ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΓΕΦΥΡΩΝ ΜΕΤΣΟΒΟΥ ΚΑΙ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙΟΥ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

υπό

ΒΑΣΙΛΕΙΟ ΝΕΚΤΑΡΙΟ ΚΕΛΑΝΤΩΝΗ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Π.Θ. (2010)

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

2010

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ Παπαδημητρίου Κωνσταντίνος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 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

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Ευχαριστίες

Θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Παπαδημητρίου. Επίσης να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα του Εργαστηρίου Δυναμικής Συστημάτων Χριστίνα Παπαδιώτη για τη στήριξή της και την άριστη συνεργασία κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου.

Ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Π. Τσόπελα για το υλικό τις γνώσεις και την πολύ καλή συνεργασία.

Τέλος να ευχαριστήσω τον καλό μου φίλο και συμφοιτητή Νικόλαο Άγγελο Λιόκο. Η καθοδήγησή του στο σχεδιαστικό πρόγραμμα και το υλικό της εργασίας του πάνω στον αριστερό κλάδο της γέφυρας του Μετσόβου (σχεδιασμός, εξαγωγή ιδιοσυχνοτήτων-ιδιομορφών σε Comsol Multiphisics) ήταν παραπάνω από πολύτιμη.

Βασίλης Νεκτάριος Κελαντώνης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή 5

Κεφάλαιο 2 : Σχεδιασμός του δεξιού κλάδου της γέφυρας του Μετσόβου 7

2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά 7
2.2 Βάθρο Μ1δ 10
2.3 Βάθρο Μ2δ 15
2.4 Βάθρο Μ3δ.....22
2.5 Κατάστρωμα.....25
2.6 Ακρόβαθρο Α0.....30
2.7 Ακρόβαθρο Α4.....32

Κεφάλαιο 3 : Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και δυναμική ανάλυση της γέφυρας του Μετσόβου στο COMSOL.....34

Κεφάλαιο 4 : Σχεδιασμός του δεξιού κλάδου (Τ9) της γέφυρας του Περιστερίου....54

4.1 Γενικά χαρακτηριστικά 54
4.2 Ακρόβαθρο Α1δ 56
4.3 Βάθρο ΜΑδ.....58
4.4 Βάθρο Μ1δ 61
4.5 Βάθρο Μ2δ 63
4.6 Ακρόβαθρο Α2δ 66
4.7 Κατάστρωμα 68
4.8 Εφέδρανα 71

Κεφάλαιο 5 : Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και δυναμική ανάλυση της γέφυρας Τ9 στο COMSOL.....76

5.1 Εφέδρανα τύπου 4 – μοντελοποίηση με ελατήρια 77
5.1.1 Εφέδρανα με δυνάμεις ελατηρίων 82
5.1.2 Εφέδρανα με truss elements 83
5.2 Εφέδρανα σφαιρικής έδρασης-ολισθαίνοντα 84
5.3 Τμήμα Α1_ΜΑ – συγκριτικό μεταξύ μεθόδου δυνάμεων και trusses.....86
5.4 Κλάδος Τ9 – Εύρεση ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών.....89

Κεφάλαιο 6 : Συμπεράσματα 106

Βιβλιογραφία 108

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Περίληψη

Το θέμα της διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση (σχεδιασμός) και η μελέτη συμπεριφοράς των κατασκευών. Πιο συγκεκριμένα οι κατασκευές που μελετήθηκαν είναι ο δεξιός κλάδος της γέφυρας του Μετσόβου και η γέφυρα Τ9 (δεξιός κλάδος της γέφυρας Περιστερίου), που αποτελούν μέρη της Εγνατίας οδού. Η γενικότερη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε έχει εφαρμογή σε όλες τις κατασκευές. Η μελέτη των δύο κατασκευών ξεκινάει από λεπτομερή κατασκευαστικά σχέδια στο χαρτί, ακολουθεί η αποτύπωση των σχεδίων αυτών σε τρισδιάστατα μοντέλα μέσω ειδικού σχεδιαστικού προγράμματος και τέλος μελετώνται μέσω προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και συγκρίνονται τα αποτελέσματα για διαφορετικές συνθήκες επίλυσης.

Η αποτύπωση των σχεδίων σε μοντέλα έγινε χρησιμοποιώντας σχεδιαστικό πρόγραμμα ενώ για την επιβολή των συνοριακών συνθηκών (πάκτωση, άρθρωση, κλπ), την επιλογή των ιδιοτήτων των υλικών (πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας, κλπ) και την διακριτοποίηση των μοντέλων σε πεπερασμένα στοιχεία για την διεξαγωγή της δυναμικής ανάλυσης και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων COMSOL Multiphysics.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η δυναμική μελέτη των παραπάνω μοντέλων αλλά και η παρουσίαση της γενικότερης μεθοδολογίας της δυναμικής ανάλυσης και μελέτης αντίστοιχων κατασκευών. Η δυναμική ανάλυση και μελέτη αναφέρεται στην εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών της εκάστοτε κατασκευής. Ο βαθμός ποιότητας των μοντέλων που αναπτύχθηκαν εξακριβώθηκε συγκρίνοντας δυναμικά ιδιομορφικά χαρακτηριστικά των μοντέλων με διαθέσιμα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά τα οποία προέκυψαν από μετρήσεις στις κατασκευές.

Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων των δύο κατασκευών μαζί με την δυναμική τους μελέτη που πραγματοποιείται στην παρούσα διπλωματική θα χρησιμεύσει στο μέλλον για την αναθεώρηση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και την διάγνωση δομικής ακεραιότητας των κατασκευών με βάση μετρήσεις ταλάντωσης που προέρχονται από σύστημα αισθητήρων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα παρακάτω κεφάλαια ακολουθεί εκτενέστερη ανάλυση του τρόπου κατασκευής και μελέτης ως προς τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά των μοντέλων του δεξιού κλάδου της γέφυρας του Μετσόβου και της γέφυρας Τ9. Πιο συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση του δεξιού κλάδου της γέφυρας του Μετσόβου με τις λεπτομέρειες της και εκτενής περιγραφή της δημιουργίας του μοντέλου της από επιμέρους τμήματα. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το τρισδιάστατο (3D) μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της παραπάνω γέφυρας, η δυναμική ανάλυση και η εξαγωγή ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών. Στο κεφάλαιο 4 και 5 γίνεται η ίδια ακριβώς παρουσίαση όπως στα κεφάλαια 2 και 3 αντίστοιχα, αλλά εδώ για τον δεξιό κλάδο της γέφυρας Τ9. Τέλος στο κεφάλαιο 6 εξάγονται τα συμπεράσματα που αποκομίστηκαν από την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Για το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων επιλέχθηκε το COMSOL Multiphysics ανάμεσα στα Abaqus, Femtools, λόγω του ότι μας δίνεται η δυνατότητα με τη χρήση του να διεξαχθεί μελλοντικά η αναθεώρηση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων με μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί στο εργαστήριο Δυναμικής Συστημάτων του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Κεφάλαιο 2

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΕΞΙΟΥ ΚΛΑΔΟΥ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΣΟΒΟΥ

2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Η γέφυρα του Μετσόβου κατασκευάστηκε στο τμήμα 3.2 (Σήραγγα Ανθοχωρίου – σήραγγα Ανηλίου) της Εγνατίας Οδού και γεφυρώνει την χαράδρα του ποταμού Μετσοβίτικου. Είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα με την μέθοδο της συμμετρικής προβολοδόμησης. Είναι επίσης η υψηλότερη χαραδρογέφυρα της Εγνατίας Οδού και αποτελείται από δύο κλάδους. Τον δεξιό και τον αριστερό. Θα πρέπει να αναφέρουμε σε αυτό το σημείο πως η μελέτη που ακολουθεί έγινε για τον δεξιό κλάδο. Κάθε κλάδος αποτελείται από δύο ακρόβαθρα στις άκρες (Α0 και Α4), τρία βάθρα (Μ1, Μ2 και Μ3) και το κατάστρωμα όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.1 και 2.2. Συγκεκριμένα για τον δεξιό κλάδο, το κατάστρωμα έχει συνολικό μήκος 536,99 μέτρα, σταθερή διαμήκη κλίση 2,6% και έχει μέγιστο ύψος από την κορυφή του καταστρώματος ως το έδαφος 112,25 μέτρα στο βάθρο Μ2δ. Για τον καλύτερο προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της γέφυρας, αναφέρονται ενδεικτικά κάποιες από τις λεπτομέρειες των τμημάτων της, οι οποίες αναλύονται και επιμέρους παρακάτω.

Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το κατάστρωμα έρχεται σε επαφή με τα ακρόβαθρα δεξιά (Α4δ) και αριστερά (Α0δ) με εφέδρανα εγκιβωτισμένου ελαστικού, κάτι που συμβαίνει επίσης και με το βάθρο Μ1δ. Ενώ τα Μ2δ και Μ3δ συνδέονται μονολιθικά με τον φορέα της γέφυρας. Επίσης το κατάστρωμα πέραν της διαμήκους κλίσης, έχει και εγκάρσια επίκλιση 2.5%. Αποτελείται από 134 τμήματα σε όλο το μήκος των 536,99 μέτρων, που κατασκευάστηκαν με μέγιστο βήμα 5 μέτρων και περιέχουν συνολικά 14 επαναλαμβανόμενες διατομές. Από αυτές τις διατομές η μία είναι σταθερή, ενώ όλες οι υπόλοιπες είναι μεταβλητές ως προς το ύψος και το πάχος τους. Ο τρόπος μεταβολής τους φαίνεται στο σχέδιο των Διατομών Καταστρώματος της Εγνατίας οδού το οποίο παρουσιάζεται στην Παράγραφο 2.5 .

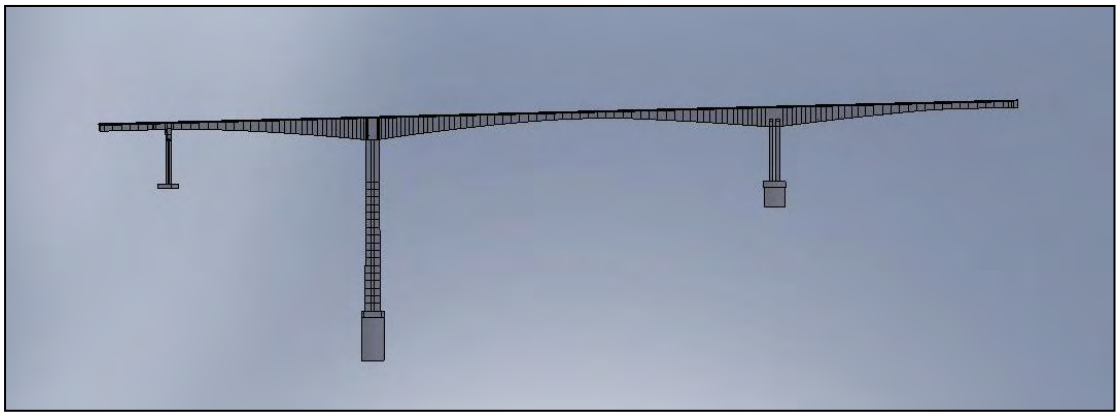
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Το βάθρο Μ2δ, το οποίο είναι το υψηλότερο με ύψος 99.15 μέτρα, έχει μεταβλητή διατομή και στην κατά μήκος και στην εγκάρσια όψη από την βάση ως τα 74.80 μέτρα ύψος ενώ παραμένει σταθερή από εκεί και πάνω (από τα 74.80 ως τα 99.15 μέτρα). Όσων αφορά την κατά μήκος όψη, η εξωτερική της επιφάνεια μεταβάλλεται ακολουθώντας κύκλο με ακτίνα καμπυλότητας 4303,877 μέτρων από την βάση μέχρι το ύψος των 74,80 μέτρων, ενώ η εσωτερική της επιφάνεια παραμένει σταθερή. Στην εγκάρσια όψη, η εξωτερική επιφάνεια ακολουθεί και πάλι κύκλο από την βάση ως τα 74.80 μέτρα ύψος, όμως με ακτίνα καμπυλότητας 1398,761 μέτρα. Τέλος, η εσωτερική επιφάνεια της εγκάρσιας τομής ακολουθεί κύκλο με ακτίνα 974.751 μέτρα από την βάση μέχρι τα 48.40 μέτρα ύψος.

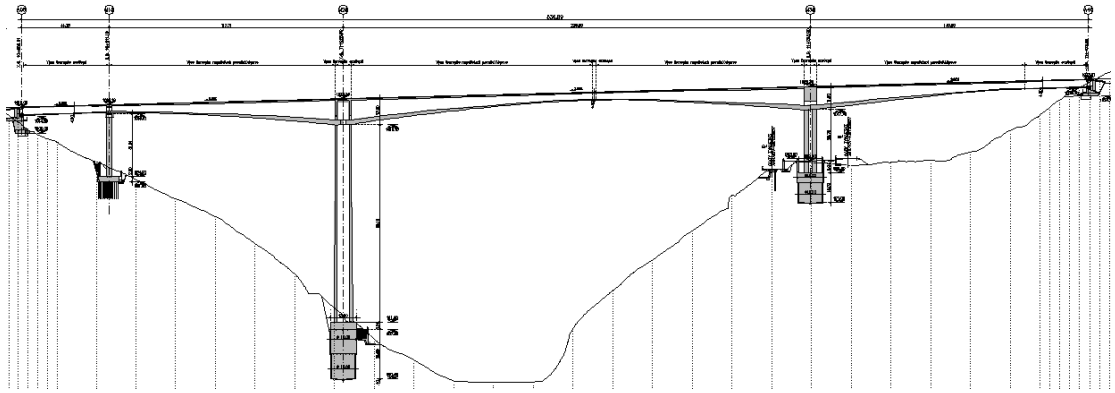
Όσων αφορά τα βάθρα Μ1δ και Μ3δ έχουν σχετικά απλή γεωμετρία (οκταγωνική και ορθογωνική αντίστοιχα) αλλά υπάρχουν πάρα πολλές λεπτομέρειες σε όλα τα τμήματα της γέφυρας, μερικές από τις οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω, οι οποίες αναδεικνύουν και την δυσκολία της μετάβασης από τα δυσδιάστατα σχέδια που υπάρχουν σε χαρτί, στην τελική δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου για την περαιτέρω ανάλυσή του.

Στη συνέχεια ακολουθεί ανάλυση όλων των επιμέρους τμημάτων από τα οποία αποτελείται η γέφυρα του Μετσόβου. Δηλαδή το βάθρο Μ1δ, το βάθρο Μ2δ, το βάθρο Μ3δ, το κατάστρωμα και τα ακρόβαθρα Α0 και Α4.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 2.1: Δεξιά όψη του δεξιού κλάδου

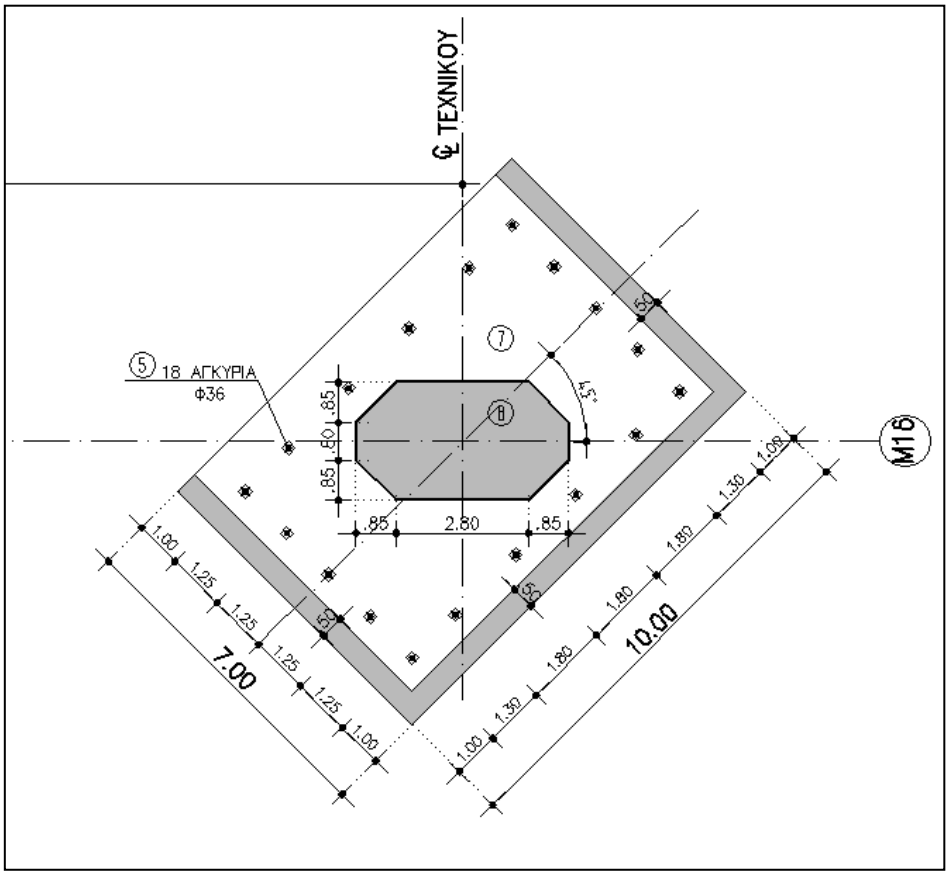


Σχήμα 2.2 : Κατά μήκος τομή του δεξιού κλάδου (πηγή Εγνατία Οδός)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

2.2 Βάθρο Μ1δ

Το βάθρο Μ1 βρίσκεται σε απόσταση 44,28 μέτρων από το ακρόβαθρο Α0δ (απόσταση μεταξύ αξόνων) και έχει ύψος 34,1 μέτρα. Το συνολικό του ύψος απαρτίζεται από την βάση του, ύψους 2,5 μέτρων, τον κεντρικό κορμό του βάθρου, ύψους 35 μέτρων και τέλος από την κεφαλή του βάθρου με ύψος 6,6 μέτρα. Η διατομή της βάσης είναι ορθογωνική (8 x 10 μέτρα) ενώ ο κορμός του έχει σταθερή οκταγωνική διατομή με διαστάσεις που φαίνονται στην κάτοψη του βάθρου στο Σχήμα 2.3.



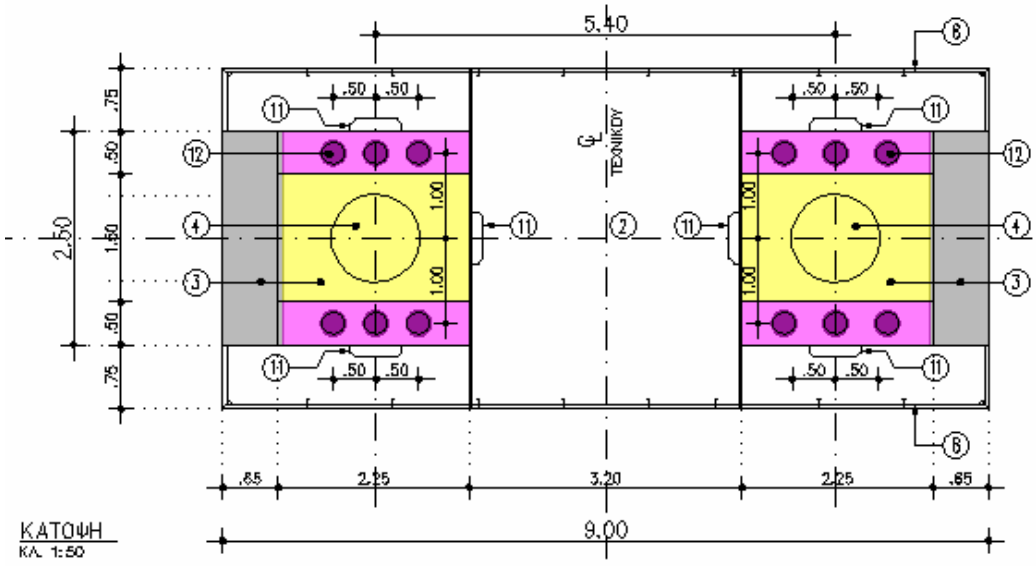
Σχήμα 2.3: Κάτοψη θεμελίωσης μεσόβαθρου Μ1δ (πηγή: Εγνατία Οδός)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Το ιδιαίτερο αυτού του βάθρου είναι ότι η επαφή του με το κατάστρωμα γίνεται μέσω εφεδράνων ολίσθησης κάτι που συμβαίνει και με τα δύο ακρόβαθρα. Τα εφέδρανα που υπάρχουν στην κεφαλή του βάθρου επιτρέπουν την κίνηση του καταστρώματος μόνο εγκάρσια ως προς την κεφαλή.

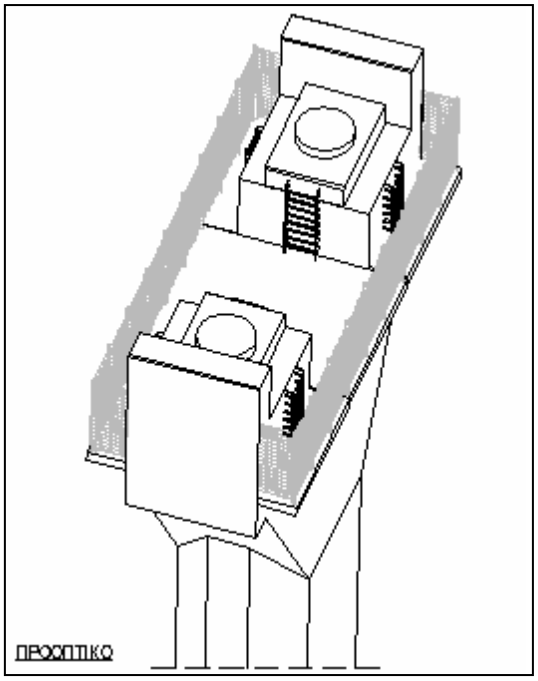
Ακολουθούν σχέδια στα οποία φαίνεται πλήρως η γεωμετρία του βάθρου, της κεφαλής (στην οποία στηρίζεται το κατάστρωμα μέσω των εφεδράνων) καθώς επίσης και των εφεδράνων.

Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 2.4 βλέπουμε την κάτοψη της κεφαλής από όπου φαίνεται και η ακριβής γεωμετρία των εφεδράνων που προαναφέρθηκαν και παρουσιάζονται με τον δείκτη 4. Ακολουθεί το Σχήμα 2.5 στο οποίο φαίνεται το προοπτικό της κεφαλής ώστε να κατανοήσουμε και να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε την γενικότερη γεωμετρία της. Τέλος στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται μια εγκάρσια τομή της κεφαλής όπου φαίνονται οι ακριβείς διαστάσεις καθώς επίσης και η γεωμετρία του φορέα του καταστρώματος στην Μ1.

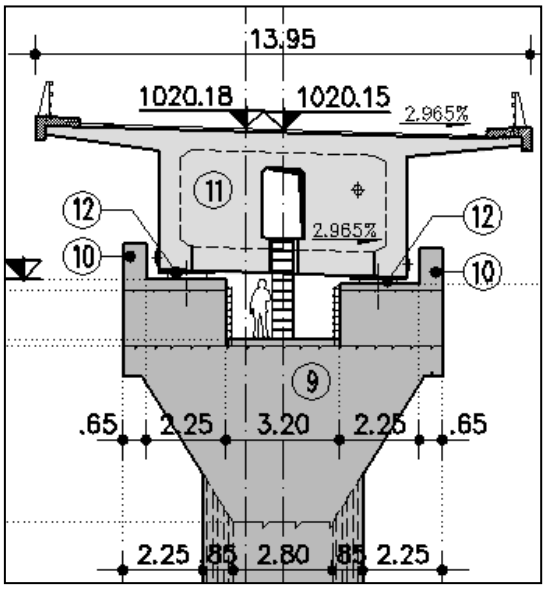


Σχήμα 2.4: Κάτοψη κεφαλής μεσόβαθρου Μ1δ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

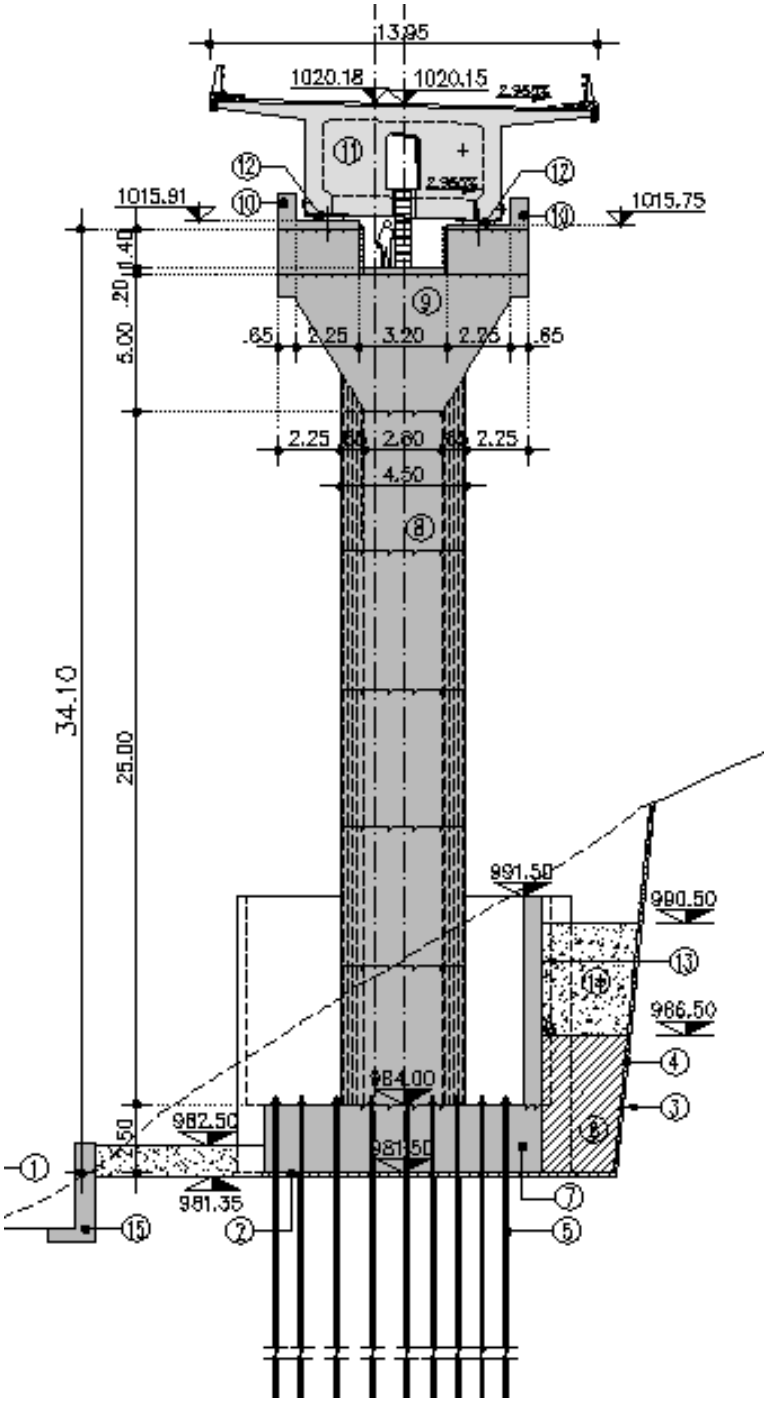


Σχήμα 2.5



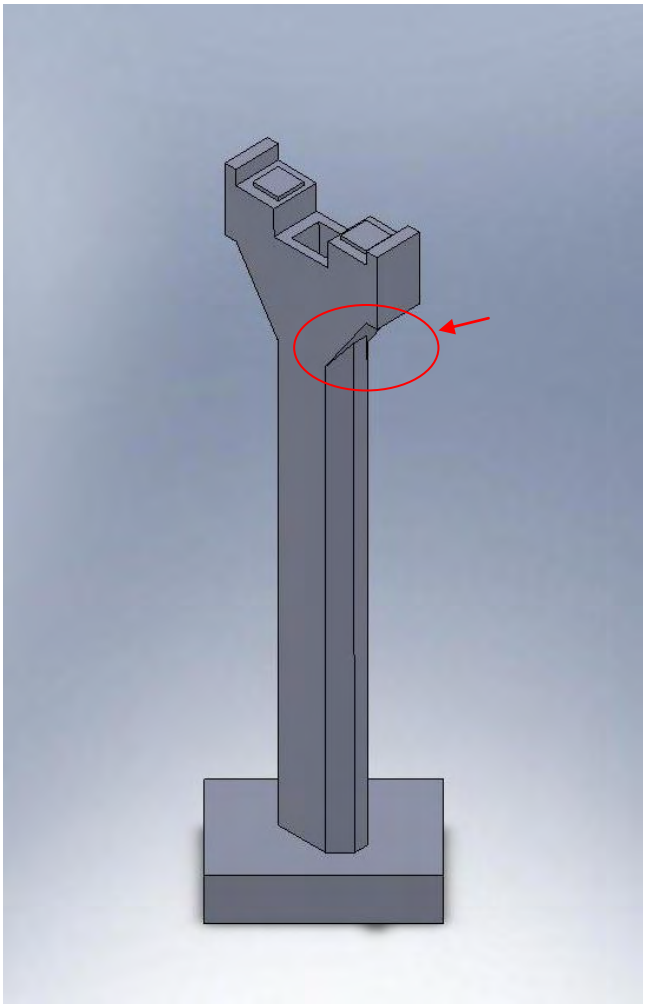
Σχήμα 2.6: Εγκάρσια τομή της κεφαλής του βάθρου Μ1δ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 2.7: Εγκάρσια τομή Μ1δ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 2.8: Τρισδιάστατη όψη του μοντέλου του μεσόβαθρου Μ1δ στο σχεδιαστικό πρόγραμμα

Η δημιουργία του μοντέλου από τα δισδιάστατα σχέδια που είχαμε από την εταιρεία Εγνατία οδός έχει ως εξής: Δημιουργήθηκε αρχικά ένα κομμάτι (part1) την βάση στραμμένη 45^{o} κατά τον διαμήκη άξονα, κατόπιν (part2) τον κεντρικό κορμό οκταγωνικής διατομής, έπειτα δημιουργήθηκε η κεφαλή του μεσόβαθρου σαν ξεχωριστό κομμάτι (part3), μετά ενώθηκαν τα τρία κομμάτια μεταξύ τους χρησιμοποιώντας την εντολή *mate* του σχεδιαστικού προγράμματος, δημιουργώντας ένα *assembly*. Όπως φαίνεται στη λεπτομέρεια του σχήματος 2.8 με την εντολή extrude boss ->up to next, δημιουργήθηκε το «σβήσιμο» του οκταέδρου στην τετραεδρική κεφαλή.

Τέλος επάνω στο τελικό κομμάτι που έχουμε από την ένωση των τριών επιμέρους κομματιών, προσθέτουμε τα εφέδρανα που θα ενωθούν με το κατάστρωμα και θα αποτελέσουν τα σημεία επαφής του καταστρώματος με το βάθρο. Στα Σχήματα 2.7 και 2.8 φαίνονται διαστάσεις και η τρισδιάστατη όψη του βάθρου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

2.3 ΒάθροΜ2δ

Το βάθρο Μ2δ βρίσκεται σε απόσταση 117,71 μέτρων από το βάθρο Μ1δ (απόσταση αξόνων), έχει ύψος 99,15 μέτρων από το έδαφος χωρίς τον φορέα ύψους 13 μέτρων και είναι το υψηλότερο δομικό στοιχείο της χαραδρογέφυρας του Μετσόβου.

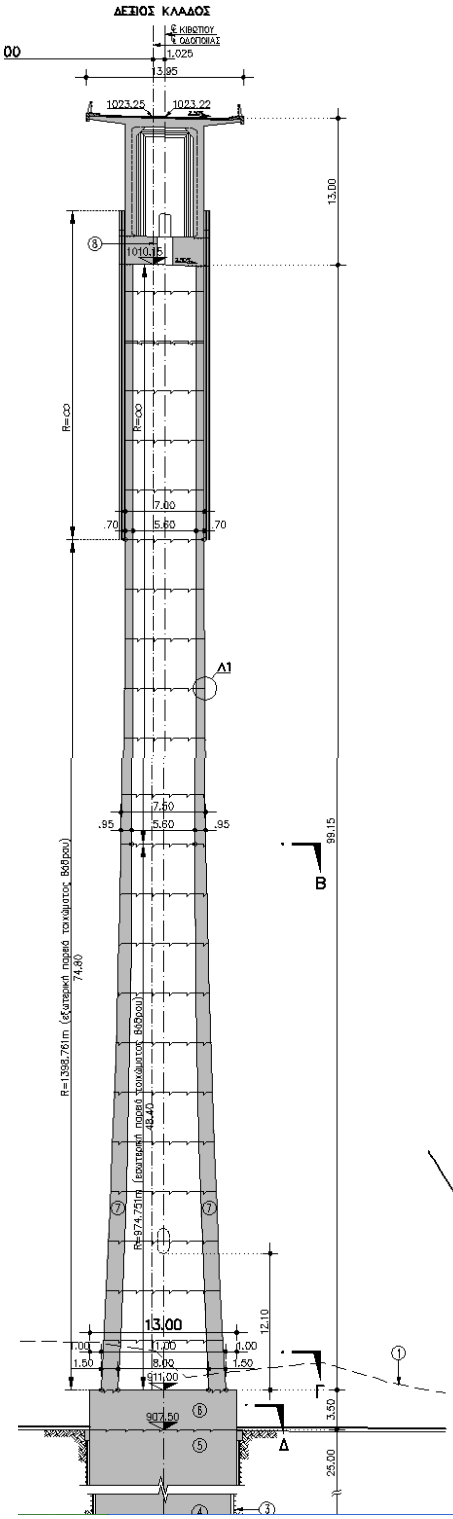
Αποτελεί το πιο σύνθετο από τα τρία βάθρα εξαιτίας της μεταβλητή διατομής του. Το πάχους του κατά την διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση μεταβάλλεται ανάλογα με το ύψος από το έδαφος.

Η μεταβολή του πάχους οφείλεται στην μεταβολή της εσωτερικής και της εξωτερικής επιφάνειας της εγκάρσιας τομής, οι οποίες ακολουθούν διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας, καθώς επίσης και στην μεταβολή μόνο της εξωτερικής επιφάνειας της κατά μήκος τομής. Η εξωτερική επιφάνεια ακολουθεί και αυτή κύκλο με ακτίνες και τόξα όπως αναφέρθηκαν με λεπτομέρεια παραπάνω στην Παράγραφο 2.1.

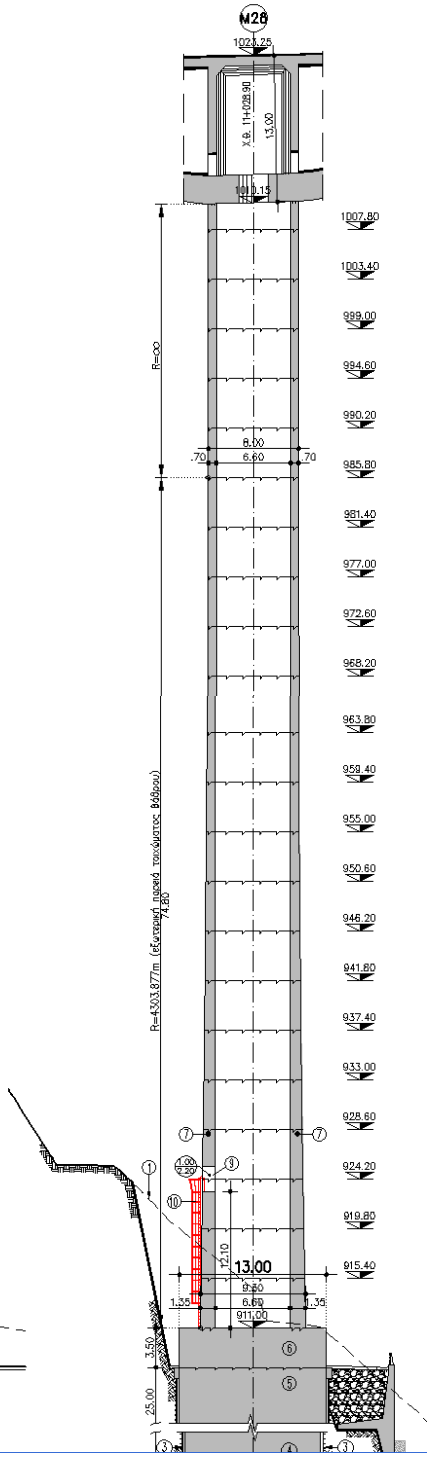
Για την διευκόλυνση της κατανόησης της γεωμετρίας του βάθρου Μ2, οι παραπάνω λεπτομέρειες φαίνονται στα Σχήματα 2.9 και 2.10.

Στο Σχήμα 2.9, βλέπουμε ουσιαστικά αυτά που αναφέρθηκαν στα γενικά τεχνικά χαρακτηριστικά για το βάθρο Μ2. Δηλαδή παρατηρούμε πως στην κατά μήκος τομή μεταβάλλεται μόνο η εξωτερική επιφάνεια ενώ η εσωτερική παραμένει σταθερή με μήκος 6.60 μέτρα. Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται φαίνεται και στις λεπτομέρειες αριστερά της τομής. Δηλαδή από την βάση ως και ύψος 74.80 μέτρα, η εξωτερική επιφάνεια της κατά μήκος τομής περιγράφει κύκλο ακτίνας R= 4303.877 μέτρων, με αποτέλεσμα το πάχος της να μεταβάλλεται από 1.35 ως 0.7 μέτρα. Τέλος παρατηρούμε πως από το ύψος των 74.80 μέτρων μέχρι και το σημείο επαφής με το κατάστρωμα, η διατομή της είναι σταθερή.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 2.10 : Εγκάρσια τομή Μ1δ

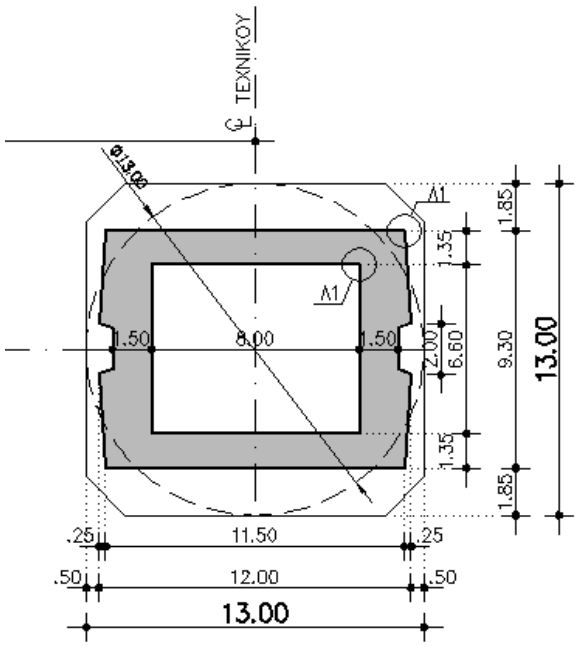


Σχήμα 2.9: Κατά μήκος τομή Μ1

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

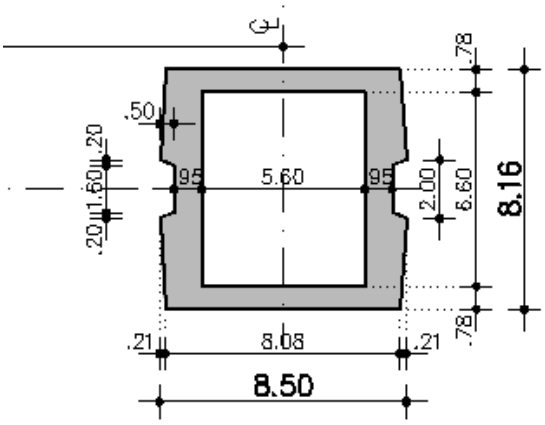
Στο σχήμα 2.10, η εξωτερική επιφάνεια μεταβάλλεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στην κατά μήκος τομή. Επίσης παρατηρούμε πως πάνω από τα 74.80 μέτρα ύψος, παραμένει σταθερή η διατομή του βάθρου. Στην εγκάρσια τομή όμως βλέπουμε πως σε αντίθεση με την κατά μήκος, η εσωτερική επιφάνεια δεν παραμένει σταθερή, αλλά μεταβάλλεται από την βάση μέχρι και το ύψος των 48.40 μέτρων. Ο τρόπος μεταβολής της είναι παρόμοιος με αυτόν της εξωτερικής. Εδώ όμως η εξωτερική επιφάνεια περιγράφει κύκλο με ακτίνα R= 974.751 μέτρα, όπως φαίνεται και στις λεπτομέρειες αριστερά της τομής.

Συνεχίζοντας με την γεωμετρία του βάθρου Μ2δ θα πρέπει να αναφερθεί ότι στα σχέδια της εταιρείας υπήρχαν κατόψεις μόνο σε τρία σημεία του βάθρου. Μια στη βάση (Σχήμα 2.11), μια στο ύψος των 48,4 μέτρων (Σχήμα 2.12) και μία τρίτη σε ύψος 74,8 μέτρων (Σχήμα 2.13), πάνω από το οποίο η διατομή του βάθρου Μ2 παραμένει σταθερή όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.9 και 2.10 .

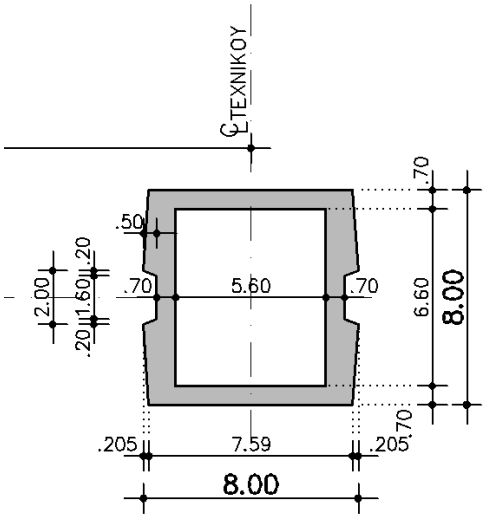


Σχήμα 2.11: Διατομή στη βάση της Μ2δ (τομή Γ-Γ σχήματος 2.10)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 2.12: Διατομή σε ύψος 48.40 μέτρων από τη βάση Μ2δ (τομή Β-Β σχήματος 2.10)



Σχήμα 2.13: Διατομή σε ύψος 74.80 μέτρων από τη βάση Μ2δ (τομή Α-Α σχήματος 2.10)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

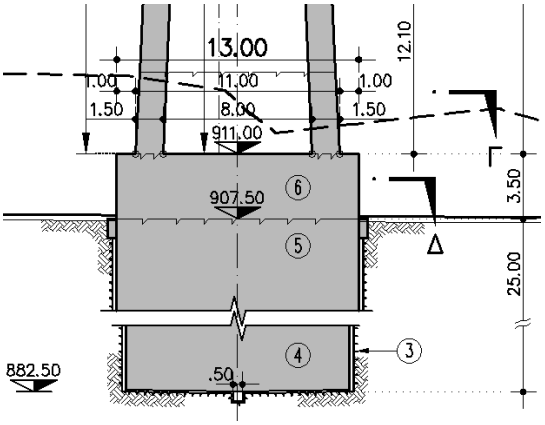
Η κατασκευή του βάθρου έχει γίνει με βήμα τεσσάρων μέτρων. Άρα θα έπρεπε για την καλύτερη σύγκλιση του μοντέλου με την πραγματικότητα να βρεθεί ο τρόπος με τον οποίο περνάμε από την μια διατομή στην επόμενη από αυτές που παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.11, 2.12, και 2.13 . Οπότε ο σχεδιασμός του τρισδιάστατου μοντέλου, λόγω των δύο παραπάνω γεγονότων έγινε με τον υπολογισμό όλων των ενδιάμεσων διατομών από την βάση μέχρι και το σημείο όπου αρχίζει η σταθερή διατομή.

Ο υπολογισμός αυτών των ενδιάμεσων διατομών οι οποίες δεν υπήρχαν στα σχέδια της Εγνατίας οδού έγινε με χρήση ενός διπλού κώδικα σε Matlab, ένα πρόγραμμα δηλαδή με δύο σκέλη. Ένα για την εγκάρσια και ένα για την κατά μήκος μεταβολή. Σε κάθε βρόγχο επανάληψης μεταβαλλόταν το ύψος και υπολογιζόταν και εξαγόταν η διαφορά του μήκους του εσωτερικού σημείου του πάχους (μετρημένο από το κέντρο του κύκλου) από την ακτίνα του εκάστοτε κύκλου. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφέρουμε ότι λόγω της ομοιότητας του δεξιού με τον αριστερό κλάδο της γέφυρας αυτής, η παραπάνω μεθοδολογία είχε εφαρμοστεί πρώτα στον αριστερό κλάδο.

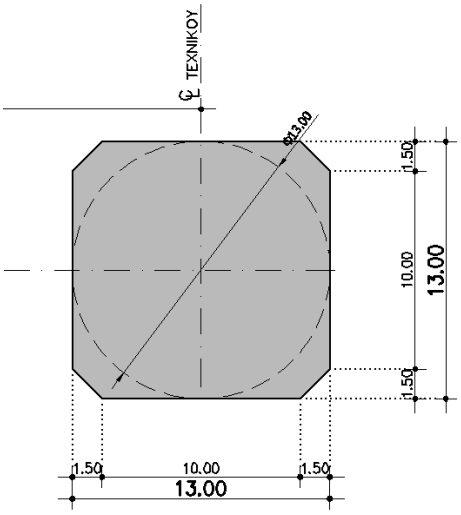
Όσων αφορά την μετατροπή των σχεδίων σε μοντέλο έγινε χρησιμοποιώντας την εντολή Lofted Boss του σχεδιαστικού προγράμματος για την δημιουργία των επιμέρους τμημάτων του βάθρου (ανάμεσα σε κάθε διατομή) και έπειτα την εντολή Mate για την ένωση αυτών των επιμέρους τμημάτων. Για το τμήμα σταθερής διατομής του βάθρου Μ2 χρησιμοποιήθηκε η εντολή Extruded Boss η οποία μετατρέπει μια δισδιάστατη διατομή (σχέδιο) σε τρισδιάστατο, δίνοντας του απλά το μήκος της τρίτης διάστασης.

Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε και την γεωμετρία καθώς επίσης και την μορφή της θεμελίωσης του βάθρου Μ2, η οποία φαίνεται στα Σχήματα 2.14 και 2.15. Το Σχήμα 2.15 αποτελεί κάτοψη του βάθρου Μ2 στην τομή Δ του Σχήματος 2.14. Ουσιαστικά η θεμελίωση του βάθρου Μ2 αποτελείται, ξεκινώντας από το έδαφος από έναν συμπαγή κύλινδρο διαμέτρου δεκατριών μέτρων (Φ13) και ύψους 25 μέτρων επάνω στον οποίο βρίσκεται μια οκταγωνική γεωμετρία με διαστάσεις που φαίνονται στο Σχήμα 2.15.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



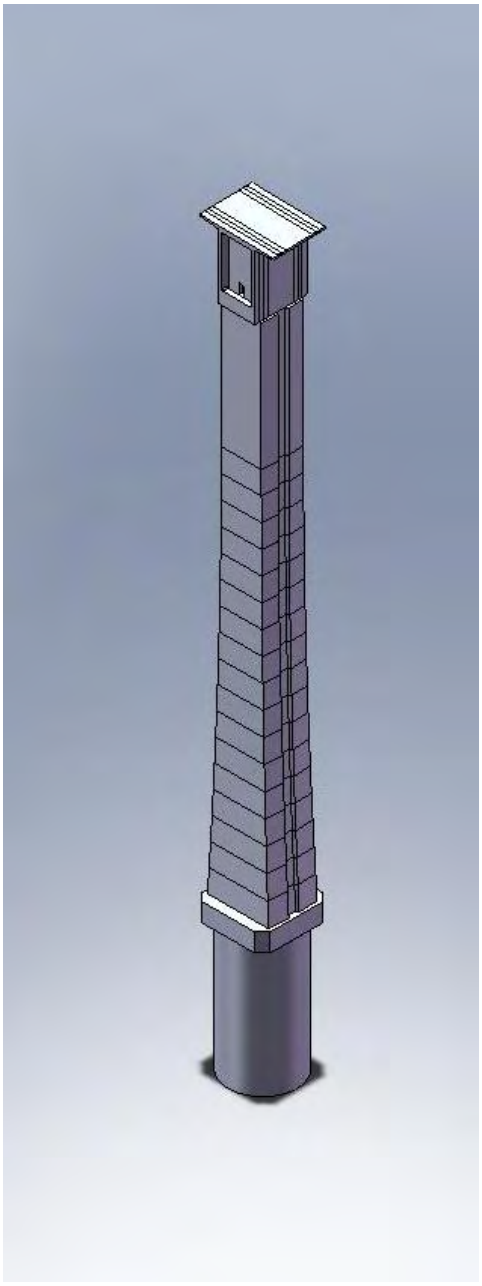
Σχήμα 14: Εγκάρσια τομή θεμελίωσης βάθρου Μ2δ



Σχήμα 15: Κάτοψη θεμελίωσης βάθρου Μ2δ

Στο Σχήμα 2.16 φαίνεται το βάθρο Μ2 με την θεμελίωση και τον φορέα του καταστρώματος στο βάθρο, όπως προέκυψε μετά της σχεδίασή του στο σχεδιαστικό πρόγραμμα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 2.16: Τρισδιάστατη όψη βάθρου και φορέα Μ2δ στο σχεδιαστικό πρόγραμμα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

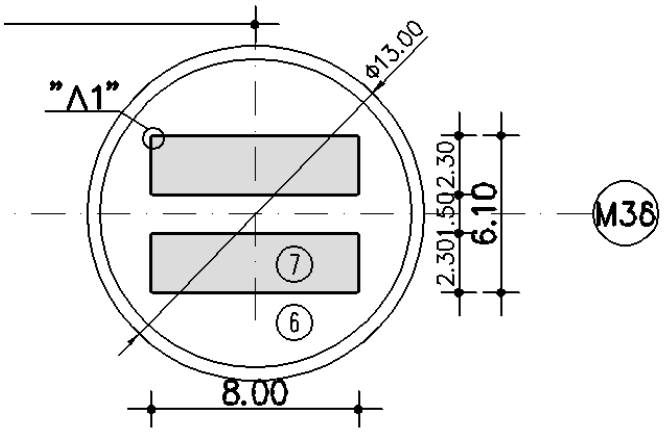
2.4 Βάθρο Μ3

Το τρίτο και τελευταίο βάθρο της γέφυρας είναι το Μ3. Βρίσκεται σε απόσταση 235 μέτρων από το βάθρο Μ2δ (απόσταση αξόνων) από αριστερά και 140 μέτρων από το ακρόβαθρο Α4 που είναι δεξιά. Έχει συνολικό ύψος 31.8 μέτρα, χωρίς τη βάση του.

Το συγκεκριμένο βάθρο θα μπορούσαμε να πούμε ότι αποτελείται ουσιαστικά από δύο επιμέρους παράλληλα βάθρα ορθογωνικής διατομής με διαστάσεις 2.3 μέτρα στην κατά μήκος όψη και 8 μέτρων στην εγκάρσια, όπως φαίνεται στην κάτοψη του βάθρου (Σχήμα 2.17). Τα δύο επιμέρους βάθρα έχουν απόσταση 1.5 μέτρο μεταξύ τους στην κατά μήκος, ενώ είναι παράλληλα στην εγκάρσια. Τέλος η βάση του έχει ύψος 15 μέτρων και αποτελείται από δύο κυλίνδρους με διάμετρο 12 και 13 μέτρων ο καθένας.

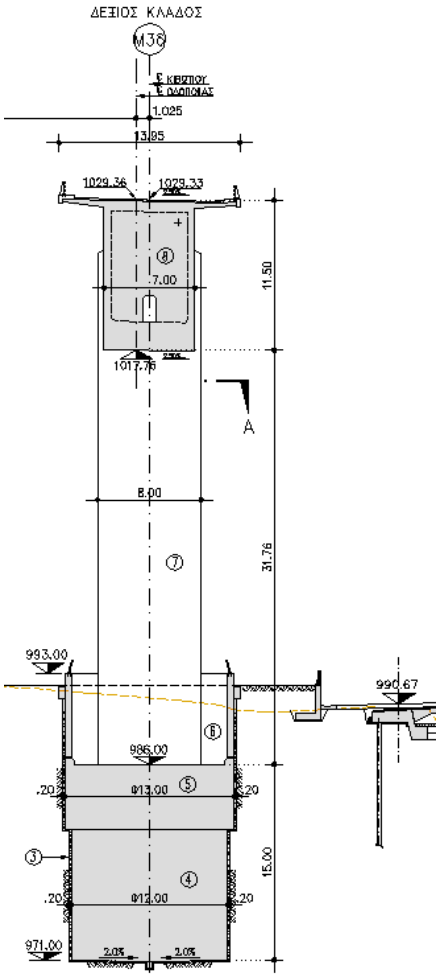
Πρώτα σχεδιάστηκε η κάτοψη του βάθρου, που είναι ορθογωνικής διατομής και η μετατροπή του σε τρισδιάστατο, έγινε χρησιμοποιώντας την εντολή Extruded Boss, με την οποία ουσιαστικά δόθηκε το ύψος του βάθρου.

Για τον πλήρη καθορισμό της γεωμετρίας του βάθρου Μ3 χρησιμοποιήθηκαν τα σχέδια της εγκάρσιας και της κατά μήκος τομής (Σχήματα 2.18 και 2.19), όπως επίσης και μιας τομής της εγκάρσιας όψης που ουσιαστικά αποτελεί κάτοψη του βάθρου (Σχήμα 2.17). Η τρισδιάστατη όψη του τελικού σχεδιαστικού προϊόντος του μοντέλου του βάθρου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.20.

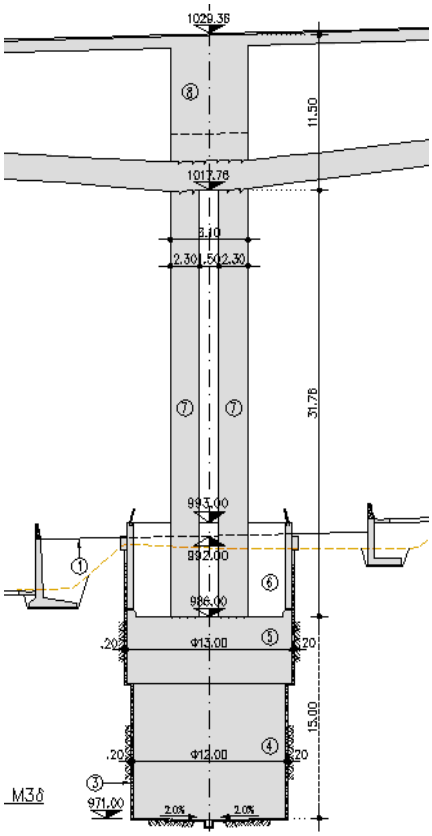


Σχήμα 2.17: Κάτοψη βάθρου Μ3δ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

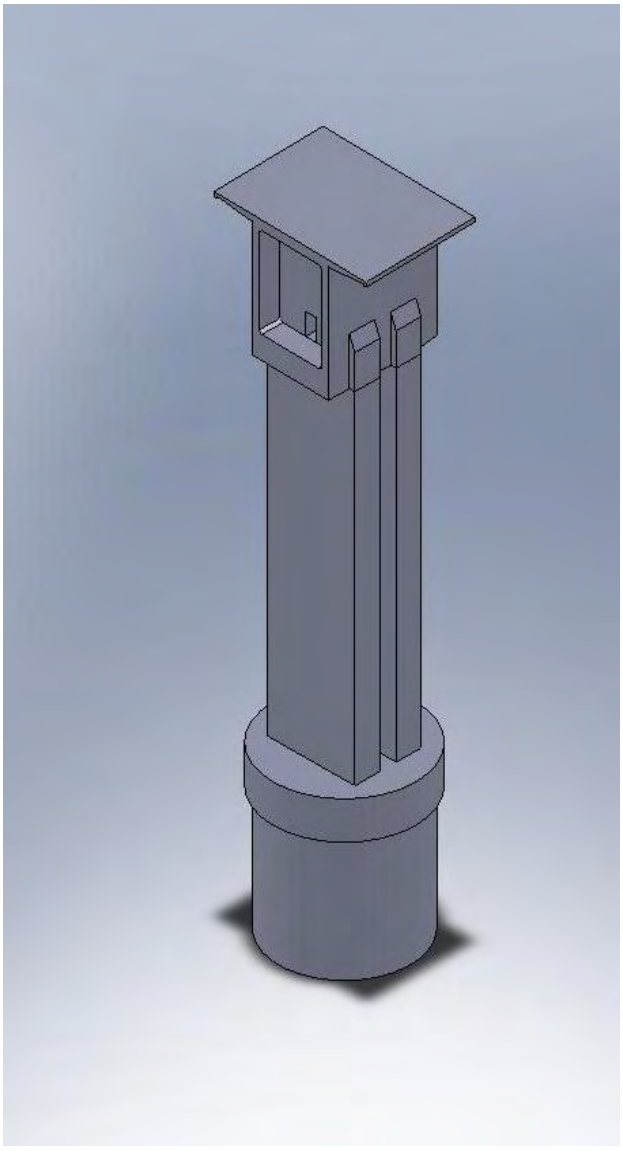


Σχήμα 2.18: Εγκάρσια τομή M3δ



Σχήμα 2.19: Κατά μήκος τομή M3δ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



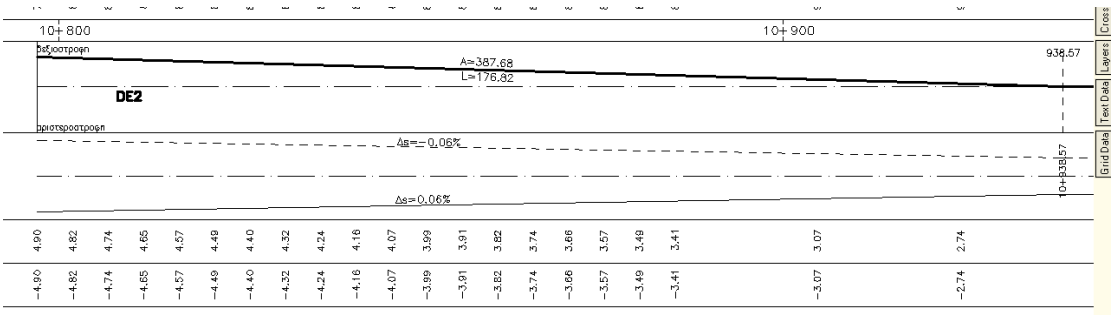
Σχήμα 2.20: Τρισδιάστατη όψη του βάθρου και φορέα Μ3δ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

2.5 Κατάστρωμα

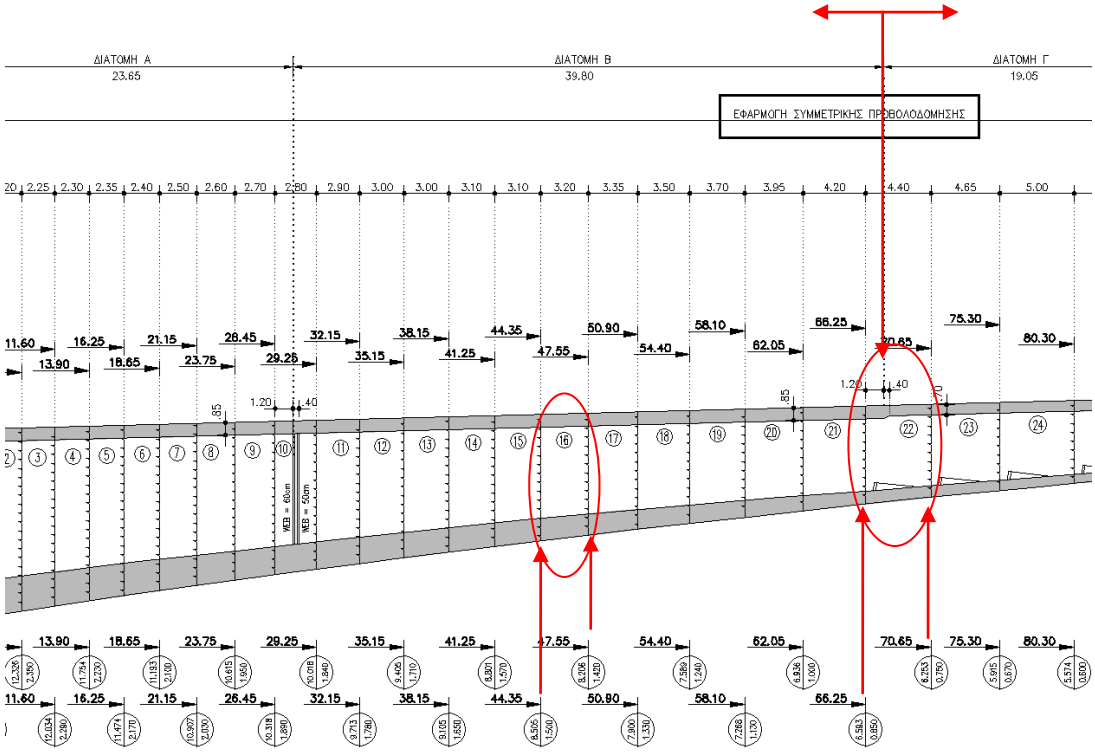
Όπως αναφέρθηκε και στα τεχνικά χαρακτηριστικά της γέφυρας συνολικά το κατάστρωμα έχει μήκος 536,99 μέτρα, σταθερό πλάτος 13,95 μέτρα και σταθερή ανηφορική κλίση από το ακρόβαθρο Α0δ προς το ακρόβαθρο Α4δ ίση με 2.6 %. Εκτός από την διαμήκη κλίση, σε όλο του το μήκος έχει και εγκάρσια επίκληση η οποία ξεκινάει με 3,71 % από το ακρόβαθρο Α0δ και μεταβάλλεται με ρυθμό -0,006 % μέχρι σε μήκος 71,66 μέτρων από το Α0δ. Έπειτα παραμένει σταθερή και ίση με 2,5 % μέχρι το τέλος του καταστρώματος (δηλαδή μέχρι και το ακρόβαθρο Α4δ). Ο υπολογισμός της επίκλισης στο μοντέλο υπολογίζεται σε μοίρες, βρίσκοντας την αντίστροφη εφαπτομένη της επίκλησης. Οι ρυθμοί της επίκλισης εξάχθηκαν από το διάγραμμα επικλίσεων που φαίνεται στο Σχήμα 2.21 το οποίο περιέχεται στο σχέδιο των μηκοτομών του αριστερού κλάδου.

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του καταστρώματος της γέφυρας του Μετσόβου της Εγνατίας οδού είναι ότι αποτελείται από 137 τμήματα (σπονδύλους) τα οποία κατασκευάστηκαν με μέγιστο βήμα μήκους 5 μέτρων. Αυτά τα τμήματα προέρχονται από την επανάληψη 14 διαφορετικών διατομών εκ των οποίων μόνο η μια είναι σταθερή, ενώ οι υπόλοιπες μεταβάλλονται ως προς το ύψος. Η μεταβολή αυτή προέρχεται από την μεταβολή του ύψους του πάνω και του κάτω πέλματος των φορέων, όπως επίσης και του πάχους τους με νόμους οι οποίοι ορίζονται στα σχέδια των προβόλων και των διατομών καταστρώματος. Κάποια τμήματα αυτών παρουσιάζονται παρακάτω. Το αποτέλεσμα της μεταβολής αυτής είναι ότι το κατάστρωμα έχει παραβολικά μεταβαλλόμενη κάτω επιφάνεια. Ταυτόχρονα όμως, η επάνω επιφάνεια παραμένει ευθύγραμμη με 2,6 % ανηφορική κλίση όπως φαίνεται και στα αρχικά Σχήματα 2.1 και 2.2 .

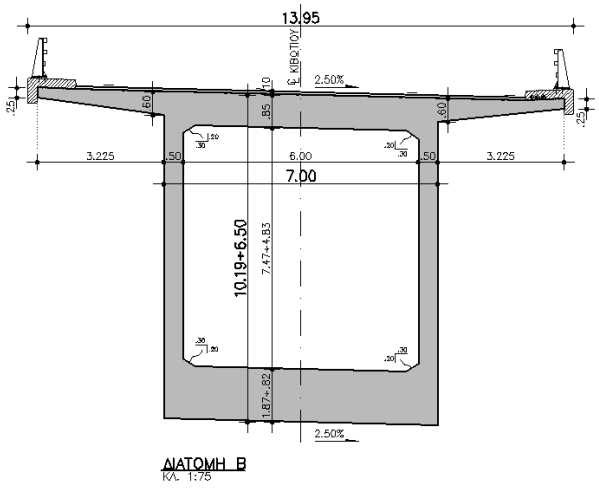


Σχήμα 2.21: Διάγραμμα επικλίσεων δεξιού κλάδου γέφυρας του Μετσόβου

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 2.22: Τμήμα σχεδίου προβόλων δεξιού κλάδου (κατά μήκος τομή, τμήμα Μ2δ-Μ3δ)



Σχήμα 2.23: Διατομή Β (εγκάρσια τομή)

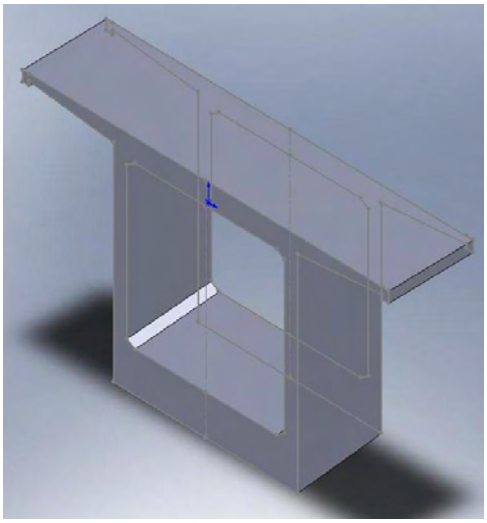
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Όσων αφορά την δημιουργία του μοντέλου του καταστρώματος, για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής ακρίβειας, έγινε κάτι αντίστοιχο με αυτό που συνέβη για την κατασκευή του βάθρου Μ2. Δηλαδή αρχικά σχεδιάστηκαν όλες οι διατομές που χρειαστήκαμε για να δημιουργήσουμε 137 κομμάτια (parts) σε παράλληλα επίπεδα, λαμβάνοντας υπ' όψιν την εκάστοτε εγκάρσια επίκλιση και την διαμήκη ανηφορική κλίση 2,6 %. Στην πράξη οι διατομές είχαν απόσταση ίση με αυτή που ορίζεται στα σχέδια των προβόλων (όπως στο Σχήμα 2.22), αλλά ταυτόχρονα είχαν και υψομετρική διαφορά που ορίζει η διαμήκης κλίση 2,6 %.

Παρακάτω θα ακολουθήσουν δύο παραδείγματα σχεδίασης στο σχεδιαστικό πρόγραμμα. Το πρώτο είναι η σχεδίαση της ποιο απλής γεωμετρίας ενός κομματιού (part), ενώ το δεύτερο ενός πιο σύνθετου κομματιού.

Πρώτα για την σχεδίαση ενός part του καταστρώματος με την ποιο απλή γεωμετρία, χρειαζόμαστε 2 διατομές. Για παράδειγμα, στο κομμάτι του Σχήματος 2.22 κυκλωμένο με τον αριθμό 16 :

- Ορίζουμε δύο παράλληλα επίπεδα απόστασης 3,2 μέτρα.
- Σχεδιάσουμε τις διατομές τύπου «Διατομή Β», σύμφωνα με τα σχέδια των διατομών που μας δόθηκαν (Σχήμα 2.23) και προσαρμόζουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάθε διατομής σύμφωνα με το σχέδιο των προβόλων (Σχήμα 2.22, συνολικό ύψος / ύψος κάτω πέλματος κάθε διατομής).
- Δίνουμε τα χαρακτηριστικά εγκάρσιας επίκλισης της κάθε διατομής σύμφωνα με το διάγραμμα επικλίσεων.
- Δίνουμε την σχετική υψομετρική διαφορά για να επιτύχουμε διαμήκη κλίση 2,6% .
- Με την εντολή Lofted Boss, ενώνουμε με συμπαγές υλικό τις διατομές μας.
- Με την εντολή Lofted Cut, αφαιρούμε υλικό στο εσωτερικό του part για να έχουμε το αποτέλεσμα του Σχήματος 2.24

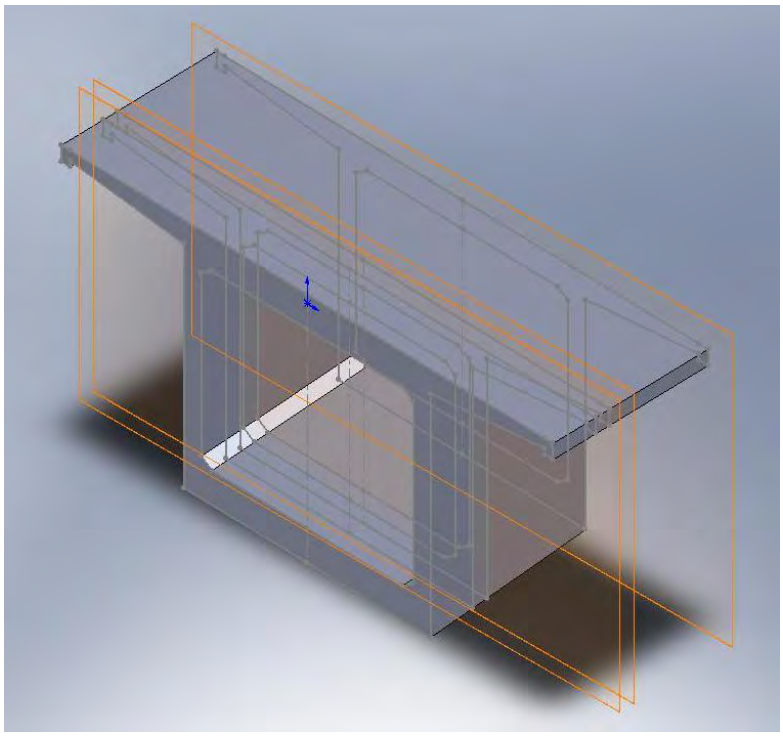


Σχήμα 2.24

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Κατόπιν, για την σχεδίαση ενός part του καταστρώματος με λίγο ποιο σύνθετη γεωμετρία, θα δούμε ότι χρειαζόμαστε περισσότερες από δύο διατομές. Για παράδειγμα, στο κομμάτι του Σχήματος 2.22 κυκλωμένο με τον αριθμό 22 :

- Ορίζουμε τέσσερα παράλληλα επίπεδα. Από αριστερά προς τα δεξιά το δεύτερο σε απόσταση 1,2 μέτρων από το πρώτο. Το τρίτο σε απόσταση 0,4 μέτρων από το δεύτερο. Το τελευταίο σε απόσταση 4,4 μέτρων από το πρώτο.
- Σχεδιάσουμε τις διατομές τύπου «Διατομή Β» (Σχήμα 2.23) στα επίπεδα 1 και 2, διατομές τύπου «Διατομή Γ» στα επίπεδα 3 και 4.
- Προσαρμόζουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάθε διατομής σύμφωνα με το σχέδιο των προβόλων (Σχήμα 2.22, συνολικό ύψος / ύψος κάτω πέλματος κάθε διατομής). Για τις ενδιάμεσες διατομές στα επίπεδα 2 και 3, επειδή δεν έχουμε δεδομένα, υπολογίζουμε το συνολικό ύψος και το ύψος κάτω πέλματος αναλογικά.
- Δίνουμε τα χαρακτηριστικά εγκάρσιας επίκλισης της κάθε διατομής σύμφωνα με το διάγραμμα επικλίσεων.
- Δίνουμε την σχετική υψομετρική διαφορά για να επιτύχουμε διαμήκη κλίση 2,6% .
- Με την εντολή Lofted Boss, ενώνουμε με συμπαγές υλικό τις διατομές μας ανά δύο.
- Με την εντολή Lofted Cut, αφαιρούμε υλικό (ανά δύο διατομές) στο εσωτερικό του part για να έχουμε το αποτέλεσμα του Σχήματος 2.25.

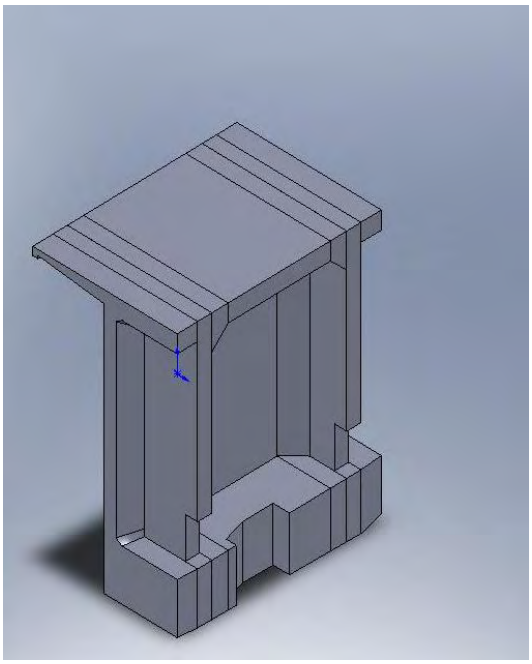


Σχήμα 2.25

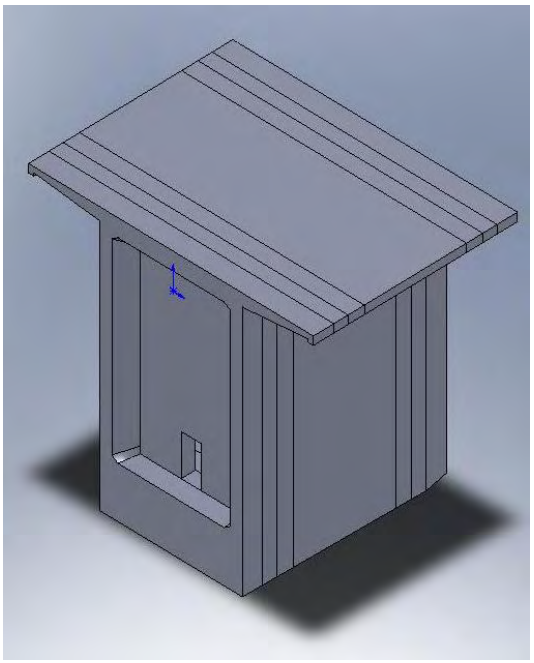
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να πούμε ότι σύμφωνα με τις οδηγίες των παραπάνω δύο παραδειγμάτων, είναι εφικτό να σχεδιαστούν όλα τα τμηματα του καταστρώματος. Αυτά συμπεριλαμβάνουν από τα απλά σχεδιαστικά τμήματα έως και τα πιο σύνθετα στα οποία εισάγονται παραπάνω από δύο διατομές διαφορετικού τύπου, στροφές του οδοστρώματος, οπές στο κατάστρωμα κλπ. Στα παραπάνω ανήκουν οι φορείς των βάθρων Μ1δ, Μ2δ, Μ3δ και τα ακρόβαθρα Α0δ και Α4δ.

Αφού ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός του κάθε part ξεχωριστά, με την εντολή mate μπορούμε να ενώσουμε τα επιμέρους parts και να δημιουργήσουμε ένα assembly. Το assembly αυτό μπορεί να αποτελεί τμήμα της γέφυρας το οποίο κατόπιν να ενωθεί με άλλα assemblies και να μας δώσει όλη τη γέφυρα.



Σχήμα 2.26: Παράδειγμα, Φορέας βάθρου Μ2δ-τομή



Σχήμα 2.27: Φορέας βάθρου Μ2δ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

2.6 Ακρόβαθρο Α0

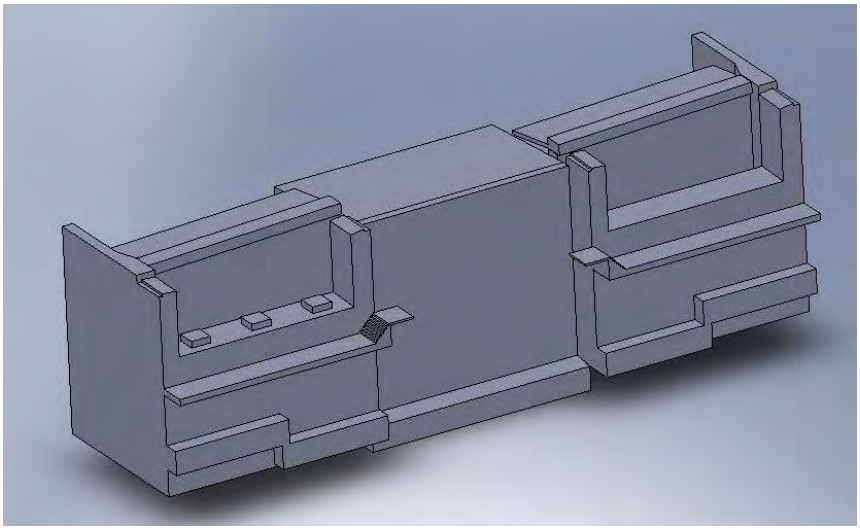
Το ακρόβαθρο Α0 αποτελεί μία από τις δύο ακραίες στηρίξεις του δεξιού κλάδου της γέφυρας του Μετσόβου. Έρχεται σε επαφή με το κατάστρωμα μέσω τριών εφεδράνων τύπου «εγκιβωτισμένου ελαστικού (Pot Bearings)» τα οποία εδράζονται σε τάκους. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου εφεδράνου είναι ότι είναι κοινό και για του δύο κλάδους της γέφυρας του Μετσόβου. Όπως μπορούμε να διακρίνουμε στην τρισδιάστατη όψη του Α0 στο Σχήμα 2.28, αριστερά (στο σχήμα) εδράζεται ο δεξιός κλάδος και δεξιά ο αριστερός. Το βάθρο στο σύνολό του αποτελεί μία σύνθετη γεωμετρία στην οποία επίσης ακολουθήσαμε την μεθοδολογία σχεδίασης μέσω εγκάρσιων και κατά μήκους διατομών.

Ο κάθε φορέας εδράζεται στο ακρόβαθρο μέσω δύο εγκάρσιων διατμητικών συνδέσμων (χαλύβδινοι βιομηχανικού τύπου αρθρωτοί περί τον κατακόρυφο άξονα) και ενός εφεδράνου εγκιβωτισμένου ελαστικού. Σύνολο λοιπόν 2 εφέδρανα και 4 διατμητικοί σύνδεσμοι.

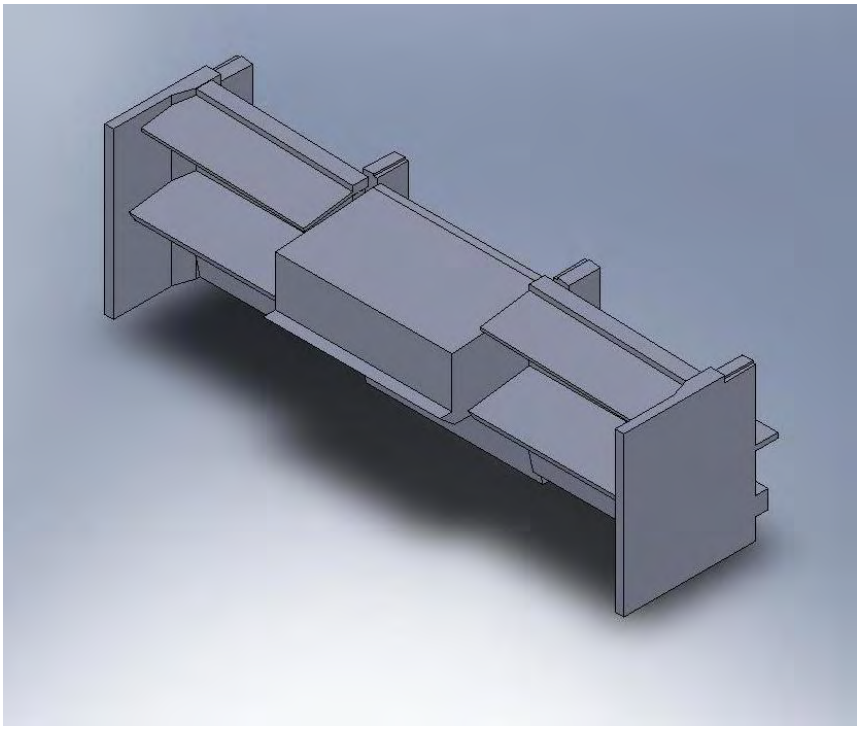
Να αναφέρουμε ότι οι γεωμετρίες Α0 και Α4 των ακρόβαθρων της γέφυρας του Μετσόβου δεν θα ληφθούν υπ’ όψιν στην δυναμική ανάλυση του δεξιού κλάδου και θα χρησιμοποιηθούν τα τρισδιάστατα μοντέλα του σχεδιαστικού προγράμματος για μελλοντική μελέτη. Θα θεωρηθεί λοιπόν ότι ο δεξιός κλάδος εδράζεται σε τρία εφέδρανα τα οποία με τη σειρά τους είναι πακτωμένα στην κάτω επιφάνειά τους.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τρισδιάστατες όψεις από το σχεδιαστικό πρόγραμμα, στα σχήματα 2.28 και 2.29. Στο σχήμα 2.28 φαίνονται και τα τρία εφέδρανα του δεξιού κλάδου. Τα εφέδρανα σχεδιάστηκαν ως ορθογώνια παραλληλεπίπεδα (1.25x1.25x0.4).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 2.28: Τρισδιάστατη όψη ακρόβαθρου Α0 στο σχεδιαστικό πρόγραμμα



Σχήμα 2.29: Τρισδιάστατη όψη ακρόβαθρου Α0 στο σχεδιαστικό πρόγραμμα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

2.7 Ακρόβαθρο Α4

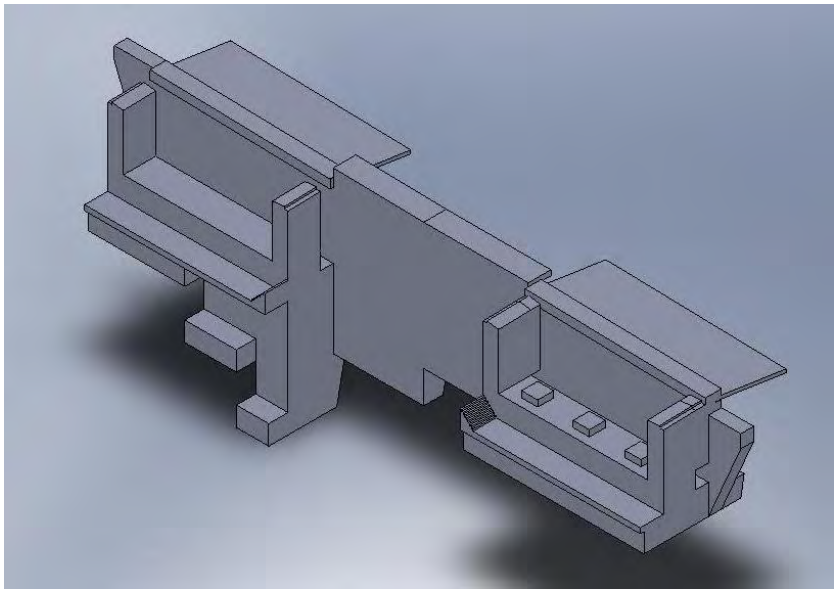
Το ακρόβαθρο ακολουθεί το ίδιο μοτίβο σχεδιασμού όπως και το Α0 αλλά έχει αρκετά διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Αποτελεί το δεύτερο ακραίο στήριγμα του δεξιού και αριστερού κλάδου της γέφυρας του Μετσόβου σε απόσταση 536,99 μέτρων από το πρώτο.

Ο κάθε φορέας εδράζεται στο ακρόβαθρο μέσω δύο εγκάρσιων διατμητικών συνδέσμων (χαλύβδινοι βιομηχανικού τύπου αρθρωτοί περί τον κατακόρυφο άξονα) και ενός εφεδράνου εγκιβωτισμένου ελαστικού. Σύνολο λοιπόν 2 εφέδρανα και 4 διατμητικοί σύνδεσμοι.

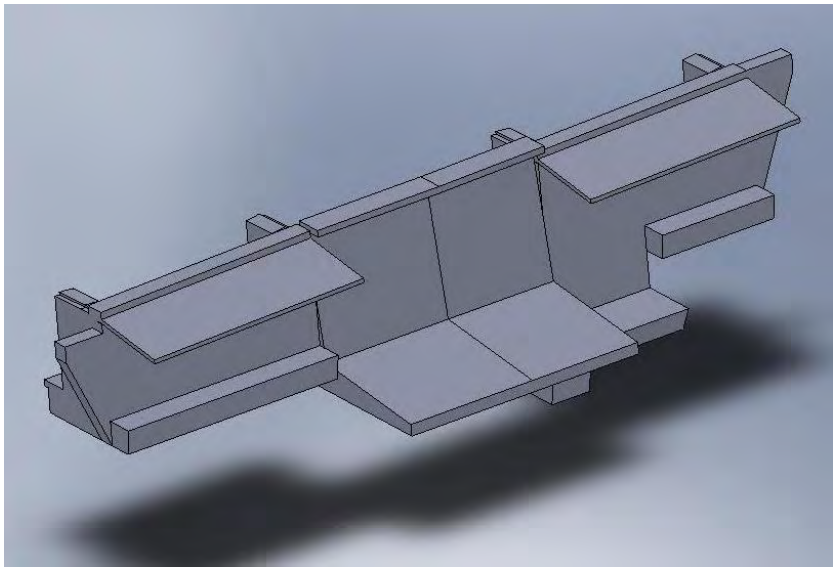
Το Α4 επίσης δεν θα ληφθεί υπ’ όψιν στη δυναμική ανάλυση. Στη δυναμική ανάλυση θα θεωρηθεί λοιπόν ότι ο δεξιός κλάδος εδράζεται σε τρία εφέδρανα τα οποία με τη σειρά τους είναι πακτωμένα στην κάτω επιφάνειά.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τρισδιάστατες όψεις από το σχεδιαστικό πρόγραμμα, στα σχήματα 2.30 και 2.31. Στο σχήμα 2.30 φαίνονται και τα τρία εφέδρανα του δεξιού κλάδου. Τα εφέδρανα σχεδιάστηκαν ως ορθογώνια παραλληλεπίπεδα (1.25x1.25x0.4) με μηχανικές ιδιότητες που αναφέρονται στο κεφάλαιο 3.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 2.30: Τρισδιάστατη όψη ακρόβαθρου Α0 στο σχεδιαστικό πρόγραμμα



Σχήμα 2.31: Τρισδιάστατη όψη ακρόβαθρου Α0 στο σχεδιαστικό πρόγραμμα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Κεφάλαιο 3

ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή αλλά και στο τμήμα της εργασίας μέχρι τώρα, το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για το τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων είναι το COMSOL Multiphysics.

Η σύνδεση του σχεδιαστικού προγράμματος με το COMSOL έγινε μέσω των ίδιων επεκτάσεων αρχείων που μπορούν να εισαχθούν και να εξαχθούν στα και από τα δύο προγράμματα. Τέτοια αρχεία είναι τα: Parasolid (*.x_t, *.x_b), IGES (*.igs, *.iges), VRML(*.wrl, .*wml), STL (*.stl) και άλλα είδη αρχείων. Στο δικό μας μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν τα αρχεία Parasolid με επέκταση *.x_t. Δηλαδή τα σχεδιαστικά μοντέλα εξάγονται με την επέκταση *.x_t από το σχεδιαστικό πρόγραμμα και εισάγονται στο πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με την ίδια επέκταση η οποία είναι συμβατή και στα δύο. Πιο συγκεκριμένα αποθηκεύονται τα αρχεία από το σχεδιαστικό πρόγραμμα με επέκταση *.x_t και έπειτα μέσα από το COMSOL χρησιμοποιούνται κατά σειρά οι εντολές File, Import, CAD data from file και κάνουμε browse το αρχείο που έχουμε αποθηκεύσει από το σχεδιαστικό πρόγραμμα.

Μετά την εισαγωγή (import) του μοντέλου στο COMSOL ακολουθείται μια διαδικασία έτσι ώστε να φτάσουμε στο αποτέλεσμά μας, το οποίο είναι οι ιδιομορφές και οι ιδιοσυχνότητες του εκάστοτε μοντέλου.

Η διαδικασία αυτή ξεκινάει με την επιβολή των συνοριακών συνθηκών στο πρόβλημα. Πιο συγκεκριμένα το COMSOL Multiphysics μας δίνει την δυνατότητα να ορίσουμε ποια τμήματα της κατασκευής μας είναι πακτωμένα ή αν έχουν γενικότερα κάποιο κινηματικό περιορισμό όπως η κύλιση για παράδειγμα, ή αν δέχονται κάποια δύναμη.

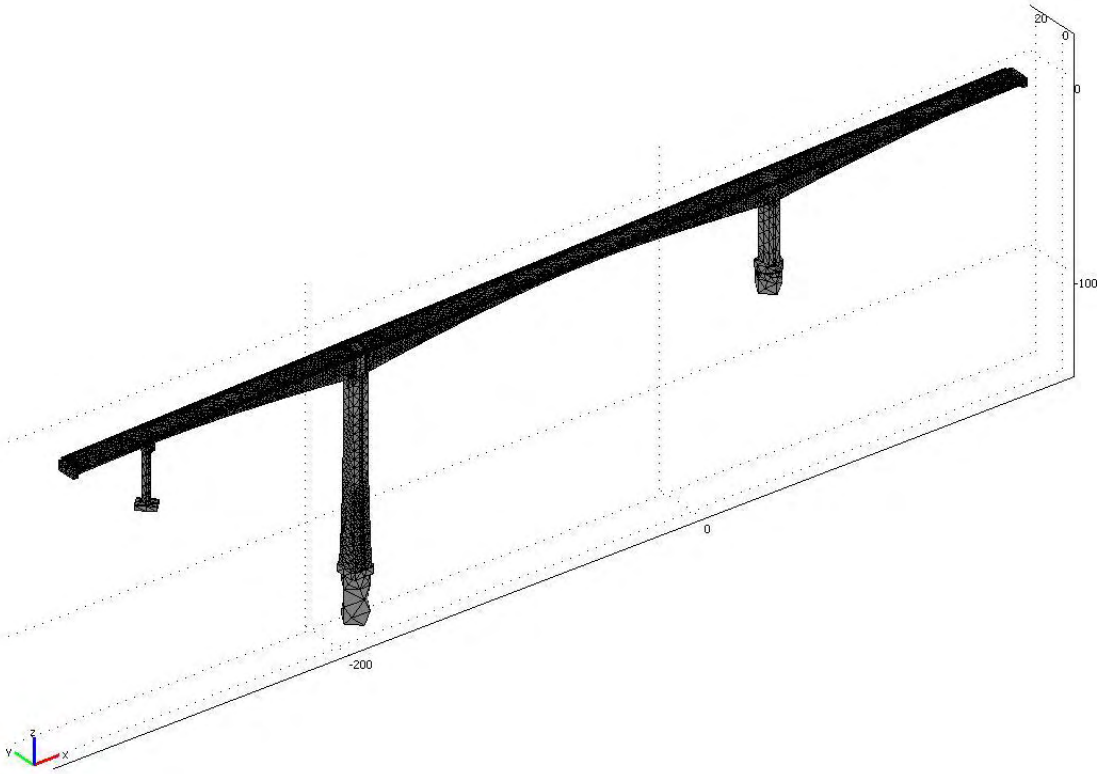
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Επίσης μπορούμε να εισάγουμε από την βιβλιοθήκη του προγράμματος το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το μοντέλο μας, ή εναλλακτικά μας δίνεται η δυνατότητα να δώσουμε εμείς τις ιδιότητες του υλικού (πυκνότητα, μέτρο ελαστικότητας κλπ) για κάθε τμήμα της κατασκευής. Η επιβολή των συνοριακών συνθηκών επιτυγχάνεται με την χρήση της καρτέλας Physics από την γραμμή εργαλείων του προγράμματος απ' όπου επιλέγουμε αν θέλουμε να επιβάλουμε τον περιορισμό μας σε σημείο, σε επιφάνεια, σε ακμή.

Το επόμενο και τελικό βήμα πριν την εκκίνηση της λύσης για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων μας, είναι η διακριτοποίηση του μοντέλου μας σε πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιώντας την καρτέλα Mesh από την γραμμή εργαλείων του προγράμματος. Η γεωμετρία των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιεί το COMSOL είναι τετραεδρική. Μπορούμε να ορίσουμε επίσης στην αυτοματοποιημένη διαδικασία και την πυκνότητα των στοιχείων. Υπάρχουν οι εξής κατηγορίες διακριτοποίησης (mesh) από την πιο απλή (αραιή) προς την πιο σύνθετη (πυκνή) διασπορά των πεπερασμένων στοιχείων: Extra coarse, Coarser, Coarse, Normal, Fine, Finer, Extra fine και Extremely fine. Μπορούμε όμως και σε αυτό το σημείο, εναλλακτικά, να ορίσουμε εμείς (χειροκίνητα) το μέγεθος, άρα κατ' επέκταση και των αριθμό των πεπερασμένων στοιχείων. Ο λόγος για τον οποίο μας δίνεται η επιλογή της διακριτοποίησης είναι για να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε την μεταβολή των τιμών των ιδιοσυχνοτήτων του μοντέλου μας καθώς περνάμε από την πιο αραιή προς την πιο πυκνή διακριτοποίηση. Η μεταβολή των τιμών των ιδιοσυχνοτήτων είναι ανάλογη με την προσέγγιση με την οποία έχει γίνει το μοντέλο.

Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται το ολοκληρωμένο μοντέλο της γέφυρας το οποίο περιέχει όλο το κατάστρωμα καθώς επίσης και τα τρία βάθρα μαζί με τις θεμελιώσεις και είναι διακριτοποιημένο σε πεπερασμένα στοιχεία μετά την εισαγωγή του στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Όπως αναφέραμε στις παραγράφους 2.6 και 2.7 στο μοντέλο δυναμικής ανάλυσης δεν συμπεριλάβαμε τα ακρόβαθρα Α0 και Α4.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 3.1 : Τρισδιάστατη όψη διακριτοποιημένου μοντέλου της γέφυρας σε πεπερασμένα στοιχεία με *mesh type -> extra coarse.*

Τέλος, από την καρτέλα Solve της γραμμής εργαλείων, επιλέγω την εντολή Solve Parameters απ' όπου επιλέγω τι είδος προβλήματος προσπαθώ να λύσω, πχ ιδιομορφική ανάλυση, στατική ανάλυση κλπ, καθώς επίσης στην περίπτωση μας που αφορά την ιδιομορφική ανάλυση μπορώ να επιλέξω τον αριθμό των ιδιοσυχνοτήτων που θέλω να εξάγω.

Συγκεκριμένα για το μοντέλο της γέφυρας για το οποίο εξάγαμε τις ιδιοτιμές του Πίνακα 3.2 οι συνοριακές συνθήκες που επεβλήθησαν είναι οι παρακάτω:

- Όσων αφορά τους κινηματικούς περιορισμούς, επιβάλαμε πάκτωση σε όλες τις επιφάνειες των θεμελιώσεων των τριών βάθρων, καθώς επίσης και στα εφέδρανα των ακρόβαθρων Α0 και Α4. Όλα τα υπόλοιπα τμήματα της γέφυρας παραμένουν ελεύθερα. Ουσιαστικά η επιβολή πάκτωσης στην θεμελίωση των βάθρων υποδεικνύει την παραδοχή πως το έδαφος δεν έχει ελαστικότητα. Κατ' επέκταση η επιβολή πάκτωσης στην κάτω επιφάνεια των εφεδράνων γίνεται με την παραδοχή ότι τα ακρόβαθρα Α0 και Α4 δεν έχουν ελαστικότητα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

- Όσων αφορά το υλικό τώρα, όπως προαναφέρθηκε η γέφυρα είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα. Από την βιβλιοθήκη του προγράμματος εισάγαμε το concrete σαν υλικό με τις εξής αλλαγές. Σε όλα τα τμήματα της γέφυρας η πυκνότητα που εισάγαμε είναι 2548 Kg/m^3 και επίσης από τις προεπιλογές του COMSOL για το concrete μεταβάλλαμε το μέτρο ελαστικότητας (E) θέτοντάς το 37 GPa για το κατάστρωμα και 34 GPa για όλα τα υπόλοιπα τμήματα, τιμές που δίνονται στα κατασκευαστικά σχέδια.

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι πρώτες είκοσι ιδιοσυχνότητες που εξάγονται από το COMSOL Multiphysics για το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας του Μετσόβου (FEM_fixed base_RH Branch) για δύο διαφορετικούς τύπους διακριτοποίησης. Ξεκινώντας από την πιο αραιή (extra coarse) και κατόπιν πιο πυκνή διακριτοποίηση (normal) παρατηρούμε την μεταβολή του αριθμού των στοιχείων από 91.959 για extra coarse σε 302939 για normal. Ταυτόχρονα όμως με τον αριθμό των στοιχείων αυξάνονται και οι βαθμοί ελευθερίας για του οποίους λύνεται το ιδιοπρόβλημα (537.885 για extra coarse μέχρι 1.635.816 για normal).

Πίνακας 3.1 : Στατιστικά Διακριτοποίησης

	Τύπος Διακριτοποίησης (type of mesh)	
	Normal	Extra coarse
Number of degrees of freedom	1635816	537885
Number of mesh points	88450	29520
Number of elements	302939	91959
Tetrahedral	302939	91959
Prism	0	0
Hexahedral	0	0
Number of boundary elements	146781	65512
Triangular	146781	65512
Quadrilateral	0	0
Number of edge elements	30217	20351
Number of vertex elements	4072	4207
Minimum element quality	0.013	0.019
Element volume ratio	0	0

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Πίνακας 3.2 : Οι πρώτες 20 ιδιοσυχνότητες του μοντέλου της γέφυρας

	Τύπος Διακριτοποίησης (type of mesh)	
Ιδιοσυχνότητες	Normal	Extra coarse
1η	**0.32073**	**0.32135**
2η	**0.63723**	**0.63983**
3η	**0.65154**	**0.65277**
4η	**0.99563**	**1.00075**
5η	**1.11820**	**1.12128**
6η	**1.19954**	**1.20003**
7η	**1.52376**	**1.52426**
8η	**1.75511**	**1.75731**
9η	**1.95201**	**1.94310**
10η	**2.33751**	**2.33105**
11η	**2.39097**	**2.40782**
12η	**2.68000**	**2.68535**
13η	**2.85131**	**2.85616**
14η	**3.17914**	**3.18048**
15η	**3.19848**	**3.20555**
16η	**3.64320**	**3.65334**
17η	**4.00260**	**4.00219**
18η	**4.48268**	**4.49388**
19η	**4.61939**	**4.59921**
20η	**4.76043**	**4.77636**

Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε ότι για την γέφυρα του Μετσόβου έγιναν κάποιες μετρήσεις. Προηγήθηκε λοιπόν μία διαδικασία ενοργάνωσης του αριστερού και δεξιού κλάδου της γέφυρας του Μετσόβου και αναγνώρισης των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών των δύο κλάδων χρησιμοποιώντας τις μετρούμενες ταλαντώσεις. Η ενοργάνωση και συλλογή μετρήσεων από τους δύο κλάδους της γέφυρας του Μετσόβου πραγματοποιήθηκε καθ' όλη την περίοδο κατασκευής της γέφυρας. Συγκεκριμένα, η γέφυρα ενοργανώθηκε επανειλημμένα κατά την περίοδο από Νοέμβριο του 2007 έως και το Σεπτέμβριο του 2008 και συλλέχτηκαν μετρήσεις για πολλές φάσεις κατά τη διάρκεια κατασκευής των δύο κλαδων της γέφυρας.

Η ενοργάνωση της γέφυρας στις διάφορες φάσεις κατασκευής των δύο κλάδων έχει γίνει με ένα βέλτιστα τοποθετημένο δίκτυο αισθητήρων επιτάχυνσης με σκοπό την όσο το δυνατό καλύτερη συλλογή πληροφορίας από ταλαντώσεις της γέφυρας σε λειτουργικά φορτία (Panetsos and Lambropoulos 2006, Πανέτσος κ.α. 2006).

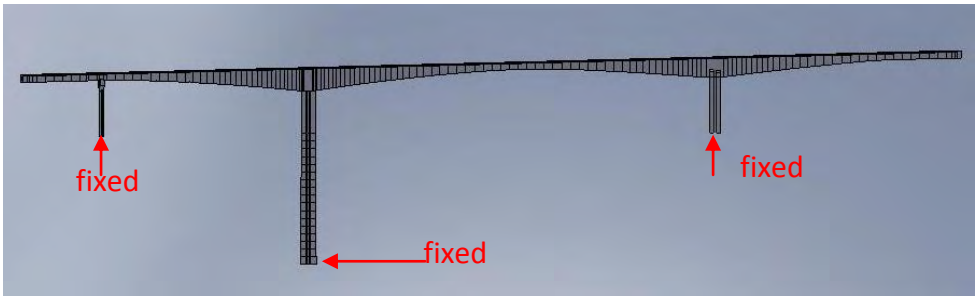
Στον Πίνακα 3.3 παρακάτω, βλέπουμε ένα συγκριτικό μεταξύ των ιδιοσυχνοτήτων του δεξιού και του αριστερού κλάδου της γέφυρας του Μετσόβου. Μετρήσεις στην ολοκληρωμένη φάση, δηλαδή να αντιστοιχούν σε ολόκληρο το φορέα, υπάρχουν μόνο για τον αριστερό κλάδο. Στον συγκεντρωτικό παρακάτω πίνακα λοιπόν υπάρχουν μόνο αποτελέσματα FEM για τον δεξιό κλάδο.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Πίνακας 3.3: Συγκριτικός πίνακας αριστερού και δεξιού κλάδου (μετρήσεις και FEM results)

		Low amplitude response LH Branch		High amplitude response LH Branch		FEM (fixed base) LH Branch	FEM (fixed base) RH Branch	FEM (without foundation) RH Branch
No	**Identified Modes**	**Frequency Hz**	**Damping ζ%**	**Frequency Hz**	**Damping ζ%**	**Model frequencies**	**Model frequencies**	**Model frequencies**
01	1st transverse	0.281	0.29	0.278	0.47	0.318	0.321	0.325
02	transverse	0.439	0.53	0.441	0.60	-	-	-
03	transverse	0.567	1.08	-	-	-	-	-
04	2nd transverse	0.636	1.07	0.623	0.90	0.621	0.639	0.646
05	1st bending	0.656	0.55	0.656	0.23	0.645	0.652	0.656
06	transverse	0.713	0.31	0.713	0.40	-	-	-
07	3rd transverse	1.03	0.46	1.02	1.23	0.989	1.000	1.034
08	2nd bending	1.48	0.51	1.47	2.15	1.11	1.121	1.125
09	4th transverse	-	-	-	-	1.17	1.200	1.202
10	3rd bending	1.62	0.52	1.61	0.19	1.51	1.524	1.525
11	5th transverse	1.69	0.43	1.69	0.33	1.71	1.757	1.768
12	bending	1.86	0.75	1.85	0.91	1.93	1.943	1.946
13	bending	2.08	0.37	2.01	2.75	2.31	2.331	2.340
14	transverse	2.3578	0.3255	2.3581	1.2770	2.3506	2.407	2.432
15	bending	2.8329	0.6144	2.8323	0.4674	2.8378	2.856	2.860
16	transverse	3.0951	0.3653	3.0932	0.4177	3.1306	3.180	3.189
17	bending	3.1993	0.7696	3.2179	0.9178	3.1743	3.205	3.247
18	bending	3.6015	0.3789	3.6023	0.3665	3.6344	3.653	3.706

Στον παραπάνω πίνακα στην στήλη «**FEM (without foundation) RH Branch**» αναφερόμαστε σε μία κατάσταση όπου από τον δεξιό κλάδο της γέφυρας του Μετσόβου έχουν αφαιρεθεί οι θεμελιώσεις κάτω από τα βάθρα Μ1δ, Μ2δ και Μ3δ (Σχήμα 3.2). Οι συνθήκες στήριξης έχουν αλλάξει και είναι πλέον πακτώσεις στις επιφάνειες κάτω από τα βάθρα που προαναφέραμε. Πακτώσεις έχουμε και στην κάτω επιφάνεια των εφεδράνων, όπως είχαμε και στο μοντέλο «**FEM (fixed base) RH Branch**».



Σχήμα 3.2 : Τρισδιάστατη όψη δεξιού κλάδου χωρίς θεμελιώσεις στο σχεδιαστικό πρόγραμμα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Μέτρηση στις 10/9/2008 (δεξιός κλάδος)

Κατά τη μέτρηση στις 10/9/2008 που αφορά τον δεξιό κλάδο της γέφυρας του Μετσόβου δεν έχει σκυροδετηθεί η κλείδα του ανοίγματος Μ2-Μ3. Έχει ολοκληρωθεί η συμμετρική προβολοδόμηση (26 και 26’ σπόνδυλοι) των προβόλων του βάθρου Μ3 αριστερού κλάδου, ενώ φορεία στηρίζουν τους ακραίους σπονδύλους, συνολικής μάζας 85t, ο καθένας. Η μάζα αυτή επιμερίζεται στους δύο τελευταίους σπονδύλους. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων έριχναν σκυρόδεμα στους τελευταίους σπονδύλους. Η κατάσταση αυτή της γέφυρας είναι αντίστοιχη με της κατάσταση του αριστερού κλάδου της μέτρησης 22/11/2007.

Στον Πίνακα 3.4 συγκρίνονται οι ιδιοσυχνότητες και οι συντελεστές απόσβεσης που προκύπτουν από τις μετρήσεις στις 10/9/2008 για τον δεξιό κλάδο με αυτές στις 22/9/2007 για τον αριστερό κλάδο.

Όπως ήταν αναμενόμενο, από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3.4 προκύπτουν πολύ μικρές διαφορές της τάξης του 0.5% ή μικρότερες μεταξύ των πειραματικά προσδιορισμένων ιδιομορφικών χαρακτηριστικών των δύο όμοιων κλάδων της γέφυρας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Πίνακας 3.4 : COMPARISON BETWEEN MODES OF LEFT (LB) AND RIGHT (RB) BRANCHES OF "M3 CANTILEVER" CONSTRUCTION PHASE

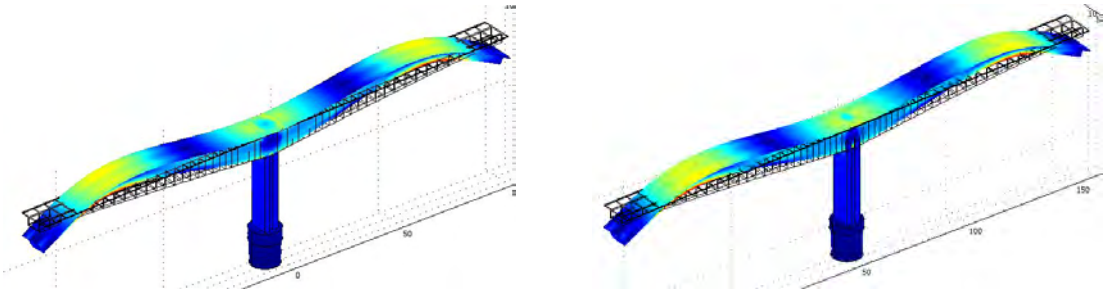
No	Identified Modes	Measured Frequencies Hz		Measured Damping ζ%		FEM (fixed base)	FEM (fixed base)	% diff.
		LB	RB	LB	RB	LB	RB	L.B - R.B
1	Pure torsion of column	0.159	0.159	1.06	0.35	0.155	0.154	0.65
2	1st pure bending of column	0.305	0.305	0.48	0.47	0.280	0.279	0.36
3	1st transverse and bending of column in transverse direction	0.623	0.621	0.61	0.32	0.570	0.569	0.18
4	2nd bending of column and deck deformation	0.686	0.686	0.38	0.22	0.639	0.635	0.63
5	3rd bending of deck without deck deformation	0.908	0.906	0.59	0.40	0.858	0.856	0.23
6	2nd transverse and deck deformation in opposite direction of transverse	1.31	1.31	1.28	0.48	1.27	1.28	0.79
7	3rd transverse	1.46	1.47	0.87	1.25	-	-	-
8	4th bending and column deformation	2.29	2.29	0.41	0.39	2.19	2.19	0.00
9	4th transverse and column slightly deformed	2.38	2.38	1.29	0.94	2.43	2.43	0.00
10	bending	3.24	3.24	0.32	0.47	3.13	3.13	0.00
11	transverse	4.63	4.63	0.35	0.61	4.36	4.39	0.69
12	1st rotational, x axis	4.94	4.91	0.61	0.54	5.01	5.02	0.20

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Left Branch **Right Branch**

Bending Mode

3.131592 Hz **3.130991 Hz**



Transverse Mode

4.366301 Hz **4.396122 Hz**

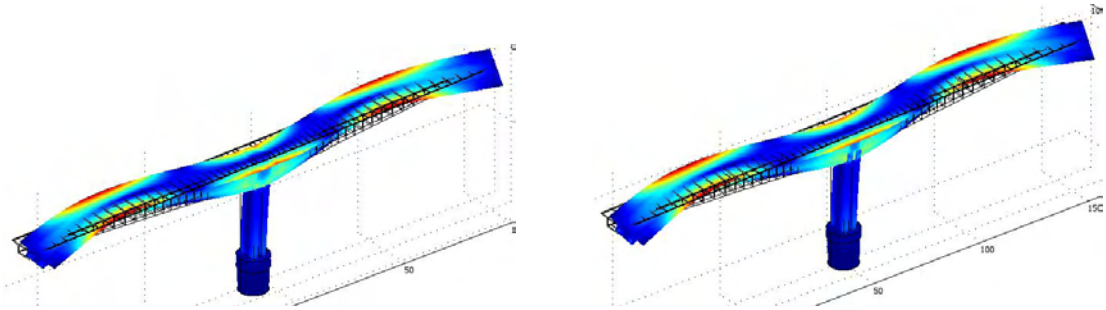


Figure 3.11: Representative bending and transverse mode shapes of “M3 Cantilever” predicted by the fixed base models of left and right branch.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

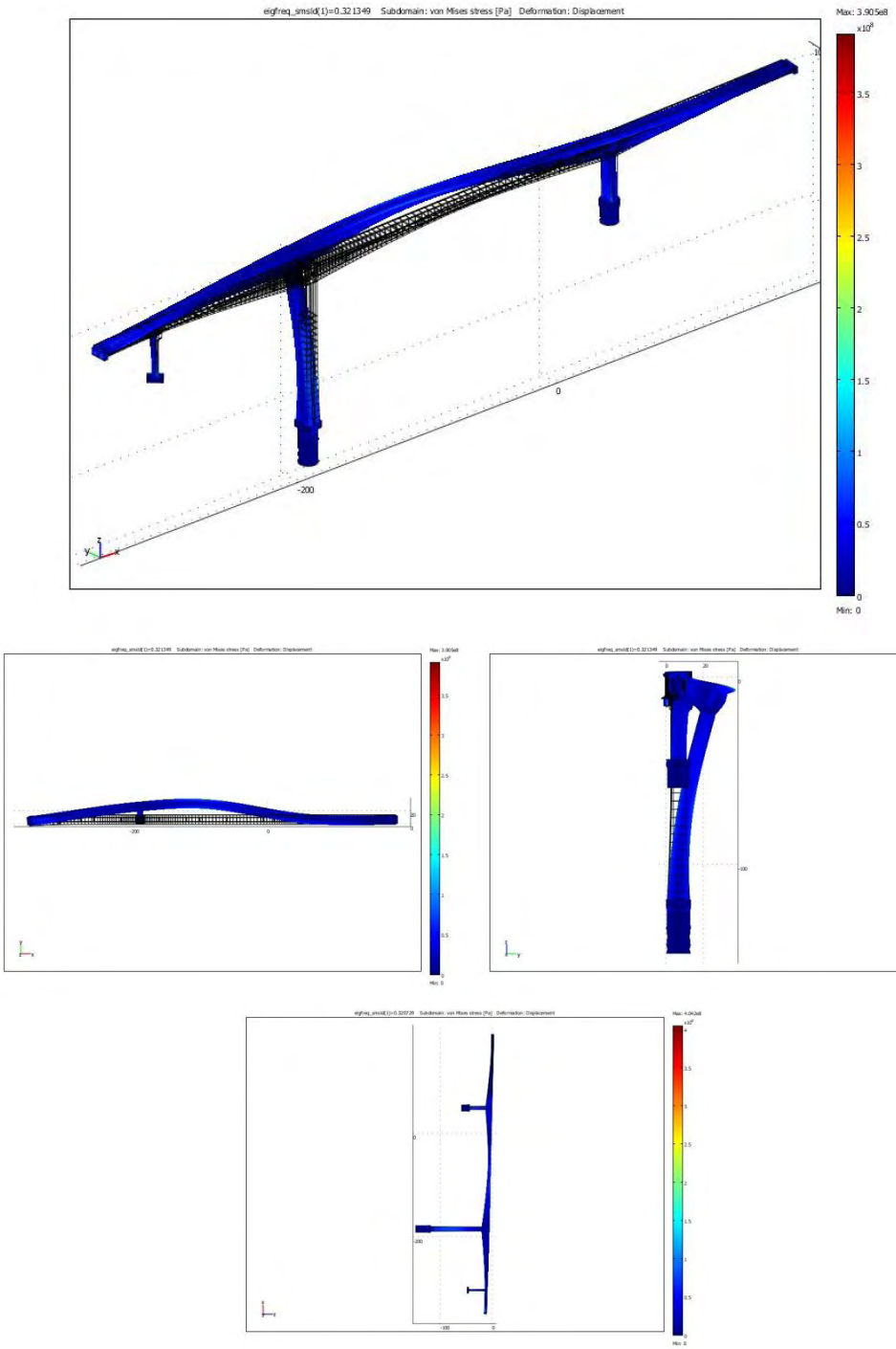
Παρακάτω παρουσιάζονται αντίστοιχα οι δέκα πρώτες ιδιομορφές που προβλέπονται από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και αντιστοιχούν στις δέκα πρώτες ιδιοσυχνότητες του μοντέλου της γέφυρας του Μετσόβου. Το μοντέλο αυτό του δεξιού κλάδου έχει ως συνοριακές συνθήκες:

- Πάκτωση στις θεμελιώσεις των βάθρων Μ1δ, Μ2δ και Μ3δ
- Πάκτωση στην κάτω επιφάνεια των εφεδράνων στα δύο άκρα του φορέα(Α0 και Α4)
- Δεν έχουν τοποθετηθεί τα ακρόβαθρα Α0 και Α4 στα οποία στηρίζονται τα εφέδρανα και κατ΄ επέκταση όλος ο φορέας του δεξιού κλάδου
- Με τις συνθήκες πάκτωσης στα σημεία που αναφέραμε παραπάνω δεν υπολογίζεται η ελαστικότητα του εδάφους και των ακρόβαθρων

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

''1st Mode'' right branch (0.321349 Hz)

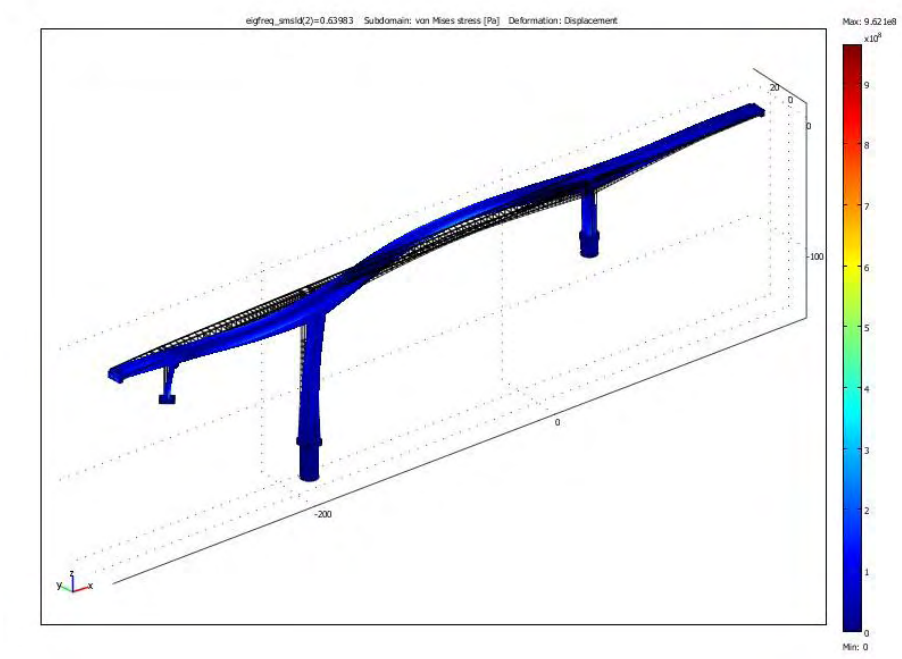
1st transverse

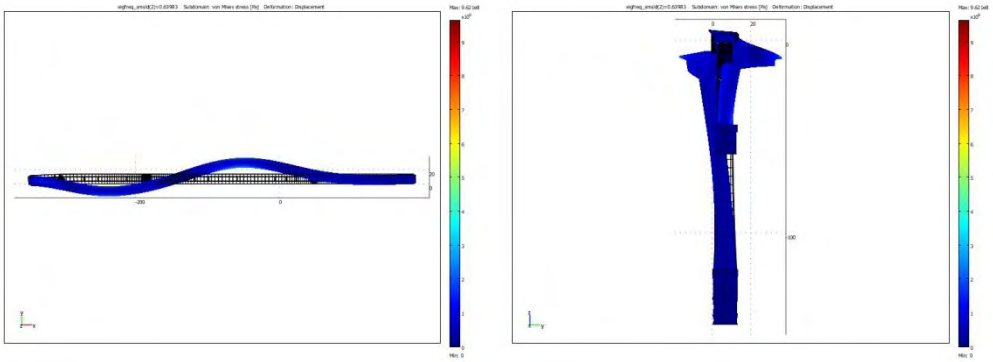


Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"2nd Mode" right branch (0.63983 Hz)

2nd transverse

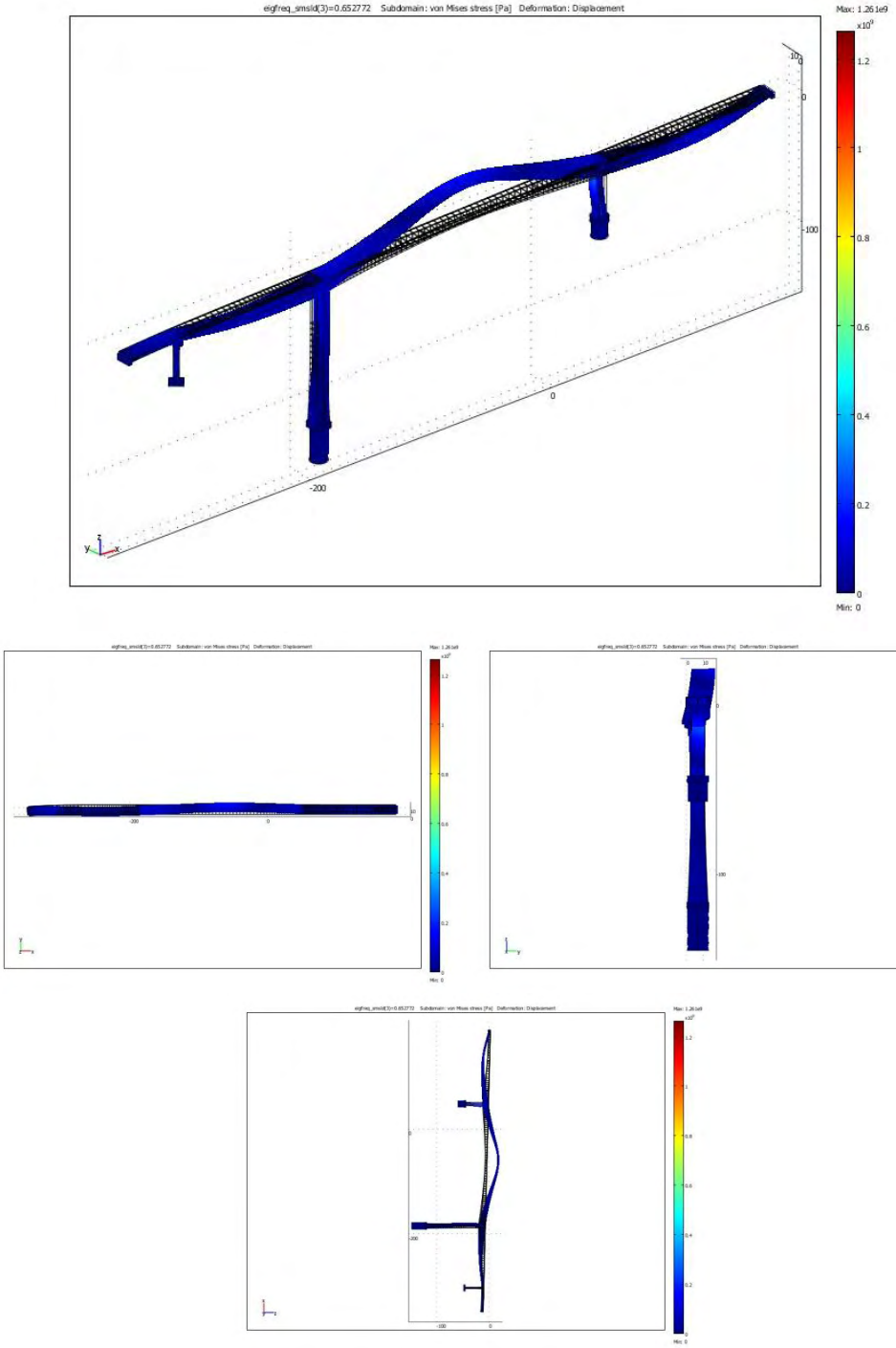




Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"3rd Mode" right branch (0.652772 Hz)

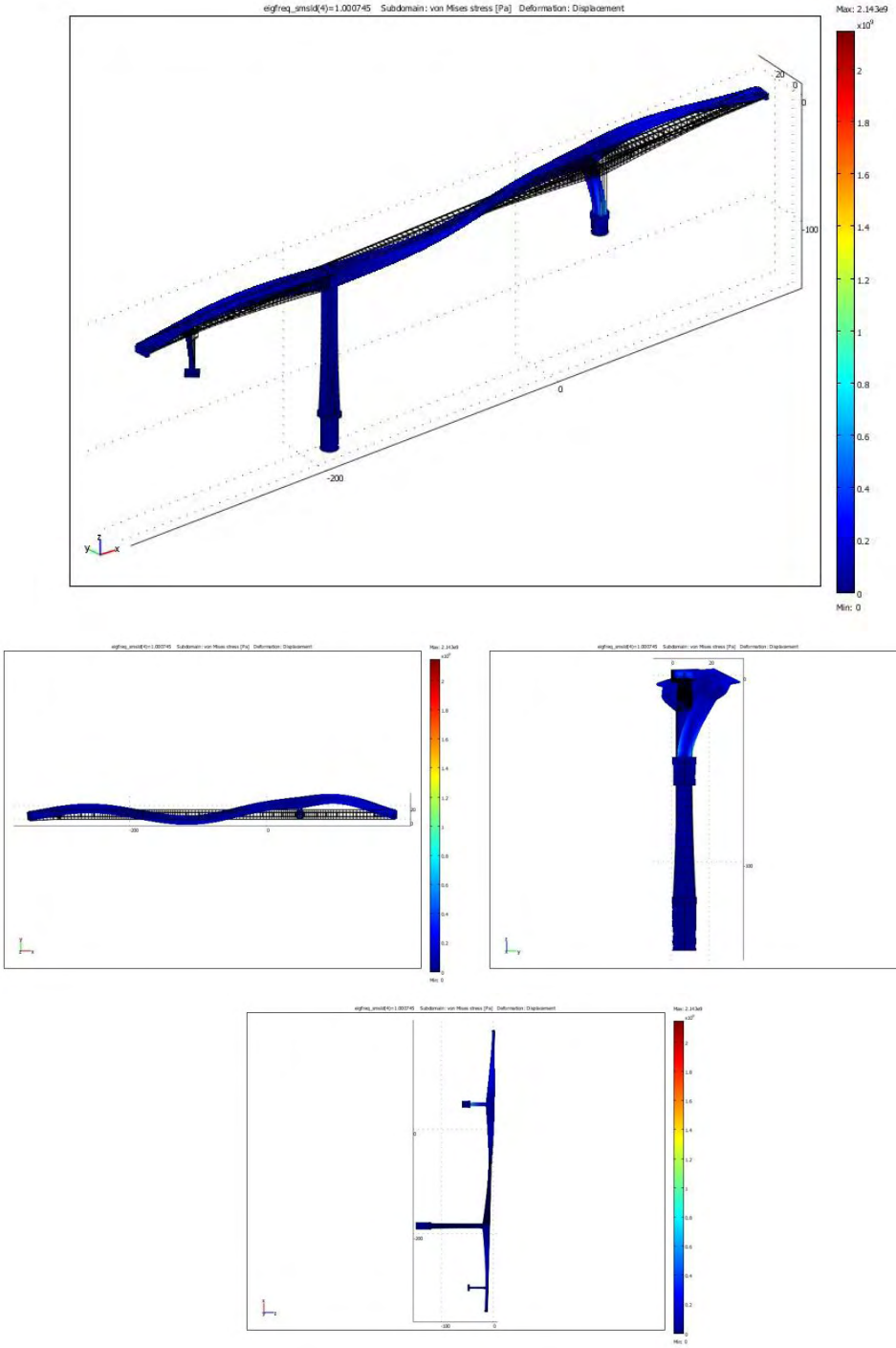
1st bending



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"4th Mode" right branch (1.000745 Hz)

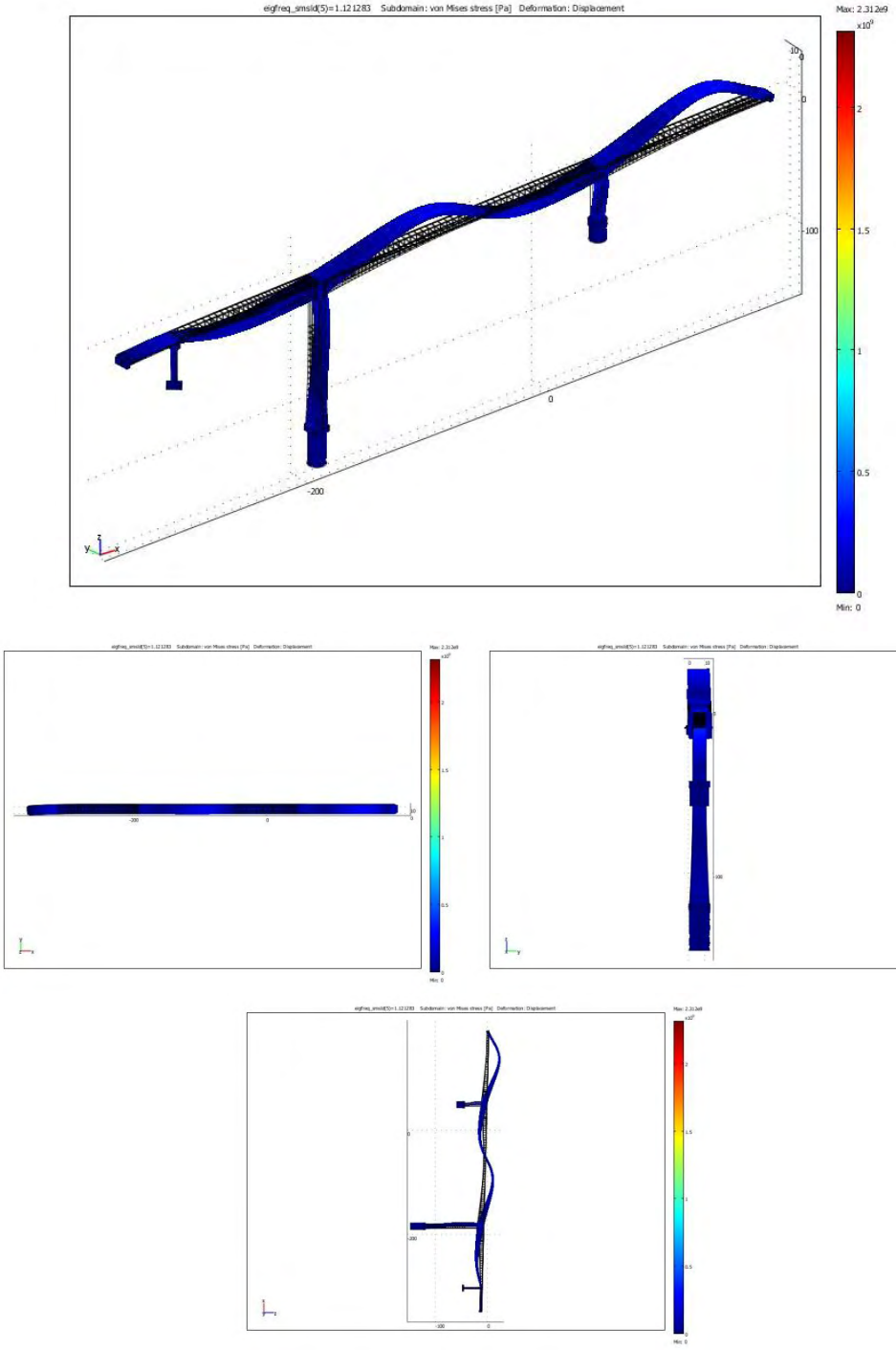
3rd transverse



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"5th Mode" right branch (1.121283 Hz)

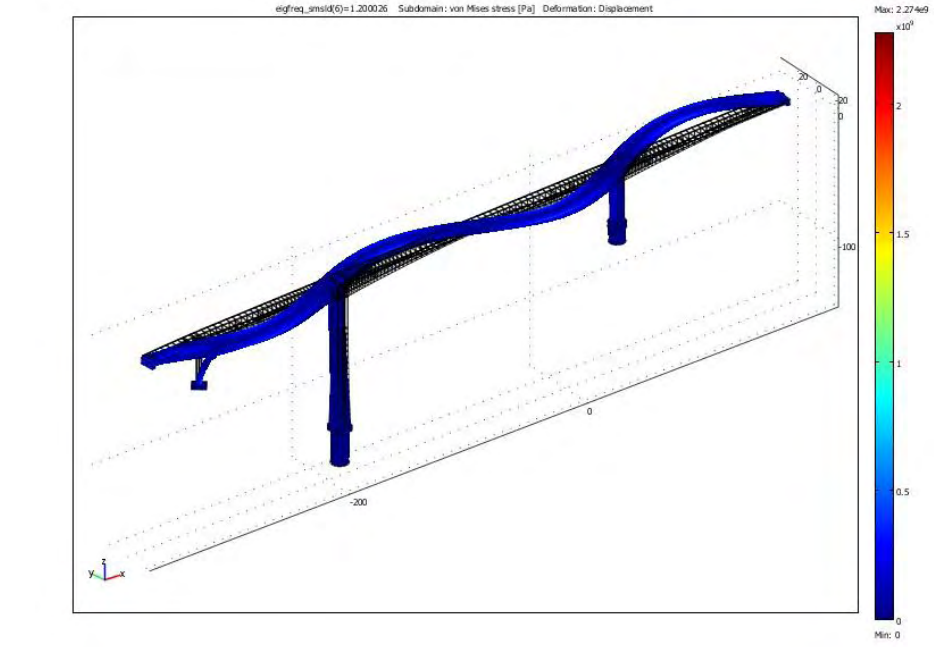
2nd bending

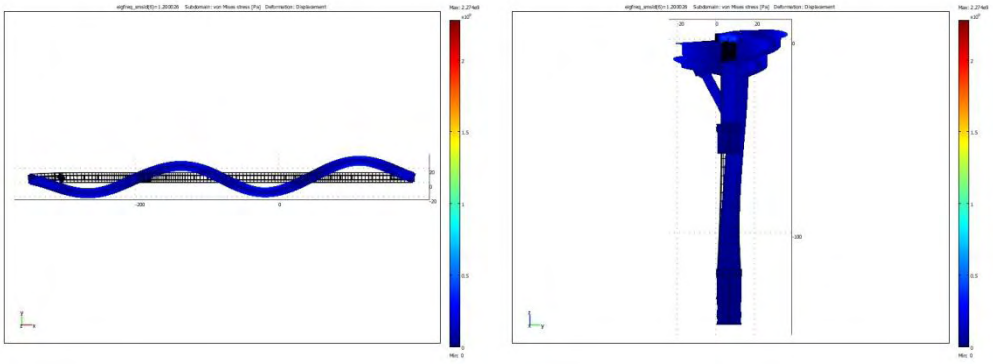


Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"6th Mode" right branch (1.200026 Hz)

4th transverse

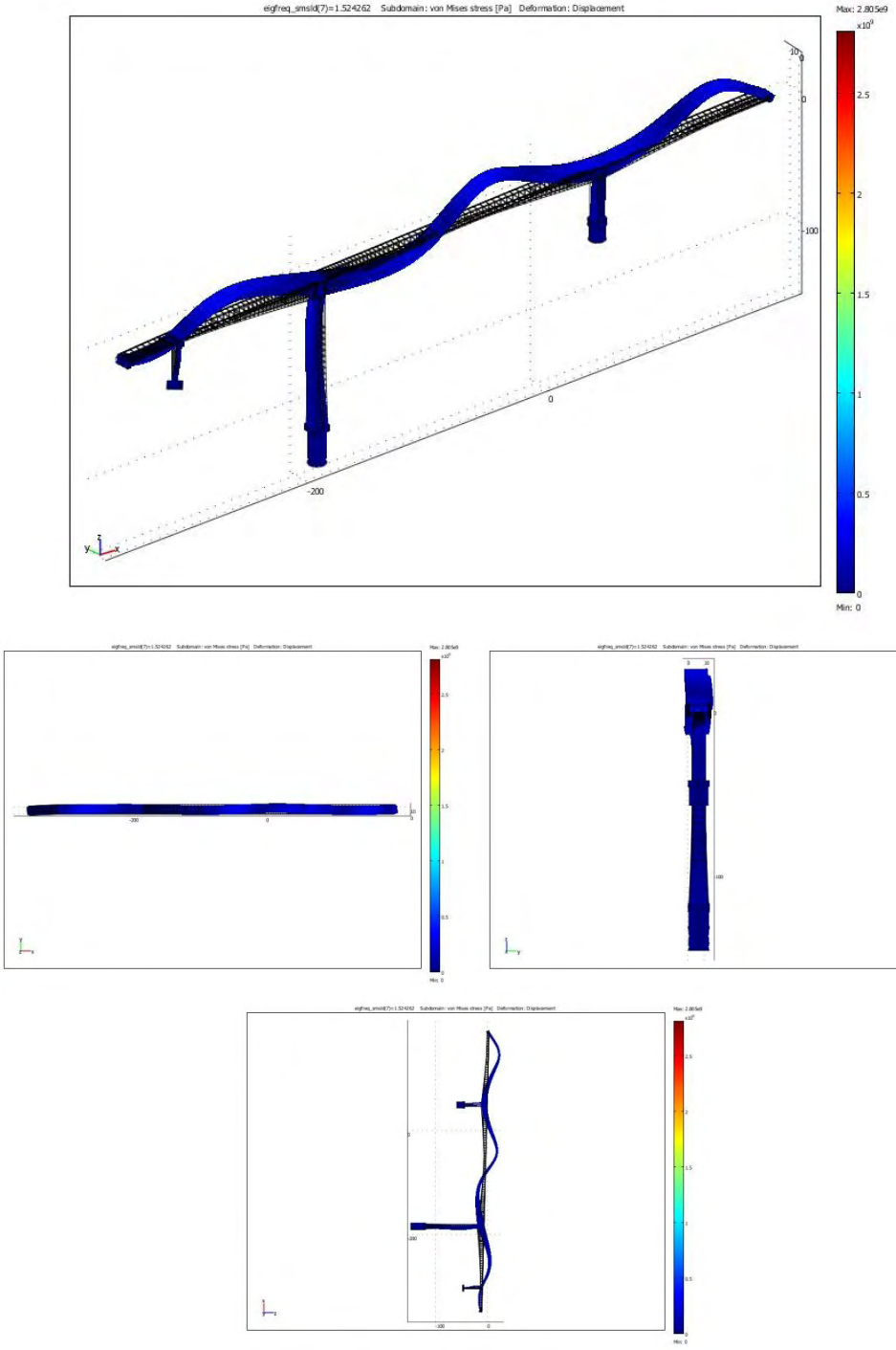




Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"7th Mode" right branch (1.524262 Hz)

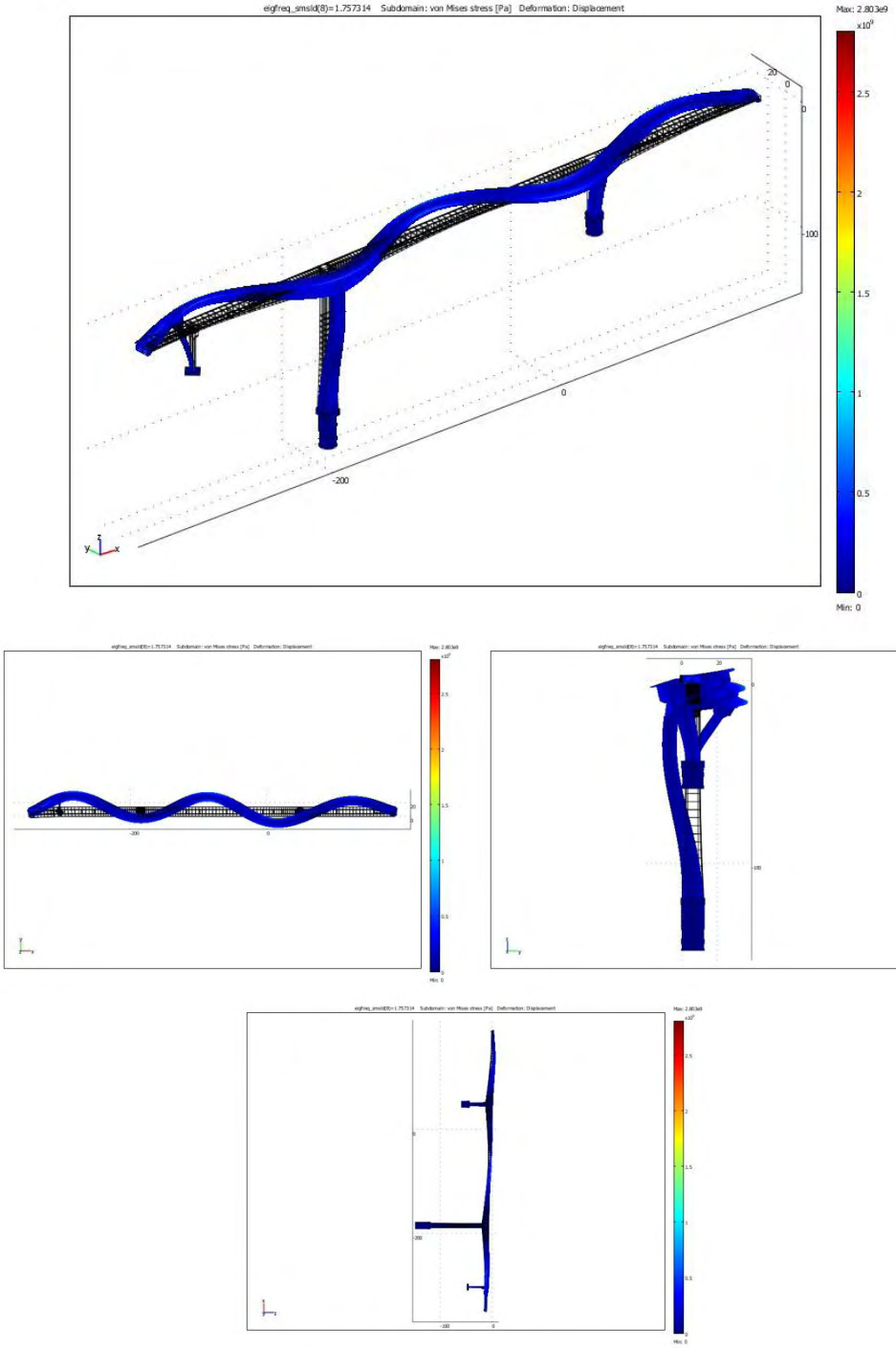
3rd bending



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"8th Mode" right branch (1.757314 Hz)

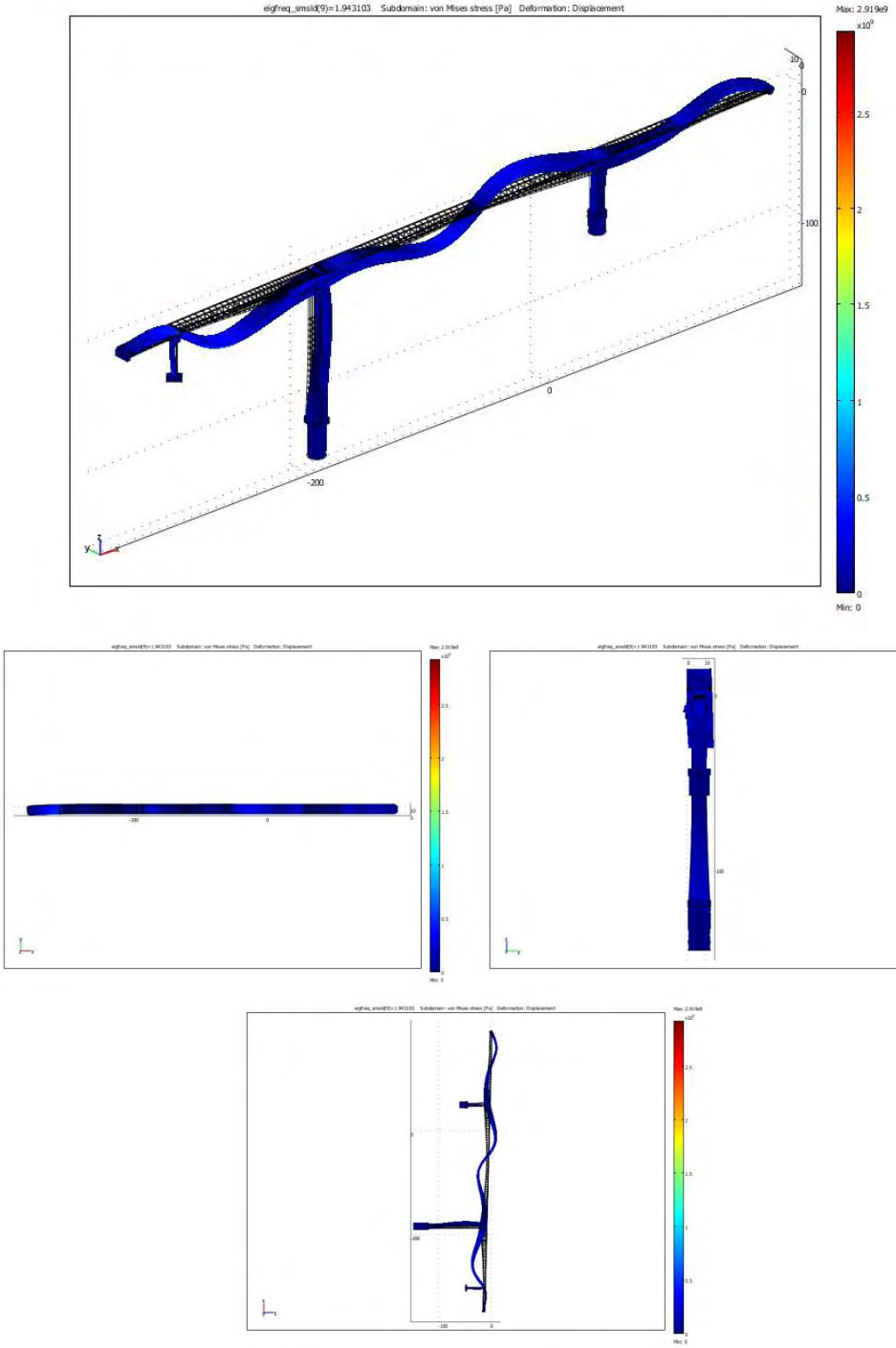
5th transverse



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"9th Mode" right branch (1.943103 Hz)

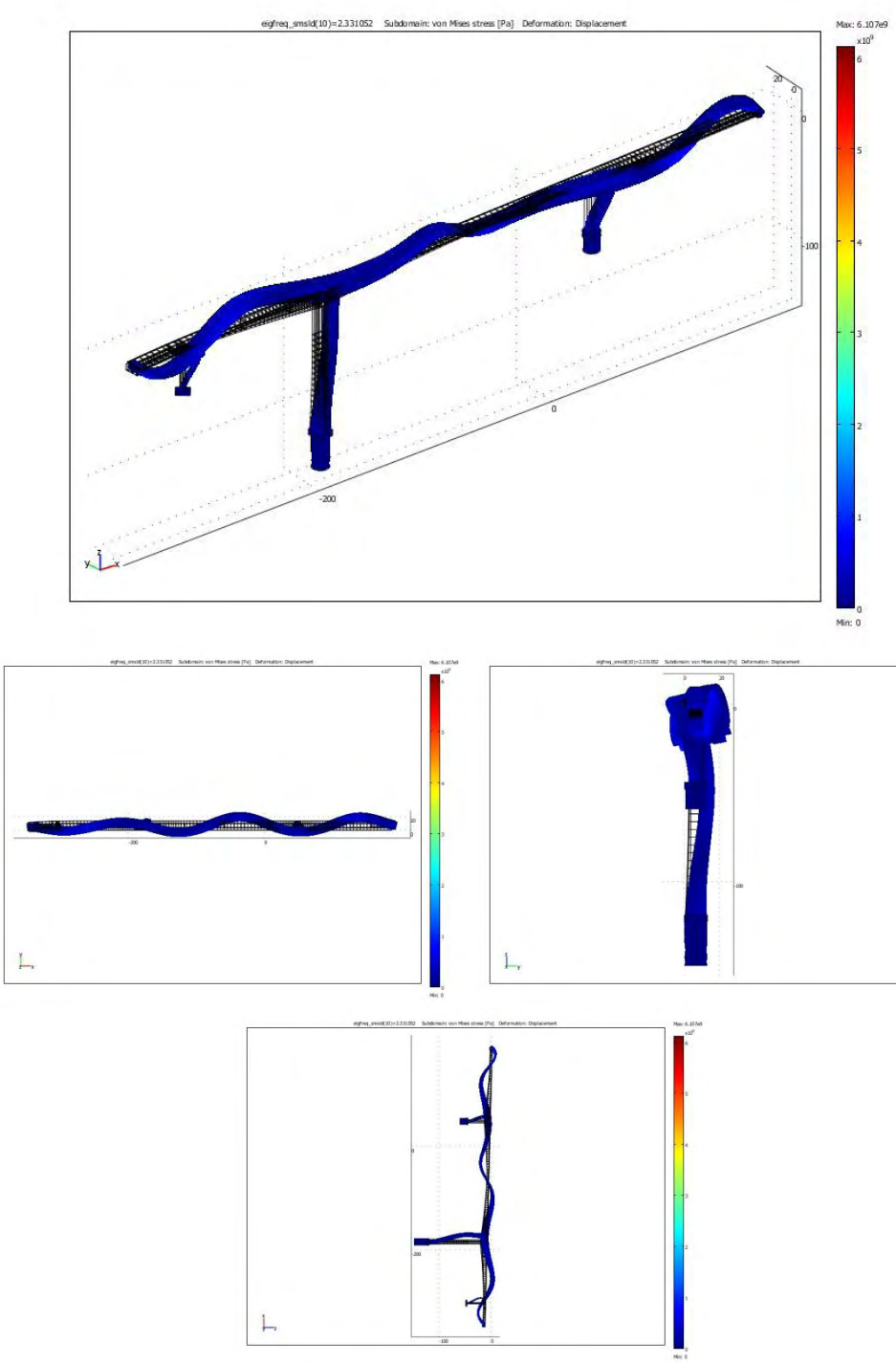
4th bending



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

''10th Mode'' right branch (2.331052 Hz)

5th bending



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Κεφάλαιο 4

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΕΞΙΟΥ ΚΛΑΔΟΥ (Τ9) ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΣΤΕΡΙΟΥ

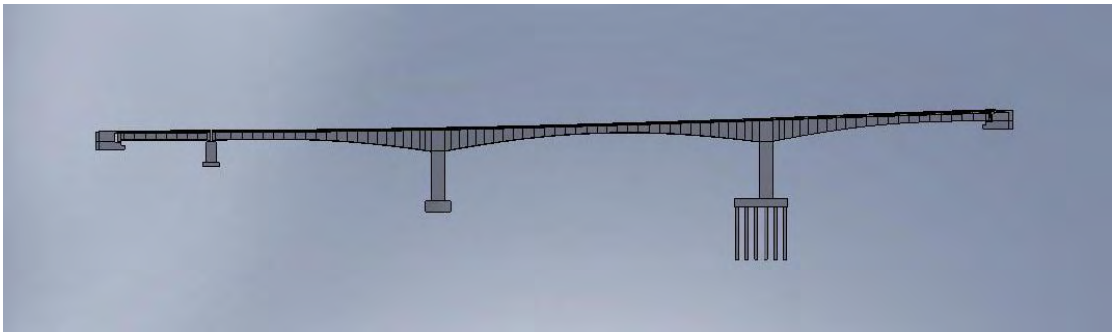
4.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Η γέφυρα Τ9-Τ11 στο Περιστέρι (ποταμός Άραχθος τμήμα 2.4 Εγνατίας Οδού) έχει δύο ανεξάρτητους κλάδους και 2 λωρίδες κυκλοφορίας + ΛΕΑ σε κάθε κατεύθυνση. Τα εδάφη στην περιοχή του Περιστερίου είναι ιδιαιτέρως σαθρά και αυτό ήταν γνωστό από το 1998. Αυτός είναι και ο κυριότερος λόγος για την καθυστέρηση τόσο της έναρξης των εργασιών όσο και της ολοκλήρωσης της σαν ένα από τα τελευταία τμήματα της Εγνατίας Οδού.

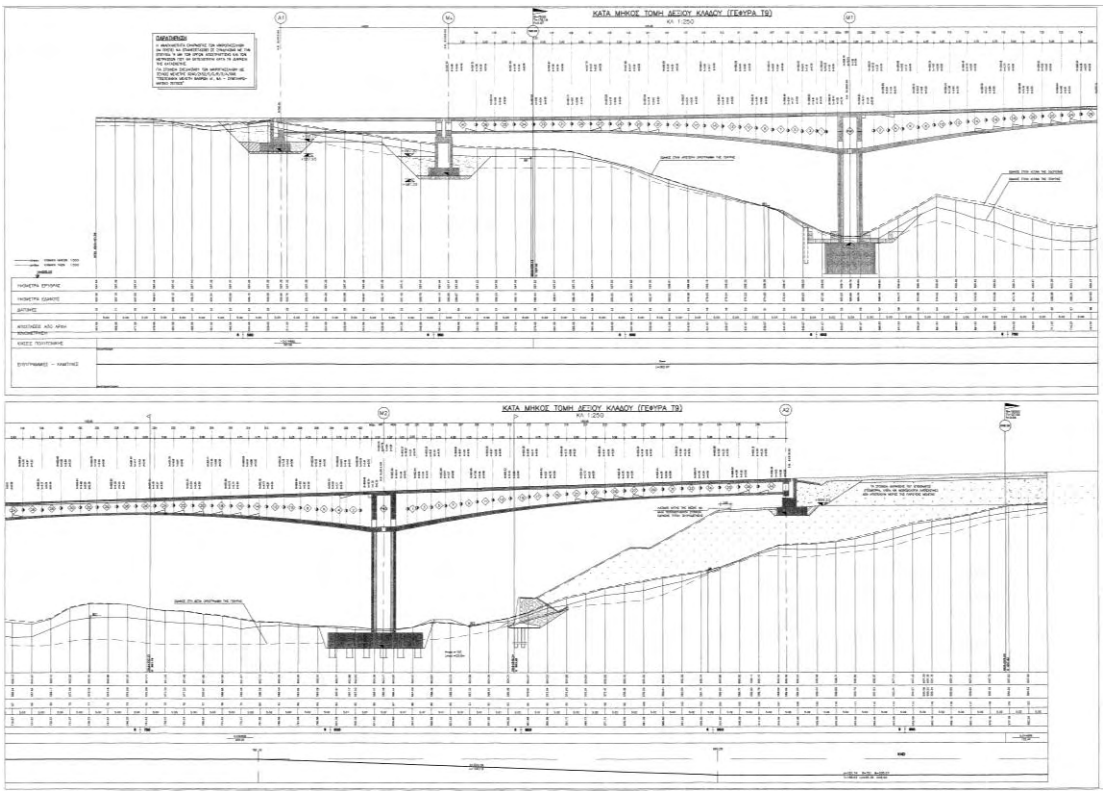
Είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα. Κάθε κλάδος αποτελείται από δύο ακρόβαθρα στις άκρες (Α1 και Α2), τρία βάθρα (ΜΑ, Μ1 και Μ2) και το κατάστρωμα όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.1 και 4.2. Συγκεκριμένα για τον δεξιό κλάδο Τ9, το κατάστρωμα έχει συνολικό μήκος 408.38 μέτρα και μεταβλητή διαμήκη κλίση για την οποία θα γίνει αναλυτικότερη περιγραφή στην παράγραφο 4.7.

Για τον καλύτερο προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της γέφυρας, αναφέρονται στις παρακάτω παραγράφους αναλυτικά οι λεπτομέρειες των τμημάτων της.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 4.1: Δεξιά όψη του δεξιού κλάδου Τ9



Σχήμα 4.2: Κατά μήκος τομή του δεξιού κλάδου (πηγή Εγνατία οδός)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

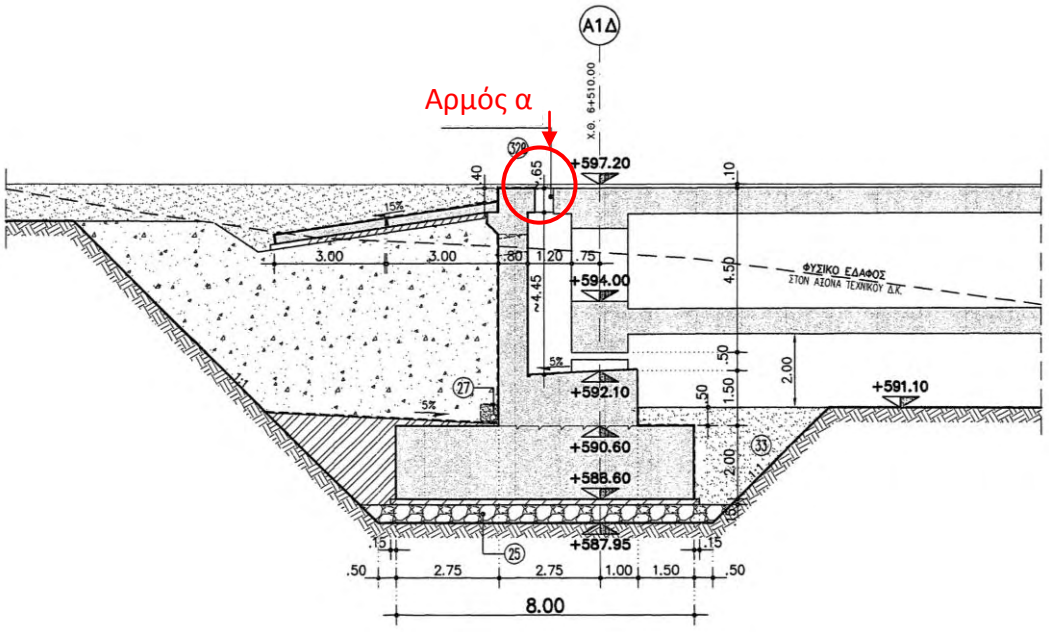
4.2 Ακρόβαθρο Α1δ

Το ακρόβαθρο Α1δ αποτελεί μία από τις δύο ακραίες στηρίξεις της γέφυρας Τ9. Το βάθρο αυτό έρχεται σε επαφή με το κατάστρωμα μέσω δύο ελαστομεταλλικών εφεδράνων αγκυρούμενου τύπου (τύπου 4). Αναλυτική περιγραφή των τύπων εφεδράνων που χρησιμοποιούνται στην γέφυρα θα γίνει στην παράγραφο 4.8.

Ακολουθούν σχέδια στα οποία φαίνεται πλήρως η γεωμετρία του βάθρου καθώς επίσης και των εφεδράνων.

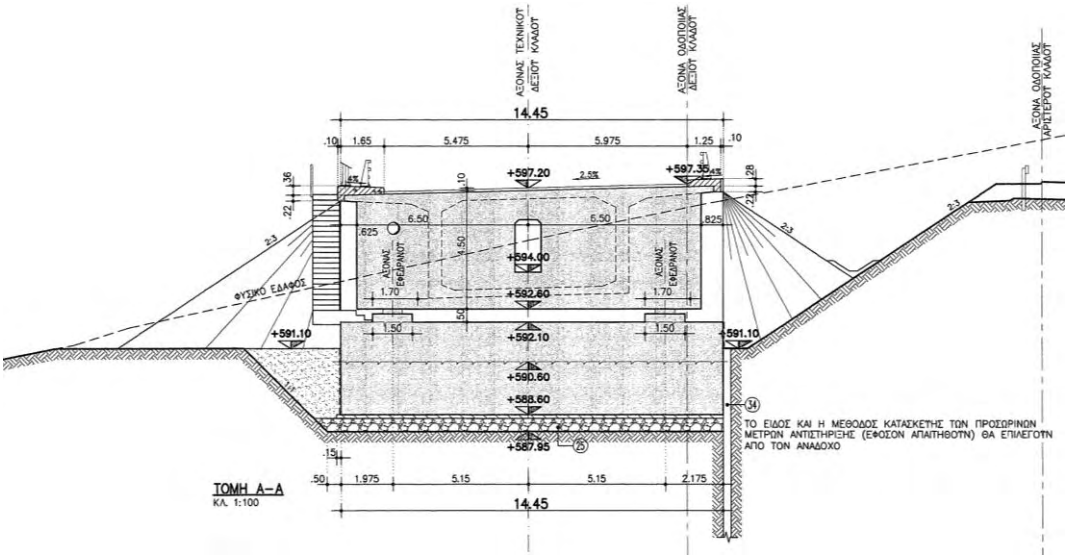
Ποιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 4.3 βλέπουμε την κατά μήκος τομή. Εδώ παρατηρούμε και τον αρμό συστολής-διαστολής ανάμεσα στο ακρόβαθρο και το κατάστρωμα. Ο αρμός αυτός καλύπτεται καθ' όλο το πλάτος του καταστρώματος από ελαστομεταλλικό στεγανό αρμό διαστολής βαρέως τύπου (ενδεικτικού τύπου MAURER swivel joist). Το απαιτούμενο πλάτος του διάκενου είναι ίσο με α=150mm.

Στο σχήμα 4.4 βλέπουμε την εγκάρσια τομή του ακρόβαθρου Α1δ. Το αποτέλεσμα στο σχεδιαστικό πρόγραμμα του συγκεκριμένου ακρόβαθρου, φαίνεται στο Σχήμα 4.5 όπου βλέπουμε μία τρισδιάστατη όψη του μοντέλου όπου φαίνονται και τα εφέδρανα.

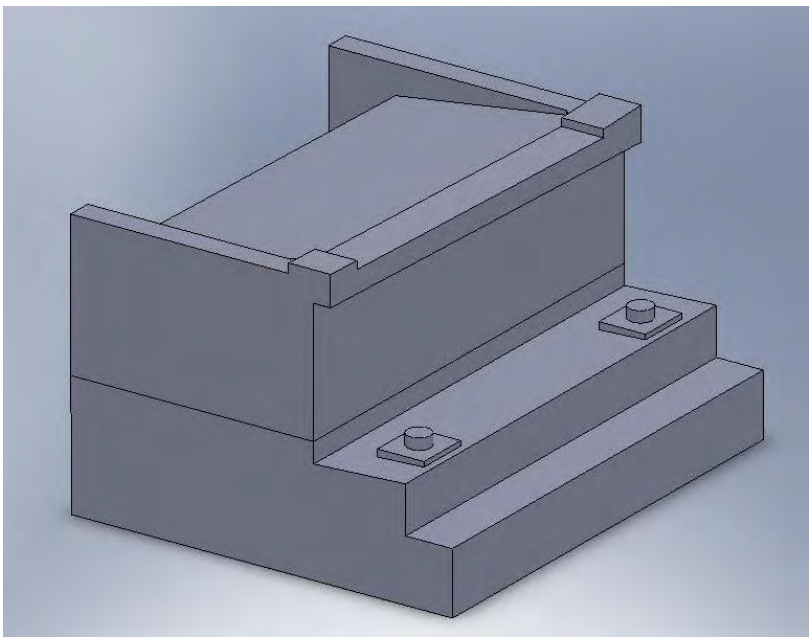


Σχήμα 4.3 : Κατά μήκος τομή ακρόβαθρου Α1δ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 4.4 : Εγκάρσια τομή του ακρόβαθρου Α1δ



Σχήμα 4.5 : Τρισδιάστατη όψη του μοντέλου του ακρόβαθρου Α1δ στο σχεδιαστικό πρόγραμμα

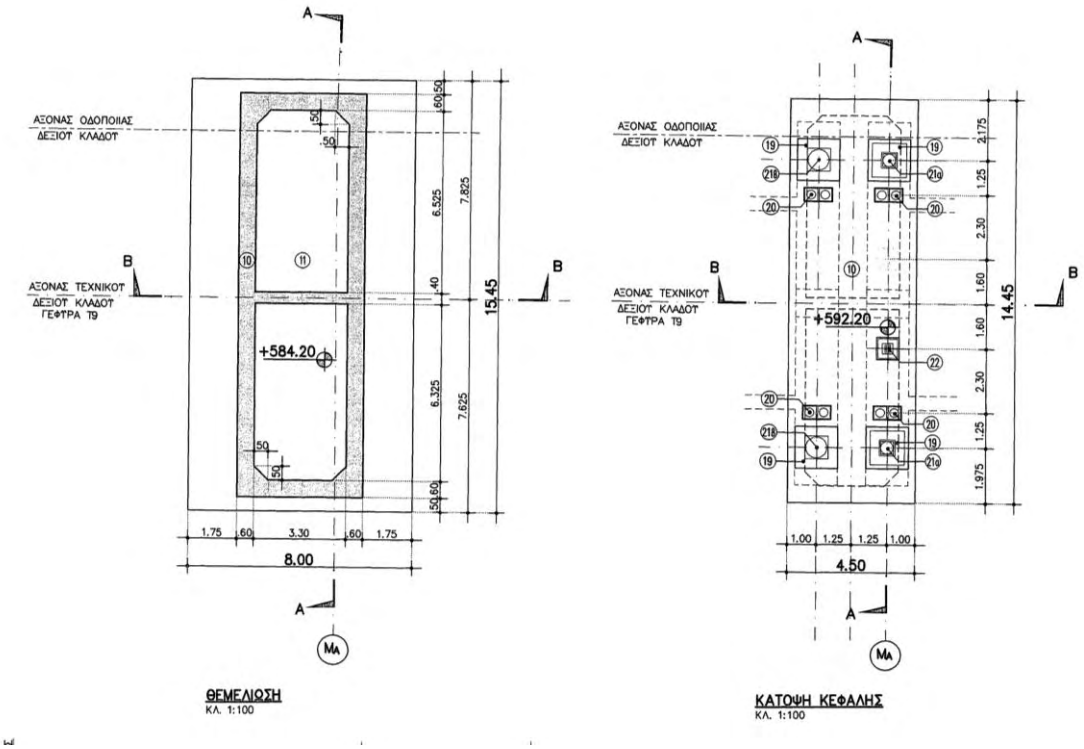
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

4.3 Βάθρο ΜΑδ

Το βάθρο ΜΑδ βρίσκεται σε απόσταση 42,75 μέτρων από το ακρόβαθρο Α1δ (απόσταση μεταξύ αξόνων) και έχει ύψος 15,1 μέτρα. Το συνολικό του ύψος απαρτίζεται από την βάση του, ύψους 2 μέτρων, τον κεντρικό κορμό του βάθρου, ύψους 5 μέτρων και τέλος από τα εφέδρανα της κεφαλής του βάθρου με ύψος 0,51 μέτρα. Η διατομή της βάσης είναι ορθογωνική (8 x 15,45 μέτρα) ενώ ο κορμός του έχει σταθερή διατομή με διαστάσεις που φαίνονται στην κάτοψη του βάθρου στο Σχήμα 4.6.

Το ιδιαίτερο αυτού του βάθρου είναι ότι η επαφή του με το κατάστρωμα γίνεται μέσω εφεδράνων. Τα εφέδρανα που υπάρχουν ανάμεσα στην κεφαλή και το κατάστρωμα, επιτρέπουν την παραμόρφωσή και ολίσθηση τους και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις.

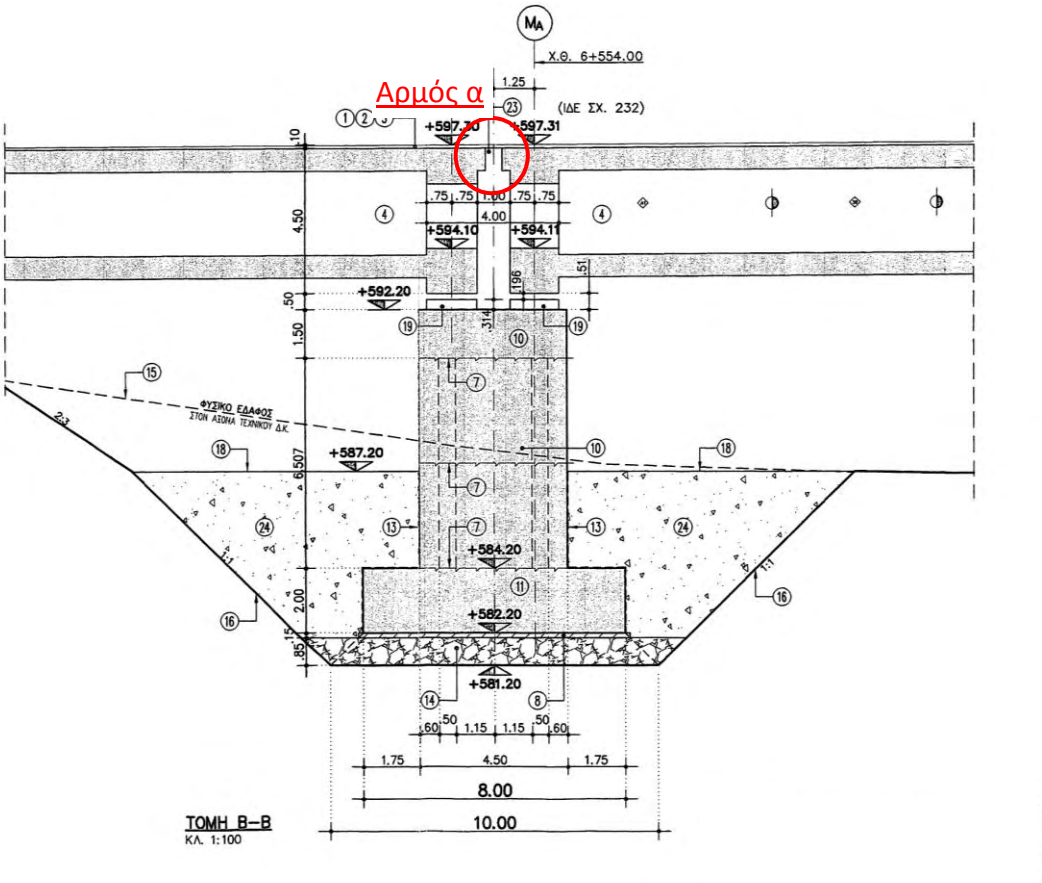
Όσον αφορά τα εφέδρανα, στο συγκεκριμένο βάθρο χρησιμοποιούνται δύο τύποι. Τα εφέδρανα *τύπου 4* επιτρέπουν παραμόρφωση και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις και φαίνεται η θέση τους στο Σχήμα 4.6 με τον δείκτη 21β. Τα εφέδρανα *τύπου ολίσθησης σφαιρικής έδρασης* επιτρέπουν ολίσθηση και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις και φαίνεται η θέση τους στο Σχήμα 4.6 με τον δείκτη 21α.



Σχήμα 4.6 : Κάτοψη θεμελίωσης και κεφαλής βάθρου ΜΑδ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

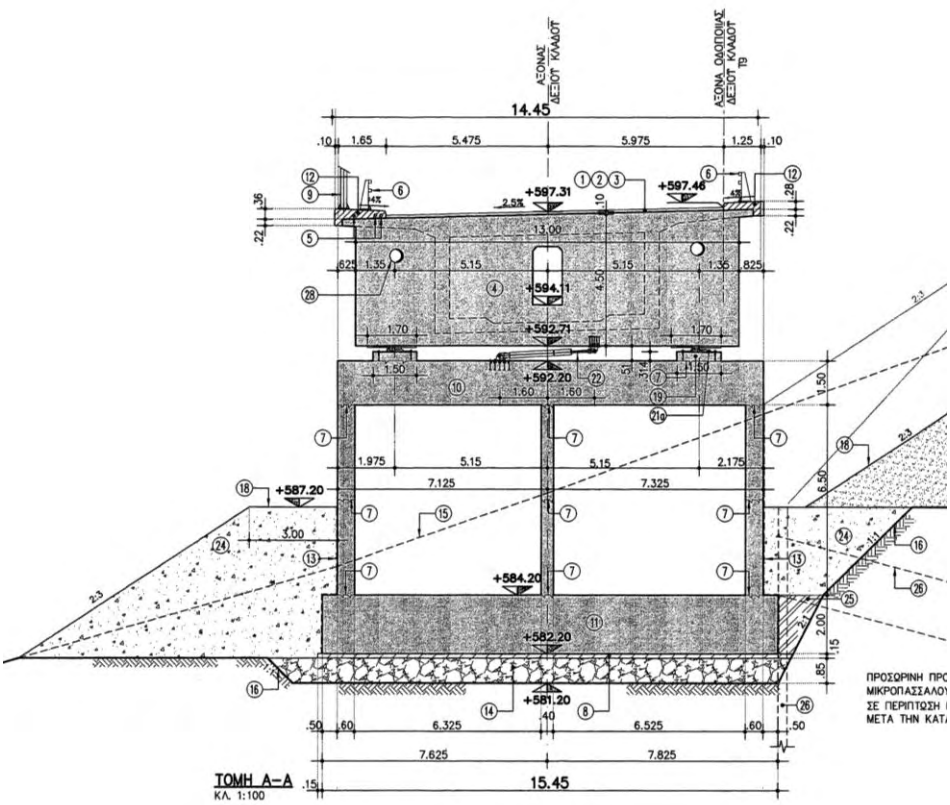
Στο Σχήμα 4.7 βλέπουμε την κατά μήκος τομή. Φαίνεται και ο αρμός συστολής-διαστολής ανάμεσα στα δύο επιμέρους-ενδιάμεσα ακρόβαθρα του καταστρώματος. Εδώ ουσιαστικά παρατηρούμε ότι το κατάστρωμα χωρίζεται στα δύο. Ο αρμός αυτός καλύπτεται καθ' όλο το πλάτος του καταστρώματος από ελαστομεταλλικό στεγανό αρμό διαστολής βαρέως τύπου (ενδεικτικού τύπου MAURER swivel joist). Το απαιτούμενο πλάτος του διάκενου είναι ίσο με α=580mm.



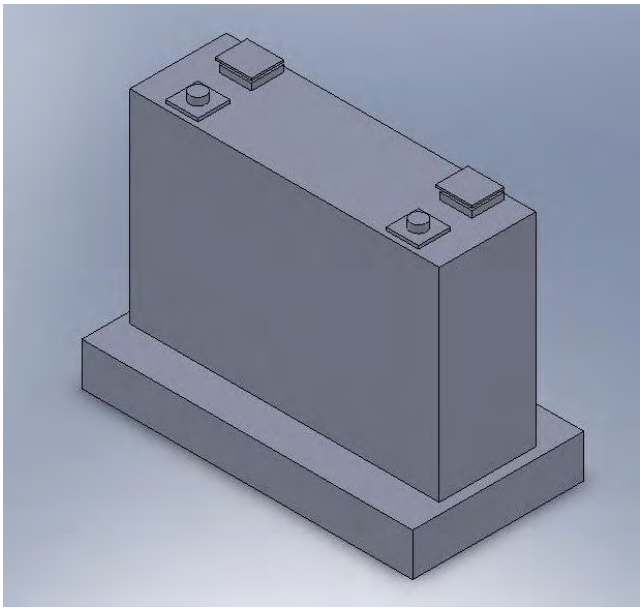
Σχήμα 4.7 : Κατά μήκος τομή βάθρου ΜΑδ

Ακολουθούν η εγκάρσια τομή στο βάθρο ΜΑδ (Σχήμα 4.8) και το τρισδιάστατο μοντέλο του σχεδιαστικού προγράμματος. Στο Σχήμα 4.9 φαίνεται η γεωμετρία του μεσόβαθρου ΜΑδ, των εφεδράνων ολίσθησης και εφεδράνων παραμόρφωσης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 4.8 : Εγκάρσια τομή βάθρου ΜΑδ

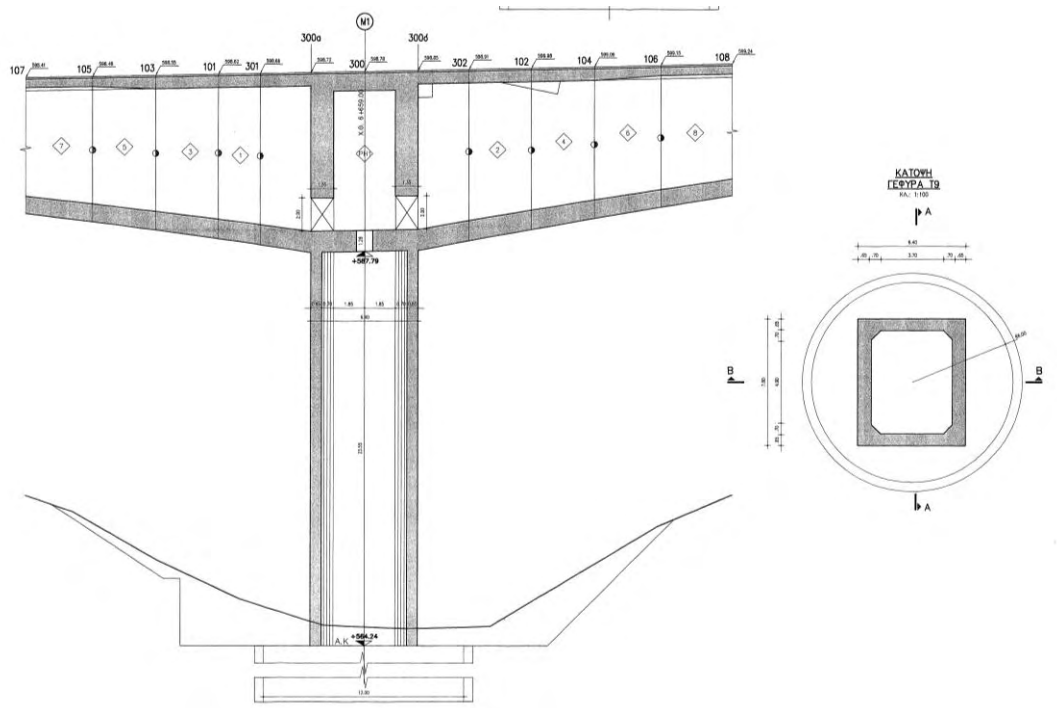


Σχήμα 4.9 : Τρισδιάστατη όψη μοντέλου του μεσόβαθρου ΜΑδ στο σχεδιαστικό πρόγραμμα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

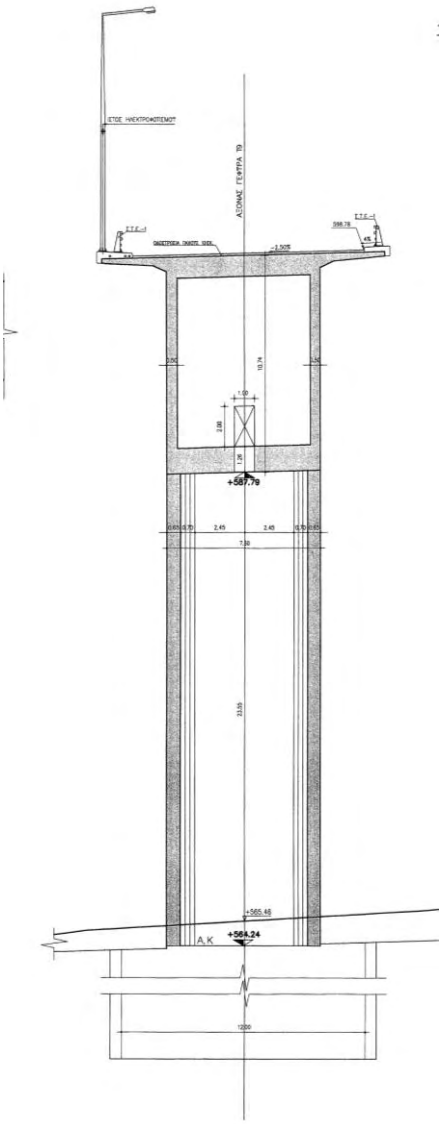
4.4 Βάθρο Μ1δ

Το βάθρο Μ1δ βρίσκεται σε απόσταση 103,75 μέτρων από το βάθρο ΜΑδ (απόσταση μεταξύ αξόνων). Ο κορμός του ύψους 23,55 μέτρων είναι ορθογωνικής εξωτερικής διατομής και οκταγωνικής εσωτερικής διατομής. Η διατομή της βάσης είναι κυκλικής διατομής διαμέτρου 12 μέτρων. Οι διαστάσεις και γεωμετρίες φαίνονται στην κάτοψη και κατά μήκος τομή του βάθρου στο Σχήμα 4.10, στην εγκάρσια τομή του βάθρου στο Σχήμα 4.11 και στο τρισδιάστατο μοντέλο του σχεδιαστικού προγράμματος στο Σχήμα 4.12.

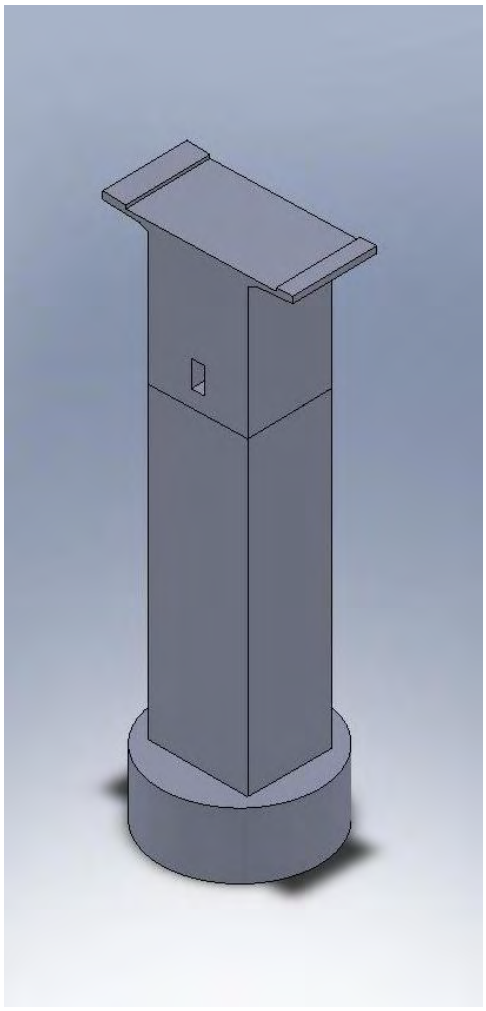


Σχήμα 4.10 : Κατά μήκος τομή βάθρου Μ1δ και κάτοψη βάσης βάθρου Μ1δ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 4.11 : Εγκάρσια τομή βάθρου Μ1δ

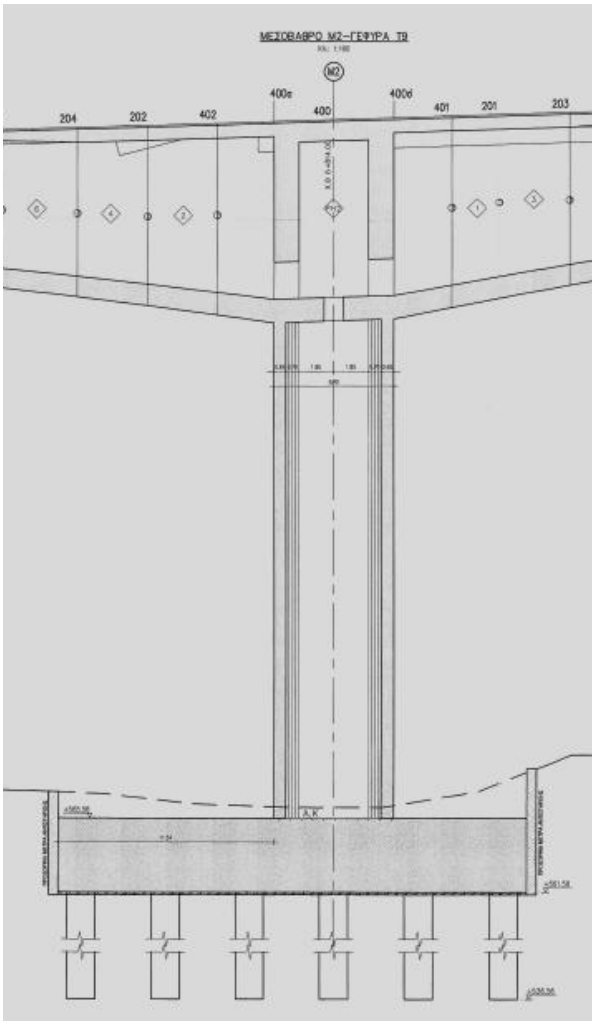


Σχήμα 4.12 : Τρισδιάστατη όψη βάθρου και φορέα Μ1δ στο σχεδιαστικό πρόγραμμα

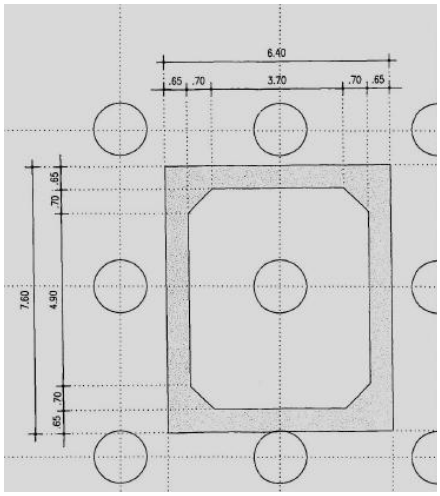
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

4.5 Βάθρο Μ2δ

Το βάθρο Μ1δ βρίσκεται σε απόσταση 155 μέτρων από το βάθρο Μ1δ (απόσταση μεταξύ αξόνων). Ο κορμός του ύψους 26.77 μέτρων είναι ορθογωνικής εξωτερικής διατομής και οκταγωνικής εσωτερικής διατομής. Η βάση είναι ορθογωνικής διατομής (30,2x25 μέτρα) ύψους 4 μέτρα. Οι διαστάσεις και γεωμετρίες φαίνονται στην κατά μήκος τομή και στην κάτοψη του βάθρου στο Σχήμα 4.13 και Σχήμα 4.14 αντίστοιχα, στην εγκάρσια τομή του βάθρου στο Σχήμα 4.16 και στο τρισδιάστατο μοντέλο του σχεδιαστικού προγράμματος, στο Σχήμα 4.17.



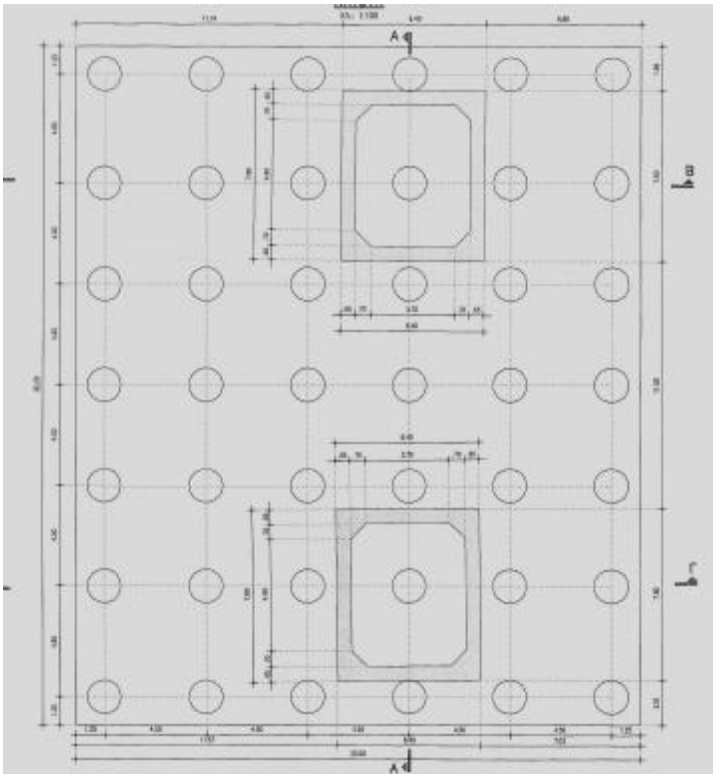
Σχήμα 4.13 : Κατά μήκος τομή βάθρου Μ2δ



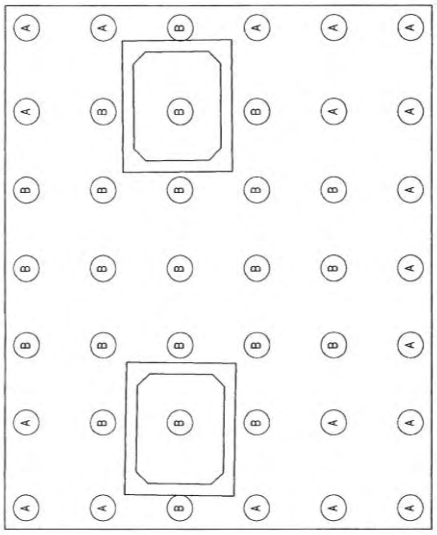
Σχήμα 4.14 : Κάτοψη κορμού βάθρου Μ2δ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Το ιδιαίτερο με αυτό το βάθρο είναι ότι κάτω από τη βάση υπάρχουν πάσσαλοι από οπλισμένο σκυρόδεμα Β25, οι οποίοι βυθίζονται άλλα 25 μέτρα στο έδαφος. Αυτοί οι πάσσαλοι θεμελίωσης τύπου Φ150 είναι 42 σε αριθμό και ανάλογα με τον οπλισμό χωρίζονται σε δύο κατηγορίες (Α και Β). Στο Σχήμα 4.15 φαίνεται η θέση των πασσάλων αυτών και στο Σχήμα 4.16 η θέση ανάλογα με τον τύπο οπλισμού.

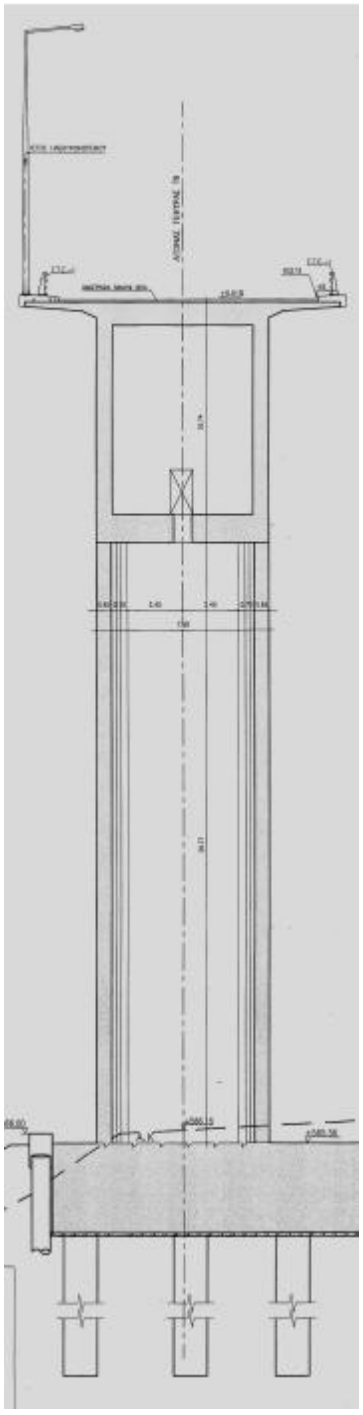


Σχήμα 4.15 : Κάτοψη βάσης βάθρου Μ2δ - θέσεις πασσάλων

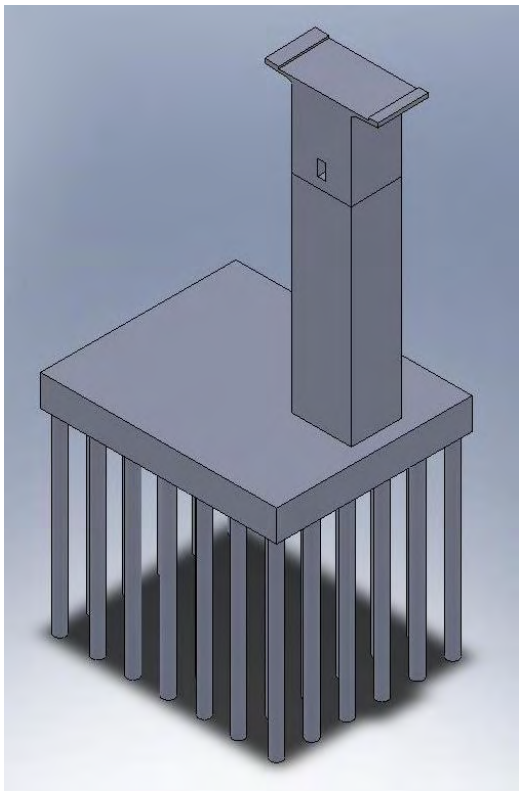


Σχήμα 4.16 : Θέσεις πασσάλων τύπου Α και τύπου Β

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 4.17 : Εγκάρσια τομή βάθρου Μ2δ



Σχήμα 4.18 : Τρισδιάστατη όψη βάθρου με φορέα και θεμελίωση βάθρου Μ2δ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

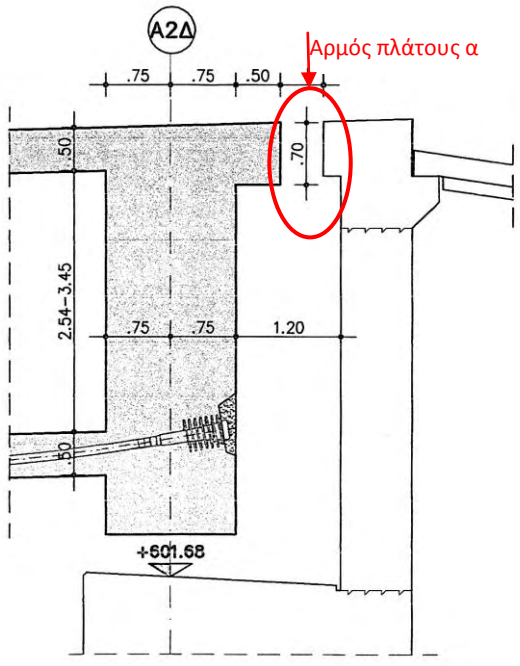
4.6 Ακρόβαθρο Α2δ

Το ακρόβαθρο Α2δ αποτελεί μία από τις δύο ακραίες στηρίξεις της γέφυρας Τ9. Το βάθρο αυτό έρχεται σε επαφή με το κατάστρωμα μέσω δύο εφεδράνων ολίσθησης σφαιρικής έδρασης. Αναλυτική περιγραφή των τύπων εφεδράνων που χρησιμοποιούνται στην γέφυρα θα γίνει όπως προαναφέραμε στην παράγραφο 4.8.

Ακολουθούν σχέδια στα οποία φαίνεται πλήρως η γεωμετρία του βάθρου καθώς επίσης και των εφεδράνων.

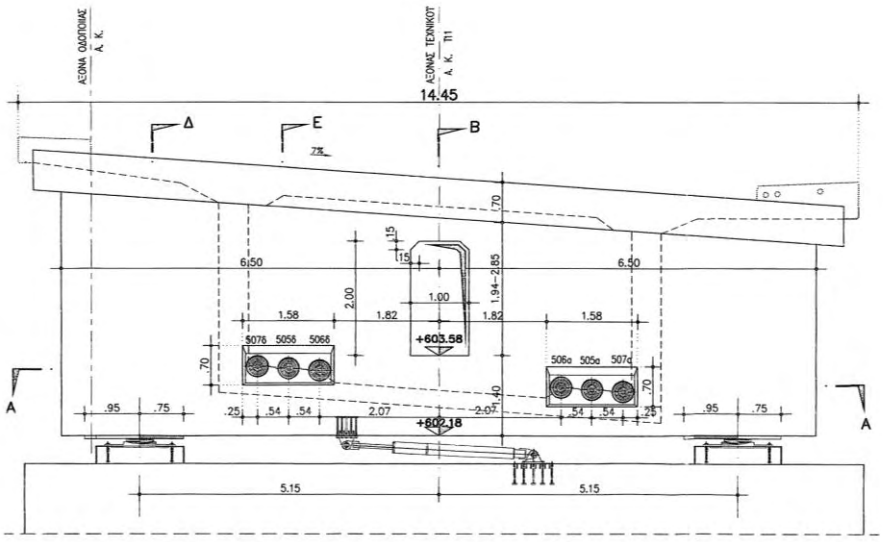
Ποιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 4.19 βλέπουμε την κατά μήκος τομή. Εδώ παρατηρούμε και τον αρμό συστολής-διαστολής ανάμεσα στο ακρόβαθρο και το κατάστρωμα. Ο αρμός αυτός καλύπτεται καθ' όλο το πλάτος του καταστρώματος από ελαστομεταλλικό στεγανό αρμό διαστολής βαρέως τύπου (ενδεικτικού τύπου MAURER swivel joist). Το απαιτούμενο πλάτος του διάκενου είναι ίσο με α=310mm.

Στο Σχήμα 4.20 βλέπουμε την εγκάρσια τομή του ακρόβαθρου Α2δ. Το αποτέλεσμα στο σχεδιαστικό πρόγραμμα του συγκεκριμένου ακρόβαθρου, φαίνεται στο Σχήμα 4.6 όπου βλέπουμε μία τρισδιάστατη όψη του μοντέλου όπου φαίνονται και τα εφέδρανα.

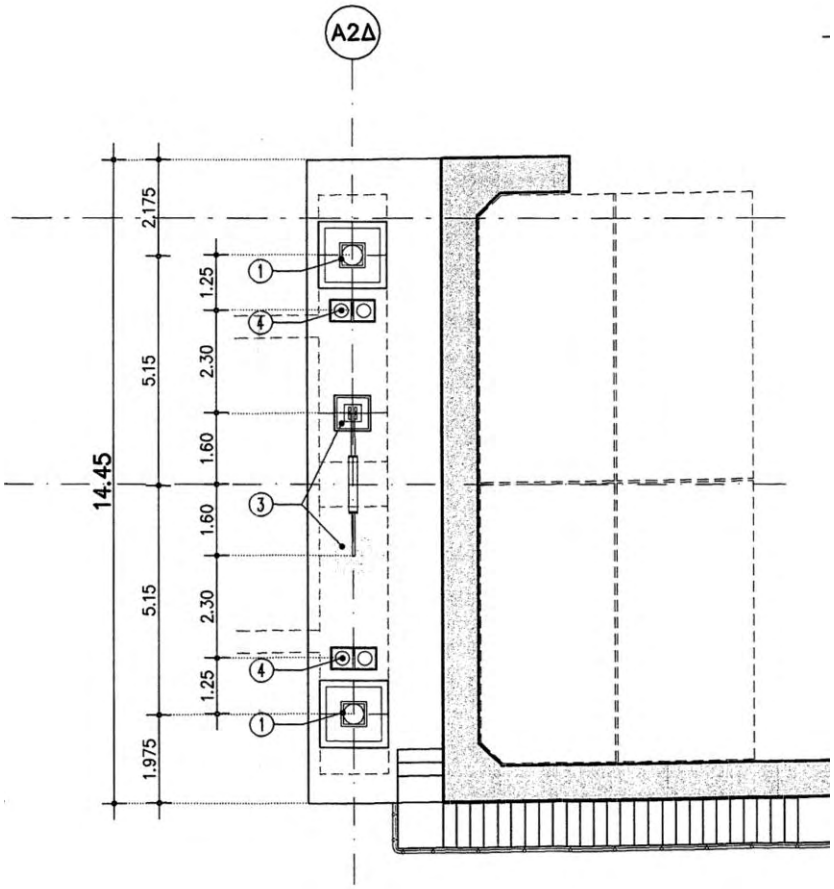


Σχήμα 4.19 : Κατά μήκος τομή ακρόβαθρο Α2δ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

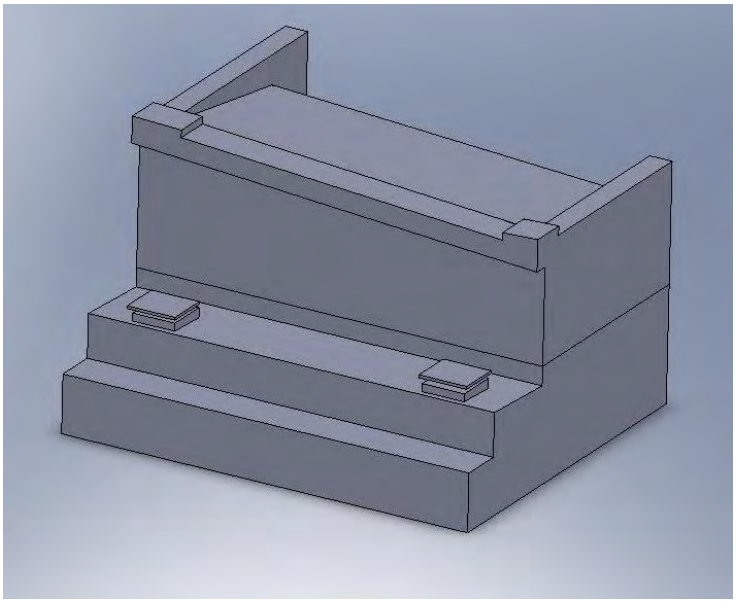


Σχήμα 4.20 : Εγκάρσια τομή διαδοκίδας ακρόβαθρου Α2δ



Σχήμα 4.21 : Κάτοψη ακρόβαθρου Α2δ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



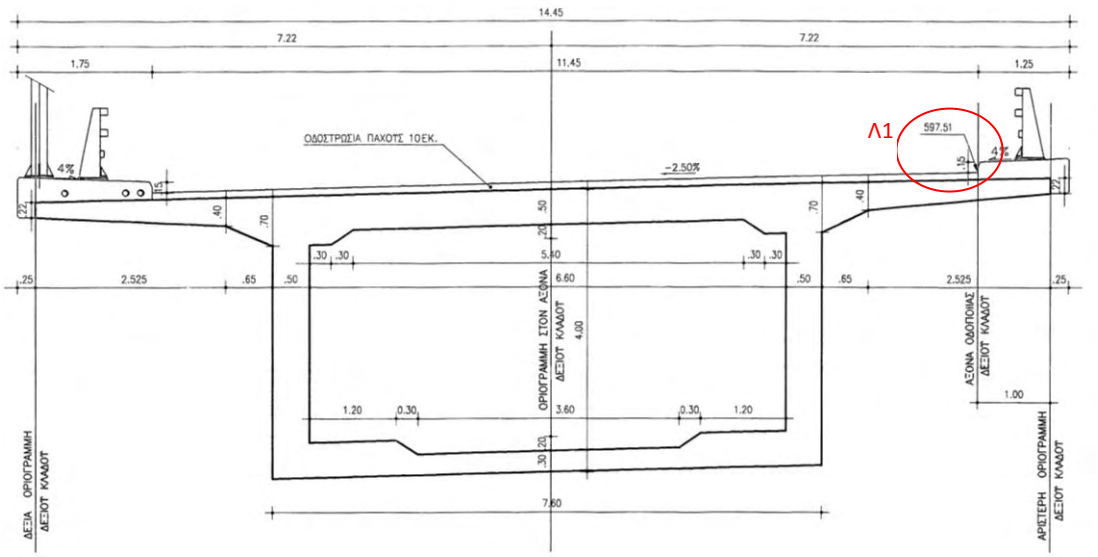
Σχήμα 4.22 : Τρισδιάστατη όψη ακρόβαθρου Α2δ στο σχεδιαστικό πρόγραμμα

4.7 Κατάστρωμα

Συνολικά το κατάστρωμα έχει μήκος 408,38 μέτρα (απόσταση αξόνων Α1δ και Α2δ) και πλάτος σταθερό 14,45 μέτρα. Εκτός από την μεταβλητή διαμήκη κλίση σε όλο του το μήκος, έχει και μεταβλητή εγκάρσια επίκληση η οποία ξεκινάει με -2,5 % από το ακρόβαθρο Α1δ και μεταβάλλεται μέχρι το Α2δ όπου έχει επίκλιση +7%. Ο υπολογισμός της επίκλισης στο μοντέλο υπολογίζεται σε μοίρες, βρίσκοντας την αντίστροφη εφαπτομένη της επίκλησης. Το ποσοστό της επίκλησης δίνεται στα σχέδια της κάθε διατομής του καταστρώματος του δεξιού κλάδου (π.χ. Σχήμα 4.23).

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του καταστρώματος της γέφυρας Τ9 του Περιστερίου της Εγνατίας οδού είναι ότι αποτελείται από 95 τμήματα (σπονδύλους) τα οποία κατασκευάστηκαν με μέγιστο βήμα μήκους 7,25 μέτρων. Αυτά τα τμήματα προέρχονται από 96 διαφορετικές διατομές οι οποίες διαφέρουν μεταξύ τους σε γεωμετρία και εγκάρσια επίκληση. Στα σχέδια των προβόλων και των διατομών καταστρώματος παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κάθε διατομής, κάποια εκ των σχεδίων παρουσιάζονται παρακάτω. Το αποτέλεσμα είναι στην κατά μήκος τομή της γέφυρας, το κατάστρωμα να έχει παραβολικά μεταβαλλόμενη κάτω πλευρά, ενώ η επάνω είναι μία καμπύλη που ακολουθεί την μεταβαλλόμενη ανηφορική κλίση όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4.1 και 4.2 της παραγράφου 4.1.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

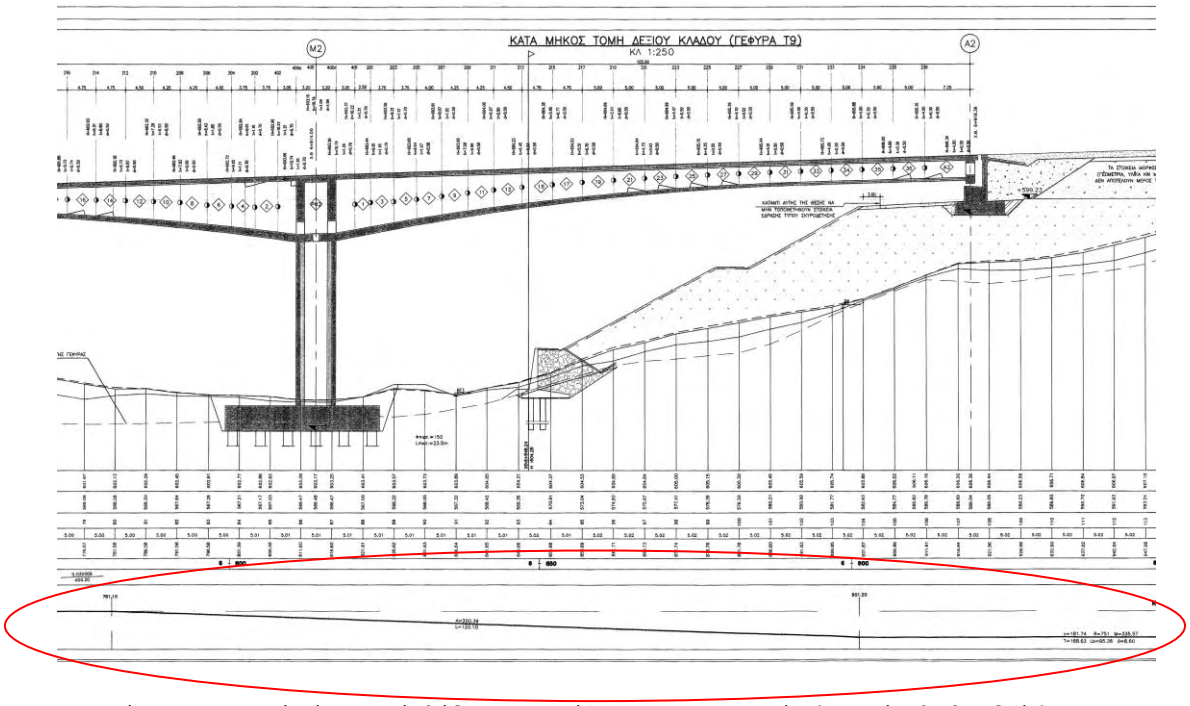


Σχήμα 4.23 : Διατομή Νο 136 (εγκάρσια τομή καταστρώματος 51,25 μέτρα από τον άξονα του Α1δ)

Στο Σχήμα 4.23 παρατηρούμε ότι αναγράφεται το υψόμετρο (λεπτομέρεια Λ1) του άξονα οδοποιίας του δεξιού κλάδου (Τ9). Σύμφωνα με αυτό το υψόμετρο, σε σχέση με το ύψος αναφοράς, καθορίστηκε η υψομετρική διαφορά της μιας διατομής από την άλλη. Αποτέλεσμα του παραπάνω είναι η δημιουργία μεταβλητής διαμήκους κλήσης του καταστρώματος.

Επίσης να αναφέρουμε και ένα άλλο σημαντικό σημείο της γεωμετρίας του κλάδου Τ9. Στην Χ.Θ 6+781,1 που αντιστοιχεί σε απόσταση από τον άξονα Α1δ ίση με 271,1 μέτρα, υπάρχει έναρξη κυκλικού τόξου ακτίνας καμπυλότητας R=751 μέτρα. Το συγκεκριμένο κυκλικό τόξο, το οποίο γίνεται και πάλι ευθυγραμμία στην Χ.Θ 6+901,2, προσδίδει σε αυτό το τμήμα του κλάδου μία δεξιά στροφή ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Να αναφέρουμε ότι τα υπόλοιπα τμήματα του κλάδου Τ9 είναι ευθύγραμμα. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 4.24 της κατά μήκους τομής του κλάδου, φαίνονται τα δεδομένα της κλωθοειδούς. Οι διατομές που τοποθετούνται στο μεσοδιάστημα της κλωθοειδούς και σχηματίζουν τους σπονδύλους του τμήματος αυτού, ακολουθούν περιφέρεια κύκλου ακτίνας 751 μέτρων. Ως αποτέλεσμα είναι η σχετική εγκάρσια μετατόπιση τους που προσδίδει στο τμήμα αυτό στροφή.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

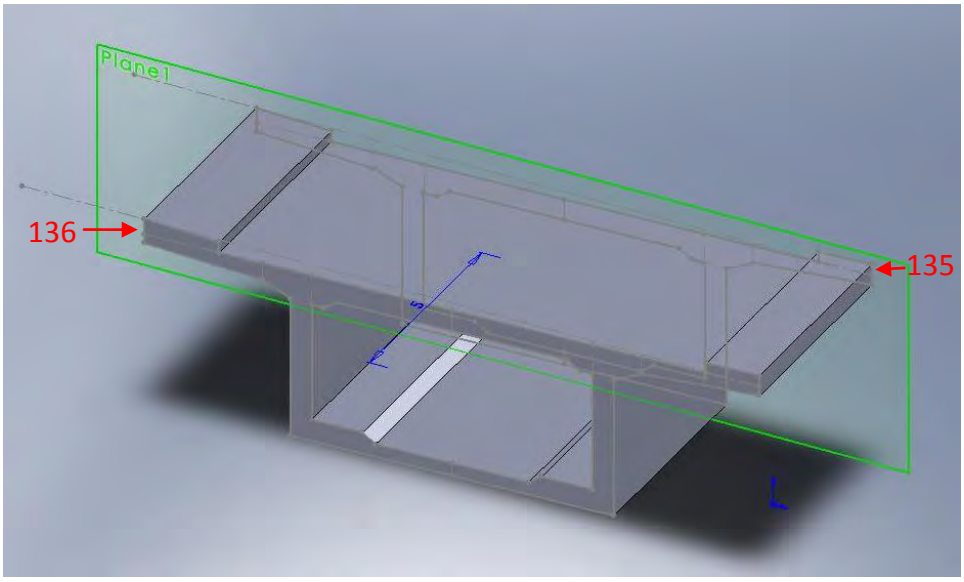


Σχήμα 4.24 : Κατά μήκος τομή κλάδου Τ9 της γέφυρας του Περιστερίου(στοιχεία κλωθοειδούς)

Συνοψίζοντας τον τρόπο σχεδιασμού του καταστρώματος στο σχεδιαστικό πρόγραμμα, σε κάθε part που απαρτίζεται από δύο διαδοχικές διατομές:

- Αρχικά τοποθετούσαμε την αρχική διατομή σε ένα κατακόρυφο επίπεδο
- Κατόπιν τοποθετούσαμε την επόμενη διατομή σε επίπεδο παράλληλο του πρώτου στην απόσταση που προβλέπουν τα σχέδια
- Δίναμε την κατακόρυφη μετατόπιση της δεύτερης διατομής σύμφωνα με την σχετική απόσταση του άξονα οδοποιίας.
- Δίναμε την εγκάρσια μετατόπιση της δεύτερης διατομής σύμφωνα με την σχετική μεταξύ τους απόσταση όταν οι διατομές μας τοποθετούνται σε περιφέρεια κύκλου ακτίνας 751 μέτρων
- Με την εντολή “Lofted Boss” δημιουργούμε ένα solid part (όπως και στον δεξιό κλάδο της γέφυρας του Μετσόβου)
- Τέλος με την εντολή “Lofted Cut” αφαιρούμε το εσωτερικό τμήμα του στερεού σώματος ώστε να λάβουμε την τελική κιβωτιοειδή μορφή του σχήματος 4.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 4.25 : Τρισδιάστατη όψη τμήματος του καταστρώματος κλάδου Τ9 (διατομές 136 & 135)

4.8 Εφέδρανα

Τύπου 4

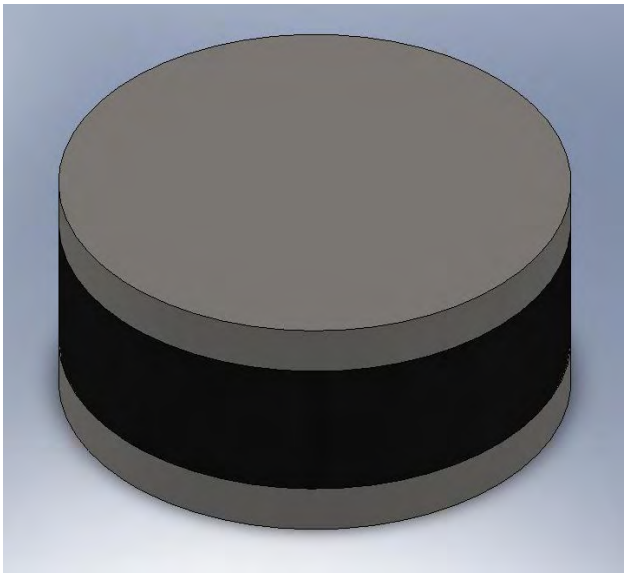
Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα αποτελούνται από εναλλασσόμενες στρώσεις ελαστομερούς και χαλύβδινων φύλλων. Τύπου 4 είναι τα αγκυρούμενα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με διπλά εξωτερικά μεταλλικά ελάσματα και βλήτρα αγκύρωσης. Στον κλάδο Τ9 τοποθετούνται στα σημεία όπως αυτά φαίνονται στο Σχήμα 4.29 με τον δείκτη 2. Τα συγκεκριμένα υπόκεινται σε παραμόρφωση και στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις και έχουν τις εξής διαστάσεις:

- Διάμετρος Φ750mm
- Πάχος ελαστομερούς 210mm(14 στρώσεις x 15mm)
- Συνολικό πάχος εφεδράνου 355mm

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

BEARING TYPE 4
Elastomeric bearings with external plates and pins that connect to suitable steel plates in order to secure the bearing to the structure.

Σχήμα 4.26 : Ελαστομεταλλικό εφέδρανο *τύπου 4*



Σχήμα 4.27 : Τρισδιάστατη όψη ελαστομεταλλικού εφεδράνου *τύπου 4* στο σχεδιαστικό πρόγραμμα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Εφέδρανα ολίσθησης σφαιρικής έδρασης

Τα εφέδρανα σφαιρικής ολίσθησης που χρησιμοποιούνται στον κλάδο Τ9, συγκεκριμένα στα σημεία του σχήματος 4.29 με τον δείκτη 1 και είναι ενδεικτικού τύπου “MAURER KGa”. Είναι δηλαδή γενικώς κινούμενα εφέδρανα. Κινήσεις στην x- και y-διεύθυνση είναι επιτρεπτές, αλλά όχι η μετάδοση εσωτερικών οριζόντιων δυνάμεων.

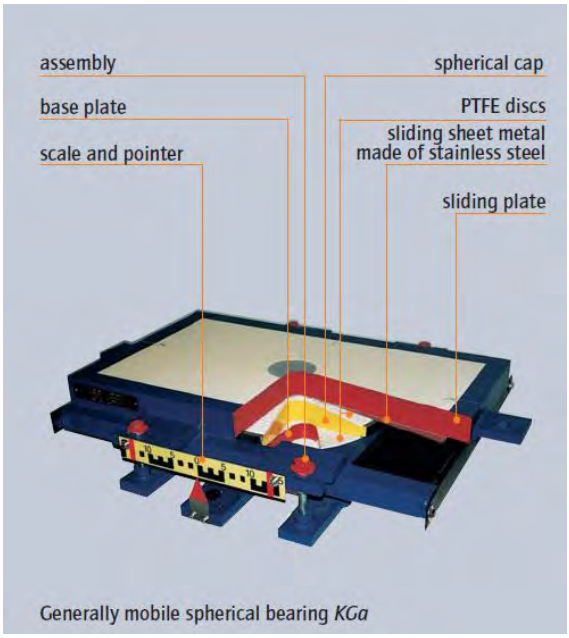
Generally mobile bearing KGa

Movements in x- and y-direction are possible, but no transmission of outside horizontal forces. The spherical cap does not contribute to the transmission of horizontal forces. Rotations laterally to the direction of displacement, and thus a skewing of both restraints relative to the base plate, are leveled by tilting units, which are arranged at the base plate and are able to roll off. Frictional resistances in the contact area between guide and tilting units are kept low by suitable sliding surfaces.

Design

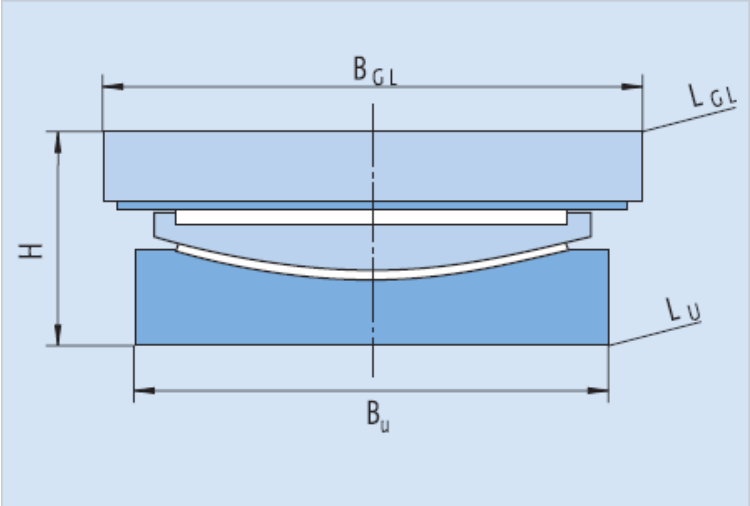
A PTFE disc is inserted into the spherically machined out surface of the base plate. The hard-chrome plated lower surface of the spherical cap serves as sliding surface. A further PTFE disc is inserted into the flat top of the spherical cap, which slides on an austenitic, chrome nickel- alloyed steel sheet, which is connected shear-resistantly to the sliding plate.

To increase their load bearing capacity the PTFE discs are embedded into the steel approximately for the half of their thickness. The PTFE discs are provided with recesses (lubrication bore reliefs), which serve for storing a special lubricant to guarantee a permanent lubrication of the sliding surfaces. To achieve small coefficients of friction the chrome-plated and/or austenitic sliding surface is finished with smallest surface roughness.



Σχήμα 4.28 : Σχεδίαση και τεχνικά χαρακτηρηστικά σύμφωνα με “MAURER SOHNE”

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



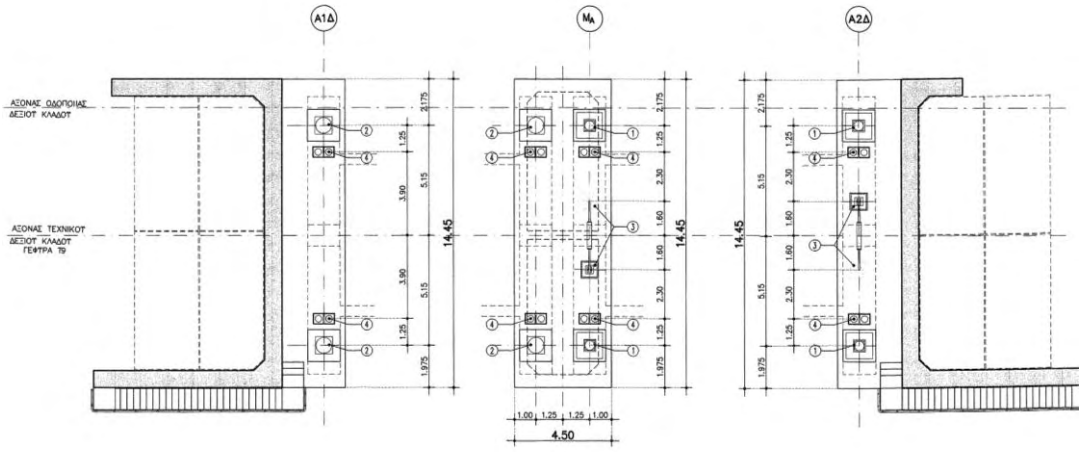
Ενδεικτικά σύμφωνα με τις προδιαγραφές των σφαιρικών εφεδράνων τύπου “MAURER KGa”, και συγκεκριμένα κατακόρυφης φόρτισης 8000 kN (KGa-8):

KGa-8	load V kN	H mm	B_u L_u mm
Permissible concrete pressure = 26 N/mm2	8000	145	600

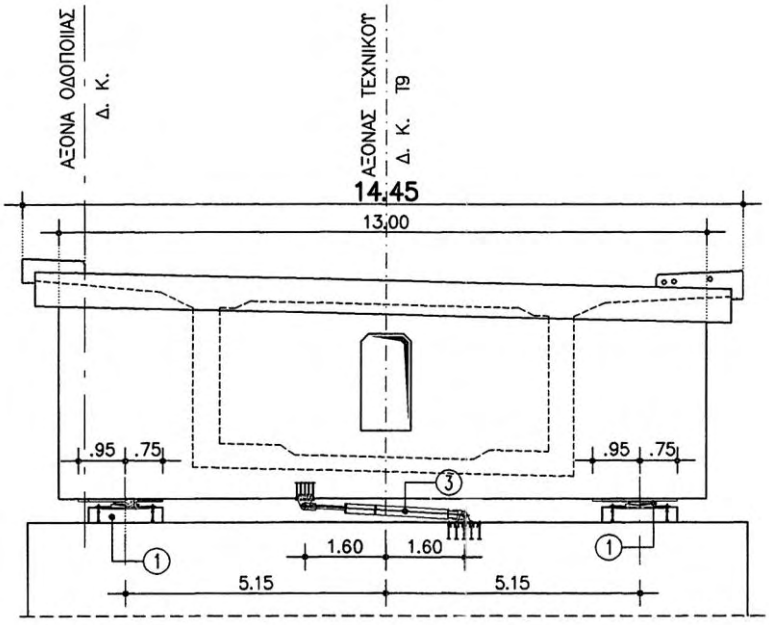
Στον συγκεκριμένο κλάδο τα μεγέθη σχεδιασμού όσον αφορά την πλάκα ολίσθησης είναι τα παρακάτω :

- Διαστάσεις πλάκας ολίσθησης L_{GL} x B_{GL}=1.5m x 1.7m
- Τοποθετείται έκκεντρα κατά την εγκάρσια διεύθυνση (0.75 + 0.95 = 1.7) ώστε να υπάρχει περιθώριο για την κάλυψη των εγκάρσιων ερπυστικών παραμορφώσεων του εδάφους

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 4.29 : Κάτοψη σχεδίου Τ9 όπου φαίνονται οι θέσεις των 2 διαφορετικών τύπων εφεδράνων (δείκτες 1 & 2)



Σχήμα 4.30 : Εγκάρσια τομή. Χαρακτηριστική για τοποθέτηση εφεδράνου τύπου ολίσθησης σφαιρικής έδρασης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Κεφάλαιο 5

ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ (Τ9)

Η διαδικασία δυναμικής ανάλυσης της γέφυρας Τ9 του Περιστερίου με πεπερασμένα στοιχεία έγινε με τη χρήση του προγράμματος COMSOL Multiphysics. Όπως και στο κεφάλαιο 3, όπου περιγράφεται η ίδια διαδικασία για τον δεξιό κλάδο της γέφυρας του Μετσόβου, έτσι και εδώ χρησιμοποιήσαμε τις ίδιες εντολές για την εισαγωγή του μοντέλου από το σχεδιαστικό πρόγραμμα στο Comsol. Παρακάτω θα περιγράψουμε αναλυτικότερα για τις ιδιαιτερότητες της γέφυρας Τ9 που οδήγησαν σε περεταίρω τροποποίηση του μοντέλου στο Comsol.

Αυτό το κεφάλαιο θα το χωρίσουμε σε τέσσερεις κύριες υποενότητες. Σε αυτές τις ενότητες θα περιγράψουμε τα διάφορα στάδια που πρέπει να ακολουθήσουμε ώστε να επιλύσουμε το ιδιοπρόβλημα και να λάβουμε ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές ανάλογα με τη γεωμετρία και τις συνοριακές συνθήκες της κατασκευής μας.

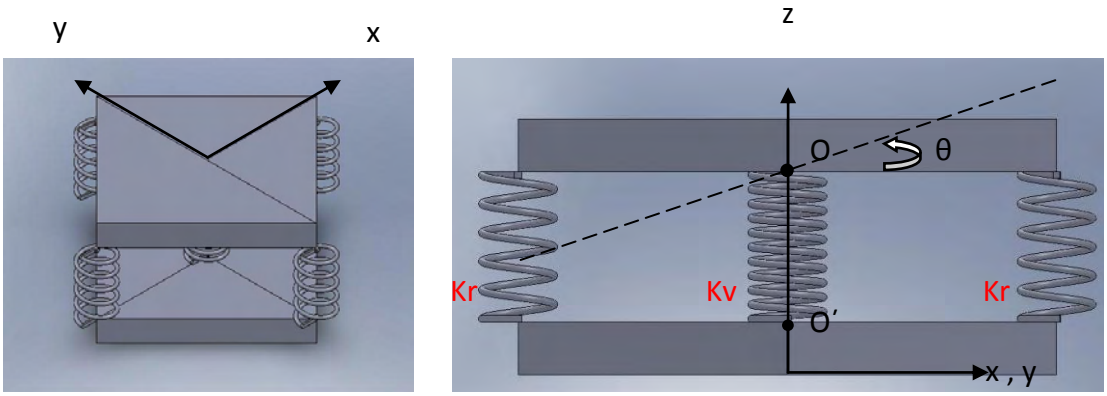
Κάνοντας μία ανασκόπηση στο κεφάλαιο 4, που αφορούσε το σχεδιασμό, το κατάστρωμα χωρίζεται σε δύο τμήματα με αρμό συστολής-διαστολής πάνω από το βάθρο ΜΑ όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.7. Το κατάστρωμα επίσης εδράζεται τόσο στο βάθρο ΜΑ όσο και στα άκρα του (βάθρα Α1 και Α2) σε δύο τύπους εφεδράνων (4 εφέδρανα «τύπου 4» και 4 εφέδρανα «τύπου ολισθαίνοντα σφαιρικής έδρασης», 8 στο σύνολο) όπως περιγράφηκαν αναλυτικότερα στην παράγραφο 4.8. Παρακάτω θα αναλύσουμε τον τρόπο μοντελοποίησης των εφεδράνων και των συνθηκών έδρασης του καταστρώματος γενικότερα, ανάλογα με το είδος εφεδράνων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

5.1 Εφέδρανα Τύπου 4

Όπως περιγράφηκαν και στην παράγραφο 4.8, αυτού του είδους εφεδράνων αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες στρώσεις ελαστικού και λεπτών μεταλλικών πλακών. Το ιδιαίτερο με αυτά τα εφέδρανα είναι ότι το φυσικό ή τεχνητό καουτσούκ που χρησιμοποιείται είναι πρακτικά ασυμπίεστο (Poisson ratio = 0.5) και επίσης δεν συμπεριφέρεται στο σύνολό του (μαζί με τις λεπτές μεταλλικές στρώσεις) σαν ισοτροπικό υλικό.

Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκαν μια σειρά από ελατήρια για να προσομοιώσουμε την ορθότροπη συμπεριφορά του εφεδράνου. Για λόγους απλοποίησης, το εφέδρανο σχεδιάστηκε όχι ως κυλινδρικό, αλλά ως δύο ορθογώνιες παραλληλεπίπεδες μεταλλικές πλάκες πάχους 0,0725m (οι πλάκες επαφής του εφεδράνου με κατάστρωμα και βάθρο) οι οποίες απέχουν μεταξύ τους 0,21m. Στο εδιάμεσο τους μία σειρά από ελατήρια όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. αντικαταστάθηκε δηλαδή ο χώρος όπου υπήρχε καουτσούκ με ελατήρια.



Σχήμα 5.1 Τρισδιάστατη όψη (αριστερά) και δεξιά όψη (δεξιά) εφεδράνου με ελατήρια.

Όπως βλέπουμε και στο παραπάνω σχήμα, τοποθετήθηκαν πέντε ελατήρια στην κατακόρυφη διεύθυνση που ενώνουν τις δύο μεταλλικές πλάκες. Υπάρχουν δηλαδή τέσσερα ελατήρια σταθεράς Kr, ανά δύο στις διευθύνσεις x και y. Επίσης τοποθετήθηκε και ένα ελατήριο σταθεράς Kv στο κέντρο. Όπως βλέπουμε στην δεξιά όψη του σχήματος 5.1, ο συνδυασμός των ελατηρίων όπως έχουν τοποθετηθεί ρυθμίζουν τόσο την σχετική απόσταση OO’ με το Kv, όσο και τη σχετική στροφή μεταξύ των σχετικά άκαμπτων μεταλλικών πλακών με τα Kr.

Με αυτά τα 5 ελατήρια που έχουν τοποθετηθεί έχουμε περιορίσει τη σχετική κίνηση του πάνω μέρους με το κάτω όσον αφορά τη κατακόρυφη μετατόπιση και τη στροφή. Μένουν να τοποθετηθούν και άλλα δύο ελατήρια που θα συνδέουν τα O και O΄. Αυτά θα ρυθμίζουν τη μετατόπιση στο επίπεδο xy, θα έχουμε δηλαδή ένα στην x διεύθυνση και ένα στην y.

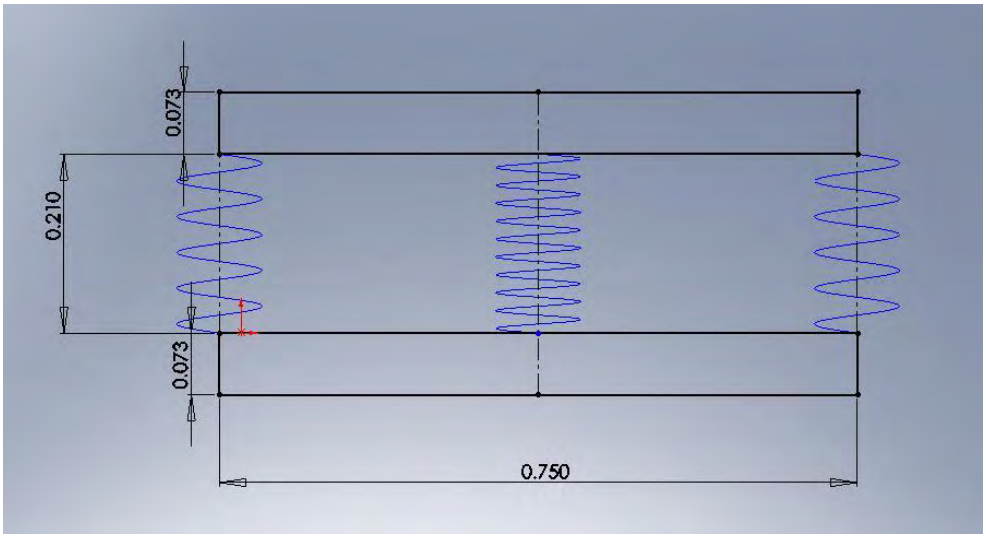
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Σύμφωνα με “Analysis of Multilayer Elastomeric Bearings, Panos Tsopelas, Ph.D. 10/15/2010” οι τιμές των σταθερών των ελατηρίων για ολόκληρο το ελαστομεταλλικό εφέδρανο καθορίζονται ως εξής :

- $K_{Compressional} = \frac{E_c \cdot A_b}{\Sigma t} = 1775 \qquad [MN/m]$
- $K_{Rotational} = \frac{E_r \cdot I_r}{\Sigma t} \approx \frac{E_c \cdot I_r}{3\Sigma t} = 43.76 \qquad [MN/m]$
- $K_{Horizontal} = \frac{G_{eff} \cdot A_b}{\Sigma t} = 1.3 \qquad [MN \cdot m/rad]$

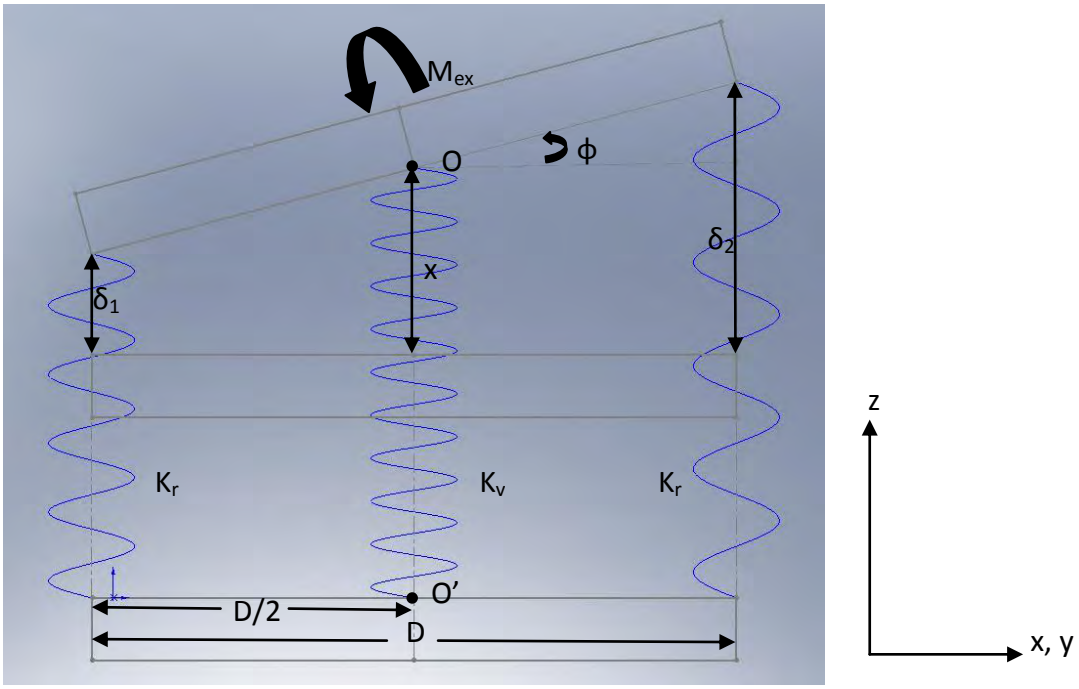
Όπου

- $t = 15mm$: thickness of rubber layer
- $N = 14$: number of layers
- $\Sigma t = N \cdot t = 0.21m$: total bearing thickness
- $D = 0.75m$: bearing diameter
- $A_b = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$: bonded Area
- $G = 0.9\ Mpa$: rubber Shear modulus
- $G_{eff} = 90\ psi = 0.62\ Mpa$: effective Shear modulus
- $E_c = 6 \cdot G \cdot S^2$: compression modulus of a single layer
- $S = \frac{Area\ with\ load}{Area\ without\ load} = \frac{D}{4 \cdot t}$: shape factor
- $E_r = 2 \cdot G \cdot S^2 = 3 \cdot E_c$: rotational modulus of a single layer
- $I_r = \frac{\pi \cdot D^4}{64}$: moment of inertia



Σχήμα 5.2 : Διαστάσεις εφεδράνου “τύπου 4”

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 5.3

Από το Σχήμα 5.3 σε μία τυχαία θέση, λαμβάνουμε τα παρακάτω :

- Για τυχαία επιμήκυνση x του κεντρικού ελατηρίου σταθεράς K_v
- φ :είναι η γωνία στροφής της πάνω πλάκας
- $\delta_1 = x - \frac{D}{2} \cdot \sin\varphi \approx \mathrm{x} - \frac{D}{2} \cdot \varphi$:είναι η επιμήκυνση του ελατηρίου σταθεράς K_r αριστερά στο σχήμα
- $\delta_1 = x + \frac{D}{2} \cdot \sin\varphi \approx \mathrm{x} + \frac{D}{2} \cdot \varphi$:είναι η επιμήκυνση του ελατηρίου σταθεράς K_r δεξιά στο σχήμα
- M_{ex} :είναι η επιβαλλόμενη ροπή στην πάνω πλάκα

Παίρνοντας ισορροπία στο O, επειδή η συνολική ροπή πρέπει να είναι μηδέν καταλήγουμε στη σχέση :

$$M_{ex} = (\mathrm{K_r} \cdot \delta_1 + \mathrm{K_r} \cdot \delta_2) \cdot \frac{D}{2} = \left(\frac{D^2}{2} \cdot \mathrm{K_r}\right) \cdot \varphi$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Επειδή όμως η ροπή δίνεται από τη σχέση :

$$M = k \cdot \hat{\theta}$$

για σταθερά στροφικού ελατηρίου k και γωνία στροφής ίση με $\hat{\theta}$. Καταλήγουμε στη σχέση :

$$\mathrm{K}_{Rotational} = \frac{D^2}{2} \cdot \mathrm{K}_\mathrm{r}$$

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω στο παράδειγμά μας, έχουμε τελικά πέντε ελατήρια τα οποία συνεισφέρουν όλα στην κατακόρυφη διεύθυνση. Επειδή όμως η συνολική συνεισφορά πρέπει να είναι ίση με $K_{Compressional}$, καταλήγουμε στη σχέση :

$$\mathrm{K}_v = K_{Compressional} - 4 \cdot \mathrm{K}_\mathrm{r}$$

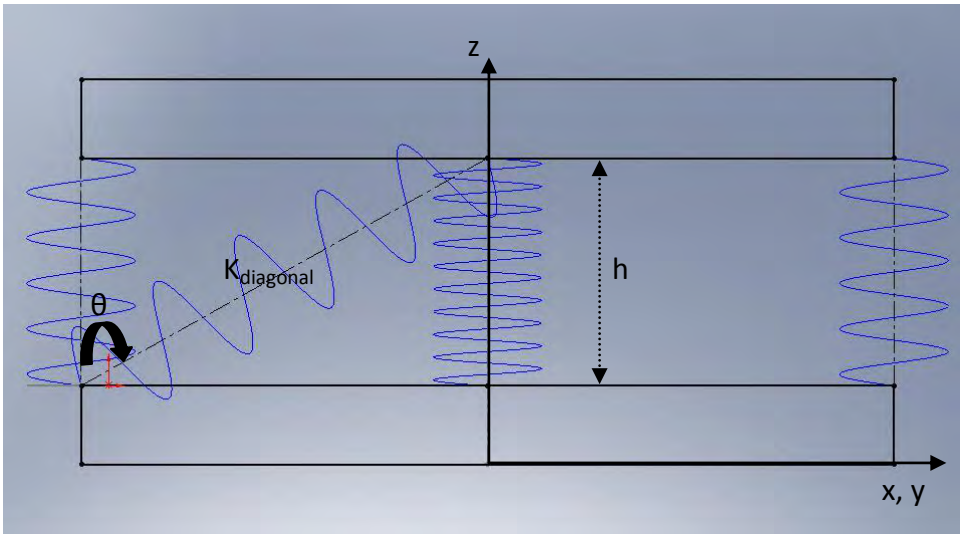
Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι είτε βρισκόμαστε στο zx επίπεδο είτε στο zy, η σχέση που αφορά το $\mathrm{K}_{Rotational}$ είναι η ίδια, με αποτέλεσμα το K_r να έχει την ίδια τιμή ασχέτως σε πιο από τα δύο παραπάνω επίπεδα βρισκόμαστε. Επίσης εφαρμόζοντας δύο ελατήρια σταθεράς ίσης με $K_{Horizontal}$ μεταξύ των O και O', ένα κάθε διεύθυνση x και y, έχουμε ολοκληρώσει τη σύζευξη με ελατήρια των δύο μεταλλικών πλακών.

Μπορούμε να αναφέρουμε και μία άλλη διάταξη ελατηρίων. Αυτή η διάταξη αφορά τα ελατήρια που διαχειρίζονται τα φορτία στο επίπεδο xy, και αυτά είναι τα δύο ελατήρια σταθεράς $K_{Horizontal}$. Στην περίπτωση που δεν τοποθετηθούν παράλληλα στο xy επίπεδο και τοποθετηθούν υπό γωνία, θα πρέπει να υπολογιστεί και η συνεισφορά τους και στο κατακόρυφο επίπεδο. Αυτή η διάταξη βρίσκει εφαρμογή στην περίπτωση που θελήσουμε να τοποθετήσουμε πραγματικά ελατήρια ή και "truss elements" για να συνδέσουμε την τις δύο πλάκες.

Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την σύνδεση όπως προαναφέραμε με ένα διαγώνιο ελατήριο σταθεράς $\mathrm{K}_{\mathrm{diagonal}}$. Ο τρόπος σύνδεσης στο παράδειγμά μας είναι ο ίδιος για τα επίπεδα zx και zy. Από το προαναφερθέν ελατήριο έχουμε συνεισφορά ίση με :

- $K_{x,y} = K_{\mathrm{diagonal}} \cdot \sin\theta$ στο επίπεδο xy
- $K_z = K_{\mathrm{diagonal}} \cdot \cos\theta$ στα επίπεδα zx και zy

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157



Σχήμα 5.4 Τοποθέτηση διαγώνιου ελατηρίου σύνδεσης

Επειδή όμως η συνολική συνεισφορά του $K_{diagonal}$ στο επίπεδο xy πρέπει να είναι ίση με $K_{Horizontal}$ έχουμε :

$$K_{\text{diagonal}} = \frac{K_{Horizontal}}{\sin\theta}$$

Επίσης λόγω της συνεισφοράς K_z των δύο στο σύνολο (ένα στο zx και ένα στο zy επίπεδο) διαγώνιων ελατηρίων, το K_v αναπροσαρμόζεται στην συνθήκη :

$$K_v = K_{Compressional} - 4 \cdot K_r - 2 \cdot K_{\text{diagonal}} \cdot \cos\theta$$

Παρακάτω θα χωρίσουμε την παράγραφο 5.1 σε δύο υποενότητες που θα αντιστοιχούν σε δύο τρόπους εφαρμογής της μεθοδολογίας των ελατηρίων στο Comsol.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

5.1.1 Εφέδρανα με δυνάμεις ελατηρίων

Αρχικά να αναφέρουμε ότι στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Comsol, δεν δίνεται η δυνατότητα χρήσης καθεαυτού ελατηρίων. Εναλλακτικός τρόπος είναι η επιβολή ίσων και αντίθετων δυνάμεων ανάμεσα σε δύο σημεία σύμφωνα με τις σχέσεις :

$$k \cdot (-u_1 + u_2) \quad \text{και} \quad k \cdot (-u_2 + u_1)$$

όπου k είναι η σταθερά ελατηρίου και $u_{1,2}$ είναι οι μετατοπίσεις των σημείων. Αυτό γίνεται στο Comsol με την εξής διαδικασία :

Options->Integration Coupling Variables->Point Variables

επιλέγουμε το κάθε σημείο και στο κελί "*name*" δίνουμε ένα τυχαίο όνομα έστω *a1* για το πρώτο σημείο και *a2* για το δεύτερο. Στο κελί "*expression*" γράφουμε *u* (μετατόπιση στην x-διεύθυνση) για το κάθε σημείο. Έτσι έχουμε δώσει όνομα για την μετατόπιση του κάθε σημείου στην κατακόρυφη διεύθυνση. Κατόπιν

Physics->Point Settings

και σε κάθε σημείο που αναφέραμε στο παράδειγμά μας στο κελί δίπλα στο "F_x" της σελίδας "Load" εισάγουμε για το πρώτο σημείο δύναμη ίση με

k(-u+a2)*

ενώ για το δεύτερο σημείο εισάγουμε

k(-u+a1)*

Κατόπιν επιλέγουμε :

Options->Constants

και στο κελί "name" δίνουμε το όνομα της σταθεράς ελατηρίου

k

και στο κελί "expression" γράφουμε την τιμή της σταθεράς ελατηρίου που επιθυμούμε μαζί με τις μονάδες μέτρησης [N/m].

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Η ίδια διαδικασία μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε διεύθυνση ανάμεσα σε δύο σημεία. Επίσης μπορεί το κάθε ζεύγος σημείων να είναι συζευγμένο με δυνάμεις σε όλες τις διευθύνσεις, αρκεί να έχουμε ονομάσει τις μετατοπίσεις και να έχουμε δώσε τιμή στην σταθερά ελατηρίου που αντιστοιχεί σε κάθε διεύθυνση.

5.1.2 Εφέδρανα με truss elements

Όπως είναι γνωστό τα "truss elements" συμπεριφέρονται σαν γραμμικά ελατήρια και παραμορφώνονται μόνο αξονικά. Αποτελούν λοιπόν μία πολύ καλή επιλογή για να εφαρμόσουμε συμπεριφορά ελατηρίου.

Για να εισάγουμε στο τρέχον μοντέλο μας ένα "truss element" ανάμεσα σε δύο σημεία ακολουθούμε την παρακάτω διαδικασία:

Multiphisics->Model Navigator->3D truss->Add

από την επιλογή "*Multiphisics*" πλέον θα μας εμφανίζει δύο περαιτέρω επιλογές

Solid και *3D truss*

Αφού είμαστε στην επιλογή "*3D truss*" επιλέγουμε

Physics->Edge Settings

και κάνουμε απενεργοποίηση όλων των ακμών που δεν ανήκουν τα σημεία μας επιλέγοντας τις υπόλοιπες ακμές και κάνοντας uncheck στο εδάφιο "*Active in this domain* "

κατόπιν ορίζουμε τις ιδιότητες του truss element σύμφωνα με τη σχέση

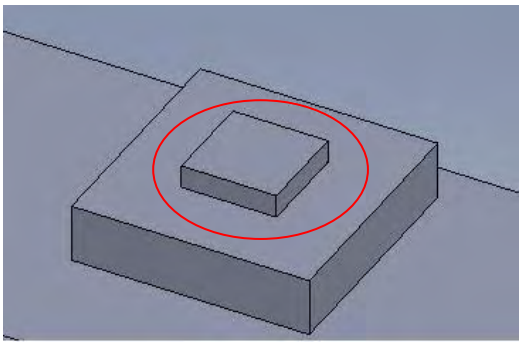
$$k = E \cdot A/L$$

Στην παραπάνω σχέση θέλοντας να επιτύχουμε τη σταθερά ελατηρίου k που είναι δεδομένο, λύνοντας ως προς E για γνωστή απόσταση μεταξύ των σημείων L και τυχαία επιφάνεια διατομής A (*cross-section*). Συμπληρώνουμε τα κελιά με το μέτρο ελαστικότητας και για πυκνότητα βάζουμε έναν αριθμό κοντά στο μηδέν.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

5.2 Εφέδρανα σφαιρικής έδρασης – ολισθαίνοντα

Όπως περιγράφηκαν και στην παράγραφο 4.8 αναφερόμαστε σε γενικώς κινούμενα εφέδρανα, επιτρέπονται δηλαδή κινήσεις στην x- και y-διεύθυνση χωρίς να μεταδίδονται οι οριζόντιες δυνάμεις. Επίσης οι δύο “sliding plates, upper & lower” είναι στο σύνολό τους μεταλλικές. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι είναι πρακτικά άκαμπτες. Το υλικό τριβής μεταξύ των πλακών ολίσθησης είναι PTFE με λίπανση, που σημαίνει ότι ο συντελεστής τριβής είναι πολύ μικρός και πρακτικά αμελητέος. Στο σχεδιαστικό πρόγραμμα σχεδιάστηκαν λοιπόν ως ορθογώνια παραλληλεπίπεδα (600mm x 600mm x 145mm) όπως φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.5 Τρισδιάστατη όψη ολισθαίνοντος εφεδράνου στο σχεδιαστικό πρόγραμμα (βάθρο ΜΑ)

Κατόπιν της εισαγωγής του μοντέλου από το σχεδιαστικό πρόγραμμα στο Comsol με τον τρόπο που έχουμε προαναφέρει, επιλέγουμε :

Physics->Subdomain Settings->Subdomains

επιλέγοντας τα εφέδρανα και κάνοντας uncheck στο εδάφιο Active in this domain. Ουσιαστικά τα αφαιρούμε από το συνολικό μοντέλο παραβλέποντας τα. Με αυτό τον τρόπο όμως έχουμε διατηρήσει την σχετική απόσταση μεταξύ του βάθρου και του φορέα, ανάμεσα στα οποία υπάρχει το εφέδρανο, όπως επίσης έχουμε διατηρήσει και τα 8 σημεία των ακμών του εφεδράνου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Στα σημεία του εφεδράνου τώρα μπορούμε να επιβάλουμε κινηματικούς περιορισμούς ώστε από τη μία να έχουμε ολίσθηση μεταξύ του πάνω μέρους του εφεδράνου (που ανήκει στον φορέα του καταστρώματος) και του κάτω (που ανήκει στο βάθρο που στηρίζεται το κατάστρωμα) αλλά από την άλλη να έχουμε και την ίδια μετατόπιση της πάνω επιφάνειας με την κάτω. Για να γίνει αυτό πρέπει κάθε ένα από τα 4 σημεία της κάτω επιφάνειας του εφεδράνου να έχει την ίδια μετατόπιση στην κατακόρυφη διεύθυνση με το αντίστοιχο σημείο της πάνω επιφάνειας που ανήκει στην ίδια κατακόρυφη ακμή. Έστω ότι αναφερόμαστε σε δύο σημεία που ανήκουν στην ίδια κατακόρυφη ακμή. Κάνουμε την εξής διαδικασία:

Options->Integration Coupling Variables->Point Variables

επιλέγουμε το κάθε σημείο και στο κελί "name" δίνουμε ένα τυχαίο όνομα έστω c1 για το πρώτο σημείο και c2 για το δεύτερο. Στο κελί "expression" γράφουμε w (μετατόπιση στην z-διεύθυνση) για το κάθε σημείο. Έτσι έχουμε δώσει όνομα για την μετατόπιση του κάθε σημείου στην κατακόρυφη διεύθυνση. Κατόπιν

Physics->Point Settings

και σε κάθε σημείο που αναφέραμε στο παράδειγμά μας κάνουμε check στο εδάφιο "R_z" και εισάγουμε στο κελί δίπλα, για το πρώτο σημείο μετατόπιση ίση με c2 ενώ για το δεύτερο c1.

Επαναλαμβάνοντας την διαδικασία για όλα τα σημεία του εφεδράνου, έχουμε επιβάλει τους κινηματικούς περιορισμούς που επιθυμούσαμε.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

5.3 Τμήμα A1_MA - Συγκριτικό μεταξύ μεθόδου δυνάμεων και trusses

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιάσουμε τις ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές που λαμβάνουμε αν σε ένα μοντέλο εφαρμόσουμε δυνάμεις ή truss elements στο Comsol. Το μοντέλο που θα δοκιμαστεί είναι το τμήμα της γέφυρας Τ9, από το ακρόβαθρο Α1 ως το βάθρο ΜΑ μαζί με κατάστρωμα και εφέδρανα.

Το τμήμα του καταστρώματος σε αυτό το μοντέλο όπως έχουμε προαναφέρει, εδράζεται σε 4 ελαστομεταλλικά εφέδρανα «τύπου 4». Διακρίνουμε λοιπόν στο συγκριτικό δύο περιπτώσεις:

- Στην πρώτη έχουμε συνθήκες στήριξης του καταστρώματος μόνο με δυνάμεις ελατηρίων σύμφωνα με παράγραφο 5.1 και υποπαράγραφο 5.1.1
- Στην δεύτερη έχουμε truss elements στη θέση των ελατηρίων σύμφωνα με παράγραφο 5.1 και υποπαράγραφο 5.1.2

Να αναφέρουμε ότι στον πρώτο τρόπο στήριξης του καταστρώματος, δεν έχουμε διαγώνιες δυνάμεις να συνδέουν τις δύο πλάκες του εφεδράνου. Στον δεύτερο τρόπο όμως, τοποθετήθηκαν trusses με τον τρόπο που βλέπουμε στο Σχήμα 5.4. Οι σταθερές ελατηρίων και οι ιδιότητες των truss elements ακολούθησαν τη μεθοδολογία της παραγράφου 5.1.

Για τον υπολογισμό των ιδιοσυχνοτήτων επιβάλαμε πάκτωση στις κάτω επιφάνειες του ακρόβαθρου Α1 και του βάθρου ΜΑ. Επίσης ορίσαμε και τις παρακάτω ιδιότητες υλικών μέσα από τα “Subdomain Settings” :

- Βάθρα Α1 και ΜΑ : E=34 Gpa, ρ=2548 Kg/m^3 , v=0.2
- Κατάστρωμα : E=37 Gpa και ρ=2548 Kg/m^3 , v=0.2
- Μεταλλικές πλάκες εφεδράνων : E=200 Gpa και ρ=7850 Kg/m^3 , v=0.33

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

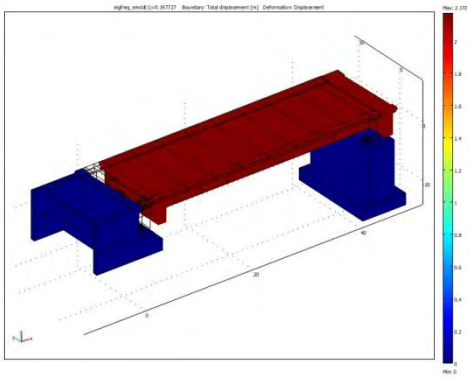
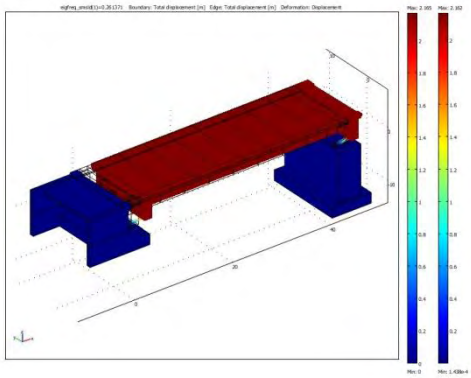
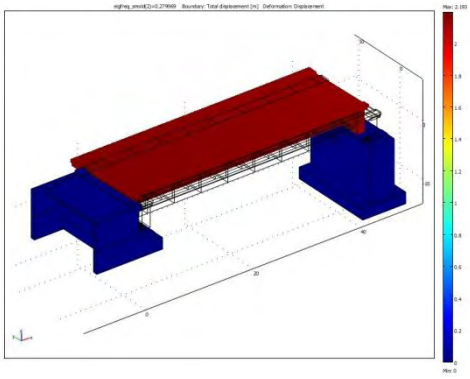
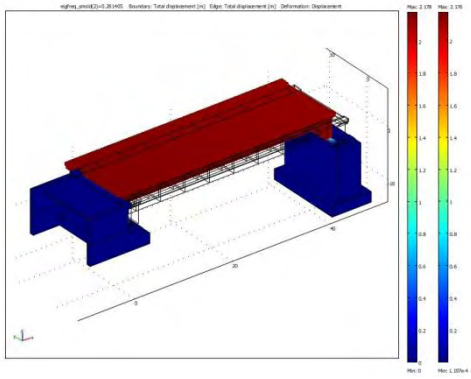
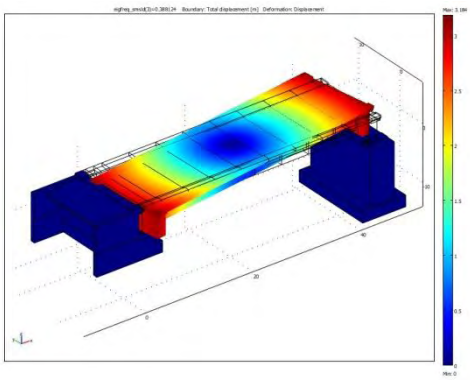
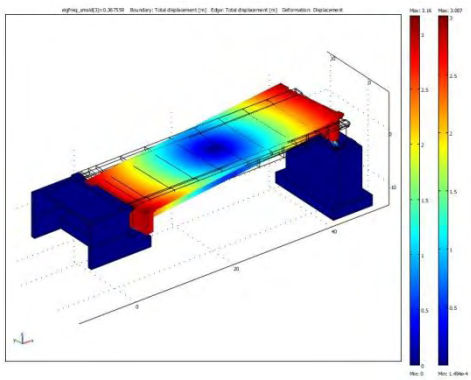
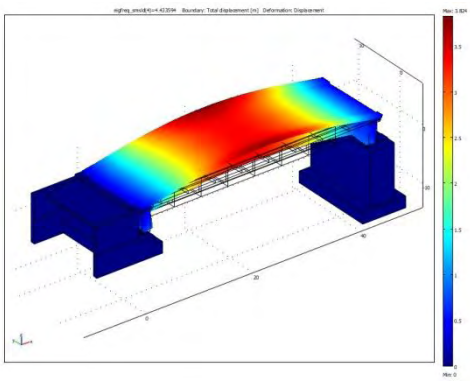
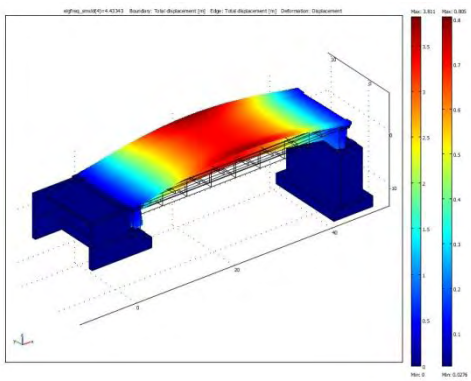
Στον Πίνακα 5.1 βλέπουμε τις πρώτες 20 ιδιοσυχνότητες που υπολογίσαμε με το Comsol.

Πίνακας 5.1 Οι πρώτες 20 ιδιοσυχνότητες για μέθοδο με δυνάμεις και μέθοδο με trusses

State 1 : Forces	State 2 : Trusses
0.1977	0.2614
0.2800	0.2614
0.3881	0.3676
4.4336	4.4334
8.5812	8.5765
11.0375	11.0294
14.6539	14.6433
15.0909	15.0829
15.8308	15.8143
17.4917	17.4328
17.5402	17.5471
17.7463	17.7604
18.3217	18.3198
19.7656	19.7610
22.0872	22.0858
22.9151	22.9162
23.2840	23.2873
24.2939	24.2911
24.7982	24.7663
26.6617	26.6714

Όπως παρατηρούμε, διαφορές υπάρχουν μόνο στις τρείς πρώτες ιδιοσυχνότητες. Παρακάτω, θα παρουσιάσουμε ενδεικτικά 5 ιδιομορφές που αντιστοιχούν στις 4 πρώτες ιδιοσυχνότητες. Οι τρείς πρώτες όπως θα δούμε αφορούν ολόσωμη μετατόπιση του καταστρώματος (πρώτη και δεύτερη) και ολόσωμη περιστροφή του καταστρώματος περί του κατακόρυφου άξονα (τρίτη). Σε αυτές λοιπόν τις ιδιοσυχνότητες δεν παρατηρείται παραμόρφωση ούτε του καταστρώματος ούτε των βάθρων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

A/A	State 1 : Forces	State 2 : Trusses
1		
2		
3		
4		

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

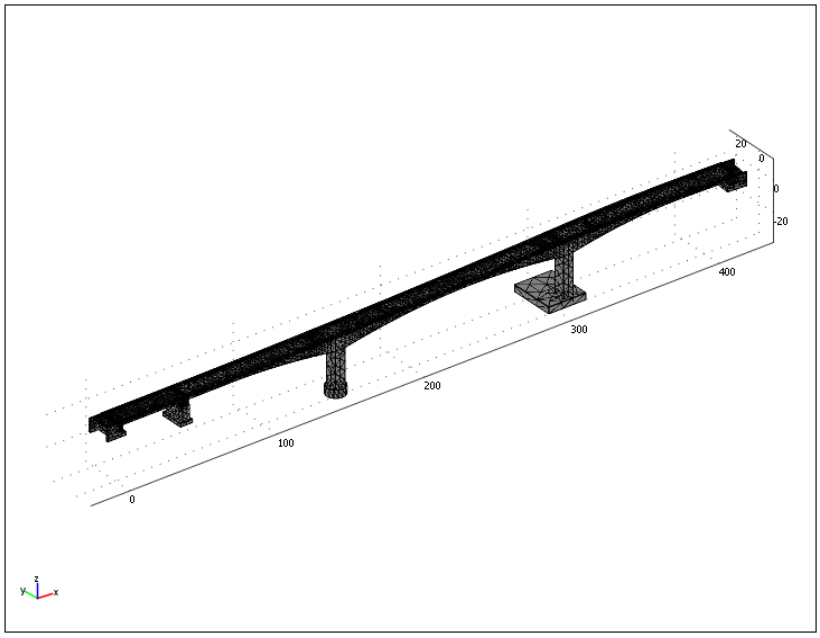
5.4 Κλάδος Τ9 - Εύρεση ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων

Σε αυτή τη παράγραφο θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των ιδιοσυχνοτήτων και ενδεικτικά κάποιες ιδιομορφές ολόκληρου του κλάδου Τ9 της γέφυρας του Περιστερίου. Σύμφωνα με τις παραγράφους 5.1 και 5.1.1, ακολουθήθηκε η διαδικασία εφαρμογής δυνάμεων και όχι truss elements στα ελαστομεταλλικά εφέδρανα. Στα ολισθαίνοντα εφέδρανα εφαρμόστηκε η επιβολή κινηματικών περιορισμών σύμφωνα με την παράγραφο 5.2.

Χωρίσαμε τα αποτελέσματα των ιδιοσυχνοτήτων σε τρείς καταστάσεις. Κάθε μία κατάσταση αντιστοιχεί είτε σε διαφορετικές συνοριακές συνθήκες, είτε σε κάποια διαφορά στη γεωμετρία του κλάδου, είτε σε συνδυασμό τους. Οι καταστάσεις είναι οι εξής :

State A

Σε αυτή την κατάσταση συμπεριλαμβάνεται όλο το κατάστρωμα, τα βάθρα, ακρόβαθρα και εφέδρανα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Ιδιαιτερότητα αποτελεί το βάθρο Μ2 και συγκεκριμένα η θεμελίωση του βάθρου. Εδώ λοιπόν παραλείψαμε τις κολώνες οπλισμένου σκυροδέματος κάτω από τη θεμελίωση και επιβάλαμε πάκτωση στην κάτω επιφάνεια και γύρω από το θεμέλιο. Αναλυτικότερα στοιχεία για τη γεωμετρία του βάθρου Μ2 υπάρχουν στην παράγραφο 4.5.

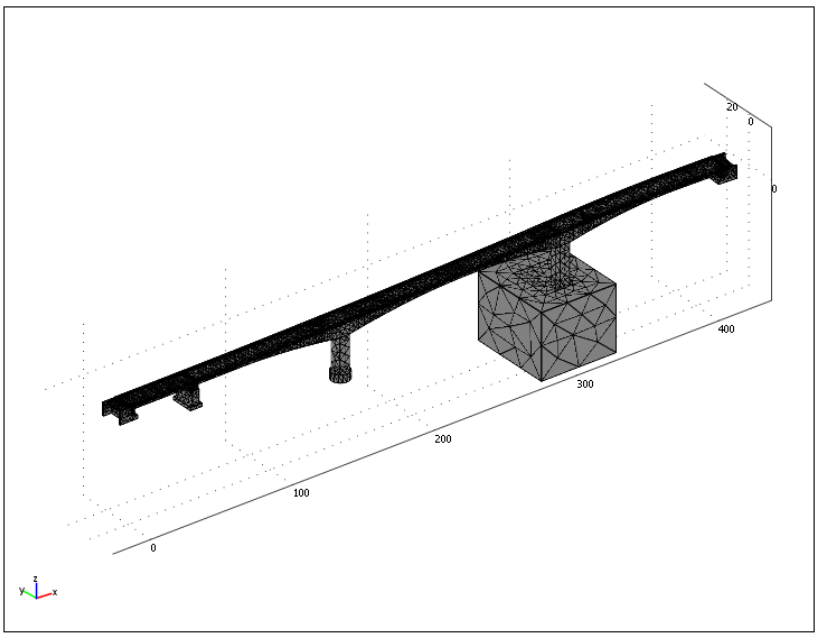


Σχήμα 5.6 Τρισδιάστατη όψη Τ9 (State A) χωρισμένη σε πεπερασμένα στοιχεία στο Comsol

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

State B

Αυτή η κατάσταση είναι ίδια με την State A, με τη διαφορά ότι εδώ τοποθετήθηκαν και οι κολώνες στη θεμελίωση του Μ2. Συγκεκριμένα, οι κολώνες αυτές επειδή τοποθετούνται στις θεμελιώσεις για να περιορίσουν τις μετασεισμικές παραμένουσες μετατοπίσεις της γέφυρας, δεν μπορέσαμε να παραλείψουμε και το περιβάλλον έδαφος. Έτσι λοιπόν τοποθετήσαμε και ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο που να περιβάλει όλη τη θεμελίωση και τα κολωνάκια, το οποίο μπορούμε να του δώσουμε ιδιότητες εδάφους. Αυτό το παραλληλεπίπεδο έχει μήκος και πλάτος που να εκτείνεται 10 φορές την διάμετρο των 150 cm (διάμετρος Φ150 κάθε κολώνας) μακριά από την θεμελίωση και ύψος 44 m. Η κατάσταση που περιγράψαμε φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



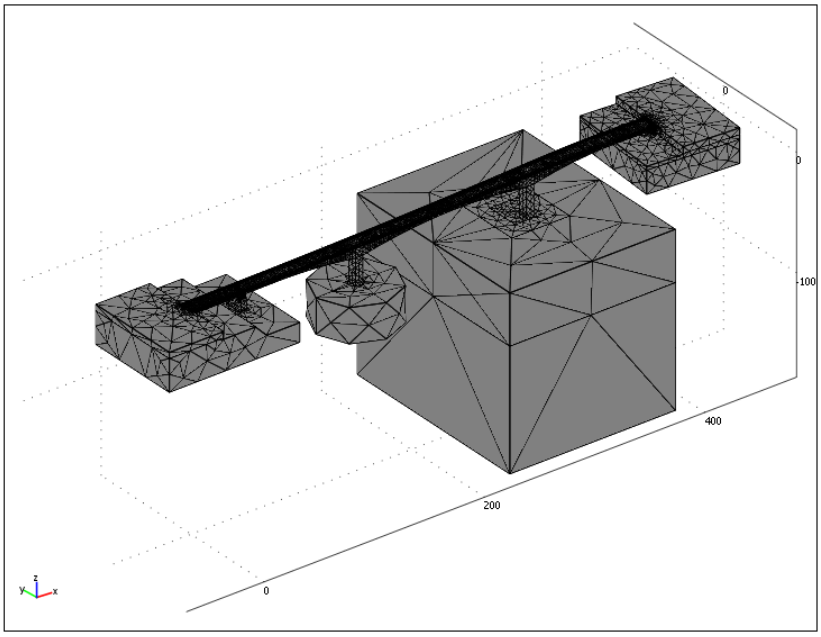
Σχήμα 5.7 Τρισδιάστατη όψη Τ9 (State B) χωρισμένη σε πεπερασμένα στοιχεία στο Comsol

State C

Αυτή η κατάσταση ακολουθεί τη γεωμετρία της State B, με τη διαφορά όμως ότι εδώ έχουμε τοποθετήσει γεωμετρίες σε όλα τα βάθρα και ακρόβαθρα στις οποίες θα δώσουμε ιδιότητες εδάφους. Θέλουμε λοιπόν εδώ να εισάγουμε την ελαστικότητα του εδάφους σε όλες τις θεμελιώσεις της γέφυρας και να ξεφύγουμε από την παραδοχή του εδάφους χωρίς ελαστικότητα που λαμβάναμε με τις πακτώσεις των θεμελιώσεων στα προηγούμενα States.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Η γεωμετρία εδάφους γύρω από κάθε θεμελίωση σχεδιάστηκε έτσι ώστε να έχει διαστάσεις ίσες με τις διαστάσεις της γεωμετρίας που θέλουμε να περιβάλουμε πολλαπλασιασμένες επί 6. Τέλος επιβάλαμε για συνοριακές συνθήκες πάκτωση σε όλες τις πλευρές των γεωμετριών που περιγράφουν το έδαφος, εκτός από τη πάνω πλευρά την οποία αφήσαμε ελεύθερη. Η κατάσταση που περιγράψαμε φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.8 Τρισδιάστατη όψη T9 (State C) χωρισμένη σε πεπερασμένα στοιχεία στο Comsol

Όσων αφορά τις συνοριακές συνθήκες στα States A & B, στα τμήματα όπου δεν υπήρχε γεωμετρία εδάφους να περιβάλει κάποιο τμήμα της γέφυρας, επιβάλαμε πάκτωση στις επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με το έδαφος, σύμφωνα με τα σχέδια. Στα States B & C, στις γεωμετρίες εδάφους επιβάλαμε πάκτωση στις γύρω επιφάνειες και στην κάτω. Όλες οι υπόλοιπες επιφάνειες παραμένουν ελεύθερες. Η διαδικασία στο Comsol για την επιβολή συνοριακών συνθηκών σε επιφάνεια, περιγράφεται στο κεφάλαιο 3 για τη γέφυρα του Μετσόβου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Οι ιδιότητες των υλικών όπως ορίζονται μέσα από την επιλογή “Subdomain Settings” είναι οι παρακάτω :

Πίνακας 5.2 Ιδιότητες υλικών για την γέφυρα Τ9

Τμήμα	Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας	Πυκνότητα	Λόγος Poisson
Κατάστρωμα	Οπλισμένο Σκυρόδεμα	E=37 Gpa	ρ=2548 Kg/m^3	v=0.2
Βάθρα	Οπλισμένο Σκυρόδεμα	E=34 Gpa	ρ=2548 Kg/m^3	v=0.2
Κολώνες Φ150	Οπλισμένο Σκυρόδεμα	E=29 Gpa	ρ=2500 Kg/m^3	v=0.2
Μεταλλικές πλάκες εφεδράνων	Structural Steel	E=200 Gpa	ρ=7850 Kg/m^3	v=0.33
Έδαφος	Χώμα	E=2.88 Gpa	ρ=2548 Kg/m^3	v=0.2

Η διαδικασία στο Comsol για την επιβολή συνοριακών συνθηκών σε επιφάνεια αλλά και η απόδοση των επιθυμητών ιδιοτήτων σε κάθε στερεό σώμα, περιγράφεται στο κεφάλαιο 3 για τη γέφυρα του Μετσόβου.

Παρακάτω ακολουθεί πίνακας με τις πρώτες 20 ιδιοσυχνότητες που υπολογίστηκαν με το Comsol Multiphysics και αντιστοιχούν σε κάθε State του κλάδου Τ9. Υπολογίστηκαν για τύπο διακριτοποίησης extra coarse. Στο Σχήμα 5. Βλέπουμε τις 10 πρώτες ιδιομορφές του State A.

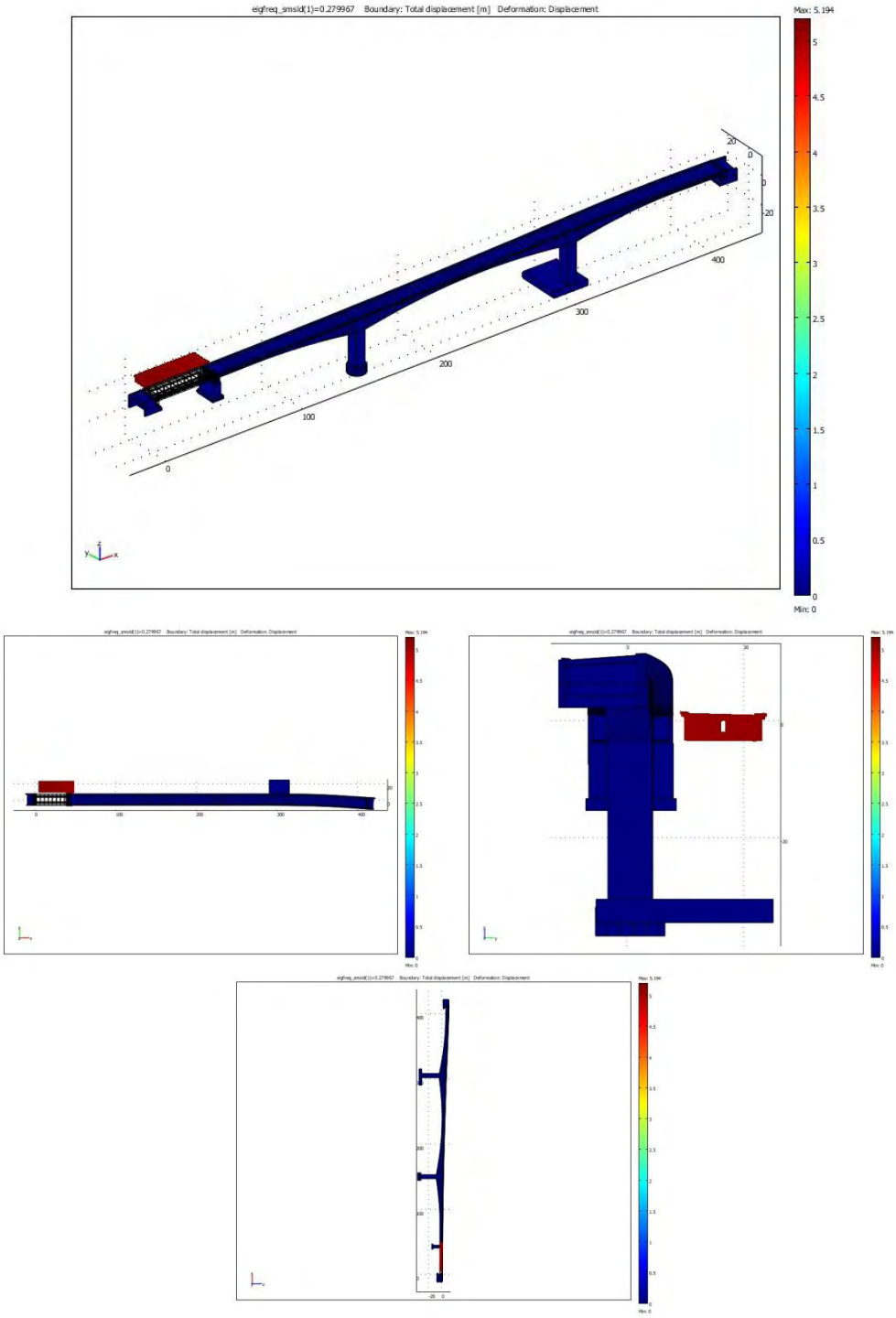
Πίνακας 5.3 Οι 20 πρώτες ιδιοσυχνότητες του κλάδου Τ9 της γέφυρας Περιστερίου

DEGREES OF FREEDOM	370188	503073	535419
State / No	**State A [Hz]**	**State B [Hz]**	**State C [Hz]**
1	0.2800	0.2800	0.2799
2	0.2800	0.2800	0.2800
3	0.3937	0.3937	0.3937
4	0.4174	0.4163	0.4149
5	0.4824	0.4793	0.4739
6	0.9974	0.9767	0.9486
7	1.1450	1.1319	1.1106
8	1.3023	1.2983	1.2847
9	1.6200	1.5957	1.5428
10	1.9388	1.9340	1.9304
11	2.0172	2.0029	1.9632
12	2.0467	2.0388	2.0088
13	2.9808	2.9794	2.9757
14	3.2867	3.2744	3.2296
15	-	-	3.3087
16	-	-	3.9426
17	-	-	4.2358
18	4.3175	4.3089	4.2892
19	4.4328	4.4226	4.4150
20	4.5278	4.5236	4.4977

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"1st Mode" (0.28 Hz)

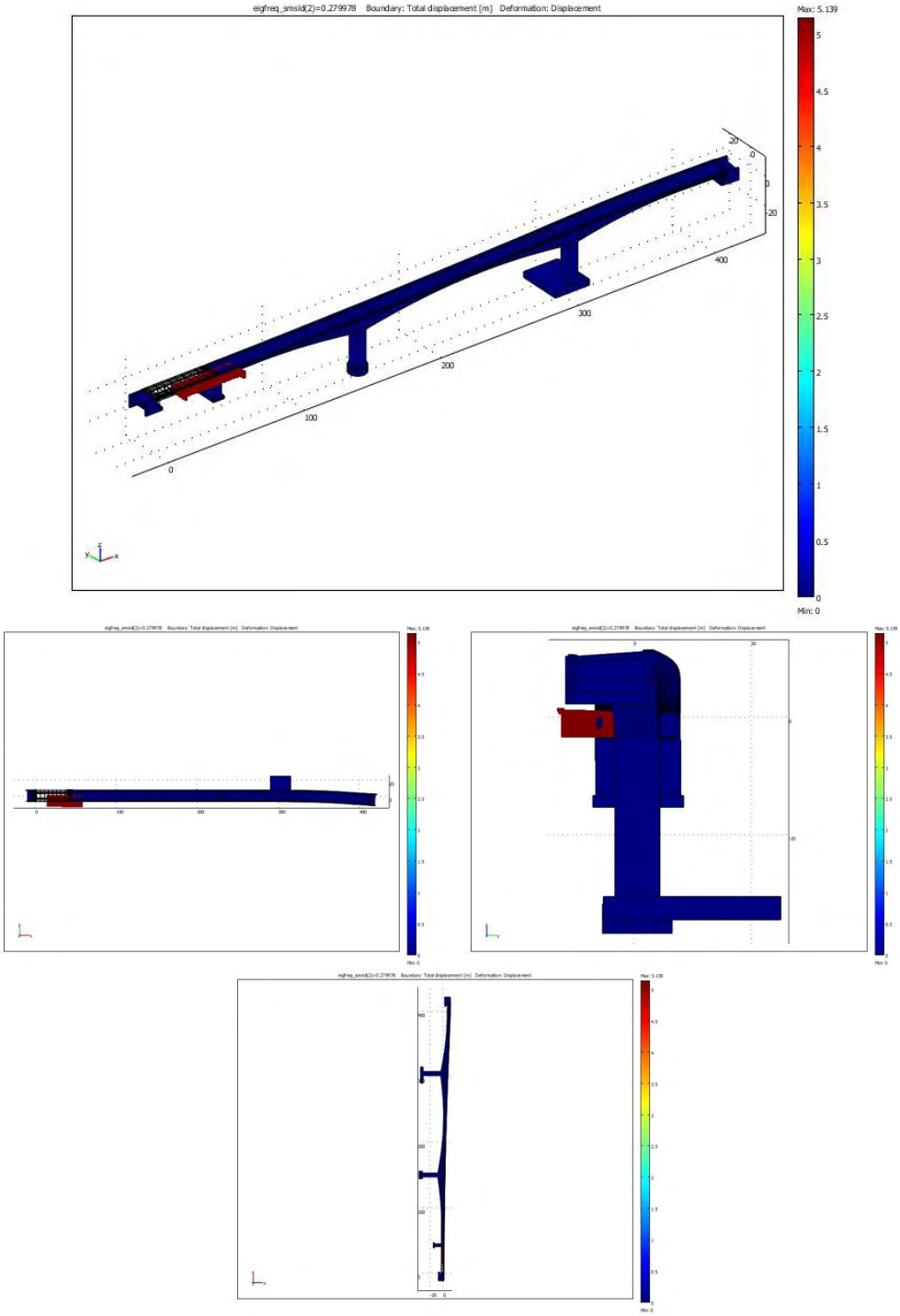
1st transverse



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"2nd Mode" (0.28 Hz)

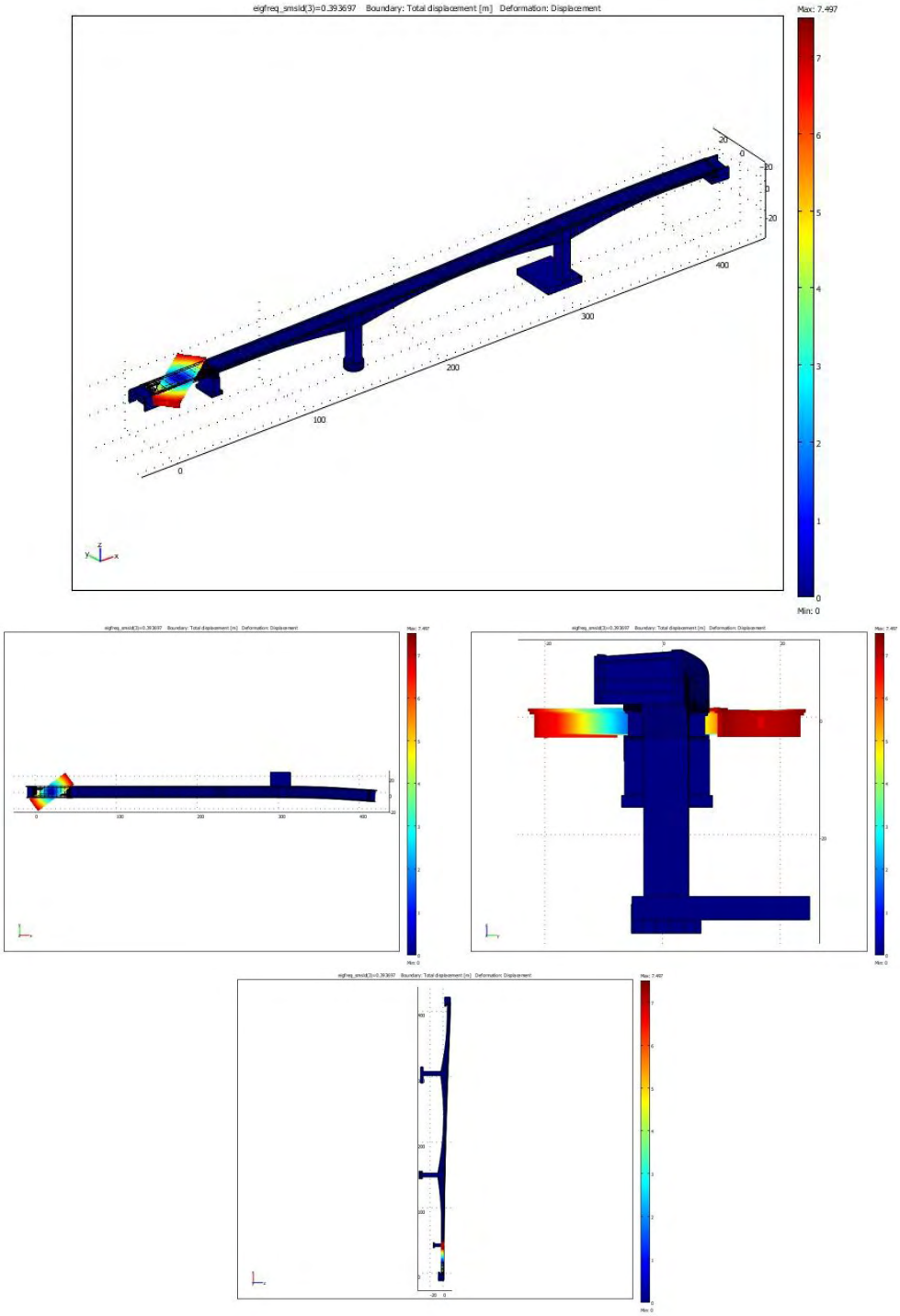
2nd transverse



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

''3rd Mode'' (0.3937 Hz)

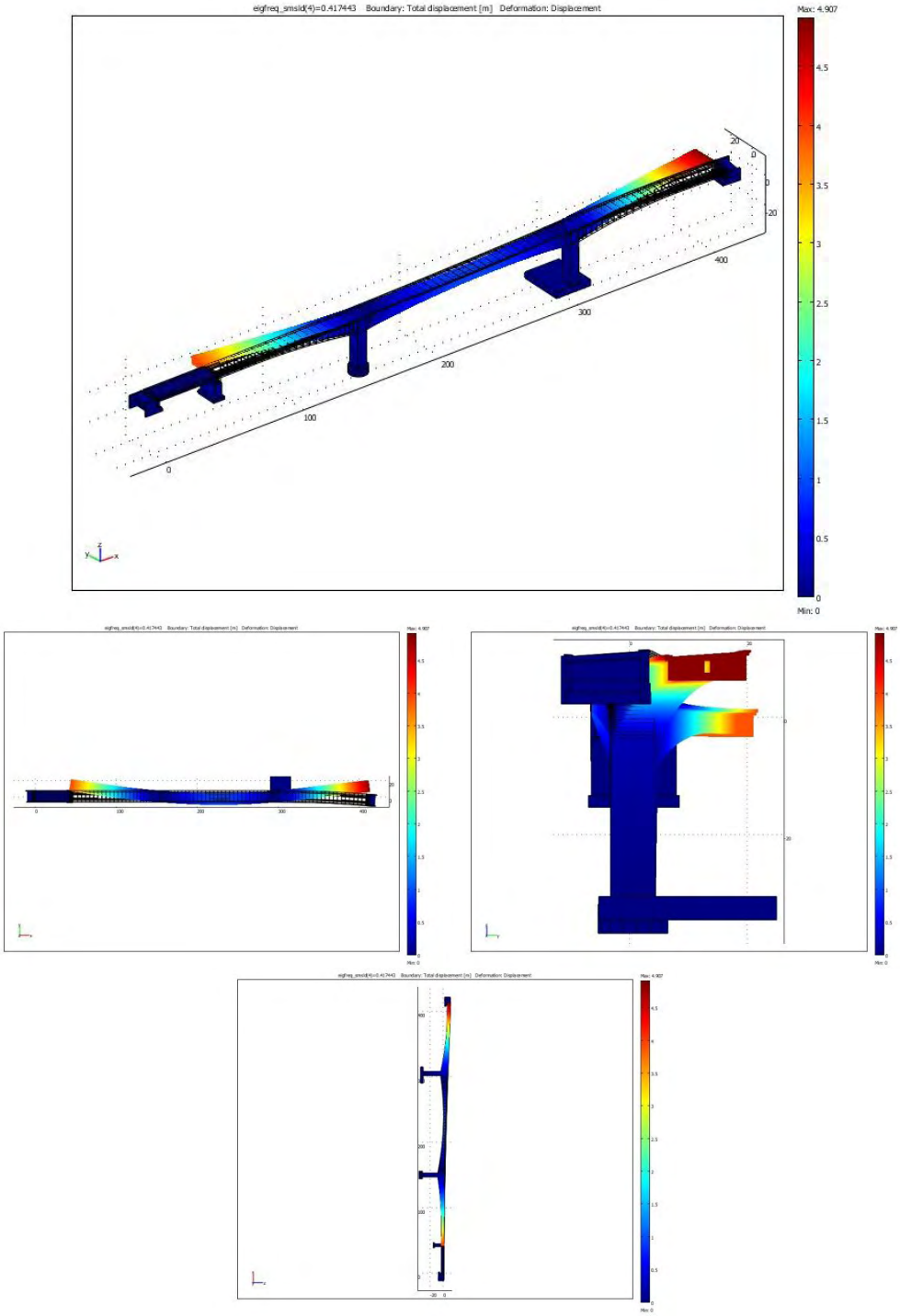
3rd transverse



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"4th Mode" (0.4174 Hz)

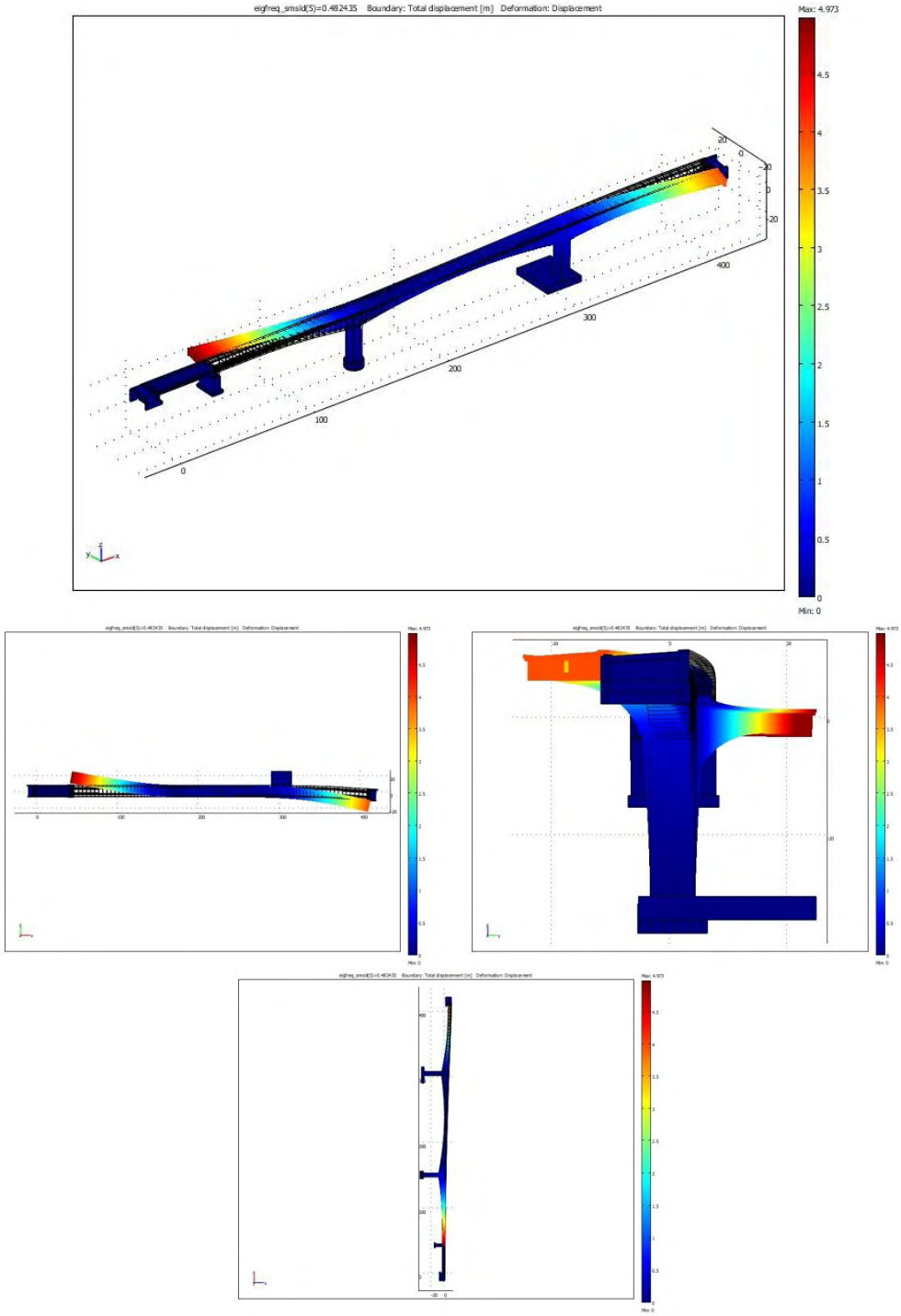
4th transverse



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"5th Mode" (0.4824 Hz)

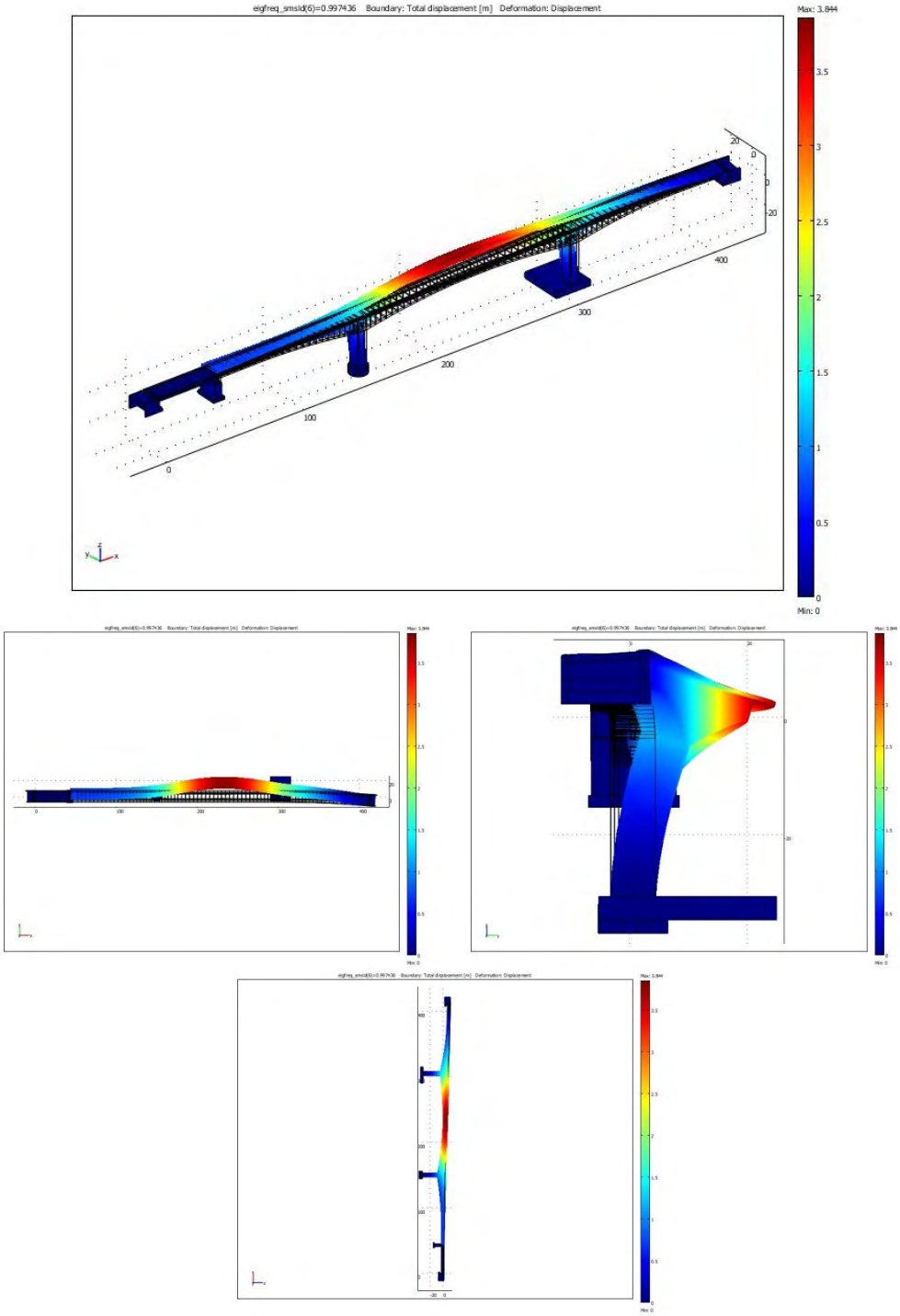
5th transverse



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

''6th Mode'' (0.9974 Hz)

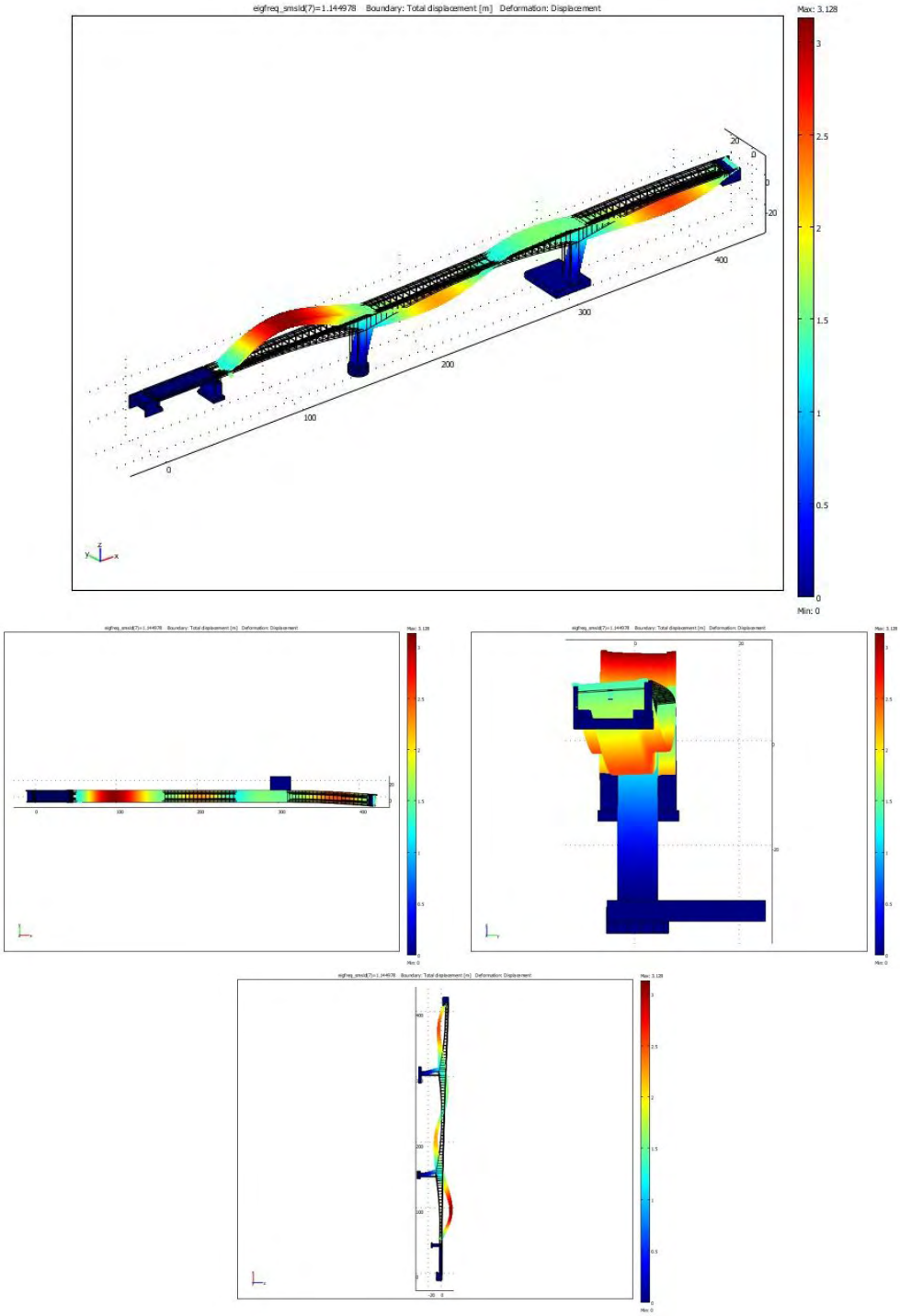
6th transverse



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"7th Mode" (1.1450 Hz)

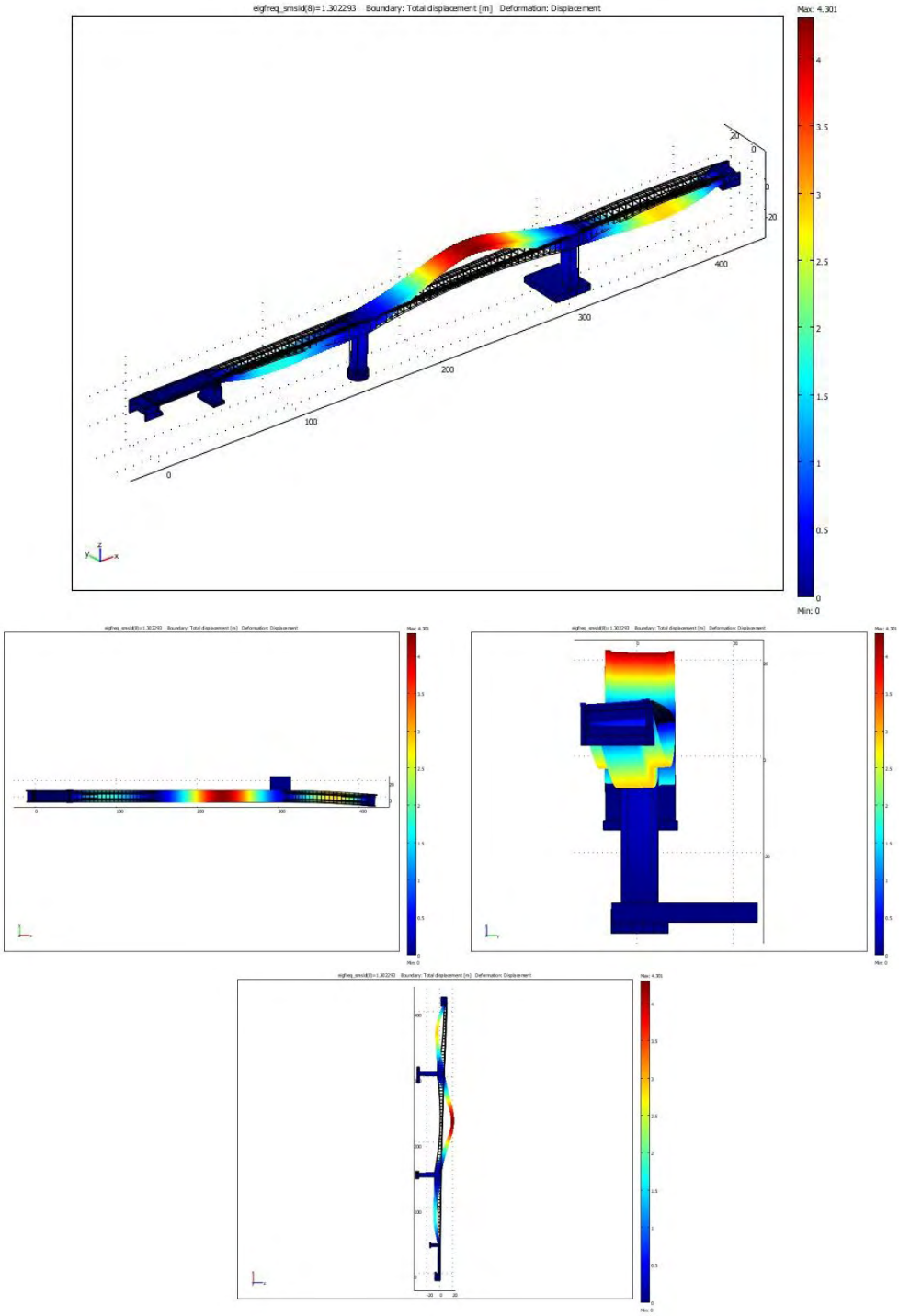
1st bending



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"8th Mode" (1.3023 Hz)

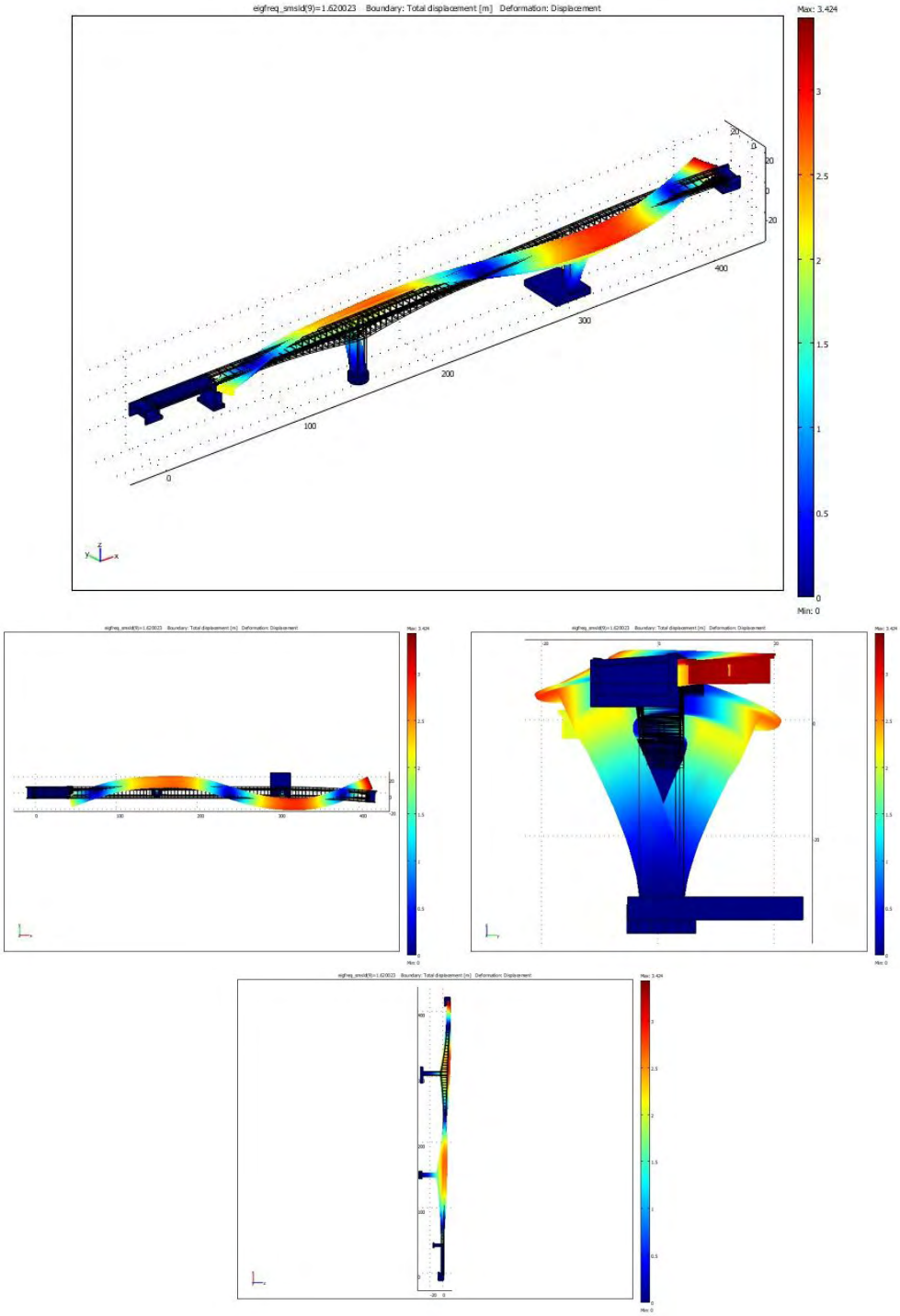
2nd bending



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"9th Mode" (1.62 Hz)

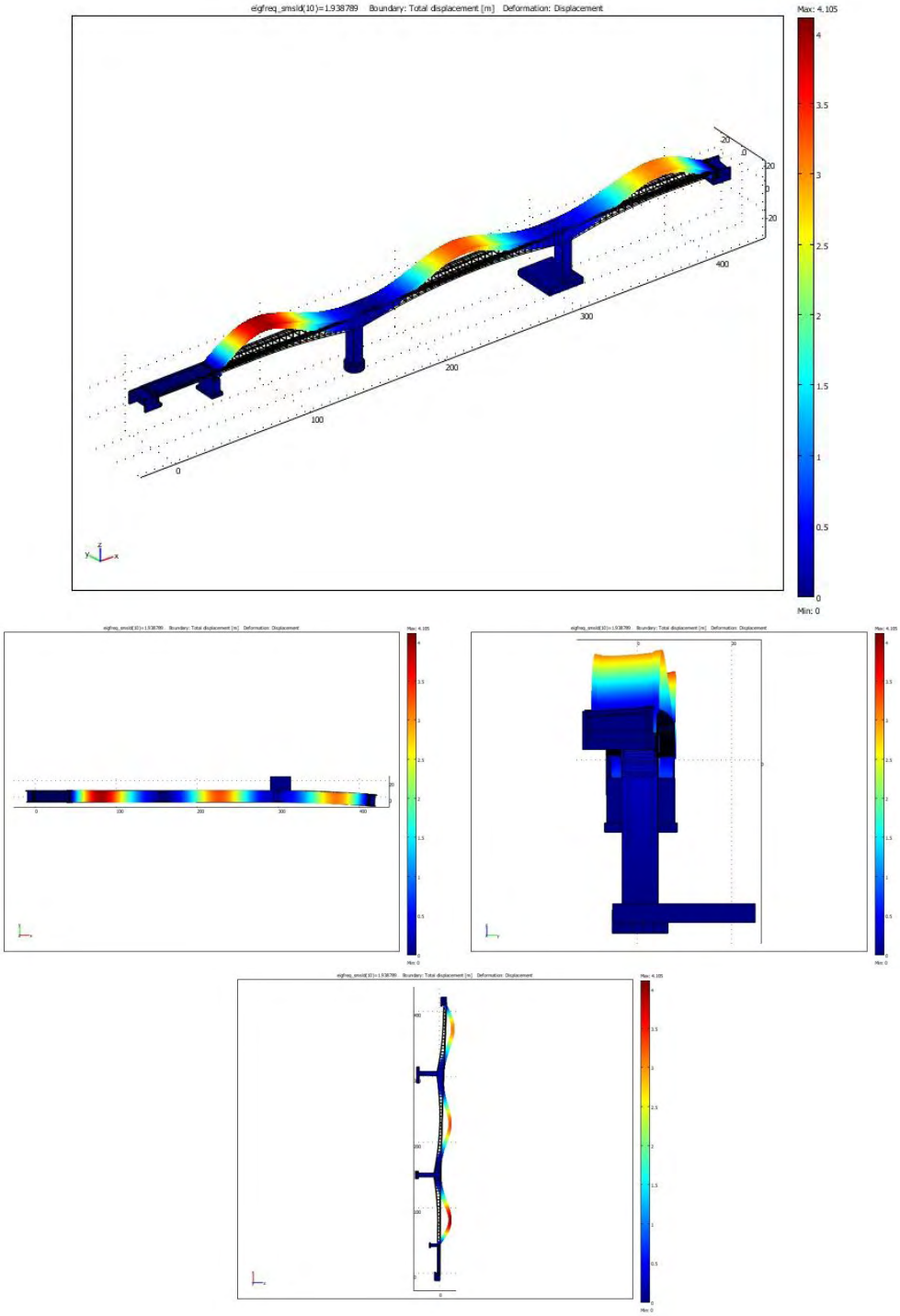
7th transverse



Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

"10th Mode" (1.9388 Hz)

3rd bending



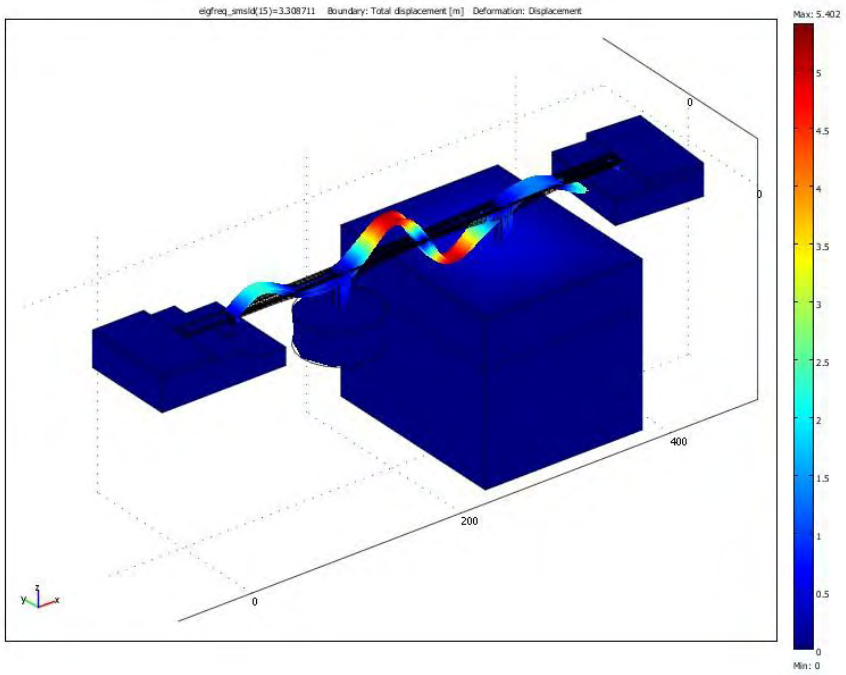
Σχήμα 5.9 Προβλεπόμενες ιδιομορφές από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του δεξιού κλάδου Τ9 της γέφυρας του Περιστερίου.

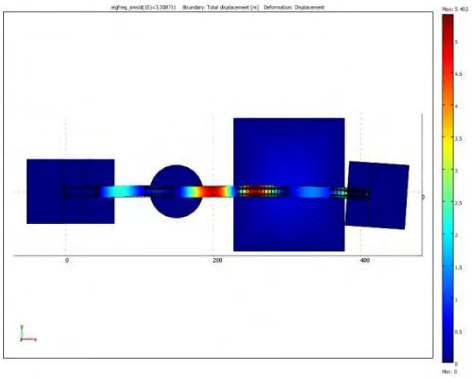
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

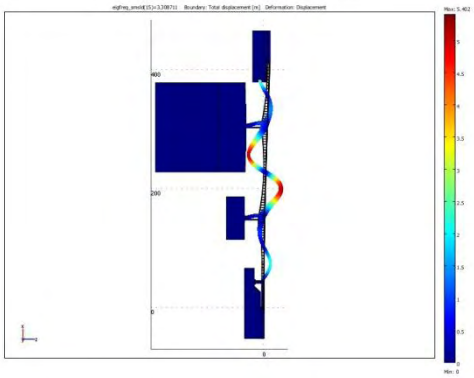
Όπως παρατηρούμε και στον πίνακα 5.3, οι 15^{η} έως και η 17^{η} ιδιοσυχνότητες του state C δεν εμφανίζονται στις άλλες δύο καταστάσεις. Αυτό είναι αποτέλεσμα της ελαστικότητας του εδάφους κυρίως κάτω από το βάθρο Μ2 όπως βλέπουμε και στις ιδιομορφές του παρακάτω σχήματος (Σχήμα 5.10).

"15th Mode of state C" (3.308711 Hz)

bending



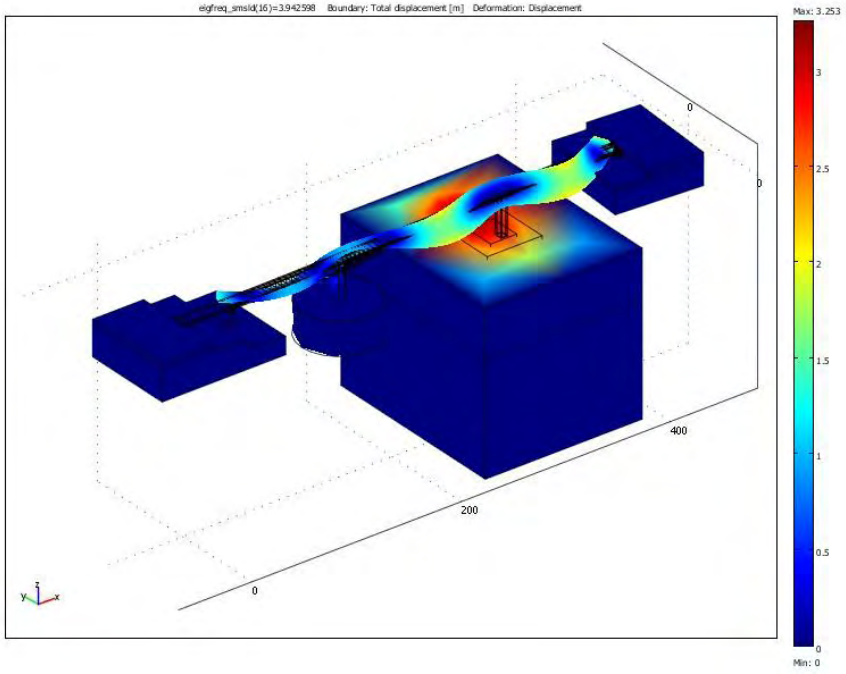


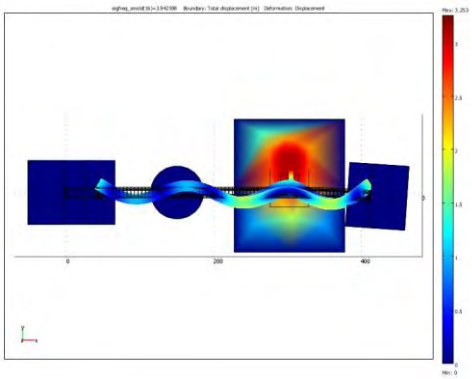


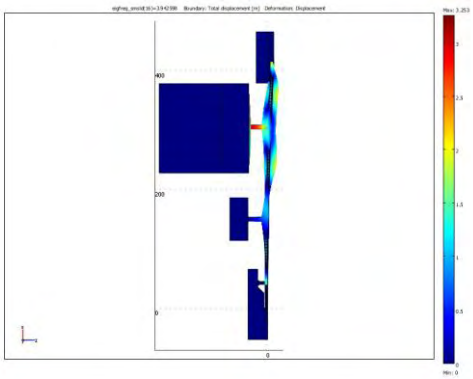
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

''16th Mode of state C'' (3.9426 Hz)

transverse



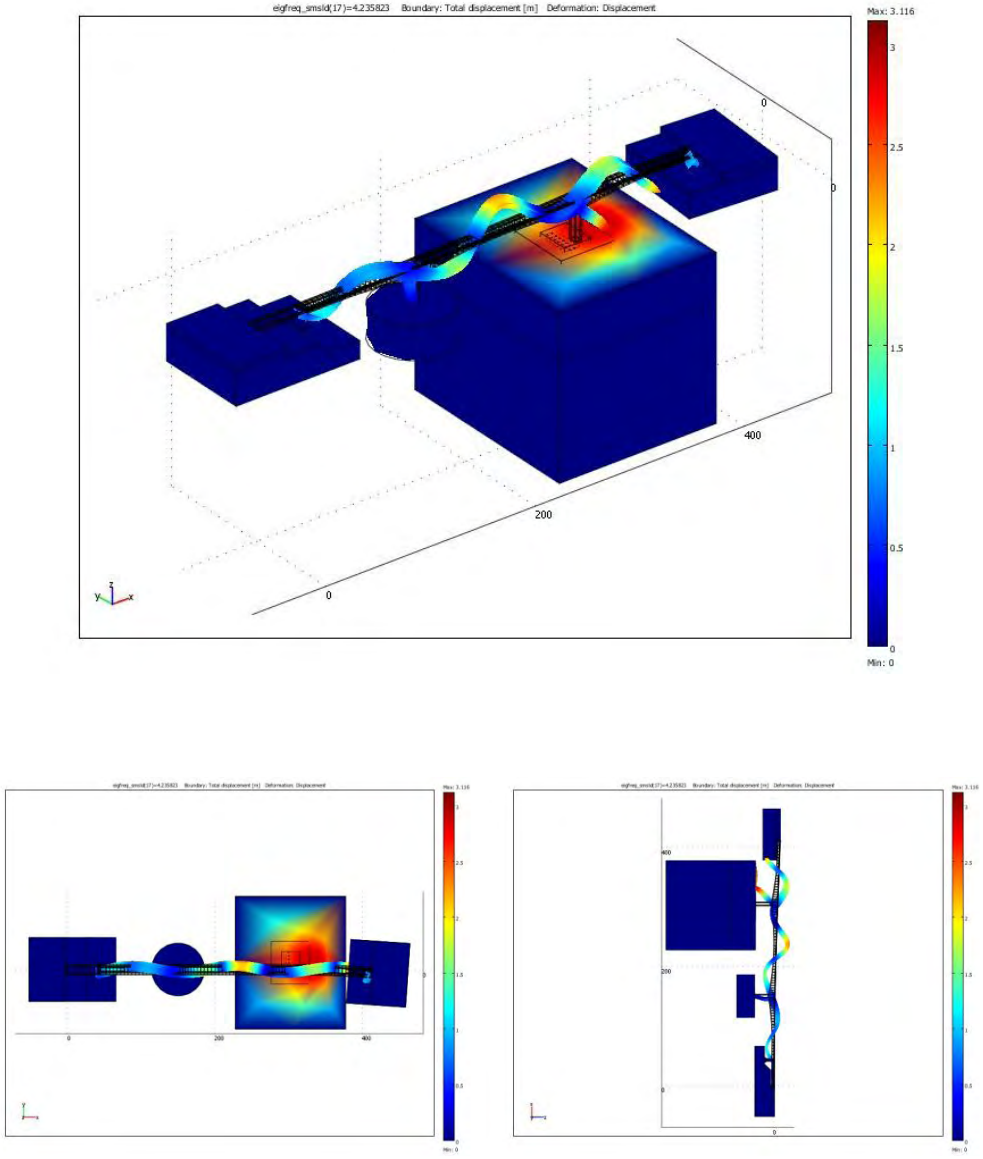




Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

''17th Mode of state C'' (4.2358 Hz)

Bending & transverse



Σχήμα 5.10 Προβλεπόμενες ιδιομορφές από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του δεξιού κλάδου Τ9. Αφορά την 15η , 16η και 17η ιδιομορφή που αντιστοιχούν στις ιδιοσυχνότητες του State C.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Στόχος της εργασίας ήταν ο λεπτομερής σχεδιασμός και ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων δύο κατασκευών: της Γέφυρας του Μετσόβου και της Γέφυρας του Περιστερίου. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν τρισδιάστατα μοντέλα για τις δύο κατασκευές με βάση τα δισδιάστατα σχέδια τα οποία ήταν διαθέσιμα. Τα τρισδιάστατα σχέδια χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό COMSOL Multiphysics για την περαιτέρω ανάπτυξη μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και την δυναμική ανάλυση των κατασκευών. Για τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων των γεφυρών χρησιμοποιήθηκαν τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία. Χρησιμοποιήθηκε διακριτοποίηση τύπου extra coerse στο πρόγραμμα COMSOL η οποία έχει αποδειχτεί σε προηγούμενες εργασίες ότι διατηρεί αποδεκτά επίπεδα ακρίβειας με σχετικά μικρό αριθμό πεπερασμένων στοιχείων και βαθμών ελευθερίας των μοντέλων. Τέλος, οι ιδιοσυχνότητες που προβλέπονται από τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που κατασκευάσθηκαν συγκρίθηκαν με τις ιδιοσυχνότητες οι οποίες προέκυψαν από την ανάλυση πειραματικών δεδομένων, όπου αυτές υπήρχαν. Τα σχετικά μικρά σφάλματα τα οποία ενδέχεται να παρατηρηθούν μεταξύ των προβλεπόμενων από τα μοντέλα τιμών των ιδιοσυχνοτήτων και των μετρούμενων τιμών αποδίδονται σε παραδοχές που έγιναν κατά την ανάπτυξη των μοντέλων και παράγοντες οι οποίοι δεν ελήφθησαν υπόψη στην μοντελοποίηση. Συγκεκριμένα, τα σφάλματα είναι πιθανόν να οφείλονται στη δυσκαμψία του εδάφους όταν αυτή δεν λήφθηκε υπόψη ή στις ιδιότητες των εφεδράνων εάν αυτές δεν προσεγγίζουν ικανοποιητικά την πραγματικότητα.

Συγκεκριμένα για τη γέφυρα Τ9 του Περιστερίου, δεν υπήρχαν τιμές ιδιοσυχνοτήτων που να προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις. Τα σημεία τα οποία ίσως το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων να θέλει αναθεώρηση είναι τα εφέδρανα και οι κολώνες της θεμελίωσης του βάθρου Μ2.

Όπως αναφέραμε στην παράγραφο 5.1, για τα εφέδρανα *τύπου 4*, χρησιμοποιήθηκαν 2 μεθοδολογίες μοντελοποίησης. Ανάμεσα σε αυτές τις δύο μεθοδολογίες παρατηρήθηκαν μικρές διαφορές όσον αφορά την επίπτωση στις ιδιοσυχνότητες του τμήματος που εδράζεται σε αυτά.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Στην παράγραφο 4.8, όπου περιγράφουμε εφέδρανα *τύπου σφαιρικής έδρασης-ολισθαίνοντα,* αναφερόμαστε σε γενικώς κινούμενα εφέδρανα. Σε αυτά δεν υπάρχει συγκράτηση όσον αφορά την απομάκρυνση των δύο ολισθαινόντων πλακών στην κατακόρυφη διεύθυνση. Στην παράγραφο 5.2 περιγράφουμε τον τρόπο εφαρμογής κινηματικών περιορισμών στο COMSOL ώστε να περιγράψουμε αυτά τα εφέδρανα στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Με αυτούς τους περιορισμούς όμως δεν δίνεται η ελευθερία απομάκρυνσης των ολισθαινόντων πλακών αλλά η ολίσθηση χωρίς τριβές μεταξύ δύο άκαμπτων πλακών διατηρώντας σταθερή απόσταση μεταξύ τους.

Στην παράγραφο 4.5 αναφερθήκαμε στον σχεδιασμό της θεμελίωσης του βάθρου Μ2. Αναφέραμε ότι η θεμελίωση περιέχει 42 κολώνες οπλισμένου σκυροδέματος Β25. Για να επιτύχουμε μικρότερο βαθμό διακριτοποίησης και κατ' επέκταση λιγότερων βαθμών ελευθερίας, αντί για κυκλικής διατομής σχεδιάστηκαν με οκταγωνική διατομή εγγεγραμμένη στην κυκλική. Επίσης στην ίδια παράγραφο αναφέρουμε την ύπαρξη δύο τύπων κολώνων ανάλογα με τον οπλισμό. Εμείς θεωρήσαμε κοινές μηχανικές ιδιότητες και για τις 42 κολώνες στην δυναμική ανάλυση.

Τα αποτελέσματα της εργασίας είναι χρήσιμα στην βελτίωση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων με βάση τις μετρήσεις οι οποίες ανακτώνται από σύστημα ενοργάνωσης για τις δύο κατασκευές. Η βελτίωση αυτή επιτυγχάνεται με κατάλληλο λογισμικό αναθεώρησης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης τα αποτελέσματα της εργασίας για την γέφυρα του Μετσόβου είναι χρήσιμα στην παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής (Ntotsios et al. 2009b) με βάση τις μετρήσεις που προέρχονται από ενσωματωμένο πάνω στην γέφυρα σύστημα αισθητήρων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157

Βιβλιογραφία

1. Νατσιάβας Σ., «Ταλαντώσεις Μηχανικών Συστημάτων», Εκδόσεις ΖΗΤΗ (2001).

2. COMSOL Documentation, *COMSOL Multiphysics Version 3.5a, "Structural Mechanics Module - User's Guide*" [http://www.comsol.com]

3. COMSOL 3.5a Documentation, *COMSOL Multiphysics Version 3.5a, "Structural Mechanics Module - Model Library".*

4. COMSOL Documentation, *COMSOL Multiphysics Version 3.5a, "Structural Mechanics Module - Reference Guide".*

5. COMSOL Documentation, *COMSOL Multiphysics Version 3.5a, "Structural Mechanics - Verification Manual".*

6. Panetsos P. and Lambropoulos S. (2006), "Bridge Health Monitoring for Egnatia Odos Bridge Management System"., *Proceedings of the 3rd European Workshop on Structural Health Monitoring*, Granada, Spain, July 5-7, (CD-Rom).

7. Ntotsios, E., Papadimitriou, C., Panetsos, P., Karaiskos, G., Perros, K. and Perdikaris, P. C. (2009b). "Bridge Health Monitoring System based on Vibration Measurements." *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7(2), pp. 469-483.

8. P. Tsopelas (15/10/2010), "Analysis of Multilayer Elastomeric Bearings"

9. P. Tsopelas (15/10/2010), "Mechanical properties of elastomeric isolators"

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
19/04/2024 13:34:51 EEST - 3.143.0.157