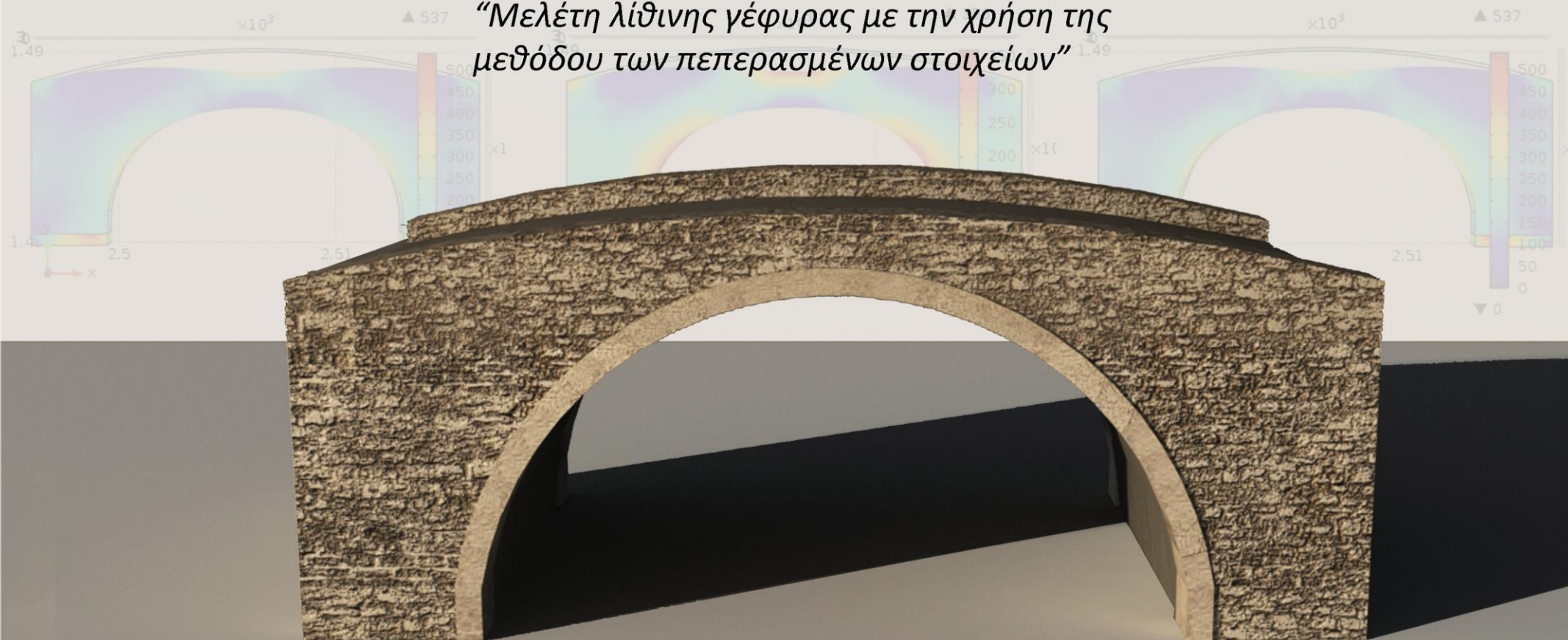




Διπλωματική εργασία

“Μελέτη λίθινης γέφυρας με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων”



Επιμέλεια : Τσουκαλάς Φώτιος _ Αριθμός Μητρώου : 2011010006
Επιβλέπων καθηγητης : Σταυρουλάκης Γεώργιος
Χανιά , Ιούνιος 2017

Ευχαριστίες,

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας που σηματοδοτεί το τέλος των προπτυχιακών φοιτητικών μου χρόνων.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για όλα όσα μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον άνθρωπο που με στήριξε σε όλη τη διάρκεια της μελέτης τόσο στα εύκολα όσο και στα δύσκολα, τη Χαρά Τριανταφυλλίδου.

Τσουκαλάς Φώτης,

Χανιά | Ιούνιος, 2017

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορικό	5
1.2 Μορφές Γεφυριών	7
1.3 Τρόπος Κατασκευής	10
1.4 Υλικά Κατασκευής	13

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ΑΥΞΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ

2.1 Γενικά	14
2.2 Ιστορικά στοιχεία και εφαρμογές.....	15
2.3 Αρνητικός λόγος Poisson	16
2.4 Χαρακτηριστικά αυξητικών υλικών	17
2.5 Εφαρμογές αυξητικών υλικών.....	17
2.6 Πάνελ τύπου σάντουιτς	18

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

3.1 Το πρόγραμμα Autodesk AutoCad 2016	19
3.2 Σχεδιασμός των δύο μοντέλων	20
3.3 Διαστασιολόγηση και χαρακτηριστικά γέφυρας..	22

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 Ιστορικό	23
4.2 Βασικές έννοιες	24
4.3 Το πρόγραμμα Comsol Multiphysics 5.0.....	25

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ ΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ COMSOL MULTIPHYSICS 5.0

5.1 Κριτήριο Διαρροής von mises	27
5.2 Δυναμικό πρόβλημα	27
5.3 Στάδια προσομοίωσης	29

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ 2 ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....

7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....

Σκοπός της εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η στατική και ιδιομορφική ανάλυση μιας λίθινης γέφυρας που έχουμε σχεδιάσει ,με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων .

Η ανάλυση αυτή θα μας βοηθήσει στην βασική κατανόηση της μεθόδου αλλά και την ενασχόληση με την ανάλυση μιας κατασκευής που είναι ένα από τα βασικά αντικείμενα ενασχόλησης ενός Μηχανικού Παραγωγής και Διοίκησης αλλά και προσωπικό μου ενδιαφέρον .

Η ανάλυση αυτή θα πραγματοποιηθεί με την βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Comsol Multiphysics 5.0 έπειτα από τον σχεδιασμό που θα κάνουμε στο σχεδιαστικό πρόγραμμα Autodesk AutoCad 2016.

Πιο αναλυτικά θα πραγματοποιήσουμε Στατική ανάλυση της κατασκευής ,καταγράφοντας τις τάσεις Von Misses και τις καταπονήσεις και δυναμική ανάλυση της καταγράφοντας τις καταπονήσεις και τις ιδιομορφές που θα αναφέρουμε στη συνέχεια της εργασίας πιο συγκεκριμένα .

Θα σχεδιάσουμε και θα προσομοιώσουμε δυο μοντέλα ,το 1ο μοντέλο θα είναι η λίθινη γέφυρα όπως την σχεδιάσαμε εξ αρχής και έπειτα το 2ο μοντέλο θα έχει την χρήση ενός αυξητικού υλικού στα πέλδρα της .

Τέλος ,θα συγκρίνουμε την συμπεριφορά των δυο αυτών μοντέλων και θα βγάλουμε τα συμπεράσματα μας για το ποιό απο τα δύο μοντέλα θα έχουν καλύτερη απόδοση .

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

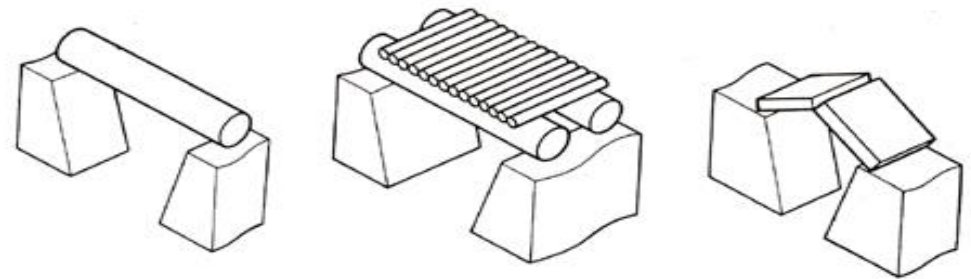
1.1 Ιστορικό

Η εξέλιξη της γεφυροποιίας ακολούθησε την εξέλιξη της οδοποιίας και κατ' επέκταση των συγκοινωνιών. Παρά το γεγονός ότι η εξέλιξη αυτή ήταν συνεχής, μπορούμε να διακρίνουμε τρεις ξεχωριστές φάσεις θέτοντας ως διαχωριστικές σημείο την εισαγωγή της **επεξεργασμένης πέτρας** από τους Ρωμαίους γύρω στο 200 π. Χ. και του **χυτοσιδήρου** στα τέλη του 18ου αι. μ. Χ.

ΦΑΣΗ 1η: 4000 π. Χ. - 200 π. Χ.

Χρήση ακατέργαστων ή ελαφρώς κατεργασμένων υλικών όπως μεγάλες πλάκες, ογκόλιθοι, κορμοί και μεγάλα κλαδιά δέντρων κ.ά.

Η πρώτη γέφυρα που κατασκεύασε ο άνθρωπος θα ήταν επακόλουθο του πρώτου μονοπατιού, που στην κατασκευή της θα οδηγήθηκε από την ίδια τη φύση. Είναι λοιπόν φυσικό τα πρώτα γεφύρια να αποτελούνταν από υλικά που παρείχε η φύση με ελάχιστη ανθρώπινη επεξεργασία

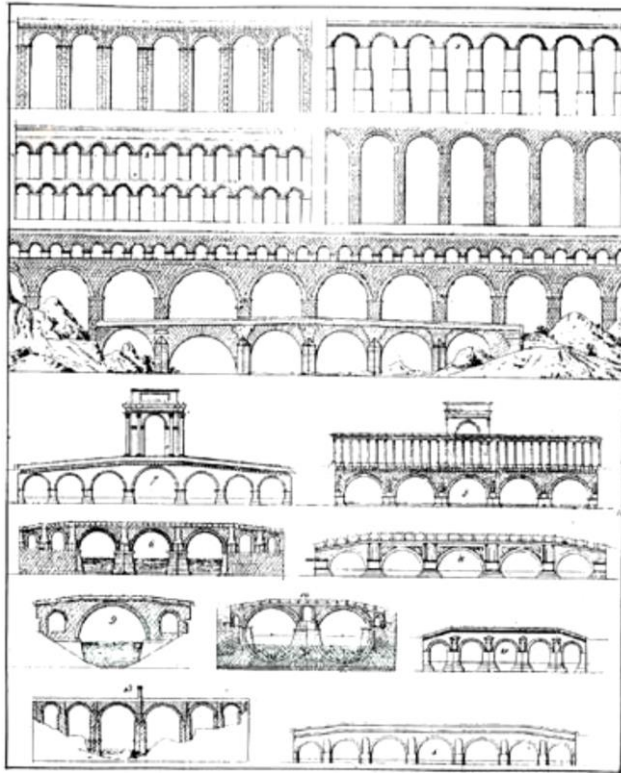


Εικόνα 1.1.1 Χαρακτηριστικοί τρόποι γεφύρωσης από τις πρώτες γενιές του ανθρώπου. Χρησιμοποιήθηκαν κορμοί δέντρων και μεγάλες πέτρινες πλάκες

ΦΑΣΗ 2η : 200 π. Χ. - 1780 μ. Χ.

Χρήση μερικώς κατεργασμένων υλικών όπως λαξευμένες πέτρες και ξύλινα δοκάρια διαφόρων σχημάτων και μεγεθών.

Η περίοδος αυτή αρχίζει με την κατασκευή τοξωτών φορέων από τους Ρωμαίους, οι οποίοι κατασκευάζοντας το οδικό δίκτυο που συνέδεε τη Ρώμη με τις επαρχίες της Αυτοκρατορίας τους, αναγκάστηκαν να κατασκευάσουν γέφυρες. Οι ρωμαϊκές γέφυρες κατασκευάστηκαν με περίσσεια αντοχή και για το λόγο αυτό πολλές απ' αυτές σώζονται μέχρι σήμερα.



Εικόνα 1.1.2 Τύποι Ρωμαϊκών Γεφυρών



Εικόνα 1.1.3 Το γεφύρι Σεοσεπόλ(που σημαίνει ωραία γέφυρα) στο Εσφαχάν με τα χαρακτηριστικά και ψαλιδωτά τόξα του. (περσική ψάλις). Γεφυρώνει τον ποταμό Ζαγιαντιέ μέσα στην πόλη. Κατασκευάστηκε το 1650 μ. Χ., έχει συνολικό μήκος 360m και αποτελείται από 33 τόξα

ΦΑΣΗ 3η : 1780 μ.Χ. - Σήμερα

Χρήση πλήρως κατεργασμένων υλικών όπως σίδηρο, ατσάλι και οπλισμένο σκυρόδεμα.

Κατά τον 19ο αιώνα, οι πέτρινες γέφυρες φτάνουν στα όρια τους. Νεώτερα υλικά, όπως ο χυτοσίδηρος και το σκυρόδεμα, εμφανίζονται και εκτοπίζουν τις πέτρες από τις κατασκευές.

Με τα νέα υλικά, μεγαλύτερα ανοίγματα καλύπτονται με οικονομικότερο τρόπο αλλά εκείνο που πρέπει να τονισθεί ιδιαίτερος είναι το γεγονός ιστορικά αποδειγμένο, ότι οι πέτρινες γέφυρες είναι αξεπέραστες από την άποψη της αντοχής στο χρόνο και από αισθητική άποψη.

1.2 Μορφές Γεφυριών

Όλα τα πέτρινα γεφύρια αποτελούνται από τόξα, δεδομένου ότι το τόξο είναι η μοναδική μορφή πέτρινου φορέα που μπορεί να γεφυρώσει κάποιο άνοιγμα.

Αυτό δίνει μια ιδιαίτερη χάρη, ομορφιά και σταθερότητα. Ανάλογα τώρα, με τον αριθμό των τόξων, το σχήμα τους και το μέγεθος τους, διακρίνουμε πολλές μορφές τοξωτών γεφυριών όπου το καθένα έχει την ιδιαιτερότητα του, τη δική του ταυτότητα θα μπορούσαμε να πούμε.

Ανάλογα με τον αριθμό των τόξων τους, τα πέτρινα γεφύρια διακρίνονται σε **μονότοξα** και **πολύτοξα**.

Μονότοξα

Μονότοξα γεφύρια ήταν τα γεφύρια μόνο με ένα τόξο. Αυτά είχαν μικρότερο κόστος, μικρότερο χρόνο κατασκευής και ήταν πιο στερεά. Τα περισσότερα μονότοξα γεφύρια κατασκευάστηκαν σε ορεινές περιοχές όπου υπήρχαν στενώματα ποταμών ή σε χαράδρες στα σημεία εξόδου τους προς στις πεδιάδες ελαττώνοντας τις δύσκολες συνθήκες. Η κατασκευή μονότοξων γεφυριών γινόταν μεγάλος άθλος λόγω των άδηλων συνθηκών θεμελιώσεων πάνω σε βράχους. Εκτός των μικρών σε πλάτος μονότοξων γεφυριών κατασκευάστηκαν και μεγάλα σε άνοιγμα γεφύρια με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Το ελεύθερο άνοιγμά τους υπερβαίνει, πολλές φορές, τα 30 μέτρα.
- Το ύψος του τόξου τους, σε αρκετές περιπτώσεις, κυμαίνεται γύρω στα 20 μέτρα.
- Το πλάτος του φορέα τους κυμαίνεται, συνήθως, από 2,5 έως 3,5 μέτρα.

Το παρατηρούμενο μεγάλο ύψος των γεφυριών δεν οφείλεται στο ύψος της πλημμυρικής στάθμης του ποταμού αλλά σε καθαρά στατικούς λόγους, καθώς προκαλείται μικρότερη οριζόντια ώθηση στις στηρίξεις (ακρόβαθρα) όσο αυξάνεται το ύψος του τόξου.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα μεγάλων μονότοξων γεφυριών είναι: της Τέμπλας επί του Αχελώου με 24 μ., της Πύλης Τρικάλων με 28 μ., της Μεσοχώρας Τρικάλων με 30 μ. και τελευταίο και μεγαλύτερο που έχει καταγραφεί το ανατιναγμένο γεφύρι του Κοράκου επί του Αχελώου με συνολικό μήκος 45 μ.

Πολύτοξα

Τα περισσότερα γεφύρια που χτίστηκαν σε πεδινές, ημιορεινές ή ορισμένες φορές και σε ορεινές περιοχές, με σημαντικό πλάτος της κοίτης του ποταμού που συνεπάγεται ότι το έδαφος δεν ήταν συμπαγές και στερεό αλλά αποτελούνταν από φερτά υλικά, γεγονός που το επέβαλαν τοπικές, διοικητικές ή στρατιωτικές ανάγκες, είναι, δίτοξα, τρίτοξα, κ.λ.π.

Παρόλο το μικρό πλάτος των πόταμων στις ημιορεινές περιοχές σε σχέση με τις πεδινές περιοχές τύχαινε να υπάρχει ριζιμιός βράχος στην κοίτη οπότε αντί μονότοξο που θα περιμέναμε χιζόντουσαν γεφύρια με περισσότερα του ενός τόξα.

Τα πολύτοξα γεφύρια παρουσιάζουν, συνήθως, τα κύρια ανοίγματα (2 ή το πολύ 3) συγκριτικά μεγαλύτερα από τα άλλα, δεδομένου ότι τα ανοίγματα αυτά γεφυρώνουν τη βαθιά κοίτη του ποταμού.

Τα υπόλοιπα ανοίγματα καθώς και τα ανακουφιστικά ανοίγματα ή «ψευτοκαμάρες» ή «ανακουφιστικά τόξα» πάνω από τα μεσόβαθρα παραλαμβάνουν τις πλημμυρικές παροχές του ποταμού. Για παράδειγμα, στη γέφυρα του Ενιπέα των Φαρσάλων η βαθιά κοίτη του ποταμού βρίσκεται κάτω από τα δύο πρώτα ανοίγματα, από όπου διέρχεται η συνήθης παροχή του.

Η πιο μεγάλη δυσκολία των πολύτοξων γεφυριών ήταν το γεφύρωμα μεγάλου ποταμού στην πεδιάδα χρησιμοποιώντας αναγκαστικά βάθρα εδραζόμενα σε χαλαρά εδάφη λόγω των πολλών και μεγάλων ανοιγμάτων που προαναφέραμε.

Ορολογία

Πιο κάτω παραθέτουμε ορολογία των χαρακτηριστικών στοιχείων των γεφυριών για ευχερέστερη ανάγνωση των παρακάτω :

Θολίτες ονομάζονται οι πέτρες από τις οποίες αποτελείται το τόξο.

Κλειδί (κλείς) του τόξου ονομάζεται ο υψηλότερα τοποθετημένος θολίτης στον άξονά του.

Τύμπανα ονομάζονται τα διαμήκη πέτρινα τοιχεία που εδράζονται στα άκρα του τόξου.

Εσωρράχιο ονομάζεται η κάτω (ορατή) επιφάνεια του τόξου.

Εξωρράχιο ονομάζεται η επάνω επιφάνεια του τόξου, η οποία καλύπτεται από το μεταξύ των τυμπάνων γέμισμα. (Ράχη του τόξου).

Βάθρα είναι οι ορθοστάτες επί των οποίων στηρίζεται το τόξο.

Πρόβολοι (Προρίνιο ανάντη Μεταρίνιο κατάντη) είναι οι κατασκευές πριν και μετά τα βάθρα που τα προστατεύουν από τα φερτά υλικά και ομαλοποιούν τη ροή του ποταμού.

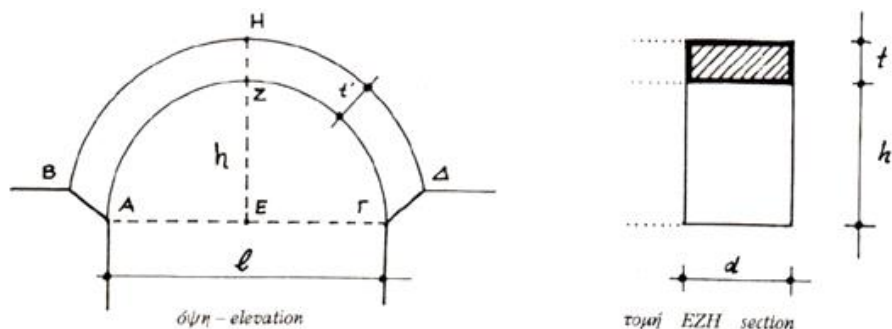
Γενέσεις ονομάζονται οι επιφάνειες έδρασης των τόξων επί των βάθρων.

Βέλος του τόξου είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ γένεσης και κλειδιού της θολωτής κάτω επιφάνειας του τόξου.

Διαζώματα (ή Αρχιθόλοι) είναι οι ορατές (εξωτερικές) επιφάνειες του τόξου στις όψεις των γεφυρών.

Καταβιβασμένο λέγεται το τόξο, όταν το βέλος είναι μικρότερο από το ήμισυ του ανοίγματός του.

Αναβιβασμένο λέγεται το τόξο, όταν το βέλος είναι μεγαλύτερο από το ήμισυ του ανοίγματός του.

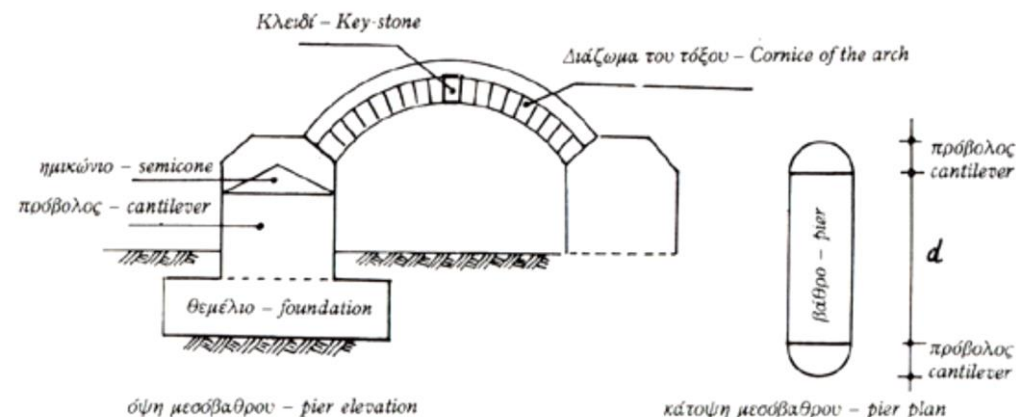


Γενέσεις	: Είναι οι επιφάνειες έδρασης AB.d & ΓΔ.d
Εσωράχιο (αντυξ.)	: Είναι η επιφάνεια ΑΖΓ.d
Εξωράχιο	: Είναι η επιφάνεια ΒΗΔ.d
Κλειδί (κλεις)	: Είναι η επιφάνεια ΗΖ.d
Ελεύθερο άνοιγμα (l)	: Είναι το μήκος ΑΓ
Βέλος	: Είναι το μήκος ΕΖ
Καταβασμός τόξου	: Είναι η σχέση h/l , EZ/AG
Πάχος κλειδιού	: t , HZ
Πάχος τόξου	: t'
Ύψος τόξου	: h
Πλάτος φορέα	: d

Εικόνα 1.2.1 Τόξα



Εικόνα 1.2.2 Είδη τόξων



Εικόνα 1.2.3 Μεσόβαθρο



Εικόνα 1.2.4 Είδη προβόλων

1.3 Τρόπος κατασκευής

Όσο αφορά τα ορεινά και ημιορεινά μέρη που χτίζονταν τα γεφύρια η θεμελίωση δεν ήταν τόσο πολύ σημαντικό πρόβλημα αφού οι βράχοι και οι μικρές κοίτες των ποταμών ήταν οι καλύτεροι σύμμαχοι των Κουδαραίων. Αντίθετα **στα πεδινά η θεμελίωση των γεφυριών δημιουργούσε πολλές δυσκολίες.**

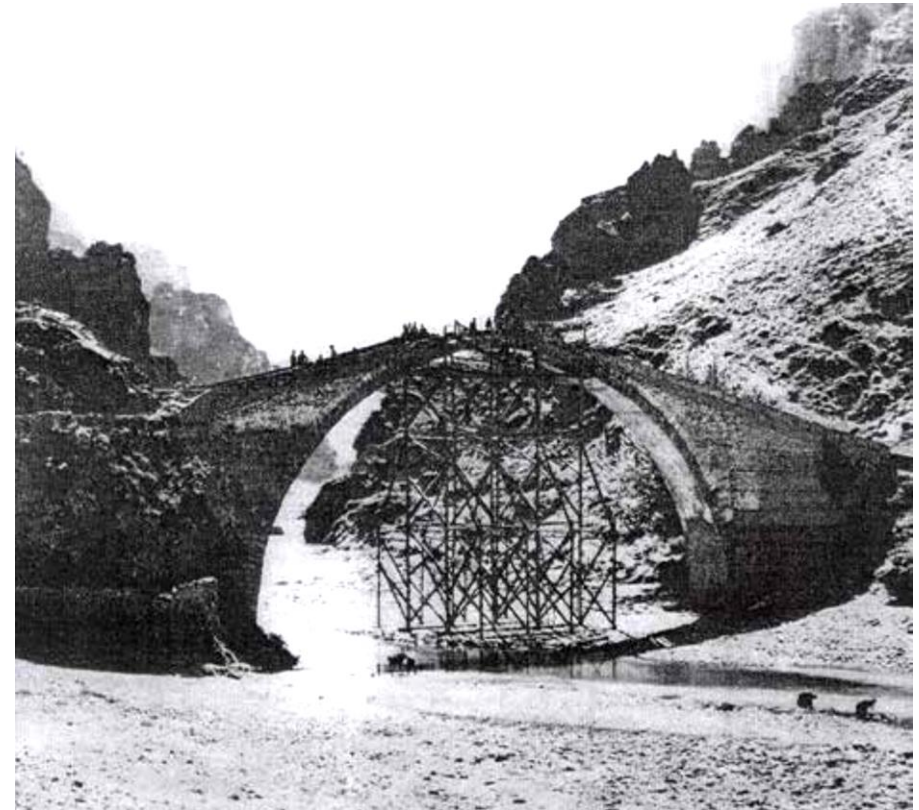
Η **θεμελίωση** των γεφυρών στα πεδινά προσχωσιγενή και ιλυώδη ήταν\ δυσχερέστατη επειδή απαιτούσε σταθεροποίηση τους. Η τεχνολογία της σταθεροποίησης εδαφών είναι γνωστή ως πασσαλόμψη. Ήταν γνωστή ήδη από τους αρχαίους προγόνους μας και τους Ρωμαίους και οι αρχές της ισχύουν και σήμερα όπου χρησιμοποιούμε μπετονένιους (φρεατοπάσσαλοι, έγχυτοι, πρόχυτοι).

Τότε η πασσαλόμψη ήταν δυσχερέστατη διότι εκτός των άλλων απαιτούσε ταυτόχρονα άντληση. Αυτή περιλάμβανε την χρησιμοποίηση και έμπηξη ξύλινων πασσάλων από δρυ ή καστανιά, επιφανειακά απανθρακωμένων ώστε να μην σαπίζουν. Ύστερα ακλουθούσε η κατασκευή κεφαλόδεσμου με διάταξη εσχάρας διασταυρούμενων ξυλοδοκών πάνω στον οποίο χτιζόταν το θεμέλιο του βάθρου

Σειρά είχε η **κατασκευή των βάθρων** που θα δέχονταν το τεράστιο βάρος του γεφυριού και την τρομερή ορμή των νερών του ποταμού. Τα βάθρα προκειμένου να αντέξουν την πίεση του κατερχόμενου νερού μπορούσαν να πραγματοποιήσουν οι μαστόροι δύο δραστικά μέτρα βελτίωσης .

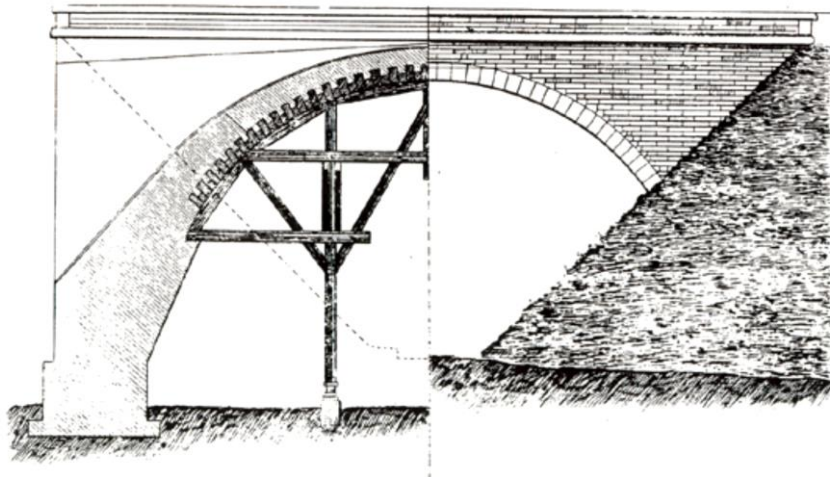
Αρχικά με την κατασκευή εμβόλων κατά τα ανάντη και τα κατόντη των βάθρων για την ορμή εμπρός και την δίνη πίσω λόγω των υδάτων.

Αφού τέλειωνε το χτίσιμο των βάθρων σειρά είχε η **κατασκευή του τόξου**. Η φάση κατασκευής των τόξων ήταν η σημαντικότερη και δυσχερέστερη για το κτίσιμο του γεφυριού. Η κακή τοποθέτηση των σκαλωσιών, η αιφνίδια κακοκαιρία και οι πλημμύρες αποτελούσαν, κυρίως, τα αίτια κατάρρευσης των γεφυριών .



Εικόνα 1.3.1 Κατασκευή τόξου πέτρινου γεφυριού

Η πλημμύρα είναι ο μεγάλος κίνδυνος, όταν κατασκευάζεται το τόξο του γεφυριού (ή σειρά των τόξων) πάνω στα ξύλινα καλούπια καθώς σχετίζεται με τη στάθμη και την ορμή των νερών του ποταμού. Τα ξύλινα καλούπια φροντίζουν οι μαστόροι να στηρίζονται με αγκυλώσεις κατ' ευθείαν πάνω στα λίθινα βάθρα, κατά κανόνα στις γενέσεις του τόξου (όπου συχνά στο εσωράχιο κατασκευασμένων γεφυριών βλέπουμε ανοιχτές «σκαλότρυπες» (=δοκοθήκες) αφημένες). Μερικές φορές όμως κάποια υποστηρίγματα καλουπιών πατάνε στην κοίτη του ποταμού, εκτεθειμένα στα βίτσια και στα ρεύματα του. Διαλέγανε λοιπόν να σηκώσουν το γεφύρι – όσο πιο γρήγορα μπορούσαν – τους καλοκαιρινούς μήνες, ξεκινώντας όταν χαμήλωναν τα νερά του ποταμού και τελειώνοντας πριν αρχίσουν το φθινόπωρο οι βροχές. Κατά κανόνα, στον ευρύτερο χώρο της κεντρικής Ελλάδας διαλεγόταν η περίοδος πριν από τον Ιούλιο έως τον Σεπτέμβριο



Εικόνα 1.3.2 αριστερά Στάδια κατασκευής με χρήση ξυλότυπων
δεξιά Τελικό αποτέλεσμα

Η κατασκευή του τόξου αυτή καθ' αυτή ήταν δύσκολο και απρόβλεπτο έργο ακόμη και για τους πιο έμπειρους πρωτομάστορες ταιριάζοντας μικρών διαστάσεων πέτρες τεχνουργώντας ένα ολόλιθο γεφύρι. Η κατασκευή του ξεκινούσε με το στήσιμο των σκαλωσιών, το χτίσιμο των βάθρων και από τις δύο άκρες της καμάρας του και έπειτα από τις γενέσεις με την χρήση πεπλατυσμένων πετρών με δύο συνεργεία (ή δύο συγκροτήματα συνεργείων στα μεγάλα έργα). Στη συνέχεια κατασκευάζονταν οι σκαλωσιές και οι ξυλότυποι με τέτοιο τρόπο ώστε να σημειώνονται ελάχιστες παραμορφώσεις του τόξου και να απαιτείται ταυτοχρόνως ελάχιστος χρόνος κατασκευής και ο ελάχιστος απαιτούμενος όγκος ξυλείας

Οι πέτρες διαλέγονταν με προσοχή, και τις πελεκούσαν οι «πελεκητές»(πελεκάνοι) με τέχνη και μεγάλη υπομονή, κάτω από την άμεση επίβλεψη και τις οδηγίες του πρωτομάστορα, ο οποίος πολλές φορές δούλευε σαν **πελεκητής**. Η πέτρα περνούσε από πολλά διαδοχικά στάδια επεξεργασίας, μέχρι να φτάσει στην κατάλληλη θέση για να χτιστεί. Κατ' αρχήν οι νταμαρτζήδες βγάζοντας τους ογκόλιθους από το νταμάρι, τους κομμάτιαζαν σε μικρότερες πέτρες, με διάφορα κατάλληλα εργαλεία, τις οποίες μετά τις κατέβαζαν στους πελεκητές. Αυτοί την έπιαναν στα χέρια τους, την εξέταζαν καλά από όλες τις μεριές, λες και τη χάιδευαν και μιλούσαν μ' αυτή, και κατόπιν την πελεκούσαν με υπομονή και τέχνη, σύμφωνα πάντα με τις οδηγίες του χτίστη και του πρωτομάστορα, ο οποίος παρακολουθούσε άγρυπνα όλους τους μαστόρους, στο πόστο που δούλευε ο καθένας. Αφού τελείωνε ο πελεκητής με το πελέκημα, την έπαιρνε ο «παραγιάς» την πέτρα και την μετέφερε στο μέρος που ήταν ο χτίστης. Εάν η πέτρα δεν ήταν καλά πελεκημένη και δεν ταίριαζε όπως έπρεπε, την ξαναγύριζε ο παραγιάς πίσω στον πελεκητή, ο οποίος συνέχιζε να την πελεκάει, με καινούργιες οδηγίες αυτή τη φορά, συμπληρωματικές. Όσπου, τελικά, κατάλληλα πελεκημένη η πέτρα, έφτανε στο τελικό στάδιο του χτισίματος. Οι πέτρες που

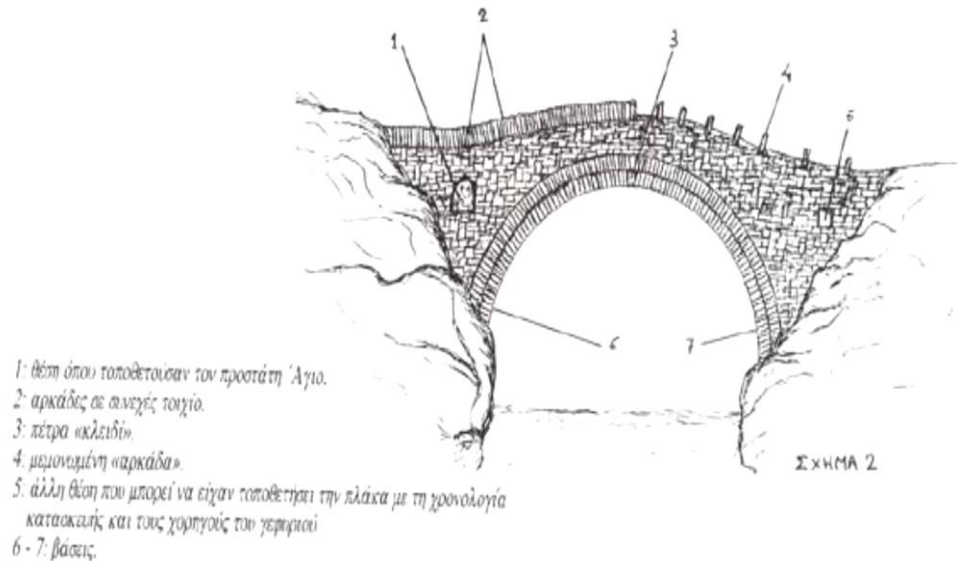
σχημάτιζαν την **πρώτη σειρά της καμάρας**, το «**στεφάνι**» όπως το έλεγαν, έπρεπε να είναι πελεκημένες όλες στις ίδιες διαστάσεις, και μακρόστενες.

Όταν πλέον έφταναν στο **ψηλότερο σημείο της**, εκεί που θα έκλεινε το τόξο, έμπαινε η ιερή πέτρα του γεφυριού, το «**κλειδί**». Ήταν η πέτρα που έκρυβε όλα τα μυστικά του γεφυριού, όπως έλεγαν, αυτή που έδενε όλες τις άλλες και τις κρατούσε στη θέση τους. Από το κλειδί ξεκινούσαν οι δυνάμεις (τα βάρη) πιέζοντας προς τα πλάγια και οι οποίες βαθμιαία μεταβιβάζονταν στις βάσεις. Γι' αυτό, την πέτρα αυτή την διάλεγαν με μεγάλη προσοχή και την ξεχώριζαν από πολύ νωρίς. Έπρεπε τα νερά της να είναι κατάλληλα, να είναι ανθεκτική και μεγάλη, και γενικά, να μην έχει κανένα ελάττωμα. Και βέβαια, το πελέκημά τους γινόταν με μεγάλη λεπτομέρεια. Την έπιανε στα χέρια του ο πελεκητής, και όσες μέρες την πελεκούσε για να της δώσει τη μορφή που έπρεπε, τη μιλούσε, λες και προσπαθούσε να την εξημερώσει και να τη φέρει στα νερά του. Συνήθως **πάνω στο κλειδί σκάλιζαν και τη χρονολογία κατασκευής του γεφυριού, καθώς και τον χορηγό τους**. Μερικές φορές όμως, τη χρονολογία κατασκευής τη σκάλιζαν σε άλλη πλάκα, την οποία εντοιχίζανε σε άλλο σημείο του γεφυριού.

Στα μεγάλου ανοίγματος γεφύρια, πάνω στο εξωράχιο της καμάρας τους οι μαστόροι κατασκευάζανε και δεύτερο πλήρες τόξο για στερεότυπη κατασκευή. Οι θολίτες του τελευταίου εξείχαν προς τα έξω από αυτούς της κύριας καμάρας, τονίζοντας έτσι την παρουσία τους και τη λυγεράδα όλης της γέφυρας με τη λεπτή γραμμική σκιά που δημιουργούσαν. Τα δύο μέτωπα της κύριας καμάρας σύνδεαν με ενσωματωμένους σιδερένιους ελκυστήρες, στων οποίων τις άκρες (σαν από τρύπα βελόνας) πέρναγαν κάθετες ράβδους αγκύλωσης (τις «αρπές» ή «αλπές»). Έτσι εξασφάλιζαν το ολόσωμο του φορέα, ιδιαίτερα από σεισμό (θέλοντας να προφυλάξουν τον κόσμο σε μια έκτακτη

ανάγκη, κρεμούσαν από το εξωράχιο των «κλειδιών» ένα καμπανάκι που προειδοποιούσε για επερχόμενο δυνατό άνεμο).

Οι **αρμοί των πετρών κατασκευάζονταν κάθετα προς τη γραμμή των πιέσεων** (συνισταμένη των πιέσεων) προσαρμοσμένοι στη βασική προϋπόθεση της ευνοϊκότερης σε θλίψη καταπόνησης των στοιχείων.



Εικόνα 1.3.3 Κατασκευή πέτρινου γεφυριού

1.3 Υλικά κατασκευής

Αφού, λοιπόν, τοποθετούσαν και το κλειδί, και έδενε το γεφύρι, έχτιζαν κατόπιν το διάδρομό του, ο οποίος ήταν λιθόστρωτος (καλντερίμι). Για την κατασκευή του διαδρόμου δεν χρησιμοποιούσαν κουρασάνι. Τις πέτρες, αφού τις διάλεγαν και τις πελεκούσαν με προσοχή, τις τοποθετούσαν κολλητά τη μια με την άλλη, σφηνώνοντάς τες κατά κάποιον τρόπο. Ήταν μακρόστενες πέτρες, και τις τοποθετούσαν κάθετα προς το έδαφος, λες και τις φύτευαν σ' αυτό. Ήταν όμως τόσο τέλεια η επαφή των επιφανειών τους, ώστε δεν κουνιόντουσαν καθόλου. Στα πλάγια, εκεί που τελείωνε το καλντερίμι του διαδρόμου, σήκωναν στηθαία, τα λεγόμενα «παραπέτα». Για τα παραπέτα χρησιμοποιούσαν μακρόστενες πελεκημένες πέτρες, τις οποίες έχτιζαν κάθετα. Αυτές, άλλοτε τις τοποθετούσαν μεμονωμένες, σε απόσταση 50 έως 80 εκατοστά μεταξύ των, άλλοτε τις έχτιζαν κολλητά τη μία με την άλλη, έτσι ώστε, σχηματίζονταν ένα συνεχές τοιχίο με όρθιες πέτρες. Αυτές τις πέτρες τις έλεγαν «αρκάδες». Αυτά λοιπόν τα παραπέτα, οι αρκάδες, είτε ήταν μεμονωμένες είτε σε συνεχές τοιχίο, χτίζονταν για να προσδίδουν περισσότερη σιγουριά στα ζώα και τους ανθρώπους που περνούσαν το γεφύρι. Σε ψηλά ιδίως γεφύρια, όταν οι καιρικές συνθήκες ήταν άσχημες, (δυνατός αέρας, κακοκαιρία με ομίχλη, βροχή δυνατή ή χιόνι) ήταν πολύ επικίνδυνο να περάσει κανείς. Και δεν είναι λίγα τα περιστατικά που αναφέρουν, ότι γκρεμίστηκαν άνθρωποι και ζώα σε τέτοιες περιπτώσεις.

Το χτίσιμο του γεφυριού τελείωνε με το σκάλισμα του προστάτη Αγίου του, που αυτό γινόταν πάνω σε πλάκα πέτρινη, την οποία τοποθετούσαν σε ειδική κόγχη.

Η **πέτρα** που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των γεφυριών, προέρχεται από **ντόπια πετρώματα**.

Ο σχιστόλιθος έχει το πλεονέκτημα της λήψης πλακοειδών πετρών με μικρή επεξεργασία και εύκολη και φτηνή μεταφορά.

Είναι χαρακτηριστικό ότι σε θέσεις γεφύρωσης όπου η πηγή λήψης των υλικών ήταν σχετικώς μακριά, χρησιμοποιήθηκαν πολλά είδη πέτρας. Τα **βάθρα και οι πρόβολοι** των γεφυριών δεχόμενα δυνάμεις τριβής από τη στερεό παροχή των ποταμών, κατασκευάστηκαν **από συμπαγή ασβεστόλιθο**, ενώ για την **ανωδομή** χρησιμοποιήθηκαν **ελαφρότερα ή και ευκολότερα επεξεργάσιμα υλικά** (π.χ. το διάζωμα της γέφυρας των Φαρσάλων κατασκευάστηκε από πωρόλιθο).

Γενικά το πέτρωμα, από το οποίο προήλθαν οι πέτρες της κατασκευής των γεφυριών, ήταν ομογενές, συμπαγές και ανθεκτικό, χωρίς να περιέχει μεγάλους κρυστάλλους και χωρίς ρωγμές και δεν παρουσίασε φαινόμενα αποσάθρωσης κατά την επαφή του με το νερό ή με τον αέρα.

Το **κονίαμα (κουρασάνι)** που αποτελεί την συνδετική ύλη των πετρών παρουσιάζει πολλές παραλλαγές, κατά γεφύρι και περιοχή. Τα κύρια συστατικά του είναι η άμμος (πολλές φορές χώμα), νερό, σβησμένος ασβέστης και το κεραμίδι. Πολλές φορές το κονίαμα αποτελείται από ελαφρόπετρα, ξερά χόρτα, ασπράδια αβγών, ακόμα και μαλλιά ζώων, που λειτουργούν σαν ενισχυτικές ίνες. Για τη **θεμελίωση το κουρασάνι το μετατρέπανε σε υδραυλικό** εμπλουτίζοντας το με τριμμένο κεραμίδι.

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ ΑΥΞΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ

2.1 Γενικά

Όταν ένα κοινό υλικό υπόκειται εφελκυσμό σε μία κατεύθυνση, προκαλείται μεταβολή του μήκους του σε κατεύθυνση κάθετη προς την κατεύθυνση στην οποία υπάρχει η φόρτιση, πραγματοποιείται δηλαδή μείωση της διατομής του (συρρίκνωση). Αντίστοιχα, όταν συμπιέζεται ένα κοινό υλικό, στην κάθετη κατεύθυνση από αυτή στην οποία εφαρμόζεται η κλίση το υλικό εμφανίζει επιμήκυνση. Ο λόγος Poisson μετράει αυτή τη μεταβολή του μήκους ενός ελαστικού υλικού, η οποία πραγματοποιείται κάθετα στην κατεύθυνση του εκάστοτε εφαρμοζόμενου φορτίου, είναι συνήθως θετικός αριθμός $0 < \nu < 0.5$ και ορίζεται ως το αρνητικό κλάσμα της εγκάρσια τροπής προς την αξονική τροπή.

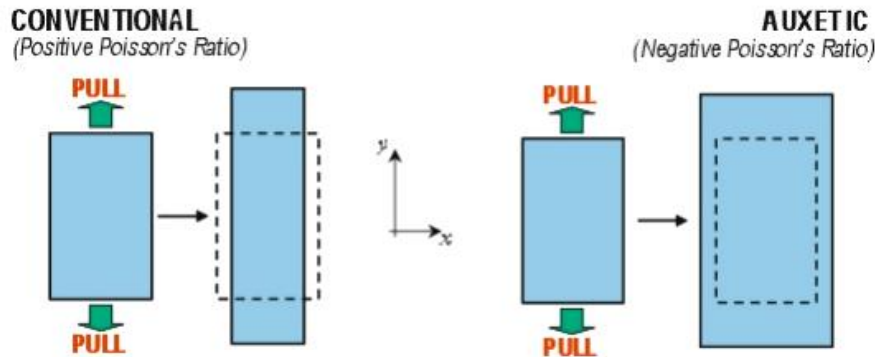
Τα υλικά που εμφανίζουν αρνητικό λόγο Poisson ονομάζονται αυξητικά (*auxetic materials*). Πρόκειται ουσιαστικά για μικροδομές οι οποίες όταν υπόκεινται σε εφελκυσμό αντί να συρρικνώνονται, επιμηκύνονται κάθετα στην κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου φορτίου. Η ονομασία αυτή τους δόθηκε λόγω της αυξανόμενης διατομής που παρουσιάζουν, ενώ εμφανίζονται και με άλλες ονομασίες, όπως αντί-καουτσούκ (*anti-rubber*) επειδή όταν είναι τεντωμένα γίνονται παχύτερα σε εγκάρσια τομή, σε αντίθεση με το καουτσούκ που γίνεται λεπτότερο. Ονομάζονται επίσης και *dilatational materials* (υλικά που διογκώνονται) διότι ενώ τα κοινά υλικά μπορούν εύκολα να υποστούν διατμητική παραμόρφωση και όχι τόσο μεταβολή όγκου, τα αυξητικά υλικά εμφανίζουν εύκολη μεταβολή στον όγκο. Πολλές διαφορετικές μικροδομές έχουν διαμορφωθεί προκειμένου να εξηγηθεί και να μοντελοποιηθεί η αυξητική συμπεριφορά.

2.2 Ιστορικά στοιχεία και εφαρμογές

Για δεκαετίες, έχουν παρουσιαστεί διάφορες γεωμετρικές δομές με αυξητική συμπεριφορά οι οποίες έχουν αναλυθεί και επεξεργαστεί έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή λόγω της ασυνήθιστης συμπεριφορά που παρουσιάζουν. Το 1987, ο Lakes ανέπτυξε για πρώτη φορά τον αφρό πολυουρεθάνης, με αρνητικό λόγο Poisson, με αυξητική δομή (Lakes, 1987a and 1987b). Αυτός ο πολυμερής αφρός είχε λόγο Poisson $-0,7$.

Αυτά τα νέου τύπου υλικά ονομάστηκαν αυξητικά από τον Evans (Evans, et al, 1991), τα οποία σε αντίθεση με τα συμβατικά υλικά (όπως το καουτσούκ, γυαλί, μέταλλα, κ.λπ.) έχουν την ιδιότητα να γίνονται παχύτερα όταν τεντώνονται, ή να γίνονται λεπτότερα όταν συμπιέζονται. Ο όρος αυξητικά "Auxetics" προέρχεται από την Ελληνική λέξη *auxetos*, που σημαίνει «εκείνο το οποίο μπορεί να αυξηθεί». Τα αυξητικά υλικά είναι γνωστά για πάνω από 100 χρόνια, παρόλα αυτά ειδικά στην αρχή δεν δόθηκε αρκετή προσοχή σε αυτά καθώς και σε εφαρμογές που θα μπορούσαν να έχουν.

Μέχρι σήμερα, μεγάλη ποικιλία αυξητικών υλικών έχει κατασκευαστεί, σε αυτά περιλαμβάνονται πολυμερείς και μεταλλικοί αφροί, μικροπορώδη πολυμερή, ελάσματα ανθρακονημάτων καθώς και δομές κυψελών. Ένα τυπικό παράδειγμα είναι το ευρέως γνωστό τεφλόν (συνθετικό πολυμερές- πολυτετραφθοροαιθυλενίου PTFE), το οποίο χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια. Άλλα παραδείγματα υλικών τα οποία έχουν την ιδιότητα αρνητικού λόγου Poisson είναι το μικροπορώδες, εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο (UHMWPE), το πολυπροπυλένιο (PP) (Caddock &

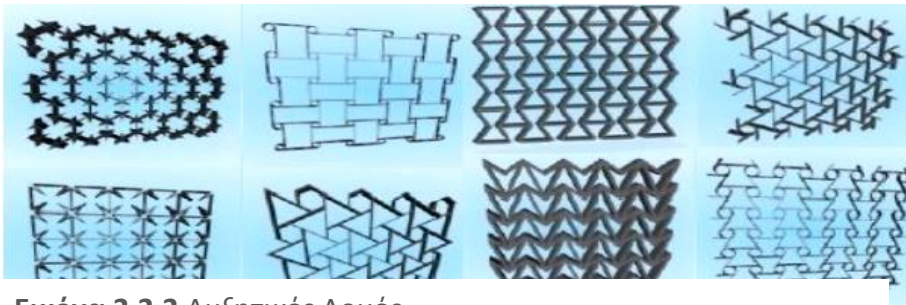


Εικόνα 2.1.1 Χαρακτηριστικά κλασικού και αυξητικού υλικού

Evans, 1989; Picklrs, et al, 1996; Alderson, et al, 2000), καθώς και αρκετοί τύποι πετρωμάτων (Nur & Simmons, 1969).

Παρόλα αυτά, τα ειδικά χαρακτηριστικά τους δεν είχαν γίνει ευρέως γνωστά μέχρι σχετικά πρόσφατα, όπου η δουλειά του Lakes, του Evans και άλλων επιστημόνων προσέλκυσε την προσοχή στα αυξητικά υλικά. Τα αυξητικά υλικά τυγχάνουν ενδιαφέροντος λόγω του γεγονότος ότι **παρουσιάζουν βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες**, όπως διατμητική αντοχή, αντίσταση στην παραμόρφωση και αντοχή σε θραύση (Lakes, 1987a; Evans, 1990), σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά από τα οποία κατασκευάζονται.

Συνεπώς, η μελέτη τέτοιου τύπου μη συμβατικών υλικών είναι πραγματικά σημαντική από την σκοπιά στοιχειώδους έρευνας καθώς και πιθανών πρακτικών εφαρμογών, ιδιαίτερα στο πεδίο της ιατρικής, της αεροδιαστημικής καθώς και της βιομηχανίας. Στην πραγματικότητα, μερικά υλικά με τέτοιου είδους ασυνήθιστες ιδιότητες έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές, όπως είναι ο πυρολιθικός γραφίτης που χρησιμοποιείται για θερμική προστασία στην αεροδιαστημική καθώς και δομή κρυστάλλων Ni3Al σε βάνες στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών.



Εικόνα 2.2.2 Αυξητικές Δομές

2.3 Αρνητικός λόγος Poisson

Είναι γνωστό, ότι ο λόγος Poisson, ορίζεται από το λόγο της εγκάρσιας συστολής προς τον διαμήκη επέκταση σε μια απλή κατάσταση έντασης (Fung, 1968) όπου "ε" είναι η παραμόρφωση, οποία ορίζεται ως: $\epsilon = \Delta L / L$ όπου ΔL η μεταβολή στο μήκος και L το μήκος.

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\frac{\Delta y}{l_y}}{\frac{\Delta x}{l_x}} = -\frac{\Delta y}{\Delta x} \Rightarrow \nu < 0 \text{ με } \Delta x, \Delta y > 0$$

Ο λόγος που η πληθώρα των υλικών έχουν θετικό λόγο Poisson, δηλαδή λεπταίνουν στην διατομή τους καθώς εφελκούνται, είναι ότι είναι ευκολότερο να αλλάξουν σχήμα απ' ότι να **αλλάξουν όγκο**.

Στα γραμμικά ελαστικά υλικά, οι σχέσεις τάσης - παραμόρφωσης προέρχονται από το γενικευμένο κανόνα του Hooke. Τέσσερα είναι τα βασικά μεγέθη τα οποία χρησιμοποιούμε για να χαρακτηρίσουμε την συμπεριφορά ενός ισοτροπικού γραμμικού ελαστικού υλικού:

το μέτρο ελαστικότητας (E), το μέτρο διάτμησης (ή μέτρο δυσκαμψίας) (G), το μέτρο ελαστικότητας όγκου (K) και η αναλογία Poisson (ν), τα οποία συνδυάζονται μεταξύ τους με βάση τις σχέσεις που ακολουθούν :

2.4 Χαρακτηριστικά αυξητικών υλικών

Γενικά, υλικά με αρνητικό λόγο Poisson έχουν τις ακόλουθες ειδικές ιδιότητες:

- Υψηλή εντός επιπέδου αντίσταση σημειακής παραμόρφωσης
- Καλή δυσθραυστότητα
- Υψηλό εγκάρσιο μέτρο διάτμησης
- Υψηλές δυναμικές ιδιότητες

2.5 Εφαρμογές αυξητικών υλικών

Τα υλικά με αρνητικό λόγο Poisson ή αυξητικά προσφέρουν μια εναλλακτική και σχεδόν ανεξερεύνητη πρόταση στην επιλογή υλικών για αναρίθμητα προϊόντα και εφαρμογές. Ο συνδυασμός των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν αυτά τα υλικά φέρνει πιο κοντά στην πραγματικότητα εφαρμογές που είναι αδύνατες μέχρι σήμερα και βελτιώνει σημαντικά τις επιδόσεις από ήδη υπάρχουσες εφαρμογές. Τις προηγούμενες δεκαετίες μελέτες με την υποστήριξη από γνωστούς φορείς, πιστοποίησαν και τεκμηρίωσαν τις ιδιότητες των αυξητικών υλικών, πρότειναν νέες χρήσεις και μεθόδους παραγωγής και συγκέντρωσαν το επιστημονικό ενδιαφέρον. Η πρόοδος όσον αφορά τις μεθόδους παραγωγής των αυξητικών υλικών προδιαθέτει για την εμφάνιση πολλών καινοτόμων εφαρμογών στον βιομηχανικό κλάδο αλλά και σε άλλους τομείς. Κάποιες χαρακτηριστικές εφαρμογές των αυξητικών υλικών είναι οι εξής:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2)$$

$$E = \frac{9KG}{(3K+G)} \quad (3)$$

$$\left(\frac{(1+\nu)}{(1-2\nu)} \right) = \frac{3K}{2G} \quad (4)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left(\frac{3K-2G}{3K+G} \right) \quad (5)$$

Σύμφωνα με τις πρώτες δύο εξισώσεις ο λόγος Poisson ενός υλικού δεν μπορεί να είναι μικρότερος από -1.0 και μεγαλύτερος από 0.5 εφόσον είναι αναγκαία συνθήκη το μέτρο διάτμησης και το μέτρο ελαστικότητας όγκου να έχουν θετικές τιμές.

Έτσι, καθώς το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) αφορά την παραμόρφωση δισδιάστατων υλικών ενώ το μέτρο διάτμησης και το μέτρο ελαστικότητας όγκου χαρακτηρίζουν τρισδιάστατα υλικά, προκύπτει ότι ο ομογενοποιημένος λόγος Poisson μπορεί να πάρει τιμές από **-1.0 < ν < 0.5 σε 3D δομές** και **-1.0 < ν < 1.0 σε 2D δομές**.

Σύνθετα υλικά με αυξητικές ίνες

Τα σύνθετα υλικά με αυξητικές ίνες παρουσιάζουν βελτιωμένες επιδόσεις στην αντοχή. Οι αυξητικές ίνες διαστέλλονται διατμητικά στις αξονικές εφελκυστικές τάσεις άρα θα είναι δυσκολότερο να αποτραβηχτούν μέσα από τη μήτρα, πράγμα που είναι προαπαιτούμενο για την αστοχία του σύνθετου υλικού.

Αισθητήρες

Τα αυξητικά υλικά είναι ελκυστική επιλογή για την κατασκευή υδρόφωνων και αισθητήρων γενικότερα λόγω της μικρής τιμής του μέτρου διόγκωσης (K) που εμφανίζουν. Το μικρό μέτρο διόγκωσης σημαίνει ευκολία στις υδροστατικές μεταβολές του όγκου, άρα ευαισθησία στις κυματικές διαταραχές από το εξωτερικό περιβάλλον του αισθητήρα. Ο σκοπός των αισθητήρων είναι να είναι όσο το δυνατόν πιο ευαίσθητοι στις μεταβολές του περιβάλλοντός τους. Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται και οι συνδυαστικές εφαρμογές με πιεζοηλεκτρικά στοιχεία.

Βιοϊατρική

Ένας ιδιαίτερα ενδιαφέρον κλάδος που έχει να αποκομίσει πολλά από τις εφαρμογές με τα αυξητικά υλικά είναι αυτός της Βιοϊατρικής. Μια χαρακτηριστική εφαρμογή είναι με τις αυξητικές τεχνητές αρτηρίες. Αν η τεχνητή αρτηρία είναι από μη – αυξητικό υλικό, τείνει να λεπταίνει στο πάχος των τοιχωμάτων της ως αντίδραση στο κύμα αίματος που προκύπτει από τον παλμό της καρδιάς. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε ρήξη της αρτηρίας με καταστροφικές συνέπειες. Για αυτό το λόγο προτάθηκε η χρήση αυξητικού υλικού για τις τεχνητές αρτηρίες.

Δομές απόσβεσης

Η περίπλοκη εσωτερική, των αυξητικών υλικών, γεωμετρία διευκολύνει την διασπορά και την απορρόφηση των ηχητικών κυμάτων. Προϊόντα που χρησιμοποιούνται στην ηχομόνωση αλλά και στην απορρόφηση ενέργειας κρούσης είναι από τις πιθανές διεξόδους που μπορούν να βρουν οι αυξητικές εφαρμογές στην αγορά. Ωτοασπίδες, υλικό ηχομόνωσης, προφυλακτήρες αυτοκινήτων, συσκευασία (με την ευρεία έννοια) είναι μερικές από αυτές τις εφαρμογές.

2.6 Πάνελ τύπου σάντουιτς

Η ιδέα για την κατασκευή στοιχείων τύπου σάντουιτς αναπτύχθηκε στις αρχές του 19ου αιώνα, ωστόσο η ανάπτυξη τους αυτή ολοκληρώθηκε τον 20ο αιώνα. Η χρήση κατασκευών τύπου σάντουιτς επικράτησε σε πολλές κατασκευές χάρη στα ποικίλα πλεονεκτήματα που προσφέρει όσον αφορά την εξοικονόμηση βάρους και την υψηλή ακαμψία. Γενικά, τα πάνελ τύπου σάντουιτς αποτελούνται από τον πυρήνα που βρίσκεται στην μέση και είναι από ελαφρύ υλικό και έχει ως κύριο σκοπό την μεταφορά των διατμητικών τάσεων μεταξύ των δύο επιστρώσεων, οι οποίες με την σειρά τους είναι από ισχυρότερο υλικό ανθεκτικό στις τάσεις εφελκυσμού και θλίψης που εφαρμόζονται στο επίπεδο τους. Οι επιστρώσεις είναι κολλημένες στις κύριες επιφάνειες του πυρήνα με κατάλληλο τρόπο που εξαρτάται από τον τύπο του στρωματοειδούς. Κάθε μέρος αυτής δομής από μόνο του είναι αδύναμο και εύκαμπτο, όταν λειτουργεί όμως ως σύνολο παρέχει μια άκαμπτη, ισχυρή και ελαφριά δομή. Τέτοιου είδους σάντουιτς πάνελ προσφέρουν πολλαπλές εφαρμογές στον τομέα της αεροδιαστημικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο πυρήνας κατασκευάζεται από αφρώδη υλικά, δικτυώματα και κυψέλες. Πολλές μελέτες έχουν προσπαθήσει να μοντελοποιήσουν τις μηχανικές ιδιότητες δομών τύπου σάντουιτς με χρήση μαθηματικής μοντελοποίησης και ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA).

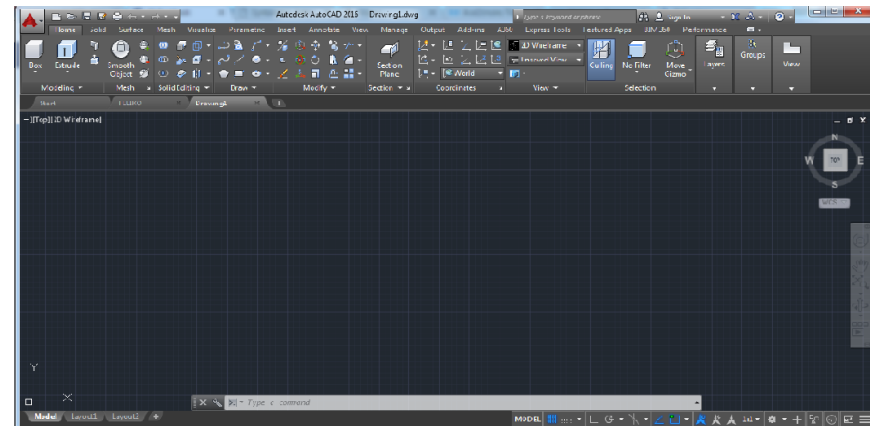
Συμβατικές εξαγωνικές κυψέλες χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του πυρήνα κατασκευών σάντουιτς. Ένα πλεονέκτημα της κυψελοειδούς δομής είναι η αντίσταση της στη κόπωση. Οι αυξητικές κυψέλες είναι κυτταρικές δομές στις οποίες αντιστρέφεται η γωνιά μιας μονάδας κελιού σε αρνητική. Στην αυξητική δομή με την αντιστροφή της γωνίας μεταβάλλεται και ο λόγος Poisson σε αρνητικές τιμές.

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

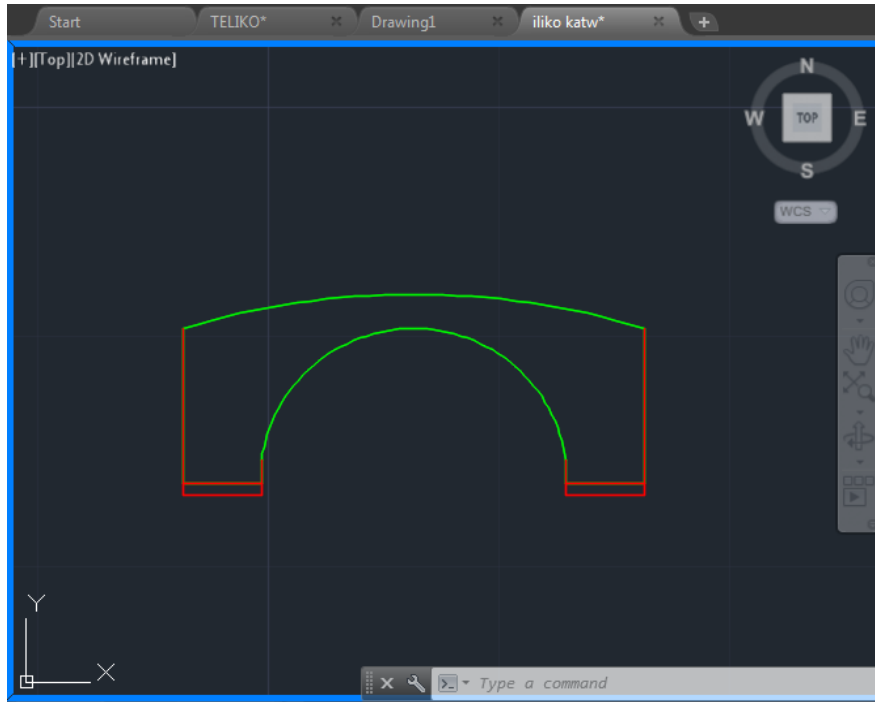
Έχοντας δει σε προηγούμενα κεφάλαια τις σχεδιαστικές αρχές των γεφυρών ,σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στο πρόγραμμα σχεδίασης AutoCad 2016 και στον τρόπο με τον οποίο θα σχεδιάσουμε τα δύο μοντέλα γέφυρας που θα μελετήσουμε .

3.1 Autodesk AutoCad 2016

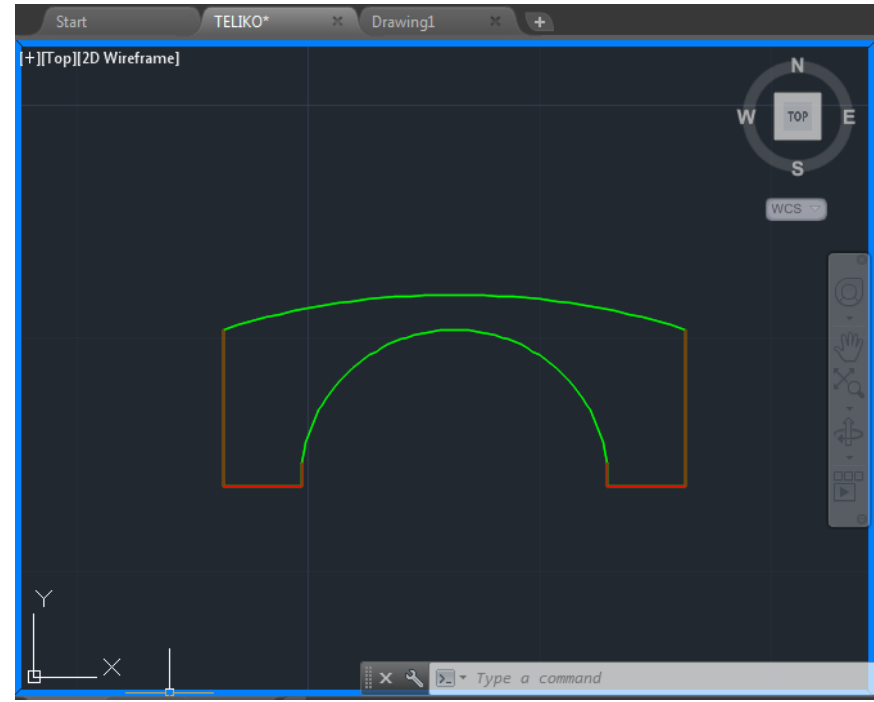
Το Autodesk AutoCad είναι ένα από τα κορυφαία προγράμματα τρισδιάστατης σχεδίασης CAD. Στην εργασία αυτή για την κατασκευή του μοντέλου χρησιμοποιείται η έκδοση 2016.Σαν πρόγραμμα χαρακτηρίζεται για το φιλικό για τον χρήστη περιβάλλοντος εργασίας και την ευκολία σχεδιασμού. Ο τύπος των αρχείων που δουλεύει είναι **dwg**, ωστόσο δύναται η δυνατότητα να εξαχθούν τα αρχεία σε πιο γενικές μορφές CAD αρχείων. Εντάσσεται γενικότερο πλαίσιο των λογισμικών της Autodesk , έχοντας μεγάλη ικανότητα διεπαφής με την αντίστοιχη πλατφόρμα.



3.2 Σχεδιασμός των δύο μοντέλων



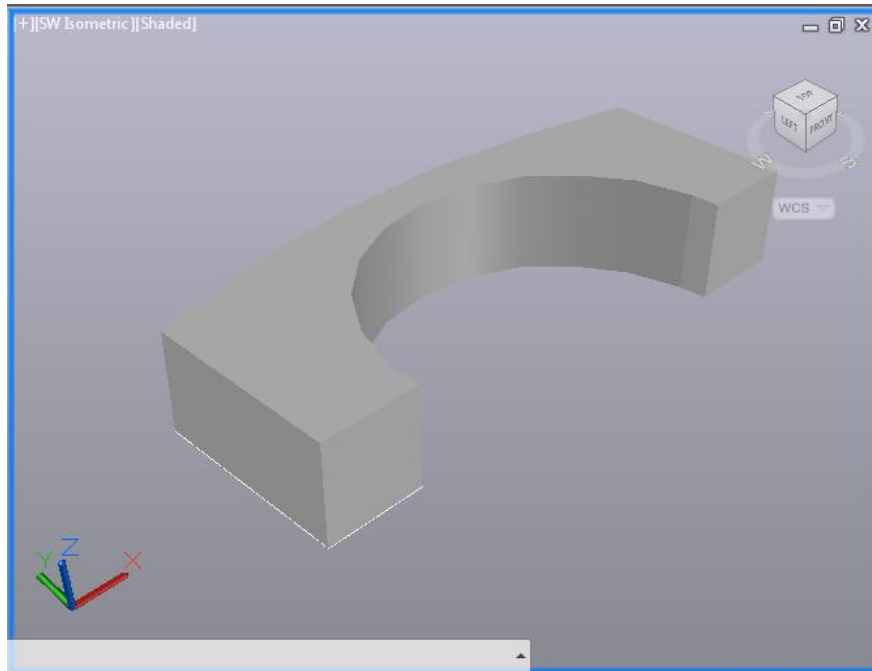
Πρώτο Μοντέλο



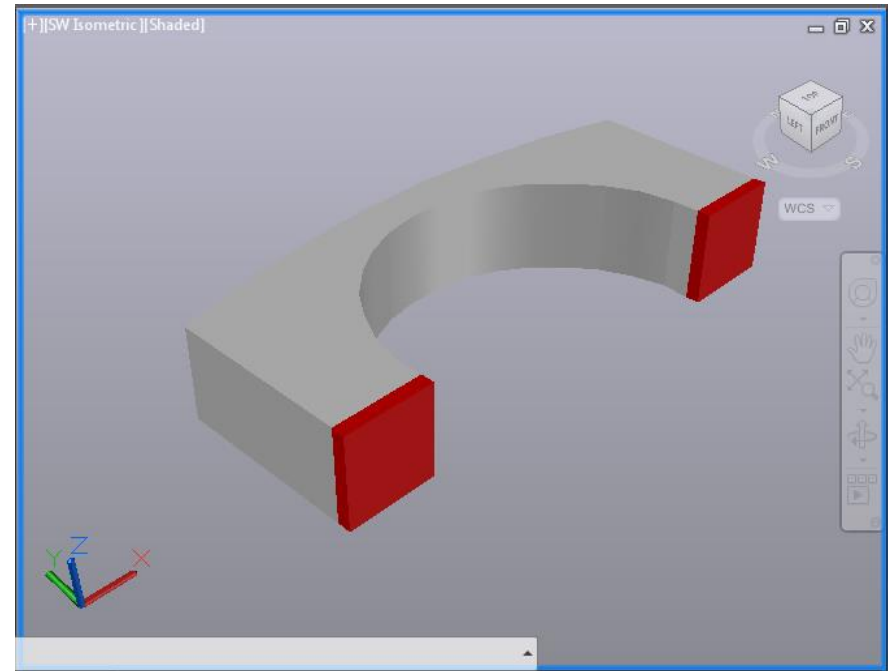
Δεύτερο Μοντέλο

Εντολές που χρησιμοποιήθηκαν :

- Το κόκκινο **Layer** δημιουργήθηκε με την εντολή **Line** ενώ το πράσινο με την εντολή **Arc**
- Αντίστοιχα στο δεύτερο μοντέλο το αυξητικό υλικό δημιουργήθηκε με την εντολή **Line**.



Πρώτο Μοντέλο

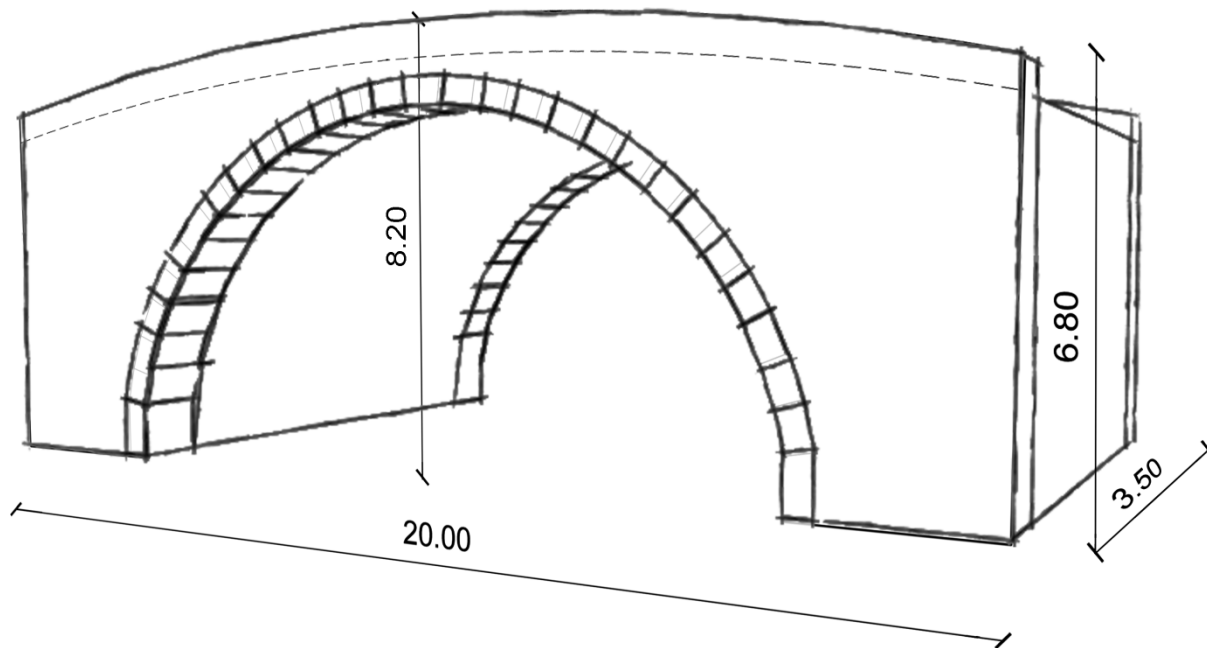
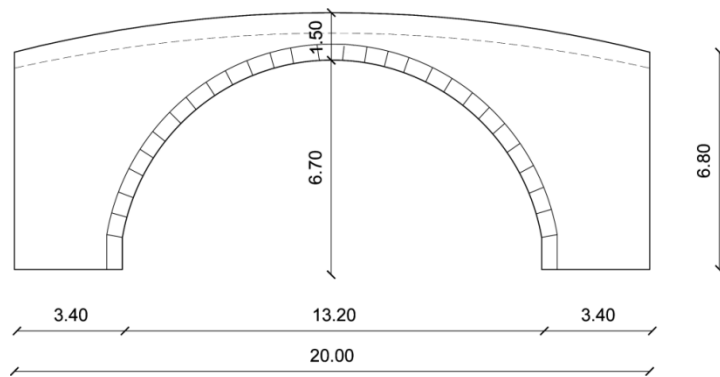


Δεύτερο Μοντέλο

Εντολές που χρησιμοποιήθηκαν :

- Στη συνέχεια με την εντολή **VIEWPORTS** μετατρέπουμε τα δύο σχέδια από 2D σε 3D και με τη χρήση της εντολής **extrude** ορίσαμε το πλάτος της γέφυρας.

3.3 Διαστασιολόγηση της γέφυρας



4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

4.1 Ιστορικό

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιασθεί περιληπτικά η **Μεθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων** (ΜΠΣ κ.εξ.).Αν και η αρχική σύλληψη της ΜΠΣ είχε στόχο την **μητρική ανάλυση**, η θεωρητική της βάση διευρύνθηκε σημαντικά. Κι αυτό γιατί σύντομα έγινε αντιληπτό η δυνατότητα εφαρμογής της στην ανάλυση συνεχών μέσων (κελύφη, ελάσματα κτλ.). Πιο συγκεκριμένα, κύριο χαρακτηριστικό της ΜΠΣ είναι η **χρήση δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων στην προσομοίωση συνεχών μέσων**.

Μια από τις πρώτες δημοσιεύσεις στις οποίες παρουσιάσθηκε η ιδέα αυτή ήταν εκείνη των Turner, Clough, Martin και Torp (1956) οι οποίοι κατάφεραν να δημιουργήσουν μητρώα ακαμψίας για δικτυώματα, δοκούς και άλλα στοιχεία. Πρόδρομος, ωστόσο, της προσέγγισης αυτής θα μπορούσε να χαρακτηριστεί η μελέτη τόσο του Hrenikoff (1941) όσο και των Courant (1943) και McHenry (1943). Η σχετική βιβλιογραφία εμπλουτίστηκε σημαντικά χάρη στις δημοσιεύσεις του καθηγητή Αργύρη και των συνεργατών του κατά την περίοδο από το 1954 ως το 1960.

Μετά την καθιέρωση της στη γραμμική ελαστική περιοχή η μέθοδος εφαρμόσθηκε και σε δυσκολότερα προβλήματα όπως η δυναμική συμπεριφορά ,ο λυγισμός και η μη-γραμμική απόκριση και συμπεριφορά του υλικού, ενώ οι μαθηματικές της βάσεις τέθηκαν στη δεκαετία του '70 καταδεικνύοντας ότι μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάθε πρόβλημα πεδίου με μεταβολική διατύπωση

4.2 Βασικές έννοιες

Η ΜΠΣ αποτελεί σήμερα ένα πανίσχυρο εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός σημαντικού φάσματος προβλημάτων του μηχανικού καθώς στον πυρήνα της βρίσκεται η δυνατότητα προσομοίωσης μιας πραγματικής, συνεχούς κατασκευής, χωρίς φυσικούς διαχωρισμούς, με τεχνητά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε έναν πεπερασμένο αριθμό κόμβων.

Τα τεχνητά αυτά στοιχεία, ή *πεπερασμένα στοιχεία*, είναι συνήθως τετράπλευρα ή τριγωνικά με τους κόμβους να καταλαμβάνουν τις θέσεις των άκρων. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται, επομένως, ένας πεπερασμένος αριθμός διακριτών μεταβλητών επι των οποίων είναι εφικτό να εφαρμοσθούν μητρωικές μέθοδοι. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και, σε ορισμένες περιπτώσεις, και οι παράγωγοί τους.

Στην τελευταία αυτή περίπτωση κάνουμε λόγο για **βαθμούς ελευθερίας αντί για μετατοπίσεις κόμβων**. Έτσι, οι μόνοι άγνωστοι είναι οι μετατοπίσεις στους κόμβους, άρα και το πρόβλημα μετασχηματίζεται από συνεχές σε διακριτό εκφραζόμενο ως ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων οι οποίες επιλύονται με μητρωικές μεθόδους.

Ωστόσο, μια διακριτή προσομοίωση δεν μπορεί να αποδώσει πάντοτε και με απόλυτη ακρίβεια την συμπεριφορά ενός συνεχούς μέσου, ανεξάρτητα από τον αριθμό των διακριτών μεταβλητών που εκάστοτε χρησιμοποιούνται. **Υπάρχει, δηλαδή, πάντοτε το περιθώριο σφάλματος**. Με την ορθή όμως επιλογή των ιδιοτήτων των στοιχείων και την κατάλληλη διακριτοποίηση το αριθμητικό

σφάλμα **μπορεί να περιορισθεί** και να χαρακτηριστεί ως αμελητέο και τοπικό.

Ο πλέον διαδεδομένος τρόπος για διατύπωσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για γραμμικά στατικά προβλήματα βασίζεται στη μέθοδο των μετατοπίσεων. Άλλοι τρόποι κάνουν χρήση της ισορροπίας δυνάμεων ή άλλων υβριδικών ή και μεικτών μεθόδων. Σε κάθε περίπτωση, όμως, αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων, η επίλυση των οποίων δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς.

Τα βασικά στάδια της μεθόδου είναι:

1. Η προσομοίωση (διακριτοποίηση) της κατασκευής με ένα σύνολο στοιχείων που συνδέονται με συνωριακούς κόμβους.
2. Ο προσδιορισμός των γενικευμένων (αγνώστων) μετατοπίσεων που θα καθορίσουν πλήρως την απόκριση της κατασκευής.
3. Η διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας που αντιστοιχούν στις άγνωστες κομβικές μετατοπίσεις και η επίλυσή τους.
4. Ο υπολογισμός των εσωτερικών κατανομών των τάσεων των στοιχείων για δεδομένες μετατοπίσεις στους κόμβους.
5. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης (μετατοπίσεις και τάσεις) με βάση τις δεδομένες παραδοχές του προβλήματος.

Οι αυξημένες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος αποτελούσαν για χρόνια το μεγάλο μειονέκτημα της εν λόγω μεθόδου ιδίως όταν εφαρμοζόταν σε σύνθετα μοντέλα. Το μειονέκτημα όμως αυτό αμβλύνθηκε χάρη στη ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστικών μηχανών και των συστημάτων CAD (*Computer Aided Design*).

Σήμερα, εναλλακτικά μοντέλα μπορούν να ελεγχθούν σε ψηφιακό περιβάλλον πολύ πριν την κατασκευή του πρωτοτύπου εκμηδενίζοντας ουσιαστικά το περιθώριο αυτού που παραπάνω κατονομάστηκε ως *σφάλμα*.

4.3 Το πρόγραμμα Comsol Multiphysics 5.0

Το **Comsol Multiphysics** είναι ένα πανίσχυρο διαδραστικό περιβάλλον για τη **μοντελοποίηση και την επίλυση επιστημονικών και τεχνικών προβλημάτων** που περιγράφονται από *μερικές διαφορικές εξισώσεις* (ΜΔΕ κ.εξ.), οι οποίες, ως γνωστόν, αποτελούν τη βάση για τη μοντελοποίηση ενός ευρέος φάσματος φαινομένων στις επιστήμες της φυσικής και της μηχανικής.

Κάτα την επίλυση των ΜΔΕ το Comsol Multiphysics (CM κ.εξ.) χρησιμοποιεί την ιδιαίτερα αποτελεσματική *Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων* για την οποία λόγος έγινε παραπάνω. Εδώ θυμίζουμε απλώς πως η ανάγκη επίλυσης σύνθετων προβλημάτων οδήγησε στην ανάπτυξη προσεγγιστικών μεθόδων όπως η ΜΠΣ.

Το μειονέκτημα, ωστόσο, που η συγκεκριμένη μέθοδος έχει είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ. Λύση στο πρόβλημα αυτό ήρθε να δώσει η αξιοσημείωτη ανάπτυξη των υπολογιστικών μηχανών και λογισμικών συστημάτων όπως το CM.

Το Comsol και ειδικά στην έκδοση 5.0, περιλαμβάνει επιπλέον μεγάλου εύρους φυσικών προβλημάτων. Μερικοί από αυτούς αφορούν :

- Μηχανική των Στερεών
- Ηλεκτρισμού
- Χημείας
- Ακουστικής
- Λεπτών Φίλμ
- Πιεζοηλεκτρισμού
- Μοριακής ροής
- Ροής Ρευστών

Η σημασία του μεγάλου εύρους των επιλυτών έγκειται στο γεγονός ότι το σύνολο των ζητούμενων εξισώσεων που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος, είναι προκαθορισμένο από πριν και δεν χρειάζεται ο χρήστης να περιγράψει ο ίδιος τις εξισώσεις. Καινοτομίες υπάρχουν επίσης και στην σχεδίαση των προς ανάλυση μοντέλων, χωρίς ωστόσο να μπορεί άμεσα να ανταγωνιστεί στην λεπτομέρεια και την ακρίβεια προς το παρών τα σύγχρονα CAD λογισμικά.

Η εφαρμογή της ΜΠΣ απαιτεί πια τα ακόλουθα στάδια:

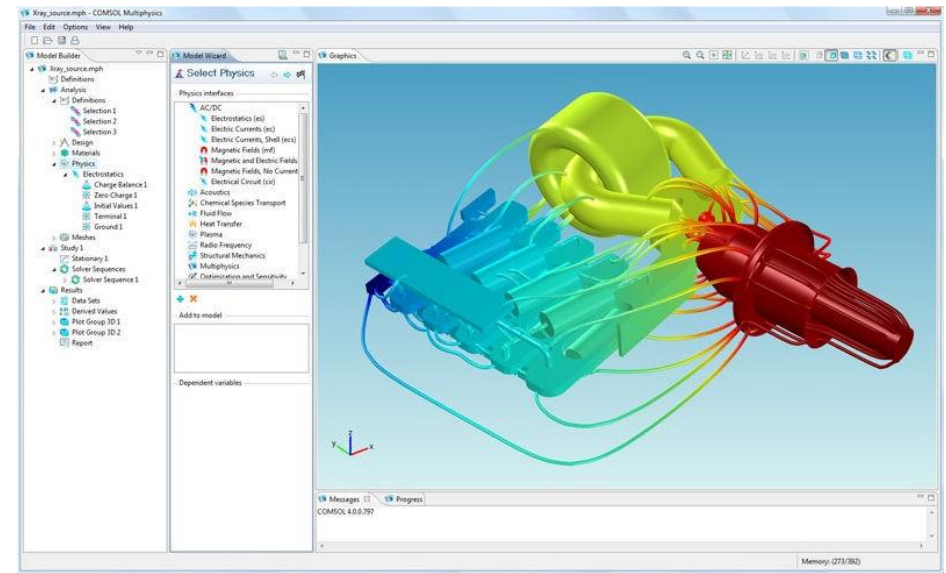
- Εισάγεται η γεωμετρία της υπο μελέτης κατασκευής σε ένα πρόγραμμα, όπως το CM και δημιουργείται ένα τρισδιάστατο μοντέλο αυτής.
- Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία, δημιουργείται το πλέγμα, επιλέγεται ο τρόπος επίλυσης και εισάγονται τα πρόσθετα δεδομένα που απαιτούνται.

- Τα προς επίλυση δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα επίλυσης του προβλήματος.
- Μετά την επίλυση, χρησιμοποιείται ένα πρόγραμμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων και ανάγνωσής τους από τον μελετητή.

Σημαντικό πλεονέκτημα του CM είναι η δυνατότητα αλληλεπίδρασής του με το Matlab, γεγονός που επιτρέπει την αποθήκευση ενός υπολογιστικού μοντέλου με τη μορφή κώδικα. Στον κώδικα αυτόν ο σχεδιαστής είναι σε θέση να επέμβει επιφέροντας τις αλλαγές και τις τροποποιήσεις που κρίνει αναγκαίες.

Ένα άλλο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του λογισμικού αυτού είναι *extended Multiphysics*, δηλαδή ο συνδυασμός των μεταβλητών για να συνδέσει μοντέλα μερικώς διαφορικών εξισώσεων σε διάφορες γεωμετρίες – ένα βήμα σημαντικό προς τη μοντελοποίηση σε επίπεδο συστήματος.

Τέλος, ένα εξίσου αξιόλογο χαρακτηριστικό του CM είναι η ικανότητα να συνδυάζει τομείς διαφορετικών χωρικών διαστάσεων στο ίδιο πρόβλημα. Αυτή η ευελιξία όχι μόνο απλοποιεί την μοντελοποίηση αλλά μειώνει και τον χρόνο εκτέλεσης.



Εικόνα 4.2.1 Γραφικό περιβάλλον στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ΤΑ ΣΤΑΔΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟ COMSOL MULTIPHYSICS 5.0

5.1 Κριτήριο διαρροής von mises

Ο κύριος σκοπός της προσομοίωσης είναι ο προσδιορισμός του πότε και που, θα αστοχήσει ένα υλικό, κατασκευή. Θεωρίες αστοχίας υλικών δεν θα αναπτυχθούν εδώ, αλλά αναφέρουμε απλώς ότι, τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα κριτήρια αστοχίας είναι, για τα όλκιμα υλικά, αυτό του Von Mises. Στο πρόγραμμα του COMSOL υπάρχει η δυνατότητα του υπολογισμού αυτών των τάσεων. Πιο συγκεκριμένα τα σημεία όπου καταπονούνται περισσότερο από τάσεις θα είναι ευδιάκριτα στο τρισδιάστατο μοντέλο καθώς θα υπάρχει διαφορετικός χρωματισμός σε αυτά

5.2 Δυναμικό πρόβλημα

Οι δυναμικές αναλύσεις είναι συχνά πιο σύνθετες και περίπλοκες από τις αντίστοιχες στατικές, κυρίως λόγω του ότι τα φορτία είναι συναρτήσεις και του χρόνου σε τέτοιου είδους προβλήματα. Δυναμικό φορτίο είναι κάθε φορτίο του οποίου το μέτρο, η διεύθυνση και η θέση μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου. Επίσης, η απόκριση της κατασκευής σε κάθε δυναμικό φορτίο, δηλαδή οι τάσεις και οι μετακινήσεις που αναπτύσσονται σε κάθε σημείο του δομήματος είναι χρονομεταβλητές. Λόγω των παραπάνω, ένα δυναμικό πρόβλημα δεν έχει μια μοναδική λύση, όπως έχει το αντίστοιχο στατικό. Μια επαλληλία λύσεων ενός δυναμικού προβλήματος πρέπει να είναι εδραιωμένη και να

ανταποκρίνεται σε ολόκληρη την χρονική διάρκεια της χρόνο-ιστορίας των δράσεων.

Η Δυναμική ανάλυση συνυπολογίζει τις επιδράσεις των αδρανειακών δυνάμεων, καθώς και της απόσβεσης της ελαστικής δύναμη αντίστασης. Οι αδρανειακές δυνάμεις αντιτίθενται στις επιταχύνσεις της κατασκευής. Εάν ένα δυναμικό φορτίο εφαρμόζεται σε μια κατασκευή, η προκύπτουσα απόκριση εξαρτάται όχι μόνο από το φορτίο, αλλά και από τις αδρανειακές δυνάμεις. Κατά συνέπεια, η αντίστοιχη εσωτερική απάντηση του δομήματος πρέπει να συνυπολογίζει, όχι μόνο τις εξωτερικές, αλλά και τις αδρανειακές δυνάμεις που είναι αποτέλεσμα των επιταχύνσεων της κατασκευής.

Εάν οι αδρανειακές δυνάμεις αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό μέρος του συνολικού φορτίου, ο δυναμικός χαρακτήρας του προβλήματος πρέπει να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς. Εάν οι αδρανειακές δυνάμεις είναι αμελητέα ποσότητα, μπορεί να θεωρηθεί καλύτερη η στατική ανάλυση του προβλήματος, ακόμα κι αν το φορτίο και η διεύθυνση του, μπορεί να είναι συναρτήσει του χρόνου.

Ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης

Σχεδόν όλα τα σώματα τείνουν να δονούνται κατά κύριο λόγο σε συγκεκριμένες συχνότητες όταν τα διαταράσσουμε ξαφνικά. Οι συχνότητες αυτές καλούνται φυσικές συχνότητες ή ιδιοσυχνότητες των συγκεκριμένων αντικειμένων, συμβολίζονται με το γράμμα (ω) και έχουν διαστάσεις rad/sec ή sec-1. Είναι μέγεθος που εξαρτάται από την μάζα και την δυσκαμψία του συστήματος και αποτελεί ίδιο δυναμικό χαρακτηριστικό μέγεθος του συστήματος.

Ο χρόνος που απαιτείται για να εκτελέσει μία πλήρη ταλάντωση το σύστημα ονομάζεται ιδιοπερίοδος του συστήματος και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T=2\pi/\omega$$

Το αντίστροφο της περιόδου εκφράζει τον αριθμό των πλήρων ταλαντώσεων στη μονάδα του χρόνου και ονομάζεται συχνότητα του συστήματος και εκφράζεται σε Hertz (sec-1).

$$F=1/T$$

Η στατική ανάλυση ισχύει όταν τα φορτία εφαρμόζονται αργά. Όταν τα φορτία εφαρμόζονται απότομα, ή όταν είναι μεταβλητά, εισάγεται στο πρόβλημα η επίδραση της μάζας και της επιτάχυνσης. Ένα στερεό σώμα, όπως μια μηχανική κατασκευή, το οποίο παραμορφώνεται ελαστικά και απελευθερώνεται απότομα, τείνει να δονείται γύρω από τη θέση ισορροπίας. Αυτή η περιοδική κίνηση, η οποία οφείλεται στην αποκατάσταση της ενέργειας παραμόρφωσης, ονομάζεται ελεύθερη ταλάντωση. Ο αριθμός των κύκλων ανά μονάδα χρόνου ονομάζεται συχνότητα. Η μέγιστη μετατόπιση από τη θέση ισορροπίας ονομάζεται πλάτος. Πρακτικά, οι ταλαντώσεις ελαττώνονται με το χρόνο λόγω της απόσβεσης. Στο απλούστερο μοντέλο ταλάντωσης, αγνοούμε τις επιδράσεις της απόσβεσης. Το μοντέλο μη αποσβεσμένης ελεύθερης ταλάντωσης μιας κατασκευής δίνει σημαντικές πληροφορίες για τη δυναμική συμπεριφορά του.

5.3 Στάδια προσομοίωσης

Τα βήματα τα οποία ακολουθήθηκαν για την πραγματοποίηση της ανάλυσης είναι:

1. Καθορισμός περιβάλλοντος
2. Προσδιορισμός τύπου ανάλυσης
3. Εισαγωγή του μοντέλου
4. Προσδιορισμός υλικών, των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς του μοντέλου
5. Πλεγματοποίηση (Meshing)
6. Επίλυση
7. Συλλογή αποτελεσμάτων

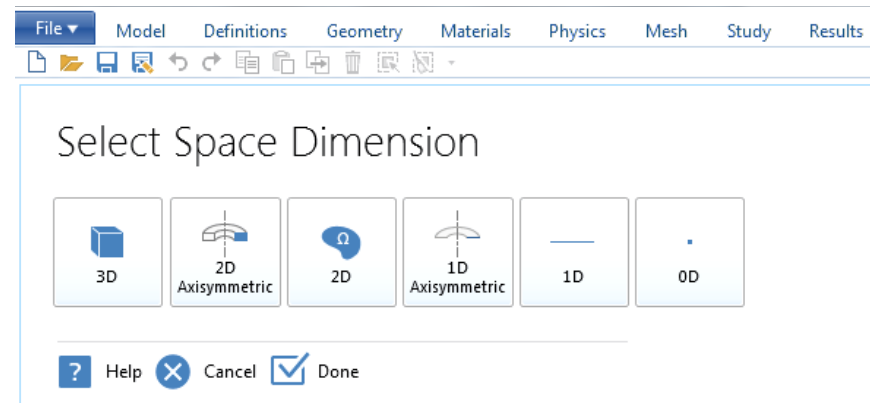
Για καθένα από τα παραπάνω στάδια ακολουθεί μια μικρή περιγραφή, δίνοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα για τον τρόπο που λειτουργεί το συγκεκριμένο πρόγραμμα.

1. Καθορισμός περιβάλλοντος

Με την εκκίνηση του προγράμματος Comsol, ανοίγει το αρχικό περιβάλλον του και οι πρώτες επιλογές που εμφανίζονται είναι σε

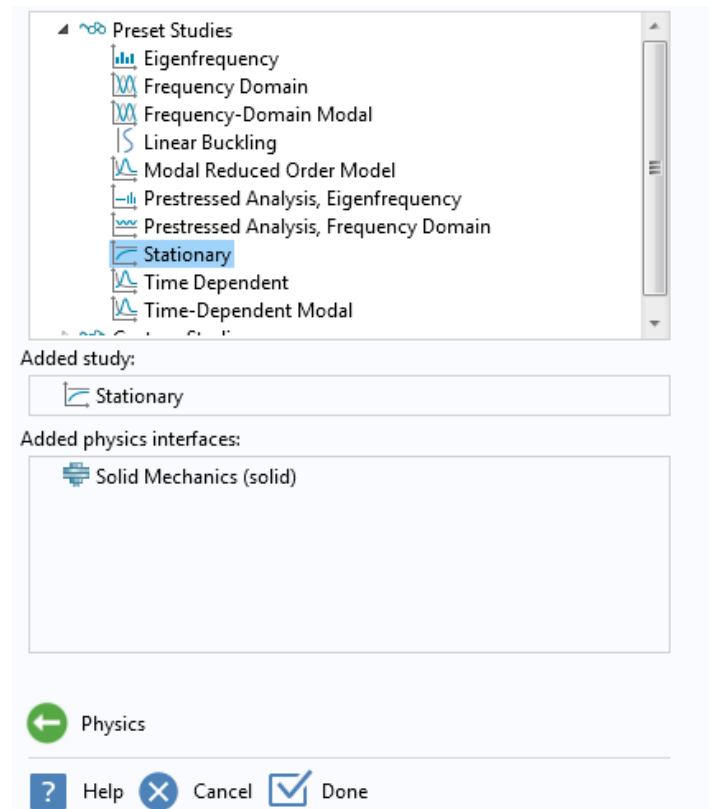
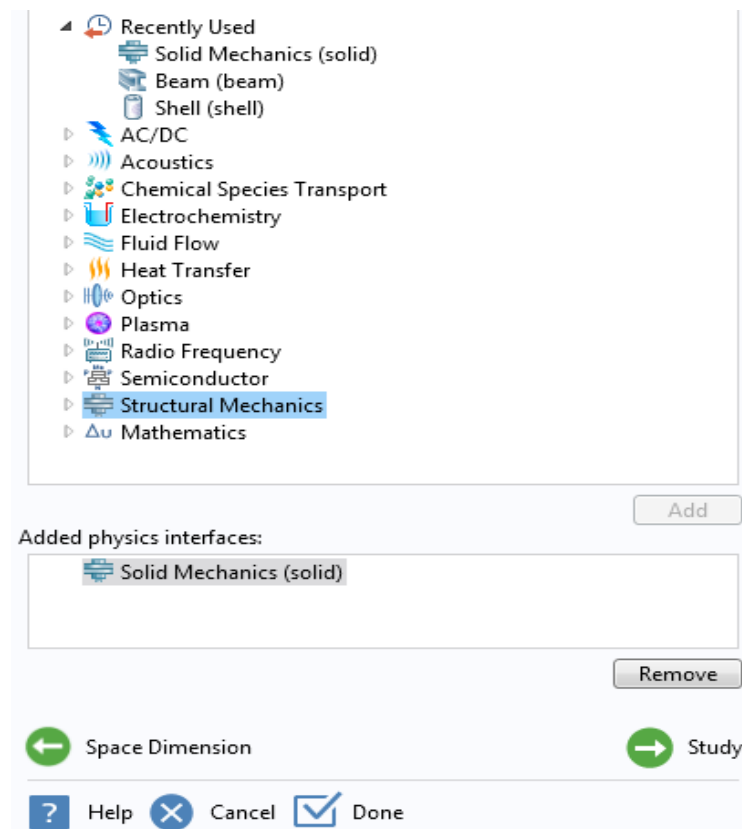
πιο περιβάλλον ορίζεται για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση. Οι επιλογές μπορεί να είναι σε τρισδιάστατο περιβάλλον σε δισδιάστατο αξονοσυμμετρικό, σε δισδιάστατο, σε μονοδιάστατο αξονοσυμμετρικό και σε μονοδιάστατο.

Το περιβάλλον που μας αφορά είναι το τρισδιάστατο οπότε και γίνεται η επιλογή.



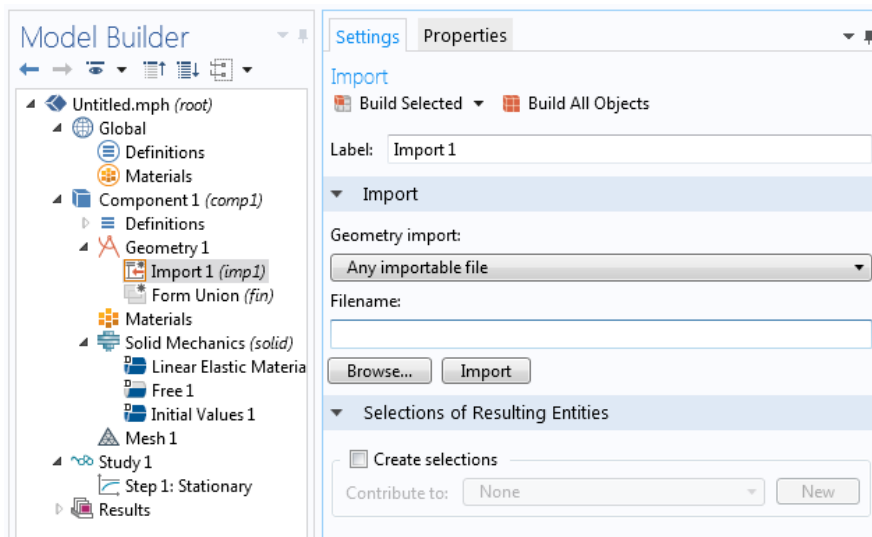
2. Προσδιορισμός τύπου ανάλυσης

Στην συνέχεια ζητείται από το πρόγραμμα να επιλεγεί ο τύπος της ανάλυσης. Υπάρχουν πολλές κατηγορίες ανάλυσης, για τις οποίες έγινε λόγος στην εισαγωγή. Ωστόσο η ανάλυση που πρόκειται εμείς να πραγματοποιήσουμε είναι η στατική. Επιλέγουμε κατ επέκταση την επιλογή Structural Mechanics και στην συνέχεια την στατική ανάλυση που είναι και το αντικείμενο της εργασίας για αρχή (Stationary)



3. Εισαγωγή του μοντέλου

Αφού έχει προετοιμαστεί το μοντέλο προς επεξεργασία στο περιβάλλον του AutoCad, το επόμενο στάδιο είναι η εισαγωγή του στο Comsol. Δίνεται επίσης η επιλογή να σχεδιαστεί η διάταξη στο περιβάλλον του Comsol. Ωστόσο αυτό αποτελεί ένα υποτυπώδες σχεδιαστικό περιβάλλον, ακατάλληλο για τη σχεδίαση περίπλοκων διατάξεων. Για το λόγο αυτό έγινε και η χρήση του προγράμματος του AutoCad. Από το Model Builder, το δέντρο πάνω στο οποίο γίνονται όλες οι επιλογές της διάταξης, πηγαίνουμε στον κόμβο της γεωμετρίας (Geometry) για να προχωρήσουμε στην συνέχεια στην εισαγωγή του σχεδίου.



4. Προσδιορισμός υλικών, των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς του Μοντέλου

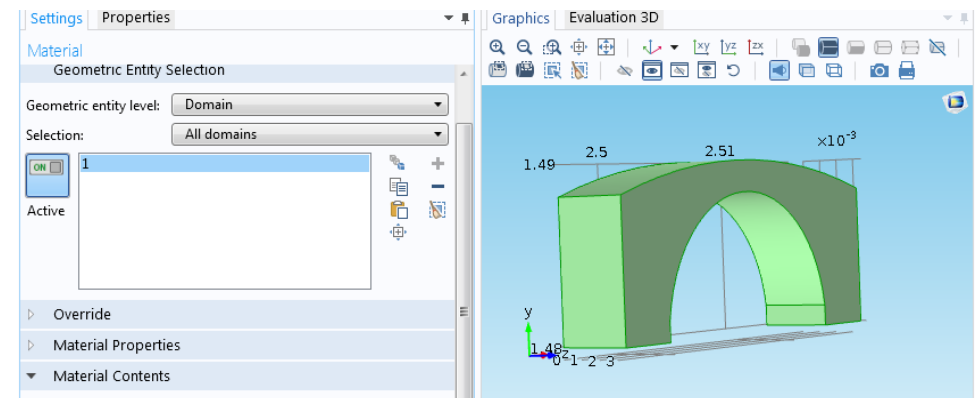
Το αμέσως επόμενο βήμα περιλαμβάνει την επιλογή του υλικού της διάταξης. Το πρόγραμμα Comsol Multiphysics διαθέτει μια πλούσια βιβλιοθήκη με υλικά όλων πολλών ειδών, μέσα από την οποία μπορούμε να επιλέξουμε το υλικό που μας ενδιαφέρει.

Το υλικό που θα εισάγουμε είναι ο ασβεστόλιθος με της εξής μηχανικές ιδιότητες

Property	Name	Value	Unit
✓ Young's modulus	E	25e9[Pa]	Pa
✓ Poisson's ratio	nu	0.2	1
✓ Density	rho	2200[kg/...]	kg/m ³
TD	TD	TD(T[1/K...]	m ² /s

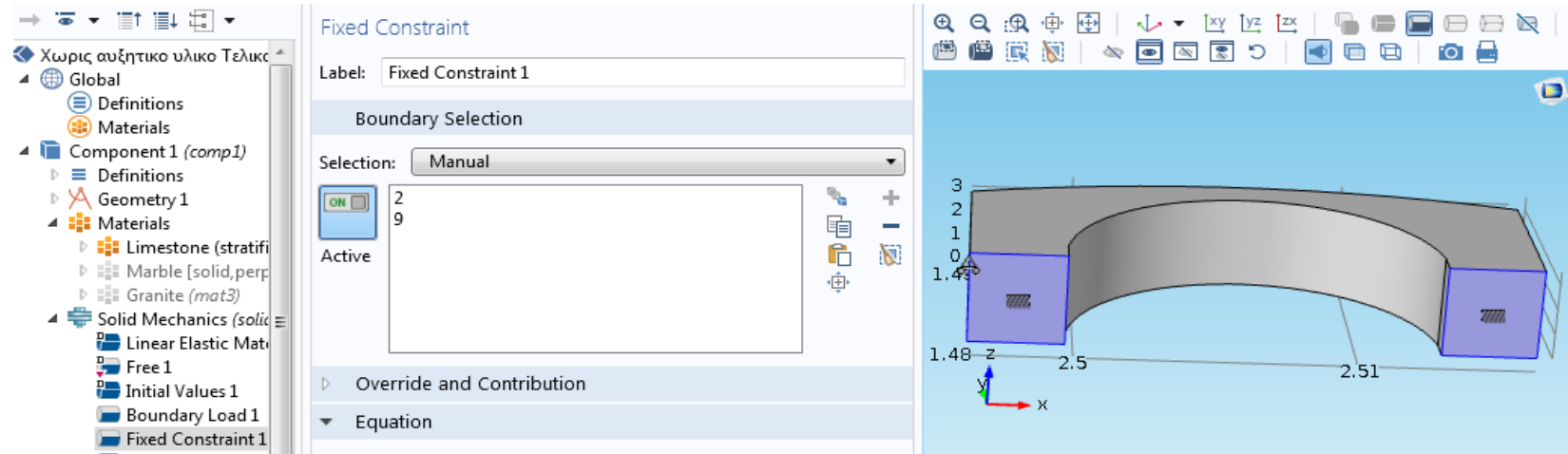
Οπότε από το δέντρο μοντελοποίησης του προγράμματος εισάγουμε στην διάταξη το συγκεκριμένο είδος υλικού και μετά το εισάγουμε σε όλη τη διάταξη

Add to component

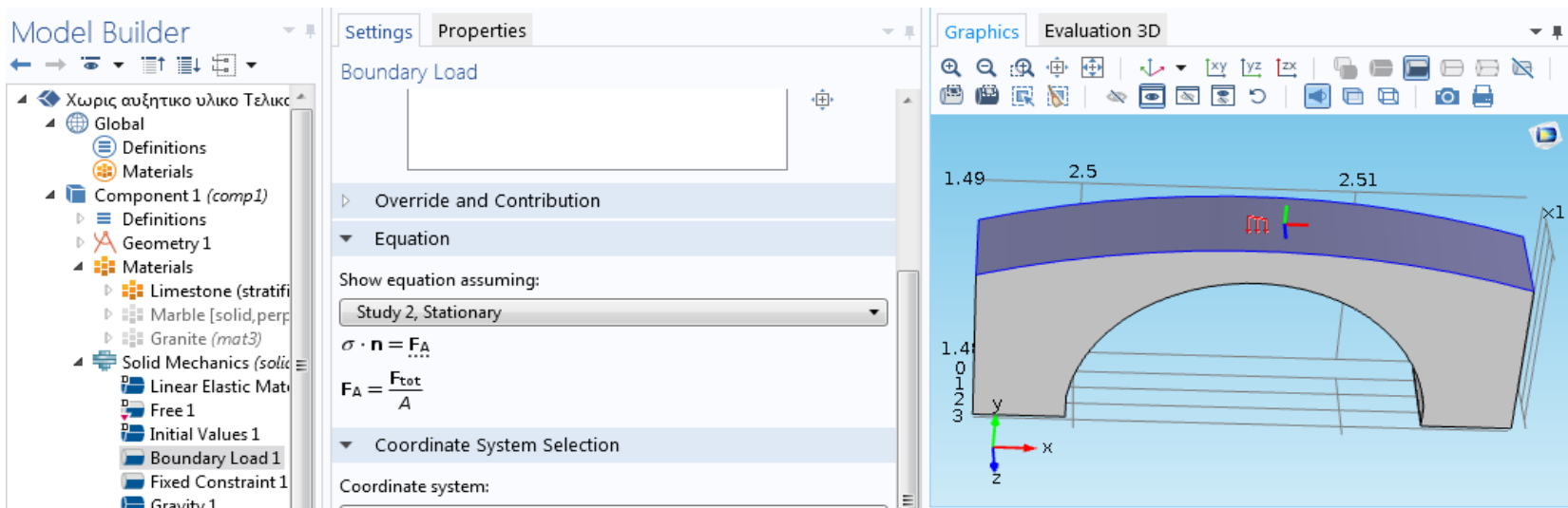


Στο ίδιο στάδιο πρέπει επίσης να οριστούν οι μηχανικές οριακές συνθήκες. η επεξεργασία γίνεται στο μοντέλο με πάκτωση στα πέδιλα του. Οπότε από το δέντρο μοντελοποίησης του προγράμματος, εισάγουμε την κατάλληλη εντολή. Επίσης πρέπει να βάλουμε και πάκτωση στις δύο πλευρές που ακουμπούν στα πλάγια. Παράλληλα πρέπει να ορίσουμε το φορτίο που του ασκείται που είναι κατ' εκτίμηση μία λωρίδα γεμάτη αυτοκίνητα μέσω της εντολής boundary load .Και με την εντολή gravity το ίδιο βάρος .

Εντολή Fixed Constraint (πάκτωση)



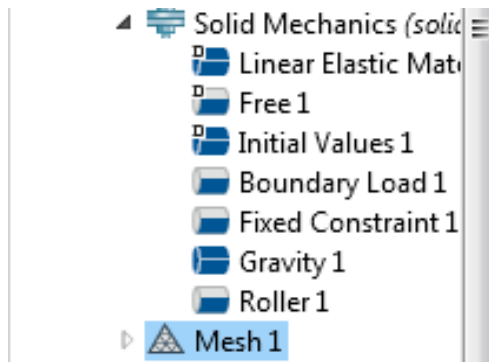
Εντολή Boundary Load (εφαρμογή φορτίου στον φορέα)



5. Πλεγματοποίηση (Meshing)

Στο στάδιο αυτό το πρόγραμμα δημιουργεί αυτόματα τα στοιχεία του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των συναρτήσεων που χρησιμοποιεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για να παράγει τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

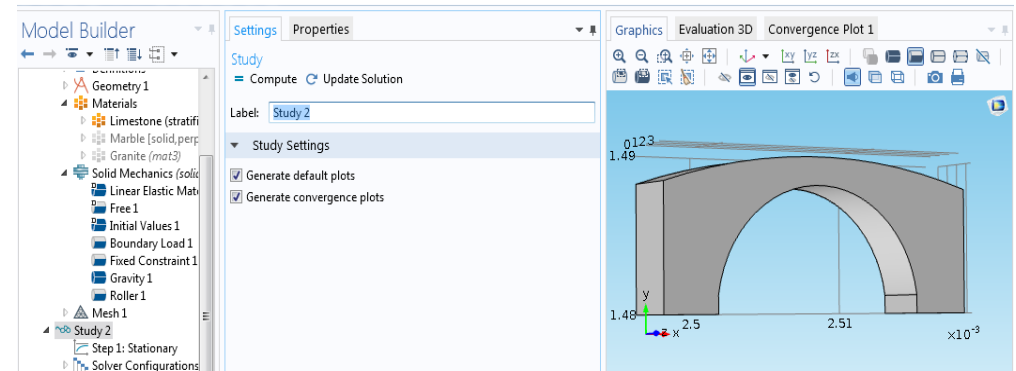
Για κάθε μοντέλο που εισάγεται στο Comsol, πραγματοποιείται πλεγματοποίηση, των οποίων τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο. Από το πρόγραμμα πατάμε την επιλογή mesh για να προχωρήσουμε στην δημιουργία του πλέγματος.



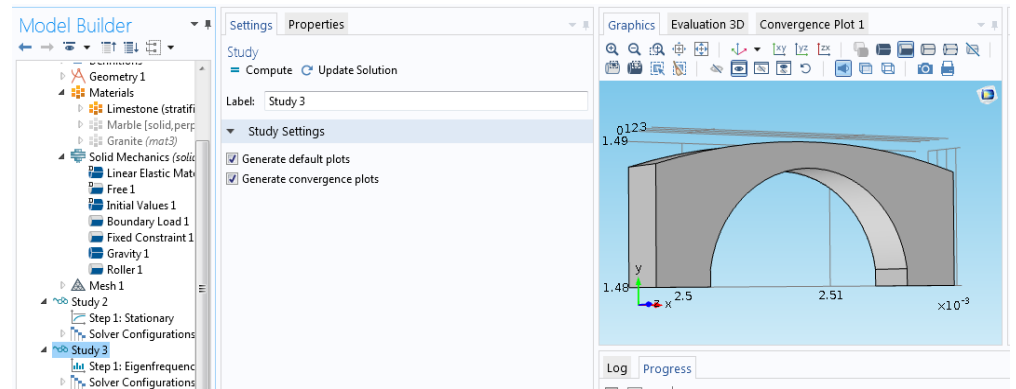
6. Επίλυση

Αφού έχει ολοκληρωθεί η ρύθμιση των παραμέτρων, το επόμενο στάδιο είναι η επίλυση του προβλήματος από το πρόγραμμα. Αυτό πρέπει να κάνουμε είναι να προχωρήσουμε στην επίλυση μέσω της επιλογής Study που μας δίνεται από το δέντρο μοντελοποίησης του προγράμματος.

Επίλυση για την στατική ανάλυση



Επίλυση για την ιδιομορφική ανάλυση



7. Συλλογή αποτελεσμάτων

Αφού το πρόγραμμα τελικά επιλύσει το πρόβλημα, μας δίνεται η δυνατότητα να κάνουμε την συλλογή των αποτελεσμάτων. Από το δέντρο μοντελοποίησης του προγράμματος μπορούμε να αναζητήσουμε τις τιμές που μας ενδιαφέρει. Οι δυνατότητες επεξεργασίας των αποτελεσμάτων είναι πάρα πολλές.

Μπορούμε να επεξεργαστούμε τρισδιάστατες εικόνες των αποτελεσμάτων, να τις μετατρέψουμε σε δισδιάστατη μορφή, όπως και να δημιουργήσουμε διαγράμματα από τις τιμές των αποτελεσμάτων.

****Αυτη την διαδικασία ακολουθήσαμε για την στατική και την ιδιομορφική ανάλυση του μοντέλου 1 ,ακριβώς την ίδια ακολουθούμε για την στατική και δυναμική ανάλυση του μοντέλου 2 το οποίο είναι με την χρήση του αυξητικού υλικού .Τα αποτελέσματα αυτών των δύο μοντέλων και των αναλύσεων τους θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας .***

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ 2 ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Στο 5ο κεφάλαιο παρουσιάσαμε τα στάδια μοντελοποίησης της στατικής και ιδιομορφικής ανάλυσης της λίθινης γέφυρας που σχεδιάσαμε, στο πρόγραμμα Comsol Multiphysics 5.0 . Είχαμε δύο μοντέλα τα οποία αναλύσαμε ,το 1ο μοντέλο ήταν η λίθινη γέφυρα και το 2ο μοντέλο ήταν η λίθινη γέφυρα με την προσθήκη ενός αυξητικού υλικού στα πέδιλα της.

Στο παρών κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα που προήλθαν απο τις μελέτες που πραγματοποιήσαμε για τα δύο μοντέλα.Τα αποτελέσματα αυτά θα παρουσιαστούν με την μορφή εικονικών 3D τα οποία θα μας επεικονίζουν στην κάθε περίπτωση της παραμορφώσεις που θα υπάρχουν στο κάθε μοντέλο .

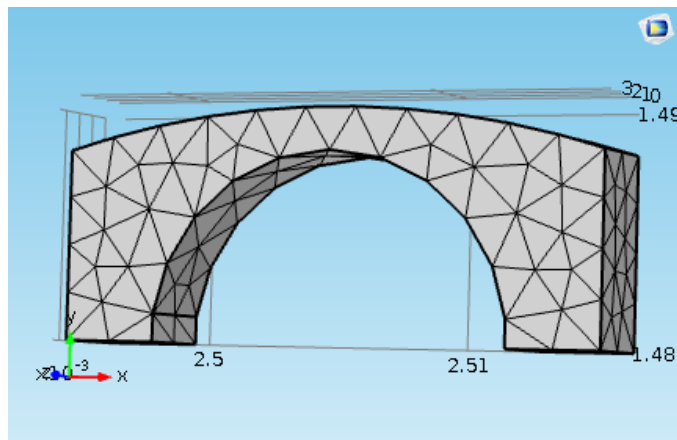
Ταυτόχρονα με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα παραθέσουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα των δύο μοντέλων με σκοπό την πιο εύκολη σύγκριση τους .

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, για να εφαρμόσει το Comsol Multiphysics την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στο υπό μελέτη μοντέλο και να επιλύσει το πρόβλημα, είναι απαραίτητη η πλεγματοποίηση.

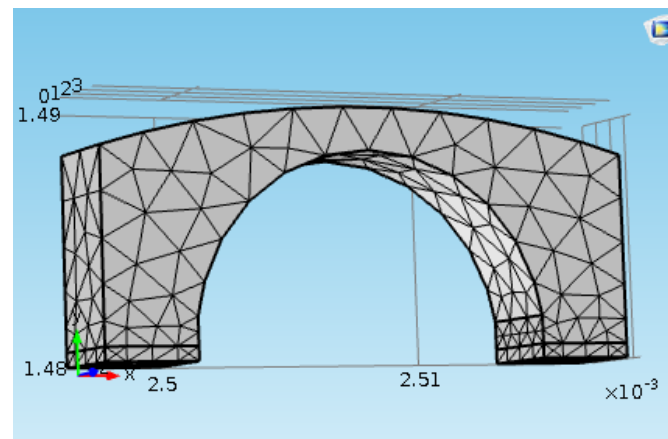
Στο σύνολο της μελέτης πραγματοποιήθηκε πλεγματοποίηση σε ένα μόνο επίπεδο, καθώς η δεύτερη πλεγματοποίηση θα αύξανε σε σημαντικό βαθμό τον υπολογιστικό φόρτο έτσι ώστε η επίλυση από ένα κοινό υπολογιστή θα γινότανε χρονοβόρα έως και αδύνατη. Τα αποτελέσματα της πλεγματοποίησης του συγκεκριμένου μοντέλου δίνονται στο πίνακα.

Αποτελέσματα της πλεγματοποίησης των δυο μοντέλων

Statistics	
Complete mesh	
Element type:	All elements
Tetrahedral elements:	520
Triangular elements:	322
Edge elements:	86
Vertex elements:	16
— Domain element statistics —	
Number of elements:	520
Minimum element quality:	0.2731
Average element quality:	0.7323
Element volume ratio:	0.1661
Mesh volume:	$2.963\text{E-}7 \text{ m}^3$
Maximum growth rate:	2.186
Average growth rate:	1.73



Statistics	
Complete mesh	
Element type:	All elements
Tetrahedral elements:	1163
Triangular elements:	670
Edge elements:	156
Vertex elements:	24
— Domain element statistics —	
Number of elements:	1163
Minimum element quality:	0.0902
Average element quality:	0.6396
Element volume ratio:	0.006406
Mesh volume:	$3.08\text{E-}7 \text{ m}^3$
Maximum growth rate:	3.15
Average growth rate:	1.75



Απο μία πρώτη εικόνα γίνεται ξεκάθαρο απο τα στατιστικά της διακριτοποίησης ότι το δεύτερο μοντέλο είναι αρκετά πιο σύνθετο μοντέλο. Αυτή την επιπλέον πολυπλοκότητα του την προσδίδει η χρήση του αυξητικού υλικού.

Αφού πραγματοποιηθεί η στατική και δυναμική ανάλυση, προσφέρεται η δυνατότητα να καταγραφούν τόσο αριθμητικά όσο και παραστατικά τα αποτελέσματα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τάσεις Von Mises που αναπτύσσονται και οι ιδιοσυχνότητες- ιδιομορφές, σε εικόνες που προσφέρονται από το πρόγραμμα.

Με τα συγκεκριμένα αποτελέσματα δίνεται μια πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς του μοντέλου, καθώς παρατηρώντας τα, μπορούμε να δούμε από το χρώμα την τιμή κάθε μεταβλητής στα διάφορα σημεία του.

Παρακάτω λοιπόν, θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τα αποτελέσματα μας. Αρχικά θα κάνουμε μια απλή αναφορά στις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούμε με συνοπτικούς πίνακες για να είναι πιο εύκολη η ανάγνωση τους

Πρώτο μοντέλο [Λιθόκτιστη Γέφυρα]

Μηχανικές Ιδιότητες

ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	Μέτρο Ελαστικότητας[Pa]	Λόγος Poisson	Πυκνότητα [Kg/m ³]
Ασβεστόλιθος	25e9	0.2	2200

»	Property	Name	Value
✓	Young's modulus	E	25e9[Pa]
✓	Poisson's ratio	nu	0.2
✓	Density	rho	2200[kg/...

Δεύτερο μοντέλο [Λιθόκτιστη Γέφυρα με την χρήση αυξητικού υλικού]

Μηχανικές Ιδιότητες

ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	Μέτρο Ελαστικότητας[Pa]	Λόγος Poisson	Πυκνότητα [Kg/m ³]
Ασβεστόλιθος	25e9	0.2	2200
Αυξητικό υλικό	69e9	-0.9	2700

»	Property	Name	Value
✓	Young's modulus	E	69e9[Pa]
✓	Poisson's ratio	nu	-0.9
✓	Density	rho	2700[kg/...

Εισαγωγή στο Comsol Multiphysics 5.0

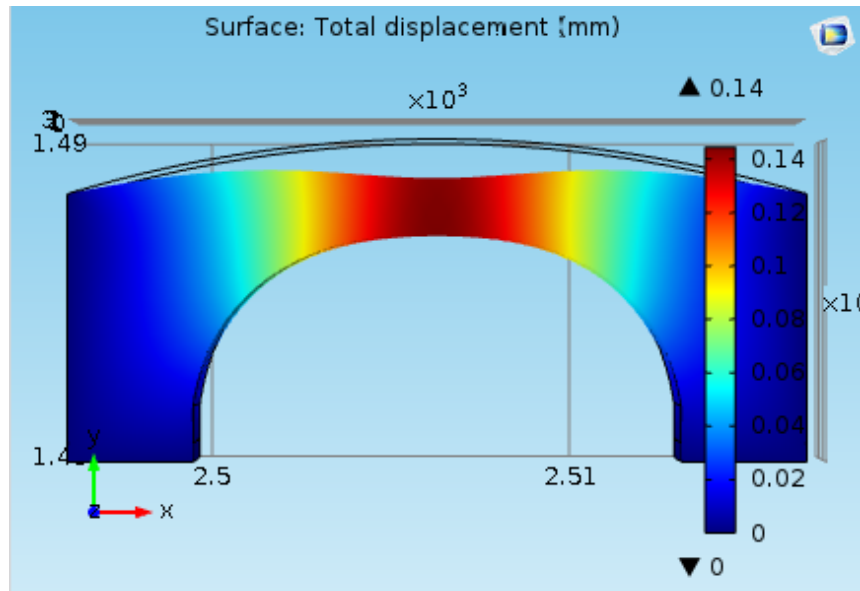
Η δομή παρουσίασης των αποτελεσμάτων θα γίνει με τον εξής τρόπο, αρχικά θα δείξουμε την στατική ανάλυση της γέφυρας δείχνοντας τις τάσεις von mises για το κάθε ένα μοντέλο και στη συνέχεια θα δείξουμε τις μετατοπίσεις που προκαλούνται από τις καταπονήσεις που ασκούνται στην γέφυρα.

Στην συνέχεια θα δείξουμε την ιδιομορφική ανάλυση για τα δύο μοντέλα. Πρώτα θα δείξουμε τις ιδιομορφές και στην συνέχεια τις τάσεις για την κάθε ιδιοσυχνότητα.

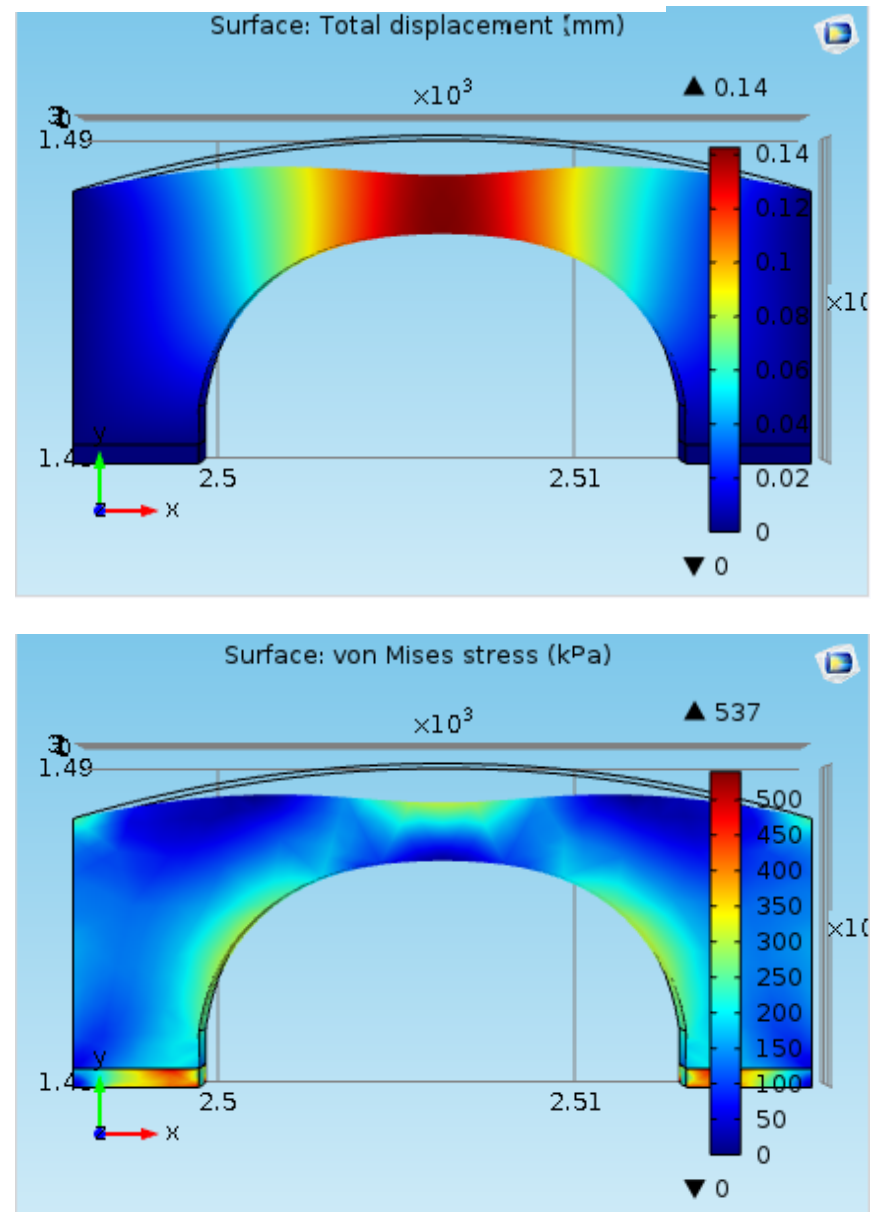
Στατική ανάλυση

Παρουσίαση των τάσεων Von Mises -Παραμορφώσεις

Μοντέλο 1



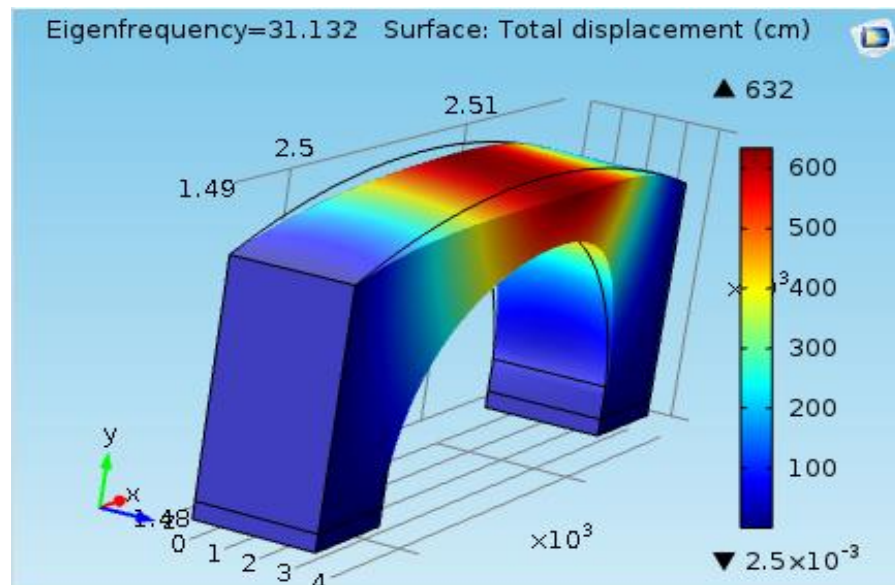
Μοντέλο 2



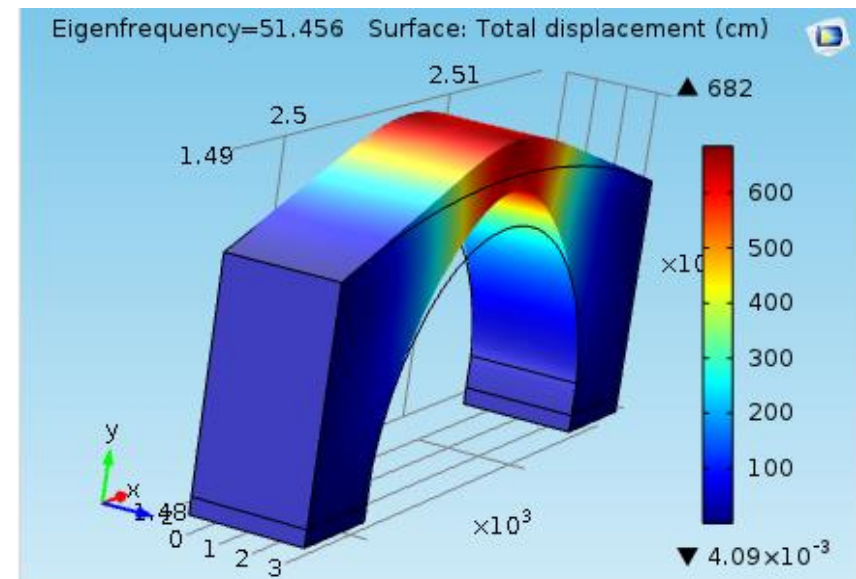
Ιδιομορφική ανάλυση

Παρουσίαση των ιδιομορφών

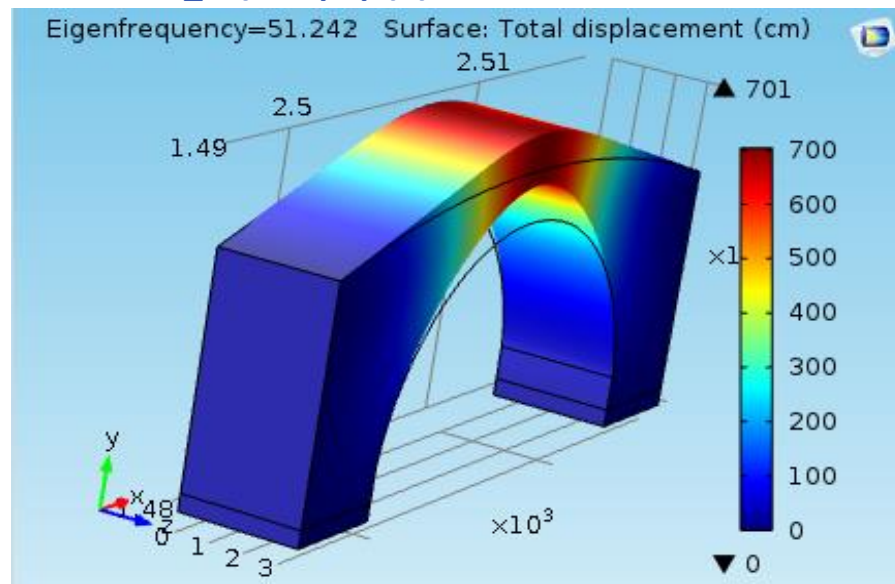
Μοντέλο 1_1η Ιδιομορφή



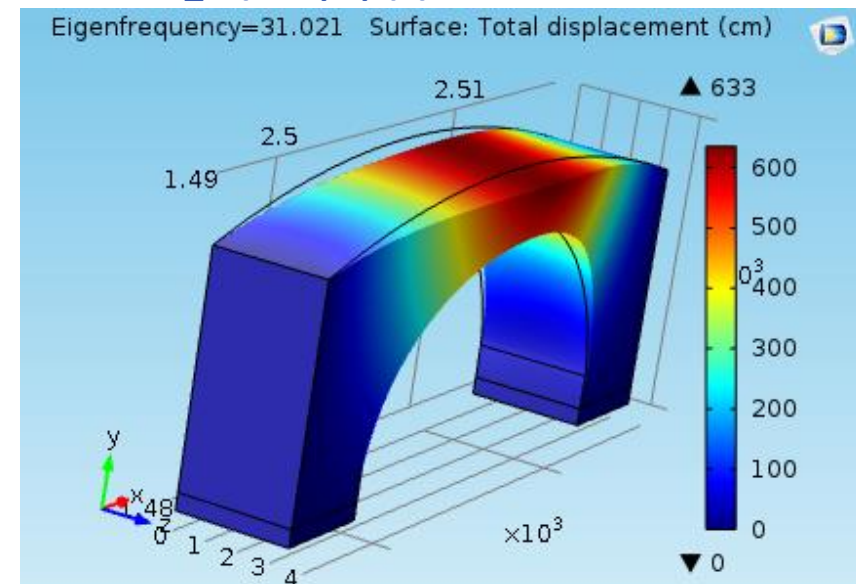
Μοντέλο 2_1η Ιδιομορφή



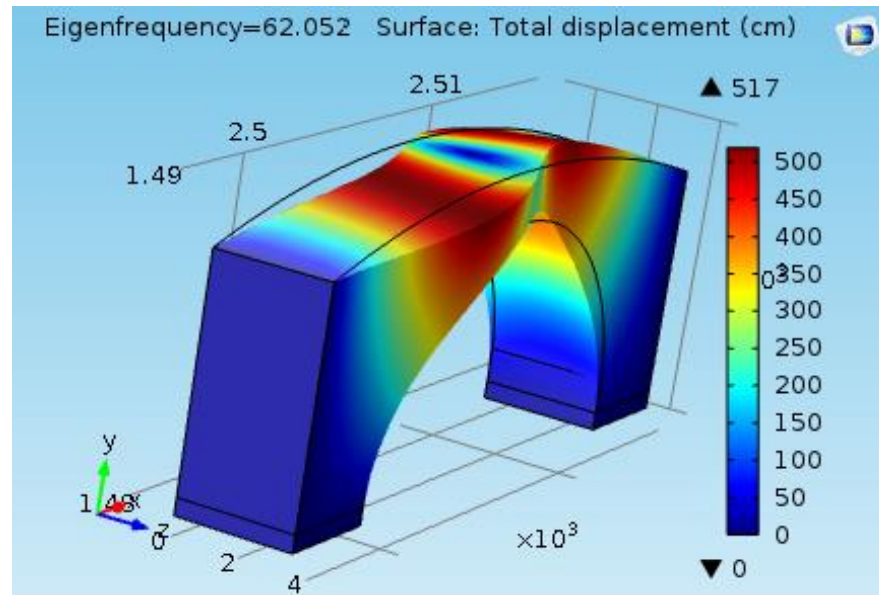
Μοντέλο 1_2η Ιδιομορφή



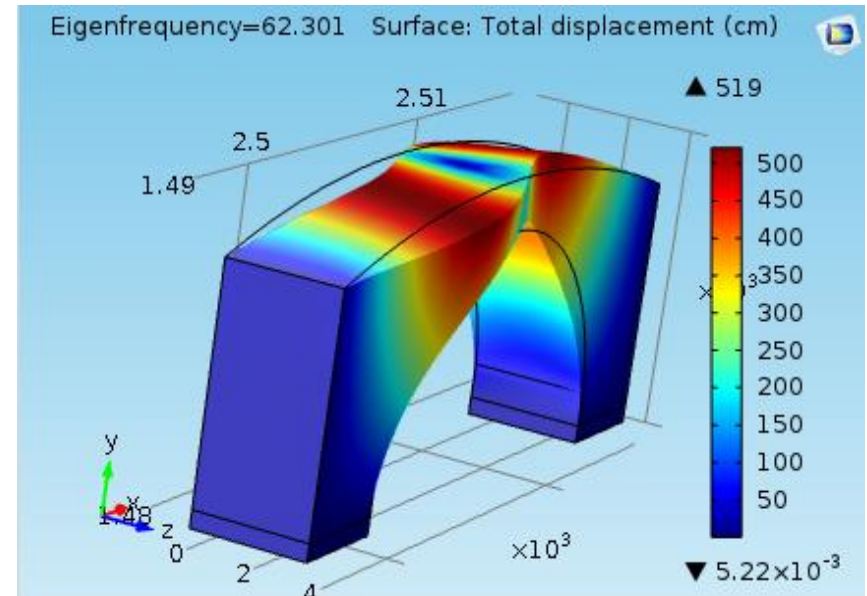
Μοντέλο 2_2η Ιδιομορφή



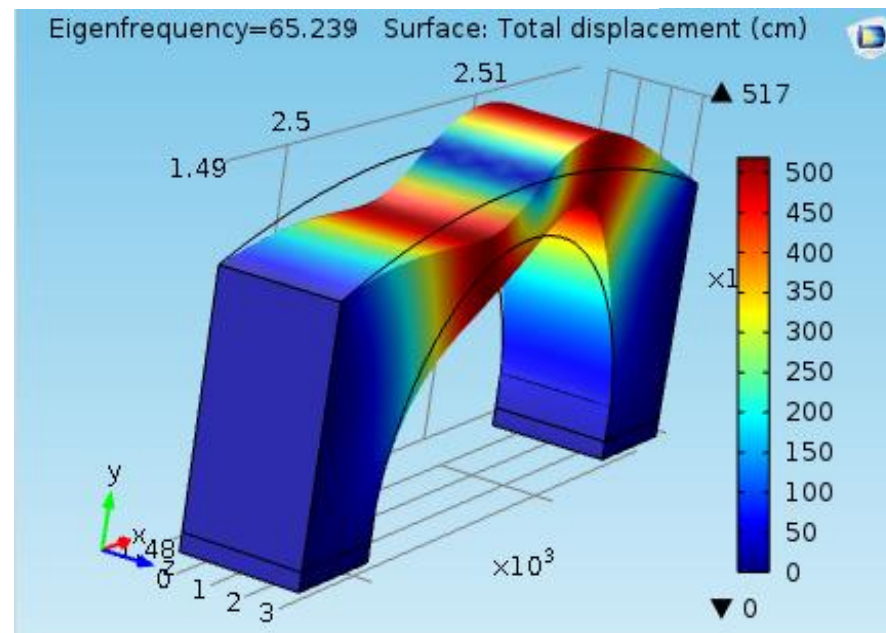
Μοντέλο 1_ 3η Ιδιομορφή



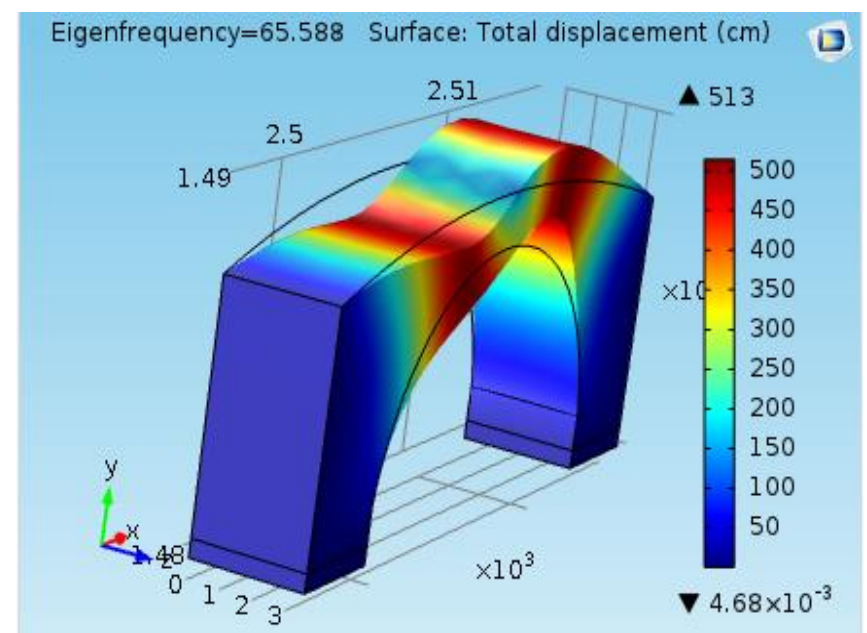
Μοντέλο 2_ 3η Ιδιομορφή



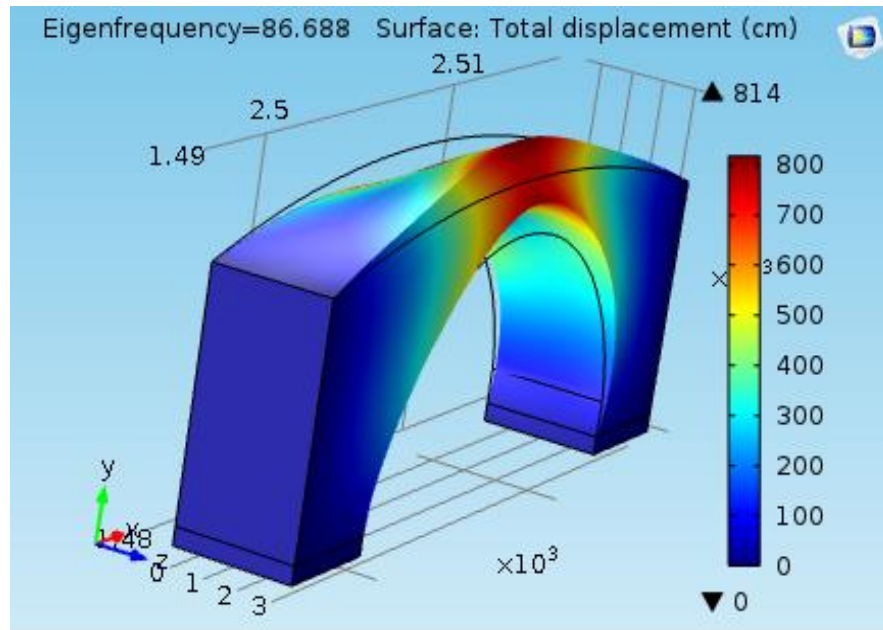
Μοντέλο 1_ 4η Ιδιομορφή



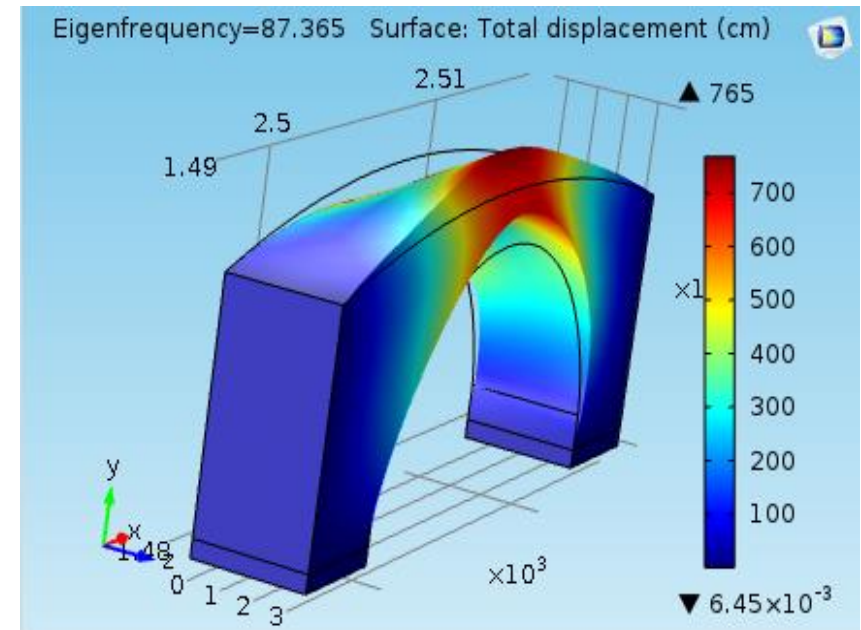
Μοντέλο 2_ 4η Ιδιομορφή



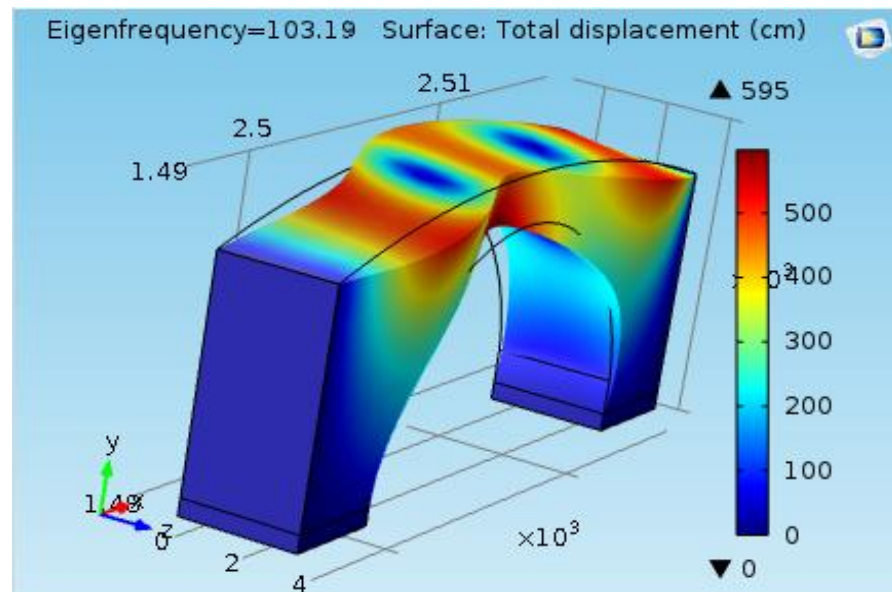
Μοντέλο 1_ 5η Ιδιομορφή



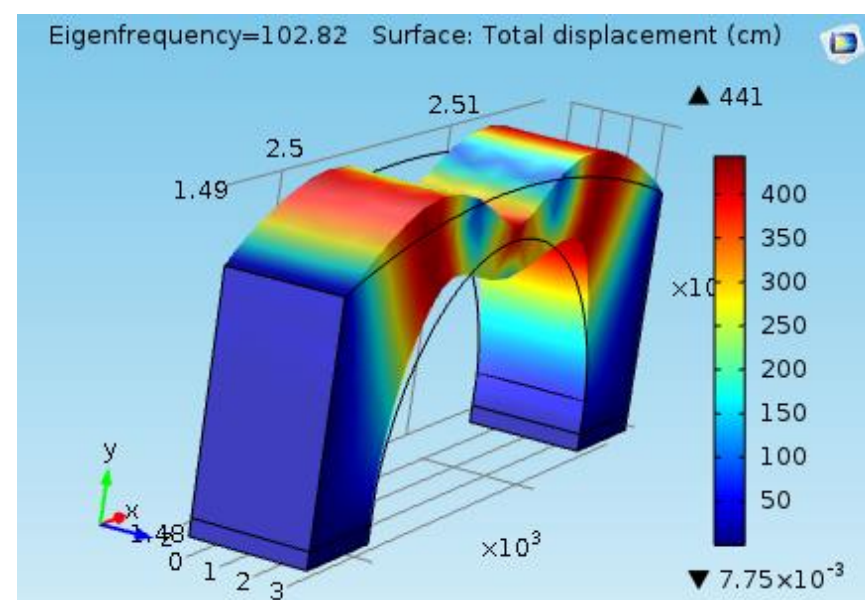
Μοντέλο 2_ 5η Ιδιομορφή



Μοντέλο 1_ 6η Ιδιομορφή

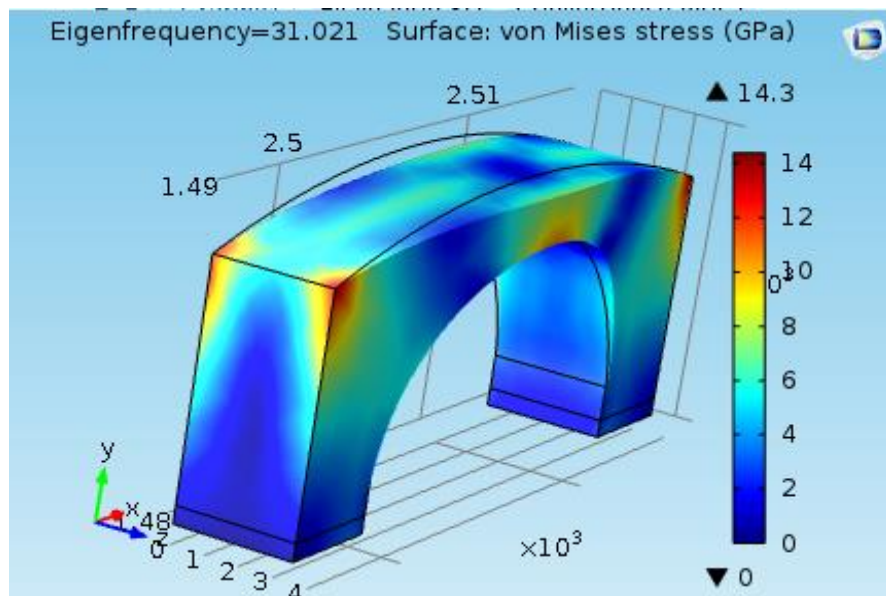


Μοντέλο 2_ 6η Ιδιομορφή

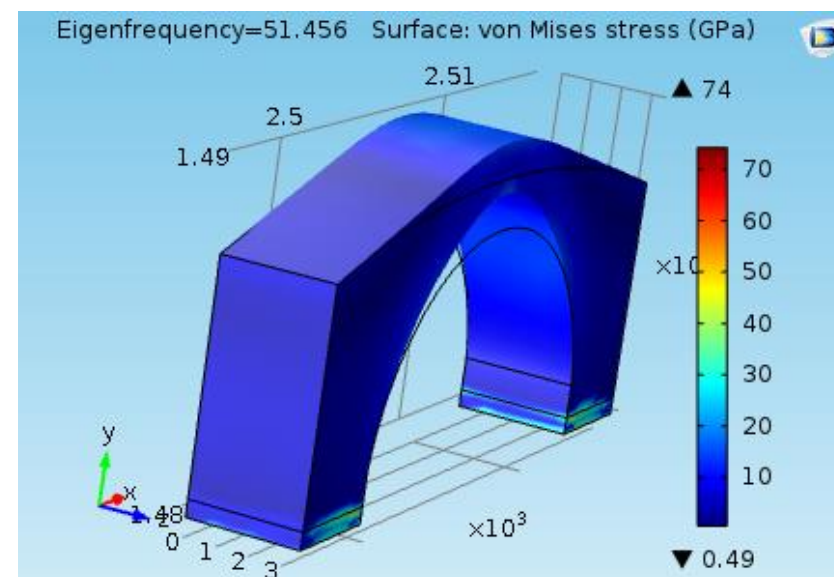
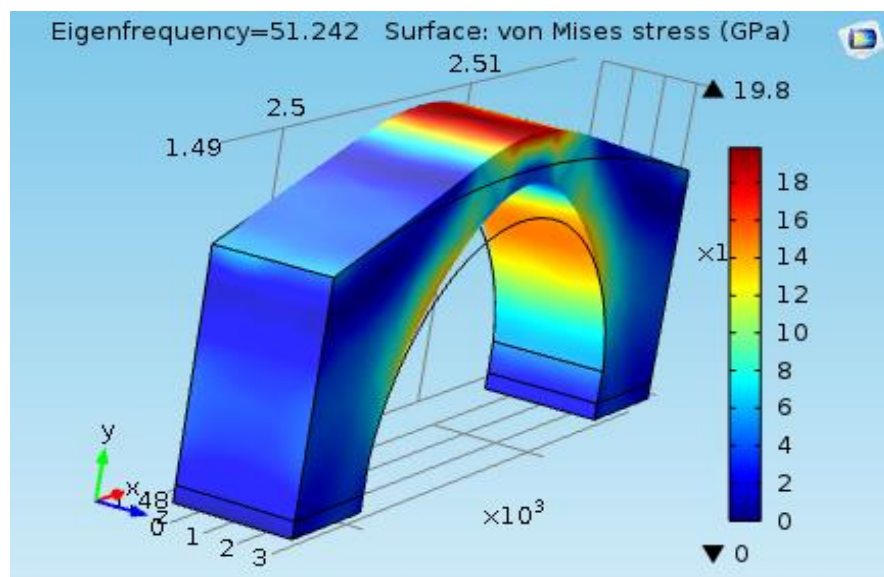
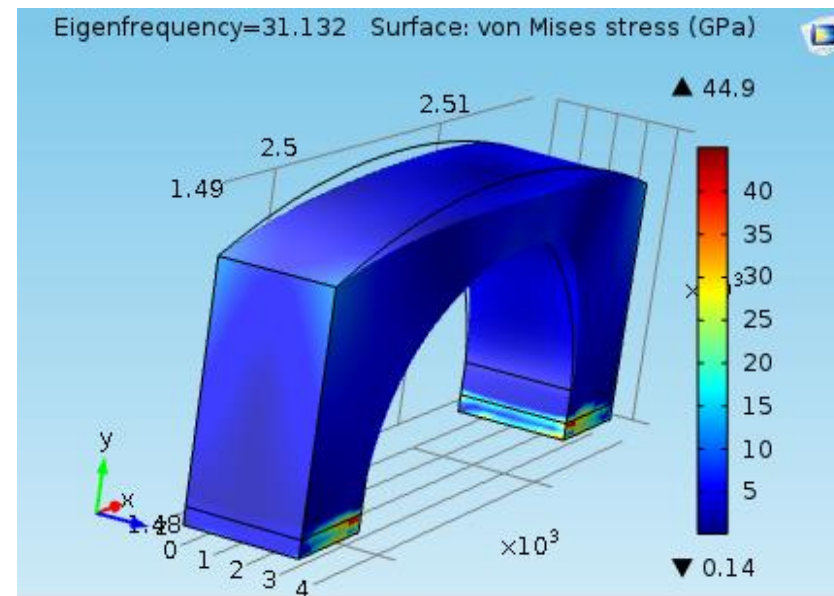


Παρουσίαση των τάσεων ανα ιδιοσυχνότητα (6 ιδιοσυχνότητες)

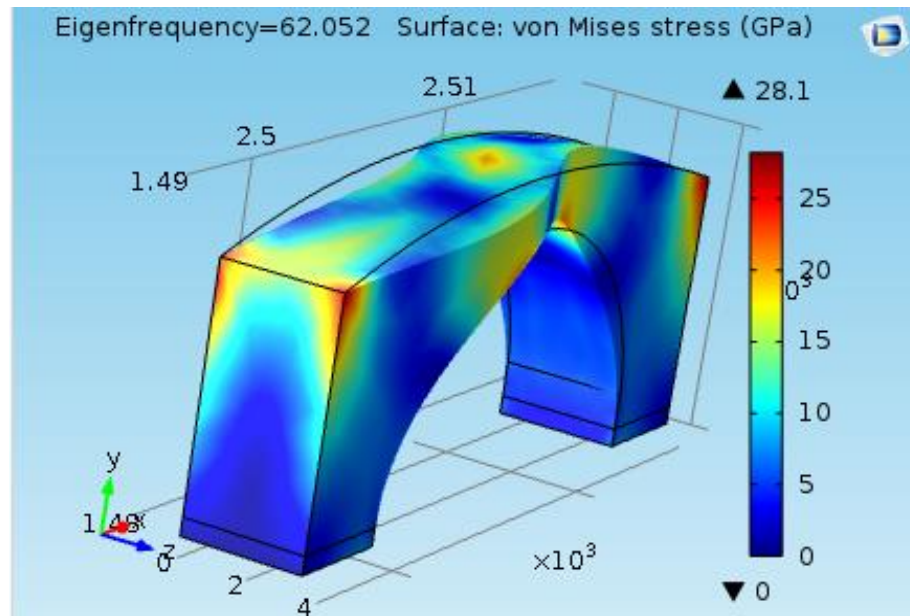
Μοντέλο 1



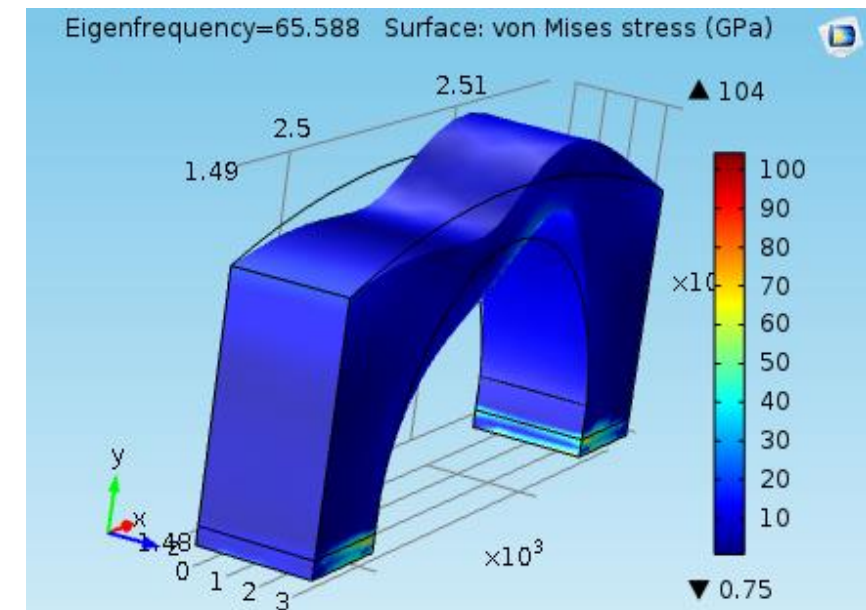
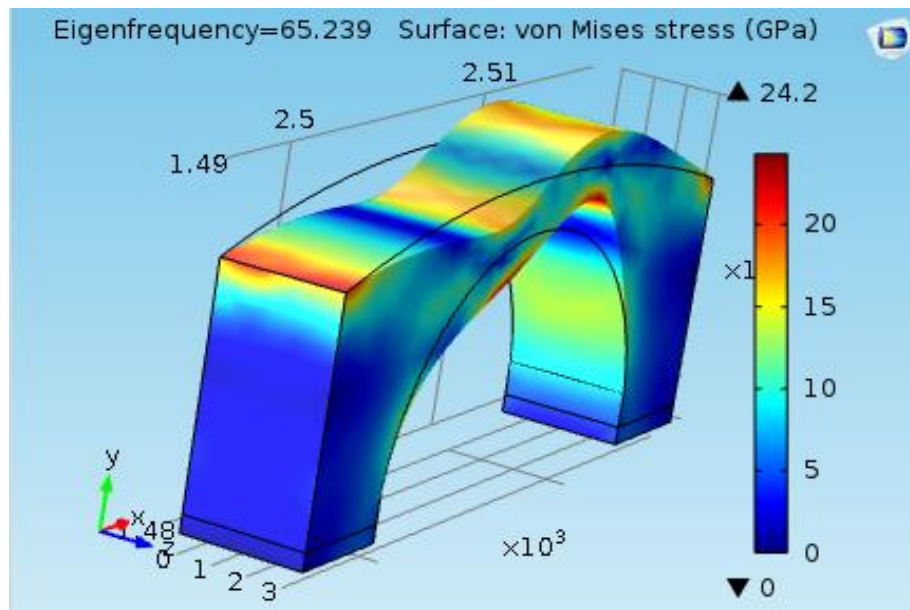
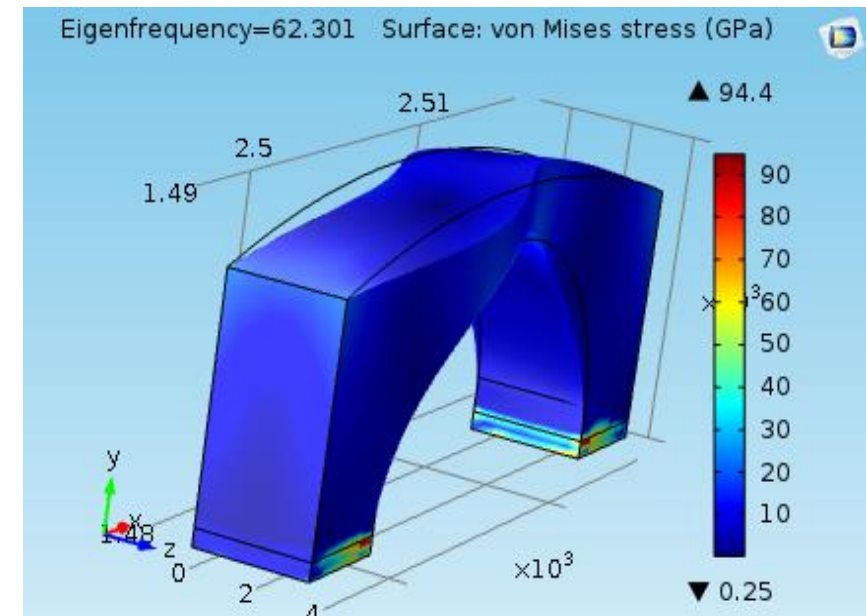
Μοντέλο 2



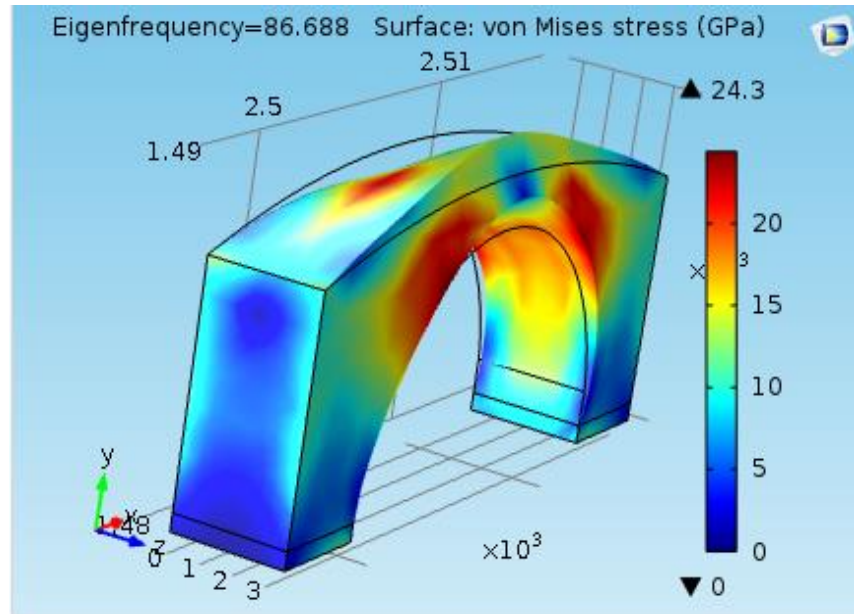
Μοντέλο 1



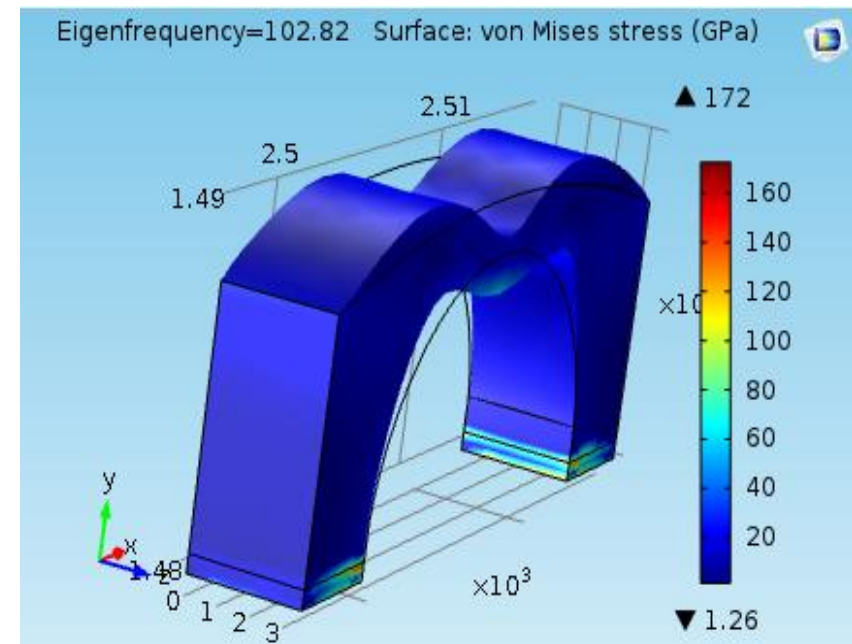
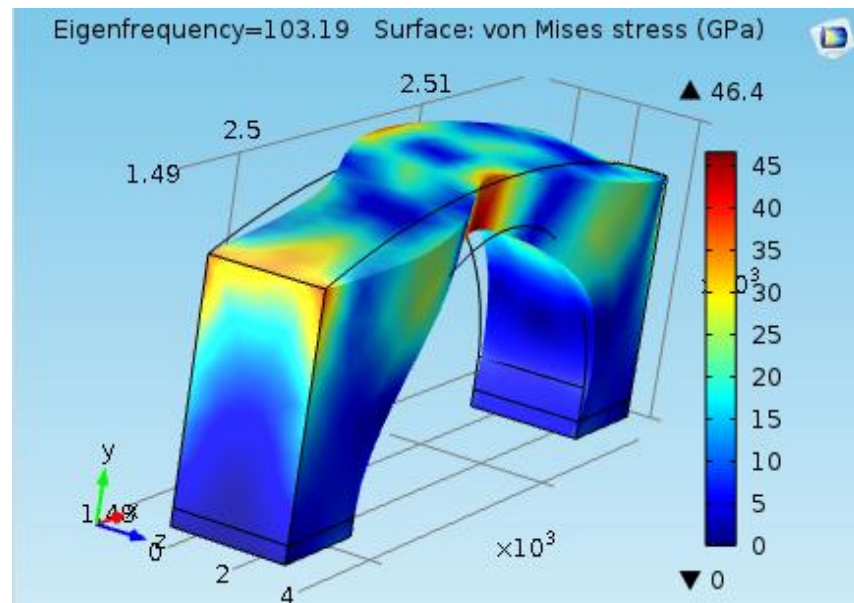
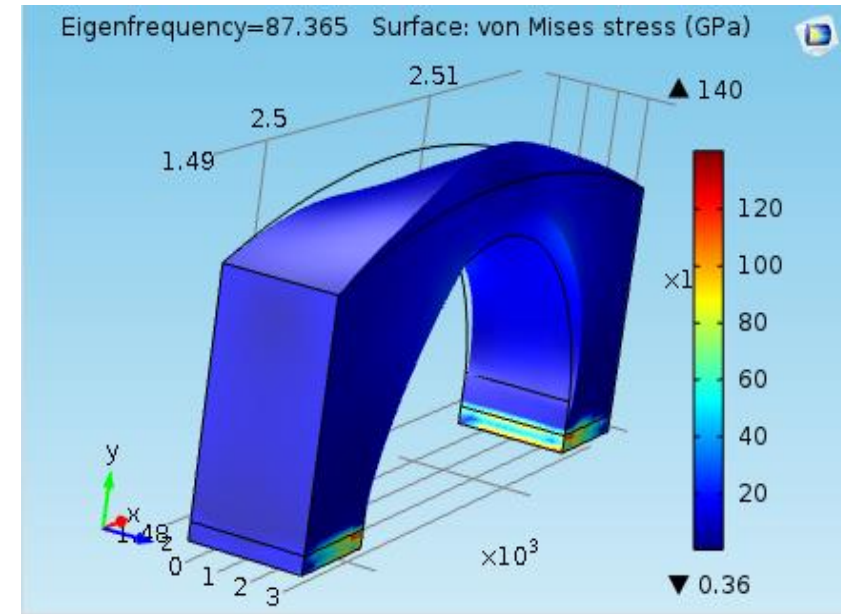
Μοντέλο 2



Μοντέλο 1



Μοντέλο 2



Καταγραφή αποτελεσμάτων

Αρχικά ,στην **στατική ανάλυση** που πραγματοποιήσαμε για τα δύο μοντέλα , καταγράψαμε γραφικά τις τάσεις von mises και τις παραμορφώσεις που αυτές προκαλούν στα δύο μοντέλα .

Η μεταβλητή Total displacement είναι σε **mm** και μας υποδεικνύει την παραμόρφωση που προκαλείται στο στερεό σώμα .

Η μεταβλητή Von Mises stress σε **kPa** μας υποδεικνύει τις καταπονήσεις που δημιουργούνται στο στερεό σώμα .

Στο μοντέλο 1 έχουμε maximum τιμή για την παραμόρφωση 0,14 mm και minimum τιμή το 0 mm.

Στο μοντέλο 2 βγάζουμε ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα με το μοντέλο 1 .

Στο μοντέλο 1 έχουμε maximum τιμή για την καταπόνηση 358 kPa και minimum τιμή το 0 kPa.

Στο μοντέλο 2 έχουμε maximum τιμή για την καταπόνηση 537 kPa και minimum τιμή το 0 kPa.

Τώρα θα ακολουθήσει η καταγραφή των αποτελεσμάτων για την **ιδιομορφική ανάλυση** και για τα δύο μοντέλα και θα δείξουμε τις 6 πρώτες ιδιομορφές αλλά και τις τάσεις που δημιουργούνται σε καθε μία .

Η μεταβλητή Total displacement είναι σε **cm** και μας υποδεικνύει την παραμόρφωση που προκαλείται στο στερεό σώμα .

Η μεταβλητή Von Mises stress σε **GPa** μας υποδεικνύει τις καταπονήσεις που δημιουργούνται στο στερεό σώμα .

Τα αποτελέσματα θα τα κατάγραψουμε σε σειρά απο την πρώτη ιδιομορφή μέχρι την έκτη .

Για το μοντέλο 1

Για την ιδιοσυχνότητα 31.021 έχουμε μετατοπίσεις με max τιμή 633 cm και min τιμή 0 cm και καταπονήσεις με max τιμή 14.3 GPa και min τιμή 0 GPa .

Για την ιδιοσυχνότητα 51.242 έχουμε μετατοπίσεις με max τιμή 701 cm και min τιμή 0 cm και καταπονήσεις με max τιμή 19.8 GPa και min τιμή 0 GPa.

Για την ιδιοσυχνότητα 62.052 έχουμε μετατοπίσεις με max τιμή 517 cm και min τιμή 0 cm και καταπονήσεις με max τιμή 28.1 GPa και min τιμή με 0 GPa.

Για την ιδιοσυχνότητα 65.239 έχουμε μετατοπίσεις με max τιμή 517 cm και min τιμή 0 cm και καταπονήσεις με max τιμή 24.2 GPa και min τιμή με 0 GPa.

Για την ιδιοσυχνότητα 86.688 έχουμε μετατοπίσεις με max τιμή 814 cm και min τιμή 0 cm και καταπονήσεις με max τιμή 24.3 GPa και min τιμή 0 GPa.

Για την ιδιοσυχνότητα 103.19 έχουμε μετατοπίσεις με max τιμή 595 cm και min τιμή 0 cm και καταπονήσεις με max τιμή 46.4 GPa και min τιμή 0 GPa.

Για το μοντέλο 2

Για την ιδιοσυχνότητα 31.132 έχουμε μετατοπίσεις με max τιμή 632 cm και min τιμή $2.5 \cdot 10^{-3}$ και καταπονήσεις με max τιμή 44.9 GPa και min τιμή 0.14 GPa.

Για την ιδιοσυχνότητα 51.456 έχουμε μετατοπίσεις με max τιμή 682 cm και min τιμή $4.09 \cdot 10^{-3}$ και καταπονήσεις με max τιμή 74 GPa και min τιμή 0.49 GPa.

Για την ιδιοσυχνότητα 62.301 έχουμε μετατοπίσεις με max τιμή 519 cm και min τιμή $5.22 \cdot 10^{-3}$ και καταπονήσεις με max τιμή 94.4 GPa και min τιμή 0.25 GPa.

Για την ιδιοσυχνότητα 65.588 έχουμε μετατοπίσεις με max τιμή 513 cm και min τιμή $4.68 \cdot 10^{-3}$ και καταπονήσεις με max τιμή 104 GPa και min τιμή 0.75 GPa.

Για την ιδιοσυχνότητα 87.365 έχουμε μετατοπίσεις με max τιμή 765 cm και min τιμή $6.45 \cdot 10^{-3}$ και καταπονήσεις με max τιμή 140 GPa και min τιμή 0.36 GPa.

Για την ιδιοσυχνότητα 102.82 έχουμε μετατοπίσεις με max τιμή 441 cm και min τιμή $7.75 \cdot 10^{-3}$ και καταπονήσεις με max τιμή 172 GPa και min τιμή 1.26 GPa.

Στη συνέχεια πρίν περάσουμε στην σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων θα κάνουμε πρώτα την μετατροπή των ιδιοσυχνοτήτων σε ιδιοπεριόδων μέσω του τύπου $T=2\pi/\omega$.

Ιδιοσυχνότητες Πρώτου Μοντέλου	Ιδιοπερίοδοι Πρώτου μοντέλου
31.021	0.202
51.242	0.122
62.052	0.101
65.239	0.096
86.688	0.072
103.19	0.060

Ιδιοσυχνότητες Δεύτερου Μοντέλου	Ιδιοπερίοδοι Δεύτερου Μοντέλου
31.132	0.201
51.456	0.122
62.301	0.100
65.588	0.095
87.365	0.071
102.82	0.061

7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στα συμπεράσματα που βγάλαμε για το κάθε μοντέλο από τα αποτελέσματα που πήραμε από το πρόγραμμα comsol και τις διαφορές που εντοπίσαμε στα δύο διαφορετικά μοντέλα .

Πραγματοποιήθηκαν δύο αναλύσεις στα δύο μοντέλα που μελετήσαμε ,η στατική ανάλυση του με την θεώρηση ότι έχουμε μία λωρίδα γεμάτη από αυτοκίνητα πάνω στον φορέα της γέφυρας και την ιδιομορφική που μας δείχνει την συμπεριφορά της γέφυρας σε μία σεισμική δόνηση. Με την χρήση του αυξητικού υλικού στο ένα από τα δύο μοντέλα θέλαμε να δούμε την επίδραση του υλικού στην κατασκευή και το κατά πόσο θα βελτίωνε την συμπεριφορά του .

Όσον αφορά την στατική του ανάλυση αυτό που παρατηρήσαμε είναι ότι οι παραμορφώσεις που δημιουργούνται από το ασκούμενο φορτίο στον φορέα της γέφυρας είναι και στα δύο μοντέλα ίδιες .Όμως στο μοντέλο το πρώτο βλέπουμε ότι ο φορέας της γέφυρας καταπονείται σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι στο μοντέλο με το αυξητικό υλικό ,το οποίο δείχνει να ανταποκρίνεται πολύ καλύτερα ,με τον φορέα τις γέφυρας να μην παρουσιάζει μεγάλες τάσεις. Στα σημεία που προστέθηκε το αυξητικό υλικό δημιουργούνται μεγαλύτερες τάσεις ,κάτι το οποίο όμως είναι και ο σκοπός της χρήσης του αυξητικού για την καλύτερη αντοχή του φορέα .

Αυτό το αποτέλεσμα μας δείχνει ότι στην πάροδο του χρόνου η χρήση του αυξητικού υλικού θα βοηθήσει στην στατική επάρκεια της γέφυρας .

Η στατική ανάλυση μπορούμε να πούμε ότι και με αυτή την μελέτη που κάναμε είναι ικανή να μας δείξει ένα έμπιστο αποτέλεσμα .

Όσον αφορά την δυναμική ανάλυση ,πρέπει να γίνει ξεκάθαρο ότι τα αποτελέσματα δεν μπορούν τόσο εύκολα να μας δώσουν μία σίγουρη απάντηση, όμως στο επίπεδο μελέτης στην εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία τα αποτελέσματα που έχουμε μπορούμε να τα αναλύσουμε.

Αρχικά θα πρέπει να αναφερθούμε στον σεισμό όπου κατά την διάρκεια του μια κατασκευή θα πρέπει να δονείται γύρω από την συγκεκριμένη συχνότητα των σεισμικών κυμάτων. Σε περίπτωση που η συχνότητα αυτή ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής τότε αυτή θα καταρρεύσει. Το τυπικό εύρος συχνοτήτων επιφανειακών σεισμών είναι 10-80 Hz..

Οι ιδιοσυχνότητες των δύο μοντέλων όπως δείχνουμε και σε προηγούμενο πίνακάκι είναι αρκετά παραπλήσιες .

Και στα δύο μοντέλα στην 5η ιδιοσυχνότητα παρουσιάζεται η μεγαλύτερη παραμόρφωση.

Στο μοντέλο 2 εμφανίζονται πολύ μεγαλύτερες τάσεις από ότι στο μοντέλο 1 ,όμως δεν δείχνουν να προκαλούν κάποιο πρόβλημα στην κατασκευή σε αντίθεση με το μοντέλο 1 όπου παρότι εμφανίζονται μικρότερες τάσεις ειδικά στην πέμπτη ιδιοσυχνότητα προκαλείται μεγάλο πρόβλημα .

Σε γενικές γραμμές αυτό που παρατηρούμε είναι ότι το αυξητικό υλικό βοηθά στην στατικότητα της κατασκευής. Στην σεισμική δόνηση είναι ξεκάθαρο ότι το αυξητικό υλικό απορροφά μεγάλο βαθμό των τάσεων και δεν προκαλείται κάποιο πρόβλημα στην κατασκευή ,η οποία χωρίς το αυξητικό παρουσιάζει μεγάλες καταπονήσεις που μπορεί να οδηγήσουν και σε κατάρρευση.

8^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ_ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Tirupathi R. Chandrupatla , Ashok D. Belegundu , " Εισαγωγή στα πεπερασμένα στοιχεία για μηχανικούς ", Κλειδάριθμος ,2005
- [2] Callister D. William Jr , " Επιστήμη και τεχνολογία υλικών", Τζιόλα, 2004,Αθήνα
- [3] Beer Ferdinand P., Johnston Russell E., Eisenberg Elliot R., "Τεχνική Μηχανική ,Τόμος 1:Εισαγωγή στη μηχανική", Τζιόλα, 2005, Αθήνα
- [4] Γκράσσοι, Γεώργιος , "Τα πέτρινα τοξωτά γεφύρια της Ελλάδας", Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων, 2007, Μακρινίτσα
- [5] Introduction to Comsol Multiphysics, 2011
- [6] Comsol Multiphysics Modeling Guide, 2008
- [7] Hadjigeorgiou E.P and Stavroulakis G.E , THE USE OF AUXETIC MATERIALS IN SMART STRUCTURES
- [8] Σταυρουλάκης Γ.Ε , "Εκπαιδευτικό υλικό μαθήματος υπολογιστικής μηχανικής" , διαθέσιμο μέσω του www.eclass.tuc.gr
- [9] Παπαμίχος, Ευρυπίδης, "Αντοχή των υλικών", Τζιόλα, 2004

