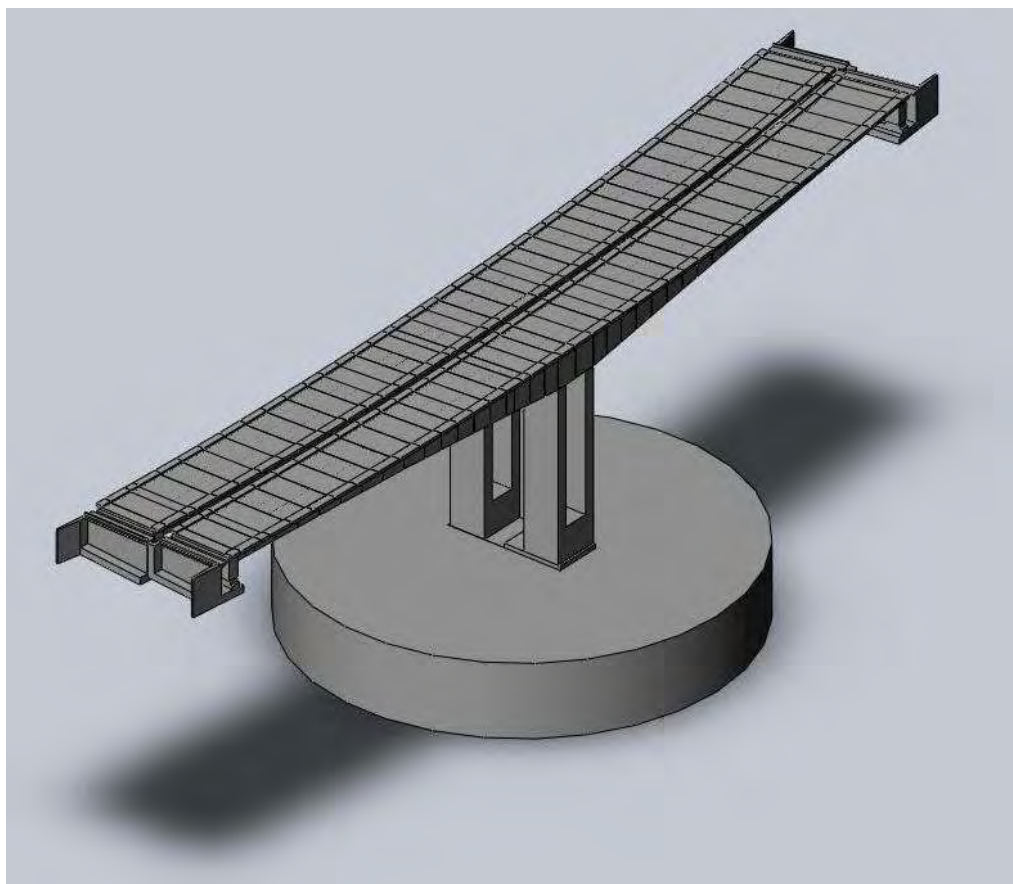


Μεταπτυχιακή Εργασία



**ΘΕΜΑ: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΕΦΥΡΑΣ
Γ9 ΠΟΛΥΜΥΛΟΥ ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

υπό

ΝΙΚΟΛΑΟΥ Γ. ΚΑΡΑΜΑΝΕ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Α.Π.Θ. 2005

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης- Μάρτιος 2011

© 2011 Νικόλαος Καραμανές

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Παπαδημητρίου Κωνστανίνος
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Ντακούλας Παναγιώτης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Τσόπελας Παναγιώτης
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Παπαδημητρίου Κωνσταντίνο, επιβλέποντα καθηγητή μου στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, για την πολύτιμη βοήθειά του κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής μου εργασίας αλλά και για την καθοδήγησή του και τις υποδείξεις του κατά τη διάρκεια των σπουδών. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου Χριστίνα Παπαδιώτη, Θέμις Τουμανίδου και Βασίλη Κελαντώνη για την ανεκτίμητη βοήθειά τους καθ' όλη τη διάρκεια του Μεταπτυχιακού.

Θα ήταν παράληψή μου, όμως, να μην αναφέρω την συμβολή των γονέων μου, χωρίς την ηθική και οικονομική συμπαράστασή τους δεν θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωση του μεταπτυχιακού, ενώ τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω και τη Δώρα, για την υπομονή και την κατανόησή της...

Νίκος Καραμανές

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΓΕΦΥΡΑΣ Γ9 ΠΟΛΥΜΥΛΟΥ ΕΓΝΑΤΙΑΣ ΟΔΟΥ, ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΚΑΡΑΜΑΝΕΣ

Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός Α.Π.Θ. 2005

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Παπαδημητρίου Κωνσταντίνος, Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Η ενόργανη παρακολούθηση των δομικών κατασκευών είναι μία συμπληρωματική μέθοδος δομικού ελέγχου τους, που μπορεί να υποστηρίξει την επαρκή, έγκαιρη και οικονομική συντήρησή τους με στόχο την ενίσχυση της ανθεκτικότητάς τους στον χρόνο. Υλοποιείται με δίκτυα ειδικών οργάνων (αισθητήρων), που εγκαθίστανται στην επιφάνεια ή ενσωματώνονται στην μάζα του φορέα των κατασκευών και γίνεται καταγραφή, με ειδικές καταγραφικές μονάδες, βασικών παραμέτρων της μηχανικής απόκρισης των δομικών κατασκευών, όπως η επιτάχυνση, η παραμόρφωση και η μετακίνηση, υπό συνήθεις και σεισμικές δράσεις. Η καταγραφή αυτή περιλαμβάνει την αρχική μέτρηση, όπου αυτή είναι διαθέσιμη κατά την έναρξη της λειτουργίας τους, και τις περιοδικές μετρήσεις (με συχνότητα μηνών ή ετών).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται η σχεδίαση και η κατασκευή τριών διαφορετικών μοντέλων της γέφυρας Γ9 του Πολύμυλου, στην Εγνατία Οδό. Έπειτα, γίνεται δυναμική ανάλυση των μοντέλων για την εξεύρεση των ιδιοτιμών της κατασκευής. Τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα με τις πειραματικές μετρήσεις που έχουν ληφθεί από με την τοποθέτηση στη γέφυρα κατάλληλων συσκευών (επιταχυνσιόμετρα) και χρήση ειδικού λογισμικού.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	7
1.2 ΚΙΝΗΤΡΟ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	7
1.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	9
1.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	9
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	11
2.1 ΔΟΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΦΥΡΑΣ	11
2.2 ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ	11
2.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΑΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	14
3. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	28
4. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	25
4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	25
4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΦΥΡΑΣ ΧΩΡΙΣ ΕΛΑΦΟΣ	26
4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΕΛΑΦΟΣ	49
4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΠΛΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΕΛΑΦΟΣ	71
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	89
6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ	94

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Ένα από τα μεγαλύτερα τεχνικά έργα που έγινε μέχρι σήμερα στην Ελλάδα είναι η Εγνατία Οδός. Πρόκειται για έναν κλειστό αυτοκινητόδρομο διεθνών προδιαγραφών μήκους 670 χιλιομέτρων, που διασχίζει «οριζόντια» τη Βόρεια Ελλάδα, από την Ηγουμενίτσα μέχρι τους Κήπους Εβρου. Μαζί με τους κάθετους άξονες (Σιάτιστα - Κρυσταλλοπηγή, Θεσσαλονίκη - Προμαχώνας και Αρδάνιο - Ορμένιο και Κομοτηνή - Νυμφαία) μήκους 300 χιλιομέτρων, που κατασκευάζονται δημιουργούν ένα οδικό έργο που διασχίζει την Ηπειρο, τη Μακεδονία και τη Θράκη και συνδέει τη Θεσσαλονίκη με τις γειτονικές χώρες. Το συνολικό κόστος της Εγνατίας Οδού, περιλαμβανομένων και των κάθετων οδικών αξόνων, ανέρχεται σε 7,5 δισ. ευρώ, από τα οποία τα 2,5 δισ. ευρώ είναι κοινοτική συγχρηματοδότηση.



Φωτ. 1-1. Κοιλαδογέφυρα Εγνατίας Οδού

1.2. ΚΙΝΗΤΡΟ ΚΑΙ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Η χάραξη σύγχρονων αυτοκινητοδρόμων σε δύσκολο ορεινό ανάγλυφο, όπως συμβαίνει σε πολλά τμήματα της Εγνατίας Οδού, απαιτεί την κατασκευή χαραδρογεφυρών και κοιλαδογεφυρών μεγάλου μήκους, με πολύ ψηλά βάθρα. Η ορθή χρήση των σύγχρονων μεθόδων και λογισμικών Στατικής και Δυναμικής Ανάλυσης και η πιστή εφαρμογή των Κανονισμών οδηγεί εν γένει σε ασφαλή σχεδιασμό για τις φορτίσεις και τους καταναγκασμούς που θα επιβληθούν στην γέφυρα κατά τη διάρκεια της ζωής της.

Υπάρχουν όμως κάποιοι παράγοντες που μπορούν να μεταβάλουν δυσμενώς τις αρχικές προβλέψεις, και συνεπώς πρέπει η επίδρασή τους στη λειτουργική και δομική ακεραιότητα της γέφυρας να αποτιμάται μέσω συμπληρωματικών δομικών ελέγχων, όπως της ενόργανης παρακολούθησης. Τέτοιοι παράγοντες είναι:

- Η έκθεση της γέφυρας σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, σε συνδυασμό με την ύπαρξη κατασκευαστικών αποκλίσεων και κακοτεχνιών. Μπορούν να επιφέρουν πρόωρη εκδήλωση σημαντικών φθορών (π.χ. ενανθράκωση του σκυροδέματος, απώλεια διατομής οπλισμού λόγω οξειδωσης). Ως γνωστόν, η σημαντική απώλεια διατομής οπλισμού προκαλεί ρηγματώση και απώλεια διατομής σκυροδέματος. Συνεπώς επηρεάζει την ακαμψία του φορέα της γέφυρας.
- Κατά τον σχεδιασμό γεφυρών με πολύ μεγάλα χαρακτηριστικά (ύψος βάθρων, μήκος ανοίγματος και συνολικό μήκος, βάθος θεμελίωσης), ή γεφυρών με μη κανονική κατανομή μάζας και ακαμψίας, η αυτονόητη συμμόρφωση με τους εν ισχύ κανονισμούς μπορεί να μη είναι αρκετή για την ασφαλή πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους στην πράξη. Έτσι απαιτείται συνήθως, ιδιαίτερα για αυτές τις γέφυρες, η αρχική και στην συνέχεια η τακτική ενόργανη παρακολούθησή τους, ώστε να μετρηθεί, να αναλυθεί και να γίνει κατανοητή η πραγματική μηχανική συμπεριφορά τους και η συμμόρφωση με τις προβλέψεις του σχεδιασμού τους.
- Σε γέφυρες που οι φορείς τους στηρίζονται μέσω εφεδράνων σε βάθρα και ακρόβαθρα, οι ιδιότητες αυτών των συσκευών (π.χ. δυστένεια, δυστημψία) είναι δεσπόζουσες για την στατική και δυναμική συμπεριφορά των γεφυρών. Στην περίπτωση, λοιπόν, χρήσης τέτοιων συσκευών σεισμικής μόνωσης είναι πολύ κρίσιμη η πιθανή μεταβολή ή απώλεια των βασικών ιδιοτήτων τους με τον χρόνο (π.χ. απόσβεση, ακαμψία κ.α.). Συνεπώς, για την έγκαιρη διάγνωση της τυχόν δυσμενούς μεταβολής των ιδιοτήτων των συσκευών αυτών, είναι χρήσιμη η ενόργανη παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των γεφυρών.
- Οι γεωτεχνικές συνθήκες θεμελίωσης, ιδιαίτερα των εκτεταμένων και βαθιών θεμελιώσεων, λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό με χρήση υψηλών συντελεστών ασφαλείας. Η πραγματική, όμως, επιρροή τους στην μηχανική συμπεριφορά των βάθρων, στύλων, τοιχίων είναι απαραίτητο να αποτιμηθεί πειραματικά (βαθμός στατικής και δυναμικής πάκτωσης) με ενόργανη παρακολούθηση της κατασκευής. Υπενθυμίζεται ότι η δυναμική συμπεριφορά των γεφυρών επηρεάζεται, ως γνωστόν, σημαντικά λόγω της αλληλεπίδρασης με το έδαφος.
- Η αξιόπιστη εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου μπορεί να γίνει μέσω της ενόργανης παρακολούθησης. Έτσι μπορούν να εκτιμηθούν π.χ. η συχνότητα και η ένταση σεισμικού κραδασμού, καθώς και η πιθανή γειννίαση με ενεργό σεισμικό ρήγμα, σε συνδυασμό με την αποτίμηση της επιρροής παραγόντων δυσμενούς αλλοίωσης της έντασης, του συχνοτικού περιεχομένου και του συγχρονισμού του σεισμικού κραδασμού στη βάση των βάθρων, (όπως το γεωλογικό υπόστρωμα και το τοπογραφικό ανάγλυφο κατά μήκος της γέφυρας).

Για την αξιόπιστη, λοιπόν, γνώση της επιρροής των παραπάνω παραγόντων στη δομική ακεραιότητα και στη δομική διακινδύνευση των γεφυρών, απαιτείται η αρχική και η συχνή ή μόνιμη ενόργανη παρακολούθηση της μηχανικής απόκρισης τους και της απόκρισης του εδάφους θεμελίωσής τους σε σεισμό (Structural Health Monitoring-SHM). Η ενόργανη παρακολούθηση των δομικών κατασκευών είναι μία συμπληρωματική μέθοδος δομικού ελέγχου τους, που μπορεί να υποστηρίξει την επαρκή, έγκαιρη και οικονομική συντήρησή τους με στόχο την ενίσχυση της ανθεκτικότητάς τους στον χρόνο. Υλοποιείται με δίκτυα ειδικών οργάνων (αισθητήρων), που εγκαθίστανται στην επιφάνεια ή ενσωματώνονται στην μάζα του φορέα των κατασκευών (Φωτ. 1-2).



Φωτ. 1-2. Αισθητήρες δυναμικής μέτρησης: (α) παραμόρφωσης, (β) μετακίνησης αρμού

Ο στόχος είναι η καταγραφή, με ειδικές καταγραφικές μονάδες, βασικών παραμέτρων της μηχανικής απόκρισης των δομικών κατασκευών, όπως η επιτάχυνση, η παραμόρφωση και η μετακίνηση, υπό συνήθεις και σεισμικές δράσεις. Η καταγραφή αυτή περιλαμβάνει την αρχική μέτρηση, όπου αυτή είναι διαθέσιμη κατά την έναρξη της λειτουργίας τους, και τις περιοδικές μετρήσεις (με συχνότητα μηνών ή ετών).

1.3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Τα τελευταία χρόνια διεξάγεται μια μεγάλη έρευνα με τη συνεργασία του τμήματος Τακτικής Συντήρησης Μεγάλων Τεχνικών Έργων της Εγνατίας Οδού ΑΕ και του Εργαστηρίου Δυναμικής Συστημάτων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Έχει γίνει ενοργάνωση με ειδικά δίκτυα επιταχυνσιογράφων και συστηματική παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς διαφόρων γεφυρών της Εγνατίας Οδού (η 2^η Χαραδρογέφυρα παράκαμψης Καβάλας, η γέφυρα Γ9, θέση 5.1 – Πολύμυλος) (Lekidis et al. 2004, Karakostas et al. 2006, Panetsos et al. 2006, Papadimitriou et al., 2007). Παράλληλα έχει αναπτυχθεί κατάλληλο λογισμικό για την ανάλυση των μετρήσεων.

Στα πλαίσια αυτής της έρευνας έχουν γίνει αρκετές διπλωματικές εργασίες και διδακτορικές διατριβές, κυρίως από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Ένα μικρό μέρος αυτής της έρευνα αποτελεί και η παρούσα εργασία.

1.4. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και η κατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου του δεξιού κλάδου της γέφυρας Πολύμυλου της Εγνατίας Οδού. Θα σχεδιαστούν τρία διαφορετικά μοντέλα:

- Δεξιός κλάδος, με έδαφος
- Δεξιός κλάδος, χωρίς έδαφος
- Διπλή γέφυρα

Έπειτα θα γίνει και η δυναμική ανάλυση των παραπάνω μοντέλων, για την εύρεση των είκοσι πρώτων ιδιοτιμών, για τις διάφορες παραλλαγές του μοντέλου. Οι ιδιοτιμές θα συγκριθούν με τιμές που μετρήθηκαν επιτόπου στο έργο (με τις ειδικές διατάξεις - επιταγχνσιόμετρα). Στόχος είναι να σχεδιαστεί ένα μοντέλο που θα ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν περισσότερο στην πραγματικότητα. Το μοντέλο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μοντέλο αναφοράς για την διαδικασία συνεχούς παρακολούθησης και καταγραφής της συμπεριφοράς της γέφυρας. Έτσι, τυχόν μεταβολή της στατικής ικανότητας της γέφυρας, οφειλόμενη είτε σε κάποια σεισμική δόνηση είτε σε φυσική φθορά με το πέρασμα του χρόνου, θα μπορούσε να παρατηρηθεί έγκαιρα μελετώντας τις τρέχουσες τιμές και συγκρίνοντάς τες με τις αντίστοιχες του πρότυπου μοντέλου.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

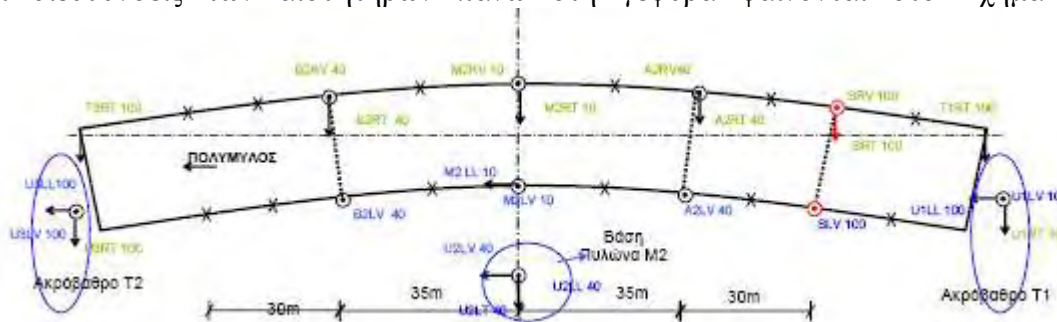
2.1. ΔΟΜΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΓΕΦΥΡΑΣ

Η γέφυρα ευρίσκεται στην Εγνατία οδό, στο τμήμα Πολύμυλος - Λευκόπετρα. Ένας από τους κύριους παράγοντες που οδήγησε την ερευνητική ομάδα στην επιλογή της συγκεκριμένης γέφυρας είναι το ότι ανήκει στο δεύτερο πιο αντιπροσωπευτικό τύπο γεφυρών της ΕΟΑΕ, κατασκευασμένη με τη μέθοδο της προβολοδόμησης. Το μήκος της εν προβόλω δόμησης των 85 περίπου μέτρων, θεωρείται από τα πιο μεγάλα αυτού του δομικού τύπου στην ΕΟ (μέγιστος πρόβολος που έχει κατασκευασθεί μέχρι σήμερα στην ΕΟΑΕ είναι περίπου 110 μέτρα, ενώ στην πλειονότητα των γεφυρών αυτού του τύπου είναι μήκους 55 – 60 μέτρα).

Η γέφυρα Γ9 του Πολύμυλου αποτελείται από δύο όμοιους, στατικά ανεξάρτητους, κλάδους μορφής T με μικρή καμπυλότητα κατά μήκος τους (Σχήμα 2-1). Το μήκος της είναι 170m και η διατομή του καταστρώματος είναι κυβοτοειδής, πλευράς που κυμαίνεται από 9m κοντά στο μεσόβαθρο ως 4m κοντά στα ακρόβαθρα. Έχει ένα μοναδικό βάθρο αποτελούμενο από δύο όμοιες κολώνες ύψους 35m μονολιθικά συνδεδεμένες με την ανωδομή που θεμελιώνονται σε μια ογκώδης ορθογώνια βάση η οποία βρίσκεται μέσα στο έδαφος. Η γέφυρα είναι κατασκευασμένη με προβολοδόμηση και εδράζεται στα ακρόβαθρα επί ελαστομεταλλικών εφεδράνων. Αυτά επιτρέπουν την ελεύθερη κίνηση (ολίσθηση) κατά μήκος του διαμήκη άξονα της γέφυρας (για παραλαβή των θερμοκρασιακών συστολοδιαστολών), ενώ λειτουργούν ως ελαστομεταλλικά κατά την εγκάρσια έννοια.

2.2. ΕΝΟΡΓΑΝΩΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ

Ο βορεινός (κλάδος από Βέροια προς Κοζάνη) κλάδος της γέφυρας έχει ενοργανωθεί με είκοσι τέσσερα επιταχυνσιόμετρα από τα οποία τα δεκαπέντε είναι τοποθετημένα στις πλευρές του καταστρώματος, τρία στη βάση του μεσόβαθρου και από τρία στα δύο ακρόβαθρα στις βάσεις των ελαστομερών εφεδράνων. Οι ακριβείς θέσεις και διευθύνσεις των αισθητήρων πάνω στη γέφυρα φαίνονται στο Σχήμα 2-1.



Σχ. 2-1: Θέσεις και διευθύνσεις των επιταχυνσιομέτρων πάνω στη Γέφυρα Γ9 του Πολύμυλου



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Φωτ. 2-2: Γέφυρα Πολυμήλου (Γ9) (α), (β) Όψεις (γ) άνοψη των δύο κλάδων (δ) ακρόβαθρο ενός κλάδου

Για την ενοργάνωση της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε το κινητό σύστημα καταγραφής της απόκρισης (σύστημα επιταχυνσιογράφων), που περιγράφηκε προηγουμένως. Παράλληλα με τις διαδικασίες απόκτησης του συστήματος ενοργάνωσης από την ΕΟΑΕ, υλοποιήθηκαν στη γέφυρα Γ9 τα απαιτούμενα έργα υποδομής για την ενοργάνωση. Η υλοποίηση τους έγινε από την Θεμελιοδομή ΑΕ, κατόπιν σχετικών οδηγιών από την ΕΟΑΕ, και περιελάμβαναν, μεταξύ άλλων, τη δημιουργία θέσεων ρευματοληψίας σε κατάλληλες θέσεις, τη δημιουργία προστατευτικών μεταλλικών κλωβών για τα καταγραφικά συστήματα (Φωτ. 2-2α) καθώς επίσης και την κατασκευή ειδικής μεταλλικής πλατφόρμας, η οποία τοποθετήθηκε στο διάκενο μεταξύ των δύο στατικώς ανεξάρτητων κλάδων, για την εγκατάσταση σε αυτή της μίας καταγραφικής μονάδας (Φωτ. 2-2β).

Με δεδομένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διαστάσεις της γέφυρας, κρίθηκε ότι επαρκούσε για την πλήρη παρακολούθηση της η χρήση 24 αισθητήρων που θα υποστηρίζονται από δύο καταγραφικές μονάδες Kinematics K2. Στο μέσο του συνολικού ανοίγματος (στη θέση του κεντρικού πυλώνα) και σε κάθε πλευρά της γέφυρας εγκαταστάθηκε από μία καταγραφική μονάδα (Φωτ. 2-3α,β), και υλοποιήθηκε μεταξύ τους σύνδεση με ειδικό καλώδιο για την επίτευξη κοινής εκκίνησης εγγραφής (common start) όλων των αισθητήρων (Φωτ. 2-3γ,δ).



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Φωτ. 2-3: Γέφυρα Πολυμύλου (Γ9) – σύστημα ενοργάνωσης (α) Καταγραφική μονάδες στη ‘δεξιά’ πλευρά της γέφυρας (β) Μεταλλική πλατφόρμα στην ‘αριστερή’ πλευρά της γέφυρας και καταγραφική μονάδα (γ) αισθητήρες στη θέση έδρασης σε ακρόβαθρο (δ) αισθητήρες στη βάση του κεντρικού πυλώνα

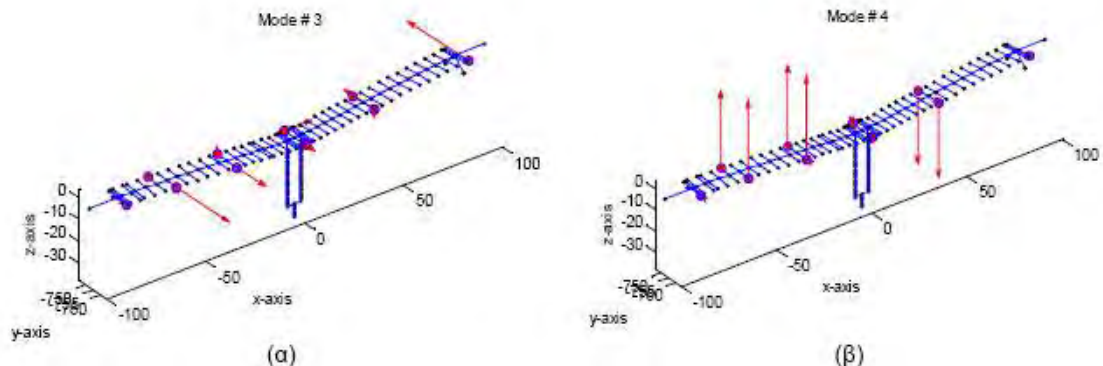
2.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΕΦΥΡΑΣ Γ9 ΠΟΛΥΜΥΛΟΥ ΑΠΟ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Οι μετρήσεις των ταλαντώσεων της γέφυρας που καταγράφηκαν, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών της γέφυρας με βάση διαθέσιμο λογισμικό ιδιομορφικής αναγνώρισης κατασκευών (Paradimitriou et al. 2008). Υπήρξαν δυο διαφορετικά είδη διεγέρσεων, η περιβαλλοντική και η σεισμική, οι οποίες έδωσαν και δυο σειρές ιδιοτιμών. Από τη διεγερση των οχημάτων και τη σεισμική διεγερση, αναγνωρίστηκαν καθαρά κάποιες ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές της γέφυρας. Ο τύπος των ιδιομορφών που αναγνωρίστηκαν, οι τιμές των ιδιοσυχνοτήτων και οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών απόσβεσης για ένα σετ μετρήσεων φαίνονται στον Πίνακα 1. Τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής αναγνώρισης για περιβαλλοντικές και σεισμικές διεγέρσεις που δείχνονται στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται αναλυτικά στις εργασίες Ntotsios et al. (2008) και Karakostas et al. (2008)

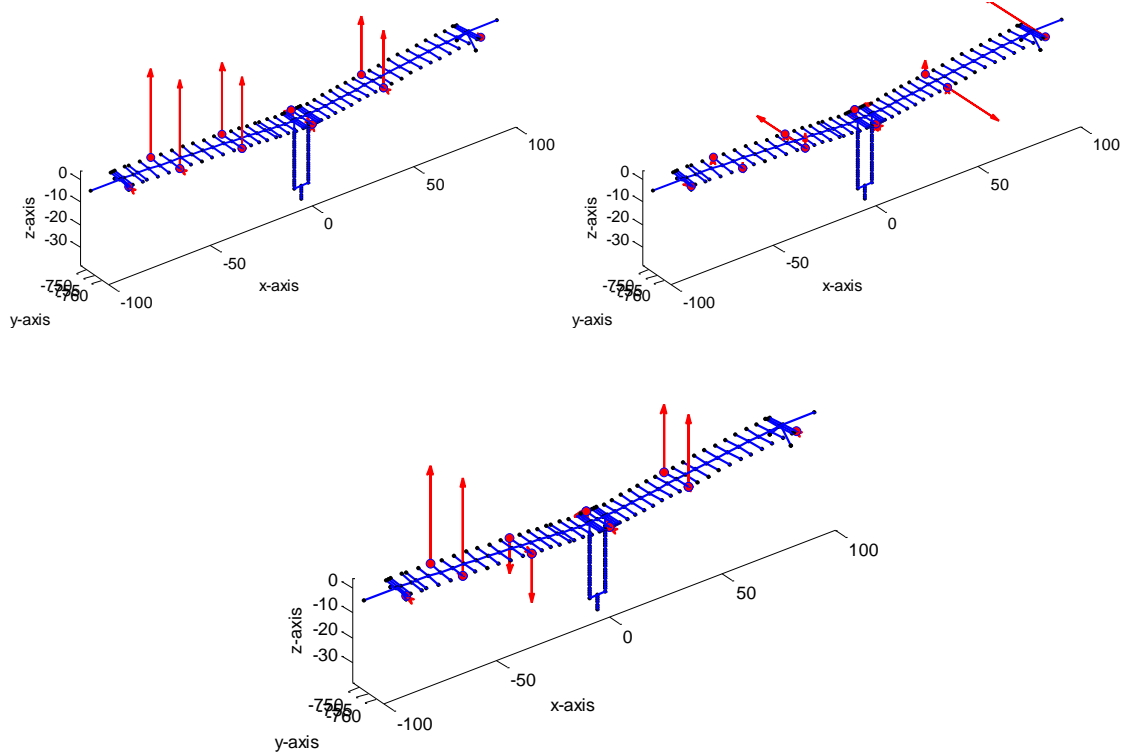
Ιδιομορφή	Περιβαλλοντική Διέγερση		Σεισμική Διέγερση	
	ω Hz	ζ (%)	ω Hz	ζ (%)
1 ^η Εγκάρσια	1.13	2.0	1.29	1.8
1 ^η Διαμήκης	-	-	1.17	1.8
2 ^η Εγκάρσια	1.20	5.6	1.30	5.9
1 ^η Καμπτική	2.13	0.6	2.20	0.6
3 ^η Εγκάρσια	2.22	1.1	2.56	3.5
2 ^η Καμπτική	3.07	0.4	3.20	0.7
4 ^η Εγκάρσια	4.10	0.8	4.23	3.2
3 ^η Καμπτική	6.66	0.5	6.89	0.6
5 ^η Εγκάρσια	6.78	0.8	7.24	1.2

Πίνακας 2-4. Αποτελέσματα αναγνώρισης ιδιομορφικών χαρακτηριστικών

Μερικές ενδεικτικές ιδιομορφές που αναγνωρίστηκαν φαίνονται στο Σχήμα 2-5 και στο Σχήμα 2-6. Τα κόκκινα βέλη βρίσκονται στα σημεία μέτρησης και το μήκος τους είναι ανάλογο της αντίστοιχης κανονικοποιημένης ιδιομορφικής συνιστώσας.



Σχήμα 2-5: Αναγνωρισμένες ιδιομορφές της γέφυρας Γ9 - Πολύμυλος (α) 1^η εγκάρσια ($\omega = 1.13$ Hz) (β) 1^η καμπτική ($\omega = 2.13$ Hz)



Σχήμα 2-6: Αναγνωρισμένες ιδιομορφές της γέφυρας Γ9 - Πολύμυλος (α) 2^η καμπτική ($\omega = 3.07 \text{ Hz}$), (β) 4^η εγκάρσια ($\omega = 4.10 \text{ Hz}$), (γ) 3^η καμπτική ($\omega = 6.65 \text{ Hz}$)



Φωτ. 2-7: Φωτογραφία από τη φάση της κατασκευής γέφυρας της Εγνατίας Οδού (Προβολοδόμηση)

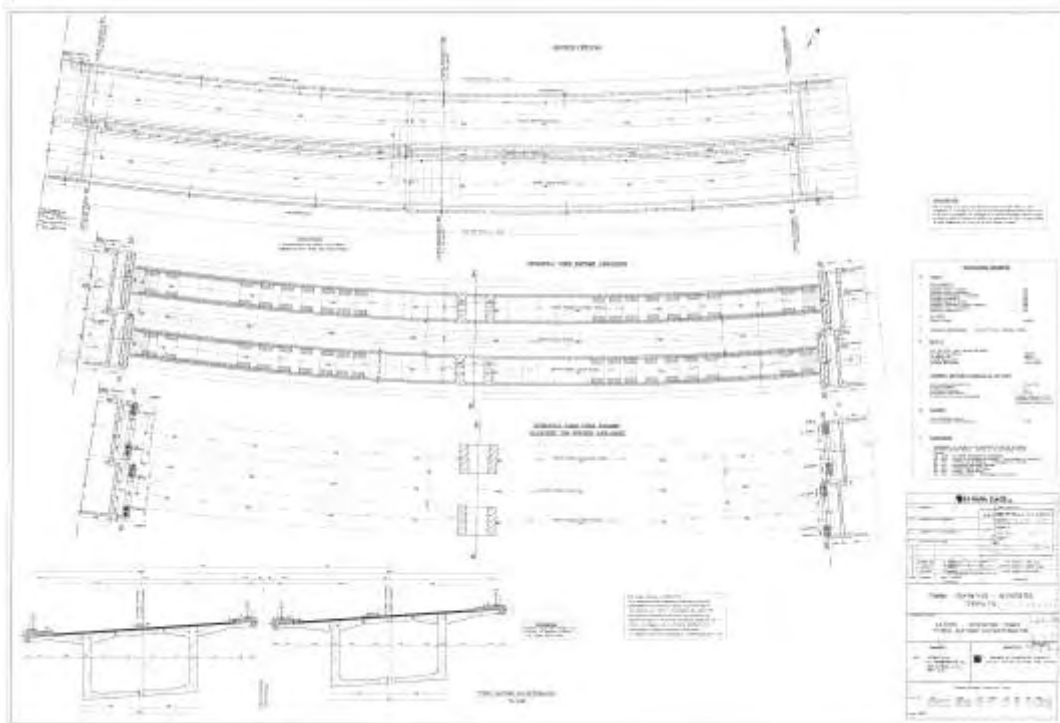


Σχήμα 2-8: Φωτογραφία από τη φάση της κατασκευής μεσόβαθρων γέφυρας της Εγνατίας Οδού

3. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

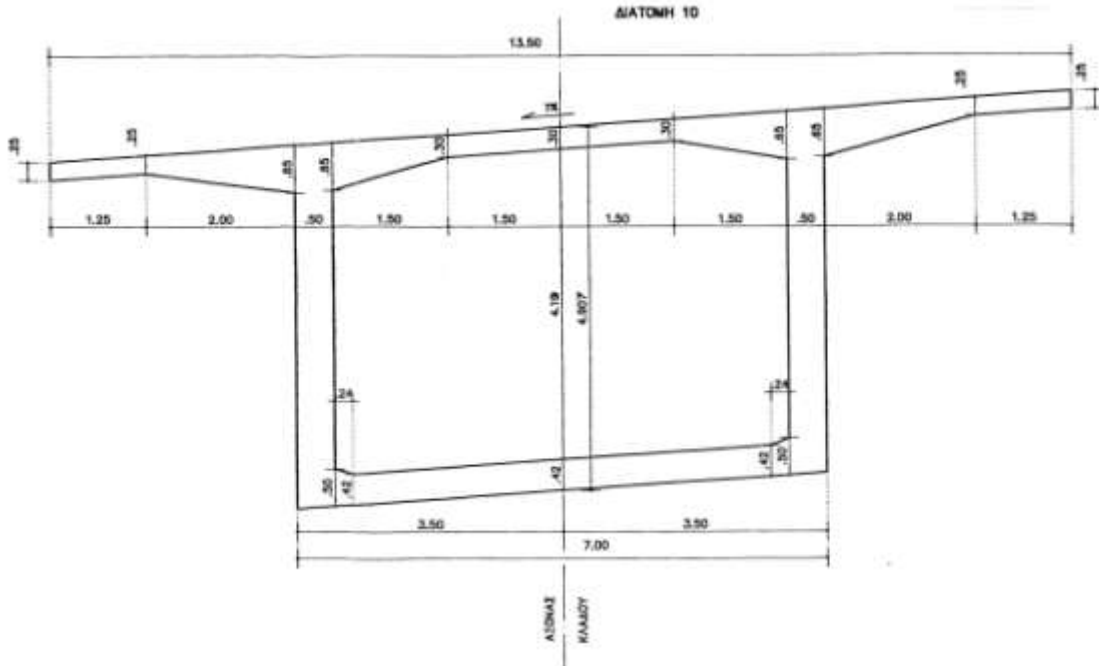
Για την κατασκευή του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα 3D παραμετροποιημένης σχεδίασης SolidWorks 2009 της Dassault Systems. Η σχεδίαση ξεκίνησε με τη μελέτη των 2D σχεδίων που εστάλησαν από την Εγνατία Α.Ε. Τα σχέδια ήταν σε μορφή pdf και απεικονίζουν όψεις και τομές της συγκεκριμένης γέφυρας, με γενικές διαστάσεις και κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Δίνουν πληροφορίες για τον τρόπο της κατασκευής, για τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και τις ιδιότητες αυτών (E, ν, κτλ), καθώς και τοπογραφικά στοιχεία.

Η γέφυρα είναι κατασκευασμένη με τη μέθοδο της προβολοδόμησης. Το κατάστρωμα αποτελείται από 42 τμήματα μεταβαλλόμενης διατομής. Εδράζεται σε δύο ακρόβαθρα, τα Α0 και Α2, καθώς και στο μεσόβαθρο Μ1. Στον διαμήκη άξονα, η γέφυρα έχει μια σταθερή κλίση οδοστρώματος 3.5%, ενώ το κατάστρωμα έχει μια σταθερή εγκάρσια κλίση 7%. Επίσης, η γέφυρα δεν είναι ευθύγραμμη, αλλά έχει μια σταθερή ακτίνα καμπυλότητας με $R=757,55m$.

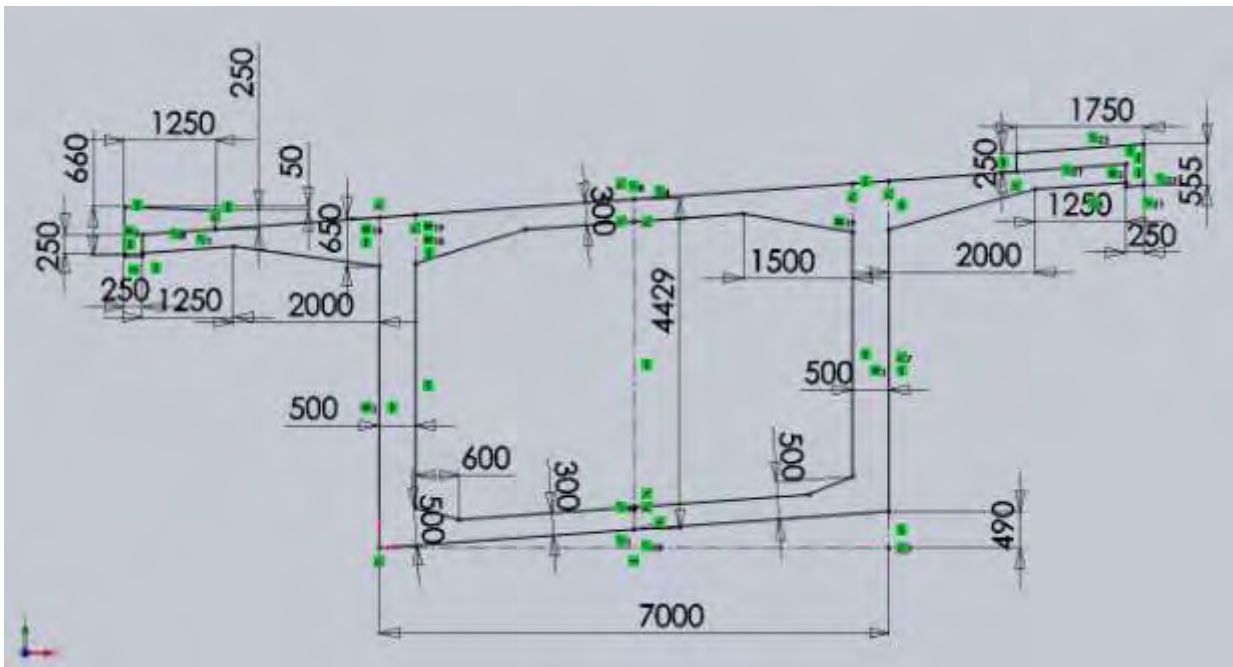


Σχήμα 3-1: Γέφυρα Πολύμυλου, κάτοψη-τομές

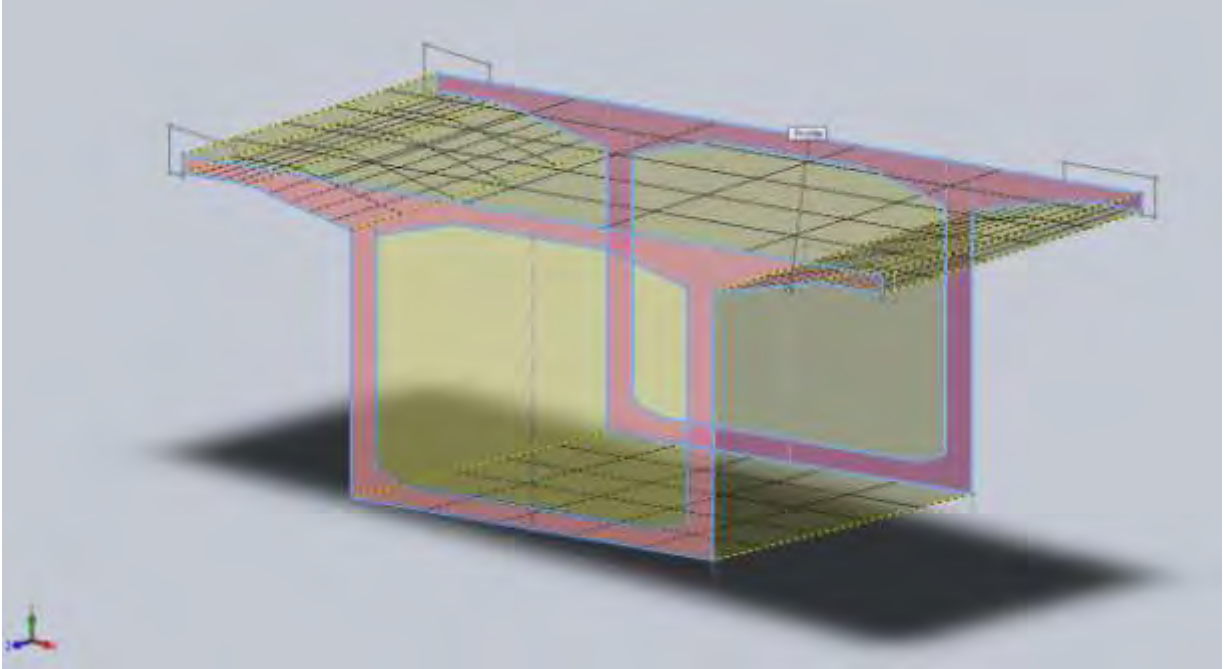
Η σχεδίαση έγινε με γνώμονα την όσο το δυνατόν πιο πιστή αποτύπωση της πραγματικής κατασκευής. Έτσι, αρχικά, σχεδιάστηκαν τα 42 διαφορετικά τμήματα που αποτελούν το κατάστρωμα της γέφυρας. Για την κατασκευή καθενός από τα παραπάνω τμήματα χρειάζεται αρχικά να σχεδιαστούν οι δύο διατομές, η αρχική και η τελική. Οι διατομές αυτές ενώνονται με την εντολή LOFT του SolidWorks, σχηματίζοντας το αντίστοιχο τμήμα (PART).



Σχήμα 3-2: Γέφυρα Πολύμυλου, τυπική διατομή

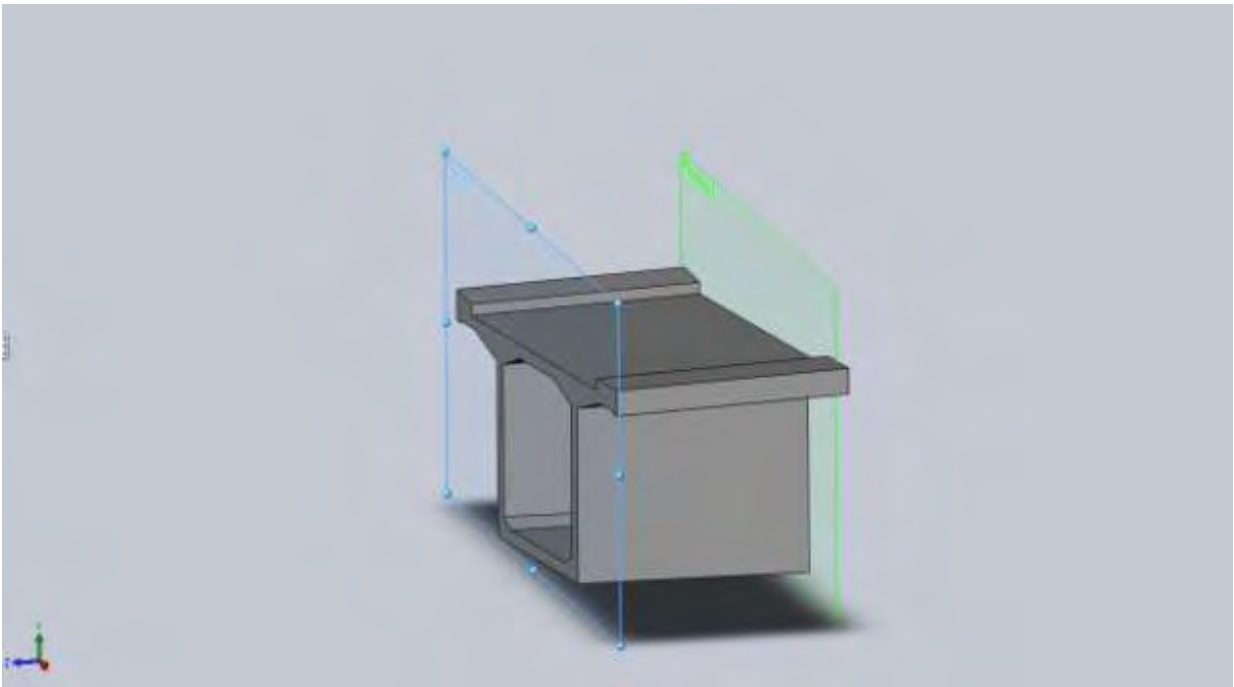


Σχήμα 3-3: Γέφυρα Πολύμυλου, τυπική διατομή, σχεδιασμένη σε περιβάλλον SolidWorks

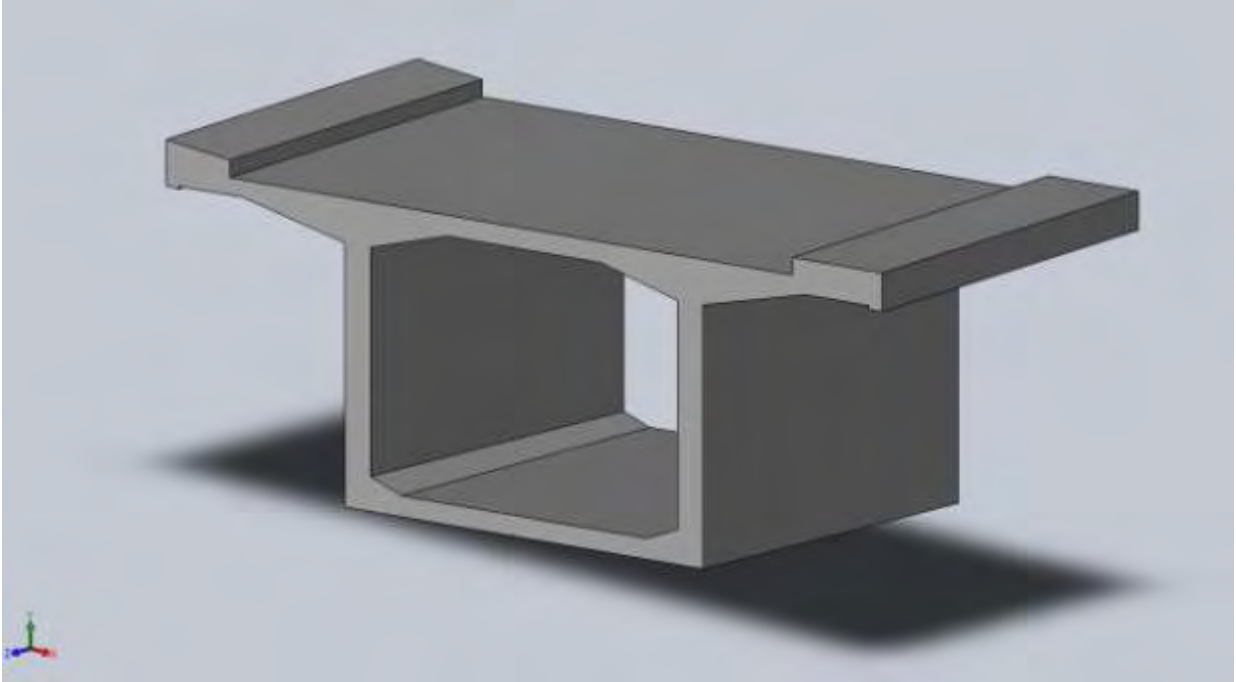


Σχήμα 3-4: Εφαρμογή εντολής LOFT

Πρέπει να τονισθεί ότι τα επίπεδα στα οποία είναι σχεδιασμένες οι διατομές δεν είναι παράλληλα, αλλά έχουν μεταξύ τους μια γωνία, ανάλογα με το μήκος του τμήματος, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ακτίνα καμπυλότητας που έχει το κατάστρωμα.

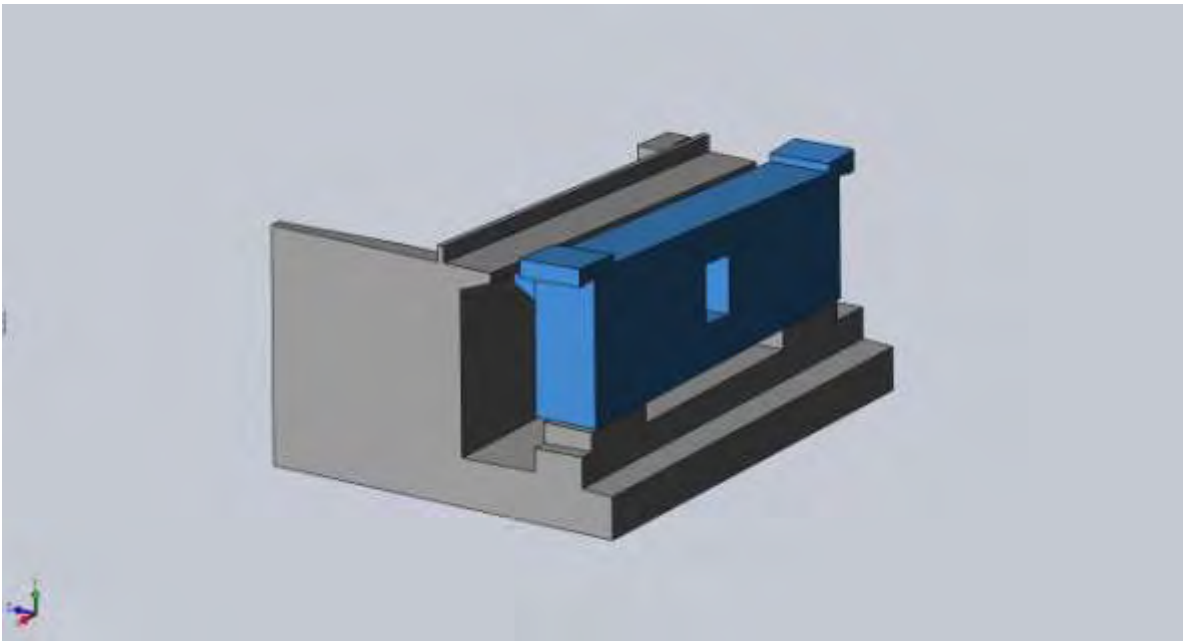


Σχήμα 3-5: Τοπικό τμήμα (PART) της γέφυρας

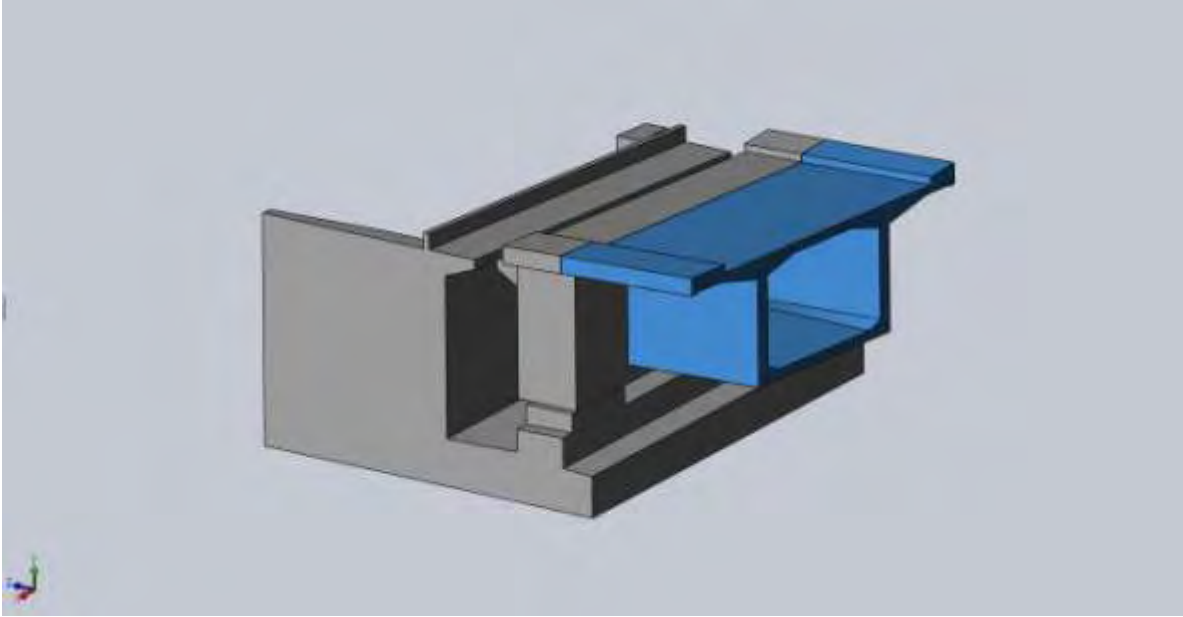


Σχήμα 3-6: Τυπικό τμήμα (PART) της γέφυρας

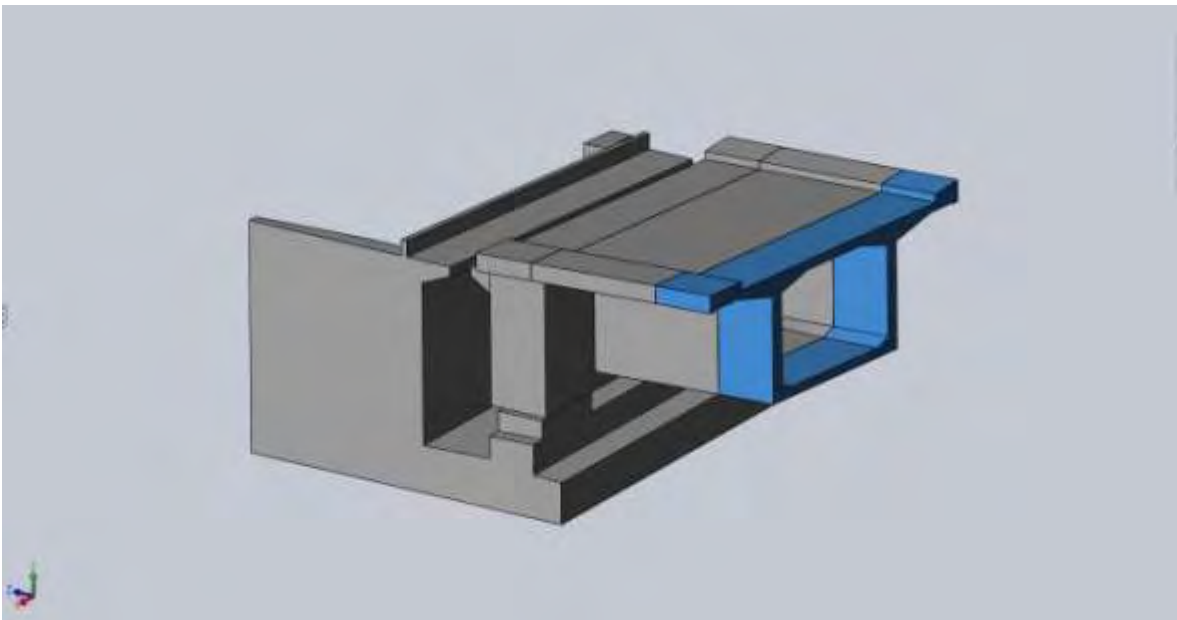
Αντίστοιχα, σχεδιάζονται και κατασκευάζονται τα δύο ακρόβαθρα, το μεσόβαθρο, η βάση του μεσόβαθρου και το έδαφος, γύρω από το μεσόβαθρο. Έπειτα, τα τμήματα συναρμολογούνται, χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα mates, σχηματίζοντας την τελική κατασκευή (ASSEMBLY). Παρακάτω παρατίθενται κάποια στάδια από τη φάση της σχεδίασης.



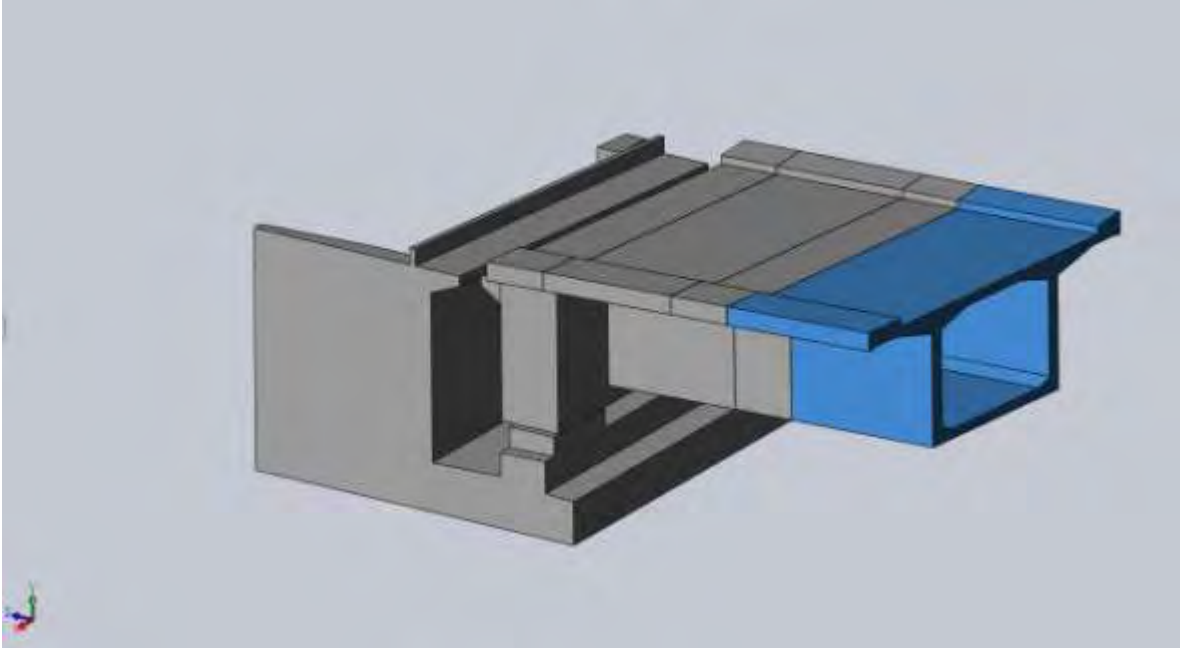
Σχήμα 3-7: Συναρμολόγηση τελικού Assembly, στάδιο 1



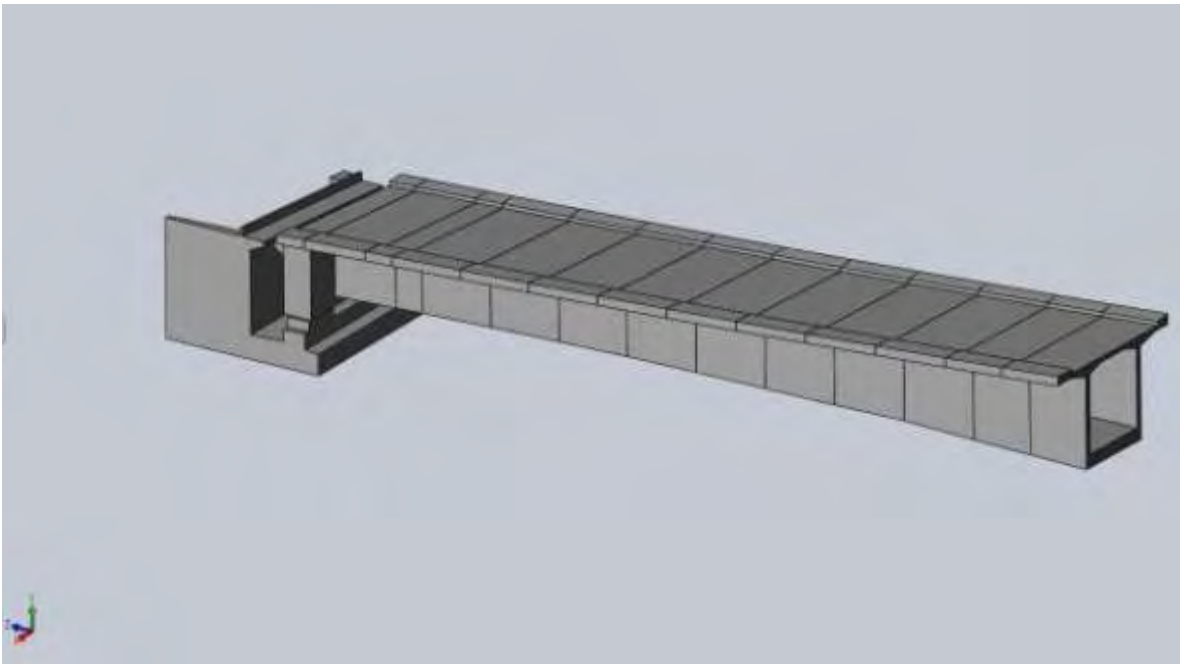
Σχήμα 3-8: Συναρμολόγηση τελικού Assembly, στάδιο 2



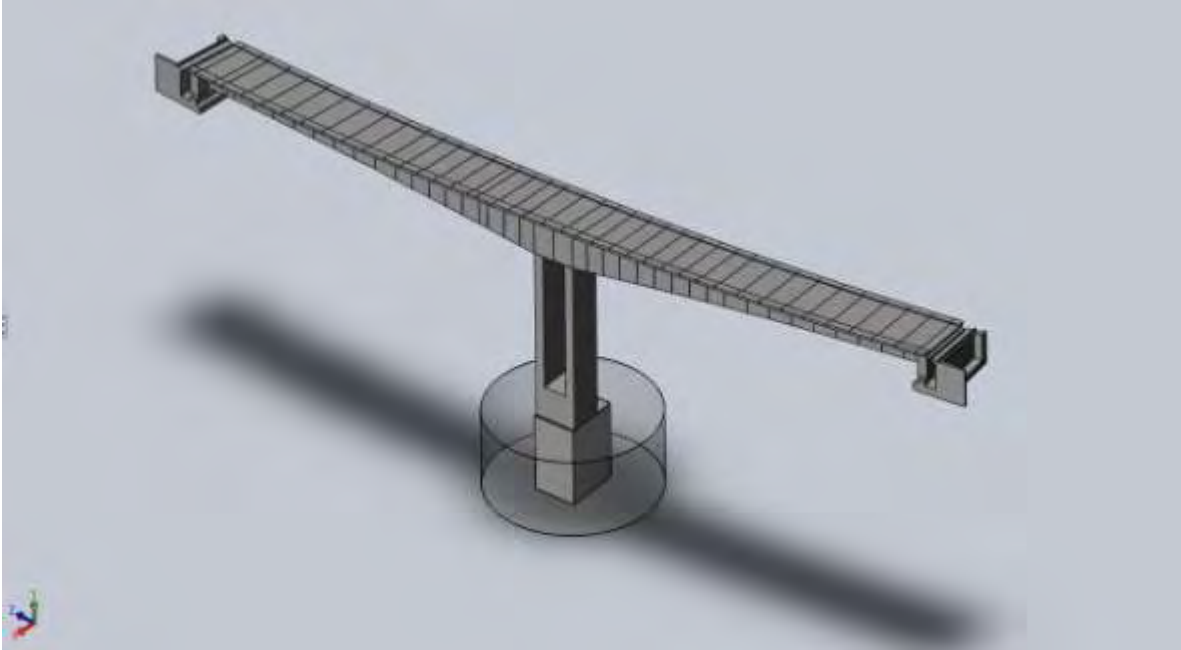
Σχήμα 3-9: Συναρμολόγηση τελικού Assembly, στάδιο 3



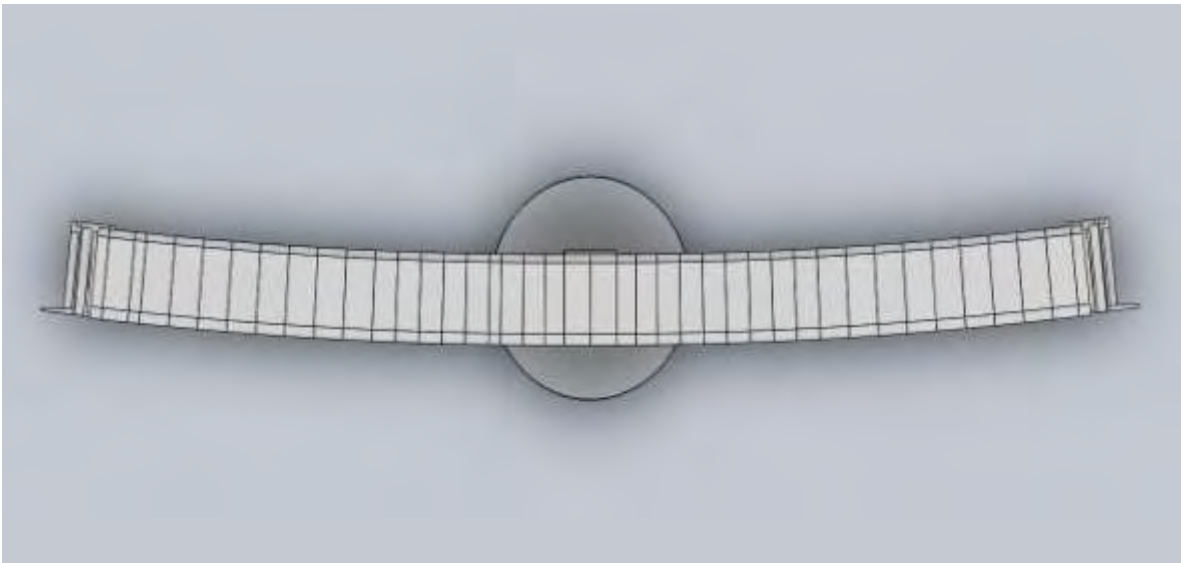
Σχήμα 3-10: Συναρμολόγηση τελικού Assembly, στάδιο 4



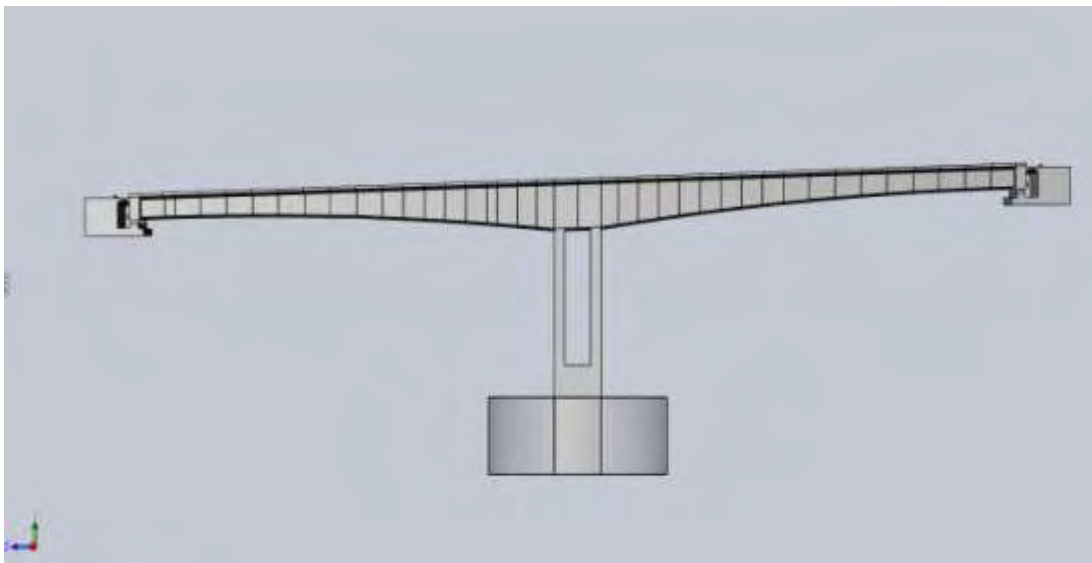
Σχήμα 3-11: Συναρμολόγηση τελικού Assembly, στάδιο 5



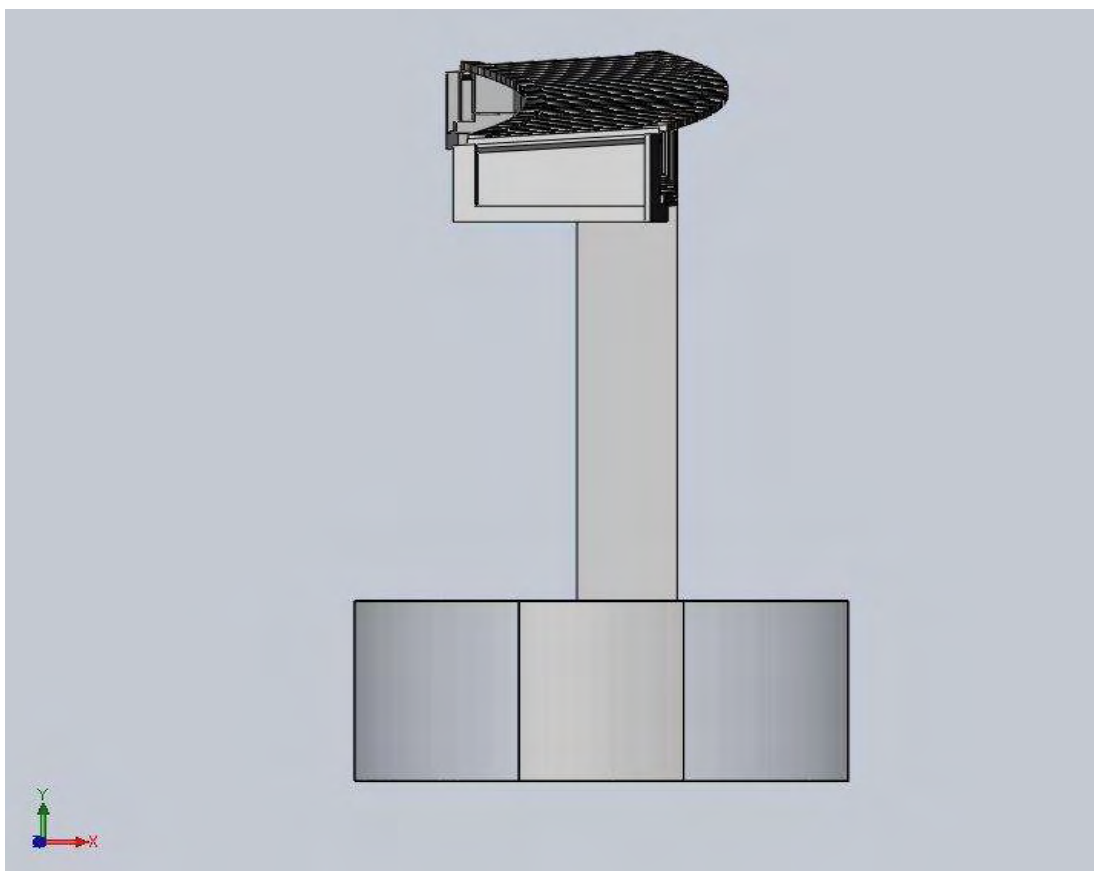
Σχήμα 3-12: Τελικό μοντέλο, ισομετρική όψη



Σχήμα 3-13: Τελικό μοντέλο, κάτοψη



Σχήμα 3-14: Τελικό μοντέλο, πλάγια όψη



Σχήμα 3-15: Τελικό μοντέλο, πρόσοψη

Για την όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική μοντελοποίηση της γέφυρας, σχεδιάστηκε με την ίδια φιλοσοφία και ο αριστερός κλάδος της, έτσι ώστε να γίνει και ένα τελικό μοντέλο με τους δύο κλάδους.

4. ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

4.1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κατασκευάζονται 3 διαφορετικά μοντέλα. Στο πρώτο δεν λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση του εδάφους με το μεσόβαθρο και θεωρούμε πακτωμένη την βάση του. Στο δεύτερο, το έδαφος προσομοιώνεται με ένα τεμάχιο, που έχει τις δικές του ιδιότητες και σταθερές. Στο τρίτο μοντέλο προσομοιώνεται η διπλή γέφυρα με την παρουσία του εδάφους. Μια σημαντική παραδοχή που γίνεται είναι ότι τα εφέδρανα συμπεριφέρονται σαν ισότροπο υλικό. Τα ακρόβαθρα θεωρούνται ως απαραμόρφωτα σώματα. Οι πυλώνες θεωρείται ότι συνδέονται άκαμπτα με τη θεμελίωση.

Η όλη προσομοίωση γίνεται σε περιβάλλον προγραμματισμού COMSOL Multiphysics. Αρχικά εισάγεται το μοντέλο που έχει σχεδιαστεί στο Solid Works. Το κάθε μοντέλο αποθηκεύεται σε μορφή x_t για να μπορεί να είναι αναγνώσιμο από το COMSOL. Έπειτα, μέσω της εντολής boundary settings καθορίζονται οι οριακές συνθήκες. Εδώ καθορίζουμε ποιες επιφάνειες θα είναι πακτωμένες (π.χ. κάτω επιφάνεια βάσης μεσόβαθρου) και ποιες θα κινούνται ελεύθερα. Για την ακριβέστερη προσομοίωση της γέφυρας, τα τεμάχια (parts) που απαρτίζουν το συνολικό μοντέλο (assembly) χωρίζονται σε πέντε διαφορετικές ομάδες. Καθεμία από αυτές, έχει διαφορετικές ιδιότητες, που καθορίζονται από το υλικό που είναι κατασκευασμένη. Οι ομάδες και τα χαρακτηριστικά τους απεικονίζονται στον επόμενο πίνακα:

A/A	Group	Material model	E (Young's Modulus) Pa	v (Poisson's ratio)	a (Thermal expansion coef)_ 1/K	d (Density) kg/m ³
1	Deck (Κατάστρωμα)	Isotropic	3.7e10	0.2	1.2e ⁻⁵	2548
2	Bearings (Εφέδρανα)	Isotropic	1.272e7	0.49	1.2e ⁻⁵	2548
3	M1 pier (Μεσόβαθρο M1)	Isotropic	3.4e10	0.2	1.2e ⁻⁵	2548
4	M1 Base (Βάση μεσόβαθρου)	Isotropic	3e10	0.2	1.2e ⁻⁵	2548
5	Soil (Εδαφος)	Isotropic	2.88e9	0.2	1.2e ⁻⁵	2548

Πίνακας 4-1: Σταθερές που λήφθηκαν υπόψη κατά την δυναμική ανάλυση

Αφού έχει γίνει ο προσδιορισμός των σταθερών, το επόμενο βήμα είναι η κατασκευή του δικτύωματος με πεπερασμένα στοιχεία. Το πρόγραμμα μας δίνει τη δυνατότητα να επιλέξουμε ανάμεσα σε εννιά διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος, από πολύ αραιό (extremely coarse) μέχρι πολύ πυκνό (extremely fine). Επιλέχτηκε σχετικά αραιή κατανομή βρόχων (extra coarse), διότι από δοκιμές που έγιναν αποδείχτηκε ότι είχε μικρούς χρόνους υπολογισμού, ενώ παράλληλα τα αποτελέσματα που δίνει δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές με πιο πυκνά δίκτυα.

4.2. ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΦΥΡΑΣ ΧΩΡΙΣ ΕΔΑΦΟΣ



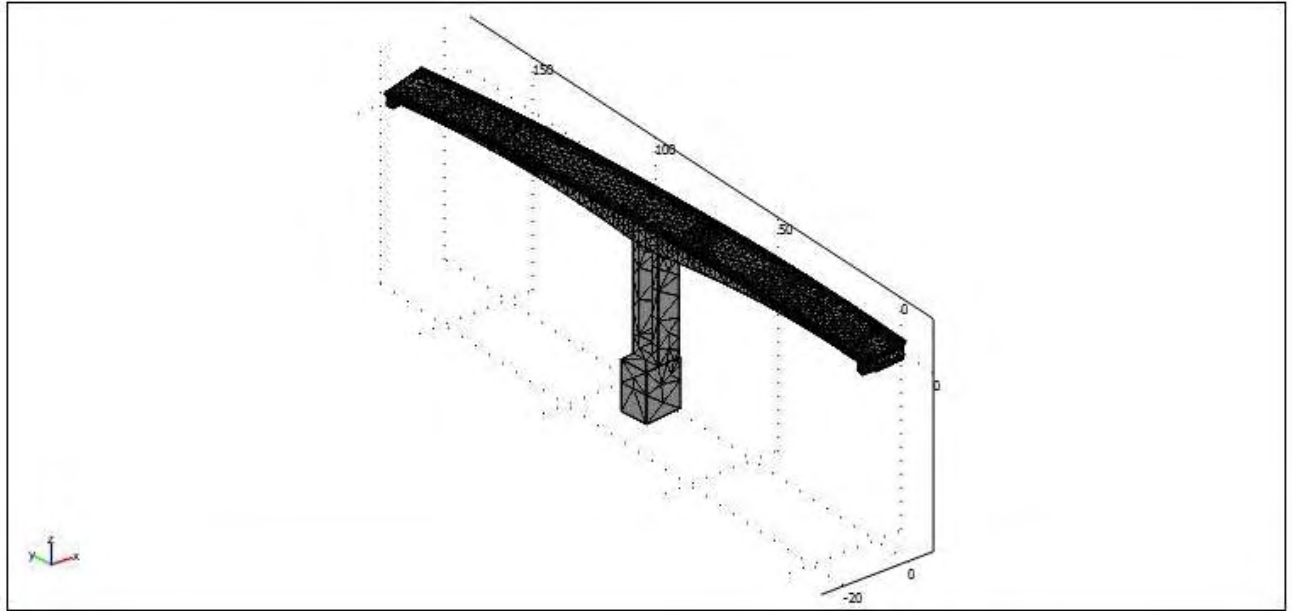
Σχήμα 4-2. Δεξιά γέφυρα - FEM με πακτωμένη βάση

Το πρώτο μοντέλο που μελετήθηκε είναι η γέφυρα χωρίς έδαφος. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι extra coarse και έχει συνολικά 48062 πεπερασμένα στοιχεία. Οι βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου είναι 273066. Για την δυναμική ανάλυση θεωρούμε πακτωμένες τις κάτω πλευρές των εφεδράνων και την κάτω επιφάνεια της βάσης του μεσόβαθρου. Στον παρακάτω πίνακα 4-3 παρουσιάζονται οι είκοσι πρώτες ιδιοτιμές που υπολογίστηκαν.

Επίσης, έγινε ανάλυση και με πλέγμα coarse, το οποίο έχει σχεδόν τριπλάσιους βαθμούς ελευθερίας και αριθμό πεπερασμένων στοιχείων. Παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα, όπου επιβεβαιώνεται η αρχική εκτίμηση για την μικρή διαφορά στα αποτελέσματα. Σε μία μόνο ιδιοτιμή παρουσιάζεται διαφορά περίπου 6%, ενώ ο μέσος όρος είναι περίπου 1%.

Μοντέλο χωρίς έδαφος, με πακτωμένη βάση	Αριθμός FEM: 48062 (extra coarse) Βαθμοί Ελευθερίας: 273066	Αριθμός FEM:132304 (coarse) Βαθμοί Ελευθερίας: 717531		
A/A	Ιδιοτιμές (αποτελέσματα)	Ιδιοτιμές (αποτελέσματα)	Είδος ιδιομορφών	Διαφορά (%) extra coarse-coarse
1	0.892852	0.878586	διαμήκης	1.6%
2	0.998062	0.994416	εγκάρσια	0.4%
3	1.089419	1.087916	εγκάρσια - στρεπτική	0.14%
4	1.996292	1.991868	διαμήκης	0.22%
5	2.040494	2.012686	καμπτική	1.36%
6	2.898880	2.899880	καμπτική	0.03%
7	3.867404	3.860689	διαμήκης	0.95%
8	5.816768	5.857029	καμπτική	0.7%
9	6.147161	6.123153	διαμήκης - στρεπτική	0.39%
10	6.564620	6.629568	καμπτική	0.99%
11	6.969816	6.960310	εγκάρσια - στρεπτική	0.13%
12	7.152510	7.126739	στρεπτική	0.36%
13	8.215384	7.951891	καμπτική	3.21%
14	8.836051	8.952779	καμπτική	1.32%
15	9.179120	9.127261	στρεπτική	0.55%
16	9.338459	9.405912	καμπτική	0.77%
17	10.174080	9.529244	καμπτική	6.33%
18	10.744952	10.663295	εγκάρσια	0.76%
19	11.841144	11.830981	καμπτική	0.08%
20	12.034821	11.907790	στρεπτική	1,05%

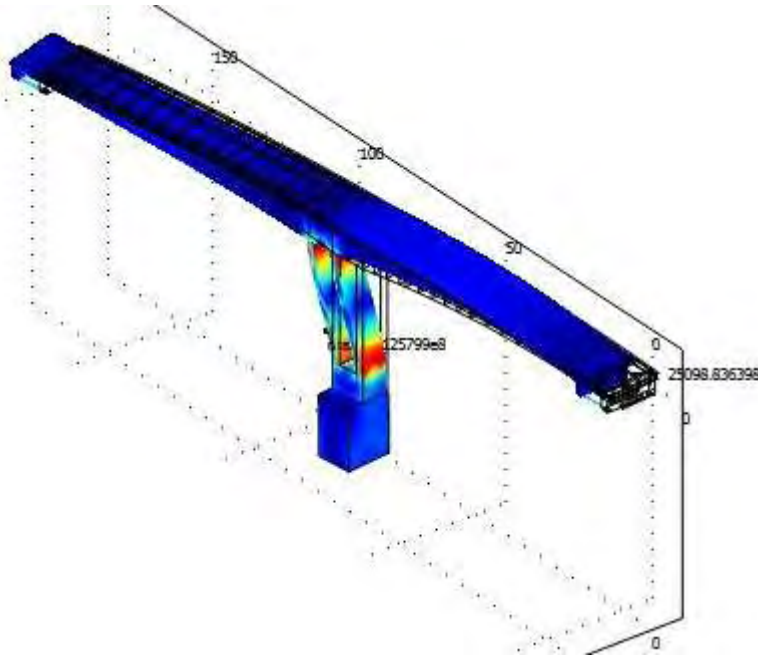
Πίνακας 4-3. Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης δεξιού κλάδου γέφυρα - FEM με πακτωμένη βάση



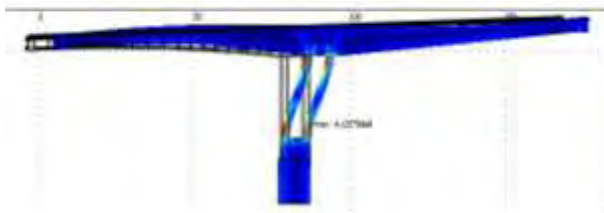
**Σχήμα 4-4. Δικτύωμα δεξιού κλάδου γέφυρας - FEM με πακτωμένη βάση
Extra coarse, DOF=273066, F.E.=48062**

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται οι απεικονίσεις των ιδιομορφών που υπολογίστηκαν για το συγκεκριμένο μοντέλο.

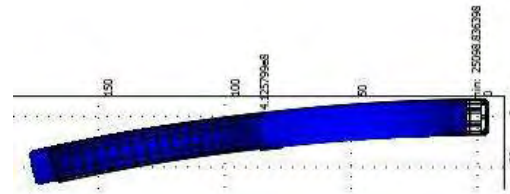
1st ιδιομορφή (0.892852) [διαμήκης]



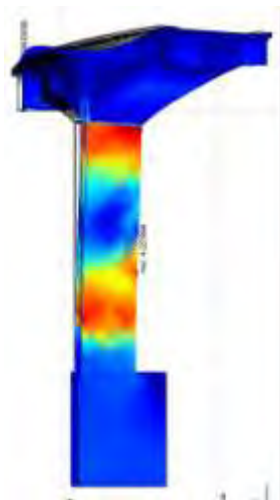
Isometric View



Side View

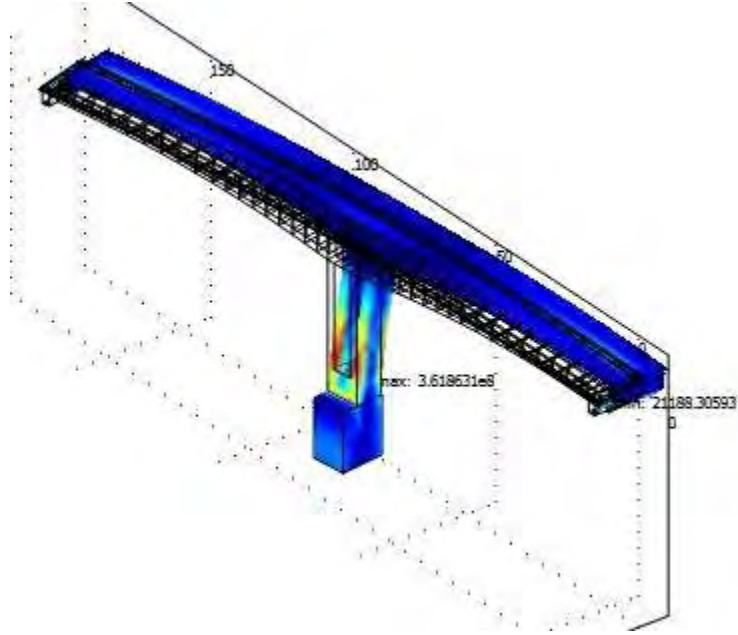


Top View

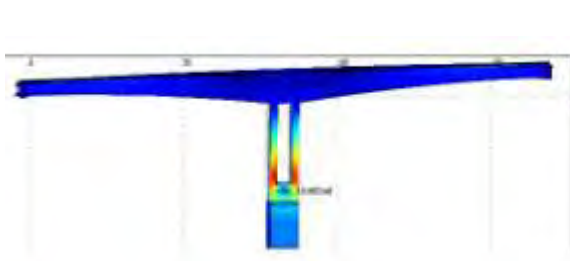


Front View

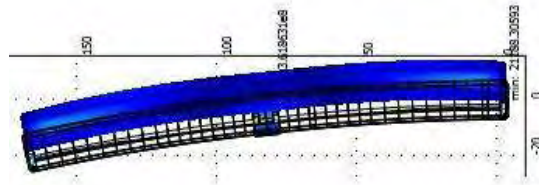
2st ιδιομορφή (0.998062) [εγκάρσια]



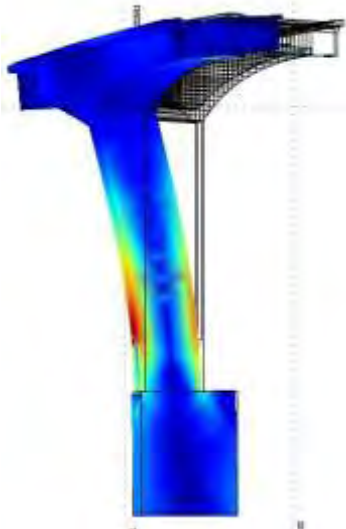
Isometric View



Side View

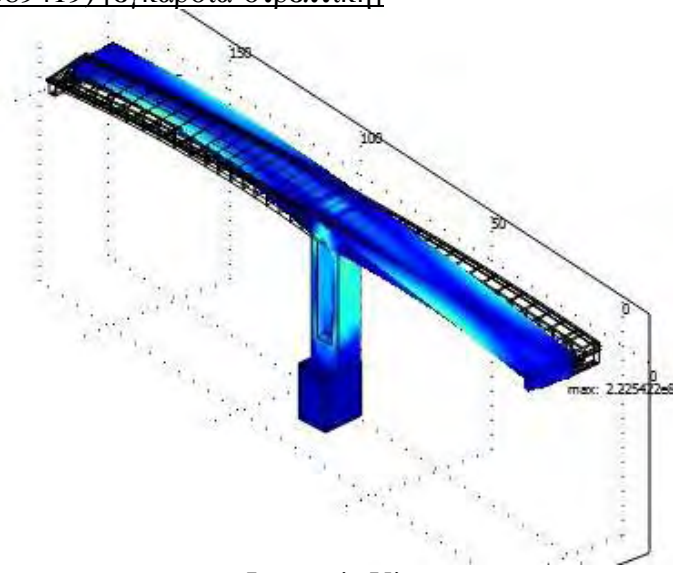


Top View

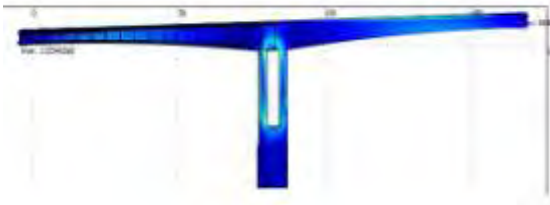


Front View

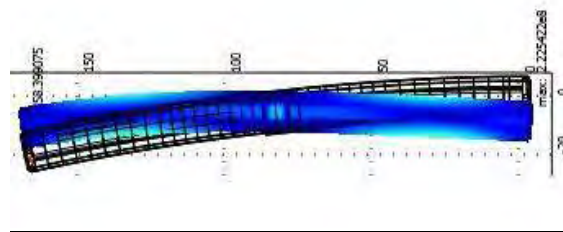
3st ιδιομορφή (1.089419) [εγκάρσια-στρεπτική]



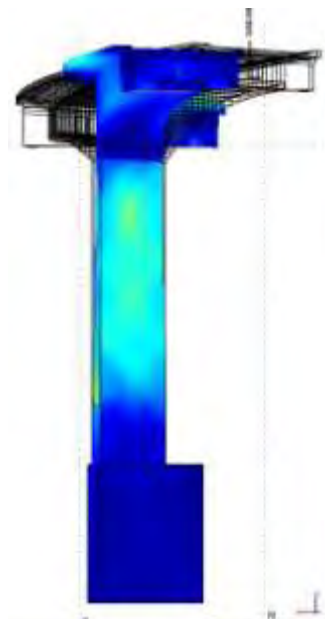
Isometric View



Side View

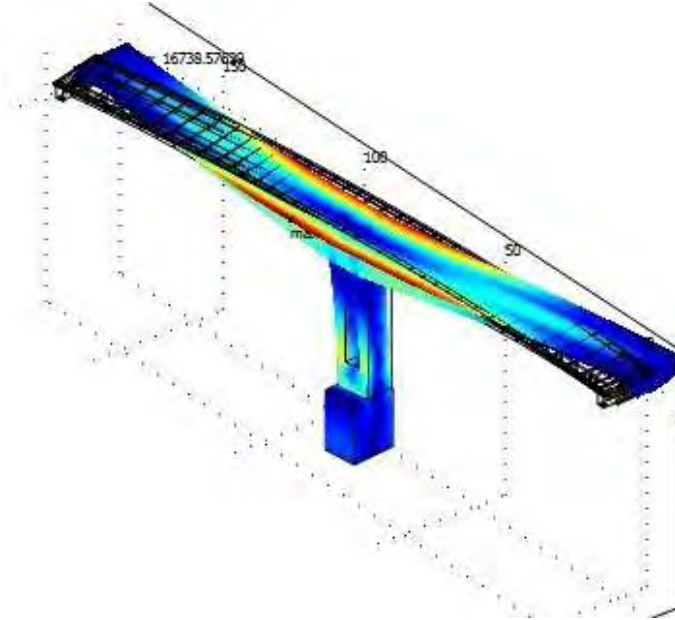


Top View

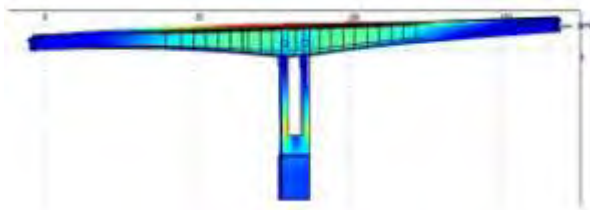


Front View

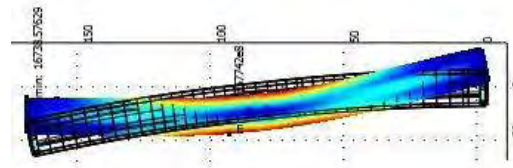
4st ιδιομορφή (1.996292) [εγκάρσια]



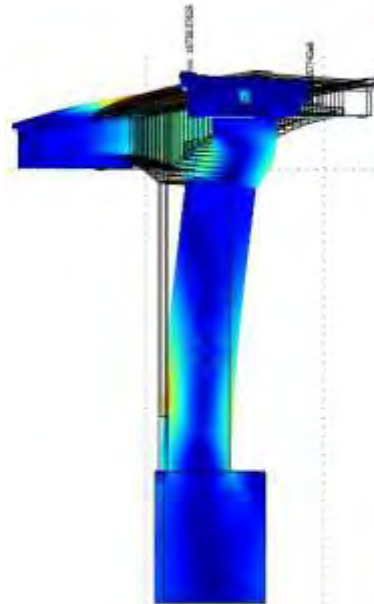
Isometric View



Side View

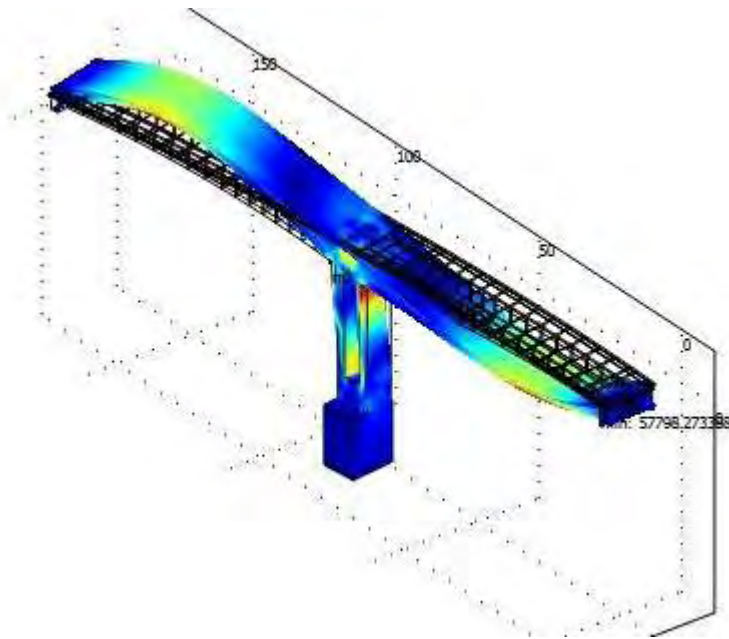


Top View

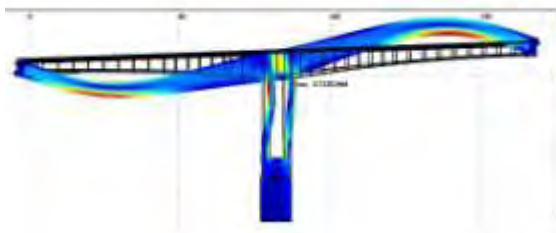


Front View

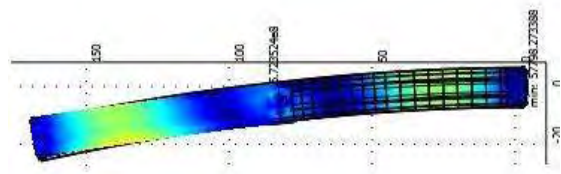
5st ιδιομορφή (2.020494) [καμπτική]



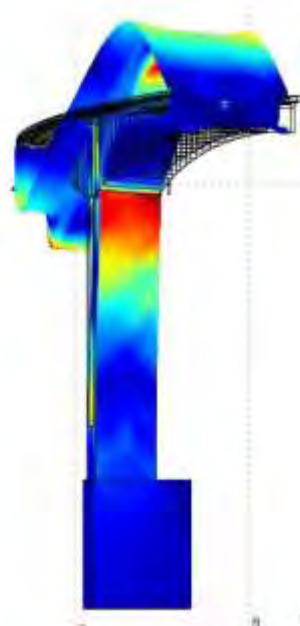
Isometric View



Side View

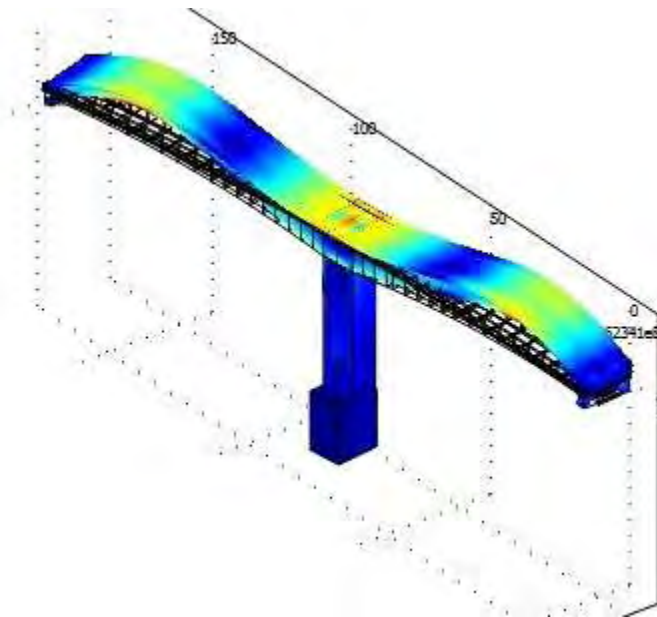


Top View

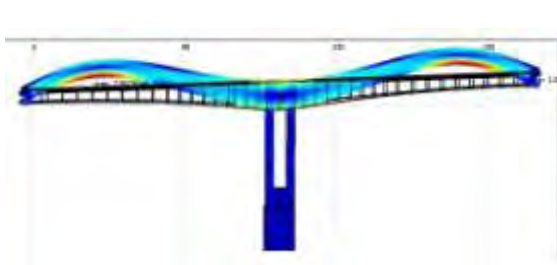


Front View

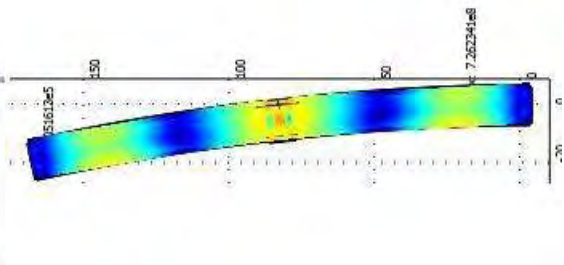
6st ιδιομορφή (2.898880) [καμπτική]



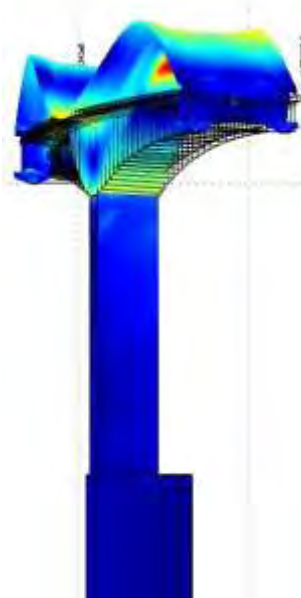
Isometric View



Side View

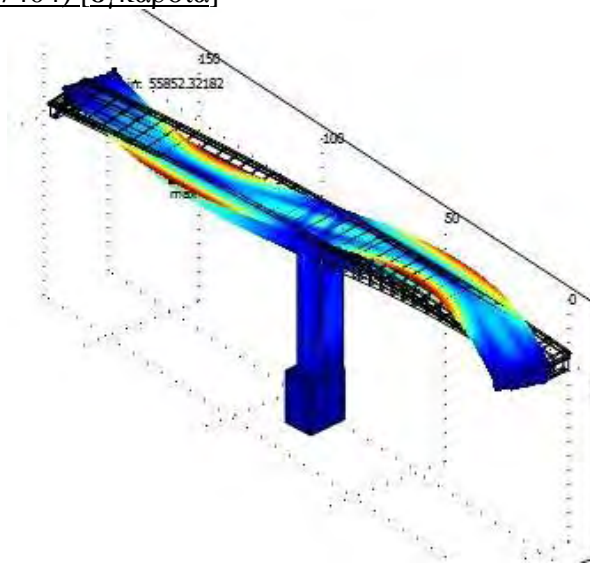


Top View

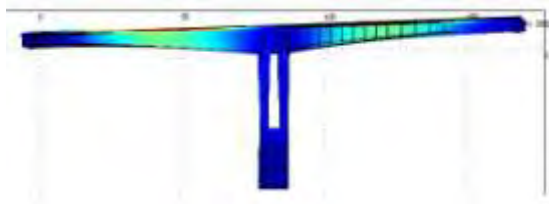


Front View

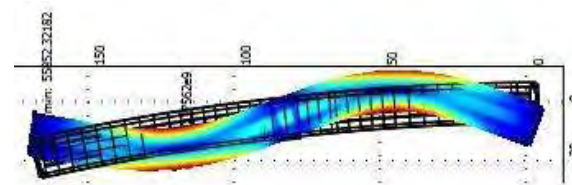
7st ιδιομορφή (3.867404) [εγκάρσια]



Isometric View



Side View

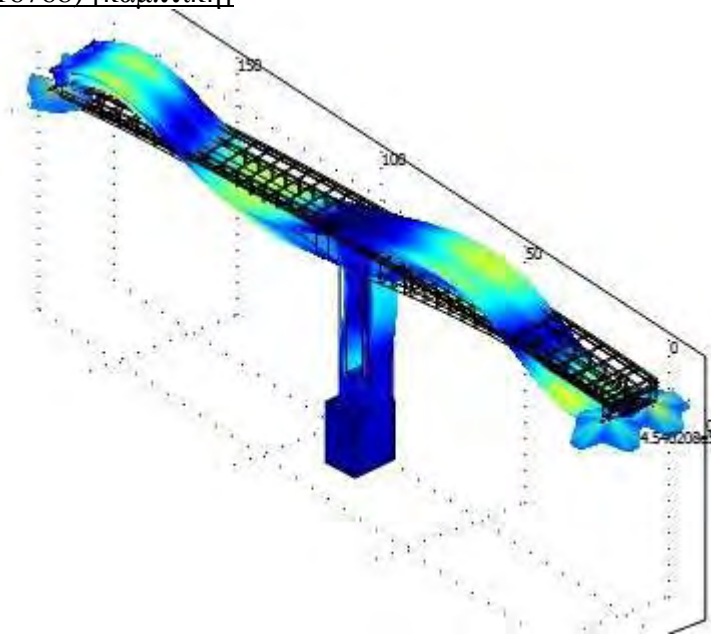


Top View

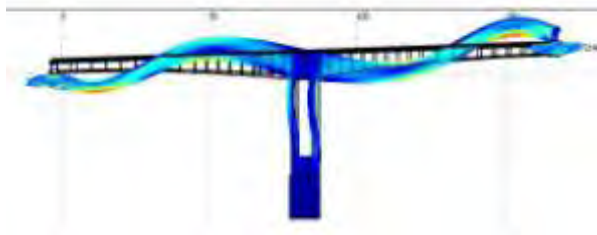


Front View

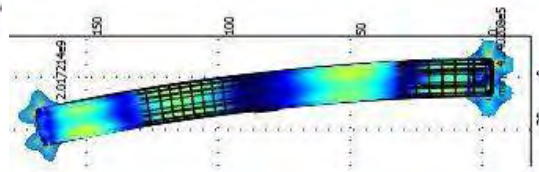
8st ιδιοτιμή (5.816768) [καμπτική]



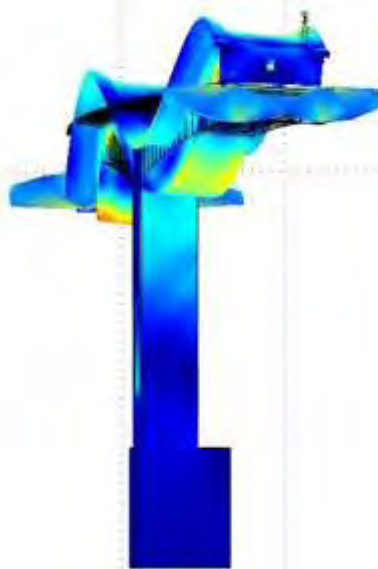
Isometric View



Side View

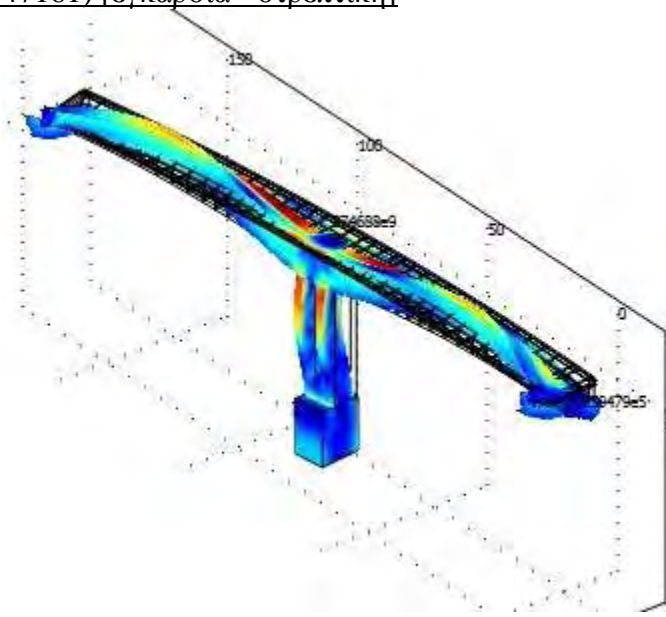


Top View

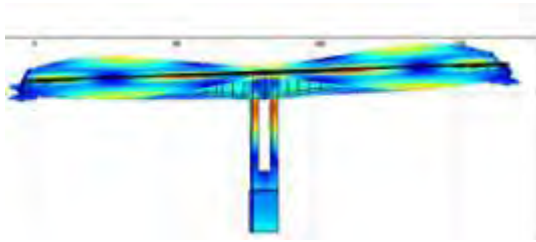


Front View

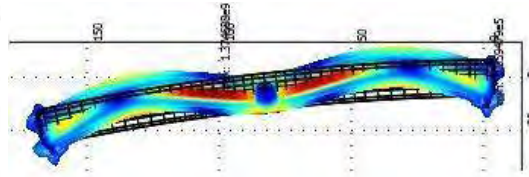
9st ιδιομορφή (6.147161) [εγκάρσια - στρεπτική]



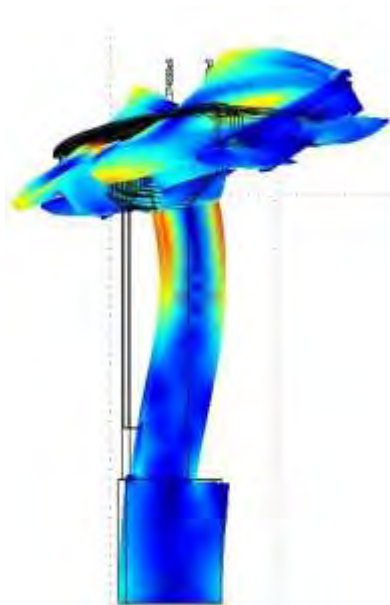
Isometric View



Side View

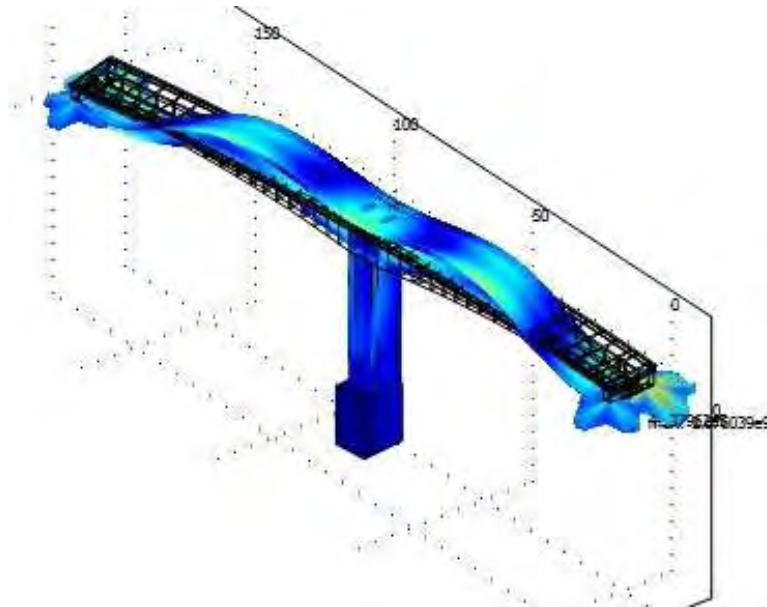


Top View



Front View

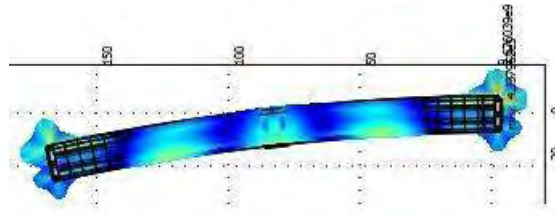
10st ιδιομορφή (6.564620) [καμπτική]



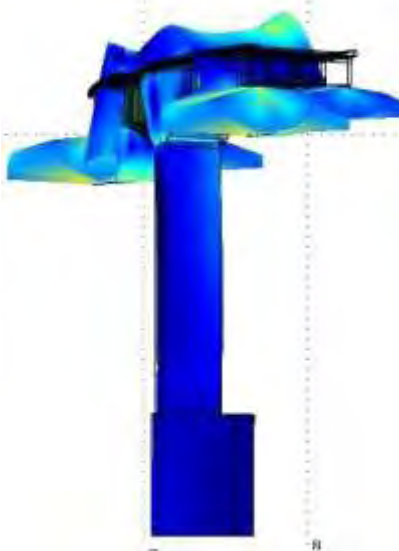
Isometric View



Side View

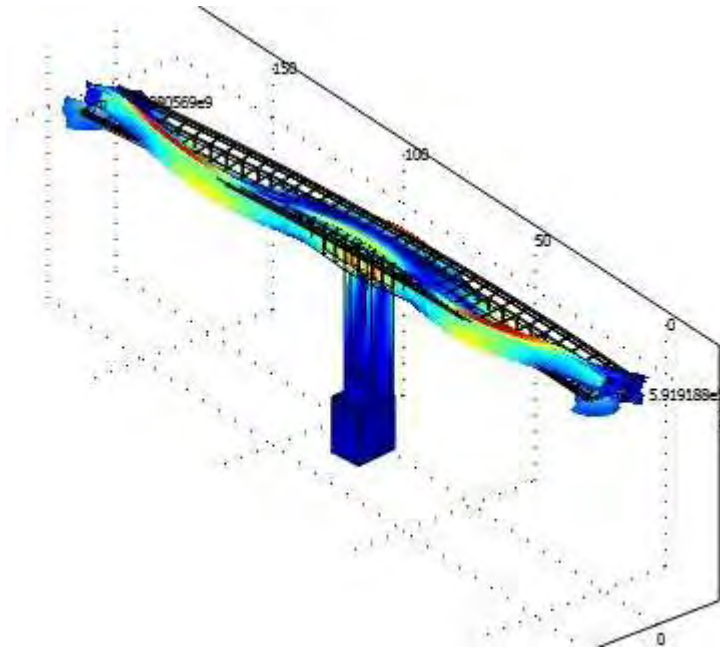


Top View

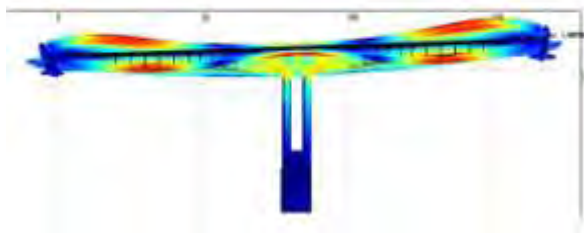


Front View

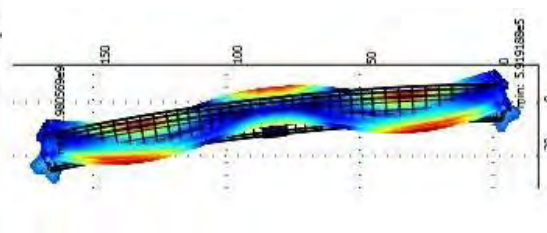
11st ιδιομορφή (6.969816) [εγκάρσια-στρεπτική]



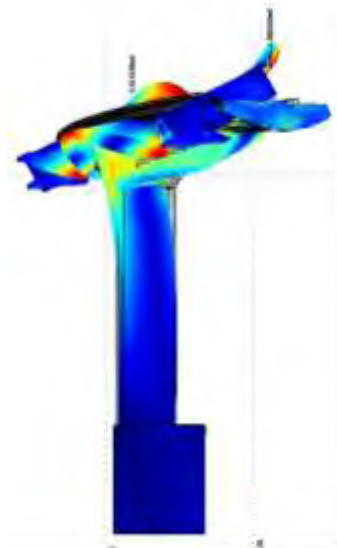
Isometric View



Side View

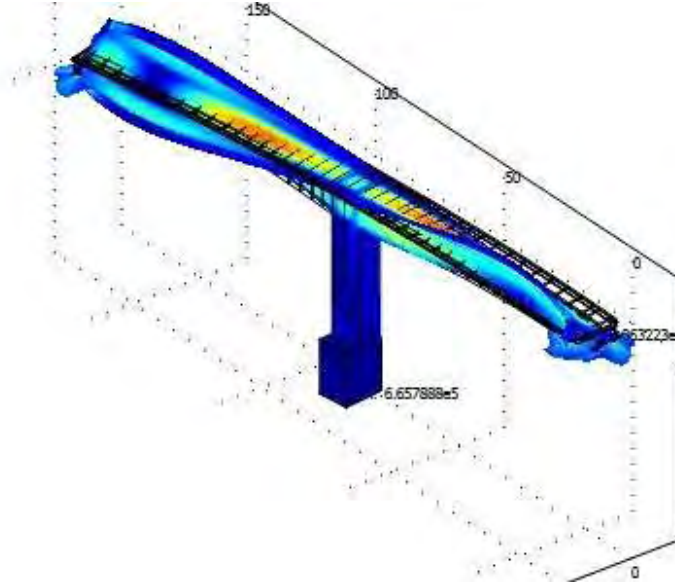


Top View

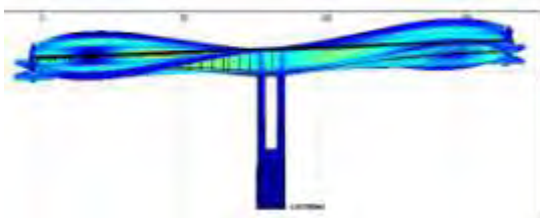


Front View

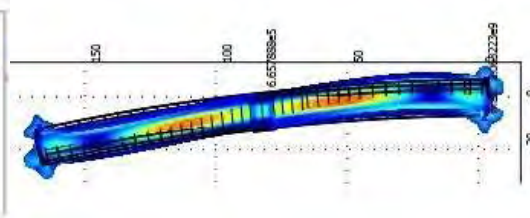
12st ιδιομορφή (7.152510) [στρεπτική]



Isometric View



Side View

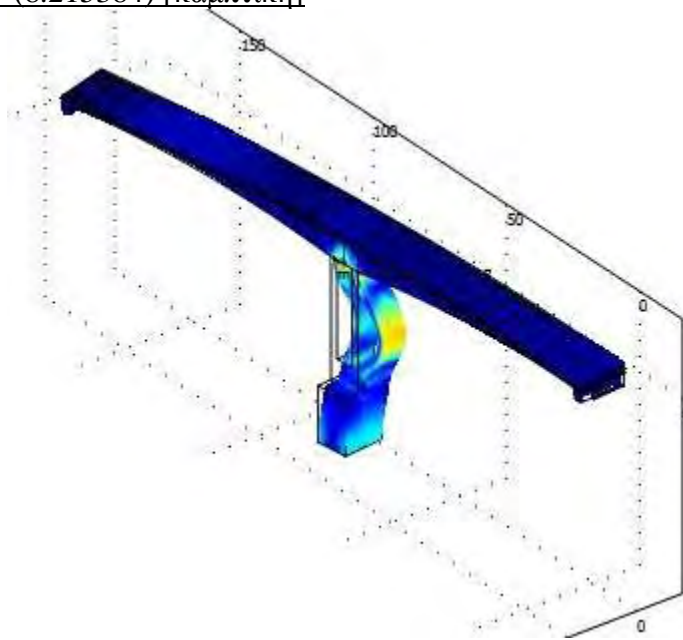


Top View

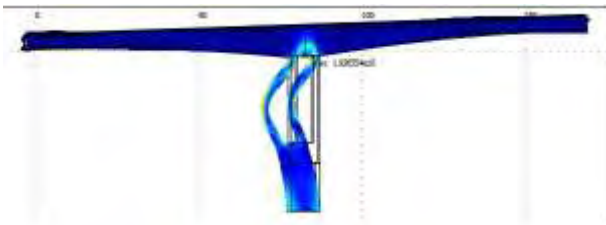


Front View

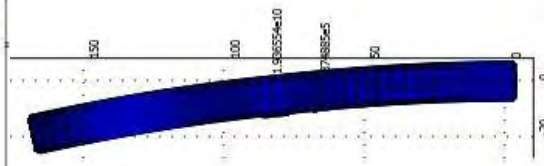
13st ιδιομορφή (8.215384) [καμπτική]



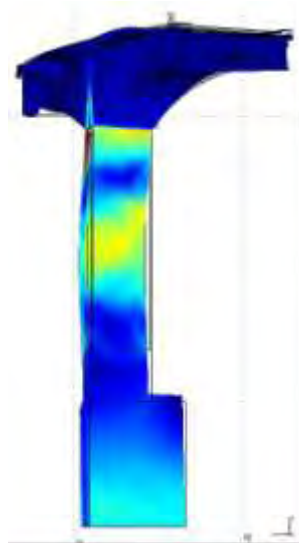
Isometric View



Side View

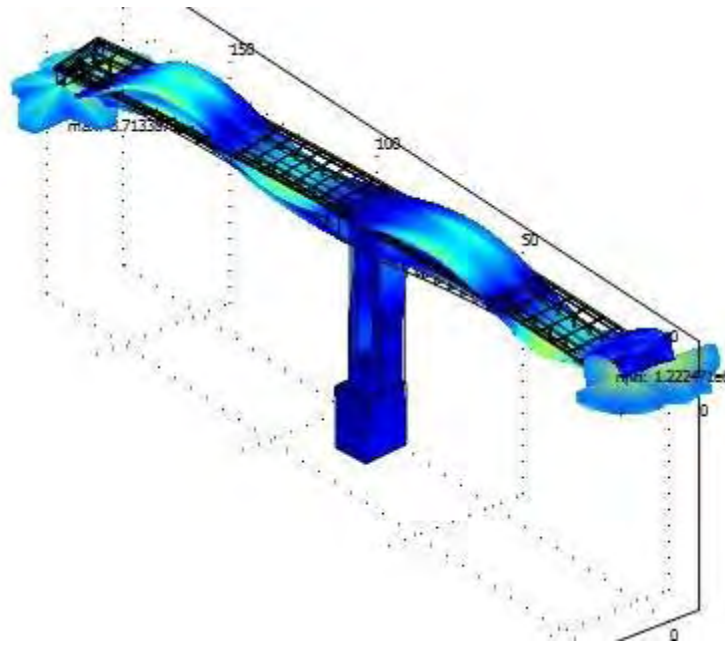


Top View



Front View

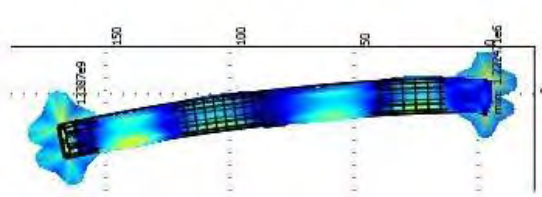
14st ιδιομορφή (8.836051) [καμπτική]



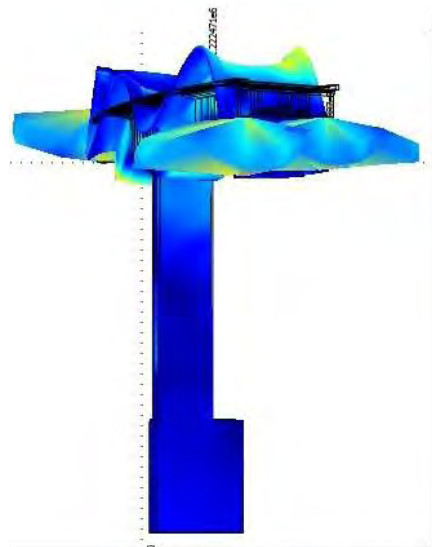
Isometric View



Side View

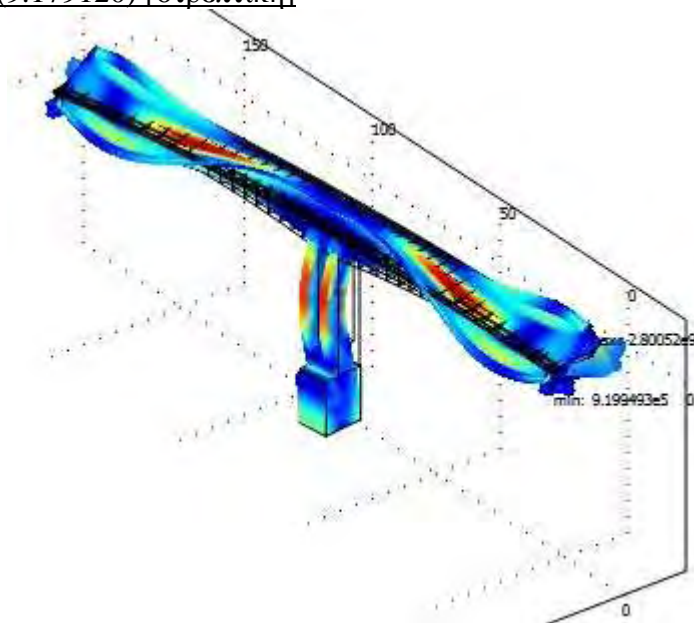


Top View

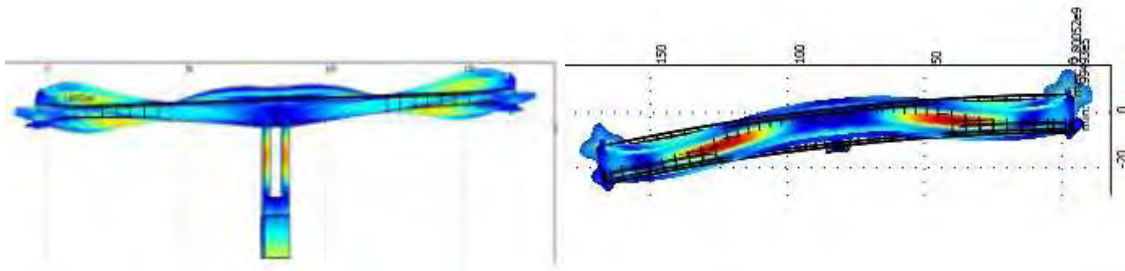


Front View

15st ιδιομορφή (9.179120) [στρεπτική]

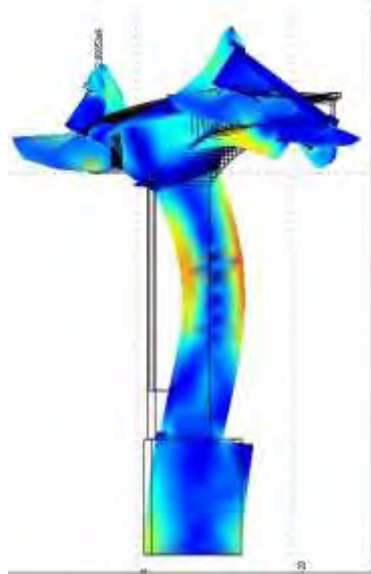


Isometric View



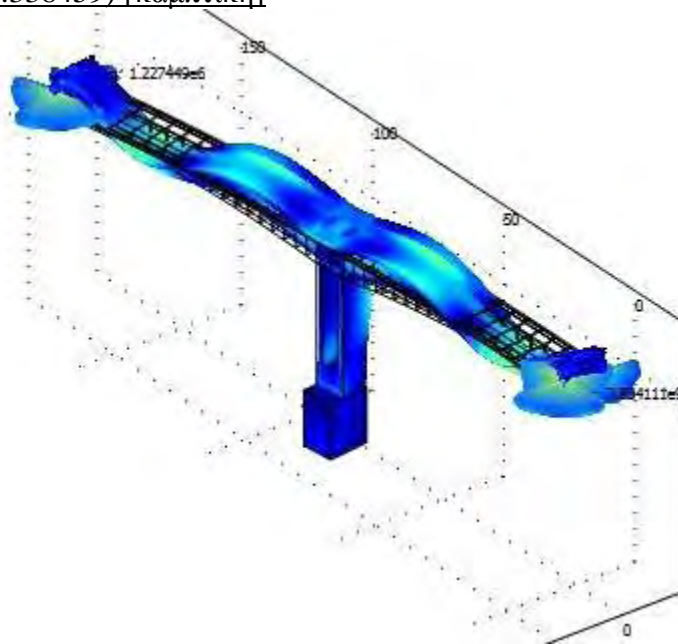
Side View

Top View



Front View

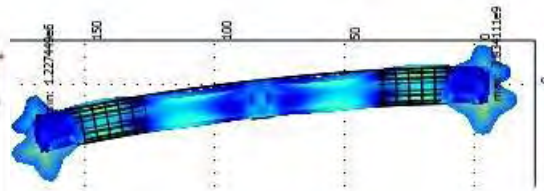
16st ιδιομορφή (9.338459) [καμπτική]



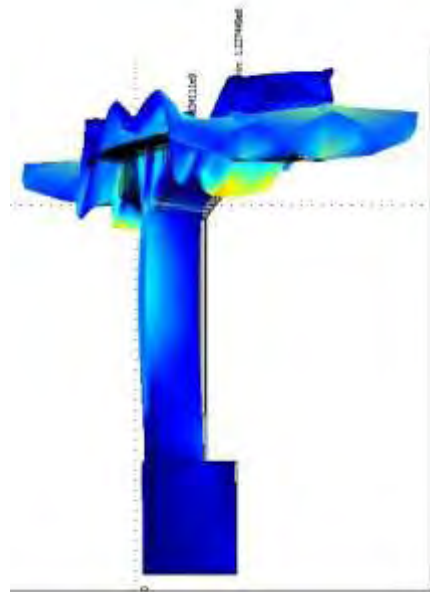
Isometric View



Side View

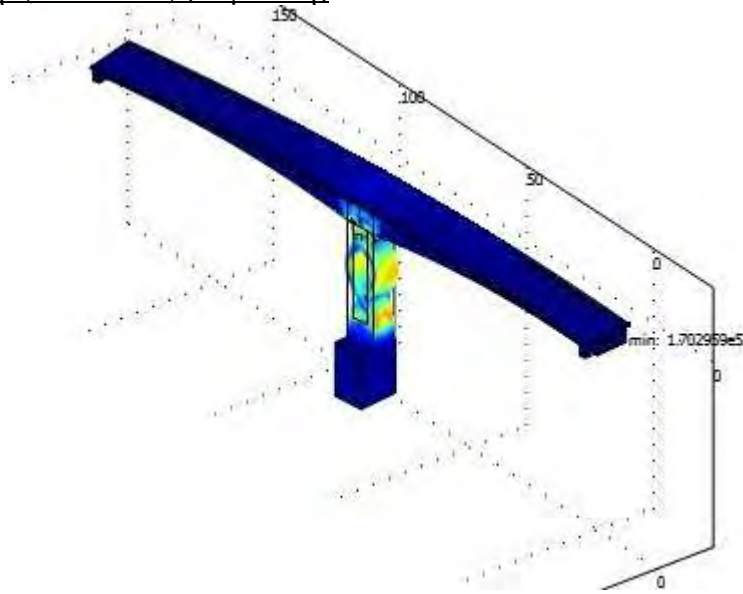


Top View

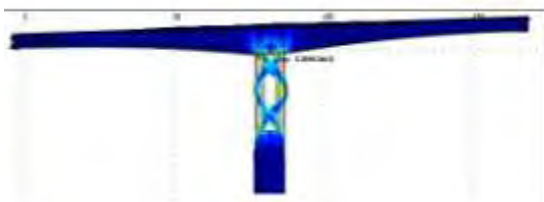


Front View

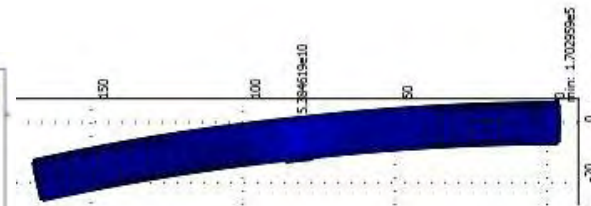
17st ιδιομορφή (10.174080) [καμπτική]



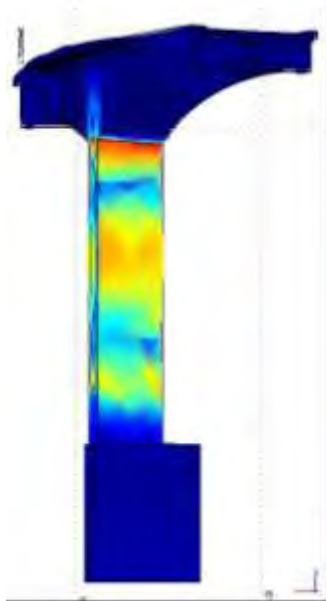
Isometric View



Side View

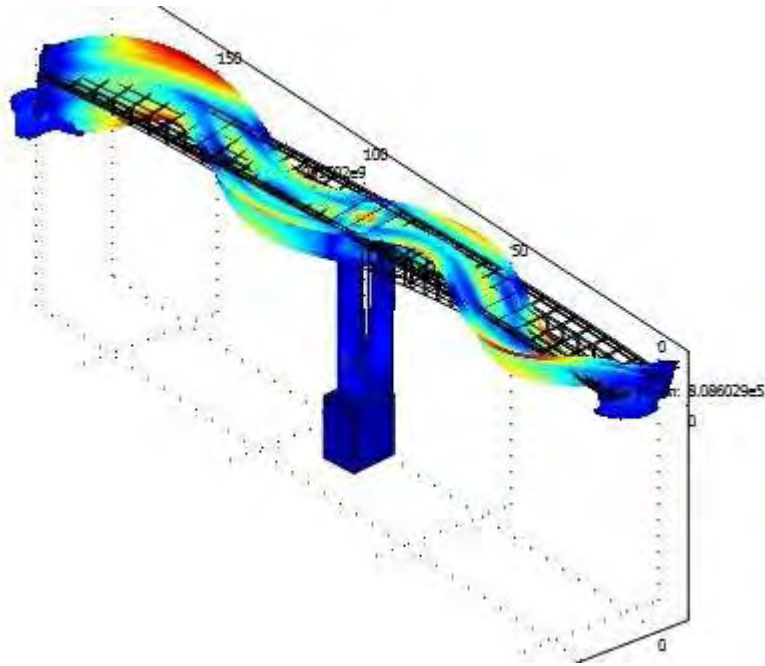


Top View

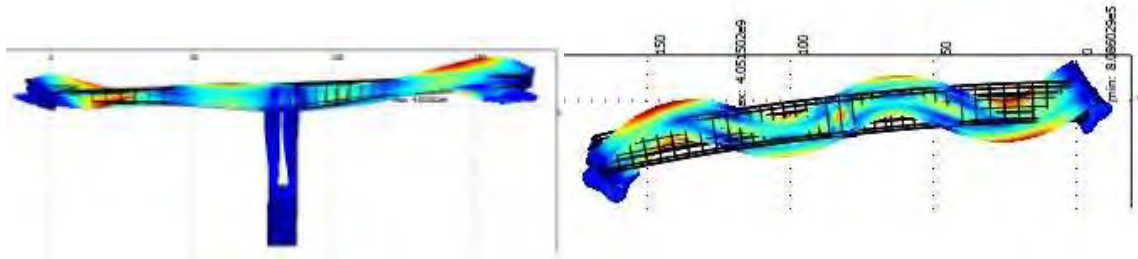


Front View

18st ιδιομορφή (10.744952) [εγκάρσια]

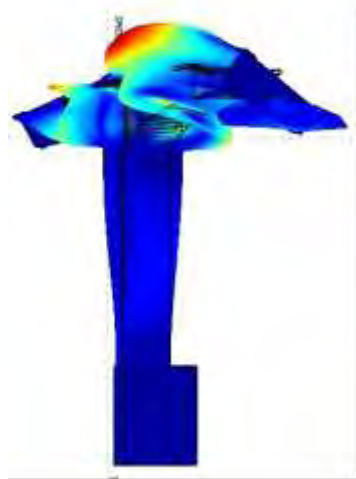


Isometric View



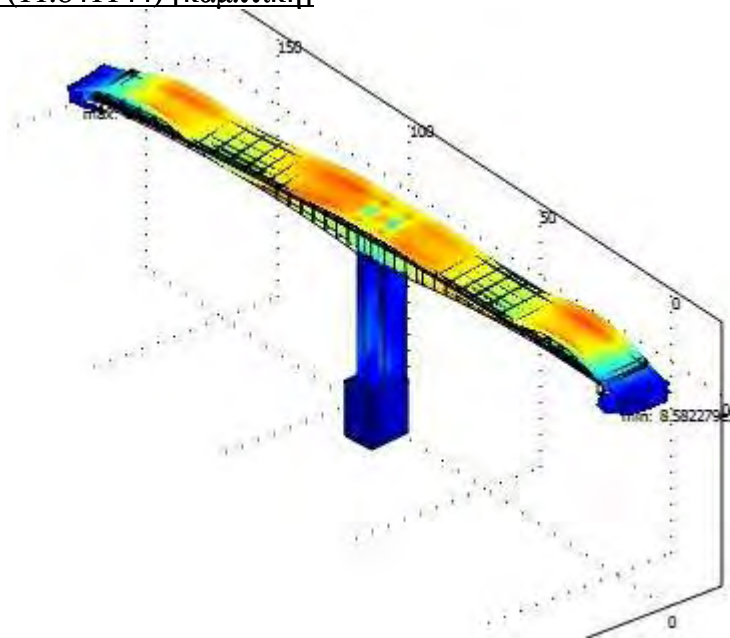
Side View

Top View

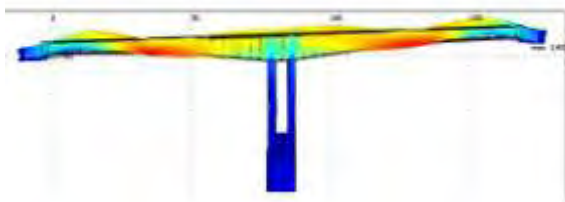


Front View

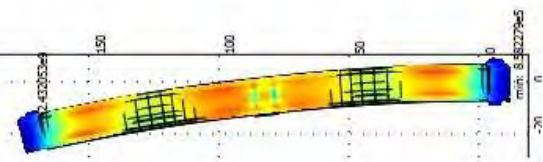
19st ιδιομορφή (11.841144) [καμπτική]



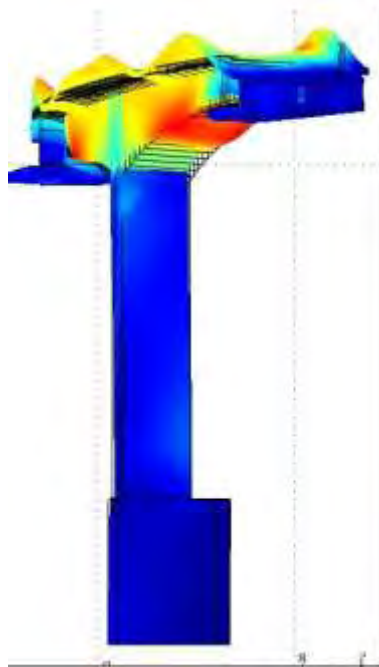
Isometric View



Side View

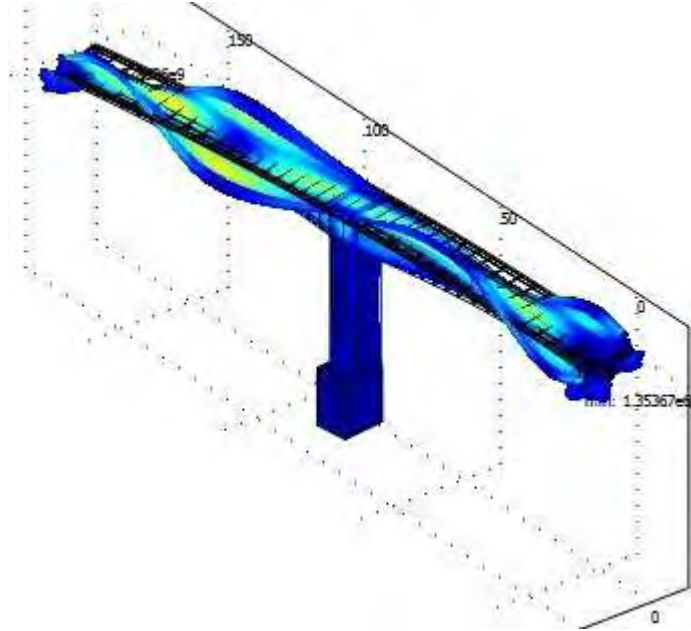


Top View

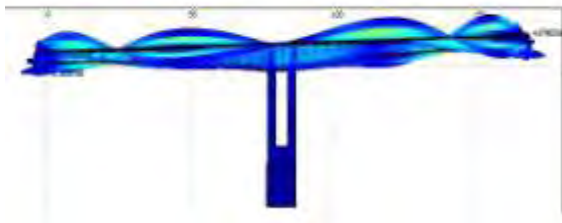


Front View

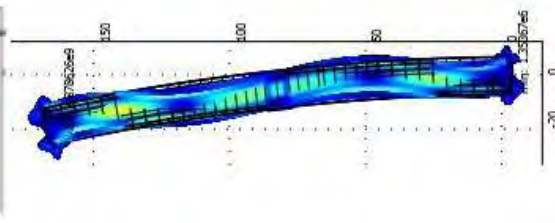
20st ιδιομορφή (12.034821) [στρεπτική]



Isometric View



Side View

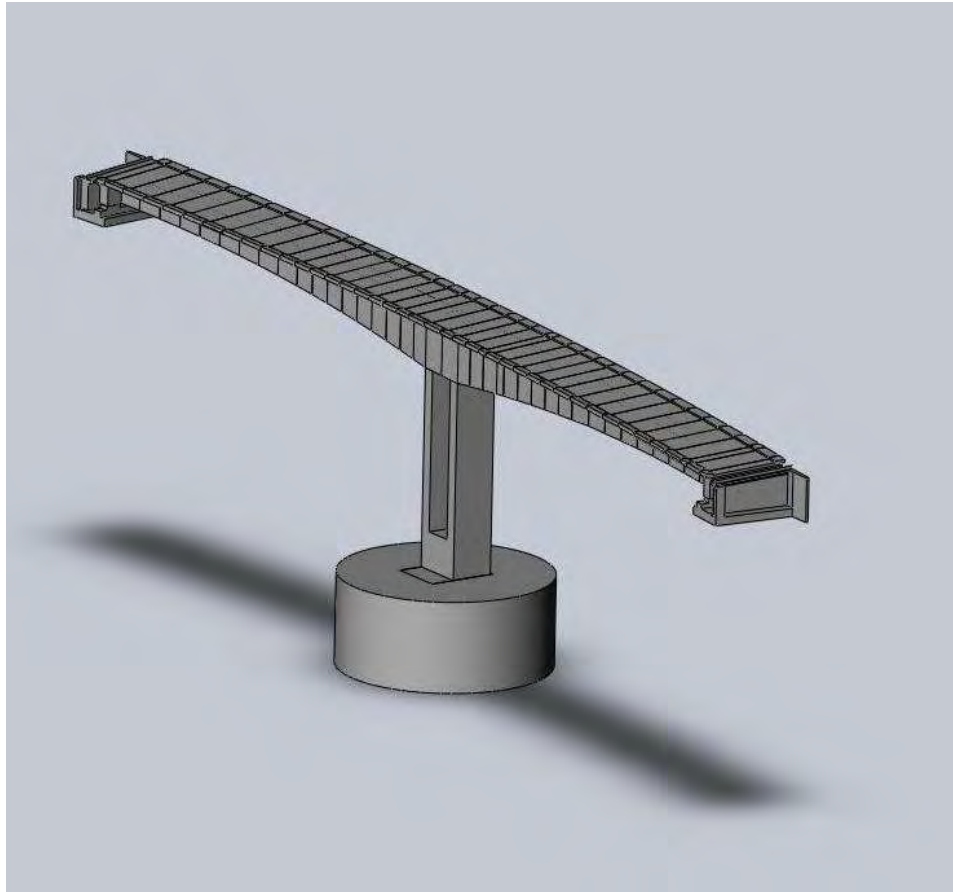


Top View



Front View

4.3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΕΔΑΦΟΣ

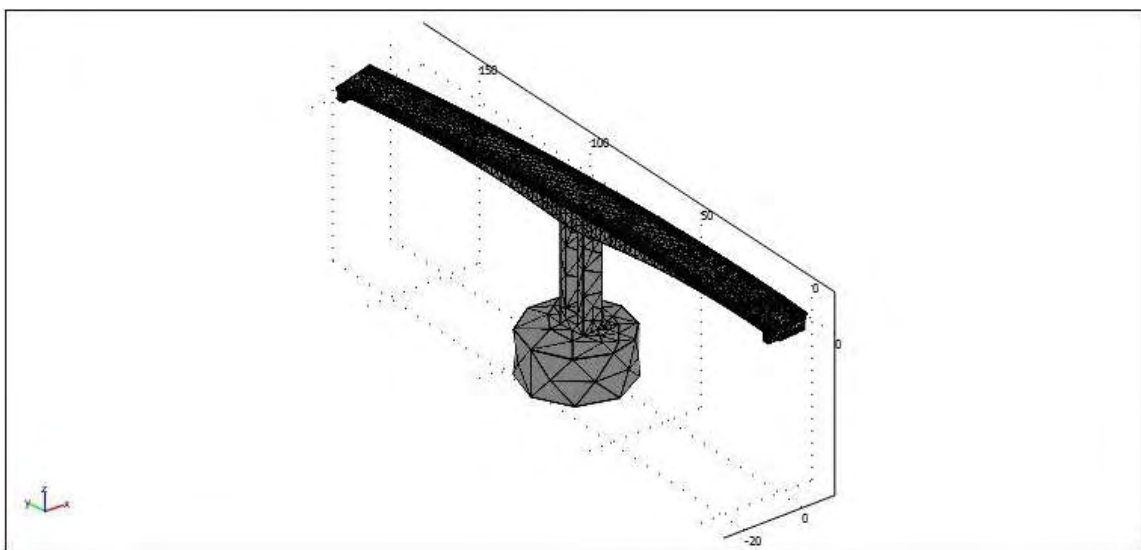


Σχήμα 4-5. Δεξιά γέφυρα - FEM με έδαφος

Το επόμενο μοντέλο που αναλύθηκε είναι ο δεξιός κλάδος της γέφυρας με έδαφος. Το έδαφος προσομοιώνεται με ένα μεγάλο τεμάχιο, η διάμετρος του οποίου είναι τουλάχιστον $6R$, (όπου R η ακτίνα που περικλείει την διατομή της βάσης της γέφυρας). Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι extra coarse και έχει συνολικά 48365 πεπερασμένα στοιχεία. Οι βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου είναι 274494. Για την δυναμική ανάλυση θεωρούμε πακτωμένες τις κάτω πλευρές των εφεδράνων, την κάτω πλευρά της βάσης του μεσόβαθρου, καθώς επίσης και την κάτω και τις πλαϊνές επιφάνειες του εδάφους. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι είκοσι πρώτες ιδιοτιμές που υπολογίστηκαν.

Μοντέλο με έδαφος	Αριθμός FEM : 48365	Βαθμοί Ελευθερίας : 274464
A/A	Ιδιότητες (αποτελέσματα)	Είδος ιδιομορφών
1	0.914647	διαμήκης
2	1.036330	εγκάρσια
3	1.089886	εγκάρσια - στρεπτική
4	2.019565	διαμήκης
5	2.027334	καμπτική
6	2.899904	καμπτική
7	3.868207	διαμήκης
8	5.818534	καμπτική
9	6.360236	διαμήκης - στρεπτική
10	6.579331	καμπτική
11	6.974849	εγκάρσια - στρεπτική
12	7.149767	στρεπτική
13	8.788861	καμπτική
14	9.341538	καμπτική
15	9.729933	καμπτική
16	9.990046	στρεπτική
17	10.213171	καμπτική
18	10.752894	εγκάρσια
19	11.846984	καμπτική
20	12.038572	στρεπτική

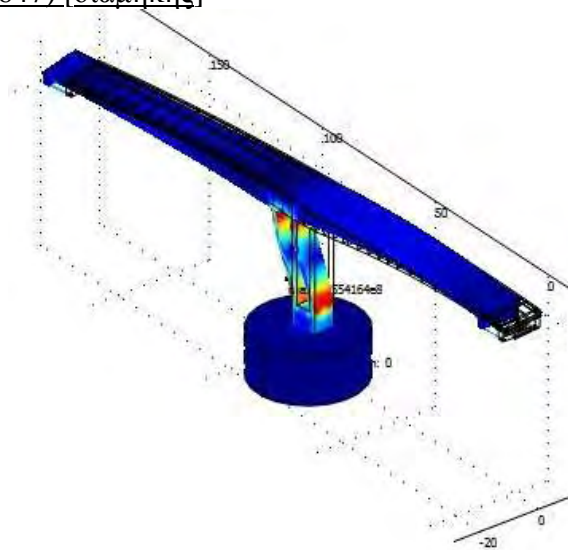
Πίνακας 4-6. Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης δεξιού κλάδου γέφυρα - FEM με έδαφος



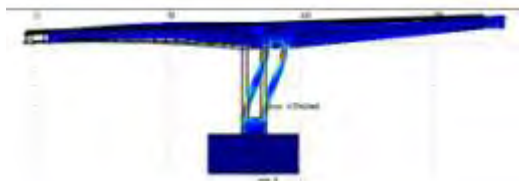
Σχήμα 4-7. Δικτύωμα δεξιού κλάδου γέφυρας - FEM με έδαφος
Extra coarse, DOF =274494, F.E.=48365

Στις παρακάτω σελίδες παρουσιάζονται οι απεικονίσεις των ιδιομορφών που υπολογίστηκαν για το συγκεκριμένο μοντέλο.

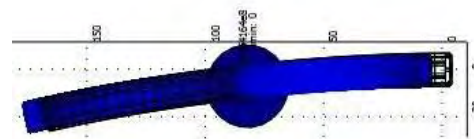
1st ιδιομορφή (0.914647) [διαμήκης]



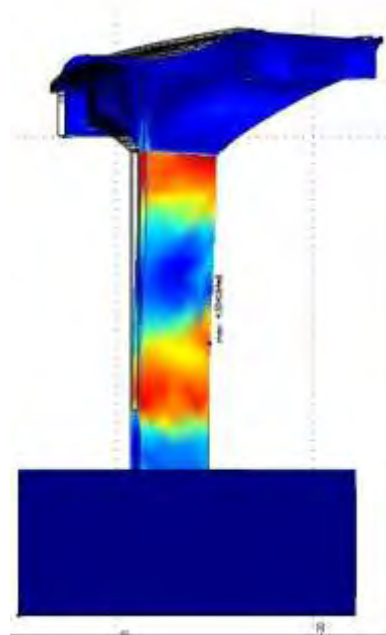
Isometric View



Side View

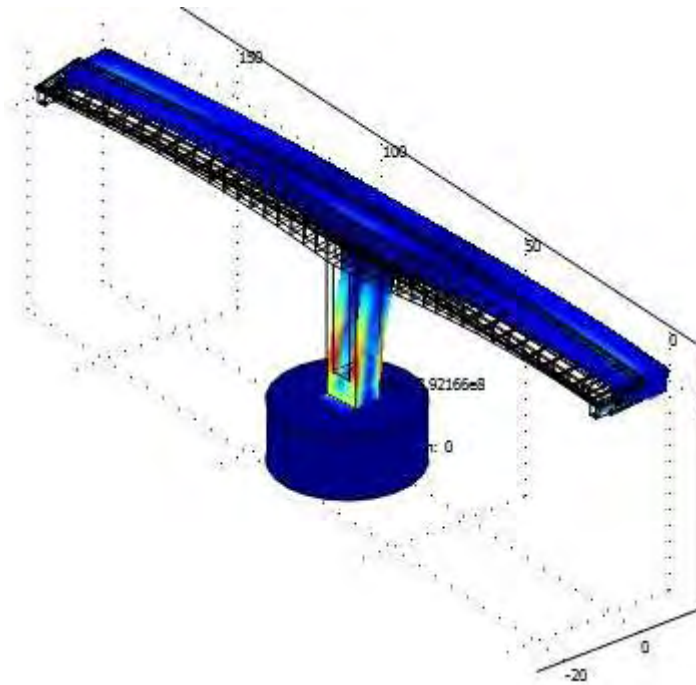


Top View

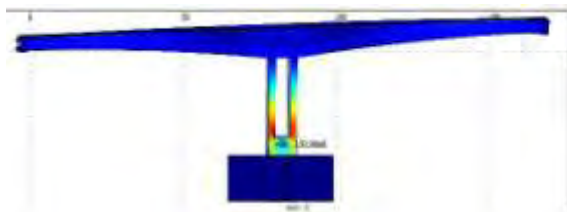


Front View

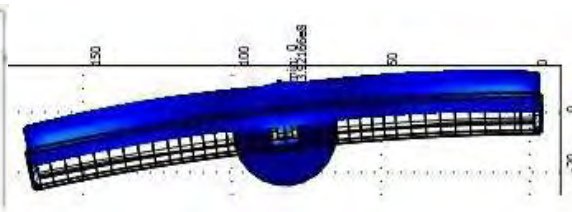
2st ιδιομορφή (1.036330) [εγκάρσια]



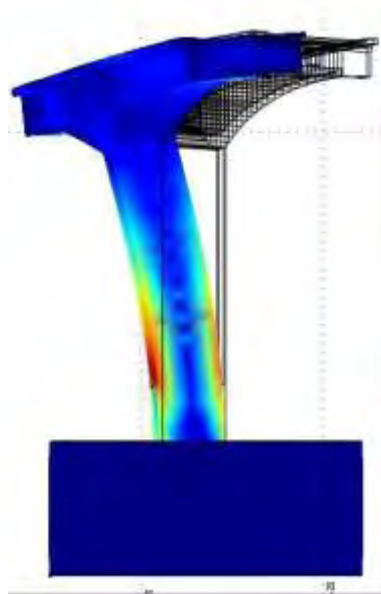
Isometric View



Side View

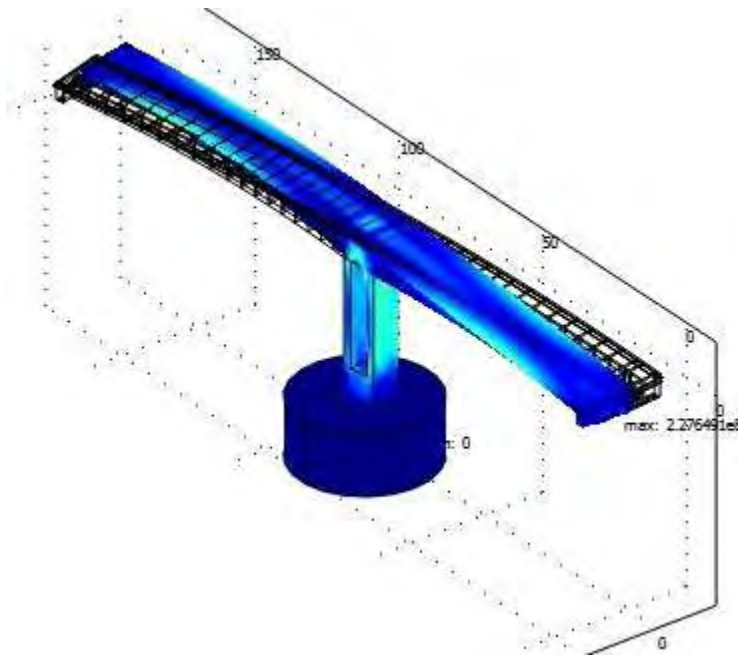


Top View

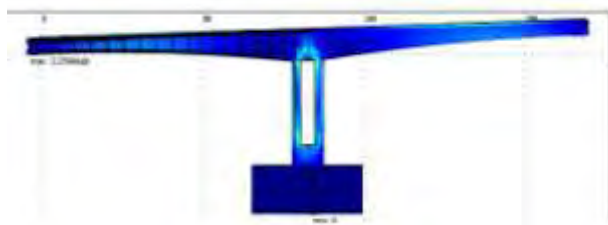


Front View

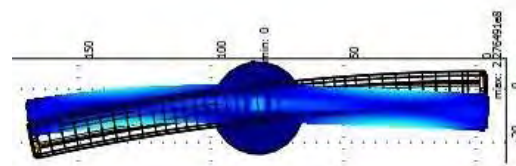
3st ιδιομορφή (1.089886) [εγκάρσια-στρεπτική]



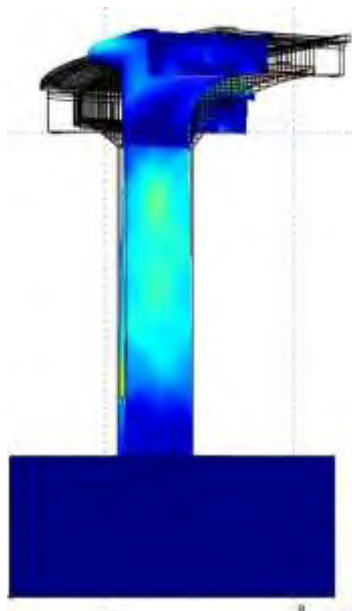
Isometric View



Side View

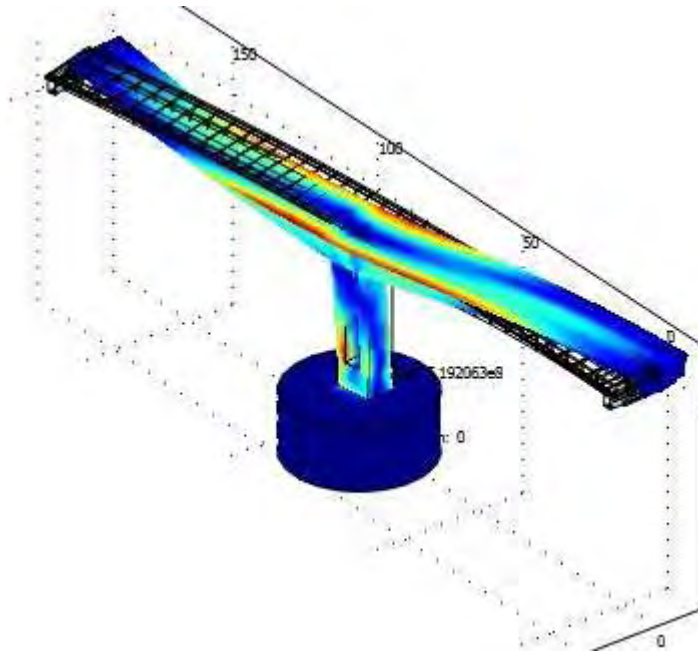


Top View

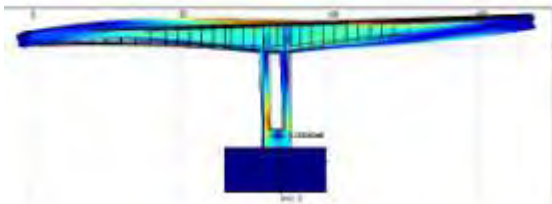


Front View

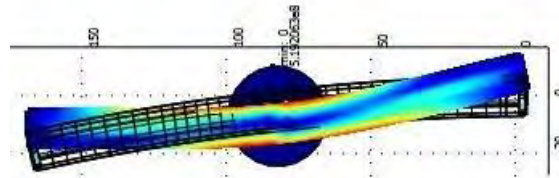
4st ιδιομορφή (2.019565) [εγκάρσια]



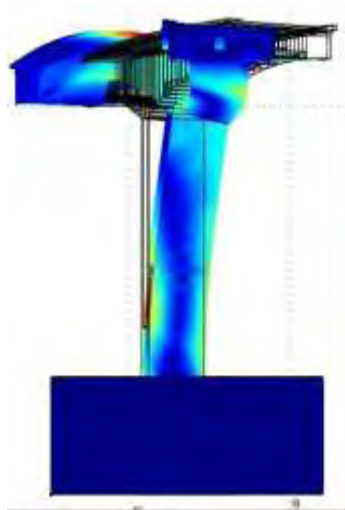
Isometric View



Side View

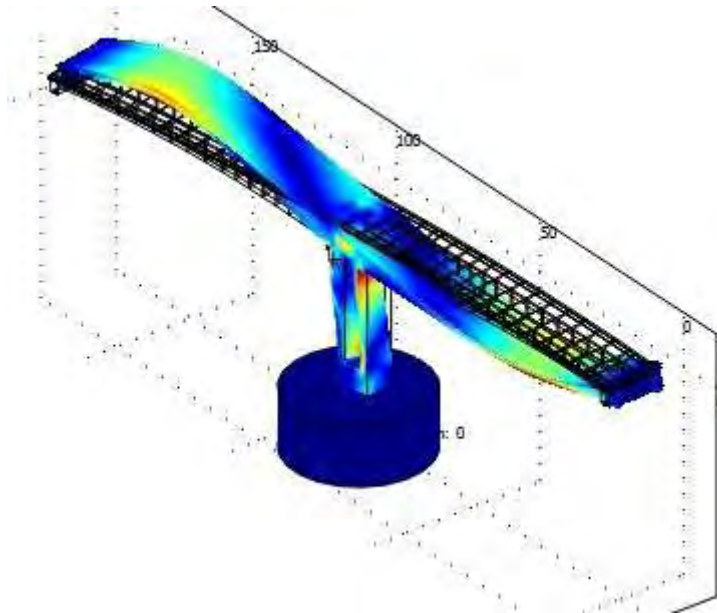


Top View

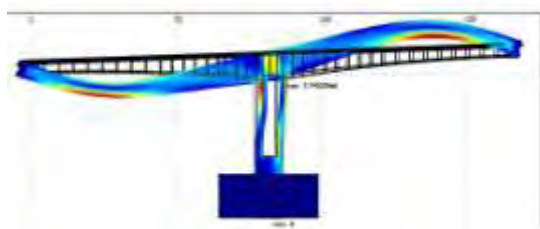


Front View

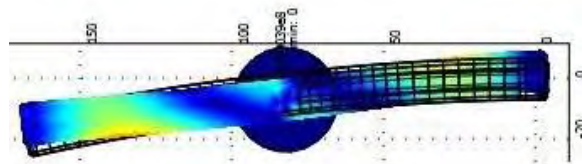
5st ιδιομορφή (2.027334) [καμπτική]



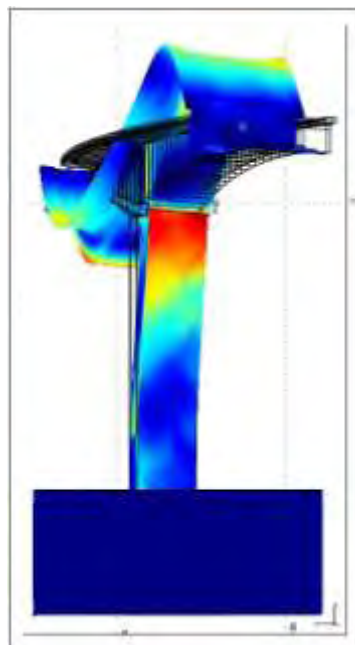
Isometric View



Side View

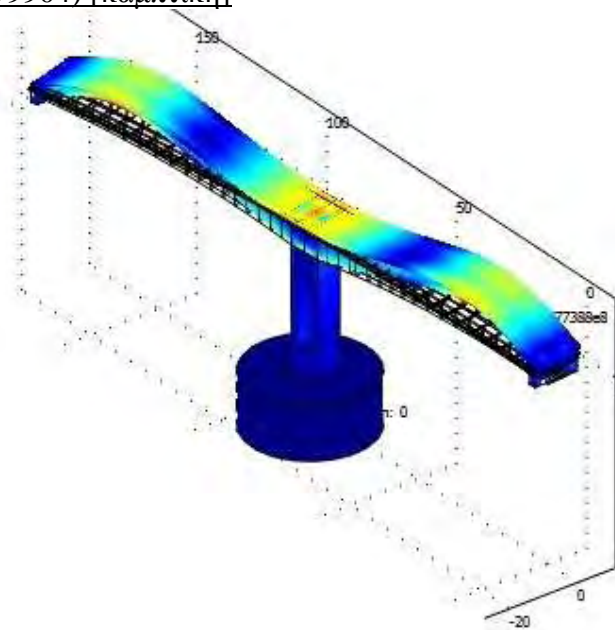


Top View

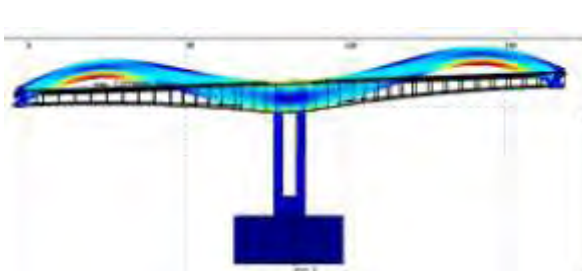


Front View

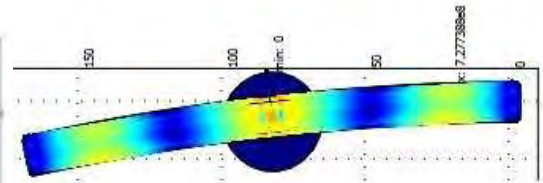
6st ιδιομορφή (2.899904) [καμπτική]



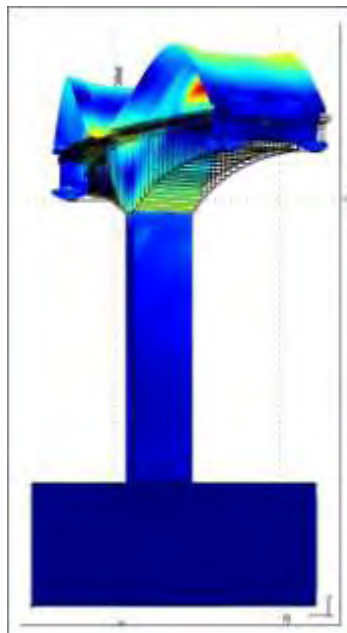
Isometric View



Side View

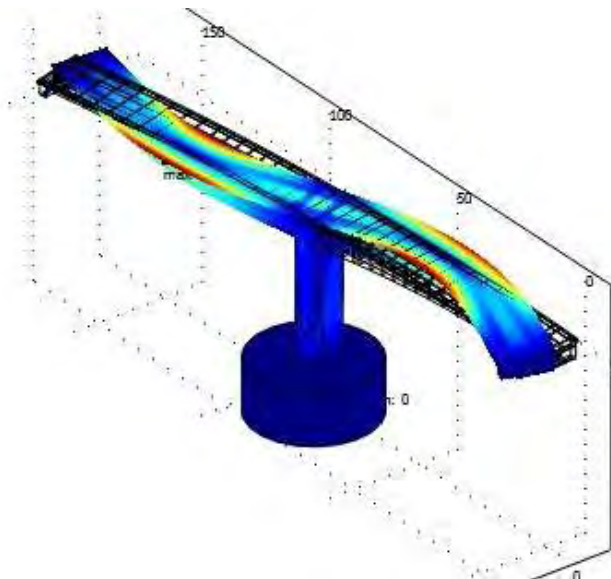


Top View

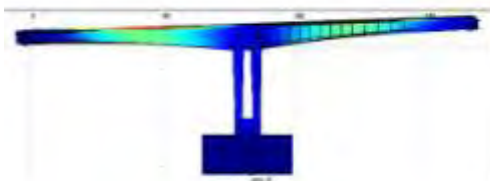


Front View

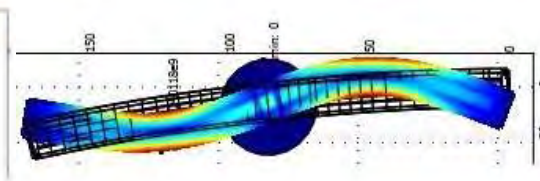
7st ιδιομορφή (3.868207) [εγκάρσια]



Isometric View



Side View

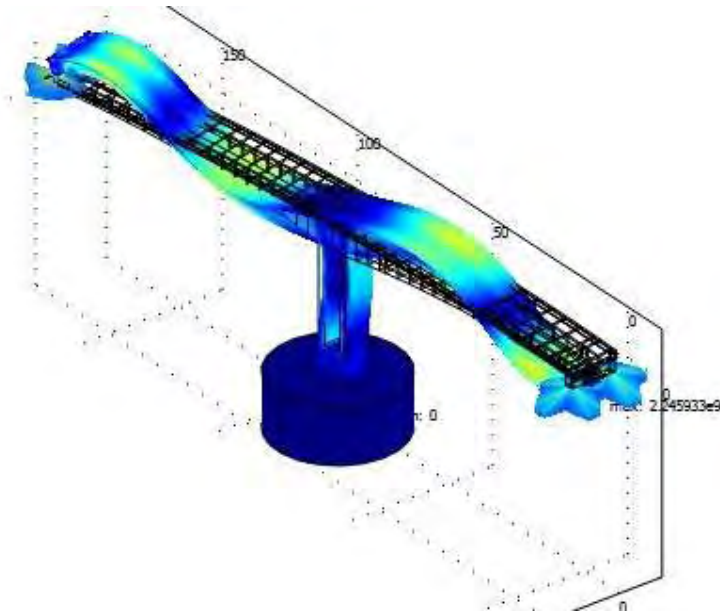


Top View

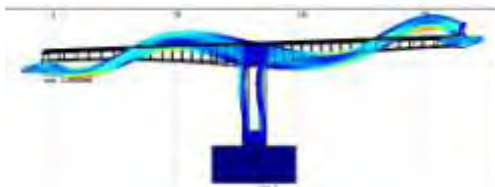


Front View

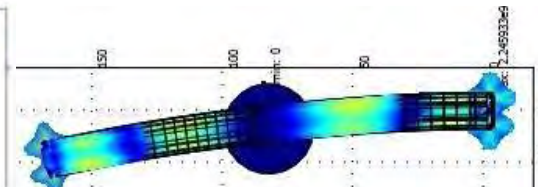
8st ιδιομορφή (5.818534) [καμπτική]



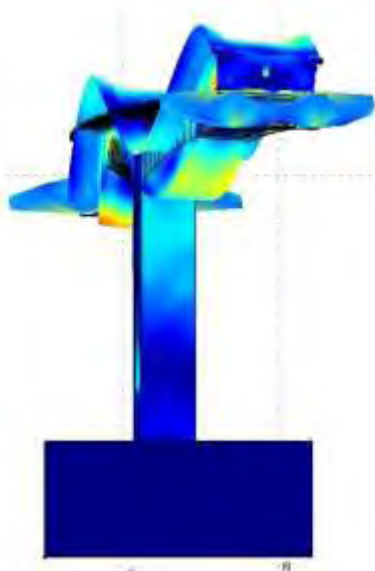
Isometric View



Side View

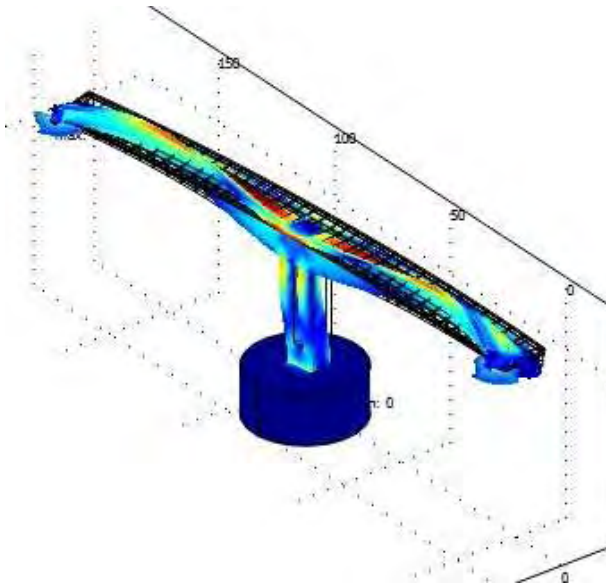


Top View

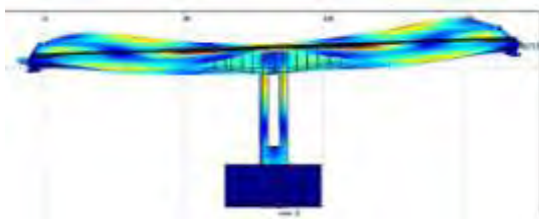


Front View

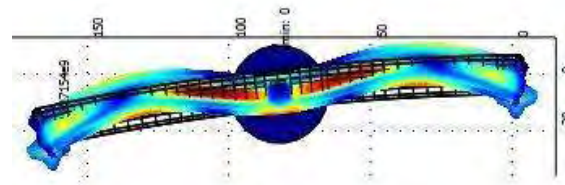
9st ιδιομορφή (6.360236) [εγκάρσια-στρεπτική]



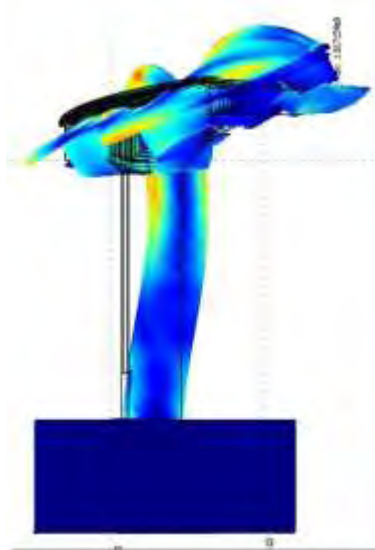
Isometric View



Side View

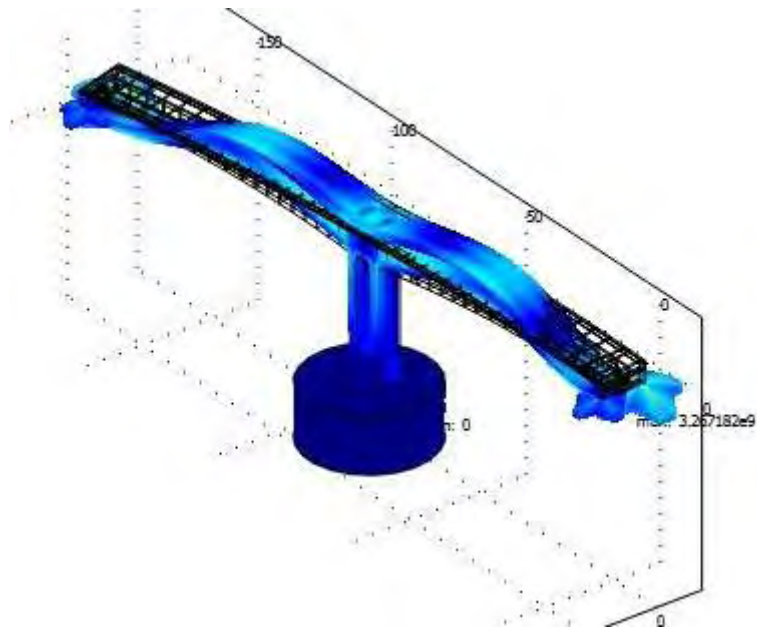


Top View

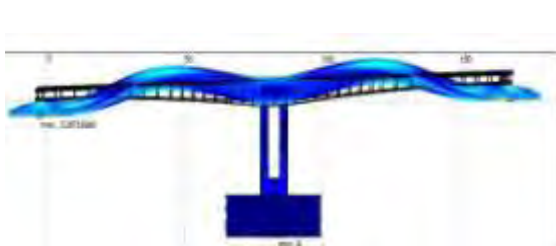


Front View

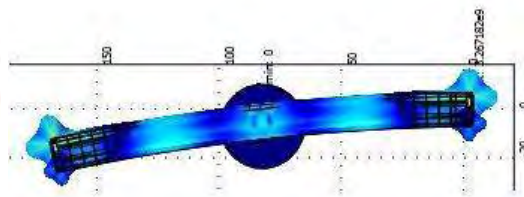
10st ιδιομορφή (6.579331) [καμπτική]



Isometric View



Side View

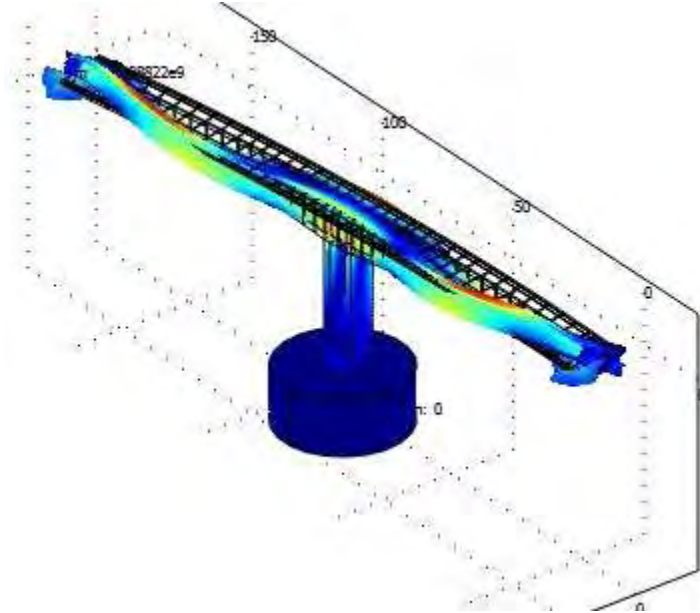


Top View

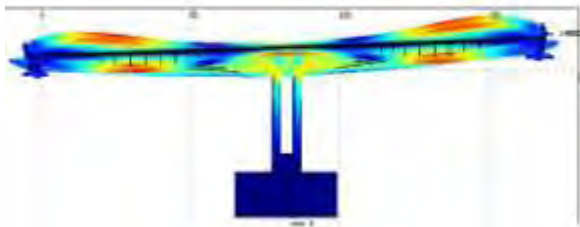


Front View

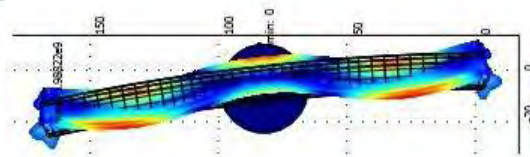
11st ιδιομορφή (6.974849) [εγκάρσια-στρεπτική]



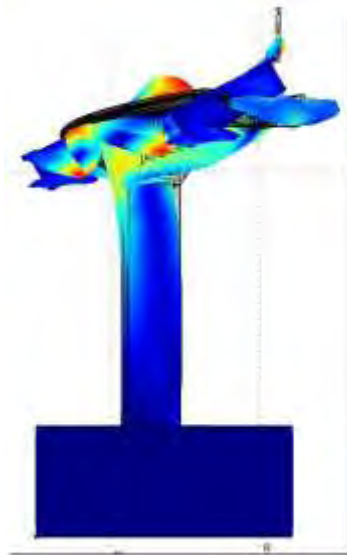
Isometric View



Side View

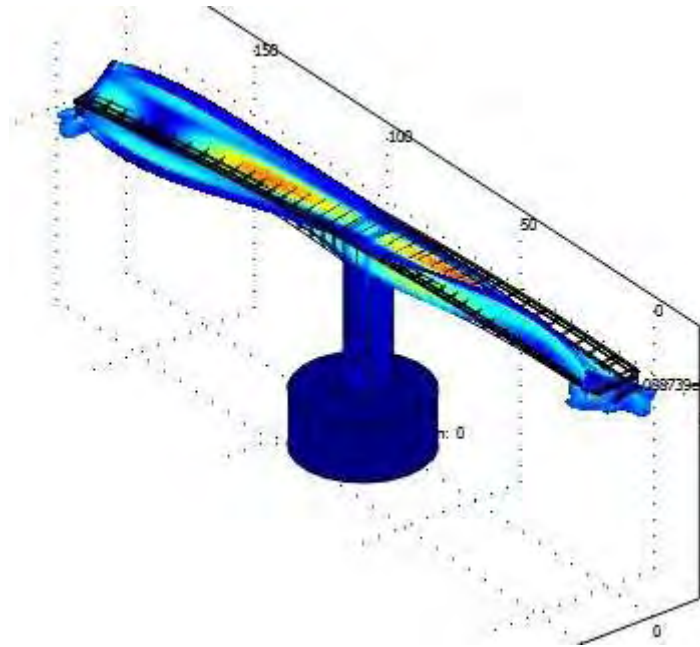


Top View

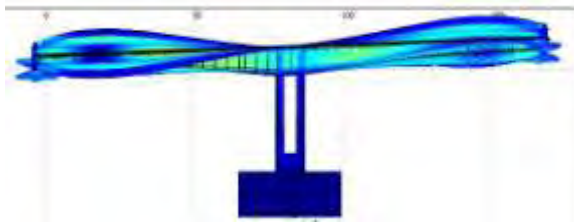


Front View

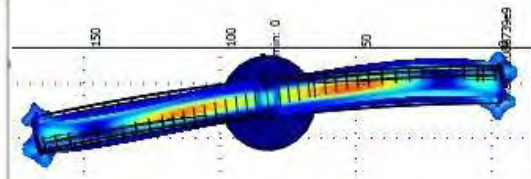
12st ιδιομορφή (7.149767) [στρεπτική]



Isometric View



Side View

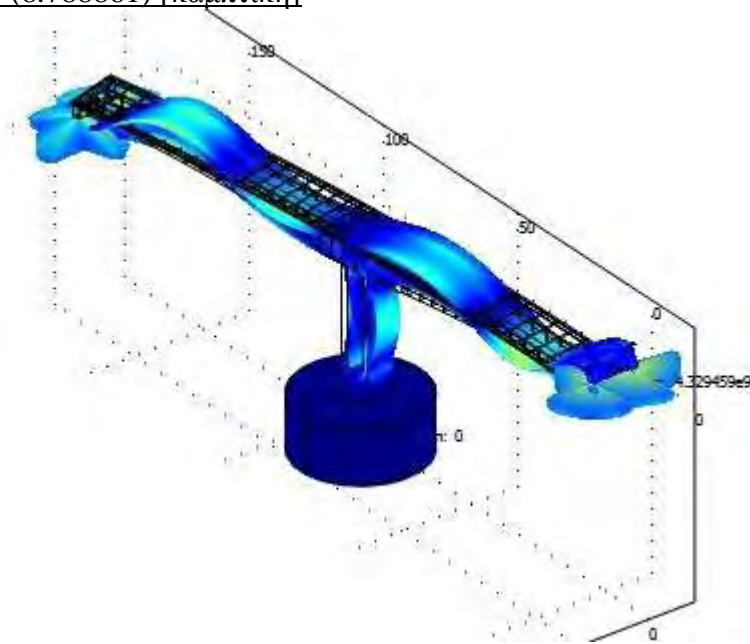


Top View

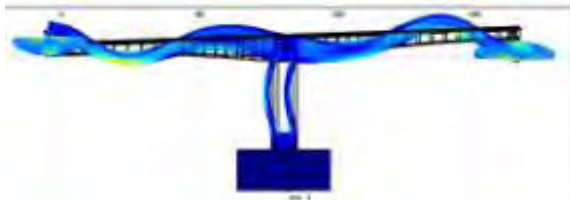


Front View

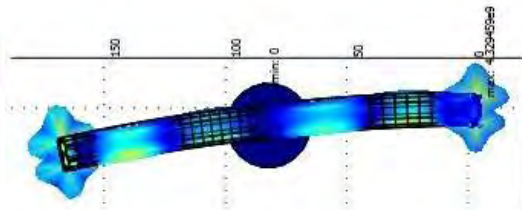
13st ιδιομορφή (8.788861) [καμπτική]



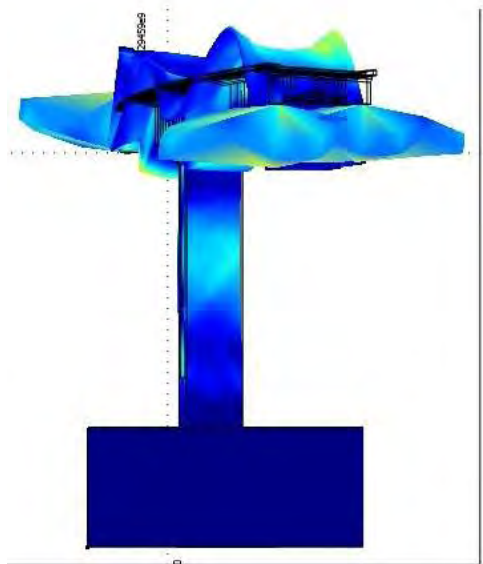
Isometric View



Side View

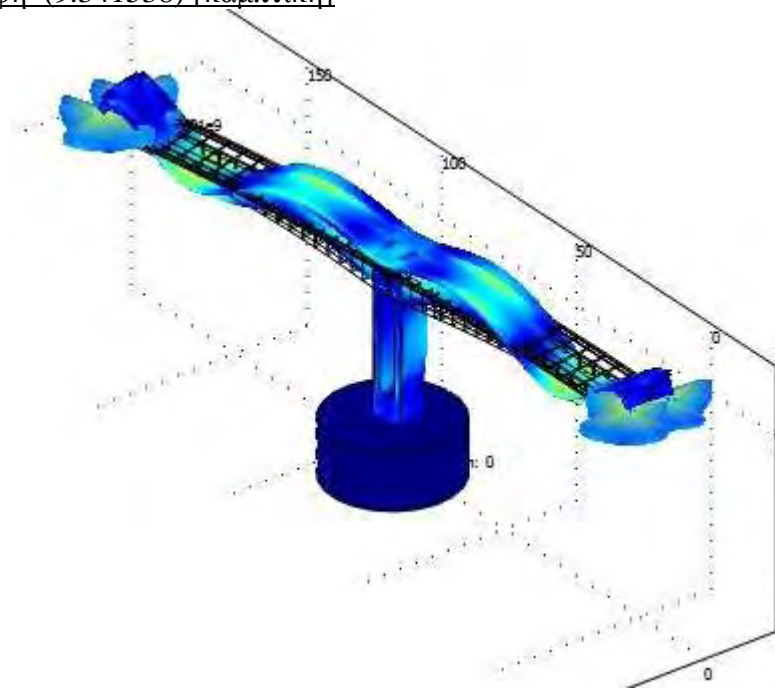


Top View

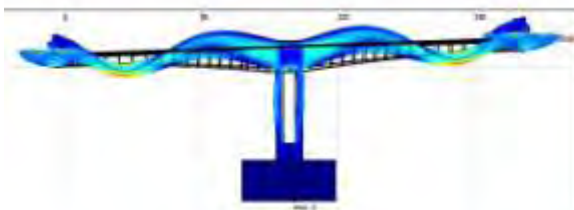


Front View

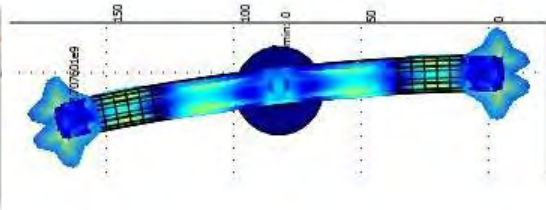
14st ιδιομορφή (9.341538) [καμπτική]



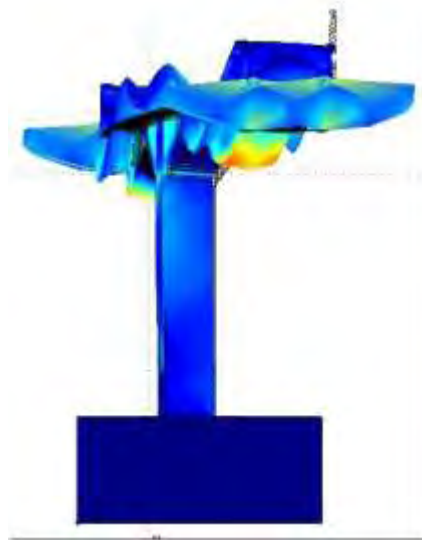
Isometric View



Side View

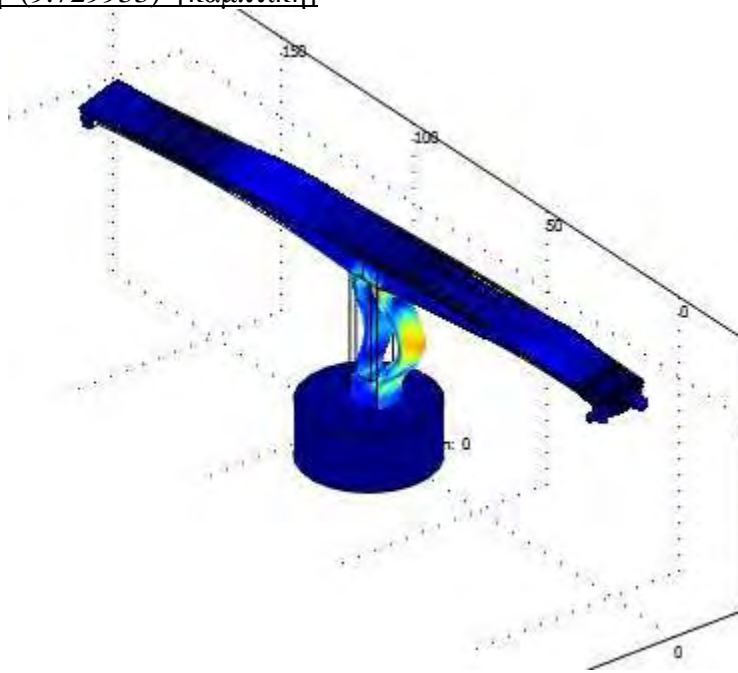


Top View

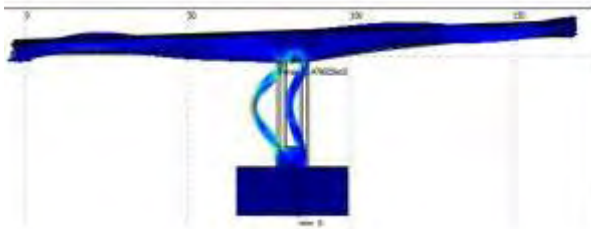


Front View

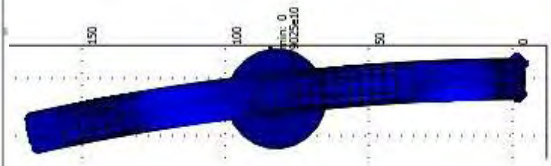
15st ιδιομορφή (9.729933) [καμπτική]



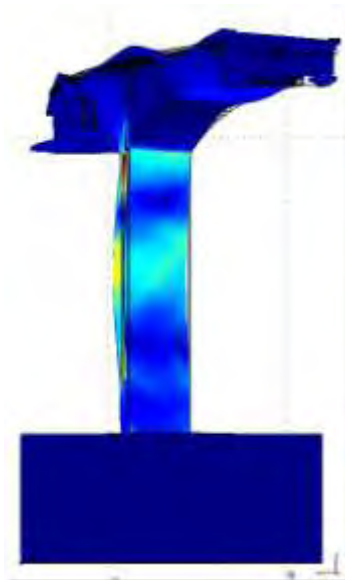
Isometric View



Side View

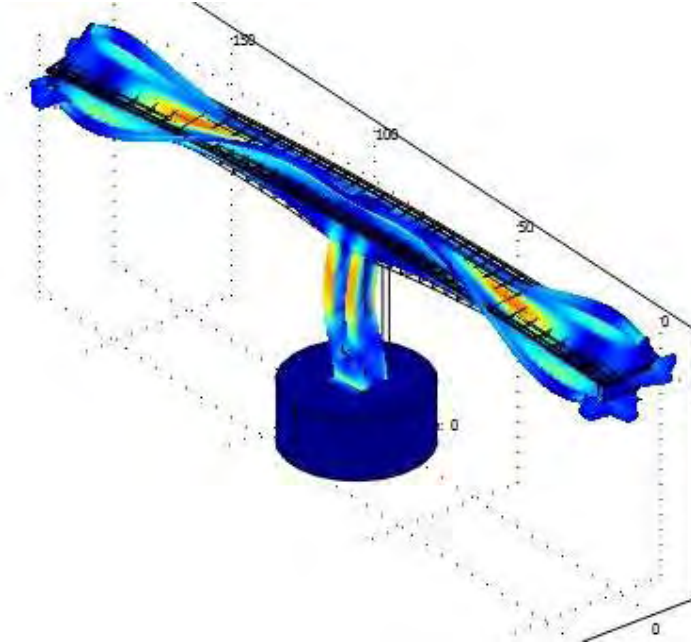


Top View

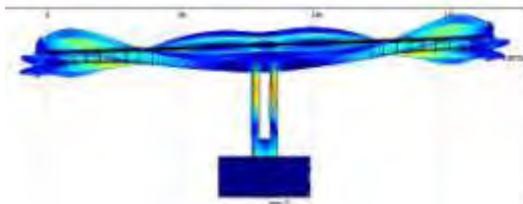


Front View

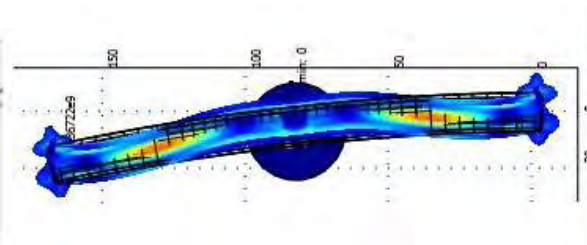
16st ιδιομορφή (9.990046) [στρεπτική]



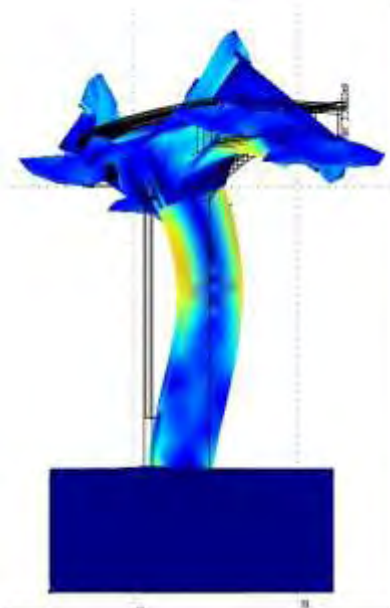
Isometric View



Side View

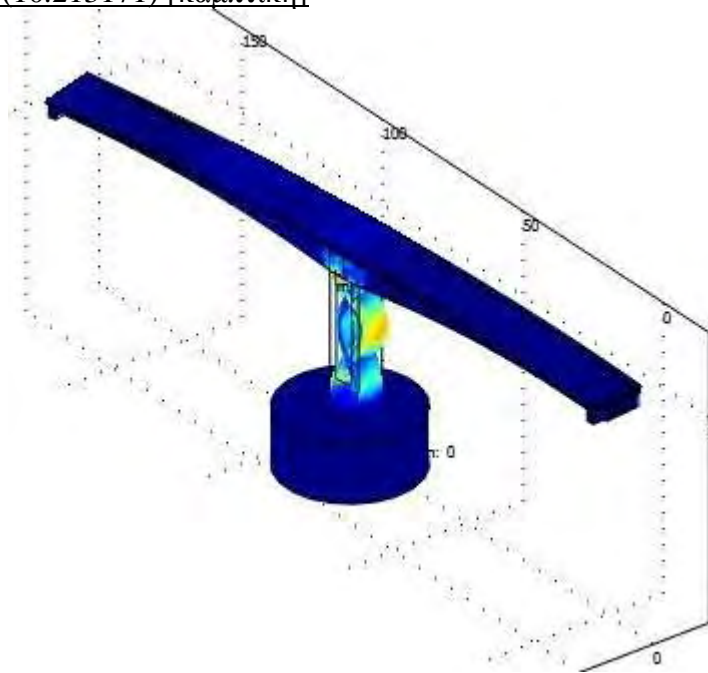


Top View

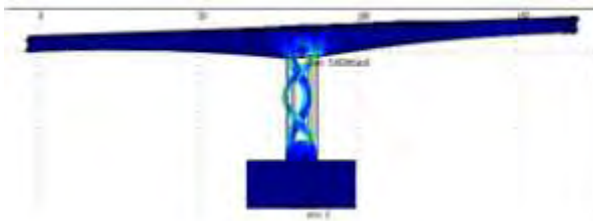


Front View

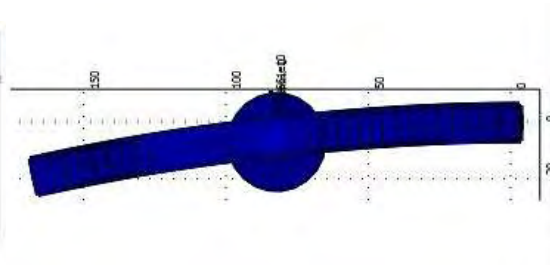
17st ιδιομορφή (10.213171) [καμπτική]



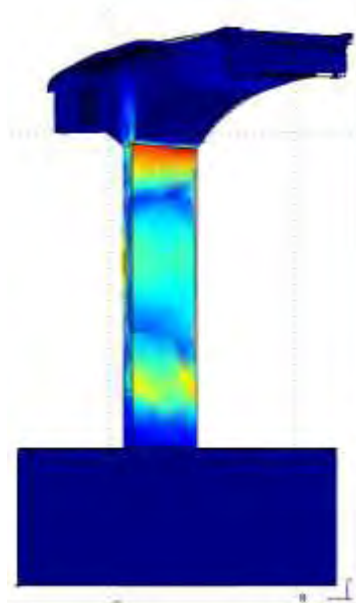
Isometric View



Side View

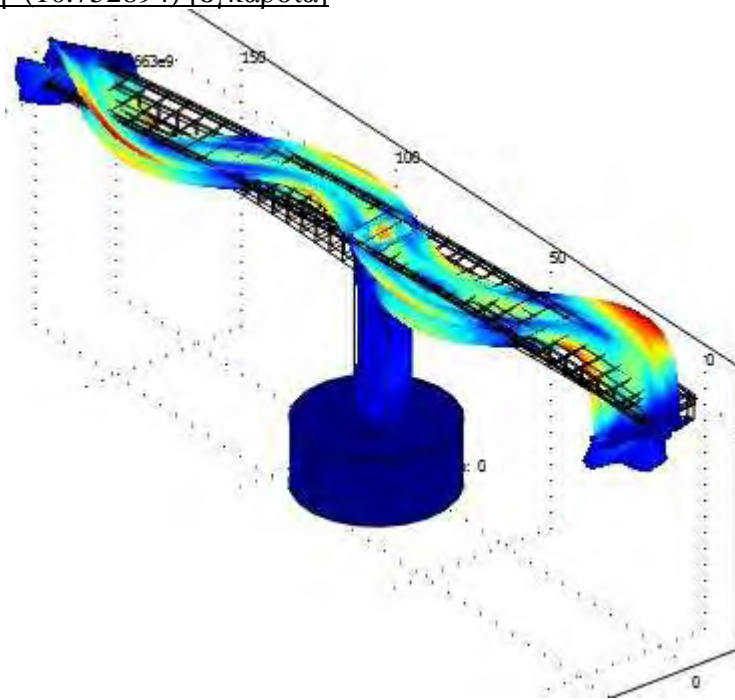


Top View

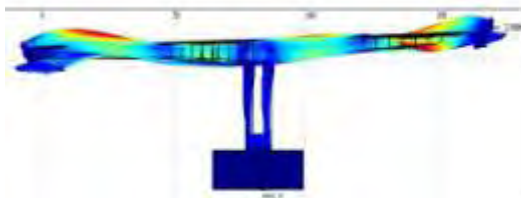


Front View

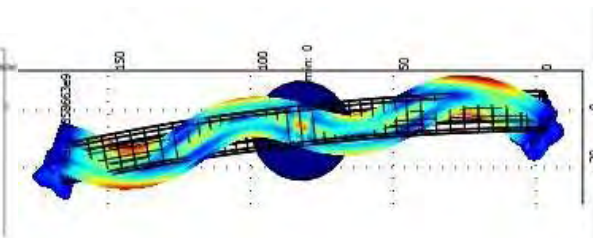
18st ιδιομορφή (10.752894) [εγκάρσια]



Isometric View



Side View

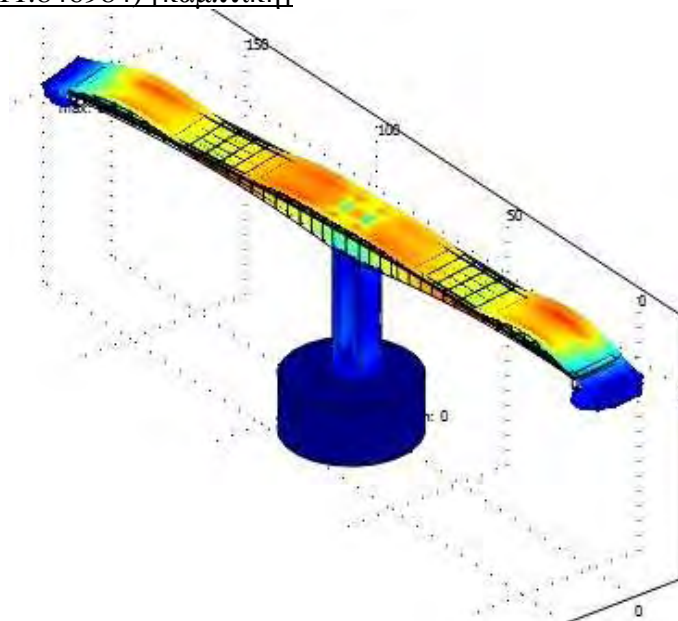


Top View

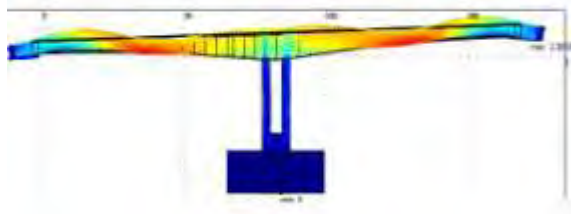


Front View

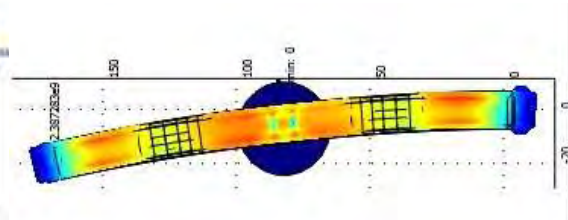
19st ιδιομορφή (11.846984) [καμπτική]



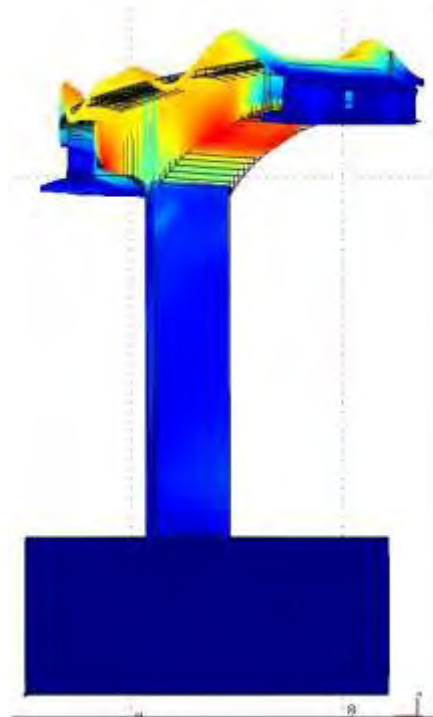
Isometric View



Side View

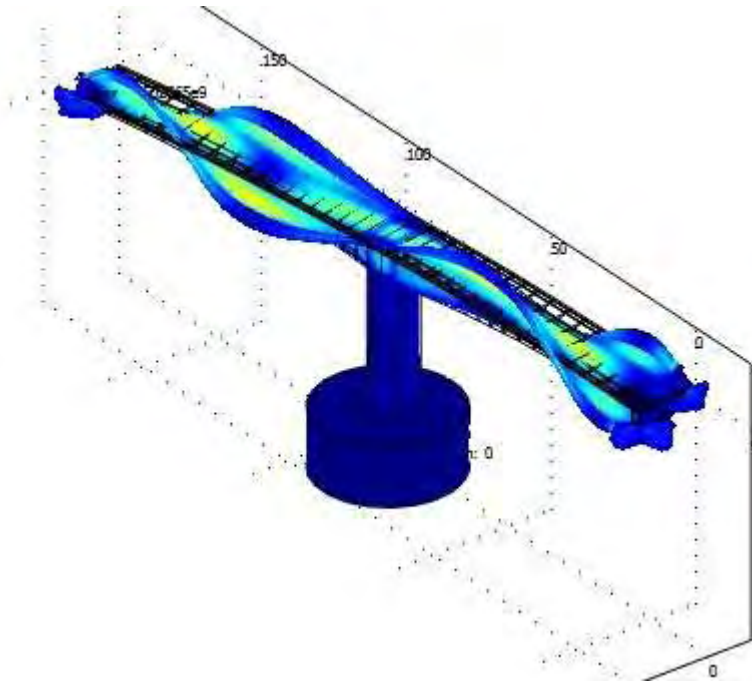


Top View

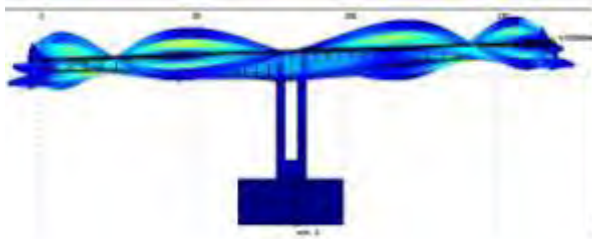


Front View

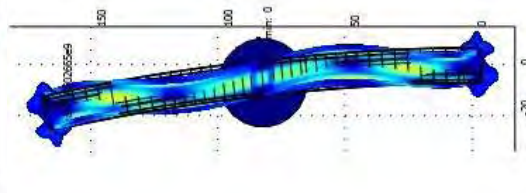
20st ιδιομορφή (12.038572) [στρεπτική]



Isometric View



Side View

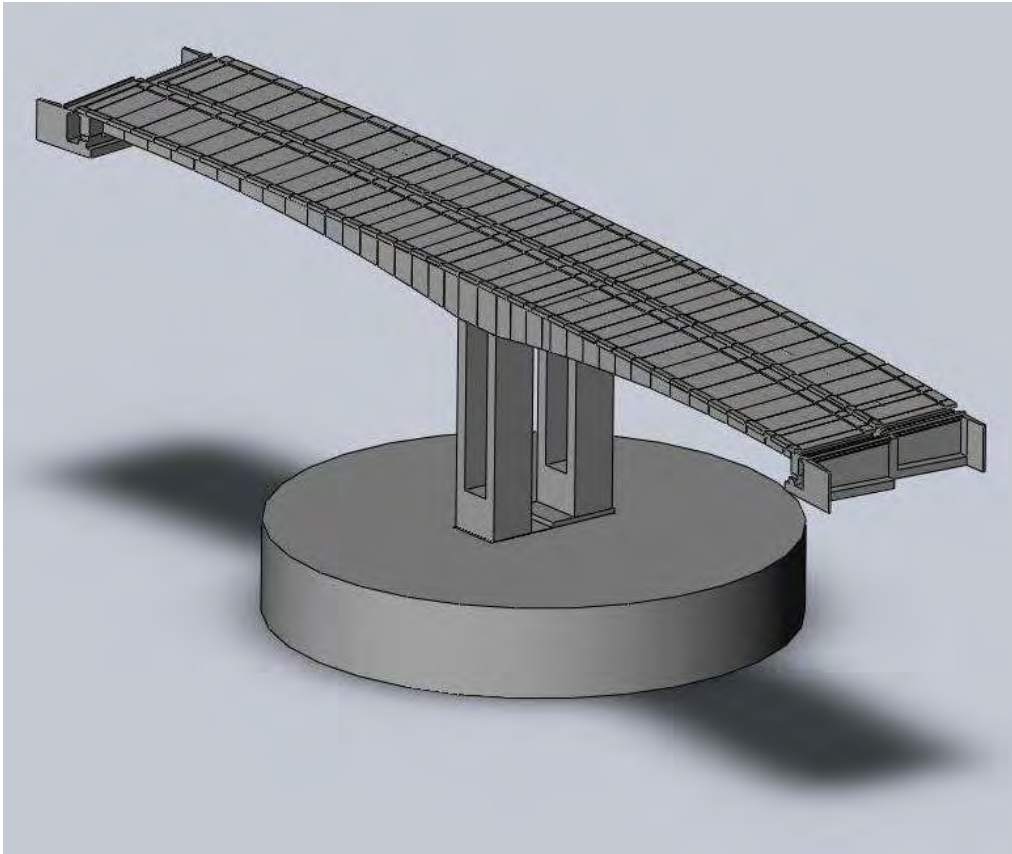


Top View



Front View

4.4. ΜΟΝΤΕΛΟ ΔΙΠΛΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕ ΕΔΑΦΟΣ



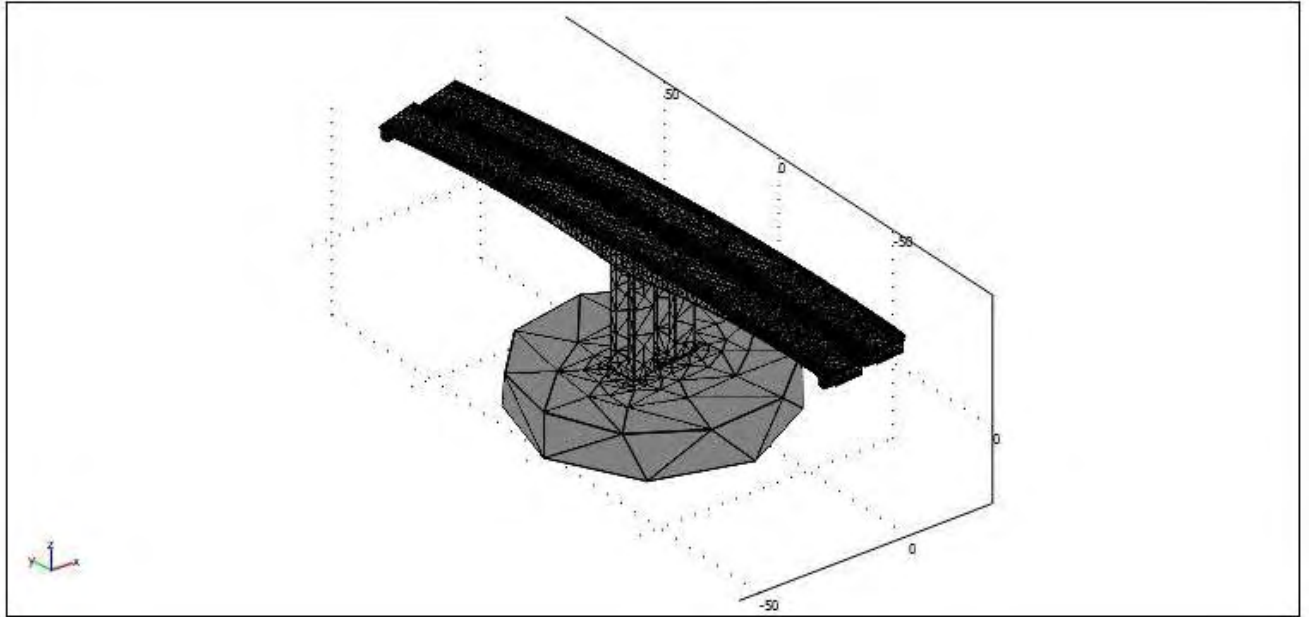
Σχήμα 4-8. Μοντέλο διπλής γέφυρας

Το τελευταίο μοντέλο που αναλύθηκε είναι η διπλή γέφυρα με έδαφος. Το έδαφος προσομοιώνεται, όπως και πριν με ένα μεγάλο τεμάχιο, η διάμετρος του οποίου είναι τουλάχιστον $6R$, όπου R η ακτίνα που περικλείει την διατομή της βάσης του μεσόβαθρου. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε είναι extra coarse και έχει συνολικά 97136 πεπερασμένα στοιχεία. Οι βαθμοί ελευθερίας του μοντέλου είναι 550922. Για την δυναμική ανάλυση θεωρούμε πακτωμένες τις κάτω πλευρές των εφεδράνων, την κάτω πλευρά της βάσης του μεσόβαθρου, καθώς επίσης και την κάτω και τις πλαϊνές επιφάνειες του εδάφους. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι εικοσιτέσσερις πρώτες ιδιοτιμές που υπολογίστηκαν.

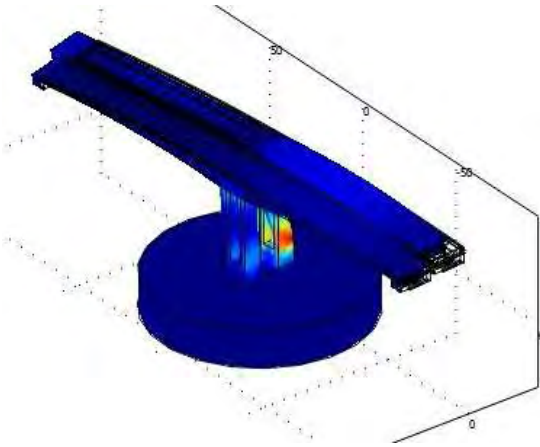
Μοντέλο διπλής γέφυρας	Αριθμός FEM : 97136	Βαθμοί Ελευθερίας : 550922
A/A	Ιδιοτιμές (αποτελέσματα)	Είδος ιδιομορφών
1	0.917058	διαμήκης
2	0.922032	διαμήκης
3	1.038629	εγκάρσια
4	1.041974	εγκάρσια
5	1.090026	εγκάρσια - στρεπτική
6	1.090120	εγκάρσια - στρεπτική
7	2.021048	καμπτική - εγκάρσια
8	2.022566	καμπτική - εγκάρσια
9	2.028941	καμπτική
10	2.031684	καμπτική
11	2.900777	καμπτική
12	2.902087	καμπτική
13	3.868027	εγκάρσια
14	3.868452	εγκάρσια
15	5.828956	καμπτική
16	5.833756	καμπτική
17	6.366434	εγκάρσια - στρεπτική
18	6.380449	εγκάρσια - στρεπτική
19	6.593571	καμπτική
20	6.626884	καμπτική
21	6.976327	καμπτική - εγκάρσια
22	6.979463	καμπτική - εγκάρσια
23	7.161160	καμπτική - εγκάρσια
24	7.163918	καμπτική - εγκάρσια

Πίνακας 4-9. Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης διπλού κλάδου γέφυρας - FEM με έδαφος

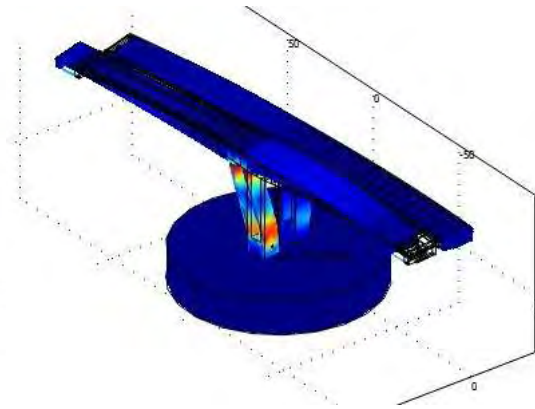
Από την μελέτη των παραπάνω αποτελεσμάτων και την παρατήρηση των ιδιομορφών βλέπουμε ότι οι ιδιοτιμές ανά ζεύγη είναι σχεδόν ταυτόσημες. Αυτό γίνεται γιατί προσδιορίζουν εναλλάξ την κίνηση του δεξιού και του αριστερού κλάδου. Έτσι οι 1, 3, 5, 7, 9, 11, 14, 15, 19, 22, 23 αναφέρονται στον δεξιό κλάδο, ενώ αντίθετα οι ιδιοτιμές οι 2, 4, 6, 8, 10, 12, 13, 16, 20, 21, 24 περιγράφουν τον αριστερό κλάδο. Υπάρχουν και δύο, οι 17, 18, που αναφέρονται σε ταυτόχρονη ταλάντωση των δύο κλάδων.



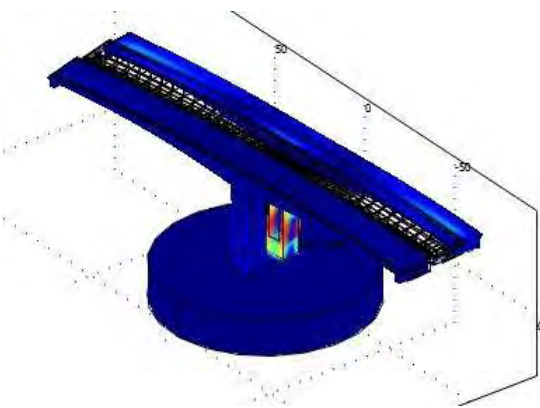
**Σχήμα 4-10. Δικτύωμα διπλού κλάδου γέφυρας - FEM με έδαφος
Extra coarse, DOF =550922, F.E.=97136**



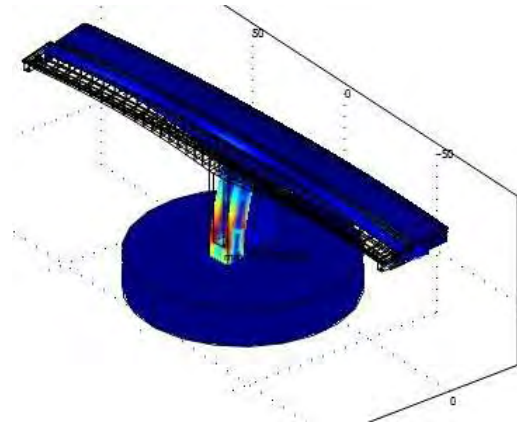
1st ιδιοτιμή (0.917058) [διαμήκης]



2st ιδιοτιμή (0.922032) [διαμήκης]



3st ιδιοτιμή (1.038629) [εγκάρσια]



4st ιδιοτιμή (1.041974) [εγκάρσια]

Σχήμα 4-11: Απεικόνιση 4 πρώτων ιδιομορφών

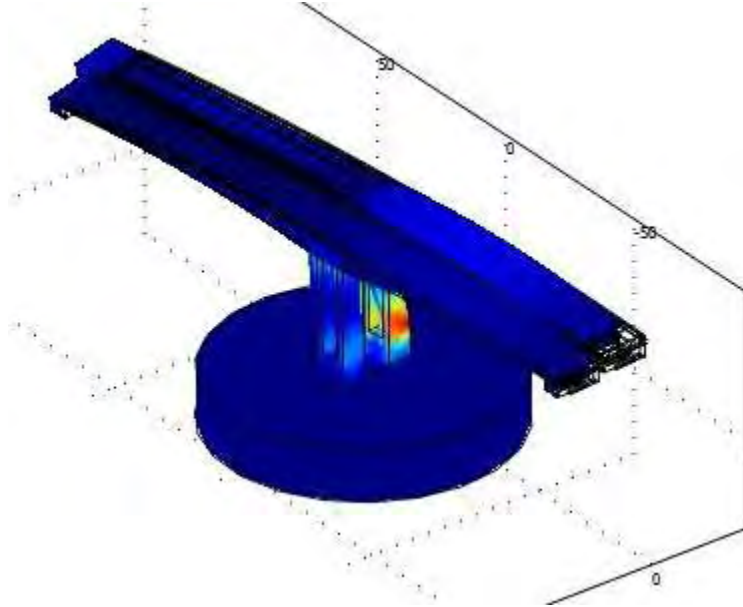
Επειδή πειραματικά αποτελέσματα έχουμε μόνο για τον δεξιό κλάδο, θα παρουσιάσουμε και θα σχολιάσουμε παρακάτω μόνο τις ιδιοτιμές που αντιστοιχούν σ' αυτόν. Έτσι, στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι 11 (+2 που αφορούν και τους δύο κλάδους ταυτόχρονα) ιδιοτιμές που αφορούν τον δεξιό κλάδο.

Μοντέλο διπλής γέφυρας	Αριθμός FEM : 97136	Βαθμοί Ελευθερίας : 550922
No	Ιδιοτιμές (αποτελέσματα)	Είδος ιδιομορφών
1	0.917058	διαμήκης
3	1.038629	εγκάρσια
5	1.090026	εγκάρσια - στρεπτική
7	2.021048	καμπτική - εγκάρσια
9	2.028941	καμπτική
11	2.900777	καμπτική
14	3.868452	εγκάρσια
15	5.828956	καμπτική
17	6.366434	εγκάρσια - στρεπτική
18	6.380449	εγκάρσια - στρεπτική
19	6.593571	καμπτική
22	6.979463	καμπτική - εγκάρσια
23	7.161160	καμπτική - στρεπτική

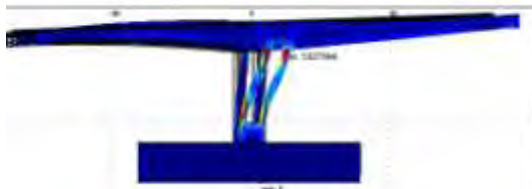
Πίνακας 4-12. Αποτελέσματα δυναμικής ανάλυσης διπλού κλάδου γέφυρας - FEM με έδαφος
Ιδιοτιμές που σχετικές με τον δεξιό κλάδο

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται οι απεικονίσεις των ιδιομορφών που υπολογίστηκαν για το συγκεκριμένο μοντέλο.

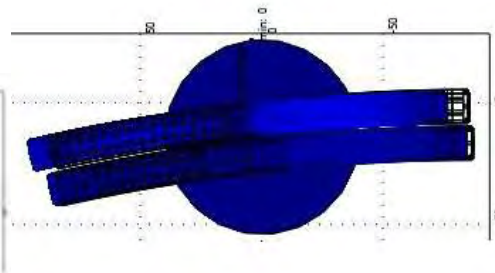
1st ιδιομορφή (0.917058) [διαμήκης]



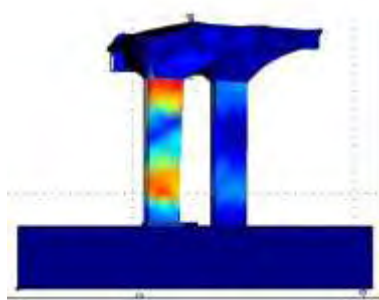
Isometric View



Side View

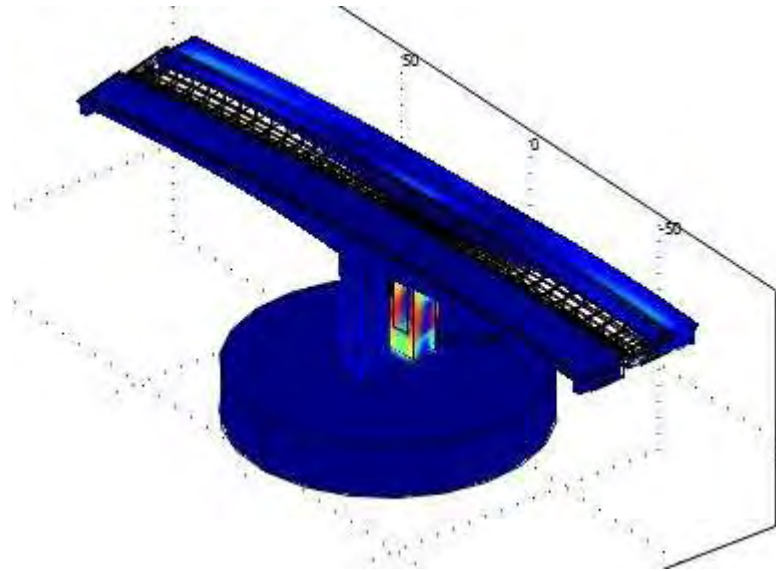


Top View

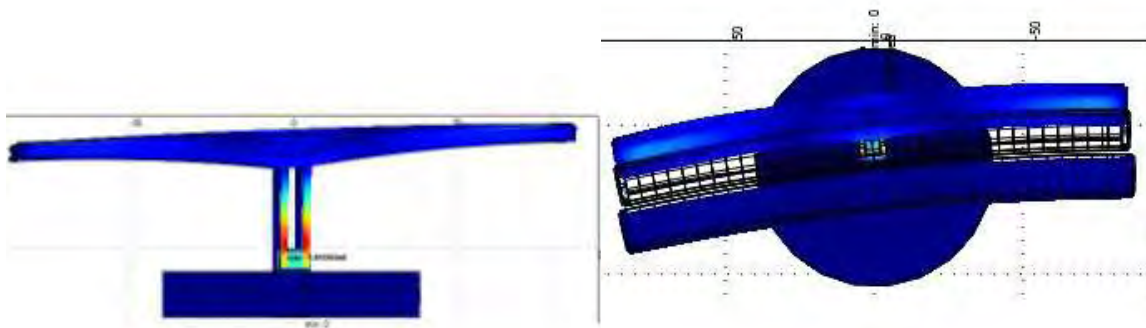


Front View

3st ιδιομορφή (1.038629) [εγκάρσια]

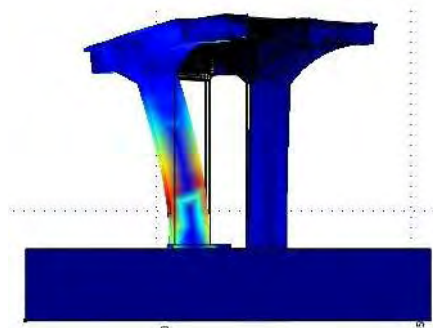


Isometric View



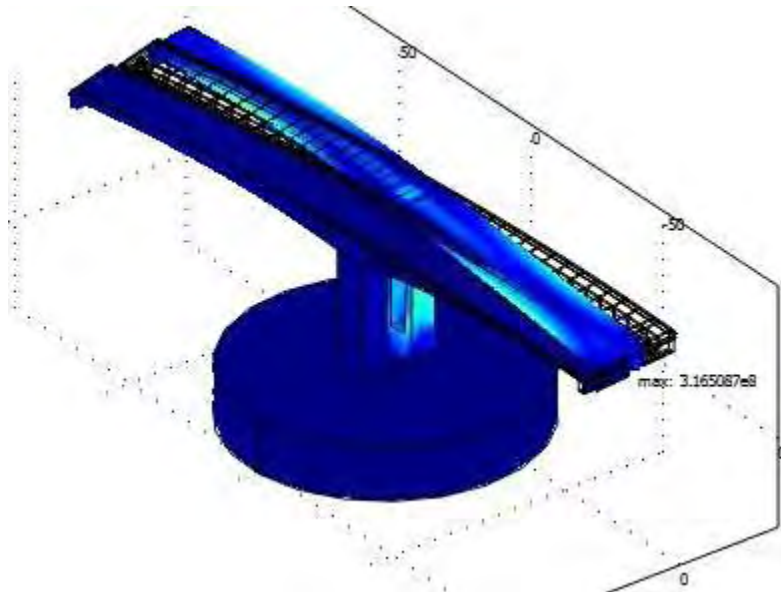
Side View

Top View

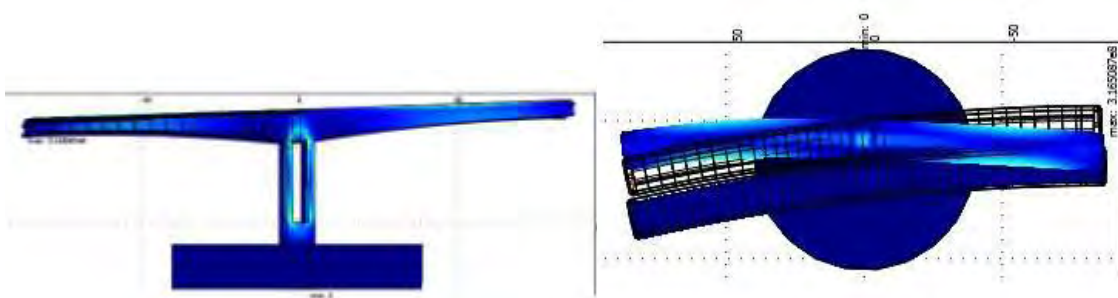


Front View

5st ιδιομορφή (1.090026) [εγκάρσια - στρεπτική]

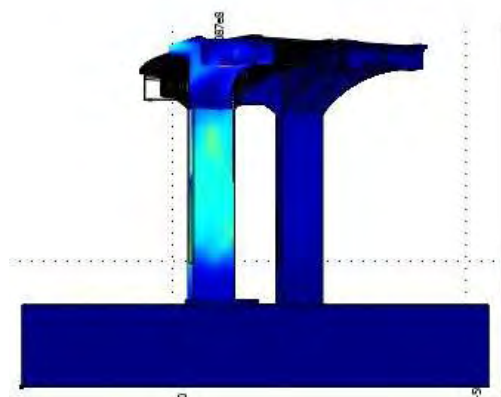


Isometric View



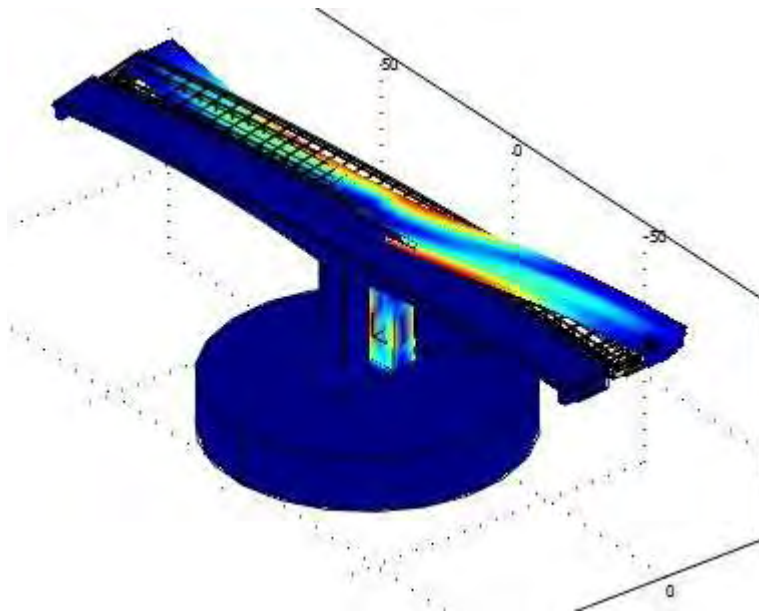
Side View

Top View

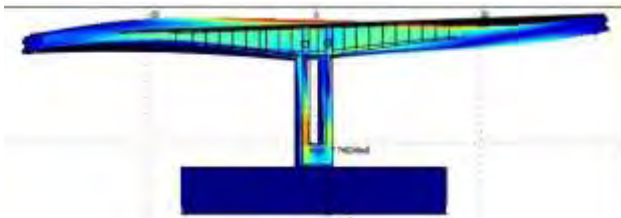


Front View

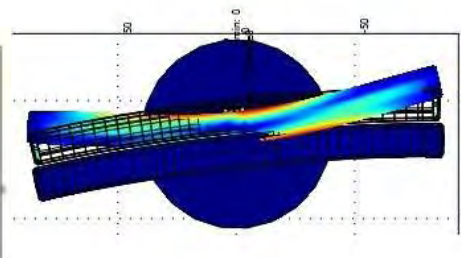
7st ιδιομορφή (2.021048) [καμπτική -εγκάρσια]



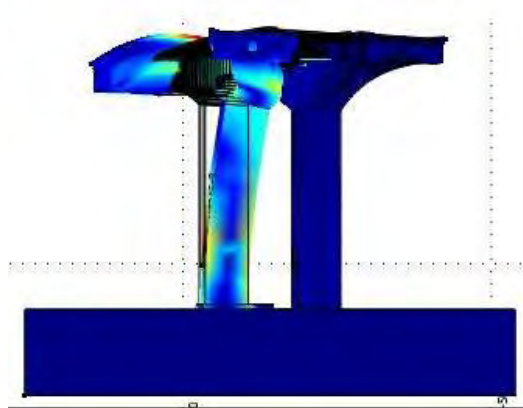
Isometric View



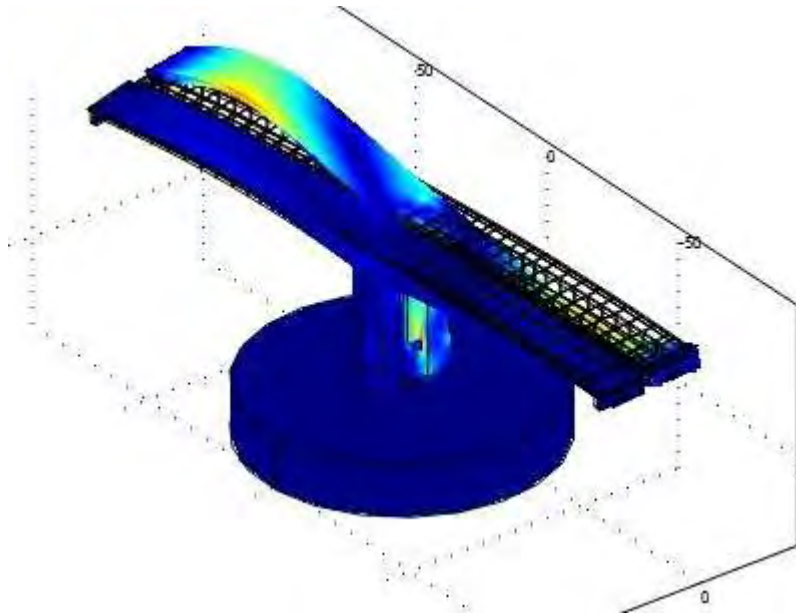
Side View



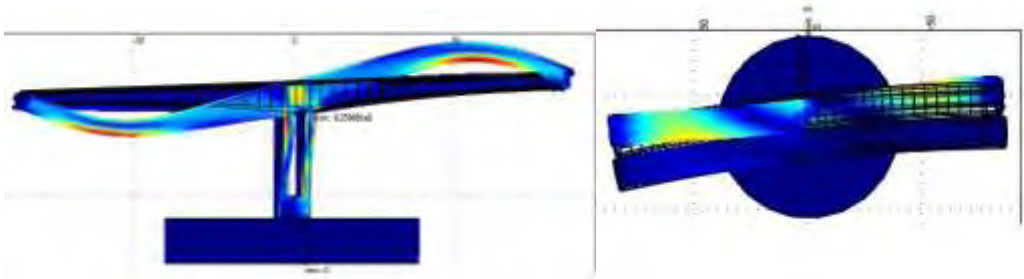
Top View



Front View

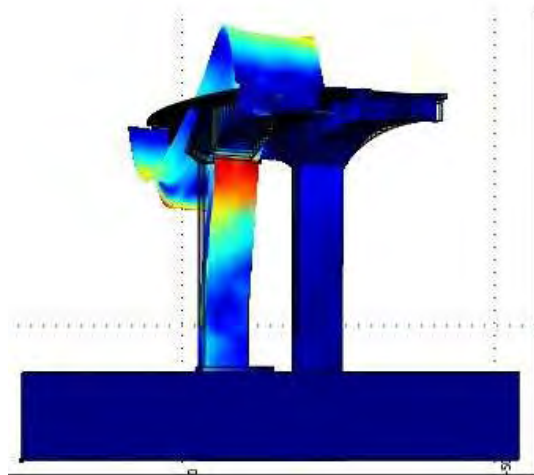


Isometric View



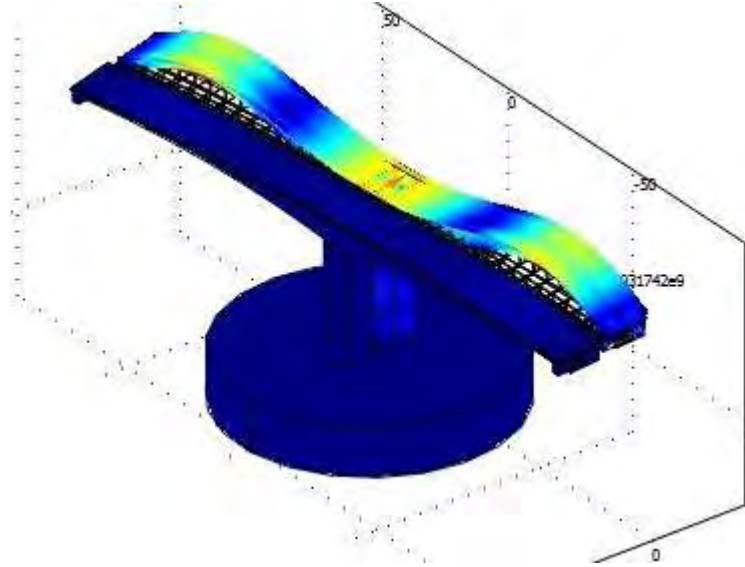
Side View

Top View

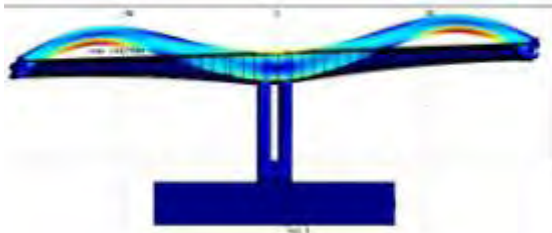


Front View

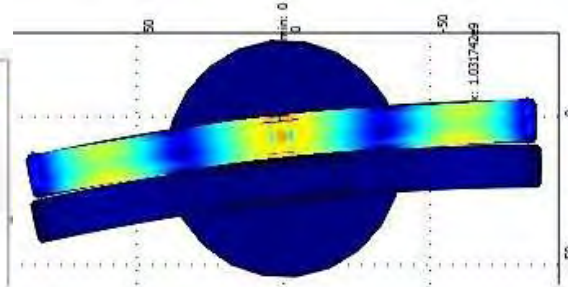
11st ιδιομορφή (2.900777) [καμπτική]



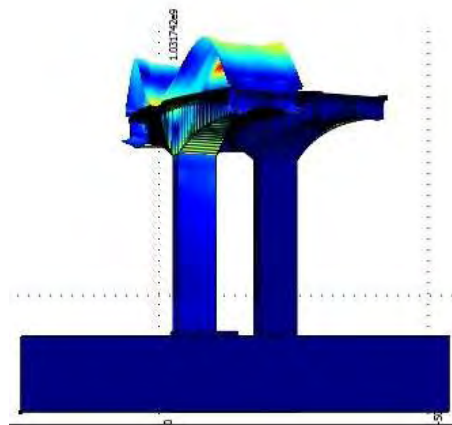
Isometric View



Side View

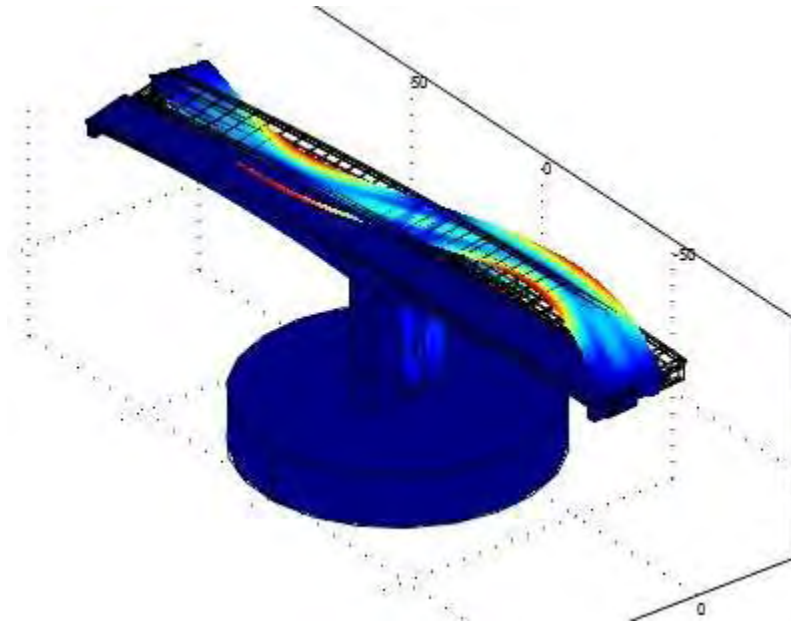


Top View

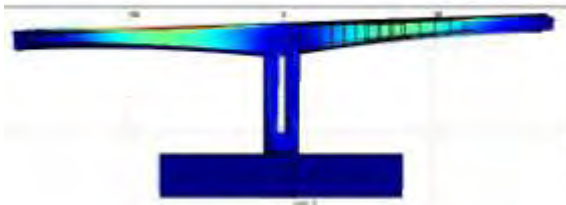


Front View

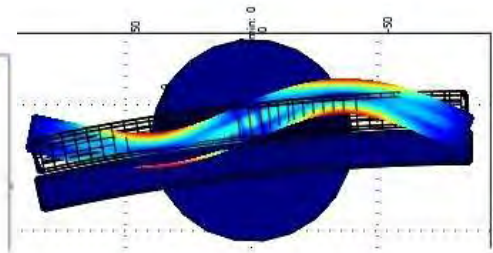
14st ιδιομορφή (3.868452) [εγκάρσια]



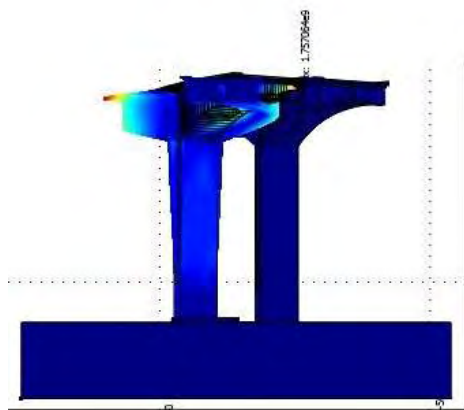
Isometric View



Side View

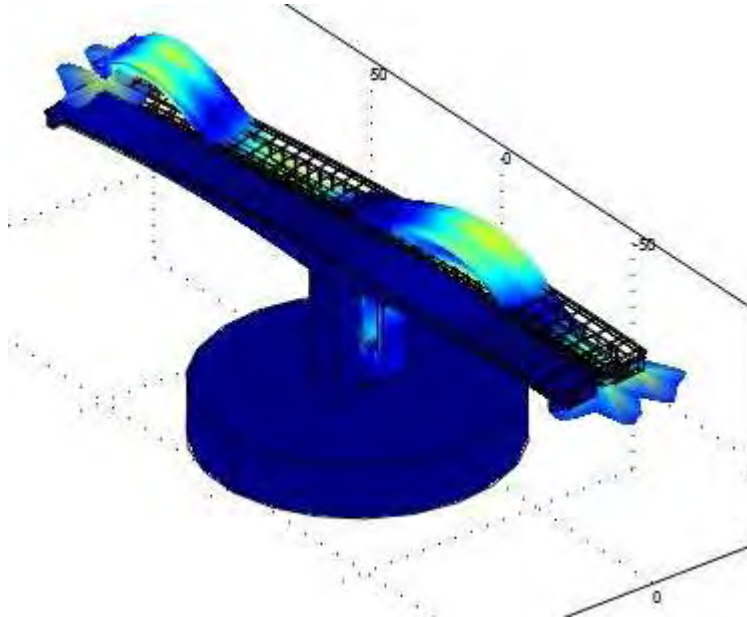


Top View

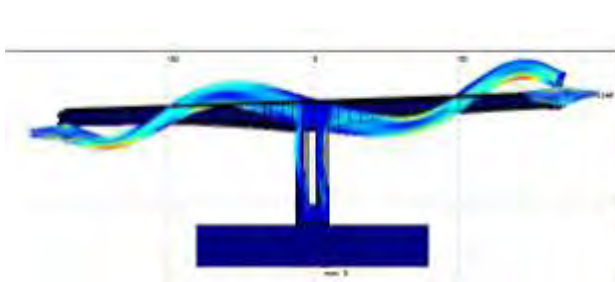


Front View

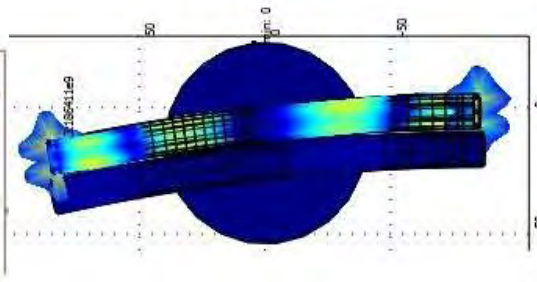
15st ιδιομορφή (5.828956) [καμπτική]



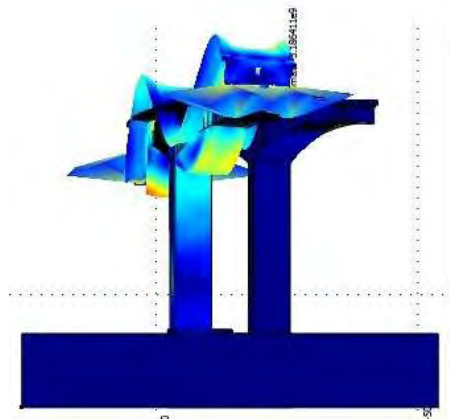
Isometric View



Side View

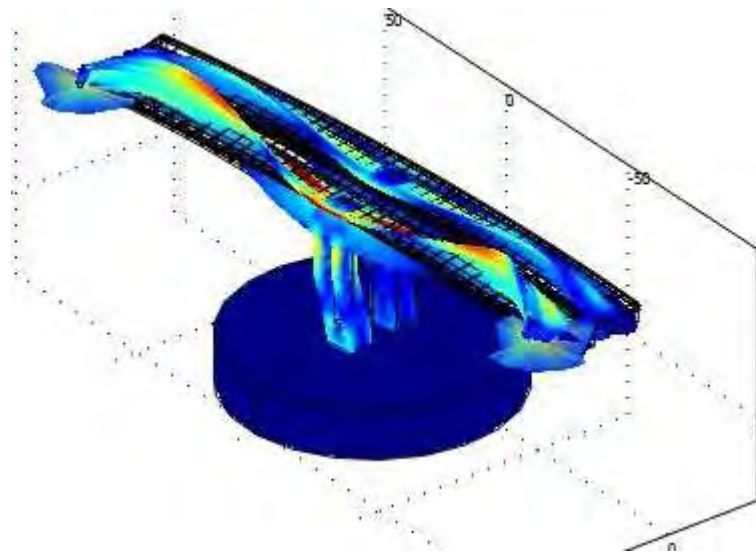


Top View

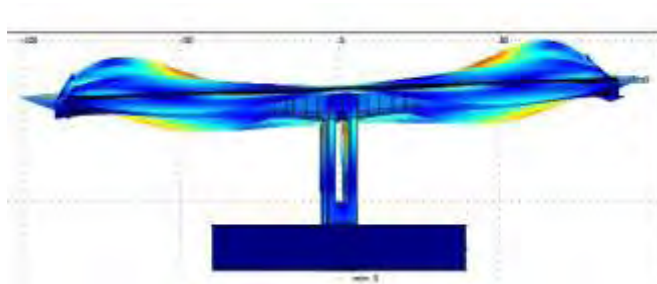


Front View

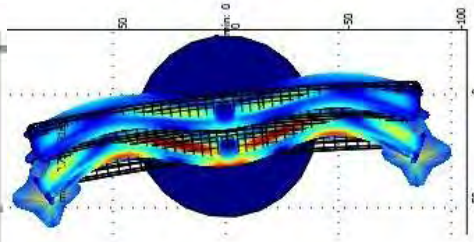
17st ιδιομορφή (6.366334) [εγκάρσια-στρεπτική]



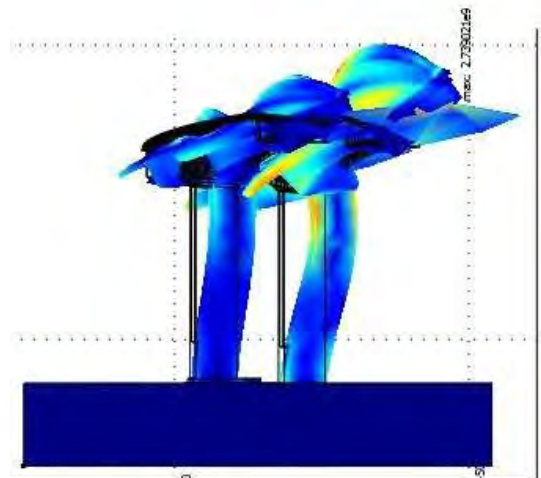
Isometric View



Side View

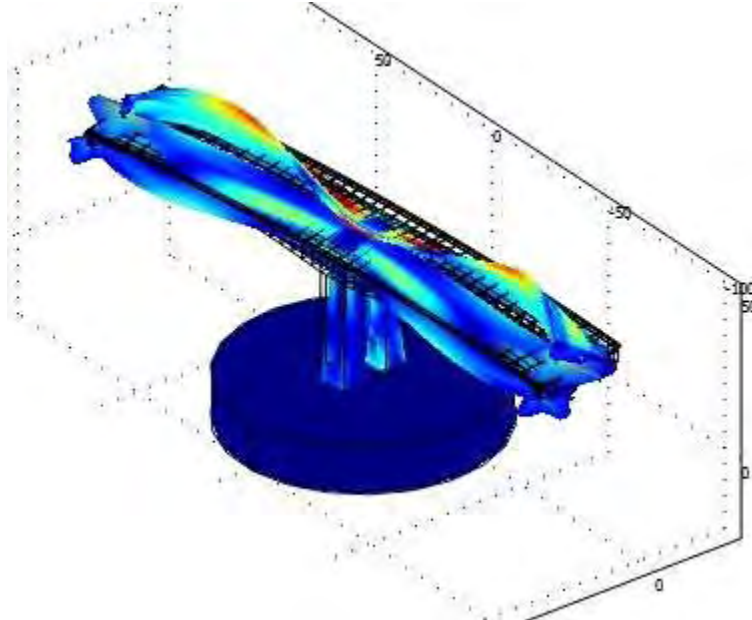


Top View

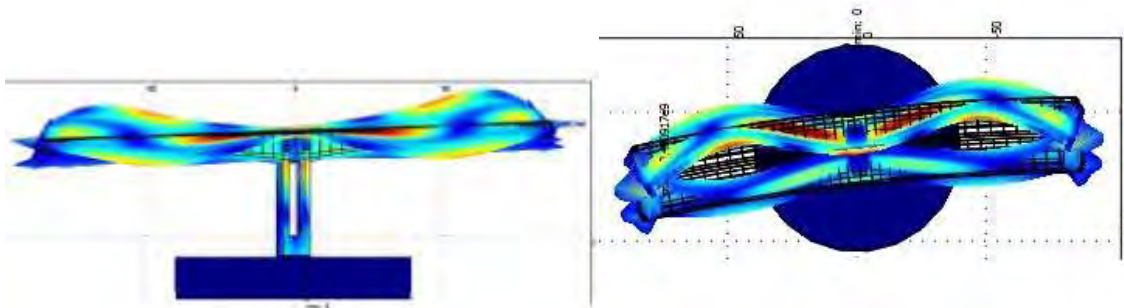


Front View

18st ιδιομορφή (6.380449) [εγκάρσια-στρεπτική]

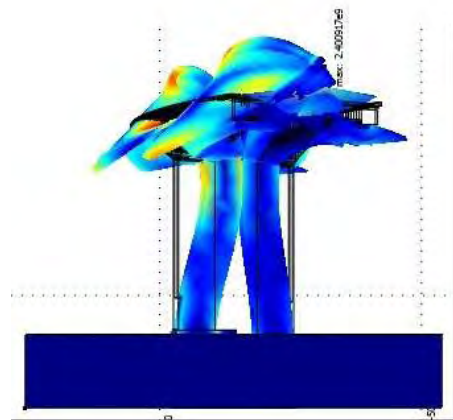


Isometric View



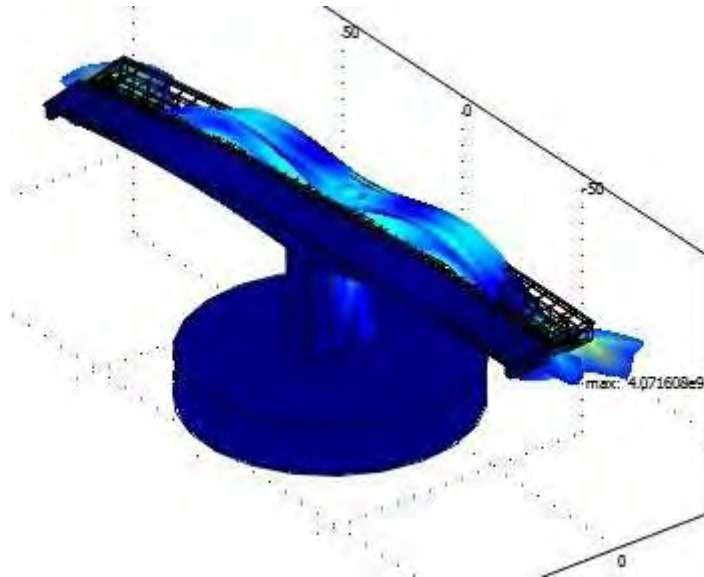
Side View

Top View



Front View

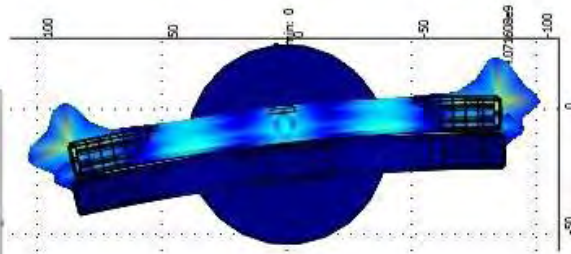
19st ιδιομορφή (6.593571) [καμπτική]



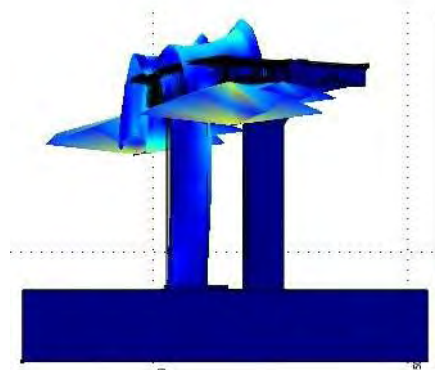
Isometric View



Side View

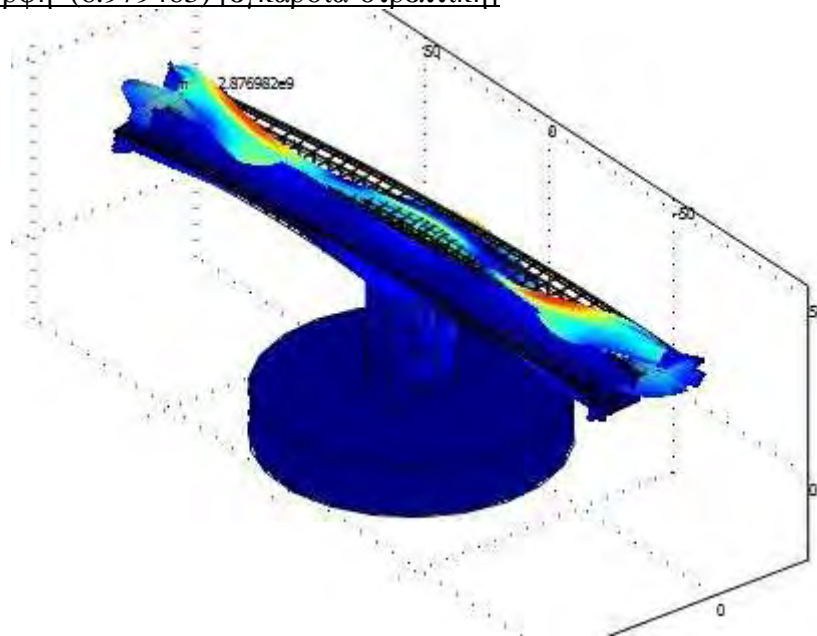


Top View

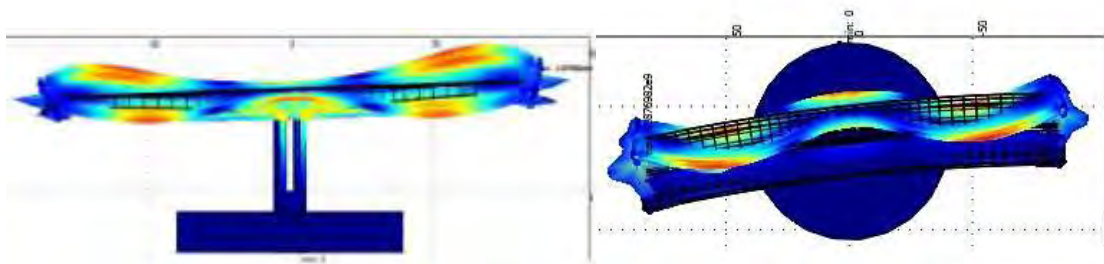


Front View

22st ιδιομορφή (6.979463) [εγκάρσια-στρεπτική]

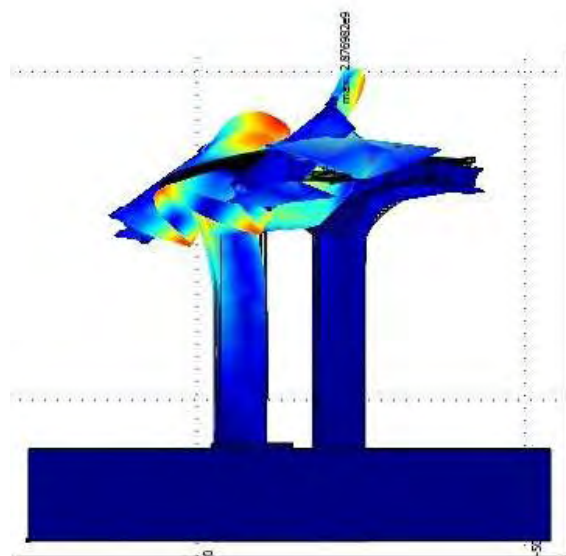


Isometric View



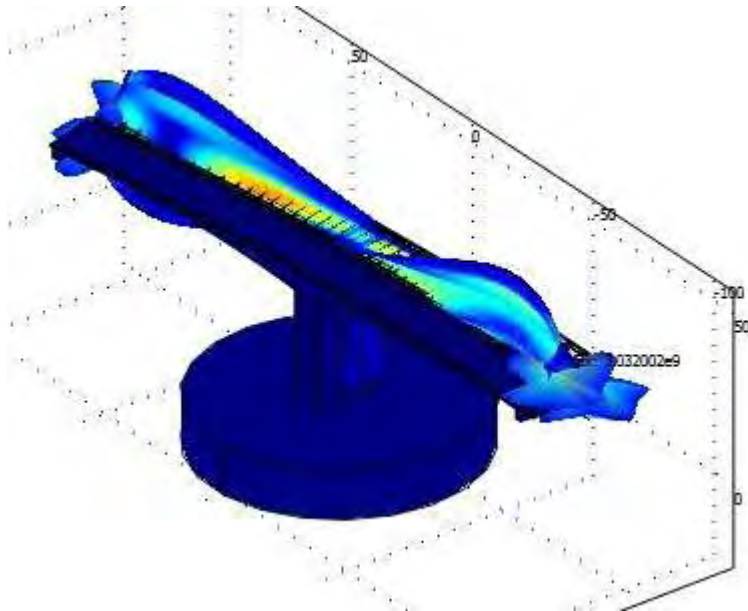
Side View

Top View

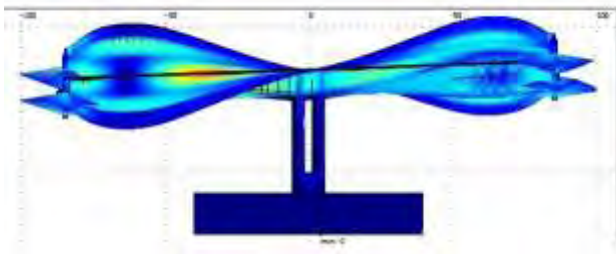


Front View

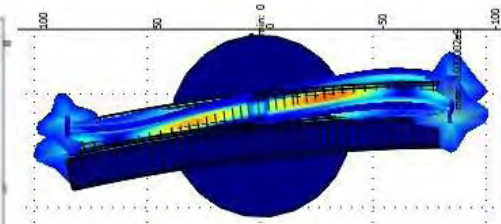
23st ιδιομορφή (7.161160) [στρεπτική]



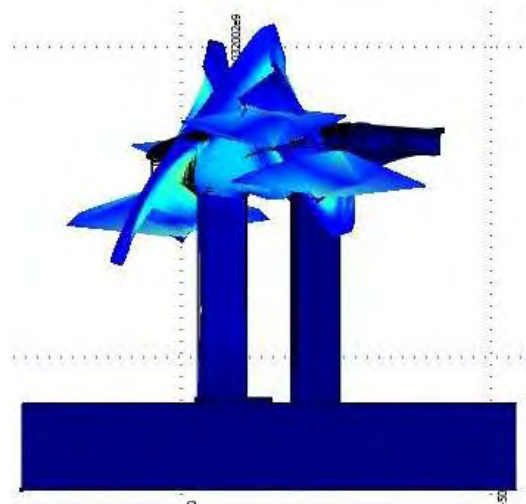
Isometric View



Side View



Top View



Front View

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον πρώτο συγκεντρωτικό πίνακα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τα τρία μοντέλα που μελετήθηκαν. Παρατηρούμε ότι γενικά, οι μετρούμενες τιμές είναι πολύ κοντά, ενώ ο τύπος κάθε ιδιομορφής είναι ίδιος, κάθε φορά. Στον επόμενο πίνακα 5-1 παρατίθενται τα αποτελέσματα των δυναμικών αναλύσεων στα τρία μοντέλα.

No	Μοντέλο με πακτωμένη βάση		Μοντέλο με έδαφος		Μοντέλο διπλής γέφυρας με έδαφος	
	Αριθμός FEM: 48062	Βαθμοί ελευθερίας: 273066	Αριθμός FEM : 48365	Βαθμοί ελευθερίας : 274464	Αριθμός FEM : 97136	Βαθμοί ελευθερίας : 550922
	Ιδιοτιμές (αποτελέσματα)	Είδος ιδιομορφών	Ιδιοτιμές (αποτελέσματα)	Είδος ιδιομορφών	Ιδιοτιμές (αποτελέσματα)	Είδος ιδιομορφών
1	0.892852	διαμήκης	0.914647	διαμήκης	0.917058	διαμήκης
2	0.998062	εγκάρσια	1.036330	εγκάρσια	1.038629	εγκάρσια
3	1.089419	εγκάρσια - στρεπτική	1.089886	εγκάρσια - στρεπτική	1.090026	εγκάρσια - στρεπτική
4	1.996292	εγκάρσια	2.019565	εγκάρσια	2.021048	καμπτική - εγκάρσια
5	2.040494	καμπτική	2.027334	καμπτική	2.028941	καμπτική
6	2.898880	καμπτική	2.899904	καμπτική	2.900777	καμπτική
7	3.867404	εγκάρσια	3.868207	εγκάρσια	3.868452	εγκάρσια
8	5.816768	καμπτική	5.818534	καμπτική	5.828956	καμπτική
9	6.147161	εγκάρσια - στρεπτική	6.360236	εγκάρσια - στρεπτική	6.366434/ 6.380449	εγκάρσια - στρεπτική
10	6.564620	καμπτική	6.579331	καμπτική	6.593571	καμπτική
11	6.969816	εγκάρσια - στρεπτική	6.974849	εγκάρσια - στρεπτική	6.979463	εγκάρσια - στρεπτική
12	7.152510	στρεπτική	7.149767	στρεπτική	7.161160	στρεπτική
13	8.215384	καμπτική	8.788861	καμπτική	8.818715	καμπτική
14	8.836051	καμπτική	9.341538	καμπτική	9.361741	καμπτική
15	9.179120	στρεπτική	9.729933	καμπτική	9.873707	καμπτική
16	9.338459	καμπτική	9.990046	στρεπτική	10.034020	στρεπτική
17	10.17408	καμπτική	10.213171	καμπτική	10.438601	καμπτική
18	10.74495	εγκάρσια	10.752894	εγκάρσια	10.753178	εγκάρσια
19	11.84114	καμπτική	11.846984	καμπτική	11.847618	καμπτική
20	12.03482	στρεπτική	12.038572	στρεπτική	12.046452	στρεπτική

Πίνακας 5-1. Σύγκριση αποτελεσμάτων δυναμικής ανάλυσης τριών υπό μελέτη μοντέλων

Μια βασική παρατήρηση είναι ότι η επίδραση του εδάφους στο μοντέλο έχει αξιοσημείωτη συμβολή στα αποτελέσματα και δεν μπορεί να αγνοηθεί. Βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα του 1^{ου} μοντέλου (γέφυρα χωρίς έδαφος) είναι μικρότερα από το δεύτερο (γέφυρα με έδαφος) περίπου 2% (μέση τιμή απόκλισης). Υπάρχουν όμως κάποιες ιδιοτιμές οι οποίες παρουσιάζουν απόκλιση περίπου 6% (9^η, 13^η, 14^η, 15^η, 16^η). Παρατηρώντας τις αντίστοιχες ιδιομορφές βλέπουμε ότι οι συγκεκριμένες σχετίζονται άμεσα με την κίνηση του μεσόβαθρου, η οποία λογικά επηρεάζεται από την ύπαρξη ή μη του τεμαχίου που προσομοιάζει το έδαφος.

Με αντίστοιχη σύγκριση των αποτελεσμάτων του 2^{ου} μοντέλου, (γέφυρα με έδαφος) με το 3^ο μοντέλο (διπλή γέφυρα με έδαφος), βλέπουμε ότι οι διαφορές είναι αρκετά μικρότερες, της τάξης περίπου 0,5% (μεγαλύτερες στο μοντέλο της διπλής γέφυρας.). Αυτό μας δείχνει ότι η ύπαρξη του αριστερού κλάδου, δεν φαίνεται να επηρεάζει ιδιαίτερα τα αποτελέσματα του δεξιού. Βέβαια, το τελευταίο μοντέλο μας δίνει πολύ περισσότερες πληροφορίες για την συνολική κατασκευή, καθώς μας δίνει και περισσότερες ιδιοτιμές.

Ακολουθεί ο πίνακας 5-2 με τις πραγματικές μετρηθήσες τιμές, ενώ στην τελευταία στήλη δίνονται οι αντίστοιχες ιδιοτιμές του μοντέλου του δεξιού κλάδου με έδαφος. Υπάρχουν δύο μετρήσεις, η μία έχει αποτελέσματα που προέρχονται από περιβαλλοντική διέγερση, ενώ η άλλη από σεισμική.

Ιδιομορφή	Περιβαλλοντική Διέγερση		Σεισμική Διέγερση		Μοντέλο δεξιού κλάδου με έδαφος
	ω (Hz)	ζ (%)	ω (Hz)	ζ (%)	ω (Hz)
1 ^η Εγκάρσια	1.13	2.0	1.29	1.8	1,04
1 ^η Διαμήκης	-	-	1.17	1.8	0,91
2 ^η Εγκάρσια	1.20	5.6	1.30	5.9	1,09
1 ^η Καμπτική	2.13	0.6	2.20	0.6	2,03
3 ^η Εγκάρσια	2.22	1.1	2.56	3.5	2,02
2 ^η Καμπτική	3.07	0.4	3.20	0.7	2,89
4 ^η Εγκάρσια	4.10	0.8	4.23	3.2	3,86
3 ^η Καμπτική	6.66	0.5	6.89	0.6	5,82
5 ^η Εγκάρσια	6.78	0.8	7.24	1.2	6,36

Πίνακας 5-2. Αποτελέσματα αναγνώρισης ιδιομορφικών χαρακτηριστικών - σύγκριση με αποτελέσματα μοντέλου δεξιού κλάδου με έδαφος

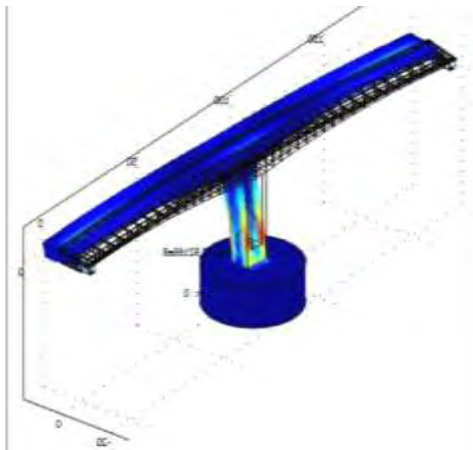
Ένα γεγονός που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι δεν ήταν εφικτή η αναγνώριση έστω και μιας διαμήκουσ ιδιομορφής από περιβαλλοντική διέγερση, πράγμα που μπορεί να οφείλεται στην απουσία κατάλληλης περιβαλλοντικής διέγερσης στη διεύθυνση αυτή.

Συγκρίνοντας τις τιμές των αναγνωρισμένων ιδιοσυχνοτήτων της πραγματικής κατασκευής με αυτές που προκύπτουν από το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων, προκύπτει αρχικά, ότι δεν έχουν αναγνωριστεί όλες οι ιδιομορφές που προβλέπονται από το μοντέλο. Αυτό οφείλεται στο ότι το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα θεωρητικό μοντέλο ενώ οι αναγνωρισμένες ιδιομορφές προέρχονται από την πραγματική κατασκευή και συνεπώς υπάρχουν και οι ανάλογες αποκλίσεις μεταξύ τους. Κάποιοι από τους λόγους για τους οποίους αρκετές ιδιομορφές που μας δίνει το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων δεν αναγνωρίζονται από τις μετρήσεις στην πραγματική κατασκευή είναι:

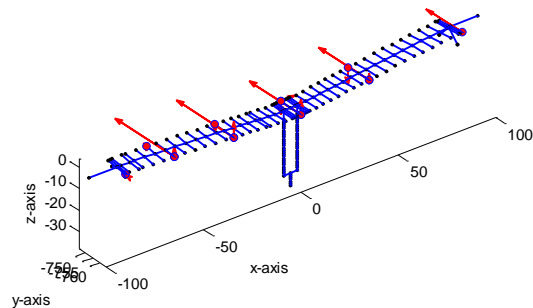
- Μη κατάλληλη διέγερση της κατασκευής από τα λειτουργικά της φορτία τη χρονική περίοδο της μέτρησης
- Προβλήματα στην τοποθέτηση των αισθητήρων
- Αποκλίσεις από τον σχεδιασμό στην κατασκευή τμήματος της γέφυρας.
- Αποκλίσεις στις ιδιότητες των υλικών κατασκευής της γέφυρας
- Αποκλίσεις στη σύσταση και τις ιδιότητες του εδάφους.

Αναφορικά με τα αριθμητικά αποτελέσματα, οι αναγνωρισμένες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων που προκύπτουν από τον αρχικό σχεδιασμό των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Οι διαφορές, εκτός από τους παραπάνω λόγους, πιθανόν οφείλονται και στις πολύ υψηλότερες τιμές της δυσκαμψίας των ελαστομερών εφεδράνων σε χαμηλής έντασης ταλαντώσεις των γεφυρών. Αυτή η δυναμική συμπεριφορά αποδίδεται στην υψηλά μη γραμμική υστερητική (πλαστική) συμπεριφορά των πολυστρωματικών ελαστομερών εφεδράνων. Ειδικότερα, το μέτρο διάτμησης των εφεδράνων για μικρές παραμορφώσεις κάτω από μικρής έντασης ταλαντώσεις σύμφωνα με τις μετρήσεις, είναι σημαντικά υψηλότερο από εκείνο που παρουσιάζονται για μεγάλες παραμορφώσεις σύμφωνα με τον ισχυρό σεισμό σχεδιασμού ο οποίος καθορίζεται από τον σεισμικό κώδικα.

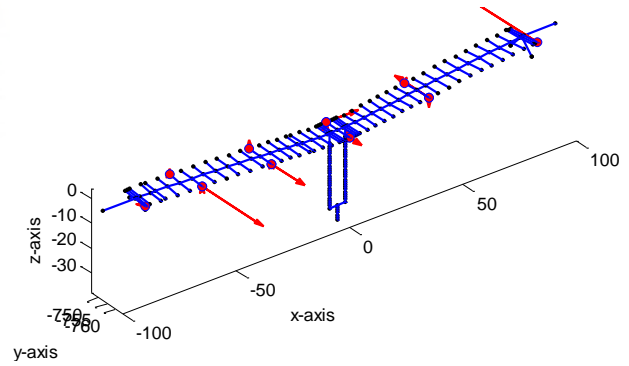
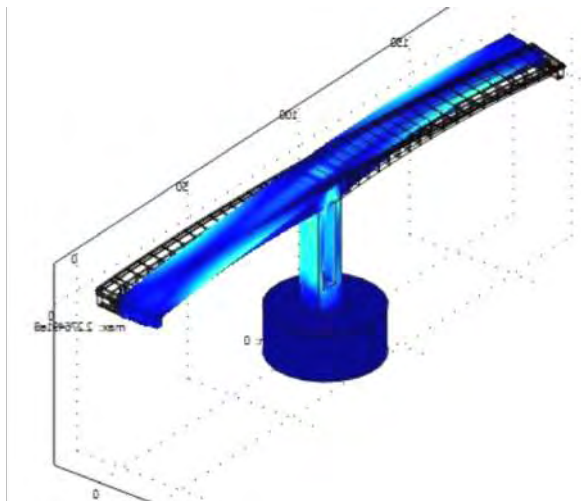
Στο τελευταίο σχήμα παρουσιάζονται συγκριτικά οι έξι πρώτες ιδιομορφές όπως έχουν υπολογιστεί από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του δεξιού κλάδου της γέφυρας με έδαφος και δίπλα τους είναι οι αντίστοιχες ιδιομορφές όπως αναγνωρίστηκαν από τις πειραματικές μετρήσεις. Βλέπουμε ότι οι ιδιομορφές ταυτίζονται απόλυτα σαν μορφή, ενώ οι τιμές τους, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, έχουν μια απόκλιση.



1^η εγκάρσια ιδιομορφή ($\omega=1,04$ Hz)

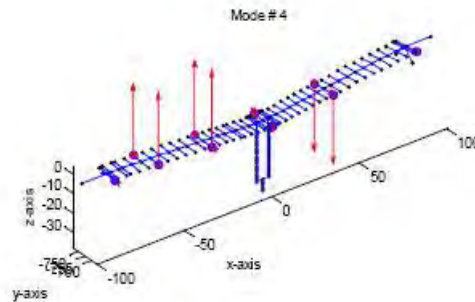
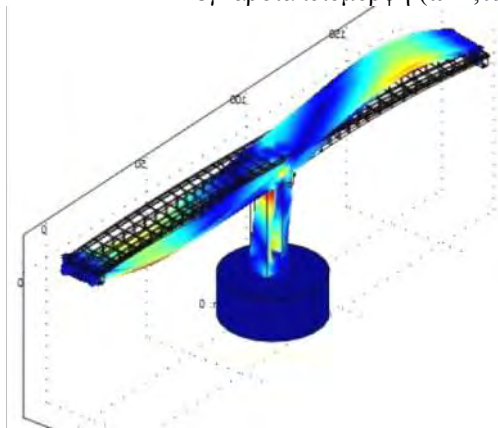


1^η εγκάρσια ιδιομορφή ($\omega=1,13$ Hz)



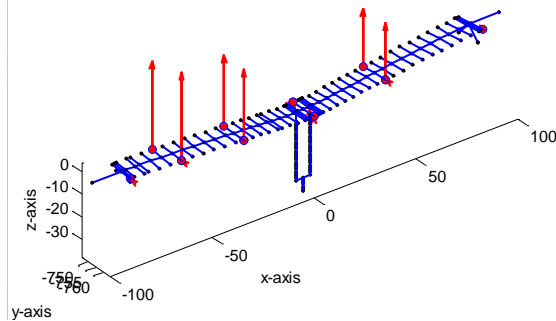
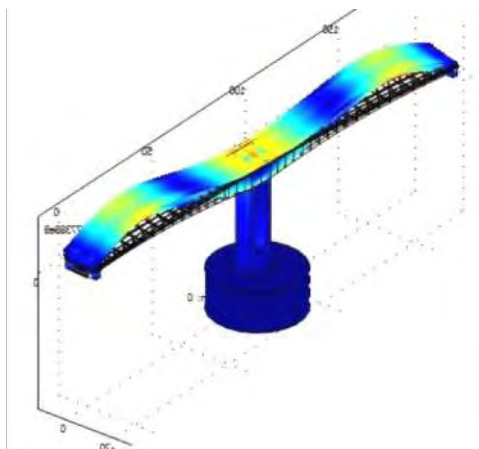
2^η εγκάρσια ιδιομορφή ($\omega=1,09$ Hz)

2^η εγκάρσια ιδιομορφή ($\omega=1,20$ Hz)



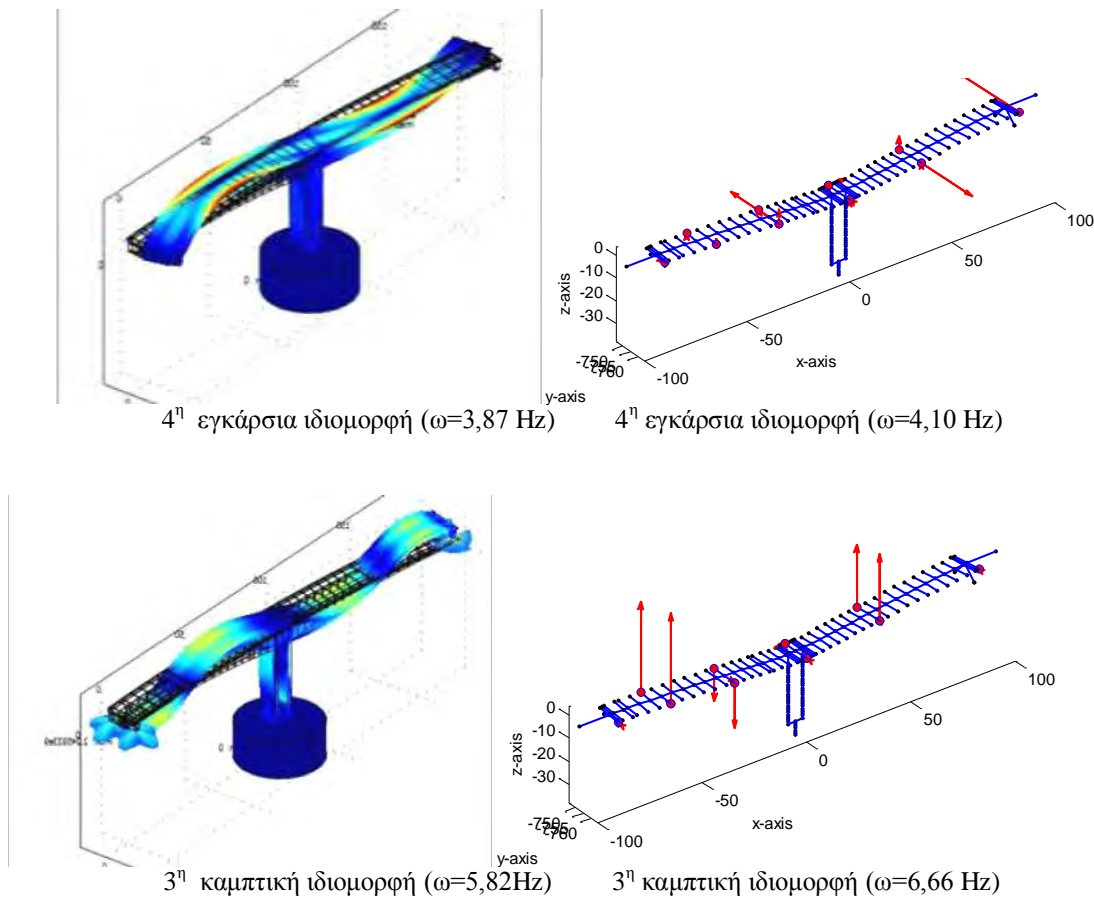
1^η καμπτική ιδιομορφή ($\omega=2,03$ Hz)

1^η καμπτική ιδιομορφή ($\omega=2,13$ Hz)



2^η καμπτική ιδιομορφή ($\omega=2,90$ Hz)

2^η καμπτική ιδιομορφή ($\omega=3,07$ Hz)



Σχήμα 5-3. Απεικόνιση των ιδιομορφών του μοντέλου και των πειραματικά μετρούμενων έξι πρώτων ιδιομορφών.

Για την βελτιστοποίηση των μοντέλων πρέπει να γίνει η διαδικασία της αναθεώρησης. Εκεί, με τη βοήθεια κατάλληλου λογισμικού που έχει αναπτύξει το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, υπό τον Καθηγητή κ. Παπαδημητρίου, βρίσκουμε τις σταθερές και τις ιδιότητες του μοντέλου (E , ν , ακαμψία, κτλ), ώστε να ανταποκρίνεται στις μετρήσεις.

Συμπερασματικά, πρέπει να τονισθεί ότι από την πολυετή εμπειρία της δομικής επιθεώρησης των γεφυρών από σκυρόδεμα της Εγνατίας Οδού προκύπτει ως βασικό συμπέρασμα ότι η συστηματική ενόργανη επιθεώρηση των μεγάλων γεφυρών είναι χρήσιμη και απαραίτητη, αφενός για την πειραματική αναγνώριση της μηχανικής συμπεριφοράς τους και αφετέρου για τον έγκαιρο εντοπισμό δυσμενών μεταβολών της λόγω σημαντικών βλαβών. Συνεπώς, η ενόργανη επιθεώρηση αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο δομικής αξιολόγησης και λήψης αποφάσεων για την συντήρηση μεγάλων τεχνικών έργων.

6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Πανέτσος Π., Ντότσιος Ε., Παπαδημητρίου Κ. (2008). «Αξιολόγηση της δομικής κατάστασης των γεφυρών βάσει συνδυασμένης οπτικής και ενόργανης επιθεώρησής τους». Πρακτικά 3ου Πανελληνίου Συνεδρίου Αντισεισμικής Μηχανικής, Αθήνα.
- [2] Σύστημα ενόργανης παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας των γεφυρών από σκυρόδεμα της Εγνατίας Οδού Παναγιώτης ΠΑΝΕΤΣΟΣ1, Ιωάννης ΡΕΝΤΖΕΠΕΡΗΣ 2, Κωνσταντίνος ΛΙΟΛΙΟΣ 3
- [3] Πανέτσος Π., Ρεντζεπέρης Ι., Λιώλιος Α., (2006) «Σύστημα διαχείρισης της κύριας συντήρησης οδικών γεφυρών από σκυρόδεμα». 15ο Ελλ. Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη.
- [4] E.Ntotsios, C. Karakostas, V. Lekidis, P. Panetsos, I. Nikolaou, C. Papadimitriou, T. Salonikios (2009). “Structural Identification of Egnatia Odos Bridges based on ambient and earthquake induced vibrations”. Bulletin of Earthquake Engineering, No 7: 485-501.
- [5] E.Ntotsios, C. Papadimitriou, P. Panetsos, G. Karaiskos, K. Perros, P. Perdikaris (2009). “Bridge Health Monitoring system based on vibration measurements”. Bulletin of Earthquake Engineering, No 7: 409-483.
- [6] Christodoulou K., Ntotsios E., Papadimitriou C., Panetsos P. (2008), “Structural model updating and prediction variability using Pareto optimal models.” Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 198 (1), 138-149.
- [7] Liokos N.A. (2009), “Design and Response Identification of Structures” Diploma Thesis Report, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Thessaly.
- [8] Ntotsios E., Christodoulou K., Papadimitriou C. (2006), “Optimal Experimental Design in Structural Dynamics.” 5th International Conference on Computational Stochastic Mechanics, Rhodes, Greece.
- [9] Ntotsios E., Papadimitriou C., Panetsos P, Karaiskos G, Perros K., Perdikaris Ph (2008), “Bridge health monitoring system based on vibration measurements.” Bulletin of Earthquake Engineering, doi: 10.1007/s10518-008-9067-4.
- [10] Panetsos P., Ntotsios E., Papadioti D.-C., Papadimitriou C., Dakoulas P. (2010), “Health Monitoring of Metsovo Bridge using Ambient Vibrations” 5th European Workshop on Structural Health Monitoring, Sorrento, Italy.
- [11] Panetsos P , Ntotsios E., Liokos N.A, Papadimitriou C. (2009), “Identification of Dynamic Models of Metsovo Bridge Using Ambient Vibration Measurements.” 2nd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering COMPDYN 2009, Rhodes, Greece.

[12] Papadimitriou, C., Ntotsios, E. (2009), "Structural Model Updating using Vibration Measurements." 2nd International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering COMPDYN 2009, Rhodes, Greece.

[13] COMSOL AB (2005), "Comsol Multyphysics user's guide" [www.comsol.com/].