξεργασία του. Έπειτα στην αρχή και το τέλος κάθε ανοίγματος τοποθετήθηκαν δύο στηρίξεις εκατέρωθεν της δοκού. Αυτό έγινε για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι, για να μπορεί ο φορέας, να αναλάβει ευκολότερα τη στρέψη που θα υπάρξει απ' τα οριζόντια φορτία, και ο δεύτερος στο να αποφύγουμε τις εφελκυστικές τάσεις στα εφέδρανα (αν επιτευχθεί). Για αυτό μάλιστα το λόγο τα βάλαμε στη μέγιστη απόσταση που μας επέτρεπαν τα βάθρα, δηλαδή 1.5m. Στο πρόγραμμα αυτό συνδέσαμε το κέντρο βάρους της διατομής κάθε φορά με σχεδόν άκαμπτα επίπεδα στοιχεία ώστε να μεταφέρεται η ένταση απ το φορέα στα εφέδρανα. Όσον αφορά τους βαθμούς ελευθερίας των εφεδράνων φροντίσαμε να είμαστε εντός των προτύπων που δίνουν οι εταιρείες κατασκευής τους για στενές γέφυρες όπως φαίνεται και στο σχήμα παρακάτω αλλά ταυτόχρονα προσδώσαμε κάποιους επιπλέον βαθμούς ελευθερίας για να είμαστε πιο σίγουροι όσον αφορά τον σχεδιασμό σε εκτός επιπέδου φορτία όπως είναι ο άνεμος και η φυγόκεντρος.



Σχ. 1.7: Διατάζεις εφεδράνων για στενές γέφυρες

Η μελέτη των ελασμάτων αυτών έγινε στη συνέχεια με ιδιαίτερη έμφαση και μάλιστα σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, ώστε να είμαστε απολύτως σίγουροι για την ασφάλεια του έργου και ότι είναι απολύτως ικανά να μπορούν να μεταδώσουν την μέγιστη ένταση που δημιουργείται.

Η χάραξη του φορέα έγινε με στοιχεία δοκού (beam elements) ανά 1 μέτρο για να έχουμε όσο το δυνατον πιο καλή εποπτεία, αλλά και πιο καλή απεικόνιση των εντατικών μεγεθών εξ' αιτίας της στροφής που γίνεται πιο έντονη στο άνοιγμα R2, αλλά γενικά για να υπολογίσουμε και τις ήπιες καμπυλώσεις των άλλων τριών τμημάτων στην οριζοντιογραφία.

Στη συνέχεια παρατίθενται τρεις εικόνες απ' ευθείας απ' το λογισμικό που έγινε η μελέτη, ώστε να φαίνεται με σαφήνεια η χάραξη του φορέα σε κάθε διεύθυνση. Η πρώτη εικόνα είναι η οριζοντιογραφία του φορέα που διακρίνονται οι καμπυλώσεις του εκάστοτε τμήματος καθώς επίσης και οι στηρίξεις που αναπαριστούν σε μια πρώτη προσέγγιση τα εφέδρανά μας. Προσομοιώθηκαν αρχικά κατ' αυτόν τον τρόπο ώστε να μπορούμε να λάβουμε κάποια εντατικά μεγέθη για τους συνδυασμούς ΟΚΑ και να έχουμε μια ιδέα του μέγεθους των εντατικών μεγεθών που πρέπει να παραλάβει μετέπειτα ο φορέας.

Στη συνέχεια φαίνεται μια τρισδιάστατη όψη του φορέα απ' όπου φαίνεται με μεγαλύτερη έμφαση η μεγάλη αυτή αλλαγή στην κατεύθυνση του τμήματος μελέτης, καθώς επίσης και οι στηρίξεις σε σχήμα πυραμίδας που υπάρχουν.



Σχ. 1.8: Κάτοψη γέφυρας απ' το λογισμικό sofistik



Στην τρίτη φωτογραφία φαίνεται η πλάγια όψη της χάραξης μας, όπου διακρίνονται με ευκολία ο διαχωρισμός των στοιχείων δοκού ανά 1m όπως έχει ειπωθεί, αλλά αξίζει να προσεχθεί η μεταβολή της δοκού στις στηρίξεις όπως θα αναλυθεί και θα υπολογιστεί στη συνέχεια.



Σχ. 1.10:Πλάγια όψη δοκού απ' το λογισμικό sofistik

## 1.4 Στοιχεία κατά μήκος της δοκού

Πιο συγκεκριμένα το τμήμα που ασχοληθήκαμε παρουσιάζει αρκετές ιδιαιτερότητες κατά μήκος του καθώς κατά την χάραξή του είχαμε συνεχείς αλλαγές στην κατεύθυνση των στοιχείων δοκού που χρησιμοποιήσαμε. Αυτό μας οδήγησε σε μια πιο λεπτομερή απεικόνιση των στοιχείων αυτών (ανά 1m), ώστε τα εντατικά μεγέθη που θα προκύψουν να

είναι όσο πιο κοντά στα πραγματικά και κατ' αυτόν τον τρόπο να γίνει η καλύτερη δυνατή διαστασιολόγηση. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκαν και στοιχεία δοκού (beam elements), ώστε να λαμβάνουμε κάθε φορά όλα τα εντατικά μεγέθη και να βλέπουμε ποια έχουν τη δυσμενέστερη επιρροή στο φορέα μας για τους διάφορους συνδυασμούς. Για να καταφέρουμε, να παραλάβουμε τα μεγάλα μεγέθη σε στρέψη, αρχικά αποφασίστηκε να αποτελείται η κύρια δοκός μας από κοίλη συγκολλητή ορθογωνική διατομή μεταβλητού κορμού, όπως γνωρίζουμε λόγω των όρων Steiner έχει ιδιαίτερα μεγάλη δυστρεψία. Στη στρέψη βέβαια όπως είπαμε συμβάλλει και ο τρόπος που έχουν τοποθετηθεί τα εφέδρανα για να μπορέσουμε να μεταβιβάσουμε όμως εκεί την ένταση πρέπει σε πρώτο στάδιο να την παραλάβει η διατομή μου επιλέξαμε και γι αυτό είναι κοίλη ορθογωνική.

Επιπλέον αποφασίστηκε για οικονομία της κατασκευής, αλλά και για βελτιστοποίηση όσο το δυνατόν του φορέα να χρησιμοποιήσουμε δύο είδους διατομές όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια. Πιο συγκεκριμένα οι δύο διατομές έχουν την κάτωθι μορφή με στοιχεία ύψους και πλάτους όπως φαίνεται στον πίνακα από κάτω, ενώ μεταξύ τους έγινε γραμμική παρεμβολή σε μήκος 10m εκατέρωθεν της κάθε στήριξης. Αυτό συμβαίνει γιατί οι δοκοί θα συναρμολογηθούν επιτόπου στο εργοτάξιο, όπου θα έχουν μεταφερθεί σαν κομμένα ελάσματα με τα πάχη και τα ύψη που έχουν καθοριστεί απ' την μελέτη. Η συναρμολόγηση αυτών θα γίνει με συγκολλήσεις, οπότε και θα πρέπει να αποφευχθούν συγκεντρώσεις τάσεων προκειμένου να μην υπάρξει φαινόμενο ψαθυρής αστοχίας στα σημεία των συνδέσεων, αλλά και γενικά στα σημεία αποκατάστασης συνέχειας της δοκού.



Span Description-Concept	W1 (mm)	D1 (mm)
Central span up to 10m from either support	690	2200
Maximum at support "to be verified and confirmed"	690	4000
From support center to 10m either side of support center to 20m Vari		Varies from
"to be verified and confirmed"	4000 to 2200	

Αναλυτικότερα, στην πραγματικότητα η παρεμβολή αυτή όπως ειπώθηκε και προηγουμένως θα γίνεται σαν μια ευθεία με κλίση. Στο λογισμικό μελέτης λόγω αδυναμίας να υποστηριχθεί μια τέτοιου είδους κλίση στη εισαγωγή των διατομών αποφασίστηκε σταδιακή κλιμάκωση αυτών στα στοιχεία του 1m που υπήρχαν απ' τη χάραξη. Έτσι κατασκευάστηκαν 11 διατομές για να εισαχθούν στη συνέχεια στη χάραξη και για να μεταβούμε από διατομή 2.2m σε διατομή 4m. Αυτό βέβαια ισχύει εκατέρωθεν των στηρίξεων που η χάραξη είναι σχεδόν ευθύγραμμη.

Στο σχήμα παρακάτω φαίνεται αναλυτικότερα το πως μεταβάλλεται η διατομή της κύριας δοκού μέσω διαδοχικών κλιμακώσεων για διάστημα 10m από το άνοιγμα προς τη στήριξη.



Σχ. 1.11: Κατά μήκος τομή εκατέρωθεν της στήριζης της κύριας δοκού

Πιο συγκεκριμένα η κλιμάκωση των διατομών που ακολουθήθηκε έγινε με βήμα 0.18m και οι διατομές που δημιουργήθηκαν είχαν τις διαστάσεις του κάτωθι πίνακα:



a
a

Διατομές δοκού h x a (mm)
2200 x 690
2380 x 690
2560 x 690
2740 x 690
2920 x 690
3100 x 690
3280 x 690
3460 x 690
3640 x 690
3820 x 690
4000 x 690

Πιν. 1.2: Πίνακας διατομών κύριας δοκού

Όλα αυτά βέβαια ισχύουν για τις διατομές των ανοιγμάτων των οποίων η χάραξη είναι ευθύγραμμη ως επί τω πλείστων, δηλαδή πιο συγκεκριμένα αφορά τα ανοίγματα R1, R3, R4. Προφανώς το πλάτος επιρροής τους είναι το ένα μέτρο κάτι που ορίστηκε στην οριζοντιογραφία του προγράμματος σαν μικρά ευθύγραμμα τμήματα κάθε φορά πάνω στην καμπύλη χάραξης. Μ' αυτόν τον τρόπο είμαστε όσο πιο κοντά γίνεται στην αρχική μας χάραξη καθώς τα ευθύγραμμα αυτά τμήματα είναι πολύ μικρά και προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό τις αλλαγές κατεύθυνσης που θέλουμε να προσδώσουμε στο φορέα.

Όλα αυτά βέβαια ισχύουν για τα ανοίγματα R1, R3, R4. Ξεχωριστή αναφορά θα πρέπει να γίνει στο άνοιγμα R2 της κύριας δοκού, το οποίο χρήζει ιδιαίτερης αναφοράς και ανάλυσης σε επίπεδο διατομών. Όπως προσέξαμε και απ' την χάραξη είναι το τμήμα με τη μεγαλύτερη αλλαγή κατεύθυνσης αφού ουσιαστικά εκεί πραγματοποιείται η στροφή του φορέα. Είναι εύλογο λοιπόν σ' αυτό το τμήμα να αναπτύσσονται παραπάνω εντατικά μεγέθη κατά την διέλευση των τρένων κάτι το οποίο μας απασχόλησε ιδιαίτερα στο σχεδιασμό και στην επιλογή πάχους δοκού. Για να παραλάβουμε αυτά τα παραπάνω εντατικά μεγέθη που ως επί το πλείστον είναι οριζόντια (φυγόκεντρος, άνεμος), αποφασίστηκε να δοθεί στην κύρια δοκό μία επίκληση που θα βοηθά στην παραλαβή των μεγεθών αυτών. Έτσι αυτό είχε σαν αποτέλεσμα απ' τις στηρίξεις και προς το άνοιγμα να υπάρχει κλιμακωτά για 10m κατά μήκος, όχι μόνο κλιμάκωση του ύψους της διατομής όπως προηγουμένως, αλλά και σταδιακή επίκληση αυτής από 0° στις 15°. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτύχαμε πολύ μεγάλη ανακούφιση της κύριας δοκού, αφού πλέον παραλαμβάνει ευκολότερα τα εντατικά μεγέθη λόγω της ευμενούς επιρροής της επίκλησης που προσδώσαμε για να μεταδώσει στη συνέχεια την ένταση αυτή στα εφέδρανα. Άξιο αναφοράς είναι, ότι η επίκληση είναι αρκετά ήπια και σύμφωνα με τις διατάξεις του ΕΚ-3, ώστε και να μην κινδυνεύω από ανατροπή του τρένου αλλά και να μην υπάρχει πρόβλημα εκτροχιασμού αν η ταχύτητά του είναι σύμφωνη με τη μελέτη.

Στην παρούσα μελέτη ενώ στα ευθύγραμμα τμήματα επιτρέψαμε την κίνηση των συρμών με τη μέγιστη ταχύτητα που επιλέχθηκε στο παρών έργο, δηλαδή τα 80km/h, στο συγκεκριμένο κομμάτι (R2) ορίσθηκε αυστηρά ως ανώτατο όριο τα 50km/h. Αυτό έγινε για λόγους ευστάθειας και ασφάλειας των συρμών, ώστε να είναι σε θέση η δοκός που επιλέξαμε να αναλαμβάνει με ασφάλεια τη φυγόκεντρο που δημιουργείτε λόγω της ταχύτητας αυτής του τρένου. Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό η επίδρασή της για την ασφάλεια του της κίνησης των συρμών είναι ακόμα πιο δυσμενής αν σκεφτούμε το μεγάλο υψόμετρο που είναι τοποθετημένη η γέφυρα και γενικά το σύνολο του έργου. Με άλλα λόγια η φυγόκεντρος μόλις θα συνδυαστεί με τα φορτία ανέμου σε ένα τέτοιο υψόμετρο θα μας προξενήσουν έναν ιδιαίτερα δυσμενή συνδυασμό. Αυτές οι φορτίσεις θα μας επιρρεάσουν μάλλον και κατά κύριο λόγο στο σχεδιασμό της δοκού μετέπειτα. Όμως η επιρροή των φορτίσεων αυτών δεν σταματάει εκεί για ένα τέτοιο έργο. Σημαντική θεωρείται και η δράση τους για το σχεδιασμό των εφεδράνων. Πιο συγκεκριμένα η δοκός μας είναι μια κοίλη ορθογωνική διατομή με μεγάλο ύψος. Από μόνη της επομένως είναι μια αρκετά ελαφριά κατασκευή επιρρεπής σε οριζόντιες φορτίσεις λόγω της μικρής αδράνειας που διαθέτει. Γι αυτό το λόγο υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας ζεύγους δυνάμεων λόγω δημιουργίας ροπής αφού οι οριζόντιες αυτές δυνάμεις δρούν στον συρμό. Επομένως σε συνδυασμό της ύπαρξης οριζοντίων και μάλιστα μεγάλων δυνάμεων με τα μικρά λόγω ελαφριάς κατασκευής κατακόρυφα φορτία, ίσως μας δημιουργήσουν εφελκυσμό σε κάποιο εφέδρανο. Κάτι τέτοιο θα ήταν ολέθριο για το εφέδρανο αφού θα δημιουργούσε μεγάλες βλάβες στο εσωτερικό του και ως κατ' επέκταση θα απειλούνταν η ευστάθεια και η λειτουργικότητα ολόκληρου του έργου.

Το καλύτερο θα ήταν επομένως να προσπαθήσουμε να δώσουμε μια επίκληση και ένα πάχος δοκού που να μας προσφέρουν μια εξασφάλιση έναντι των ανωτέρω επικίνδυνων καταστάσεων, αλλά ταυτόχρονα να είναι σύμφωνα με τις ισχύοντες διατάξεις. Επιπλέον θα πρέπει να προσέξουμε η αύξηση της επίκλησης να γίνει με τρόπο αρκετά ήπιο ώστε να

υπάρχει αίσθημα ασφάλειας στους επιβάτες σε κανονική λειτουργία των συρμών, αλλά και από τεχνικής πλευράς να μην έχουμε φαινόμενα συγκεντρώσεις τάσεων στα σημεία αποκατάστασεις συνέχειας ή κάπου αλλού κάτι που είναι αποφευκταίο όσο γίνεται στις μεταλλικές κατασκευές. Γι' αυτό το λόγο σχεδιάστηκαν ξεχωριστές διατομές για το άνοιγμα R2 και πάλι ανά 1m όπως και πρίν για λόγους ακριβέστερης ανάλυσης μετέπειτα και καλύτερης κατανόησης των εντατικών μεγεθών. Εδώ όμως και λόγω της απότομης αλλαγής στην κατεύθυνση κρίνεται ακόμα πιο αναγκαίος ο διαχωρισμός αυτός των στοιχείων δοκού κατά την προσομοίωση της δοκού στο πρόγραμμα ανάλυσης. Επιπλέον επιλέχθηκε στα πρώτα 10m κατά μήκος που θα γίνεται η μείωση του ύψους της δοκού όπως και στα άλλα τρία ανοίγματα, να γίνεται εφαρμογή και της σταδιακής επίκλισης του φορέα, ώστε να μπορέσουμε στο άνοιγμα που θα έχουμε την μεγαλύτερη εναλλαγή στην κατά μήκος κατεύθυνση, να διαθέτουμε στη δοκό με την πλήρη επίκλιση που τελικά θα έχει. Κατ' αυτόν τον τρόπο θα είναι ικανή από εκείνο το σημείο και μετά να αναλάβει τις διάφορες εντάσεις που θα ορισθούν απ' τους συνδυασμούς φορτίσεων για τις διάφορες καταστάσεις αστοχίας που ορίζει ο κανονισμός. Για να αποφευχθεί για μία ακόμα φορά κάποια συγκέντρωση τάσεων στα σημεία συγκόλλησης αποφασίστηκε το πάχος των διατομών να είναι ενιαίο σε όλο το μήκος της δοκού και αυτό να οριστεί με ακρίβεια απο τους συνδυασμούς σε ΟΚΑ, ώστε να επαρκεί και για τους μετέπειτα ελέγχους. Πιο συγκεκριμένα οι διατομές σε ύψος και πλάτος που επιλέχθηκαν καθώς επίσης και η μορφή των δοκών με επίκλιση βρίσκονται αναλυτικά στα πάρακάτω σχήματα ενώ τα αριθμητικά τους δεδομένα φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί:



Διατομές δοκού hxa (mm)	Επίκλιση διατομών δοκού
2200 x 690	15°
2380 x 690	13.5°
2560 x 690	12°
2740 x 690	10.5°
2920 x 690	9°
3100 x 690	7.5°
3280 x 690	6°
3460 x 690	4.5°
3640 x 690	3°
3820 x 690	1.5°
4000 x 690	0°

Στη συνέχεια έγινε εισαγωγή των διατομών αυτών στο λογισμικό που θα γίνουν οι αναλύσεις και ο φορέας που δημιουργήθηκε στο συγκεκριμένο άνοιγμα είχε την εξής μορφή:



Σχ. 1.12: Τρισδιάστατη απεικόνιση του ανοίγματος R2 της κύριας δοκού

## 2. Φορτία σχεδιασμού εντατικών μεγεθών

### 2.1 Εισαγωγή

Η διαστασιολόγηση ενός τέτοιου έργου απαιτεί ειδικές διατάξεις καθώς δεν είναι κάποιου είδους συμβατική κατασκευή. Αντιθέτως είναι ένα πάρα πολύ μεγάλο έργο με πολλές ιδιομορφίες τόσο στη χάραξη όπως και είδαμε, όσο και στη στατική του επίλυση. Γι' αυτό το λόγο η επιλογή των δράσεων καθώς επίσης και οι συνδυασμοί που θα χρησιμοποιήσουμε κατά τη διαστασιολόγηση θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα αυστηροί ώστε να καλύπτουν κάθε πιθανή μορφή φόρτισης που μπορεί να επιρρεάσει το φορέα. Γι' αυτό αρχικά θα πρέπει να καθοριστούν όλες οι δράσεις που θα επιβαρύνουν τους συρμούς και ως κατ' επέκταση τη γέφυρα ή κατ' ευθείαν τη γέφυρα. Κατ' αυτόν τον τρόπο θα επιτύχουμε πλήρη διαστασιολόγηση όλων των διατομών που εισάχθηκαν μόνο οι εξωτερικές διαστάσεις τους από προηγουμένως στο λογισμικό. Αυτό επιτεύχθηκε μετά από αναλύσεις και μετρήσεις στην εκεί περιοχή που αφορούσαν τις συνθήκες θεμελίωσης αλλά και άλλες δράσεις λόγω της συγκεκριμένης τοποθεσίας και χωροθέτησης του έργου όπως η ένταση του ανέμου λόγω του μεγάλου υψομέτρου. Έτσι καταλάβαμε ποια μεγέθη χρειάζονταν ώστε να τα εισάγουμε στους μετέπειτα συνδυασμούς αστοχίας που θα χρησιμοποιήσουμε για τον εκάστοτε έλεγχο. Πιο αναλυτικά οι δράσεις που κρίθηκαν σημαντικές και κρίσιμες για την κατασκευή και τη διάρκεια ζωής του φορέα διακρίνονται σε τρεις κατά κύριο λόγο κατηγορίες. Η πρώτη είναι τα μόνιμα φορτία που επιρρεάζουν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του το φορέα και τα λαμβάνουμε σε κάθε φόρτιση απαραίτητα, είτε ως έχουν, είτε προσαυξημένα με συντελεστές που θα υπολογισθούν στη συνέχεια. Η δεύτερη κατηγορία είναι τα κινητά φορτία, δηλαδή τα φορτία που οφείλονται στη διέλευση των συρμών και κατά πόσο αυτοί έχουν επιβάτες ή όχι, καθώς και απ' την ταχύτητα του τρένου για φορτίσεις εκτός επιπέδου, που θα μας απασχολήσουν και πιο πολύ.

Ως κατ' έπεκταση πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία να εισαχθούν σωστά για να μην μας οδηγήσουν σε οριακές κατααστάσεις κατά την λειτουργία του φορέα τη στιγμή της διέλευσης των συρμών είτε αυτές αφορούν το αίσθημα ασφάλειας των επιβατών (ΟΚΛ), είτε ακόμα χειρότερα σε αστοχία (ΟΚΑ) του φορέα. Στην πρώτη περίπτωση θα έχουμε κατασκευάσει ένα έργο που δεν θα έχει τόσο μεγάλη προσέλευση πολιτών κάτι που θα ήταν ολέθριο για την οικονομία της περιοχής αφού προορίζεται να καλύπτει τις ανάγκες για μετακίνησεις των ανθρώπων για μεγάλο διάστημα. Στη δεύτερη περίπτωση προφανώς είναι ακόμα πιο ζωτικής σημασίας για την ευστάθεια της κατασκευής αφού πιθανή αστοχία όχι μόνο θα έριχνε σε αξιοπιστία και προσέλευση ατόμων την υφιστάμενη κατασκευή αλλά πιθανόν, ανάλογα και την έκταση της ζημιάς, ίσως να οδηγούσε και σε θύματα. Τέτοιες καταστάσεις επ' ουδενί δεν θέλουμε ως μηχανικοί να φανταστούμε γι αυτό δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στο κομμάτι αυτό.

Εκτός όλων αυτών βασικές προυποθέσεις για την σωστή λειτουργία του έργου θα είναι κατά την κατασκευή του να γίνεται επαρκής επίβλεψη και έλεγχος της ποιότητας των ελασμάτων που καταφθάνουν κάθε φορά από το εργοστάσιο στο εργοτάξιο. Μ' αυτόν τον τρόπο θα αποφευχθούν χονδροειδή σφάλματα στην κατασκευή και κακοτεχνίες καθώς

επίσης και τα υλικά να είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζουν οι ΕΝ1990 έως ΕΝ1999 ή με άλλα σχετικά πρότυπα και προδιαγραφές.

Σημαντικό επίσης είναι να γίνεται τακτική και προσεκτική συντήρηση τόσο των κύριων στοιχείων που επιρρεάζουν άμεσα την εύρρυθμη λειτουργία της κατασκευής όσο και των δευτερευόντων στοιχείων. Παράλληλα βέβαια η χρήση του έργου να γίνεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές που έχουν ορισθεί απ' την κατασκευάστρια εταιρεία και να μην διαπιστώνονται ελλείψεις και παραβάσεις σε κάθε περίπτωση.

Ταυτόχρονα βέβαια για να επαρκεί ο σχεδιασμός θα πρέπει να γίνει πρόβλεψη για παροδικές καταστάσεις όπως είναι η φάση κατασκευής, και σε τι στάδια πρέπει να πραγματοποιηθεί ώστε να μην έχουμε κάποια ένταση παραμένουσα που θα επιβαρύνει μετέπειτα στη φάση λειτουργίας την γέφυρα. Επιπρόσθετα να γίνει μελέτη και για κάποιες τυχηματικές καταστάσεις που μπορούν να προκύψουν και να εμποδίσουν την συνήθη λειτουργία όπως είναι μια πυρκαγιά, πρόσκρουση συρμών από ανθρώπινο σφάλμα ή ακόμα και μια πιθανή τοπική αστοχία σε κάποιο τμήμα του φορέα.

## 2.2 Δράσεις υπολογισμού

Σ' αυτό το κεφάλαιο θα παρατεθούν πιο αναλυτικά οι δράσεις υπολογισμού και σε ποιες καταστάσεις αστοχίας απευθύνονται κυρίως για να γίνει πληρέστερη κατανόηση αυτών, αλλά και για να γίνει πλήρως κατανοητή η επιλογή αυτών απ' τον μελετητή για το συγκεκριμένο έργο. Η επιλογή των δράσεων έγινε έπειτα από προσεκτική μελέτη της συγκεκριμένης περιοχής ώστε να δούμε ποια φορτία χρειάζονται και σε ποια ένταση, αλλά και από τις διατάξεις του ACI-358 για γέφυρες από χάλυβα. Οι οριακές καταστάσεις είναι εκείνες, πέραν των οποίων η κατασκευή δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις ασφαλείας και λειτουργικότητας για το σχεδιασμό και ορίζονται ως:

- Οριακές καταστάσεις αστοχίας (OKA)
- Οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας (ΟΚΛ)

Οι οριακές καταστάσεις αστοχίας αντιστοιχούν σε κατάρρευση ή άλλου είδους αστοχίες μέσω απώλειας ισορροπίας της κατασκευής η αστοχίας λόγω υπερβολικών παραμορφώσεων η αστοχίας λόγω κόπωσης, που θέτουν σε κίνδυνο τις ανθρώπινες ζωές, ενώ οι οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας είναι εκείνες, πέραν των οποίων δεν ικανοποιούνται τα κριτήρια λειτουργικότητας της κατασκευής (μεγάλες παραμορφώσεις ή μετακινήσεις που προκαλούν βλάβες στα στοιχεία πλήρωσης, ή ταλαντώσεις ενοχλητικές για τους επιβάτες). Οι δράσεις οι οποίες επιβάλλονται στην γέφυρα με τη μορφή συνδυασμών για τις προαναφερθείσες κατασκευές σχεδιασμού, διακρίνονται σε:

- Αμεσες, π.χ. συγκεντρωμένα ή ομοιόμορφα κατανεμημένα γραμμικά και επιφανειακά φορτία.
- Έμμεσες, π.χ. επιβαλλόμενη παραμόρφωση λόγω διαφορικής καθίζησης των στηρίξεων, ή θερμοκρασιακές μεταβολές.

Οι δράσεις αυτές ως πρός το χρόνο ταξινομούνται σε:

- Μόνιμες, π.χ. ίδια βάρη της γέφυρας, προσαρτήματα κλπ,
- Μεταβλητές, π.χ. επιβαλλόμενα φορτία σημειακά η κατανεμημένα λόγω των συρμών, φορτία ανέμου,
- Τυχηματικές, π.χ. προσκρούσεις συρμών, σεισμός

Ως προς τη θέση τους οι δράσεις ταξινομούνται σε :

- Καθορισμένες, π.χ. ίδιο βάρος
- Ελεύθερες, π.χ. κινητά επιβαλλόμενα φορτία συρμών

Αυτοί ήταν κάποιοι τυπικοί διαχωρισμοί των δράσεων που επιβαρύνουν τη γέφυρα που διαστασιολογήσαμε κατά το σχεδιασμό.

Σημαντικό τμήμα της έρευνας μας πριν αρχίσουμε τις αναλύσεις ήταν το μέγεθος και ή ένταση των δράσεων αυτών στη διάρκεια ζωής του έργου. Έγιναν πολλαπλές μετρήσεις στα σημεία εγκατάστασης του έργου λόγω του, ότι όπως ειπώθηκε η περιοχή είναι αναπτυσσόμενη και άρα δεν υπήρχε προηγούμενη εμπειρία από ανάλογες κατασκευές. Τελικώς οι δράσεις που αποφασίστηκαν να συμμετέχουν στους διάφορους συνδυασμούς αστοχίας και λειτουργικότητας είναι οι εξής:

- Μόνιμα φορτία δοκού (D), αφορά μόνον τα φορτία τα οποία έχει από μόνη της η κύρια δοκός στη φάση του σχεδιασμού και ορίζεται απ' τις ιδιότητες του υλικού και τις διαστάσεις της διατομής που θα προκύψουν απ' τις οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας. Το ειδικό βάρος του χαλυβα \$235 που χρησιμοποιήθηκε και ορίζεται από συγκεκριμένους πίνακες κατασκευαστών έχει ως εξής:
  - Τδιον βάρος χάλυβα: 78.50 kN/m<sup>3</sup>. Παρακάτω φαίνεται μία σχηματική της δράσης αυτής του ίδιου βάρους της κατασκευής όπως αυτή προέκυψε απ' το λογισμικό ανάλυσης του φορέα μελέτης.



Σχ. 2.1: Φορτία κύριας δοκού λόγω ιδίων βαρών

2. Πρόσθετα μόνιμα φορτία (SDL), γενικά τα φορτία αυτά αναφέρονται σε φορτία επικαλύψεων ή φορτία πληρώσεως, επίπλων κλπ, των κύριων μελών ενός φορέα σε συμβατικά έργα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επειδή εκτός της κύριας δοκού δεν έχουμε κάτι άλλο που να επιβαρύνει το φορέα σαν μόνιμη πρόσθετη δράση, ως πρόσθετα μόνιμα φορτία ορίζονται τα φορτία που επιβαρύνουν κατακόρυφα το φορέα (μπλέ χρώμα στην εικόνα) λόγω της ύπαρξης πλατφόρμας αποβίβασης των επιβατών, ανά τακτά κατά μήκος διαστήματα της δοκού. Βέβαια εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι εξαιτίας του ότι η πλατφόρμα επιβαρύνει απ' τη μία πλευρά της δοκού, δημιουργεί και μόνιμη ροπή (κόκκινο χρώμα στην εικόνα) την οποία πρέπει και να λαμβάνουμε υπ' όψην. Έτσι αυτά ορίσθηκαν ως εξής:



Λόγω πλατφόρμας: 10.90 kN/m<sup>2</sup>

Σχ. 2.2: Φορτία κύριας δοκού λόγω πρόσθετων μόνιμων φορτίων

3. Κινητά φορτία λόγω τροχών του τρένου (L), τα φορτία αυτά αναφέρονται στην κάθετη επιβάρυνση που προδίδει η διέλευση της δοκού κάθε φορά στο τμήμα της κύριας δοκού απ' το οποίο διέρχεται. Αναλυτικότερα οι τιμές των φορτίων θα ορισθούν στη συνέχεια με πίνακα όπου θα φαίνονται ξεκάθαρα οι απόλυτες τιμές τους. Επιλέχθηκε αυτός ο τρόπος εξαιτίας της μεγάλης αλλαγής που υπόκεινται οι τιμές των κατακόρυφων δράσεων απ' την ύπαρξη ή μη επιβατών μέσα στα βαγόνια που συνθέτουν κάθε συρμό. Επιπλέον στους συνδυασμούς μετέπειτα χρειάσθηκε όχι μόνο να ορισθούν οι εντάσεις απ' τα κατακόρυφα φορτία αλλά και ο αριθμός των βαγονιών που αποτελείται ο κάθε συρμός, καθώς υπήρξε ανάγκη από την εργοδότρια εταιρία ακόμα και αυτών ο αριθμός να ποικίλει κατά περίπτωση, ώστε να μην υπάρχουν άσκοπες φορτίσεις σε ώρες μειωμένης κίνησης των πολιτών. Στη συνέχεια φαίνονται οι πιθανοί συνδυασμού αριθμού βαγονιών συρμού ταυτόχρονα με την επιβάρυνση που μπορούν να υποστούν από την ύπαρξη η μη των επιβατών σ' αυτά. Επιπλέον πιο κάτω δίνονται ενδεικτικά και

στιγμιαίες φορτίσεις από την εισαγωγή τους στο sofistik για την διαστασιολόγηση της κύριας δοκού.



Σχ. 2.3: Πιθανοί συνδυασμοί επιβατών και βαγονιών συρμού



Σχ. 2.4: Τυπική φόρτιση μόνο από κατακόρυφα φορτία συρμού με δύο βαγόνι<br/>α και γεμάτα επιβάτες



Σχ. 2.5: Τυπική φόρτιση μόνο από κατακόρυφα φορτία συρμού με τέσσερα βαγόνια γεμάτα επιβάτες



Σχ. 2.6:Τυπική φόρτιση μόνο από κατακόρυφα φορτία συρμού με έξι βαγόνια, δύο γεμάτα επιβάτες και τέσσερα άδεια

4. Φυγόκεντρος που αναπτύσεται στο άνοιγμα R2 λόγω στροφής (CF), είναι η εκτός επιπέδου δύναμη που δρα στη δοκό και αναπτύσεται λόγω της ταχύτητας που έχει ο συρμός πάνω σε στροφή με δεδομένη καμπυλότητα. Πιο συγκεκριμένα είναι μία οριζόντια δύναμη η οποία δρα πάνω στο τρένο λόγω του ότι, ενώ ο συρμός έχει μια καθορισμένη κατεύθυνση, δηλαδή σε ευθύγραμμη κίνηση πριν τη στροφή, παρουσιάζεται αυτή η αλλαγή στην κατεύθυνση. Λόγω της ύπαρξης στροφής στη χάραξη αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργείτε αυτή η δύναμη εκτροπής που έχει φορά αντίθετη με αυτή της στροφής που θέλει να εισέλθει με ασφάλεια ο συρμός ώστε να μπορέσει να διέλθει επιτυχώς, με αποτέλεσμα να δρα ιδιαίτερα επιβαρρυντικά στην κίνηση αυτή των συρμών. Το μέγεθος αυτής δίνεται απ' τον παρακάτω μαθηματικό τύπο. Αξίζει να σημειωθεί η μεγάλη επιρροή της ταχύτητας στο μέγεθος της δύναμης που θα προκύψει τελικά, γι' αυτό το λόγο ορίσθηκε αυστηρά στο άνοιγμα που δρα αυτή να έχουμε μέγιστο όριο ταχύτητας των συρμών 50km/h.

•  $CF = LV^2/(127R)$ 

Στο διπλανο σχήμα φαίνεται με λεπτομέρια ο τρόπος με τον οποίο δρούν τα κινητά κατακόρυφα φορτία αλλά και η φυγόκεντρος σε τυχαίο βαγόνι όταν ο συρμός διέρχεται απ την κύρια δοκό. Ως alpha ορίζεται η γωνία που έχουν τα κατακόρυφα φορτία λόγω της κλίσης που παίρνει ο συρμός για να μπορέσει να διέλθει απ' την στροφή επιτυχώς. Όπως διακρίνεται η φυγόκεντρος εκτός απ την οριζόντια δύναμη, μεταφέρει και μια ροπή στην κύρια δοκό εξαιτίας της απόστασης που υπάρχει απ' το σημείο δράσης της και το κέντρο βάρος της κύριας δοκού. Προφανώς λόγω της επίκλισης που έχουμε δώσει στο άνοιγμα R2 υπάρχει μία ευμενής, για την ευστάθεια του συρμού, ροπή που δρα ανακουφιστικά σε σχέση με την ροπή που δημιουργείται απ' την φυγόκεντρο. Για λόγους όμως ασφαλείας αλλά και επειδή η ροπή αυτή έχει αρκετά μικρή τιμή λόγω της μικρής γωνίας της επίκλισης αποφασίστηκε κατά τη διάρκεια των αναλύσεων στους



διάφορους συνδυασμούς να αμελήσουμε την επιρροή της.

5. Φορτία ανέμου (WL και WS), ορίσθηκαν μετά από μετρήσεις στην περιοχή κατασκευής του έργου. Η επιβάρυνση λόγω των φορτίων ανέμου ποικίλει ανάλογα και με το κατακόρυφο βάρος που φέρουν τα βαγόνια, δηλαδή τα

κατακόρυφα φορτία που υπάρχουν λόγω της ύπαρξης και σε τι μέγεθος των επιβατών των βαγονιών του εκάστοτε συρμού. Αυτό συμβαίνει γιατί τα φορτία ανέμου είναι πλευρικά φορτία και συνήθως επιβαρύνουν περισσότερο και ως κατ' επέκταση είναι κρισιμότερα σε κατασκευές οι οποίες είναι πιο ελαφρές σε κατακόρυφα φορτία και άρα όχι τόσο σταθερές στο επίπεδο που κατά κύριο λόγο εδράζονται. Τα φορτία αυτά τα χωρίζουμε σε δύο κατηγορίες ανάλογα σε ποια κατασκευή δρουν:

a. Η πρώτη περίπτωση, η οποία είναι και η πιο περίπλοκη, αφορά τα φορτία ανέμου που δρουν στον συρμό κατά τη διέλευση του από το κάθε τμήμα της δοκού. Εδώ το κατανεμημένο αυτό φορτίο λόγω πίεσης του ανέμου δρα στα βαγόνια του συρμού που βρίσκονται σε απόσταση από το κέντρο βάρους της κύριας δοκού. Επόμενο είναι λοιπόν εκτός του οριζόντιου φορτίου που πρέπει να αναλάβει η δοκός, έχει να αναλάβει και την ροπή που δημιουργεί αυτή η ανεμοπίεση στα βαγόνια των συρμών ώστε να έχουμε πλήρη ανάλυση της φόρτισης αυτής.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι απόλυτες τιμές των φορτίων των συρμών γενικά, για όλες τις ανωτέρω φορτίσεις που αναλύθηκαν ανάλογα με το βάρος που φέρουν, λόγω της ύπαρξης ή μη των επιβατών στα βαγόνια που τους αποτελούν.

Ονομαστικά φορτία συρμών τρένου			
L <sub>0</sub>	77.10kN		
CF <sub>0</sub>	15.60kN	Empty train	
WIo	2.40kPa		
L <sub>1</sub>	130.30kN		
CF <sub>1</sub>	26.30kN	Full of passengers train	
WI <sub>1</sub>	1.00kPa		

Πίν. 2.1: Ονονμαστικά φορτία συρμών τρένου

b. Η δευτερη περίπτωση είναι με τη μορφή οριζόντιου γραμμικού φορτίου που δρα στο κέντρο βάρους της κύριας δοκού μας. Η τιμή του φορτίου αυτού είναι συγκεκριμένη στην παρούσα εργασία για τους διάφορους συνδυασμούς αστοχίας και λειτουργικότητας και δεν την επιρρεάζουν τα ανωτέρω κατακόρυφα φορτία που αναφέρθηκαν καθώς η δομή της δοκού είναι η ίδια είτε υπάρχει διέλευση τρένου είτε όχι. Επιπλέον λόγω του ότι δρα στο κέντρο βάρους της διατομής έχει μόνο οριζόντια δράση ως δύναμη και καθόλου ροπή όπως είναι εμφανές.



Σχ. 2.7: Φόρτιση λόγω ανεμοπίεσης στη δοκό

- 6. Διαμήκης δύναμη λόγω πρόσφυσης μεταξύ τρένου και δοκού (LF) είναι μία διαμήκης δύναμη ή αλλιώς μη δύναμη πέδησης, η οποία δημιουργείται είτε από πιθανό φρενάρισμα, είτε από επιτάχυνση του συρμού της δοκού κατά την κίνησή του. Με άλλα λόγια η δύναμη αυτή εμφανίζεται όταν έχουμε αυξομειώσεις στην ταχύτητα του συρμού. Όπως και οι προηγούμενες δυνάμεις εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος των κατακόρυφων φορτίων. Πιο αναλυτικά, όσο πιο πολλοί επιβάτες υπάρχουν ανά βαγόνι τόσο πιο δύσκολα αλλάζει ταχύτητα ο συρμός και προφανώς θέλει περισσότερο χρόνο για να φτάσει στο επιθυμητό καθε φορά όριο, γι αυτό και η κίνησή του απ τους επαγγελματίες οδηγούς πρέπει να γίνεται όπως ορίζεται απ' τη μελέτη. Παρακάτω φαίνονται και οι σχέσεις απ' τις οποίες ορίσθηκαν οι δυνάμεις πέδησης των συρμών για διαφορετικές οριακές καταστάσεις. Η πρώτη σχέση αφορά την οριακή κατάσταση αστοχίας απ' οπου υπολογίστηκε και ορίστηκε στους διάφορους συνδυασμούς, ενώ η δεύτερη την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας κατά τον ίδιο τρόπο:
  - Lfe = 0.30xL
  - Lfn = 0.15xL

7. Θερμοκρασιακές μεταβολές (Τ), η φόρτιση αυτή οφείλεται στην πιθανή διαφορά θερμοκρασίας που μπορεί να έχει το εσωτερικό κλειστό τμήμα της κύριας δοκού, απ' το εξωτερικό που είναι σε άμεση επαφή με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας. Γι' αυτό το λόγο, μετά από μελέτες στην τοποθεσία του έργου, κρίθηκε ικανοποιητικό ως φορτίο λόγω μεταβολής θερμοκρασίας, ένα γραμμικό κατανεμημένο φορτίο με σταθερή τιμή 12°C σε όλο το μήκος της γέφυρας, όπως φαίνεται και παρακάτω,



Σχ. 2.8: Φόρτιση κύριας δοκού λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής

8. Διαφορική καθίζηση βάθρων (SE), η οποία μπορεί να επιβαρύνει το φορέα όχι σε βαθμό να επέλθει κάποιου είδους αστοχία, αλλά σίγουρα να επιρρεάσει την αίσθηση ασφάλειας των επιβατών κατά τη συνήθη λειτουργία του έργου. Πιο αναλυτικά, μετά από μετρήσεις που έγινε στο έδαφος θεμελίωσης αποφασίστηκε να γίνει παραδοχή ενιαίας κατακόρυφης διαφορικής καθίζησης 10mm για ένα κάθε φορά βάθρο απ' τα πέντε της γέφυρας μελέτης, ώστε να είμαστε πλήρως καλυμένοι για όλες τις περιπτώσεις.



Σχ. 2.9: Ενδεικτική φόρτιση διαφορικής καθίζησης στο μεσαίο βάθρο

Αυτές ήταν αναφορικά και με λίγα λόγια οι φορτίσεις που θα μας απασχολήσουν με τη δράση τους στο μετέπειτα κομμάτι της ανάλυσης της δοκού στη συγκεκριμένη εργασία. Στα επόμενα κεφάλαια θα ορισθούν οι συνδυασμοί σε κάθε περίπτωση των δράσεων αυτών,
ώστε να πάρουμε τη δράση αυτών που μας δίνουν τα δυσμενέστερα για το φορέα εντατικά μεγέθη και να γίνει τελικά η πλήρης διαστασιολόγηση. Πριν απ' όλα αυτά όμως θα πρέπει να γίνει εύρεση του δυναμικού συντελεστή επιβάρυνσης των φορτίων που οφείλονται λόγω της διέλευσης των συρμών πάνω στη δοκό, ώστε να χρησιμοποιηθεί στους συνδυασμούς της οριακής κατάστασης αστοχίας, όπως συμβαίνει με αντίστοιχους συντελεστές επιβάρυνσης και στις συνήθεις κατασκευές έργων πολιτικού μηχανικού. Η διαφορά εδώ είναι ότι η ιδιαιτερότητα της κατασκευής, μας επιβάλλει να βρούμε ένα συντελεστή που θα απεικονίζει τη δυναμική επιβάρυνση του φορέα, ώστε μ' αυτό τον τρόπο να επιτύχουμε ασφαλή σχεδιασμό.

### 2.3 Εύρεση δυναμικού συντελεστή επιβάρυνσης (impact factor – I)

Η γέφυρα της παρούσας μελέτης είναι μια κατασκευή διαφορετική σε φορτία και σε δομή και γενικά δεν υπάργει κάτι αντίστοιγο με συμβατικές κατασκευές. Γι' αυτό το λόγο έγιναν παραδοχές με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς και διατάξεις για γέφυρες τρένων ώστε να κατασκευαστεί μια ασφαλής και αξιόπιστη κατασκευή που θα μπορεί να αποτελέσει έργο μακράς διάρκειας για τους πολίτες. Αργικά αποφασίστηκε ότι για τα φορτία δεν επαρκεί να τα βάλουμε απλά με τις τιμές που δώσαμε προηγυμένως στους διάφορους συνδυασμούς αστοχίας ή λειτουργικότητας, αλλά θα πρέπει να δοθεί ένας επιβαρυντικός δυναμικός συντελεστής ασφαλείας. Αυτό θα γίνει ώστε, όχι μόνο για να επιτύχουμε την άνεση και το αίσθημα ασφαλείας των επιβατών σε συνήθεις καταστάσεις λειτουργίας των συρμών, αλλά και για να έχουμε μια ασφαλή κατασκευή σε περίπτωση σφάλματος ανθρώπινο ή υποτίμησης λόγω μελλοντικής αύξησης κάποιου μεγέθους. Επιπροσθέτως στην παρούσα εργασία είναι πολύ σημαντική η συμβολή των δυναμικών φορτίων πάνω στη γέφυρα του συρμού και γι' αυτό θα πρέπει να τα λάβουμε σοβαρά υπ' όψην μέσω των φορτικών συντελεστών. Τέτοιες δυνάμεις όπως έχουμε αναφέρει και στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι η φυγόκεντρος, η οποία λόγω της κατεύθυνσής της αν την υποτιμήσουμε μπορεί να αποβεί ολέθρια για τους διερχόμενους συρμούς, αλλά και την επιρροή του ανέμου. Ο άνεμος είναι σημαντικός στην συγκεκριμένη κατασκευή για δύο λόγους. Αρχικά γιατί η κατασκευή μας αποτελεί μία ελαφριά κατασκευή, η οποία όπως και όλες οι τέτοιου είδους κατασκευές είναι επιρρεπείς σε πλάγια φορτία ιδιαίτερα αν πρόκειται να συνδυαστεί με τη δύναμη της φυγόκεντρου στο 2° άνοιγμα, εκεί καταλαβαίνουμε ότι οι δράσεις θα είναι ιδιαίτερα δυσμενείς ακόμα και για τα εφέδρανα που θα πρέπει να τις αναλάβουν στη συνέχεια. Εν συνεχεία βέβαια δεν θα πρέπει να αμεληθεί το μεγάλο υψόμετρο που έχει σηκωθεί μέσω των βάθρων η γέφυρα, κάτι που σε πολλά τμήματα μας προβληματίζει λόγω του ότι η ένταση του ανέμου δεν θα απομειώνεται σε κάποια απ' τις υφιστάμενες συμβατικές κατασκευές της περιοχής. Επομένως ο φορέας μας θα δέγεται όλη αυτή την ένταση που προκύπτει απ' τις μετρήσεις που έγιναν πάνω στις ανεμοπιέσεις της περιοχής. Για όλες λοιπόν αυτές τις δυσμενείς δυναμικές φορτίσεις που αφορούν την κατασκευή μας, επιλέχθηκε να ακολουθήσουμε τις διατάξεις πάνω στα δυναμικά φορτία που ορίζει ο κανονισμός ACI-358 για τέτοιου είδους κατασκευές. Από εκεί ορίσθηκε ένας συνδυασμός φόρτισης της γέφυρας μέσω του οποίου τοποθετώντας τα φορτία που μας όρισε το λογισμικό που θα τα εισάγαμε και θα κάναμε τις μελέτες θα μας εξήγαγε τις ιδιομορφές που θα είχε η κατασκευή απ' αυτή. Έπειτα θα καταλήγαμε στην μικρότερη κατακόρυφη συχνότητα και μέσω σχέσεως που ορίζεται απ' τον ίδιο κανονισμό για γέφυρες πολλαπλών ανοιγμάτων θα γίνει εύρεση του δυναμικού αυτού συντελεστή επιβάρυνσης της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά λάβαμε υπ' όψην μας τον συνδυασμό απ' τον κανονισμό ACI – 358 ο οποίος είναι:

 Case 1 = P + M<sub>CF</sub>, όπου P (=L) είναι το κατακόρυφο φορτίο πο προκύπτει απ' τους διερχόμενους συρμούς και M<sub>CF</sub> η ροπή που προκύπτει απ' την επιρροή της φυγόκεντρου στη δοκό.

Οι αναλύσεις που έγιναν για το συγκεκριμένο συνδυασμό αφορούν όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης της γέφυρας και είχαν να κάνουν με τον αριθμό των βαγονιών, αλλά και με το φορτίο που προσδίδουν οι επιβάτες ανάλογα με το αν γεμίζουν ή όχι κάθε φορά τα βαγόνια του συρμού. Γι αυτό το λόγο επιλέξαμε να λάβουμε υπ' όψην τους συνδυασμούς που μας δίνουν την μικρότερη κατά την κατακόρυφη διεύθυνση της γέφυρας συχνότητα ταλάντωσης, ώστε να είμαστε εντός των ορίων του κανονισμού. Οι ιδιοσυχνότητες που μας έδωσε το πρόγραμμα προς όλες τις διευθύνσεις του φορέα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

No.	LC	frequency	moda	al mass		modal	mass f	Factor	activated
		[Hertz]	X[t]	Y[t]	Z[t]	X[%]	Y[%]	<b>Z[%]</b>	mass [%]*
1	2001	0.337	66.4	73.8	0.0	16.19	18.00	0.00	40.15409
2	2002	0.582	51.8	119.6	0.0	12.63	29.17	0.00	18.78275
3	2003	1.073	19.9	48.3	0.9	4.86	11.77	0.23	33 <b>.1</b> 7483
4	2004	1.822	2.8	0.0	0.0	0.69	0.00	0.01	17.25245
5	2005	2.383	11.1	36.3	17.0	2.70	8.86	4.15	38.82850
6	2006	2.775	24.2	0.2	30.7	5.90	0.05	7.49	30.39519
7	2007	3.785	42.1	0.1	2.1	10.26	0.02	0.50	26.96182
8	2008	4.221	20.5	47.1	4.1	5.01	11.48	1.01	27.62063
9	2009	5.061	52.2	17.2	8.9	12.72	4.19	2.16	34.09723
10	2010	6.076	0.1	7.3	1.7	0.03	1.78	0.42	44.58526
11	2011	6.616	21.3	13.6	0.7	5.20	3.31	0.18	18.02398
12	2012	6.822	36.2	2.4	0.0	8.83	0.59	0.01	23.84673
<b>1</b> 3	2013	8.104	29.5	6.6	50.5	7.21	1.60	12.31	24.26353
14	2014	9.829	0.9	1.0	27.3	0.23	0.24	6.65	24.67702
<b>1</b> 5	<b>201</b> 5	10.108	2.9	14.9	76.4	0.72	3.63	18.63	27.92075
16	2016	10.903	6.2	0.6	17.2	1.51	0.13	4.19	19.30238
17	2017	<b>11.8</b> 33	2.1	2.0	1.8	0.52	0.48	0.43	11.44277
18	2018	12.687	10.1	0.7	10.9	2.46	0.17	2.66	18.27379
19	2019	13.815	0.5	0.6	1.4	0.12	0.14	0.34	17.71585

#### Modal masses - activated mass

Πιν. 2.2: Ιδιοσυχνότητες φορέα λόγω φόρτισης Case1

Πιο συγκεκριμένα στο πίνακα μπορούμε να δούμε στην πρώτη στήλη τον αύξοντα αριθμό των συχνοτήτων ενώ στη δεύτερη τη θέση που είναι αποθηκευμένα στο λογισμικό, κάτι που είναι καθαρά για λόγους εποπτείας και καλύτερης διαχείρησης των αποτελεσμάτων. Στην τρίτη στήλη φαίνεται η απόλυτη τιμή της συχνότητας σε Hertz που προκύπτει μετά την ανάλυση. Οι επόμενες τρεις στήλες δείχνουν τη μάζα της γέφυρας σε τόνους (t) που ενεργοποιείται κάθε φορά, για κάθε διεύθυνση, για την κάθε συχνότητα ταλάντωσης που προκύπτει, ενώ ακολουθούν οι άλλες τρεις στήλες που μας δίνουν ποσοστιαία απεικόνιση της ενεργοποιημένης μάζας ανά κατεύθυνση. Στην τελευταία δε στήλη φαίνεται η ποσοστιαία συνολική μάζα του φορέα που ενεργοποιείται για την κάθε συχνότητα. Επιπλέον απ' τον παραπάνω πίνακα μπορούμε να διακρίνουμε την συχνότητα με τη μικρότερη απόλυτη τιμή που μας ενεργοποιεί την μεγαλύτερη, κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (z), μάζα του φορέα και αυτή είναι η 13<sup>η</sup>, η οποία μας ενεργοποιεί το 12.31% κατά Z.

Αφού βρήκαμε την συχνότητα που χρειαζόμασταν για την συγκεκριμένη κατασκευή που σχεδιάσαμε και για τον δεδομένο συνδυασμό φόρτισης απ' τον κανονισμό ACI-358, τώρα σειρά έχει να αξιοποιήσουμε έναν άλλο πίνακα του κανονισμού που έχει να κάνει με σχέσεις απ' τις οποίες μέσω της συχνότητας της γέφυρας αλλά και το είδος της (αμφιέρειστη ή πολλαπλών ανοιγμάτων) θα καταλήξουμε στον τελικό δυναμικό συντελεστή επιβάρυνσης, που είναι και το ζητούμενο. Παρακάτω μπορούμε να δούμε στο πίνακα που παρατείθεται απ' τον κανονισμό πως υπολογίζεται ο συντελεστής που ψάχνουμε, ενώ οι ελάχιστες τιμές του δυναμικού συντελεστή εξαρτώνται όχι μόνο από τις διάφορες κατηγορίες γεφυρών ανάλογα με τ' ανοίγματα που διαθέτουν αλλά και απ' τον τρόπο σύνδεσης των τμημάτων αυτών μεταξύ τους.

Structure Type	Rubber-tired and Continuously Welded Rail	Jointed rail
Simple-span structures, I = VCF/f <sub>1</sub> -0.1	≥ 0.10	≥ 0.30
Continuous-span structures, I = VCF/2f <sub>1</sub> -0.1	≥ 0.10	≥ 0.30

Πίν. 2.3: Ελάχιστα όρια από διατάζεις ΑCI-358

Στη γέφυρα μελέτης την οποία εξετάζουμε εμείς προφανώς είμαστε στην δεύτερη περίπτωση που αφορά γέφυρες συνεχών ανοιγμάτων, αφού έχουμε τέσσερα ανοίγματα, δηλαδή πάνω από ένα που αντιστοιχεί η πρώτη, ενώ ο τρόπος συνδεσης είναι συγκόλληση των δοκών μεταξύ τους, άρα είμαστε και στη δεύτερη στήλη. Επομένως ο συντελεστής επιβάρυνσης δεν μπορεί να είναι μικρότερος από το 1.3 που ορίζεται από τον ισχύοντα κανονισμό.

Εφαρμόζοντας στη συνέχεια τη δεύτερη σχέση η οποία είναι αυτή που αντιπροσωπεύει την περίπτωση της γέφυράς μας και για τη συχνότητα που ενεργοποιούσε το μεγαλύτερο ποσοστό της κατακόρυφης μάζας δηλαδή την  $13^{\eta}$  (f<sub>13</sub> = 8.104Hz), θα υπολογίσουμε έναν δυναμικό συντελεστή επιβάρυνσης περίπου ίσο με 1. Αυτό έγινε γιατί εισάγαμε συχνότητα διέλευσης τρένων (VCF) ίση με 0.002 που αντιστοιχεί σε ένα τρένο ανά 10 λεπτά (κάτι που θα χρησιμοποιήσουμε και μετέπειτα στους κύκλους φόρτισης της κύριας δοκού λόγω κόπωσης) και ως f<sub>1</sub> του πίνακα, την f<sub>13</sub> που προέκυψε απ' τα αποτελέσματα των αναλύσεων. Άρα τελικά ο φορτικός δυναμικός συντελεστής που θα χρησιμοποιηθεί στους μετέπειτα συνδυασμούς αστοχίας και λειτουργικότητας που θα αναλυθούν θα είναι αυτός που ορίζεται ως ελάχιστος απ' τον κανονισμό, αφού προέκυψε το κάτω όριο αυτού μεγαλύτερο από αυτό που υπολογίσαμε, και ορίζεται ως I = 1.3.

Τελειώνοντας αυτό το στάδιο, καταφέραμε εκτός του δυναμικού συντελεστή που ήταν και ο βασικός μας στόχος, να βρούμε, να πάρουμε και μια μικρή ιδέα της συμπεριφοράς της γέφυρας μας για την μετέπειτα προδιαστασιολόγηση, η οποία θα μας φέρει και ένα βήμα πριν την τελική οριστικοποίηση των διαστάσεων από τους συνδυασμούς οριακής κατάστασης αστοχίας. Ας δούμε όμως, πως θα γίνει αυτή η προδιαστασιολόγηση και πώς θα επιτευχθούν όλα αυτά.

### 2.4 Προδιαστασιολόγηση κύριας δοκού

Σ' αυτό το κεφάλαιο θα γίνει εκτενής περιγραφή του τρόπου με τον οποίο θα καθορίσουμε όλες τις διαστάσεις της κύριας δοκού, ώστε να είναι έτοιμη μετέπειτα να υποβληθεί στους συνδυασμούς φορτίσεων που απαιτούνται για τις οριακές καταστάσεις. Νωρίτερα έχει γίνει αναφορά των διαστάσεων των διατομών κάθε φορά της κύριας δοκού, και πώς αυτές μεταβάλλονται απ' τις στηρίξεις προς τα ανοίγματα. Δηλαδή έχει δειχθεί (και με σχήματα) η μεταβολή του ύψους του κορμού της διατομής που μειώνεται όσο πάμε από τις στηρίξεις προς τα ανοίγματα. Δηλαδή έχει δειχθεί (και με σχήματα) η μεταβολή του ύψους του κορμού της διατομής που μειώνεται όσο πάμε από τις στηρίξεις προς τα ανοίγματα. Αυτό που δεν έχει αναφερθεί καθόλου και θα μας απασχολήσει κατά κύριο λόγο εδώ είναι το μέγεθος του πάχους μιας τέτοιας διατομής. Οι διαστάσεις του πλάτους και του ύψους ορίσθηκαν νωρίτερα ανάλογα με τις ανάγκες της δοκού για ενίσχυση περισσότερο στις στηρίξεις. Γι αυτό το λόγο εδώ θα αποφασιστεί γι' αυτές τις διαστάσεις στη δεδομένη χάραξη ποιο είναι το πιο κατάλληλο πάχος. Αυτό βέβαια δεν μπορεί να γίνει αμέσως αλλά μετά απο δοκιμές που έγιναν πάνω στο φορέα. Οι δοκιμές αυτές είχαν ως ενδεικτική φόρτιση για προδιαστασιολόγηση αυτή που και πάλι έρχεται να μας ορίσει ο κανονισμός ACI-358 και είναι η εξής:

Case 2 =  $IxP + CF + IxM_{CF}$ , όπου Ι ο δυναμικός συντελεστής που ορίσθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, P (=L) τα κατακόρυφα φορτία της δοκού λόγω της διέλευσης

συρμών, CF η οριζόντια φυγόκεντρος δύναμη και  $M_{CF}$ η ροπή που δημιουργείται απ' τη φυγόκεντρο στο κέντρο βάρους της κύριας δοκού

Στην φόρτιση αυτή όπως και προηγουμένως εισάγαμε στο λογισμικό κάθε πιθανή μορφή φόρτισης που μπορεί να επιφέρει μια διέλευση συρμού και όπως αυτές ορίσθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, ανάλογα τον αριθμό των βαγονιών και των επιβατών μέσα σ αυτά. Η οριζόντια φυγόκεντρος δύναμη ορίσθηκε ανάλογα με το κατακόρυφο φορτίο και μάλιστα κάθε φορά στη θέση που βρίσκει εφαρμογή αυτό. Αυτό έγινε για να μην μας παρουσιάσει στα αποτελέσματα το πρόγραμμα σε άλλο σημειο τη μέγιστη τάση λόγω κατακορύφου και σε άλλο λόγο της αντίστοιχης απ' αυτό φυγόκεντρο. Με άλλα λόγια όπως διέρχεται ο συρμός κάθε φορά απ' τη γέφυρα η φυγόκεντρος και η αντίστοιχη κατακόρυφη αξονική δύναμη πρέπει να έχουν κάθε φορα το ίδιο σημείο εφαρμογής, κάτι που να αντικατοπτρίζεται και στα διαγράμματα εντατικών μεγεθών μετέπειτα. Η ροπή της φυγόκεντρου εισάχθηκε απ' τον μελετητή στο πρόγραμμα, αλλά με την δέουσα προσοχή ώστε να συμβαδίζει κι αυτή αντίστοιχα με τα προαναφερθέντα δύο μεγέθη. Τέλος τα μεγέθη του κατακόρυφου φορτίου και της ροπής προσαυξήθηκαν για λόγους ασφαλείας, όπως ορίζει ο κανονισμός.

Αποφασίστηκε για λόγους απλότητας αλλά και συνέχειας της δοκού, να διατηρήσουμε στις αναλύσεις μας σταθερό πάχος διατομής. Με τις συνθήκες αυτές έγιναν αρκετές δοκιμές πάνω στο φορέα αλλάζοντας κάθε φορά το μέγεθος του πάχους ώστε να επαρκεί και να πετύχουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα για τη συγκεκριμένη φόρτιση. Έτσι προέκυψαν κατά τις αναλύσεις οι εξής χαρακτηριστικές διατομές, η πρώτη αναφέρεται στο



άνοιγμα και η δεύτερη στη στήριξη, ενώ στο ενδιάμεσο με το ίδιο πάχος το ύψος μεταβάλεται γραμμικά για μήκος 10m όπως έχουμε δείξει.

Τα αντίστοιχα διαγράμματα που μας έδωσε το πρόγραμμα για τις ανωτέρω διατομές ώστε να γίνουν και οι έλεγχοι ότι επαρκούν είναι τα ακόλουθα:



Σχ. 2.11: Διάγραμμα ροπών για μέγιστη ροπή στο άνοιγμα



Σχ. 2.12: Διάγραμμα ροπών για μέγιστη ροπή στη στήριζη

Απ' την μέγιστη ροπή που μας δίνει το πρώτο διάγραμμα διαστασιολογήθηκε η διατομή στο άνοιγμα, η οποία διαθέτει M<sub>el,Rd</sub> = 11532 kNm εμφανώς μεγαλύτερο απ' την δρώσα ροπή εκεί που είναι σχεδόν η μισή. Αντίστοιχα από το δεύτερο διάγραμμα ροπών προέκυψε M<sub>el,Rd</sub> = 78567kNm και αυτή ιδιαίτερα αυξημένη σε σχέση με τη δρώσα. Αυτή η άνεση σ αυτό το στάδιο επιλέχθηκε ώστε να είμαστε καλυμένοι όσο γίνετε στη συνέχεια για τους πιο δυσμενείς συνδιασμούς που θα μας απασχολήσουν κατά κύριο λόγο. Επιπλέον να είμαστε σε κάθε περίπτωση εντός της ελαστικής περιοχής όπως προβλέπεται απ' τις ισχύουσες διατάξεις του κανονισμού για τον σχεδιασμό γεφυρών.

#### 2.5 Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας αυτό το κεφάλαιο έχουμε ολοκληρώσει την ενσωμάτωση όλων εκείνων των στοιχείων τα οποία με τις κατάλληλες διατάξεις, θα μας επιφέρουν την επίλυση του προβλήματος. Αρχικά ορίσαμε ονομαστικά αυτή τη φορά αλλά και με τις απόλυτες τιμες τους, τα φορτία που θα επεξεργασθούμε και θα εισάγουμε με τη χρήση των διαφόρων συνδυασμών που θα προκύψουν απ' τον κανονισμό για την εκάστοτε περίπτωση. Εν συνεχεία είδαμε πως προέκυψε ο δυναμικός συντελεστής επιβάρυνσης της κύριας δοκού τον οποίο θα χρησιμοποιήσουμε κατά κόρων στη συνέχεια για λόγους ασφαλείας στην κατασκευή μας. Αυτό βέβαια έγινε μέσω ενός συνδυασμού φορτίσεων ο οποίος μας υποδείχθηκε απ' τον κανονισμό, ώστε να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα. Έπειτα με συνδυασμό φόρτισης που και πάλι μας επιβλήθηκε απ' τον ACI – 358, αλλά και από πολλές επαναλήψεις στο λογισμικό μελέτης, καταλήξαμε στο ενιαίο πάγος που θα έγουν όλες οι διατομές που συνθέτουν τον φορέα μας κάθε φορά. Τέλος μέσω των διαγραμμάτων που προέκυψαν έγιναν οι απαραίτητοι έλεγχοι ώστε να εξασφαλίσουμε ότι η προδιαστασιολόγηση που έγινε είναι συμβατή με τον κανονισμό, αλλά και με τις αντοχές του υλικού και της διατομής που επιλέχθηκαν. Έτσι θα είμαστε πιο κοντά στην τελική διαστασιολόγηση που θα προκύψει απ' τις αναλύσεις σε οριακή κατάσταση αστοχίας κυρίως αλλά και λειτουργικότητας, για να μην χρειαστούν και πάλι αρκετές επαναλήψεις κάτι που θα έδινε επιπλέον υπολογιστικό φόρτο στη μελέτη του προβλήματος. Έγινε επομένως η προετοιμασία ώστε στο επόμενο κεφάλαιο να ξεκινήσει η ουσιαστική διαστασιολόγηση του φορέα, με την οριστικοποίηση των διαστάσεων σε όλες τις διευθύνσεις όλων των διατομών, αλλά και οι έλεγχοι αυτών προς κάθε δρώντα συνδυασμό. Όλα αυτά όμως δεν μπορούσαν να γίνουν χωρίς να ορισθεί έστω και μ αυτόν τον τρόπο ένα πάχος αρκετά κοντά, θέλουμε να πιστεύουμε, στο πραγματικό, ώστε να μπορεί πρόγραμμα να τρέχει αναλύσεις και να μας δίνει ρεαλιστικά μεγέθη στα διαγράμματα εντατικών μεγεθών.

### 3. Έλεγχοι σε οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ)

### 3.1 Εισαγωγή

Ο βασικός στόχος κατά το σχεδιασμό μιας κατασκευής είναι η διασφάλιση ενός ικανοποιητικού επιπέδου ασφαλείας έναντι αστοχίας. Πέραν αυτού επιβάλλεται η διεξαγωγή ελέγχων λειτουργικότητας για την αποφυγή υπερβολικών παραμορφώσεων και ταλαντώσεων των στοιχείων της κατασκευής, ελέγχων κόπωσης για τα μέλη που υπόκεινται σε μεγάλο αριθμό διακυμάνσεων τάσεων λόγω επαναλαμβανόμενης φόρτισης και τέλος ελέγχου έναντι πυρκαγιάς, προκειμένου να διατηρηθεί η σταθερότητα της κατασκευής για συγκεκριμένο κατ' ελάχιστο χρονικό διάστημα, ώστε να προλάβουν τα σωστικά συνεργεία να απεγκλωβίσουν τους επιβάτες χωρίς την ύπαρξη κινδύνου άμεσης εκτροπής του συρμού.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφονται οι έλεγχοι στην οριακή κατάσταση αστοχίας και πιο συγκεκριμένα οι έλεγχοι επαρκούς αντοχής των διατομών και ευστάθειας του φορέα της κύριας δκού. Η επάρκεια αυτή θα πρέπει να αποδεικνύεται τόσο στην τελική φάση λειτουργίας όσο και σε όλες τις ενδιάμεσες φάσεις ανέγερσης της κατασκευής. Επιπλέον πρέπει να ελέγχεται η στατική ισορροπία του φορέα ή τμημάτων του, η επάρκεια της θεμελίωσης κλπ.

Με άλλα λόγια η οριακή κατάσταση αστοχίας συνδέεται με την αστοχία του έργου ή μερών αυτού και σχετίζεται με την ευστάθεια του και την προστασία των ατόμων και αντικειμένων. Για την εν λόγω εξεταζόμενη δόμηση η οριακή κατάσταση αστοχίας συνδέεται με την:

- Απώλεια ισορροπίας του φορέα, ως στερεού σώματος
- Την απώλεια αντοχής του φορέα ή μεμονωμένων τμημάτων του λόγω υπερβολικής πλαστικοποίησης, απώλεια ευσταθείας, αστοχία συγκολλήσεων κλπ.

Επομένως ο σχεδιασμός που θα γίνει μέσω της οριακής κατάστασης αστοχίας πρέπει να γίνει με ιδιαίτερη προσοχή απ' το μελετητή. Πιθανή μάλιστα παράλειψη ή υποτίμηση ως προς το εύρος ή τη σημασία κάποιας δράσης ή συνδυασμού φορτίσεων μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε φαινόμενα αστοχίας του έργου, είτε αυτή γίνει άμεσα δηλαδή στην αρχή του έργου, είτε γενικά κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Ένα έργο μάλιστα όπως το συγκεκριμένο, το οποίο είναι ένας συρμός τρένου monorail υπερυψωμένο μάλιστα σε απόσταση πάρα πολύ μεγάλη σε σχέση με την επιφάνεια της γης, θα πρέπει να είμαστε ακόμα πιο προσεκτικοί, καθώς πιθανή αστοχία θα οδηγούσε όχι μόνο σε υλικές ζημιές, που είναι το λιγότερο αν το έργο φτάσει σε οριακή κατάσταση αστοχίας, αλλά να υπάρξει και απώλεια ανθρώπινων ζωών. Κάτι τέτοιο προφανώς θα καθιστούσε άμεσα το έργο ως ανασφαλές και αναξιόπιστο στα μάτια των πολιτών, αλλά βέβαια το κόστος μιας τέτοιας αστοχίας θα ήταν ανυπολόγιστο για μια τόσο μεγάλη και ακριβή κατασκευή η οποία απ' την μια στιγμή στην άλλη θα ήταν από δείγμα πολιτισμού και αναβάθμισης της περιοχής, ένα κακοφτιαγμένο έργο δευτέρας διαλογής.

Όλα αυτά ελπίζουμε ότι δεν θα συμβούν καθώς θα λάβουμε όχι μόνο τους πιο δυσμενείς συνδυασμούς που μπορούν να προκύψουν σε οριακή κατάσταση αστοχίας στην συγκεκριμένη περιοχή, αλλά και θα τους προσαυξήσουμε και με τον δυναμικό συντελεστή ασφαλείας που βρήκαμε προηγουμένως, για ακόμα πιο μεγάλη άνεση της κατασκευής κατά τη συνήθη λειτουργία των συρμών σ' αυτή.

### 3.2 Συνδυασμοί οριακής κατάστασης αστοχίας

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή στο κεφάλαιο αυτό θα αναφέρουμε ονομαστικά του συνδυασμούς για την οριακή κατάσταση αστοχίας του έργου, πέραν των οποίων θα επέλθει είτε μερική είτε ολοκληρωτική κατάρρευση του φορέα. Γι' αυτό το λόγο δείξαμε τη δέουσα προσοχή όταν έγιναν οι συγκεκριμένοι έλεγχοι απ' τα διαγραμμάτα των δρώντων μεγεθών που προέκυψαν για τη δοκό σχεδιασμού. Πριν όμως απ' τους ελέγχους αντοχής διατομών της κύριας δοκού θα αναφερθούμε στους συνδυασμούς που των χρησιμοποιήθηκαν και πώς απ' αυτούς θα καταλήξουμε στα διαγράμματα εντατικών μεγεθών που επιθυμούμε τελικά. Όπως έχουμε δείξει μέχρι τώρα, έχουμε καταφέρει να σχεδιάσουμε την κύρια δοκό όσον αφορά τη χάραξη και τη θέση των εφεδράνων. Επιπλέον έχουμε καταλήξει όσο γίνεται στις τελικές διαστάσεις των διατομών του τελικού φορέα. Όλα αυτά θα τα χρησιμοποιήσουμε σ' αυτό το στάδιο ώστε να οριστικοποιήσουμε το πάχος των διατομών, το οποίο θα διατηρήσουμε κι εδώ σταθερό, μέσω δοκιμών απ' τους συνδυασμούς αστοχίας, κάτι αντίστοιχο δηλαδή με την προδιαστασιολόγηση μόνο που εδω οι συνδυασμοί θα είναι δυσμενέστεροι και θα προκύψουν οι τελικές διατομές της δοκού. Οι συνδυασμοί μελέτης δίνονται, όπως και οι προηγούμενοι απ' τον ACI-358 και είναι οι εξής:

Strength 1 =	1.25(0.9) x D + 1.50(0.65) x SDL+1.75 x (L x I+CF or HF)+1.4 x LFe			
	+PS+CR+SH+FR+β x T			
Strength 2 =	Not Applicable			
Strength 3 =	1.25(0.9) x D + 1.50(0.65) x SDL+ 1.4(1.0) x L(empty)			
	+1.4 x WS+1.4 x WL2+PS+CR+SH+FR+β x T			
Strength 4 =	1.50 x D + 1.50 x SDL+PS+CR+SH+FR+β x T			
Strength 5 =	1.25(0.9) x D + 1.50(0.65) x SDL+1.35 x (L+I+CF or HF)+ 1.40 x LFe			
	+0.4 x WS +WL1+PS+CR+SH+β x T			

Τα σύμβολα που χρησιμοποιήθηκαν στους παραπάνω συνδυασμούς αντιπροσωπεύουν τα εξής εντατικά μεγέθη:

- D (dead loads): τα μόνιμα φορτία που αναφέρονται μόνο στα ίδια βάρη της κύριας δοκού,
- SDL (super imposed dead loads): αντιπροσωπεύει τα πρόσθετα μόνιμα φορτία της δοκού, που όπως έχουμε πει στην παρούσα μελέτη επειδή δεν έχουμε πρόσθετα φορτία όπως στις συνήθεις κατασκευές, μ' αυτό το συμβολισμό θα εννοούμε από δώ και πέρα την επιβάρυνση της κύριας δοκού απ' τις πλατφόρμες που υπάρχουν ανά διαστήματα κατά μήκος της χάραξης,
- L (live loads): αφορά τα φορτία που επιβαρύνουν τη δοκό κατά διέλευση των συρμών και αναφέρεται μόνο στα κατακόρυφα φορτία που μεταδίδονται απ' τους τροχούς του συρμού όπως φαίνεται και στο πάρακάτω σχήμα, όπου προσοχή αντί για L χρησιμοποιεί το συμβολισμό P αλλά αναφέρεται ακριβώς στα ίδια φορτία χωρίς καμία διαφορά,



Σχ. 3.1: Κατακόρυφα φορτία συρμών

Παρακάτω θα δείξουμε γι' αυτά τα κατακόρυφα φορτία πως μεταβάλλεται το εύρος τους ανάλογα με τον αριθμό των επιβατών μόνο, που υπάρχουν σ' αυτά. Άρα λοιπόν έχουμε τα εξής διαφορετικά φορτία που μπορεί να υπάρξουν σ ένα βαγόνι κατά τη λειτουργία του:

ASCE 21 Reference	Loading Condition	No. of pass./ car	A/B Car Mass (kg)	Axle Load (kN)
AW0	Empty	0	15,000	73.6
AW1	Seated	17	16,190	79.4
AW2	Seated+4 passengers/m <sup>2</sup>	17+69=86	21,020	103.1
AW3	Seated+6 passengers/m <sup>2</sup>	17+103=120	23,400	114.7
AW4	Seated+8 passengers/m <sup>2</sup>	17+138=155	25,850	126.8

Πιν. 3.1:Φορτία βαγονιών συρμού ανά άζονα

Στον παραπάνω πίνακα μπορούμε να δούμε αρχικά μία ενδεικτική ονομασία για την κάθε φόρτιση, η οποία είναι για λόγους κατανόησης απ' το μελετητή και τίποτα παραπάνω, έπειτα στη δεύτερη στήλη τις συνθήκες φόρτισης ανάλογα με το αν υπάρχουν επιβάτες στα βαγόνια, και αν ναι πόσοι είναι, αφού ανάλογα με το μέγεθός τους αυξάνεται. Στην Τρίτη στήλη ο σχεδιασμός που έχει γίνει για την χωρητικότητα των βαγονιών σε επιβάτες που είναι καθιστοί και σ αυτούς που είναι όρθιοι, ενώ στις δύο τελευταίες στήλες δίνονται οι συνολικές φορτίσεις ανά άξονα για την κάθε κατηγορία φόρτισης, σε μάζα (kg) και σε δύναμη(kN), όπου η τελευταία στήλη είναι και αυτή που θα χρησιμοποιήσουμε μετέπειτα στους συνδυασμούς που αναφέραμε

- I (impact factor): είναι ο δυναμικός συντελεστής τον οποίο βρήκαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο και θα προσαυξάνει τα εντατικά μεγάθη που αφορούν τα φορτία των συρμών, καθώς αυτά είναι που θα επιβαρύνουν με δυναμική ένταση τον φορέα με τη στιγμιαία κάθε φορά ύπαρξη τους, λόγω της ταχύτητας του τρένου,
- CF (centrifugal loads): συμβολίζει την φυγόκεντρο δύναμη η οποία ως γνωστόν αναπτύσσεται στο κέντρο βάρους του διερχόμενου οχήματος λόγω της ταχύτητας πορείας που έχει κατά τη διάρκεια διέλευσης από τις διάφορες στροφές. Όσον αφορά την συγκεκριμένη κατασκευή και χάραξη, αναφέρεται στη διέλευση συρμών απ' το άνοιγμα R2 μόνο όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο των δράσεων νωρίτερα το οποίο έχει έντονη καμπύλωση κατά μήκος, ανάμεσα στα δύο εφέδρανα που το οριοθετούν.

Παρακάτω δίνεται σκίτσο στο οποίο φαίνονται πολλά απ' τα προαναφερθέντα μεγέθη όπως είναι η εξέδρα επιβίβασης-αποβίβασης, καθώς και το σημείο

εφαρμογής της φυγόκεντρου την οποία αναλύσαμε μόλις, για να καταστεί σαφές πως αυτή δρά στο κέντρο βάρους της δοκού. Επιπλέον φαίνονται και οι διαστάσεις τυχαίου βαγονιού για κλειστές πόρτες όπως αυτό έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για το συγκεκριμένο έργο,



Σχ. 3.2: Τυπιική μορφή βαγονιού συρμού κατά τη διέλευσή του από στροφή με ύπαρξη πλατφόρμας

 LFe (emergency longitundinal braking): αναφέρεται κυρίως στη δύναμη πέδησης που δημιουργείται στους άξονες των βαγονιών κατά την αυξομείωση της ταχύτητας πορείας του συρμού κάθε φορά. Με τον συγκεκριμένο συμβολισμό εννοούμε τον συνδυασμό της διαμήκους αυτής δύναμης που αναπτύσσεται σε οριακή κατάσταση αστοχίας μόνο και δεν αφορά άλλες οριακές καταστάσεις. Μάλιστα απ' τις σχέσεις που είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο φαίνεται ότι η δύναμη αυτή σε σχέση με αυτή των άλλων καταστάσεων είναι διπλάσιου μεγέθους και επομένως θα πρέπει να εισάγουμε με προσοχή κάθε φορά ώστε να μην γίνει κάποιο λάθος στους συνδυασμούς, ανάλογα την οριακή κατάσταση που απευθυνόμαστε,

- Τ (temperature): ορίζει την ένταση των θερμοκρασιακών μεταβολών και όπως αυτές έχουν ορισθεί από μετρήσεις και αναλύσεις στο κλίμα της περιοχής μελέτης του έργου. Στο παρών έργο κατασκευής είναι η πιθανή μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας που μπορεί να υπάρξει στη διατομή της κύριας δοκού, ανάμεσα στην εξωτερική πλευρά που είναι σε άμεσο αντίκτυπο με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και από την κλειστή εσωτερική πλευρά της κοίλης ορθογωνικής διατομής,
- L<sub>0</sub> (live load 0): συμβολίζει όπως και το σκέτο L τα φορτία των επιβατών που μεταβιβάζονται στην δοκό λόγω της διέλευσης του συρμού, μόνο που σ' αυτή την περίπτωση μας καθιστάται συγκεκριμένη η επιλογή μόνο της πρώτης σειράς φορτίων όπως παρατέθηκαν και στον πίνακα που αφορά φορτία με μηδενικό το βάρος των επιβατών,
- PS (prestress effects): αφορά δυνάμεις προεντάσεως διατομών μπετόν, δεν μας αφορά στην περίπτωσή της συγκεκριμένης κατασκευής που αποτελείται μόνο από χάλυβα,
- CR (creep and locked in erection stress): αφορά φαινόμενα ερπυσμού και χαλάρωσης διατομών μπετόν, δεν μας αφορά στην περίπτωσή της συγκεκριμένης κατασκευής που αποτελείται μόνο από χάλυβα,
- β: είναι ο συντελεστής επιβάρυνσης για τις θερμοκρασιακές μεταβολές, ο οποίος κυμαίνεται γενικά, αλλά εμείς για λόγους ασφαλείας και πληρότητας θα πάρουμε την δυσμενέστερη τιμή αυτού η οποία είναι ίση με 1,
- SH (shrinkage): συρρίκνωση και πάλι διατομών μπετόν άρα δεν μας αφορά και πάλι στην περίπτωσή της συγκεκριμένης κατασκευής που αποτελείται μόνο από χάλυβα,
- WL<sub>1</sub> (wind on live load-1): με τον συμβολισμό αυτό θα εννοούμε τα φορτία ανέμου εναλλασώμενης έντασης που δρούν πάνω στο συρμό ενώ αυτός διέρχεται απ' την κύρια δοκό. Το μέγεθος αυτής της φόρτισης ποικίλει και καθορίζεται απ' τις συνθήκες που επικρατούν στην συγκεκριμένη περιοχή που θα κατασκευαστεί

το έργο και συγκεκριμένα την ένταση των ανέμων. Γι' αυτό το λόγο έγιναν μετρήσεις με ειδικά όργανα και καταλήξαμε στις κλιμακώσεις που φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα. Αρχικά στην πρώτη στήλη έχουμε την κατάσταση του συρμού που διέρχεται απ' τη δοκό, στη δεύτερη και την τρίτη την ταχύτητα του ανέμου κάθε φορά σε διαφορετική μονάδα μέτρησης, και στην τελευταία στήλη την πίεση του ανέμου που επιβαρύνει για κάθε κατηγορία την κατασκευή μας

System Operating Condition	Wind Speed (km/h)	Wind Speed (m/s)	Wind pressure (kPa)
Normal operation	<72 km/h	20.0	0.48
Normal operation with 25% degradation allowed	<88 km/h	24.4	0.72
Reduced train performance (may be manual) allowed	<105 km/h	36.1	1.03
System will not operate	>105 km/h	36.1	1.03
System structural design (without structural damage) (including <b>empty</b> stored trains on the guidebeam)	<160 km/h	44.4	2.4



Στην περίπτωση μας για λόγους ασφαλείας της κατασκευής, για κάθε φόρτιση βαγονιού εκτός του άδειου που θα αναλυθεί παρακάτω, θα εισάγουμε στους συνδυασμούς μας τη μέγιστη τιμή για βαγόνια με κάποιο αριθμό επιβατών η οποία είναι 1kPa,

- WL<sub>2</sub> (wind on live load-2): αφορά τα φορτία ανέμου εναλλασώμενης έντασης που δρούν πάνω στους συρμούς που διέρχονται πάνω στην δοκό όπως και WL<sub>1</sub> προηγουμένως, αλλά σ' αυτήν την περίπτωση αφορά την περίπτωση που τα βαγόνια των συρμων είναι κενά και μόνο, χωρίς τους υπόλοιπους συνδυασμούς. Επομένως όπως προκύπτει απ' τον παραπάνω πίνακα η τιμή της πίεσης του ανέμου πάνω στον συρμό σε μια τέτοια περίπτωση θα είναι σταθερή και ίση με 2.4kPa,
- WS (wind on structure): το σύμβολο αυτό αφορά την πίεση του ανέμου που δρα πάνω στην κύριο δοκό απευθείας όπως έχουμε δείξει και με διάγραμμα σε προηγούμενο κεφάλαιο και αφορά σταθερής τιμής εναλλασόμενης έντασης με

τιμή 2.4kPa αφού η δομή της είναι μία κοίλη ορθογωνική διατομή κενή στο εσωτερικό του, και επομένως προτιμήσαμε την τιμή που ισχύει και για τους συρμούς χωρίς επιβάτες και είναι και η δυσμενέστερη του πίνακα που έχουμε απ' τον κανονισμό

Τα φορτία ανέμου σε μια τέτοια ελαφριά κατασκευή σαν αυτή που γίνεται η συγκεκριμένη μελέτη έχουν ιδιαίτερη σημασία για τα τελικά εντατικά μεγέθη. Όπως μπορούμε εύκολα να καταλάβουμε και από διάφορες συνήθεις κατασκευές στην καθημερινή μας ζωή, οι πιο ελαφρές είναι και οι πιο ευάλωτες σε τέτοιου είδους φορτία, σε αντίθεση με αυτές πού κατασκευάζονται από μπετόν ή άλλα συναφή υλικά, τα οποία έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τους το μεγάλο ίδιο βάρος, σε συνάρτηση βέβαια με τις μεγάλες, σε σχέση με αντίστοιχες από χάλυβα. Αυτό συμβαίνει γιατί τα φορτία αυτά του ανέμου συνήθως έχουν πλάγια, σε σχέση με το επίπεδο έδρασης των κατασκευών κατεύθυνση και επιβαρύνει τις κατασκευές κατά την διεύθυνση την οποία δεν διαθέτουν τόσο μεγάλη ροπή αδράνειας, και είναι πιο ασθενής. Εκτός αυτού, λόγω αυτής της ιδιότητάς του στην κατεύθυνση που δρα πάνω στις κατασκευές, πολλές φορές δημιουργεί ζεύγη ροπών κάτι που είναι αρκετά επιβαρυντικό για την εκάστοτε θεμελίωση των διαφόρων κατασκευών και δημιουργεί επιπλέον προβλήματα στην ευστάθειά της. Μάλιστα αυτές οι καταστάσεις που προκαλεί η φόρτιση λόγω ανέμου, πρέπει να διαχειριστούν αποτελεσματικά απ' τον μελετητή στην εκάστοτε κατασκευή, ώστε να μην έχουμε εκτροπή ή κατάρρευση ή άλλες καταστάσεις που θα την οδηγήσουν σε αστοχία ή απώλεια του αισθήματος ασφαλείας των ατόμων που την χρησιμοποιούν και κινούνται σ αυτή (κατάσταση λειτουργικότητας). Στην δική μας μελέτη πιο συγκεκριμένα τώρα, μπορεί να προκύψουν οι παραπάνω κίνδυνοι με έναν πιο ιδιαίτερο τρόπο, δηλαδή να έχουμε κάποια αστοχία στον συρμό αν δεν λάβουμε την απαραίτητη τιμή που ορίζεται απ τον κανονισμό κάτι που θα σήμαινε εκτροχιασμό κάποιου συρμού, ιδιαίτερα επίφοβοι μάλιστα είναι οι συρμοί που είναι άδειοι ή έχουν μικρό αριθμό επιβατών, καθώς θα είναι πιο ελαφριοί και ως κατ' επέκταση πιο επιρρεπείς στην εν λόγω φόρτιση. Παράλληλα σ' αυτό πρέπει να προσέξουμε ιδιαίτερα δυσμενείς συνδυασμούς όπως είναι τα φορτία ανέμου και η φυγόκεντρος στο 2° άνοιγμα όταν δρούν προς την ίδια κατεύθυνση. Δεν θα πρέπει να αμεληθεί και η πίεση που θα υποστεί η κύρια δοκός από μόνη της, αλλά και μετέπειτα που θα πρέπει να παραλάβει με ασφάλεια τις φορτίσεις που δίνει απ' την διέλευσή του ο συρμός. Τέλος ιδιαίτερη προσοχή να δοθεί στις αντιδράσεις των εφεδράνων όπου υπάρχει η πιθανότητα από τέτοιου είδους φορτίσεις να εμφανίσουν ζεύγος δυνάμεων, και ως κατ' επέκταση κάποια απ' αυτά να αναπτύξουν εφελκυστικές τάσεις, κάτι ιδιαίτερα επιβαρυντικό που πιθανόν θα οδηγούσε όχι μόνο σε αίσθημα ανασφάλειας στους επιβάτες και γενικά κακό σχεδιασμό του έργου στη συνήθη λειτουργία του έργου, αλλά και σε μια πιθανή αστοχία αν η διέλευση των συρμών επαναληφθεί για κάποιο χρονικό διάστημα απ' το δεδομένο σημείο για το οποίο δημιουργούνται αυτές οι εντάσεις και δεν έχει δοθεί το συντομότερο δυνατό λύση. Παρακάτω σχεδιάστηκε σκαρίφημα για τις ανάγκες του σχεδιασμού και πληρότητας της μελέτης του έργου, όπου φαίνονται σαφώς οι δράσεις του ανέμου στον συρμό και στην κύρια δοκό, η κατεύθυνση τους, το σημείο εφαρμογής τους, αλλά και η απόσταση απ' το

κέντρο βάρους της διατομής του φορέα απ' όπου και θα γίνει τελικά η παραλαβή όλων των φορτίων και έχει ως εξής:



Σχ. 3.3:Τυπική μορφή δοκού και συρμού σε λειτουργία που δέχονται φορτία ανέμου

Μέχρι τώρα αναλύσαμε τους συνδυασμούς που είχαμε απ' τον κανονισμό και πως αυτοί εφαρμόζονται στην περίπτωσή μας. Είδαμε επίσης τις δράσεις που ενσωματώνονται σ' αυτούς και πως επιρρεάζουν αυτές την κύρια δοκό μας τελικά. Στη συνέχεια της ανάλυσης για να διαστασιολογήσουμε σε οριακή κατάσταση αστοχίας εισάγαμε τις δράσεις με τους συντελεστές επιβάρυνσης, όπως αυτοί ορίζονται στους συνδυασμούς αυτούς και μετά από επαναλήψεις της διαδικασίας της ανάλυσης στο λογισμικό μελέτης καταλήξαμε στα διαγράμματα εντατικών μεγεθών που θα παρατεθούν με τη σειρά παρακάτω για τον εκάστοτε συνδυασμό. Οι συνδυασμοί από δω και πέρα θα αναφέρονται μόνο στα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν και για τα υλικά που έχουμε χάρην απλότητας. Πιο συγκεκριμένα αυτοί είναι:

# > Strength1 = 1.25x(0.9)xD + 1.5x(0.65)xSDL + 1.75x(LxI + CF) + 1.4xLFe + T

Οι περιβάλλουσες ροπών κάμψεως και τεμνουσών δυνάμεων που μας δίνει ο συγκεκριμένος συνδυασμός είναι τα ακόλουθα,



Σχ. 3.4: Περιβάλλουσα ροπών κάμψεως Strength 1



Σχ. 3.5: Περιβάλλουσα τεμνουσών δυνάμεων Strenght 1

Strength2 = Not Applicable

## > Strength3 = 1.25x(0.9)xD + 1.5x(0.65)xSDL + 1.4xL0 + 1.4xWS + 1.4xWL0 + T

Οι περιβάλλουσες ροπών κάμψεως και τεμνουσών δυνάμεων που μας δίνει ο συγκεκριμένος συνδυασμός είναι τα ακόλουθα,



Σχ. 3.6: Περιβάλλουσα ροπών κάμψεως Strength 3



Σχ. 3.7: Περιβάλλουσα τεμνουσών δυνάμεων Strenght 3

### $\blacktriangleright$ Strength4 = 1.5xD + 1.5xSDL + T

Τα διαγράμματα ροπών κάμψεως και τεμνουσών δυνάμεων που μας δίνει ο συγκεκριμένος συνδυασμός είναι τα ακόλουθα,



Σχ. 3.8: Διάγραμμα ροπών κάμψεως Strength 4



Σχ. 3.9: Διάγραμμα τεμνουσών δυνάμεων Strength 4

# > Strength5 = 1.25x(0.9)xD + 1.5x(0.65)xSDL + 1.35x(LxI + CF) + 0.4xWS + WL1 + 1.4xLFe

Οι περιβάλλουσες ροπών κάμψεως και τεμνουσών δυνάμεων που μας δίνει ο συγκεκριμένος συνδυασμός είναι τα ακόλουθα,



Σχ. 3.10: Περιβάλλουσα ροπών κάμψεως Strength 5



Σχ. 3.11: Περιβάλλουσα τεμνουσών δυνάμεων Strenght 5

### 3.3 Διαστασιολόγηση και έλεγχοι έναντι κάμψης της κύριας δοκού

Αυτές ήταν οι περιβάλουσες των εντατικών μεγεθών που προέκυψαν απ' το λογισμικό sofistik μετά απ' τις αναλύσεις που έγιναν με τους συνδυασμούς για οριακή κατάσταση αστοχίας στη γέφυρα σχεδιασμού. Ωστόσο κατά τη διάρκεια μελέτης της γέφυρας χρειάστηκε για τους ελέγχους σε κύρτωση, όπως θα δούμε και αναλυτικότερα πιο κάτω που έγιναν αναλυτικότερα οι αντίστοιχοι έλεγχοι πέρα απ' τον κανονισμό και με το λογισμικό Adina για λόγους ασφαλείας, να αυξήσουμε το τελικό πάγος όλων των διατομών σε σγέση με αυτό που είχαμε θεωρήσει στις αναλύσεις στην προδιαστασιολόγηση και ως αποτέλεσμα από 20mm έγινε 23mm ώστε να μπορεί να επαρκεί σε κάθε περίπτωση και να διατηρεί τις ιδιότητές τους. Μ' αυτόν τον τρόπο επιτύχαμε να παραμένει ελαστική η συμπεριφορά του κορμού της δοκού για κάθε συνδυασμό φόρτισης της οριακής κατάστασης αστογίας. Επιπλέον καταφέραμε και να ενεργοποιήσουμε με την βοήθεια των διαμήκων νευρώσεων μεγαλύτερο τμήμα του κορμού, ιδιαίτερα μάλιστα στη στήριξη όπου λόγω του ότι μας προέκυπτε κατηγορίας 4, είχαμε μεγάλο τμήμα του ανενεργό. Είναι πολύ σημαντικό σε τέτοιου είδους μεγάλες και ιδιαίτερες κατασκευές να έχουμε μια παραπάνω αντοχή στις διατομές πόσο μάλλον όταν οι συνδυασμοί των δρώντων διαγραμμάτων αφορούν την οριακή κατάσταση αστοχίας. Γι' αυτό το λόγο σχεδιάσαμε κατ' αυτόν τον τρόπο όλες τις διατομές ώστε τα πέλματα να είναι σίγουρα κατηγορίας 1, μιας και αυτά είναι που θα αναλαμβάνουν την ένταση της κάμψης που είναι και η μεγαλύτερη. Στον κορμό σίγουρα θα είμαστε σε κατηγορία 3 ή 4, κάτι το οποίο δεν μπορούμε να το αποφύγουμε αν θέλουμε μια κατασκευή οικονομική, αφού μια αύξηση του πάχους του κορμού θα μας έριχνε την κατηγορία της διατομής, αλλά πέρα απ' αυτό δεν θα άλλαζε ούτε στο ελάχιστο τις ιδιότητες

και τις αντοχές της εν λόγω διατομής και έτσι από άποψη χρησιμότητας δεν θα βοηθούσε καθόλου. Παρακάτω θα δειχθούν με σχέδια απ' το autocad οι δύο πιο χαρακτηριστικές διατομές οι οποίες είναι αυτές του ανοίγματος και της στήριξης:



Αυτές είναι οι δύο χαρακτηριστικές διατομές της γέφυράς μας μετά τις αναλύσεις από τους συνδυασμούς φορτίσεων σε οριακή κατάσταση αστοχίας. Γενικά στις διατομές όπως θα φανεί και μετέπειτα στους ελέγχους σε κάμψη, δώσαμε κάποια "υπεραντοχή" σε κάμψη σε σχέση με τις δράσεις που εμφανίστηκαν απ' τις περιβάλλουσες ροπών. Κάτι τέτοιο είναι βέβαια αντιοικονομικό καθώς χρησιμοποιήσαμε περισσότερο υλικό και μάλιστα χάλυβα που είναι ένα ακριβό στην αγορά του υλικό, αλλά θέλαμε να είμαστε πλήρως εξασφαλισμένοι σ' αυτό το στάδιο και να λειτουργούν όλα πλήρως ελαστικά, σε όλο το εύρος της γέφυρας όπως επιβάλλει και ο κανονισμός. Εκτός αυτού ακολουθούν οι πιο απαιτητικοί έλεγχοι που μάλλον θα χρειαστούμε και ούτως η άλλως ενίσχυση, όπως είναι η κύρτωση. Πιο συγκεκριμένα θέλαμε τα πέλματα να είναι στην ελαστική περιοχή και μάλιστα όχι οριακά, γιατί είναι αυτά που θα έρχονται σε άμεση επαφή με τους συρμούς, οπότε δεν θα θέλαμε σε καμία περίπτωση να υπάρξει κάποια αστοχία είτε αυτή ήταν τοπική είτε επιρρέαζε σε μεγαλύτερο τμήμα τον φορέα. Μ' αυτόν τον τρόπο όπως φαίνεται και απ' τα διαγράμματα, δεν κινδυνεύουμε και από τοπικούς λυγισμούς κάτι που σε τόσο μεγάλες διατομές είναι ιδιαίτερα επίφοβο, πόσο μάλλον με δυναμικά σημειακά κατακόρυφα φορτία όπως είναι αυτά που εφαρμόζονται λόγω των συρμών που διελαύνουν στην κατασκευή μας. Παράλληλα με τα πέλματα διαστασιολογήσαμε και τον κορμό με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτύχουμε οικονομία όσο γίνεται στο υλικό μας και ως κατ' επέκταση στην κατασκευή του έργου. Σ' αυτή την περίπτωση, σε αντίθεση με προηγουμένως, είμαστε συνηθισμένοι οι κορμοί αυτών των διατομών να είναι μεγαλύτερες κατηγορίες (3 ή 4) γιατί έχουμε άλλους τρόπους να τους ενισχύουμε και να τους ενεργοποιούμε όπως θα δείξουμε και παρακάτω. Επιπλέον όπως και σε διάφορες παρόμοιου βελινεκούς κατασκευές ο κορμός χρησιμοποιείται ιδιαίτερα ψηλός εξ' ορισμού, ώστε να δώσει μοχλοβραχίονα στην εκάστοτε διατομή μελέτης και βέβαια μέσω αυτού ροπής αντογής. Ως αποτέλεσμα έγουμε πολύ μεγάλη αύξηση της ροπής αντοχής με τον πιο οικονομικό τρόπο, αφού δεν βάζουμε περισσότερο υλικό στην διατομή μας. Επομένως, ως συνήθως και εδώ ο κορμός μας δεν αποφύγαμε να είναι ψηλός και λεπτός (από θέμα πάχους διατομής) και έτσι έχουμε τις εξής κατηγορίες:

• And  $\pi \epsilon \lambda \mu \alpha$ : c = 690 mm, t = 6.00 mm

Κατηγορία πέλματος: c / t =  $10.73 \le 26.85^*$  Κατηγορία 1

\*από Ευρωκώδικα 3 έχουμε ότι το όριο για τα πέλματα μιας κοίλης ορθογωνικής διατομής ώστε να είναι κατηγορίας 1 εκεί η διατομή για χάλυβα S355 (f<sub>y</sub> = 355Mpa) είναι τα εξής:  $33xsqrt\left(\frac{235}{fy}\right) = 26.85$ 

• Κάτω πέλμα: c = 690mm , t = 6.00mm

Κατηγορία πέλματος: c / t = 10.73  $\leq 26.85^*$  Κατηγορία 1

\*από Ευρωκώδικα 3 έχουμε ότι το όριο για τα πέλματα μιας κοίλης ορθογωνικής διατομής ώστε να είναι κατηγορίας 1 εκεί η διατομή για χάλυβα S355 (f<sub>y</sub> = 355Mpa) είναι τα εξής:  $33xsqrt\left(\frac{235}{fy}\right) = 26.85$ 

Αυτή ήταν η κατηγοριοποίηση των πελμάτων, όλων των διατομών μας κατά μήκος της γέφυρας μελέτης συμφωνα με τις σχετικές διατάξεις κατάταξης πελμάτων κοίλων ορθογωνικών διατομών του ευρωκώδικα 3, καθώς όλες όπως δείξαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο έχουν κοινές διαστάσεις, πάχη και πλάτη, οπότε όλα είναι κατηγορίας 1 και μάλιστα είμαστε πολύ πιο κάτω απ' τα όρια του κανονισμού όπως φαίνεται σαφώς. Άρα

μάλλον επιτύχαμε μια πλήρως ελαστική κατανομή των αξονικών φορτίων που μεταδίδουν οι διερχόμενοι συρμοί των δοκών, όπως θα φανεί και στους ελέγχους σε κάμψη με την ελαστική ροπή αντοχής της εκάστοτε διατομής με τη δρώσα. Πριν όμως απ' αυτό ας δούμε και την κατηγοριοποίση των κορμών των δύο κύριων διατομών της δοκού μας, που δεν είναι άλλες απ' αυτές που δείξαμε και παραπάνω στα σχέδια, δηλαδή αυτήν στο άνοιγμα και στην στήριξη. Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

• Κορμός ανοίγματος: c = 2080 mm, t = 23 mm

Κατηγορία κορμού:  $53.70 \le c/t = 90.43 \le 100.89^*$  Κατηγορία 3

\*από Ευρωκώδικα 3 έχουμε, ότι το όριο για τους κορμούς μιας κοίλης ορθογωνικής διατομής ώστε να είναι κατηγορία 2 και κατηγορία 3 εκεί η διατομή για χάλυβα S355 (f<sub>y</sub> = 355Mpa) είναι κατα σειρα τα εξής:  $66xsqrt\left(\frac{235}{fy}\right) = 53.70\ 124xsqrt\left(\frac{235}{fy}\right) = 100.89$ 

• Κορμός στήριξης: c = 2080 mm, t = 23 mm

Κατηγορία κορμού: c / t =  $168.70 \ge 100.89^*$  Κατηγορία 4

\*από Ευρωκώδικα 3 έχουμε, ότι το όριο για τους κορμούς μιας κοίλης ορθογωνικής διατομής ώστε κατηγορία 3 εκεί η διατομή για χάλυβα S355 (f<sub>y</sub> = 355Mpa) είναι τα εξής:  $124xsqrt\left(\frac{235}{fy}\right) = 100.89$ 

Όπως το περιμέναμε λοιπόν, οι κορμοί πρέκυψαν από κατηγορίες μεγαλύτερες από 1, κάτι απόλυτα λογικό εξαιτίας της δομής που έχουν σε τόσο μεγάλες και ιδιαίτερες κατασκευές στις οποίες χρειαζόμαστε το ύψος του κορμού, όπου θα δώσει τον απαραίτητο μοχλοβραχίονα, που πρέπει να έχει η διατομή ανάμεσα στα πέλματα και να αυξήσει σημαντικά την τελική ελαστική ροπή αντοχής με τον πλεον οικονομικό τρόπο. Για τον κορμού μιας τέτοιας διατομής, που ίσως μας γλιτώσει από περαιτέρω ενισχύσεις στη συνέχεια (νευρώσεις κλπ). Εκεί που μάλλον θα υπάρξει πρόβλημα και μάλιστα μεγάλο θα είναι στη διατομή της δοκού στη στήριξη. Βλέπουμε ότι όχι μόνο είναι κατηγορίας 4 η διατομή αλλά είναι πάρα πολύ χαμηλά σε σχέση με το όριο που θέτει ο κανονισμός. Αυτό σημαίνει ότι σίγουρα θα έχουμε πολλούς τοπικούς λυγισμούς καθ' ύψος. Πέρα απ' αυτό μεγάλο τμήμα του κορμού στο μέσο θα είναι ανενεργό μάλιστα (στο μέσο βέβαια), αφού λόγω της δομής του δεν θα μπορεί, αν το αφήσουμε ως έχει να προσφέρει ουσιαστικά στη διατομή. Μετά απο υπολογισμούς που έγιναν με βάση τις διατάξεις του ευρωκώδικα 3 είδαμε ότι όχι μόνο στο μεσό το ανενεργό τμήμα, αλλά είναι και ιδιαίτερα μεγάλο σε

σύγκριση με το συνολικό ύψος της διατομής στη στήριξη. Για να φανεί καλύτερα το μέγεθος του τμήματος αυτού παρακάτω θα το δείξουμε με σχέδιο που θα καθιστά ακόμα πιο σαφές, πως θα συμπεριφερθεί το τμήμα αυτό σε κάθε περίπτωση φόρτισης:



Όπως μπορούμε να δούμε το πρώτο σχέδιο στ' αριστερά δείχνει τη διατομή όπως αυτή έχει σχεδιαστεί και δείξαμε και νωρίτερα, άλλα έτσι θα είναι μόνο ως προς το πως φαίνεται και τίποτ' άλλο. Στο δεύτερο σχέδιο, το οποίο αυτό έχει την πραγματική σημασία για την λειτουργία και την κατασκευή του έργου έχουμε κάτι διαφορετικό. Με τις κόκκινες γραμμές μπορούυμε να διακρίνουμε την ανενεργή περιοχή η οποία φτάνει περίπου το 70% της διατομής του κορμού, ποσοστό ιδιαίτερα σημαντικο για μια τέτοια κατασκευή, κάτι που σημαίνει ότι θα χρειαστούμε και διαμήκεις ενισχύσεις. Επιπλέον μπορούμε να δούμε τα ενεργά τμήματα των οποίων τα ύψη στο πάνω τμήμα είναι περίπου 0.60m ενώ στο κάτω 0.50m. Τα μήκη αυτά υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις που ορίζονται για διατομές κατηγορίας 4. Αρχικά ελέγχθηκε η κατανομή των ορθών τάσεων απ' το λογισμικό μελέτης (sofistik). Έπειτα προσδιορίστικε μέσω της συγκεκριμένης διαδικασίας ένας μειωτικός συντελεστής ρ ο οποίος προέκυψε κοντά στο 0.3 και αντιπροσωπεύει το ποσοστό του κορμού που παραμένει ενεργό. Τέλος συνδυάζοντας τον συντελεστή αυτό με την αρχική κατανομή των δρωσών τάσεων, προέκυψε η κατανομή των ενεργών υψών που είδαμε παραπάνω.

Αφού καθορίσαμε με τις κανονιστικές διατάξεις του ευρωκώδικα 3 τις κατηγορίες των διαφόρων τμημάτων των διατομών μας, τώρα έχει σειρά να υπολογίσουμε τις ελαστικές ροπές αντοχής με τις οποίες θα γίνει και ο τελικός έλεγχος σε οριακή κατάσταση αστοχίας των διατομών της δοκού σε σχέση με τις δυσμενέστερες τιμές των περιβαλλουσών που έχουν προκύψει και έχουμε παραθέσει αναλυτικά στο αμέσως προηγούμενο κεφάλαιο για τους συνδυασμούς δράσεων σε οριακή κατάσταση αστοχίας. Ο τρόπος εύρεσης της ελαστικής ροπης αντοχής έγινε ως εξής, αρχικά βρήκαμε την ενεργό ροπή αδράνειας της κάθε διατομής, όπου στην περίπτωση της διατομής του ανοίγματος είναι ίδια με την πραγματική, ενώ στην περίπτωση της διατομής στη στήριξη έπρεπε να αφαιρέσουμε τα ανενεργά τμήματα καθώς δεν προσφέρουν αντίσταση στη συνολική διατομή και έτσι προέκυψαν οι εξής δύο ροπές αδράνειας:

- Για τη διατομή του ανοίγματος, όπου έχουμε κατατάξει τον κορμό σε κατηγορία 3
  - $\succ$  I<sub>v</sub> = 3626774.93 cm<sup>4</sup>
- Για τη διατομή της στήριξης, όπου έχουμε κατατάξει τον κορμό σε κατηγορία 4
  - $\blacktriangleright$  I<sub>y,eff</sub> = 45951469.52cm<sup>4</sup>

Αυτό που είναι άξιο προσοχής, είναι πόσο πολύ αυξάνονται τα αδρανειακά στοιχεία της διατομής της κύριας δοκού μόνο αλλάζοντας το ύψος της κύριας δοκού. Κάτι τέτοιο το περιμέναμε καθώς μεγαλώνουν ταχύτατα κυρίως λόγω των όρων steiner που υπάρχουν στη σχέση υπολογισμού τους. Μετά την εύρεση των ροπών αδρανείας των δύο κύριων διατομών μας, είχε σειρά να βρούμε τα κέντρα βάρους των διατομών αυτών, ώστε να καταλήξουμε στις ροπές αντίστασης των διατομών, που χρειαζόμαστε για να βρούμε τις τελικές ελαστικές ροπές αντοχής, με τις ποίες θα γίνουν και οι τελικοί έλεγχοι σε οριακή κατάσταση αστοχίας. Πριν απ' αυτά ας δούμε τις μεγαλύτερες ροπές αντίστασης των πελμάτων για τις διατομές που ελέγχθηκαν:

- Για τη διατομή του ανοίγματος:  $W_{el} = 116906 \text{ cm}^3$
- Για τη διατομή στα σημεία των στηρίξεων:  $W_{el} = 264689 \text{ cm}^3$

Για τη διατομή στο άνοιγμα όπως περιμέναμε, λόγω και του ότι ο κορμός είναι κατηγορίας 3 το κέντρο βάρους ήταν στο κέντρο της διατομής. Όσον αφορά τη διατομή στη στήριξη το κέντρο βάρους προέκυψε πιο κοντά στο άνω πέλμα λόγω της κατανομής των ενεργών κορμών όπως φαίνεται και στα παραπάνω σχήματα, αφού στα τμήματα των κορμών που είναι ενεργά απ' το πάνω πέλμα έχουν μεγαλύτερο ύψος που συμμετέχει στην παραλαβή εντατικών μεγεθών για την κύρια δοκό. Έπειτα έγινε εύρεση των αντίστοιχων

ροπών αντοχής των διατομών του φορέα μέσω της σχέσης του κανονισμού του Ευρωκώδικα 3, M<sub>b</sub> = f<sub>y</sub> x W. Ως αποτελέσματα αυτών προέκυψαν αντίστοιχα για το άνοιγμα και τη στήριξη:

- $M_{b,el} = 41501 \text{ kNm}$
- $M_{b,el} = 93964 \text{ kNm}$

Αφού καταλήξαμε μετά απ' τη συγκεκριμένη διαδικασία, όπως αυτή ορίζεται απ' τις σχετικές κανονιστικές διατάξεις, στις δεδομένες ροπές αντοχής είμαστε έτοιμοι για τον τελικό έλεγχο της κύριας δοκού μας σε κάμψη. Θεωρώντας απ' τα δρώντα εντατικά μεγέθη, ότι εκεί έχουμε τις μεγαλύτερες δρώσες τάσεις, αν προκύψει ότι επαρκούν για τις παραπάνω ροπές αντοχής τότε είμαστε καλυμένοι για τον έλεγχο αυτό. Σε κάθε άλλη περίπτωση θα πρέπει να κοιτάξουμε για περαιτέρω διερεύνηση της διατομής μας, ώστε να καταλήξουμε στα επιθυμητά αποτελέσματα. Απ' τις περιβάλουσες ροπών που παρατέθηκαν αναλυτικά σε προηγούμε νο κεφάλαιο έχουμε ήδη τις μέγιστες δρώσες σροπός σοπός σε άνοιγμα και στήριξη. Πάμε να δούμε την κάθε περίπτωση διατομής ξεχωριστά παρακάτω ώστε να καταλάβουμε αν υπερκαλύπτονται απ' τις αντοχές:

- ✓ Για το άνοιγμα:  $M_b$  = 41501 kNm >  $M_{ed}$  = 5996 kNm O.K.
- ✓ Για τη στήριξη:  $M_b$  = 93694 kNm >  $M_{ed}$  = 13816 kNm O.K.

Επομένως μπορούμε να δούμε ότι οι διατομές μας επαρκούν και μάλιστα εκ πρώτης όψεως φαίνεται ότι η δοκός μας είναι υπερδιαστασιολογημένη. Αυτό βέβαια θα καλυφθεί στη συνέχεια, όταν θα γίνει αλληλεπίδραση και με τα άλλα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν λόγω φόρτισης και γενικά στατικού προσομοιώματος. Εξαιτίας της ιδαιτερότητας της κατασκευής μας και μάλιστα των λεπτότοιχων κορμών των διατομών μας υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να προκύψουν πιο οριακές καταστάσεις στον έλεγχο σε κύρτωση, ο οποίος ακολουθεί στη συνέχεια.

### 3.4 Έλεγχοι κύριας δοκού έναντι τέμνουσας

Το αντικείμενο που θα μας απασχολήσει σ' αυτό το κεφάλαιο είναι η επάρκεια του φορέα μας στις διατμητικές δράσεις που υπάρχουν λόγω των κατακόρυφων φορτίσεων σ αυτόν. Ο έλεγχος αυτός συνήθως είναι κρίσιμος σε λεπτόκορμες διατομές, όπως είναι και αυτές που έχουμε στη παρούσα μελέτη. Αρχικά θα ήθελα για λόγους κατανόησης να γίνει πλήρως ανιληπτό τι θα σήμαινε μία πιθανή αστοχία σε τέμνουσα του φορέα της διατομής. Γενικά η αστογία σε τέμνουσα είναι μια μορφή ψαθυρής αστογίας μιας κατασκευής όπου σημαίνει ακαριαία κατάρρευση ολόκληρης της κατασκευής ή τμηματικά, εκεί που δέχεται την μεγαλύτερη ένταση. Κατά συνέπεια δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χρόνος να απεγκλωβιστούν ούτε οι άνθρωποι που παρεβρίσκονται εντός της κατασκευής. Κάτι τέτοιο προφανώς θα ήταν πλήγμα όχι μόνο για την αξιοπιστία της κατασκευής που αποδεδιγμένα θα καταστρεφόταν μαζί της, αλλά θα υπήρχε τεράστιο οικονομικό και ηθικό πλήγμα απέναντι στην κοινωνία. Επομένως γίνεται ευκόλως αντιληπτή μετά απ όλα αυτά η σημασία μιας τέτοιας αστοχίας της κατασκευής. Στην παρούσα μελέτη δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στο σχεδιασμό και τους ελέγχους σ' αυτό το στάδιο για του λόγους που προαναφέρθηκαν. Μάλιστα έγινε περαιτέρω διερεύνηση της κατασκευής μέσω λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, ειδικευόμενο σε αναλύσεις μεταλλικών κατασκευών, στο οποίο εισάχθηκαν οι διατομές των κορμών των χαρακτηριστικών διατομών καθώς και η κατανομή των δρωσών τάσεων που βρέθηκαν απ΄ το sofistik, ώστε να γίνει πλήρης ανάλυση των διατομών σε κύρτωση. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις διατάξεις του ευρωκώδικα 3 ο έλεγχος κορμού σε τέμνουσα έχει δύο φάσεις. Η μια είναι με τις διατμητικές τάσεις και ελέγχονται με τις εγκάρσιες νευρώσεις, και η άλλη και πιο σημαντική για την ευστάθεια του φορέα είναι ο έλεγχος έναντι ορθών τάσεων, όπου αν δεν επαρκούν οι διαστάσεις του κορμού τότε χρειαζόμαστε διαμήκεις νευρώσεις. Εδώ παρουσιάστηκαν πολύ εποπτικά οι συγκεκριμένες διαδικασίες, παρακάτω θα γίνει αναλυτική προσομοίωση των μοντέλων και παράθεση των αποτελεσμάτων ώστε να γίνουν πλήρως αντιληπτά. Αρχικά έγιναν οι σχετικοί έλεγχοι και δείξαμε ότι μας επαρκούσαν και οι πιο αραιές εγκάρσιες νευρώσεις, όμως στα τελικά σχήματα χρειάστηκε λόγω των ορθών τάσεων που ενεργούν στον κορμό να τις πυκνώσυμε αρκετά περισσότερο ώστε να είμαστε καλυμένοι. Έπειτα ελέγχαμε τον κορμό του ανοίγματος ο οποίος μας είχε προκύψει κατηγορίας 3, πιστεύοντας ότι θα επαρκούσε χωρίς διαμήκεις νευρώσεις στην κατανομή δρωσών τάσεων που υπήρχε στη διατομή στο δυσμενέστερο σημείο. Τελικά όμως μετά από έλεγχο που έγινε με τις αντοχές των διατάξεων του ευρωκώδικα δεν επαρκούσε και μάλιστα ήθελε αρκετά μεγάλη αύξηση του πάχους για να περνάει τον έλεγχο. Κάτι τέτοιο αρχικά θα μας μείωνε τον υπολογιστικό φόρτο, όμως κρίθηκε αντιοικονομικό για την εξέλιξη και κατασκευή του έργου, γι' αυτό το λόγο προχωρήσαμε με τη χρήση και διαστασιολόγηση διαμήκους νεύρωσης, όπως υπάρχει στον κανονισμό. Συγκεκριμένα μάλιστα, επιλέξαμε για καλύτερη τοποθέτησή της πάνω στον κορμό της δοκού στο άνοιγμα, να ακολουθηθεί όσο γίνεται η κατανομή των τάσεων από τα δρώντα μεγέθη, η οποία ήταν ένα τραπέζιο με θλιπτικές τάσεις όπως αυτό φάινεται παρακάτω:



Σχ. 3.12: Κάτοψη μοντέλου κορμού από Adina

Στο σχήμα παραπάνω φαίνεται μια ποιοτική απεικόνιση του κορμού με την κατανομή των τάσεων. Έτσι παρακάτω και με βάση αυτή την κατανομή τοποθετήσαμε τη διαμήκη νεύρωση ως εξής:



Σχ. 3.13: Τρισδάστατη όψη μοντέλου κορμού

Πιο αναλυτικά για το παραπάνω τμήμα μέσω των δρώντων μεγεθών ορίσθηκε όπως είπαμε η θέση της διαμήκους νεύρωσης, η οποία όπως περιμέναμε είναι πιο κοντά στο πέλμα με τη μεγαλύτερη θλίψη καθώς εκεί προφανώς χρειαζόμαστε μεγαλύτερη ενίσχυση. Γενικά απ' τον κανονισμό ορίζεται ως ψ ο συντελεστής που μας δίνει τον λόγο των τάσεων μεταξύ των άκρων του κορμού, και στην συγκεκριμένη περίπτωση που έχουμε θλίψη σε όλη την έκτασή του ο λόγος αυτός είναι ψ = 0,79. Παρακάτω παρατίθεται το σχετικό παράρτημα του ευρωκώδικα 3 για ύπαρξη μίας διαμήκους νεύρωσης στον κορμό,



Πιν. 3.3: Διατάζεις κορμού με μία διαμήκη νεύρωση

Κάνοντας τους σχετικούς υπολογισμούς και λαμβάνοντας υπ' όψην και τις διατάξεις για ανοικτές διαμήκεις νευρώσεις ορίσθηκαν για το άνοιγμα ως τελικά μεγέθη, εγκάρσιες νευρώσεις ανά 2,30m και την διαμήκη όπως φαίνεται παραπάνω. Εν συνεχεία ακολουθώντας τις αντίστοιχες διατάξεις κάναμε τους δύο ελέγχους όπως αυτοί ορίζονται, και είναι οι εξής:

- Έλεγχος τύπου πλάκας, απ' όπου προέκυψε μειωτικός συντελεστής ρ = 0,96
- Έλεγχος τύπου υποστυλώματος απ' όπου προέκυψε μειωτικός συντελεστής ρ<sub>c,υπ</sub> = 0,64

Επομένως όπως και το περιμέναμε σε τέτοιες περιπτώσεις ενώ ο έλεγχος τύπου πλάκας δεν απομειώνει σχεδόν καθόλου τον κορμό μας οπότε και δεν θα είχαμε ιδιαίτερο πρόβλημα, ο έλεγχος τύπου υποστυλώματος είναι ιδιαίτερα δυσμενής, και μ' αυτόν προφανώς θα ελέγξουμε τη διατομή μας. Οι διαστάσεις της νεύρωσης που επιλέχθηκαν κατά το σχεδιασμό της ώστε να επαρκεί η διατομή έναντι των ελέγχων κύρτωσης ορίσθηκαν ως εξής, πλάτος νεύρωσης ίσο με 150mm και πάχος νεύρωσης 15mm ώστε να τηρείται και το όριο που τίθεται απ΄τον κανονισμό, δηλαδή  $I_p / I_t \ge 5,3 x f_y / E$ . Θα δειχθούν και σχήματα για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η συμπεριφορά του κορμού στη συγκεκριμένη φόρτισή του:

Συμπεριφορά τύπου πλάκας



Κάποια στοιχεία που εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς είναι η αισθητή μείωση της ενεργού διατομής γύρω απ' τη νεύρωση κάτι που υπήρξε λόγω της μικρότερης τιμής του μειωτικού συντελεστή ρ όπως είδαμε και παραπάνω. Τέλος αφού διαστασιολογήσαμε πλήρως τη διατομή και τη νεύρωση μας στο άνοιγμα, θα πρεπει να ολοκληρώσουμε τον τελικό έλεγχο ώστε να επαρκεί η κατασκευή στα σημεία αυτά. Η τάση αντοχής προέκυψε μετά από μια σειρά από πράξεις και προφανώς την επίδραση του μειωτικού συντελεστή ρ σ<sub>Rd,EK-3</sub> = 207 Mpa. Απ' τα διαγράμματα που προέκυψαν απ' τις αναλύσεις η μέγιστη ορθή τάση που μας έδωσε το λογισμικό sofistik για τους συνδυασμούς σε οριακή κατάσταση αστοχίας είναι σ<sub>Ed,max</sub> = 202 Mpa.

Έλεγχος για κύρτωση δοκού στο άνοιγμα:

$$\sigma_{Rd,EK-3} = 207 \text{ Mpa} > \sigma_{Ed,max} = 202 \text{ Mpa}$$
 O.K.

Επομένως ο σχεδιασμός που κάναμε έναντι των ορθών τάσεων για το άνοιγμα μας επαρκεί οριακά. Επειδή όπως προείπαμε υπήρξε ενδιαφέρον στην παρούσα μελέτη για περαιτέρω διερεύνιση με λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο θα δώσει ακριβέστερα εντατικά μεγέθη σχετικά με την αντοχή της διατομής που επιλέξαμε, θα εισάγουμε το συγκεκριμένο τμήμα της δοκού σχεδιασμού καθώς και την κατανομή των τάσεων για να δούμε τι θα προκύψει. Μετά την επεξεργασία στο λογισμικό adina καταλήξαμε στα εξής αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σχετικά με την αυστηρότητα των διατάξεων του ευρωκώδικα:



Σχ. 3.14: Διάγραμμα αναλύσεων κορμού διατομής ανοίγματος

Στο διάγραμμα παραπάνω φαίνονται 3 γραμμές οι οποίες αναπαριστούν όπως φαίνεται κατά σειρά από αριστερά προς τα δεξιά, την τάση αντοχής που είχαμε βρει για τη διατομή μας με τον ευρωκώδικα 3, την δρώσα μέγιστη τάση που προκύπτει για τη διατομή στο άνοιγμα απ' το λογισμικό sofistik στον κορμό της δοκού και τέλος η αντοχή που παίρνουμε για συνεχώς αυξανόμενη ένταση, με κατανομή που έχουμε δείξει σε σχήματα παραπάνω και ατέλεια όπως ορίζεται απ' τον κανονισμό δηλαδή 1/200 = 11mm. Παρατηρούμε ότι η αντοχή του κορμού μας με τη νεύρωση που θέσαμε κατά τα γνωστά και με το συγκεκριμένο πάχος, για ελαστικό πάντα σχεδιασμό μιας και κατασκευάζουμε έργο σιδηράς γέφυρας με αυξημένες απαιτήσεις ασφαλείας, φθάνει κοντά στα 265 Mpa. Δηλαδή, σχεδόν 30% μεγαλύτερη απ' την αντίστοιχη που βρήκαμε με τις αντίστοιχες διατάξεις του ευρωκώδικα 3. Επομένως για διατομές κατηγορίας 3 όπως αυτή, βλέπουμε μια υπεραντοχή την οποία μας δίνουν οι σχετικές διατάξεις, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό σε σχεδιασμό τόσο σημαντικών έργων. Έτσι δεν κινδυνεύουμε από φαινόμενα ψαθυρής αστοχίας που μπορεί να προκύψουν

από οριακές καταστάσεις. Αυτό μάλιστα το διαπιστώνουμε και από τη ροή των τάσεων Von Mises πάνω στον κορμό της δοκού για εφαρμογή της μέγιστης δρώσας τάσης,



Σχ. 3.15: Ροή τάσεων στην έκταση του φατνώματος

Έτσι τελικά η τομή της δοκού μαζί με τις αντίστοιχες διαστάσεις όπου χρειάζονται στο άνοιγμα μετά την εφαρμογή διαμήκων νευρώσεων είναι η εξής:



Μέχρι εδώ σχεδιάσαμε τη διατομή της δοκού όπως αυτή θα κατασκευαστεί και θα λειτουργήσει στα ανοίγματα της κύριας δοκού, δηλαδή, όπου η δοκός θα έχει ύψος 2,2m. Στη συνέχεια θα δείξουμε πως θα γίνει ο σχεδιασμός της διατομής στη στήριξη όπου οι απαιτήσεις αλλά και οι αντοχές της διατομής θα είναι περισσότερες. Όπως είναι ευρέως γνωστό το δυσκολότερο για την τέμνουσα είναι η διαστασιολόγηση και η επάρκειά της στις στηρίξεις όπου εκεί οι εντάσεις λόγω τέμνουσας εχουν τις μέγιστες τιμές τους. Αυτό φάνηκε στη συγκεκριμένη μελέτη, στις περιβάλλουσες όπου παρατέθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, και μ' αυτές θ' ασχοληθούμε. Αρχικά τοποθετήσαμε εγκάρσιες νευρώσεις ανά 3m αλλά εν τέλει στο τέλος από τις ισχύουσες διατάξεις τοποθετήθηκαν ανά 1,5m. Στη συνέχεια για τυπικούς κυρίως λόγους, καθώς λόγω της κατηγορίας 4 του κορμού ξέραμε ότι δεν θα επαρκεί, ελέγξαμε τον κορμό χωρίς διαμήκη νεύρωση και προφανώς δεν επαρκούσε. Εν συνεχεία κάναμε δοκιμές για πολλές εκδοχές όσον αφορά τις διαστάσεις αλλά και την θέση των διαμήκων νευρώσεων, ώστε να καταλήξουμε στον βέλτιστο σχεδιασμό ο οποίος θα παρατεθεί με σχήμα παρακάτω ώστε να μην υπάρχουν αμφιβολίες για τις θέσεις των νευρώσεων ή κάποιο άλλο χαρακτηριστικών τους. Έπειτα θα αναφερθούμε στις διατάξεις που μας ορίζουν τις αντοχές της διατομής συμφωνα με τον ευρωκώδικα 3, αλλά και με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένη η διατομή είναι:



Τοποθετήθηκαν καθ' ύψος 3 ισαπέχουσες διαμήκεις νευρώσεις ανά 0,97m μεταξύ τους ώστε να ακολουθούν όσο γίνεται το διάγραμμα δρωσών τάσεων καθ' ύψος κάτι που είναι το επιθυμητό για τον καλύτερο δυνατό σχεδιασμό. Όπως φαίνεται και στο σχήμα οι νευρώσεις έχουν πλάτος 0,16m και πάχος 0,016m, ώστε να καλύπτουν τις διατάξεις σχετικά με τα όρια που θέτει ο ευρωκώδικας. Επιπλέον είναι σε θέση να ενεργοποιούν αρκετά μεγάλο τμήμα του κορμού ώστε να μπορεί με ασφάλεια να παραλάβει την μέγιστη τέμνουσα που προκύπτει απ' τις περιβάλουσες των συνδυασμών σε οριακή κατάσταση αστοχίας. Έπειτα ορίσαμε, όπως προέκυψε απ' το λογισμικό sofistik την κατανομή των ορθών τάσεων στο κορμό της δοκού στη στήριξη και είχαμε την εξής κατανομή:



Στο σχήμα παραπάνω φαίνεται μια ποιοτική απεικόνιση του κορμού με την κατανομή των τάσεων. Έτσι παρακάτω και με βάση αυτή την κατανομή τοποθετήσαμε τις τρείς διαμήκεις νευρώσεις:


Πιο αναλυτικά για το παραπάνω τμήμα μέσω των δρώντων μεγεθών ορίσθηκαν όπως είπαμε οι τρεις διαμήκεις νευρώσεις, οι οποίες ισαπέχουν μεταξύ τους για χάρην απλότητας στην κατασκευή τους αλλά και επειδή προκύπτει απ' την κατανομή των τάσεων. Γενικά απ' τον κανονισμό ορίζεται ως  $\psi$  ο συντελεστής που μας δίνει τον λόγο των τάσεων μεταξύ των άκρων του κορμού, και στην συγκεκριμένη περίπτωση που έχουμε θλίψη σε όλη την έκτασή του ο λόγος αυτός είναι  $\psi = 0,64$ . Παρακάτω παρατίθεται το σχετικό παράρτημα του ευρωκώδικα 3 για ύπαρξη τριών διαμήκων νευρώσεων, και ποιές διατάξεις ισχύουν για τη διαστασιολόγηση και την τοποθέτηση αυτών πάνω στον κορμό της κύριας δοκού του έργου, και άρα έχουμε:



### Συντελεστές κύρτωσης $k_\sigma$ για πλάκες με τουλάχιστον 3 ισαπέχουσες διαμήκεις ενισχύσεις

Πιν. 3.4: Διατάζεις κανονισμού για κορμούς με τρεις διαμήκεις νευρώσεις

Κάνοντας τους σχετικούς υπολογισμούς και λαμβάνοτας υπ' όψην και τις διατάξεις για ανοικτές διαμήκεις νευρώσεις ορίσθηκε για το άνοιγμα ως τελικά μεγέθη, εγκάρσιες νευρώσεις ανά 1,50m και τις διαμήκεις όπως φαίνονται παραπάνω. Εν συνεχεία ακολουθώντας τις αντίστοιχες διατάξεις κάναμε τους δύο ελέγχους όπως αυτοί ορίζονται, και είναι οι εξής:

Έλεγχος τύπου πλάκας, απ' όπου προέκυψε μειωτικός συντελεστής ρ = 1,00

Έλεγχος τύπου υποστυλώματος απ' όπου προέκυψε μειωτικός συντελεστής ρ<sub>c,υπ</sub> = 0,64

Επομένως, όπως και το περιμέναμε σε τέτοιες περιπτώσεις ενώ ο έλεγχος τύπου πλάκας δεν απομειώνει καθόλου τον κορμό μας οπότε και δεν θα είχαμε ιδιαίτερο πρόβλημα, ο έλεγχος τύπου υποστυλώματος είναι ιδιαίτερα δυσμενής, και μ' αυτόν προφανώς θα ελέγξουμε τη διατομή μας. Οι διαστάσεις της νεύρωσης που επιλέχθηκαν κατά το σχεδιασμό της ώστε να επαρκεί η διατομή έναντι των ελέγχων κύρτωσης ορίσθηκαν ως εξής, πλάτος κάθε νεύρωσης ίσο με 160mm και πάχος νεύρωσης 16mm ώστε να τηρείται και το όριο που τίθεται απ΄τον κανονισμό, δηλαδή  $I_p / I_t \ge 5,3 \ge 6$ .



1. Συμπεριφορά τύπου πλάκας

Κάποια στοιχεία που εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς είναι η αισθητή μείωση της ενεργού διατομής γύρω απ' τη νεύρωση κάτι που υπήρξε λόγω της μικρότερης τιμής του μειωτικού συντελεστή ρ όπως είδαμε και παραπάνω. Τέλος αφού διαστασιολογήσαμε πλήρως τη διατομή και τη νεύρωση μας στο άνοιγμα, θα πρέπει να ολοκληρώσουμε τον τελικό έλεγχο ώστε να επαρκεί η κατασκευή στα σημεία αυτά. Η τάση αντοχής προέκυψε μετά από μια σειρά από πράξεις και προφανώς την επίδραση του μειωτικού συντελεστή ρ σ<sub>Rd,EK-3</sub> = 234 Mpa. Απ' τα διαγράμματα που προέκυψαν απ τις

αναλύσεις η μέγιστη ορθή τάση που μας έδωσε το λογισμικό sofistik για τους συνδυασμούς σε οριακή κατάσταση αστοχίας είναι σ<sub>Ed,max</sub> = 227 Mpa.

Έλεγχος για κύρτωση δοκού στο άνοιγμα:

$$\sigma_{\text{Rd},\text{EK-3}} = 234 \text{ Mpa} > \sigma_{\text{Ed},\text{max}} = 227 \text{ Mpa} \quad \text{O.K.}$$

Επομένως ο σχεδιασμός που κάναμε έναντι των ορθών τάσεων για το άνοιγμα μας επαρκεί οριακά. Επειδή όπως προείπαμε υπήρξε ενδιαφέρον στην παρούσα μελέτη για περαιτέρω διερεύνιση με λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο θα δώσει ακριβέστερα εντατικά μεγέθη σχετικά με την αντοχή της διατομής που επιλέξαμε, θα εισάγουμε το συγκεκριμένο τμήμα της δοκού σχεδιασμού καθώς και την κατανομή των τάσεων για να δούμε τι θα προκύψει. Μετά την επεξεργασία στο λογισμικό adina καταλήξαμε στα εξής αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σχετικά με την αυστηρότητα των διατάξεων του ευρωκώδικα:



Σχ. 3.18: Αποτελέσματα αναλύσεων λογισμικού Adina

Στο διάγραμμα παραπάνω φαίνονται 3 γραμμές οι οποίες αναπαριστούν όπως φαίνεται κατά σειρά από αριστερά προς τα δεξιά, την τάση αντοχής που είχαμε βρει για τη διατομή μας με τον ευρωκώδικα 3, την δρώσα μέγιστη τάση που προκύπτει για τη διατομή στο

άνοιγμα απ' το λογισμικό sofistik στον κορμό της δοκού και τέλος η αντοχή που παίρνουμε για συνεχώς αυξανόμενη ένταση, με κατανομή που έχουμε δείξει σε σχήματα παραπάνω και ατέλεια όπως ορίζεται απ' τον κανονισμό δηλαδή 1 / 200 = 20mm. Παρατηρούμε ότι η αντοχή του κορμού μας με τη νεύρωση που θέσαμε κατά τα γνωστά και με το συγκεκριμένο πάχος, για ελαστικό πάντα σχεδιασμό μιας και κατασκευάζουμε έργο σιδηράς γέφυρας με αυξημένες απαιτήσεις ασφαλείας, φθάνει κοντά στα 242 Mpa. Δηλαδή, σχεδόν ίση με την αντίστοιχες διατάξεις του ευρωκώδικα 3. Επομένως για διατομές κατηγορίας 4 σε αντίθεση με προηγουμένως βλέπουμε ότι ο ευρωκώδικας δίνει οριακές αντοχές ίσες με τις πραγματικές του φορέα ωστόσο και πάλι η διατομή μας επαρκεί στον έλεγχο σε κάθε περίπτωση. Έτσι δεν κιδυνεύουμε από φαινόμενα ψαθυρής αστοχίας που μπορεί να προκύψουν από οριακές καταστάσεις. Αυτό μάλιστα το διαπιστώνουμε και από τη ροή των τάσεων Von Mises που φαίνεται παρακάτω για εφαρμογή της μέγιστης δρώσας τάσης,



Σχ. 3.19: Απεικόνηση ροής τάσεων πάνω στον κορμό στην στήριζη για τη δρώσα τάση

Κατ' αυτό τον τρόπο ολοκληρώσαμε την διαστασιολόγηση αλλά και τους σχετικούς ελέγχους με πλήρη ανάλυση για σχεδιασμό της κύριας δοκού μας και ιδιαίτερα των κορμών της έναντι τέμνουσας. Γενικά είναι μια ιδιαίτερα σημαντική διαδικασία κατά την οποία θα πρέπει να ληφθουν υπ' όψην αρκετά εντατικά μεγέθη ώστε να γίνει ο τελικός έλεγχος των διατομών μας. Σημαντικό ρόλο βέβαια θα παίξει και η συνδεσμολογία που θα γίνει στο φορέα στο εργοτάξιο καθώς επίσης και οι ατέλειες που προβλέφθηκαν για τα υλικά μας. Γι' αυτό η επίβλεψη κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική στο συγκεκριμένο στάδιο του έργου. Παρακάτω θα δείξουμε σε σχήμα πως θα γίνει η διάταξη σε τυχαία κατά μήκος τομή της κύριας δοκού, όπου θα φαίνονται για κάποιο μήκος, οι νευρώσεις που τοποθετήθηκαν καθώς επίσης οι σχετικές αποστάσεις μεταξύ τους αλλά και οι διαστάσεις τους για λόγους

πληρότητας, αν και είναι γνωστές από προηγούμενα σχήματα. Έχουμε επομένως το εξής σχήμα αριστερά από τυχαία στήριξη:



Σχ. 3.20: Εποπτική απεικόνιση νευρώσεων σε διαμήκη τομή δοκου εύρους 20m

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται μια κατά μήκος τομή της κύριας δοκού μας για 20m αριστερά τυχαίας στήριξης, όπως θα είναι στην τελική της κατάσταση με όλες τις διαμήκεις και τις κατακόρυφες νευρώσεις. Όπως μπορούμε να δούμε στα πρώτα 10m αμέσως μετά τη στήριξη οι εγκάρσιες νευρώσεις είναι τοποθετημένες ανά 1,50m ενώ μετά και καθ' όλη τη διάρκεια του ανοίγματος όπως έχουμε δείξει, μέχρι βέβαια την επόμενη στήριξη, είναι στα 2,30m. Οι διαμήκεις νευρώσεις βλέπουμε ότι ξεκινούν από 3, στα 5m περίπου από τη στήριξη γίνονται δύο, για να φτάσουμε στο άνοιγμα όπου επαρκεί και μία νεύρωση όπως έχουμε υπολογίσει και νωρίτερα. Επίσης φαίνονται ακριβώς και οι αποστάσεις που θα γίνει η συνδεσμολογία όλων των νευρώσεων στην κάθε περιοχή, καθώς και οι διαστάσεις της δοκού για την εκάστοτε θέση. Αυτό που δεν φαίνεται, επειδή είναι ένα πιο μακροσκοπικό σχήμα είναι οι διαστάσεις των νευρώσεων κάθε φορά. Βέβαια ξέρουμε ότι για το άνοιγμα είναι 0,15m και 0,015m για πλάτος και πάχος αντίστοιγα, ενω για τα 10m μεταξύ στήριξης και ανοίγματος ισχύουν νευρώσεις με διαστάσεις 0,16m και 0,016m πλάτος και πάγος. Λαμβάνοντας υπ' όψην μας όλα αυτά έχουμε διαστασιολογήσει πλήρως και σε όλο το εύρος της την κύρια δοκό και είμαστε έτοιμοι να προβούμε στους επιπλέον ελέγγους για την οριακή κατάσταση αστοχίας.

#### 3.5 Έλεγχος σε στρέψη

Σε μια τέτοια γέφυρα όπως αυτή, με την ιδιαιτερότητα του συρμού να συνδέεται κατά τον τρόπο που έχουμε δείξει στην εισαγωγή στην κύρια δοκό περιμέναμε αρκετά μεγάλα πρβλήματα σε στρέψη. Γι' αυτό το λόγο και επιλέχθηκε η διατομή να είναι συγκολλητή κοίλη ορθογωνική, ώστε να έχει μεγάλη δυστρεψία λόγω των όρων steiner και να ελαχιστοποιείται το πρόβλημα. Έτσι για τους συνδυασμούς της οριακής κατάστασης αστοχίας τρέξαμε το λογισμικό sofistik για να δούμε τα διαγράματα δρώντων εντατικών και που παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές με τις οποίες θα κάνουμε τους ελέγχους μας και σ' αυτό το στάδιο του φορέα.



Σχ. 3.21: Δυσμενέστερο διάγραμμα θετικών ροπών στρέψης



Σχ. 3.22: Δυσμενέστερο διάγραμμα αρνητικών ροπών στρέψης

Στα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε τα διαγράμματα ροπών στρέψης όπως αυτές προέκυψαν μετά τις αναλύσεις. Βλέπουμε όπως είναι και λογικό σε τέτοιου είδους περιπτώσεις να αυξάνεται η ένταση όσο είμαστε στις στηρίξεις και να μειώνεται έως ότου να τείνει στο μηδέν στο μέσο του ανοίγματος κάθε φορά. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι τις μέγιστες κατ΄απόλυτη τιμή εντάσεις τις έχουμε στο άνοιγμα R2 όπου έχουμε την

επίκληση αλλά και ταυτόχρονα την μεγαλύτερη αλλαγή κατεύθυνσης στο τμήμα της χάραξης που μελετήθηκε. Κάτι τέτοιο μοιάζει εύλογο αφού εκεί θα δημιουργούνται πολλές ροπές, όχι μόνο απ' τα οριζόντια φορτία όπως ο άνεμος και η φυγόκεντρος, αλλά και από ζεύγη ροπών στα εφέδρανα ακόμα και από τα διαμήκη ή τα κατακόρυφα φορτία, σε μικρότερο βαθμό βέβαια τα τελευταία.

Οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν με την μέγιστη δρώσα ροπή απ' τα παραπάνω διαγράμματα αφού πρώτα βρήκαμε τις αντοχές της διατομής μας. Πιο συγκεκριμένα, στη περίπτωσή μας έχουμε κλειστή μονοκυψελική διατομή, γι' αυτό το λόγο βρήκαμε από τον 2° τύπο του Bredt τη ροπή αδράνειας της διατομής σε στρέψη μέσω της σχέσης αυτής η οποία είναι:

• 
$$Jt = \frac{4A_m^2}{\oint \frac{ds}{t}}$$

Από την παραπάνω σχέση καταλήξαμε σε ροπή δυστρεψίας η οποία έχει τις εξής τιμές για άνοιγμα και στήριξη:

>  $J_t = 3941000 \text{ cm}^4$ , για τη διατομή στο άνοιγμα

>  $J_t = 7721000 \text{ cm}^4$ , για τη διατομή στη στήριξη

Όπως μπορούμε να δούμε στη στήριξη είναι σχεδόν η διπλάσια απ' ότι είναι στο άνοιγμα, και απ' αυτό συμπεραίνουμε πόσο μεγάλη επιρροή έχουν οι όροι steiner σε μια τέτοια κλειστή μονοκυψελική διατομή στην περίπτωση της ροπής αδράνειας σε στρέψη. Στη συνέχεια και έχοντας αυτές βρήκαμε τις τελικές ροπές αντοχής με τις οποίες θα συγκρίνουμε τις μέγιστες δρώσες ροπές στρέψης που βρήκαμε προηγουμένως ώστε να δούμε αν επαρκούν οι διατομές μας. Οι αντοχές μας αυτές είναι οι εξής για την κύρια δοκό μας:

\*  $M_{b,t,el} = 12426.77$  kNm, για τη διατομή του ανοίγματος

•  $M_{b,t,el} = 23255 \text{ kNm}$ , για τη διατομή του στηρίγματος

Αρκετά μεγάλες όπως θα φανεί και στους ελέγχους στη συνέχεια, κάτι που το θέλουμε γενικά να συμβαίνει σε κατασκευές με τεράστια σημασία αλλά και αναπτυξιακού

χαρακτήρα, όπως αυτή που σχεδιάζουμε στην παρούσα εργασία καθώς μιλάμε για έναν συρμό monorail ο οποίος θα διεκπεραιώνει τις ανάγκες για μετακίνηση εντός της πόλης, αλλά και τη σύνδεση αυτής με πύλες εισόδου στη χώρα όπως το αεροδρόμιο της εκεί περιοχής. Έτσι οι έλεγχοι που έγιναν με βάση όλες αυτές τις συνθήκες αλλά και τα παραπάνω μεγέθη που βρέθηκαν είναι οι ακόλουθοι:

✓ 
$$M_{b,t,el} = 12426.77 \text{ kNm} > M_{t,ed} = 1097 \text{ kNm}$$

✓  $M_{b,t,el} = 23255 \text{ kNm} > M_{t,ed} = 1627 \text{ kNm}$ 

Εδώ ολοκληρώθηκαν οι επιμέρους έλεγχοι και άρα και ο σχεδιασμός σε καταστάσεις οριακής κατάστασης αστοχίας. Αν χρειαστεί κάποια αλλαγή η δοκός, θα την κάνουμε στην συνέχεια και θα επαναλάβουμε την διαδικασία που κάναμε. Στη συνέχεια θα παρατεθεί ένας συνολικός έλεγχος απ' όλα τα εντατικά μεγέθη με τάσεις αυτή τη φορά για έναν τελευταίο έλεγχο.

#### 3.6 Έλεγχος τάσεων von Mises - Συμπεράσματα

Εδω θα γίνουν για λόγους πληρότητας της μελέτης ο έλεγχος της διατομής στη δυσμενέστερη θέση με την τάση διαρροής του υλικού, ώστε να είμαστε πλήρως εξασφαλισμένοι και σε περίπτωση αλληλεπίδρασης των προαναφερθέντων εντατικών μεγεθών μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα το διάγραμμα που πήραμε για τον δυσμενέστερο συνδυασμό των τάσεων von Mises είναι το παρακάτω:



Σχ. 3.23: Δυσμενέστερη περίπτωση διαγράμματος τάσεων Von Mises

Όπως βλέπουμε η μέγιστη τιμή της έντασης παρουσιάζεται στη στήριξη και είναι η τιμή που είναι μέσα στο μαύρο τετραγωνάκι. Μ' αυτήν κάναμε και τον τελικό έλεχο των διατομών και έχουμε:

•  $\sigma_{Ed,max} = 227.10 Mpa < f_y = 355 Mpa$ 

Όπου βλέπουμε ότι επαρκεί για τον ελαστικό σχεδιασμό που έχουμε υπολογίσει και επομένως είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στα επόμενα στάδια ελέγχων αφού αυτό ολοκληρώθηκε επιτυχώς με τον πλήρη σχεδιασμό και διαστασιολόγηση των διαφόρων τμημάτων της δοκού σε όλο το τμήμα μελέτης που ασχολούμαστε στην παρούσα εργασία.

#### 4. Έλεγχοι σε κόπωση

#### 4.1 Εισαγωγή

Αρχικά θα εισάγουμε την κόπωση ως έννοια και πότε ο έλεγχός της είναι σημαντικός στις μεταλλικές κατασκευές όπως αυτή στην παρούσα εργασία. Γενικά όταν σε ένα υλικό επιβάλλεται επαναλαμβανόμενη φόρτιση η οποία δημιουργεί αυξομειούμενες τάσεις, είναι ενδεχόμενο να προκληθεί αστοχία του υλικού, ακόμη και αν οι μέγιστες τάσεις παραμενουν αρκετά μικρότερες από το όριο διαρροής του. Το φαινόμενο κατά το οποίο δημιυργείται μηχανησμός αστοχίας μέσω ανάπτυξης ρωγμών στο υλικό, ονομάζεται κόπωση, τα δε φορτία και οι τάσεις που προκαλούν την κόπωση, ονομάζονται φορτία και τάσεις κόπωσης.

"Κόπωση είναι η διαδικασία προοδευτικής τοπικής μόνιμης δομικής αλλαγής, που λαμβανει χώρα σε ένα υλικό υποκείμενο σε συνθήκες οι οποίες προκαλούν αυξομειούμενες τάσεις και παραμορφώσεις σε ένα η περισσότερα σημεία, με πιθανό αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών ή πλήρους αστοχίας μετά από μεγάλο αριθμό αυξομειώσεων".

Ο όρος κόπωση (fatigue), εισήχθη για πρώτη φορά από το Γάλλο J.V.Poncelet, ο οποίος παρατήρησε ότι η αντοχή των χαλύβδινων κατασκευών μειωνόταν λόγω επενέργειας κυκλικών δράσεων (εφελκυστικών και θλιπτικών). Οι πρώτες σοβαρές μελέτες πάνω στο πρόβλημα της κόπωσης έγιναν από το Γερμανό A. Wöhler το 1858, ο οποίος ανέπτυξε μία μέθοδο μέτρησης του ορίου κόπωσης (fatigue limit ή endurance limit), η οποία εξακολουθεί να υφίσταται μέχρι σήμερα.

Η κόπωση εμφανίζεται σε κατασκευές οι οποίες υπόκεινται σε μεγάλο αριθμό αυξομειώσεων των τάσεων. Έτσι, οι φέροντες οργανισμοί κτιριακών έργων, επειδή δεν εκτίθενται σε μεγάλο αριθμό επαναλήψεων, δεν κινδυνεύουν συνήθως να παρουσιάσουν προβλήματα κόπωσης, σε αντίθεση με άλλες κατασκευές, όπως γέφυρες, γερανογέφυρες, θαλάσσιες εξέδρες κλπ, όπου ο αριθμός των επαναλήψεων είναι πολύ μεγάλος, ενώ συγχρόνως και ο λόγος του κινητού προς το συνολικό φορτίο είναι υψηλός.

Η αστοχία σε κόπωση συνδέεται κατά κύριο λόγο με τις αναπόφευκτες μικροσκοπικές ατέλειες και γεωμετρικές ασυνέχειες που συσσωρεύονται στο εσωτερικό του κάθε υλικού. Οι ατέλειες και οι ασυνέχειες αυτές (εγκοπές σε ελαττωματικά σύνορα, κακή κατασκευή ή κακή ποιότητα κοπής με φλόγα οζυγόνου, ραφές συγκόλλησης κακής ποιότητας κλπ) αποτελούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων, δηλαδή μικροσκοπικές περιοχές όπου οι τάσεις είναι δυνατόν να ξεπερνούν το όριο διαροοής, παρόλο που σε συνολικό μακροσκοπικό επίπεδο οι τάσεις αυτές δεν ξεπερνούν την ελαστική περιοχή. Με τη συνεχή εναλλαγή της φόρτισης εκκινεί στις μικροσκοπικές περιοχές αυξημένων τάσεων ένας μηχανησμός δημιουργίας και επέκτασης μικρορωγμών, καθώς και σχετικής ολίσθησης των επιπέδων των δομικών στοιχείων του υλικού. Τελικό αποτέλεσμα είναι ο σχηματισμός μακροσκοπικές περιοχής του υλικού και τη θραύση του. Οι ανεπιθύμητες μικροσκοπικές ατέλειες του υλικού δεν είναι δυνατόν ούτε να αποφευχθούν ούτε να εξαλειφθούν, αλλά ούτε και να εκτιμηθούν με ακρίβεια, γι αυτό και η μελέτη του φαινομένου της κόπωσης γίνεται κυρίως μέσω πειραματικής έρευνας. Στόχος

της έρευνας αυτής είναι ο προσδιορισμός του χρόνου ζωής των διαφόρων υλικών, όταν αυτά υποβάλλονται σε διαφορετικούς τύπους καταπονήσεων. Τα μεγέθη που προσδιορίζονταιαπό τις δοκιμές κόπωσης, έχουν χαρακτήρα στατιστικού μέσου όρουαπό ένα πολύ μεγάλο αριθμό ίδιων πειραμάτων, επειδή η συσσώρευση των ατελειών και των ασυνεχειών σε διαφορετικά δείγματα του ίδιου υλικού δεν είναι ποτέ απολύτως ίδια, με άμεση συνέπεια τη διασπορά των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Λόγω του ότι η διατομή μας είναι μια συγκολλητή κοίλη ορθογωνική διατομή θα κάνουμε ιδιαίτερη αναφορά σ αυτού του είδους τις διατομές για τον έλεγχο της κόπωσης. Οι συγκολλητές κατασκευές είναι επιρρεπείς σε κόπωση, λόγω διαφόρων παραγόντων που εμφανίζονται στην περιοχή των ραφών της συγκόλησης (ατέλειες, τοπική συγκέντρωση τάσεων, παραμένουσες τάσεις) και συντείνουν στην ανάπτυξη του φαινομένου. Οι περισσότερες μέθοδοι συγκόλλησης δημιουργούν μεταλλουργικές ασυνέχειες, από τις οποίες μπορεί να αναπτυχθούν μικρορωγμές. Ως αποτέλεσμα αυτού, η αρχική περίοδος έναρξης, η οποία απαιτε'ιται κανονικά για να εμφανισθεί μία ρωγμή σε ένα χαλύβδινο στοοιχείο, εδώ είναι είτε πολύ μικρή, ή δεν υπάρχει καθόλου, αφού το σημείο έναρξης έχει ήδη δημιιουργηθεί κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης. Ένας άλλος λόγος είναι το γεγονόος ότι οι περισσότερες συγκολλήσεις έχουν τραγείες επιφάνειες, στα σημεία δε των άκρων και των ριζών καθώς και στις απολήξεις των συγκολλήσεων δημιουργείται απότομη αλλαγή διεύθυνσης και έντονη τοπική συγκέντρωση τάσεων. Έξάλλου σχετικά με τις παραμένουσες τάσεις, αυτές αναπτύσσονται στην περιοχή της συγκόλλησης κατά μήκος αλλά και εγκάρσια προς τις ραφές, και μπορεί να προκαλέσουν ταυτόγρονη παραμόρφωση των συγκολλούμενων τεμαχίων.

#### 4.2 Κανονιστικές διατάξεις για έλεγχο σε κόπωση του ΕΚ-3

Για να προβούμε στους ελέγχους που απαιτούνται για τον έλεγχο της δοκού μας σε κόπωση, θα πρέπει πρώτα να βρούμε το συνδυασμό εκείνο, ο οποίος για τον φορέα μας και την συγκεκριμένη κατασκευή θα μας δώσει τα τελικά δρώντα εντατικά μεγέθη. Ο συνδυασμός αυτός για γέφυρες τρένων, δίνεται ως ένας συρμός που αποτελείται από δύο βαγόνια. Τα βαγόνια αυτά έχουν μια ενδιάμεση φόρτιση απ' αυτές που είδαμε στην οριακή κατάσταση αστοχίας για να μπορούμε να λάβουμε υπ' όψην μας πιο εποπτικά τα φορτία της δοκού. Επίσης εκτός από τις κατακόρυφες δράσεις συμπεριλαμβάνονται τα μόνιμα φορτία της δοκού καθώς και το 60% των θερμοκρασιακών φορτίων. Πιο αναλυτικά η σχέση υπολογισμού των δράσεων έχει ως εξης:

#### $\blacktriangleright$ Fatigue = D + TMF +0.6xT

Όπου πιο συγκεκριμένα τα μόνιμα φορτία αφορούν τα ίδια βάρη δοκού όπως ορίσθηκαν και πριν στην οριακή κατάσταση αστοχίας, ως φορτία τροχού ορίσθηκαν κατακόρυφα φορτία με τιμή 106,60kN και αντίστοιχα η φυγόκεντρς που δημιουργείται γι' αυτή τη δράση μόνο στο άνοιγμα R2 ώστε να είμαστε πλήρεις στο διάγραμμα τάσεων που θα προκύψει απ' τον παραπάνω συνδυασμό. Τέλος έχουμε τα θερμοκρασιακά φορτία που είναι και πάλι τα ίδια με την οριακή κατάσταση αστοχίας όπου θα προκύψει

κατανεμημένο φορτίο όπου θα έχουμε θερμοκρασιακή μεταβολή 12°C. Για να είμαστε σίγουροι ότι θα πάρουμε το διάγραμμα με το δυσμενέστερο εύρος τάσεων της κύριας δοκού φροντίσαμε να τοποθετήσουμε αρκετά σημεία ελέγχου πάνω στη διατομή της κάθε φορά. Τα σημεία που επιλέξαμε φαίνονται πιο ξεκάθαρα στο παρακάτω σχήμα και επιλέχθηκαν ως τα πιθανότερα για πιο δυσμενή, καθώς είναι στα άκρα της διατομής κάθε φορά όπου εκεί δημιουργούνται οι μεγαλύτερες εντάσεις. Αυτά που επιλέξαμε είναι τα εξής:



Όπως μπορούμε να δούμε οι κουκίδες μας δείχνουν τα σημεία που θα πάρουμε τις τάσεις του παραπάνω συνδυασμού σε κόπωση. Επιπλέον το σημείο με τον αριθμό 5 μετά από σύγκριση που έγινε στα αποτελέσματα του sofistik στα διαγράμματα τάσεων προέκυψε ότι εκεί δημιουργείται το μεγαλύτερο εύρος στη διατομή της δοκού. Για αυτό το λόγο και είναι κυκλωμένο με κόκκινη γραμμή, αφού εκεί θα γίνουν και οι σχετικοί έλεγχοι, αφού βέβαια επιλέξουμε κατηγορία λεπτομέριας. Πριν απ' αυτό όμως ας δούμε την περιβάλλουσα τάσεων που προέκυψε στη δυσμενέστερη αυτή θέση,



Τελικά προκύπτει όπως μπορούμε να δούμε ότι το μέγιστο εύρος τάσεων απ' την παραπάνω περιβάλλουσα του σημείου 5 είναι  $\Delta\sigma_{Ed,max}$ = 51.70 Mpa. Έπειτα σειρά έχει να βρούμε τους συντελεστές που ίσως μας προσαυξήσουν αυτήν την δρώσα τάση. Έτσι βρήκαμε ότι οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας για τις δρώσες τάσεις είναι Φ<sub>2</sub>=1.036, γ<sub>Ff</sub>= 1.00 και λ = 1. Εδώ αξίζει να σημειώσουμε ότι οι υπολογισμοί που κάναμε για τα λ<sub>1</sub>, λ<sub>2</sub>,..., ώστε να βρούμε το λ προέκυπτε μία τιμή κοντά στο 0.56. Αυτό σημαίνει ότι σε τέτοιες κατασκευές οι διατάξεις του ευρωκώδικα για ελέγχους σε κόπωση χρειάζονται ίσως περαιτέρω διερεύνηση στην εύρεση των φορτικών συντελεστών προσαύξησης των εντατικών μεγεθών. Επομένως το εύρος τάσεων που θα κάνουμε τους ελέγχους θα γίνει μετά από τους φορτικούς συντελεστές,  $\Delta\sigma_{Ed,max}$ = 53.56 Mpa.

Έχοντας βρει το μέγιστο εύρος τάσεων από τους παραπάνω υπολογισμούς, τώρα θα πρέπει να βρούμε την κατηγορία λεπτομέρειας της διατομής που έχουμε, ώστε να καταλήξουμε στους τελικούς ελέγχους. Γι' αυτό το λόγο διαχωρήσαμε τις εξής περιπτώσεις που υπάρχουν κατά μήκος της διατομής:

- Μέγιστο εύρος τάσεων Κατηγορία λεπτομέρειας 100
- Αποκατάσταση συνέχειας δοκού Κατηγορία λεπτομέρειας 90
- Αλλαγή διατομής δοκού Κατηγορία λεπτομέρειας 90
- Εγκάριες νευρώσεις Κατηγορία λεπτομέρειας 80

Οι κατηγορίες που αναφέραμε παραπάνω προέκυψαν από τους αντίστοιχες πίνακες του ευρωκώδικα 3 που θα δείξουμε παρακάτω ώστε να γίνουν απολύτως σαφείς αφού εκεί αναφέρονται αναλυτικά οι περιπτώσεις που μόλις είδαμε.

100		<ul> <li>5) Χειροποίητε; εσωράφέ; ή εξωραφέ;</li> <li>6) Χειροποίητε; ή αυτόματε; μονότλευρε; εσωραφέ; ενδικά για κλευστέ; διατομέ;</li> </ul>	5), 6) Απαιτείται τέλεια συναρμογή πέλματος-κορμού. Προετοιμασία ακμής κορμού ώστε να φαίνεται και να πληρώνεται επαρκώς η ρίζα για την αποφυγή τοπικής αστοχίας.
90	Empperi skiumar, ye 1-25mm k,=(251) <sup>62</sup>	<ul> <li>5) Εγκάρστες ετεκτάσεις σε λετίδες ή ελασματα.</li> <li>6) Πλήρης αποκατάσταση ελετάν δατομάν με εσαροφές χαρίς στές συναρμογής.</li> <li>7) Εγκάρστες ετεκτάσεις σε λετίδες ή ελασματα μεταβλητού Κλάτους ή πάχους με κλίση 5 %.</li> <li>Επεξεργοσία ραφών ώστε να είναι ελεύθερες εγκοπών.</li> </ul>	<ul> <li>Υψος καιλότητας ραφής όχι μεγαλύτερο από το 10% του πλατοος με ομαλή συναρμογή στην επιφάνεια ελόσματος.</li> <li>Χρήση και στη συνάχεια αφάρεση υποθάματος, άγκαυση ρίζας στις εκμές είλαιτό τη διειθόνιση των τόσεων.</li> <li>Αμφτιλευρη συγκόλληση: έλεγχος με μη καταστροφικές μεθόδοις.</li> <li><u>Αμπομέρειες 5 και 7:</u> Συγκολληση σε επιτέρη θέση.</li> </ul>
80	t⊊50mm	<ul> <li>Δ. Συγκολλούμενα σε έλασμα.</li> <li>δ) Συγκολλούμενα σε έλασμα.</li> <li>7) Κατακόρυφες ενισχύσεις συγκολλούμενες σε ελατή ή συγκολλητή δοκό.</li> </ul>	<u>Τα άκρα της ραφής θα πρέπει να</u> λειαίνονται προσεκτικά για την εξάλεινη κάθε πθανής εγκαπής. 7) Η Δο θα υπολογίζεται βάσει

Η πρώτη κουκίδα αφορά την πρώτη σειρά μια απλή συγκολλητή διατομή. Η δεύτερη και η τρίτη αφορούν η μία την αποκατάσταση συνέχειας αφού προφανώς δεν γίνεται να μεταφερθεί η δοκός ολόκληρη στο εργοτάξιο και επομένως θα γίνει με συγκολλήσεις στο ενδιάμεσο, και η άλλη την αλλαγή διατομής όσον αφορά τη σταδιακή μείωση του κορμού της διατομής όσο πηγαίνουμε από τη στήριξη στο άνοιγμα κάθε φορά. Η τέταρτη και πιο δυσμενής αφού δίνει τη μικρότερη κατηγορία λεπτομέρειας και άρα αυτή θα χρησιμοποιήσουμε για την τάση αντοχής, αφορά την ύπαρξη εγκάρσιων νευρώσεων που υπολογίσαμε και τοποθετήσαμε νωρίτερα στην κύρια δοκό μας. Παράλληλα επειδή η δοκός ελέγχους μας και ένα πρόσθετο συντελεστή ασφαλείας ο οποίος από τον κανονισμό θα είναι γ<sub>Mf,α</sub>=1.15. Έτσι η τάση αντοχής που προκύπτει τελικά σε κόπωση είναι με την εισαγωγή του συντελεστή ασφαλείας, Δσ<sub>Rd,f</sub> = 69.57 Mpa.

Πλέον είμαστε έτοιμοι να κάνουμε το σχετικό έλεγχο και άρα προκύπτει:

• 
$$\Delta \sigma_{\text{Ed,max,f}} = 53.56 \text{ Mpa} < \Delta \sigma_{\text{Rd,f}} = 69.57 \text{ Mpa}$$

Όπως μπορούμε να δούμε η διατομή που επιλέξαμε στον έλεγχο που έγινε σε κόπωση επαρκεί για τις συνθήκες αυτές του έργου.

#### 4.3 Αντοχή και διάρκεια ζωής κύριας δοκού σε κόπωση

Θέλοντας στη συνέχεια να προβλέψουμε τη διάρκεια ζωής της κύριας δοκού ώστε να κάνουμε πιο πλήρη τη μελέτη μας σχετικά με το σχεδιασμό του κύριου φορέα του έργου, θελήσαμε να υπολογίσουμε μέσω της κατηγορίας λεπτομέρειας τα έτη μετά τα οποία θα πρέπει να τον αντικαταστήσουμε. Αυτό θα πρέπει να γίνει ώστε το έργο να συνεχίσει να λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές της παρούσας μελέτης.

Γνωρίζουμε από τον προηγούμενο υπολογισμό ότι η κατηγορία λεπτομέρειας της διατομής μας είναι 80. Από τον πίνακα του ευρωκώδικα θα βρούμε σε ποια περιοχή ανήκει η κατασκευή μας ανάλογα με τη τάση που προέκυψε.



Ο παραπάνω πίνακας συνδέει το εύρος τάσεων με τους κύκλους φόρτισης και ανάλογα σε ποια περιοχή είμαστε, πράγμα που φαίνεται απ' την κλίση του πίνακα. Η πρώτη περιοχή είναι για m=3, m=5, και η αποκοπτώμενη περιοχή όπου δεν χρειάζεται να ελέγξουμε τα έτη που πρέπει να αντικατασταθεί η δοκός αφού δεν θα επιρρεαστεί απ το φαινόμενο της κόπωσης. Με κόκκινο κύκλο έχουμε ορίσει την ευθεία που κινούμαστε ανάλογα με την κατηγορία λεπτομέρειας. Για την παραπάνω διερεύνηση όπως είπαμε πρέπει να βρούμε

τους κύκλους φόρτισης. Αυτό γίνεται ανάλογα σε πιο εύρος τάσεων κινούμαστε ανάλογα με τα όρια που έχει ορίσει ο ευρωκώδικας. Πιο συγκεκριμένα τα όρια αυτά είναι:

- Δσc = 69.57 Mpa
- $\Delta \sigma_D = 0.737 x \Delta \sigma_c = 51.27 \text{ Mpa}$
- $\Delta \sigma_{\rm L} = 0.405 {\rm x} \Delta \sigma_{\rm c} = 28.18 {\rm Mpa}$

Προκύπτει επομένως ότι είμαστε ανάμεσα στις δύο πρώτες περιπτώσεις και άρα η κατηγορία που κινούμαστε θα είναι για m=3 στο παραπάνω διάγραμμα. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις τάσεις μέσω του παρακάτω πίνακα του ευρωκώδικα θα καταλήξουμε στους κύκλους φόρτισης που αντιστοιχούν στη δοκό μας.

Κυκλώσαμε τους κύκλους που αντιστοιχούν στο διάστημα που αναφερθήκαμε, ώστε μέσω της αναλογίας με την δρώσα να καταλήξουμε στον αριθμό κύκλων που ψάχνουμε. Ο αριθμός κύκλων υπολογίσθηκε από τη σχέση  $N = Ncx(\Delta\sigma c/\Delta\sigma_{Ed,max,f})^m$ , με m=3 όπως έχουμε αναφέρει. Εδώ χρειάστηκε να υποθέσουμε διέλευση φορτίου κόπωσης ανά 10 λεπτά και αυτό λόγω της ιδιαιτερότητας του έργου, και την περιοχή όπου είναι αναπτυσσόμενη και δεν υπάρχουν προηγούμενες μετρήσεις. Μετά απ' αυτή τη διαδικασία προέκυψαν κύκλοι φόρτισης ίσοι με N = 1531893 κύκλοι μέχρι την απαίτηση για αντικατάσταση της κύριας δοκού. Τέλος μετά από όλα αυτά προκύπτει διάρκεια ζωής της δοκού μας ίση με 29 έτη. Μετά το πέρας αυτών των χρόνων θα πρέπει να υπάρξει αντικατάσταση για να συνεχίσει η ομαλή λειτουργία της δοκού και να μην έχουμε ανεπιθύμητες ταλαντώσεις σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας που θα προκαλούσαν τη δυσφορία των επιβατών αλλά και ένα αίσθημα ανασφάλειας των συρμών, αλλά και περαιτέρω εξέλιξη του φαινομένου θα οδηγούσε σε τοπική αστοχία της δοκού κάτι ακόμα πιο δυσμενές για την ευστάθεια αυτή τη φορά της κατασκευής μας.

#### 5 Έλεγχος σε οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

#### 5.1 Εισαγωγή

Γενικά οι γέφυρες πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται κατά τρόπο που να ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις των οριακών καταστάσεων λειτουργικότητας, όπως π.χ. εξασφάλιση ελαστικής συμπεριφοράς της γέφυρας, περιορισμός των καθιζήσεων και των φυσικών συχνοτήτων, αποφυγή λυγηρών κορμών στις δοκούς, ευκολία συντήρησης και επισκευής, εξασφάλιση όρων για επαρκή ανθεκτικότητα κλπ.

Ορισμένες από τις απαιτήσεις λειτουργικότητας είναι κοινές για όλους τους τύπους γεφυρών, άλλες όμως αναφέρονται ειδικά σε οδικές ή σιδηροδρομικές γέφυρες ή πεζογέφυρες.

Ο χαλύβδινος φορέας πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να ελαχιστοποιήται ο κινδυνος σκωρίασης και να είναι δυνατή η εύκολη πρόσβαση για επιθεώρηση, συντήρηση και επισκευή όλων των τμημάτων της κατασκευής. Η απαίτηση αυτή δεν ισχύει για προσωρινές ή μικρής διάρκειας ζωής γέφυρες

#### 5.2 Έλεγχος βελών κύριας δοκού

 $\Sigma$ ' αυτό το στάδιο σχεδιασμού της κατασκευής θα υποβάλουμε τη δοκό μας σε φορτίσεις συνήθους λειτουργίας όπως αυτές ορίζονται από τον κανονισμό ACI – 358, ώστε να ελέγξουμε αν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους συνδυασμούς αυτούς είναι κάτω από τα ισχύοντα όρια. Η αποτελεσματικότητα και η ανοχή που θα έχουμε στους ελέγχους στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας θα καθορίσει σε μεγάλο βαθμό την ομαλή διέλευση των συρμών πάνω από το τμήμα μελέτης που έχουμε ορίσει στην παρούσα εργασία. Πιθανή μεγάλη ανοχή στα βέλη θα προκαλούσε μεγάλες ταλαντώσεις και κραδασμούς στους συρμούς και ως κατ' επέκταση στις καμπίνες με τους επιβάτες. Κατι τέτοιο βέβαια εκτός από τη δυσφορία που θα προκαλέσει στους ανθρώπους, θα μειώνει και το αίσθημα ασφάλειας που θα έχουν για τη χρήση του συγκεκριμένου έργου στις καθημερινές μετακινήσεις τους. Προφανώς κάτι τέτοιο θα ήταν επιζήμιο για το έργο αφού θα το καθιστούσε αφερέγγυο στα μάτια τους για χρήση. Για όλους αυτούς τους λόγους επομένως θα πρέπει να είμαστε ακόμα πιο αυστηροί με τα όρια που θα θέσουμε στα βέλη λόγω και της ιδιαιτερότητας της κατασκευής να είναι σε μεγάλο ύψος, πράγμα που αυξάνει και την ύπαρξη δυναμικών φαινομένων στα ήδη υπάρχοντα εντατικά μεγέθη που θα προκύψουν. Επομένως τώρα είμαστε έτοιμοι να ανατρέξουμε στον κανονισμό και να εισάγουμε τους συνδυασμούς για οριακή κατάσταση λειτουργικότητας οι οποίοι θα μας δώσουν τα δρώντα μεγέθη που χρειαζόμαστε. Αυτοί είναι:

#### Table 5.1: Service Load Combination

Service 1A =	D+SDL+L x I+PS+LFn+0.4 x WS+WL1+0.5 x DT+0.5 x SE						
	+β x T+CF or HF						
Service 1B =	D+SDL+PS+0.4 x WS+DT+ β x T+SE						
Service 2 =	Not applicable						
Service 3 =	D+SDL+L x I+PS+LFn+0.5 x DT+ $\beta$ x T+ CF or HF+0.5 x SE						
Service 4 =	D+SDL+L(empty)+PS+0.7 x WS+0.7 x WL2+ β x T+SE						

Όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε οι συμβολισμοί είναι οι ίδιοι με την οριακή κατάσταση αστοχίας εκτός από δύο συντελεστές που εισάγονται για πρώτη φορά. Αυτοί είναι:

- SE (differential settlement): ο συμβολισμός αυτός αφορά τη διαφορική καθίζηση των βαθρών λόγω διαφορετικής υποχώρησης του εδάφους σε κάθε θέση σε βάθος χρόνου κυρίως,
- LF<sub>n</sub> (Normal longitudinal braking): είναι η δράση που αφορά την διαμήκη δύναμη που δημιουργεί η αλλαγή στην ταχύτητα του συρμού κατά τη λειτουργία του. Η διαφορά με την αντίστοιχη στην οριακή κατάσταση αστοχίας, είναι ότι αυτή έχει τη μισή απόλυτη τιμή από την προηγούμενη

Αφού αναλύθηκαν οι δράσεις που υπάρχουν στους παραπάνω συνδυασμούς και έχοντας από προηγούμενες φορτίσεις το μοντέλο της γέφυρας με τις οριστικές του διατομές, θα εισάγουμε στο λογισμικό sofistik τα δεδομένα αυτά, ώστε να πάρουμε τα δρώντα εντατικά μεγέθη που θέλουμε για τους αντίστοιχους ελέγχους. Όπως θα δούμε και αργότερα στα αποτελέσματα που προέκυψαν η δυσμενέστερη δράση από αυτές που εισάγαμε είναι η διαφορική καθίζηση όπου υπάρχει, καθώς μας δίνει μια πάγια κατακόρυφη μετακίνηση όπως αυτή έχει ορισθεί από τη μελέτη στα 10 mm κάθε φορά. Η τιμή αυτή για μια ελαφριά κατασκευή όπως αυτή που θα κατασκευαστεί προέκυψε ότι είναι μια αρκετά μεγάλη επιβάρυνση. Επιπλέον η δυσμενέστερη θέση για να την τοποθετήσουμε προέκυψε το μεσαίο βάθρο όπου και λόγο στατικού προσομοιώματος, αλλά και της ύπαρξης στροφής γίνεται μεγαλύτερη συσσώρευση της έντασης. Μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων μας προέκυψαν τα εξής δύο πιο δυσμενή διαγράμματα βελών για τον φορέα, για διαφορετικό όμως συνδυασμό το καθένα κάθε φορά,



Σχ. 5.2: Διάγραμμα μέγιστων βελών βύθισης

Όπως βλέπουμε στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται το μέγιστο κατακόρυφο βέλος με φορά προς τα πάνω. Κάτι τέτοιο το περιμέναμε από τον πρώτο ή τον τρίτο συνδυασμό που έχουν μειωτικό συντελεστή επιβάρυνσης στη διαφορική καθίζηση και εδώ πρέκυψε από τον 1°. Το δεύτερο διάγραμμα αφορά τη φόρτιση 3 και μας δείχνει τη μέγιστη μετακίνηση της δοκού προς τα κάτω. Επειδή η γέφυρά μας είναι ιδιαίτερα ελαφριά και λαμβάνοντας υπ' όψην το μεγάλο της υψόμετρο αποφασίσαμε να λάβουμε ως όρια ελέγχου των βελών τα πιο δυσμενή που ορίζει ο κανονισμός και αυτά είναι το 1/1000 για το εκάστοτε άνοιγμα κάθε φορά. Εδώ όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε μας ενδιαφέρουν τα ανοίγματα R<sub>2</sub> και R<sub>3</sub> όπου εκεί έχουμε τα δύο μεγαλύτερα βέλη κάθε φορά στα δύο παραπάνω διαγράμματα. Έτσι τα βέλη ελέγχου έχουν ως εξής:

$$\circ L_2/1000 = 47 \text{ mm}$$

 $L_3/1000 = 36 \text{ mm}$ 

Και άρα οι σχετικοί έλεγχοι με τα πιο αυστηρά κριτήρια που έχουμε θέσει και πρέπει να ισχύουν για τις διατομές δοκού που ορίσαμε στην οριακή κατάσταση αστοχίας ορίζονται οι ακόλουθοι:

- ✓ 13 mm < 36 mm
- ✓ 29.1 mm < 47 mm

Οι οποίοι μπορούμε να δούμε ότι ικανοποιούνται σε κάθε περίπτωση για τα ανοίγματα της κύριας δοκού μας και επομένως είμαστε σίγουροι ότι θα έχουμε ομαλή διέλευση τρένων από το τμήμα της χάραξης που σχεδιάσαμε θα γίνεται χωρίς διαφορά σε σχέση με τη διέλευση του τρένου σε όλο τον υπόλοιπο φορέα. Επομένως το στάδιο της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας ικανοποιιήθηκε με ιδιαίτερη επιτυχία και είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στους τελευταίους ελέγχους που χρειάζονται και είναι αυτοί που αφορούν τα εφέδρανα.

#### 6. Επιλογή εφεδράνων και σύνδεσή τους με τον κύριο φορέα

#### 6.1 Εισαγωγή

Τα εφέδρανα είναι μηχανικά στοιχεία, με προορισμό να μεταφέρουν στα βάθρα τα φορτία, τα οποία επενεργούν στο φορέα της γέφυρας. Επιπλέον, παρέχουν τη δυνατότητα σχετικών μετακινήσεων και στροφών στις θέσεις όπου τοποθετούνται. Τα φορτία που μεταβιβάζονται είναι κατακόρυφα και οριζότια (διαμήκη ή εγκάρσια), οι δε μετακινήσεις οφείλονται σε θερμοκρασιακές μεταβολές ή σε άμεση φόρτιση της γέφυρας.

Οι μετακινήσεις αυτές γενικώς δεν πρέπει να παρεμποδίζονται για να μην δημιουργείται στην ανωδομή πρόσθετη ανεπιθύμητη καταπόνηση.

Τα εφέδρανα, ανάλογα με τη χρήση τους διακρίνονται σε σταθερά και κινητά. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται συνοπτικά η συμβολική τους παράσταση καθώς και οι μετκινήσεις και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε κάθε περίπτωση.

				DESIGN PARAMETERS								
			R	eactio	ns	Relative N				<b>Novements</b>		
Туре	ld	Symbol		Loads	5	Disp	Displacement		R	otatio	n	
Fixed	TF	$\bigcirc$	N	Vx	Vy	None	None	VZ	α	αy	02	
Longitudinally guided	TGe	•	N		Vy	Sliding	None	eq	ation	ation	ation	
Transversally guided	TGe	$( \begin{tabular}{c} ta$	N	Vx		None	Sliding	Limit	Deform	Deform	Deform	
Free	TGa	•	N			Sliding	Sliding	-				

Πιν. 6.1: Κατηγοριοποίηση βάθρων ανάλογα με τους δεσμευμένους βαθμούς ελευθερίας

Στη συνέχεια φαίνεται στο παρακάτω σχήμα μία τυπική διάταξη εφεδράνων σε καμπύλες γέφυρες όπως αυτή που μελετάμε,



Σχ. 6.2: Τυπική διάταξη εφεδράνων καμπύλης χάραξης

Τοποθετούνται στις θέσεις στήριξης των κύριων δοκών επί των βάθρων, σε γέφυρες δε με περισσότερες από δύο κύριες δοκούς, τοποθετούνται σε κάθε σημείο στήριξης των δοκών. Επιλέγονται έτσι ώστε να μπορούν να μεταφέρουν όλες τις επιβαλλόμενες δυνάμεις, κατά τα στάδια ανέγερσης και λειτουργίας. Κατά την προσομοίωση της ανωδομής, πρέπει η συμπεριφορά των εφεδράνων να εισάγεται στο συνολικό μοντέλο, προκειμένου το αποτέλεσμα της ανάλυσης να αποδίδει στην ορθή καταπόνηση του συστήματος. Πρέπει δηλαδή οι ελευθερίες μετακίνησης και στροφής καθώς και τα χαρακτηριστικά των εφεδράνων (στροφική και αξονική ακαμψία, συντελεστής τριβής κλπ) να εισάγονται στο μοντέλο, έτσι ώστε η περιγραφή των συνθηκών στήριξης της γέφυρας να προσεγγίζει κατά το δυνατόν την πραγματικότητα.

Τα εφέδρανα σχεδιάζονται και διαστασιολογούνται έτσι ώστε να είναι επαρκή σε σχέση με τις απαιτήσεις του κανονισμού (EN1337) για τις οριακές καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας. Σε κάθε περίπτωση, αναζητούνταιοι δυσμενέστερες τιμές των αντιδράσεων και μετατοπίσεων ως ακολούθως:

- Μέγιστες και ελάχιστες τιμές των κατακόρυφων δυνάμεων, μαζί με τις ταυτόχρονες οριζόντιες δυνάμεις και μετατοπίσεις, αλλά και ενδεχομένως καμπτικές ροπές.
- Μέγιστες και ελάχιστες τιμές των οριζόντιων δυνάμεων, μαζί με τις ταυτόχρονες κατακόρυφες δυνάμεις και μετατοπίσεις, αλλά και ενδεχόμενες καμπτικές ροπές.

 Μέγιστες και ελάχιστες τιμές των μετατοπίσεων, μαζί με τις ταυτόχρονες κατακόρυφες και οριζόντιες δυνάμεις, αλλά και ενδεχόμενες καμπτικές ροπές.

Εφ' όσον εμφανίζονται και δυνάμεις ανύψωσης (οι οποίες είναι γενικώς ανεπιθύμητες), πρέπει να αντιμετωπίζονται καταλλήλως, μέσω εφελκυστικών στοιχείων (αγκύρια) ή μέσω μιας αρχικής παραμόρφωσης της κατασκευής.

Τα εφέδρανα πρέπει να είναι έτσι τοποθετημένα ώστε να είναι εύκολα επισκέψιμα για επιθεώρηση, συντήρηση ή αλλαγή, εφ' όσον παραστεί ανάγκη, προκειμένου να ικανοποιείται η λειτουργικότητά τους, για όλη τη διάρκεια ζωής της γέφυρας.

Υπάρχει γενικά μεγάλη ποικιλία εφεδράνων, ανάλογα με το σκοπό που καλούνται να εξυπηρετήσουν κάθε φορά.

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν εφέδρανα με εγκιβωτισμένο ελαστομερές (ή pot bearings, Μέρος 5, EN1337), τα οποία συνίστανται από μια ορθογωνική η κυκλική βάση μορφής δοχείου (από χάλυβα ή αλουμίνιου), μέσα στην οποία τοποθετείται ελαστομερές, το οποίο καλύπτεται από πάνω με ειδική μεταλλική πλάκα. Το εγκιβωτισμένο κατ' αυτό τον τρόπο ελαστομερές, δεν έχει ελευθερία πλευρικής διόγκωσης ή οριζόντιας παραμόρφωσης, συμπεριφέρεται δε ως υγρό, με μεγάλη φέρουσα ικανότητα, Σχ. 6.3. Τα εφέδρανα αυτού του τύπου επιτρέπουν τη στροφή προς όλες τις διευθύνσεις (με την προϋπόθεση να μην ξεπερνά η στροφή κάποια όρια) και μπορεί να επιτρέπουν την μετακίνηση προς καμία, μία ή και όλες τις διευθύνσεις. Στις περιπτώσεις που επιτρέπεται μετακίνηση, οι επιφάνειες ολίσθησης είναι συνήθως ανοξείδωτος χάλυβας και PTFE.



Σχ. 6.3: Εσωτερικά μέλη τυπικού εφεδράνου pot bearing

Παρακάτω θα δέιξουμε με σχήμα πως φαίνονται και οι 3 διαφορετικές κατηγορίες εφεδράνων τύπου pot bearings ανάλογα με τους βαθμούς ελευθερίας που έχουμε δεσμεύσει κατά περίπτωση Σχ. 6.4, Σχ. 6.5, Σχ. 6.6.



Σχ. 6.4: Εφέδρανο με δεσμευμένους όλους τους βαθμούς ελευθερίας



Σχ. 6.5: Εφέδρανο με δεσμευμένο τον κατακόρυφο και έναν οριζόντιο βαθμό ελευθερίας



Σχ. 6.6: Εφέδρανο με δεσμευμένο μόνο τον κατακόρυφο βαθμό ελευθερίας

#### 6.2 Διαστασιολόγηση εφεδράνων

Όπως και σε κάθε έλεγχο μέχρι τώρα, έτσι κι εδώ πριν από την επιλογή του μεγέθους των εφεδράνων, θα πρέπει να βρούμε τα εντατικά μεγέθη από τις δράσεις της κατασκευής κάθε φορά και τους συνδυασμούς αυτών οι οποίοι θα μας καθορίσουν το μέγεθος των εφεδράνων. Νωρίτερα έχουμε αναφέρει ότι έγινε επιλογή εφεδράνων τύπου pot bearings ως τα πιο απλά από την κατασκευή τους και κυρίως οικονομικά, κάτι που αξίζει να προσέξουμε σε τέτοιες μεγάλες μελέτες. Στην παρούσα μελέτη οι έλεγχοι θα γίνουν με τους συνδυασμούς της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας αφού κρίθηκαν ικανοποιητικά για τη λειτουργία των pot bearings που επιλέζαμε, μιας και δεν υπάρχει τόσο μεγάλη περίπτωση σεισμού. Τα δυναμικά επομένως φαινόμενα περιοριστούμε. Από τους συνδυασμούς οριακής κατάστασης λειτουριστούμε. Από τους συνδυασμούς οριακής κατάστασης λειτουριστούμε.



Σχ. 6.8: Μέγιστες θλιπτικές αντιδράσεις εφεδράνων

Το πρώτο αφορά τις μέγιστες εφελκυστικές ή λιγότερο θλιπτικές, ενώ το δεύτερο διάγραμμα έχει τις μέγιστες θλιπτικές ανά εφέδρανο σε κάθε θέση. Αυτό που μας δημιουργεί πολύ μεγάλο πρόβλημα μετά τον υπολογισμό των αντιδράσεων είναι οι πάρα

πολύ μεγάλες εφελκυστικές αντιδράσεις που προκύπτουν από το λογισμικό ανάλυσης. Οι εφελκυστικές αυτές δυνάμεις αν επιδράσουν ως έχουν στα εφέδρανα που επιλέξαμε θα πλήξουν ανεπανόρθωτα το ελαστομερές και στη συνέχεια θα προκαλέσουν αν όχι αστοχία, σίγουρα μεγάλους κραδασμούς κατά τη διέλευση των τρένων. Ένας τρόπος να το αντιμετωπίσουμε είναι να αλλάξουμε τις αποστάσεις των εφεδράνων ώστε να μειωθεί η επίδραση από τα ζεύγη ροπών που επιδρούν εκεί. Κάτι τέτοιο όμως δεν μπορεί να γίνει αφού το βάθρο δεν έχει τόσο μεγάλη διάμετρο και αυτή τη στιγμή τα έχουμε βάλει στην μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση. Επομένως αυτό που θα κάνουμε είναι ο δεύτερος τρόπος που αναλύθηκε και στην εισαγωγή σε περίπτωση εφελκυσμού και είναι η χρήση αγκυρίων. Κατ' αυτόν τον τρόπο τα αγκύρια θα παραλάβουν με ασφάλεια αυτές τις εφελκυστικές δυνάμεις που θα εμφανιστούν και το εφέδρανο θα παραμείνει ανενεργό σ' εκείνη την περίπτωση ώστε να παραλαμβάνει μόνο τις θλιπτικές δυνάμεις για τις οποίες έχει σχεδιαστεί. Πριν απ' αυτό όμως πρέπει να δούμε και τις οριζόντιες δράσεις στις στηρίξεις που τις έχουμε δεσμεύσει καθώς έχουμε κάποιους περιορισμούς και σε σχέση μ' αυτές για τα αντίστοιχα pot bearings. Αυτές είναι:





Περιβάλλουσα αντιδράσεων κατά τη διεύθυνση y



Όπως φαίνεται οι αντιδράσεις είναι μικρές σχετικά με τις κατακόρυφες οπότε μάλλον δεν θα έχουμε πρόβλημα σ' αυτό, θα το δουμε αναλυτικότερα και στη συνέχεια. Τώρα σειρά έχει να αριθμοίσουμε τα εφέδρανα και να κάνουμε μια τυπική αρίθμοιση για να μπορούμε να τα χειριζόμαστε καλύτερα. Έτσι θα ισχύει:



Σχ. 6.9: Αρίθμιση εφεδράνων

Η αρίθμιση ορίσθηκε αυθαίρετα όπως είπαμε απ' το μελετητή για να υπάρχει καλύτερη σαφήνεια στη συνέχεια της κατηγοριοποίησης των εφεδράνων, ανάλογα με τους βαθμούς ελευθερίας που έχουν δεσμευμένους. Πάνω με τα βελάκια όπως μπορούμε να δούμε παντού είναι δεσμευμένη η κατακόρυφη μετακίνηση (κατά Z) ενώ στα υπόλοιπα ποικίλει. Τώρα είμαστε έτοιμοι για την κατηγοριοποίησή τους όπως την έχουμε ορίσει από την κατασκευάστρια εταιρία στο σχ. 6.8. Έτσι έχω τις εξής περιπτώσεις στην παρούσα κατασκευή:

Τα εφέδρανα 5, 6 θα έχουν τον τύπο F αφού είναι δεσμευμένοι όλοι οι βαθμοί ελευθερίας,

- Τα εφέδρανα 2, 9 θα έχουν τον τύπο Ε αφού θα είναι ελεύθερος μόνο ο οριζόντιος βαθμός ελευθερίας x,
- Τα εναπομείναντα 1, 3, 4, 7, 8, 10 θα έχουν τον τύπο Α αφού είναι και οι δύο οριζόντιοι βαθμοί ελευθερίας ελεύθεροι,

Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι οι οριζόντιοι βαθμοί ελευθερίας αναφέρονται στο τοπικό σύστημα κάθε φορά ώστε να μην γίνουν παρερμηνείες και προκύψουν ενδιάμεσες καταστάσεις που δεν ανταποκρίνονται στους πραγματικούς υπολογισμούς. Παρακάτω θα δείξουμε πως θα γίνει η επιλογή του μεγέθους των εφεδράνων ανάλογα με την ένταση που έχουν σε θλίψη. Πιο συγκεκριμένα για κάθε μια από τις 3 προηγούμενες περιπτώσεις έχουμε:

# Fixed Pot Bearings (TF)

Permissible concrete pressure = 26 N/mm <sup>2</sup>											
type of load H D <sub>cover</sub> D <sub>o</sub>											
bearing	V										
	kN	mm	mm	mm	kg						
TF - 1	1000	70	270	270	36						
TF - 2	2000	80	360	360	62						
TF- 3	3000	90	430	430	93						
TF- 4	4000	94	490	490	119						
TF - 5	5000	101	550	550	155						
TE C	0000	100	000	000	100						

1) Για τα εφέδρανα 5, 6 θα επιλεγεί από τον πίνακα της κατασκευάστριας εταιρίας μέγεθος εφεδράνου ίσο με, TF – 4, όπου 4000kN > 3346 kN ώστε να επαρκεί. Επίσης ορίζεται και πρόσθετη απαίτηση οι οριζόντιες δυνάμεις να είναι κοντά στο 10% της κατακόρυφης αντοχής του εφεδράνου. Εδώ έχουμε  $0.1V_{Rd,z}$ =400kN  $\approx V_{Ed,x}$ =428kN, επαρκεί

# **Guided Pot Bearings (TGe)**

Permissible concrete pressure = 26 N/mm <sup>2</sup>											
type of bearing	load V kN	H mm	Bu Lu mm	BGL mm	ex = : LGL mm	±50mm weight kg	ex = ± LGL mm	100mm weight kg	ex = ± LGL mm	150mm weight kg	
TGe-1	1000	117	270	330	440	118	555	134	670	150	
TGe - 2	2000	123	360	420	530	167	645	186	760	204	
TGe-3	3000	129	420	480	590	213	705	237	820	261	
TGe-4	4000	136	490	550	660	292	775	316	890	339	
TGe-5	5000	145	550	610	720	363	835	404	950	445	
TCo E	6000	1.40	E00	CEO.	760	404	976	460	000	400	

2) Για τα εφέδρανα 2, 9 θα επιλεγεί από τον πίνακα της κατασκευάστριας εταιρίας μέγεθος εφεδράνου ίσο με, TGe – 1, όπου 1000kN > 209.10 kN ώστε να επαρκεί. Επίσης ορίζεται και πρόσθετη απαίτηση την οριζόντια δύναμη y να είναι κοντά στο 10% της κατακόρυφης αντοχής του εφεδράνου. Εδώ έχουμε  $0.1V_{Rd,z}$ =100kN  $\approx V_{Ed,y}$ =129kN, επαρκεί

## Free Pot Bearings (TGa)

Permissible concrete pressure = 26 N/mm <sup>2</sup>											
type of	load	Н	Bu Lu	BGL	ex = ±	50mm	$ex = \pm 2$	100mm	$ex = \pm 2$	150mm	
bearing	v				LGL	weight	LGL	weight	LGL	weight	
	kN	mm	mm	mm	mm	kg	mm	kg	mm	kg	
TGa - 1	1000	100	270	320	440	85	555	96	670	106	
TGa – 2	2000	107	360	410	530	130	645	143	760	156	
TGa- 3	3000	113	420	470	590	168	705	186	820	204	
TGa-4	4000	120	480	530	650	212	765	238	880	264	
TGa – 5	5000	129	530	580	700	264	815	296	930	328	
TCo C	6000	122	570	600	740	200	OFF	244	070	200	

3) Για τα εφέδρανα 1, 10 θα επιλεγεί από τον πίνακα της κατασκευάστριας εταιρίας μέγεθος εφεδράνου ίσο με, TGa – 1, όπου 1000kN > 209.10 kN ώστε να επαρκεί. Για τα εφέδρανα 3, 4, 7, 8 θα επιλεγεί από τον πίνακα της κατασκευάστριας εταιρίας μέγεθος εφεδράνου ίσο με, TGa – 2, όπου 2000kN > 1548 kN ώστε να επαρκεί.

Σ' αυτό το σημείο ολοκληρώσαμε τη διαστασιολόγηση των εφεδράνων ανάλογα με την κατηγορία τους. Όμως δεν πρέπει να ξεχνάμε τις εφελκυστικές δυναμεις που είχαμε σε κάποιες περιπτώσεις. Γι' αυτό το λόγο θα εισάγουμε αγκύρια όπου χρειάζεται. Πιο συγκεκριμένα η κατηγοριοποίηση ανάλογα με την ύπαρξη εφελκυσμού ή όχι είναι:

a) Λόγω ύπαρξης εφελκυστικών δυνάμεων τα εφέδρανα : 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10 θα σχεδιαστούν με τοποθετημένα αγκύρια ως εξής,



 b) Για τα εφέδρανα 7, 8 θα γίνει συνηθισμένη κατασκευή για εφέδρανα τύπου TGa, αφού παραλαμβάνουν μόνο θλίψη και έχουμε,



#### 6.3 Διαστασιολόγηση ελάσματος σύνδεσης

Ήταν έντονος ο προβληματισμός που είχαμε σχετικά με τον τρόπο που θα γίνει η σύνδεση των εφεδράνων, που αναφερθήκαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με την κύρια δοκό. Μετά από σκέψη αποφασίστηκε η χρήση ελάσματος το οποίο θα εισέρχεται μέσα στην κύρια δοκό σε ύψος μέχρι εκεί που μας το επιτρέπουν τα ύψη των πλατφρμών, και θα γίνεται έπειτα η συγκόλλησή του με αυτή. Επειδή είχαμε και πρόσθετη ροπή που έπρεπε να παραλάβει το έλασμα αυτό στα ακριανά τρίτα του που είναι στο εξωτερικό τμήμα της δοκού τοποθετήσαμε και πέλματα πάνω και κάτω σαν να θυμίζει διατομή διπλού ταυ ενώ στο εσωτερικό παρέμεινε σκέτο το έλασμα. Έτσι η δοκός εξωτερικά θα έχει την κάτωθι μορφή:



Σχ. 6.10: Τρισδιάστατες απεικονίσεις τμήματος κύριας δοκού σε τυχαία στήριζη και ένωση με έλασμα

Όπως μπορούμε να δούμε όλες οι συνδέσεις γίνονται με συγκόλληση ενώ η μορφή φαίνεται μόνο εξωτερικά της δοκού σαν ένα διπλό ταυ. Στη συνέχεια, αφού καθορίσαμε τη μορφή της σύνδεσης που θα χρησιμοποιήσουμε, θα πρέπει να το διαστασιολογήσουμε ανάλογα με τα εντατικά μεγέθη που προκύπτουν από το λογισμικό ανάλυσης που χρησιμοποιούμε. Βρήκαμε ότι στη δυσμενέστερη περίπτωση η δρώσα τάση που θα υπάρχει

στο έλασμα σύνδεσης θα είναι, σ<sub>Ed,max</sub> = 150.20 Mpa. Και επομένως για αυτή πρέπει να διαστασιολογήσουμε. Η αλήθεια είναι ότι δεν είναι τοσο υψηλή η τάση και θα μπορούσε να είναι άλλες οι διαστάσεις που επιλέξαμε όμως όλα τα στοιχεία που αποτελούν το έλασμα αυτό να είναι κατηγορίας 1 και μάλιστα άνετα σε σχέση με τα όρια, για δύο λόγους. Ο ένας είναι γιατί το συγκεκριμένο τμήμα ενώνει την κύρια δοκό μας με τα εφέδρανα σύνδεεση ζωτικής σημασίας για την ομαλή λειτουργία αλλά και την ασφάλεια του έργου έναντι αστοχίας στο συγκεκριμένο σημείο που θα ήταν καταστροφική. Ο άλλος λόγος είναι για να είναι ικανό να αυξήσουμε τα φορτία αν χρειαστεί χωρίς να μας δημιουργεί ιδιαίτερο πρόβλημα για μελλοντική χρήση της γέφυρας. Επομένως το έλασμα έχει την κάτωθι μορφή συμφωνα με όσα είπαμε:



Σχ. 6.11: Τρισδιάστατη απεικόνιση ελάσματος σύνδεσης

Πιο αναλυτικά θα ελέγξουμε αν οι διαστασεις των επιμέρους στοιχείων είναι της κατηγορίας που επιλέξαμε προηγουμένως και μετά θα προβούμε σε περαιτέρω αναλύσεις για την εύρεση αντοχής της διατομής. Έτσι οι κατηγορίες των στοιχείων της διατομής έχουν ως εξής:

- Άνω πέλμα, c / t = 1.13 < 9ε = 7.32 Κατηγορία 1
- Κορμός, c / t = 28.29 < 72ε = 58.58 Κατηγορία 1
- Κάτω πέλμα, c / t = 1.13 < 9ε = 7.32 Κατηγορία 1</li>

Επομένως όπως είδαμε όλα τα στοιχεία είναι κατηγορίας 1 και άρα και η διατομή στο σύνολό της. Δεν κινδυνεύουμε επομένως από φαινόμενα τοπικού λυγισμού ή άλλες παρόμοιες μορφές αστοχίας των διατομών, οπότε θα προχωρήσουμε στην εύρεση της συμπεριφοράς του τμήματος αυτού της κατασκευής ανάλογα με τη φόρτιση που δέχεται. Για λεπτομερή ανάλυση εισάγαμε την παραπάνω διατομή μας όπως φαίνεται στο Σχ. 6.12 στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Στη θέση που θα είναι οι ραφές ασκήσαμε σταδιακά κατακόρυφο φορτίο τριγωνικής κατανομής αφού υποθέσαμε ότι αυτή θα είναι μια πιθανή κατανομή από παρόμοιου είδους κατασκευές. Έτσι πήραμε την παρακάτω μορφή μετά απ' αυτή την επεξεργασία,



Σχ. 6.12: Μοντέλο μελέτης που εισάγαμε στο λογισμικό Adina
Στο κάτω πέλμα τοποθετήθηκαν ελατήρια με μεγάλο μέτρο δυσκαμψίας, ώστε να αναπαριστούν τα εφέδρανα που θα υπάρχουν εκεί στο φορέα με το ίδιο μέτρο ελαστικότητας. Επεξεργάζοντας όλα αυτά στο πρόγραμμα Adina τα αποτελέσματα που πήραμε είναι ιδιαίτερα ενδιαφέροντα και είναι τα ακόλουθα,



Σχ. 6.14: Απεικόνιση ροής τάσεων ελάσματος για επίδραση μέγιστης δρώσας τάσης

Μπορούμε στον σχ. 6.13 να δούμε ότι η δρώσα τάση είναι στο 40% της ελαστικής περιοχής της διατομής σύνδεσης που κατασκευάσαμε, επομένως η διαστασιολόγηση που κάναμε δεδομένου της σημασίας του συγκεκριμένου τμήματος είναι επαρκής και θα την αφήσουμε ως έχει. Αυτό που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το Σχ. 6.14 όπου φαίνεται η ροή των τάσεων όσο αυξάνουμε την ένταση των φορτίων στη θέση των ραφών. Συγκεκριμένα βλέπουμε στο συγκεκριμένο σχήμα του φορέα τις τάσεις που θα υπάρχουν σε περίπτωση της μέγιστης δρώσας τάσης στις ραφές από τα φορτία δοκού. Παρατηρούμε ότι τα τμήματα του ελάσματος εκτός της δοκού επιβαρύνονται σε σχέση με το έλασμα στο εσωτερικό που μένει ανενεργό, καθώς μεταφέρουν την ένταση στα πέλματα και ως κατ' επέκταση στα εφέδρανα. Επιπλέον από την κλίμακα των τάσεων δίπλα βλέπουμε ότι καθ' όλη την έκταση είμαστε στην ελαστική περιοχή, οπότε δεν κινδυνεύουμε από μόνιμες παραμορφώσεις του φορέα.

#### 6.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό είδαμε πώς γίνεται η επιλογή βαθρών, καθώς έχουμε κάθε φορά να αντιμετωπίσουμε διαφορετικές και ιδιαίτερες περιπτώσεις κατά τον σχεδιασμό και να βρούμε λύσεις ασφαλείς για τις κατασκευές μας. Επιπλέον η μεταφορά της έντασης θα πρέπει κάθε φορά να γίνεται με ασφάλεια μεταξύ των μελών ώστε να φορτίζεται το καθένα σύμφωνα με τις αντοχές που έχει σχεδιαστεί, ώστε να μην υπάρξουν αστοχίες μετέπειτα στην κατασκευή ή στη χρήση του.

## 7. Συμπεράσματα

Στο σημείο αυτό ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός της γέφυρας συρμού monorail που αναλύσαμε. Κάποια σημαντικά στοιχεία που αξίζει να κρατήσουμε είναι το πόσο μας επιρρέαζαν τα φορτία ανέμων στους διάφορους συνδυασμούς δράσεων, για την διαστασιολόγηση των επιμέρους διατομών της δοκού, αλλά και την ένταση μέσω ζεύγους ροπών που μας επιβάρυναν τα εφέδρανα με αποτέλεσμα να μας αναγκάσουν στη χρήση αγκυρίων για την παραλαβή τους. Εκτός όμως απ τον άνεμο είχαμε πολλές ιδιαιτερότητες και στη χάραξη του έργου με την έντονη καμπύλη που υπήρχε πράγμα που μας επιβάρυνε καθ' όλη τη διάρκεια του σχεδιασμού με μια πρόσθετη δύναμη, τη φυγόκεντρο. Καταφέραμε με τη χρήση νευρώσεων να σταθεροποιήσουμε την δοκό μας ώστε να της προσδώσουμε την ευστάθεια που χρειάζεται για να παραλαμβάνει με ασφάλεια τις εντάσεις και να τις μεταβιβάζει στα εφέδρανα και από εκεί στο έδαφος μέσω των βάθρων. Όλα αυτά βέβαια αναλύθηκαν λεπτομερώς ώστε να είμαστε σίγουροι για την αντοχή αλλά και την έντασή τους κάθε φορά για τον δυσμενέστερο συνδυασμό που πιθανόν να προκύψει. Επιπλέον μέσω των κύκλων S – N καθορίσαμε και τον χρόνο αντικατάστασης της δοκού αν θέλουμε το έργο να συνεχίσει να λειτουργεί σύμφωνα με το σχεδιασμό και μετά τα έτη που υπολογίσθηκαν.

# 8. Βιβλιογραφία

- 1. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005α). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, 2η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- Βάγιας Ι. (2003). «Σιδηρές κατασκευές-Ανάλυση και διαστασιολόγηση, 2η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα
- Βάγιας Ι., Ηλιόπουλος Α. (2006α). «Σύμμικτες γέφυρες Οδηγός σχεδιασμού με βάση τα DIN-Fachberichte και τους Ευρωκώδικες, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- 4. Ερμόπουλος Ι. (2008). «Σιδηρές και σύμμικτες γέφυρες (2η έκδοση)», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
- 5. Βάγιας Ι. (2010). «Σύμμικτες κατασκευές από χάλυβα και οπλισμένο σκυρόδεμα, 3η έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.

# Παράρτημα Α – Κύρτωση





#### Συντελεστές κύρτασης k, για πλάκες με δύο διαμήκεις ενισχύσεις στη θλιβόμενη ζάνη

	$B \left[ \frac{b_1}{b_2} \right] \left[ - \left\{ l \\ ll \\ \delta \kappa a \mu \pi \tau \eta \right] \right]$	$B' \begin{bmatrix} b_1^* \\ b_2^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J & deca \mu \pi m \\ J \end{bmatrix}$	B' b'
	α) Ενίσχοση Ι	β) Ενίσχοση Π	<ul> <li>γ) συγκεντραμένη</li> <li>ενίσχυση</li> </ul>
Εμβαδόν διατομής	A <sub>dJ</sub>	A <sub>41,2</sub>	$\mathbf{A}_{\mathrm{sl},1} + \mathbf{A}_{\mathrm{sl},2}$

### Συντελεστές κύρτασης k, για πλάκες με τουλάχιστον 3 ισαπέχουσες διαμήκεις. ενισχύσεις



# Παράρτημα Β – Κόπωση

καμπύλες καμπύλες S-N (καμπύλες Wöhler)



### Καμπύλες κόπωσης S-N

- ονομαστική αντοχή σε κόπωση Δσ<sub>e</sub> για N<sub>e</sub> = 2.10<sup>6</sup> (2 εκατομ.) κύκλους.
- εύρος τάσεων Δσ<sub>D</sub> N<sub>D</sub>=5.10<sup>6</sup> → Αλλαγή κλίσης
- εύρος τάσεων  $\Delta \sigma_L$  NL=10<sup>8</sup> → σταθερή αντοχή

$$\left(\frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2}\right)^m = \frac{N_2}{N_1} \quad \acute{\eta} \qquad \qquad \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_2} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^{1/m}$$

Για παράδειγμα στην περιοχή με m = 3 είναι:

$$\left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_C}\right)^3 = \frac{N_C}{N_D} = \frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6} \quad \rightarrow \quad \Delta\sigma_D = 0,737 \cdot \Delta\sigma_C$$

ενώ στην περιοχή με m = 5 είναι:

$$\left(\frac{\Delta\sigma_L}{\Delta\sigma_D}\right)^5 = \frac{N_D}{N_L} = \frac{5 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^8} \quad \rightarrow \quad \Delta\sigma_L = 0.549 \cdot \Delta\sigma_D$$