

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

υπό

ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΑΓΓΕΛΟΥ ΛΙΟΚΟΥ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

2009



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 8282/1
Ημερ. Εισ.: 23-03-2010
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜ
2009
ΛΙΟ

© 2009 Νικόλαος Άγγελος Λιόκος

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

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

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

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

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Πανέτσος Παναγιώτης
Διδάσκων Π. Δ. 407/80, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Παπαδημητρίου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Ντακούλα Παναγιώτη και Πανέτσο Παναγιώτη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ευχαριστίες σε όλους τους μεταπτυχιακούς φοιτητές και υποψήφιους διδάκτορες του Εργαστηρίου Δυναμικής Συστημάτων για την στήριξη τους και την άριστη συνεργασία κατά την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου.

Λιόκος Νικόλας Άγγελος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u>	6
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u> ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</u> ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΣΟΒΟΥ	
2.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά της Γέφυρας του Μετσόβου.....	9
2.2 Βάθρο Μ1.....	12
2.3 Βάθρο Μ2.....	17
2.4 Βάθρο Μ3.....	26
2.5 Κατάστρωμα.....	31
2.6 Παραδοχές κατά τον σχεδιασμό της γέφυρας.....	35
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</u> ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ	38
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u> ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	
4.1 Σχεδιασμός του οχήματος.....	56
4.2 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του οχήματος.....	58
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</u> ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	71
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	73

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το θέμα της διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση (σχεδιασμός) και η μελέτη συμπεριφοράς των κατασκευών. Πιο συγκεκριμένα οι κατασκευές που μελετήθηκαν είναι η γέφυρα του Μετσόβου, η οποία αποτελεί μέρος της Εγνατίας οδού, καθώς επίσης και το πλαίσιο ενός πειραματικού οχήματος. 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 το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks ενώ για την επιβολή των συνοριακών συνθηκών (πάκτωση, άρθρωση, πυκνότητα, υλικό και άλλα) και για 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.

Με την ανάλυση των κατασκευών σε πεπερασμένα στοιχεία και με την δυναμική τους μελέτη, μας δίνεται η δυνατότητα να κάνουμε έλεγχο της δομικής τους ακεραιότητας καθώς επίσης και μελλοντική χρήση των αποτελεσμάτων έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί μια πιθανή αναθεώρηση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.

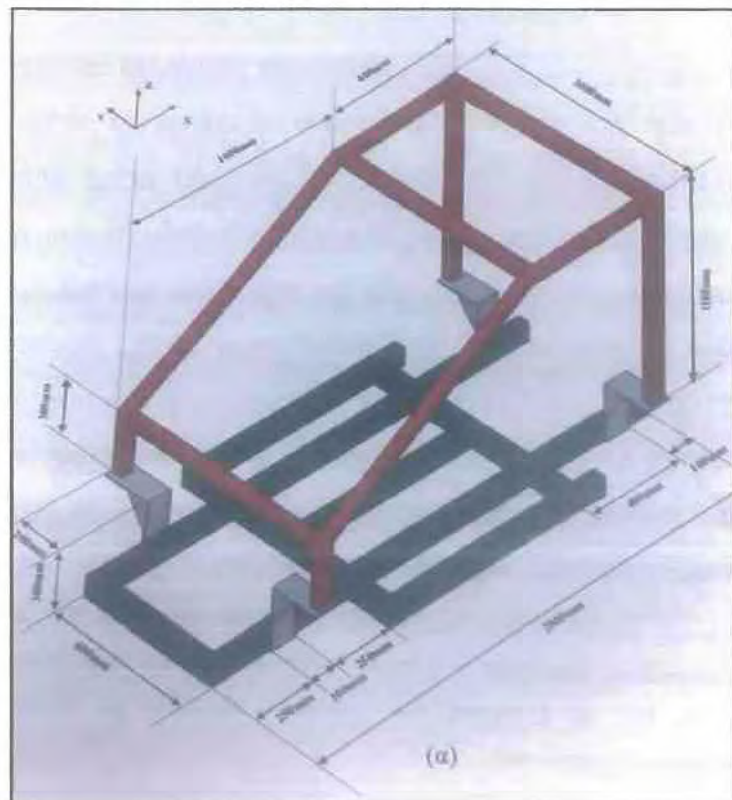
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα παρακάτω κεφάλαια ακολουθεί εκτενέστερη ανάλυση του τρόπου κατασκευής και μελέτης ως προς τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά των μοντέλων της γέφυρας του Μετσόβου και του πειραματικού οχήματος τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 1.1 και Σχήμα 1.2 αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση της γέφυρας του Μετσόβου με τις λεπτομέρειές της και εκτενής περιγραφή της δημιουργίας του μοντέλου της από επιμέρους τμήματα. Στο κεφάλαιο 3 αρχικά παρουσιάζεται το τρισδιάστατο (3D) μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας, η δυναμική της ανάλυση και εξάγονται οι ιδιοσυχνότητες και οι ιδιομορφές της συναρτήσει του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων και ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με πραγματικές μετρήσεις από την κατασκευή. Στο κεφάλαιο 4 γίνεται η παρουσίαση του σχεδιασμού και της δυναμικής ανάλυσης του μοντέλου του οχήματος και τέλος στο κεφάλαιο 5 εξάγονται τα συμπεράσματα που αποκομίστηκαν από την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αναφερθεί ότι το σχεδιαστικό πρόγραμμα που προτιμήθηκε ανάμεσα στα Pro Engineer, AutoCAD, SolidWorks είναι το τελευταίο. 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.



Σχήμα 1.1: Όψη γέφυρας του Μετσόβου (προοπτικό)



Σχήμα 1.2: Σχήμα του μοντέλου του οχήματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : **ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ ΤΟΥ ΜΕΤΣΟΒΟΥ**

2.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά της Γέφυρας του Μετσόβου

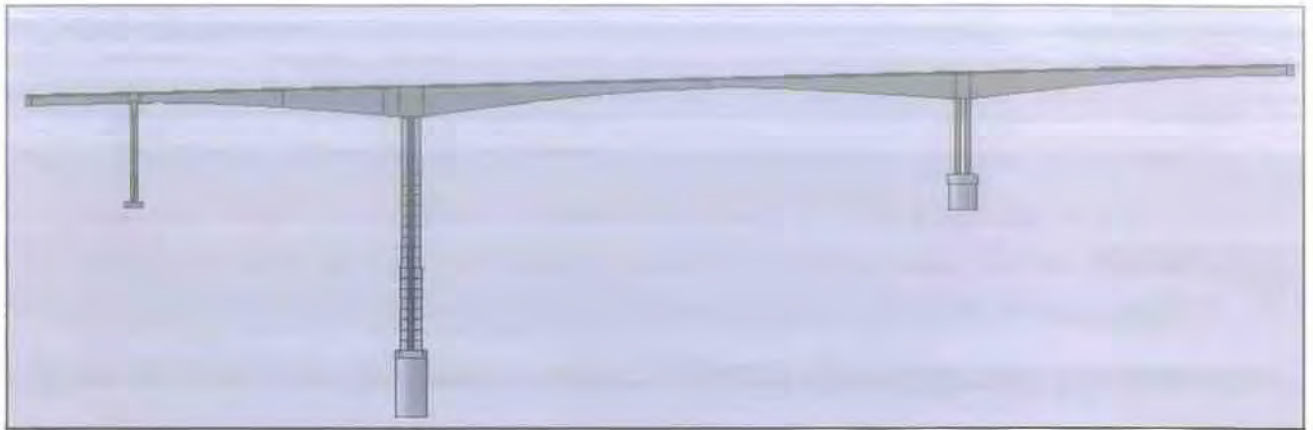
Η γέφυρα του Μετσόβου κατασκευάστηκε στο τμήμα 3.2 (Σήραγγα Ανθοχωρίου – σήραγγα Ανηλίου) της Εγνατίας Οδού και γεφυρώνει την χαράδρα του ποταμού Μετσοβίτικου. Είναι κατασκευασμένη από σπλισμένο σκυρόδεμα και με την μέθοδο της συμμετρικής προβολοδόμησης. Είναι επίσης η υψηλότερη χαραδρογέφυρα της Εγνατίας Οδού και αποτελείται από δύο κλάδους. Τον δεξιό και τον αριστερό, οι οποίοι είναι όμοιοι. Θα πρέπει να αναφέρουμε σε αυτό το σημείο πως η μελέτη που ακολουθεί έγινε για τον αριστερό κλάδο. Οι δύο κλάδοι αποτελούνται 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 αριστερό κλάδο, το κατάστρωμα έχει συνολικό μήκος 537,65 μέτρα, σταθερή κλίση 2,6% και γενικά ο κλάδος έχει μέγιστο ύψος από την κορυφή του καταστρώματος ως το έδαφος 112,31 μέτρα στο βάθρο Μ2. 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 (Α4) και αριστερά (Α0) με εφένδρανα εγκιβωτισμένου ελαστικού, κάτι που συμβαίνει επίσης και με το βάθρο Μ1. Ενώ τα Μ2 και Μ3 συνδέονται μονολιθικά με τον φορέα της γέφυρας. Επίσης το κατάστρωμα έχει πέραν της κλίσης, επίκλιση 2.5%, αποτελείται από 134 τμήματα σε όλο το μήκος των 537,65 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 .

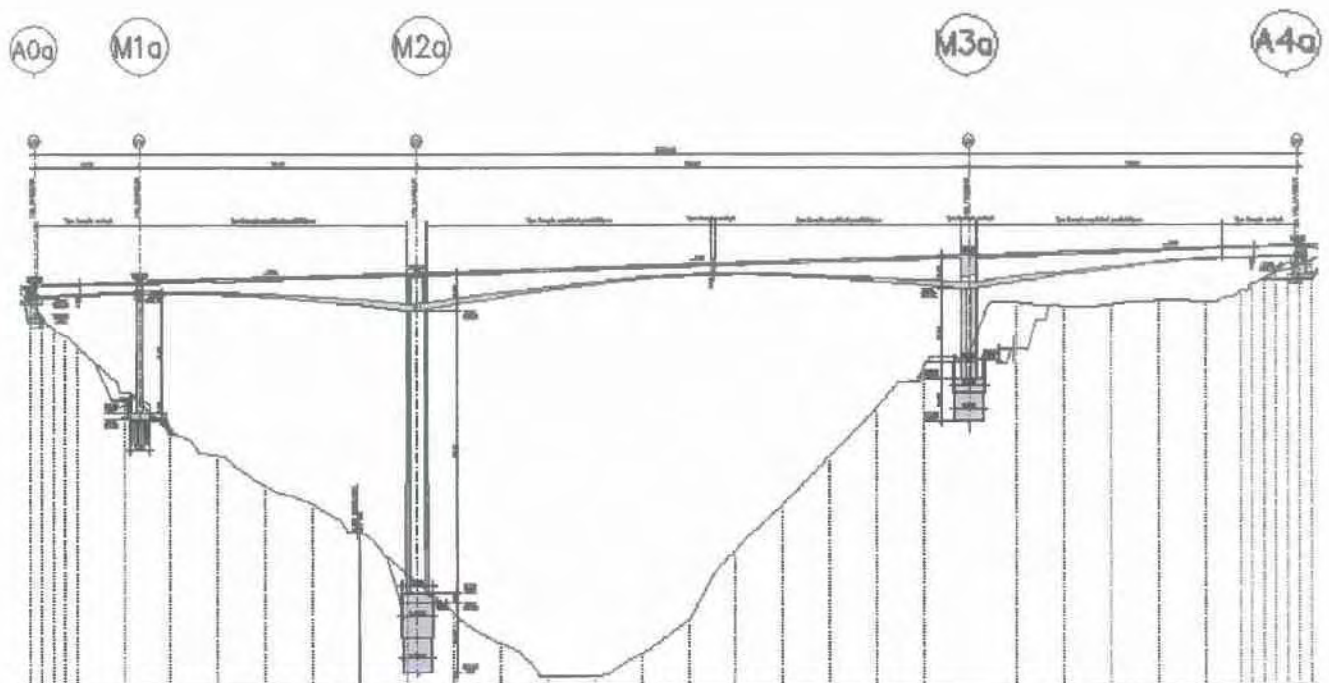
Το βάθρο M2, το οποίο είναι το υψηλότερο με ύψος 99.31 μέτρα, έχει μεταβλητή διατομή και στην κατά μήκος και στην εγκάρσια όψη από την βάση ως τα 74.80 μέτρα ύψος ενώ παραμένει σταθερή από εκεί και πάνω (από τα 74.80 ως τα 99.31 μέτρα). Όσον αφορά την κατά μήκος όψη, η εξωτερική της επιφάνεια μεταβάλλεται 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.

Τέλος όσον αφορά τα βάθρα M1 και M3 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. Λόγω της δυσκολίας αυτής, παρακάτω αναφέρονται και κάποιες παραδοχές που έγιναν έτσι ώστε η συνεργασία των προγραμμάτων σχεδιασμού και ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων να είναι εφικτή.

Στη συνέχεια ακολουθεί ανάλυση όλων των επιμέρους τμημάτων από τα οποία αποτελείται η γέφυρα του Μετσόβου. Δηλαδή το βάθρο M1, το βάθρο M2, το βάθρο M3 και το κατάστρωμα.



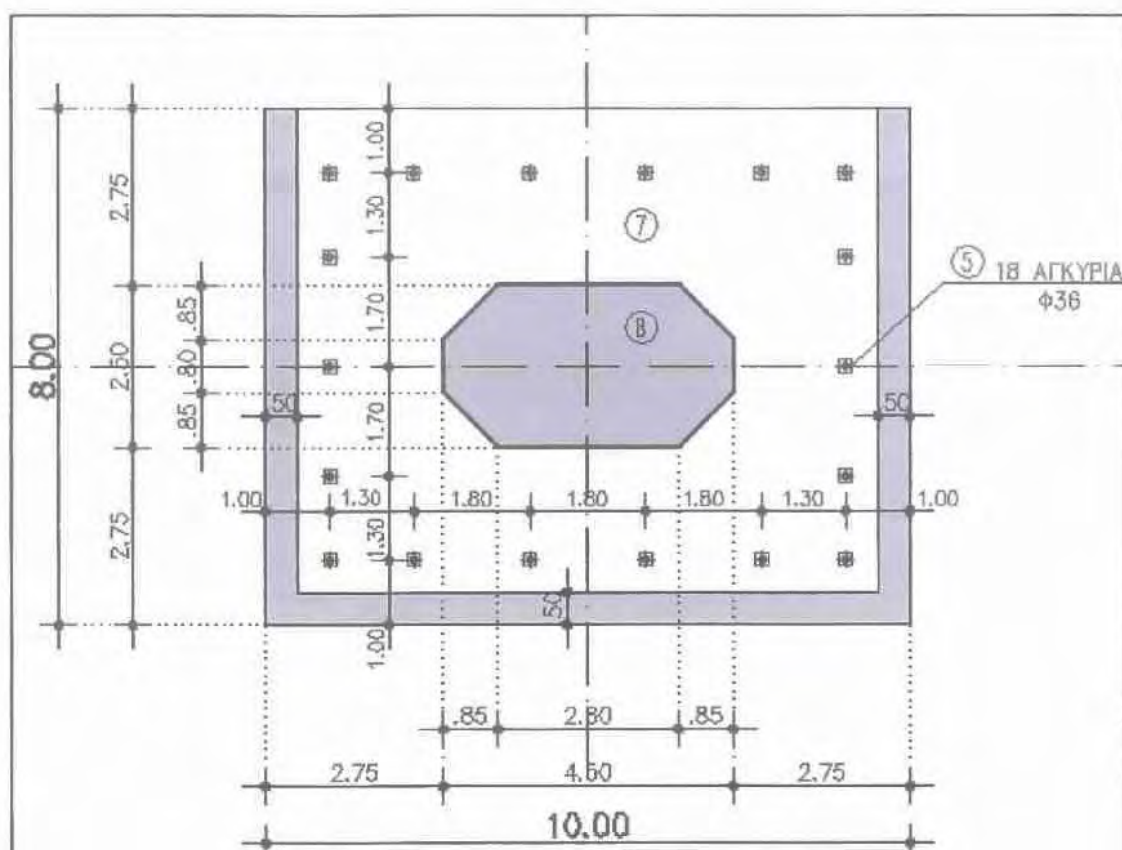
Σχήμα 2.1: Κατά μήκος όψη του αριστερού κλάδου του μοντέλου της γέφυρας



Σχήμα 2.2: Κατά μήκος τομή του αριστερού κλάδου της γέφυρας (πηγή: Εγνατία Οδός)

2.2 Βάθρο Μ1

Το βάθρο Μ1 βρίσκεται σε απόσταση 44,78 μέτρων από το ακρόβαθρο Α0 και έχει ύψος 44,1 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.

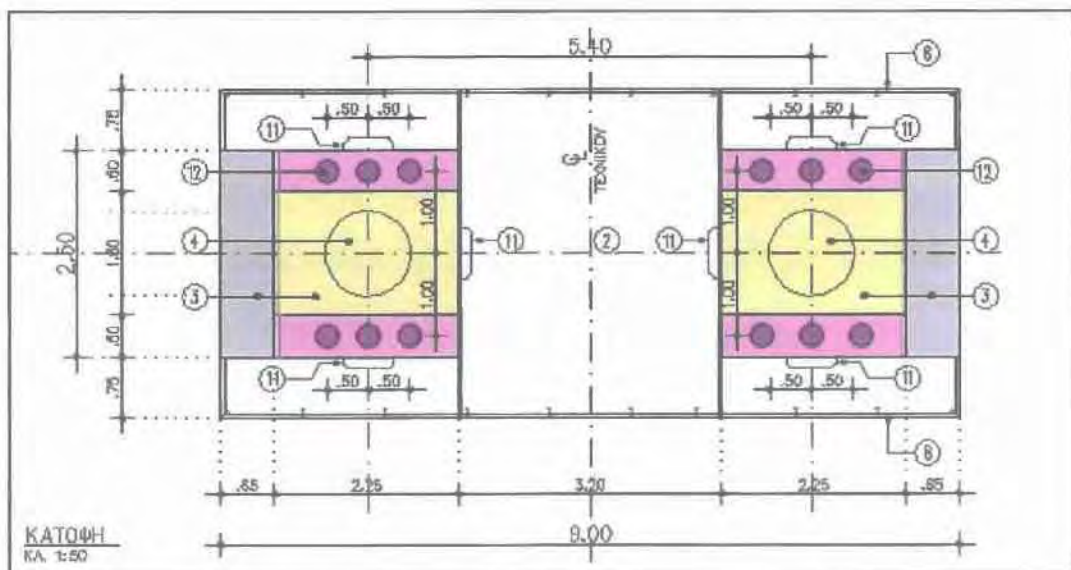


Σχήμα 2.3: Κάτοψη θεμελίωσης μεσόβαθρου Μ1α (πηγή: Εγνατία Οδός)

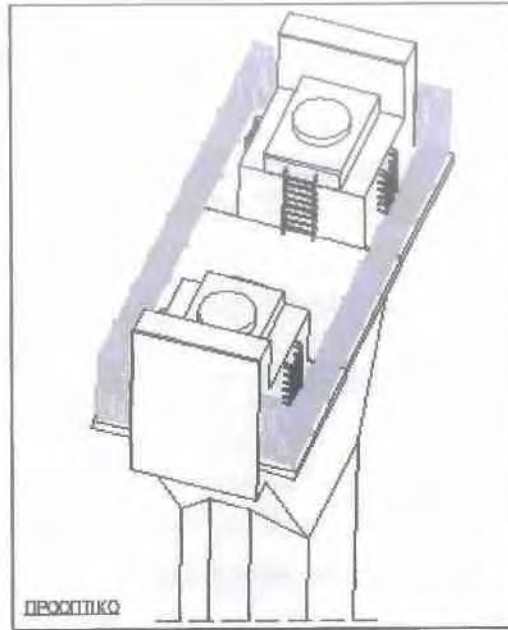
Το ιδιαίτερο αυτού του βάρου είναι ότι η επαφή του με το κατάστρωμα γίνεται μέσω εφεδράνων ολίσθησης κάτι που συμβαίνει και με τα δύο ακρόβαθρα. Τα εφεδράνα που υπάρχουν στην κεφαλή του βάρου επιτρέπουν την κίνηση του καταστρώματος μόνο εγκάρσια ως προς την κεφαλή.

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

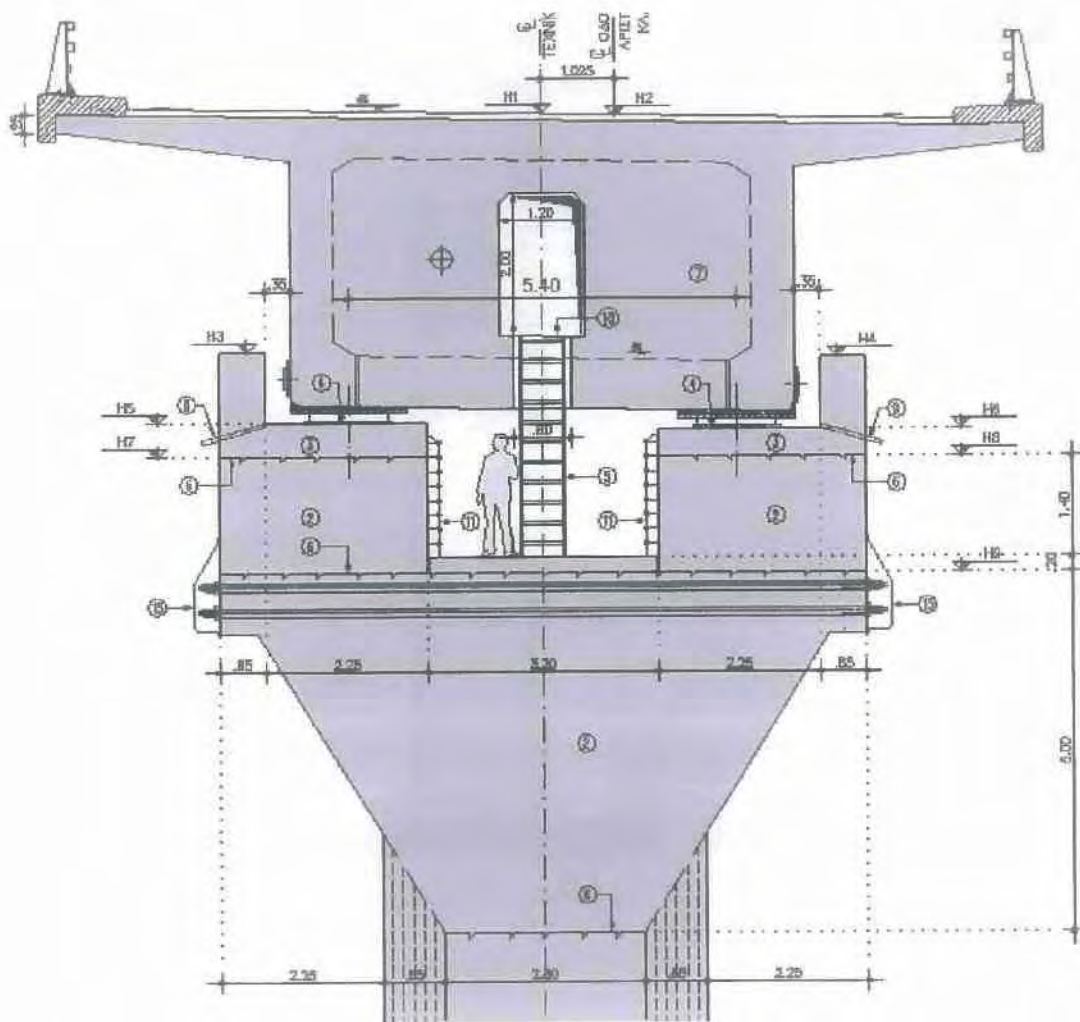
Πιο συγκεκριμένα στο Σχήμα 2.4 βλέπουμε την κάτοψη της κεφαλής απ' όπου φαίνεται και η ακριβής γεωμετρία των εφεδράνων που προαναφέρθηκαν και παρουσιάζονται με τον δείκτη 4, ακολουθεί το Σχήμα 2.5 στο οποίο φαίνεται το προοπτικό της κεφαλής ώστε να κατανοήσουμε και να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε την γενικότερη γεωμετρία της και τέλος στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται μια εγκάρσια τομή της κεφαλής όπου φαίνονται οι ακριβείς της διαστάσεις καθώς επίσης και η γεωμετρία του φορέα του καταστρώματος στην M1.



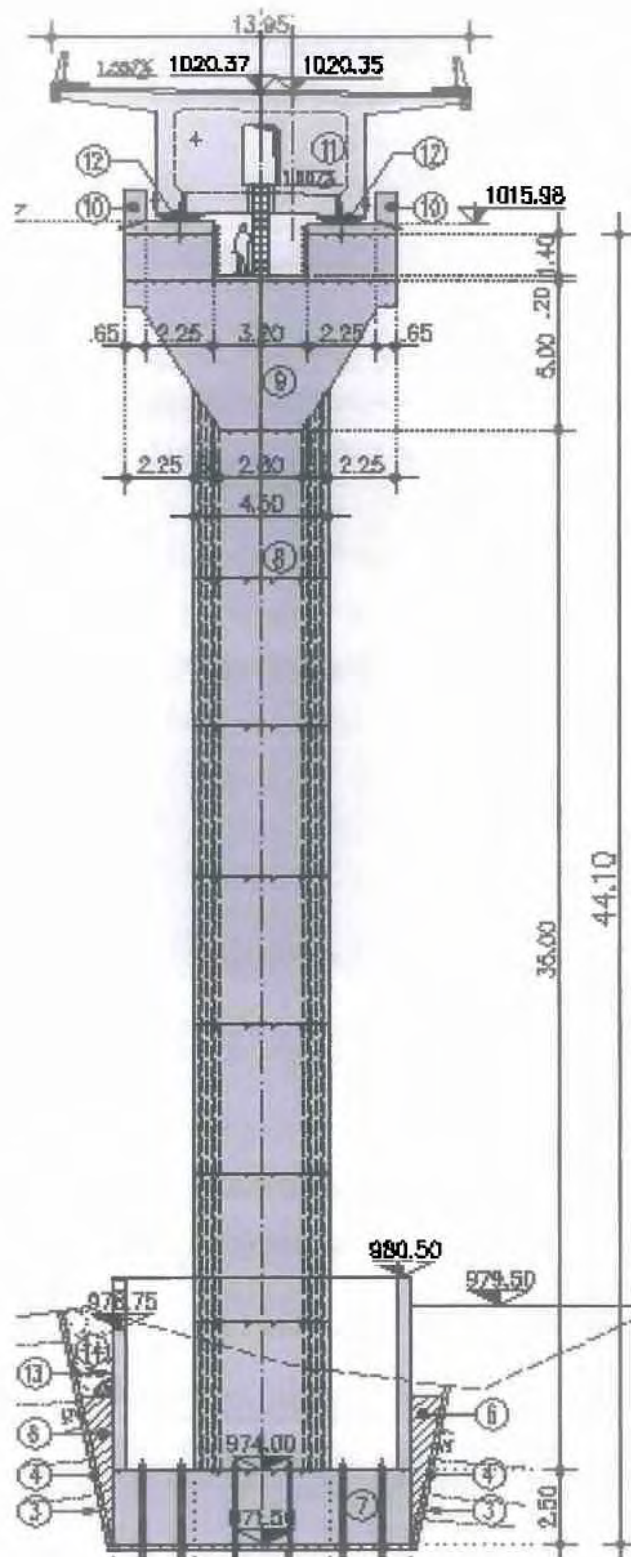
Σχήμα 2.4: Κάτοψη κεφαλής του μεσόβαθρου M1



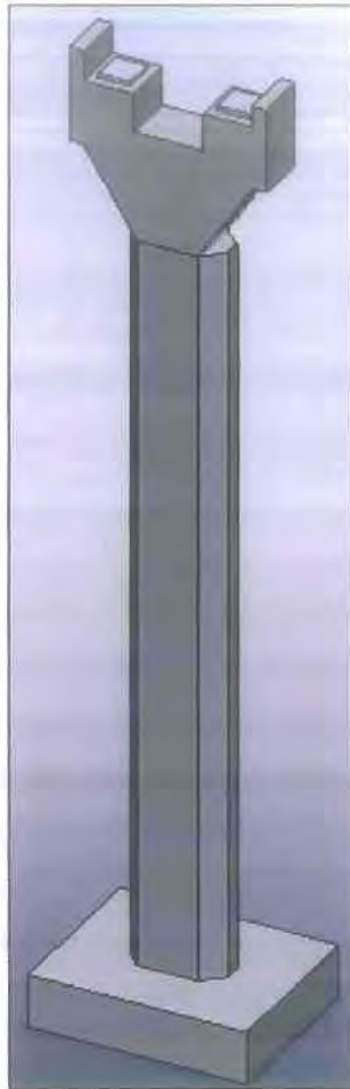
Σχήμα 2.5



Σχήμα 2.6 : Εγκάρσια τομή της κεφαλής του βάθρου M1



Σχήμα 2.7 : Εγκάρσια τομή του M1



Σχήμα 2.8 : Τρισδιάστατη όψη του μοντέλου του μεσόβαθρου M1 στο SolidWorks

Η δημιουργία του μοντέλου από τα δισδιάστατα σχέδια που είχαμε από την εταιρεία Εγνατία οδός έχει ως εξής: Δημιουργήθηκε αρχικά ένα κομμάτι (part) το οποίο αποτελείτο από την βάση και τον κεντρικό κορμό οκταγωνικής διατομής, έπειτα δημιουργήθηκε η κεφαλή του μεσόβαθρου σαν ξεχωριστό κομμάτι (part), μετά ενώθηκαν τα δυο κομμάτια μεταξύ τους χρησιμοποιώντας την εντολή mate του προγράμματος SolidWorks δημιουργώντας ένα assembly.

Τέλος επάνω στο τελικό κομμάτι που έχουμε από την ένωση των δύο επιμέρους κομματιών, προσθέτουμε τα εφέδρανα που θα ενωθούν με τα εφέδρανα τα οποία σχεδιάζουμε στο κατάστρωμα και θα αποτελέσουν τα σημεία τομής του καταστρώματος με το βάθρο. Στα Σχήματα 2.7 και 2.8 φαίνονται οι λεπτομερές διαστάσεις και το τελικό σχεδιαστικό προϊόν το οποίο προέκυψε από το SolidWorks, αντίστοιχα.

2.3 Βάθρο M2

Το βάθρο M2 βρίσκεται σε απόσταση 117,87 μέτρων από το βάθρο M1 (απόσταση κέντρων), έχει ύψος 99,31 μέτρα χωρίς τον φορέα του ύψους 13 μέτρων και είναι το υψηλότερο δομικό στοιχείο της χαραδρογέφυρας του Μετσόβου.

Όμως το τμήμα της κεφαλής του βάθρου έχει αρκετά σύνθετη και μεταβλητή γεωμετρία, όπως θα δούμε στην Παράγραφο 2.4, όπου αναλύεται λεπτομερώς το κατάστρωμα.

Άλλο ένα χαρακτηριστικό του που το κάνει να αποτελεί το πιο σύνθετο από τα τρία βάθρα είναι η μεταβλητή διατομή του, ή πιο ακριβώς η μεταβολή του πάχους της διατομής του στην εγκάρσια και στην αξονική ή κατά μήκος διεύθυνση.

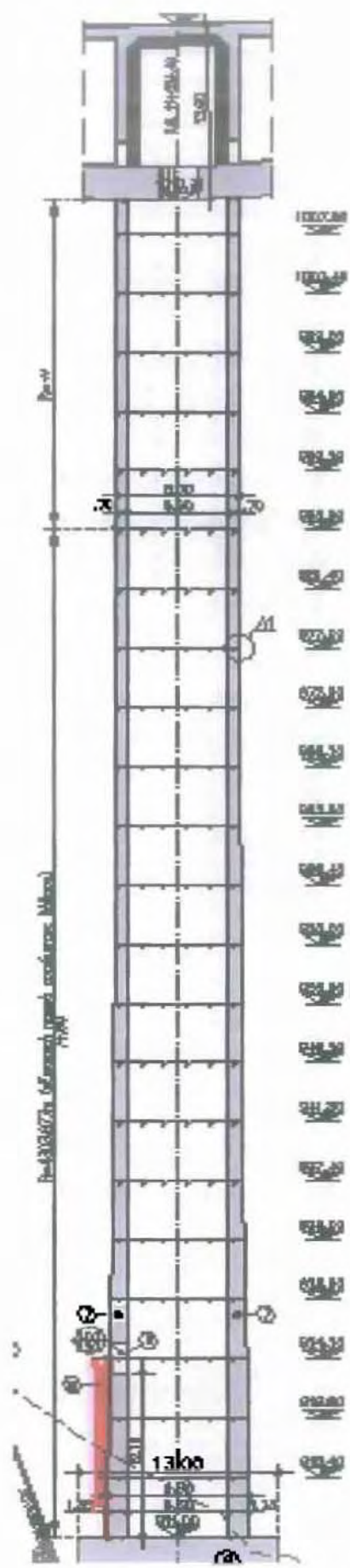
Η μεταβολή του πάχους οφείλεται στην μεταβολή της εσωτερικής και της εξωτερικής επιφάνειας της εγκάρσιας τομής, οι οποίες ακολουθούν κύκλους με διαφορετικές ακτίνες καθώς επίσης και στην μεταβολή μόνο της εξωτερικής επιφάνειας της κατά μήκος τομής ακολουθώντας και αυτή κύκλο με ακτίνες και τόξα όπως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

Για την διευκόλυνση της κατανόησης της γεωμετρίας του βάθρου M2, οι παραπάνω λεπτομέρειες φαίνονται στα Σχήματα 2.9 και 2.10 που ακολουθούν, τα οποία λόγω των λεπτομερειών τους εισάγονται το καθένα σε ξεχωριστά φύλλα.

Στο Σχήμα 2.9, βλέπουμε ουσιαστικά αυτά που αναφέρθηκαν στα γενικά τεχνικά χαρακτηριστικά για το βάθρο M2. 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.

R=4303.877m (εξωτερική ηχοαπότομή το χωμάτινο βάθρου) R=∞
74.80

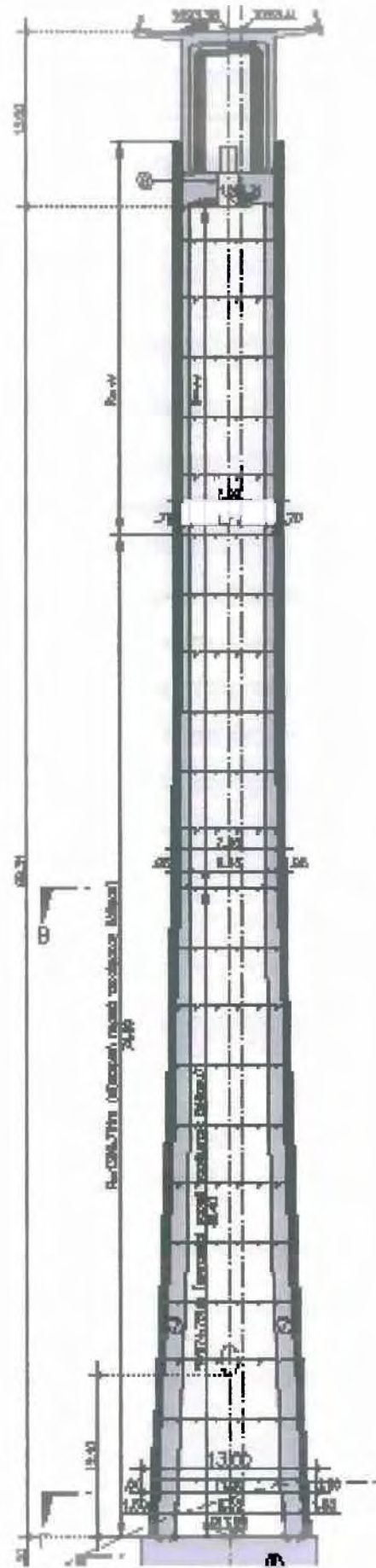


Σχίμα 2.9 : Κατά μήκος τομή M2α

R=974.751m (εσωτερική περιφέρεια χάλυβα βόθρου)

13.00

48.40



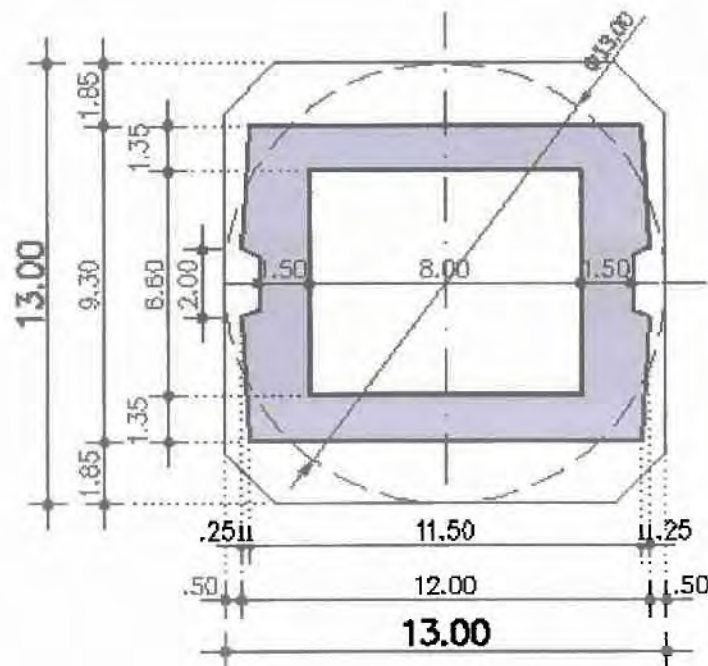
Σχήμα 2.10 : Εγκάρσια τομή M2α

Όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 2.10, η εξωτερική επιφάνεια μεταβάλλεται ακριβώς 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.

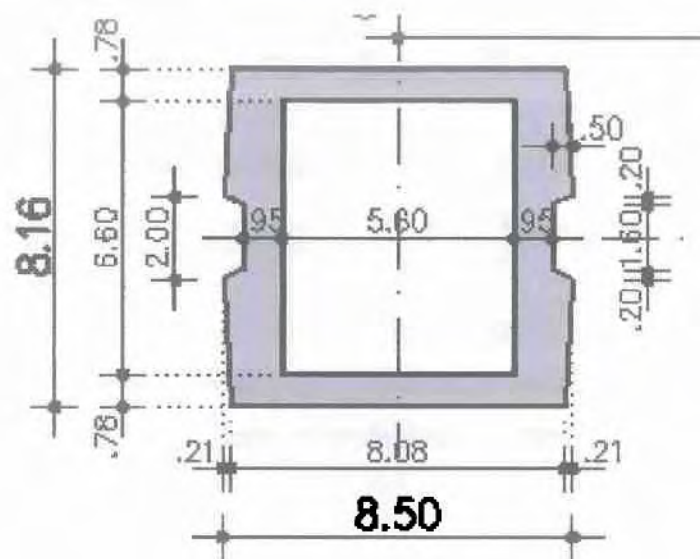
Στην εγκάρσια τομή όμως βλέπουμε πως σε αντίθεση με την κατά μήκος, η εσωτερική επιφάνεια δεν παραμένει σταθερή, αλλά μεταβάλλεται από την βάση μέχρι και το ύψος των 48.40 μέτρων. Ο τρόπος μεταβολής της είναι παρόμοιος με αυτόν της εξωτερικής. Εδώ όμως η εξωτερική επιφάνεια περιγράφει κύκλο με ακτίνα $R=974.751$ μέτρα, όπως φαίνεται και στις λεπτομέρειες αριστερά της τομής.

Τέλος μια σημαντική πληροφορία που δίνεται από το Σχήμα 2.10 της εγκάρσιας τομής είναι ότι το κατάστρωμα πάνω ακριβώς από το βάθρο M2 (ή εναλλακτικά η κεφαλή του βάθρου M2) έχει ύψος 13 μέτρα.

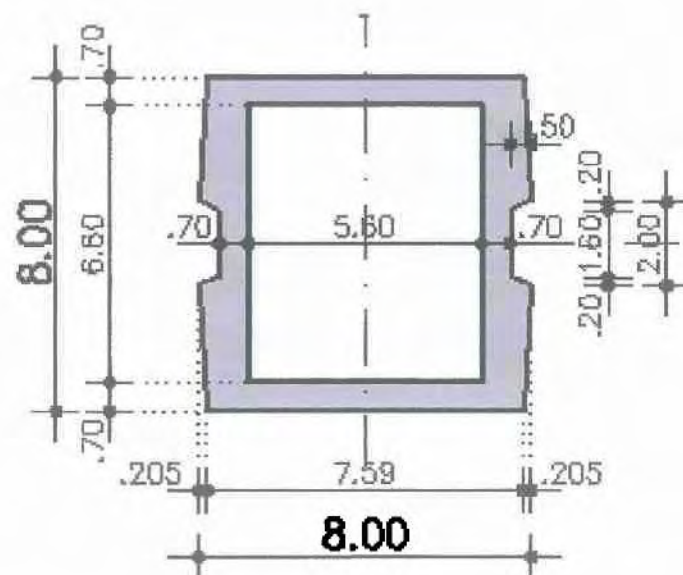
Συνεχίζοντας με την γεωμετρία του βάθρου M2 θα πρέπει να αναφερθεί πως στα σχέδια της εταιρείας υπήρχαν κατόψεις μόνο σε τρία σημεία του βάθρου από όπου φαινόταν ότι υπάρχει μεταβολή της διατομής. Μια στη βάση (Σχήμα 2.11), μια στο ύψος των 48,4 μέτρων (Σχήμα 2.12) και μία τρίτη σε ύψος 74,8 μέτρων (Σχήμα 2.13), πάνω από το οποίο η διατομή του βάθρου M2 παραμένει σταθερή όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.9 και 2.10 .



Σχήμα 2.11 : Διατομή στη βάση της M2 (τομή Γ-Γ του σχήματος 2.10)



Σχήμα 2.12 : Διατομή σε ύψος 48.40 μέτρα από τη βάση της M2 (τομή Β-Β του σχήματος 2.10)



Σχήμα 2.13 : Διατομή σε ύψος 74.80 μέτρα από τη βάση της M2

Από την άλλη μεριά, 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. Γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την σχεδόν πλήρη ακρίβεια του μοντέλου του βάθρου M2, αφού η σχεδίαση του έγινε ακριβώς όπως και η κατασκευή του στην πραγματικότητα.

Ο υπολογισμός αυτών των ενδιάμεσων διατομών οι οποίες δεν υπήρχαν στα σχέδια της Εγνατίας οδού έγινε με χρήση ενός διπλού κώδικα σε Matlab. Στον κώδικα χρησιμοποιήθηκαν απλές γεωμετρικές σχέσεις με την βοήθεια των οποίων υπολογίστηκε σε κάθε βήμα των τεσσάρων μέτρων ύψους η μεταβολή του πάχους στην εγκάρσια και στην κατά μήκος τομή. Πιο συγκεκριμένα, με τον όρο διπλός κώδικας εννοείται πως υπήρχε ένα πρόγραμμα 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.

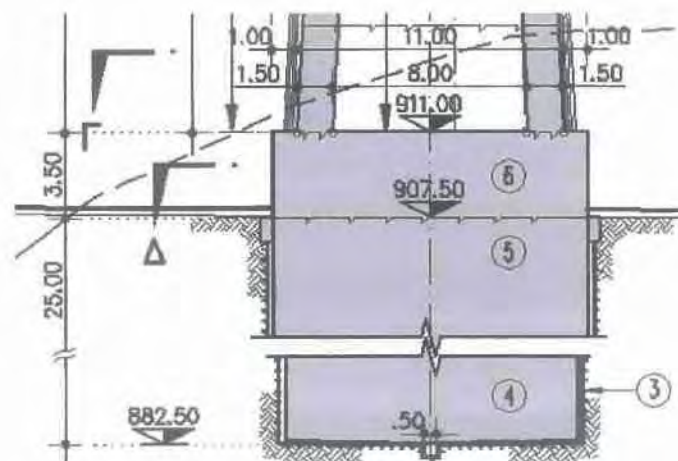
Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του πάχους της κάθε διατομής είναι $\delta = R - \sqrt{R^2 + h^2}$, όπου R είναι η ακτίνα καμπυλότητας, h το ύψος και δ το πάχος στο επόμενο ύψος h. Ο όρος $\sqrt{R^2 + h^2}$ είναι ουσιαστικά το κατά πόσο μεταβάλλεται το πάχος της κάθε διατομής περνώντας από μεγαλύτερο ύψος σε μικρότερο και προκύπτει από την γεωμετρία του ορθογωνίου τριγώνου που ενώνει το κέντρο του κύκλου και τις εξωτερικές αριστερές επιφάνειες του βάθρου στα σημεία με διαφορά ύψους h μιας που ισχύει ότι $x = R \cos \theta = R \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = R \sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2}} = \sqrt{R^2 + h^2}$.

Όσον αφορά την μετατροπή των σχεδίων σε μοντέλο έγινε χρησιμοποιώντας την εντολή Lofted Boss του σχεδιαστικού προγράμματος SolidWorks 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 M2 χρησιμοποιήθηκε η εντολή Extruded Boss η οποία

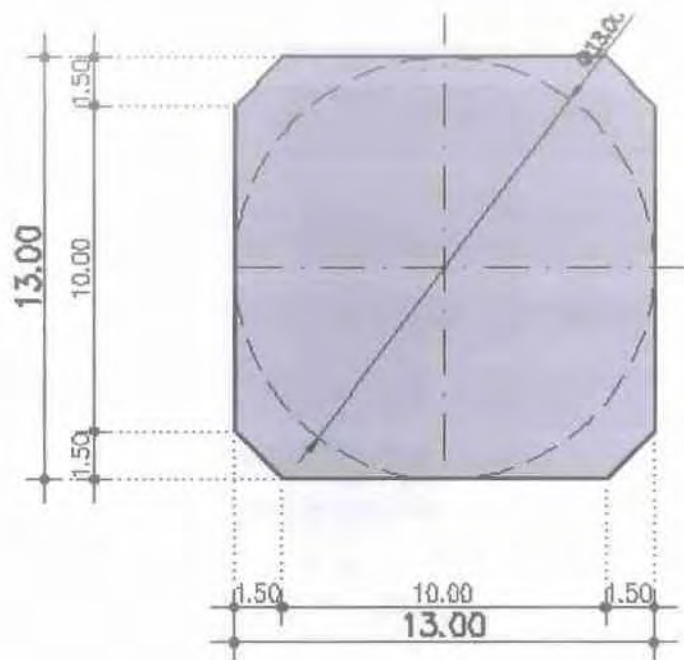
μετατρέπει μια δισδιάστατη διατομή (σχέδιο) σε τρισδιάστατο, δίνοντας του απλά το μήκος της τρίτης διάστασης.

Η διαφορά της τελευταίας από την πρώτη εντολή έγκειται στο ότι η πρώτη χρησιμοποιείται για την δημιουργία ενός τρισδιάστατου σώματος με μεταβλητή διατομή. Δηλαδή ενώνει τα σημεία δύο διατομών (ανεξαρτήτως από το αν είναι όμοιες ή όχι) που είναι σχεδιασμένες σε παράλληλα επίπεδα, γεμίζοντας την ενδιάμεση περιοχή με συμπαγές υλικό.

Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε και την γεωμετρία καθώς επίσης και την μορφή της θεμελίωσης του βάθρου M2, η οποία φαίνεται στα Σχήματα 2.14 και 2.15. Το Σχήμα 2.14 είναι το κάτω τμήμα του Σχήματος 2.10 το οποίο λείπει. Είναι δηλαδή τμήμα της εγκάρσιας τομής του βάθρου M2. Από την άλλη το Σχήμα 2.15 αποτελεί κάτοψη του βάθρου M2 στην τομή Δ του Σχήματος 2.14. Ουσιαστικά η θεμελίωση του βάθρου M2 αποτελείται, ξεκινώντας από το έδαφος από έναν συμπαγή κύλινδρο διαμέτρου δεκατριών μέτρων ($\Phi 13$) και ύψους 25 μέτρων επάνω στον οποίο βρίσκεται μια οκταγωνική γεωμετρία με διαστάσεις που φαίνονται στο Σχήμα 2.15.

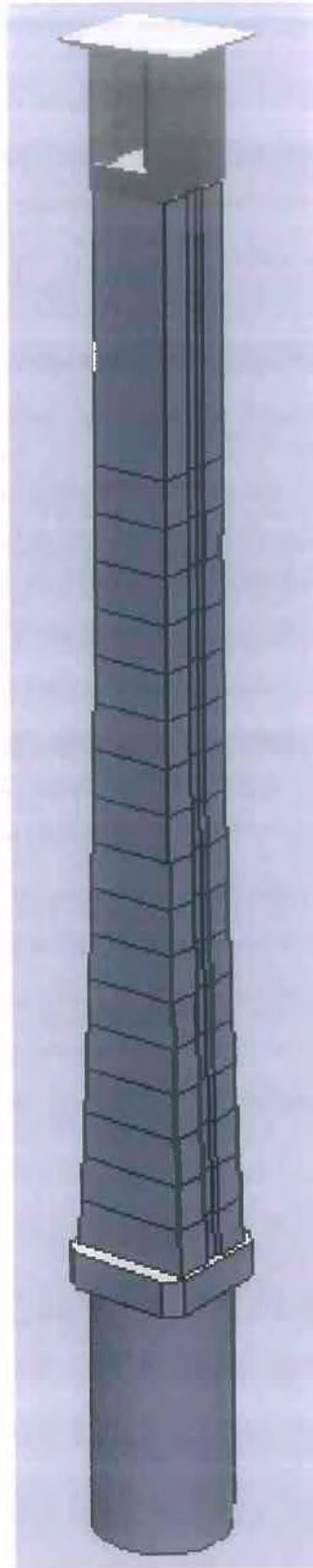


Σχήμα 2.14: Εγκάρσια τομή θεμελίωσης βάθρου M2



Σχήμα 2.15: Κάτοψη θεμελίωσης βάρου M2

Το τελικό σχεδιαστικό προϊόν που προέκυψε από το SolidWorks για το βάρου M2 φαίνεται στο Σχήμα 2.16 στο οποίο φαίνεται το βάρου M2 με την θεμελίωση και τον φορέα του καταστρώματος στο βάρου. Για τον φορέα του βάρου M2 γίνεται εκτενέστερη ανάλυση ως προς την γεωμετρία του και τον τρόπο σχεδιασμού του στην Παράγραφο 2.6.



Σχήμα 2.16: Γενική τρισδιάστατη όψη μοντέλου του βάρου M2 στο SolidWorks

2.4 Βάθρο M3

Το τρίτο και τελευταίο βάθρο της γέφυρας είναι το M3. Βρίσκεται σε απόσταση 235 μέτρων από το βάθρο M2 (απόσταση κέντρων) που είναι αριστερά του στην κατά μήκος τομή και 140 μέτρων από το ακρόβαθρο A4 που είναι δεξιά του στην ίδια τομή. Έχει συνολικό ύψος 31.92 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. 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.

Ως προς την δημιουργία του μοντέλου είναι σχετικά απλή. 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.

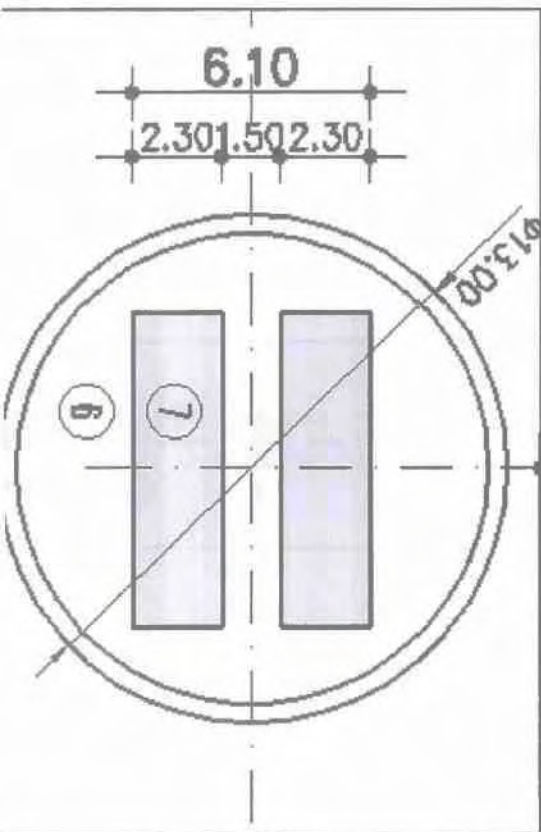
Για τον πλήρη καθορισμό της γεωμετρίας του βάθρου M3 χρησιμοποιήθηκαν τα σχέδια της εγκάρσιας και της κατά μήκος τομής (Σχήματα 2.18 και 2.19), όπως επίσης και μιας τομής της εγκάρσιας όψης που ουσιαστικά αποτελεί κάτοψη του βάθρου (Σχήμα 2.17). Η τρισδιάστατη όψη του τελικού σχεδιαστικού προϊόντος του μοντέλου του βάθρου το οποίο προέκυψε από το SolidWorks παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.20.

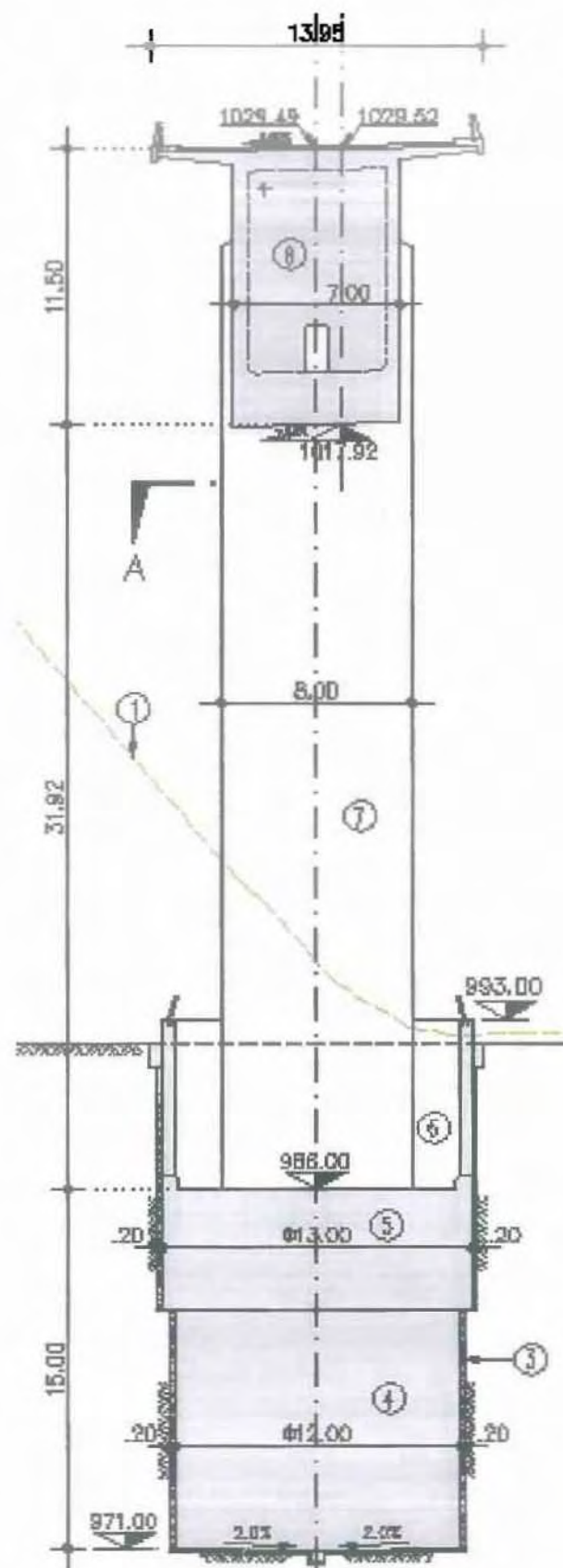
Επίσης από τα Σχήματα 2.17, 2.18 και 2.19 εξάγουμε και την γεωμετρία της θεμελίωσης του βάθρου M3, η οποία αποτελείται από δύο συμπαγείς κυλίνδρους με διαμέτρους δώδεκα και δεκατριών μέτρων ($\Phi 12$ και $\Phi 13$) και συνολικού ύψους δεκαπέντε μέτρων.



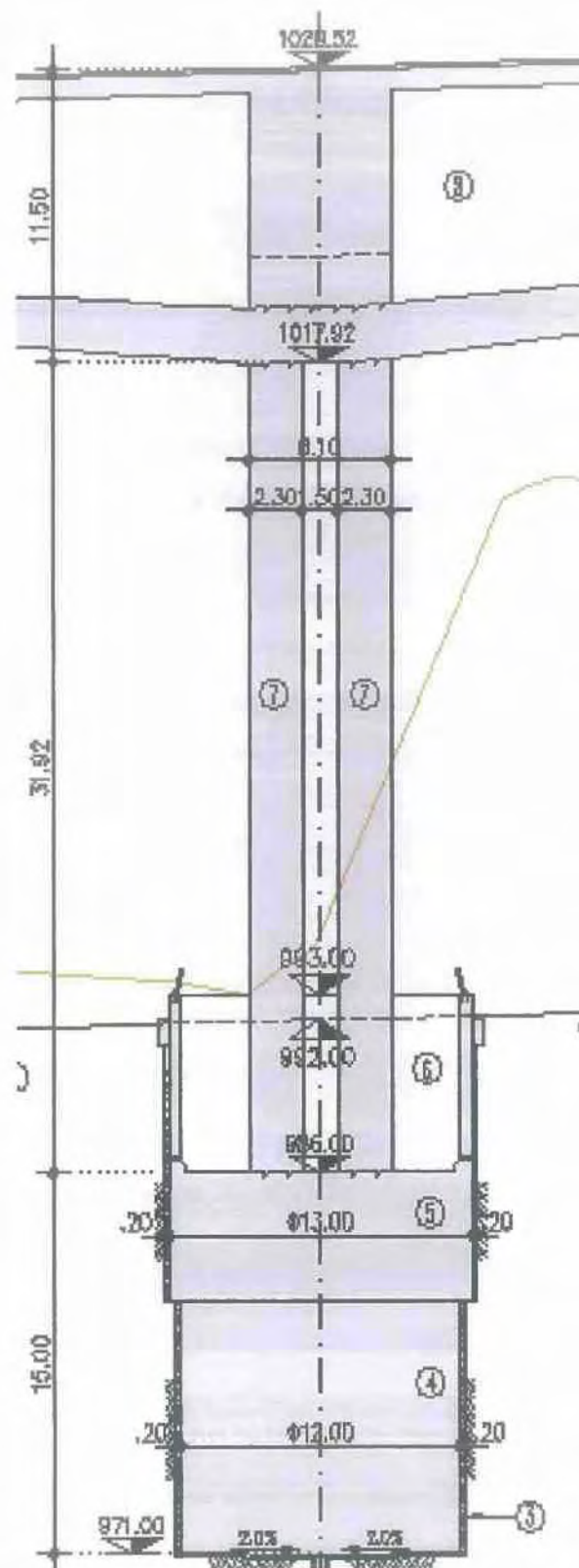


Σχήμα 2.17 : Κάτοψη Βάθρου Μ3 από την εγκάρσια όψη

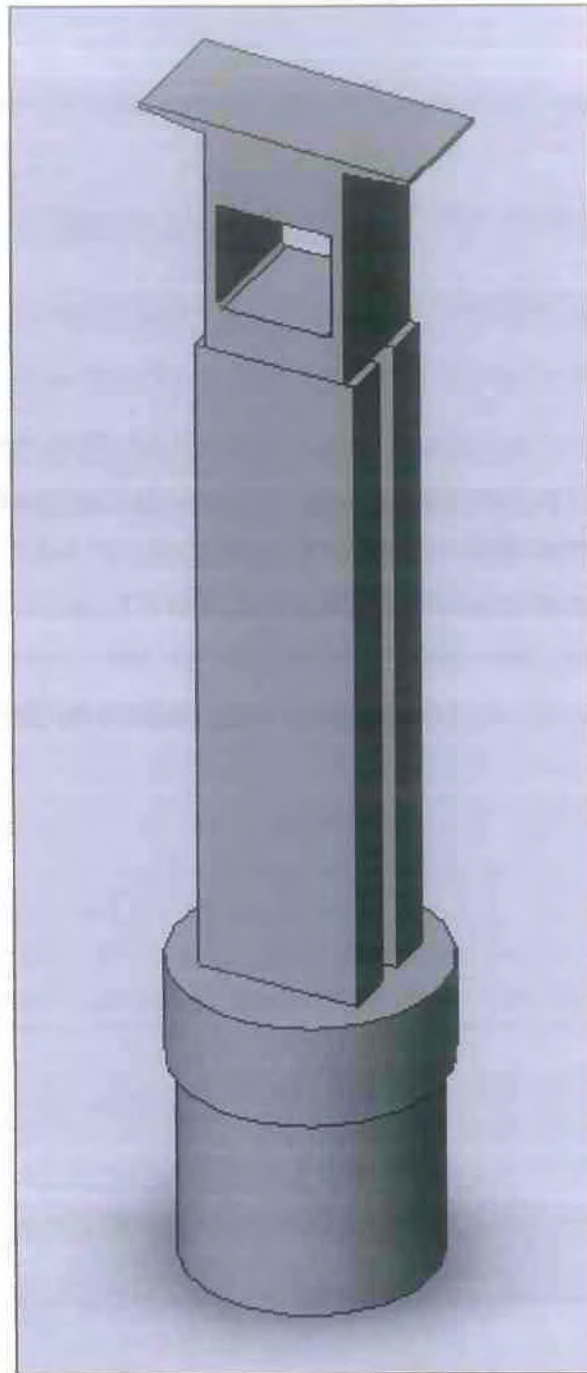




Σχήμα 2.18 : Εγκάρσια τομή Μ3



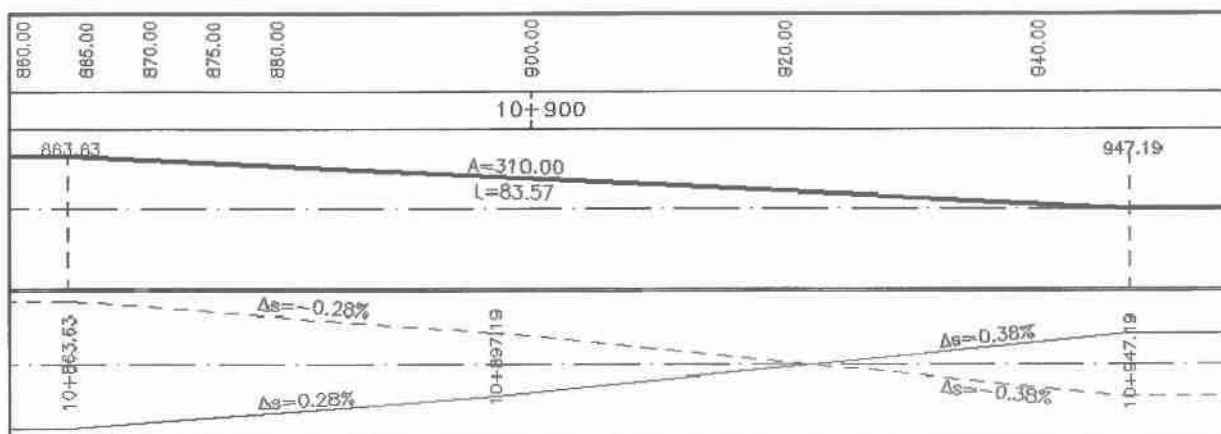
Σχήμα 2.19: Κατά μήκος τομή M3



Σχήμα 2.20 : Τρισδιάστατη όψη του βάρου M3 (με την κεφαλή του) στο SolidWorks .

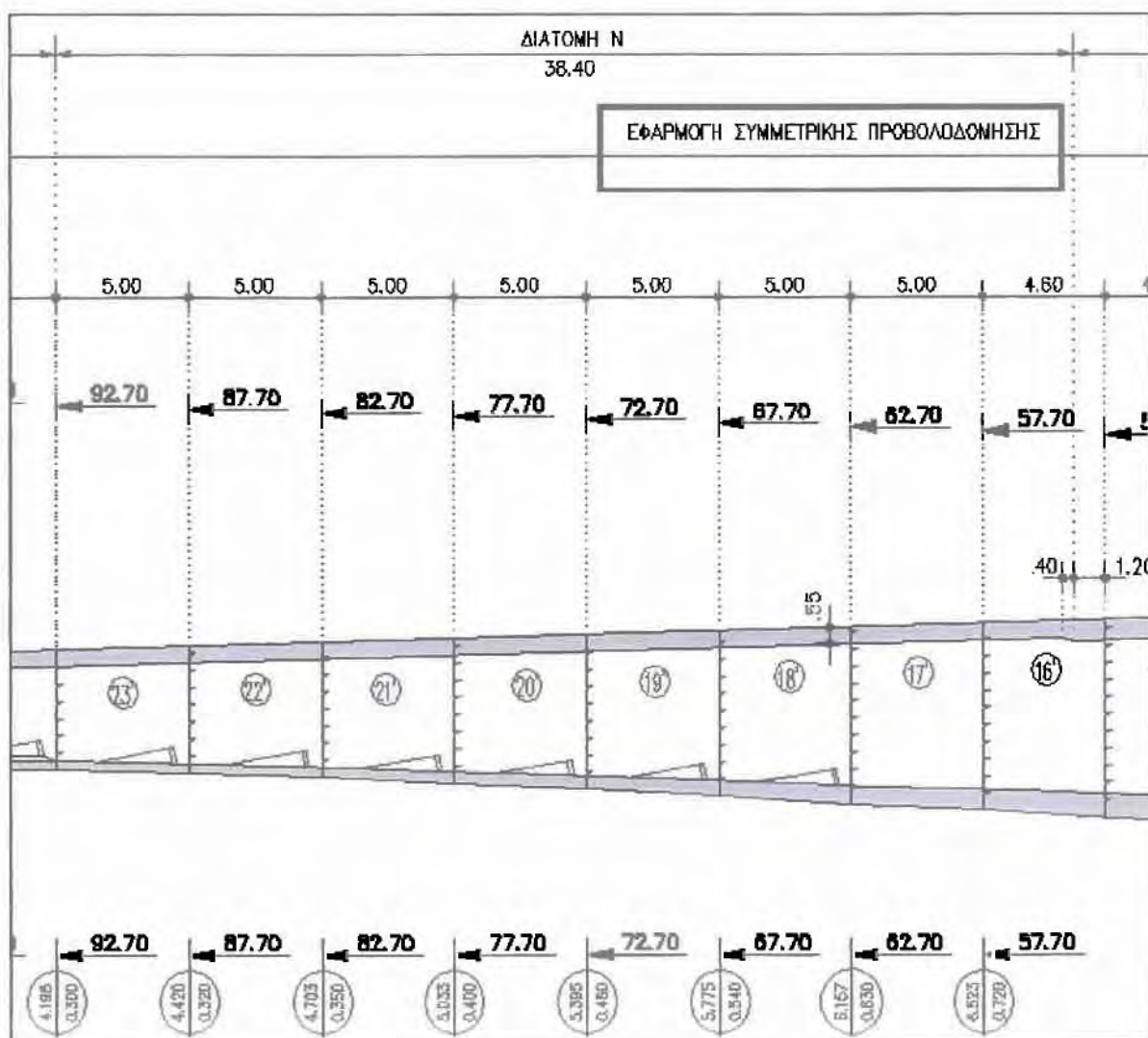
2.5 Κατάστρωμα

Όπως αναφέρθηκε και στα τεχνικά χαρακτηριστικά της γέφυρας συνολικά το κατάστρωμα έχει μήκος 537,65 μέτρα και πλάτος σταθερό 13,45 μέτρα στον κάθε κλάδο και συνολική ανηφορική κλίση από το ακρόβαθρο A0 προς το ακρόβαθρο A4 ίση με 2.6 %. Εκτός από την κλίση, σε όλο του το μήκος έχει και επίκλιση η οποία ξεκινάει με 5 % από το ακρόβαθρο A0 και μεταβάλλεται με ρυθμό -0,28 % μέχρι σε μήκος 60 μέτρων από το A0. Έπειτα αλλάζει ο ρυθμός σε 0,38 % μέχρι και 87,19 μέτρα από το A0, από όπου και τέλος παραμένει σταθερή και ίση με 2,5 % μέχρι το τέλος του καταστρώματος (δηλαδή μέχρι και το ακρόβαθρο A4). Ο υπολογισμός της επίκλισης στο μοντέλο υπολογίζεται σε μοίρες, βρίσκοντας την αντίστροφη εφαπτομένη της επίκλισης. 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.

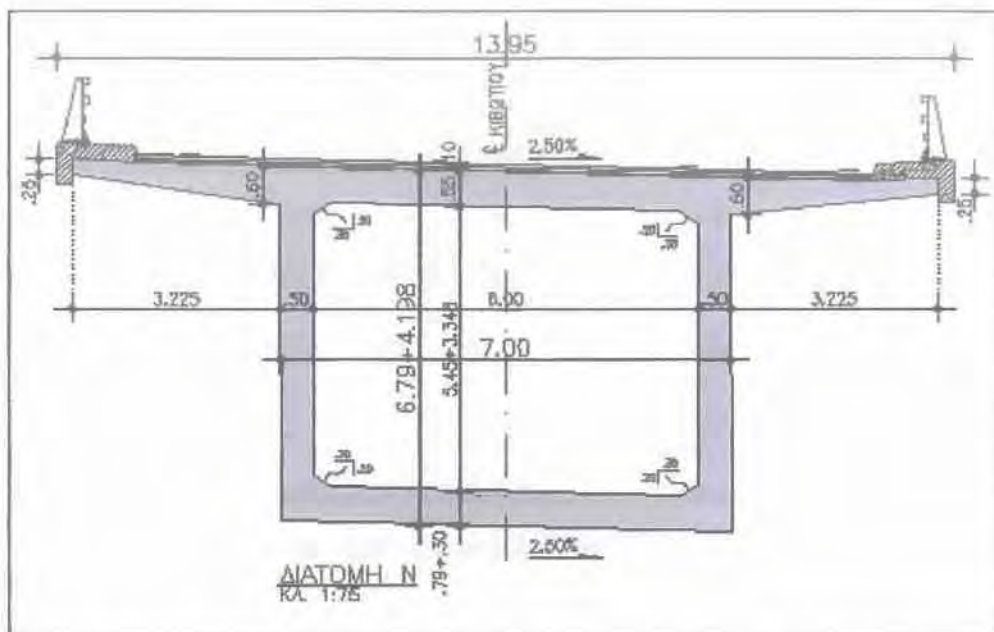


Σχήμα 2.21 : Διάγραμμα επικλίσεων αριστερού κλάδου

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, τμήματα των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω. Το αποτέλεσμα είναι στην κατά μήκος τομή της γέφυρας, το κατάστρωμα να έχει παραβολικά μεταβαλλόμενη κάτω πλευρά, ενώ η επάνω παραμένει ευθύγραμμη με την 2,6 % κλίση όπως φαίνεται και στα αρχικά Σχήματα 2.1 και 2.2 .



Σχήμα 2.22 : Τμήμα σχεδίου Προβόλων αριστερού κλάδου (άνοιγμα M2-M3 - κατά μήκος όψη)



Σχήμα 2.23 : Διατομή N από το δεύτερο φύλλο των Διατομών Καταστρώματος (εγκάρσια όψη)

Όσον 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 βάρου M2. Δηλαδή αρχικά σχεδιάστηκαν όλες οι 137 διατομές σε παράλληλα επίπεδα, λαμβάνοντας υπ' όψιν την επίκλιση αλλά και την γενική ανηφορική κλίση 2,6 %. Στην πράξη οι διατομές (και κατ' επέκταση τα παράλληλα επίπεδα) είχαν απόσταση ίση με αυτή που ορίζεται στα σχέδια των προβόλων (όπως στο Σχήμα 2.22), αλλά ταυτόχρονα είχαν και υψομετρική διαφορά ίση με το γινόμενο της κλίσης 2,6 % επί την απόσταση των διατομών. Δηλαδή $0,026 \cdot \text{απόσταση διατομών}$.

Για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου σχεδιασμού των διατομών, θα δοθεί ένα πιο συγκεκριμένο παράδειγμα το οποίο αφορά την διατομή N χρησιμοποιώντας τα Σχήματα 2.22 και 2.23. Από το Σχήμα 2.23 βλέπουμε την γενική γεωμετρία της συγκεκριμένης διατομής στην εγκάρσια όψη. Παρατηρούμε όμως πως ενώ οι υπόλοιπες διαστάσεις παραμένουν σταθερές, το πάχος (ή ύψος) του κάτω πέλματος της διατομής μεταβάλλεται από 0.30 ως 0.79 μέτρα, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα και την μεταβολή του συνολικού ύψους της διατομής από 4.198 ως 6.79 μέτρα. Κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται από το σχέδιο των προβόλων (Σχήμα 2.22) . Από το σχέδιο των προβόλων επίσης, παρατηρούμε την απόσταση που έχουν οι διατομές μεταξύ τους. Παραδείγματος χάρη εδώ απέχουν όλες 5 μέτρα. Ακόμα παρατηρούμε σε ποια

διατομή αναφέρεται (αυτό φαίνεται στο επάνω μέρος του σχήματος). Τέλος από το κάτω τμήμα του σχήματος 2.22 και πιο συγκεκριμένα από τους κύκλους που είναι στραμμένοι κατά 90 μοίρες βλέπουμε στον αριθμητή το συνολικό ύψος της διατομής και στον παρονομαστή το πάχος του κάτω πέλματος. Επαναλαμβάνοντας λοιπόν αυτή την διαδικασία σε όλο το μήκος του σχήματος των προβόλων και ανατρέχοντας στα σχέδια των διατομών καταστρώματος ανάλογα με την διατομή που εξετάζουμε, μπορούμε να σχεδιάσουμε όλες τις διατομές του καταστρώματος.

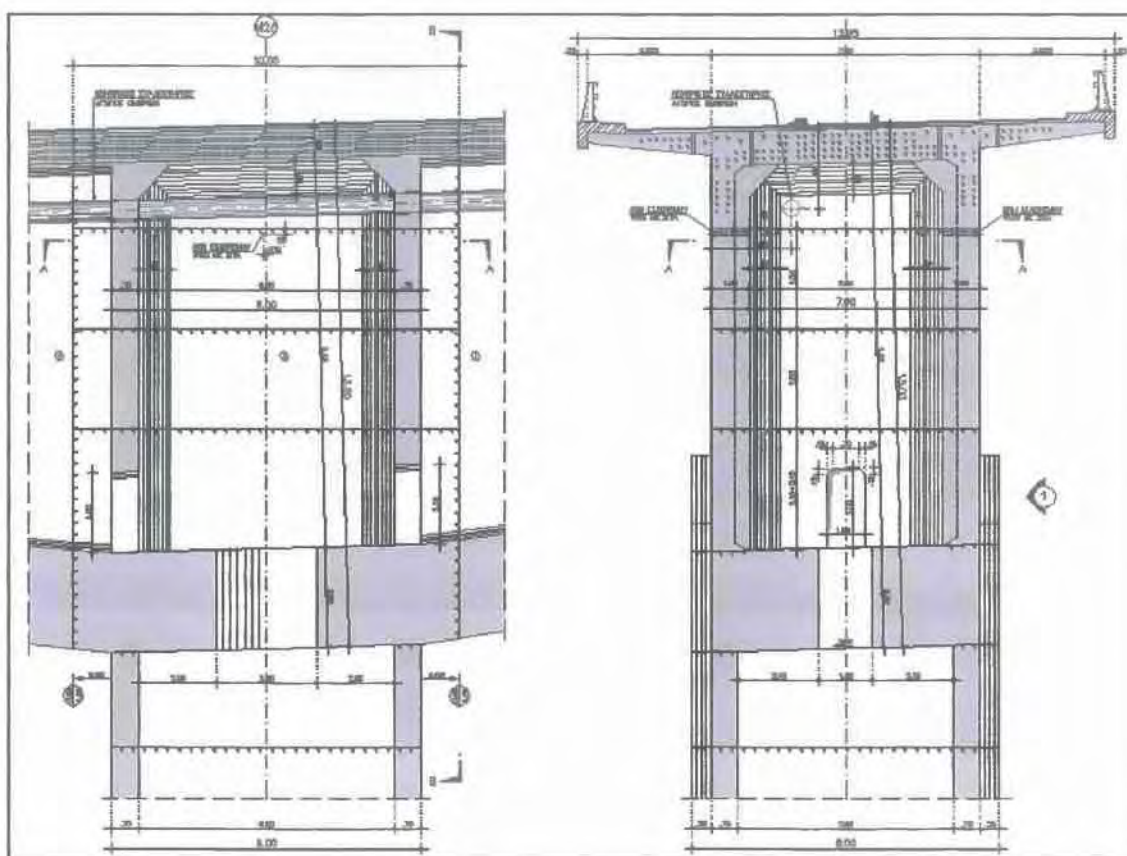
Μετά το σχεδιασμό όλων των διατομών χρησιμοποιήθηκε η εντολή Lofted Boss η οποία αναφέρεται και πιο πάνω για την ένωση των διατομών με συμπαγές υλικό και τέλος η εντολή Mate για την ένωση των επιμέρους τμημάτων του καταστρώματος.

Θα πρέπει να αναφερθεί πως το σχέδιο του μοντέλου του καταστρώματος εμπεριέχει την γεωμετρία και σχεδίαση των ακρόβαθρων A0 και A4 καθώς επίσης και των φορέων των βάθρων M1, M2 και M3.

2.6 Παραδοχές κατά τον σχεδιασμό της γέφυρας

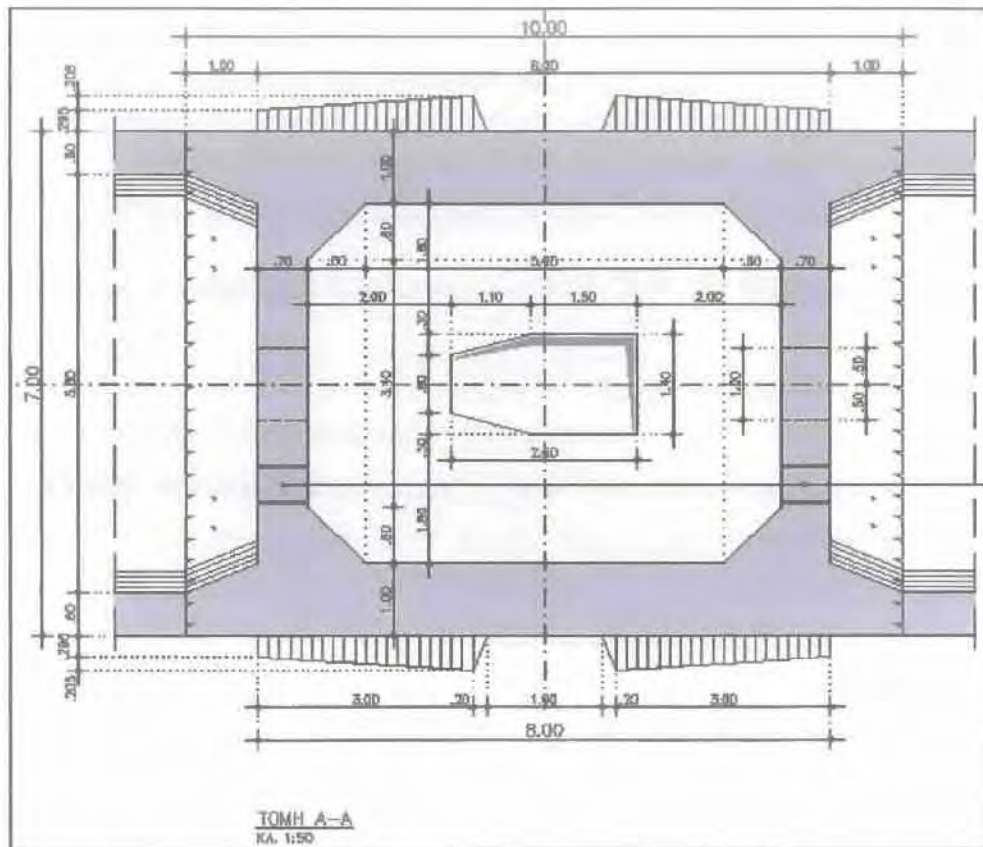
Όσον αφορά τη γεωμετρία του φορέα του βάθρου M1, φαίνεται στα Σχήματα 2.6 και 2.7. Στο μοντέλο όμως έγινε η εξής παραδοχή. Τα εφάδρανα βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και η κάτω πλευρά του φορέα δεν έχει επίκλιση αλλά είναι οριζόντια. Οπότε η επίκλιση του φορέα έρχεται από την κλίση που έχει το επάνω μέρος του φορέα.

Από την άλλη όπως προαναφέρθηκε, ο φορέας του βάθρου M2 έχει αρκετά σύνθετη γεωμετρία. Παρακάτω ακολουθεί το σχήμα του φορέα του βάθρου M2 και εν συνεχεία αναλύεται ο τρόπος με το οποίο σχεδιάστηκε.



Σχήμα 2.24: Κατά μήκος τομή φορέα

Σχήμα 2.25: Εγκάρσια τομή φορέα

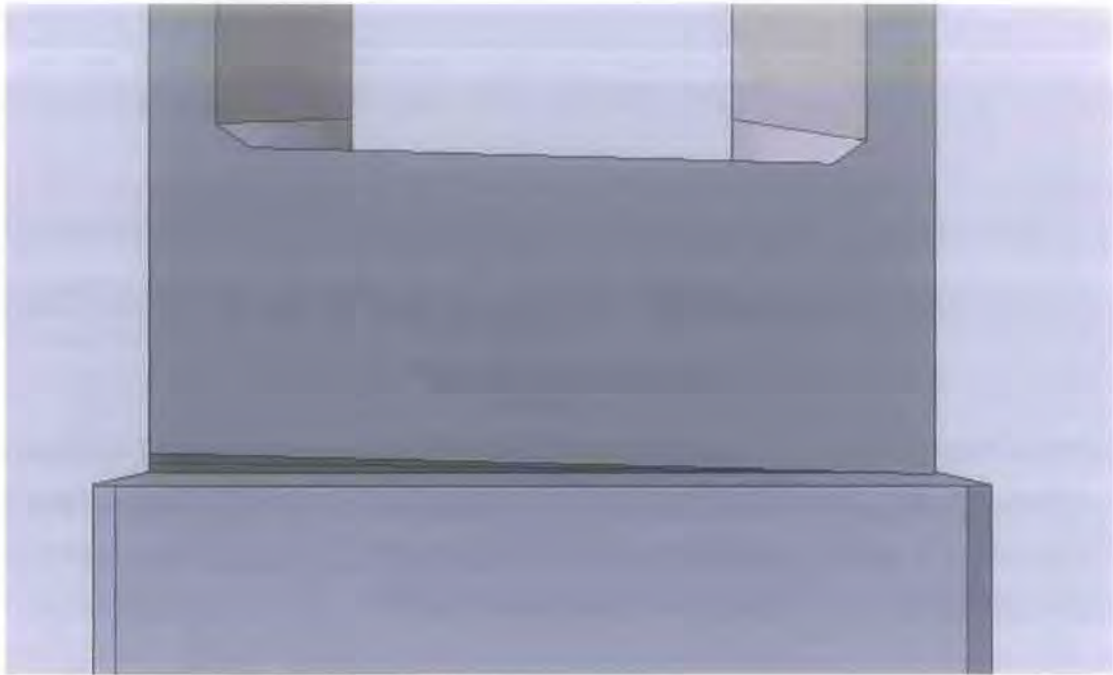


Σχήμα 2.26: Κάτοψη κεφαλής μεσόβαθρου M2 (τομή Α - Α)

Ο φορέας σχεδιάστηκε με βάση την κάτοψη του Σχήματος 2.26. Δημιουργήθηκε αρχικά η βάση, όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.24 και 2.25 και έπειτα η σταθερή οκταγωνική γεωμετρία που φαίνεται στο Σχήμα 2.26.

Η παραδοχή που έγινε και σε αυτό το φορέα είναι παρόμοια με αυτή που έγινε και για τον φορέα του βάθρου M1. Δηλαδή η κάτω πλευρά του φορέα θεωρήθηκε οριζόντια και όχι με κλίση όπως φαίνεται στα σχέδια της εγκάρσιας και της κατά μήκος τομής του.

Επιπλέον για την σύνδεση του φορέα και του βάθρου M2 σχεδιάστηκε μια επιπλέον γεωμετρία ενδιάμεσα τους όπως φαίνεται στο σχήμα 2.27. Αυτό συνέβη ώστε να γίνει δυνατή η διακριτοποίηση του τμήματος αυτού σε πεπερασμένα στοιχεία στο πρόγραμμα COMSOL. Οπότε ενώ το μοντέλο έπρεπε να είναι όπως στο σχήμα 2.25, είναι όπως στο σχήμα 2.27. Δηλαδή βλέπουμε ότι στο τελικό μοντέλο μεσολαβεί μια επιπλέον γεωμετρία ανάμεσα στο βάθρο M2 και στον φορέα η οποία να μην ενώνει οριζόντια τα δύο τμήματα αλλά διατηρεί και την επιθυμητή επίκλιση.



Σχήμα 2.27 : Εγκάρσια όψη στην ένωση του βάθρου M2 με τον φορέα (ανάμεσά τους φαίνεται η γεωμετρία που εισήχθη ως παραδοχή)

Τέλος η γεωμετρία του φορέα του βάθρου M3 είναι και αυτή απλή (παρόμοια με αυτή όλων των διατομών του καταστρώματος) και φαίνεται στα Σχήματα 2.18 και 2.19. Και σε αυτήν την περίπτωση έγινε η ίδια παραδοχή.

Η συγκεκριμένη παραδοχή, δηλαδή ότι τα σημεία επαφής των βάθρων με το κατάστρωμα είναι οριζόντια, έγινε για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής συνεργασίας του σχεδιαστικού προγράμματος SolidWorks και του προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων COMSOL. Αυτό συμβαίνει επειδή η γεωμετρία που εξάγεται από το σχεδιαστικό πρόγραμμα, μεταφράζεται από το δεύτερο και αποτυπώνεται σε αυτό. Οπότε όσο το δυνατόν απλούστερη η γεωμετρία που εισάγεται στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, τόσο πιο εύκολα μεταφράζεται και διακρίτοποιείται σε πεπερασμένα στοιχεία. Σαφώς και ελήφθη υπ' όψιν η χρυσή τομή. Δηλαδή όσο το δυνατόν απλούστερο μοντέλο, χωρίς να αγνοείται όμως η λεπτομέρεια της κατασκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 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 SolidWorks 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 SolidWorks 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.

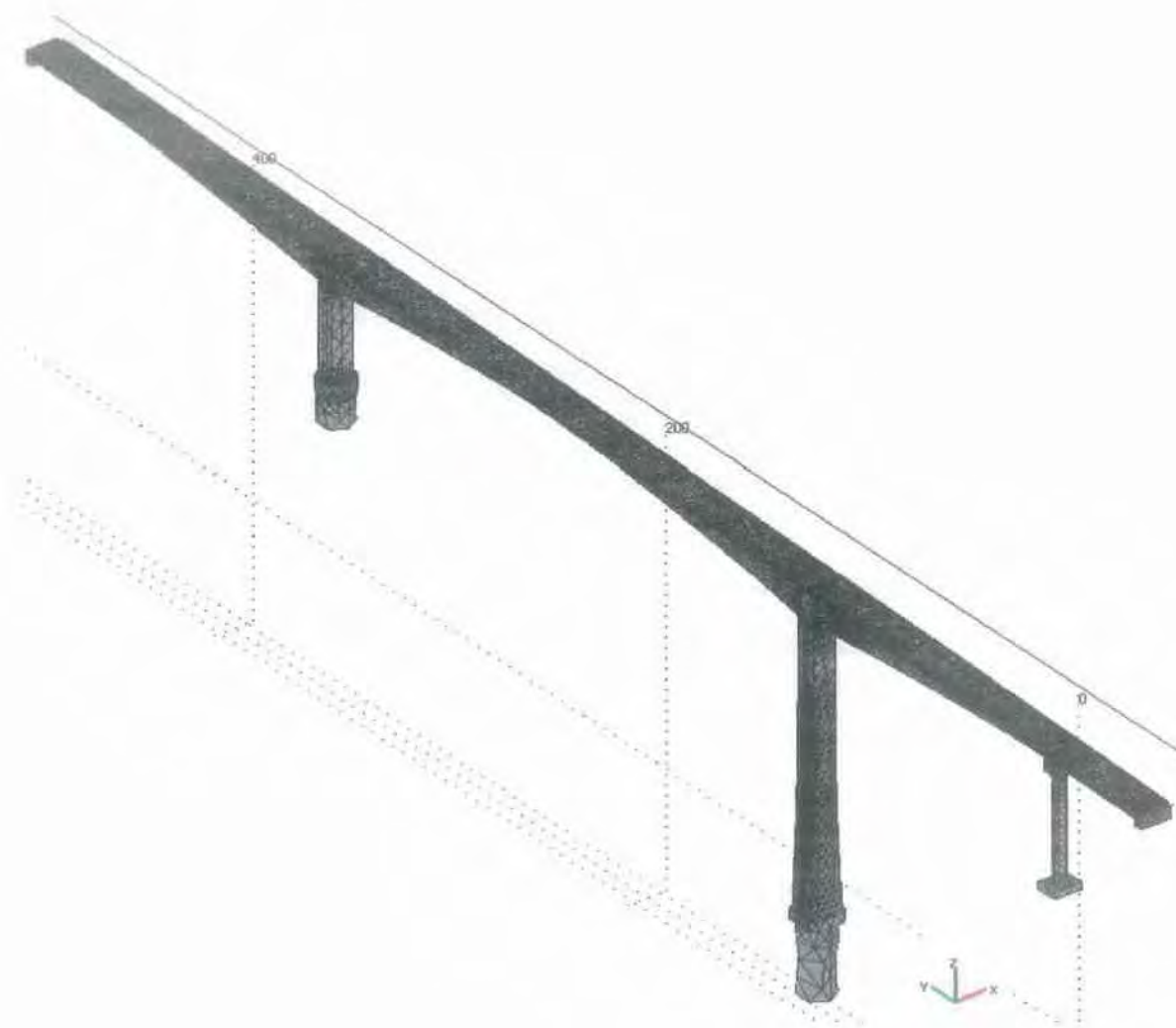
Η διαδικασία αυτή ξεκινάει με την επιβολή των συνοριακών συνθηκών στο πρόβλημα. Πιο συγκεκριμένα το COMSOL Multiphysics μας δίνει την δυνατότητα να ορίσουμε ποια τμήματα της κατασκευής μας είναι πακτωμένα ή αν έχουν γενικότερα κάποιο κινηματικό περιορισμό όπως η άρθρωση για παράδειγμα, ή αν δέχονται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

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 πλευρά ή σε ολόκληρο τμήμα της κατασκευής.

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 τον 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 με τα δύο ακρόβαθρα καθώς επίσης και τα τρία βάθρα μαζί με τις θεμελιώσεις και είναι διακριτοποιημένο σε πεπερασμένα στοιχεία μετά την εισαγωγή του στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 3.1: Τρισδιάστατη όψη διακριτοποιημένου μοντέλου της γέφυρας σε πεπερασμένα στοιχεία με mesh type το coarser.

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 3.1 οι συνοριακές συνθήκες που επεβλήθησαν είναι οι παρακάτω.

Όσον αφορά τους κινηματικούς περιορισμούς, επιβάλαμε πάκτωση σε όλες τις επιφάνειες των θεμελιώσεων των τριών βάθρων, καθώς επίσης και στα εφέδρανα των

ακροβάθρων A0 και A4. 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.

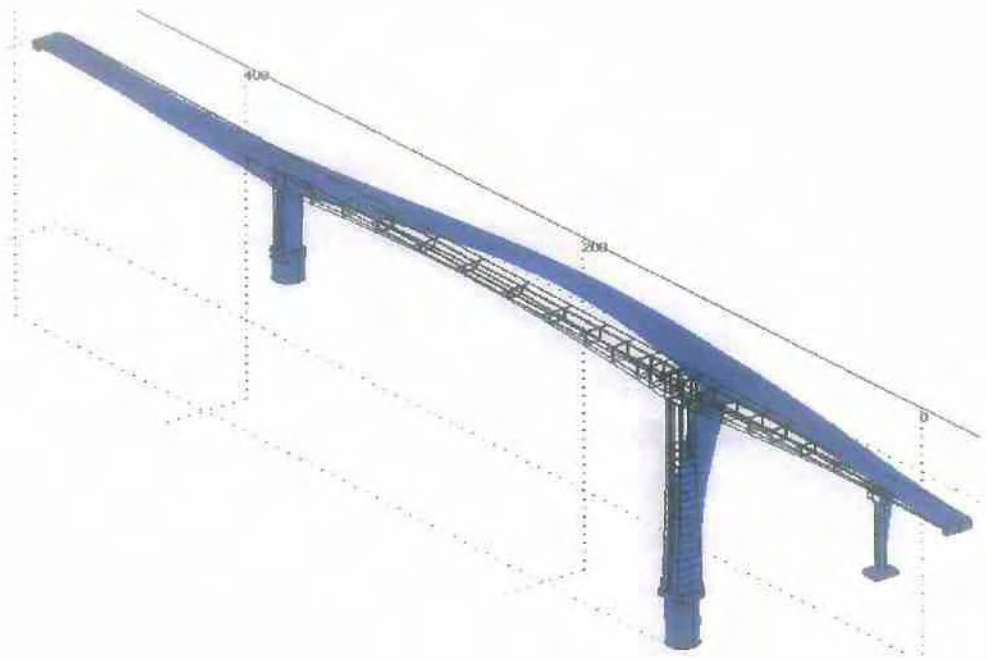
Όσον αφορά το υλικό τώρα, όπως προαναφέρθηκε η γέφυρα είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα, οπότε από την βιβλιοθήκη του προγράμματος εισάγαμε το concrete σαν υλικό με τις εξής αλλαγές. Σε όλα τα τμήματα της γέφυρας η πυκνότητα που εισάγαμε είναι 2548 kg/m^3 και επίσης από τις προεπιλογές του 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 3.1 παρουσιάζονται οι πρώτες είκοσι δύο ιδιοσυχνότητες που εξάγονται από το COMSOL Multiphysics για το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας του Μετσόβου για διαφορετικούς τύπους διακριτοποίησης. Ξεκινώντας από την πιο αραιή (coarser) και περνώντας στις πιο πυκνές διακριτοποιήσεις (coarse, normal και fine) παρατηρούμε την μεταβολή του αριθμού των στοιχείων από 82,716 για coarser σε 281,671 για fine. Ταυτόχρονα όμως με τον αριθμό των στοιχείων αυξάνονται και οι βαθμοί ελευθερίας για του οποίους λύνεται το ιδιοπρόβλημα (472,845 για coarser μέχρι 1,544,148 για fine).

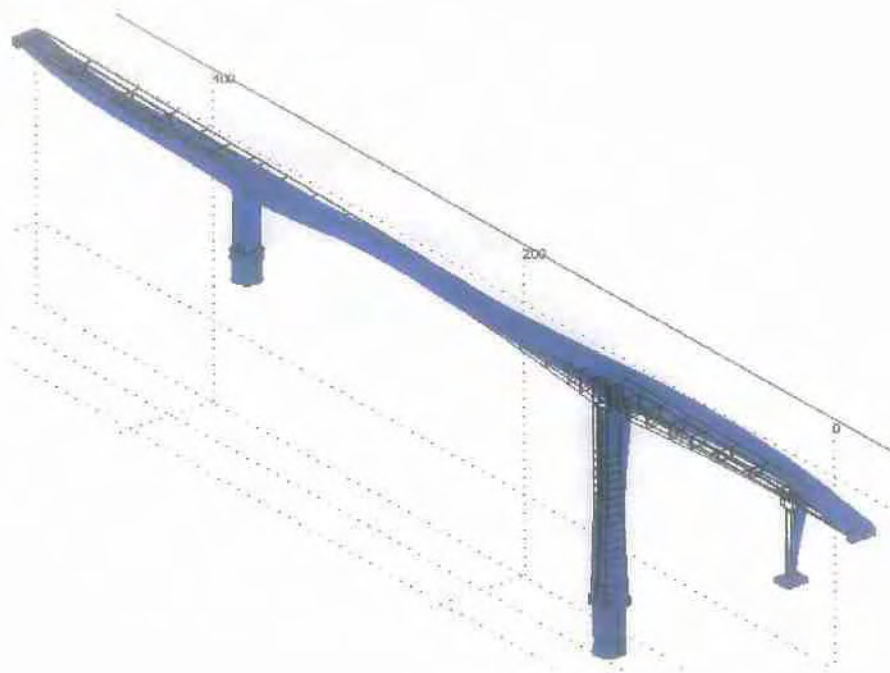
Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται αντίστοιχα οι δέκα πρώτες ιδιομορφές που προβλέπονται από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και αντιστοιχούν στις δέκα πρώτες ιδιοσυχνότητες του μοντέλου της γέφυρας του Μετσόβου.

Πίνακας 3.1 : Οι πρώτες 22 ιδιοσυχνότητες του μοντέλου της γέφυρας.

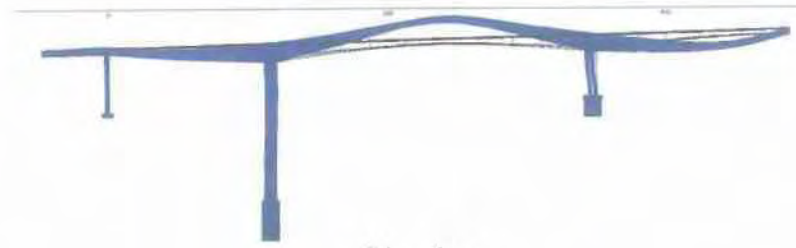
TYPE OF MESH	COARSER	COARSE	NORMAL	FINE
NUMBER OF ELEMENTS	82716	124422	191238	281671
NUMBER OF DEGREES OF FREEDOM	472845	708921	1069587	1544148
1st	0.3155	0.3149	0.3147	0.3138
2nd	0.6064	0.6048	0.6044	0.6019
3rd	0.6153	0.6142	0.6136	0.6125
4th	0.9631	0.9589	0.9586	0.9544
5th	1.0531	1.0509	1.0508	1.0484
6th	1.1339	1.1291	1.1289	1.1225
7th	1.4331	1.4297	1.4298	1.4234
8th	1.6817	1.6755	1.6755	1.6680
9th	1.8687	1.8605	1.8611	1.8456
10th	2.0792	2.0636	2.0655	2.0447
11th	2.3233	2.3175	2.3173	2.3101
12th	2.5609	2.5537	2.551	2.5428
13th	2.7504	2.7446	2.7447	2.7392
14th	3.0552	3.0487	3.0474	3.0424
15th	3.0826	3.0774	3.0767	3.0688
16th	3.5273	3.519	3.5164	3.5097
17th	3.8058	3.7817	3.7659	3.7541
18th	3.8590	3.8484	3.8482	3.8378
19th	4.3299	4.3108	4.3082	4.2842
20th	4.4386	4.4161	4.4023	4.3909
21st	4.6049	4.5938	4.5875	4.5793
22nd	4.6709	4.6553	4.6491	4.6360



(α) 1^η εγκάρσια (0.3155 Hz)

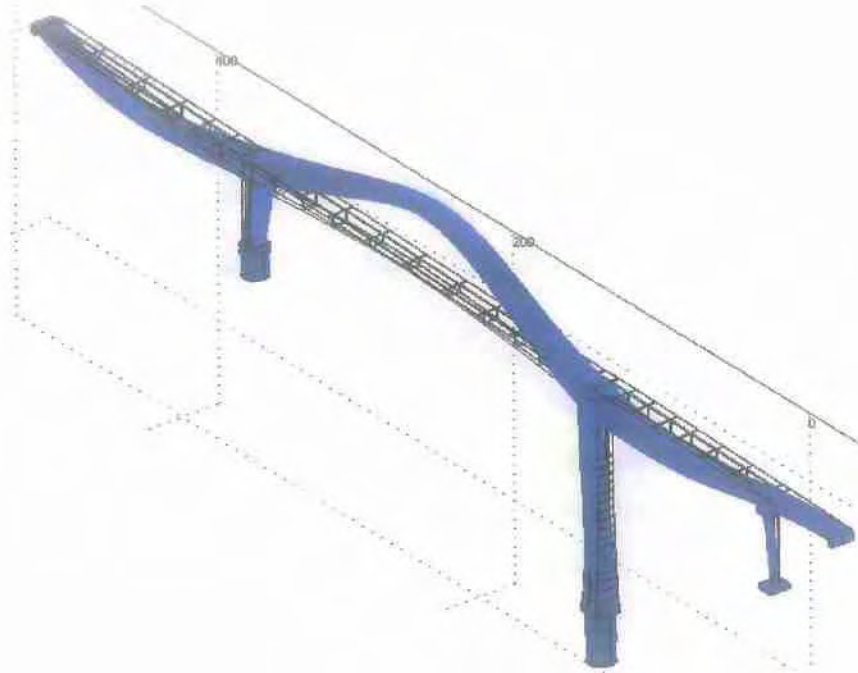


κάτοψη

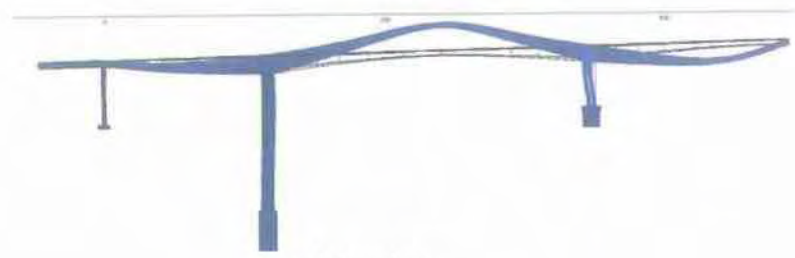


πλάγια όψη

(β) εγκάρσια και καμπτική (0.6064 Hz)

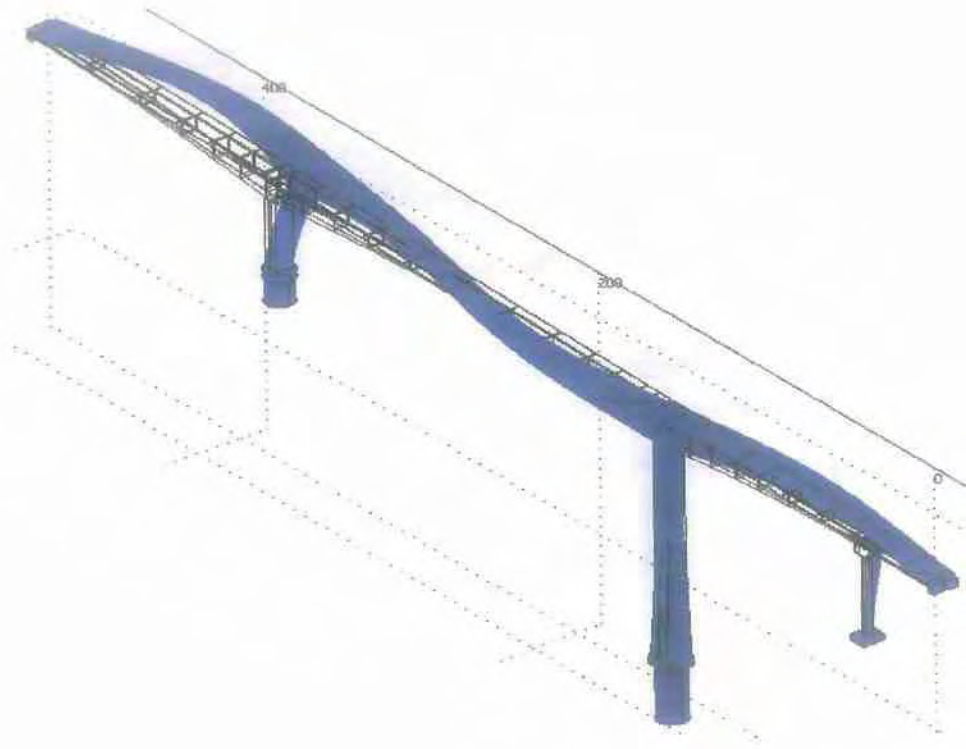


κάτοψη

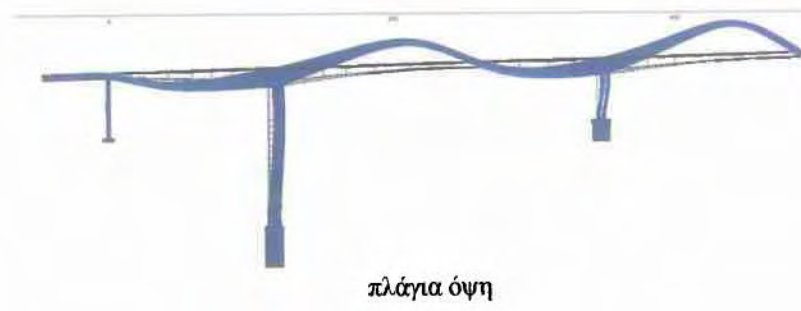
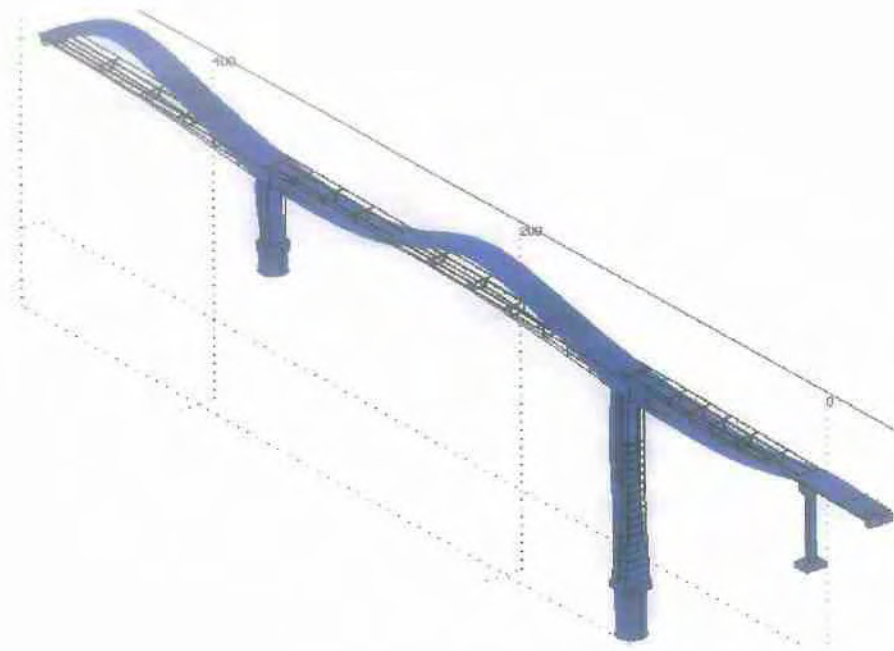


πλάγια όψη

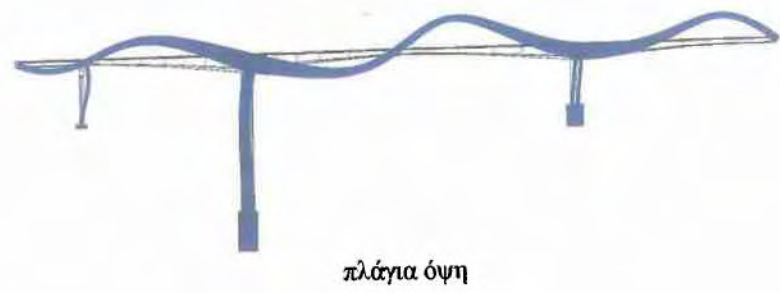
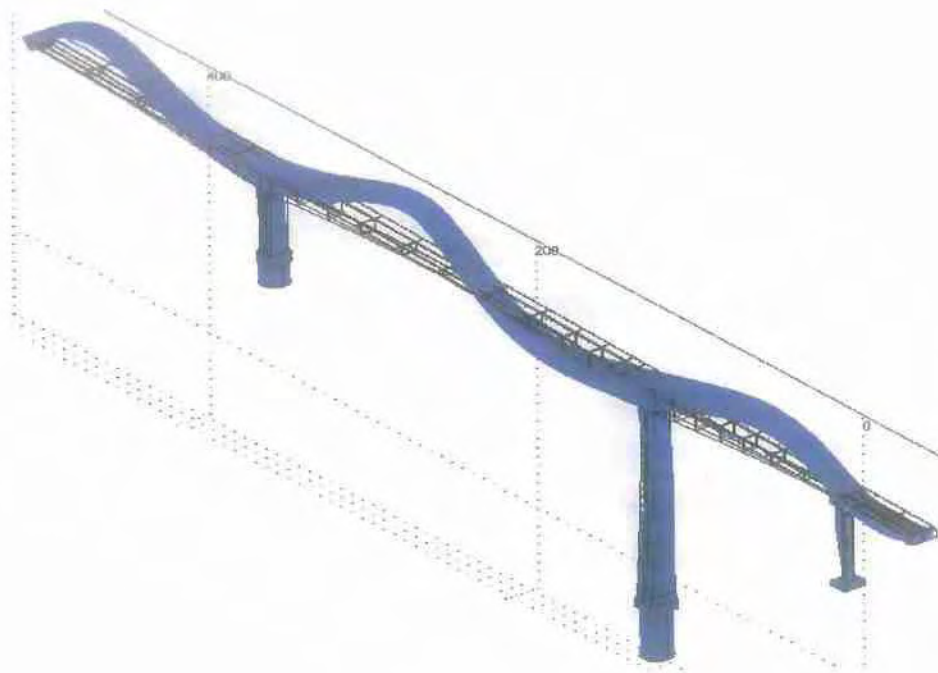
(γ) εγκάρσια και καμπτική (0.6153 Hz)



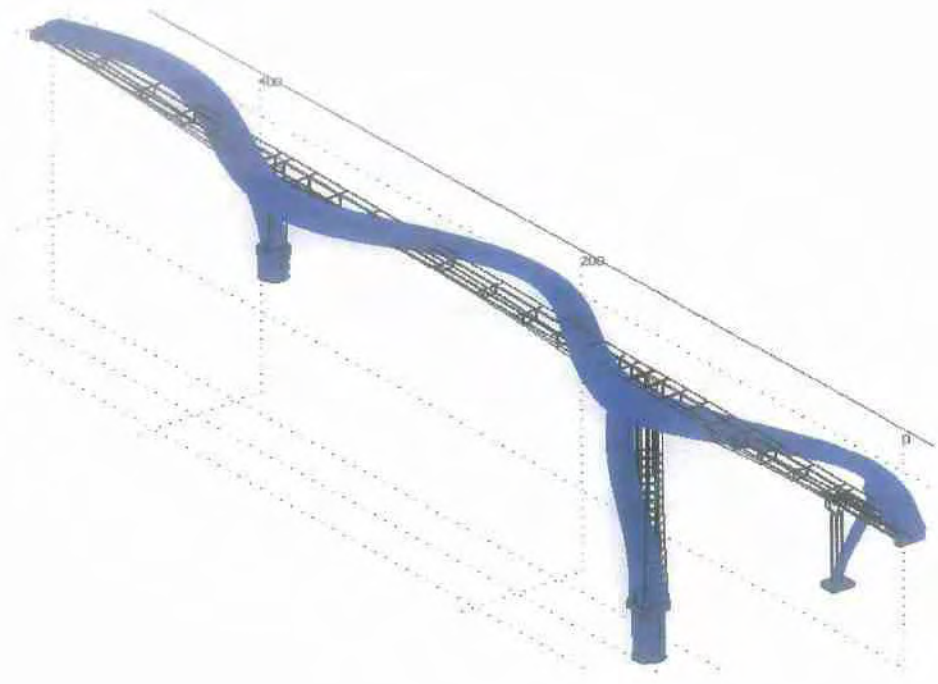
(δ) 2^η εγκάρσια (0.9631 Hz)



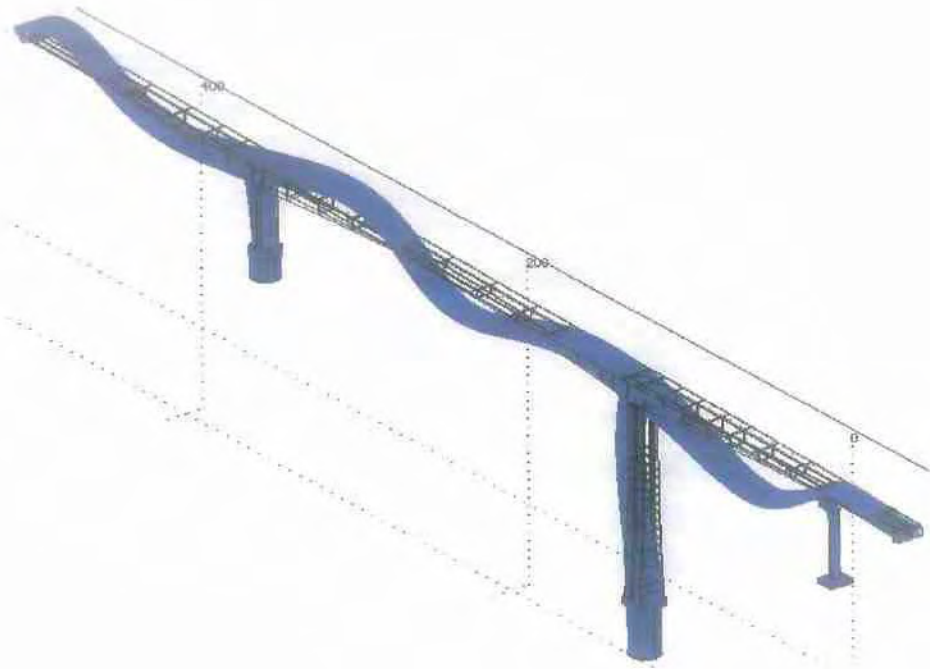
(ε) 1^η καμπτική (1.0531 Hz)



(στ) 2^η καμπτική (1,4331 Hz)



(ζ) 3^η εγκάρσια (1.6817 Hz)

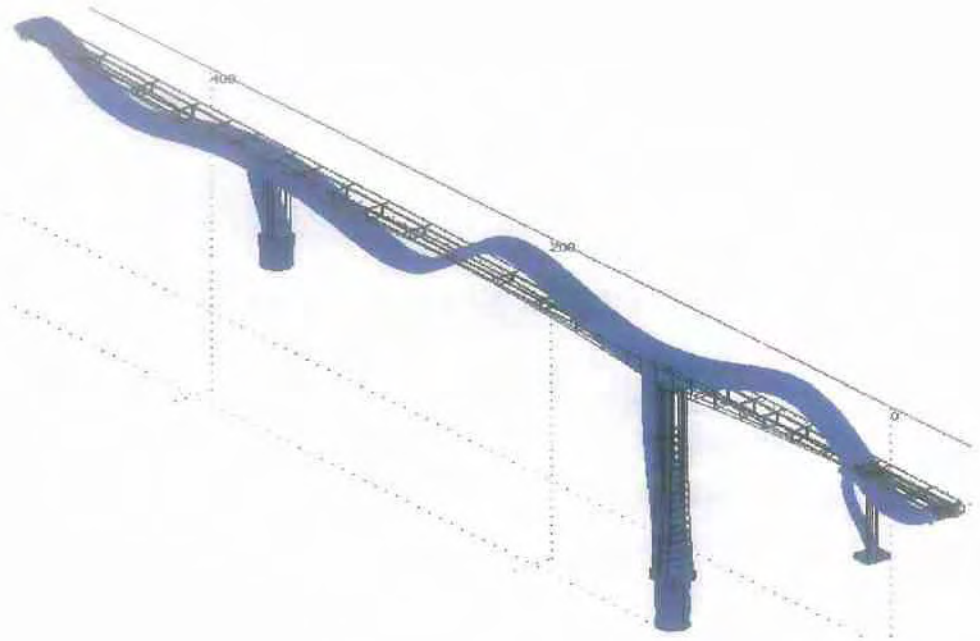


κάτοψη

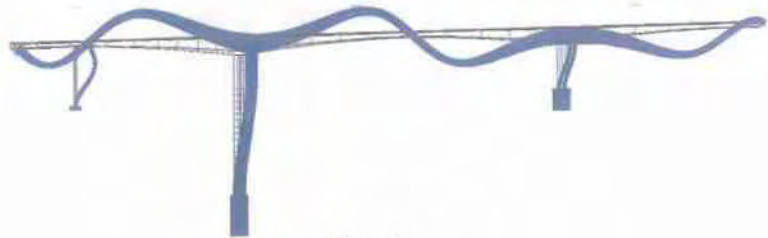


πλάγια όψη

(η) 3^η καμπτική (1.8687 Hz)

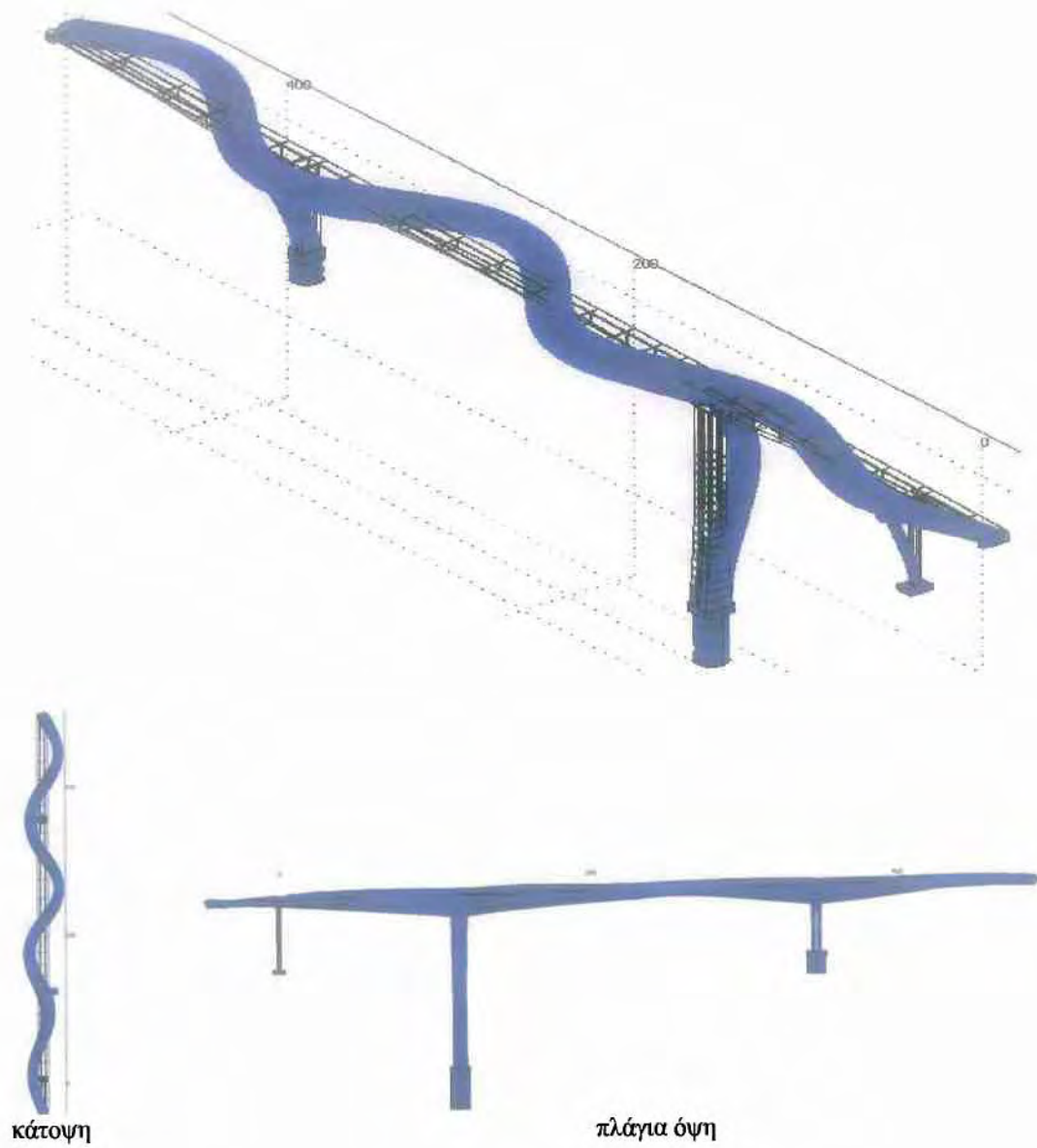


κάτοψη



πλάγια όψη

(θ) 4^η καμπτική (2.0792 Hz)



(ι) 4^η εγκάρσια (2.323 Hz)

Σχήμα 3.2: Προβλεπόμενες ιδιομορφές από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του αριστερού κλάδου της γέφυρας του Μετσόβου

Αυτό που έχει μεγαλύτερη σημασία όμως όσον αφορά την ανάλυση του Πίνακα 3.1 είναι το γεγονός πως οι ιδιοσυχνότητες δεν μεταβάλλονται σε τόσο μεγάλο βαθμό ανάλογα με τον τύπο διακριτοποίησης (μεταβολή στο τρίτο δεκαδικό ψηφίο), οπότε μπορούμε να πούμε πως είναι σχεδόν ανεξάρτητες από αυτό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να χρησιμοποιήσουμε τις ιδιοτιμές που εξάγονται με την πιο αραιή διακριτοποίηση (coarser) για την σύγκριση του μοντέλου μας με τις πραγματικές μετρήσεις, μιας που επιλέγοντάς αυτές αποφεύγουμε να λύσουμε σύνθετα προβλήματα με πολλά στοιχεία και κατ' επέκταση πολλούς βαθμούς ελευθερίας.

Όσον αφορά τις ιδιομορφές του Σχήματος 3.2, παρατηρούμε πως οι ιδιοσυχνότητες με τιμές 0.6064 και 0.6153 είναι συνδυασμός εγκάρσιων και καμπτικών αποκρίσεων. Μεταβάλλοντας το μέτρο ελαστικότητας του μοντέλου μας θα παρατηρήσουμε πως η ιδιοτιμή 0.6064 τείνει να γίνει εγκάρσια ενώ η ιδιοτιμή 0.6153 τείνει να γίνει καμπτική. Κάτι τέτοιο γίνεται αντιληπτό αν λάβουμε υπ' όψιν μας τον Πίνακα 3.2.

Στον Πίνακα 3.2 γίνεται η σύγκριση των προβλέψεων του μοντέλου με τις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων που μετρήθηκαν από την πραγματική κατασκευή. Η συλλογή μετρήσεων από την κατασκευή πραγματοποιήθηκε κατά όλη την περίοδο κατασκευής της γέφυρας. Συγκεκριμένα, οι δύο κλάδοι της γέφυρας ενοργανώθηκαν επανειλημμένα κατά την περίοδο από Νοέμβριο του 2007 έως και το Σεπτέμβριο του 2008 και συλλέχτηκαν μετρήσεις για πολλές φάσεις κατά τη διάρκεια κατασκευής 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). Συγκεκριμένα, εγκαταστάθηκαν στο εσωτερικό του κιβωτοειδούς φορέα του προβόλου M3 της υπό κατασκευή γέφυρας Μετσόβου εξακάναλο κινητό σύστημα επιταχυνσιομέτρων. Λόγω συμμετρικής προβολοδόμησης και λόγω ολοκλήρωσης ίδιου αριθμού σπονδύλων πέριξ του βάθρου M3, επελέγη να τοποθετηθούν αισθητήρια μόνο στο δεξιό πρόβολο του βάθρου M3.

Έτσι λοιπόν στην 2^η στήλη του Πίνακα 3.2 παρατηρούμε τον τύπο της ιδιομορφής, δηλαδή αν είναι εγκάρσια (transverse) ή καμπτική (bending), στην 3^η στήλη αντιστοιχίζονται οι προβλεπόμενες από το μοντέλο ιδιοσυχνότητες, ενώ στην 5^η και 7^η στήλη παρουσιάζονται οι μετρήσεις από την πραγματική κατασκευή σε χαμηλού και υψηλού εύρους ταλάντωσης αντίστοιχα. Τώρα λοιπόν γίνεται αντιληπτό αυτό που

αναφέραμε για τις ιδιοσυχνότητες με τιμές 0.6064 και 0.6153. Η πρώτη είναι πιο κοντά στην 0.6363 και αντιστοιχίζεται σε αυτή η οποία είναι εγκάρσια, ενώ η δεύτερη είναι πιο κοντά στην 0.6559 και αντιστοιχίζεται σε αυτή η οποία είναι καμπτική. Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε πως εξήχθησαν ιδιοσυχνότητες και για ένα μοντέλο της γέφυρας του Μετσόβου με μόνη διαφορά την επιβολή πάκτωσης μόνο στην κάτω επιφάνεια της θεμελίωσης (στην βάση της θεμελίωσης) και όχι σε όλες τις επιφάνειες της θεμελίωσης. Στην 4^η στήλη του Πίνακα 3.2 (FEM1 Modal Frequencies) γίνεται η αντιστοίχιση των προβλεπόμενων ιδιοσυχνοτήτων αυτού του μοντέλου.

Από την σύγκριση των τιμών των ιδιοσυχνοτήτων που προβλέπονται από το μοντέλο και των αντίστοιχων τιμών που προκύπτουν από την ανάλυση των μετρήσεων χρησιμοποιώντας λογισμικό αναγνώρισης ιδιομορφών (Ntotsios et al. 2009a), προκύπτει ότι το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια την δυναμική συμπεριφορά της γέφυρας αφού οι προβλεπόμενες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων είναι πολύ κοντά στις μετρούμενες.

Πίνακας 3.2 : Σύγκριση αναγνωρισμένων ιδιοσυχνοτήτων του αριστερού κλάδου της χαραδρογέφυρας Μετσόβου με αυτές που προβλέπονται από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

No	Mode	FEM Modal Frequencies (Hz)	FEM1 Modal Frequencies (Hz)	Low amplitude response		High amplitude response	
				Frequency (Hz)	Damping ratio (%)	Frequency (Hz)	Damping ratio (%)
1	transverse	0.3155	0.2923	0.2809	0.2897	0.2783	0.4680
2	transverse			0.4390	0.5287	0.4406	0.6006
3	transverse			0.5671	1.0783		
4	transverse	0.6064	0.5938	0.6363	1.0745	0.6228	0.8969
5	bending	0.6153	0.6098	0.6559	0.5523	0.6561	0.2274
6	transverse			0.7129	0.3082	0.7129	0.4045
7	transverse	0.9631	0.9100	1.0292	0.4617	1.0189	1.2268
8	bending	1.0531	1.0413	1.0906	0.4523	1.0745	0.7513
9	bending	1.4331	1.4275	1.4757	0.5091	1.4677	2.1532
10	transverse		1.6128	1.6234	0.5154	1.6077	0.1944
11	transverse	1.6817		1.6934	0.4301	1.6878	0.3331
12	bending	1.8687	1.8258	1.8568	0.7531	1.8545	0.9142
13	bending	2.0792	2.0590	2.0795	0.3713	2.0089	2.7530
14	transverse	2.3233	2.0068	2.3578	0.3255	2.3581	1.2770
15	bending	2.7504	2.6062	2.8329	0.6144	2.8323	0.4674
16	transverse			3.0951	0.3653	3.0932	0.4177
17	bending		3.2814	3.1993	0.7696	3.2179	0.9178
18	bending	3.5273	3.7910	3.6015	0.3789	3.6023	0.3665
19	transverse	3.8590	3.8058	3.8850	0.2179	3.8415	0.2476
20	bending			4.2814	0.2347	4.1728	0.6235
21	bending	4.3299	4.3091	4.3241	0.1771	4.2839	0.3296
22	bending	4.6049	4.5120	4.5950	0.4286		

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 :

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

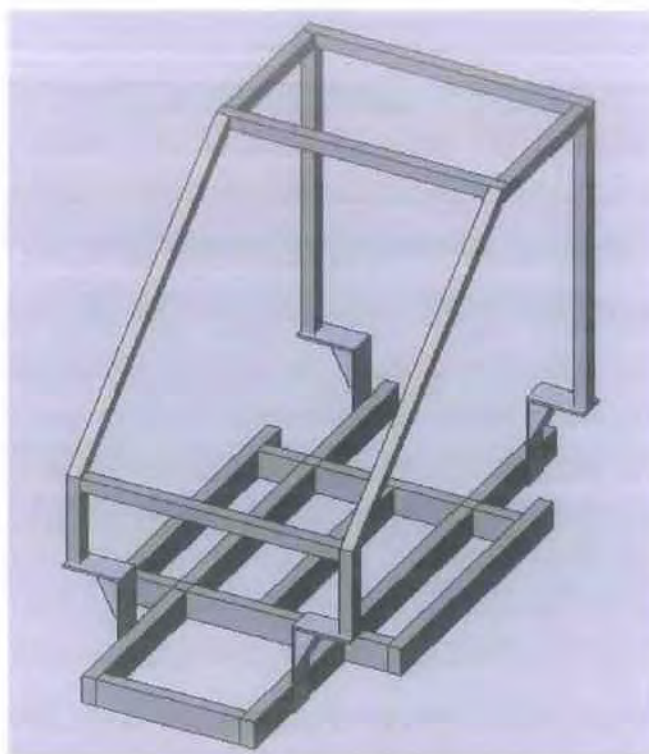
4.1 Σχεδιασμός του οχήματος

Παρόλο που προαναφέρθηκε πως το μοντέλο του οχήματος είναι σχετικά πιο απλό σε σχέση με το μοντέλο της γέφυρας του Μετσόβου, υπήρξαν κάποιες απαιτήσεις και τεχνικά προβλήματα τα οποία το έκαναν αρκετά σύνθετο. Κατ' αρχάς δεν υπήρχαν άλλα σχέδια εκτός του Σχήματος 1.2 για να εξάγουμε τις ακριβείς διαστάσεις του οχήματος και επίσης έπρεπε να γίνει μοντέλο κελύφους του οχήματος(shell model). Για να έχουμε λοιπόν τελικά ένα μοντέλο κελύφους για το οποίο θα εξάγουμε τις ιδιοσυχνότητες και ιδιομορφές, δημιουργήσαμε ένα Solid μοντέλο στο SolidWorks με διαστάσεις όμως, αυτές της κεντρικής γραμμής της κάθε διατομής.

Έτσι λοιπόν κατασκευάσαμε το μοντέλο του Σχήματος 4.1 με βάση τις διαστάσεις του Σχήματος 1.2 και με την παραδοχή ότι από κάθε διατομή κρατάμε την κεντρική γραμμή ως εξής. Στην βάση του οχήματος θεωρούμε την κεντρική γραμμή, ή ουσιαστικά κεντρική διατομή, 3 χιλιοστά πιο μικρή ενώ για όλα τα υπόλοιπα τμήματα του οχήματος 2 χιλιοστά πιο μικρή. Δηλαδή μια διατομή της βάσης με διαστάσεις 100x50 γίνεται 97x47 (η κάθε ακμή χάνει 1.5 χιλιοστό από την κάθε πλευρά), ενώ μια διατομή εκτός βάσης με διαστάσεις 100x50 γίνεται 98x48, δηλαδή η κάθε ακμή χάνει 1 χιλιοστό από την κάθε πλευρά.

Το τελικό κατασκευαστικό προϊόν αποτελείται από δύο τμήματα. Το επάνω τμήμα και το κάτω, τα οποία ενώνονται με τις «γωνίες» οι οποίες φαίνονται με το ανοιχτό γκριζο στο Σχήμα 4.1. Το κάθε τμήμα σχεδιάστηκε ξεχωριστά με τον τρόπο που αναφέραμε στην παραπάνω παράγραφο, αλλά με ειδικό τρόπο σχεδιάστηκαν και οι «γωνίες» που τα ενώνουν έτσι ώστε να μην αλλοιωθούν οι διαστάσεις του οχήματος.

Έτσι λοιπόν το τελικό μοντέλο που δημιουργήθηκε από το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks για το πειραματικό όχημα, είναι αυτό του Σχήματος 4.1.



Σχήμα 4.1: Μοντέλο πειραματικού οχήματος

Το μοντέλο του Σχήματος 4.1 είναι ένα solid μοντέλο. Το τελικό μοντέλο κελύφους (shell) με την τελική επιθυμητή γεωμετρία του οχήματος που θέλουμε να εξετάσουμε ως προς τις ιδιοσυχνότητες και τις ιδιομορφές θα προκύψει όχι από το σχεδιαστικό πρόγραμμα SolidWorks, αλλά από το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων COMSOL Multiphysics με τον τρόπο που θα αναφέρουμε στην επόμενη Ενότητα 4.2.

4.2 Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του οχήματος

Αρχικά εισάγουμε το μοντέλο του οχήματος με τον ίδιο τρόπο όπως αναφέραμε για το μοντέλο της γέφυρας στην Ενότητα 3.1. Στην περίπτωση του οχήματος όμως πρέπει να κάνουμε μια επιπλέον διαδικασία επειδή το μοντέλο που εισάγαμε είναι συμπαγές (solid), ενώ εμείς θέλουμε να μελετήσουμε το μοντέλο κελύφους (shell) του οχήματος.

Για το λόγο αυτό θα μετατρέψουμε όλο το μοντέλο σε επιφάνειες επιλέγοντας από την καρτέλα Draw της γραμμής εργαλείων, την εντολή Coerce To και έπειτα Face. Με την χρήση της εντολής αυτής μετατρέπεται όλο το μοντέλο σε επιφάνειες και δεν υπάρχει πλέον κανένα συμπαγές τμήμα. Σβήνοντας λοιπόν όλες τις ενδιάμεσες επιφάνειες που δεν χρειάζονται καταλήγουμε από ένα συμπαγές σε ένα μοντέλο κελύφους του οποίου θέλουμε να εξάγουμε τα ιδιομορφικά χαρακτηριστικά.

Η σειρά των ενεργειών που ακολουθούν για να πραγματοποιηθεί η ιδιομορφική ανάλυση του μοντέλου του οχήματος είναι ίδια με αυτή του μοντέλου της γέφυρας του Μετσόβου. Δηλαδή αφού εισάγουμε το μοντέλο και το μετατρέψουμε σε επιφάνειες όπως αναφέραμε στην πρώτη παράγραφο της ενότητας αυτής, εισάγουμε τις συνοριακές συνθήκες και το υλικό, έπειτα περνάμε στην διακριτοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία (mesh) και τέλος επιλέγουμε το πλήθος των ιδιοσυχνοτήτων που θέλουμε να εξάγουμε. Λεπτομέρειες για τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιούμε κάθε στάδιο αναφέρονται στην Ενότητα 3.1.

Πιο συγκεκριμένα στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του οχήματος δεν υπάρχουν συνοριακές συνθήκες και το όχημα θεωρείται ελεύθερο. Για τον λόγο αυτό οι έξι πρώτες ιδιοσυχνότητες παίρνουν τιμή 0 επειδή αντιστοιχούν σε ιδιομορφές στερεού σώματος. Οι έξι αυτές μηδενικές ιδιοτιμές δεν παρουσιάζονται.

Όσον αφορά το υλικό, επιλέχθηκε χάλυβας (Structural Steel στην βιβλιοθήκη του COMSOL Multiphysics) με μέτρο ελαστικότητας $E = 200 \text{ MPa}$, πυκνότητα $\rho = 7.850 \text{ kg/m}^3$ και συντελεστή Poisson $\nu = 0.33$.

Τέλος ο τύπος της διακριτοποίησης που χρησιμοποιήθηκε είναι το Normal, οπότε και το μοντέλο για το οποίο εξήχθησαν οι ιδιομορφές αποτελείτο από 15.468 πεπερασμένα στοιχεία και λύθηκε για 46.362 βαθμούς ελευθερίας.

Αφού λοιπόν υλοποιήσαμε όλες τις απαραίτητες παραπάνω διαδικασίες εξάγαμε τις πρώτες 20 ιδιοσυχνότητες οι οποίες φαίνονται στην τελευταία στήλη του Πίνακα 4.1.

Στην δεύτερη στήλη του Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι ιδιοσυχνότητες που μετρήθηκαν για το πραγματικό πειραματικό όχημα στο κατάλληλα εξοπλισμένο Εργαστήριο Δυναμικής Μηχανών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2.

Όπως παρατηρούμε, κάποιες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων του μοντέλου αντιστοιχίζονται πολύ κοντά στις τιμές από την μέτρηση του πραγματικού οχήματος και κάποιες όχι. Αυτό αποδίδεται στις ενδεχόμενες ελλείψεις λόγω των παραδοχών που έγιναν κατά τον σχεδιασμό του μοντέλου.

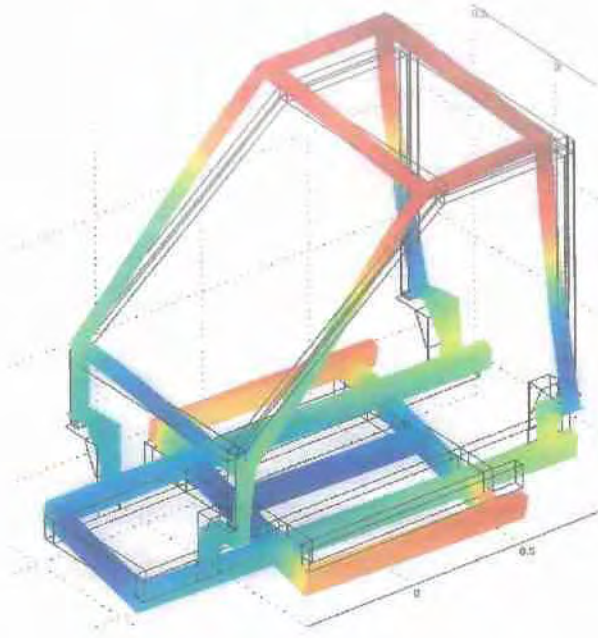
Πίνακας 4.1 : Σύγκριση αναγνωρισμένων ιδιοσυχνοτήτων του πειραματικού οχήματος με αυτές που προβλέπονται από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Mode	Frequency (Hz)	Damping ratio (%)	FEM (Hz)
1	23.2139	0.4799	23.2348
2	42.1225	0.3611	39.1265
3	42.5020	0.2263	41.6084
4	48.2753	0.2218	47.2930
5	58.1552	0.1954	57.5692
6	69.0429	0.2287	66.2020
7	69.4700	0.1662	69.0533
8	80.0413	0.1651	80.4391
9	86.1449	0.1564	83.2491
10	100.2428	0.1141	101.6080
11	102.5815	0.1714	105.9357
12	110.4424	0.1838	106.6243
13	115.1205	0.1519	112.5407
14	123.6425	0.0982	121.7747
15	127.6472	0.0977	129.0741
16	132.4204	0.1347	131.7794
17	134.9544	0.1673	133.8787
18	138.9425	0.1066	137.3287
19	148.6929	0.1474	146.5237
20	164.3888	0.1026	155.7296
21	171.3352	0.0898	
22	181.2229	0.1197	
23	192.7520	0.0819	

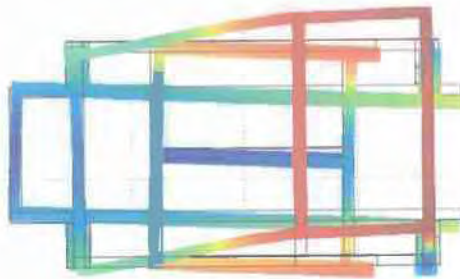


Σχήμα 4.2: Εικόνα του πειραματικού οχήματος κατά την μέτρηση των ιδιοσυχνοτήτων του

Τέλος, για λόγους πληρότητας, στο Σχήμα 4.3 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι δέκα πρώτες ιδιομορφές που αντιστοιχούν στις τιμές των δέκα πρώτων ιδιοσυχνοτήτων που εξήχθησαν από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων COMSOL Multiphysics για το μοντέλο του πειραματικού οχήματος.



πρόσοψη

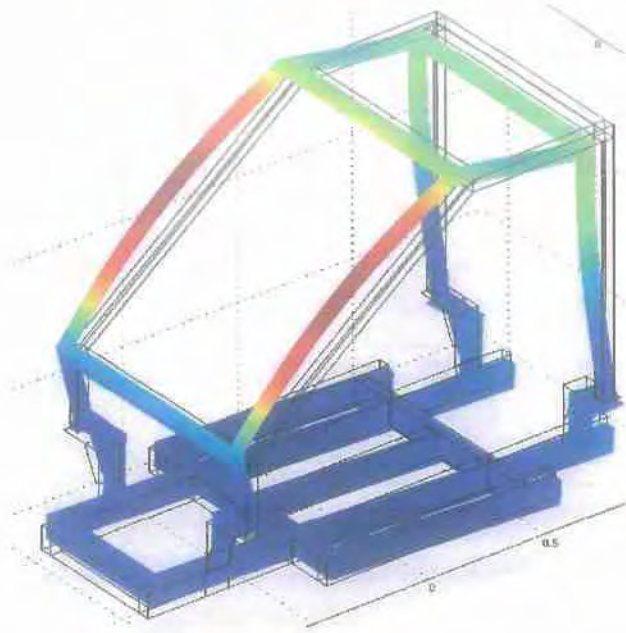


κάτοψη

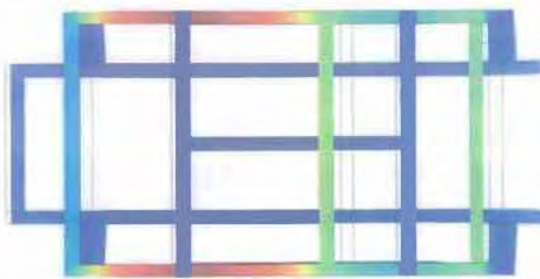


πλάγια όψη

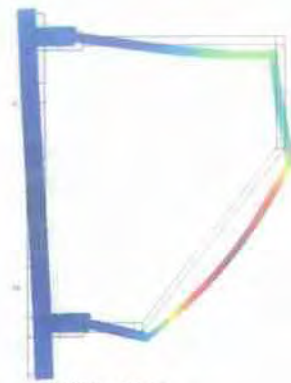
(α) 1^η ιδιομορφή (23.23 Hz)



πρόσοψη

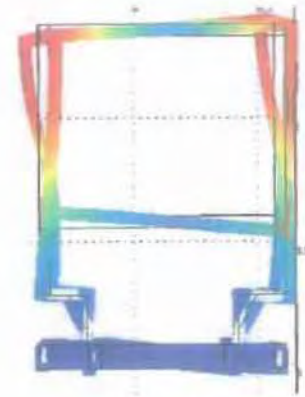
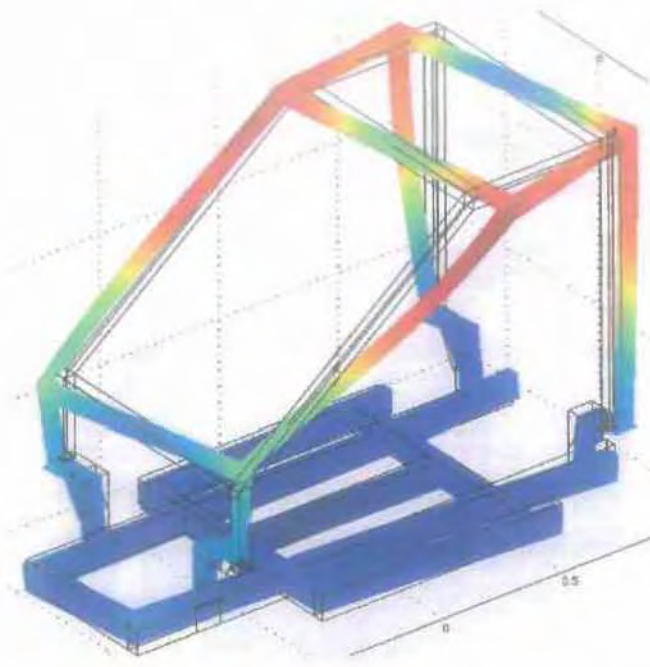


κάτοψη

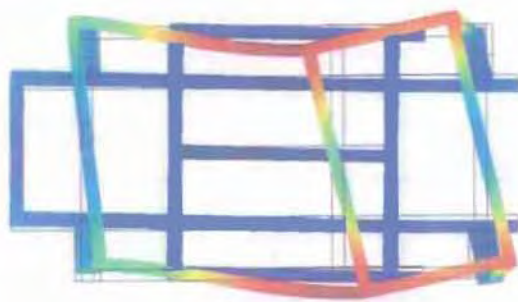


πλάγια όψη

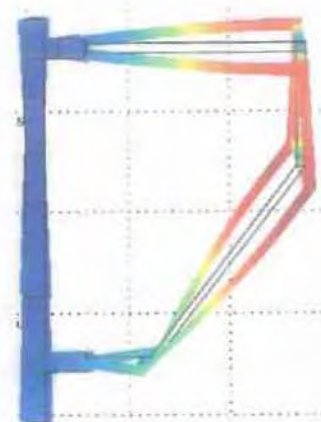
(β) 2^η ιδιομορφή (39.12 Hz)



πρόσοψη

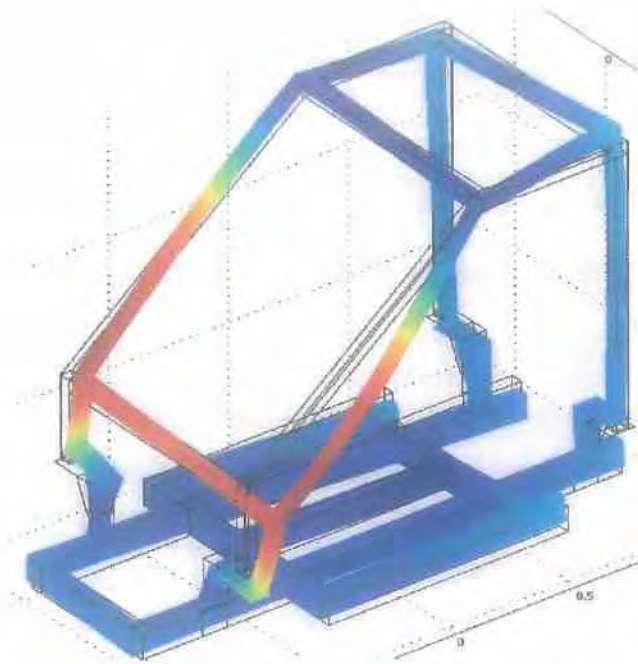


κάτοψη

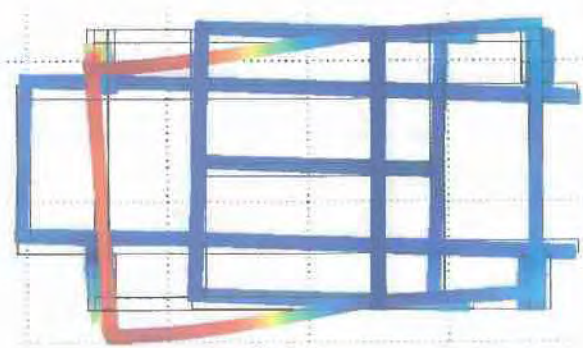


πλάγια όψη

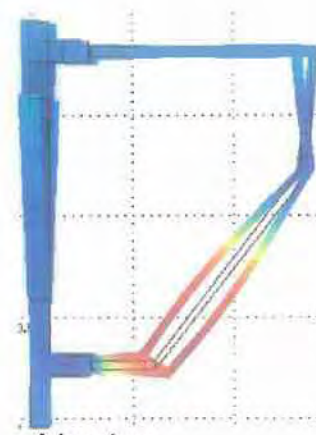
(γ) 3^η ιδιομορφή (41.60 Hz)



πρόσῶπι

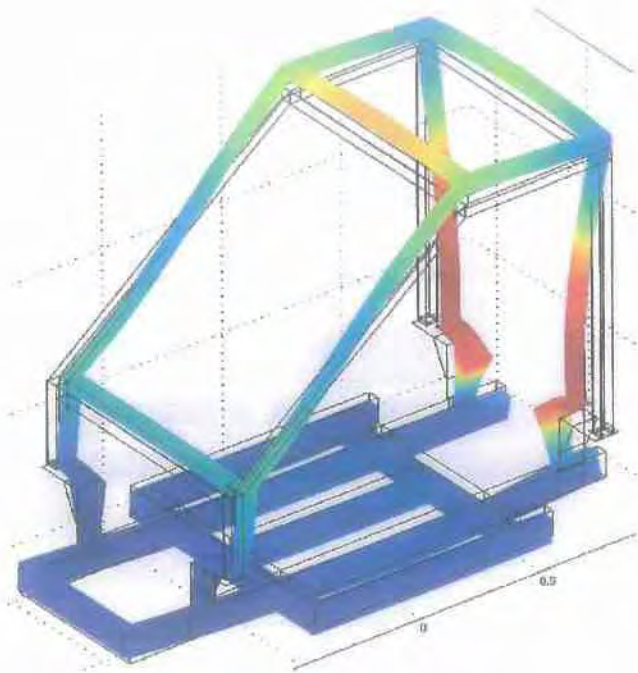


κάτωψη

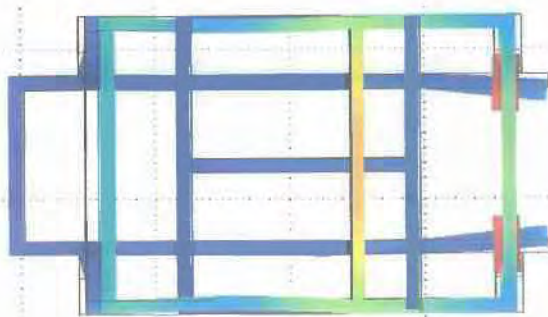


πλάγια όψη

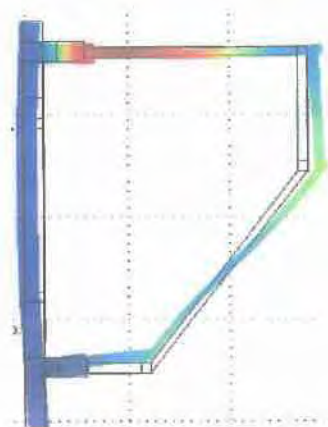
(c) 4^η ιδιομορφή (47.29 Hz)



πρόσοψη

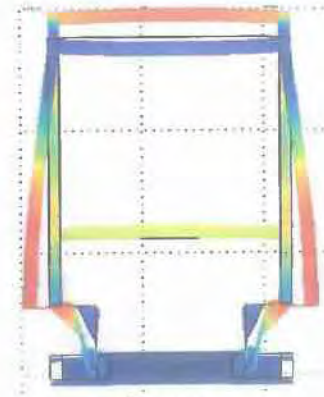
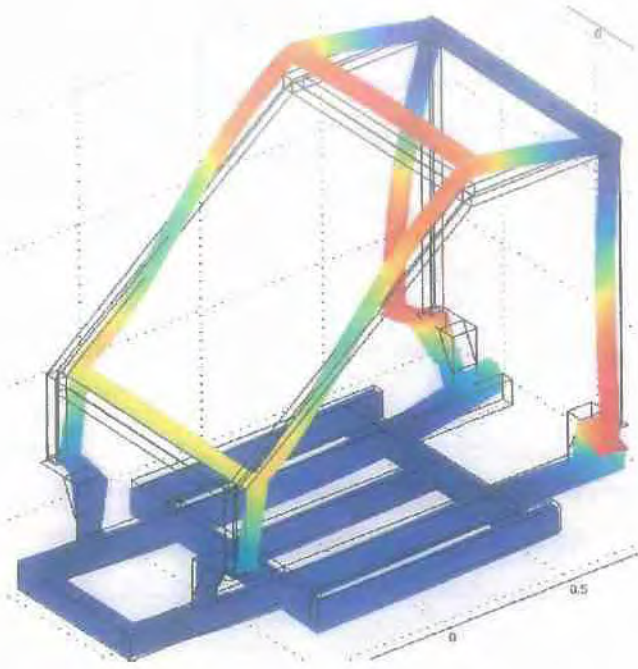


κάτοψη

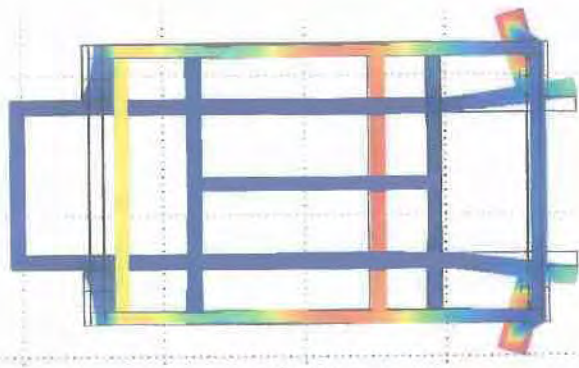


πλάγια όψη

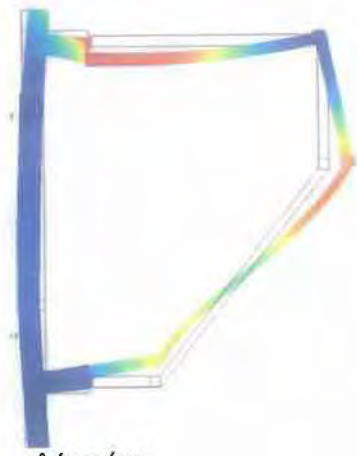
(ε) 5η ιδιομορφή (57.56 Hz)



πρόσοψη

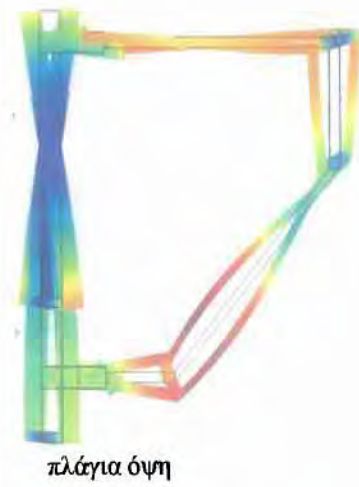
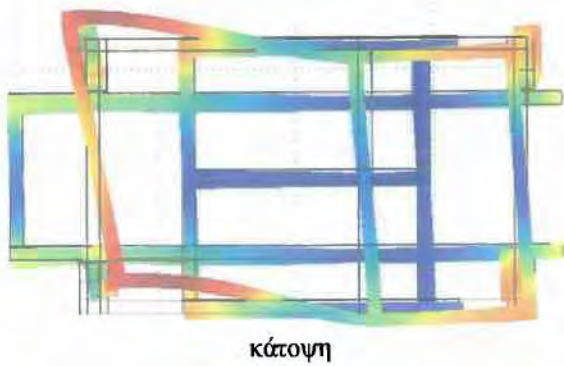
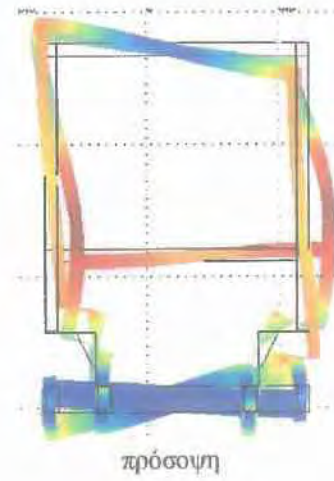
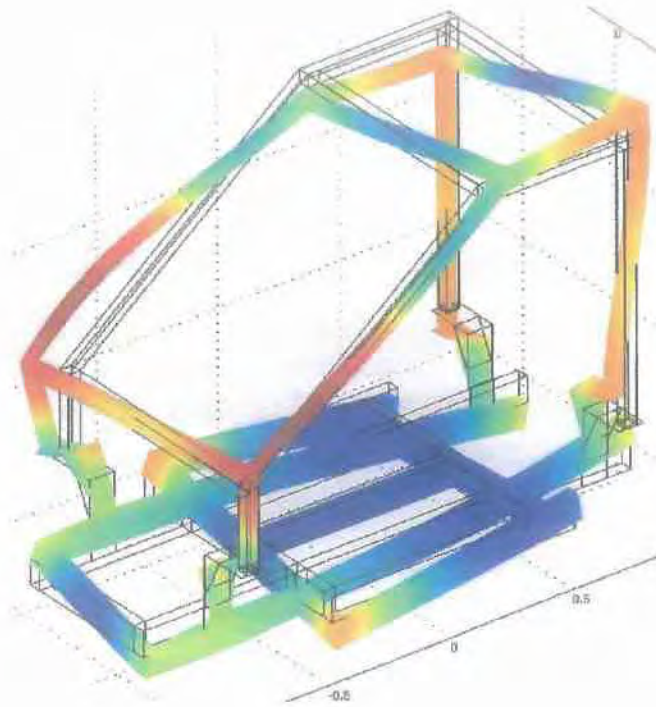


κάτοψη

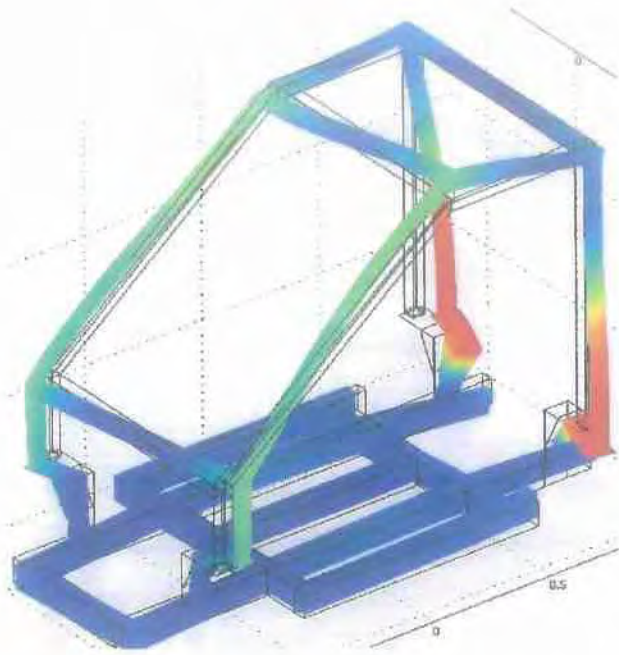


πλάγια όψη

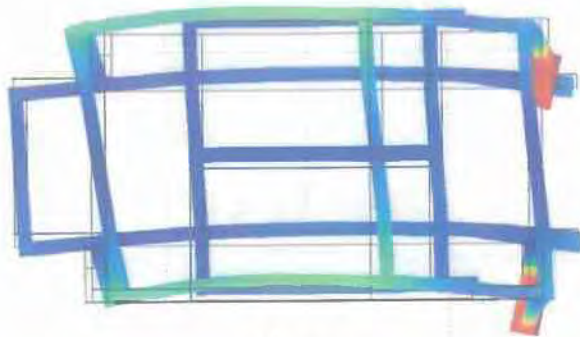
(στ) 6^η ιδιομορφή (66.20 Hz)



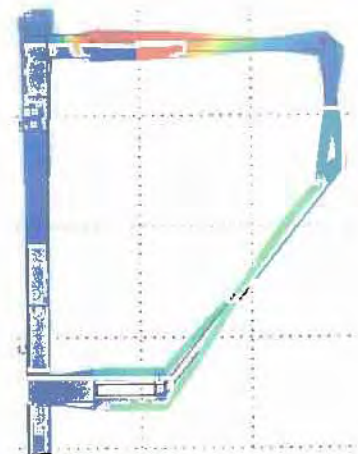
(ζ) 7^η ιδιομορφή (69.05 Hz)



πρόσψη

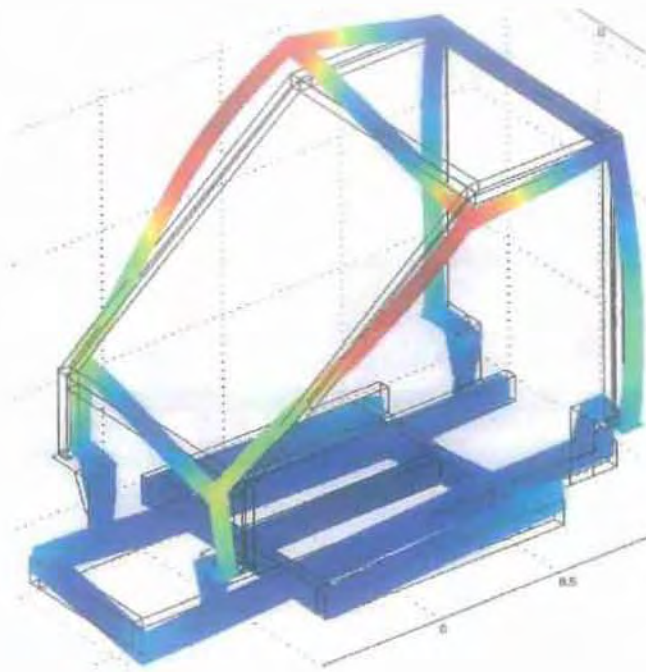


κάτοψη

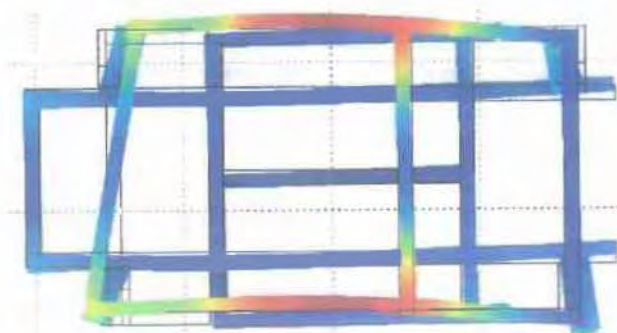


πλάγια όψη

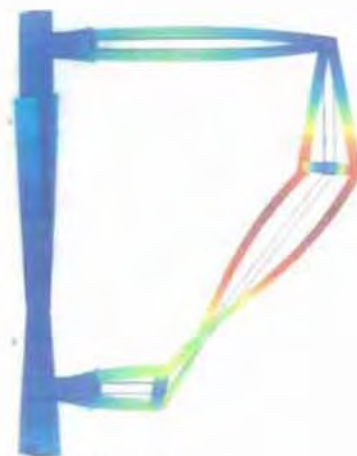
(1) 3^η ιδιομορφή (30.42 Hz)



πρόσψη

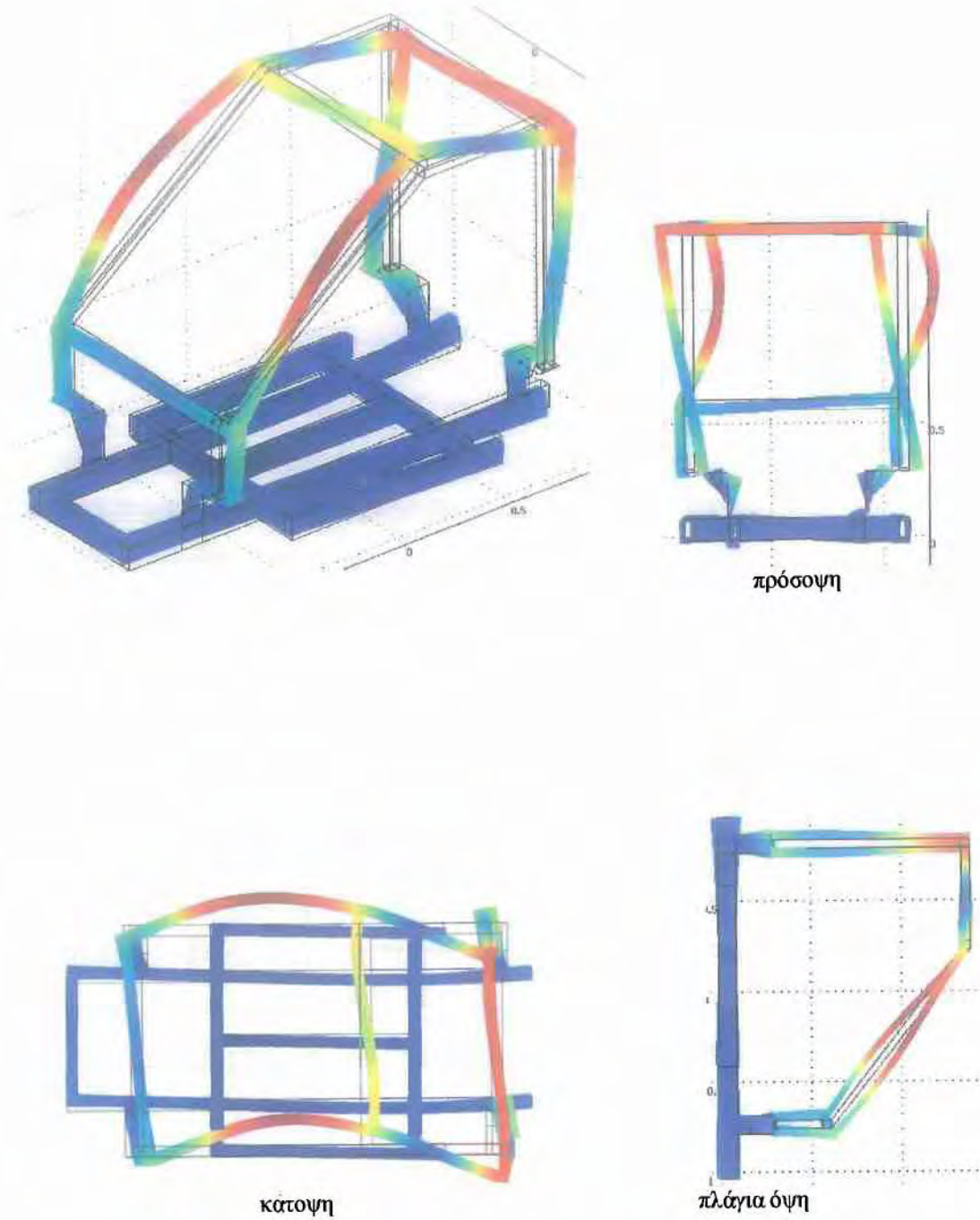


κάτοψη



πλάγια όψη

(8) 8^η ιδιομορφή (83.24 Hz)



(ι) 10^η ιδιομορφή (101.0 Hz)

Σχήμα 4.3: Προβλεπόμενες ιδιομορφές από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του πειραματικού οχήματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 :

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της εργασίας ήταν ο λεπτομερής σχεδιασμός και ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων δύο κατασκευών: της Γέφυρας του Μετσόβου και ενός πλαισίου πειραματικού οχήματος μικρής κλίμακας. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν τρισδιάστατα μοντέλα για τις δύο κατασκευές με βάση τα δισδιάστατα σχέδια τα οποία ήταν διαθέσιμα. Ο σχεδιασμός έγινε χρησιμοποιώντας το λογισμικό SolidWorks έτσι ώστε να αποτυπωθούν όλες οι λεπτομέρειες των κατασκευών στα τρισδιάστατα μοντέλα. Τα σχέδια του SolidWorks χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό COMSOL Multiphysics για την περαιτέρω ανάπτυξη μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και την δυναμική ανάλυση των κατασκευών. Για το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της γέφυρας χρησιμοποιήθηκαν τετραεδρικά πεπερασμένα στοιχεία ενώ για το πειραματικό όχημα χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους. Πραγματοποιήθηκε μελέτη για την ανάλυση της επίδρασης της διακριτοποίησης στην πρόβλεψη των τιμών των ιδιοσυχνοτήτων. Η μελέτη αυτή κατέληξε στην επιλογή της πιο κατάλληλης διακριτοποίησης η οποία διατηρεί αποδεκτά επίπεδα ακρίβειας με τον μικρότερο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων και βαθμών ελευθερίας των μοντέλων. Τέλος, οι ιδιοσυχνότητες που προβλέπονται από τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που κατασκευάστηκαν συγκρίθηκαν με τις ιδιοσυχνότητες οι οποίες προέκυψαν από την ανάλυση πειραματικών δεδομένων και για τις δύο κατασκευές. Με βάση τις συγκρίσεις προέκυψε ότι τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων προβλέπουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις μετρούμενες τιμές των ιδιοσυχνοτήτων. Τα σχετικά μικρά σφάλματα τα οποία παρατηρήθηκαν 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 για την γέφυρα του Μετσόβου οφείλονται στο γεγονός ότι η δυσκαμψία του εδάφους, ενώ επηρεάζει την δυναμική συμπεριφορά της γέφυρας, δεν λήφθηκε υπόψη στην ανάπτυξη του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Τα αποτελέσματα της εργασίας είναι χρήσιμα στην βελτίωση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων με βάση τις μετρήσεις οι οποίες ανακτώνται από σύστημα ενοργάνωσης από 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 στην παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής (Ntotsios et al. 2009b) με βάση τις μετρήσεις που προέρχονται από ενσωματωμένο πάνω στην γέφυρα σύστημα αισθητήρων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Νατσιάβας Σ., «Ταλαντώσεις Μηχανικών Συστημάτων», Εκδόσεις ΖΗΤΗ (2001).
2. COMSOL AB., (2005), *COMSOL Multiphysics User's Guide*.
[<http://www.comsol.com/>].
3. 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).
4. Πανέτσος Π., Μπάρμπα Ζωή, κ.α., (2006), «Αναλυτικό εγχειρίδιο οπτικής επιθεώρησης γεφυρών», Παραδοτέο της Ε.Ο.Α.Ε. στο ερευνητικό πρόγραμμα «ΑΣΠΡΟΓΕ».
5. Ntotsios, E., Karakostas, Ch., Lekidis, V., Panetsos, P., Νικόλαου, G., Papadimitriou, C. and Salonikos, T. (2009a). "Structural Identification of Egnatia Odos Bridges based on Ambient and Earthquake Induced Vibrations." *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7(2), pp. 485-501
6. 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.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000073765

