

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ



Διπλωματική Εργασία

" Βέλτιστος σχεδιασμός γερανογέφυρας υποκείμενη σε στατικές φορτίσεις "

Φοιτητής: Ροντογιάννης Σταύρος
Α.Μ.:2013010091

**Επιβλέπων
καθηγητής:** Γεώργιος Σταυρουλάκης

Χανιά, Δεκέμβριος 2019

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ.

TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE
SCHOOL OF PRODUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT
DECISION SCIENCES DIVISION



Diploma Thesis

" Optimal design of a crane gantry subjected to static loadings "

Student: Rontogiannis Stavros

S.N.:2013010091

Professor: George Stavroulakis

Chania, December 2019

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ.



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Διπλωματική Εργασία

" Βέλτιστος σχεδιασμός γερανογέφυρας υποκείμενη σε στατικές φορτίσεις "

Φοιτητής: Ροντογιάννης Σταύρος
Α.Μ.:2013010091

Επιβλέπων
καθηγητής: Γεώργιος Σταυρουλάκης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή της

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Γεώργιος Σταυρουλάκης

Καθηγητής Π.Κ.



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε από τον φοιτητή Ροντογιάννη Σταύρο του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης κατά το ακαδημαϊκό έτος 2019-2020 υπό την επίβλεψη του καθηγητή Σταυρουλάκη Γεώργιου και του υποψήφιου διδάκτορα Κουτσιανίτη Παναγιώτη.

Θα ήθελα λοιπόν να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή μου για την ανάθεση του θέματος, την πολύτιμη βοήθεια του, το ενδιαφέρον του αλλά και τον χρόνο που διέθεσε για την διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στον υποψήφιο διδάκτορα Κουτσιανίτη Παναγιώτη για την καθοριστικής σημασίας βοήθεια του, κατά την εκτέλεση του υπολογιστικού μέρους καθώς και για τις συμβουλές και γνώσεις που μου παρείχε κατά την συγγραφή της εργασίας.

Περιεχόμενα

<u>Ευχαριστίες</u>	7
<u>Περιεχόμενα</u>	8
<u>Κατάλογος εικόνων</u>	10
<u>Περίληψη</u>	13
<u>Abstract</u>	14
<u>1. Ανυψωτικές μηχανές</u>	15
<u>1.1 Γερανοί</u>	16
<u>1.1.1 Κινητοί γερανοί</u>	16
<u>1.1.1.1 Αυτοκινούμενοι γερανοί</u>	16
<u>1.1.1.2 Ερπυστριοφόροι γερανοί</u>	17
<u>1.1.1.3 Πλωτοί γερανοί</u>	17
<u>1.1.2 Σταθεροί γερανοί</u>	18
<u>1.1.2.1 Πυργογερανοί</u>	18
<u>1.1.2.2 Boom cranes</u>	19
<u>1.1.2.3 Γερανογέφυρες</u>	19
<u>2. Σχεδιασμός</u>	22
<u>2.1 Βέλτιστος σχεδιασμός</u>	22
<u>2.2 Τοπολογική βελτιστοποίηση</u>	23
<u>2.2.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων</u>	24
<u>2.2.2 Τρόπος λειτουργίας και στάδια</u>	26
<u>3. Στατικά φορτία γεφυρών</u>	28
<u>4. Παράθεση σχεδίου</u>	30
<u>5. Στατική ανάλυση συστήματος δοκών κύλισης φορέα ανάληψης φορτίου</u>	32
<u>6. Τοπολογική ανάλυση συστήματος δοκών κύλισης φορέα ανάληψης φορτίου</u> ..	38
<u>7. Επανασχεδιασμός της υπό μελέτη κατασκευής-παράθεση σχεδίου</u>	43
<u>8. Επαναληπτικός στατικός έλεγχος</u>	46

<u>9. Συμπεράσματα</u>	50
<u>Βιβλιογραφία</u>	52

Κατάλογος εικόνων

<u>Εικόνα 1.1: Ανυψωτική μηχανή στην αρχαία Ελλάδα</u>	15
<u>Εικόνα 1.2: Γερανοφόρο φορτηγό</u>	16
<u>Εικόνα 1.3: Ερπυστριοφόρος γερανός</u>	17
<u>Εικόνα 1.4: Πλωτός γερανός</u>	17
<u>Εικόνα 1.5: Πυργογερανός</u>	18
<u>Εικόνα 1.6: Boom crane</u>	19
<u>Εικόνα 1.7: Τροχιές κύλησης</u>	20
<u>Εικόνα 1.8: Ηλεκτρικό βαρούλκο</u>	20
<u>Εικόνα 1.9: Αρπάγη</u>	21
<u>Εικόνα 1.10: Καμπίνα χειριστού (1)</u>	21
<u>Εικόνα 1.11: Καμπίνα χειριστού (2)</u>	21
<u>Εικόνα 2.1: Εικονικά στάδια μοντέλου τοπολογικής βελτιστοποίησης</u>	24
<u>Εικόνα 2.2: Ακολουθία ενεργειών τοπολογικής βελτιστοποίησης</u>	26
<u>Εικόνα 2.3: 3D Tetrahedral mesh</u>	27
<u>Εικόνα 3.1: Τυποποιημένος πίνακας Ευρωκόδικα 1</u>	29
<u>Εικόνα 4.1: Σύστημα κολώνων στήριξης</u>	30
<u>Εικόνα 4.2: Σύστημα δοκών κύλισης φορέα ανάληψης φορτίου</u>	31
<u>Εικόνα 4.3: Μπούμα</u>	31
<u>Εικόνα 5.1: Solution form (Linear Statics)</u>	32
<u>Εικόνα 5.2: Assign material</u>	33
<u>Εικόνα 5.3: Mesh creation</u>	33
<u>Εικόνα 5.4: 3D Tetrahedral Mesh</u>	33
<u>Εικόνα 5.5: 3D Tetrahedral Mesh (Zoomed in)</u>	33
<u>Εικόνα 5.6: Constraint type (fixed)</u>	33
<u>Εικόνα 5.7: Load Type (force)</u>	33
<u>Εικόνα 5.8: Ογκομετρικά χαρακτηριστικά (1)</u>	34

<u>Εικόνα 5.9: Displacement - Nodal (1)</u>	35
<u>Εικόνα 5.10: Rotation – Nodal (1)</u>	35
<u>Εικόνα 5.11: Stress - Elemental (1)</u>	36
<u>Εικόνα 5.12: Stress – Elemental – Nodal (1)</u>	36
<u>Εικόνα 5.13: Reaction Force – Nodal (1)</u>	37
<u>Εικόνα 5.14: Reaction Moment – Nodal (1)</u>	37
<u>Εικόνα 6.1: Solution form (Topology Optimization)</u>	38
<u>Εικόνα 6.2: Design compliance</u>	39
<u>Εικόνα 6.3: Design constraint</u>	39
<u>Εικόνα 6.4: Design area</u>	39
<u>Εικόνα 6.5: Manufactory constraint</u>	39
<u>Εικόνα 6.6: Διάγραμμα σύγκλισης αντικειμενικής συνάρτησης</u>	40
<u>Εικόνα 6.7: Topology Optimization 20th Cycle 30%</u>	40
<u>Εικόνα 6.8: Topology Optimization 20th Cycle 50%</u>	41
<u>Εικόνα 6.9: Topology Optimization 20th Cycle 70%</u>	41
<u>Εικόνα 6.10: Topology Optimization 20th Cycle 90%</u>	41
<u>Εικόνα 6.11: Topology Optimization 20th Cycle 100%</u>	42
<u>Εικόνα 6.12: Topology Optimization 20th Cycle 100% (Zoomed in)</u>	42
<u>Εικόνα 7.1: Ογκομετρικά χαρακτηριστικά (2)</u>	43
<u>Εικόνα 7.2: Άνω όψη επανασχεδιασμένου αντικειμένου</u>	44
<u>Εικόνα 7.3: Πρόσοψη επανασχεδιασμένου αντικειμένου</u>	44
<u>Εικόνα 7.4: Πλάγια όψη επανασχεδιασμένου αντικειμένου</u>	44
<u>Εικόνα 7.5: Πίσω όψη επανασχεδιασμένου αντικειμένου</u>	45
<u>Εικόνα 7.6: Κάτω όψη επανασχεδιασμένου αντικειμένου</u>	45
<u>Εικόνα 7.7: Επανασχεδιασμένο αντικείμενο</u>	45
<u>Εικόνα 8.1: 3D Tetrahedral Mesh</u>	46
<u>Εικόνα 8.2: 3D Tetrahedral Mesh (Zoomed in)</u>	46
<u>Εικόνα 8.3: Constraint type (fixed)</u>	46

<u>Εικόνα 8.4: Load type (force)</u>	46
<u>Εικόνα 8.5: Displacement – Nodal (2)</u>	47
<u>Εικόνα 8.6: Rotation – Nodal (2)</u>	47
<u>Εικόνα 8.7: Stress – Elemental (2)</u>	48
<u>Εικόνα 8.8: Stress – Elemental – Nodal (2)</u>	48
<u>Εικόνα 8.9: Reaction – Force – Nodal (2)</u>	49
<u>Εικόνα 8.10: Reaction Moment – Nodal (2)</u>	49
<u>Εικόνα 9.1: Τελική μορφή γερανογέφυρας</u>	52

Περίληψη

Με βάση τις τάσεις των σύγχρονων διαδικασιών παραγωγής βιομηχανικών προϊόντων και κατασκευών, η βέλτιστη σχεδίαση και η εξοικονόμηση υλικών θεωρούνται απαραίτητα συστατικά για την επιτυχή υλοποίηση των διαδικασιών αυτών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο τον βέλτιστο σχεδιασμό κατασκευής τύπου γερανογέφυρας, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού της βάρους, διατηρώντας ταυτόχρονα τις μηχανικές της ιδιότητες καθώς αυτή υπόκειται σε στατικές φορτίσεις. Για το λόγο αυτό, θα χρησιμοποιηθούν βέλτιστες τεχνικές σχεδιασμού όπως η τοπολογική σχεδίαση.

Όλες οι απαιτούμενες διαδικασίες θα υλοποιηθούν με χρήση του εμπορικού προγράμματος **siemens nx**, όπως η αρχική σχεδίαση της κατασκευής, η στατική ανάλυση και στην συνέχεια, η τοπολογική σχεδίαση, από την οποία θα προκύψει και ο τελικός βέλτιστος σχεδιασμός αυτής.

Abstract

Based on the trends of modern production processes of industrial products and constructions, optimum design and saving of materials are considered essential for the successful implementation of these processes.

The present thesis aims to optimally design a crane-type construction in order to minimize its overall weight while maintaining its mechanical properties as it is subject to static loads. For this reason, optimal design techniques such as topological design will be used.

All required processes will be implemented using **siemens nx** commercial program, such as the initial design of the construction, the static analysis and then the topological design, which will result in the final optimal design.

1. Ανυψωτικές μηχανές

Ανυψωτικές μηχανές ονομάζουμε τα μηχανικά συγκροτήματα, τα οποία χρησιμεύουν για τη μεταφορά βαρών, κατακόρυφα ή οριζόντια και κατακόρυφα συγχρόνως. Σήμερα χρησιμοποιούνται ευρέως και μεταφορικά μηχανήματα για τη μετακίνηση υλικών από τη μία θέση στην άλλη.

Ο προορισμός των ανυψωτικών μηχανών με την πάροδο του χρόνου γίνεται περισσότερο σημαντικός σε όλους τους κλάδους της σύγχρονης βιομηχανίας. Χρησιμοποιούνται στη βαριά βιομηχανία για την μετακίνηση μεγάλων βαρών, στις αποβάθρες και τους σιδηροδρομικούς σταθμούς για τη φόρτωση υλικών, στα εργοστάσια για τις μετακινήσεις μηχανών και υλικών, στα πολυώροφα κτήρια για την εξυπηρέτηση ανυψωτικών και μεταφορικών αναγκών προσωπικού και υλικών σε άλλους ορόφους, στα μεταλλεία, στα δομικά έργα και γενικά παντού, όπου παρίσταται ανάγκη ανύψωσης ή μετακίνησης υλικών.

Με τη χρησιμοποίησή τους εξοικονομούνται εργατικά χέρια, δεν έχουμε απώλεια χρόνου και δεν καταπονείται το προσωπικό με βαριές εργασίες. Οι ανυψωτικές μηχανές βελτιστοποιούνται συνεχώς, καθώς καθημερινά τα φορτία που πρέπει να ανυψώνονται γίνονται μεγαλύτερα ενώ παράλληλα η παραγωγή να γίνεται οικονομικότερα και συγχρόνως να πληρούνται οι όροι ασφάλειας, άνεσης και αισθητικής. [2]



Εικόνα 1.1 Ανυψωτική μηχανή στην αρχαία Ελλάδα

1.1 Γερανοί

1.1.1 Κινητοί γερανοί

Κινητούς, ονομάζουμε γερανούς των οποίων ο έλεγχος κίνησης γίνεται μέσω ενσύρματου χειριστηρίου και κινούνται αυτόνομα μέσω ερπυστριών, τροχών ή υδραυλικών συστημάτων. Φέρουν τηλεσκοπικό βραχίονα και εγκαθίστανται πάνω σε φορητά ή αποτελούν αυτοκινούμενα μοντέλα. Είναι σχεδιασμένοι για να μεταφέρονται εύκολα σε μία τοποθεσία και χρησιμοποιούνται για διαφόρων ειδών τύπους φορτίων. [1]

1.1.1.1 Αυτοκινούμενοι γερανοί

Ο πιο γνωστός κινητός τύπος γερανού είναι αυτός που είναι προσαρμοσμένος πάνω σε τροχοφόρο φορητό αυτοκίνητο. Αυτοί οι γερανοί είναι σχεδιασμένοι να μπορούν να ταξιδεύουν αυτόνομα σε κάθε εργοτάξιο. Με τη χρήση πτυσσόμενων πέλδων σταθεροποιούνται στη θέση που απαιτείται από τις εργασίες ενώ αρκετοί τροχοφόροι γερανοί μπορούν να μετακινούνται αργά, ενώ έχουν αναρτημένο φορτίο με το βάρος της σταθεροποίησης να πέφτει στην ανάρτηση του φορητού. Οι περισσότεροι γερανοί αυτού του είδους έχουν επίσης φορητά αντίβαρα για σταθεροποίηση πέρα από τα πέλδα. Η ανυψωτική ικανότητα των τροχοφόρων γερανών συνήθως ποικίλει από 10 μέχρι 100 τόνους, ενώ υπάρχουν και σύγχρονοι γερανοί που σηκώνουν μέχρι και 1100 τόνους [2]



Εικόνα 1.2 Γερανοφόρο φορητό

1.1.1.2 Ερπυστριοφόροι γερανοί

Πρόκειται για γερανούς οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε ένα πλαίσιο που φέρει ερπύστριες οι οποίες παρέχουν τόσο αυξημένη σταθερότητα όσο και ικανότητα κίνησης σε ανώμαλο έδαφος (πχ: εντός εργοταξίου). Συνήθως έχουν ανυψωτική ικανότητα από 40 έως και 3100 τόνους, με κύριο πλεονέκτημα τους πέραν της ευελιξίας κίνησης, να κάνουν την ανύψωση με πολύ μικρή προεργασία καθώς και να μεταφέρουν ανυψωμένα φορτία με μεγαλύτερη ευκολία. Παράλληλα το μεγάλο τους μειονέκτημα είναι πως είναι πολύ βαριά μηχανήματα και το κόστος μετακίνησης τους πολύ μεγάλο αφού για τους μεγάλους ερπυστριοφόρους γερανούς χρειάζεται αποσυναρμολόγηση και μεταφορά από φορτηγά. [2]



Εικόνα 1.3 Ερπυστριοφόρος γερανός

1.1.1.3 Πλωτοί γερανοί

Χρησιμοποιούνται κυρίως στην κατασκευή γεφυρών και λιμενικών κατασκευών, αλλά και για την φόρτο-εκφόρτωση ιδιαίτερα βαριών φορτίων πλοίων. Ορισμένοι βρίσκονται εγκατεστημένοι επάνω σε πλωτήρες και άλλοι είναι εξειδικευμένοι γερανοί με ανυψωτική ικανότητα που υπερβαίνει τους 9000 τόνους και χρησιμοποιούνται ακόμα και για την μεταφορά ολόκληρων τμημάτων γεφυρών. Πέραν αυτών συχνά χρησιμοποιούνται στην ανέλκυση βυθισμένων πλοίων και ειδικά στις υπεράκτιες κατασκευές. [2]



Εικόνα 1.4 Πλωτός γερανός

1.1.2. Σταθεροί γερανοί

1.1.2.1. Πυργογερανοί

Πρόκειται για γερανούς εξισορρόπησης που χρησιμοποιούνται κυρίως σε κατασκευαστικά εργοτάξια. Έχουν πολύ μικρή βάση στήριξης σε σχέση με την επιφάνεια που μπορούν να καλύψουν μεταφέροντας φορτία. Αποτελούνται συνήθως από έναν κάθετο ιστό πάνω στον οποίο συνδέεται μια μακριά οριζόντια μπούμα πάνω σε μια τράπεζα περιστροφής. Η μία άκρη της μπούμας συγκρατεί το αναρτημένο από συρματόσχοινα φορτίο, ενώ η άλλη, η κοντύτερη πλευρά της μπούμας φέρει το αντίβαρο που είναι συνήθως φτιαγμένο από μπετόν. Πλάγια της τράπεζας περιστροφής υπάρχει συνήθως η καμπίνα χειρισμού. Ο γερανός αυτός έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας. Την οριζόντια περιστροφή της μπούμας, την κίνηση του φορέου πάνω στη μπούμα και την κάθετη κίνηση του φορτίου. Με ύψος που μπορεί να φτάνει τα 100 μέτρα, έκταση μπούμας στα 80 μέτρα και ανυψωτική ικανότητα στην άκρη της μπούμας μέχρι και 18 τόνους, έχουν αποδείξει την χρησιμότητά τους στην κατασκευή πολύ ψηλών κτιρίων. [2]



Εικόνα 1.5 Πυργογερανός

1.1.2.2. Boom cranes

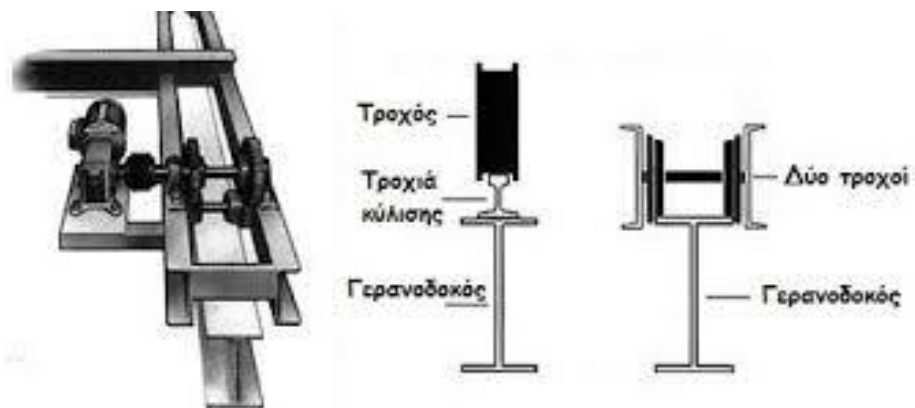
Πρόκειται για ένα κοινό τύπο γερανού ο οποίος συνήθως είναι εγκατεστημένος σταθερά σε πλάκα σκυροδέματος ή είναι προσαρμοσμένος σε πλοία, φορητά ή ερπιστριοφόρα μηχανήματα. Οι πυργογερανοί τις περισσότερες φορές δίνουν τον καλύτερο συνδυασμό ύψους-ανυψωτικής ικανότητας και χρησιμοποιούνται κυρίως στην κατασκευή ψηλών κτηρίων. Συναντώνται επίσης πολύ συχνά σε λιμάνια και υπεράκτιες πλατφόρμες. Ο κύριος μηχανισμός ανύψωσης αποτελείται από μια μπούμα συνδεδεμένη σε μια περιστρεφόμενη τράπεζα η οποία συνήθως είναι στηριγμένη πάνω σε μια σταθερή βάση από πυλώνες. Με τη βοήθεια υδραυλικών συστημάτων ή καλωδίων η μπούμα μπορεί και αλλάζει γωνία και μαζί με την περιστροφή της βάσης μπορεί και μεταφέρει τα φορτία. Επίσης μπορεί κάποιος από τους βραχίονες να είναι πτυσσόμενος. [1]



Εικόνα 1.6 Boom crane

1.1.2.3. Γερανογέφυρες

Οι γερανογέφυρες συνήθως κυλίνουν κατά μήκος δύο σταθερά πακτωμένων στο σκελετό του κτιρίου σιδηροτροχιών και πάνω σε αυτές τα φορεία τους που φέρουν και την τελική απόληξη ανάληψης των βαρών. Γερανογέφυρες μικρού φορτίου και ανοίγματος αποτελούνται συνήθως από μονό κύριο φορέα, με τυποποιημένη διατομή, στο κάτω πέλμα του οποίου κυλιέται ένα φορείο. Μεγαλύτερες γερανογέφυρες έχουν δύο κύριους φορείς, με αυτές που η ανυψωτική τους ικανότητα ξεπερνά τους 20 τόνους να αποτελούνται από ένα σύνθετο δικτύωμα. Για μικρά φορτία ή γερανούς χρησιμοποιούνται χαλύβδινες τροχιές ορθογωνικής διατομής. Η ένωση τους με την κύρια δοκό της τροχιάς γίνεται με βίδωμα, κοχλίωση ή συγκόλληση. Οι τροχοί κύλισης με σκοπό την χειροκίνητη λειτουργία κατασκευάζονται από χυτοσίδηρο, ενώ για μηχανοκίνητη από χυτοχάλυβα. Οι τροχοί των γεφυρών φέρουν αυλακώσεις διαστάσεων ανάλογων του πλάτους των τροχιών, ενώ οι επιφάνειες κύλισης των τροχών των φορείων είναι κωνικές για την καλύτερη προσαρμογή τους.



Εικόνα 1.7 Τροχιές κύλισης

Συνηθιζόταν να εφαρμόζεται χειροκίνητη κύλιση για φορτία μικρά, με χρήση αλυσίδας που εφαρμόζει σε οδοντωτό τροχό, ενώ για μεγάλα φορτία αποκλειστικά με ηλεκτροκινητήρα. Αυτό έχει αρχίσει να εκλείπει πλέον με σκοπό να εκμεταλλευόμαστε την αυξημένη ασφάλεια που παρέχουν οι ηλεκτροκινητήρες λόγω της αυτόματης πέδης που διαθέτουν η οποία ενεργεί αμέσως μετά τη διακοπή του ρεύματος. Σχεδόν πάντα τοποθετείται από ένας ηλεκτροκινητήρας σε κάθε πλευρά της γέφυρας. [2]

Οι ηλεκτροκινητήρες μπορεί να είναι συνεχούς ή εναλλασσόμενης τροφοδοσίας. Τα επιζητούμενα χαρακτηριστικά τους είναι η δυνατότητα απόδοσης υψηλής ροπής εκκίνησης και επιτάχυνσης σε μεγάλα φορτία, όσο πιο ομαλά γίνεται, η αυξημένη αντοχή σε συχνό δυναμικό φρενάρισμα, καθώς και να διατηρούν τις μηχανικές τους ιδιότητες αλλά και την μορφολογία τους καθώς υπόκεινται σε σκόνη, υψηλές θερμοκρασίες ή ακόμα και συχνή κακομεταχείριση από τον χειριστή. Ακόμα, απαραίτητο προσόν είναι η δυνατότητα μετακίνησης του φορτίου στην επιθυμητή κάθε φορά ταχύτητα, χωρίς να είναι απαραίτητη η συνεχής χρήση των φρένων τριβής. Τα φορεία όσων αφορά τον τρόπο κύλισης τους διακρίνονται σε: φορεία που κυλιόνται με έναν φορέα και τα φορεία που κυλιόνται με δύο φορείς. [2]

Η ανύψωση του φορτίου πραγματοποιείται με βαρούλκο, χειροκίνητο ή ηλεκτρικό. Για την έλξη του χειροκίνητου βαρούλκου προτιμάται η αλυσίδα, καθώς με την ύπαρξη τροχαλίας μειώνεται σημαντικά το μήκος ανύψωσης. Στις μέρες μας, πρωταγωνιστικό ρόλο παίζουν τα ηλεκτρικά βαρούλκα αφού είναι σχεδιασμένα και κατασκευασμένα έτσι ώστε να έχουν μικρό βάρος, να



Εικόνα 1.8 Ηλεκτρικό βαρούλκο

καταλαμβάνουν μικρό χώρο και μεγάλη ασφάλεια λειτουργίας, με μικρές απαιτήσεις συντήρησης και καλό βαθμό απόδοσης. Χωροταξικά κερδίζουν καθώς ο κινητήρας και τμήματα του μηχανισμού τοποθετούνται μέσα στο τύμπανο και έτσι μειώνεται ο απαιτούμενος χώρος. Κατά κανόνα το όργανο έλξεως είναι χαλύβδινο καλώδιο, το οποίο χρησιμοποιείται από μόνο του έως και τέσσερα παράλληλα, ανάλογα την απαίτηση του φορτίου και το άνω και κάτω όριο του αγκίστρου ελέγχεται και περιορίζεται από διακόπτη ρεύματος. [2]

Η σύνδεση του δε με το φορτίο, γίνεται με χρήση αγκίστρου, μηχανικής αρπάγης, ηλεκτρομαγνητικής αρπάγης ή άλλων ειδικών εξαρτημάτων. Ο χειρισμός μεταφοράς και ανύψωσης επιτυγχάνεται είτε από απόσταση, είτε εντός εγκατεστημένης καμπίνας χειρισμού επί της κατασκευής, τέτοιας ώστε να επιτρέπεται στον χειριστή η απαραίτητη οπτική επαφή με το φορτίο, για όλες τις θέσεις αυτού. [2]



Εικόνα 1.9 Αρπάγη



Εικόνα 10 Καμπίνα χειριστού 1



Εικόνα 1.11 Καμπίνα χειριστού 2

2. Σχεδιασμός

2.1 Βέλτιστος σχεδιασμός

Οι αυξημένες ανάγκες της εποχής μας για μεγάλο όγκο παραγωγής βιομηχανικών προϊόντων και κατασκευών, σε συνδυασμό με την πληθώρα νέων υλικών αλλά και τις νέες απαιτήσεις-κατασκευαστικές προδιαγραφές, δικαιολογούν την απαίτηση για διαδικασίες ανάπτυξης ιδεών, συνδεδεμένες άμεσα με το σχεδιασμό της παραγωγής τους. Οι διαδικασίες αυτές μέχρι πρότινος αντιμετωπίζονταν ως δύο ξεχωριστές αυτοτελείς διαδικασίες, χωρίς προμελέτη για αρμονικό συνδυασμό αυτών, με κακό αντίκτυπο στα αποτελέσματα κόστους κατασκευής των τελικών προϊόντων.

Για τον λόγο αυτό εισήχθησαν συστήματα σχεδιομελέτης και παραγωγής με χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή σε συνδυασμό με μεθόδους εφαρμοσμένης μηχανικής, που γεφυρώνουν σε μεγάλο βαθμό το χάσμα μεταξύ των δύο σταδίων, της ανάπτυξης των ιδεών και του σχεδιασμού της παραγωγής τους. Είναι σημαντικό να τονισθεί πως ο σχεδιασμός της παραγωγής είναι συνεχώς εξελισσόμενος με σημείο αιχμής την προσέγγιση του σχετικά με τις διαδικασίες προσθετικής κατασκευής.

Ο σχεδιασμός της παραγωγής αποτελεί τον συνδετικό κρίκο των απαραίτητων διαδικασιών για την επικερδή υλοποίηση των εκάστοτε προϊόντων και διέπει διαδοχικά τα στάδια υλοποίησης αυτών που αρχικά αφορούν την ανάπτυξη της ιδέας συναρτήσει των επιθυμητών λειτουργιών και τελικών προδιαγραφών των προϊόντων. Στην συνέχεια, τον υπολογισμό των εξόδων σχεδιασμού και την προσέγγιση του κόστους, ενώ μέσω των δοκιμών που υλοποιεί, προσδιορίζει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, την ποικιλία των πιθανών χρησιμοποιούμενων υλικών και τελικά τα στάδια και πεδία βελτίωσης της διαδικασίας παραγωγής των τελικών προϊόντων με σκοπό την μεγιστοποίηση του κέρδους.

Αρχικά, στο στάδιο του σχεδιασμού, ο σχεδιαστής της παραγωγής διασπά σε επιμέρους τμήματα το προς σχεδίαση προϊόν, αποσαφηνίζοντας κατά αυτό τον τρόπο την πολυπλοκότητα της δομής του και προσδιορίζει το κόστος παραγωγής. Η αποδόμηση και η ουσιαστική κατανόηση όλων των λεπτομερειών και των απαιτήσεων των επιμέρους τμημάτων του τελικού σχεδιασμού συνεισφέρει αποτελεσματικά στον ακριβέστερο υπολογισμό του συνολικού κόστους της παραγωγής. Στη συνέχεια προκύπτει ως αποτέλεσμα η ομαλή μετάβαση από την εντατικοποίηση της παραγωγής στην κανονική παραγωγή, στοχεύοντας χαμηλό κόστος παραγωγής με αυξημένης ποιότητας προϊόντα.

Καταλαβαίνουμε λοιπόν πως οι διαδικασίες σχεδιασμού της παραγωγής είναι πλέον υψίστης σημασίας για την επιτυχή ανάπτυξη των σύγχρονων προϊόντων, σκεπτόμενοι την πολυπλοκότητα της δομής και των υλικών αυτών αλλά και τον αυξημένο ανταγωνισμό μεταξύ των παραγωγών προϊόντων ανά τις αγορές. Συνυπολογίζοντας δε τον αυξημένο αριθμό επιχειρήσεων με την διαφορετικότητα που τις χαρακτηρίζει είναι

εύκολο να αντιληφθούμε την δυσκολία για προσδιορισμό της χρυσής τομής κόστους και ποιότητας σε ένα περιβάλλον συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων και ανταγωνισμού. Συμπερασματικά, ο σχεδιασμός της παραγωγής αποτελεί απαραίτητο εφόδιο-εργαλείο στα χέρια των σημερινών μηχανικών, προς επίτευξη προσοδοφόρων τακτικών για την εξυπηρέτηση όλου του εύρους του αγοραστικού κοινού.

Κατά την διαδικασία εύρεσης του σχεδιασμού της παραγωγής, οι επιμέρους διαδικασίες καθώς και τα άτομα που τις υλοποιούν (μηχανικοί, σχεδιαστές, οικονομικοί αναλυτές) αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου μοτίβου. Ακολουθούν διαδικασίες εκτίμησης της βιωσιμότητας των διαδικασιών ανάπτυξης των προϊόντων και στην συνέχεια κάνουν μία αρχική εκτίμηση του κόστους της παραγωγής. Στη συνέχεια αποδομούν την όλη διαδικασία με σκοπό την εύρεση των κοστολογικά ζημιολογικών μερών αυτής, τα επαναπροσδιορίζουν και κάνουν την εκ νέου εκτίμηση του συνολικού κόστους παραγωγής. Η διαδικασία αυτή είναι μία επαναληπτική μέθοδος η οποία σταματά με την εύρεση του πλέον συμφέροντος μοτίβου σχεδιασμού της παραγωγής από άποψη κόστους-βελτιστοποίηση του κέρδους. [3]

2.2 Τοπολογική βελτιστοποίηση

Η τοπολογία αφορά στον γενικότερο κλάδο της γεωμετρίας ο οποίος είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον σχεδιασμό των κατασκευών. Η τοπολογική βελτιστοποίηση διενεργείται μέσω πρακτικών που αναπαριστούν την γεωμετρία της εκάστοτε κατασκευής, ασχέτως της πολυπλοκότητας της, με επαναληπτικές διαδικασίες προσομοίωσης της κατασκευής έως ότου προκύψει η βέλτιστη γεωμετρία αναφορικά με την ελαχιστοποίηση-μεγιστοποίηση κάποιου χαρακτηριστικού ή κρίσιμου μεγέθους, τηρώντας πάντα τις κατασκευαστικές απαιτήσεις του τελικού προϊόντος.

Η μέθοδος της τοπολογικής βελτιστοποίησης ορίζεται ως μία μαθηματική μέθοδος που βελτιστοποιεί τη διάταξη του υλικού εντός ενός δεδομένου χώρου σχεδιασμού, για προκαθορισμένα σύνολα φορτίων, οριακές συνθήκες και περιορισμούς με στόχο τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος. Διαφοροποιείται από τη βελτιστοποίηση του σχήματος και του μεγέθους καθώς ο σχεδιασμός, επιτυγχάνει οποιοδήποτε σχήμα στο χώρο του σχεδιασμού έναντι της αντιμετώπισης προκαθορισμένων διαμορφώσεων.

Για την υλοποίηση της τοπολογικής βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων (FEM) για την αξιολόγηση της απόδοσης του σχεδιασμού, με χρήση τεχνικών μαθηματικού προγραμματισμού, όπως ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης κριτηρίων και η μέθοδος μετακίνησης ασυμπτωτικών ή αλγορίθμων που δεν βασίζονται σε διαβάθμιση όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι.

Το φάσμα εφαρμογών της τοπολογικής βελτιστοποίησης είναι ευρύ και συνεχώς αυξανόμενο καθώς συναντάται ήδη στην αεροδιαστημική, μηχανική, βιοχημική και γενικά

στα αντικείμενα των μηχανικών. Σήμερα η τοπολογική βελτιστοποίηση, αποτελεί αναπόσπαστο μέσο των μηχανικών που ασχολούνται με την αρχική σχεδιαστική διαδικασία. Η μορφολογική ελευθερία δε που προκύπτει από τα αποτελέσματα της διεργασίας συχνά είναι αδύνατο να αποτυπωθεί πρακτικά. Για τον λόγο αυτό και είναι υψίστης σημασίας η σωστή παραμετροποίηση των γενικών και ειδικών περιορισμών που διέπουν την διαδικασία της βελτιστοποίησης τοπολογίας του αντικειμένου που μελετάται. Η προσθήκη περιορισμών στη σύνθεση, προκειμένου να αυξηθεί η δυνατότητα κατασκευής, αποτελεί λοιπόν ένα ενεργό πεδίο έρευνας. [3][5][8][9][10][11][12][13]



Εικόνα 2.1 Εικονικά στάδια μοντέλου τοπολογικής βελτιστοποίησης

2.2.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Πρόκειται για μία αριθμητική μέθοδο η οποία μέσω της επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων χρησιμοποιείται στο χώρο της μηχανικής για την μελέτη και προσέγγιση λύσεων σε προβλήματα που έχουν να κάνουν με αντικείμενα πολύπλοκων και ακαθόριστων σχημάτων. Αρχικά βρήκε εφαρμογή ως μέσο επίλυσης προβλημάτων αεροναυπηγικών κατασκευών κατά την δεκαετία του 1940 και η ύπαρξη της συνδέεται άμεσα με την ύπαρξη και διάδοση των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Καθώς οι έως τότε αναλυτικές μέθοδοι δεν μπορούσαν να δώσουν λύσεις στις μελέτες των όλο ένα και απαιτητικότερων προς μελέτη αντικειμένων σχεδιαστικά, δημιουργήθηκε και υιοθετήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων η οποία έδωσε και δίνει μέχρι και σήμερα λύσεις σε σύνθετα προβλήματα, προσεγγίζοντας πάντα την βέλτιστη. Πλέον βρίσκει εφαρμογή σε διάφορους τομείς της μηχανικής και αποτελεί εργαλείο έμπιστο και απαραίτητο στα χέρια των μηχανικών-μελετητών.

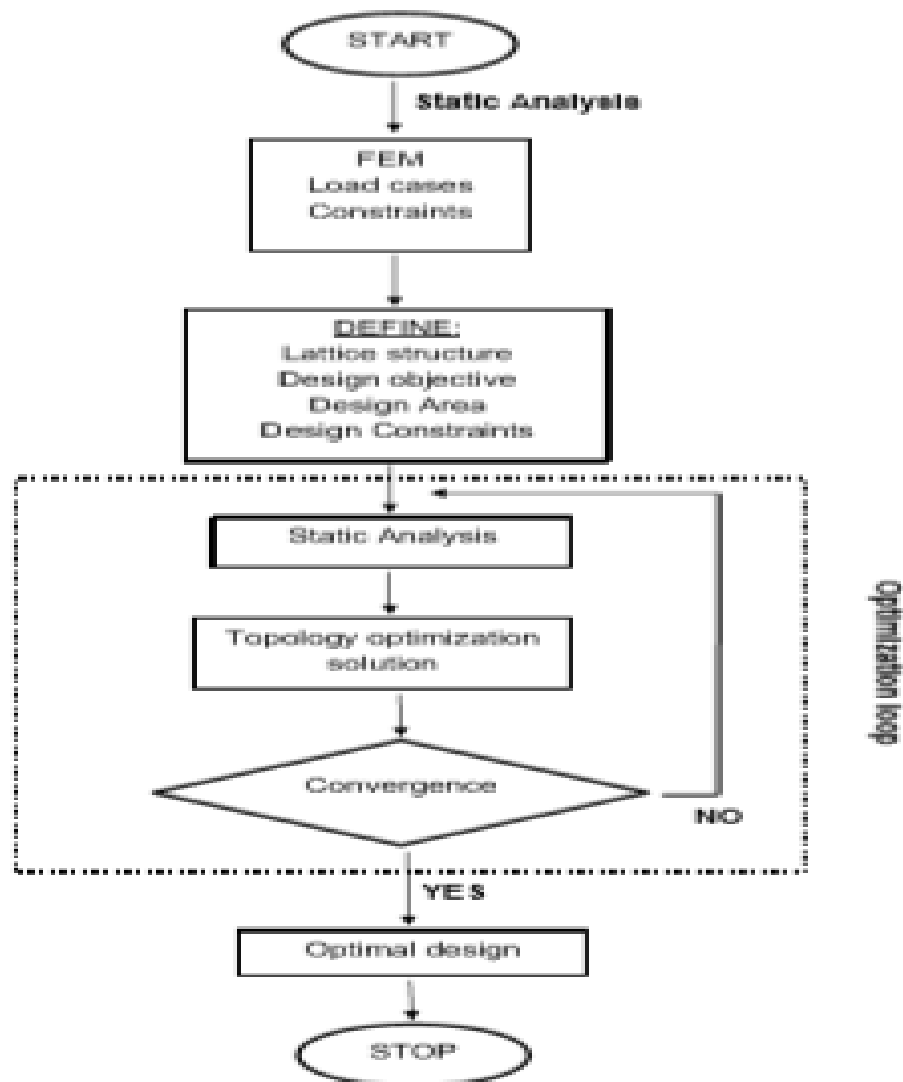
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων λειτουργεί μέσω της μοντελοποίησης των προς μελέτη αντικειμένων σε ένα εικονικό περιβάλλον διενεργώντας διακριτοποίηση των στοιχείων που το αποτελούν. Με τον τρόπο αυτό μελετά την συμπεριφορά των επιμέρους στοιχείων και δύναται να δώσει αποτελέσματα για την συμπεριφορά αυτών κατά το στάδιο της σχεδίασης τους και πριν την παραγωγή των τελικών. Μέσω της μεθόδου οι μηχανικοί μπορούν να προβλέψουν και να αποκλείσουν σχεδιαστικά μοτίβα τα οποία θα οδηγούσαν σε κατασκευαστικά λάθη καθώς και να επιτύχουν εξοικονόμηση των υλικών κατασκευής.

Η συνολική εφαρμογή της μεθόδου ολοκληρώνεται με την υλοποίηση επιμέρους βημάτων τα οποία και είναι τα εξής:

- Αρχικά εφαρμόζεται διακριτοποίηση των στοιχείων του αντικειμένου, με καθορισμένες κατευθύνσεις όσον αφορά τον τύπο, τη διάταξη το μέγεθος και τον αριθμό αυτών από τον αναλυτή.
- Έπειτα καθορίζεται το κατάλληλο μοντέλο παρεμβολής ή μετατόπισης που ιδανικά θα μπορούσε να προβλέψει την μετατόπιση της εκάστοτε περίπλοκης γεωμετρίας του αντικειμένου.
- Εκμεταλλευόμενοι τα προηγούμενα γίνεται παραγωγή μητρώων στιβαρότητας $[K_e]$ και διανυσμάτων του φορτίου $P \rightarrow e$ ενός στοιχείου e , χρησιμοποιώντας συνθήκες ισορροπίας ή κατάλληλες μεταβλητές αρχές.
- Έτσι, παράγονται οι ολικές εξισώσεις ισορροπίας που προκύπτουν από την συνάθροιση των εξισώσεων των επιμέρους στοιχείων με γνώμονα τη σωστή μορφή του συνόλου των εξισώσεων ισορροπίας $[K] * U \rightarrow = P \rightarrow$, που αποσκοπεί στην απαραίτητη σωστή συναρμολόγηση που αποτελούν το συνολικό αντικείμενο.
- Γίνεται επίλυση ως προς τις άγνωστες μετατοπίσεις των κόμβων εφαρμόζοντας τις οριακές συνθήκες για όλες τις εξισώσεις ισορροπίας εκφραζόμενες ως: $[K]*U \rightarrow =P \rightarrow$
- Τελικά μέσω των γνωστών πλέον κομβικών μετατοπίσεων $U \rightarrow$ και με χρήση των κατάλληλων-απαραίτητων εξισώσεων των στερεών ή της μηχανικής των κατασκευών, υπολογίζονται οι καταπονήσεις και παραμορφώσεις των στοιχείων του αντικειμένου που μελετάται. [4][6][7]

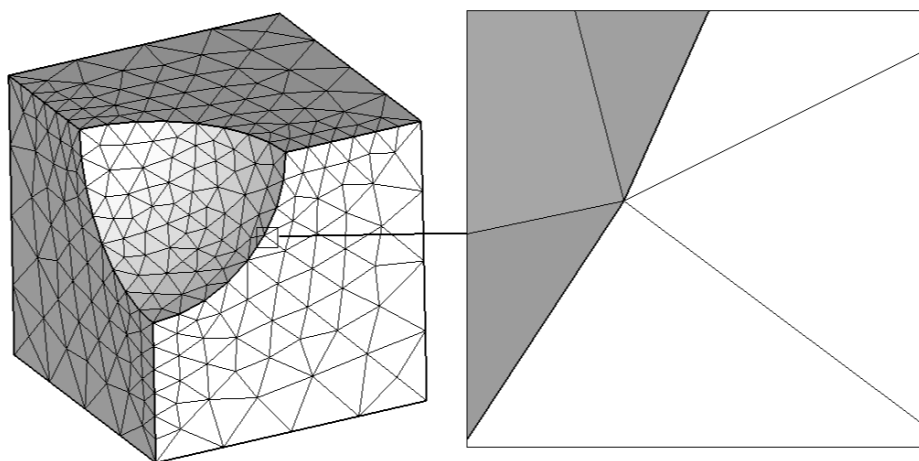
2.2.2 Τρόπος λειτουργίας και στάδια

Η τοπολογική βελτιστοποίηση διενεργείται επιλύοντας προβλήματα μέσω αλγοριθμικών διαδικασιών με σκοπό την εύρεση της κατάλληλης κατανομής υλικού για τον επιθυμητό βέλτιστο σχεδιασμό. Αυτό επιτυγχάνεται με την μεταβολή της πυκνότητας των στοιχείων του εκάστοτε προς μελέτη αντικειμένου. Για την υλοποίηση της διαδικασίας υπάρχει μία σειρά ενεργειών που ακολουθούνται και παρατίθενται στην εικόνα 2.2 καθώς και αναλυτικά στην παράθεση της τοπολογικής βελτιστοποίησης που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία.



Εικόνα 2.2 Ακολουθία ενεργειών τοπολογικής βελτιστοποίησης

Ειδικότερα, η όλη διαδικασία ξεκινά με την μετατροπή του εξεταζόμενου αντικειμένου σε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, εικονικά μορφής πλέγματος, στο οποίο διακρίνεται το σύνολο των στοιχείων και των κόμβων που το απαρτίζουν. Η δημιουργία αυτών των κόμβων του πλέγματος είναι απαραίτητη καθώς η κίνηση αυτών αποσκοπεί στην εύρεση νέων διατάξεων των στοιχείων με γνώμονα τις βέλτιστες ιδιότητες του συνόλου. Η αναδιάταξη του συνόλου των στοιχείων είναι μία διαδικασία που επαναλαμβάνεται κάθε φορά που επαναλαμβάνεται και η επίλυση του αλγορίθμου της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Έπειτα προσδιορίζεται το υλικό της κατασκευής ώστε να της προσδοθούν και οι ανάλογες μηχανικές ιδιότητες όπως επίσης τα προσδοκώμενα φορτία ανάληψης αυτής και οι οριακές συνθήκες βάση των οποίων μας ενδιαφέρει το πως πρόκειται να συμπεριφέρεται.



Εικόνα 2.3 3D Tetrahedral mesh

Μετά το πέρας της στατικής ανάλυσης ξεκινά ο ορισμός και η παραμετροποίηση των απαραίτητων συνιστωσών για την εφαρμογή της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Αρχικά καθορίζεται ο στόχος της σχεδίασης ο οποίος προκύπτει από το προσδοκώμενο αποτέλεσμα του χρήστη. Ο στόχος μπορεί να διαφέρει δημιουργώντας έτσι διαφορετικά μοντέλα βελτιστοποίησης, ένα εκ των οποίων είναι το παρουσιαζόμενο στην παρούσα εργασία, με στόχο την ελαχιστοποίηση του βάρους του μοντέλου. Στη συνέχεια ορίζεται η περιοχή σχεδίασης (design area) και/ή τα σταθερά τμήματα (frozen area). Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζονται οι περιοχές που επιθυμούμε να επηρεαστούν ή μη κατά την εύρεση της βέλτιστης δομής. Ο ορισμός των περιορισμών της βελτιστοποίησης που έπεται των προαναφερθέντων, αφορά τον όγκο ή το βάρος του μοντέλου, για το οποίο κάθε φορά γίνεται και ανάλογος ορισμός του επιθυμητού. Μέχρι την εξαγωγή της βέλτιστης γεωμετρίας από το πρόγραμμα επίσης γίνεται ο ορισμός των κατασκευαστικών περιορισμών και ο καθορισμός της μορφής παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

Έχοντας λάβει πλέον την προτεινόμενη βέλτιστη γεωμετρία του μοντέλου από την διεργασία της τοπολογικής βελτιστοποίησης, επανεξετάζουμε την στατικότητα αυτού επαναλαμβάνοντας την διαδικασία της στατικής ανάλυσης με την οποία και ξεκινήσαμε την όλη διαδικασία. Ο σκοπός της επαναληπτικής στατικής ανάλυσης γίνεται για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων της τοπολογικής βελτιστοποίησης, την ορθή αξιολόγηση αυτής και τελικά την εξαγωγή συμπερασμάτων. [4]

3. Στατικά φορτία γεφυρών

Με τον όρο “στατικά φορτία” εννοούμε κάθε παράγοντα του συστήματος που μελετάμε ή και εξωγενή, ο οποίος συσχετίζεται με την υπερκατασκευή, με τέτοιο τρόπο ώστε να την φορτίζει με τάσεις, η οποία καλείται να αναλάβει και λειτουργεί, φέροντας εις πέρας τις απαιτούμενες εργασίες, με την αποτελεσματικότητα και ασφάλεια που καθορίζονται από τους κανονισμούς που την διέπουν. Ως τέτοια φορτία θεωρούνται το ίδιο βάρος της γερανογέφυρας, το ανυψούμενο φορτίο αυτής, οι παραγόμενες οριζόντιες δυνάμεις κίνησης, το δοκιμαστικό φορτίο, οι ασκούμενες στις διατάξεις τέρματος δυνάμεις καθώς και τα φορτία ανέμου. Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο τυποποιημένος πίνακας με τα προαναφερόμενα φορτία όπως προβλέπεται από τον Ευρωκώδικα 1.

Είναι καθοριστικής σημασίας η ορθή συμπερίληψη των στατικών φορτίων που πρόκειται αν αναλάβει η υπερκατασκευή που μελετάμε, με σκοπό την επιτυχή λειτουργία αυτής σε συνδυασμό με τις τεχνικές προδιαγραφές του τελικού προϊόντος και πάντα με γνώμονα την ασφάλεια εργασίας. Συνηθίζεται για ευνόητους λόγους, ο λόγος αναφερόμενης ανυψωτικής ικανότητας/πραγματικής ανυψωτικής ικανότητας να είναι πολύ μικρός για την ελαχιστοποίηση πιθανών περιπτώσεων υπέρβασης της δεύτερης.

Παρ’ όλα τα μεγέθη που προβλέπονται από τον Ευρωκώδικα 1 όσον αφορά την ορθή στατική μελέτη τύπου γερανογέφυρας, αυτά που θα μας απασχολήσουν στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία είναι το ίδιο βάρος της και το ανυψούμενο φορτίο, καθώς σκοπός μας είναι να εφαρμόσουμε τοπολογική βελτιστοποίηση στις δοκούς κυλίσεως γερανογέφυρας, με προκαθορισμένα ομοιόμορφα κατανεμημένο ανυψούμενο φορτίο. [1][2]

Συμβολισμός προσαναζητικών δυναμικών συντελεστών	Επιρροές στην γερανογέφυρα	Έχουν εφαρμογή
ψ	Εξαιτίας της ανύψωσης του φορτίου από το έδαφος παρουσιάζεται δυναμική διέγερση στην γερανογέφυρα	Ίδιο βάρος της γερανογέφυρας
ψ_2 η ψ	Δυναμική επίδραση στην γερανογέφυρα κατά τη διαδικασία μεταφοράς του φορτίου από το έδαφος Σε περίπτωση χρήσης μαγνήτη ή αρπάγης έχουμε δυναμική επιρροή στο σώμα της γερανογέφυρας κατά την απότομη απόθεση του φορτίου που έχει ανυψωθεί	Ανυψούμενο φορτίο
ψ	Δυναμικές επιδράσεις που επεισέρχονται κατά την μετακίνηση της γερανογέφυρας πάνω στις τροχιές κυλίσεως	Ίδιο βάρος γερανογέφυρας και ανυψούμενο φορτίο
ψ	Δυναμικές επιρροές που οφείλονται στις δυνάμεις προώθησης (επιτάχυνση ή επιβράδυνση γερανογέφυρας)	Οριζόντιες δυνάμεις κίνησης
ψ	Προσομοίωση της λειτουργίας της γερανογέφυρας με δοκιμαστικό φορτίο	Δοκιμαστικό φορτίο
ψ	Αφορά την ελαστική δυναμική επίδραση που λαμβάνει χώρα κατά την πρόσκρουση των τροχών επί των συστημάτων απόσβεσης	Δυνάμεις ασκούμενες στις διατάξεις τέρματος στα άκρα των τροχών (φορτία πρόσκρουσης)
ψ_8	Αφορά την απόκριση της γερανογέφυρας σε ανεμοριπή	Φορτία ανέμου

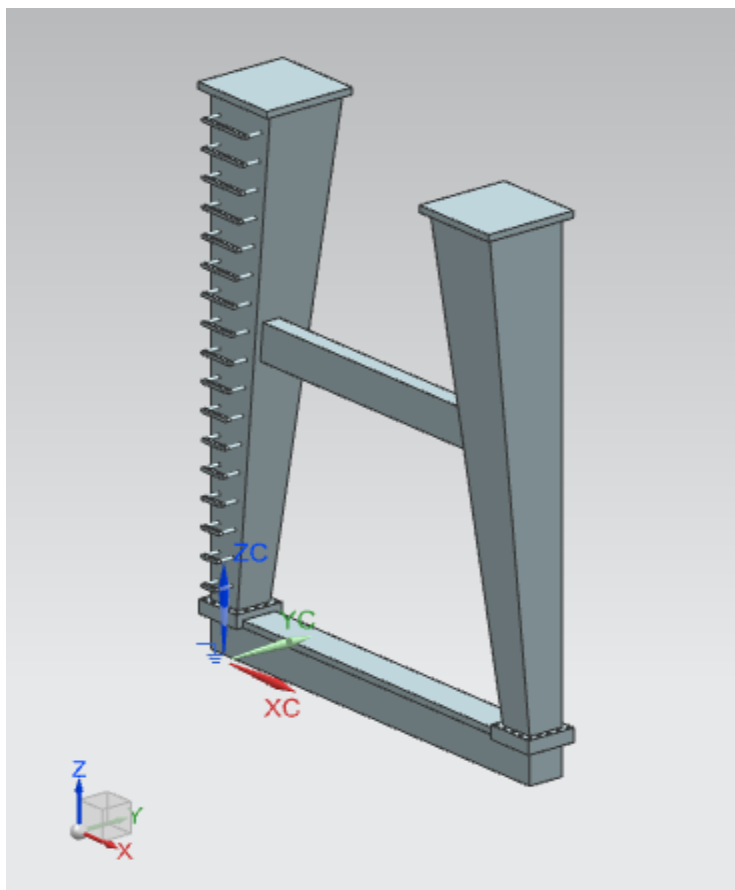
Εικόνα 3.1 Τυποποιημένος πίνακας ευροκώδικα 1

4. Παράθεση σχεδίου

Η γερανογέφυρα η οποία σχεδιάστηκε για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι γερανογέφυρα ναυπηγείου με διαστάσεις 16,2m.(μήκος) x 6m.(πλάτος) x 9.95m.(ύψος). Σχεδιάστηκε με χρήση του εμπορικού προγράμματος **siemens nx** και τα επιμέρους τμήματα της παρατίθενται στη συνέχεια.

2x Σύστημα κολώνων στήριξης:

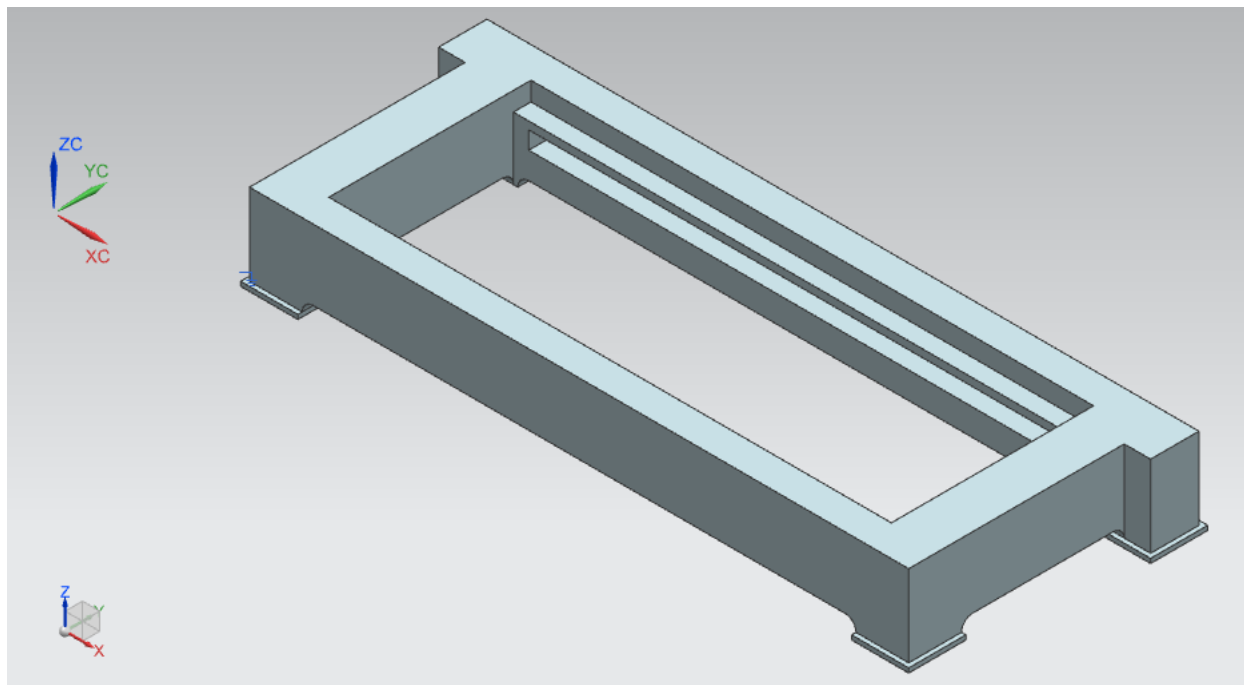
Το κάθε σύστημα κολώνων στήριξης έχει ύψος 7,78m. Και παρεμβάλλεται μεταξύ του επιπέδου εγκατάστασης της υπερκατασκευής και του συστήματος δοκών κύλισης του φορέα ανάληψης των εκάστοτε φορτίων. Στο άνω και κάτω μέρος του υπάρχει αναμονή σύνδεσης με την ανωδομή και την βάση εγκατάστασης καθώς επίσης διαθέτει και έλασμα ένωσης των δύο κολώνων που συνθέτουν το σύστημα με σκοπό την αύξηση αντοχής σε ανάληψη φορτίων.



Εικόνα 4.1 Σύστημα κολώνων στήριξης

Σύστημα δοκών κύλισης φορέα ανάληψης φορτίου:

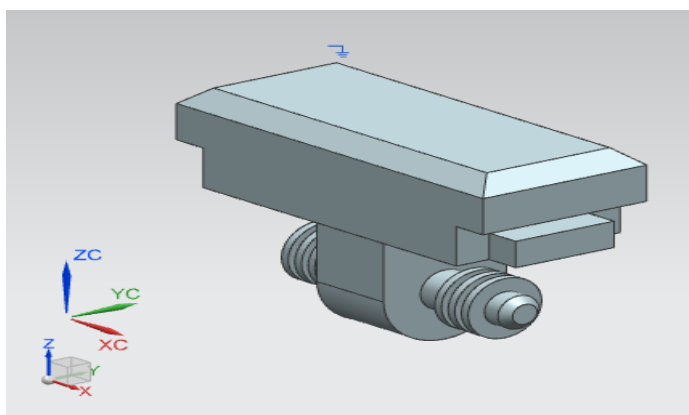
Το σύστημα δοκών κύλισης φορέα ανάληψης φορτίου έχει εξωτερικές διαστάσεις 16,2m. X 6m και εσωτερικές 12,8m. X 3,8m. Φέρει στο εσωτερικό του αύλακες κύλισης του φορέα κύλισης καθώς και αναμονές σύνδεσης με τα συστήματα των κολώνων στήριξης αυτού.



Εικόνα 4.2 Σύστημα δοκών κύλισης φορέα ανάληψης φορτίου

Φορέας ανάληψης φορτίου:

Ο φορέας ανάληψης φορτίου έχει διαστάσεις 4,6m. X 2m. X 2,9m. Το κάτω επίπεδο εφαρμόζει στις αύλακες κύλισης του συστήματος δοκών κύλισης του φορέα ενώ το κάτω μέρος του τεμαχίου πρόκειται να αναλάβει τον σύνδεσμο ανάληψης του εκάστοτε φορτίου προς ανύψωση.



Εικόνα 4.3 Μπούμα

5. Στατική ανάλυση συστήματος δοκών κύλισης φορέα ανάληψης φορτίου

Η στατική ανάλυση που θα παρατεθεί, εφαρμόστηκε στο σύστημα δοκών κύλισης του φορέα ανάληψης φορτίου το οποίο και αποτελεί το μέρος της υπερκατασκευής που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί σχεδιαστικά. Η στατική ανάλυση αποτελεί απαραίτητη και πρωτεύουσα διαδικασία για την υλοποίηση της συνολικής διεργασίας καθώς μελετά μεγέθη και απεικονίζει αποτελέσματα που αφορούν στην στατικότητα της υπό μελέτη κατασκευής, βάση των οποίων καθορίζονται στην συνέχεια οι περιορισμοί αλλά και οι επιθυμητοί στόχοι από την τοπολογική ανάλυση. Ακόμα, αποτελούν μέτρα σύγκρισης μεταξύ του αρχικού σχεδίου και του σχεδίου που προκύπτει μετά το πέρας της τοπολογικής ανάλυσης για κατανόηση των αλλαγών, απόδειξη ικανοποίησης των περιορισμών και γενικότερα απόδειξη ορθότητας των τελικών αποτελεσμάτων.

Η έναρξη της διεργασίας της στατικής ανάλυσης έγινε μετά το πέρας της σχεδίασης του προς επεξεργασία εξαρτήματος με την επιλογή της εφαρμογής **“pre/post”**, η οποία παρέχει τα εργαλεία για την μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

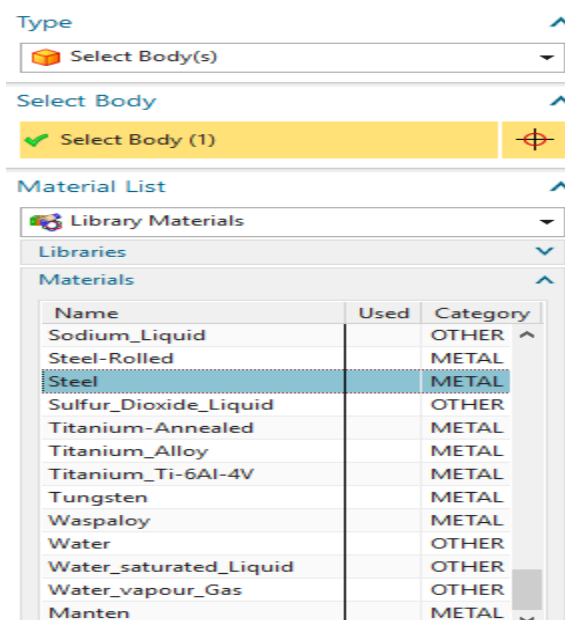
Στη συνέχεια με την επιλογή **“new FEM and simulation”** δημιουργήθηκε ένα νέο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και ένα αρχείο προσομοίωσης βασισμένο στο τρέχων μέρος, το οποίο επιμέρισε το μοντέλο μας σε 3d στοιχεία τετραεδρικών διατομών διαστάσεων 120mm. Ορίστηκε το υλικό του σε χάλυβα και έπειτα οι βαθμοί ελευθερίας καθώς και τα προς ανάληψη φορτία (4903325.014319425 N/500 tones).

The screenshot displays the 'Solution' setup window in NX Nastran. The 'Name' field is set to 'Solution 1'. The 'Solver' is 'NX Nastran'. The 'Analysis Type' is 'Structural'. The '2D Solid Option' is 'None'. The 'Solution Type' is 'SOL 101 Linear Statics - Global Constraints'. The checkbox 'Automatically Create Step or Subcase' is checked. Below this, the 'SOL 101 Linear Statics - Global Constraints' section is expanded, showing a 'Preview' button and a list of parameters. The 'Parameters (PARAM)' section includes 'Parameters' set to 'None', 'Inertia Relief (INREL)' unchecked, and 'Flat Shell Rz Stiffness Factor (K6ROT)' set to '100'. The 'DOF Sets' section is collapsed. The 'CWELD/CFAST Connection Parameters' and 'User Defined Text' are both set to 'None'.

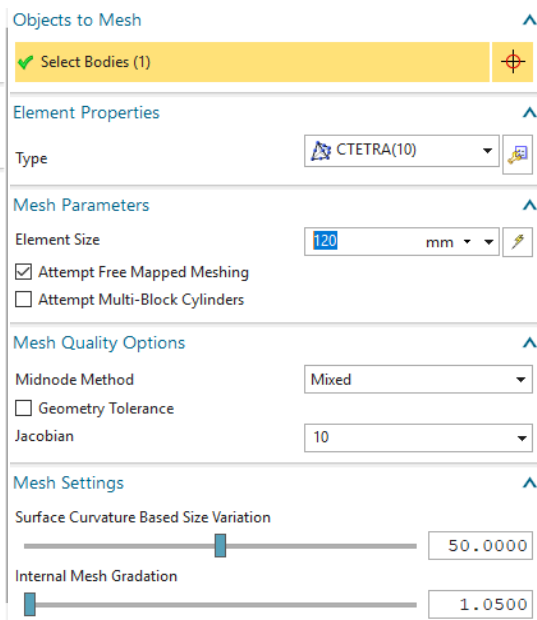
Solution	
Name	Solution 1
Solver	NX Nastran
Analysis Type	Structural
2D Solid Option	None
Solution Type	SOL 101 Linear Statics - Global Constraints
<input checked="" type="checkbox"/> Automatically Create Step or Subcase	

SOL 101 Linear Statics - Global Constraints	
Preview	
Parameters (PARAM)	
Parameters	None
<input type="checkbox"/> Inertia Relief (INREL)	
Flat Shell Rz Stiffness Factor (K6ROT)	100
DOF Sets	
CWELD/CFAST Connection Parameters	None
User Defined Text	None

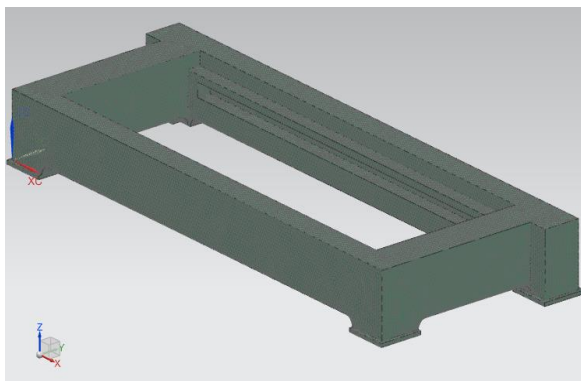
Εικόνα 5.1 Solution form (Linear Statics)



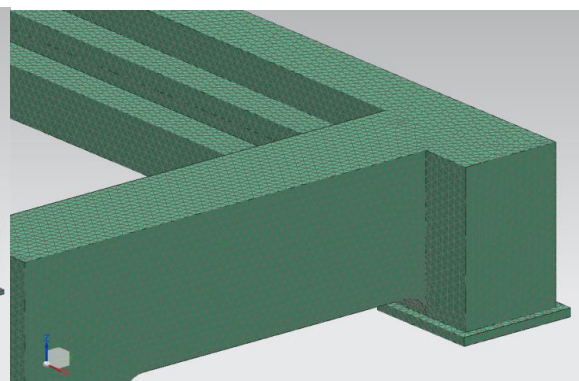
Εικόνα 5.2 Assign material



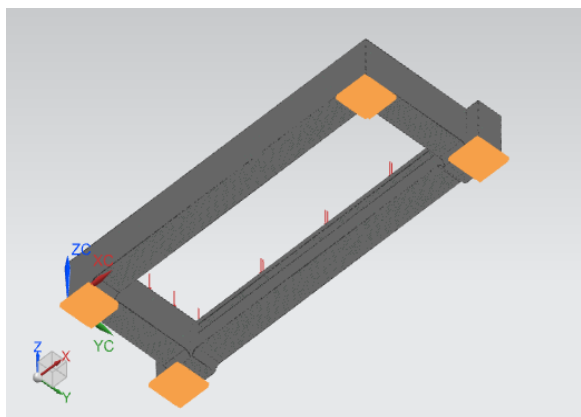
Εικόνα 5.3 Mesh creation



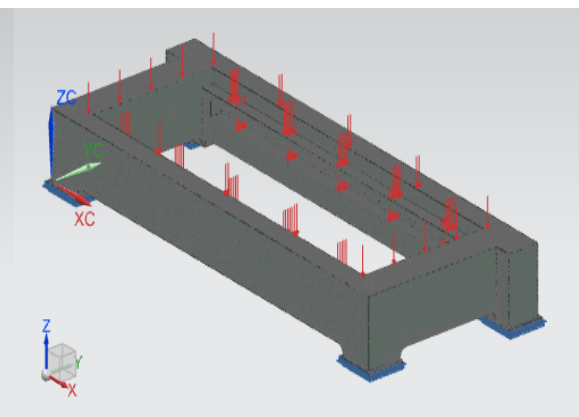
Εικόνα 5.4 3D Tetrahedral Mesh



Εικόνα 5.5 3D Tetrahedral Mesh (Zoomed in)



Εικόνα 5.6 Constraint type (fixed)



Εικόνα 5.7 Load Type (force)

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση ήταν ικανοποιητικά, δίνοντας την δυνατότητα για σημαντικές αλλαγές στη παραμετροποίηση-διαστασιολόγηση του υφιστάμενου σχεδίου καθώς η συμπεριφορά αυτού υποκείμενο στις φορτίσεις που ορίστηκαν, διαπιστώθηκε πως απέχει κατά πολύ από τα ανεκτά του όρια. Στην συνέχεια παρατίθενται τα ογκομετρικά χαρακτηριστικά της υπό μελέτης κατασκευής καθώς και τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης.

NX Nastran SOLID PROPERTIES

```

-----

Total Length (1D elements): 0.000000E+00 mm
Total Area (2D elements) : 0.000000E+00 mm2
Volume                  : 6.296833E+10 mm3

Total Mass                : 4.929791E+05 kg

Center of Gravity about Global CSYS
7.499167E+03  3.092690E+03  9.725359E+02 mm

Moment of Inertia about Global CSYS
I(xx)  I(yy)  I(zz) : 7.895904E+12  4.234325E+13  4.907164E+13 kg·mm2
I(xy)  I(yz)  I(xz) : 1.143250E+13  1.480988E+12  3.595424E+12 kg·mm2

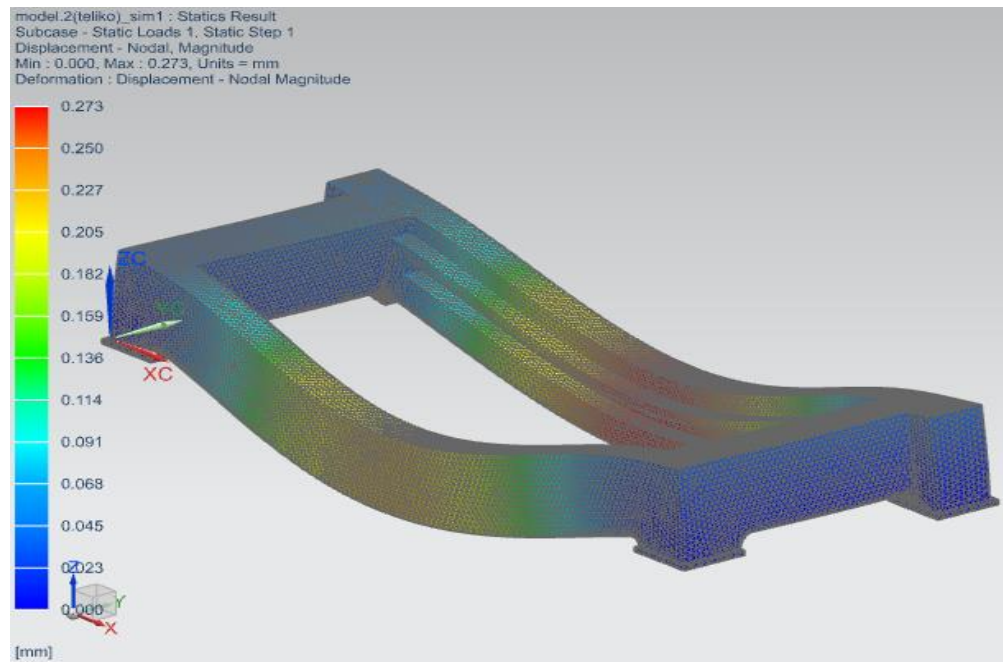
Moment of Inertia about Center of Gravity
I(xx)  I(yy)  I(zz) : 2.714419E+12  1.415306E+13  1.663251E+13 kg·mm2
I(xy)  I(yz)  I(xz) : -9.687027E+08  -1.770843E+09  2.477392E+07 kg·mm2

Principal Moments of Inertia
I(11)  I(22)  I(33) : 1.663251E+13  1.415306E+13  2.714419E+12 kg·mm2

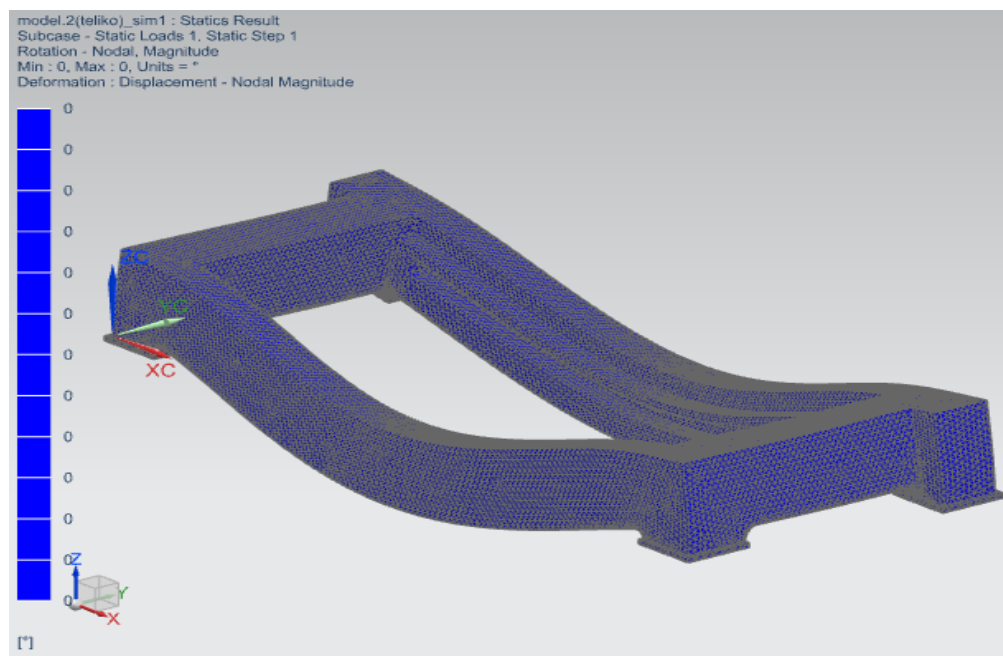
Principal Axes
 1 : -0.000002  0.000714  1.000000
 2 : -0.000085 -1.000000  0.000714
 3 : 1.000000  -0.000085  0.000002
-----

```

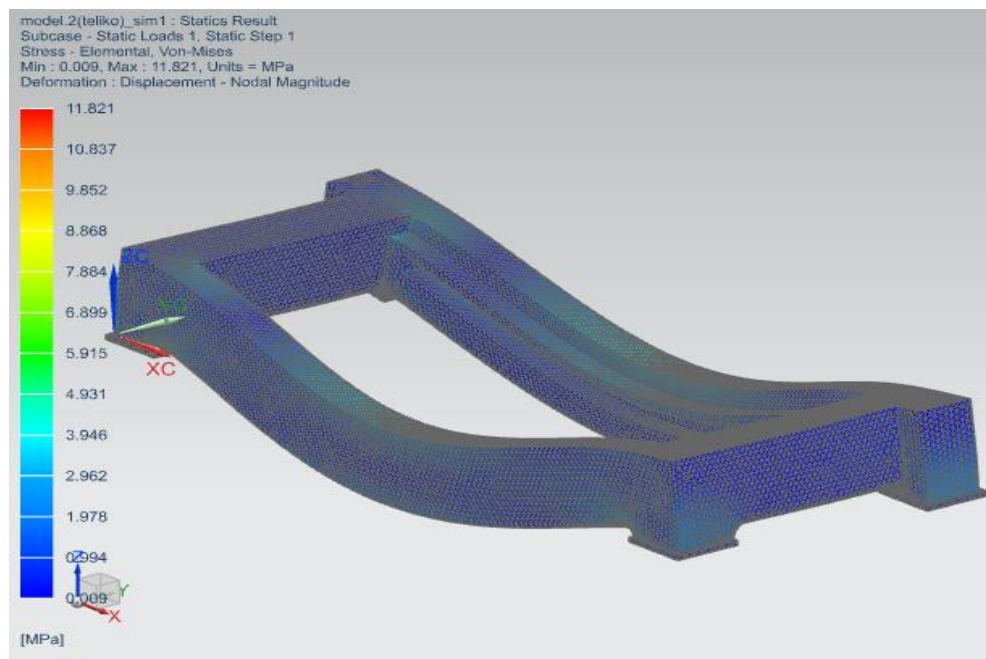
Εικόνα 5.8 Ογκομετρικά χαρακτηριστικά (1)



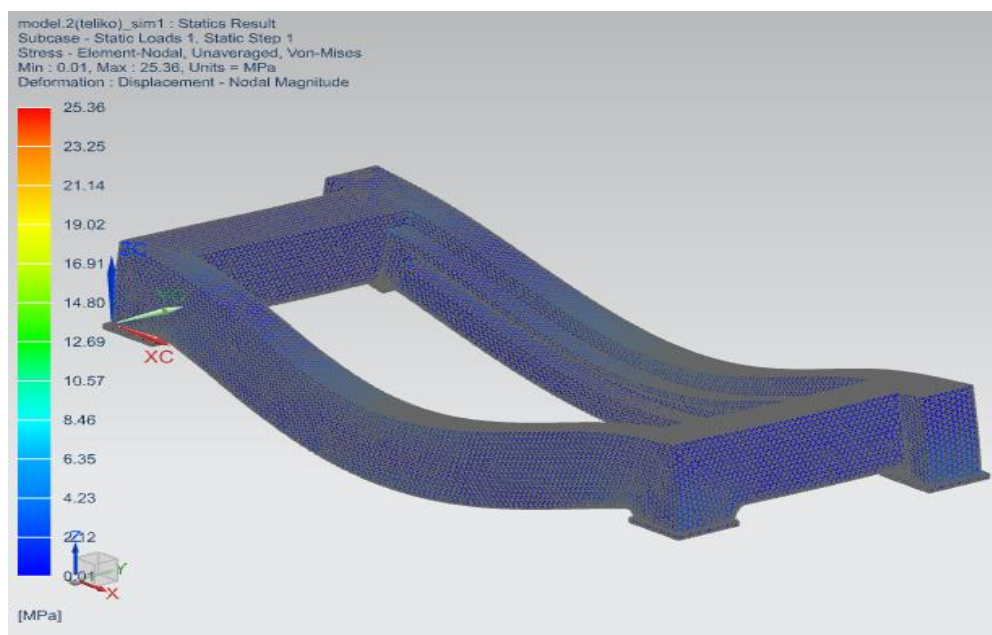
Εικόνα 5.9 Displacement – Nodal (1)



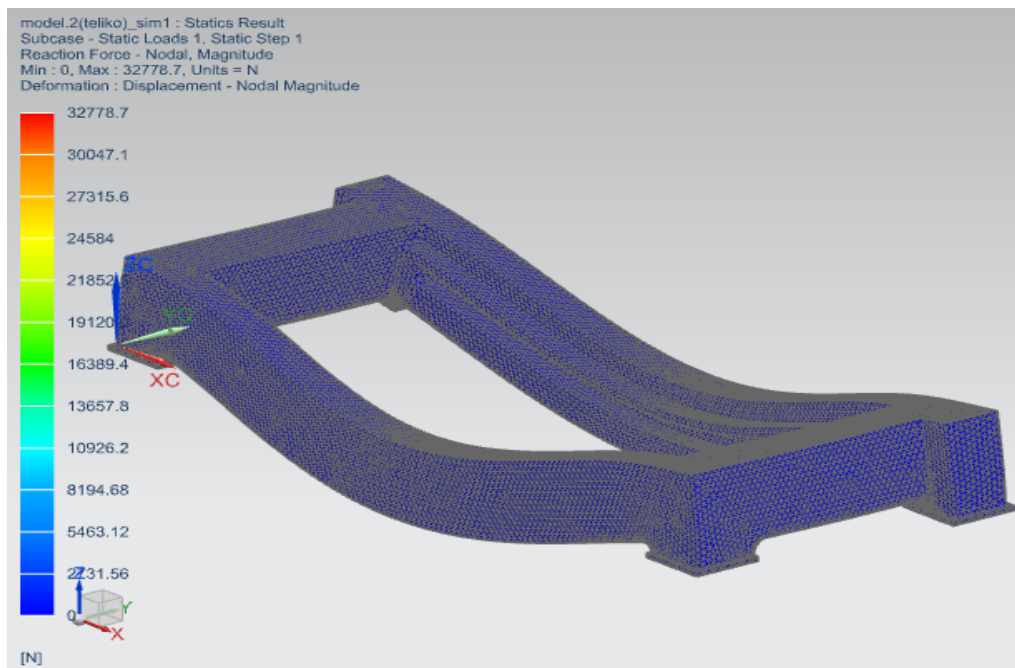
Εικόνα 5.10 Rotation – Nodal (1)



Εικόνα 5.11 Stress – Elemental (1)



Εικόνα 5.12 Stress – Element – Nodal (1)



6. Τοπολογική ανάλυση συστήματος δοκών κύλισης φορέα ανάληψης φορτίου

Η τοπολογική ανάλυση που εφαρμόζεται γίνεται με σκοπό την λήψη του βέλτιστου σχεδίου της υπό μελέτη κατασκευής, με γνώμονα τη μεγαλύτερη δυνατή μείωση υλικού που θα χρειάζεται ώστε να ανταπεξέρχεται στις καταπονήσεις για τις οποίες προορίζεται.

Αρχικά αναφέρεται πως στοιχεία και παράμετροι κοινοί με την στατική ανάλυση που προηγήθηκε χρησιμοποιήθηκαν ως είχαν. Παραδειγματικά, το υλικό της κατασκευής (steel), οι βαθμοί ελευθερίας, τα προς ανάληψη φορτία (4903325.014319425 N/500 tones), ενώ ακόμα η νέα ανάλυση εφαρμόστηκε στο ίδιο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (3d στοιχεία τετραεδρικών διατομών διαστάσεων 120mm).

Με βάση τα στοιχεία που προέκυψαν από τον υπολογισμό των ιδιοτήτων του στερεού που μελετάται από το υπολογιστικό μας πρόγραμμα και πιο συγκεκριμένα απασχολούμενοι με το βάρος του στερεού το οποίο είναι 4.929791×10^5 kg, προσδιορίστηκε το επιθυμητό προκύπτον βέλτιστο σχέδιο από την τοπολογική ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα τέθηκε η απαίτηση το νέο σχέδιο της κατασκευής μας να είναι τέτοιο ώστε να μπορεί αυτή να αναλάβει τα ίδια φορτία με την αρχική, ικανοποιώντας όλες τις απαιτήσεις καλής λειτουργίας και ασφάλειας, ζυγίζοντας όμως μεταξύ 220000 kg και 270000 kg. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης προέκυψαν ύστερα από την πραγματοποίηση 20 επαναλήψεων στην προσπάθεια επίτευξης του βέλτιστου σχεδιασμού με αξιόπιστα αποτελέσματα.

Στην συνέχεια παρατίθενται σχετικές εικόνες από τις βασικές παραμετροποιήσεις του υπολογιστικού προγράμματος, διάγραμμα προόδου/αξιοπιστίας ανάλυσης με γνώμονα τις επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και το τελικό αποτελέσματα/πρόταση της ανάλυσης για τον επιθυμητό βέλτιστο σχεδιασμό.

Solution	
Name	Solution 1
Solver	NX Nastran
Analysis Type	Structural
2D Solid Option	None
Solution Type	SOL 200 Topology Optimization
<input checked="" type="checkbox"/> Automatically Create Step or Subcase	

SQL 200 Topology Optimization	
Preview	
Bulk Data	
Optimization Parameters	
Topology Optimization Parameters (DOPTPRM)	None
Maximum Number of Design Cycles (DESMAX)	20
Penalty Law (DMRLAW)	RAMP
RAMP Penalty Value	5
Recovery Option (NASPRT)	Initial and All Improved
Parameters (PARAM)	
Parameters	None
Flat Shell Rz Stiffness Factor (K6ROT)	100
DOF Sets	
CWELD/FAST Connection Parameters	None
User Defined Text	None

Εικόνα 6.1 Solution form (Topology Optimization)

Name

Properties

Response Type: Compliance (CMPLNC)

Method: MIN

Εικόνα 6.2 Design compliance

Name

Properties

Response Type: Total Model Weight (WEIGHT)

Lower Limit: 220000 kg

Upper Limit: 270000 kg

Εικόνα 6.3 Design constraint

Modeling Object

Name: Design Area1

Label: 3

Properties

Description:

Card Name: DVTREL1

Area Type: Frozen Area

Label: 1

Element Selection Method: Specified Elements

Element Selection

☐ Group Reference

☒ Select Elements (1803)

Εικόνα 6.4 Design area

Modeling Object

Name: Manufacturing Constrair

Label: 4

Properties

Description:

Card Name: DMNCON

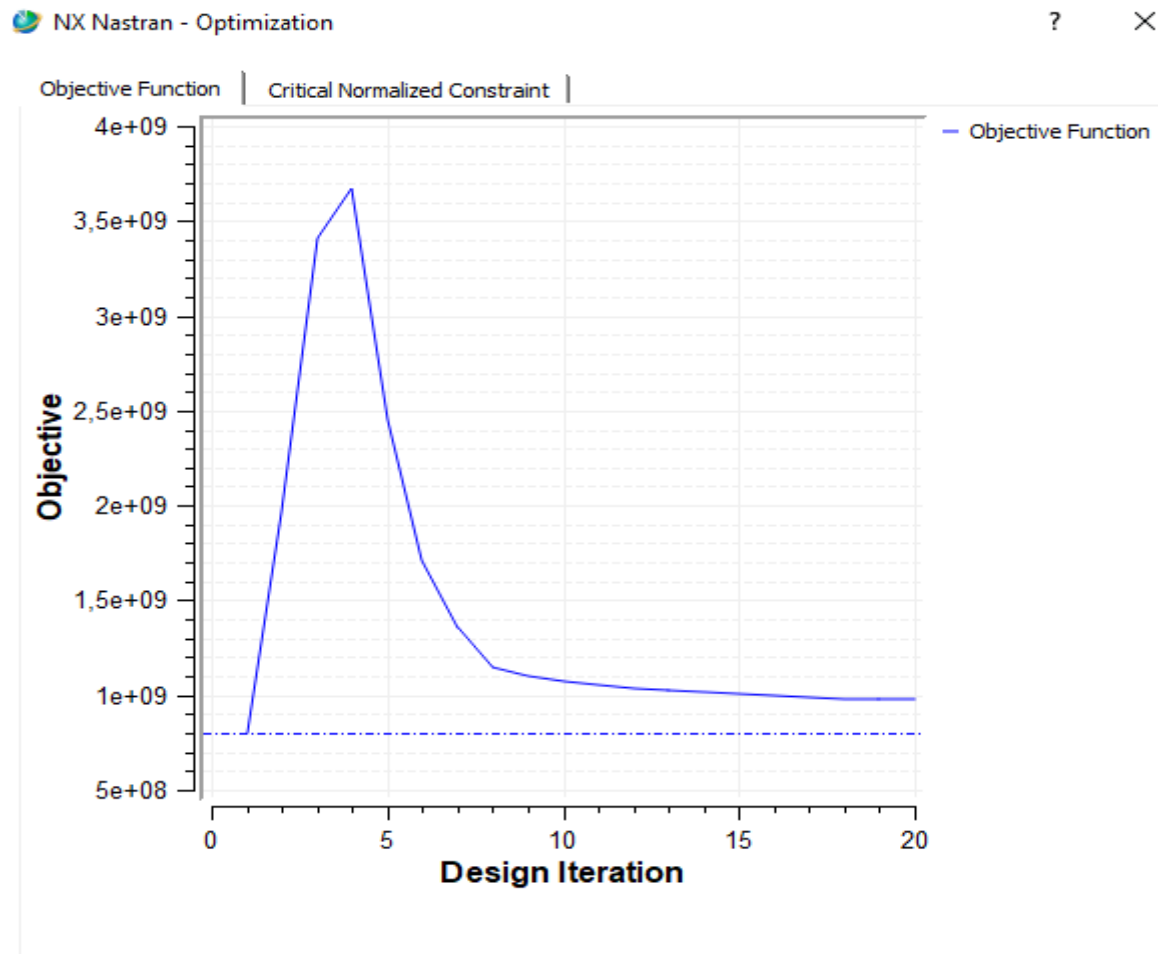
Constraint Type: Planar Symmetry (SYN)

☒ Point on Symmetry Plane

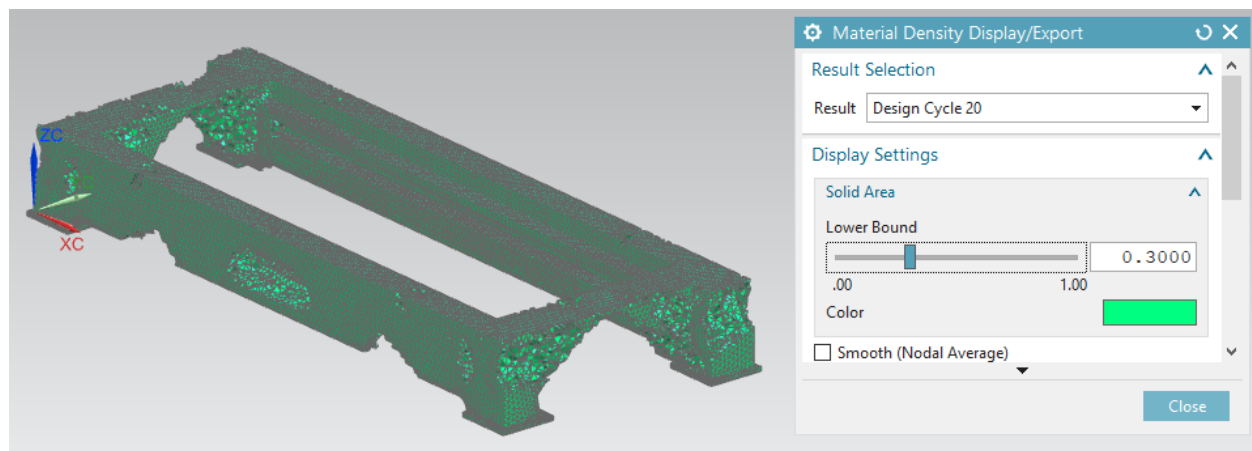
Vector Normal to Plane

☒ Specify Vector

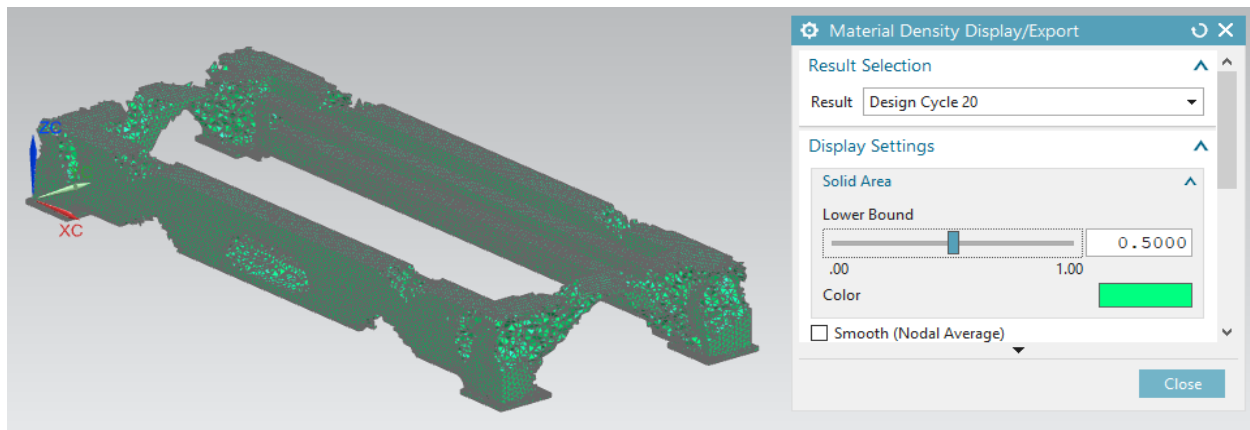
Εικόνα 6.5 Manufactory constraint



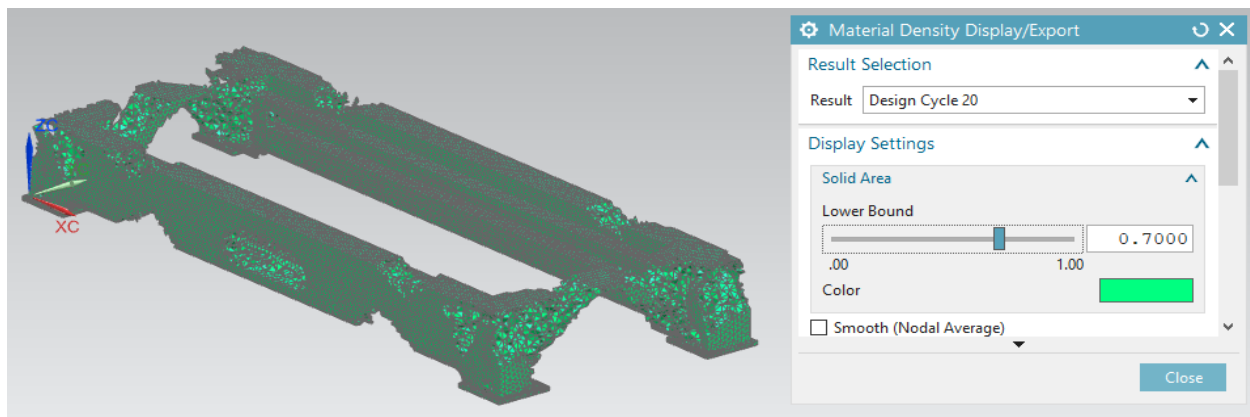
Εικόνα 6.7 Διάγραμμα σύγκλισης αντικειμενικής συνάρτησης



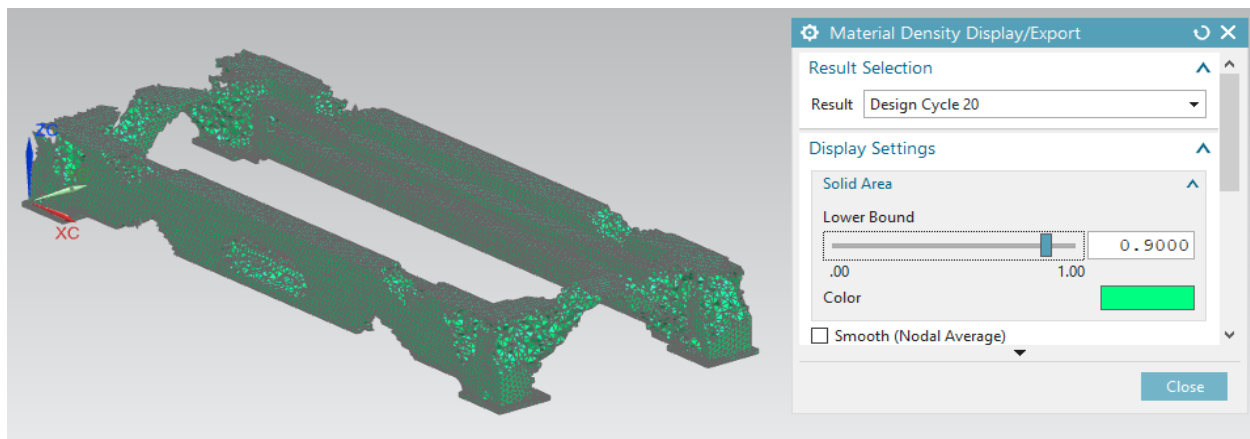
Εικόνα 6.8 Topology Optimization 20th Cycle 30%



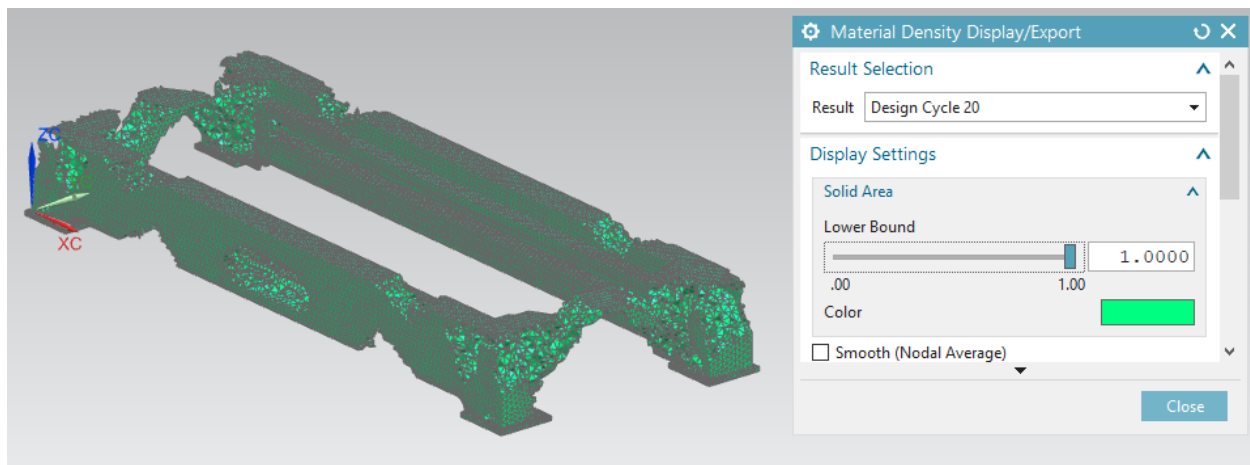
Εικόνα 6.9 Topology Optimization 20th Cycle 50%



Εικόνα 6.10 Topology Optimization 20th Cycle 70%



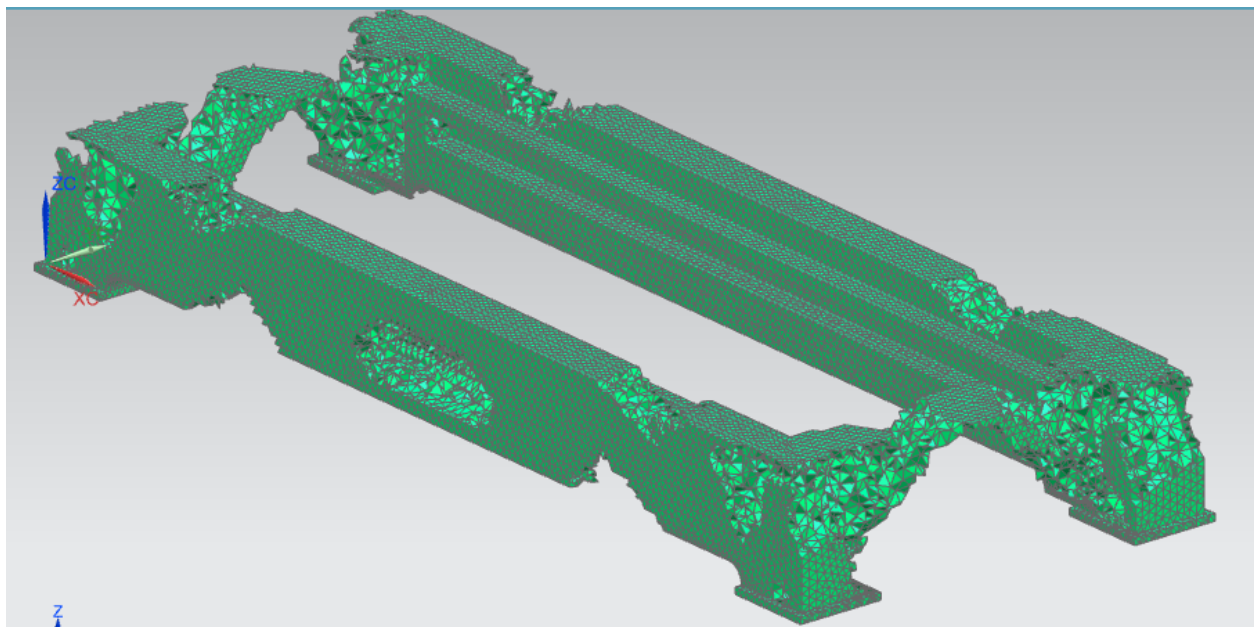
Εικόνα 6.11 Topology Optimization 20th Cycle 90%



Εικόνα 6.12 Topology Optimization 20th Cycle 100%

Τα αποτελέσματα της τοπολογικής ανάλυσης που παρατίθενται προέκυψαν από την 20^η επανάληψη ως βέλτιστη του υπολογιστικού μας προγράμματος και απεικονίζουν το αποτέλεσμα ανά 20% αυξανόμενο χαμηλότερο όριο επιτρεπόμενης αφαίρεσης στοιχείων.

Το τελευταίο με 100% αφαίρεση στοιχείων είναι αυτό που προέκυψε ως βέλτιστο και το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την νέα και τελική σχεδίαση της κατασκευής.



Εικόνα 6.13 Topology Optimization 20th Cycle 100% (Zoomed in)

7. Επανασχεδιασμός της υπό μελέτη κατασκευής-παράθεση σχεδίου

Μετά το πέρας της τοπολογικής ανάλυσης και εκμεταλλευόμενος τα αποτελέσματα αυτής προς προσδιορισμό του βέλτιστου σχεδιασμού της υπό μελέτη κατασκευής, υλοποιήθηκε ο επανασχεδιασμός της και έγινε έλεγχος των ογκομετρικών της χαρακτηριστικών τα οποία δίνουν αποτέλεσμα της επιζητούμενης μείωσης του βάρους της κατασκευής κατά 49.13%.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υπολογιστικού προγράμματος σχετικά με τα ογκομετρικά χαρακτηριστικά της επανασχεδιασμένης κατασκευής, καθώς και το τελικό σχέδιο αυτής.

```
NX Nastran SOLID PROPERTIES

-----

Total Length (1D elements): 0.000000E+00 mm
Total Area (2D elements) : 0.000000E+00 mm2
Volume                  : 3.203399E+10 mm3

Total Mass              : 2.507941E+05 kg

Center of Gravity about Global CSYS
7.499742E+03  3.093764E+03  1.044447E+03 mm

Moment of Inertia about Global CSYS
I(xx)  I(yy)  I(zz) : 4.081608E+12  2.237359E+13  2.574836E+13 kg·mm2
I(xy)  I(yz)  I(xz) : 5.817697E+12  8.108307E+11  1.964453E+12 kg·mm2

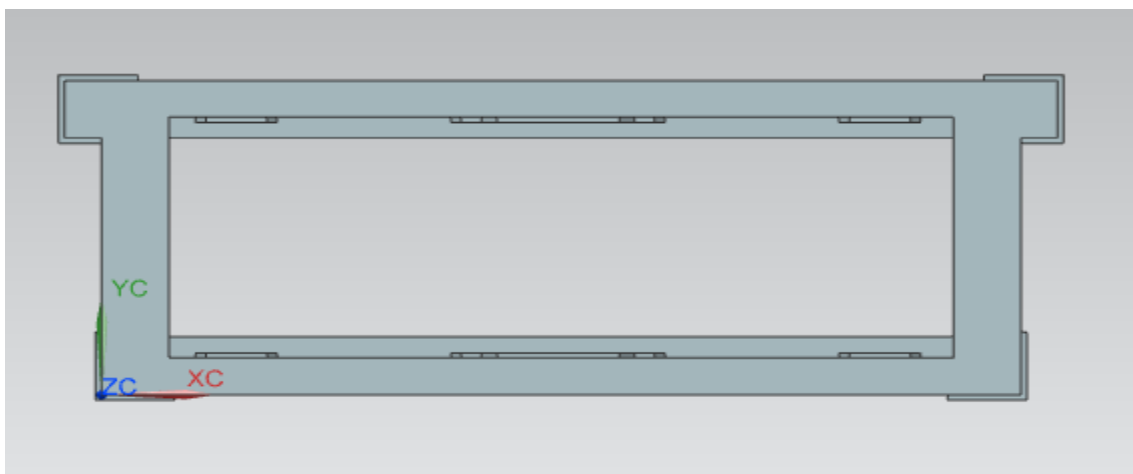
Moment of Inertia about Center of Gravity
I(xx)  I(yy)  I(zz) : 1.407579E+12  7.993807E+12  9.241715E+12 kg·mm2
I(xy)  I(yz)  I(xz) : -1.336787E+09  4.463164E+08  -3.828998E+07 kg·mm2

Principal Moments of Inertia
I(11)  I(22)  I(33) : 9.241715E+12  7.993808E+12  1.407579E+12 kg·mm2

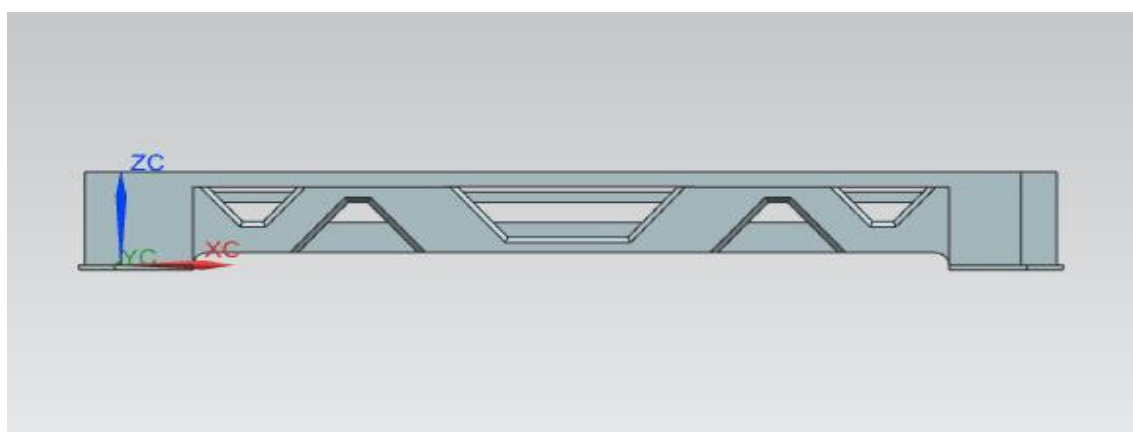
Principal Axes
1 : -0.000005  0.000358  -1.000000
2 : -0.000203  -1.000000  -0.000358
3 : -1.000000  0.000203  0.000005

-----
```

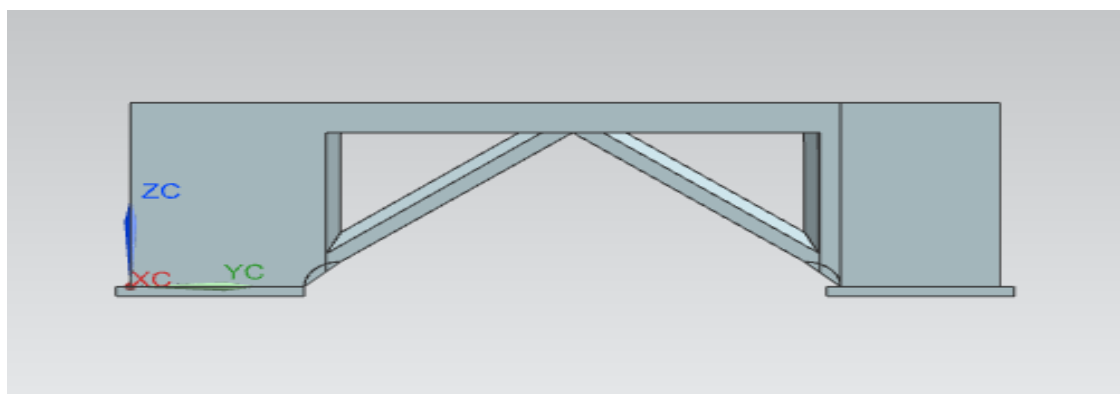
Εικόνα 7.1 Ογκομετρικά χαρακτηριστικά (2)



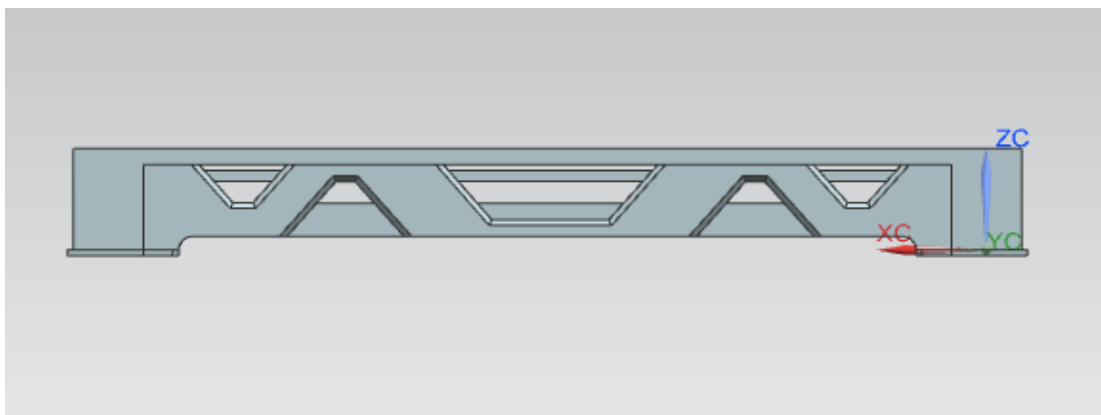
Εικόνα 7.2 Άνω όψη



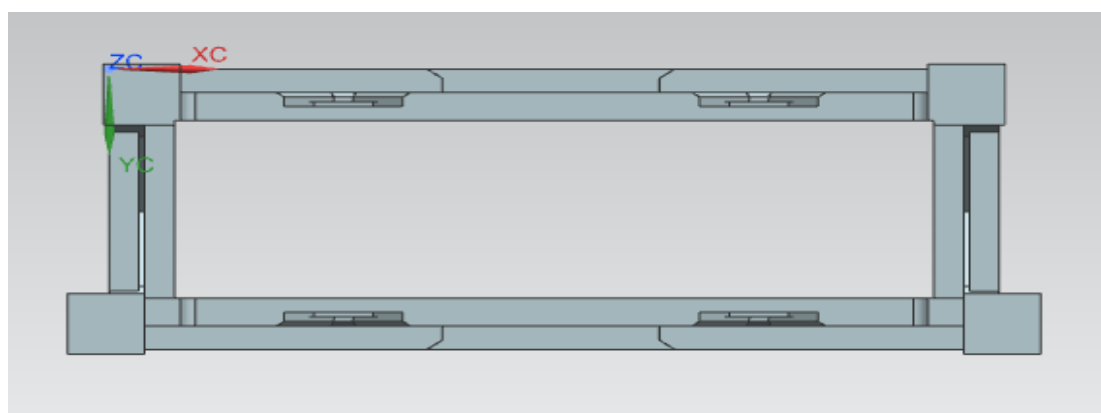
Εικόνα 7.3 Πρόσοψη



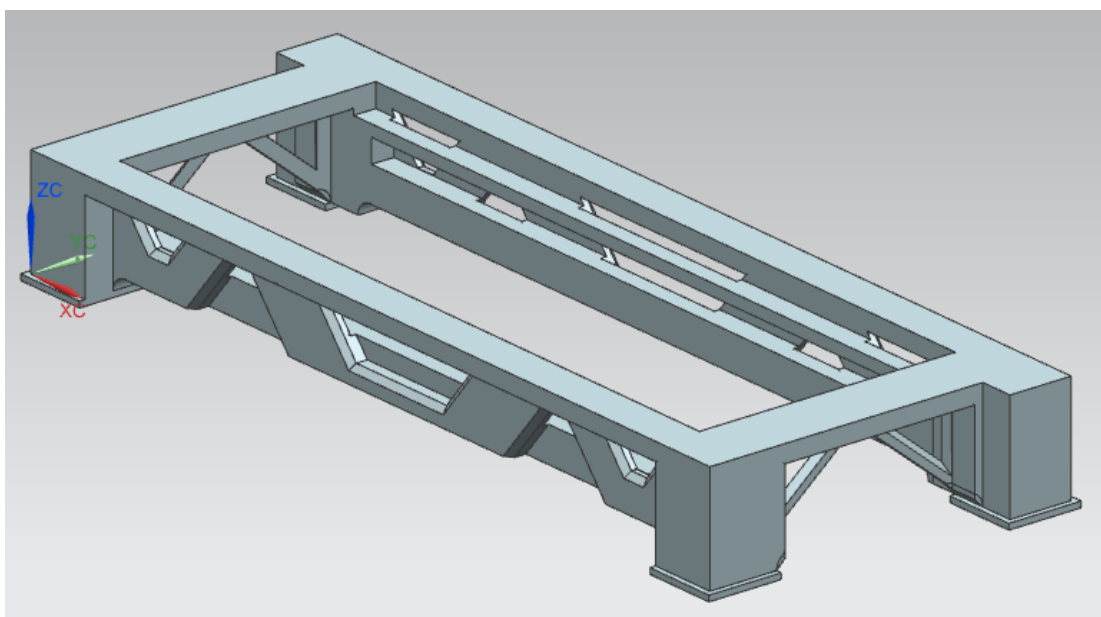
Εικόνα 7.4 Πλάγια όψη



Εικόνα 7.5 Πίσω όψη



Εικόνα 7.6 Κάτω όψη

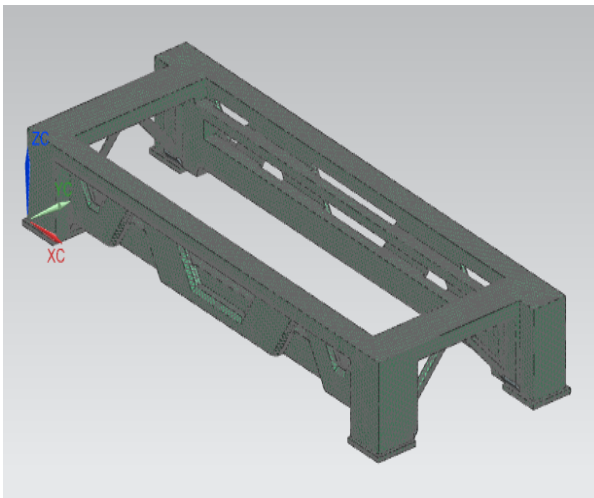


Εικόνα 7.7 Επανασχεδιασμένο αντικείμενο

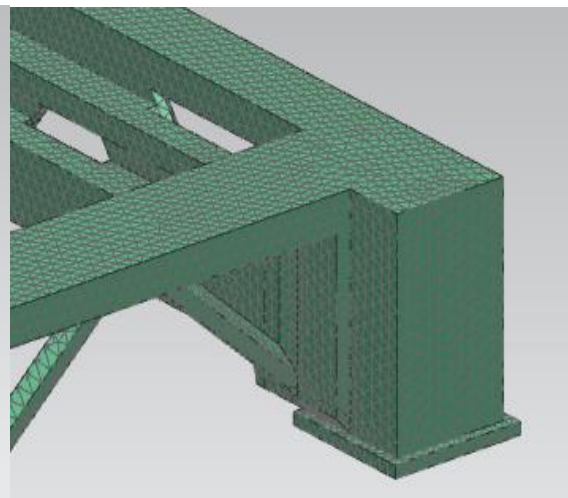
8. Επαναληπτικός στατικός έλεγχος

Μετά το πέρας της τοπολογικής ανάλυσης και την επιλογή του αποτελέσματος για τον βέλτιστο σχεδιασμό της τελικής μας κατασκευής, γίνεται επανέλεγχος του προκύπτοντάς για να σιγουρέψουμε την στατική του ορθότητα, υποκείμενο στις ίδιες φορτίσεις, περιορισμούς, γενικές και ειδικές απαιτήσεις.

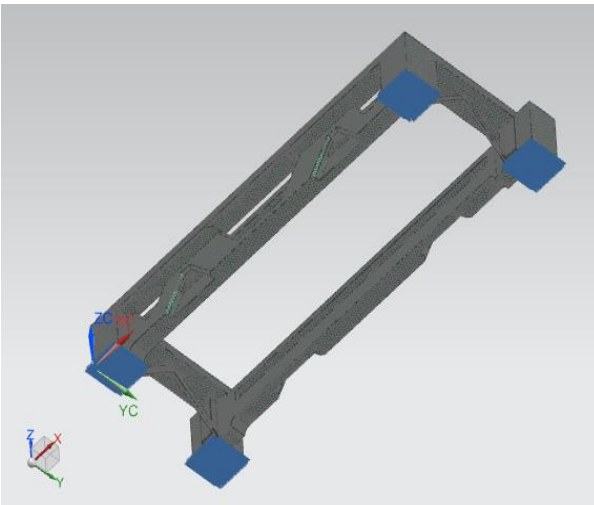
Παρατίθενται στη συνέχεια τα βασικότερα στάδια και αποτελέσματα της νέας ανάλυσης.



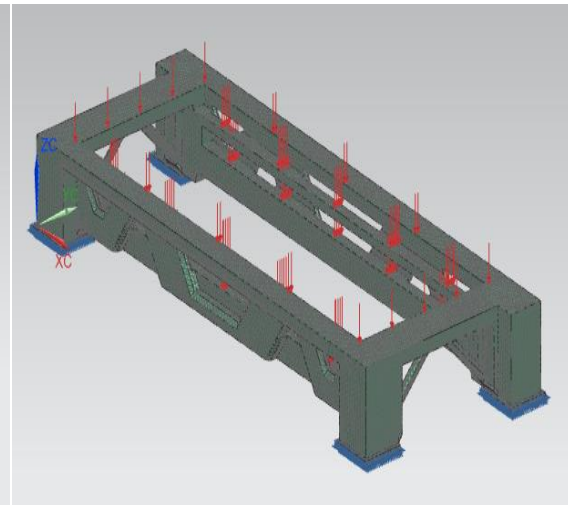
Εικόνα 8.1 3D Tetrahedral Mesh



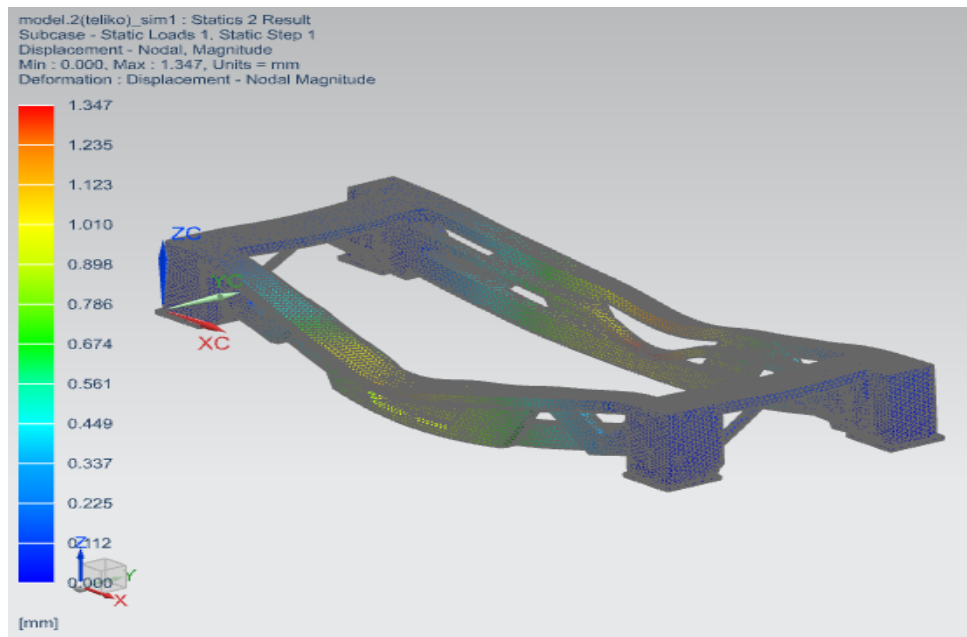
Εικόνα 8.2 3D Tetrahedral Mesh (Zoomed in)



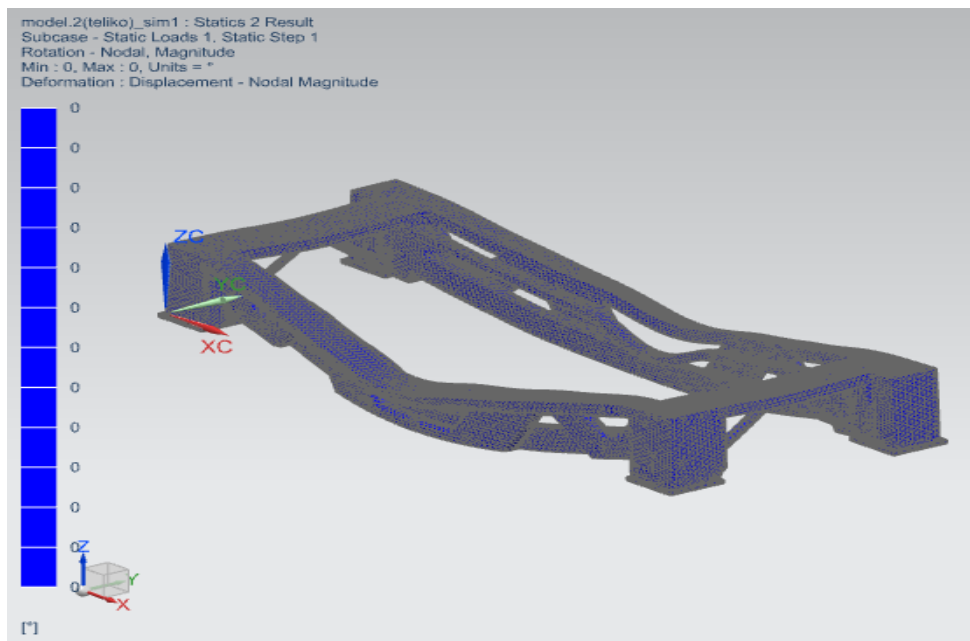
Εικόνα 8.3 Constraint type (fixed)



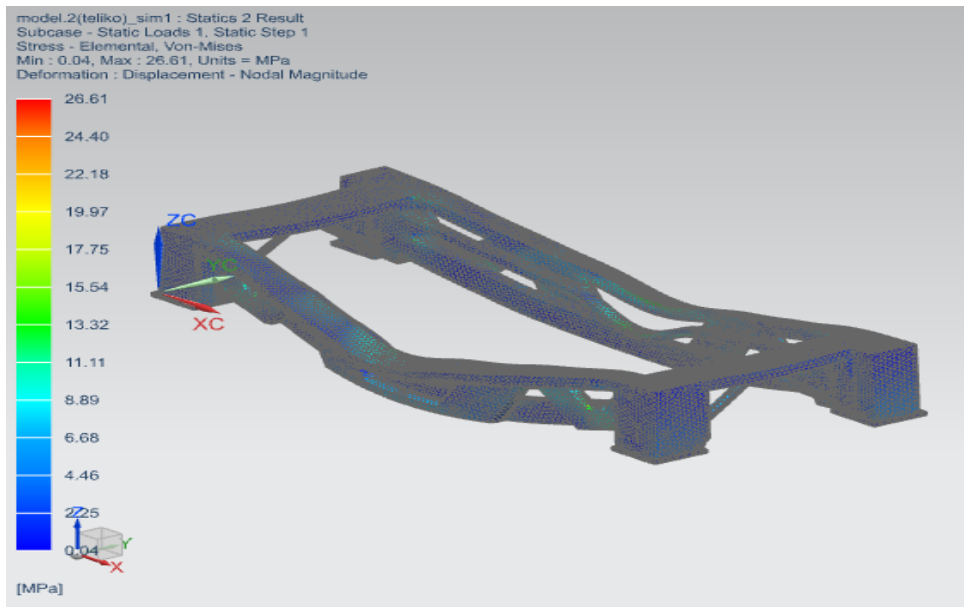
Εικόνα 8.4 Load Type (force)



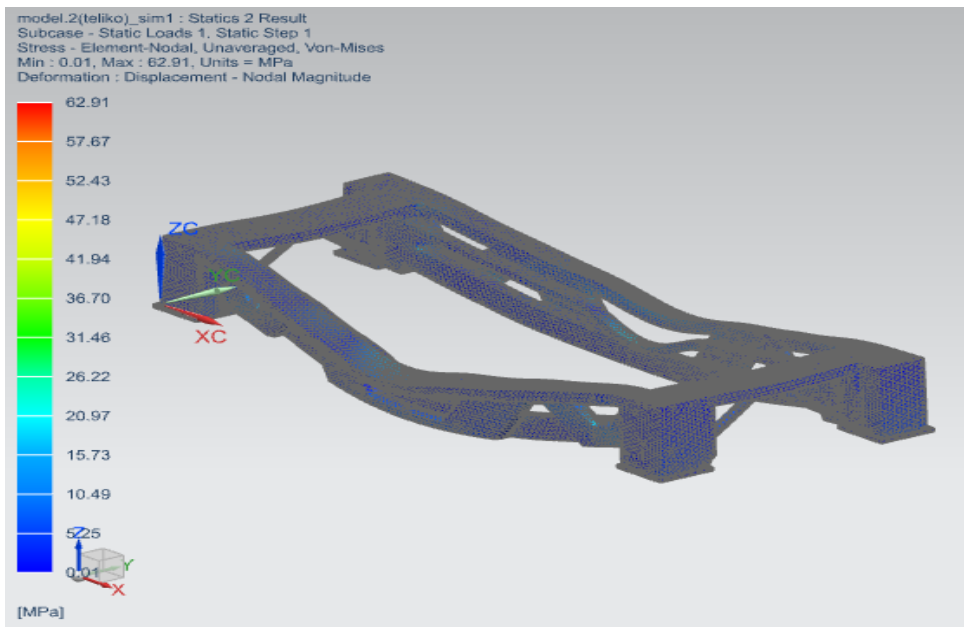
Εικόνα 8.5 Displacement – Nodal (2)



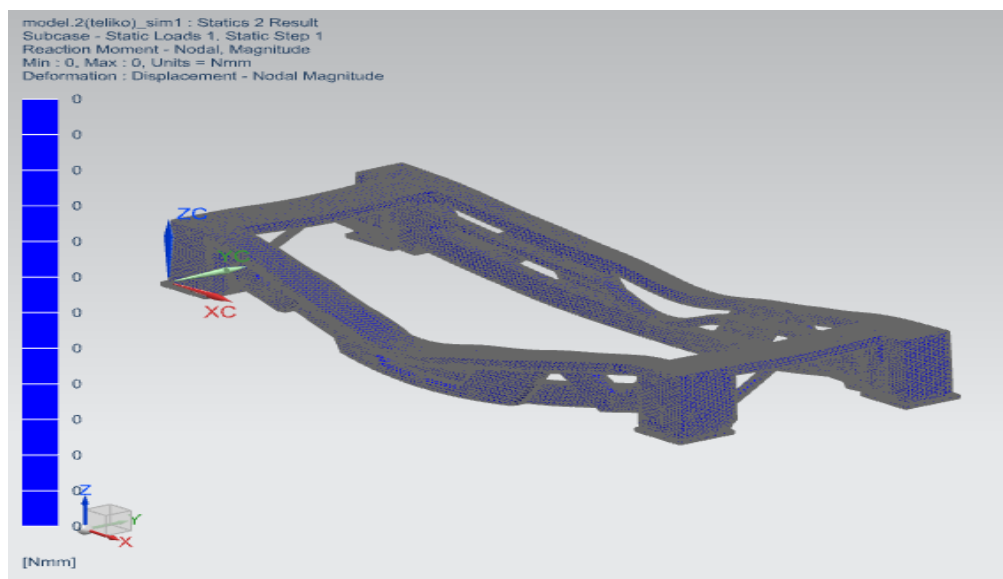
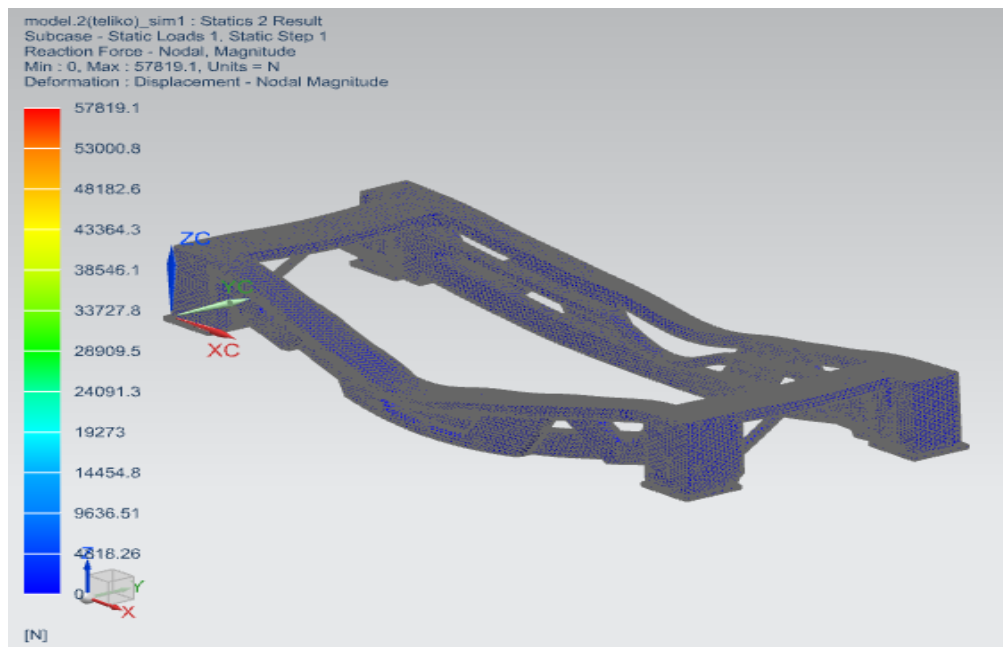
Εικόνα 8.6 Rotation – Nodal (2)



Εικόνα 8.7 Stress – Elemental (2)



Εικόνα 8.8 Stress – Element – Nodal (2)



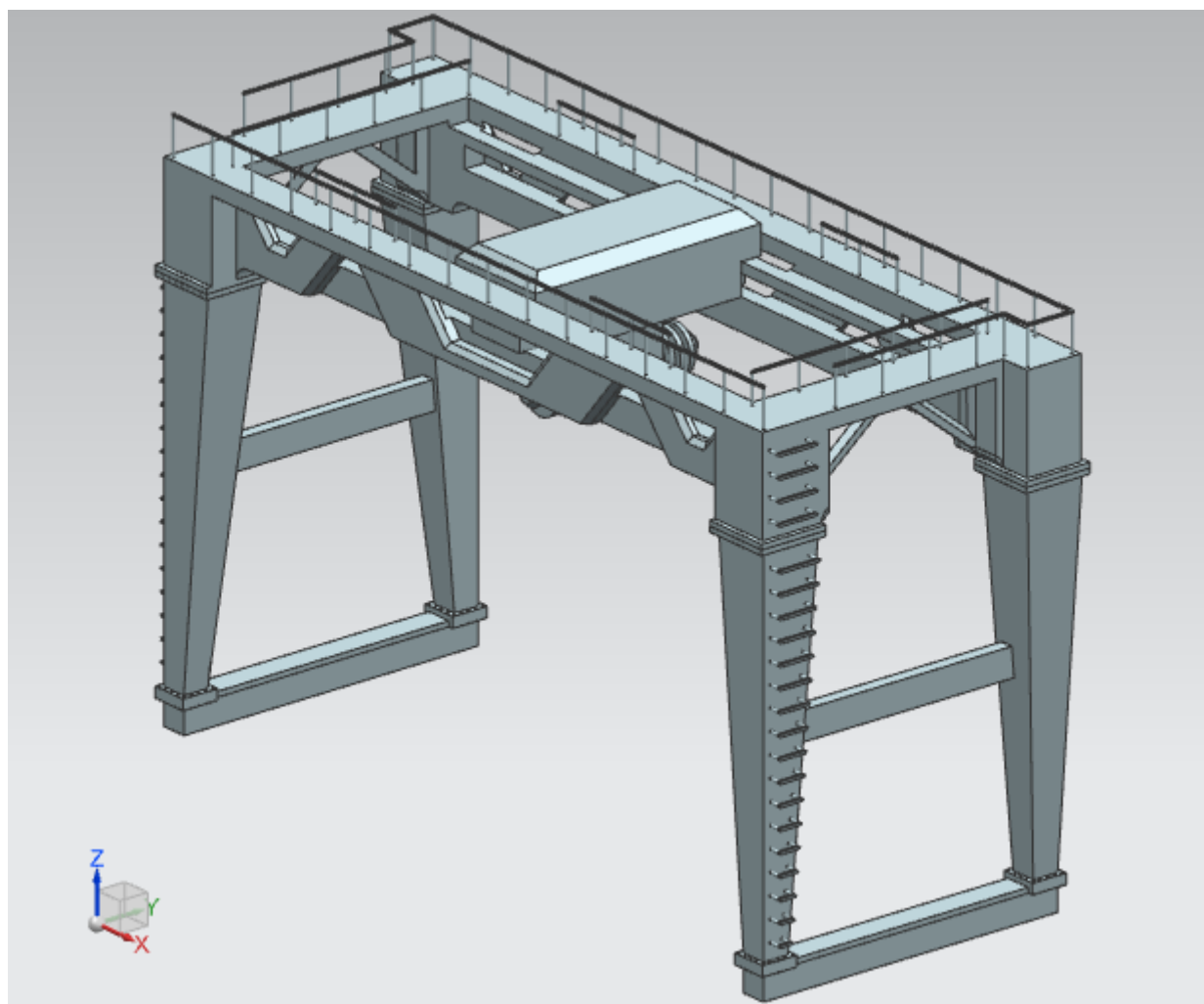
9. Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας όλες τις διαδικασίες για την εύρεση του μοντέλου με τον βέλτιστο σχεδιασμό της κατασκευής που μελετάται στη παρούσα διπλωματική εργασία, είναι εύκολο να αντιληφθούμε τη σπουδαιότητα της τοπολογικής ανάλυσης και πως εισάγοντας την στο σύνολο των διαδικασιών παραγωγής της μελέτης για τον καθορισμό του σχεδίου του αντικειμένου που θέλουμε να παράξουμε, είναι εύκολο να λάβουμε αποτελέσματα καθοριστικής σημασίας για την περάτωση του σχετικού έργου.

Επίσης αξιοσημείωτη είναι η αποτελεσματικότητα της τοπολογικής ανάλυσης, η οποία εξάγει αποτελέσματα συναρτήσει όλων των απαραίτητων περιορισμών και απαιτήσεων που διέπουν την ασφάλεια, την χρηστικότητα και την αισθητική.

Συμπεριλαμβανομένων αυτών, συμπεραίνουμε πως αποτελεί ένα ολοκληρωμένο εργαλείο στα χέρια των μηχανικών που ασχολούνται με τις διαδικασίες προμελέτης-σχεδιασμού προϊόντων προς παραγωγή, συνδυάζοντας πολύπλευρες οπτικές και παραμέτρους του εκάστοτε προς μελέτη αντικειμένου και με γνώμονα την ελαχιστοποίηση χρήσης πόρων και ότι αυτό συνεπάγεται.

Όσον αφορά τη μελέτη που παρατέθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, συνοπτικά αναφέρεται πως τα αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά, με μείωση βάρους της υπό μελέτη κατασκευής κατά 49.13% και με μετρήσεις των τάσεων που αναπτύσσονται στην τελική κατασκευή υποκείμενη σε ίδες φορτίσεις με την αρχική, που απέχουν πολύ από τα ανεκτά όρια του υλικού.



Εικόνα 9.1 Τελική μορφή γερανογέφυρας

Βιβλιογραφία

- [1] Κωνσταντόπουλος Γ., “Προηγμένες τεχνικές ελέγχου γερανών”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2008.
- [2] Κόκκαλης Π., “Ανάλυση και έλεγχος ανυψωτικών συστημάτων μεταφοράς τύπου γερανογέφυρας”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2013.
- [3] Αναγνωστάκης Π., “Διερεύνηση των δυνατοτήτων τοπολογικής βελτιστοποίησης του προγράμματος NX 12, για τις ανάγκες τεχνολογιών προσθετικής κατασκευής”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2019.
- [4] Κοκκινάκη Ε., “Τοπολογική βελτιστοποίηση κυψελωτών δομών με χρήση του προγράμματος NX”, Μεταπτυχιακή εργασία, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2018.
- [5] Larsson R., “Methodology for Topology and Shape Optimization: Application to a Rear Lower Control Arm”, Master’s thesis in Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, 2016.
- [6] Σαρασέλι Χ., “Μοντελοποίηση και δυναμική ανάλυση γονάτου ανάρτησης ρυμουλκούμενης πλατφόρμας”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, 2018.
- [7] Μαμαλάκης Μ., “Μελέτη ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών ασύγχρονης μηχανής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε 3 διαστάσεις”, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πάτρας, 2015.
- [8] Siemens NX, (2018, March 7), από Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Siemens_NX
- [9] Design areas in topology optimization, from Siemens’ Doc Center, https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:xid1128419:index_advanced:xid384581:xid1331664:xid1323064

- [10] Manufacturing constraints in topology optimization, from Siemens' Doc Center,
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:xid1128419:index_advanced:xid384581:xid1331664:xid1323103
- [11] Topology optimization post-processing results, from Siemens' Doc Center,
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:xid1128419:index_advanced:xid384581:xid1331664:xid1375298:xid1323083
- [12] Plotting the material density results, from Siemens' Doc Center,
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:xid1128419:index_advanced:xid384581:xid1331664:xid1375298:xid1375301
- [13] Verification solutions, from Siemens' Doc Center,
https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:xid1128419:index_advanced:xid384581:xid1331664:xid1375298:xid1375303