



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Δομοστατικής Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## **Μελέτη Πεζογέφυρας με μέλη από Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRP)**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
Λαζοπούλου Αθανασία  
Επιβλέπων: Ιωάννης Ραυτογιάννης

Αθήνα, Ιούλιος 2015

Λαζοπούλου Αθανασία (2012)  
Μελέτη Πεζογέφυρας με μέλη από Ινοπλισμένα Πολυμερή (FRP)  
Διπλωματική Εργασία  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### Κεφάλαιο 1

1. Εισαγωγή.....	6
1.1 Επιλογή του υλικού.....	6

### Κεφάλαιο 2. Ινοπλισμένα Πολυμερή – Εφαρμογή των Ινοπλισμένων Πολυμερών στη γεφυροποιία

<b>2.1 Ινοπλισμένα Πολυμερή .....</b>	<b>7</b>
2.1.1 Ιστορία των ινοπλισμένων Πολυμερών .....	7
2.1.2 Τα ινοπλισμένα πολυμερή στην αγορά .....	8
2.1.3 Ινοπλισμένα Πολυμερή στις κατασκευές .....	10
2.1.4 Σύσταση Ινοπλισμένων Πολυμερών .....	12
2.1.5.1 Ινες .....	12
2.1.6 Μήτρα από Πολυμερή.....	17
2.1.7 Φίλερ και πρόσθετα.....	20
2.1.8 Λειτουργία σύνθετου υλικού.....	20
2.1.9 Τεχνικές παραγωγής .....	22
<b>2.2 Γέφυρες από ινοπλισμένα Πολυμερή.....</b>	<b>23</b>
2.2.1 Ινοπλισμένα Πολυμερή στη γεφυροποιία.....	23
2.2.2 Παραδείγματα γεφυρών εξ ολοκλήρου από ινοπλισμένα πολυμερή.....	24
2.2.3 Aberfeldy Footbridge.....	24
2.2.4 Lleida Footbridge .....	25
2.2.5 Harbour Bridge Hartelhaven Rotterdam .....	26
2.2.6 Πλεονεκτήματα Ινοπλισμένων πολυμερών .....	28
2.2.7 Μειονεκτήματα Ινοπλισμένων πολυμερών .....	30
2.2.8 Συγκριτική ανάλυση Ιδιοτήτων Ινοπλισμένων Πολυμερών-Χάλυβα.....	32
2.2.9 Κώδικες κατασκευής με FRP.....	32

### Κεφάλαιο 3. Δράσεις και Έλεγχοι

3.1 Δράσεις.....	35
3.1.1 Εισαγωγή	
3.1.2. Φορτίσεις.....	36
3.1.3 Συνδυασμοί δράσεων.....	52
3.2 Έλεγχοι μελών από λεπτότοιχες διατομές σε κάμψη και θλίψη.....	56
3.3 Κοχλιώσεις σε μέλη από FRP.....	57

### Κεφάλαιο 4. Μελέτη μοντέλου

<b>4.1 Προσομοίωμα με Ινοπλισμένα Πολυμερή.....</b>	<b>61</b>
4.1.1 Στοιχεία Γέφυρας.....	61
4.1.1.1 Υλικό.....	62
4.1.1.2 Διατομές.....	67
4.1.2 Δράσεις Φορέα .....	68
4.1.2.1 Εισαγωγή.....	68
4.1.2.2 Φορτία.....	70
4.1.2.3 Φορτίσεις.....	70

4.1.3 Συνδυασμοί δράσεων.....	71
4.1.4 Εντατικά μεγέθη επί της γέφυρας.....	72
4.1.5 Έλεγχος σε λειτουργικότητα.....	73
4.1.6 Έλεγχος σε σεισμό.....	74
4.1.7 Έλεγχος σε ανθρωποσυντονισμό.....	76
4.1.8 Έλεγχος τάσεων.....	77
4.1.9 Έλεγχος εφεδράνων.....	78
4.1.10 Κατάστρωμα γέφυρας.....	80
4.1.11 Έλεγχος διατομής διαγωνίου διπλού ταυ σε θλίψη.....	83
4.1.12 Κατασκευή – Ανέγερση.....	84
<b>4.2 Προσομοίωμα με χάλυβα.....</b>	<b>86</b>
4.2.1 Υλικό.....	86
4.2.2 Εντατικά μεγέθη.....	86
4.2.3 Έλεγχος σε λειτουργικότητα.....	87
4.2.4 Έλεγχος σε σεισμό.....	89
4.2.5 Έλεγχος σε θλίψη διαγωνίου.....	90
4.2.6 Έλεγχος σε ανθρωποσυντονισμό.....	91
4.2.7 Έλεγχος τάσεων.....	92
4.2.8 Έλεγχος εφεδράνων.....	94
4.3 Συγκριση αποτελεσμάτων χαλυβδίνης γέφυρας και γέφυρας από FRP.....	92
4.4 Συμπεράσματα.....	94

## Παράρτημα

### Γέφυρες από FRP ανά τον κόσμο

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη του φορέα μιας πεζογέφυρας από ινοπλισμένα πολυμερή και χάλυβα και η συγκριτική μελέτη τους. Η μελέτη έγινε με χρήση του προγράμματος Sofistik.

Στο δευτερο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα ινοπλισμένα πολυμερή και στις γέφυρες από ινοπλισμένα πολυμερή. Καταρχήν παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των FRP και η χρησιμότητά τους στα δομικά έργα και στη συνέχεια δίνονται κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα γεφυρών.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα φορτία, οι φορτιστικές καταστάσεις και οι συνδυασμοί αυτών, με βάση τους οποίους γίνεται ο έλεγχος επάρκειας των διατομών μιας γέφυρας. Γίνεται ο διαχωρισμός στα μόνιμα, μεταβλητά, τυχηματικά και σεισμικά φορτία, που καταπονούν τις κατασκευές και παρουσιάζονται εκτενώς οι λεπτομέρειες, οι προδιαγραφές, οι συντελεστές και οι κανονισμοί για κάθε δράση, επί της κατασκευής καθώς και οι έλεγχοι που πρέπει να γίνουν.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την προσομοίωση των δύο μοντέλων, τις δράσεις τους ελέγχους και τα εντατικά μεγέθη, καθώς και έλεγχο σε σεισμό. Στη συνέχεια τα δύο μοντέλα συγκρίνονται και εξάγονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

## **1.Εισαγωγή**

### **1.1 Επιλογή του υλικού**

Η πρώτη ερώτηση διαβάζοντας το εξώφυλλο της εργασίας είναι γιατί αυτό το υλικό. Γιατί ένας μηχανικός να διαλέξει τα ινοπλισμένα πολυμερή σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά όπως το οπλισμένο σκυρόδεμα, ο χάλυβας ή έναν συνδυασμό αυτών των δύο. Από την άλλη μεριά αυτή η ερώτηση θα μπορούσε να ερωτηθεί και αντίστροφα. Γιατί τα ινοπλισμένα πολυμερή χρησιμοποιούνται τόσο σπάνια στη γεφυροποιία? Τα πλαστικά χρησιμοποιούνται σε τεράστιες ποσότητες στην καθημερινή μας ζωή. Καταρχήν τα πολυμερή είναι πολύ πιο περίπλοκο υλικό από τα παραδοσιακά κατασκευαστικά υλικά. Συγκρινόμενο με το χάλυβα και το σκυρόδεμα, το πλαστικό παρουσιάζει πολύ περισσότερες μορφές που παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες, οι περισσότερες από τις οποίες δεν είναι κατάλληλες για τη μηχανική λόγω της χαμηλής αντοχής και δυσκαμψίας που παρουσιάζουν .

Γύρω στο 1900 επιστήμονες και άνθρωποι της βιομηχανίας συνέλαβαν για πρώτη φορά την ιδέα της ενίσχυσης του πλαστικού και έτσι χάραξαν το δρόμο για τη χρήση του σε εφαρμογές των μηχανικών. Προσθέτοντας ενίσχυση σε πλαστικές μήτρες σημειώνεται πολύ σημαντική βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Σήμερα, περισσότερο από εκατό χρόνια μετά τα πολυμερή βρίσκουν εφαρμογή στη γεφυροποιία.

Η εφαρμογή ινοπλισμένων πολυμερών στην ενίσχυση γεφυρών έδωσε μία πιο ενδεδειγμένη ματιά στη γνώση σχετικά με τις ιδιότητες τους. Σε συνδυασμό με την ανάπτυξη μήτρων υψηλής αντοχής και ενισχύσεων με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες οδήγησε στην εδραίωσή του σαν κατασκευαστικό υλικό. Ωστόσο δεδομένου ότι η έρευνα συνεχίζεται λίγοι παίρνουν το ρίσκο να κατασκευάσουν με καινούρια υλικά. Τα ινοπλισμένα πολυμερή έχουν ήδη δείξει την αξία τους ως υψηλής τεχνολογίας και υψηλής ποιότητας υλικά σε άλλες βιομηχανίες όπως στην αεροναυπηγικά και την στρατιωτική βιομηχανία.

Μέχρι σήμερα το κόστος ήταν συχνά ένας ακόμη ανασταλτικός παράγων χρήσης τους σε μεγάλης κλίμακας έργα όπως οι γέφυρες. Βελτιώσεις στις τεχνικές παραγωγής οδήγησαν σε σημαντικές μειώσεις κόστους κάνοντας το υλικό πιο ανταγωνιστικό.

Τα ινοπλισμένα πολυμερή παρουσιάζουν πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα. Έχουν βέβαια και κάποια μειονεκτήματα .Κύρια μειονεκτήματά τους είναι η ψαθυρή συμπεριφορά τους, η ευαισθησία τους στην ηλιακή ακτινοβολία και την φωτιά.

## 2.1 Ινοπλισμένα πολυμερή

### 2.1.1 Ιστορία των ινοπλισμένων Πολυμερών

Σ αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η ιστορία των ινοπλισμένων πολυμερών.

Ο συνδυασμός δύο υλικών που δρουν μαζί σαν ένα σύνθετο υλικό ανακαλύφθηκε χιλιάδες χρόνια πριν. Το πρώτο γνωστό σύνθετο υλικό είναι ο συνδυασμός άχυρου και πηλού για την παρασκευή τούβλων από τους Αιγύπτιους και τους Κινέζους και στη συνέχεια οι Αιγύπτιοι ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν κοντραπλακέ το 1500 π.Χ.

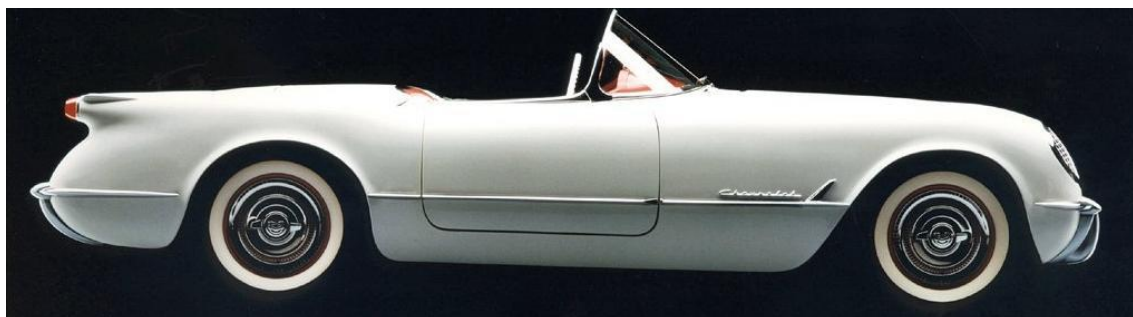


Εικόνα 2.1 : Ένα από τα πρώτα γνωστοποιημένα σύνθετα κατασκευαστικά υλικά κατασκευασμένα από τον άνθρωπο: Σύνθετο άχυρο - πηλό

Η εποχή του πλαστικού ξεκίνησε το 1868 όταν ο John W. Hyatt εφηύρε το πρώτο συνθετικό υλικό, τη ζελατίνη. Μετά το 1900, ανακαλύφθηκαν “Duroplast” ή “Bakelite”.

Η παραγωγή και ανάπτυξη των ινοπλισμένων πολυμερών αυξήθηκε ραγδαία μετά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, το 1940, όταν χρησιμοποιήθηκαν οι θόλοι για radar από GFRP. Κυρίως λόγω της υψηλής τους αντοχής και ανθεκτικότητας σε συνδυασμό με το μικρό τους ειδικό βάρος άρχισαν να χρησιμοποιούνται και στην κατασκευή αεροσκαφών και κατασκευάστηκε το πρώτο κέλυφος αεροπλάνου από GFRP.

Έτσι λοιπόν η πρόοδος της αεροναυπηγικής στα πλαίσια του αμυντικού εξοπλισμού κατά τη διάρκεια του ψυχρού πολέμου έδωσαν ώθηση στην τεχνολογία των FRP. Παράλληλα η γοργά αναπτυσσόμενη οικονομία των Η.Π.Α. αναζητούσε οικονομικές μεθόδους μαζικής παραγωγής προϊόντων προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες της αγοράς και αποτελούσε μια αρκετά αποτελεσματική λύση. Έτσι διευρύνθηκε η χρήση των σύνθετων υλικών.



Εικόνα 2.2: χρήση των FRP στην αυτοκινητοβιομηχανία

Μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο τα FRP μπήκαν και στην αγορά πέρα από την πολεμικά βιομηχανία με πρώτο σημαντικό γεγονός την κατασκευή του Chevrolet Corvette το 1953.

Και στη συνέχεια με άλλες εφαρμογές όπως πλοία, σωλήνες, δεξαμενές, ρακέτες τένις.

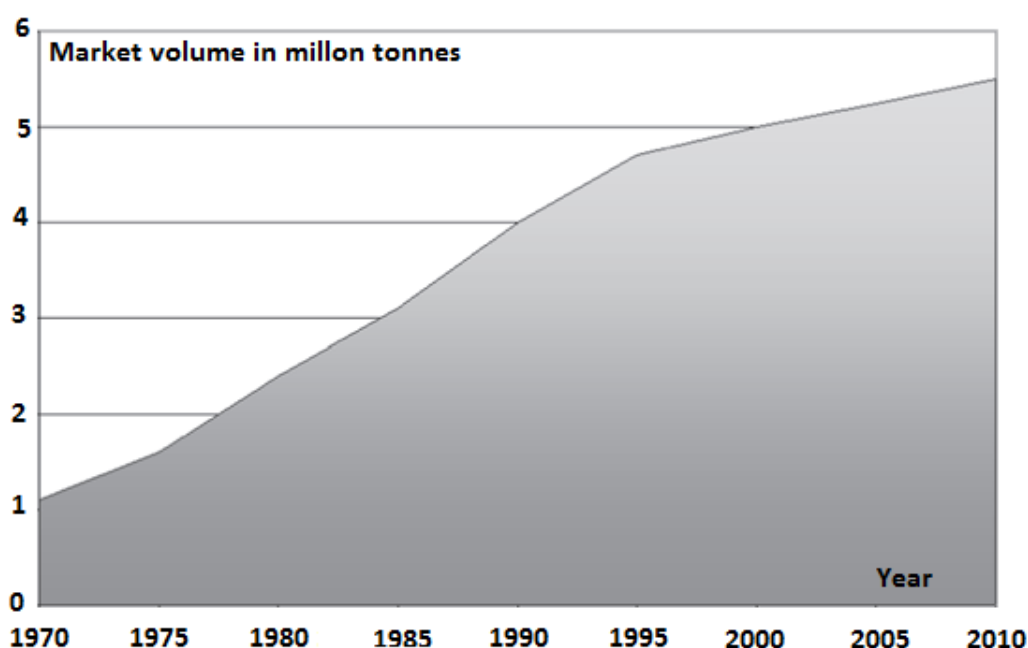
Σήμερα κυρίως βιομηχανίες υψηλής τεχνολογίας καινοτομούν στον τομέα των FRP όπως η αεροναυπηγική η τεχνολογία του διαστήματος.



Εικόνα 2.3: χρήση στην αεροναυπηγική των FRP

### **2.1.2 Τα Ινοπλισμένα Πολυμερή στην αγορά**

Στο κεφάλαιο αυτό θα δοθεί μία εικόνα της θέσης των ινοπλισμένων πολυμερών στην αγορά . Καταρχήν δίδεται ένα διάγραμμα σχετικά με το συνολικό όγκο των ινοπλισμένων πολυμερών στην αγορά. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι από το 1970 ο όγκος τους στην αγορά έχει τετραπλασιαστεί. Ο συνολικός όγκος των χρησιμοποιούμενων υλικών είναι 5,5 εκατομμύρια τόνοι. Συγκρινόμενο με την ετήσια χρήση χάλυβα περίπου 1400 εκατομμύρια τόνοι παραμένει ασφαλώς μικρή. Η διαφορά με την ετήσια παραγωγή σκυροδέματος είναι ακόμη μεγαλύτερη Το 2010 περίπου 20.000 εκατομμύρια τόνοι σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν στη βιομηχανία.



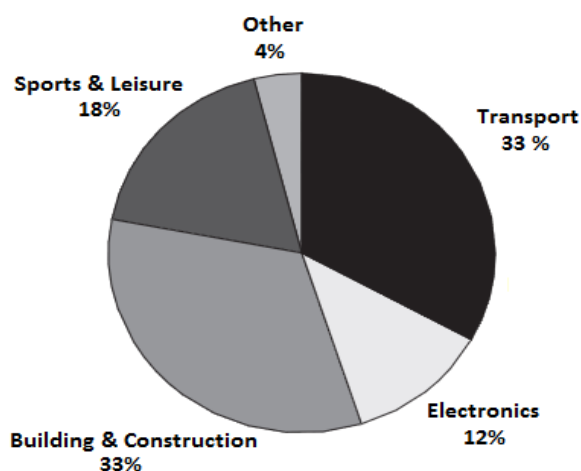
Εικόνα 2.4: η εικόνα της αγοράς των σύνθετων ινοπλισμένων πολυμερών από το 1970 έως το 2010



Αθροιστικά οι παρακάτω αγορές αποτελούν περίπου το 96% του συνολικού όγκου FRP στην Ευρώπη. Έτσι, μπορούν να θεωρηθούν ως μια πλήρη επισκόπηση της αγοράς των FRP:

- Μεταφορές
- Ηλεκτρικά και τη βιομηχανία ηλεκτρικών ειδών
- Μηχανολογία και μηχανήματα
- Κατασκευαστική βιομηχανία
- Βιομηχανία χημικών, αγωγοί και κοντεινερ
- Βιομηχανία ενέργειας και βιομηχανία offshore κατασκευών
- Αθλήματα και ελεύθερος χρόνος

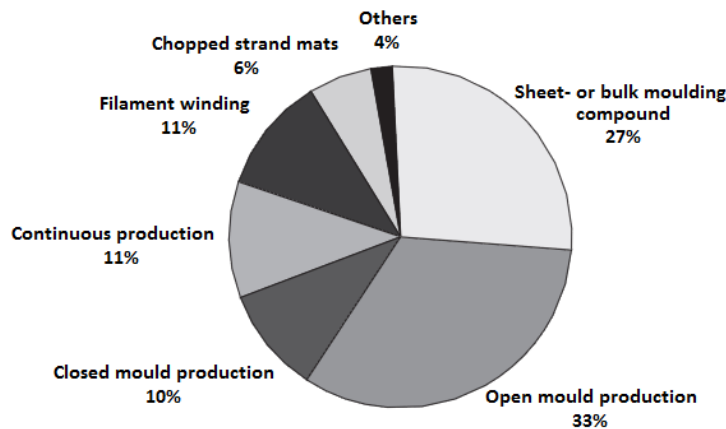
Παρακάτω οι αγορές φαίνονται σε διάγραμμα πίτα .



Εικόνα 2.5: τα μερίδια στην αγορά των σύνθετων ινοπλισμένων πολυμερών

Παρακάτω δίνονται μερικές πληροφορίες σχετικά με την αγορά των διάφορων τύπων ινοπλισμένων πολυμερών. Σύμφωνα με μία έρευνα του 1997 περίπου το 70% των ινοπλισμένων πολυμερών στην Ευρώπη ήταν θερμοσκυληνόμενα πλαστικά; Το υπόλοιπο 30% θερμοπλαστικά μείγματα. Γενικά μία ώθηση στις θερμοπλαστικές μήτρες παρατηρείται, δύο χρόνια αργότερα ,το 1999 το μερίδιό τους στην αγορά ήταν 42%.

Στο επόμενο γράφημα φαίνονται οι πιο συχνές μέθοδοι παραγωγής των ινοπλισμένων πολυμερών.



Εικόνα 2.6: Τα μερίδια των μεθόδων παραγωγής των ινοπλισμένων πολυμερών

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό ενίσχυσης είναι οι ίνες γυαλιού. Αλλά λόγω της ανάγκης για μέλη με μεγαλύτερη αντοχή και ποιότητα παρατηρείται μία ώθηση προς τις ίνες χάλυβα τα τελευταία χρόνια. Άλλοι τύποι ενίσχυσης έχουν μικρότερο μερίδιο στην αγορά. Οι φυσικές ίνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαμηλής αντοχής.

Όπως αναφέρθηκε πριν τα ινοπλισμένα πολυμερή αποτελούνται από μία μεγάλη ποικιλία από υλικά μήτρας και υλικά ενίσχυσης. Παράλληλα με αυτά και άλλα υλικά όπως πρόσθετα και πληρωτικά μπορούν να προστεθούν. Αυτό οδηγεί σε μία πολύ μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών όπως η αντοχή. Το εύρος της αντοχής είναι είναι περίπου 50-2000N/mm<sup>2</sup> και το εύρος της δυσκαμψίας είναι 10.000-400.000N/mm<sup>2</sup>.

Αντιστοίχως και η τιμή για τα διάφορα υλικά είναι πολύ διαφορετική. Οι τιμές ξεκινούν από 2€/kg μέχρι 200€/kg.

Καταλήγοντας μία σύντομη ματιά θα ρίξουμε στις περιοχές όπου διεξάγεται έρευνα σχετικά με τα ινοπλισμένα πολυμερή. Μία πρόσφατη έρευνα από την “American Society of Civil Engineers” έδειξε ενδιαφέροντα στοιχεία για τα ινοπλισμένα πολυμερή στα μεταπτυχιακά προγράμματα.

Φάνηκε ότι τα Ευρωπαϊκά και Καναδικά πανεπιστήμια προσφέρουν την καλύτερη εκπαίδευση στα ινοπλισμένα πολυμερή για κατασκευαστικά ζητήματα. Αλλά γενικά, ο ακαδημαϊκός κόσμος δεν έχει ακόμη εξοικειωθεί με τα ινοπλισμένα πολυμερή σε ικανοποιητικό βαθμό.

### 2.1.3 Ινοπλισμένα Πολυμερή στις κατασκευές

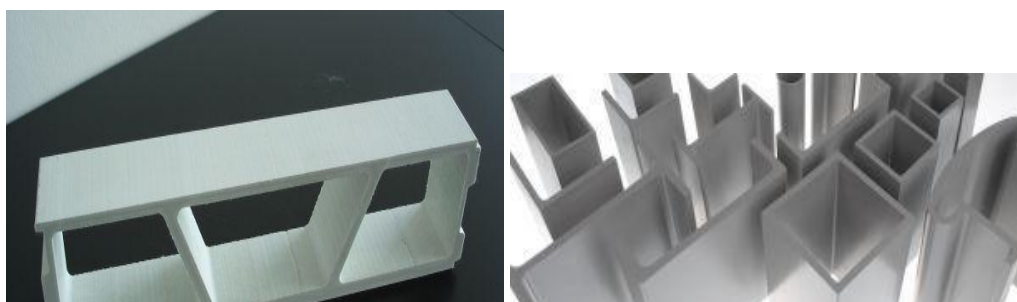
Στις κατασκευές έκαναν την εμφάνισή τους το 1950 στη Γερμανία με την παραγωγή αυλακωτών φύλλων πλαστικού ενισχυμένων με γυαλί.

Μεταξύ 1956 και 1970 σχεδόν 70 σπίτια εξολοκλήρου με FRP κατασκευάστηκαν.

Το 1990 επέστρεψαν στην αγορά και σημαντικό ρόλο σε αυτό έπαιξε η Δανέζικη εταιρία Fiberline.

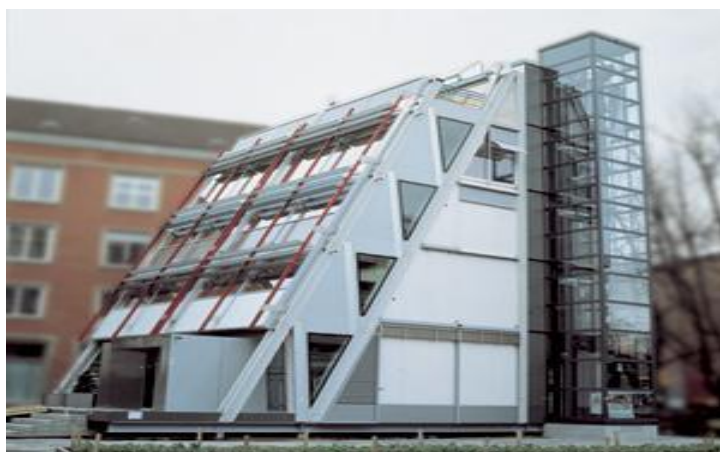
Τα διαθέσιμα προϊόντα απόFRP είναι:

- -Διατομές (CHS, RHS, I-profiles, U-profiles, κτλ)
- -σανίδες και πάνελ (πάνελ τύπου sandwich, κατάστρωμα γέφυρας, κτλ.)
- -Προσόψεις
- -μανδύες υλικού (κυρίως για ενισχύσεις)
- -τένοντες (για εφαρμογές προεντάσεως)
- -ράβδοι κεκκαμένες ή μη με ραβδώσεις ή χωρίς (χρήση ως σπλισμός κάμψης και διάτμησης)
- -καλώδια (για τη στατική ευστάθεια γεφυρών)



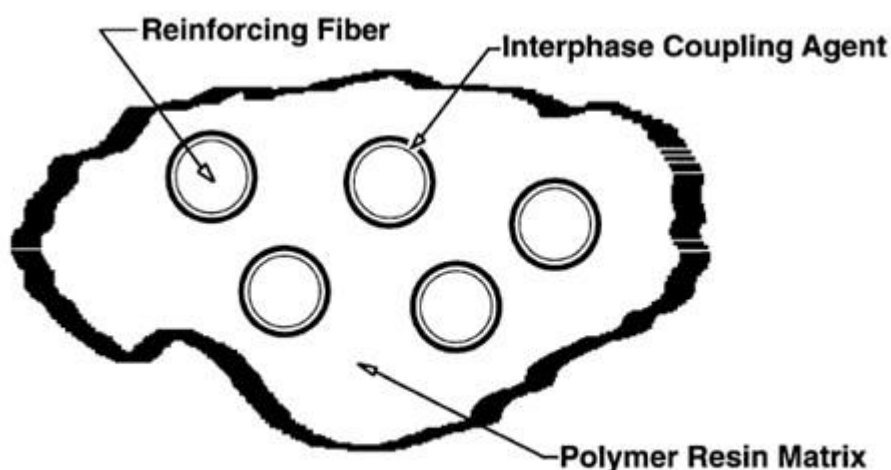
Εικόνες 2.7 και 2.8 :Fiberline FBD300 κατάστρωμα για βαριά φορτία και παραδείγματα διατομών FRP που έχουν παραχθεί με έλξη

Ένα ενδιαφέρον έργο είναι το “Eyecatcher Building”, το οποίο κατασκευάστηκε για το Swiss Building Fair το 1999 στη Βασιλεία της Ελβετίας. Το κτίριο έχει 5 ορόφους και ύψος 15 μετρα.



Εικόνα 2.9: Το ολοκληρωτικά κατασκευασμένο κτήριο από FRP Eyecatcher στοBasel της Ελβετίας το 1998

#### 2.1.4 Η σύσταση των Ινοπλισμένων πολυμερών



Εικόνα 2.10 : τμήματα ινοπλισμένου πολυμερές

Τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι ένα σχετικά νέο υλικό ικανό να ανταγωνιστεί τα παραδοσιακά δομικά υλικά όπως ο χάλυβας, το σκυρόδεμα, το ξύλο, πέτρα. Τα ινοπλισμένα πολυμερή αποτελούνται από δυο κύρια υλικά: από μια δέσμη ιών υψηλής αντοχής και μέτρου ελαστικότητας συγκολλημένες σε μια σκληρυμένη μήτρα ρητίνης. Οι ίνες λειτουργούν ως οπλισμός για την παραλαβή των φορτίων (όπως ο χάλυβας στο οπλισμένο σκυρόδεμα) ενώ η μήτρα ρητίνης προσδίδει συνοχή στο σύνθετο υλικό, μεταβιβάζει τα φορτία στις ίνες και παράλληλα τις προστατεύει από την επίδραση του περιβάλλοντος. Η μήτρα ρητίνης είναι υλικό πολυμερούς φύσεως ενώ ως ίνες χρησιμοποιούνται κυρίως ίνες γυαλιού, αραμιδίου και άνθρακα. την ενίσχυση και τη μήτρα, η οποία συνδέει την ενίσχυση σε ένα συμπαγές σύνολο .

#### 2.1.5. Οι ίνες οπλισμού

Το άλλο σημαντικό κομμάτι των FRP είναι οι ίνες οπλισμού. Υπάρχει ένας αριθμός διαφορετικών τύπων οπλισμού που διαφέρουν κυρίως στην αντοχή τους , μέτρο ελαστικότητας και επιμήκυνση τους. Όλα τα είδη οπλισμού μπορούν να εφαρμοστούν στο FRP σε διάφορες υφάνσεις , νήματα ή πλέγμα. Συνήθως χωρίζονται σε ανόργανες ίνες, οργανικές ίνες, μεταλλικές ίνες, φυσικές ίνες. Οι οργανικές και ανόργανες ίνες συνήθως αναφέρονται ως συνθετικές, και είναι συνήθως προτιμώμενες στις κατασκευές λόγω της δυσκαμψίας και ανθεκτικότητας τους. Εκτός από τις ίνες άνθρακα, όλες οι συνθετικές ίνες παράγονται από συμπαγή υλικά.

Οι ίνες στα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως για να ενισχύσουν τη μήτρα μεταφέροντας την τάση από ένα εφαρμοζόμενο φορτίο από την πιο αδύναμη μήτρα στην πολύ δυνατότερη ίνα.

Για ένα ανθεκτικό ενισχυμένο πολυμερές υπό τάση, η επιμήκυνση της ίνας πρέπει να είναι μικρότερη και η αντοχή της πολύ μεγαλύτερη από αυτή της μήτρας. Η μεταφορά τάσης κατά μήκος της διεπιφάνειας ίνας- μήτρας επιτυγχάνεται με τη χρήση συνδετικών υλικών ή ειδικών μέσων σύζευξης. Η διάμετρος της ίνας παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην μεγιστοποίηση της μεταφοράς τάσης. Μικρότερες




διάμετροι δίνουν μεγαλύτερη επιφάνεια ίνας ανά μονάδα βάρους ώστε βοηθούν τη μεταφορά τάσης.

Οι ίνες αποτελούν τον 'οπλισμό' του σύνθετου υλικού FRP με κατ' όγκο αναλογία που ποικίλει μεταξύ 30-70%. Κύρια λειτουργία τους είναι η παραλαβή των φορτίων.

Γενικά οι ίνες είναι επιθυμητό να έχουν τις εξής ιδιότητες:

- -μεγάλο μέτρο ελαστικότητας
- -υψηλή εφελκυστική αντοχή και μικρή διακύμανση αυτής της τιμής μεταξύ των ξεχωριστών ινών
- -μικρή διακύμανση της διατομής και της επιφάνειάς μεταξύ των ξεχωριστών ινών
- -σκληρότητα, ανθεκτικότητα
- -κατά το δυνατόν σταθερότητα των χαρακτηριστικών τους κατά την επεξεργασία τους για την παραγωγή του σύνθετου υλικού
- -δυνατότητα παραγωγής τους στην επιθυμητή μορφή και με τις επιθυμητές ιδιότητες
- -αποδεκτό κόστος

Οι πιο συνήθεις ίνες σήμερα είναι οι ίνες γυαλιού, οι ίνες άνθρακα, οι ίνες αραμιδίου και οι φυσικές ίνες.

Ίνες αραμιδίου	
Ίνες γυαλιού	
Ίνες άνθρακα	

Εικόνα 2.11 : είδη ινών



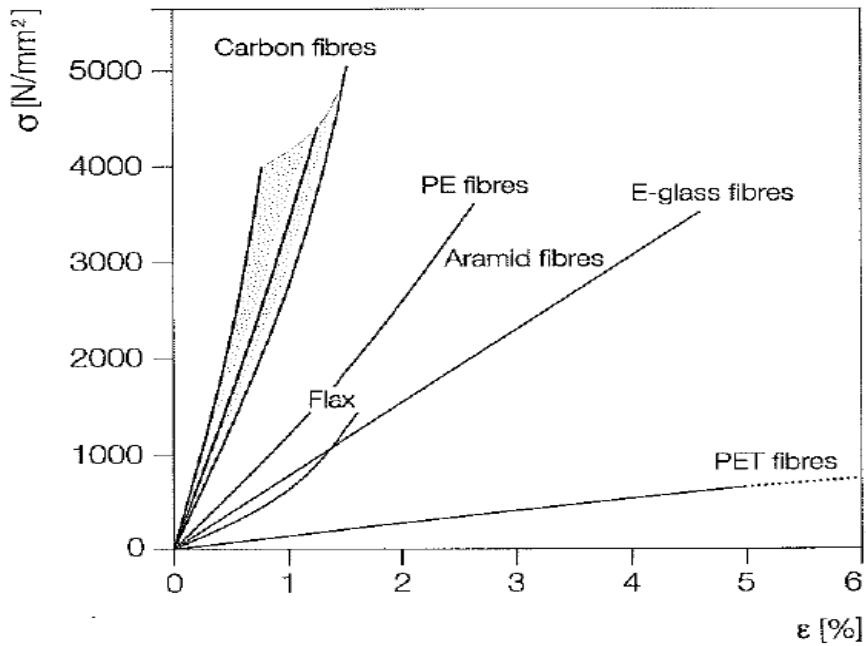
Εικόνα 2.12: συγκριτικός πίνακας ιδιοτήτων των ινών

Επίσης ίνες πολυεστέρων και nylon χρησιμοποιούνται. Όλες οι ίνες έχουν μικρή πυκνότητα και δίνουν στο πλαστικό που ενισχύουν μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία. Η μικρή πυκνότητα των ινών είναι ένας από τους κυριότερους λόγους της εξαιρετικής αναλογίας αντοχής/δυσκαμψίας και βάρους.

Η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται όταν χρησιμοποιούνται ίνες με μήκος κοντά στο άπειρο και όταν τοποθετούνται σε μία κατεύθυνση και ισότροπα. Όσο πιο ανισότροπα εισάγονται οι ίνες και όσο μικρότερο μήκος έχουν, τόσο μικρότερες είναι οι μηχανικές τους ιδιότητες.

Αυτό το μεγάλο εύρος επιλογών σε ότι αφορά το μήκος, τη διεύθυνση και το είδος των ινών δείχνει ότι τα FRP μπορούν να παραχθούν σύμφωνα με τις μηχανικές απαιτήσεις του κάθε project. Αυτό οδηγεί σε μία πολύ αποτελεσματικότερη χρήση του υλικού σε σχέση με το χάλυβα και το σκυρόδεμα.

Όλες οι ίνες συμπεριφέρονται οιονεί ελαστικά μέχρι τη θραύση.



Εικόνα 2.13:διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων των ινών

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι 4 είδη είναι τα καταλληλότερα για κατασκευές: ο άνθρακας, το γυαλί, το PE και το αραμιδίο. Ωστόσο οι ίνες PE και οι ίνες αραμιδίου είναι σχετικά ακριβές. Συγκρίνοντας τον άνθρακα με το γυαλί, το μέτρο ελαστικότητας του άνθρακα είναι ασφαλώς μεγαλύτερο αλλά η τιμή του γυαλιού είναι σαφώς μικρότερη.

### ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ



Εικόνες 2.14 και 2.15: καρούλια ινών E-glass

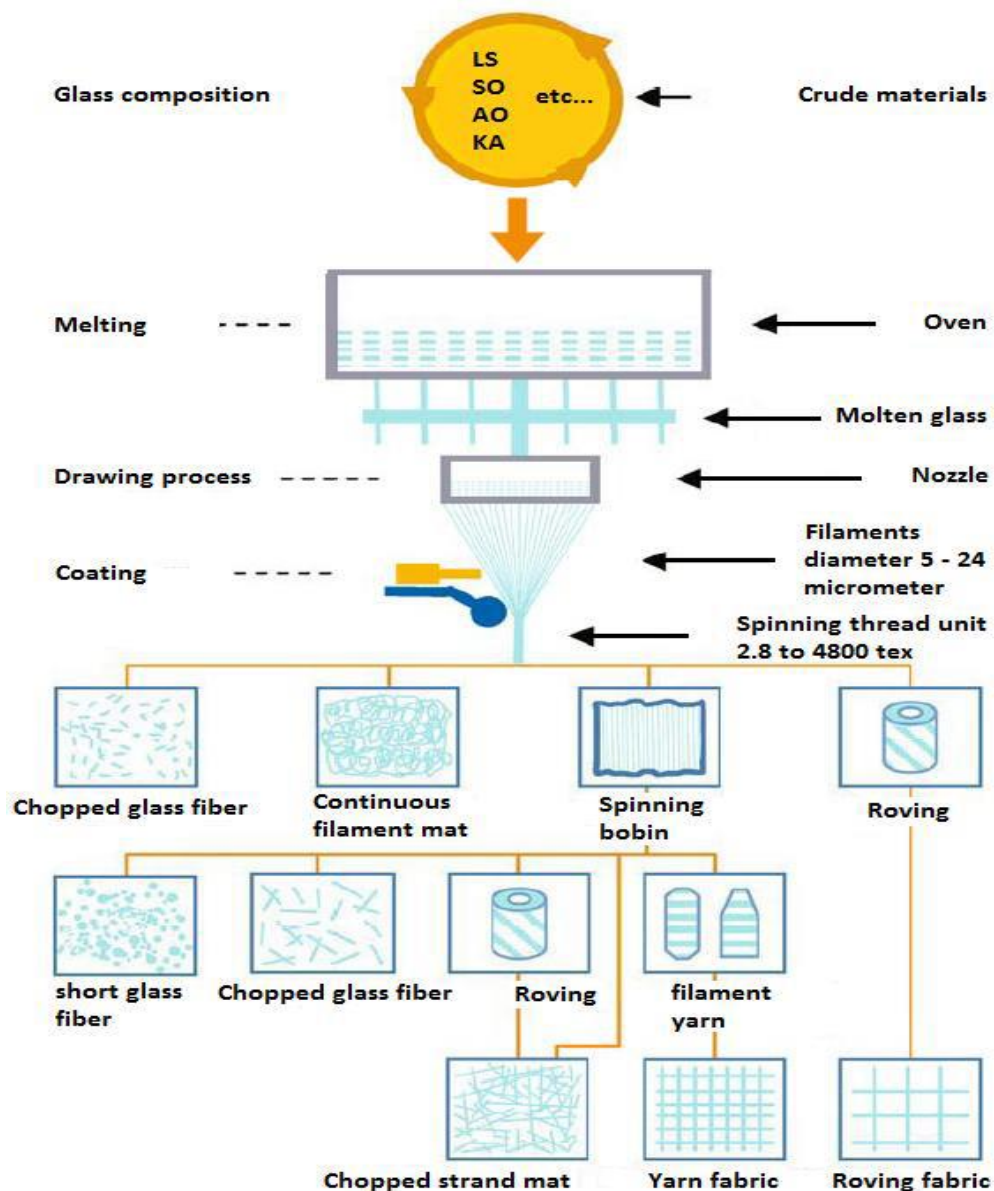
Οι ίνες γυαλιού είναι οι πιο δημοφιλείς ως συστατικό των FRP κυρίως λόγω του βέλτιστου συνδυασμού χαρακτηριστικών αντοχής και κόστους.

Παράγονται με ειδική κατεργασία υγρού γυαλιού το οποίο μπορεί να πάρει τη μορφή νήματος. Συνήθως κατά τη διαδικασία παραγωγής οι ίνες γυαλιού καλύπτονται (coated) με ειδικά διαλύματα (agents) έτσι ώστε να βελτιωθεί η συμπεριφορά τους κατά τον εμποτισμό τους από τη ρητίνη. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η συνάφεια μεταξύ των δύο υλικών και μειώνονται τα κενά στο τελικό προϊόν, το σύνθετο υλικό FRP.

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ινών γυαλιού είναι οι εξής:

- E-glass: είναι ο πιο φθηνός τύπος ινών και χρησιμοποιείται ευρέως
- S-glass: έχει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας ωστόσο δεν προτιμάται λόγω του υψηλού κόστους
- Alkali-resistant glass: παράγονται με την προσθήκη zirconium και είναι ανθεκτικές στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος που γενικά διαβρώνει τις ίνες γυαλιού.

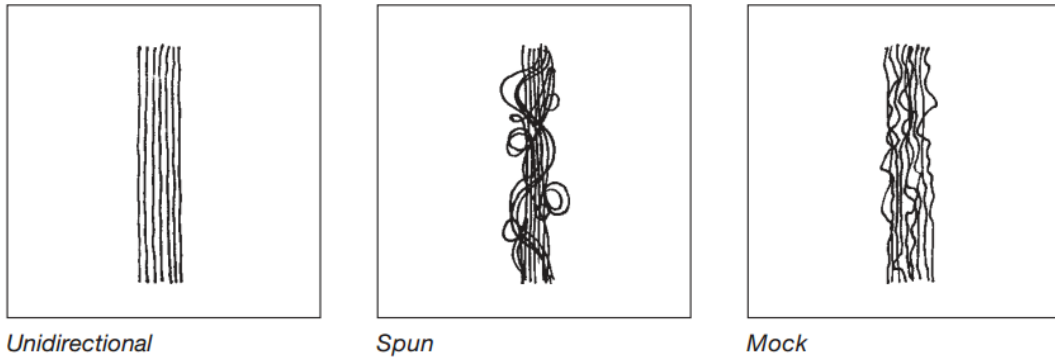
Τα πιο σημαντικά μειονεκτήματα των ινών γυαλιού είναι το σχετικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, η χαμηλή ανθεκτικότητα σε υγρό και αλκαλικό περιβάλλον, καθώς και η χαμηλή μακροχρόνια αντοχή λόγω του φαινομένου της ερπυστικής διάρρηξης (stress rupture). Παρακάτω παρουσιάζεται σε διάγραμμα η διαδικασία παραγωγής των ινών του γυαλιού.



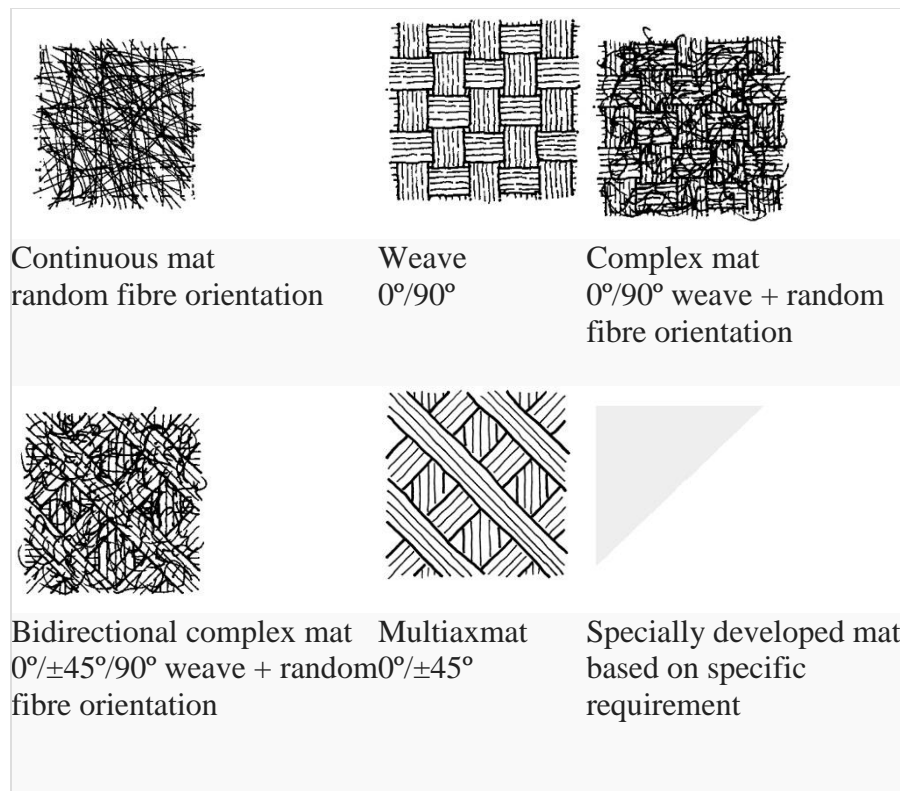
Εικόνα 2.16: Η διαδικασία παραγωγής γυαλιού και τελικών προϊόντων



Παρακάτω φαίνονται οι διάφοροι τύποι ύφανσης και διαστρωμάτωσης.



εικόνα 2.17:τύποι διαστρωμάτωσης



Εικόνα 2.18:τύποι ύφανσης

### 2.1.6 Η μήτρα από πολυμερές

Το πολυμερές είναι είτε θερμοσκληρυνόμενο ή θερμοπλαστικού τύπου και με βάση τα προϊόντα ρητίνης. Η μήτρα είναι ένα συνεχές υλικό που περιβάλλει και υποστηρίζει την ενίσχυση με τη διατήρηση της σχετικής θέσης του. Παρόλο που η αντοχή του ινοπλισμένου πολυμερούς προκύπτει από την ενίσχυση, η μήτρα πολυμερούς δίνει τη μορφή και διασφαλίζει σωστή τοποθέτηση των ινών. Επιπροσθέτως η ρητίνη προστατεύει την ενίσχυση από εξωτερικές επιδράσεις όπως ο καιρός, το νερό, η ακτινοβολία UV.

Όλοι οι τύποι ρητίνης λειτουργούν σχεδόν με τον ίδιο τρόπο. Στην ακατέργαστη μορφή τους αποτελούνται από χαλαρούς μοριακών αλυσίδων π.χ. μονομερή τα οποία διαλύονται σε μια ουσία. Όταν ο κατάλληλος παράγοντας σκλήρυνσης, καταλύτης ή επιταχυντής προστίθεται σε αυτήν την ουσία, οι αλυσίδες αρχίζουν να συγκεντρώνονται και να σχηματίζουν μια στερεή, τρισδιάστατη δομή. Οι διαφορές μεταξύ των ρητινών βρίσκονται στη αντοχή, σκλήρυνση και στην ποιότητα της διεπαφής ίνων και ρητίνης.

Μήτρα του FRP είναι το υλικό της ρητίνης μαζί με τις διάφορες προσμίξεις που έχει πλέον μετά από κατεργασία αποκρυσταλλώσει την οριστική του δομή και είναι πολυμερές υλικό. Αποτελεί περίπου το 30-60% κατ' όγκο του FRP. Η χημική του σύνθεση και οι ιδιότητες του καθορίζουν τη συμπεριφορά του σύνθετου υλικού. Η συμβατότητα του με τις ίνες και η δυνατότητα της από κοινού λειτουργίας τους επηρεάζουν τον τρόπο αστοχίας του μέλους.

Οι κυριότερες λειτουργίες του είναι οι εξής:

- Συγκρατεί σε ενότητα τις ίνες και καθορίζει τη γεωμετρική τους κατανομή
- Μεταβιβάζει τα φορτία στις ίνες κυρίως μέσω μηχανισμών τριβής
- Προσφέρει ακαμψία και το επιθυμητό σχήμα στο δομικό μέλος FRP
- Προστατεύει τις ίνες από τον κίνδυνο διάβρωσης από το περιβάλλον
- Απομονώνει τις ίνες ώστε να λειτουργούν χωριστά συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στην επιβράδυνση επέκτασης πιθανών ρωγμών
- Διαμορφώνει την επιφάνεια σύνδεσης του μέλους
- Καθορίζει την διατμητική αντοχή του μέλους για φόρτιση κάθετη στην κύρια διεύθυνση των ινών
- Σε θλιπτική καταπόνηση προσφέρει πλευρική στήριξη στις ίνες ώστε να μην αστοχήσουν σε τοπικό λυγισμό

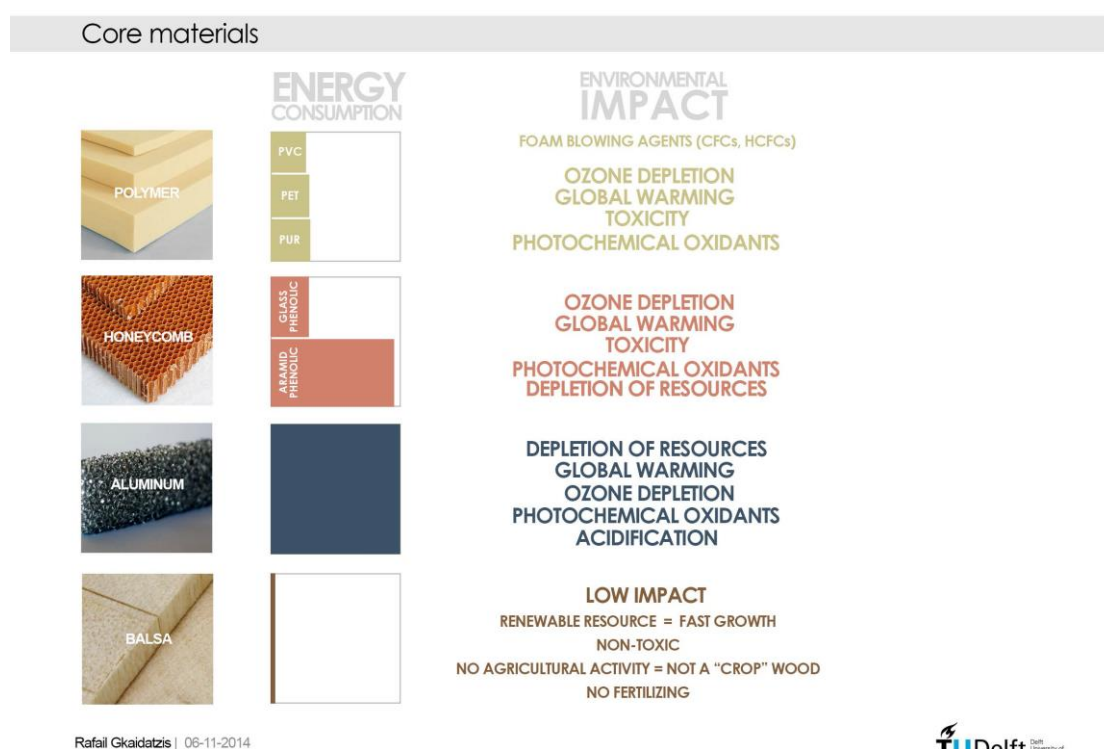
Δύο είναι οι κύριες κατηγορίες ρητινών που χρησιμοποιούνται στα FRP, οι θερμοσκληρυνόμενες (thermosetting) και οι θερμοπλαστικές (thermoplastic resins). Στις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες ανήκουν οι πολυεστερικές ρητίνες και οι βινυλεστερικές. Στα GFRP χρησιμοποιούνται πολυεστερικές ρητίνες και στα CFRP εποξικές ρητίνες. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες προτιμούνται στην παραγωγή των FRP κυρίως επειδή είναι εύκολη η κατεργασία τους (κυρίως λόγω του χαμηλού ιξώδους) και έχουν σχετικά χαμηλό κόστος. Πρόκειται για πολυμερή τα οποία αναπτύσσουν πολύ ισχυρούς μοριακούς δεσμούς και ένα τρισδιάστατο δίκτυο πολυμερούς αλυσίδας το οποίο τους προσφέρει σταθερή εσωτερική δομή και σχήμα. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι, αντίθετα με τις θερμοπλαστικές ρητίνες, μετά την οριστική σκλήρυνσή τους δεν λιώνουν ούτε αλλάζουν σχήμα υπό την επίδραση της θερμοκρασίας παρά μόνο όταν φτάσουν το όριο της θερμοκτικής τους αποσύνθεσης.

Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες έχουν ψαθυρή συμπεριφορά. Προσφέρουν στο σύνθετο υλικό μεγάλη ακαμψία, σταθερότητα σχήματος, μικρότερο συντελεστή θερμοκτικής διαστολής, μεγάλη αντοχή στην επίδραση διαλυτών και άλλων χημικών ουσιών. Πρέπει ωστόσο να ληφθεί υπόψη η προκύπτουσα ογκομετρική συρρίκνωση των ρητινών κατά την σκλήρυνσή τους (η οποία κυμαίνεται από 4% για τις εποξικές

εως 8% για τις πολυεστερικές ρητίνες) και μπορεί να προκαλέσει την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων κυρίως στη διεπιφάνεια με τις ίνες.

Type	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Acids	Alkalis	Weather	Tensile Strength [N/mm <sup>2</sup> ]	Elastic Modulus [N/mm <sup>2</sup> ]
UP	1,20	0	0	+	40-70	3000-4200
EP	1,20	+	+	0	60-125	3000-6000
VE	1,20	+	+	0	70-84	3400-3600
PF	1,30	-	-	+	20-60	1500-2500

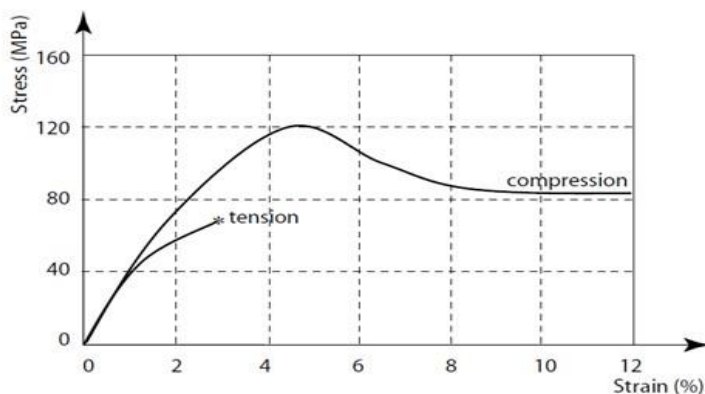
Εικόνα 2.19 διάγραμμα ιδιοτήτων των μητρών.



Εικόνα 2.20: Σύγκριση ως προς την κατανάλωση ενέργειας.

## ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

Οι πολυεστερικές ρητίνες είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες από τη βιομηχανία παραγωγής σύνθετων υλικών. Γενικά αν και οι ιδιότητες τους είναι κατώτερες των εποξικών ρητινών μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά με την ανάμιξη πρόσθετων (additives) κατά την κατεργασία τους. Λόγω της ανθεκτικότητας τους στην υπεριώδη ακτινοβολία UV και της δυσάρεστης οσμής τους συχνά βρίσκουν εφαρμογή σε εξωτερικές χρήσεις. Το σημαντικότερο μειονέκτημά τους είναι το μεγάλο ποσοστό ογκομετρικής συρρίκνωσης κατά την σκλήρυνσή τους ωστόσο μπορεί να μειωθεί αν αναμιχθούν με θερμοπλαστικά συστατικά.



Εικόνα 2.21:διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

### **2.1.7 Φίλλερ και πρόσθετα**

Τα φίλλερ είναι υλικά που προστίθενται για να ‘γεμίσει’ η τελική διατομή με τη χρησιμοποίηση μικρότερων ποσοτήτων υλικών μήτρας έτσι ώστε να μειωθεί το τελικό κόστος. Επίσης μπορούν να συμβάλλουν στην πιο αποτελεσματική μεταβίβαση των φορτίων και να μειώσουν τη ρηγμάτωση σε μη ενισχυμένες περιοχές. Πιο ευρεία χρήση έχουν το ανθρακικό ασβέστιο, ο καολινίτης και το οξείδιο του αλουμινίου.

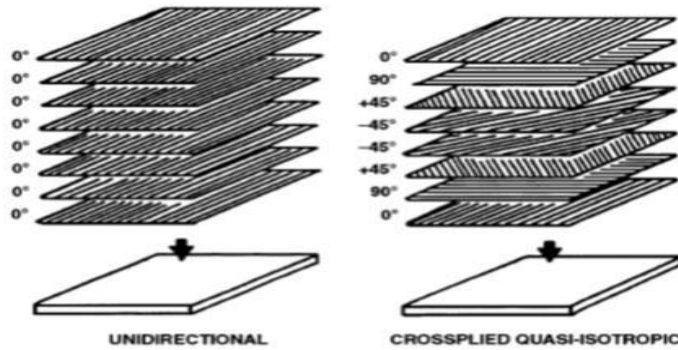
Τα πρόσθετα είναι ουσίες που προστίθενται στη μήτρα έτσι ώστε να αλλάξουν κάποιες ιδιότητες του σύνθετου υλικού, να βελτιωθεί η συμπεριφορά του και οι μηχανικές του ιδιότητες. Μπορεί να είναι καταλύτες, χρωστικές, επιβραδυντές φλόγας και κυρίως αυξάνουν την ανθεκτικότητα του υλικού σε διάβρωση υπό την επίδραση φωτιάς και γενικότερα κατά την έκθεση σε επιβλαβή περιβάλλοντα, μειώνουν τη συστολή ξηράνσεως.

### **2.1.8 Λειτουργία του σύνθετου Υλικού**

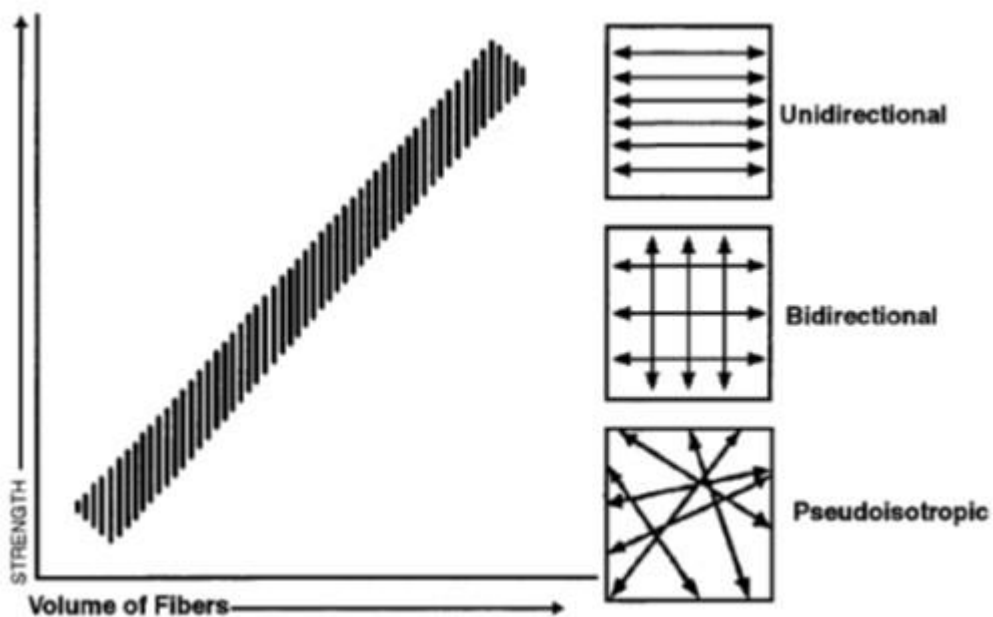
Όταν τα δύο μέρη συνδυάζονται με τον κατάλληλο τρόπο, ο παράγοντας σκλήρυνσης θα συνδέσει τις ίνες προς το πολυμερές και θα σχηματίσουν μια δομή. Η εκτέλεση αυτής της διαδικασίας σκλήρυνσης σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον θα αυξήσει δραματικά την ποιότητα του προϊόντος FRP.

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να φέρουν μεγαλύτερα επίπεδα τάσεων από ότι τα συστατικά στοιχεία τους χωριστά καθώς η μήτρα ρητίνης και οι ίνες αλληλεπιδρούν και αναδιανεμούν εσωτερικά τις τάσεις που προκαλούνται από τα εξωτερικά φορτία. Ωστόσο αυτή η δυνατότητα εσωτερικής αναδιανομής των τάσεων εξαρτάται από τη συνάφεια των δύο υλικών (όπως συμβαίνει άλλωστε και στο οπλισμένο σκυρόδεμα μεταξύ σκυροδέματος-χάλυβα). Η συνάφεια ινών-μήτρας ρητίνης εξαρτάται από χημικούς και μηχανικούς παράγοντες. Ειδικές ουσίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενισχύσουν τους χημικούς δεσμούς και τη συγκολλησιμότητα των δύο υλικών. Για την αποτελεσματικότερη λειτουργία του σύνθετου υλικού ουσιαστικής σημασίας είναι επίσης η συμβατότητα των μηχανικών παραμέτρων των δύο υλικών. Για παράδειγμα υπό εφελκυσμό η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού στη διεύθυνση των ινών είναι σχεδόν γραμμικώς ελαστική και η αντοχή καθορίζεται από την αντοχή των ινών. Έτσι, για να μην έχουμε πρόωρη ρηγμάτωση και να αναπτυχθεί η πλήρης εφελκυστική αντοχή η μήτρα θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας από τις ίνες.

Υπό θλιπτικά φορτία ωστόσο απαιτείται μια ελάχιστη ακαμψία της μήτρας έτσι ώστε να παρέχει επαρκή πλευρική στήριξη και αποφευχθεί ο λυγισμός των ινών. Επίσης σημαντικός είναι ο ρόλος της γεωμετρίας των ινών, της κατανομής τους στο χώρο, της γωνίας μεταξύ τους αλλά και με τη διεύθυνση της φόρτισης. Η βέλτιστη συμπεριφορά επιτυγχάνεται για σταθερή φόρτιση παράλληλα στη διεύθυνση των ινών (και οι ίνες τοποθετημένες σε μια κύρια διεύθυνση).



Εικόνα 2.22:διάταξη στρώσεων



Εικόνα 2.23:σχέσεις διεύθυνσης ινών-αντοχής

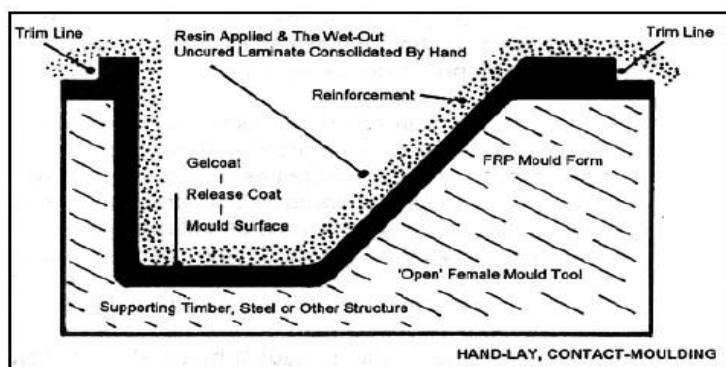
Γενικά καθώς τα FRP είναι νέα υλικά η έρευνα για τις δυνατότητες και τις ιδιότητες τους συνεχώς εξελίσσεται παράλληλα εξελίσσεται σταδιακά και η βιομηχανία παραγωγής τους. Ωστόσο οι καθιερωμένες αντιλήψεις σχεδιασμού και μορφής των υλικών είναι προσαρμοσμένες κυρίως στον χάλυβα που κυριαρχεί στις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Έτσι είναι λογικό πως τα πρώτα βήματα που έγιναν βασίστηκαν στην ήδη υπάρχουσα γνώση και έτσι τα μοντέλα και οι διατομές μιμήθηκαν κυρίως τα αντίστοιχα χαλύβδινα. Όσο όμως εμπλουτίζεται με το χρόνο η εμπειρία της χρήσης των FRP θα αναπτύσσονται και νέες μορφές υλικών και

στατικών συστημάτων που θα εκμεταλλεύονται κατά βέλτιστο τρόπο τις ιδιαίτερες ιδιότητες των FRP προσφέροντας εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού.

### 2.1.9 Τεχνικές παραγωγής

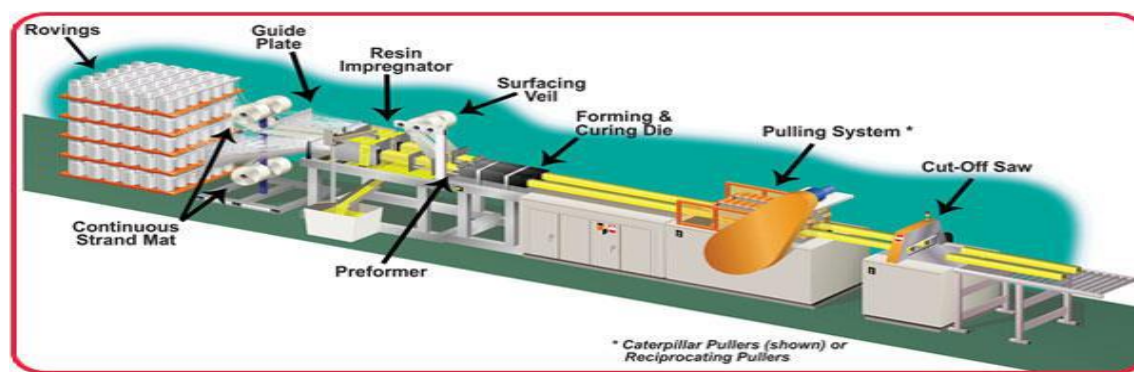
Υπάρχουν πάρα πολλές διαθέσιμες μέθοδοι διαθέσιμες για μαζική παραγωγή Ινοπλισμένων Πολυμερών. Τα παρακάτω είναι μια παρουσίαση των βασικότερων μεθόδων.

**Χειρονακτική διαδικασία μόρφωσης διαστρωμάτωσης. (Hand-lay/Contact Moulding)** Πρόκειται για την πιο απλή αλλά παρ' όλα αυτά πολύ αποτελεσματική διαδικασία στην οποία βασίστηκε η ανάπτυξη της αγοράς των ινοπλισμένων πολυμερών πριν 70 χρόνια. Επειδή η μέθοδος είναι χειρονακτική απαιτεί πολύ εργασία και γι αυτό είναι κατάλληλη μόνο για την κατασκευή πρωτοτύπων ή μεγάλων μονοκόμματων μελών.



Εικόνα 2.24: Hand-lay/Contact Moulding (CPA, 2000)

### Παραγωγή με έλξη



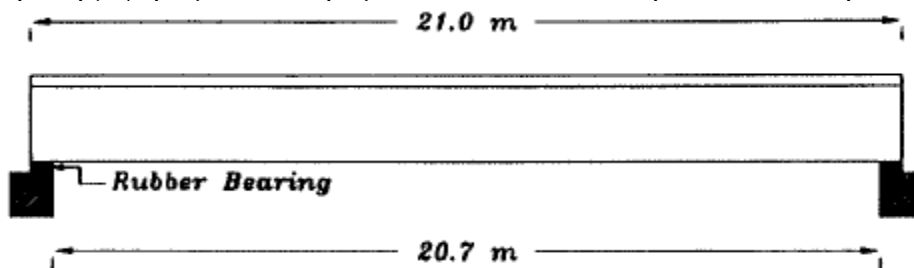
Εικόνα 2.25: παραγωγή FRP με έλξη

## 2.2 Γέφυρες από ινοπλισμένα Πολυμερή

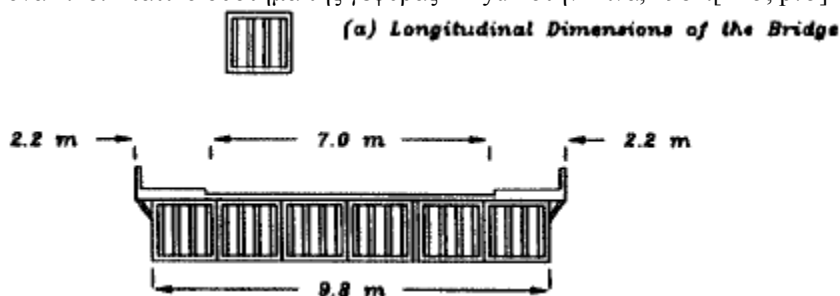
### 2.2.1 Ιστορία των FRP στη γεφυροποιία.

Η ιστορία τους στη γεφυροποιία είναι πολύ πρόσφατη. Μέχρι σήμερα αποτελούσαν ένα μικρό κομμάτι των γεφυρών. Οι περισσότερες γέφυρες αποτελούνται από παραδοσιακά υλικά όπως ξύλο χάλυβας και σκυρόδεμα. Τα πρώτα πειράματα στη γεφυροποιία ξεκίνησαν στην Κίνα το 1970.

Η πρώτη γέφυρα με κατάστρωμα FRP κατασκευάστηκε το 1982 στην Κίνα.



Εικόνα 2.28: Στατικό σύστημα της γέφυρας Miyun στην Κίνα, 1982.[B15, p75]



Εικόνα 2.29 :το κατάστρωμα τη γέφυρας Miyunστην Κίνα1982

Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή των ινοπλισμένων πολυμερών είναι ακόμη περιορισμένη και αφορά κυρίως σε μικρά τμήματα όπως το κατάστρωμα της γέφυρας, δοκούς, μπάρες ενισχύσεων ή κιγκλιδώματα. Κυρίως λόγω του χαμηλού του βάρους, τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι ιδανικά σαν υλικό ενισχύσεως σε υπάρχουσες γέφυρες με προβλήματα. Πρόσφατη έρευνα έδειξε ότι μόνο 53 γέφυρες έχουν χτιστεί παγκοσμίως.

### 2.2.2 Γέφυρες εξ ολοκλήρου από ινοπλισμένα πολυμερή.

Από την πρώτη εφαρμογή των πολυμερών στις γέφυρες, διάφορα έργα που περιελάμβαναν μέλη από ινοπλισμένα πολυμερή ξεκίνησαν. Αυτό το κεφάλαιο θα επικεντρωθεί αποκλειστικά σε πεζογέφυρες εξ ολοκλήρου κατασκευασμένες από ινοπλισμένα πολυμερή.

Θα παρουσιαστούν τρία παραδείγματα γεφυρών με κατάστρωμα από 20 έως 40 μέτρα. Οι γέφυρες αυτές βρίσκονται στην Ολλανδία, τη Σκωτία και την Ισπανία. Οι γέφυρες

αυτές είναι κατασκευασμένες από πολυεστέρα με ίνες γυαλιού. Σε ένα σύνολο 50-60 γεφυρών εξ ολοκλήρου από FRP το 90% είναι πεζογέφυρες

### **2.2.3 ABERFELDY FOOTBRIDGE**



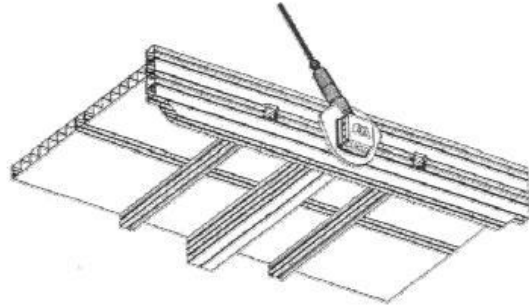
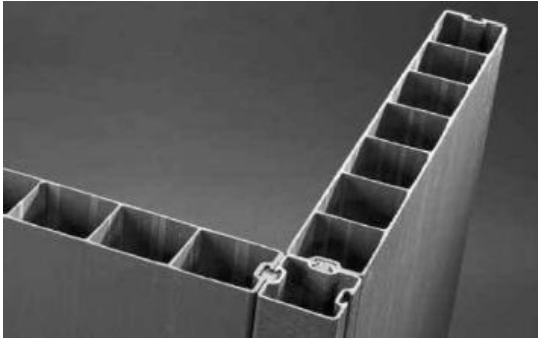
Εικόνες 2.30 και 2.31: Δύο όψεις της πεζογέφυρας Aberfeldy πάνω από τον ποταμό Τάι στη Σκωτία.

Η γέφυρα Aberfeldy κατασκευάστηκε το 1992 στη Σκωτία και διασχίζει τον ποταμό Τάι. Μετά από μία πρώτη εκτίμηση από τον καθηγητή Harvey στο πανεπιστήμιο του Dundee έγινε σαφές ότι τα παραδοσιακά υλικά δεν ήταν επαρκή για να καλύψουν τις επιθυμητές απαιτήσεις όπως το μικρό βάρος και το μεγάλο κατάστρωμα. Σαν αποτέλεσμα, οι μηχανικοί της εταιρίας “Maunsell Structural Plastics” ορίστηκαν σαν επικεφαλής δομοστατικοί μηχανικοί και αποφασίστηκε να αναλάβουν την πρόκληση και να κατασκευάσουν την πρώτη γέφυρα εξ ολοκλήρου από ινοπλισμένα πολυμερή. Η εταιρία “Maunsell” χρησιμοποίησε το νέο “Advanced Composites Component System” (ACCS), ένα σύστημα που χρησιμοποιεί προκατασκευασμένα πανελ που ενώνονται με μηχανικά μέσα στερέωσης και συγκολλούμενες ενώσεις.

Χάρη στο μικρό βάρος της γέφυρας μία μοναδική μέθοδος συναρμολόγησης μπορούσε να εφαρμοστεί χωρίς να χρησιμοποιηθούν γερανοί. Το μικρό βάρος επίσης μείωσε το κόστος θεμελίωσης. Η γέφυρα κατασκευάστηκε εξ ολοκλήρου από GFRP με επικαλύψεις που το προστάτευαν απ τη φθορά, παρέχοντας ένα προσδόκιμο ζωής 20 ετών. Το GFRP είναι φτιαγμένο από ίνες E-glass με ρητίνη ισοφθαλικού πολυεστέρα.

Η γέφυρα είναι καλωδιωτή με δύο πυλώνες σχήματος A από GFRP ζυγίζοντας μόνο 2.500 kg το κάθε πλαίσιο. Προκτασκευάστηκαν σε δύο κομμάτια το κάθε πλαίσιο.





Εικόνες 2.32 και 2.33 : αριστερά:Maunsell Structural Plastics, το αρθρωτο σύστημα ACCS που χρησιμοποιήθηκε για την πεζογέφυρα δεξιά: στήσιμο του καταστρώματος της γέφυρας Aberfeldy

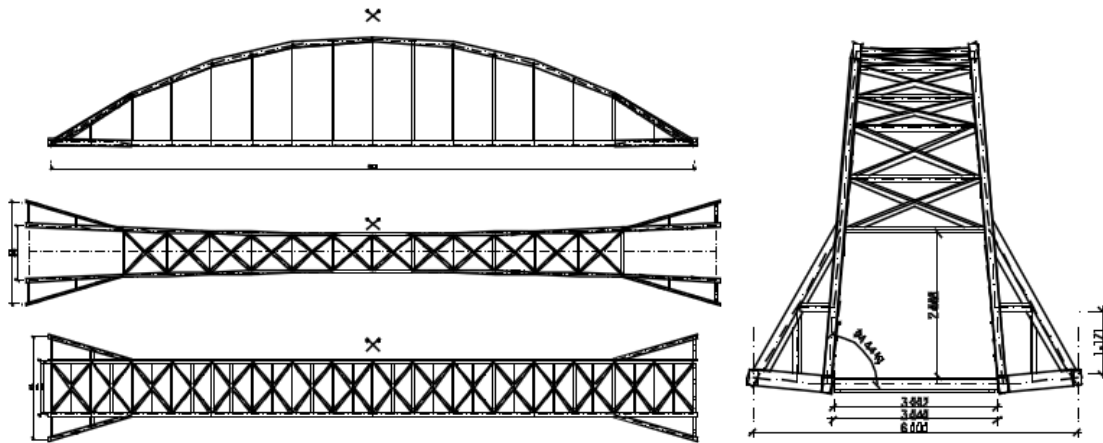
### **2.2.4 LLEIDA FOOTBRIDGE**

Η πεζογέφυρα Lleida βρίσκεται 2 χιλιόμετρα από την πόλη της Lleida στην Ισπανία. Δασχίζει έναν αυτοκινητόδρομο και ένα σιδηρόδρομο υψηλής ταχύτητας μεταξύ Μαδρίτης και Βαρκελώνης. Η γέφυρα προορίζεται για πεζούς, απαιτεί ελάχιστη συντήρηση και προκάλεσε μικρή επιβάρυνση στην κυκλοφορία του αυτοκινητόδρομου κατά την κατασκευή. Η κατασκευή της τελείωσε το 2001. Η εικόνα παρακάτω δείχνει την γέφυρα ακριβώς μετά την κατασκευή.



Εικόνα 2.34: Η γέφυρα Lleida στην Ισπανία.

Η γέφυρα είναι αποκλειστικά φτιαγμένη από GFRP. Έχει συνολικό κατάστρωμα 38 μέτρων. Είναι τοξωτή με ύψος 6,2 μέτρα. (αναλογία υψους/κατάστρωμα 0,16). Το συνολικό πλάτος της γέφυρας είναι 6,1 μέτρα, και το κατάστρωμα καταλαμβάνει τα 3 μέτρα. Το βάρος της είναι 19.000 κιλά. Όλες οι διατομές είναι από σύνθετα πολυμερή. Η ενίσχυση είναι ένας συνδυασμός E-glass ινών , woven mats and complex mats. Η μήτρα είναι φτιαγμένη από ισοφθαλικό πολυεστέρα και η μικρότερη περιεκτικότητα σε ίνες παντού στη γέφυρα είναι 50%.



Εικόνα 2.35: Στατικό σύστημα της γέφυρας Lleida.

### **2.2.5 HARBOUR BRIDGE HARTELHAVEN ROTTERDAM**

Αυτή η γέφυρα από πολυμερή με ίνες γυαλιού προορίζεται για χρήση πεζών. Είναι η πρώτη γέφυρα που αποτελείται από μία μονολιθική κατασκευή FRP και δεν απαιτεί συνδέσεις και συγκολλήσεις. Εξαιτίας του μονολιθικού χαρακτήρα της, οι συνδέσεις μεταξύ του καταστρώματος και των κιγκλιδωμάτων είναι πολύ άκαμπτες και, δίνοντας τη δυνατότητα στη γέφυρα να συμπεριφέρεται σαν μία ράβδος. Με άλλα λόγια το ύψος της κουπαστής συμμετέχει στο στατικό προσομοίωμα δίνοντας την ευκαιρία στη γέφυρα να στηρίξει το άνοιγμα των 20 μέτρων. Ένα άλλο πλεονέκτημα της είναι ότι είναι εξ ολοκλήρου προκατασκευασμένη και απλά μεταφέρθηκε στο εργοτάξιο. Η πρώτη γέφυρα τέτοιου τύπου κατασκευάστηκε το 2011 Hartelhaven από την Fibercore Europe σε συνεργασία με την Havenbedrijf Rotterdam και χρησιμοποίησε το γνωστό Infracore system της Fibercore. Thi



Εικόνα 2.36: 5 HARBOURBRIDGE HARTELHAVEN ROTTERDAM

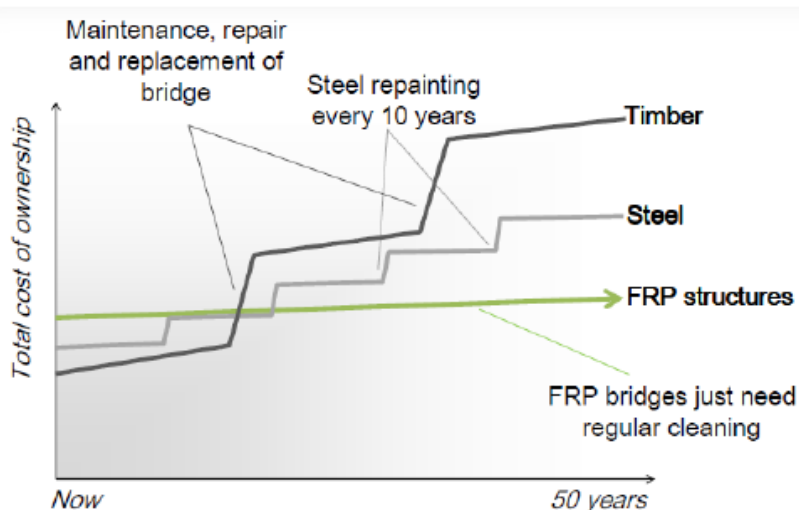
### **2.2.6 Πλεονεκτήματα τωνFRP**

Τα ινοπλισμένα πολυμερή παρουσιάζουν πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα. Έχουν βέβαια και κάποια μειονεκτήματα .Κύρια μειονεκτήματά τους είναι η ψαθυρή συμπεριφορά τους, η ευαισθησία τους στην ηλιακή ακτινοβολία και την φωτιά..Τα πλεονεκτήματα τους είναι:

- Υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος
- Αντοχή στη διάβρωση και τις καιρικές συνθήκες
- High directional strength (λόγω της ανισοτροπίας)
- Υψηλή ευελιξία ώστε να αντιμετωπίσουν συγκεκριμένες ανάγκες
- Σταθερότητα διαστάσεων (υπό εναλλασσόμενες θερμοκρασίες, υγρασία, πίεση κτλ.)
- Δυνατότητα μεγάλων, περίπλοκων και προκατασκευασμένων σχημάτων
- Υψηλή αντοχή σε κρούση
- Χαμηλό κόστος συντήρησης και μεγάλη διάρκεια ζωής

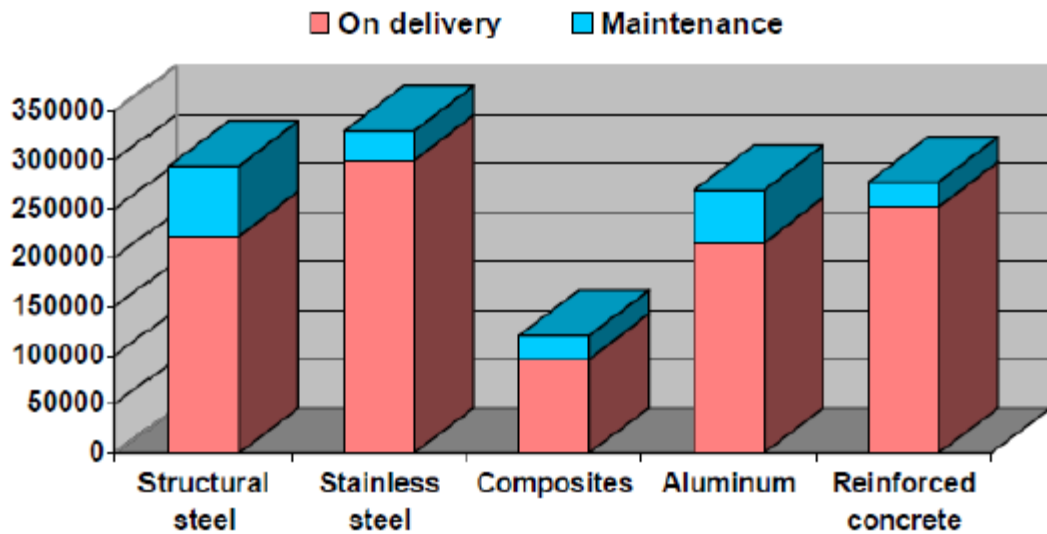
Σ αυτά τα γενικά πλεονεκτήματα των ινοπλισμένων πολυμερών ως δομικό υλικό μπορούν να προστεθούν και κάποια που αφορούν συγκεκριμένα στη γεφυροποιία:

- Μικρότερο βάρος
  - Μεγαλύτερα τμήματα μπορούν να προκατασκευαστούν και να μεταφερθούν στο εργοτάξιο, μειώνοντας όχι μόνο το κόστος μεταφοράς, αλλά επίσης και το δαπανηρό κόστος συναρμολόγησης. Επίσης η προκατασκευή αυξάνει την ποιότητα της κατασκευής λόγω του ελεγχόμενου περιβάλλοντος.
  - Μείωση σε μέγεθος και κόστος του σκελετού της γέφυρας όπως τα εφέδρανα και τα θεμέλια.
  - Μειωμένη κατανάλωση ενέργειας κατά τη μεταφορά και παραγωγή σε σύγκριση με το χάλυβα και το σκυρόδεμα.
  - Μείωση στο μέγεθος και την κατανάλωση ενέργειας του μηχανολογικού μέρους για τις ανοιγόμενες και μεταφερόμενες γέφυρες.
- Μεγαλύτερη ανθεκτικότητα.
  - Η διάβρωση του σκυροδέματος και του χάλυβα είναι εάν σημαντικό πρόβλημα στη γεφυροποιία. Πειραματικά έχει αποδειχτεί ότι τα ινοπλισμένα πολυμερή είναι πολύ ανθεκτικά στις περισσότερες επιθετικές χημικές ουσίες. Αυτή η ανθεκτική φύση τους και η αντίστασή τους στην μόλυνση του περιβάλλοντος ,στα άλατα από το λιώσιμο των πάγων, τις διάφορες χημικές ουσίες, χάρη στην ειδικά κατασκευασμένη μήτρα και ενίσχυση είναι καθοριστικοί παράγοντες στην επιλογή των ινοπλισμένων πολυμερών σαν κατασκευαστικό υλικό ειδικά σε αντίξοα περιβάλλοντα όπως οι γέφυρες κοντά σε ακτές.
- Μείωση στην απαιτήσεις συντήρησης, το κόστος καθόλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής.
  - Οι κατασκευαστές ινοπλισμένων πολυμερών υποστηρίζουν ότι τα προϊόντα τους έχουν μηδενικό κόστος συντήρησης κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους.



Εικόνα 2.37: Κόστος Κύκλου ζωής διαφορετικών τύπων γεφυρών (FiberCore Europe)

- Δυνατότητα να δημιουργήσουν πολύπλοκες μορφές
  - Νέες αισθητικές δυνατότητες.
  - Γεωμετρικά πιο αποδοτικές λύσεις.
  - Επιθυμητές ηλεκτρικές και θερμικές δυνατότητες.
  - Μπορούν να είναι ηλεκτρικά μη αγώγιμα, σημαντικό πλεονέκτημα κοντά σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις.
  - Είναι θερμικά σταθερό (ειδικά όταν χρησιμοποιούμε ίνες άνθρακα), χαρακτηριστικό το οποίο μπορεί να εξαλείψει την ανάγκη για αρμούς διαστολής.
  - Περιβαλλοντικά
- Σύμφωνα με το Veltkamp (2012) οι γέφυρες από ινοπλισμένα πολυμερή έχουν 66% μικρότερη κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους (παραγωγή, κατασκευή και συντήρηση). Επιπλέον πραγματοποιήθηκε μία περιβαλλοντική μελέτη που συνέκρινε την κατανάλωση ενέργειας μίας γέφυρας κατασκευασμένης από 5 εναλλακτικά υλικά. Η μελέτη βασίστηκε σε δύο διαφορετικές ομάδες, μία για την ενέργεια που απαιτείται μέχρι την παράδοση και μία κατά τη συντήρηση. Η πρώτη περιλαμβάνει παράγοντες όπως η ενέργεια που απαιτείται κατά την κατασκευή των μελών της γέφυρας, τη μεταφορά στο εργοτάξιο, καθώς και τη μόλυνση νερού και αέρα κατά την εγκατάσταση. Η δεύτερη αφορά στο βάψιμο τη συντήρηση και την αντικατάσταση εξαρτημάτων. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 2.21 τα σύνθετα υλικά υπερτερούν με κατανάλωση ενέργειας λιγότερο από το μισό των υπολοίπων.



Εικόνα 2.38: Κατανάλωση ενέργειας (MJ) γεφυρών από διαφορετικά υλικά (Ryszard, 2003)

- Ανακύκλωση

Υπάρχουν τρόποι ώστε τα σύνθετα υλικά να ανακυκλωθούν πλήρως για χρήση στην βιομηχανία σκυροδέματος. Τα ινοπλισμένα πολυμερή της εταιρίας Fiberline μπορούν να ανακυκλωθούν 100%, από το οποίο 30% χρησιμοποιείται σαν πηγή ενέργειας και το 70% σαν πρώτη ύλη.

Σύμφωνα με την εταιρία Fiberline, ανακυκλώνοντας 1000 τόνους διατομών στη βιομηχανία σκυροδέματος διασώζονται:

450 τόνοι κάρβουνο

200 τόνοι κιμωλίας

200 τόνοι άμμου

150 τόνοι οξειδίου του αργιλίου

### 2.2.7 Μειονεκτήματα των ινοπλισμένων πολυμερών

- Αρχικό κόστος

Οι υπεύθυνοι για την κατασκευή και τη συντήρηση των γεφυρών στην ύπαιθρο, έχουν συνήθως πρόβλημα έλλειψης χρημάτων όταν συμφωνούν για την κατασκευή καινούριων γεφυρών και γεφυρών που έχουν ήδη χτιστεί και πρέπει να αναβαθμιστούν. Οι γέφυρες που είναι κατασκευασμένες από FRP έχουν ένα μεγάλο αρχικό κόστος που δημιουργεί μια αρνητική πρώτη εντύπωση για το συγκεκριμένο υλικό. Αυτή η έλλειψη χρημάτων επισκιάζει την προβλεπόμενη διάρκεια ζωής που αποδεδειγμένα έχουν οι FRP γέφυρες. Επομένως, οποιαδήποτε απόφαση για να χρησιμοποιηθεί ένα τέτοιο ακριβό υλικό πρέπει να βασίζεται σε συγκεκριμένες προδιαγραφές ή απαιτήσεις των πελατών. Το αρχικό κόστος για την κατασκευή FRP διατομών είναι ουσιαστικά μεγαλύτερο από τα συμβατικά υλικά όπως ο χάλυβας και το μπετόν, οπότε το να επιλεγεί ο σχεδιασμός μιας γέφυρας με FRP είναι δύσκολο να δικαιολογηθεί αρχικά από τους σχεδιαστές ή τους μηχανικούς. Το κόστος

αναμένεται να μειωθεί όσο το υλικό χρησιμοποιείται πιο τακτικά και η επίγνωση για τη μεγάλη διάρκεια ζωής συνειδητοποιηθεί από τους μηχανικούς.

- Η δομική αστάθεια

Αν και ένα ελαφρύτερο κατάστρωμα έχει αποτέλεσμα στη μείωση του μεγέθους του κόστους των βασικών δοκών και άλλων εποικοδομημάτων και χαρακτηριστικά υποδομών, το αντίθετο μπορεί να είναι επίσης αληθές. Εάν το FRP κατάστρωμα δεν είναι αρκετά δυνατό για να ενεργεί σε σύνθετη δράση με το υπάρχον οικοδόμημα τότε οι δοκοί πρέπει να αυξηθούν για να καλύψουν αυτή την έλλειψη ακαμψίας. Αυτό μπορεί να έχει αποτέλεσμα να αυξηθούν τα κόστη για το έργο και να κρίνουν τη χρησιμότητα του FRP μη πρακτική. Επίσης, εάν εξαιτίας του μικρού βάρους μιας FRP γέφυρας, η δυναμική αστάθεια πιθανόν να είναι θέμα, όσον αφορά την ταλάντωση λόγω ανέμου και το συντονισμό. Αυτό μπορεί να απαιτεί την προσθήκη των αποσβεστήρων ή πρόσθετα βάρη για να την αύξηση της μάζας της γέφυρας και, ως εκ τούτου, επίσης, το κόστος.

- Πρότυπα σχεδιασμού

Αν και υπάρχουν αρκετές δημοσιεύσεις, οι οδηγοί και τα βιβλία στα πρότυπα σχεδίασης ιδιοτήτων των κατασκευών από FRP για τους πολιτικούς μηχανικούς, δεν υπάρχουν παγκόσμια ή διαδεδομένα σταθερά για τους μηχανικούς και τις διαδικασίες σχεδίασης δεν περιλαμβάνονται στις πρόσφατες σταθερές όπως ο Ευρωκώδικας. Υπάρχει ένα σοβαρό μειονέκτημα στην πιθανότητα χρησιμοποίησης από αυτές τις συνθέσεις στη στατική μελέτη. Αν αυτές οι κατάλληλες ιδιότητες και διαδικασίες δεν περιλαμβάνονται στις πρόσφατες προδιαγραφές, τότε οι μηχανικοί θα επιλέξουν συμβατικά υλικά, που γνωρίζουν ότι είναι ασφαλή και πλησιάζουν στις πρόσφατες προδιαγραφές.

- Σύνδεσμοι

Σύνδεσμοι διάτμησης ή μπουλόνια συχνά χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν χαλύβδινους δοκούς στα FRP καταστρώματα. Το FRP κατάστρωμα είναι περαιτέρω διεισδυμένο και για την αντοχή του, την ακαμψία και την αντίσταση σε οριζόντιο σπάσιμο. Πρόσφατη έρευνα που έγινε στο συγκολλητικό σύστημα άρθρωσης το οποίο προάγει μια πιο ομαλή μεταφορά μεταξύ της δοκού και του καταστρώματος και επομένως μειώνει τις τάσεις. Παρ' όλα αυτά ένα πρόβλημα που συνδέεται με αυτό το συγκολλητικό τύπο δεσμού το οποίο συζητήθηκε από τον Κέλερ και τον Σολμαιορ και η πιθανότητα ανύψωσης του καταστρώματος όπως φαίνεται στο 2.2.2. Η εμφάνιση ασύμμετρης φόρτισης μπορεί να προκαλέσει υψηλές δυνάμεις αποφλοίσωσης σε αυτές τις συνδέσεις, οι οποίες μπορεί να προκαλέσει την αποσυγκόλληση του καταστρώματος από τις υποστηρίξεις του.

- Κάγκελα

Προστατευτικά κιγκλιδώματα τα οποία συνήθως χρησιμοποιούνται στις περισσότερες γέφυρες, φτιάχνονται συνήθως σε σταθερό οπλισμένο, ρίχνονται σε αυτό για πάκτωση αλλά η πτυχή αυτή είναι αντιπαραγωγική σε σχέση με την ελαφριά φύση των FRP γεφυρών. Αυτό συχνά απαιτεί τη διάνοιξη οπών χρησιμοποιώντας ακριβά ενέματα τα οποία σε πρώτη φάση παρουσιάζουν μια αδυναμία στην αντοχή της κατασκευής.

- Ερπυσμός και κόπωση

Όπως τα πιο συμβατικά υλικά κατασκευών οι συνθέσεις από FRP τείνουν να παρειασφρήσουν κάτω από συνθήκες παρατεταμένης μακροπρόθεσμης φόρτισης. Στα FRP ο ερπυσμός συμβαίνει εντός της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς της πολυμερούς ρητίνης με ελάχιστη συνεισφορά από την αναλογία των ινών γυαλιού. Από ερπυσμού είναι μια συνάρτηση της περιεχόμενης ρητίνης, είναι ως εκ τούτου επίσης σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία και το λειτουργικό περιβάλλον. Συνήθως διατηρώντας τα πρακάτω επίπεδα εργασίας στρες μειώνει την εμφάνιση ερπυσμού και τα αποτελέσματα της.

- Θερμικές επιδράσεις

Εξαιτίας διαφορετικών συντελεστών θερμικής διαστολής μεταξύ ρητίνης και ινών γυαλιού, παρατεταμένη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να υποβαθμίσει σύνθετα υλικά με αποτέλεσμα ορατές φουσκάλες και φυσαλίδες αέρα. Αυτό μπορεί με τη σειρά του να οδηγήσει σε μειωμένη ακαμψία και αύξηση της διαπερατότητας του νερού μέσω της επαφής μέσω της ίνας και της ρητίνης. Οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις της αυξημένης θερμοκρασίας είναι σχετικά άγνωστες και απαιτούν περαιτέρω ερεύνα.

### **2.2.8 Κώδικες κατασκευής με FRP**

Δεν υπάρχουν επίσημοι συγκεκριμένοι κανονισμοί ή κώδικες για τη σχεδίαση των δομικών στοιχείων των FRP, παρόλα αυτά κάποιες δημοσιεύσεις που χρησιμοποιούνται είναι :

#### ***EUROCOMP Design Guidelines and Handbook***

Αυτή η δημοσίευση είναι ένας πρακτικός οδηγός σχεδιασμού ή κατευθυντήριες γραμμές που επιτρέπουν στους μηχανικούς να χρησιμοποιήσουν πολυμερή σε δομικές εφαρμογές. Το περιεχόμενο και οι διαδικασίες βασίζονται σε επιστημονικές πληροφορίες, αλλά η δημοσίευση δεν έχει διαπιστευθεί ως επίσημος κατασκευαστικός κώδικας. Ο σχεδιαστικός κώδικας περιλαμβάνει κεφάλαια για κάθε ζήτημα των FRP και περιλαμβάνει:

Υλικά, σχεδιασμό μελών διατομών, κατασκευή και εγκατάσταση και έλεγχος ποιότητας.

#### ***Departmental Standard BD90/05 (UK), Design Manual for FRP Bridges and Highway Structure***

#### ***Fiberline Design Manual***

### **2.2.9 Συγκριτική ανάλυση Χάλυβα- Ινοπλισμένων Πολυμερών**

Τα ινοπλισμένα πολυμερή μπορούν να φέρουν μεγάλα φορτία. Αυτό έχει να κάνει και με το είδος του FRP που επιλέγεται. Έχει παρατηρηθεί ότι οι ίνες γυαλιού σε συνδυασμό με μη κορεσμένους πολυεστέρες και οι ίνες άνθρακα με εποξύτη δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Το CFRP υπερέχει του GFRP σε θέματα αντοχής, ωστόσο το GFRP έχει πολύ μικρότερο κόστος.

Συγκρίνοντας τις ικανότητες των ινοπλισμένων πολυμερών σε σχέση με άλλα υλικά κάποια χαρακτηριστικά είναι πολύ πιο κρίσιμα από άλλα. Καταρχήν η αντοχή

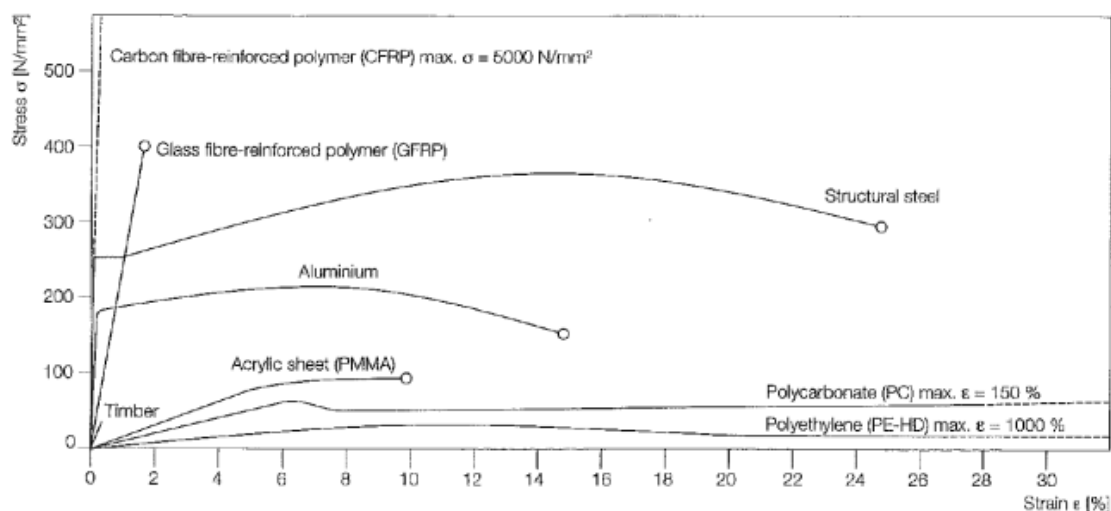


αστοχίας, δηλαδή οι τάσεις που μπορεί να αντέξει το υλικό πριν αστοχήσει είναι πολύ σημαντική. Ακόμη πιο σημαντικό είναι το μέτρο ελαστικότητας, το οποίο προκαλεί παραμόρφωση του υλικού όταν ασκούνται φορτία. Ακόμη η πυκνότητα είναι πολύ σημαντική ιδιότητα καθώς είναι ένα συγκριτικό πλεονέκτημα των FRP.

Material	Ultimate strength [MPa]	Elastic modulus [GPa]	Strain at failure [%]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]
Steel (A36)	360	210	25	7,80
Aluminium	200	70	15	2,70
GFRP	400	40	1,5	2,00
CFRP	1500	135	1,0	1,50

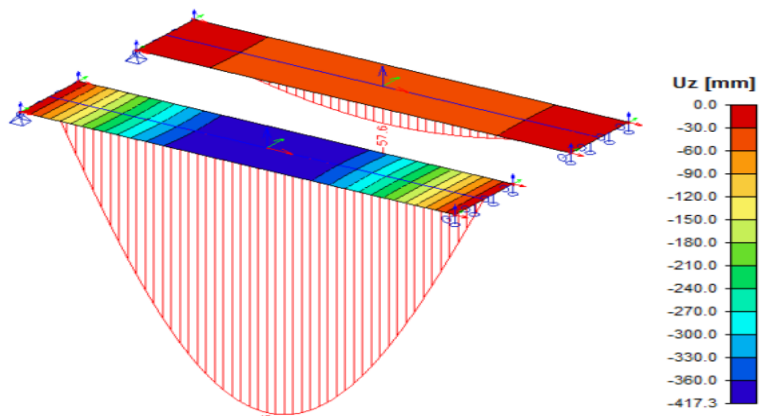
Εικόνα 2.41:επισκόπηση ιδιοτήτων των υλικών(Knipppers et al., 2011)

Στον πίνακα 5 το GFRP, CFRP, χάλυβας και αλουμίνιο συγκρίνονται. Το CFRP είναι ξεκάθαρα το υλικό με την υψηλότερη αντοχή και το μικρότερο βάρος αλλά το GFRP κρίνεται καταλληλότερο δομικό υλικό. Η αντοχή του GFRP είναι περίπου όση του χάλυβα, αλλά το μέτρο ελαστικότητας είναι αρκετά μικρότερο και έτσι λυγίζει πολύ πιο εύκολα. Η παραμόρφωση αστοχίας του GFRP είναι 1.5%, το οποίο σημαίνει ότι το GFRP θα παραμορφωθεί λιγότερο μέχρι την αστοχία. Πέρα από αυτό το GFRP είναι ελαφρύτερο από το χάλυβα.



Εικόνα 2.42:Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων υλικών (Knippersetal., 2011)

Στην εικόνα 2.42 παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων των συγκρινόμενων υλικών. Από αυτό το διάγραμμα προκύπτει ότι το GFRP έχει την ίδια αντοχή με το χάλυβα αλλά αστοχεί σε μικρότερη παραμόρφωση.



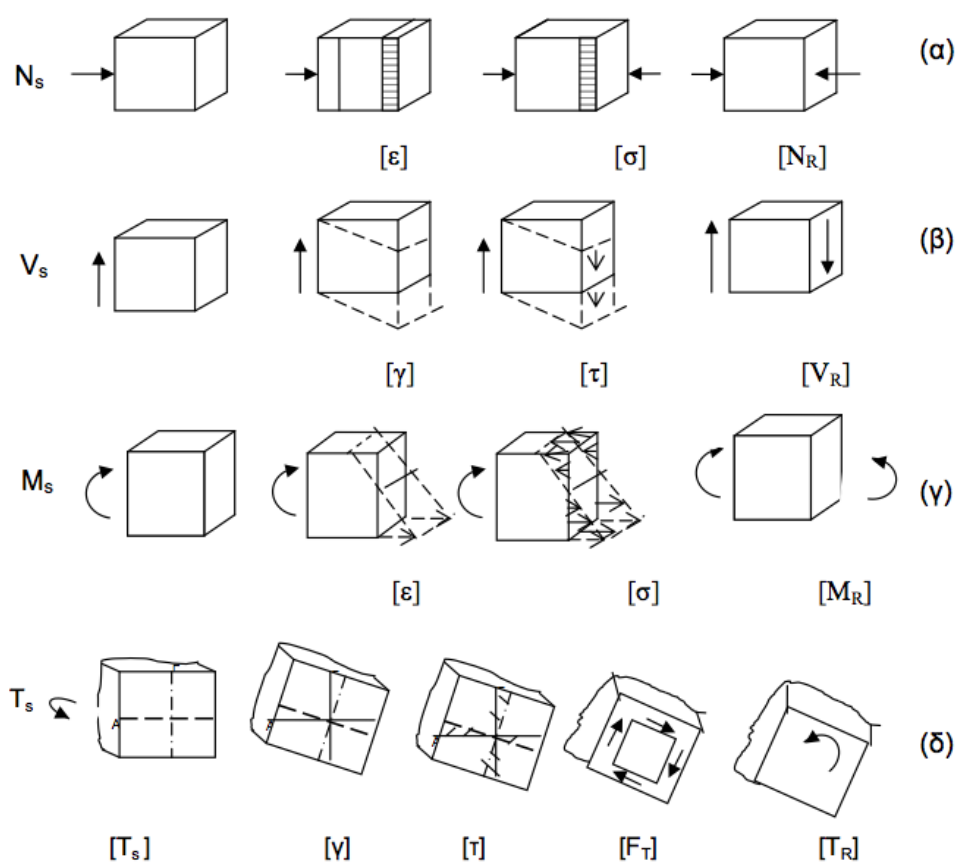
Εικόνα 2.43: Βέλη παραμορφώσεως

## Κεφάλαιο 3 Δράσεις και Έλεγχοι

### 3.1 Δράσεις

#### 3.1.1 Εισαγωγή

Δράσεις είναι οι εξωτερικές καταπονήσεις, που εφαρμόζονται στην κατασκευή προκαλώντας ορθές και διατμητικές τάσεις. Ορθές ονομάζονται οι τάσεις, που δρουν κάθετα στην επιφάνεια που φορτίζουν, ενώ διατμητικές είναι οι τάσεις που δρουν παράλληλα στην επιφάνεια φόρτισης. Ορθές τάσεις προκύπτουν, όταν στη διατομή εφαρμόζονται μεγέθη ορθής έντασης, όπως Αξονική Δύναμη ή Ροπή Κάμψης, ενώ διατμητικές τάσεις προκύπτουν, όταν στη διατομή εφαρμόζονται διατμητικά εντατικά μεγέθη, όπως Τέμνουσα Δύναμη ή Ροπή Στρέψης.



Εικόνα 3.1. Ορθές παραμορφώσεις, τάσεις, εσωτερικές δυνάμεις και εσωτερικά μεγέθη για : α) Αξονική, β) Διατμητική, γ) Καμπτική, δ) Στρεπτική καταπόνηση

Ανάλογα με τη χρήση, τη μορφή και τη θέση του έργου, προσδιορίζονται οι δράσεις από τους ισχύοντες κανονισμούς, τους οποίους ο μελετητής είναι υποχρεωμένος να ακολουθήσει, ώστε να εξασφαλισθεί η μη αστοχία αλλά και η σωστή λειτουργία της κατασκευής. Οι τιμές των φορτίων αλλά και οι συντελεστές ασφαλείας αυτών προκύπτουν από στατιστική ανάγνωση των αποκλίσεων των δυσμενέστερων καταστάσεων, που μπορεί να προκύψουν τόσο από πλευράς καταπονήσεων όσο και από πλευράς αντοχής των μελών. Σκοπός όλης αυτής της διαδικασίας είναι η σωστή

μεταφορά των φορτίων, που δρουν στη γέφυρα, με ασφάλεια στη θεμελίωση. Οι κατηγορίες φορτίων είναι οι εξής :

### **Μόνιμα Φορτία ( G )**

- Ιδία βάρη κατασκευής GIB
- Ιδία βάρη επικαλύψεων Gεπικ
- Ιδία βάρη κιγκλιδωμάτων Gκιγκλ

### **Κινητά Φορτία ( Q )**

- -Ομοιόμορφα διανεμημένο κατακόρυφο φορτίο  $q_{fk}$
- -Συγκεντρωμένο φορτίο για γενικές και τοπικές επιδράσεις  $Q_{fwk}$
- -Οριζόντιο φορτίο που δρα κατά μήκος του άξονα της γέφυρας  $Q_{flk}$
- -Δράσεις Ανέμου  $F_w$
- -Φορτίο Χιονιού  $F_s$
- Θερμοκρασιακές Μεταβολές  $T$
- -Τυχηματικά Φορτία ( F )
- Πρόσκρουση οχήματος σε βάθρο  $F_{προσκρ}$
- -Σεισμικά Φορτία ( E )
- Σεισμική δύναμη κατά τις 3 διευθύνσεις E
- Αρμονική διέγερση επί του καταστρώματος

### **3.1.2. Φορτίσεις**

#### Μόνιμα Φορτία

Στα μόνιμα φορτία κατατάσσονται οι καταπονήσεις, που έχουν μεγάλο ( πρακτικά άπειρο ) χρόνο επιβολής στη γέφυρα και εφαρμόζονται σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Αυτά είναι :

- I. Το ίδιο βάρος των Διατομών προκύπτει από το ειδικό βάρος του χάλυβα, το οποίο είναι  $78,5 \text{ KN/m}^3$
- II. Βάρος επικάλυψης θεωρείται ένα φορτίο  $1 \text{ KN/m}^2$  , το οποίο περιλαμβάνει τα βάρη επιχρίσεων, λοιπών εξοπλισμών, μονώσεων κτλ.
- III. Τα κιγκλιδώματα προσθέτουν ένα κατακόρυφο φορτίο  $1 \text{ KN/m}$  , σε μορφή λωρίδας κατά μήκος των κύριων δοκών.
- IV. Πιθανές δυνάμεις προέκτασης, είτε καλωδίων είτε τμημάτων κατά την περίοδο ανέγερσης.

#### Κινητά φορτία

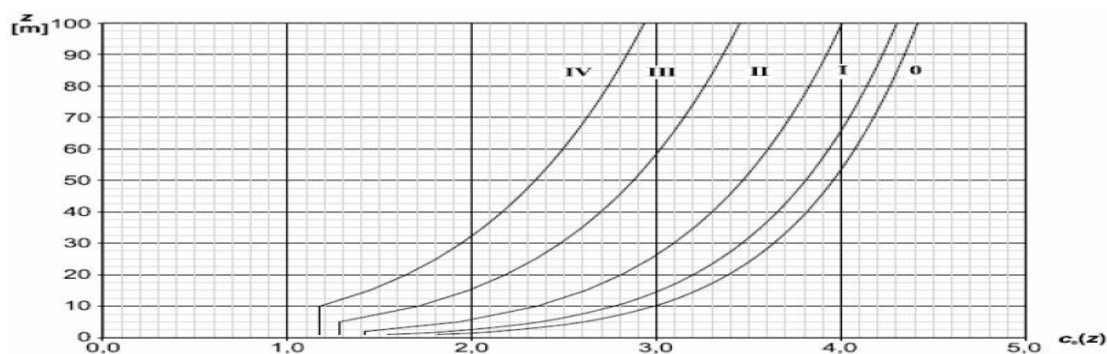
Στα κινητά φορτία κατατάσσονται οι καταπονήσεις , που προκύπτουν από τη χρήση της γέφυρας αλλά και από φορτία, τα οποία αν και αναμένεται να προκύψουν δεν γνωρίζουμε το χρόνο, τη φορά και το μέγεθός τους με σιγουριά. Αυτά τα φορτία έχουν αυξημένους συντελεστές ασφαλείας, διότι οι τιμές τους προκύπτουν από στατιστική παρατήρηση και υπάρχει αβεβαιότητα. Τα κινητά φορτία πρέπει να τοποθετούνται με τέτοια φορά και παράλληλα με διαφορετικά ενδεχόμενα

ταυτόχρονου συνδυασμού, ώστε να προκύπτουν τα πιθανότερα δυσμενή αποτελέσματα καταπόνησης. Αυτά είναι:

- I. Ένα ομοιόμορφο διανεμημένο φορτίο ανθρωποσυνοστισμού ίσο με  $5,0 \text{ KN/m}^2$ .
- II. Οριζόντιο φορτίο ίσο με το 10% του διανεμημένου φορτίου, δηλαδή  $0,5 \text{ KN/m}^2$ .

### Δράσεις Ανέμου

Ο Άνεμος παίζει σημαντικό ρόλο στις κατασκευές και πολλές φορές τείνει να γίνει το σημαντικότερο μέγεθος καταπόνησης. Η τιμή της έντασης του διαφέρει ανάλογα με τη γεωγραφική θέση, τη φυσική θέση, την τοπογραφία, τις διαστάσεις της κατασκευής, τη μέση ταχύτητα ανέμου, το σχήμα της κατασκευής, την κλίση της προσπίπτουσας επιφάνειας και τις διεύθυνσης του ανέμου. Αν και η δύναμη του ανέμου είναι χρονικά μεταβαλλόμενη και μπορεί να προκαλέσει και δυναμική καταπόνηση, τα φορτία ανέμου θεωρούνται στατικά.



Εικόνα 3.2. Συντελεστής έκθεσης  $C_e$  συναρτήσεως του ύψους  $Z$  πάνω από το έδαφος, για διάφορες κατηγορίες εδάφους.

### Πίεση ταχύτητας Αιχμής

Η εξωτερική πίεση, η οποία δρα στις επιφάνειες μιας κατασκευής δίνεται από τον τύπο:

$$W_e = q_{ref} * C_e(z) * C_d * C_{f,i} \quad (2.1)$$

όπου:

$W_e$ , η εξωτερική πίεση

$q_{ref}$ , η πίεση αναφοράς που αντιστοιχεί στη μέση ταχύτητα αναφοράς του ανέμου.

$C_e(z)$ , ο συντελεστής έκθεσης, ο οποίος λαμβάνει υπόψη την επιρροή της τραχύτητας του περιβάλλοντος εδάφους, της τοπογραφίας και του ύψους  $Z_e$  πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, επί της μέσης ταχύτητας ανέμου.

$C_d$ , ο δυναμικός συντελεστής

$C_{f,i}$ , ο συντελεστής δύναμης με το  $i$  να παίρνει τιμές  $x, y, z$  ανάλογα με τη διεύθυνση πνοής του ανέμου

- Δυναμικός συντελεστής  $C_d$

Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από το υλικό κατασκευής ( σκυρόδεμα, χάλυβας, μίξη ) και από το ύψος και το πλάτος του έργου. Εκφράζει το πόσο ευαίσθητη είναι η κατασκευή σε δυναμικές διεγέρσεις και οι τιμές του μεταβάλλονται ανάλογα με το ύψος του καταστρώματος της γέφυρας από το έδαφος ( $Z$ ) και το άνοιγμα ( $l$ ).

- Πίεση αναφοράς  $q_{ref}$

Δίνεται από τον τύπο:

$$q_{ref} = 0.5 * \rho * v_b^2 \quad (N/m^2) \quad (2.2)$$

όπου

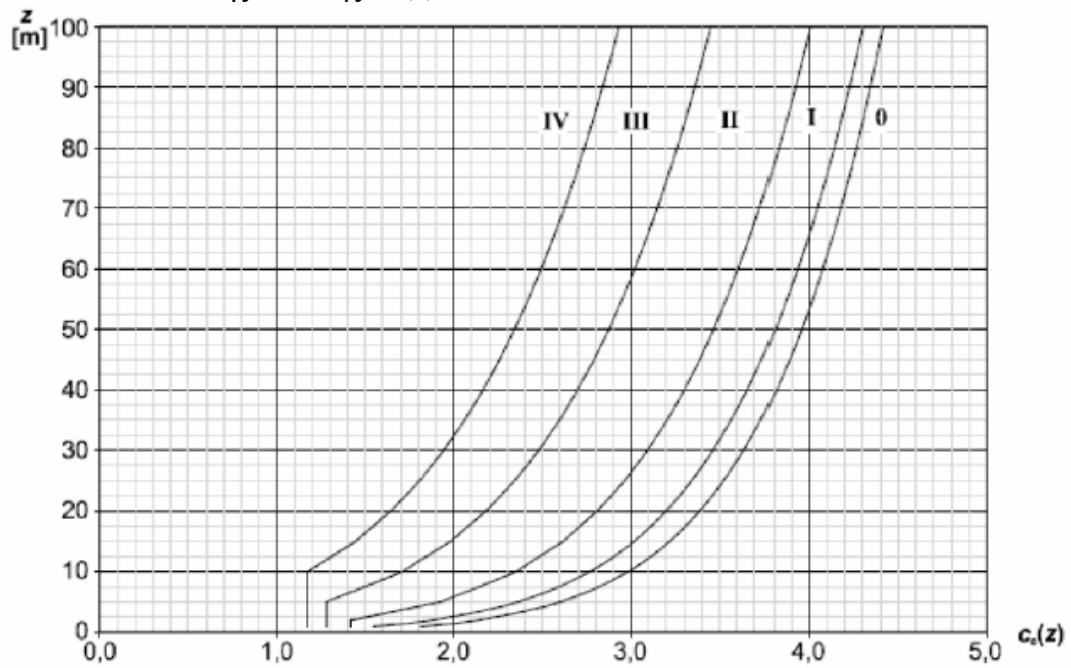
$\rho$ , η πυκνότητα του αέρα, ίση με  $1,25 \text{ kg/m}^3$

$v_b$ , η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου (m/s), η οποία δίνεται στον πίνακα που ακολουθεί

	Περιοχή	$v_b$ [m/sec]
Αφόρτιστη γέφυρα	Νησιά και παράκτιες περιοχές σε απόσταση < 10 km από τη θάλασσα	33
	Περιοχές σε απόσταση > 10 km από τη θάλασσα	27
Φορτισμένη γέφυρα	Οδική	23
	Σιδηροδρομική	25

Εικόνα 3.3. Βασική ταχύτητα ανέμου  $V_b$

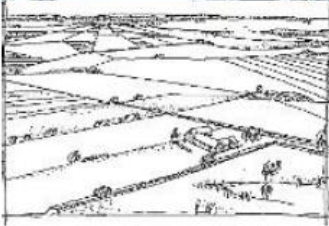


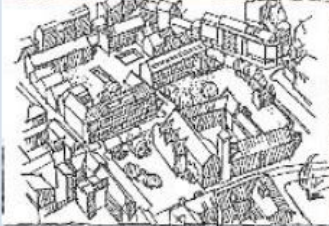
- Συντελεστής έκθεσης  $C_e(z)$



Σχήμα 3.4. Συντελεστής έκθεσης  $C_e$  συναρτήσει του ύψους  $Z$  πάνω από το έδαφος, για διάφορες κατηγορίες εδάφους.

Οι κατηγορίες εδάφους είναι :

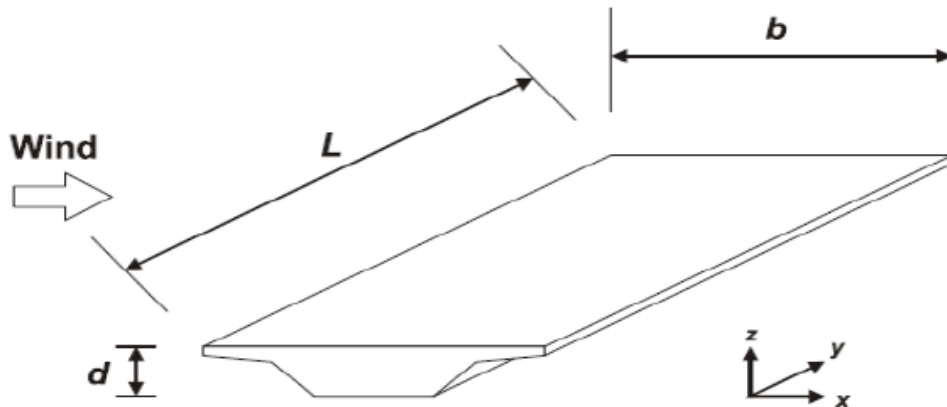


περιοχή εκτεθειμένη σε ανοιχτή θάλασσα	
I	 <p>Λίμνες με μήκος ανάπτυξης κυματισμού τουλάχιστον 5 km, καθώς και λείες επίπεδες επιφάνειες εδάφους χωρίς εμπόδια</p>
II	 <p>Αγροτικές εκτάσεις με περιμετρική περίφραξη, μικρές διάσπαρτες αγροτικές κατασκευές, κατοικίες ή δένδρα</p>
III	 <p>Προαστιακές ή βιομηχανικές περιοχές και μόνιμες δασικές εκτάσεις</p>
IV	 <p>Αστικές περιοχές, όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται από κτίρια, των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15 m</p>

Εικόνα 3.5 Κατηγορίες εδάφους

- Συντελεστές δύναμης σε γέφυρες  $C_f$   
Οι δράσεις του ανέμου επί των γεφυρών θεωρούνται κατά τις 3 διευθύνσεις x, y, z όπως φαίνεται στο σχήμα:





Εικόνα 3.6. Διευθύνσεις των δράσεων ανέμου σε γέφυρες

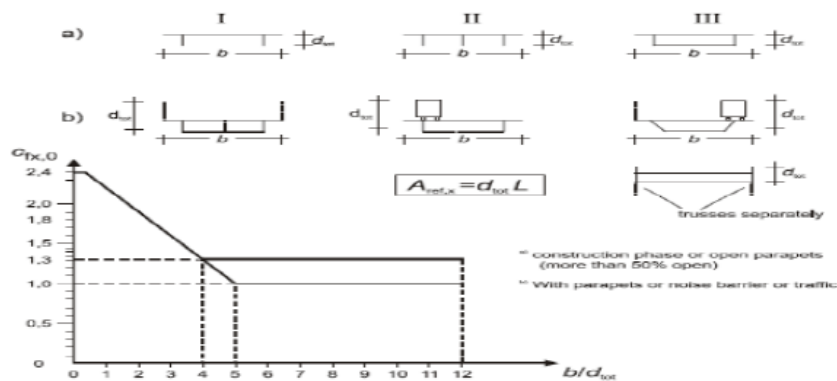
• Συντελεστής δύναμης ( $C_{f,x}$ ) κατά τη διεύθυνση x  
 Ο έλεγχος της γέφυρας θα μπορούσε να γίνει με φορτίο  $6 \text{ KN/m}^2$ , το οποίο θα φόρτιζε κάθετα την προσπίπτουσα θεωρούμενη επιφάνεια. Ωστόσο, έτσι θα φορτίζονταν επιφάνειες, οι οποίες προκαλούν απομείωση της έντασης της ανεμοπίεσης. Ο συντελεστής δύναμης  $C_{f,x}$  ισούται με :

$$C_{f,x} = C_{f,x,0} * \Psi_{\lambda,x}$$

όπου

$C_{f,x,0}$ , ο συντελεστής δύναμης για  $\lambda = l/d = \infty$  και δίνεται στο επόμενο σχήμα για διαφόρους τύπους γεφυρών

$\Psi_{\lambda,x}$ , μειωτικός συντελεστής λυγηρότητας, ο οποίος θα ληφθεί ίσος με 1.0



Εικόνα 3.7. Συντελεστής δύναμης ανέμου  $C_{f,x}$  ( $C_{f,x} = C_{f,x,0}$ )

Όταν η προσήνεμη επιφάνεια της γέφυρας είναι κεκλιμένη τότε ο συντελεστής  $C_{f,x,0}$  μπορεί να μειώνεται κατά 0.5% για κάθε μια μοίρα κλίσης, με μέγιστη συνολική μείωση 30% .

- Συντελεστής δύναμης ( $C_{f,y}$ ) κατά τη διεύθυνση  $y$   
Οι δυνάμεις κατά τη διεύθυνση  $y$ , δηλαδή το διαμήκη άξονα του καταστρώματος μπορούν να λαμβάνονται ίσες με :

25% των δυνάμεων ανέμου κατά τη διεύθυνση  $x$  για ολόσωμες γέφυρες

50% των δυνάμεων ανέμου κατά τη διεύθυνση  $x$  για δικτυωτές γέφυρες

- Συντελεστής δύναμης ( $C_{f,z}$ ) κατά τη διεύθυνση  $z$   
Οι δυνάμεις κατά τη διεύθυνση  $z$ , δηλαδή κατά τον κατακόρυφο άξονα, λαμβάνονται με εκκεντρότητα  $e = b/4$  ως προς το κέντρο βάρους του εγκάρσιου άξονα της προσήνεμης επιφάνειας.

- Επιφάνεια αναφοράς  $A_{ref,i}$   
Είναι η επιφάνεια, στην οποία προσπίπτει ο άνεμος και προκαλεί ένταση στην κατασκευή. Υπάρχουν 3 επιφάνειες διεπαφής, μια για κάθε διεύθυνση. Κατά την κύρια διεύθυνση του ανέμου ( $x$ ), η επιφάνεια αναφοράς  $A_{ref,x}$  λαμβάνεται :

I. Για κατάστρωμα με ολόσωμες δοκούς :  
Η αντίστοιχη επιφάνεια της όψης της πρώτης κύριας δοκού καθώς και όλων των τμημάτων των άλλων δοκών ή των τμημάτων του καταστρώματος, που εξέχουν πάνω ή κάτω από αυτή.

II. Για κατάστρωμα με δικτυωτές δοκούς :

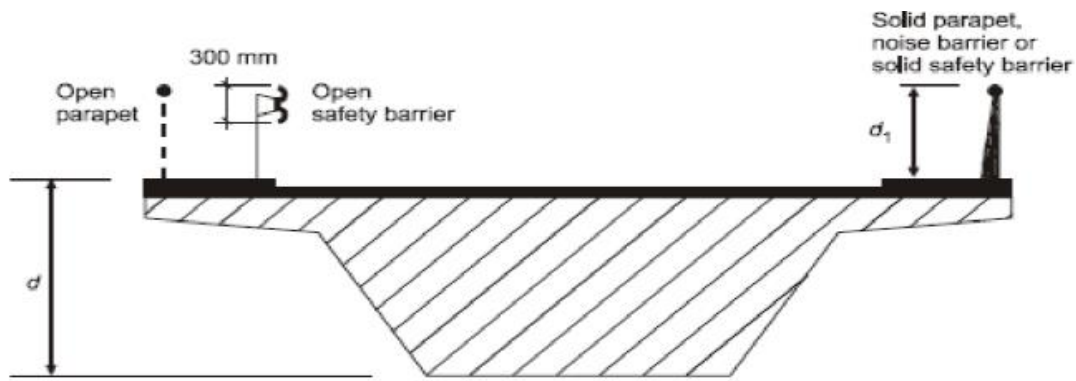
- Η επιφάνεια της όψης του οδοστρώματος ή/και των πεζοδρομίων
- Οι προβολές σε κατακόρυφο επίπεδο όλων των συμπαγών επιφανειών των τμημάτων του δικτύωματος που βρίσκονται πάνω ή κάτω από την όψη της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Σημαντικός είναι ο συνυπολογισμός της συμβολής των κιγκλιδωμάτων και των στηθαίων ασφαλείας είτε αυτά είναι προσήνεμα είτε υπήνεμα, καθώς προσαυξάνουν το συνολικό ελεύθερο ύψος  $dtot$ , όπως προσδιορίζεται παρακάτω :

- 300 mm για κάθε ανοικτό κιγκλιδωμα και στηθαίο ασφαλείας
- το άθροισμα των υψών του κιγκλιδώματος και του στηθαίου ασφαλείας, αν αποτελούνται από συνεχείς επιφάνειες

Συστήματα συγκράτησης	Σε μία πλευρά	Σε δύο πλευρές
Ανοικτό παραπέτο ή ανοικτό στηθαίο	$d + 0,3m$	$d + 0,6m$
Κλειστό παραπέτο ή κλειστό στηθαίο	$d + d_1$	$d + 2d_1$
Ανοικτό παραπέτο και ανοικτό στηθαίο	$d + 0,6m$	$d + 1,2m$

Πίνακας 2.3. Επιρροή των παραπέτων και των στηθαίων στο ελεύθερο ύψος



Εικόνα 3.8. Προσδιορισμός του ύψους της επιφάνειας αναφοράς  $d_{tot}$

Στην περίπτωση μας έχουμε έδαφος κατηγορίας IV .

Συνεπώς  $C_e(z) = 1.2$  και  $C_d = 0.94$  Για  $d/b \approx 1$  ,  $C_{F_x,0} = 2.30$

Κάνουμε απομείωση του  $C_{F_x,0}$  για 45 μοίρες κλίση ( όπου χρειάζεται ):

$$45 * 0,5\% = 22,5\% < 30\%$$

$$C_{F_y,0} = 0,50 * C_{F_x,0} = 0,89 \text{ ( για δικτυωτή γέφυρα )}$$

$$C_{F_z,0} = 0.70 \text{ , } e = b/4 = 0.75 \text{ m. } q_{ref} = 0.5 * \rho * v^2 b = 0.5 * 1.25 * 332 = 0.681 \text{ KN/m}^2$$

Επομένως η πίεση αναφοράς σε  $\text{KN/m}^2$  ανά διεύθυνση είναι :

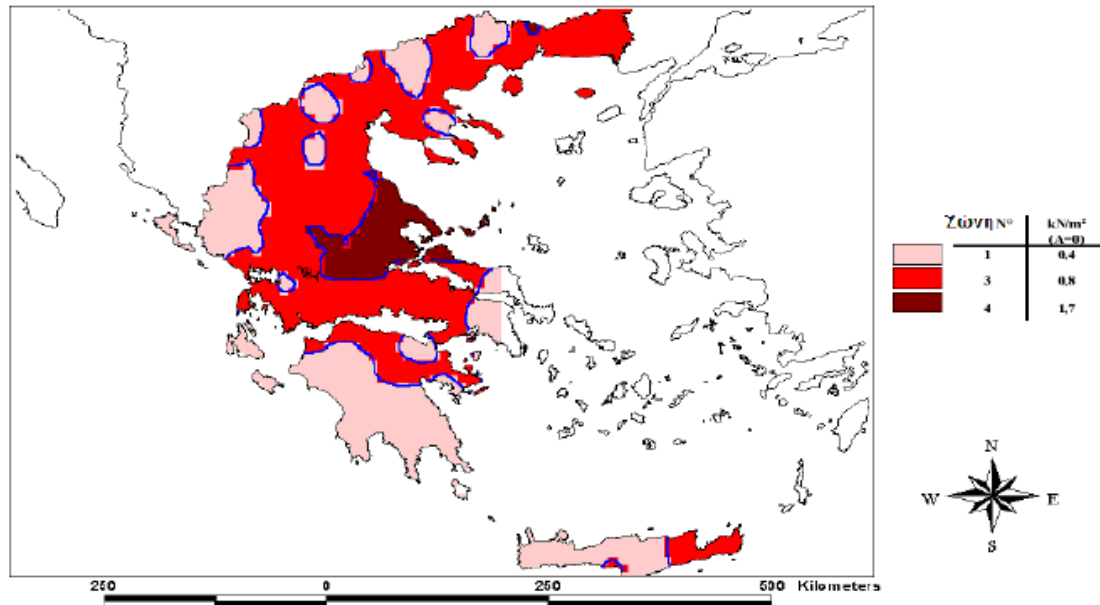
$$\text{Κατά } x : W_{e,x} = q_{ref} * C_e(z) * C_d * C_{f,x} = 0.681 * 1.2 * 0.94 * 0.45 = 1.367$$

$$\text{Κατά } y \text{ και δικτυωτή γέφυρα : } W_{e,y} = q_{ref} * C_e(z) * C_d * C_{f,y} = 0.681 * 1.2 * 0.94 * 0.89 = 0.684$$

$$\text{Κατά } z : W_{e,z} = q_{ref} * C_e(z) * C_d * C_{f,z} = 0.681 * 1.2 * 0.94 * 0.70 = 0.538$$

### Φορτία Χιονιού

Τα φορτία χιονιού αντιμετωπίζονται παραδοσιακά ορίζοντας μια απλή τιμή βάρους χιονιού ανάλογα με το ύψος χιονιού στη συγκεκριμένη περιοχή. Τα φορτία χιονιού υπάγονται στα μεταβλητά φορτία αν και σε πολύ ακραίες περιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν τυχηματικά. Υπολογίζονται για περίοδο επαναφοράς του έργου 50 έτη. Στην Ελλάδα υπάρχουν 3 ζώνες διαφοροποίησης των περιοχών, στην κάθε μια εκ των οποίων αντιστοιχεί και διαφορετικό φορτίο χιονιού.



Εικόνα 3.9 Ζώνες Χιονιού

Ζώνες	Νομοί	Φορτίο Χιονιού $S_{k,0}$ (KN/m <sup>2</sup> )
I	Αρκαδίας, Ηλείας, Λακωνίας, Μεσσηνίας και όλα τα νησιά πλην Σποράδων και Εύβοιας	0,4
II	Μαγνησίας, Φθιώτιδας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Λάρισας, Σποράδες και Εύβοια	1,7
III	Υπόλοιπη χώρα	0,8

\*\*Η Αττική υπάγεται στην Ζώνη III με  $S_{k,0} = 0,8 \text{ KN/m}^2$  .

Η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού(  $S_k$  ) επί του εδάφους σε  $\text{KN/m}^2$  δίνεται συναρτήσει της ζώνης και του αντίστοιχου υψομέτρου (A) από τον τύπο :

$$S_k = S_{k,0} * \left[ 1 + \left( \frac{A}{917} \right)^2 \right]$$

όπου στη δική μας περίπτωση δίνει για :  $A = 40 \text{ m}$  δίνει  $S_k = 0,81 \text{ KN/m}^2$  . Το τελικό φορτίο χιονιού που θα ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς δίνεται από τον τύπο :

$$S = \mu_i * C_e * C_t * S_k$$

$\mu_i$  : ο συντελεστής μορφής χιονιού, ο οποίος για μηδενική κλίση καταστρώματος λαμβάνεται ίσος με 0.8

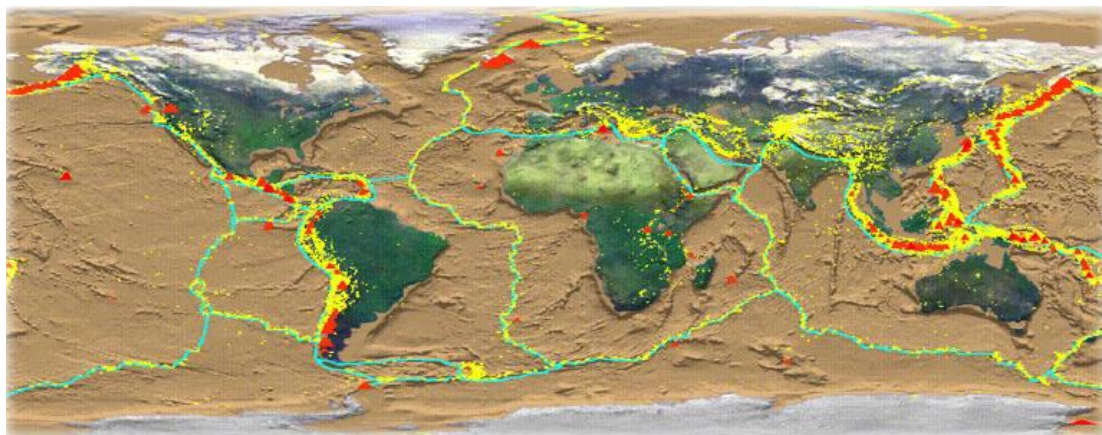
$C_e$  : ο συντελεστής έκθεσης, ο οποίος για κανονικές συνθήκες λαμβάνεται ίσος με 1.0 , εκτός αν το έργο εκτίθεται σε ισχυρούς ανέμους  $C_e = 0.8$  ή αν προστατεύεται ( από κτίρια ή δέντρα )  $C_e = 1.2$  . Εδώ λαμβάνεται 1.0 .

$C_t$  : ο θερμικός συντελεστής ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 1.0

Συνεπώς το τελικό φορτίο χιονιού είναι  $S = 0.8 * 1.0 * 1.0 * 0.81 = 0.70 \text{ KN/m}^2$  .

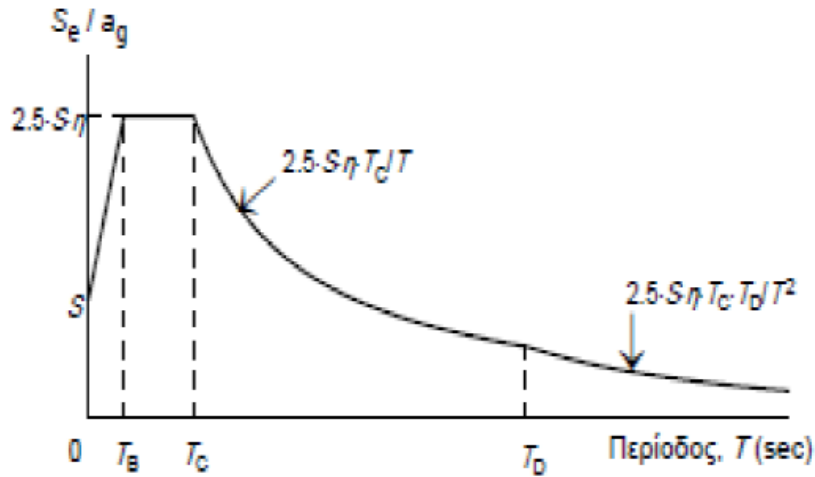
## Σεισμικά Φορτία

Κατά τη διατάραξη του φλοιού της Γής από τη μετακίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών εκλύεται ενέργεια, η οποία υπό τη μορφή ελαστικών κυμάτων μεταφέρεται στην επιφάνειά της και γίνεται αντιληπτή από τους ανθρώπους. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται σεισμός. Η Ελλάδα βρίσκεται πάνω από την Αιγαιακή πλάκα ενώ οι χαρακτηριστικές μετακινήσεις της περιοχής είναι η δυτική μετακίνηση της πλάκας της Ανατολίας κατά 25 mm ανά έτος και η νοτιοδυτική μετακίνηση της Αιγαιακής πλάκας στην περιοχή της Ελληνικής τάφρου κατά 50 mm ανά έτος.



Εικόνα 3.10. Χάρτης της Γης όπου απεικονίζονται τα όρια των τεκτονικών πλακών (γαλάζιες γραμμές), η κατανομή των πρόσφατων σεισμών (κίτρινα σημεία) και των ενεργών ηφαιστείων (κόκκινα σημεία). Εικόνα 2.1. Χάρτης της Γης όπου απεικονίζονται τα όρια των τεκτονικών πλακών (γαλάζιες γραμμές), η κατανομή των πρόσφατων σεισμών (κίτρινα σημεία) και των ενεργών ηφαιστείων (κόκκινα σημεία).

Η σεισμική φόρτιση έχει σημαντικές διαφορές σε σχέση με τις καθημερινές κατακόρυφες φορτίσεις επί των κατασκευών και για αυτό ο σωστός υπολογισμός της είναι καθοριστικός. Κατά τη διάρκεια του σεισμού αναπτύσσονται δύο οριζόντιες και μια κατακόρυφη επιτάχυνση, οι οποίες προκαλούν αδρανειακές δυνάμεις στις κατασκευές, με τις οριζόντιες να είναι συνήθως οι πιο κρίσιμες. Οι τρεις αυτές συνιστώσες θεωρούνται στατιστικά ανεξάρτητες. Ο προσδιορισμός των τιμών των σεισμικών διεγέρσεων καθορίζεται με τη βοήθεια των φασμάτων απόκρισης ενός μονοβάθμιου ταλαντωτή, σε όρους επιτάχυνσης.



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

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

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

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

όπου:

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

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

Εικόνα 3.11. Ελαστικό φάσμα

όπου:

$S_e$ , η ελαστική φασματική επιτάχυνση

$a_{gR}$ , σεισμική επιτάχυνση εδάφους

$a_g$ , επιτάχυνση που λαμβάνεται στους υπολογισμούς

$S$ , συντελεστής εδάφους

$\gamma$ , συντελεστής σπουδαιότητας

Κατηγορία Εδάφους	$T_B$ (sec)	$T_C$ (sec)	$T_D$ (sec)	$S$
A	0.15	0.40	2.50	1.00
B	0.15	0.50	2.50	1.20
C	0.20	0.60	2.50	1.15
D	0.20	0.80	2.50	1.35
E	0.15	0.50	2.50	1.40

### Κατακόρυφη Συνιστώσα

Ισχύει ό,τι και για τις οριζόντιες συνιστώσες με τις διαφορές :

- Η επιτάχυνση μειώνεται κατά  $a_{gR,ver} = 0.70 \cdot a_{gR,hor}$
- Τίθεται  $S = 1.0$
- Λαμβάνεται  $q \leq 1.5$  για όλα τα υλικά και στατικά συστήματα, εκτός αν υπάρχει κατάλληλη

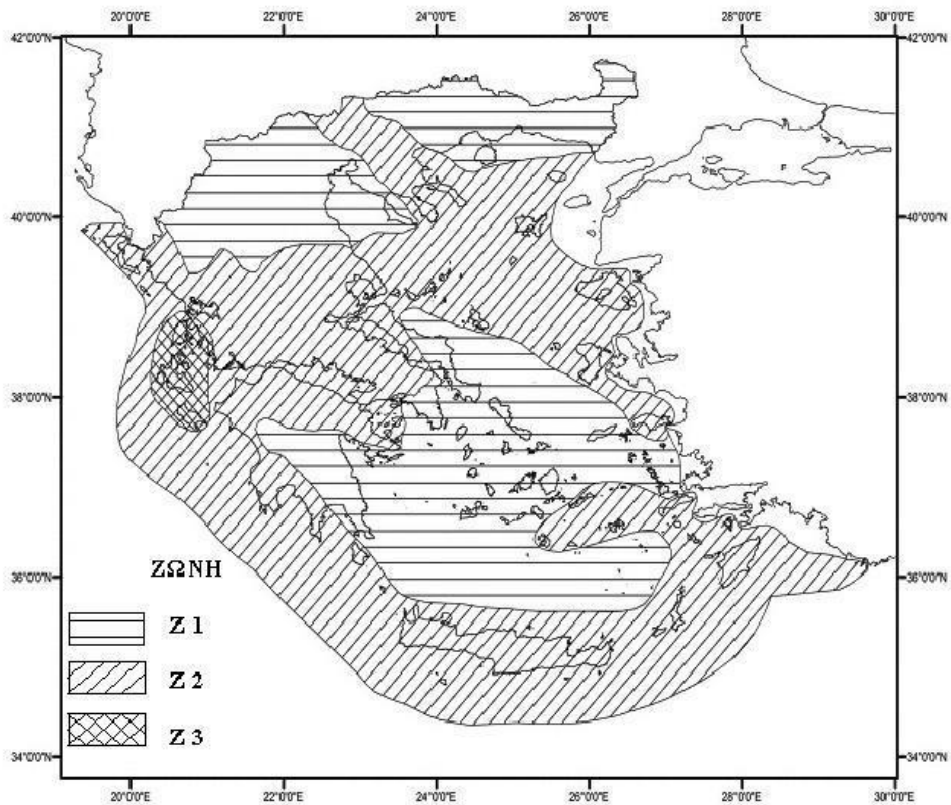
δικαιολόγηση μέσω ανάλυσης για τιμές  $q > 1.5$  .

Φάσμα Σχεδιασμού για ανελαστική συμπεριφορά (  $S_d$  , φασματική επιτάχυνση σχεδιασμού).

$$\begin{aligned} S_d(T) &= a_g \cdot S \cdot \left[ \frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \cdot \left( \frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] && \text{για } 0 \leq T \leq T_B \\ S_d(T) &= a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} && \text{για } T_B \leq T \leq T_C \\ S_d(T) &= a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \frac{T_C}{T} \geq \beta \cdot a_g && \text{για } T_C \leq T \leq T_D \\ S_d(T) &= a_g \cdot S \cdot \frac{2.5}{q} \cdot \frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \geq \beta \cdot a_g && \text{για } T_D \leq T \leq 4 \text{ sec} \end{aligned}$$

Σχήμα 2.9. Επιταχύνσεις σχεδιασμού

Όπου το  $\beta$  είναι ίσο με 0.2 σύμφωνα με το εθνικό προσάρτημα.



Σχήμα 2.10. Ζώνες Σεισμικής Επικινδυνότητας Ελλαδικού Χώρου

Ζώνες	Επιτάχυνση εδάφους $a_g/g$
Z1	0.16
Z2	0.24
Z3	0.36

Πίνακας 2.9. Επιταχύνσεις σεισμικών ζωνών

Κατηγορία σπουδαιότητας	$\gamma_i$
Σ1 Κτίρια μικρής σπουδαιότητας ως προς την ασφάλεια του κοινού, όπως αγροτικά οικήματα και αγροτικές αποθήκες, υπόστεγα, στάβλοι, βουστάσια, χοιροστάσια, ορνιθοτροφεία, κλπ.	0.80
Σ2 Συνήθη κτίρια, όπως κατοικίες και γραφεία, βιομηχανικά - βιοτεχνικά κτίρια, ξενοδοχεία (τα οποία δεν περιλαμβάνουν χώρους συνεδρίων), ξενώνες, οικότροφεία, χώροι εκθέσεων, χώροι εστίασεως και ψυχαγωγίας (ζαχαροπλαστεία, καφενεία, μπούλινγκ, μπλιάρδου, ηλεκτρονικών παιχνιδιών, εστιατόρια κλπ) τσάπερες ιατροεία	1.00



αγορές, υπεραγορές, εμπορικά κέντρα, καταστήματα, φαρμακεία, κουρεία, κομμωτήρια, ινστιτούτα γυμναστικής, βιβλιοθήκες, εργοστάσια, συνεργεία συντήρησης και επισκευής αυτοκινήτων, βαφεία, ξυλουργεία, εργαστήρια ερευνών, παρασκευαστήρια τροφίμων, καθαριστήρια, κέντρα μηχανογράφησης, αποθήκες, κτίρια στάθμευσης αυτοκινήτων, πρατήρια υγρών καυσίμων, ανεμογεννήτριες, γραφεία δημοσίων υπηρεσιών και τοπικής αυτοδιοίκησης που δεν εμπίπτουν στην κατηγορία Σ4, κλπ

<b>Σ3</b>	<b>Κτίρια τα οποία στεγάζουν εγκαταστάσεις πολύ μεγάλης οικονομικής σημασίας, καθώς και κτίρια δημοσίων συναθροίσεων και γενικώς κτίρια στα οποία ευρίσκονται πολλοί άνθρωποι κατά μεγάλο μέρος του 24ώρου, όπως αίθουσες αεροδρομίων, χώροι συνεδρίων, κτίρια που στεγάζουν υπολογιστικά κέντρα, ειδικές βιομηχανίες, εκπαιδευτικά κτίρια, αίθουσες διδασκαλίας, φροντιστήρια, νηπιαγωγεία, χώροι συναυλιών, αίθουσες δικαστηρίων, ναοί, χώροι αθλητικών συγκεντρώσεων, θέατρα, κινηματογράφοι, κέντρα διασκέδασης, αίθουσες αναμονής επιβατών, ψυχιατρεία, ιδρύματα ατόμων με ειδικές ανάγκες, ιδρύματα χρονίως πασχόντων, οίκοι ευγηρίας, βρεφοκομεία, βρεφικοί σταθμοί, παιδικοί σταθμοί, παιδότοποι, αναμορφωτήρια, φυλακές, εγκαταστάσεις καθαρισμού νερού και αποβλήτων, κλπ.</b>	<b>1.20</b>
<b>Σ4</b>	<b>Κτίρια των οποίων η λειτουργία, τόσο κατά την διάρκεια του σεισμού, όσο και μετά τους σεισμούς, είναι ζωτικής σημασίας, όπως κτίρια τηλεπικοινωνίας, παραγωγής ενέργειας, νοσοκομεία, κλινικές, αγροτικά ιατρεία, υγειονομικοί σταθμοί, κέντρα υγείας, διυλιστήρια, σταθμοί παραγωγής ενέργειας, πυροσβεστικοί και αστυνομικοί σταθμοί, κτίρια δημοσίων επιτελικών υπηρεσιών για την αντιμετώπιση έκτακτων αναγκών από σεισμό.</b> <b>Κτίρια που στεγάζουν έργα μοναδικής καλλιτεχνικής αξίας, όπως μουσεία, αποθήκες μουσείων, κλπ.</b>	<b>1.40</b>

Πίνακας 2.10. Συντελεστής σπουδαιότητας ανά κατηγορία έργου

Στις γέφυρες ο συντελεστής σπουδαιότητας παίρνει τις ακόλουθες τιμές :

- $\gamma_i = 0.85$  για γέφυρες δευτερεύουσας σημασίας ( π.χ. γέφυρες σε επαρχιακούς ή αγροτικούς δρόμους )
- $\gamma_i = 1.00$  για συνήθεις γέφυρες ( αυτοκινητοδρόμων, εθνικών οδών και σιδηροδρόμων )
- $\gamma_i = 1.30$  για σημαντικές μεγάλες γέφυρες, οι οποίες, μετά το σεισμό, πρέπει να εξασφαλίσουν τη διέλευση κυκλοφορίας και των οποίων η κατάρρευση θα συνοδευόταν από μεγάλο αριθμό θανατηφόρων ατυχημάτων.

Είδος κατασκευής		ζ%
Μεταλλική	Συγκολλητές συνδέσεις	2
	Κοχλιωτές συνδέσεις	4
Σκυρόδεμα	Άοπλο	3
	Οπλισμένο	5
	Προεντεταμένο	4
Τοιχοποιία	Οπλισμένη	6
	Διαζωματική	5
Ξύλινη	Κολλητή	4
	Κοχλιωτή	4
	Ηλωτή	5

Εικόνα 3..12. Τιμές απόσβεσης

Κατηγορία Εδάφους	
A	Βράχος με έως 5m ασθενέστερο επιφανειακό υλικό
B	Πολύ πυκνή άμμος ή αμμοχάλικο, ή πολύ σκληρή άργιλος, δεκάδων m με αύξηση μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος
C	Πυκνή άμμος ή αμμοχάλικο, ή σκληρή άργιλος, αρκετών δεκάδων ή εκατοντάδων m
D	Χαλαρή έως μετρίως χαλαρή άμμος ή αμμοχάλικο ή μαλακή έως μετρίως σκληρή άργιλος
E	Επιφανειακό στρώμα C ή D πάχους 5 έως 20 m και υπόστρωμα με $V_s > 800$ m/s

Πίνακας 2.13. Διαφοροποίηση εδαφικών κατηγοριών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8

Όπου  $V_s$  η μέση ταχύτητα μετάδοσης των διατμητικών κυμάτων.

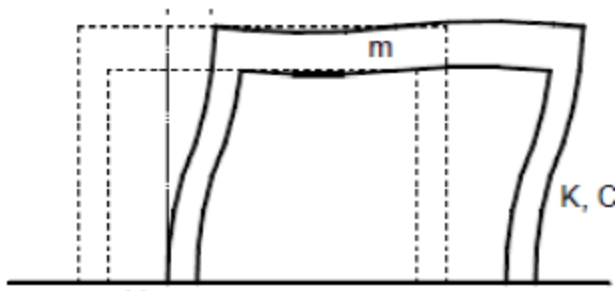
Η σεισμική δύναμη, προκαλούμενη από τις επιταχύνσεις του εδάφους δίνεται από την γνωστή σχέση :

$$F = m * a$$

Όπου,

$m$  , η μάζα των φορτίων που δρουν επί της κατασκευής την στιγμή επιβολής της σεισμικής δύναμης

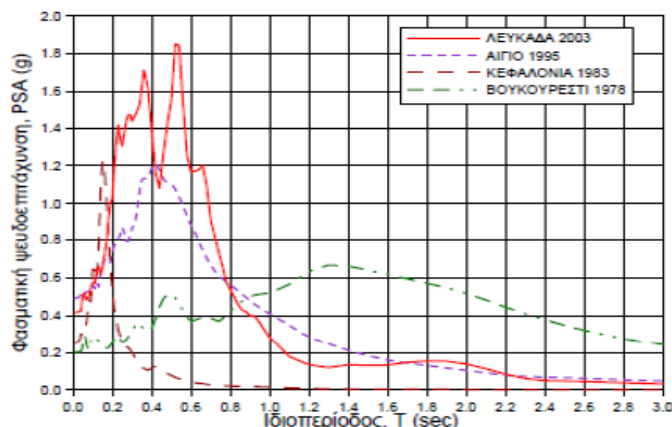
$a$  , η επιτάχυνση του εδάφους ( με συνιστώσες  $a_x$  ,  $a_y$  ,  $a_z$  )



Εικόνα 3.13. Εικόνα παραμόρφωσης κτιρίου με μάζα  $m$ , δυσκαμψία  $K$  και απόσβεση  $C$

Ο προσδιορισμός των μαζών γίνεται λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των μόνιμων φορτίων της γέφυρας με τις χαρακτηριστικές τους τιμές καθώς και τις οιονεί μόνιμες τιμές των μεταβλητών δράσεων με συντελεστή συνδυασμού  $\psi_{21}$ . Σε πεζογέφυρες επιτρέπεται να λαμβάνεται  $\psi_{21} = 0$ . Η συμπεριφορά των κατασκευών εξαρτάται, εκτός από τα γεωγραφικά, τοπογραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά του εδάφους, από την ιδιοπερίοδο τους ( $T$ ), η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$T = 2\pi * \sqrt{\left(\frac{m}{K}\right)} \quad (sec)$$



Εικόνα 3.14 Φάσμα απόκρισης, για απόσβεση  $\zeta=5\%$  , διαφόρων σεισμών.

Κατά την διάρκεια εφαρμογής της σεισμικής δύναμης, η κατασκευή μπορεί να ταλαντωθεί παίρνοντας διάφορα σχήματα (βλ. δυναμική ανάλυση μονοβάθμιων και πολυβάθμιων συστημάτων ), αυτά τα σχήματα ονομάζονται ιδιομορφές . Κάθε ιδιομορφή έχει τη δική της περίοδο καθώς και τη δική της δρώσαιομορφική μάζα. Στα πλαίσια της φασματικής ανάλυσης επιτρέπεται να λαμβάνονται στο σχεδιασμό οι ιδιομορφές, των οποίων το άθροισμα των δρωσών ιδιομορφικών μαζών αντιστοιχεί στο 90% της συνολικής μάζας της κατασκευής.

Για τη συνύπαρξη των σεισμικών δράσεων και κατά τις 3 διευθύνσεις, η σεισμική δύναμη  $E$  μπορεί να προσδιορίζεται από τις μέγιστες τιμές των ανεξάρτητων δράσεων  $E_x$  ,  $E_y$  ,  $E_z$  . Δηλαδή  $E = [ (E_x)^2 + (E_y)^2 + (E_z)^2 ]^{0.5}$  ή λαμβάνοντας την δυσμενέστερη τιμή από τους συνδυασμούς :

$$A E_x + 0.3 A E_y + 0.3 A E_z \quad 0.3 A E_x + A E_y + 0.3 A E_z \quad 0.3 A E_x + 0.3 A E_y + A E_z$$

### Ταλάντωση γεφυρών λόγω ανθρώπινων δραστηριοτήτων

Παρουσιάζεται το κριτήριο επιτρεπτής ταλάντωσης του δαπέδου λόγω βηματισμού

$$\frac{\alpha_p}{g} = \frac{P_o e^{-0.35f_n}}{\beta W}$$

και συγκρίνεται με το  $\alpha_o/g$  από τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.2.1 Συνήθεις επιβαλλόμενες συχνότητες  $f$  και δυναμικοί συντελεστές  $\alpha_i$

Αρμονική i	Βηματισμός ατόμου		Ομάδα αερόμπικ		Ομάδα χορού	
	f (Hz)	$\alpha_i$	f (Hz)	$\alpha_i$	f (Hz)	$\alpha_i$
1	1.6-2.2	0.5	2-2.75	1.5	1.5-3	0.5
2	3.2-4.4	0.2	4-5.5	0.6	-	-
3	4.8-6.6	0.1	6-8.25	0.1	-	-
4	6.4-8.8	0.05	-	-	-	-

Δυναμικός συντελεστής = μέγιστο ημιτονοειδούς δύναμης / βάρος ατόμου ή ατόμων

Πίνακας 1.4.1 Συνιστώμενες τιμές παραμέτρων ελέγχου και οριακών τιμών  $\alpha_n/g$

	Σταθερή δύναμη $P_0$	Λόγος απόσβεσης $\beta$	Οριακός λόγος $\alpha_n/g$
Χώροι γραφείων, κατοικιών, εκκλησιών	0.29 N	0.02-0.05*	0.5%
Εμπορικά κέντρα	0.29N	0.02	1.5%
Πεζογέφυρες σε εσωτερικούς χώρους	0.41 N	0.01	1.5%
Υπαίθριες πεζογέφυρες	0.41 N	0.01	5.0%
* 0.02 για δάπεδα με λίγα μη-δομικά στοιχεία (οροφές, χωρίσματα κλπ.) όπως σε ανοικτούς χώρους δουλειάς και εκκλησίες. 0.03 για δάπεδα με μη-δομικά στοιχεία και έπιπλα αλλά μερικά χωρίσματα (τυπικοί χώροι γραφείων). 0.05 για δάπεδα με πλήρη χωρίσματα μεταξύ ορόφων.			

### **3.1.3 Συνδυασμοί δράσεων**

Στους συνδυασμούς δράσεων προσπαθούμε να επιτύχουμε τους δυσμενέστερους συνδυασμούς των ανεξάρτητων φορτίσεων μέσα σε στατιστικά αποδεκτά όρια, ώστε να μην υπάρχει σπατάλη υλικού άνευ λόγου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μειωτικών συντελεστών, οι οποίοι εφαρμόζονται στα φορτία και σχετίζονται με την πιθανότητα ταυτόχρονης εμφάνισης των ανεξάρτητων φορτίσεων.

Προκειμένου να ελεγχθεί η επάρκεια των διατομών, οι συνδυασμοί δράσεων καλύπτουν όλες τις πιθανές καταστάσεις σχεδιασμού :

- Διάρκειας, οι οποίες αναφέρονται στις κανονικές συνθήκες χρήσης της κατασκευής.
- Παροδικές, οι οποίες αναφέρονται σε προσωρινές συνθήκες χρήσης του φορέα.
- Τυχηματικές, οι οποίες αναφέρονται σε εξαιρετικά σπάνιες και επίπονες συνθήκες για το έργο.
- Σεισμικές, οι οποίες αναφέρονται στη φόρτιση της κατασκευής από σεισμικό γεγονός.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες οριακών καταστάσεων, η οριακή κατάσταση αστοχίας (ΟΚΑ) και η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας (ΟΚΛ). Οριακές είναι οι καταστάσεις, πέραν των οποίων ο φορέας δεν ικανοποιεί τα κριτήρια σχεδιασμού του. Στην οριακή κατάσταση αστοχίας, η κατασκευή υπόκειται σε ελέγχους, οι οποίοι αφορούν τη μη κατάρρευση αυτής ή τμήμα αυτής και σχετίζονται με την ασφάλεια του φορέα αλλά και των ανθρώπων. Οι έλεγχοι, που γίνονται αφορούν οριακές αντοχές μελών και διατομών, απώλεια ευστάθειας, ανατροπή, κόπωση, θραύση, λυγισμός κλπ. Η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας σχετίζεται με τη δυνατότητα του φορέα να είναι λειτουργικός, δηλαδή να μην υπάρχουν έντονες ταλαντώσεις, μεγάλα βέλη, ρηγματώσεις κλπ. Οι έλεγχοι που γίνονται περιορίζουν παραμορφώσεις, οι οποίες επηρεάζουν την εμφάνιση και τη λειτουργία του έργου καθώς και την άνεση των χρηστών, αποσβένουν ταλαντώσεις, οι οποίες προκαλούν ενόχληση στους χρήστες και μηδενίζουν πιθανές βλάβες, οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά την εμφάνιση, την ανθεκτικότητα και τη λειτουργία της κατασκευής.

### 2.3.1 Συνδυασμοί στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας

I. Για καταστάσεις διάρκειας ή παροδικές

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{gj} G_{kj} + \gamma_p P_k + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Qi} \psi_{oi} Q_k$$

II. Για τυχηματικές καταστάσεις

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{GAj} G_{kj} + \gamma_{pA} P_k + A_d + \psi_{11} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Qi} \psi_{oi} Q_k$$

III. Για καταστάσεις σεισμού

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \gamma_I A_{Ed} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2i} Q_{ki}$$

Όπου

(+), δηλώνει την επαλληλία των φορτίσεων, δηλαδή την ταυτόχρονη συνύπαρξη και δεν σχετίζεται με αλγεβρική ή γεωμετρική άθροιση.

$G_{kj}$ , είναι η χαρακτηριστική τιμή των μόνιμων φορτίων

$P_k$ , είναι η χαρακτηριστική τιμή της δύναμης προέντασης

$Q_{ki}$ , είναι η χαρακτηριστική τιμή της μεταβλητής δράσης  $i$

$A_d$ , είναι η τιμή σχεδιασμού της τυχηματικής δράσης

$A_{Ed}$ , είναι η τιμή σχεδιασμού της σεισμικής δράσης

$\gamma_{Gj}$ ,  $\gamma_{GAj}$ , είναι οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας για τη μόνιμη δράση  $j$

$\gamma_p$ ,  $\gamma_{pA}$ , είναι οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας για την προένταση

$\gamma_{Qi}$ , είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για τη μεταβλητή δράση  $i$

45

$\gamma_I$ , είναι ο συντελεστής σπουδαιότητας κατά EC8  $\psi_{oi}$ ,  $\psi_{1i}$ ,  $\psi_{2i}$ , είναι οι συντελεστές συνδυασμού (ή συμμετοχής) των μεταβλητών δράσεων

Συνδυασμοί στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας

I. Χαρακτηριστικός (σπάνιος) συνδυασμός

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{oi} Q_{ki}$$

II. Συχνός συνδυασμός

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \psi_{11} Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{2i} Q_{ki}$$

III. Ημιμόνιμος συνδυασμός

$$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P_k + \sum_{i \geq 1} \psi_{2i} Q_{ki}$$

Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας γ για πεζογέφυρες			
Δράση	Συμβολισμός	Κατάσταση	
		Μόνιμη/Παροδική	Τυχηματική
Μόνιμες : ίδιο βάρος φερόντων και μη στοιχείων, μόνιμες δράσεις λόγω εδάφους κλπ.			
Δυσμενής	$\gamma_{Gsup}$	1.35	1.00
Ευμενής	$\gamma_{Ginf}$	1.00	1.00
Προένταση	$\gamma_P$	1.00	1.00
Υπαχώρηση	$\gamma_{Gset}$	1.00	-
Δράσεις κυκλοφορίας			
Δυσμενείς	$\gamma_G$	1.35	1.00
Ευμενείς		0	0
Άλλες μεταβλητές δράσεις			
Δυσμενείς	$\gamma_Q$	1.35	1.00
Ευμενείς		0	0
Τυχηματικές	$\gamma_A$	-	1.00

Πίνακας 2.17. Συντελεστές συνδυασμού

Συντελεστές συνδυασμού $\psi$ για πεζογέφυρες (ΟΚΑ)				
Δράση	Σύμβολο	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Φορτία	$gr1$	0.4	0.4	0
κυκλοφορίας	$Q_{fwk}$	0	0	0
	$gr2$	0	0	0

Δράσεις ανέμου	$F_w$	0.3	0.2	0
Θερμικές δράσεις	$T_k$	0.6	0.6	0.5
Φορτία χιονιού	$Q_{sn,k}$ (κατά την εκτέλεση)	0.8	-	0
Φορτία κατασκευής	$Q_c$	1.0	-	1.0

Διευκρινίζονται τα σύμβολα :

$GIB$  , μόνιμα φορτία ίδιου βάρους διατομών  $G_{επικ}$  , μόνιμα φορτία λόγω επικάλυψης

$G_{κιγκλ}$  , μόνιμα φορτία κιγκλιδωμάτων

$P$  , δυνάμεις προέντασης

$q_{fk}$  , ομοιόμορφα διανεμημένο κατακόρυφο φορτίο  $Q_{fwk}$  , συγκεντρωμένο κατακόρυφο φορτίο

$Q_{fk}$  , διανεμημένο οριζόντιο φορτίο  $F_w$  , δυνάμεις ανέμου

$F_s$  , δυνάμεις χιονιού

$T$  , δυνάμεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών

$F_{προσκρ}$  , δυνάμεις προσκρούσεως οχήματος σε βάθρο

$A_{Ed}$  , σεισμικές δυνάμεις

Προκύπτει για καταστάσεις αστοχίας

I. Χαρακτηριστικός ( σπάνιος ) συνδυασμός

- $G + P + (q_{fk} + Q_{fwk} + Q_{f1k}) + 0,3 * F_w + 0,8 * F_s + 0,6 * T$

- $G + P + 0,4 * (q_{fk} + Q_{f1k}) + F_w + 0,8 * F_s + 0,6 * T$

- $G + P + 0,4 * (q_{fk} + Q_{f1k}) + 0,3 * F_w + F_s + 0,6 * T$

- $G + P + 0,4 * (q_{fk} + Q_{f1k}) + 0,3 * F_w + 0,8 * F_s + T$

II. Συχνός συνδυασμός

- $G + P + 0,4 * (q_{fk} + Q_{f1k}) + 0,5 * T$

- $G + P + 0,2 * F_w + 0,5 * T$

- $G + P + 0,6 * T$

III. Ημιμόνιμος συνδυασμός

- $G + P + 0,5 * T$

I. Καταστάσεις Διάρκειας

- $1,35 * G + 1,00 * P + 1,50 * (q_{fk} + Q_{fwk} + Q_{f1k}) + 1,50 * 0,3 * F_w + 1,50 * 0,8 * F_s + 1,50 * 0,6 * T$

- $1,35 * G + 1,00 * P + 1,50 * 0,4 * (q_{fk} + Q_{f1k}) + 1,50 * F_w + 1,50 * 0,8 * F_s + 1,50 * 0,6 * T$

- $1,35 * G + 1,00 * P + 1,50 * 0,4 * (q_{fk} + Q_{f1k}) + 1,50 * 0,3 * F_w + 1,50 * F_s + 1,50 * 0,6 * T$

- $1,35 * G + 1,00 * P + 1,50 * 0,4 * (q_{fk} + Q_{f1k}) + 1,50 * 0,3 * F_w + 1,50 * 0,8 * F_s + 1,50 * T$

II. Σεισμικές Καταστάσεις

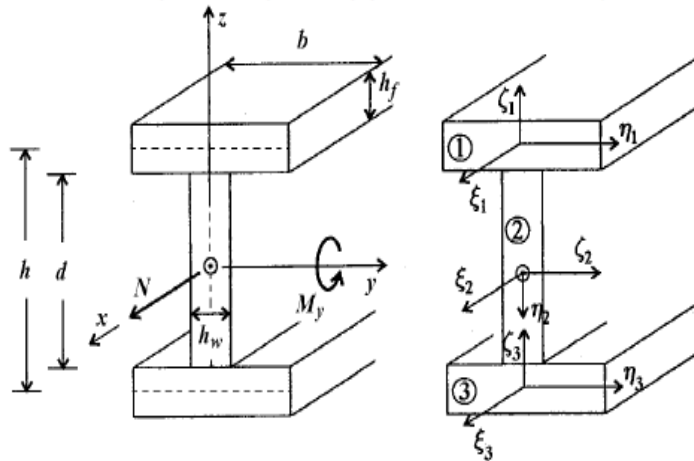
- $E_d = G + P + A_{Ed} + 0,5 * T$

### 3.2 Έλεγχος λεπτότοιγων διατομών από ινοπλισμένα πολυμερή σε κάμψη και θλίψη

Σύνθετες δοκοί παράγονται σε τυποποιημένα σχήματα λεπτότοιγων διατομών I, τετραγωνικών κοίλων διατομών, κυκλικών κοίλων διατομών, γωνιακών, διατομών Z, καθώς και κηβωτοειδών πολυκυφελωτών διατομών. Κάθε τοίχωμα είναι από συγκεκριμένη διαστρωμάτωση, οι ιδιότητες της οποίας μπορούν να υπολογιστούν όπως έχει εκθεθεί στις προηγούμενες παραγράφους.

#### 9.6.1 Διατομές από ειδικώς ορθότροπες συμμετρικές διαστρωματώσεις

Στις συμμετρικές διαστρωματώσεις δεν υπάρχει σύζευξη αξονικής και καμπτικής καταπόνησης. Επίσης, στις ειδικώς ορθότροπες διαστρωματώσεις δεν υπάρχουν οι όροι  $A_{16}$  και  $A_{26}$ . Θα συνεχίσουμε την ανάλυση θεωρώντας επίσης μηδενικούς τους όρους  $D_{16}$  και  $D_{26}$ . Η ανάλυση που ακολουθεί επικεντρώνεται σε μια διατομή διπλού ταυ και κατόπιν γενικεύεται σε άλλου τύπου διατομές.



##### 9.6.1.1 Το αξονικό πρόβλημα

Εστω σύνθετη δοκός διατομής I με πέλμα πλάτους  $b$  και κορμό ύψους  $d$  για την οποία ζητείται να υπολογιστεί η ισοδύναμη αξονική δυσκαμψία  $EA$ . Οι διαστρωματώσεις των 2 πέλματων θεωρούνται ίδιες. Καθώς η διατομή εφελκύεται από αξονική δύναμη  $N$ , όλες οι ίνες της διατομής εκτείνονται με ορθή παραμόρφωση  $\epsilon_x$  κοινή για όλη τη διατομή. Τούτο σημαίνει ότι και στις 3 διαστρωματώσεις (πέλματα και κορμός) αναπτύσσονται στο μέσο επίπεδο αξονικές δυνάμεις

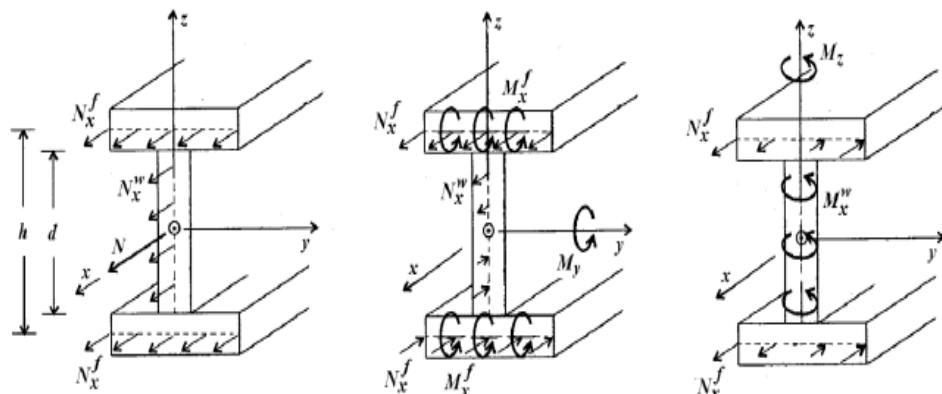
$$N_x^f = \frac{1}{a_{11}^f} \epsilon_x^o \quad N_x^w = \frac{1}{a_{11}^w} \epsilon_x^o$$

και συνεπώς η συνολική δύναμη θα είναι

$$N = 2N_x^f b + N_x^w d = \left( \frac{2b}{a_{11}^f} + \frac{d}{a_{11}^w} \right) \epsilon_x^o$$

Άρα η ισοδύναμη αξονική δυσκαμψία της διατομής θα είναι

$$\overline{EA} = \frac{2b}{a_{11}^f} + \frac{1}{a_{11}^w}$$





Όταν η διατομή κάμπτεται περί τον ισχυρό της άξονα  $y$  με μια ροπή  $\bar{M}_y$ , τα πέλματα αναπτύσσουν σταθερή κατά πλάτος εφελκυστική και θλιπτική αξονική δύναμη  $N_x^f$  και μια ροπή  $M_x^f$ , αντίστοιχα, ενώ ο κορμός αναπτύσσει μεταβλητή αξονική δύναμη  $N_x^w$  καθ' ύψος. Αυτές είναι

$$N_x^f = \frac{1}{a_{11}^f} \varepsilon_x^o \quad M_x^f = \frac{1}{d_{11}^f} k_x \quad N_x^w = \frac{1}{a_{11}^w} \varepsilon_x^o$$

Λαμβάνοντας τους μοχλοβραχίονες των δυνάμεων ως προς τα μέσα επίπεδα των διαστρωματώσεων έχουμε

$$\bar{M}_y = 2(N_x^f b \frac{h}{2}) + 2M_x^f b + 2(\frac{1}{2} N_x^w \frac{h}{2} (\frac{2}{3} \frac{h}{2}))$$

Αντικαθιστώντας τις  $N_x^f$ ,  $M_x^f$  και  $N_x^w$  στην παραπάνω σχέση θέτοντας  $\varepsilon_x^o = \frac{1}{2} h \kappa_y$  και  $k_x = \kappa_y$  έχουμε

$$\bar{M}_y = (\frac{bh^2}{2a_{11}^f} + \frac{2b}{d_{11}^f} + \frac{h^3}{12a_{11}^w}) \kappa_y$$

και η ισοδύναμη καμπτική δυσκαμψία περί τον άξονα  $y$  είναι

$$\bar{EI}_y = \frac{bh^2}{2a_{11}^f} + \frac{h^3}{12a_{11}^w} + \frac{2b}{d_{11}^f} \quad (9.34)$$

Ο τελευταίος όρος είναι συνήθως αμελητέος και μπορεί να παραληφθεί.

Όταν η διατομή κάμπτεται περί τον ασθενή της άξονα  $z$  με μια ροπή  $\bar{M}_z$ , τα πέλματα αναπτύσσουν μεταβλητή κατά πλάτος εφελκυστική και θλιπτική αξονική δύναμη  $N_x^w$ , ενώ ο κορμός αναπτύσσει μια ροπή  $M_x^w$  σταθερή καθ' ύψος. Αυτές είναι

$$N_x^f = \frac{1}{a_{11}^f} \varepsilon_x^o \quad M_x^w = \frac{1}{d_{11}^w} k_x$$

Λαμβάνοντας τους μοχλοβραχίονες των δυνάμεων ως προς τα μέσα επίπεδα των διαστρωματώσεων έχουμε

$$\bar{M}_z = 2(2\frac{1}{2} N_x^f \frac{b}{2} (\frac{2}{3} \frac{b}{2})) + M_x^w d$$

Αντικαθιστώντας τις  $N_x^f$  και  $M_x^w$  στην παραπάνω σχέση θέτοντας  $\varepsilon_x^o = \frac{1}{2} b \kappa_z$  και  $k_x = \kappa_z$  έχουμε

$$\bar{M}_z = (\frac{2b^3}{12a_{11}^f} + \frac{d}{d_{11}^w}) \kappa_z$$

και η ισοδύναμη καμπτική δυσκαμψία περί τον άξονα  $z$  είναι

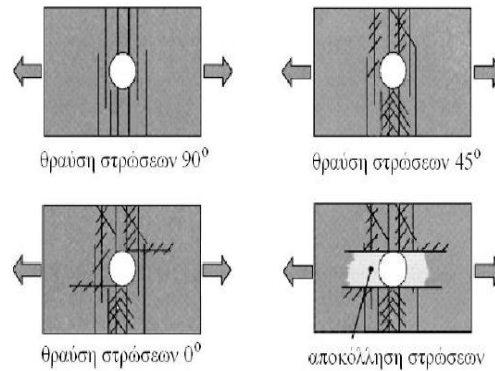
### 3.3 Συνδέσεις

#### Κοιλιωτές συνδέσεις

Η διάνοιξη οπών σε κάποιο τοίχωμα ενός σύνθετου μέλους υπό εσωτερική εντατική κατάσταση προκαλεί συγκέντρωση τάσεων στις ζώνες διάνοιξης των οπών. Δίνει τους παράγοντες συγκέντρωσης πίεσης. Συγκεκριμένα, στα τμήματα της διατομής ενός σύνθετου μέλους, η διάνοιξη οπών (είτε προβλέπεται κατά τη διαδικασία παραγωγής ή γίνεται εκ των υστέρων με διάτρηση) προκαλεί την εξασθένηση της αντοχής έναντι θραύσεως σε σύγκριση με τις ίδιες περιοχές χωρίς οπές κατά 40% ως 60% σε εφελκόμενες ζώνες και κατά 15% σε θλιβόμενες ζώνες. Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται η διαδικασία αποσύνθεσης πριν τη θραύση μιας διαστρωμάτωσης από E-glass/Epoxy  $[0_4/\pm 45/90_2]_S$  που διαθέτει μια οπή και τελεί υπό μονοαξονικό εφελκυσμό.

Οι αιτίες που προκαλούν έναρξη της αστοχίας είναι:

A) Συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή της οπής



Σχήμα 6.1 Φάσεις προόδου ρηγμάτωσης σε διαστρωμάτωση με οπή

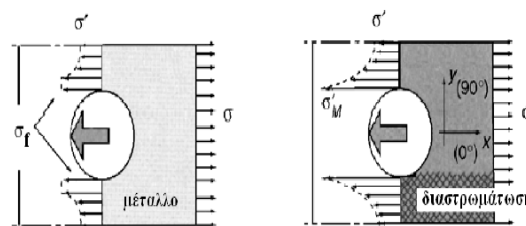
Τα διαγράμματα που φαίνονται στο Σχήμα 6.2 καταδεικνύουν την συγκέντρωση ορθών τάσεων στην περίπτωση μιας διαστρωμάτωσης από FRP σε σύγκριση με την αντίστοιχη σε μεταλλικό έλασμα.

Για την περίπτωση μιας κοινής κοχλιωτής σύνδεσης έχουμε:

$$\sigma'_M > \sigma$$

σε μια ζώνη όπου η τάση θραύσεως  $\sigma_{fr}$  που αντιστοιχεί σε τοπική αστοχία (local rupture) είναι μικρότερη από τη τάση θραύσεως της διαστρωμάτωσης  $\sigma_\theta$ , ήτοι

$$\sigma_{fr} < \sigma_\theta$$



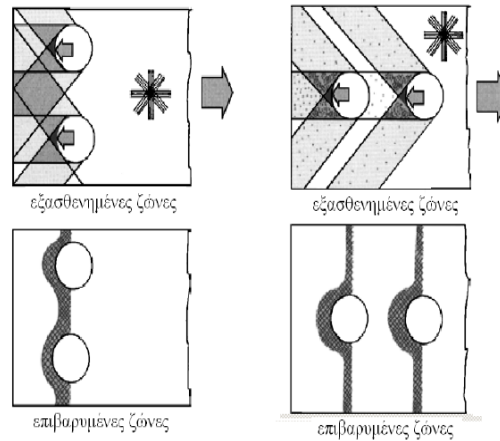
Σχήμα 6.2 Συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή της οπής

Η μέγιστη τάση αιχμής  $\sigma'_M$  στη διαστρωμάτωση είναι:

$$\sigma'_M = \sigma \left\{ 1 + \sqrt{2 \left( \sqrt{\frac{E_x - \nu_{xy}}{E_y}} \right) + \frac{E_x}{G_{xy}}} \right\}$$

όπου  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $\nu_{xy}$  και  $G_{xy}$  είναι τα ενεργά μέτρα ελαστικότητας της διαστρωμάτωσης.

Στο Σχήμα 6.3 φαίνονται οι εξασθενημένες ζώνες και οι επιβαρυνμένες περιοχές σε μια διαστρωμάτωση με οπές που εξαρτώνται και από την διάταξη των οπών.



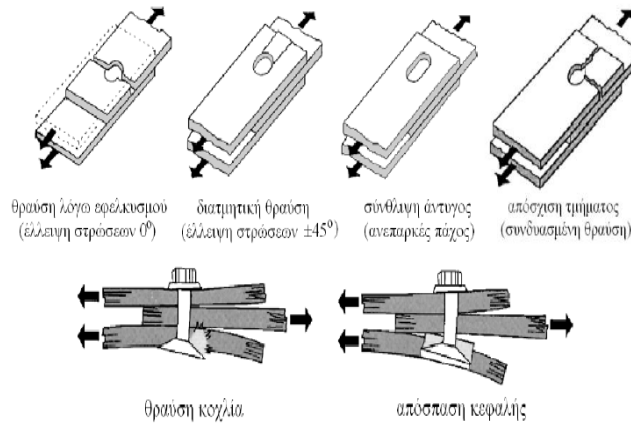
Σχήμα 6.3 Εξασθενημένες και επιβαρυνμένες ζώνες λόγω οπών

#### B) Σύνθλιψη άντυγος

Πρόκειται για τις τάσεις επαφής μεταξύ του στελέχους του κοχλία και του τοιχώματος της οπής. Όταν οι τάσεις αυτές είναι υπερβολικές προκαλούν τοπικό φούσκωμα και στη συνέχεια αποκόλληση στρώσεων στην περιοχή της οπής. Τούτο έχει ως αποτέλεσμα η αντοχή έναντι θραύσεως μιας διαστρωμάτωσης με οπή που διατρέχεται από ένα κοχλία να είναι χαμηλότερη από την αντίστοιχη αντοχή χωρίς κοχλία κατά περίπου 40%.

Γ) Θραύση ινών κατά τη διάνοιξη της οπής ή αλλαγή κατεύθυνσης ινών εάν η οπή προβλέπεται κατά τη διαδικασία παραγωγής

### 6.2.1 Τρόποι αστοχίας κοχλιωτών συνδέσεων σε διαστρωμάτωσεις FRP



Σχήμα 6.4 Τρόποι αστοχίας κοχλιωτών συνδέσεων

### 6.2.2 Συνιστώμενες τιμές

#### 6.2.2.1 Διάταξη οπών

Η διάμετρος  $d$  της οπής ή των οπών που διανοίγονται πρέπει να είναι  $d \leq 2h$  όπου  $h$  το πάχος της διαστρωμάτωσης. Η ελάχιστη συνιστώμενη απόσταση  $p_1$  μεταξύ κοχλιών που τίθενται σε σειρά κατά την έννοια της δύναμης είναι  $3d \leq p_1$ , ενώ εάν τίθενται κάθετα στην έννοια της δύναμης είναι  $4d \leq p_2 \leq 6d$  όπου  $d$  η διάμετρος της οπής. Η ελάχιστη συνιστώμενη απόσταση  $e_1$  από το άκρο της διαστρωμάτωσης κατά την έννοια της δύναμης είναι  $e_1 \geq 6d$ , ενώ η απόσταση  $e_2$  από το άκρο κάθετα στην έννοια της δύναμης είναι  $e_2 \geq \frac{1}{2} p_2$ . Όταν ισχύουν οι προϋποθέσεις αυτές, μπορεί να λαμβάνεται συντελεστής ασφαλείας όχι μικρότερος του 2.

### 6.2.3 Λοιπές συστάσεις για κοχλιωτές συνδέσεις

Οι σχετικές συστάσεις για τις κοχλιωτές συνδέσεις σύνθετων μελών μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα:

- Να μην κρούονται οι κοχλίες κατά την τοποθέτησή τους διότι αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εξασθένηση της αντοχής σε κρούση των συνδεομένων μελών.
- Να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στον κίνδυνο ανασήκωσης κεφαλής του κοχλία λόγω του μικρού πάχους των συνδεόμενων διαστρωματώσεων.
- Να σημειωθεί η ανάγκη διασφάλισης της γαλβανικής συμβατότητας μεταξύ των κοχλιών και συνδεόμενων διαστρωματώσεων.
- Όταν μια κοχλίωση συνοδεύεται με συγκόλληση των συνδεόμενων επιφανειών παρέχει μια πρόσθετη συνολική αντοχή στη σύνδεση της τάξεως του 20% με 30% με μικρή αύξηση του βάρους. Αντίθετα, η αποσυναρμολόγηση της σύνδεσης καθίσταται πλέον αδύνατη.
- Σε ορισμένες κοχλιωτές συνδέσεις η περίσφιξη του κοχλία είναι επιβεβλημένη διότι προσδίδει πρόσθετη αντοχή μέσω των δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια μεταξύ των συνδεόμενων μελών. Η περίσφιξη όμως πρέπει να είναι τέτοια ώστε μην προκαλέσει σύνθλιψη της διαστρωμάτωσης κατά την εγκάρσια έννοια. Για καλύτερη κατανομή των τάσεων χρησιμοποιούνται ροδέλες.

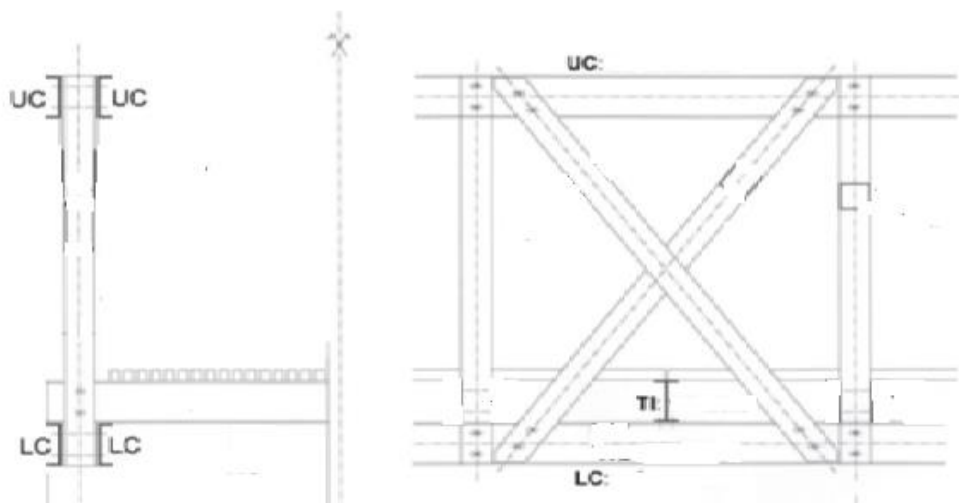
## 4.Περιγραφή Τεχνικού Έργου

### 4.1.Μοντέλο από Ινοπλισμένα Πολυμερή

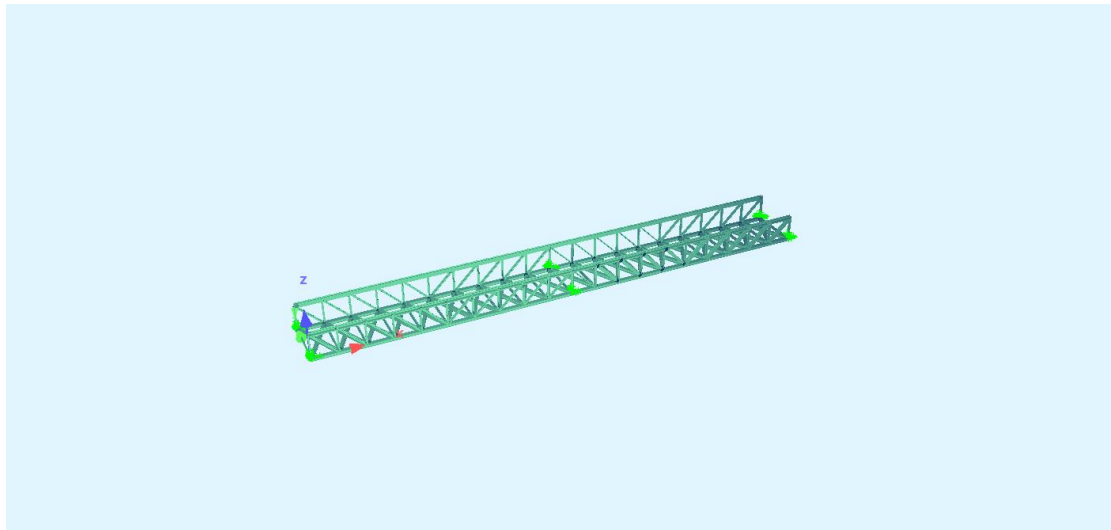
#### 4.1.1 Στοιχεία Γέφυρας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τον σχεδιασμό μίας πεζογέφυρας δύο ανοιγμάτων 30 μέτρων με δύο εναλλακτικά υλικά, από χάλυβα και ινοπλισμένα πολυμερή. Ο φορέας συμπληρώνεται από: δικτύωμα ύψους 4 μέτρων, κατάστρωμα από ξύλο και ινοπλισμένα πολυμερή αντισιγχα, μεταλλικές διαδοκίδες, εγκάρσιες στις δοκούς και έξιεφέδρανα. Για την μόρφωση του μοντέλου της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Sofistik. Το πρώτο στάδιο της εισαγωγής του μοντέλου στο πρόγραμμα αποτελεί η καταχώρηση των ραβδωτών στοιχείων. Στη συνέχεια, καθορίζεται η αξονική και εγκάρσια δυσκαμψία των εφεδράνων τα οποία παριστάνονται ως ελατήρια. Η τελική προσομοίωση του των κύριων δοκών και των διαδοκίδων επιτυγχάνεται με τη συμπλήρωση του υλικού και του πάχους κάθε πλευρικού στοιχείου. Η γεωμετρία του μοντέλου φαίνεται στα ακόλουθα σχήματα

Η γέφυρα έχει μήκος 30 μέτρα και πλάτος 3 μέτρα. Το ύψος του δικτυώματος είναι 4 μέτρα.



Εικόνα 4.1 Όψη και τομή του δικτυώματος.



Εικόνα 4.2 Προσωμείωμα στο Sofistik

#### **4.1.1.1 Υλικό**

Στο τεχνικό έργο χρησιμοποιήθηκε το υλικό Scotchply 1002. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι ιδιότητες του και οι τάσεις αστοχίας.

Type	Material	$E_x$ GPa	$E_y$ GPa	$\nu_x$	$E_s$ GPa	$\nu_f$	Specific gravity
T300/5208	Graphite /Epoxy	181	10.3	0.28	7.17	0.70	1.6
B (4)/5505	Boron /Epoxy	204	18.5	0.23	5.59	0.5	2.0
AS/3501	Graphite /Epoxy	138	8.96	0.30	7.1	0.66	1.6
Scotchply 1002	Glass /Epoxy	38.6	8.27	0.26	4.14	0.45	1.8
Kevlar 49 /Epoxy	Aramid /Epoxy	76	5.5	0.34	2.3	0.60	1.46

Πίνακας 4.1 Ιδιότητες Ινοπλισμένων Πολυμέρων

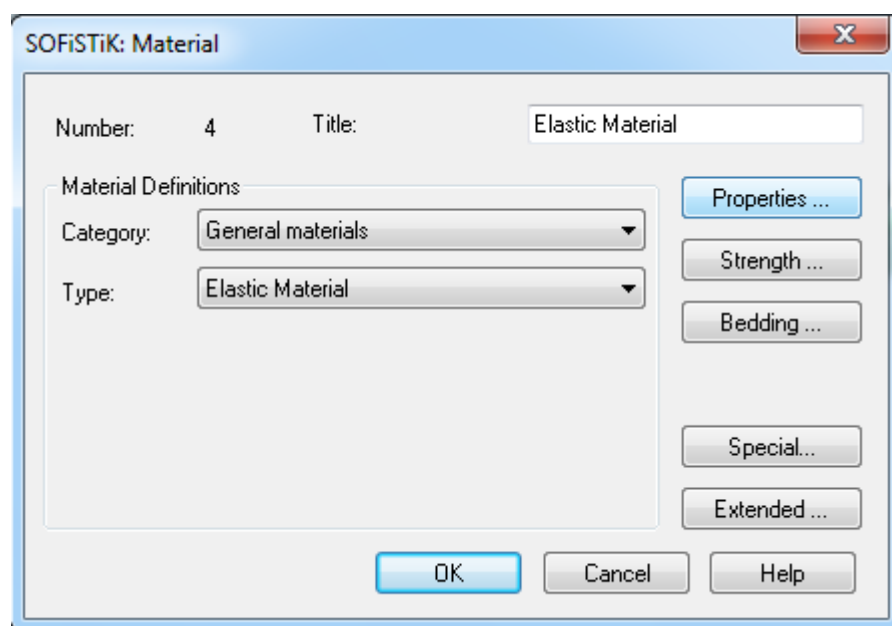
ΤΥΠΟΣ	ΥΛΙΚΟ	$v_f$	X	X'	Y	Y'	S
T300/5208	Graphite Epoxy	0.70	1500	1500	40	246	68
B(4)/5505	Boron Epoxy	0.50	1260	2500	61	202	67
AS/3501	Graphite Epoxy	0.66	1447	1447	51.7	206	93
Scotchply 1002	Glass Epoxy	0.45	1062	610	31	118	72
Kevlar 49	Aramid Epoxy	0.60	1400	235	12	53	34
-	Αλουμίνιο		400	400	400	400	230

4.2 Τάσεις αστοχίας Ινοπλισμένων Πολυμερών

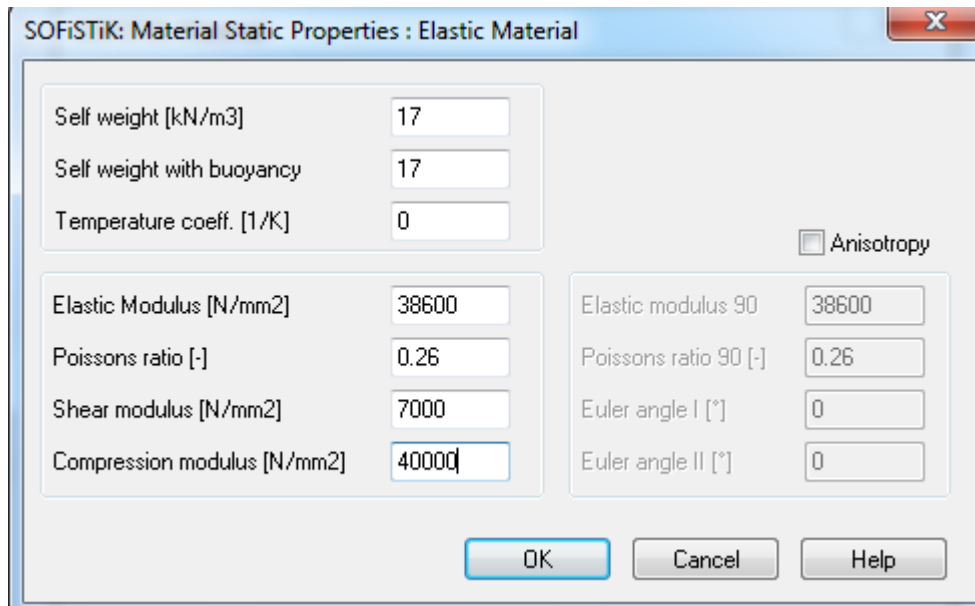
Ειδικό βάρος ( $\gamma$ )	17KN/m <sup>3</sup>
Συντελεστής Poisson ( $\nu$ )	0.26
Μέτρο ελαστικότητας (E)	3860KN/cm <sup>2</sup>
Μέτρο	4000KN/cm <sup>2</sup>
Θλιπτική αντοχή ( $f_v$ )	140KN/cm <sup>2</sup>
Εφελκυστική	60.5KN/cm <sup>2</sup>

Πίνακας 4.2 Ιδιότητες Υλικού

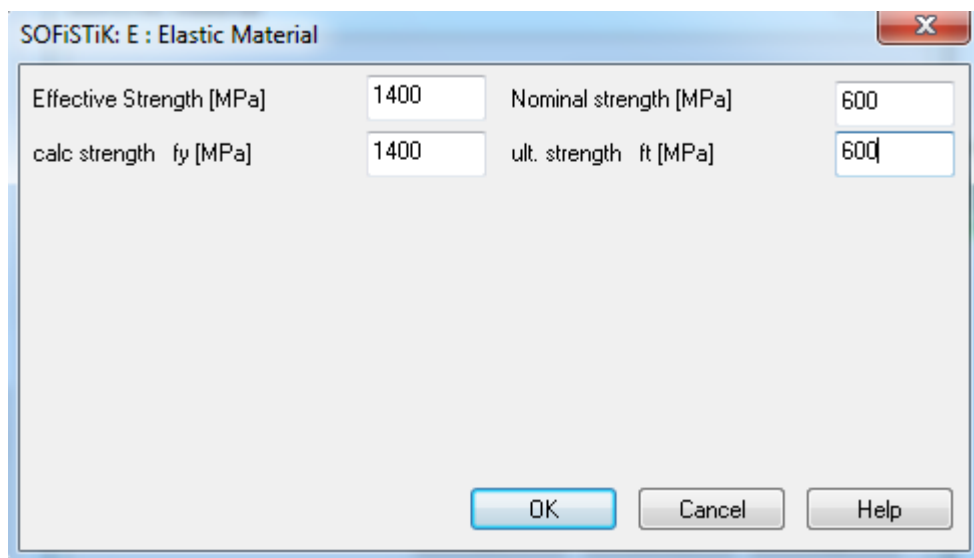
Για την προσομοίωση του στο πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε η επιλογή General Material και εν συνεχεία Elastic Material.



Εικόνα 4.2 Επιλογή Υλικού

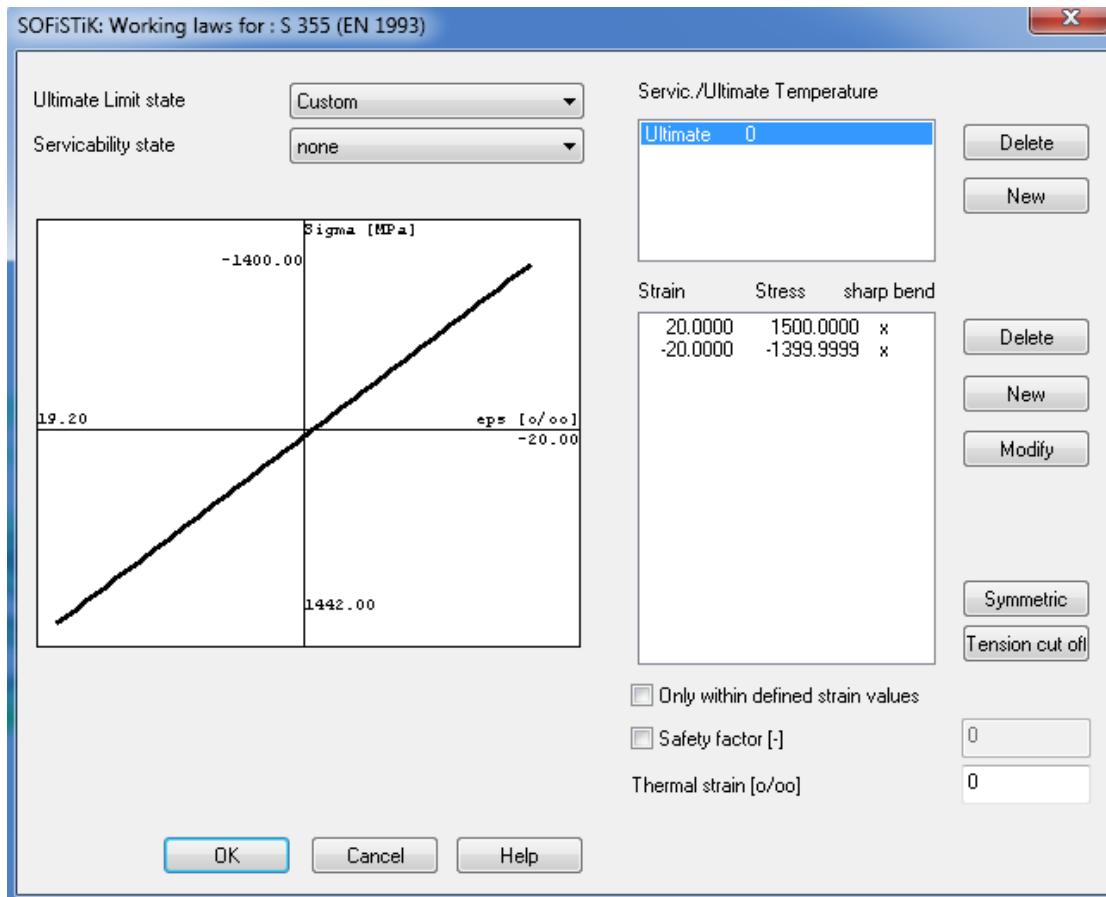


4.3 Εισαγωγή Ιδιοτήτων



Εικόνα 4.3 Εισαγωγή θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων

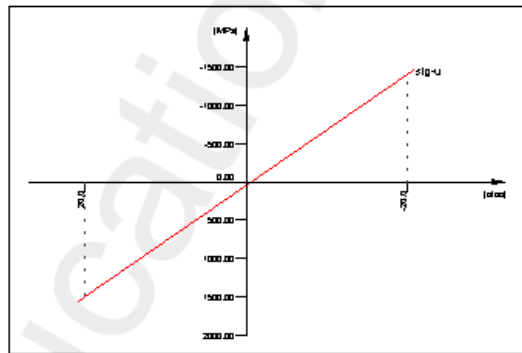




Εικόνα 4.3 Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων στο Sofistik

**No. 4 S 355 (EN 1993)**

Youngs-modulus	E	40000 [N/mm <sup>2</sup> ]	Safetyfactor	1.10 [-]	
Poisson-Ratio	mu	0.23 [-]	Yield stress	fy 275.79 [MPa]	
Shear-modulus	G	7000 [N/mm <sup>2</sup> ]	Compr.yield val.	fyc 315.57 [MPa]	
Compression modulus		40000 [N/mm <sup>2</sup> ]	Tens. strength	ft 275.79 [MPa]	
Weight		17.0 [kN/m <sup>3</sup> ]	Compr. strength	fc 315.57 [MPa]	
Weight buoyancy		17.0 [kN/m <sup>3</sup> ]	Ultim. plast. strain	100.00 [o/oo]	
Temp.elongat.coeff.		0.00E+00 [1/°K]	relative bond coeff.	0.00 [-]	
max. thickness		40.00 [mm]	EC2 bondcoeff. K1	0.00 [-]	
			Hardening modulus	0.00 [MPa]	
			Proportional limit	315.57 [MPa]	
			Dynamic stress range	0.00 [MPa]	
Stress-Strain for ultimate load			eps[o/oo]	sig-u[MPa]	E-t [N/mm <sup>2</sup> ]
Is also extended beyond the			20.000	1500.00	72500
defined stress range			-20.000	-1400.00	72500



S 355 (EN 1993)

**No. 5 avares skyrodema**

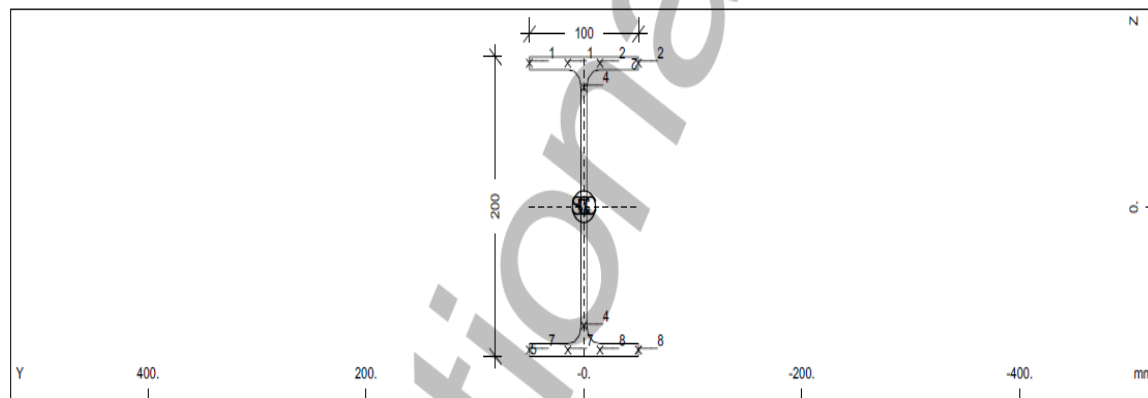
Youngs-modulus	E	32837 [N/mm <sup>2</sup> ]	Safetyfactor	1.50 [-]
Poisson-Ratio	mu	0.20 [-]	Strength	fc 25.50 [MPa]
Shear-modulus	G	13682 [N/mm <sup>2</sup> ]	Nomin. strength	fck 30.00 [MPa]
Compression modulus		18243 [N/mm <sup>2</sup> ]	Tens. strength	fctm 2.90 [MPa]
Weight		0.0 [kN/m <sup>3</sup> ]	5 % t strength	fctk 2.03 [MPa]

Εικόνα 4.3 Ιδιότητες υλικού

### 4.1.1.2 Διατομές

Στους ορθοστάτες, τις διαδοκίδες και τις διαγωνίους χρησιμοποιήθηκαν διατομές IPE 200 ενώ στις κύριες δοκούς 2 U200 σε συνδυασμό με έλασμα. Παρακάτω φαίνονται στο πρόγραμμα.

Cross section No. 4 - IPE 200

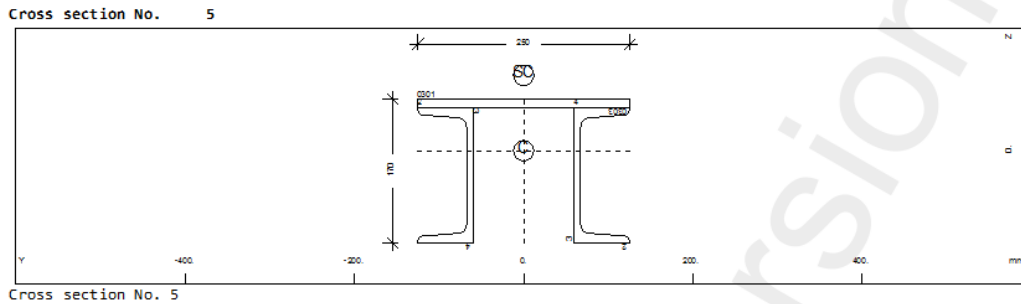


Cross section No. 4 - IPE 200

#### Static properties of cross section

No.	Mat	A[m <sup>2</sup> ]	Ay[m <sup>2</sup> ]	Iy[m <sup>4</sup> ]	yc[mm]	ysc[mm]	E[N/mm <sup>2</sup> ]	g[kN/m]
		MRf	It[m <sup>4</sup> ]	Az[m <sup>2</sup> ]	Iz[m <sup>4</sup> ]	zc[mm]	zsc[mm]	G[N/mm <sup>2</sup> ]
4	4	2.8484E-03	1.586E-03	1.943E-05	0.0	0.0	40000	0.05
		6.865E-08	1.097E-03	1.424E-06	0.0	0.0	7000	(BEAM)
= IPE 200								
No.	section number		ysc,zsc		shear centre			
Mat	material number		E		Young's modulus			
A	sectional area		g		weight per length			
Ay,Az,Ayz	transverse shear deformation area		MRf		reinforcement material number			
Iy,Iz,Iyz	bending moment of inertia		It		torsional moment of inertia			
yc,zc	centre of gravity		G		Shear modulus			

Εικόνα 4.4 Διατομή IPE 200 στο Sofistik



Static properties of cross section

No.	Mat	A[m <sup>2</sup> ]	Ay[m <sup>2</sup> ]	Iy[m <sup>4</sup> ]	yc [mm]	ysc[mm]	E[N/mm <sup>2</sup> ]	g[kN/m]
	MRF	It[m <sup>4</sup> ]	Az[m <sup>2</sup> ]	Iz[m <sup>4</sup> ]	zc [mm]	zsc[mm]	G[N/mm <sup>2</sup> ]	
			Ayz[m <sup>2</sup> ]	Iyz[m <sup>4</sup> ]				
5	4	7.3408E-03	1.545E-03	3.053E-05	0.0	0.0	40000	0.12
	2	5.118E-07	2.421E-03	4.444E-05	0.6	-88.6	7000	
=								
No.	section number		ysc,zsc		shear centre			
Mat	material number		E		Young's modulus			
A	sectional area		g		weight per length			
Ay,Az,Ayz	transverse shear deformation area		MRF		reinforcement material number			
Iy,Iz,Iyz	bending moment of inertia		It		torsional moment of inertia			
yc,zc	centre of gravity		G		shear modulus			

Εικόνα 4.5 Διατομή Κύριας Δοκού στο Sofistik

## 4.1.2 Δράσεις Φορέα

### 4.1.2.1 Εισαγωγή

Οι δράσεις οι οποίες επενεργούν σε μία πεζογέφυρα οφείλονται σε διάφορους παράγοντες και αιτίες.

Καταρχάς, έχουμε τα μόνιμα φορτία που οφείλονται στα ίδια βάρη των μελών (κύριων δοκών, πλάκας καταστρώματος και διαδοκίδων), αλλά και τα λοιπά μόνιμα, αυτά δηλαδή λόγω του επιπρόσθετου πάχους, και άρα βάρους. Υπάρχουν, επίσης, κινητά. Τα πραγματικά φορτία πάνω στις πεζογέφυρες προέρχονται από πεζούς. Σημαντικές δράσεις, ακόμα, είναι αυτές του ανέμου κατά την εγκάρσια διεύθυνση του φορέα όσο και κατά στοιχείο. Τέλος, οι δράσεις λόγω σεισμικών διεγέρσεων είναι άλλος ένας λόγος καταπόνησης των μελών της γέφυρας.

Στην περίπτωση του Δικτυωτού φορέα άνω διάβασης τα κατακόρυφα φορτία του καταστρώματος αναλαμβάνονται από το σύστημα των παράλληλων δοκών με τις διαγώνιους τους και τους ορθοστάτες μετατρέποντας επί της ουσίας τη ροπή κάμψης του ανοίγματος σε αξονικές δυνάμεις για τις δοκούς μέσω Δικτυωτού στατικού συστήματος. Τα οριζόντια φορτία αναλαμβάνονται από τους οριζόντιους συνδέσμους δυσκαμψίας του καταστρώματος.

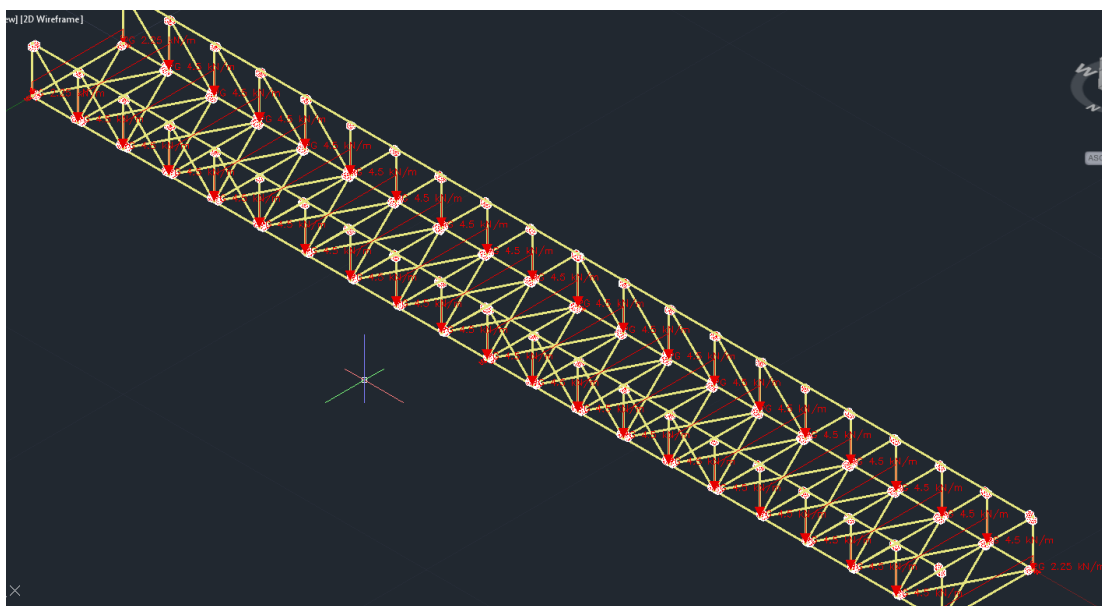
### 4.1.2.2 Φορτία

Τα ίδια βάρη του φορέα λαμβάνονται απ' ευθείας υπόψη στο Sofistik εφόσον έχουμε καθορίσει τα υλικά και τα γεωμετρικά στοιχεία των χρησιμοποιούμενων διατομών.

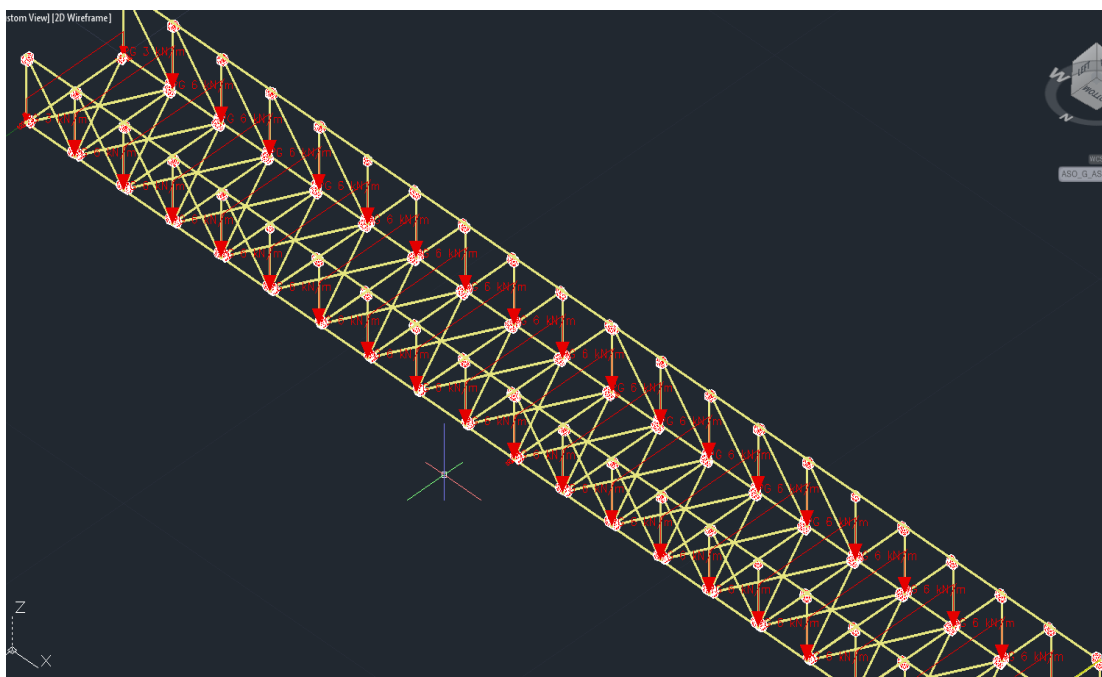
Ιδία βάρη διατομών :	17 KN/m <sup>3</sup>
Ιδίο βάρος επικαλύψεων:	1.0 KN/m <sup>2</sup>
Ιδίο βάρος κιγκλιδομάτων :	1.0 KN/m
Ομοιόμορφο διανεμημένο φορτίο ανθρωποσυνοστισμού :	4.0 KN/m <sup>2</sup>
Δράσεις Ανέμου κατά τις 3 διευθύνσεις :	$F_x= 1.367 \text{ KN/m}^2$ , $F_y=0.684 \text{ KN/m}^2$ , $F_z=0.538 \text{ KN/m}^2$
Σεισμικές Δράσεις κατά τις 3 διευθύνσεις:	Έδαφος Β, $\gamma= 1.00$ , Σοριζόντια, κατακόρυφη=1.2 , 1.0 φοριζόντια,κατακόρυφη=1.5 , 1.0 , $\zeta = 5\%$ , $a_g$ οριζόντια, κατακόρυφη = 0.160g , 0.112g = 9.81m/s <sup>2</sup> , n = 1.0
$E=\max(1.0E_x+0.3E_y+0.3E_z$ ; $0.3E_x+1.0E_y+0.3E_z$ ; $0.3E_x+0.3E_y+1.0E_z)$	

### 4.1.2.3 Φορτίσεις

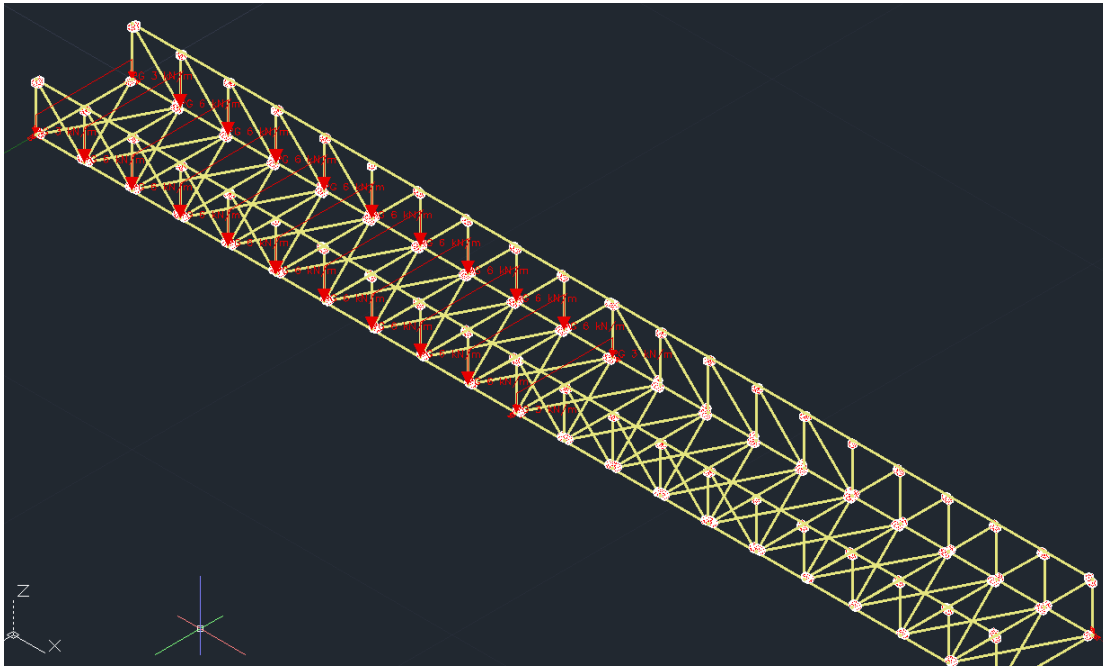
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι φορτίσεις στη γέφυρα από τα μόνιμα και κινητά φορτία καθώς και το φορτίο ανέμου. Η προσομοίωση τους στο SOFIPLUS έγινε με αναγωγή των επιφανειακών σε γραμμικά φορτία επί των διαδοκίδων.



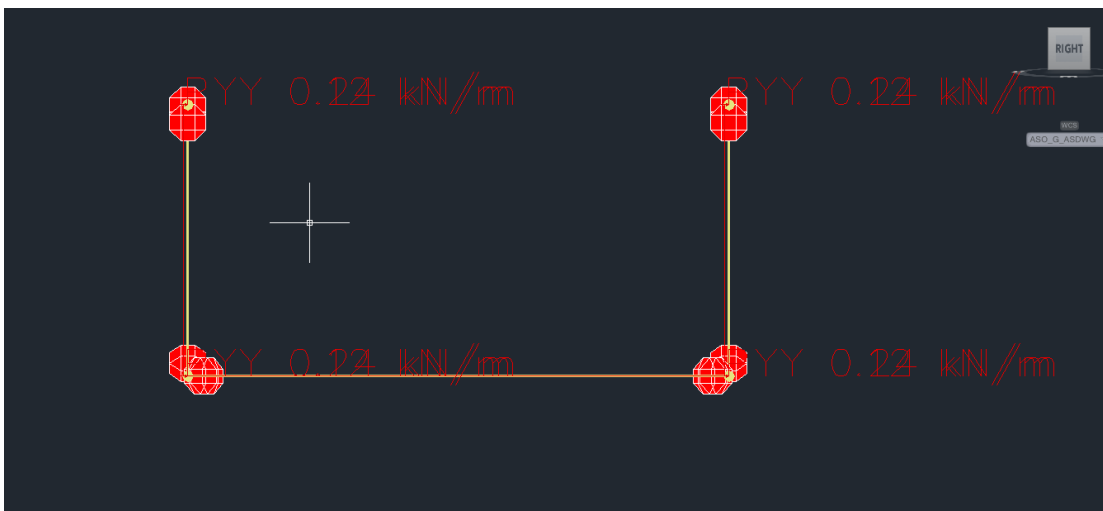
Εικόνα 4.5 Μόνιμα Φορτία



Εικόνα 4.6 Κινητά φορτία 1



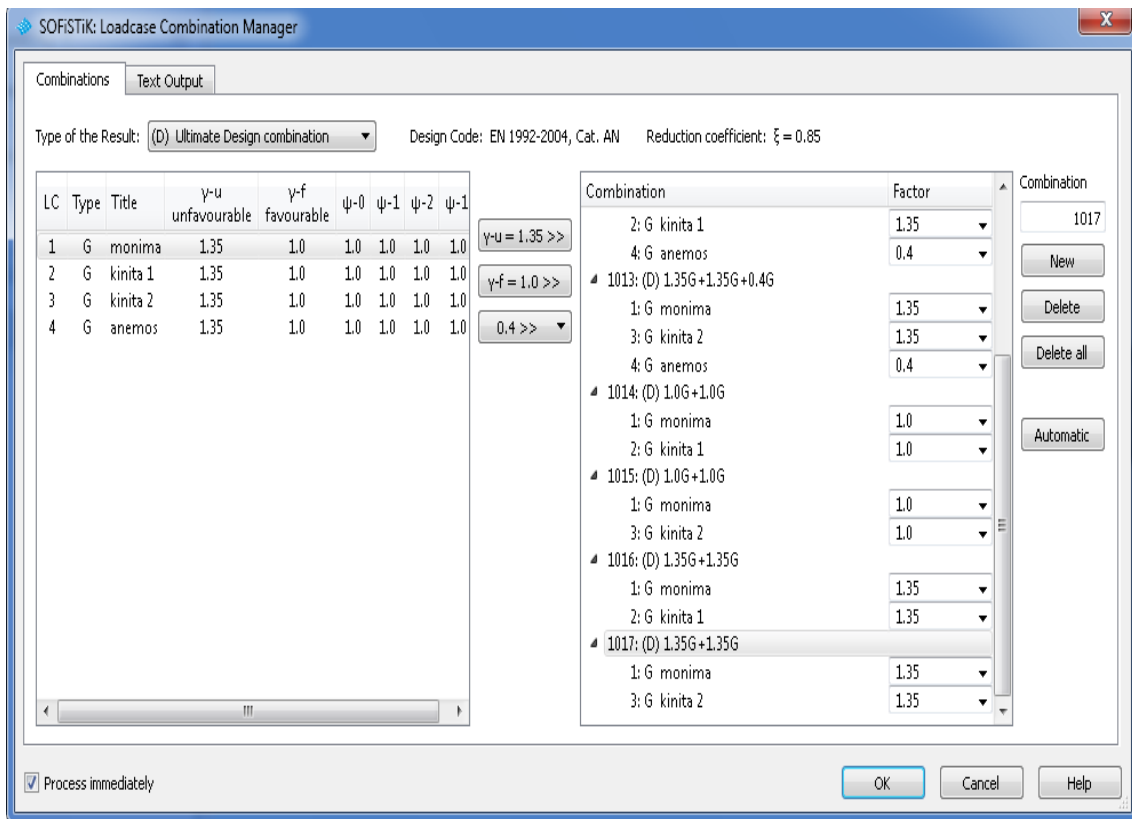
Εικόνα 4.7 Κινητά φορτία 2



Εικόνα 4.7 Φορτία ανέμου σε όψη

#### **4.1.3.3 Συνδυασμοί δράσεων**

Οι συνδυασμοί δράσεων με βάση τον Ευρωκώδικα εισάγονται στο πρόγραμμα στο εργαλείο LOADCASECOMBINATIONMANAGER



Εικόνα 4.4 Συνδυασμός δράσεων στο Loadcase combination manager

#### **4.1.4 Εντατικά μεγέθη επί της γέφυρας**

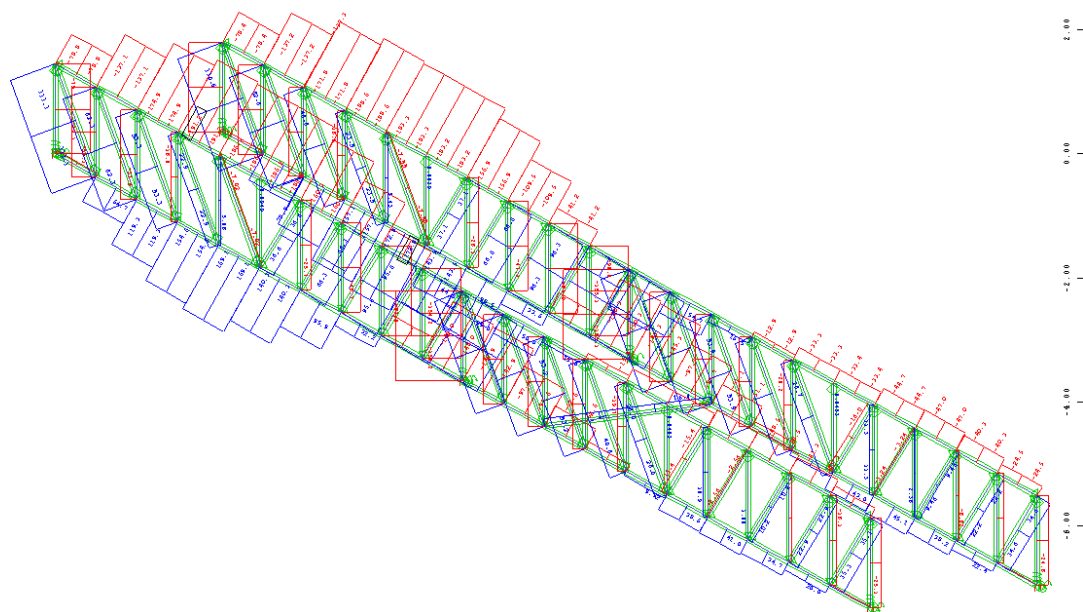
Με βάση τους συνδυασμούς δράσεων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα προκύπτουν τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη στο WINGRAF.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη.

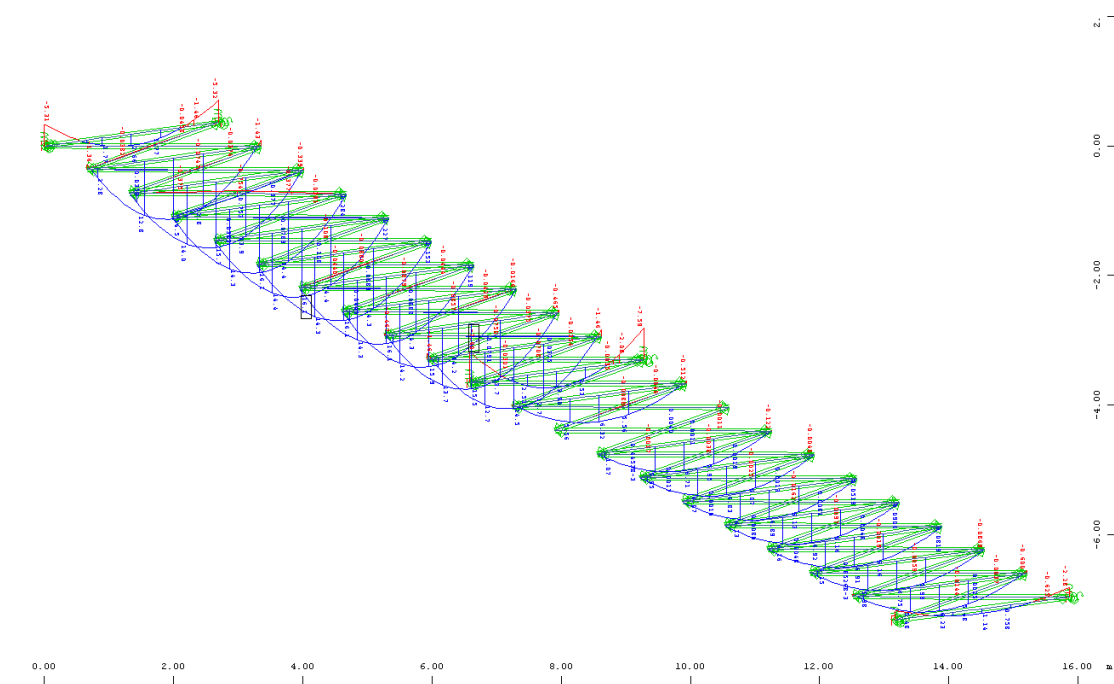
Το δυσμενέστερο μέγεθος ροπής στη διαδοκίδα,  $M_y=16,2$  προκύπτει από το LOADCASE (1016),

Το δυσμενέστερο μέγεθος αξονικής στις κύριες δοκούς προκύπτει από το LOADCASE(1017) Με μέγιστη θλιπτική δύναμη  $N=-191.1$  KN και μέγιστη εφελκυστική  $N=172.8$  KN στις ανω και κάτω αντίστοιχα και το δυσμενέστερο μέγεθος τέμνουσας  $V_y=34.7$  KN από το LOADCASE (1017)





Εικόνα 4.4 Διάγραμμα ροπών στο LOADCASE 1017

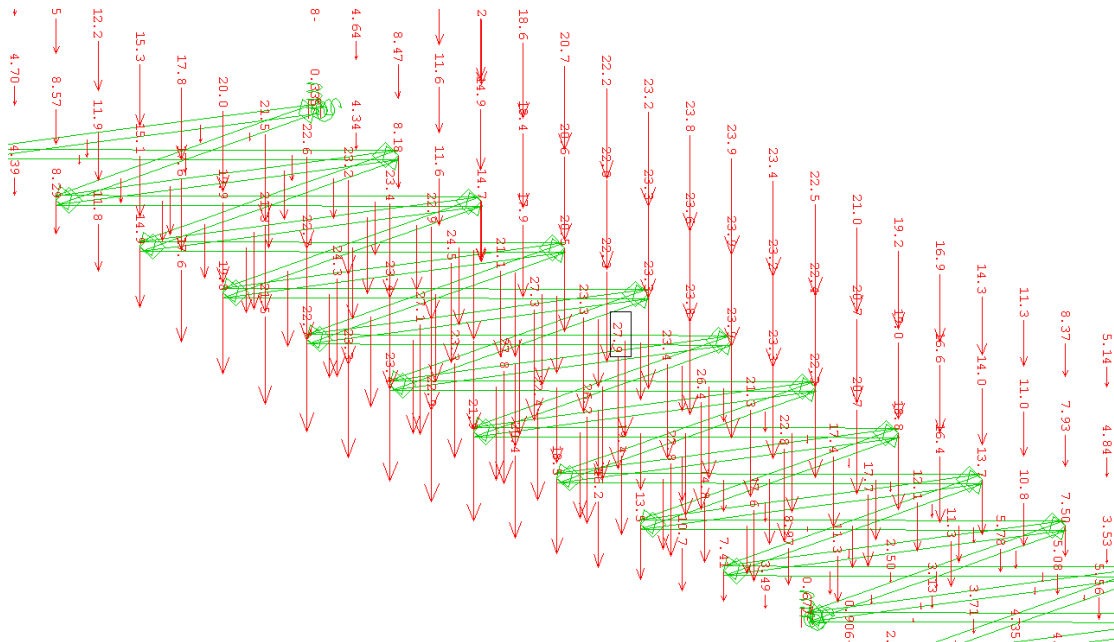


Εικόνα 4.5 Διάγραμμα ροπών διαδοκίδων στο LOADCASE 1017

#### **4.1.5 Ελεγχος σε λειτουργικότητα**

Τα βέλη του φορέα υπολογίζονται με βάση την ελαστική ανάλυση και θα πρέπει να περιορίζονται στο βαθμό που δεν επηρεάζουν την εμφάνιση αλλά και τη λειτουργικότητα του έργου ή δεν προκαλούν βλάβες σε μη φέροντα στοιχεία. Τα βέλη λόγω των φορτίων λειτουργικότητας θα πρέπει να περιορίζονται σε κάποια επιτρεπόμενη από τον κανονισμό τιμή, συνήθως  $1/250$  του μήκους του ανοίγματος. Από το πρόγραμμα ανάλυσης προκύπτει το μέγιστο βέλος κατά τη λειτουργικότητα, ίσο με:  $24.5 \text{ mm}$  στις κύριες δοκούς  $< L/250=120 \text{ mm}$

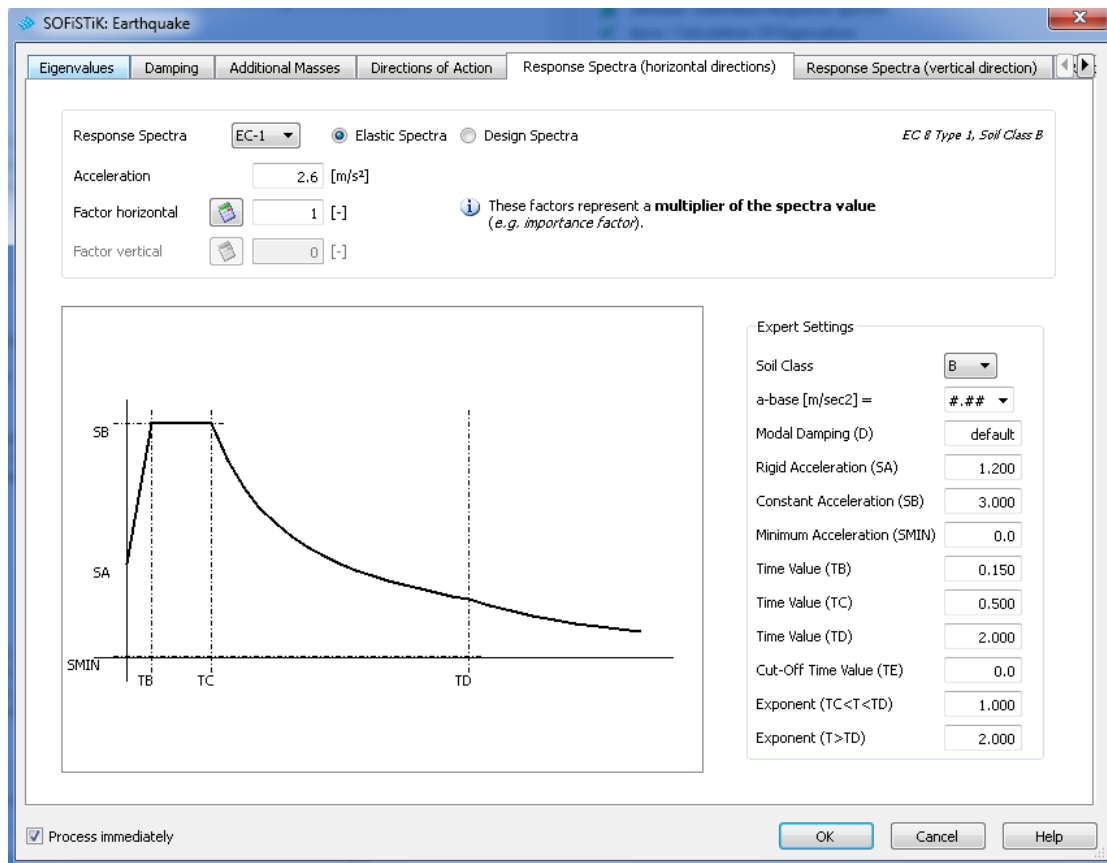
Επομένως ο έλεγχος ικανοποιείται.



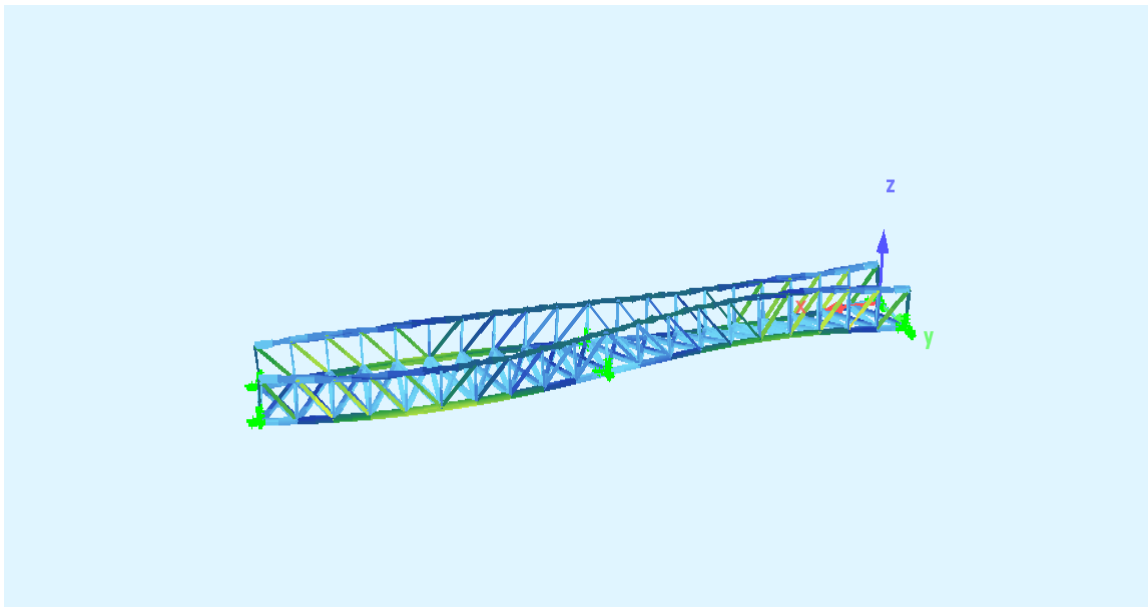
Εικόνα 4.5 Βέλη στην κατάσταση λειτουργικότητας στο LOADCASE 1014

#### 4.1.6 Έλεγχος σε σεισμό

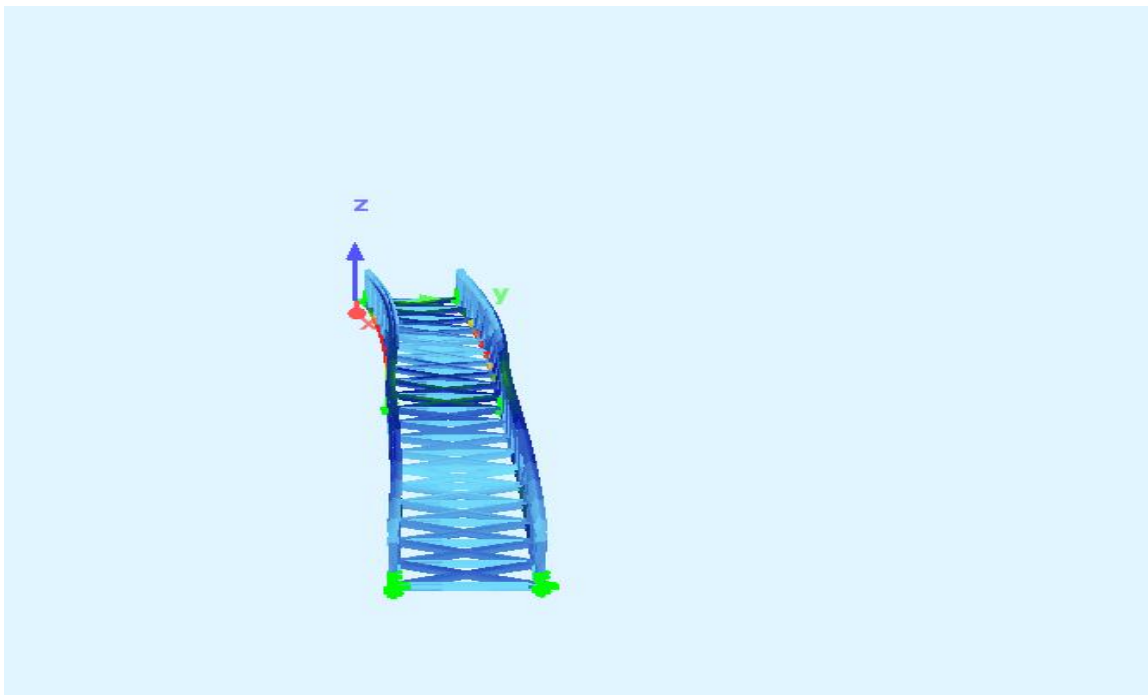
Για τον έλεγχο της γέφυρας σε σεισμικές δράσεις εισήχθησαν στο πρόγραμμα Earthquake τα δεδομένα του σεισμούσχεδιασμού ως μάζα οι δράσεις του σεισμικού συνδυασμού (1010) και (1011) και εξήχθησαν οι ιδιομορφές του σεισμού.



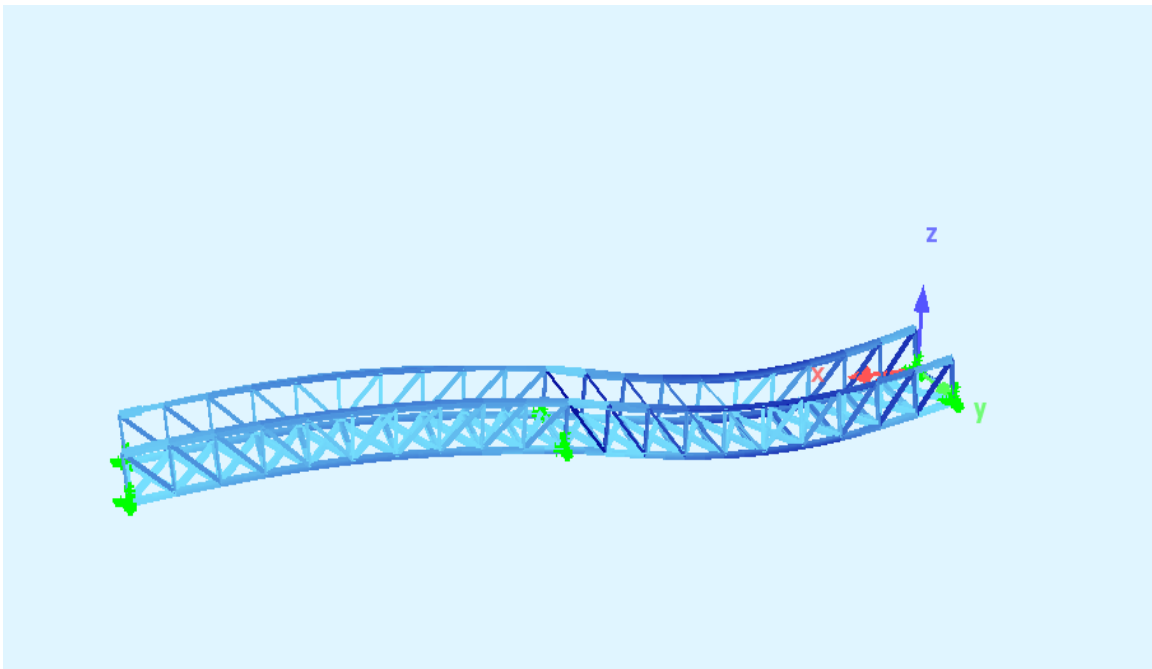
Εικόνα 4.7 Εισαγωγή δεδομένων σεισμικού φάσματος στο Sofistik Earthquake



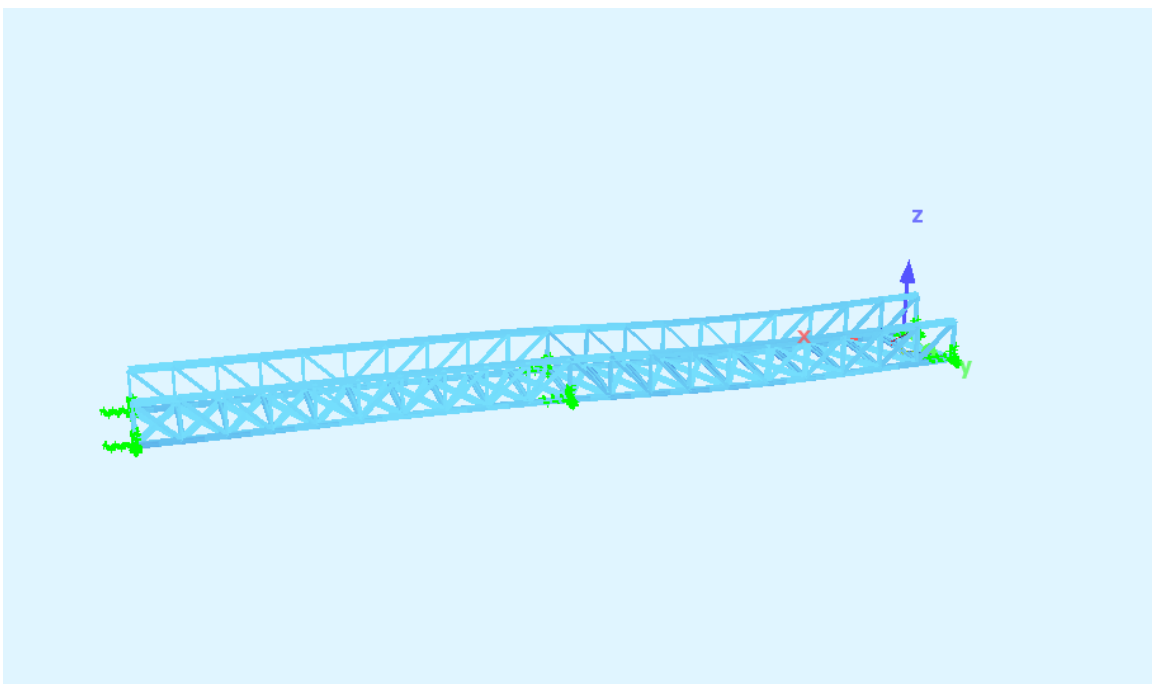
Εικόνα 4.5 καμπτική ιδιομορφή  $f=4.695$  Hz



Εικόνα 4.10 Μετακινησιακή διαμορφή κατά  $y$   $f=3,656$  Hz



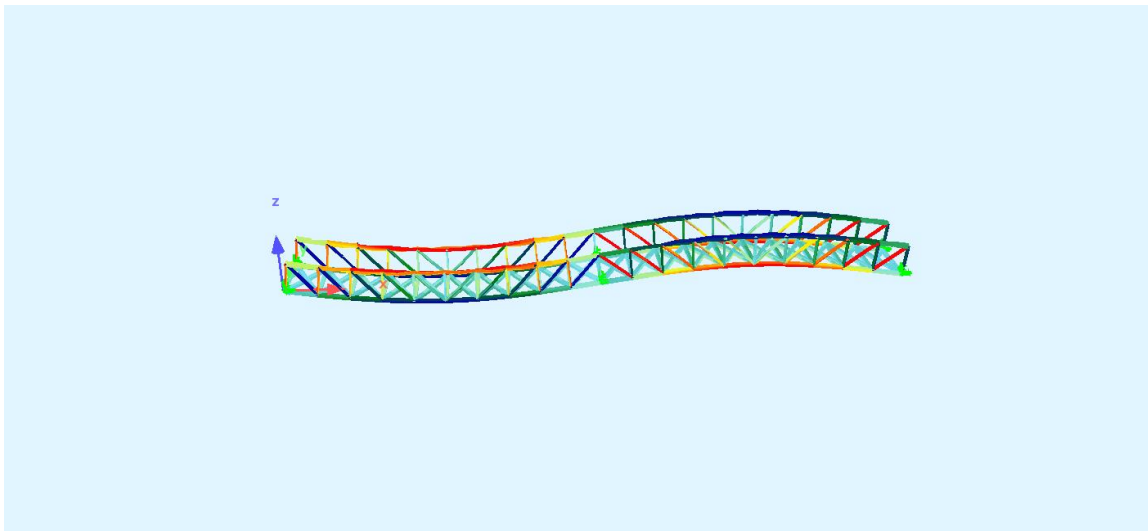
Εικόνα 4.11 Μετακινισιακή Ιδιομορφή κατά z .  $f=3,908$  Hz



Εικόνα 4.20 Μετακινισιακή Ιδιομορφή κατά x.  $f=4,342$

#### **4.1.7 Έλεγχος σε ανθρωποσυντονισμό**

Για τον έλεγχο της γέφυρας σε ανθρωποσυντονισμό χρησιμοποιείται η θεμελιώδης ιδιομορφή όπως προκύπτει από το Task Eigenvalues για το Loadcase monima  $f=3.712$ .



Εικόνα 4.6 Θεμελιώδης Ιδιομορφή φορέα

Από το συνολικό βάρος της γέφυρας είναι:

$W = 80 \text{ KN}$  Από τον πίνακα 1 λαμβάνουμε για υπαίθριες πεζογέφυρες  $\beta = 0.01$  και έχουμε  $\beta W = \text{KN}$

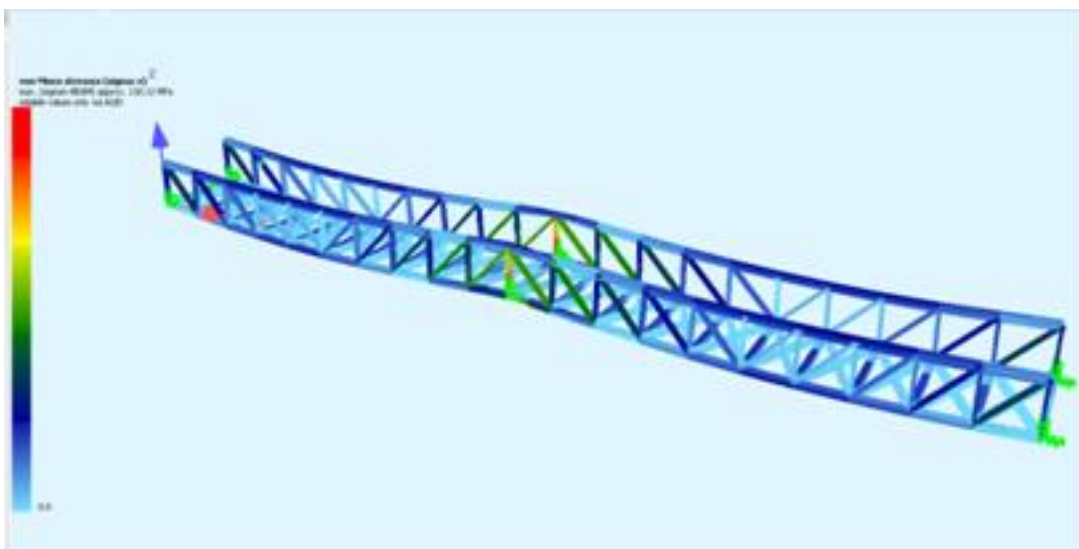
Η σχέση 1 με  $f_n = f = 3,712 \text{ Hz}$  και  $P_0 = 0,41 \text{ KN}$  μας δίδει :

$$\frac{\alpha_p}{g} = \frac{P_0 e^{-0.35f_n}}{\beta W} = 0,0405$$

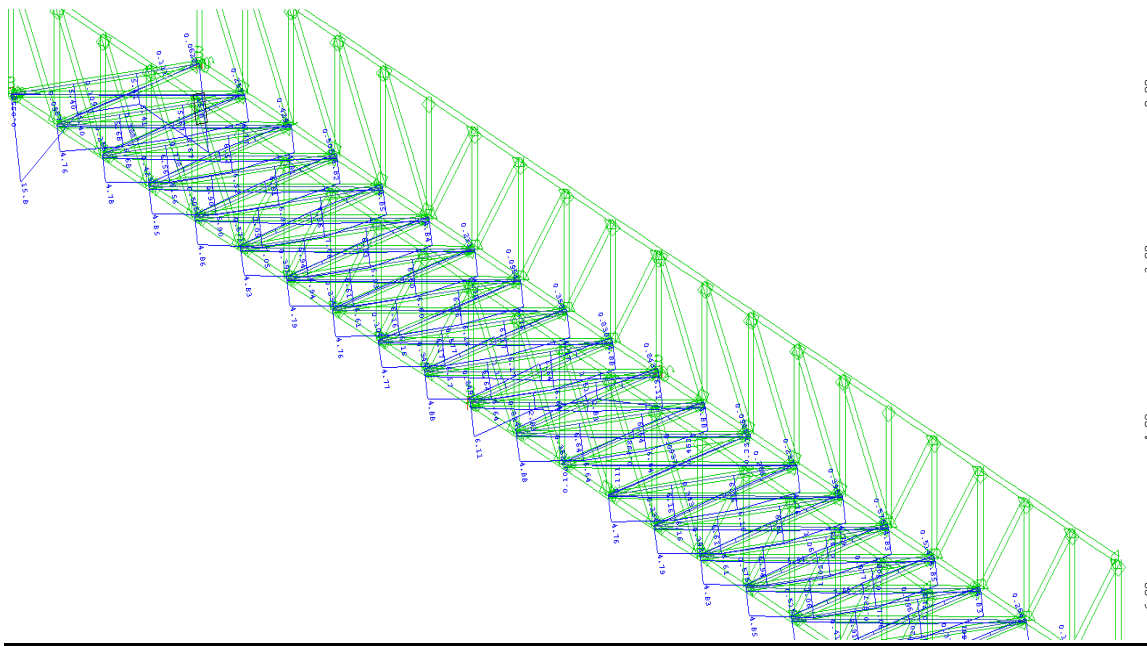
Βάση του Πίνακα 1, το όριο είναι  $5\%g$  για υπαίθριες πεζογέφυρες και αποδεκτό.

#### 4.1.8 Έλεγχος τάσεων

Έγινε έλεγχος τάσεων της γέφυρας υπό τα φορτία της όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και είναι επαρκής.

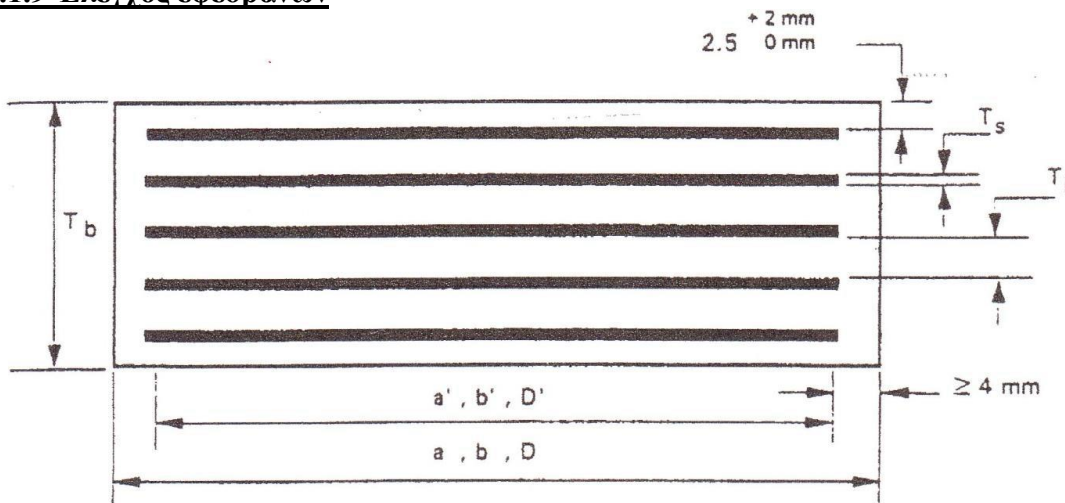


Εικόνα 4.10 Τάσεις υπό τα φορτία της γέφυρας

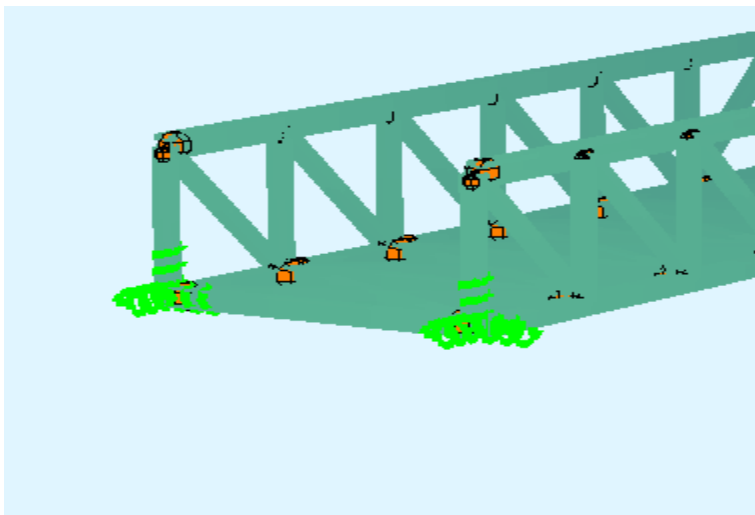


Εικόνα 4.11 Διάγραμμα τάσεων γέφυρας

#### 4.1.9 Έλεγχος εφεδράνων



Σχήμα 2.7: Τυπική διατομή ελαστομεταλλικούεφεδράνου τύπου Β



4.4 Προσομοίωση εφεδράνων

Τα ελαστομερή εφέδρανα τα οποία αναλαμβάνουν σεισμικές δράσεις πρέπει να διαθέτουν απαραίτητα ενσωματωμένες πλάκες ενίσχυσης (ελαστομεταλλικά εφέδρανα) και οι τιμές των χαρακτηριστικών τους να είναι οι εξής:

Απόσβεση : 5%
Μέτρο Διάτμησης για $\gamma_{sd} \leq 1,2$ : $G = 1,2 \text{ N/mm}^2$ αυξανόμενο γραμμικά μέχρι $\gamma_{sd} = 2,0$ σε : $G = 1,6 \text{ N/mm}^2$
Μήκυνση Θραύσης : $\gamma_{bu} = 5,0$

Επιλέγονται ελαστομεταλλικά εφέδρανα 600\*600 με 12 στρώσεις ελαστομερούς πάχους 16 mm το καθένα.

Μηχανικά χαρακτηριστικά  
 μέτρο ελαστικότητας :  $E=58.59 \text{ KN} / (\text{cm})^2$   
 μέτρο διάτμησης :  $G=0.1 \text{ KN} / (\text{cm})^2$   
 μέγιστη επιτρεπόμενη θλιπτική τάση :  $\max \sigma = 1.50 \text{ KN} / (\text{cm})^2$

Προσομοίωση εφέδρανων  
 Σταθερές ελατηρίων κατά x και κατά y.  
 $c_x = c_y = (a \cdot b \cdot G) / t = (60 \cdot 60 \cdot 0,1) / (12 \cdot 1,6) = 1875 \text{ kn/m}$

Αποτελέσματα από το sofistik για το σεισμικό συνδυασμό  
 $\delta_x = 21,29 \text{ cm}$   
 $\delta_y = 21,75 \text{ cm}$   
 $d_{ed} = \sqrt{((21,29)^2 + (21,75)^2)} = 30,44 \text{ cm}$   
 Έλεγχος διατμητικής παραμόρφωσης εφεδράνου  
 Ανηγμένη διατμητική παραμόρφωση λόγω σεισμού  
 $e_{s,d} = 30,44 / (12 \cdot 1,6) = 1,59 < 2$   
 Διατμητική ανηγμένη παραμόρφωση λόγω θλίψης  
 Μέγιστη αξονική δύναμη στο εφέδρανο από το σεισμικό συνδυασμό  
 $N_{ed} = 1526 \text{ Kn}$   
 Συντελεστής σχήματος εφεδράνου  
 $S = (a \cdot b) / (2 \cdot ((60+60) \cdot 1,6)) = 9,375$

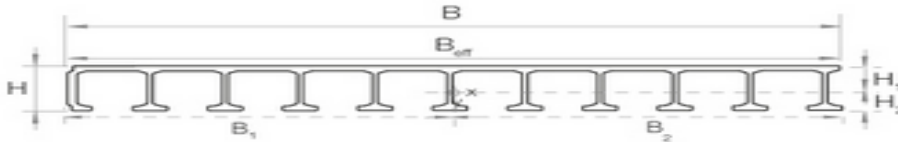
Έλεγχος ορθής τάσης.  
 Ενεργός επιφάνεια εφεδράνου  
 $\delta_{x\max} = 212,9 \text{ mm}$   
 $\delta_{y\max} = 217,5 \text{ mm}$   
 $A_r = (60 - 21,75) \cdot (60 - 21,29) = 1480 \text{ cm}^2$   
 $\sigma_c = 1526 / 1480 = 1,03 < \max \sigma_c = 1,5 \text{ kn/cm}^2$   
 $e_{c,d} = 1,5 \cdot 1,03 / (9,37 \cdot 0,1) = 1,648$   
 Μέγιστη ισοδύναμη διατμητική παραμόρφωση  
 $e_{b,d} = e_{c,d} + e_{s,d} = 3,22 < e_{u,k} / \gamma_{\mu} = 7 / 1,15 = 6,09$

Έλεγχος ολίσθησης εφεδράνου  
 $\sigma_e = 1,03 < 2 \cdot 60 \cdot 0,1 \cdot 9,375 / (3 \cdot 19,2) = 1,95 \text{ kN/cm}^2$   
 Το εφέδρανο δεν ολισθαίνει.

#### 4.1.10 Κατάστρωμα γέφυρας

Για το κατάστρωμα επιλέγεται το κατάστρωμα Fiberline Plank HD της εταιρίας Fiberline, ιδανικό για πεζογέφυρες.

### Fiberline Plank HD



#### Specifications for the profile:

H	40	mm
B	505	mm
B <sub>eff</sub>	500	mm
B <sub>1</sub>	248	mm
B <sub>2</sub>	257	mm
H <sub>1</sub>	15	mm
H <sub>2</sub>	25	mm

Για τον έλεγχο του στα φορτία της κατασκευής απομονώνουμε μία διατομή διπλού ταυ και την ελέγχουμε σε κάμψη.

Τα πέλματα και ο κορμός έχουν συνολικό πάχος  $h=22 \cdot t=4.4\text{mm}$ . Επειδή η διαστρωμάτωση πέλματων και κορμού είναι συμμετρική ως προς το μέσο επίπεδό τους δεν εμφανίζεται δευτερογενής κάμψη και τα εντατικά μεγέθη παραλαμβάνονται αποκλειστικά μέσω μεμβρανικών δράσεων.

Για το υλικό E-glass/Epoxy γνωρίζουμε τα μέτρα ελαστικότητας  $E_1=40\text{GPa}$ ,  $E_2=8\text{GPa}$ , το λόγο Poisson  $\nu=0.24$  και το μέτρο διάτμησης  $G_{12}=4\text{GPa}$ . Από αυτά υπολογίζεται πρώτα ο λόγος Poisson  $\nu_{21}$  από τη σχέση

$$\nu_{21} = E_2 \frac{\nu_{12}}{E_1} = 8 \frac{0.24}{40} = 0.048$$

και κατόπιν οι δυσκαμψίες [Q] στο σύστημα του υλικού 1-2

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{40}{1 - 0.24 \cdot 0.048} = 40.47 \text{ GPa}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{8}{1 - 0.24 \cdot 0.048} = 8.09 \text{ GPa}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{0.24 \cdot 8}{1 - 0.24 \cdot 0.048} = 1.94 \text{ GPa}$$



$$Q_{66} = G_{12} = 4.0 \text{ GPa}$$

Η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων στο σύστημα του υλικού 1-2 είναι

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 40.47 & 1.94 & 0 \\ 1.94 & 8.09 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [Q]\{\varepsilon\} = [\bar{Q}]^0\{\varepsilon\}$$

Στη συνέχεια, κάνουμε μετασχηματισμό της σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων αναφορικά με τις στρώσεις υπό γωνία  $90^\circ$ . Η μετασχηματισμένη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων ειδικά για  $\theta=90^\circ$  προκύπτει απλώς αντιμεταθέτοντας τους όρους  $Q_{11}$  και  $Q_{22}$  στο μητρώο  $[Q]$  και είναι:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.09 & 1.94 & 0 \\ 1.94 & 40.47 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [\bar{Q}]^{90}\{\varepsilon\}$$

Στη συνέχεια μορφώνουμε το μητρώο μεμβρανικής δυσκαμψίας  $[A]$  για πάχος στρώσεων  $t=0.2\text{mm}$  και κώδικα  $[0_4/90_2/0_4/90]_S$  με βάση τη γενική σχέση

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^k t_k$$

Πχ. για τον όρο  $A_{11}$  θα έχουμε:

$$A_{11} = 16t\bar{Q}_{11}^0 + 6t\bar{Q}_{11}^{90} = 16 \times 0.2 \times 40.47 + 6 \times 0.2 \times 8.09 = 192.14 \text{ kN/mm}$$

και με όμοιο τρόπο υπολογίζουμε και τους λοιπούς όρους  $A_{ij}$ . Έτσι συνολικά έχουμε

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 139.20 & 8.55 & 0 \\ 8.55 & 74.46 & 0 \\ 0 & 0 & 17.60 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix}$$

Αντιστρέφοντας την παραπάνω σχέση λαμβάνουμε

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.235 & -0.830 & 0 \\ 8.55 & 13.526 & 0 \\ 0 & 0 & 56.818 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix}$$

όπου οι όροι ενδιαφέροντος είναι οι:  $a_{11} = 7.235 \times 10^{-3} \text{ mm/kN}$  και  $a_{66} = 56.818 \times 10^{-3} \text{ mm/kN}$ .

Η ισοδύναμη αξονική δυσκαμψία  $EA$  της διατομής είναι

$$EA = \frac{2 \cdot b + h}{a_{11}} = \frac{2 \cdot 150 + 250}{0.007235} = 76022 \text{ kN}$$

Η ισοδύναμη καμπτική δυσκαμψία  $EI_y$  της διατομής είναι

$$EI_y = \left( \frac{b \cdot h^2}{2} + \frac{h^3}{12} \right) \frac{1}{a_{11}} = \left( \frac{150 \cdot 250^2}{2} + \frac{250^3}{12} \right) \frac{1}{0.007235} = 827896029 \text{ kNmm}^2$$

Η ισοδύναμη καμπτική δυσκαμψία  $EI_z$  της διατομής είναι

$$EI_z = \frac{2 \cdot b^3}{12} \cdot \frac{1}{a_{11}} = \frac{2 \cdot 150^3}{12} \cdot \frac{1}{0.007235} = 77750236 \text{ kNmm}^2$$

Η ισοδύναμη διατμητική δυσκαμψία  $GA_z$  της διατομής είναι

$$GA_z = \frac{h}{a_{66}} = \frac{250}{0.056818} = 4400 \text{ kN}$$

Η ισοδύναμη διατμητική δυσκαμψία  $GA_y$  της διατομής είναι

$$GA_y = \frac{2 \cdot b}{a_{66}} = \frac{2 \cdot 150}{0.056818} = 5280 \text{ kN}$$

Η ισοδύναμη στρεπτική δυσκαμψία  $GJ$  της διατομής είναι αμελητέα διότι πρόκειται για ανοικτή διατομή. Τα πέλματα και ο κορμός καταπονούνται ως πλάκες και συνεπώς απαιτείται ο υπολογισμός του όρου  $d_{66}$ . Τότε είναι

$$GJ = 4 \cdot \frac{2 \cdot b + h}{d_{66}}$$

Η ισοδύναμη δυσκαμψία στρέβλωσης  $EC_w$  της διατομής είναι

$$EC_w = \frac{b^3 h^2}{24 \cdot a_{11}} = \frac{150^3 \cdot 250^2}{24 \cdot 0.007235} = 1.2148 \cdot 10^{12} \text{ kNm}^4$$

Όταν η διατομή καταπονείται αξονικά ή καμπτικά, τα πέλματα και ο κορμός καταπονούνται μεμβρανικά με κατανεμημένη δύναμη  $N_x$  είτε εφελκυστική ή θλιπτική. Συνεπώς, επιλύονται τα εξής δύο προβλήματα:

1. Εφελκυστική  $N_x = 1.0 \text{ kN/mm}$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.235 & -0.830 & 0 \\ 8.55 & 13.526 & 0 \\ 0 & 0 & 56.818 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.007235 \\ -0.00083 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Οι τάσεις που αναπτύσσονται στις στρώσεις  $0^\circ$  είναι

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 40.47 & 1.94 & 0 \\ 1.94 & 8.09 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0.007235 \\ -0.00083 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.2911 \\ 0.0073 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ GPa}$$

Το κριτήριο μέγιστης τάσης δίνει συντελεστές ασφαλείας

$$\frac{1.0}{0.2911} = 3.43 \quad \frac{0.08}{0.0073} = 10.91$$

Οι τάσεις που αναπτύσσονται στις στρώσεις  $90^\circ$  είναι

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.09 & 1.94 & 0 \\ 1.94 & 40.47 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0.007235 \\ -0.00083 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.0569 \\ -0.0196 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ GPa}$$

Ο μετασχηματισμός των τάσεων στο σύστημα 1-2 δίνει

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -0.0196 \\ 0.0569 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ GPa}$$

Το κριτήριο μέγιστης τάσης δίνει συντελεστές ασφαλείας

$$\frac{-0.90}{-0.0196} = 46.03 \quad \frac{0.08}{0.0569} = 1.405$$

Συνεπώς, η μέγιστη εφελκυστική δύναμη που αντέχει μια διαστρωμάτωση είναι  $N_x = 1.405 \text{ kN/mm}$

2. Θλιπτική  $N_x = -1.0 \text{ kN/mm}$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.235 & -0.830 & 0 \\ 8.55 & 13.526 & 0 \\ 0 & 0 & 56.818 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \begin{Bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -0.007235 \\ 0.00083 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Οι τάσεις που αναπτύσσονται στις στρώσεις  $0^\circ$  είναι

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 40.47 & 1.94 & 0 \\ 1.94 & 8.09 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -0.007235 \\ 0.00083 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -0.2911 \\ -0.0073 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ GPa}$$

Το κριτήριο μέγιστης τάσης δίνει συντελεστές ασφαλείας

$$\frac{0.90}{0.2911} = 3.09 \quad \frac{-0.24}{-0.0073} = 32.73$$

Οι τάσεις που αναπτύσσονται στις στρώσεις  $90^\circ$  είναι

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.09 & 1.94 & 0 \\ 1.94 & 40.47 & 0 \\ 0 & 0 & 4.0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -0.007235 \\ 0.00083 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -0.0569 \\ 0.0196 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ GPa}$$

Ο μετασχηματισμός των τάσεων στο σύστημα 1-2 δίνει

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.0196 \\ -0.0569 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ GPa}$$

Το κριτήριο μέγιστης τάσης δίνει συντελεστές ασφαλείας

$$\frac{1}{0.0196} = 51.15 \quad \frac{-0.24}{-0.0569} = 4.21$$

Συνεπώς, η μέγιστη θλιπτική δύναμη που αντέχει μια διαστρωμάτωση είναι

$$N_x = 3.09 \text{ kN/mm}$$

Άρα όλη διατομή αντέχει θλιπτική δύναμη

$$N = (2 \cdot b + h) N_x = (2 \cdot 150 + 250) \cdot 3.09 = 1699.5 \text{ kN}$$

Όταν η διατομή κάμπτεται, αστοχία συμβαίνει πρώτα στο εφελκόμενο πέλαμα στη στρώση  $90^\circ$  και οι ροπές αντοχής είναι

$$M_y = (b \cdot h + \frac{h^2}{6}) \cdot N_x = (150 \cdot 250 + \frac{250^2}{6}) \cdot 1.405 = 67323 \text{ kNmm} = 67.32 \text{ kNm}$$

$$M_z = \frac{2 \cdot b^2}{6} \cdot N_x = \frac{2 \cdot 150^2}{6} \cdot 1.405 = 10538 \text{ kNmm} = 10.54 \text{ kNm}$$

Άρα το κατάστρωμα επαρκεί σε κάμψη.

#### 4.1.11 Έλεγχος διατομής διαγωνίου διπλού ταν σε θλίψη

Ιδιότητες διατομής :  $a_{11} = 0.007235$ ,  $a_{66} = 0.056818$ ,  $d_{66} = 0.035211$ .

Η ισοδύναμη αξονική δυσκαμψία  $\overline{EA}$  της διατομής είναι

$$\overline{EA} = \frac{2 \cdot b + h}{a_{11}} = \frac{2 \cdot 150 + 250}{0.007235} = 76022 \text{ kN}$$

Η ισοδύναμη καμπτική δυσκαμψία  $\overline{EI}_y$  της διατομής είναι

$$\overline{EI}_y = \left( \frac{b \cdot h^2}{2} + \frac{h^3}{12} \right) \frac{1}{a_{11}} = \left( \frac{150 \cdot 250^2}{2} + \frac{250^3}{12} \right) \frac{1}{0.007235} = 827896029 \text{ kNmm}^2$$

Η ισοδύναμη καμπτική δυσκαμψία  $\overline{EI}_z$  της διατομής είναι

$$\overline{EI}_z = \frac{2 \cdot b^3}{12} \cdot \frac{1}{a_{11}} = \frac{2 \cdot 150^3}{12} \cdot \frac{1}{0.007235} = 77750236 \text{ kNmm}^2$$

Η ισοδύναμη στρεπτική δυσκαμψία  $\overline{GJ}$  της διατομής είναι

$$\overline{GJ} = 4 \cdot \frac{2 \cdot b + h}{d_{66}} = 4 \cdot \frac{2 \cdot 150 + 250}{0.035211} = 62480 \text{ kNmm}^2$$

Η ισοδύναμη δυσκαμψία στρέβλωσης  $\overline{EC}_w$  της διατομής είναι

$$\overline{EC}_w = \frac{b^3 h^2}{24 \cdot a_{11}} = \frac{150^3 \cdot 250^2}{24 \cdot 0.007235} = 1.2148 \cdot 10^{12} \text{ kNmm}^4$$

Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού του στύλου περί τον ισχυρό άξονα y-y είναι

$$P_{cr,y} = \frac{\pi^2 \overline{EI}_y}{L^2} = \frac{3.14^2 \cdot 827896029}{3000^2} = 907.88 \text{ kN}$$

Το κρίσιμο φορτίο λυγισμού του στύλου περί τον ασθενή άξονα z-z είναι

$$P_{cr,z} = \frac{\pi^2 \overline{EI}_z}{\ell^2} = \frac{3.14^2 \cdot 77750236}{3000^2} = 85.26 \text{ kN}$$

Η πολική ακτίνα  $i_w$  αδρανείας της διατομής είναι

$$i_w^2 = \frac{\overline{EI}_y + \overline{EI}_z}{EA} = \frac{827896029 + 77750236}{76022} = 11913 \text{ mm}^2$$

ήτοι  $i_w = 109.15 \text{ mm}$ . Το κρίσιμο φορτίο στρεπτικού λυγισμού λόγω στρέβλωσης είναι

$$\overline{N}_{cr,w} = \frac{1}{i_w^2} \frac{\pi^2 \overline{EC}_w}{(k_w L)^2} = \frac{1}{11913} \frac{\pi^2 \cdot 1.2148 \cdot 10^{12}}{3000^2} = 111.82 \text{ kN}$$

ενώ το κρίσιμο φορτίο στρεπτικού λυγισμού συνυπολογιζόμενης της καθαρής στρέψης είναι

$$\overline{N}_{cr,xT} = \overline{N}_{cr,w} + \frac{1}{i_w^2} \overline{GJ} = 111.82 + \frac{62480}{11913} = 112.34 \text{ kN}$$

Οπότε η διατομή επαρκεί έναντι των ασκούμενων θλιπτικών φορτίων.

#### **4.1.12 Κατασκευή – Ανέγερση**

Ένα συγκριτικό πλεονέκτημα των γεφυρών από FRP είναι η δυνατότητα συναρμολόγησης της κατασκευής μέσα σε λίγες ώρες.

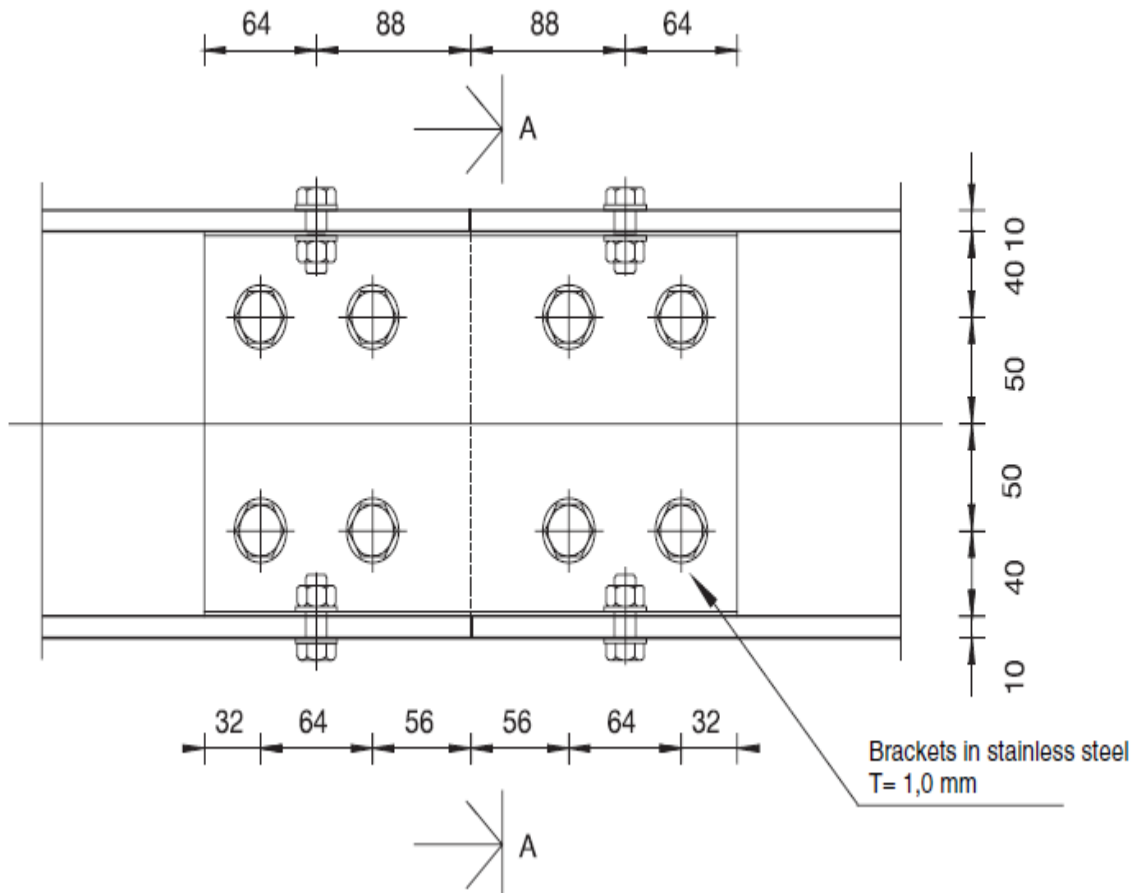
Οι κοχλίες που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατηγορίας C προεντεταμένοι, ανθεκτικοί σε ολίσθηση στην οριακή κατάσταση αστοχίας, ποιότητας 8.8 διατομής M20 στον κορμό και M16 στα πέλματα. Οι επιφάνειες επαφής θεωρήθηκαν συντηρητικά κατηγορίας B, γαλβανισμένες, με συντελεστή ολίσθησης  $\mu = 0.4$ .

Ο Ευρωκώδικας 3 προβλέπει ειδικές απαιτήσεις για κοχλιωτές συνδέσεις σε γέφυρες ( Μέρος 1.1, Κεφ. 6 ).

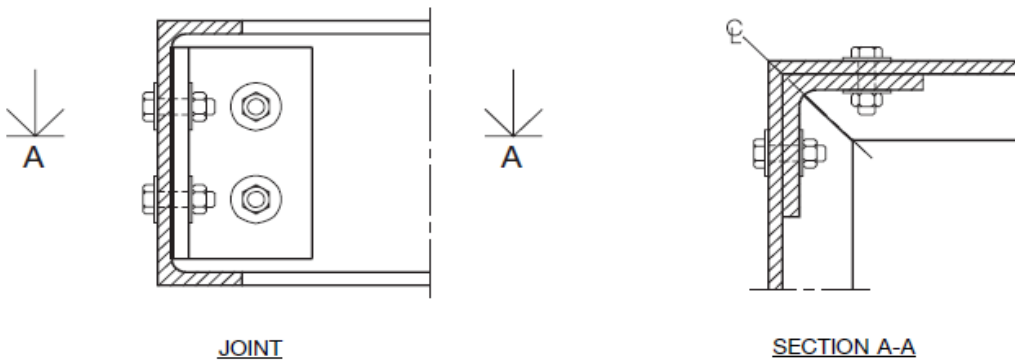
Οι αποστάσεις μεταξύ του κέντρου της οπής και των πλησιέστερων άκρων του ελάσματος πρέπει να ανήκουν στα διαστήματα :  $1.5d_0 < e_1$  ,  $e_2 < 125 \text{ mm}$  ή  $8t$  , ενώ για τις αποστάσεις μεταξύ των κέντρων των οπών ισχύουν οι τιμές :

$$2.5d_0 < p_1, p_2 < 175 \text{ mm ή } 14t_{\text{min}}$$

Tensile strength can be increased considerably by these 4x12 M12 bolts



Σχήμα 4.19. Αποκατάσταση συνέχειας κύριων δοκών



Σχήμα 4.20 Ενδεικτική Σύνδεση κύριας δοκού διαδοκίδας

## 4.2 Μοντέλο με γάλυβα

## 4.2.1 Υλικό

### Παραδοχές φορτίων και υλικών

Πίνακας 3.2. Χαρακτηριστικά Χάλυβα S355 N/NL

Ειδικό βάρος ( $\gamma$ )	78.5 KN/m <sup>3</sup>
Συντελεστής Poisson ( $\nu$ )	0.3
Μέτρο ελαστικότητας ( $E$ )	21000 KN/cm <sup>2</sup>
Μέτρο Διάτμησης ( $G$ )	8077 KN/cm <sup>2</sup>
Ειδική θερμότητα ( $c$ )	0.6 J/gK
Θερμική αγωγιμότητα ( $k$ )	45.0 W/mK
Αντοχή διαρροής ( $f_t$ )	49.0 KN/cm <sup>2</sup>
Οριακή αντοχή ( $f_w$ )	35.5 KN/cm <sup>2</sup>

Πίνακας 3.3. Παραδοχές φορτίων που θα καταπονήσουν την κατασκευή

Ιδία βάρη μεταλλικών διατομών	Υπολογίζεται από το ειδικό βάρος του χάλυβα 78.5 KN/m <sup>3</sup>
Ιδίο βάρος επικαλύψεων	1.0 KN/m <sup>2</sup>
Ιδίο βάρος κτηκιδωμάτων	1.0 KN/m
Ομοιόμορφο διανεμημένο φορτίο ανθρωποσυνοπισμού	5.0 KN/m <sup>2</sup>
Οριζόντιο διανεμημένο φορτίο ίσο με το 10% του κατακόρυφου	0.5 KN/m <sup>2</sup>
Συγκεντρωμένο φορτίο για γενικές και τοπικές επιδράσεις	10 KN
Δράσεις Ανέμου κατά τις 3 διευθύνσεις	$F_x=1.367$ KN/m <sup>2</sup> , $F_y=0.346$ ή $F_y=0.684$ KN/m <sup>2</sup> , $F_z=0.538$ KN/m <sup>2</sup>
Φορτίο Χιονιού	0.7 KN/m <sup>2</sup>
Θερμοκρασιακές μεταβολές	Ομοιόμορφη ( $\Delta T = 53, -38$ ), Γραμμική περί τον $z'z'$ ( $\Delta T_{M_{\text{τοίχου}}, M_{\text{περ}}}=18, -13$ )
Σεισμικές Δράσεις κατά τις 3 διευθύνσεις	Έδαφος Β, $\gamma=1.00$ , $S_{\text{σειζόνια, κατακόρυφη}}=1.2, 1.0$ $q_{\text{σειζόνια, κατακόρυφη}}=1.5, 1.0$ , $\zeta=5\%$ , $a_{\text{σεξόνια, κατακόρυφη}}=0.160g, 0.112g$ $g=9.81\text{m/s}^2$ , $n=1.0$ $E=\max(1.0E_x+0.3E_y+0.3E_z; 0.3E_x+1.0E_y+0.3E_z; 0.3E_x+0.3E_y+1.0E_z)$

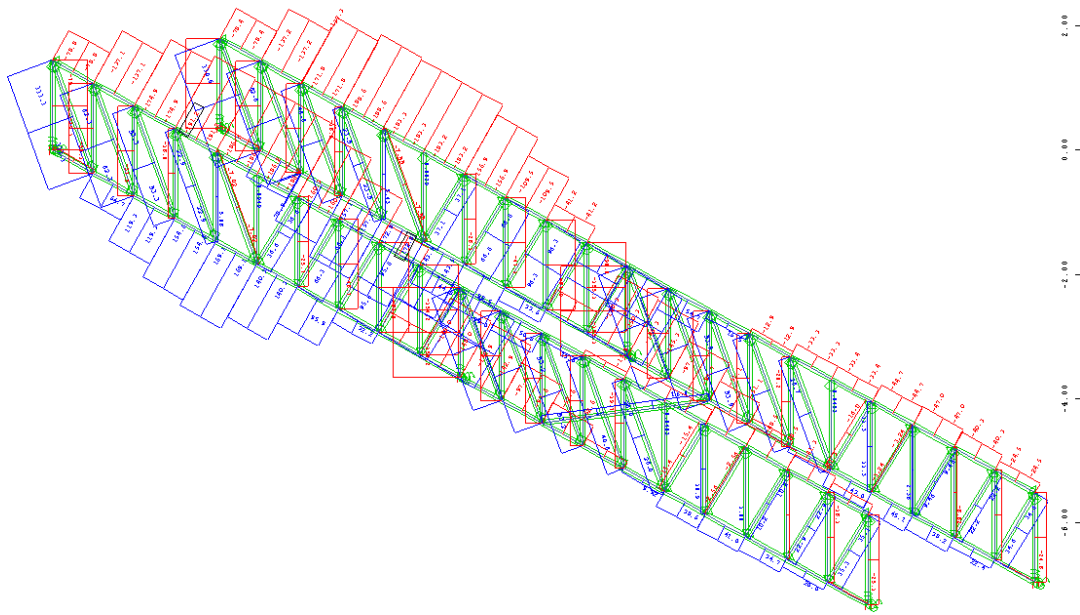
## 4.2.2 Εντατικά μεγέθη επί της γέφυρας

Με βάση τους συνδυασμούς δράσεων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα προκύπτουν τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη στο WINGRAF.

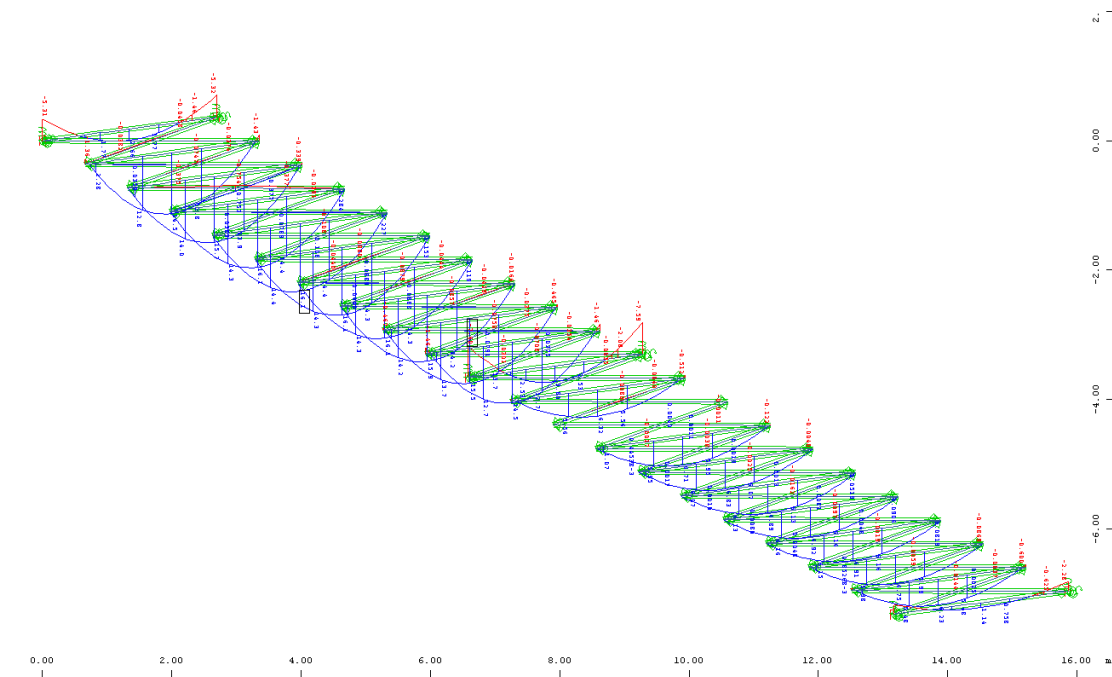
Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη.

Το δυσμενέστερο μέγεθος ροπής στη διαδοκίδα,  $M_y=16,2$  προκύπτει από το LOADCASE (1016),

Το δυσμενέστερο μέγεθος αξονικής στις κύριες δοκούς προκύπτει από το LOADCASE(1017) Με μέγιστη θλιπτική δύναμη  $N=-191.1$  KN και μέγιστη εφελκυστική  $N=172.8$  KN στις ανω και κάτω αντίστοιχα ~~ισ~~ το δυσμενέστερο μέγεθος τέμνουσας  $V_y=34.7$  KN από το LOADCASE (1017)



Εικόνα 4.4 Διάγραμμα ροπών στο LOADCASE 1017

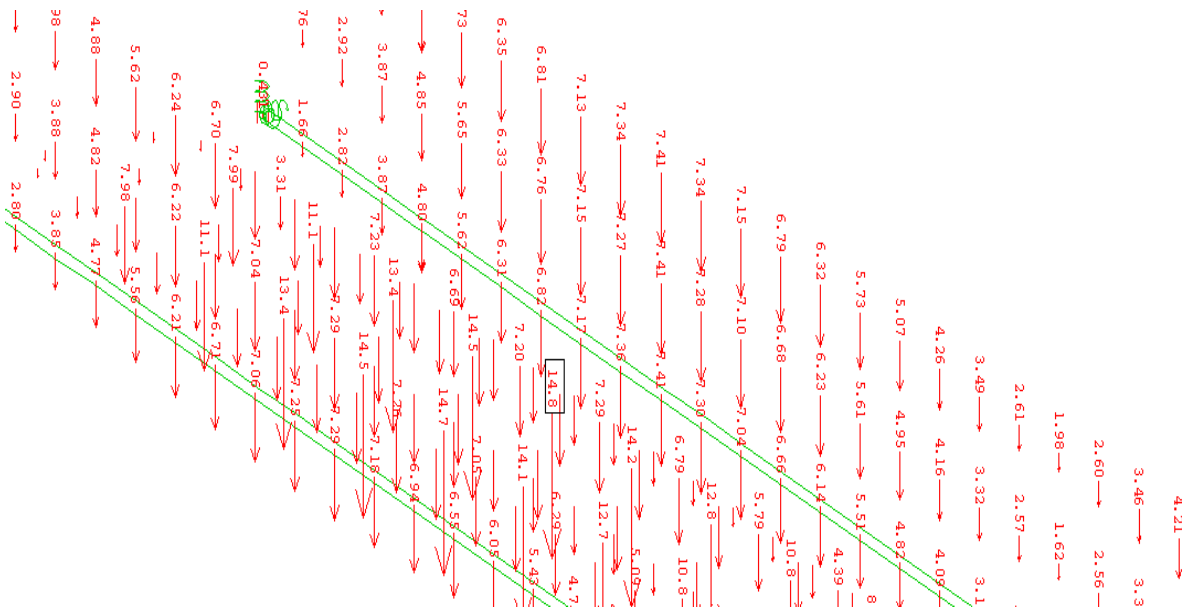


Εικόνα 4.5 Διάγραμμα ροπών διαδοκίδων στο LOADCASE 1017

### 4.2.3 Έλεγχος σε λειτουργικότητα

Τα βέλη του φορέα υπολογίζονται με βάση την ελαστική ανάλυση και θα πρέπει να περιορίζονται στο βαθμό που δεν επηρεάζουν την εμφάνιση αλλά και τη λειτουργικότητα του έργου ή δεν προκαλούν βλάβες σε μη φέροντα στοιχεία. Τα βέλη λόγω των φορτίων λειτουργικότητας θα πρέπει να περιορίζονται σε κάποια επιτρεπόμενη από τον κανονισμό τιμή, συνήθως  $1/250$  του μήκους του ανοίγματος. Από το πρόγραμμα ανάλυσης προκύπτει το μέγιστο βέλος κατά τη λειτουργικότητα, ίσο με:  $5,6 \text{ mm}$  στις κύριες δοκούς  $< L/250=120 \text{ mm}$

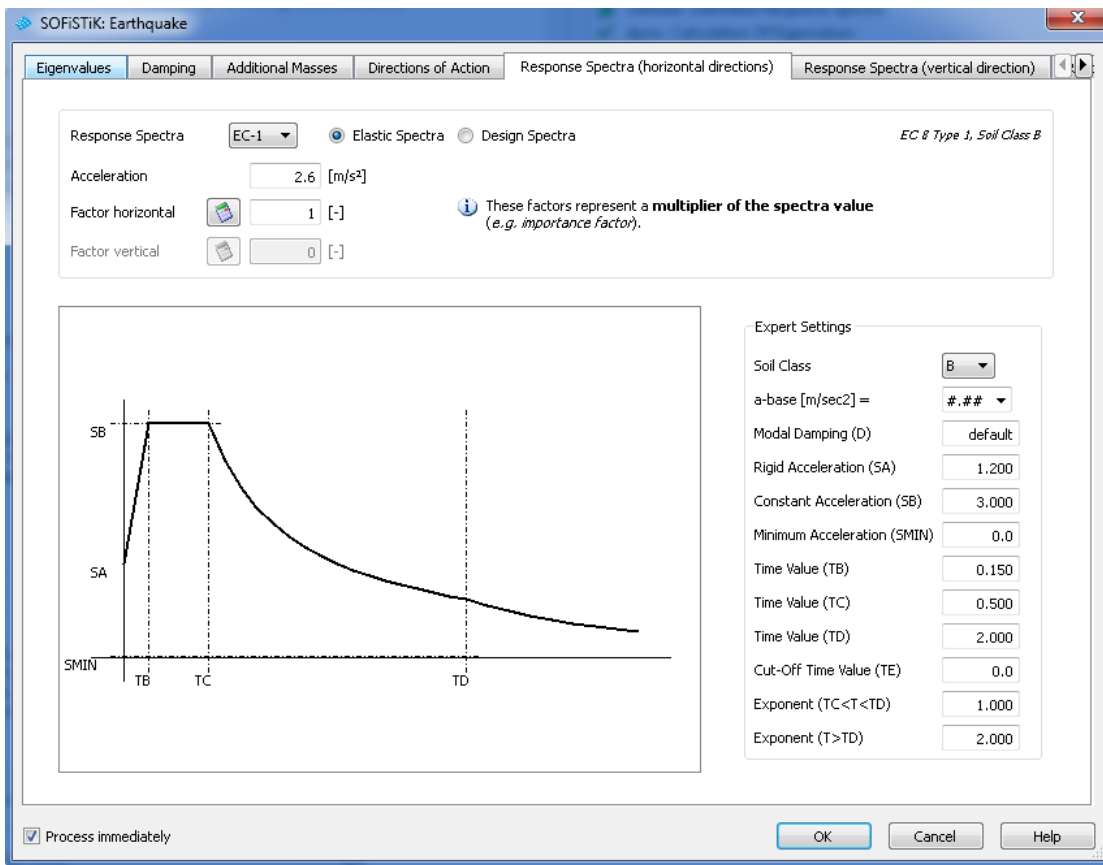
Επομένως ο έλεγχος ικανοποιείται.



Εικόνα 4.5 Βέλη στην κατάσταση λειτουργικότητας στο LOADCASE 1015

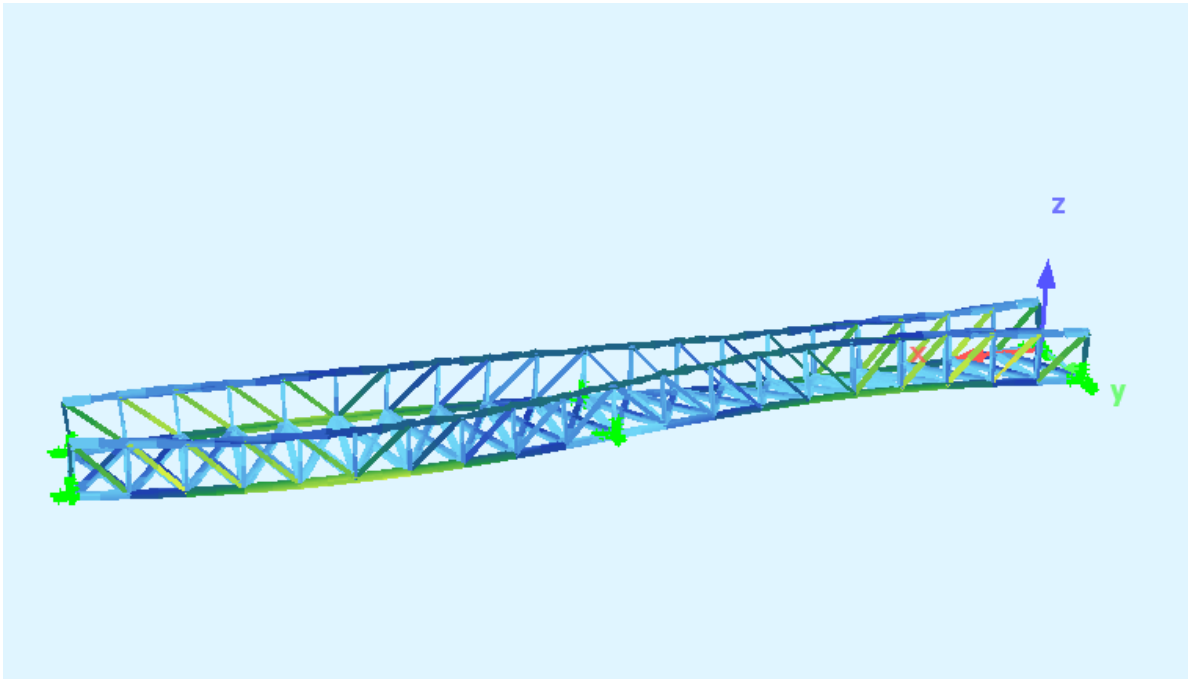
#### 4.2.4 Έλεγχος σε σεισμό

Για τον έλεγχο της γέφυρας σε σεισμικές δράσεις εισήχθησαν στο πρόγραμμα Earthquake τα δεδομένα του σειμούσχεδιασμού ως μάζα οι δράσεις του σεισμικού συνδυασμού (1010) και (1011) και εξήχθησαν οι ιδιομορφές του σεισμού.

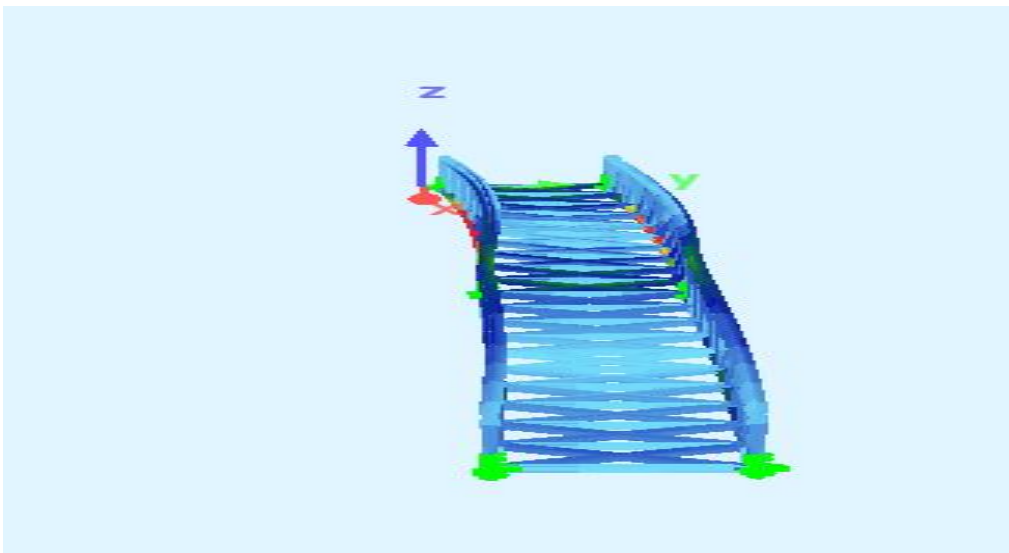


Εικόνα 4.7 Εισαγωγή δεδομένων σεισμικού φάσματος στο Sofistik Earthquake

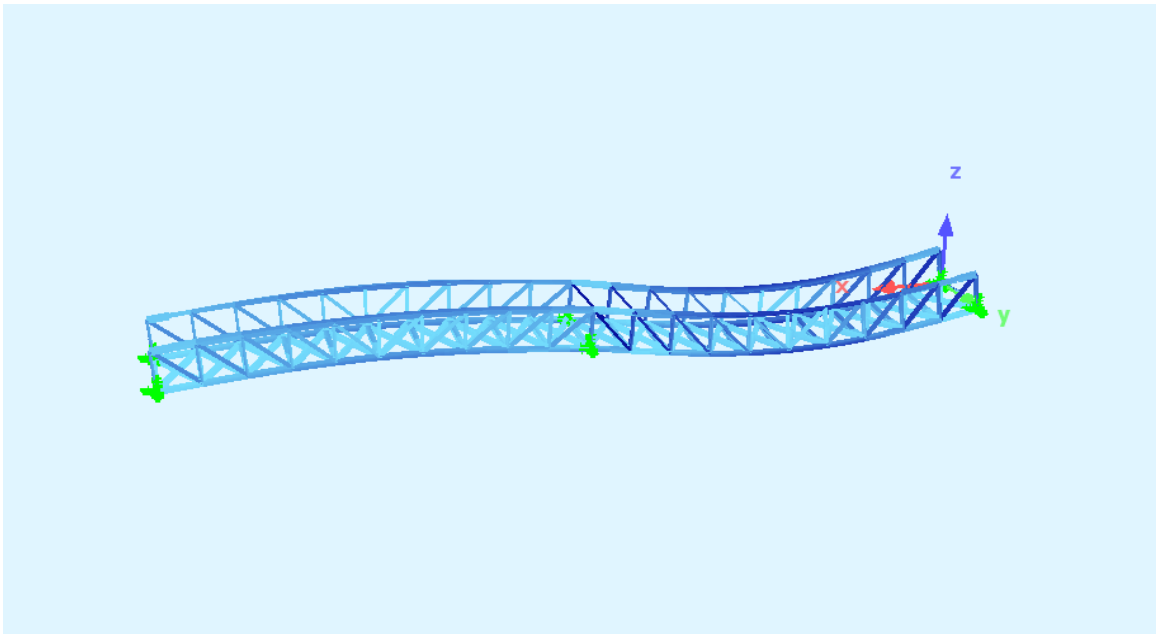




Εικόνα 4.5 καμπτική ιδιομορφή  $f=4,621$  Hz

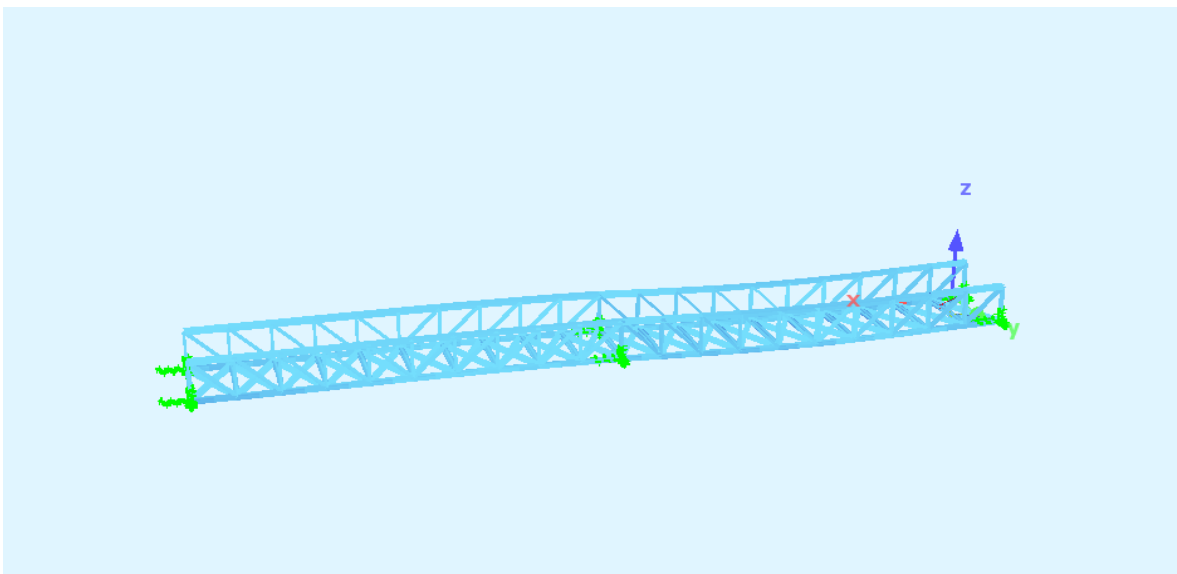


Εικόνα 4.10 Μετακινησιακή διομορφή κατά  $y$   $f=3,291$  Hz



Εικόνα 4.11 Μετακινισιακή

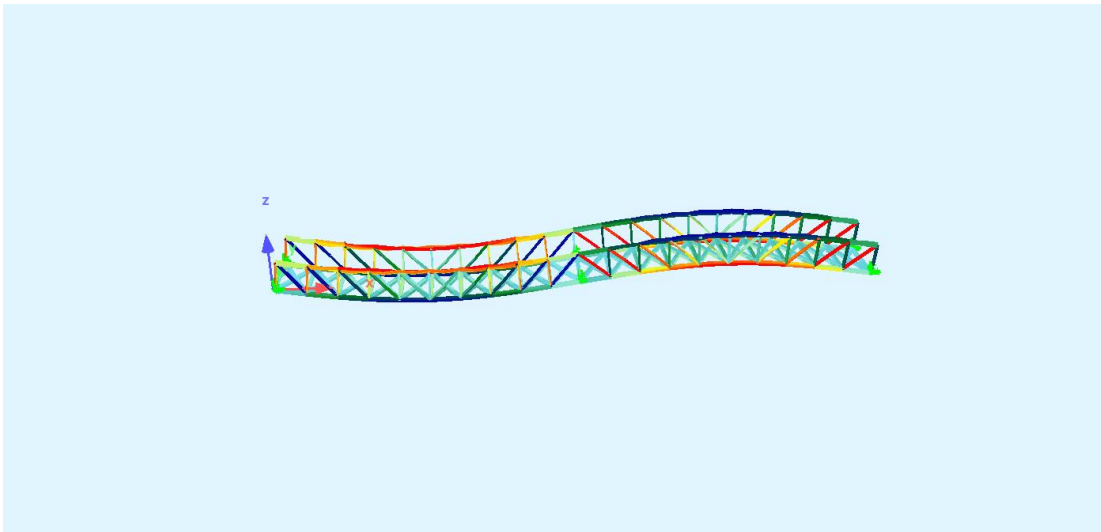
Ιδιομορφή κατά z .  $f=7,009$  Hz



Εικόνα 4.20 Μετακινισιακή Ιδιομορφή κατά x.  $f=3,219$  Hz

#### **4.2.5 Έλεγχος σε ανθρωποσυντονισμό**

Για τον έλεγχο της γέφυρας σε ανθρωποσυντονισμό χρησιμοποιείται η θεμελιώδης ιδιομορφή όπως προκύπτει από το Task Eigenvalues για το Loadcase (1016)  
 $f=3.712$



Εικόνα 4.6 Θεμελιώδης Ιδιομορφή φορέα

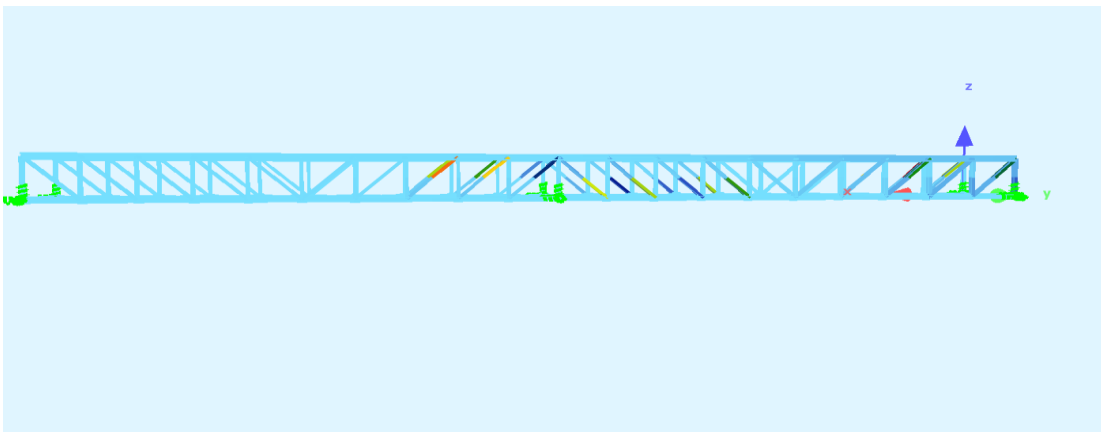
Από το συνολικό βάρος της γέφυρας είναι:

$W = 270 \text{ KN}$  Από τον πίνακα 1 λαμβάνουμε για υπαίθριες πεζογέφυρες  $\beta = 0.01$  και έχουμε  $\beta W = \text{KN}$   
 Η σχέση 1 με  $f_n = f = 3,712 \text{ Hz}$  και  $P_0 = 0,41 \text{ KN}$  μας δίδει :

$$\frac{\alpha_p}{g} = \frac{P_0 e^{-0.35f_n}}{\beta W} = 0,0183$$

Βάση του Πίνακα 1, το όριο είναι  $5\%g$  για υπαίθριες πεζογέφυρες και αποδεκτό.

#### 4.2.6 Έλεγχος σε λυγισμό ορθοστατών και διαγωνίων



Ιδιομορφή λυγισμού στο BUCKLING EIGENVALUES

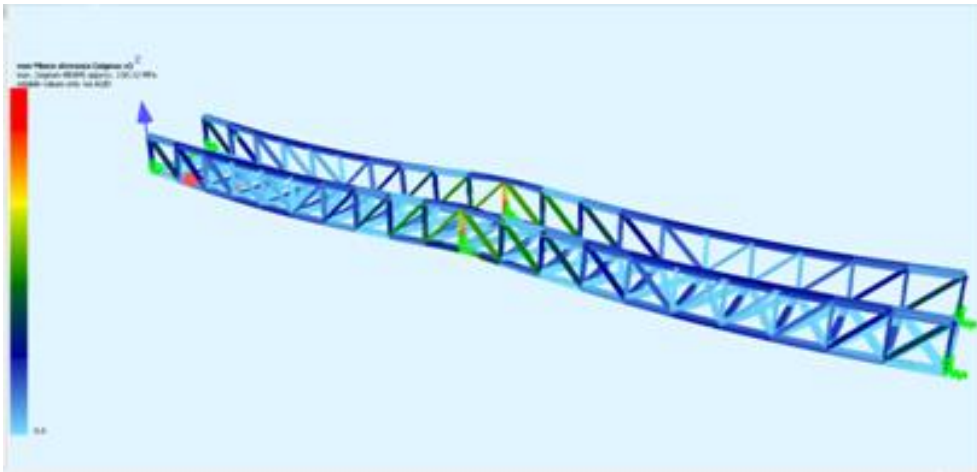
Από το Sofistik έχουμε συντ.  $\alpha_{ult} = 16.67 \%$

$\lambda = 2.56$  ,  $\chi = 0.15$

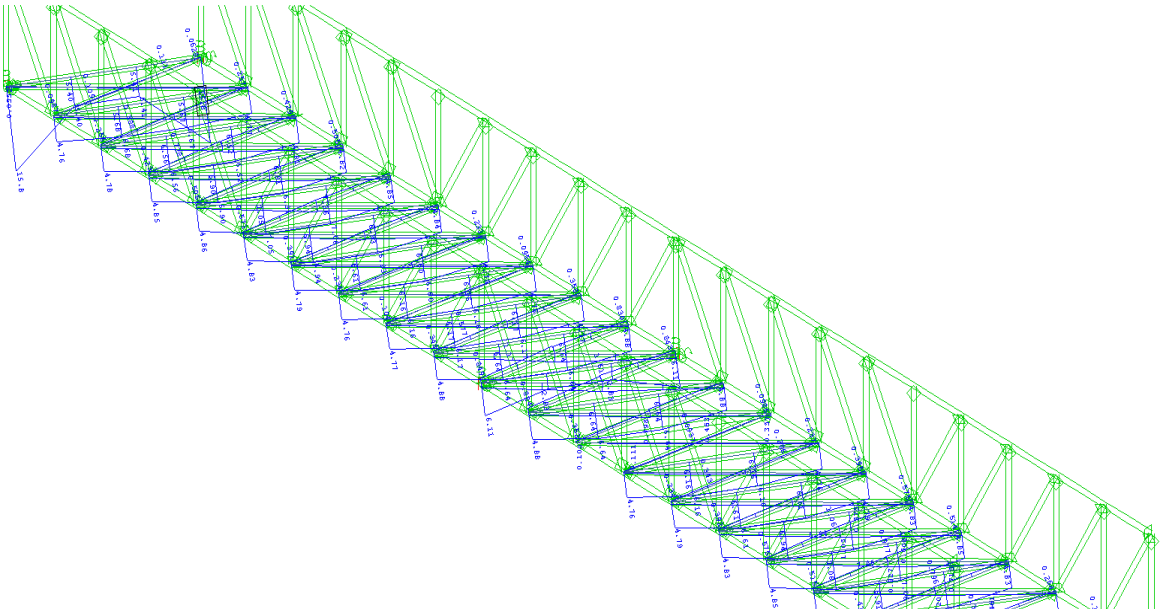
έλεγχος :  $\chi^* \alpha_{ult} / \gamma M1 = 2.27 > 1$  ☒ Άρα ο έλεγχος ικανοποιείται.

#### 4.2.7 Έλεγχος τάσεων

Έγινε έλεγχος τάσεων της γέφυρας υπό τα φορτία της όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και είναι επαρκής και οι μέγιστες θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις είναι  $-35,4$  και  $34$  αντοίσιχα.



Εικόνα 4.10 Τάσεις υπό τα φορτία της γέφυρας



Εικόνα 4.11 Διάγραμμα τάσεων γέφυρας

#### 4.2.8 Έλεγχος εφεδράνων

Τα ελαστομερή εφεδράνα τα οποία αναλαμβάνουν σεισμικές δράσεις πρέπει να διαθέτουν απαραίτητως ενσωματωμένες πλάκες ενίσχυσης (ελαστομεταλλικά εφεδράνα) και οι τιμές των χαρακτηριστικών τους να είναι οι εξής:

- Απόσβεση : 5%
- Μέτρο Διάτμησης για  $\gamma_{sd} \leq 1,2$  :  $G = 1,2 \text{ N/mm}^2$
- αυξανόμενο γραμμικά μέχρι  $\gamma_{sd} = 2,0$  σε :  $G = 1,6 \text{ N/mm}^2$

- Μήκυνση Θραύσης :  $\gamma_{bu} = 5,0$

Επιλέγονται ελαστομεταλλικά εφεδράνα 600\*600 με 12 στρώσεις ελαστομερούς πάχους 16 mm το καθένα.

Μηχανικά χαρακτηριστικά

μέτρο ελαστικότητας :  $E=58.59\text{KN}[(\text{cm})]^2$

μέτρο διάτμησης :  $G=0.1\text{KN}[(\text{cm})]^2$

μέγιστη επιτρεπόμενη θλιπτική τάση :  $\max \sigma=1.50\text{KN}[(\text{cm})]^2$

Προσομοίωση εφεδρανών

Σταθερές ελατηρίων κατά x και κατά y.

$c_x=c_y=(a*b*G)/t=(60*60*0,1)/(12*1,6)=1875\text{kn/m}$

Αποτελέσματα από το sofistik για το σεισμικό συνδυασμό

$\delta_x=21,29\text{ cm}$

$\delta_y=21,75\text{ cm}$

$d_{ed}=\sqrt{((21,29)^2+(21,75)^2)}=30,44\text{ cm}$

Έλεγχος διατμητικής παραμόρφωσης εφεδράνου

Ανηγγόμενη διατμητική παραμόρφωση λόγω σεισμού

$e_{s,d}=30,44/(12*1,6)=1,59 < 2$

Διατμητική ανηγμένη παραμόρφωση λόγω θλίψης

Μέγιστη αξονική δύναμη στο εφεδράνο από το σεισμικό συνδυασμό

$N_{ed}=1526\text{ Kn}$

Συντελεστής σχήματος εφεδράνου

$S=(a*b)/(2*((60+60)*1,6))=9,375$

Έλεγχος ορθής τάσης.

Ενεργός επιφάνεια εφεδράνου

$\delta_{x\max}=212,9\text{ mm}$

$\delta_{y\max}=217,5\text{ mm}$

$A_r=(60-21,75)*(60-21,29)=1480\text{ cm}^2$

$\sigma_c=1526/1480=1,03 < \max \sigma_c=1,5\text{ kn/cm}^2$

$e_{c,d}=1,5*1,03/(9,37*0,1)=1,648$

Μέγιστη ισοδύναμη διατμητική παραμόρφωση

$e_{b,d}=e_{c,d}+e_{s,d}=3,22 < e_{u,k}/\gamma_{\mu}=7/1,15=6,09$

Έλεγχος ολίσθησης εφεδράνου

$\sigma_e=1,03 < 2*60*0,1*9,375/(3*19,2)=1,95\text{ kN/cm}^2$

Το εφεδράνο

δεν

ολισθαίνει.

### 4.3 Σύγκριση των δύο μοντέλων

Ο λόγος της επιλογής των ινοπλισμένων πολυμερών σαν υλικό ήταν η αναμενόμενη υπεροχή του σε σχέση με τα παραδοσιακά υλικά και ειδικά με το χάλυβα. Στο κεφάλαιο αυτό ο η σχεδίαση εξ ολοκλήρου με FRP συγκρίνεται με τη σχεδίαση με χάλυβα. Συγκρίνοντας τις δύο κατασκευές από άποψη στατικής συμπεριφοράς, χρήσης υλικού και κατασκευασιμότητας μπορούμε να κάνουμε μία ακριβή εκτίμηση της πρόσθετης αξίας της σχεδίασης με ινοπλισμένα πολυμερή.

#### **Συγκριση βελών στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας**

<b>Είδος γέφυρας</b>	<b>Βέλος</b>
<b>Εξ ολοκλήρου από Ινοπλισμένα Πολυμερή</b>	<b>24,3</b>
<b>Εξ ολοκλήρου από χάλυβα</b>	<b>7,6</b>

Στον επόμενο πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις τάσεις στις δύο κατασκευές. Και στις δύο περιπτώσεις οι τάσεις είναι αρκετά μέσα στα όρια των αντοχών τους. Ωστόσο η θλιπτική και εφελκυστική αντοχή του E-glass είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα, 600 και 1060 αντίστοιχα ενώ του χάλυβα μόλις 355 N/mm<sup>2</sup>. Μπορούμε έτσι να συμπεράνουμε ότι η αναλογία φόρτισης είναι πολύ μικρότερη για το FRP. Επιπλέον η σχεδίαση με FRP δίνει 62,5 % χαμηλότερες τάσεις.

#### Σύγκριση αναπτυσσόμενων τάσεων

<b>Είδος γέφυρας</b>	<b>Μέγιστη αναπτυσσόμενη εφελκυστική τάση (MPa)</b>	<b>Μέγιστη αναπτυσσόμενη θλιπτική τάση (MPa)</b>
<b>Εξ ολοκλήρου από Ινοπλισμένα Πολυμερή</b>	<b><u>15,8</u></b>	<b><u>-15,5</u></b>
<b>Εξ ολοκλήρου από χάλυβα</b>	<b><u>34,4</u></b>	<b><u>-34,5</u></b>

### Σύγκριση βάρους των δύο κατασκευών

<b>Είδος γέφυρας</b>	<b><u>Βάρος</u></b>
<b>Εξ ολοκλήρου από Ινοπλισμένα Πολυμερή</b>	<b><u>60 KN</u></b>
<b>Εξ ολοκλήρου από χάλυβα</b>	<b><u>267 KN</u></b>

Όταν το βάρος της γέφυρας λαμβάνεται υπόψη γίνεται εμφανές ότι η γέφυρα εξ ολοκλήρου από FRP είναι πολύ πιο ελαφριά περίπου 4 φορές πιο ελαφριά.

Στη συνέχεια γίνεται μία σύγκριση των ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής . Συγκρίνονται οι 4 βασικές ιδιομορφές .

### Σύγκριση Ιδιομορφών

<b>Είδος γέφυρας</b>	<b><u>Καμπτική ιδιομορφή</u></b>	<b><u>Μετακινισιακή κατά y</u></b>	<b><u>Μετακινισιακή κατά z</u></b>
<b>Εξ ολοκλήρου από Ινοπλισμένα Πολυμερή</b>	<b><u>4,695</u></b>	<b><u>3,656</u></b>	<b><u>3,908</u></b>
<b>Εξ ολοκλήρου από χάλυβα</b>	<b><u>3,896</u></b>	<b><u>3,291</u></b>	<b><u>7,009</u></b>

## **Συμπεράσματα από τη Σύγκριση**

Έχοντας συγκρίνει τις δύο κατασκευές καταλήγουμε ότι έχουν αρκετά παρόμοιες συμπεριφορές σε αρκετά σημεία. Οι συνολικές παραμορφώσεις είναι αρκετά μεγαλύτερες στη γέφυρα από σύνθετο υλικό κάτι που της δίνει ένα προβάδισμα στο χάλυβα.

Ωστόσο σε ότι αφορά στην αξονική καταπόνηση οι τάσεις του σύνθετου υλικού είναι εμφανώς μικρότερες. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αυτό είναι ένα πραγματικό πλεονέκτημα των FRP

Η δυναμική συμπεριφορά των δύο κατασκευών είναι επίσης αρκετά παρόμοια ενώ δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα καθώς μεταβάλλοντα τόσο η μάζα όσο και η δυσκαμψία.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των FRP είναι το συνολικό βάρος όπου η γέφυρα από FRP είναι 4 φορές πιο ελαφριά, γεγονός το οποίο από μόνο του αποτελεί σημαντικό παράγοντα στο να επιλέξουμε το FRP σαν δομικό υλικό.

Ωστόσο η μελέτη ανέδειξε και κάποια μειονεκτήματα των FRP όπως το αρχικό κόστος, αλλά και το κόστος των συνδέσεων που είναι πιο περίπλοκες, δαπανηρές και χρονοβόρες.

Κι αυτό γιατί Υπάρχει πολύ μεγαλύτερη εμπειρία στην παραγωγή συνδέσεων CHS στο χάλυβα απ ότι στο FRP.

Καταλήγοντας δεν υπάρχει αμφιβολία ότι τα σύνθετα υλικά αποτελούν ένα προνομιούχο κατασκευαστικό υλικό ικανό να αντικαταστήσει τα παραδοσικά υλικά και κυρίως το χάλυβα στη γεφυροποιία.

## **Βιβλιογραφία**



1. Barker C., Mackenzie D. (2008). “Calibration of the UK national Annex. “ Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference of footbridges, Porto, Portugal.
2. Chopra A. (2007). “Dynamics of structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering, 3<sup>rd</sup> edition”, by Pearson Education Inc., New Jersey.
3. Van den Broeck P., Van Nimmen K., Gezels B., Reynders E., De Roeck G. (2011) “ Measurement and simulation of the human-induced vibration of a footbridge.” Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2011, Leuven, Belgium.
4. Zivanovic M., Pavic A. (2011). “Dynamic response of footbridges due to vertical load models of pedestrians.” Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2011, Leuven, Belgium.
5. Βάγιας Ι. (2003). « Σιδηρές κατασκευές – Ανάλυση και διαστασιολόγηση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
6. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2005). « Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, 2<sup>η</sup> έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
7. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (1999). «Σιδηρές κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος ΙΙ». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
8. Βάγιας Ι., Ηλιόπουλος Α. (2006). «Σύμμικτες γέφυρες», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
9. Γκάνης Ν., Δημάκης Ν., Καραγκιοζόπουλος Γ., Σακελλάρης Μ., Χρυσανθόπουλος Α. (2008). « Το θεωρητικό υπόβαθρο του σχεδιασμού - Εφαρμογή σε συνήθεις φορείς.» Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα
10. Ερμόπουλος Ι. (2005). « Ευρωκώδικας 1, 2<sup>η</sup> έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
11. Ερμόπουλος Ι. (2008). « Σιδηρές και σύμμικτες γέφυρες. Ανάλυση και διαστασιολόγηση σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες 1 έως 8, 2<sup>η</sup> έκδοση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
12. Μιχάλτσος Γ. (2005). « Προβλήματα δυναμικής των σιδηρών γεφυρών». Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
13. Μιχάλτσος Γ. (2008). « Ελαφρές μεταλλικές κατασκευές. Μέθοδοι υπολογισμού, 2<sup>η</sup> έκδοση», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
14. Μιχάλτσος Γ. (2009). « Ελαφρές μεταλλικές κατασκευές. Θεωρία και εφαρμογές, 3<sup>η</sup> έκδοση», Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
15. Παπαζάχος Β., Καρακαϊσής Γ., Χατζηδημητρίου Π. (2005). « Εισαγωγή στη σεισμολογία». Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
16. Το φωτογραφικό υλικό είναι αποτέλεσμα διαδικτυακής έρευνας καθώς και υλικό από προσωπικό αρχείο.
17. ASCE Committee on Composite Construction Task Group on Steel-FRP Composite Construction STEEL-FRP ‘COMPOSITE STRUCTURAL AASHTO(2013). Aashto lrfd bridge design specifications. Technical report, American Association of State
18. Highway and Transportation Officials.
19. Adams, R. and Maheri, M. (2003). Damping in advanced polymer-matrix composites. Journal of Alloys

20. and Compounds.
21. Adams, W. (1987). State of the art hydraulic systems for movable bridges.
22. Aseff, G. V. (1987). Corrosion mechanisms in the deterioration of exposed bridge steel.
23. Bai, Y. and Keller, T. (2008). Modal parameter identification for a gFRP pedestrian bridge. *Composite Structures*.
24. Barefoot, G. (2007). Preserving history: Composites breathe new life into barbados landmark. *Composites Manufacturing*.
25. Campbell, F. (2010). *Structural Composite Materials*. ASM International.
26. Carlsson, L. and Kardomateas, G. (2011). *Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites*.
27. Clarke, J. L. (1996). *Structural Design of Polymer Composites - EUROCOMP Design Code and Handbook*.
28. E&FN Spon.
29. Coates, A. C. and Bluni, S. A. (2004). Movable bridge design. *STRUCTURE* magazine.
30. Compoengineering Inc. (2013). Esacomp material database.
31. Cragg, R. L. (1987). Trunnion bascule bridge static stabilizing systems.
32. Cragg, R. L. (2004). Energy absorbing live load shoes and anchorages for bascule bridges.
33. Creative Pultrusions Inc. (2004). *The Pultex Pultrusion Design Manual*. Creative Pultrusions.

## Appendix A

### List of FRP bridges in the world (Potyrala, 2011)

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Miyun Bridge	Beijing	China	1982	all	Length: 20,7 m. Width: 9,8 m. Manufactured by Chongqing Glass Fiber
Chenjiawan Bridge	Chongqing	China	1988	all	Length: 60,0 m. Width: 4,0 m. Manufactured by Chongqing Glass Fiber
Luzhou Bridge	Luzhou	China	1988	all	Manufactured by Chongqing Glass Fiber Product Factory.
Aberfeldy Golf Course Bridge	Aberfeldy	UK	1990	all	Length: 112,8 m. Width 2,1 m. Manufactured by GEC Plastics / Linear Composites. <a href="http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0002215">en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0002215</a> <a href="http://www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1003">www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1003</a> <a href="http://www.bath.ac.uk/ace/uploads/StudentProjects/Bridgeconference2009/Papers/SKINNER.pdf">www.bath.ac.uk/ace/uploads/StudentProjects/Bridgeconference2009/Papers/SKINNER.pdf</a> <a href="http://www-civ.eng.cam.ac.uk/cjb/papers/cp25.pdf">www-civ.eng.cam.ac.uk/cjb/papers/cp25.pdf</a>
Shank Castle Footbridge	Cumbria	UK	1993	all	Length: 11,9 m. Width 3,0 m. Manufactured by Maunsell Structural
Bonds Mill Lift Bridge Stroud	Glouestershire	UK	1994	all	Length: 8,2 m. Width 4,3 m. Manufactured by GEC Reinforced Plastics. <a href="http://www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1003">www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1003</a>
Fidgett Footbridge	Chalgrove	UK	1995	all	<a href="http://www-civ.eng.cam.ac.uk/isegroup/fidgett.htm">www-civ.eng.cam.ac.uk/isegroup/fidgett.htm</a>
PWRI Demonsration Bridge	Tsukuba	Japan	1996	all	Length: 20,1 m. Width: 2,1 m. Manufactured by Tokyo Rope Mfg. Ltd. and Mitsubishi Chemical
Clear Creek Bridge	Bath	USA, Kentuck	1996	all	Length: 18,3 m. Width 1,8 m. Manufactured by Strongwell inc.

Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Fiberline Bridge	Kolding	Denmark	1997	all	Length: 39,9 m. Width: 3,0 m. Manufactured by Fiberline Composites. Literature: Braestrup, Mikael W. <b>Cable-stayed GFRP (Glass Fibre Reinforced Plastic) footbridge across railway line</b> , presented at IABSE Conference, Malmö 1999 - Cable-stayed bridges. Past, present and future Braestrup, Mikael W. <b>Footbridge Constructed from Glass-Fibre-Reinforced Profiles</b> , Denmark, in "Structural Engineering International", November 1999, n. 4 v. 9 <a href="http://www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1004">www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1004</a> <a href="http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s00">en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s00</a>
Pontresina Bridge	Pontresina	Switzerland	1997	all	Length: 25,0 m. Width 3,0 m. Manufactured by Fiberline Composites. <a href="http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0005206">en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0005206</a> <a href="http://www.fiberline.com/structures/profiles-and-decks-bridges/profiles-footbridges-and-cycle-bridges/case-stories-footbridge/pontresina-bridge-switzerland">www.fiberline.com/structures/profiles-and-decks-bridges/profiles-footbridges-and-cycle-bridges/case-stories-footbridge/pontresina-bridge-switzerland</a>
INEEL Bridge	Idaho Falls	USA, Idaho	1997	all	Length: 9,1 m. Width: 5,5 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Medway Bridge	Medway	USA, Maine	1997	all	Length: 16,5 m. Width: 9,1 m. Manufactured by Unadilla Laminated
West Seboeis Bridge	West Seboeis	USA, Maine	1997	all	Length: 13,4 m. Width: 4,9 m. Manufactured by Strongwell Inc.
Smith Creek Bridge	Hamilton/Butler	USA, Ohio	1997	all	Length: 10,1 m. Width: 7,3 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Las Rusias Military Highway		USA, Texas	1997	all	Length: 13,7 m. Width 1,2 m. Manufactured by Hughes Bros., Inc.
Falls Creek Trail Bridge	Gifford Pinchot National Forest	USA, Washingto	1997	all	Length: 13,7 m. Width 0,9 m. Manufactured by Creative Pultrusion, Inc. And E.T. Techtonics. <a href="http://www.ettechtonics.com/pedestrian_and_trail_bridges/project_g">www.ettechtonics.com/pedestrian_and_trail_bridges/project_g</a>

## Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Seebrücke	Bitterfeld	Germany	2000	all	<a href="http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0001336">en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0001336</a>
Noordland Pedestrian Bridge	Noordland inner Harbor	The Netherland s	2000	all	Length: 26,8 m. Width 1,5 m. Manufactured by Fiberline Composites.
East Dixfield Bridge	East Dixfield	USA, Maine	2000	all	Length: 13,7 m. Width: 9,1 m. Manufactured by University of Maine.
Five Mile Road Bridge #0171	Hamilton	USA, Ohio	2000	all	Length: 13,4 m. Width: 8,5 m. Manufactured by Hardcore
Lleida Footbridge	Lleida	Spain	2001	all	Length: 38,1 m. Width 3,0 m. Manufactured by Fiberline Composites. <a href="http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0008679">en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0008679</a> <a href="http://www.fiberline.com/structures/profiles-and-decks-bridges/profiles-footbridges-and-cycle-bridges/case-stories-footbridge/international-award-innovat">www.fiberline.com/structures/profiles-and-decks-bridges/profiles-footbridges-and-cycle-bridges/case-stories-footbridge/international-award-innovat</a> Sobrino, J. A., Pulido, M.D.G.: <b>Towards Advanced Composite Material Footbridges</b> , Structural Engineering International IABSE 12(2) 2002:
Sealife Park Dolphin Bridge	Oahu	USA, Hawaii	2001	all	Length: 11,0 m. Width 0,9 m. Manufactured by Strongwell Inc.
West Mill Bridge over River Cole	Shrivenham, Oxfordshire	UK	2002	all	Length: 10,0 m. Width: 6,8 m. Manufactured by Fiberline Composites. <a href="http://www.fiberline.com/structures/profiles-and-decks-bridges/profiles-road-bridges/case-stories-road-bridges/west-mill-brid/west-mill-bridge-england">www.fiberline.com/structures/profiles-and-decks-bridges/profiles-road-bridges/case-stories-road-bridges/west-mill-brid/west-mill-bridge-england</a> <a href="http://www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?Docume">www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?Docume</a>
Fredrikstad Bridge	Fredrikstad	Norway	2003	all	Length: 60,0 m. Width 3,0 m. Manufactured by Marine Composites. <a href="http://www.fireco.no/references/Gangbru">www.fireco.no/references/Gangbru</a>
Den Dungen Bridge	Den Dungen	The Netherland	2003	all	Length: 10,0 m. Width: 3,7 m.
Emory Brook Bridge	Fairfield	USA, Maine	2003	all	Length: 21,9 m. Width: 10,7 m. Manufactured by Gordon Composites.
Wood Road Bridge over Cohocton	Campbell	USA, New York	2003	all	Length: 63,1 m. Width: 5,5 m.

## Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Lake Jackson Bridge	Lake Jackson	USA, Texas	2003	all	Length: 27,4 m. Width 1,8 m.
Fiberline Footbridge in the area of GOŚ	Lodz	Poland	2004	all	Length: 0,0 m. Width: 0,0 m. Manufactured by Fiberline Composites. Zobel H., Karwowski W., Mossakowski P., Wróbel M.: Kładka komunikacyjna z kompozytów polimerowych w oczyszczalni ścieków. Badania i doswiadczenia eksploatacyjne. Gospodarka Wodna
Pedestrian bridge near the platform	Moscow	Russia	2004	all	Length: 41,4 m. Width: 3,0 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/chertanovo_eng.html">www.apatech.ru/chertanovo_eng.html</a>
Pedestrian bridge over the platform	Moscow	Russia	2005	all	Length: 47,0 m. Width: 5,0 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/kosino_eng.html">www.apatech.ru/kosino_eng.html</a>
Pedestrian bridge in recreation zone of Dubna-	Moscow	Russia	2005	all	Length: 16,0 m. Width: 3,0 m. Manufactured by Fiberline Composites. <a href="http://www.apatech.ru/dubna_eng.html">www.apatech.ru/dubna_eng.html</a>
Pedestrian bridge in recreation zone of	Moscow	Russia	2005	all	Length: 20,0 m. Width: 2,3 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/lihoborka_eng.html">www.apatech.ru/lihoborka_eng.html</a>
Pedestrian bridge in recreation zone of	Moscow	Russia	2006	all	Length: 11,2 m. Width: 2,3 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/lihoborka-first_eng.html">www.apatech.ru/lihoborka-first_eng.html</a>
Pedestrian bridge in recreation zone of	Moscow	Russia	2006	all	Length: 11,2 m. Width: 2,3 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/lih-second_eng.html">www.apatech.ru/lih-second_eng.html</a>
Pedestrian bridge in recreation zone of	Moscow	Russia	2006	all	Length: 25,0 m. Width: 2,6 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/lihoborka-">www.apatech.ru/lihoborka-</a>
Pedestrian bridge in recreation zone of	Moscow	Russia	2007	all	Length: 58,2 m. Width: 3,7 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/lihoborka-">www.apatech.ru/lihoborka-</a>
Pedestrian bridge over the platform "Testovskaya"	Moscow	Russia	2007	all	Length: 48,0 m. Width: 2,6 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/testovskaya1_eng.html">www.apatech.ru/testovskaya1_eng.html</a>
Pedestrian bridge Moscow – Kuskovo	Moscow	Russia	2007	all	Length: 31,0 m. Width: 3,5 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/kuskovo_eng.html">www.apatech.ru/kuskovo_eng.html</a>
ApATeCh mobile pedestrian bridge	Moscow	Russia	2007	all	Length: 49,8 m. Width: 2,5 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/mobile_briges_eng.html">www.apatech.ru/mobile briges_eng.html</a>
Pedestrian bridge on the Highway	Moscow	Russia	2007	all	Length: 28,6 m. Width: 2,3 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/starokashirka_eng.html">www.apatech.ru/starokashirka_eng.html</a>

## Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
St Austell Bridge over Penzance- Paddington	St Austell	UK	2007	all	Length: 26,0 m. Manufactured by Pipex Structural Composites
Nørre Aaby Footbridge	Nørre Aaby	Denmark	2008	all	<a href="http://www.fiberline.com/structures/profiles-and-decks-bridges/profiles-footbridges-and-cycle-bridges/case-stories-footbridge/crumbling-concrete-bridge-r">www.fiberline.com/structures/profiles-and-decks-bridges/profiles-footbridges-and-cycle-bridges/case-stories-footbridge/crumbling-concrete-bridge-r</a>
ApATeCh arched footbridge	Moscow	Russia	2008	all	Length: 22,6 m. Width: 2,8 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/yauza_arc_eng.html">www.apatech.ru/yauza_arc_eng.html</a> <a href="http://www.apatech.ru/news_eng.html?id=22">www.apatech.ru/news_eng.html?id=22</a>
Pedestrian bridge near the 586 km of the South-East		Russia	2008	all	Length: 42,0 m. Width: 3,2 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/rvaisk_eng.html">www.apatech.ru/rvaisk_eng.html</a>
Bridge in Sochi	Moscow	Russia	2008	all	Length: 12,8 m. Width: 1,6 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/flyover_eng.html">http://www.apatech.ru/flyover_eng.html</a>
Cueva de Oñati-Arrikruz Walkway	Oñati-Arrikruz	Spain	2008	all	<a href="http://www.fiberline.com/structures/case-stories-other-structures/grp-walkway-spanish-cave/grp-walkway-spanish-">www.fiberline.com/structures/case-stories-other-structures/grp-walkway-spanish-cave/grp-walkway-spanish-</a>
Whatstandwell Footbridge	Derbyshire	UK	2009	all	Length: 8,0 m. Width: 1,6 m. Manufactured by Pipex Structural Composites <a href="http://www.pipexstructuralcomposites.co.uk/news/news.php?id=40&amp;archived=true">www.pipexstructuralcomposites.co.uk/news/news.php?id=40 &amp; archived=true</a>
Bradkirk Footbridge	Bradkirk	UK	2009	all	Length: 24,0 m. Manufactured by AM Structures Ltd. <a href="http://www.gurit.com/bradkirk-bridge-2010.aspx">www.gurit.com/bradkirk-bridge-2010.aspx</a> <a href="http://www.compositesworld.com/news/composite-footbridge-installed-in-six-hours">www.compositesworld.com/news/composite-footbridge-installed-in-six-hours</a>
River Leri Footbridge	Ynyslas	UK	2009	all	Length: 90,0 m. <a href="http://en.structurae.info/structures/data/index.cfm?id=s">en.structurae.info/structures/data/index.cfm?id=s</a>
Pedestrian bridge at the 30th km of		Russia	2010	all	Length: 21,0 m. Width: 3,0 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/odincovo_eng.html">www.apatech.ru/odincovo_eng.html</a>

Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Manzanares Footbridge	Madrid	Spain	2011	all	Length: 44,0 m. www.netcomposites.com/newspic.asp?6634 www.mundoplast.com/noticia/jec-innovation-award- para-acciona-huntsman/61235 www.tech-plym.ac.uk/sme/composites/bridges.htm#mad
Albrandswaard Traffic bridge	Nijverheidsweg Rhoon	Netherlands	2010	all	Length: 10,5 m, width: 4,5 m www.fibercore-europe.com
60 tons traffic bridge Oosterwolde	Oosterwolde	Netherlands	2010	all	Length: 12 m, width: 11,2 m www.fibercore-europe.com
Traffic bridge Marebrug	Leiden	Netherlands	2010	all	Length: 9,3 m, width: 10,5 m Mass: 7500 kg www.fibercore-europe.com
Traffic bridge Maarssensweg	Utrecht	Netherlands	2011	all	Length: 6,8 m, width: 9 m Mass: 10,000 kg www.fibercore-europe.com
12-056 brig Hoogstraten -bicycle bridge	Hoogstraten, Strijbeek	Netherlands	2012	all	Length: 10 m, width: 2,25 m www.fibercore-europe.com
12-042 Biobridge (6 bicycles bridges)	Eendragtspolder /Rotterdam	Netherlands	2012	all	Length: 12,25-16 m, width: 1,64-3,64 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , one bridge with biological resin
12-043 Bicycle Bridge	Krommenie	Netherlands	2012	all	Length: 14 m, width: 3 m www.fibercore-europe.com
12-047 Island Bridge	Amelo	Netherlands	2012	all	Length: 10,7 m, width: 4 m www.fibercore-europe.com



## Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
11-026 bridges (2) (pedestrian & occasional vehicle)	Haarlem	Netherlands	2012	all	Length: 13,2 m, width: 9,5 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a>
11-006 bridges (2) Borne	Bongerdsweg	Netherlands	2012	all	Length: 15 m, width: 4 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a>
11- 028 bridges (2) Horn	Holenweg	Netherlands	2012	all	Length: 7,65 m, width: 3 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & road bridges
11-019 bridges (2)	Sommelsdijk	Netherlands	2012	all	Lengths: 31 & 29 m, widths: 1,2 & 4 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle bridges
11-022 bridges (3) Deventer	Zandwetering Park	Netherlands	2012	all	Length: 22 m, width: 2,5 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & road bridges
Bridges (5) Wognum	Multifunctional center, Wognum	Netherlands	2011	all	Length: 10-11 m, width: 1,5-5,4 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & road bridges
Bicycle Bridges (2) Nagele	Nagele	Netherlands	2011	all	Length: 20 m, width: 1,5 & 2,5 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & pedestrian
Cycle bridge	Roosendaal	Netherlands	2010	all	Length: 3x 12 m, width: 5 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> ,
Bride Ghent	Ghent, Old Fish Market	Belgium	2010	all	Length: 17,5 m, width: 2,5 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & pedestrian
Bridge Potgieterstraat	Rotterdam	Netherlands	2010	all	Length: 18 m, width: 2,25 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & pedestrian
2 composite cycle bridges Purmerend	Purmerend	Netherlands	2009	all	Length: 16 m, width: 2,5 & 3,75 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> ,
Composite cycle bridge Hague	Spoorlaan, The Hague	Netherlands	2009	all	Length: 2x 13,25 m, width 5 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & pedestrian
Composite bridge for China	Shanghai	China	2009	all	Length: 11,5 m, width: 2 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & pedestrian

## Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Infracore bridge	Tholen	Netherlands	2013	all	<a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , bicycle & pedestrian current
Composite cycle bridge	Ijsselmonde	Netherlands	2009	all	Length: 9,8 m, width: 2,75 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a>
Composite slow-traffic bridge Hoogvliet	Rotterdam	Netherlands	2008	all	Length: 14 m, width: 2,75 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> , pedestrian but suitable for 6 ton assistance vehicle
Composite cycle bridge	Krilpad Krimpenerwaard	Netherlands	2007	all	Length: 10 m, width: 2,75 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> . Fit for 6 ton assistance vehicle
Composite slow traffic bridge	Dronten	Netherlands	2007	all	Length: 24 m, width: 5 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> . Pedestrian but fit for 6 ton assistance vehicle
De Koegelwiek	Harlingen harbour	Netherlands	1997	all	Length: 15 m, width: 2,5 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a> .
<b>Total full FRP bridges : 80</b>					
A27 Lunetten Viaduct	Lunetten	Netherlands	2012	deck	Length: 142 m , width: 6,2 m <a href="http://www.fibercore-europe.com">www.fibercore-europe.com</a>
Unknown	Charlottesville	USA, Virginia	1978	deck	Length: 4,9 m. Width 2,1 m.
Guanyinqiao Bridge	Chongqing	China	1988	deck	Length: 157,0 m. Width: 4,6 m. Manufactured by Chongqing Glass Fiber
A19 Tees Viaduct	Middlesborough	UK	1988	deck	Manufactured by Maunsell Structural Plastics.
Jiangyou Bridge	Jiangyou	China	1990	deck	Manufactured by Chongqing Glass Fiber Product Factory.
Panzhuhua Bridge	Panzhuhua	China	1992	deck	Length: 24,1 m. Width: 3,0 m. Manufactured by Chongqing Glass Fiber
Bromley South Bridge	Kent	UK	1992	deck	Length: 210,0 m. Manufactured by Maunsell Structural Plastics. <a href="http://www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1">www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1</a>
Chuanmian Bridge	Chengdu	China	1993	deck	Length: 10,7 m. Width: 5,2 m. Manufactured by Chongqing Glass Fiber

## Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Xiangyang Bridge	Chengdu	China	1993	deck	Length: 50,0 m. Width: 4,0 m. Manufactured by Chongqing Glass Fiber
Parson's Bridge	Dyfed	UK	1995	deck	Length: 17,7 m. Width 3,0 m. Manufactured by Strongwell Inc. <a href="http://www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1007">www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1007</a>
LaSalle Street Pedestrian Walkway	Chicago	USA, Illinois	1995	deck	Length: 67,1 m. Width 3,7 m. Manufactured by Strongwell Inc.
Second Severn Bridge	Bristol	UK	1996	deck	Length: 29,4 m. Width 9,1 m. Manufactured by GEC Reinforced Plastics. <a href="http://www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1008">www.ngcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?DocumentID=1008</a>

Contd..

## Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Rogiet Bridge	Gwent	UK	1996	deck	Manufactured by Maunsell Structural Plastics.
UCSD Road Test Panels	San Diego	USA, Californi	1996	deck	Length: 4,6 m. Width: 2,4 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
No-Name Creek Bridge	Russell	USA, Kansas	1996	deck	Length: 7,3 m. Width: 8,2 m. Manufactured by Kansas Structural Composites, Inc.
Staffordshire Highbridge	Staffordshire	UK	1997	deck	Length: 45,1 m. Width 3,0 m. Manufactured by Maunsell Structural
Magazine Ditch Bridge (Del Memorial Bridge)	New Castle	USA, Delaware	1997	deck	Length: 21,3 m. Width: 6,1 m. Manufactured by Hardware Composites.
Washington Schoolhouse Road	Cecil	USA, Maryland	1997	deck	Length: 6,1 m. Width: 7,6 m. Manufactured by Hardcore Composites.
Shawnee Creek Bridge	Xenia	USA, Ohio	1997	deck	Length: 7,3 m. Width: 3,7 m. Manufactured by Creative
Wickwire Run Bridge	Grafton / Taylor	USA, West Virginia	1997	deck	Length: 9,1 m. Width: 6,7 m. Manufactured by Creative Pultrusions Inc.
Laurel Lick Bridge	Lewis	USA, West Virginia	1997	deck	Length: 6,1 m. Width: 4,9 m. Manufactured by Creative Pultrusions Inc. Aluri S., Jinka C., GangaRao H. V. S. <b>Dynamic Response of Three Fiber Reinforced Polymer Composite Bridges</b> , Journal of Bridge Engineering,
EXPO Bridge	Lisbon	Portugal	1998	deck	Length: 30,0 m. <a href="http://www.gurit.com/expo-bridge-1998.aspx">www.gurit.com/expo-bridge-1998.aspx</a>
Bridge 1-351 SR896 over Muddy Run	Newark	USA, Delawar e	1998	deck	Length: 9,8 m. Width: 7,9 m. Manufactured by Hardware Composites. Gillespie, J. W., Eckel, D.A., Edberg, W.M., Sabol, S.A., Mertz, D.R., Chajes, M.J., Shenton III, H.W., Hu, C., Chaudhri, M., Faqiri, A., Soneji, J., <b>Bridge 1-351 Over Muddy Run: Design, Testing and Erection of an All- Composite Bridge</b> , Journal of the Transportation Research Record, TRB, 1696(2), 2000, 118-123
Route 248 over Bennett's Creek	West Union	USA, New York	1998	deck	Length: 7,6 m. Width: 10,1 m. Manufactured by Hardcore Composites.

Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Rowser Farm Bridge	Bedford	USA, Pennsylvania	1998	deck	Length: 4,9 m. Width: 3,7 m. Manufactured by Creative Pultrusions Inc.
Wilson's Bridge	Chester	USA, Pennsylvania	1998	deck	Length: 19,8 m. Width: 4,9 m. Manufactured by Hardcore Composites.
Laurel Run Road Bridge, Route 4003	Somerset	USA, Pennsylvania	1998	deck	Length: 6,7 m. Width: 7,9 m. Manufactured by Creative Pultrusions Inc.
Greensbranch Pedestrian Bridge	Smyrna	USA, Delaware	1999	deck	Length: 9,8 m. Width 1,8 m. Manufactured by Hardcore Composites.
Greensbranch - Vehicular Bridge	Smyrna	USA, Delaware	1999	deck	Length: 6,4 m. Width: 3,7 m. Manufactured by Hardware Composites.
Mill Creek Bridge	Wilmington	USA, Delaware	1999	deck	Length: 11,9 m. Width: 5,2 m. Manufactured by Hardware Composites.
Crawford County Bridge (1) (Rt)	Pittsburgh	USA, Kansas	1999	deck	Length: 13,7 m. Width: 9,8 m. Manufactured by Kansas Structural Composites, Inc.
Crawford County Bridge (2) (Rt)	Pittsburgh	USA, Kansas	1999	deck	Length: 13,7 m. Width: 9,8 m. Manufactured by Kansas Structural Composites, Inc.
Levisa Fork of the Big Sandy River Footbridge	Johnson	USA, Kentucky	1999	deck	Length: 12,8 m. Width 1,2 m. Manufactured by Strongwell Inc.
Route 367 over Bentley Creek	Elmira	USA, New York	1999	deck	Length: 42,7 m. Width: 7,6 m. Manufactured by Hardcore Composites.
SR 47 over Woodington Run	Darke	USA, Ohio	1999	deck	Length: 15,2 m. Width: 14,0 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Salem Ave Bridge (1) (State Rt 49)	Dayton	USA, Ohio	1999	deck	Length: 51,2 m. Width: 15,2 m. Manufactured by Creative Pultrusions Inc. National Cooperative Highway Research Program, Report 564: Field inspection of in-service FRP bridge decks, p.
Salem Ave Bridge (2) (State Rt 49)	Dayton	USA, Ohio	1999	deck	Length: 51,2 m. Width: 15,2 m. Manufactured by Hardcore Composites. National Cooperative Highway Research Program, Report 564: Field inspection of in-service FRP bridge decks, p.

Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Salem Ave Bridge (3) (State Rt 49)	Dayton	USA, Ohio	1999	deck	Length: 17,7 m. Width: 15,2 m. Manufactured by Infrastructure Composites International. National Cooperative Highway Research Program, Report 564: Field inspection of in-service FRP bridge decks, p.
Salem Ave Bridge (4) (State Rt 49)	Dayton	USA, Ohio	1999	deck	Length: 18,9 m. Width: 9,1 m. Manufactured by Composite Deck Solutions. National Cooperative Highway Research Program, Report 564: Field inspection of in-service FRP bridge decks, p.
Troutville Weigh Station Ramp I-81 (2)	Troutville	USA, Virginia	1999	deck	Length: 6,1 m. Width: 6,1 m. Manufactured by Creative Pultrusions Inc.
Sedlitz & Senftenberg Bridge	Sedlitz & Senftenberg	Germany	2000	deck	Length: 20,1 m. Width: 2,4 m. Manufactured by Creative Pultrusions, Inc.
Milbridge Municipal Pier	Milbridge	USA, Maine	2000	deck	Length: 53,3 m. Width: 4,9 m. Manufactured by University of Maine.
Wheatley Road	Cecil	USA, Maryland	2000	deck	Length: 10,4 m. Width: 7,3 m. Manufactured by Hardcore Composites.
Route 223 over Cayuta Creek	Van Etten	USA, New York	2000	deck	Length: 39,3 m. Width: 8,8 m. Manufactured by Hardcore Composites.
SR 418 over Schroon River	Warrensburg	USA, New York	2000	deck	Length: 48,8 m. Width: 7,9 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
South Broad Street Bridge	Wellsville	USA, New York	2000	deck	Length: 36,6 m. Width: 8,8 m. Manufactured by Hardcore Composites.
Sintz Road Bridge	Clark	USA, Ohio	2000	deck	Length: 33,5 m. Width: 15,2 m. Manufactured by Hardcore Composites.
Elliot Run (Highway 14 over Elliot Run)	Knox	USA, Ohio	2000	deck	Length: 11,9 m. Width: 7,9 m. Manufactured by Hardcore Composites.
Westbrook Road Bridge over Dry Run Creek	Montgomery	USA, Ohio	2000	deck	Length: 10,4 m. Width: 10,1 m. Manufactured by Hardcore Composites. <a href="http://www.rdoapp.psu.ac.th/html/sjst/journal/30-4/0125-">www.rdoapp.psu.ac.th/html/sjst/journal/30-4/0125-</a>

Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Market Street Bridge	Wheeling	USA, West Virginia	2000	deck	Length: 57,9 m. Width: 17,1 m. Manufactured by Creative Pultrusions Inc. Aluri S., Jinka C., GangaRao H. V. S. <b>Dynamic Response of Three Fiber Reinforced Polymer Composite Bridges</b> , Journal of Bridge Engineering, Vol. 10, No. 6, Nov/Dec 2005, 722-730
Buehl-Balzhofen Bridge		Germany	2001	deck	Length: 11,9 m. Manufactured by Creative Pultrusions, Inc.
A30 Halgavor Bridge	Halgavor	UK	2001	deck	Length: 47,2 m. Width 3,7 m. Manufactured by Vosper Thorneycroft <a href="http://www.nqcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?Docume">www.nqcc.org.uk/DesktopModules/ViewDocument.aspx?Docume</a>
South Fayette Street over Town	Jacksonville	USA, Illinois	2001	deck	Length: 15,2 m. Width: 7,0 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
53rd Ave Bridge	Bettendorf	USA, Iowa	2001	deck	Length: 14,3 m. Width: 29,3 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Crow Creek Bridge	Bettendorf	USA, Iowa	2001	deck	Length: 14,3 m. Width: 29,9 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Skidmore Bridge Washington	Union	USA, Maine	2001	deck	Length: 18,9 m. Width: 7,0 m. Manufactured by University of Kenway
MD 24 over Deer Creek	Harford	USA, Maryland	2001	deck	Length: 39,0 m. Width: 9,8 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Snouffer School Road	Montgomery	USA, Maryland	2001	deck	Length: 8,8 m. Width: 10,1 m. Manufactured by Hardcore
Aurora Pedestrian Bridge	Aurora	USA, Nebraska	2001	deck	Length: 30,5 m. Width 3,0 m. Manufactured by Kansas Structural Composites Inc.
Osceola Road over East Branch Salmon River (CR 46)	Lewis	USA, New York	2001	deck	Length: 11,0 m. Width: 7,9 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Triphammer Road over Conesus Lake Outlet CR 52	Livingston	USA, New York	2001	deck	Length: 12,5 m. Width: 10,1 m. Manufactured by Hardcore Composites.
Route 36 over Tributary to Troups Creek	Troupsburry	USA, New York	2001	deck	Length: 9,8 m. Width: 11,3 m. Manufactured by Kansas Structural Composites, inc.

Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Service Route 1627 over Mill's	Union	USA, North Carolina	2001	deck	Length: 12,2 m. Width: 7,6 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Shaffer Road Bridge	Ashtabula	USA, Ohio	2001	deck	Length: 53,3 m. Width: 5,2 m. Manufactured by Hardcore
Stelzer Road Bridge	Columbus	USA, Ohio	2001	deck	Length: 118,0 m. Width: 10,7 m. Manufactured by Fiber Reinforced
Tyler Road over Bokes Creek	Delaware	USA, Ohio	2001	deck	Length: 36,6 m. Width: 6,1 m. Manufactured by Fiber Reinforced Systems
Five Mile Road Bridge #0087	Hamilton	USA, Ohio	2001	deck	Length: 14,3 m. Width: 9,1 m. Manufactured by Hardcore
Five Mile Road Bridge #0071	Hamilton	USA, Ohio	2001	deck	Length: 13,1 m. Width: 9,1 m. Manufactured by Hardcore
Spaulding Road Bridge	Kettering	USA, Ohio	2001	deck	Length: 25,3 m. Width: 17,1 m. Manufactured by Hardcore
Lewis & Clark Bridge (Warrenton - Astoria)	Clatsop	USA, Oregon	2001	deck	Length: 37,8 m. Width: 6,4 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
SR 4012 over Slippery Rock Creek	Boyers	USA, Pennsylvania	2001	deck	Length: 12,8 m. Width: 7,9 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
SR 1037 over Dubois Creek	Susquehanna	USA, Pennsylvania	2001	deck	Length: 6,7 m. Width: 10,1 m. Manufactured by Hardcore Composites.
RT S655 over Norfolk - Southern	Spartanburg	USA, South Carolina	2001	deck	Length: 18,3 m. Width: 8,2 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Montrose Bridge	Elkins	USA, West Virginia	2001	deck	Length: 11,9 m. Width: 8,5 m. Manufactured by Hardcore Composites.
West Buckeye Bridge	Morgantown	USA, West Virginia	2001	deck	Length: 45,1 m. Width: 11,0 m. Manufactured by Kansas Structural
Hanover Bridge	Pendleton	USA, West Virginia	2001	deck	Length: 36,6 m. Width: 8,5 m. Manufactured by Kansas Structural Composites, inc.
Boy Scout Bridge	Princeton	USA, West Virginia	2001	deck	Length: 9,4 m. Width: 7,9 m. Manufactured by Hardcore Composites.



## Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Katy Truss Bridge	Marion	USA, West Virginia	2001	deck	Length 27,4 m. Width 4,3 m. Aluri S., Jinka C., GangaRao H. V. S. <b>Dynamic Response of Three Fiber Reinforced Polymer Composite Bridges</b> , Journal of Bridge Engineering,
Towoomba Bridge	Towoomba	Australia	2002	deck	Length: 10,0 m. Width: 5,5 m. Manufactured by Univ. Southern Queensland.
Klipphausen Bridge	Klipphausen	Germany	2002	deck	<a href="http://www.fiberline.com/structures/profiles-and-decks-bridges/profiles-road-bridges/case-stories-road-bridges/germany's-first/germany's-first-road-bridge">www.fiberline.com/structures/profiles-and-decks-bridges/profiles-road-bridges/case-stories-road-bridges/germany's-first/germany's-first-road-bridge</a>
Benten Bridge	Fukushima	Japan	2002	deck	Length: 60,0 m. Width: 3,0 m. Manufactured by NEFMAC.
O'Fallon Park Bridge	Denver	USA, Colorad	2002	deck	Length: 30,5 m. Width 6,7 m. Manufactured by Strongwell Inc.
County Road 153 over White Creek	Washington	USA, New York	2002	deck	Length: 16,5 m. Width: 8,2 m. Manufactured by Hardcore Composites.
Fairgrounds Road Bridge over little Miami River	Greene	USA, Ohio	2002	deck	Length: 69,5 m. Width: 9,8 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
CR 76 over Cat's Creek	Washington	USA, Ohio	2002	deck	Length: 24,7 m. Width: 7,3 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Old Youngs Bay Bridge (Warrenton - Astoria)	Clatsop	USA, Oregon	2002	deck	Length: 53,6 m. Width: 6,4 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
T 565 over Dunning Creek	Bedford	USA, Pennsylvania	2002	deck	Length: 27,7 m. Width: 6,7 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Katty Truss Bridge	Bridgeport	USA, West Virginia	2002	deck	Length: 27,4 m. Width: 4,3 m. Manufactured by Creative Pultrusions Inc.
Schwerin-Neumühle Bridge	Schwerin	Germany	2003	deck	Length: 45,0 m. Width: 2,5 m. Manufactured by Creative Pultrusions, Inc.
Ribble Way Footbridge	Lancashire	UK	2003	deck	Length: 131,1 m. Width 3,0 m. Manufactured by Vosper Thorneycroft

Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Schuyler Heim Lift Bridge	Long Beach	USA, Californi	2003	deck	Length: 10,7 m. Width: 11,0 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Kansas Detour Bridge (1)	Kansas	USA, Kansas	2003	deck	Length: 18,3 m. Width: 9,1 m. Manufactured by Kansas Structural Composites, inc.
Kansas Detour Bridge (2)	Kansas	USA, Kansas	2003	deck	Length: 18,3 m. Width: 9,1 m. Manufactured by Kansas Structural Composites, inc.
Popolopen Creek Bridge	Bear Mountain	USA, New York	2003	deck	Length 18,9 m. Width 1,8 m. Manufactured by Strongwell Inc. And E. T. Techtonics <a href="http://www.ettechtonics.com/pedestrian_and_trail_bridges/project_gallery/popolopen.php">www.ettechtonics.com/pedestrian_and_trail_bridges/project_gallery/popolopen.php</a>
Hales Branch Road Bridge	Clinton	USA, Ohio	2003	deck	Length: 19,8 m. Width: 7,3 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
County Line Road over Tiffin River	Defiance	USA, Ohio	2003	deck	Length: 57,0 m. Width: 8,5 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Hotchkiss Road over Cuyahoga	Geauga	USA, Ohio	2003	deck	Length: 19,8 m. Width: 8,5 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Hudson Road over Wolf Creek	Summit	USA, Ohio	2003	deck	Length: 35,7 m. Width: 10,4 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
US 101 over Siuslaw River	Florence	USA, Oregon	2003	deck	Length: 46,9 m. Width: 8,5 m.
Chief Joseph Dam Bridge	Bridgeport	USA, Washingto	2003	deck	Length: 90,8 m. Width: 9,8 m.
Howell's Mill Bridge	Cabell	USA, West Virginia	2003	deck	Length: 74,7 m. Width: 10,1 m. Manufactured by Martin Marietta Composites.
Goat Farm Bridge	Jackson	USA, West Virginia	2003	deck	Length: 12,2 m. Width: 4,6 m. Manufactured by Kansas Structural Composites, Inc. <a href="http://infor.eng.psu.ac.th/kpi_fac/file_link/P937FPaper.pdf">infor.eng.psu.ac.th/kpi_fac/file_link/P937FPaper.pdf</a> <a href="http://www.rdoapp.psu.ac.th/html/sjst/journal/30-4/0125-3395-30-4-501-508.pdf">www.rdoapp.psu.ac.th/html/sjst/journal/30-4/0125-3395-30-4-501-508.pdf</a>

## Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
La Chein Bridge	Monroe	USA, West Virginia	2003	deck	Length: 9,8 m. Width: 7,3 m. Manufactured by Bedford Reinforced
US 151 over SH 26	Fond de Lac	USA, Wisconsin	2003	deck	Length: 32,6 m. Width: 13,1 m. Manufactured by Hughes Bros., Inc.
US 151 over SH 26	Fond de Lac	USA, Wisconsin	2003	deck	Length: 65,2 m. Width: 11,9 m. Manufactured by Diversified Composites.
Pedestrian passage on the 23rd kilometre of the Highway "Leningradskoe"	Moscow	Russia	2005	deck	Length: 56,8 m. Width: 3,9 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/lenroad_eng.html">www.apatech.ru/lenroad_eng.html</a>
Garstang Mount Pleasant M6 Bridge	Lancashire	UK	2006	deck	<a href="http://www.fiberline.com/structures/profiles-and-decks-bridges/profiles-road-bridges/case-stories-road-bridges/new-grp-bridge/new-grp-bridge-across-uk-mo">www.fiberline.com/structures/profiles-and-decks-bridges/profiles-road-bridges/case-stories-road-bridges/new-grp-bridge/new-grp-bridge-across-uk-mo</a> <a href="http://www.infrasite.net/news/news_article.php?ID_nieuwsberichten=4403">www.infrasite.net/news/news_article.php?ID_nieuwsberichten=4403</a>
Tangier Island Bridge	Tangier Island	USA, Virginia	2006	deck	Manufactured by ZellComp, Inc. <a href="http://www.zellcomp.com/highway_bridge_install.html">http://www.zellcomp.com/highway_bridge_install.html</a>
Pedestrian bridge over the platform "Depot"	Moscow	Russia	2007	deck	Length: 279,0 m (13 spans). Width: 3,0 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/depo_eng.html">www.apatech.ru/depo_eng.html</a>
Pedestrian bridge in recreation zone	Moscow	Russia	2007	deck	Length: 79,5 m. Width: 3,7 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/caricino_eng.html">www.apatech.ru/caricino_eng.html</a>
Pedestrian bridge in recreation zone	Moscow	Russia	2007	deck	Length: 58,2 m. Width: 3,7 m. Manufactured by ApATeCh. <a href="http://www.apatech.ru/caricino-second_eng.html">www.apatech.ru/caricino-second_eng.html</a>
Bradford Bridge	Bradford	USA, Vermont	2007	deck	Manufactured by ZellComp, Inc. <a href="http://www.zellcomp.com/highway_bridge_install.html">http://www.zellcomp.com/highway_bridge_install.html</a>

## Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Friedberg Bridge over B3 Highway	Friedberg	Germany	2008	deck	Knippers, J. and Gabler, M., <b>New Design Concepts for Advanced Composite Bridges - The Friedberg Bridge in Germany</b> , IABSE Report, Vol. 92, 2007, 332-333 Knippers, J. and Gabler, M., <b>The FRP road bridge in Friedberg Germany – new approaches to a holistic and aesthetic design</b> , in Proc. 4th Inter. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008), Empa, Duebendorf, 2008, Paper 7.D.6 p. 6. (CD-ROM). ISBN 978-3-905594-50-8 Knippers, J., Pelke E, Gabler M, and Berger, D., <b>Bridges with Glass Fibre Reinforced Polymers (GFRP) decks - The new Road Bridge in Friedberg (Hessen, Germany)</b> , Stahlbau, 787, 2009, 462-470 en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0021440 www.fiberline.com/structures/profiles-and-decks-bridges/profiles-road-bridges/case-stories-road-bridges/german-highway/german-highways- agency-comb
Footbridge over road no. 11 in Gadki	Gadki	Poland	2008	deck	Manufactured by Fiberline Composites.
Holländerbrücke	Reinbeck	Germany	2009	deck	Length: 98,0 m. Width: 3,5 m. Manufactured by Fiberline Composites. Sobek W.; Trumpf H.; Stork L.; Weidler N.: <b>The Hollaenderbruecke. Economic and architecturally sophisticated design employing steel and GFRP</b> , In: Steel Construction 1 (2008), vol. 1, pp. 34-41 en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0043136 www.youtube.com/watch?v=CFqX9oFkB8I
Belle Glade Bridge	Belle Glade	USA, Florida	2009	deck	Manufactured by ZellComp, Inc. <a href="http://www.zellcomp.com/highway_bridge_ins">http://www.zellcomp.com/highway_bridge_ins</a>
Lafayette Bridge	Lafayette, Tippecano	USA, Indian	2009	deck	Manufactured by ZellComp, Inc. <a href="http://www.zellcomp.com/highway_bridge_ins">http://www.zellcomp.com/highway_bridge_ins</a>
Lunetten Footbridge	Utrecht	The Netherland	2010	deck	Length: 12,0 m. Width: 5,0 m. www.netcomposites.com/newspic.as

Appendix A

Name of the Bridge	Location	Country/ State	Year	USE of FRP composites	Basic information and references
Redstone Arsenal Bridge	Redstone Arsenal	USA, Alabam a	2010	deck	Manufactured by ZellComp, Inc. <a href="http://www.compositesworld.com/articles/new-bridge-deck-bests-early-frp-systems">http://www.compositesworld.com/articles/new-bridge-deck-bests-early-frp-systems</a>
Lleida Footbridge (2)	Lleida	Spain	2011	deck	<a href="http://www.tech.plym.ac.uk/sme/composites/bridges.htm#lleida2">www.tech.plym.ac.uk/sme/composites/bridges.htm#lleida2</a>
Fort Amherst Footbridge	Fort Amherst	UK	2011	deck	Length: 25,0 m. Width: 2,0 m. <a href="http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0059485">en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0059485</a>

Total FRP deck bridges: 119