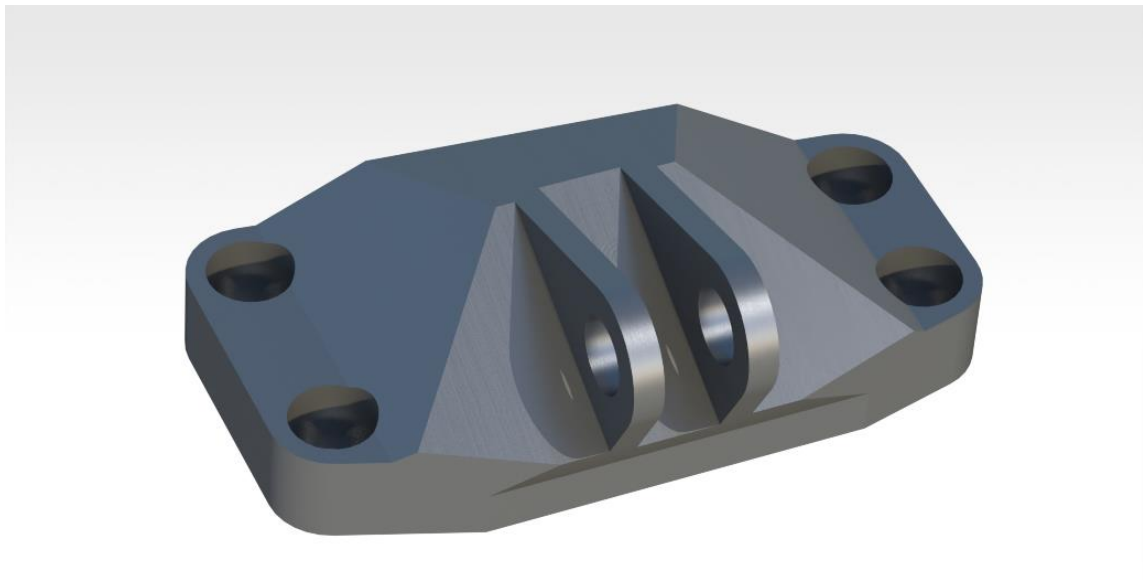


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τοπολογική βελτιστοποίηση δομικών στοιχείων με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων



ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: Δρόσος Νικόλαος
Α.Μ: 7054
ΕΠΙΒΛΕΠΟΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ιωάννης Διαμαντάκος

ΠΑΤΡΑ.....

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας παρουσιάζει ραγδαία εξέλιξη τα τελευταία χρόνια δίνοντας την δυνατότητα στους μηχανικούς-σχεδιαστές να σχεδιάζουν όσο το δυνατόν καλύτερες κατασκευές και καινοτόμα προϊόντα. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται συνεχώς, υπάρχει απαίτηση για σχεδιασμό κατασκευών με όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος και μέγεθος και μεγαλύτερη αντοχή στις συνθήκες λειτουργίας. Επίσης η μείωση του χρόνου και κόστους παραγωγής είναι ακόμη ένας παράγοντας που πρέπει να επιτευχθεί μέσω της βελτιστοποίησης τοπολογίας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει εισαγωγή στη μέθοδο βελτιστοποίησης τοπολογίας και θα εξετασθεί η διαδικασία με την οποία επιτυγχάνεται η βέλτιστη γεωμετρία μίας κατασκευής κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας και περιορισμών. Για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό πακέτο ANSYS 2020 και αρχικά θα διερευνηθούν δισδιάστατα (2D) προβλήματα που αντλήθηκαν από τη βιβλιογραφία [6,7]. Τέλος θα επιλυθεί τρισδιάστατο (3D) πρόβλημα βελτιστοποίησης τοπολογίας υποστηρίγματος μηχανής τζετ (jet engine bracket).



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1.1	Δομική βελτιστοποίηση (Structural optimization).....	6
1.2	Βελτιστοποίηση τοπολογίας.....	8
1.3	Σκοπός εργασίας.....	8
2	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ	10
2.1	Μέθοδοι βελτιστοποίησης τοπολογίας.....	10
2.2	Ορισμός προβλήματος βελτιστοποίησης τοπολογίας.....	12
2.3	Στόχοι βελτιστοποίησης τοπολογίας.....	13
2.4	Λειτουργία αλγορίθμου βελτιστοποίησης τοπολογίας.....	14
3	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ANSYS WORKBENCH	16
3.1	Διάγραμμα ροής εργασιών.....	18
3.2	Παράμετροι που επηρεάζουν την ανάλυση βελτιστοποίησης τοπολογίας.....	19
3.3	Μέθοδοι επίλυσης.....	22
3.4	Design Validation – Επαλήθευση της βέλτιστης γεωμετρίας.....	23
3.5	Περιορισμοί της μεθόδου βελτιστοποίησης τοπολογίας.....	24
4	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΣΕ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ (2D) ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	26
4.1	Αμφιέριστη δοκός σε κάμψη (δύναμη στο κέντρο της γεωμετρίας).....	26
4.2	Πρόβολος δοκός σε κάμψη.....	29
4.3	Παράδειγμα γέφυρας.....	32
4.4	Αμφιέριστη δοκός σε κάμψη (δύναμη στο κέντρο της πάνω ακμής της γεωμετρίας).....	35
4.5	Παρατηρήσεις.....	38
5	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΣΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ (3D) ΠΡΟΒΛΗΜΑ 40	
5.1	Σενάριο φόρτισης 1: Η φορά της δύναμης είναι κάθετη προς τα επάνω.....	44
5.2	Σενάριο φόρτισης 2: Η φορά της δύναμης είναι οριζόντια προς τα έξω.....	48
5.3	Σενάριο φόρτισης 3: Η φορά της δύναμης είναι κάθετη και προς τα έξω.....	52
5.4	Βελτιστοποιημένη γεωμετρία και για τα 3 σενάρια φόρτισης.....	57
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	60
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	61

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα προϊόν ή μια κατασκευή μπορεί να αποτελείται από ένα συνδυασμό εξαρτημάτων και υλικών τα οποία πρέπει να αντέξουν σε διαφορετικές φορτίσεις και συνθήκες παρουσιάζοντας καλή λειτουργική απόδοση. Σημαντικό ρόλο για την εύρυθμη λειτουργία ενός προϊόντος ή μιας κατασκευής παίζει ο σωστός σχεδιασμός της. Κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού επιλέγεται το υλικό, το μέγεθος και η συνδεσμολογία των κατάλληλων εξαρτημάτων, ώστε να παρέχουν επαρκή αντοχή και αποδοτική λειτουργία στην κατασκευή. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να αναπτύσσεται με ραγδαίους ρυθμούς στο πέρασμα των χρόνων, ο σχεδιαστής-μηχανικός καλείται να βρει την βέλτιστη επιλογή ώστε να σχεδιάσει καινοτόμα προϊόντα ή κατασκευές που θα είναι φιλικές προς το περιβάλλον και αποδοτικές.

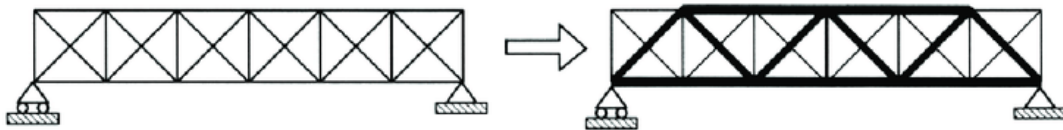
Παραδοσιακά, η διαδικασία του σχεδιασμού στηριζόταν στις πολλές δοκιμές οι οποίες οδηγούσαν σταδιακά στην επίτευξη του βέλτιστου σχεδίου. Σήμερα όμως η αγορά έχει ανάγκη από προϊόντα υψηλής ποιότητας με χαμηλό κόστος και σύντομο χρόνο σχεδίασης και κατασκευής. Η ύπαρξη σύγχρονων και ταχύτατων υπολογιστών σε συνδυασμό με την ανάπτυξη και την χρήση αριθμητικών μεθόδων και πεπερασμένων στοιχείων στην μηχανική, έχει επιτρέψει την εφαρμογή της δομικής βελτιστοποίησης σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών. Η χρήση επιστημονικών μεθόδων κατά τις διαδικασίες του σχεδιασμού και της κατασκευής βοηθάει τις εταιρίες να πετύχουν τους προαναφερθέντες στόχους και να παραμένουν ανταγωνιστικές.

1.1 Δομική βελτιστοποίηση (Structural optimization)

Σκοπός της δομικής βελτιστοποίησης είναι να επιτύχει το βέλτιστο σχεδιασμό ενός προϊόντος ή μιας κατασκευής ικανοποιώντας ταυτόχρονα ένα σύνολο κριτηρίων και περιορισμών που έχουν τεθεί κατά τη διαδικασία της σύλληψης της ιδέας. Η δομική βελτιστοποίηση χωρίζεται στον καθορισμό α) των μεταβλητών του σχεδιασμού, β) των περιορισμών του σχεδιασμού και γ) των στόχων του προβλήματος. Η λύση ενός προβλήματος δομικής βελτιστοποίησης είναι η εύρεση των μεταβλητών σχεδιασμού οι οποίες δίνουν τη βέλτιστη δυνατή κατασκευή βάσει των προκαθορισμένων περιορισμών. Οι μεταβλητές μπορεί να είναι για παράδειγμα τα δομικά χαρακτηριστικά, οι διαστάσεις και το είδος του υλικού μιας κατασκευής. Οι περιορισμοί περιλαμβάνουν παράγοντες όπως η γεωμετρία, η παραγωγικότητα (πόσο εύκολα ή δύσκολα μπορεί να παραχθεί-κατασκευαστεί ένα προϊόν ή μια κατασκευή), η αντοχή, η αξιοπιστία, η διάρκεια ζωής, και η αποδοτικότητα.

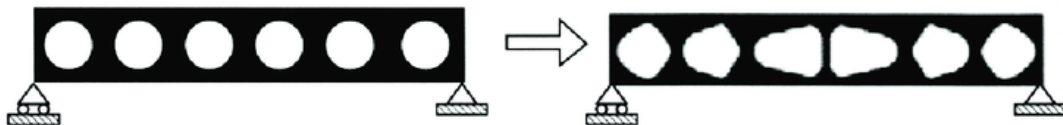
Για την επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού ο μηχανικός-σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει ανάλογα με τις ανάγκες του μεταξύ διάφορων μεθόδων βελτιστοποίησης. Οι τρεις κύριες προσεγγίσεις δομικής βελτιστοποίησης που υποστηρίζονται από τα εμπορικά λογισμικά ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (π.χ. ANSYS, Abaqus κ.α.) είναι οι εξής:

- Βελτιστοποίηση μεγέθους (size optimization). Συχνά αναφέρεται στην εύρεση των βέλτιστων διαστάσεων των επιμέρους δομικών μελών ενός σχεδίου ενώ ταυτόχρονα το σχήμα ή η σύνδεση μεταξύ των μελών της κατασκευής παραμένει σταθερό (μπορεί όμως να αφαιρούνται), κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Κάποιες παράμετροι που θα μπορούσαν να μεταβάλλονται είναι το εμβαδό μιας διατομής, η αδράνεια, το πάχος, το μήκος και το πλάτος ενός σχεδίου. Η συγκεκριμένη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι η πιο παλιά και αποτελεί συνήθως την πιο εύκολη προσέγγιση για την επίτευξη την απαραίτητης δομικής ακεραιότητας με ελαχιστοποίηση του βάρους της κατασκευής. Για παράδειγμα στην εικόνα 1 βλέπουμε την αφαίρεση δοκών οι οποίες είναι περιττές για την συγκεκριμένη φόρτιση.



Εικόνα 1: Βελτιστοποίηση μεγέθους

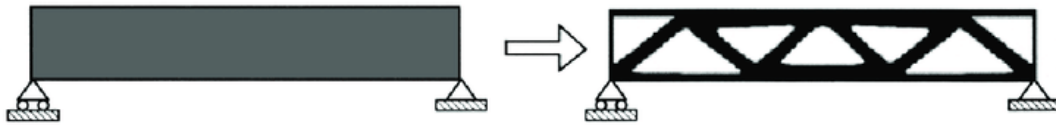
- Βελτιστοποίηση σχήματος (shape optimization). Η μέθοδος αυτή σχετίζεται με τη μεταβολή του σχήματος και των διαστάσεων των γεωμετρικών οντοτήτων που καθορίζουν το σχήμα της κατασκευής ή των επιμέρους μελών της που έχει ορίσει ο σχεδιαστής-μηχανικός. Ταυτόχρονα, ο αριθμός των μελών που απαρτίζουν μια κατασκευή και ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται παραμένουν σταθεροί. Έτσι πολλές φορές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μεταβλητές σχεδίασης, τα σημεία ελέγχου των εκάστοτε καμπυλών ή επιφανειών του μοντέλου. Συχνά γίνεται συνδυασμός της βελτιστοποίησης σχήματος και μεγέθους, προκειμένου να επιτευχθούν δομές οι οποίες να έχουν είτε σχήμα ελεύθερης μορφής είτε κάποιο τυποποιημένο (πχ. κύλινδρος) με διαστάσεις. Για παράδειγμα στην εικόνα 2 παρατηρούμε την αλλαγή του σχήματος των κενών του ελάσματος στην οποία επιτυγχάνεται μείωση της μάζας.



Εικόνα 2: Βελτιστοποίηση σχήματος

- Βελτιστοποίηση τοπολογίας (topology optimization). Είναι μια μαθηματική μέθοδος η οποία βελτιστοποιεί τη διάταξη του υλικού μέσα σε ένα προκαθορισμένο χώρο σχεδίασης, για ένα δεδομένο σύνολο φορτίων, συνοριακών συνθηκών και περιορισμών με στόχο τη μεγιστοποίηση της απόδοσης ενός συστήματος. Η συγκεκριμένη μέθοδος διαφέρει από τη βελτιστοποίηση μεγέθους και σχήματος υπό την έννοια ότι το σχέδιο μπορεί να πάρει οποιαδήποτε μορφή εντός του

χώρου σχεδίασης αντί για προκαθορισμένες διατάξεις-γεωμετρίες. Για παράδειγμα στην Εικόνα 3 βλέπουμε την σύνθετη γεωμετρία που απορρέει από το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 3. Βελτιστοποίηση τοπολογίας

1.2 Βελτιστοποίηση τοπολογίας

Μέσω της δομικής βελτιστοποίησης ο σχεδιαστής-μηχανικός μπορεί να βελτιστοποιήσει το μέγεθος, το σχήμα ή και την τοπολογία μιας κατασκευής. Η βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι η γενικότερη μορφή δομικής βελτιστοποίησης, καθώς μπορεί να αλλάξει το μέγεθος και το σχήμα των μελών της κατασκευής μέσω της επιλογής της τοπολογίας του υλικού. Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους Bendsoe και Kikuchi το 1988^{14} και εφαρμόζεται σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών, όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και η αεροναυπηγική, καθώς και σε διάφορους τομείς που σχετίζονται με τη μηχανική των υλικών. Η εφαρμογή της μεθόδου βελτιώνει σημαντικά το κόστος και την ποιότητα σχεδιασμού, επιτρέποντας στις εταιρίες να είναι ανταγωνιστικές και να παράγουν καινοτόμα προϊόντα και κατασκευές.

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι μια μαθηματική μέθοδος που αφορά την εύρεση της βέλτιστης κατανομής του υλικού εντός μιας προκαθορισμένης περιοχής σχεδίασης λαμβάνοντας υπ' όψιν συγκεκριμένες φορτίσεις και περιορισμούς. Η περιοχή αυτή, αρχικά διακριτοποιείται με πεπερασμένα στοιχεία (elements) και για κάθε ένα από τα οποία ορίζεται μία πυκνότητα υλικού. Ένας από τους στόχους της βελτιστοποίησης μπορεί να είναι ο προσδιορισμός της κατανομής του υλικού με σκοπό να μειωθεί η συνολική μάζα της κατασκευής. Έτσι, η πυκνότητα μπορεί να είναι είτε μηδέν που σημαίνει ότι το στοιχείο αφαιρείται (διατηρώντας όμως τα όρια της περιοχής σχεδίασης και τα σημεία φορτίσεων και οριακών συνθηκών), είτε ένα που σημαίνει στερεό στοιχείο.

1.3 Σκοπός εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνήσει τη μέθοδο βελτιστοποίησης τοπολογίας με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, ANSYS, χωρίς να δοθεί έμφαση στη θεωρία και τα μαθηματικά που υποστηρίζουν τις διάφορες μορφές βελτιστοποίησης. Θα επιλυθούν προβλήματα βασισμένα στη βιβλιογραφία, που αποτελούνται από φορείς κατασκευασμένους με γραμμικό ελαστικό υλικό και καταπονούνται κάτω από στατικά φορτία. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης θα είναι η μείωση του βάρους των φορέων.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η έννοια της δομικής βελτιστοποίησης και οι τρεις κυριότερες προσεγγίσεις που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο σχεδιαστής-μηχανικός για να επιτύχει το βέλτιστο σχέδιο. Έγινε, επίσης, εισαγωγή στην έννοια της βελτιστοποίησης τοπολογίας που είναι το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στα βασικά θεωρητικά στοιχεία της μεθόδου (όπως προκύπτουν από την διεθνή βιβλιογραφία), η κατανόηση των οποίων είναι σημαντική για την εφαρμογή της και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

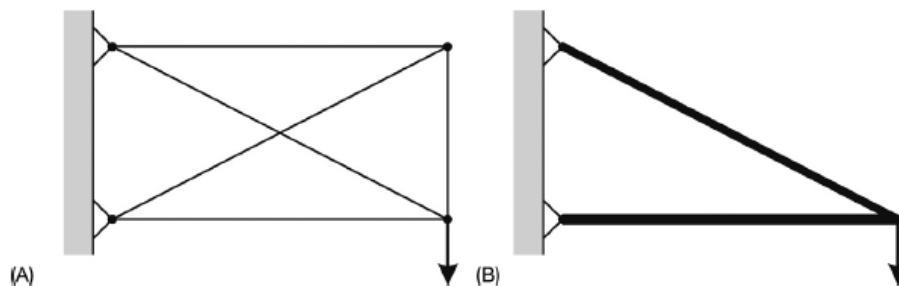
Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι δυνατότητες του υπολογιστικού εργαλείου ANSYS βάσει του οδηγού χρήσης του. Στο τέταρτο και πέμπτο κεφάλαιο επιλύονται προβλήματα τοπολογικής βελτιστοποίησης με σκοπό τη διερεύνηση της μεθόδου. Ειδικότερα, στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται δυσδιάστατα (2D) προβλήματα που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία, ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται βελτιστοποίηση τοπολογίας υποστηρίγματος κινητήρα αεροσκάφους με σκοπό τη μείωση του βάρους του. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα σχετικά με την τοπολογική βελτιστοποίηση.

2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ

Στη βελτιστοποίηση σχήματος και μεγέθους, το σχήμα και το μέγεθος των δομικών στοιχείων μια κατασκευής μπορούν να μεταβληθούν. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να πάρουν τιμές μεταξύ προκαθορισμένων ορίων, χωρίς να αλλάζει ο αριθμός των στοιχείων που απαρτίζουν τη κατασκευή (δεν γίνεται να αφαιρεθούν δομικά στοιχεία). Στην περίπτωση που ο σχεδιαστής – μηχανικός δεν γνωρίζει ποιο πρέπει να είναι το σχήμα ή το μέγεθος της κατασκευής τότε πρέπει να χρησιμοποιήσει την βελτιστοποίηση τοπολογίας για την επίλυση του προβλήματός του.

2.1 Μέθοδοι βελτιστοποίησης τοπολογίας

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας έχει δύο κύρια χαρακτηριστικά: α) οι ελαστικές ιδιότητες των υλικών (ως συνάρτηση της πυκνότητας) μπορούν να μεταβάλλονται στην περιοχή σχεδίασης, και β) το υλικό μπορεί να αφαιρεθεί μόνιμα από την περιοχή σχεδίασης.



Εικόνα 4. Βελτιστοποίηση τοπολογίας ενός δικτυώματος: (A) αρχική γεωμετρία, (B) τελική γεωμετρία – αφαίρεση στοιχείων (υλικού)

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης τοπολογίας κατηγοριοποιούνται στις ακόλουθες ομάδες:

- Μέθοδοι κριτηρίων βελτιστοποίησης (Optimality Criteria methods).

Οι μέθοδοι κριτηρίων βελτιστοποίησης είναι έμμεσες μέθοδοι βελτιστοποίησης και ικανοποιούν ένα σύνολο κριτηρίων που σχετίζεται με τη συμπεριφορά μιας κατασκευής. Συχνά, βασίζονται στην μέθοδο βελτιστοποίησης Kuhn-Tucker το οποίο σημαίνει ότι οι μέθοδοι αυτές είναι αρκετά αυστηρές. Οι μέθοδοι αυτοί πρωτοδημοσιεύτηκαν το 1951, ενώ αργότερα μελετητές βρήκαν ότι οι απαραίτητες προϋποθέσεις είχαν αναφερθεί από την μαθηματικό William Karush στην διατριβή του από το 1939. Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται σε προβλήματα με πολλές σχεδιαστικές μεταβλητές και μικρό αριθμό περιορισμών. Κατά κύριο λόγο βασίζονται στους πολλαπλασιαστές Lagrange και η λογική του βρίσκεται βέλτιστο σημείο είναι ένα σημείο σέλας, δηλαδή ένα γενικό μέγιστο (ελάχιστο) πάνω από τον τομέα των μεταβλητών επιλογής και ένα γενικό ελάχιστο (μέγιστο) (πολλαπλασιαστές), γι' αυτό το θεώρημα Karush-Kuhn-Tucker αναφέρεται μερικές

φορές ως θεώρημα σέλας. Η χρήση τους αφορά κυρίως προβλήματα με μεγάλο αριθμό μεταβλητών σχεδίασης και λίγους περιορισμούς.

Οι μέθοδοι κριτηρίων βελτιστοποίηση είναι οι εξής:

- α) Homogenization,
- β) Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP),
- γ) Level Set Method
- δ) Growth Method for Truss Structures.

- Ευρετικές ή διαισθητικές μέθοδοι (Heuristic or Intuitive methods).

Οι ευρετικές μέθοδοι προέρχονται από τη διαίσθηση και τις παρατηρήσεις κατά τις διαδικασίες της μηχανικής ή ακόμη και σε παρατηρήσεις βιολογικών συστημάτων. Η χρήση αυτών των μεθόδων δεν εξασφαλίζει πάντα την εύρεση της βέλτιστης λύσης, αλλά μπορούν να παρέχουν αποτελεσματικές και βιώσιμες προτάσεις. Στις ευρετικές μεθόδους βελτιστοποίησης τοπολογίας ανήκουν οι εξής:

- α) Fully Stressed Design (FSD),
- β) Computer-Aided Optimization (CAO),
- γ) Soft Kill Option (SKO)
- δ) Evolutionary Structural Optimization (ESO),
- ε) Bidirectional ESO (BESO),
- στ) Sequential Element Rejection and Admission (SERA), και
- ζ) Isolines/Isosurfaces Topology Design (ITD).

Τα περισσότερα εμπορικά πακέτα λογισμικού Πεπερασμένων Στοιχείων (όπως το ANSYS) χρησιμοποιούν τη βελτιστοποίηση τοπολογίας με βάση τον όγκο. Η προσέγγιση αυτή είναι γνωστή ως Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται μόνο μία μεταβλητή σχεδιασμού σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Αυτή η μεταβλητή είναι μια εικονική πυκνότητα (ρ_e) η οποία παίρνει τιμές μεταξύ $0 < \rho_{\min} \leq \rho_e \leq 1$. Αυτό σημαίνει ότι ο όγκος ενός πεπερασμένου στοιχείου πολλαπλασιάζεται με αυτή την εικονική πυκνότητα και με αυτόν τον τρόπο υπολογίζεται ο πραγματικός του όγκος. Ο όγκος της σχεδίασης της κατασκευής δίνεται από την παρακάτω εξίσωση

$$V = \sum_{e=1}^N v_e \rho_e$$

όπου N είναι ο συνολικός αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουν τον χώρο σχεδίασης, v_e και ρ_e είναι ο όγκος και η εικονική πυκνότητα, αντίστοιχα, του e -οστού στοιχείου και V είναι ο όγκος της σχεδίασης της κατασκευής.

2.2 Ορισμός προβλήματος βελτιστοποίησης τοπολογίας

Είναι κοινώς αποδεκτό ότι η σωστή διατύπωση και ο ορισμός ενός προβλήματος απαιτεί περισσότερο από το 50% της συνολικής προσπάθειας που απαιτείται για την επίλυσή του. Επομένως, είναι σημαντικό να ακολουθηθούν σαφώς καθορισμένες διαδικασίες για τον σωστό ορισμό ενός προβλήματος σχεδιαστικής βελτιστοποίησης.

Η σημασία του σωστού ορισμού ενός προβλήματος βελτιστοποίησης τοπολογίας πρέπει να τονιστεί, καθώς η βέλτιστη λύση εξαρτάται από το πόσο καλά έχει οριστεί το προς επίλυση πρόβλημα. Για παράδειγμα, εάν ο σχεδιαστής-μηχανικός ξεχάσει να συμπεριλάβει ένα κρίσιμο σχεδιαστικό περιορισμό η βέλτιστη υπολογιζόμενη λύση είναι πιθανό να τον παραβιάζει. Επίσης, εάν έχουν οριστεί πάρα πολύ περιορισμοί, ή είναι αντιφατικοί μεταξύ τους, είναι πιθανό να μην μπορεί να βρεθεί λύση στο πρόβλημα.

Για τον ορισμό ενός προβλήματος βελτιστοποίησης σχεδιασμού ακολουθούνται τα παρακάτω πέντε (5) βήματα:

1. Περιγραφή του προβλήματος. Η διαδικασία του ορισμού τους προβλήματος ξεκινά με μια λεπτομερή περιγραφή του. Στο βήμα αυτό περιγράφονται και ορίζονται οι σχεδιαστικοί στόχοι του προβλήματος, ποια κριτήρια πρέπει να ικανοποιούνται και τι θα επιτευχθεί με τη βελτιστοποίηση.
2. Συλλογή δεδομένων και πληροφοριών. Σε αυτό το βήμα συλλέγονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για το πρόβλημα που θα επιλυθεί (ιδιότητες και κόστος υλικών, απαιτήσεις απόδοσης, περιορισμοί πόρων κ.α.)
3. Αναγνώριση και καθορισμός των μεταβλητών-παραμέτρων σχεδίασης. Σε αυτό το βήμα αναγνωρίζονται και καθορίζονται οι σχεδιαστικές μεταβλητές που περιγράφουν το σύστημα. Ο αριθμός των παραμέτρων είναι σημαντικός καθώς επηρεάζει το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο αριθμός τόσο μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς και υπολογιστικός χρόνος απαιτείται.
4. Αναγνώριση και καθορισμός των κριτηρίων που πρέπει να βελτιστοποιηθούν. Τα κριτήρια αξιολόγησης και τερματισμού της διαδικασίας βελτιστοποίησης καθορίζονται κατά τη διάρκεια του βήματος αυτού. Τα κριτήρια αυτά ονομάζονται αντικειμενικές συναρτήσεις και ανάλογα με το πρόβλημα πρέπει να μεγιστοποιηθούν ή να ελαχιστοποιηθούν.
5. Αναγνώριση και καθορισμός των περιορισμών. Το τελικό βήμα στη διαδικασία ορισμού ενός προβλήματος βελτιστοποίησης είναι ο καθορισμός των περιορισμών. Για παράδειγμα, σε μια κατασκευή δεν πρέπει να υπάρχει αστοχία κάτω από φορτία στις καθορισμένες συνθήκες λειτουργίας της.

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να οριστεί μαθηματικά με τον εξής τρόπο:

Ελαχιστοποίηση: $f(x)$

Περιορισμοί: $g_i(x) \leq 0, i = 1, m$

$h_j(x) = 0, j = 1, p$

$x_k^l \leq x_k \leq x_k^u, k = 1, n$

Όπου, $f(x)$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση που θα ελαχιστοποιηθεί ικανοποιώντας τους περιορισμούς $g(x)$ και $h(x)$ αντίστοιχα. Τα m και p είναι ο αριθμός των περιορισμών ισότητας και ανισότητας, το x είναι το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης, το n είναι το πλήθος των μεταβλητών σχεδίασης και τέλος τα x^l και x^u είναι αντίστοιχα το κάτω και άνω όριο για της μεταβλητής σχεδίασης x_k .

2.3 Στόχοι βελτιστοποίησης τοπολογίας

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης τοπολογίας ακολουθεί συγκεκριμένα βήματα. Αρχικά ορίζεται η περιοχή σχεδίασης, δηλαδή η περιοχή της γεωμετρίας που μπορεί να μεταβάλλεται και αντίστοιχα η περιοχή που θα παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια για την επίλυση του προβλήματος εφαρμόζεται μια στατική ανάλυση ή ανάλυση ιδιομορφών με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis). Στην συγκεκριμένη προσέγγιση γίνεται διακριτοποίηση της γεωμετρίας με περασμένα στοιχεία και ορίζονται οι ιδιότητες υλικού, τα φορτία και οι συνοριακές συνθήκες.

Στόχος της βελτιστοποίησης τοπολογίας είναι η εύρεση μιας τοπολογίας (κατανομής υλικού) που θα έχει την απαιτούμενη δυσκαμψία σε συνδυασμό με τη μέγιστη δυνατή μείωση της μάζας. Συνεπώς, στόχος του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας (compliance), καθώς χαμηλή ενδοτικότητα συνεπάγεται υψηλή δυσκαμψία. Η ενδοτικότητα μετρά το εξωτερικό έργο που εφαρμόζεται στην κατασκευή και ισούται με το άθροισμα όλων των μετατοπίσεων στα σημεία εφαρμογής των φορτίσεων, σταθμισμένα με το μέγεθος της φόρτισης. Ως εκ τούτου, ελαχιστοποιώντας την ενδοτικότητα, μειώνεται η παραμόρφωση της κατασκευής που οφείλεται στις φορτίσεις και αυξάνεται η συνολική της δυσκαμψία.

Οι παρακάτω συναρτήσεις περιγράφουν την ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας.

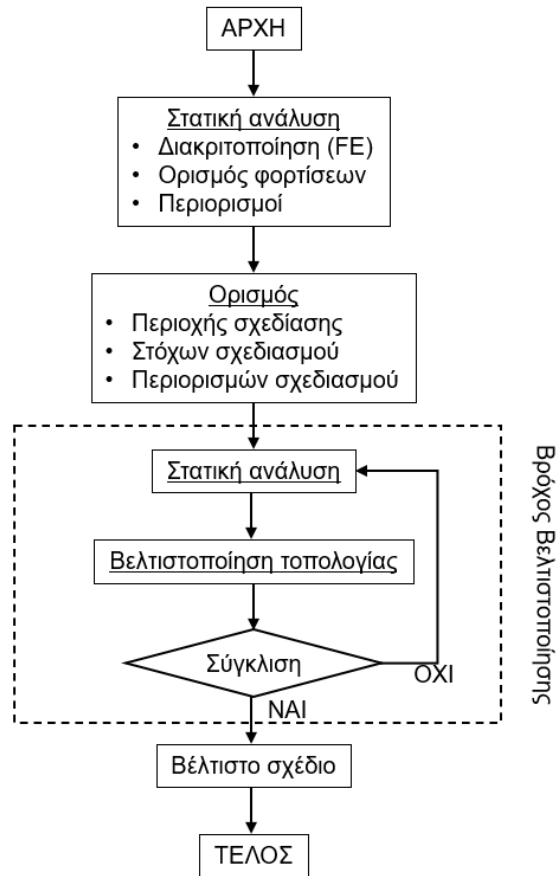
Ελαχιστοποίηση $C = F^T u, Ku = F$

Περιορισμοί $V_{\rho_e} = \sum_{e=1}^N \rho_e \frac{V_e}{V_{TOT}} \leq V^{lim}, e = 1, \dots, N, \rho_e = \{\rho_{min}, 1\}$

Όπου, το K είναι η μήτρα δυσκαμψίας της κατασκευής, το F είναι το διάνυσμα της δύναμης ανά κόμβο, το u είναι η μετατόπιση, το ρ_e είναι η εικονική πυκνότητα, το V_e είναι ο όγκος του e -οστού πεπερασμένου στοιχείου το V_{TOT} είναι ο συνολικός όγκος του μέγιστου χωρίου που μπορεί να καταλάβει η κατασκευή, το V_{lim} είναι ο επιθυμητός όγκος που καθορίζεται από το χρήστη και τέλος το N είναι ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων στα οποία έχει διακριτοποιηθεί η γεωμετρία.

2.4 Λειτουργία αλγόριθμου βελτιστοποίησης τοπολογίας

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης τοπολογίας μεταβάλλει την πυκνότητα των πεπερασμένων στοιχείων που αντιπροσωπεύουν το χώρο σχεδίασης με σκοπό την εύρεση της κατανομής του υλικού της βέλτιστης γεωμετρίας που ικανοποιεί προκαθορισμένους περιορισμούς. Η **Εικόνα 5** παρουσιάζει τα βασικά βήματα που ακολουθούνται κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης τοπολογίας.



Εικόνα 5. Διαδικασία βελτιστοποίησης τοπολογίας

Το πρώτο βήμα μίας ανάλυσης είναι η διακριτοποίηση της γεωμετρίας. Η υπό εξέταση κατασκευή μας πλέον απεικονίζεται από ένα πλέγμα που αποτελείται από στοιχεία (elements) και κόμβους (nodes). Στη συνέχεια ορίζεται η περιοχή της σχεδίασης η οποία αντιπροσωπεύει την περιοχή της γεωμετρίας στην οποία μπορεί να μεταβάλλεται η πυκνότητα του υλικού. Επίσης καθορίζονται οι στόχοι και οι περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιούνται ώστε να θεωρηθεί ένα σχέδιο ότι είναι το βέλτιστο δυνατό.

Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, ο αλγόριθμος μετακινεί τους κόμβους των στοιχείων με σκοπό τη διερεύνηση νέων διατάξεων στοιχείων-πλεγμάτων οι οποίες θα

ικανοποιούν τους στόχους και τους περιορισμούς που έχουν τεθεί. Με τον τρόπο αυτό εξετάζονται όσο το δυνατόν περισσότερες γεωμετρίες και ο αλγόριθμος καταλήγει στην βέλτιστη δυνατή. Τέλος, το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης, το βέλτιστο σχέδιο, θα πρέπει να επαληθευτεί (design validation) ότι ικανοποιεί τους στόχους του σχεδιασμού.

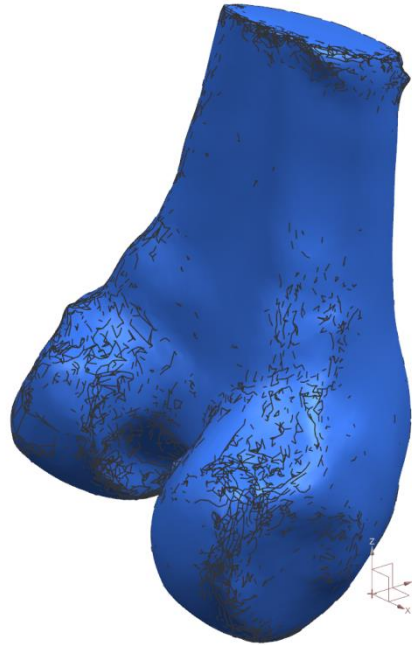
3 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ANSYS WORKBENCH

Το ANSYS Workbench αποτελεί ένα από τα πιο δημοφιλή υπολογιστικά προγράμματα παγκοσμίως και χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων όπως:

1. Στατικά προβλήματα
2. Δυναμικά προβλήματα
3. Προβλήματα ταλαντώσεων
4. Προβλήματα ηλεκτρομαγνητισμού
5. Προβλήματα μετάδοσης θερμότητας
6. Προβλήματα ρευστοδυναμικής
7. Προβλήματα αλληλεπίδρασης στερεού ρευστού
8. Προβλήματα βελτιστοποίησης
9. Προβλήματα βελτιστοποίησης τοπολογίας

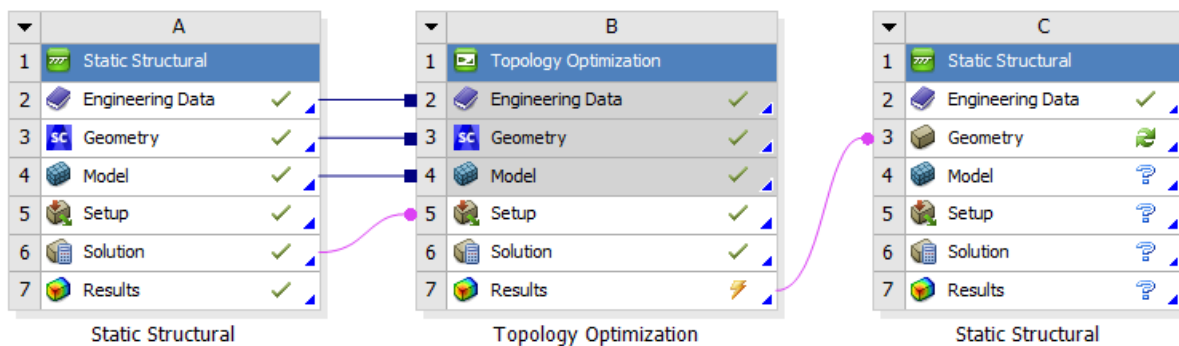
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία χρήσης του υπολογιστικού προγράμματος ANSYS, όπως επίσης, και τα βήματα που ακολουθούνται για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης τοπολογίας και οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν για να ολοκληρωθεί σωστά η ανάλυση και να προκύψει η βέλτιστη γεωμετρία της κατασκευής. Σκοπός της βελτιστοποίησης τοπολογίας είναι η εύρεση του βέλτιστου σχεδίου μιας γεωμετρίας ή μιας περιοχής της γεωμετρίας, ικανοποιώντας συγκεκριμένους περιορισμούς (constraints) και πετυχαίνοντας ταυτόχρονα προκαθορισμένους σχεδιαστικούς στόχους (objectives).

Σαν πρώτο βήμα πριν εκτελεστεί η ανάλυση βελτιστοποίησης τοπολογίας, πρέπει να έχει περατωθεί μια στατική ανάλυση (static structural analysis) ή μια ανάλυση ιδιομορφών (modal analysis) εφόσον έχουμε άγνωστα τα φορτία που καταπονούν την κατασκευή, τις ιδιότητες των υλικών καθώς και τις συνοριακές συνθήκες (boundary conditions). Εάν οι πληροφορίες αυτές είναι γνωστές τότε οι συγκεκριμένες αναλύσεις μπορούν να παραληφθούν.



Εικόνα 6. Απεικόνιση γόνατος σε μορφή STL

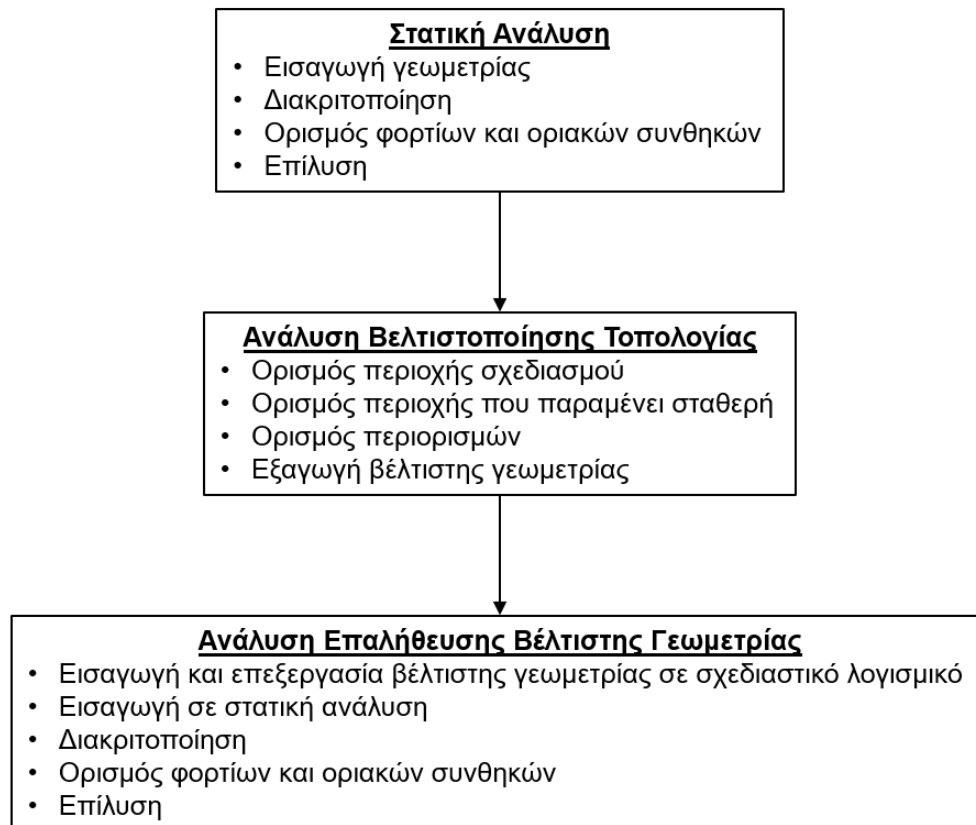
Μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης βελτιστοποίησης τοπολογίας, το βέλτιστο σχέδιο εξάγεται σε μορφή STL (στερεολιθογραφία) αρχείου (**Εικόνα 6**) και εισάγεται σε λογισμικό σχεδίασης (Computer Aided Design-CAD) με σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία και απλοποίηση της γεωμετρίας. Η απλοποιημένη γεωμετρία εισάγεται εκ νέου σε μία καινούργια ανάλυση (στατική ή ιδιομορφών), επαναπροσδιορίζονται οι οριακές συνθήκες και τα φορτία και εκτελείται η ανάλυση επιβεβαίωσης (validation analysis). Στην **Εικόνα 7** παρουσιάζεται η ολοκληρωμένη διαδικασία της ανάλυσης βελτιστοποίησης τοπολογίας.



Εικόνα 7. Διαδικασία βελτιστοποίησης τοπολογία στο υπολογιστικό λογισμικό ANSYS

3.1 Διάγραμμα ροής εργασιών

Η **Εικόνα 8** παρουσιάζει το διάγραμμα ροής εργασιών για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης τοπολογίας. Αρχικά δημιουργούμε μία στατική ανάλυση στην οποία εισάγουμε την υπό εξέταση γεωμετρία, την διακριτοποιούμε (mesh), ορίζουμε τα φορτία και τις οριακές συνθήκες και επιλύουμε την ανάλυση.



Εικόνα 8. Διάγραμμα ροής εργασιών για πρόβλημα βελτιστοποίησης τοπολογίας

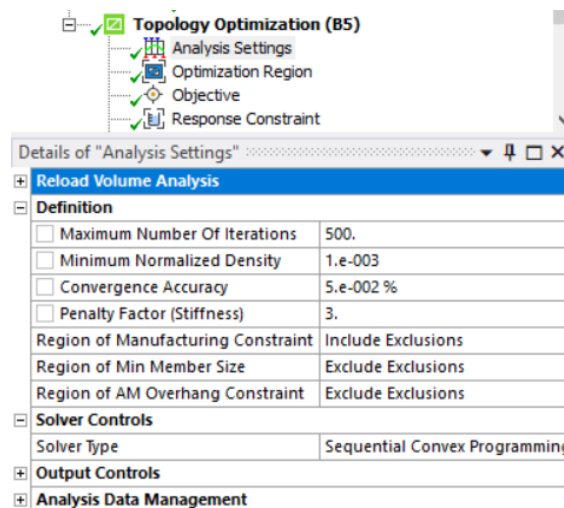
Στη συνέχεια δημιουργούμε την ανάλυση της βελτιστοποίησης τοπολογίας. Στη διάρκεια του βήματος αυτού ορίζουμε αρχικά την περιοχή σχεδίασης (design region) στην οποία μπορεί να μεταβάλλεται η πυκνότητα του υλικού και την περιοχή στην οποία η πυκνότητα παραμένει σταθερή (exclusion region – η τοπολογία δεν μεταβάλλεται). Επίσης ορίζουμε το στόχο (objective) της βελτιστοποίησης και τους περιορισμούς. Οι περιορισμοί μπορεί να είναι είτε περιορισμοί της βελτιστοποίησης (constraint response), είτε κατασκευαστικοί (manufacturing constraints), είτε συνδυασμός των δύο παραπάνω. Αφού τρέξουμε την ανάλυση βελτιστοποίησης τοπολογίας, εξάγουμε την βέλτιστη γεωμετρία σε STL μορφή αρχείου.

Τέλος εισάγουμε τη βέλτιστη γεωμετρία σε λογισμικό σχεδιασμού (Spaceclaim) και την επεξεργαζόμαστε με σκοπό τη δημιουργία μιας συμπαγούς (solid) μορφής. Τη

συμπαγή μορφή την εισάγουμε σε μια νέα στατική ανάλυση, τη διακριτοποιούμε, ορίζουμε τα φορτία και τις οριακές συνθήκες, επιλύουμε και επεξεργαζόμαστε και αξιολογούμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

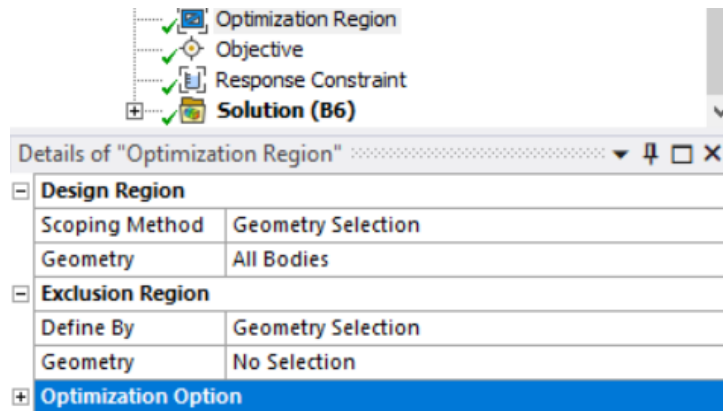
3.2 Παράμετροι που επηρεάζουν την ανάλυση βελτιστοποίησης τοπολογίας

Στην καρτέλα Analysis Settings (**Εικόνα 9**) καθορίζονται οι βασικές ιδιότητες της ανάλυσης. Πρώτα καθορίζεται ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων (*Maximum Number of Iterations*). Η προεπιλεγμένη τιμή είναι το 500. Η διαδικασία της επίλυσης συνεχίζεται μέχρι να επιτευχθεί η σύγκλιση στην ακρίβεια που ορίζεται στο Convergence Accuracy ή να φτάσει των μέγιστο αριθμό επαναλήψεων. Έπειτα ορίζεται η ακρίβεια της σύγκλισης (Convergence Accuracy). Η ιδιότητα αυτή καθορίζει την ακρίβεια της σύγκλισης και έχει προεπιλεγμένη τιμή 0.1%. Τέλος στο πεδίο Solver Type επιλέγεται η μέθοδος με την οποία θα γίνει η επίλυση βελτιστοποίησης τοπολογίας. Οι μέθοδοι μεταξύ των οποίων μπορεί να επιλέξει ο μηχανικός είναι η Sequential Convex Programming (SCP) ή η μέθοδος Optimality Criteria και παρουσιάζονται με περισσότερες λεπτομέρειες στην παράγραφο 3.3.



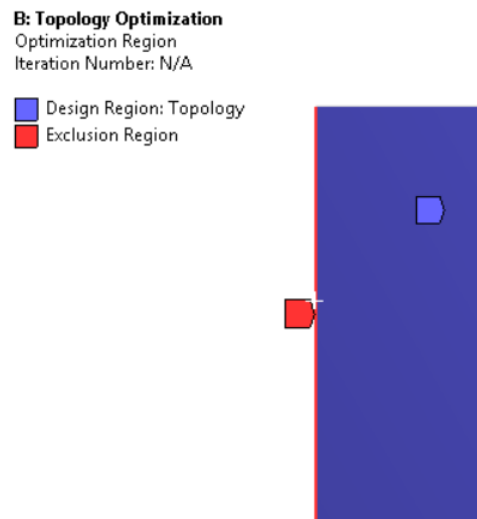
Εικόνα 9. Καρτέλα Analysis Settings

Στην συνέχεια ορίζεται η περιοχή στην οποία θα λάβει χώρα η βελτιστοποίηση τοπολογίας (Optimization Region - **Εικόνα 10**).



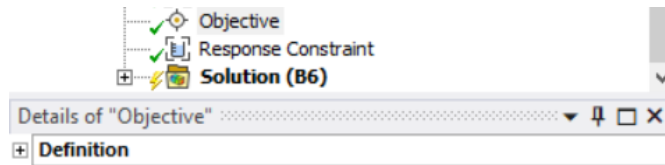
Εικόνα 10. Καρτέλα Optimization Region

Η περιοχή αυτή χωρίζεται σε δύο υπό-περιοχές (**Εικόνα 11**). Η πρώτη είναι η περιοχή σχεδιασμού (Design Region) στην οποία επιτρέπεται η μεταβολή της τοπολογίας του υλικού. Η δεύτερη (Exclusion Region) είναι η περιοχή η οποία αποκλείεται από την ανάλυση και παραμένει σταθερή.



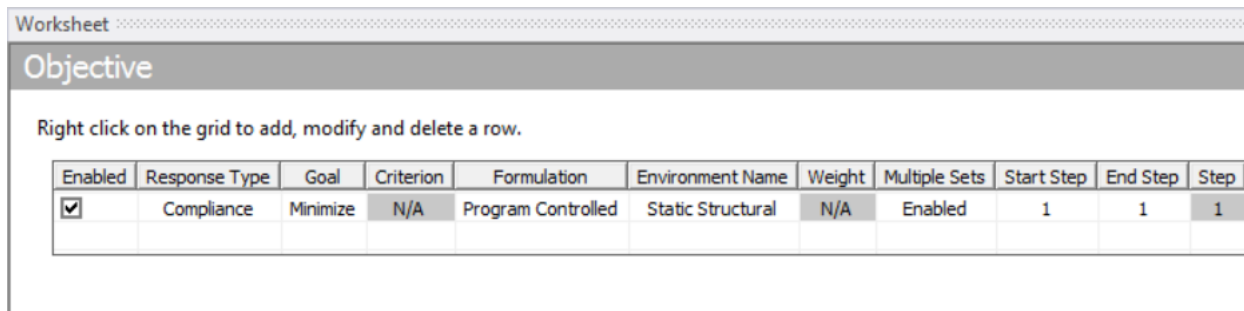
Εικόνα 11. Παράδειγμα ορισμού περιοχής σχεδίασης και περιοχής που παραμένει σταθερή

Στη συνέχεια από την καρτέλα Objective (**Εικόνα 12**) εισάγουμε τον στόχο της ανάλυσης. Σε κάθε ανάλυση μπορεί να τεθεί μόνο ένας στόχος. Οι στόχοι μπορεί να είναι οι εξής: α) η ενδοτικότητα (compliance), β) ο όγκος (volume), γ) η μάζα (mass) και δ) η συχνότητα (frequency).



Εικόνα 12. Καρτέλα Objective

Για παράδειγμα, σε μία στατική ανάλυση ο προεπιλεγμένος στόχος (**Εικόνα 13**) είναι η ενδοτικότητα και συγκεκριμένα η ελαχιστοποίησή της, η οποία μεγιστοποιεί τη δυσκαμψία της κατασκευής. Αντίστοιχα, σε μία ανάλυση ιδιομορφών (modal analysis) ο προεπιλεγμένος στόχος είναι η συχνότητα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, σε όλες τις αναλύσεις που παρουσιάζονται, ως στόχος έχει τεθεί η ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας.

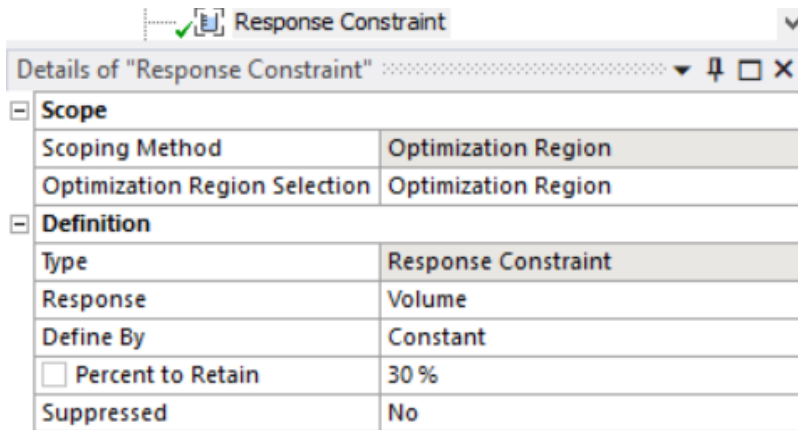


Εικόνα 13. Ορισμός στόχου ελαχιστοποίησης ενδοτικότητας

Το επόμενο βήμα είναι ο ορισμός των περιορισμών (constraints). Ο μηχανικός έχει να επιλέξει μεταξύ των εξής περιορισμών:

- Περιορισμός μάζας (Mass)
- Περιορισμός όγκου (Volume)
- Global von-Mises Stress
- Local von-Mises Stress
- Displacement
- Reaction Force

Ανάλογα με τον περιορισμό που θα επιλεγεί ορίζονται και οι αντίστοιχες παράμετροι. Για παράδειγμα αν επιλεγεί ο περιορισμός του όγκου, μπορούμε να ορίσουμε το ποσοστό που θέλουμε να διατηρηθεί (Percent to Retain - **Εικόνα 14**). Το εύρος του ποσοστού κυμαίνεται από 1 έως 99% και η προεπιλεγμένη τιμή είναι 50%. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν μπορεί να οριστεί ταυτόχρονα ο ίδιος στόχος και περιορισμός (π.χ. όγκος). Στην παρούσα διπλωματική, στα υπό εξέταση προβλήματα, έχει επιλεγεί ως περιορισμός ο όγκος.



Εικόνα 14. Ορισμός περιορισμού όγκου

Το ANSYS μας δίνει επίσης τη δυνατότητα να ορίσουμε κατασκευαστικούς περιορισμούς (manufacturing constraints). Σκοπός των περιορισμών αυτών είναι η γεωμετρία που θα προκύψει από την βελτιστοποίηση τοπολογίας να μπορεί να κατασκευαστεί χωρίς να χρειάζεται να απλοποιηθεί ή ξανά σχεδιαστεί σε κάποιο λογισμικό σχεδιασμού. Οι κατασκευαστικοί περιορισμοί μπορεί να είναι οι εξής:

- **Member size.** Με την επιλογή αυτή ορίζονται το ελάχιστο πάχος των δομών στήριξης και το μέγιστο πάχος των συνδέσμων στο τελικό σχέδιο.
- **Extrusion.** Ο περιορισμός αυτός μας δίνει τη δυνατότητα να βεβαιωθούμε ότι η διατομή του τελικού σχεδίου είναι σταθερή.
- **Symmetry.** Με τον περιορισμό αυτό επιβάλλουμε στο σχέδιο να είναι συμμετρικό σε σχέση με ένα επίπεδο που έχουμε ορίσει.
- **Pull out Direction.** Χρησιμοποιείται για διαδικασίες παραγωγής με χύτευση. Δίνει την δυνατότητα να οριστεί η κατεύθυνση αφαίρεσης του μοντέλου από το καλούπι με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζει τη δομική ακεραιότητα της κατασκευής.

3.3 Μέθοδοι επίλυσης

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται οι μέθοδοι επίλυσης για τις αναλύσεις βελτιστοποίησης τοπολογίας. Στο ANSYS είναι διαθέσιμες οι εξής τρεις:

- **Program Controlled (default).** Η εφαρμογή επιλέγει τη μέθοδο Sequential Convex Programming (SCP) καθώς είναι η προεπιλεγμένη μέθοδος επίλυσης.
- **Sequential Convex Programming (SCP).** Είναι μία επέκταση της μεθόδου moving asymptotes (MMA). Η μέθοδος SCP απαιτεί να υπάρχουν οι παράγωγοι όλων των συναρτήσεων σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης τοπολογίας. Η μέθοδος MMA είναι ένας μη γραμμικός αλγόριθμος ο οποίος προσεγγίζει μία λύση για το πρόβλημα βελτιστοποίησης τοπολογίας, λύνοντας μία σειρά από κυρτά και

διαχωριζόμενα υποπροβλήματα. Τα υποπροβλήματα αυτά μπορούν αν επιλυθούν αποτελεσματικά λόγω της ειδικής τους δομής.

Για να εξασφαλιστεί η σύγκλιση, η μέθοδος SCP επεκτείνει την μέθοδο MMA, απορρίπτοντας βήματα τα οποία δεν οδηγούν στη βέλτιστη λύση του υπό εξέταση προβλήματος. Μέσω μίας γραμμικής διαδικασίας αναζήτησης και μιας ποσοτικής συνάρτησης γίνεται ο έλεγχος για την αποδοχή της λύσης. Στόχος της ποσοτικής συνάρτησης είναι η μέτρηση της προόδου και να επιτρέπει στην αντικειμενική συνάρτηση να συνδυάζεται με κατάλληλο τρόπο με τους περιορισμούς.

- **Optimality Criteria.** Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης τοπολογίας με στόχο την ενδοτικότητα και περιορισμό τον όγκο ή τη μάζα. Η μέθοδος αυτή είναι ένας επαναληπτικός λύτης και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μαζί με ανάλυση ιδιομορφών (modal analysis). Όταν χρησιμοποιείται ο συγκεκριμένος επιλυτής, υπάρχουν οι ακόλουθοι περιορισμοί: α) υποστηρίζεται μόνο ο στόχος της ενδοτικότητας, β) υποστηρίζεται μόνο ο περιορισμός όγκου ή μάζας και γ) υποστηρίζεται μόνο η ελάχιστη (minimum) ιδιότητα για το Member Size Constraint στους κατασκευαστικούς περιορισμούς (manufacturing constraints).

3.4 Design Validation – Επαλήθευση της βέλτιστης γεωμετρίας

Η διαδικασία επιβεβαίωσης του σχεδίου (design validation) αποτελεί το τελικό στάδιο της ανάλυσης βελτιστοποίησης τοπολογίας και πραγματοποιείται κατόπιν της βελτιστοποίησης της κατασκευής. Η επιβεβαίωση της βέλτιστης γεωμετρίας περιλαμβάνει την σχεδιαστική επεξεργασία και απλοποίηση του μοντέλου και την στατική ανάλυση ή ανάλυση ιδιομορφών.

Χρησιμοποιώντας την επιλογή Export Topology μπορούμε να εξάγουμε τα αποτελέσματα σε μορφή αρχείου Standard Tessellation Language (STL) ή σε Part Manager Database (PMDB). Η βέλτιστη γεωμετρία που έχει προκύψει εισάγεται στο λογισμικό σχεδίασης Spaceclaim. Στο Spaceclaim λαμβάνουν χώρα διεργασίες όπως:

- ✓ Η διόρθωση των επικαλυπτόμενων όψεων
- ✓ Η εξομάλυνση (smoothing) των επιφανειών
- ✓ Η προσθήκη υλικού σε ορισμένα σημεία
- ✓ Η αφαίρεση υλικού από ορισμένα σημεία
- ✓ Η μετατροπή της γεωμετρίας σε συμπαγή μορφή (solid body)

Η νέα γεωμετρία που προκύπτει από την επεξεργασία στο Spaceclaim, εισάγεται στο ANSYS Mechanical, επαναπροσδιορίζονται οι απαραίτητοι παράμετροι (φορτία και συννοριακές συνθήκες) και εκτελείται η ανάλυση. Σκοπός της διαδικασίας αυτή είναι η επαλήθευση ότι των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης δείχνοντας ότι η νέα γεωμετρία μπορεί να αντέξει τις επιβαλλόμενες φορτίσεις παρά τη μείωση του βάρους και την αλλαγή της τοπολογίας του υλικού.

3.5 Περιορισμοί της μεθόδου βελτιστοποίησης τοπολογίας

Η ανάλυση βελτιστοποίησης τοπολογίας υποστηρίζει solid, shell και plane στοιχεία στην περιοχή σχεδίασης. Στην περίπτωση ύπαρξης στοιχείων διαφορετικών των προαναφερθέντων η εφαρμογή τα αποκλείει από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Η ανάλυση βελτιστοποίησης τοπολογίας δεν υποστηρίζει τα ακόλουθα:

- Την εισαγωγή στρωμάτων σε αναλύσεις σύνθετων υλικών (imported plies)
- Την pre stressed ανάλυση ιδιομορφών.
- Τα αποτελέσματα μεγάλου βέλους κάμψης (large deflections) σε στατική ανάλυση.
- Μη γραμμικές επαφές (contacts)
- Εάν οριστεί η ενδοτικότητα ως ο τύπος απόκρισης, η στατική ανάλυση δε μπορεί να εφαρμόσει ταυτόχρονα φόρτιση με βάση τη δύναμη και την μετατόπιση. Πρέπει να επιλεγεί ένα από τα δύο.
- Ο περιορισμός της εξώθησης (extrusion) δεν μπορεί να εφαρμοστεί για διακριτοποίηση με τετράεδρα στοιχεία.
- Ρωγμές που έχουν οριστεί στο Fracture.
- Την γραφική απεικόνιση των εξαιρέσεων που έχουν δημιουργηθεί από τις Direct FE συνοριακές συνθήκες.
- Εάν επιλεγθεί ο τύπος επίλυσης Optimality Criteria, η εφαρμογή υποστηρίζει μόνος του περιορισμούς μάζας και όγκου και για τύπους κατασκευαστικών περιορισμών (manufacturing constraints) να καθοριστεί μόνο το ελάχιστο μέγεθος μέλους.
- Οι θερμικές επιδράσεις δεν λαμβάνονται υπόψιν.
- Οποιοδήποτε θερμικό σύστημα που συνδέεται με το προηγούμενο στατικό σύστημα.
- Η ανάλυση εκτίμησης σχεδιασμού (design assessment analysis)

Όταν η ανάλυση βελτιστοποίησης τοπολογίας συνδέεται με ανάλυση ιδιομορφών δεν υποστηρίζονται τα παρακάτω:

- Η επιλογή ασύμμετρου λύτη.
- Η απόσβεση, όταν η ιδιότητα απόσβεσης ορίζεται σε NAI.
- Επιλογή Optimality Criteria λύτη.

Όταν η ανάλυση βελτιστοποίησης τοπολογίας συνδέεται με στατική ανάλυση δεν υποστηρίζονται οι παρακάτω συνοριακές συνθήκες:

- Φορτίο άρθρωσης (joint load).
- Διεπιφάνεια ρευστού-στερεού (fluid solid interface).

- Ηλεκτρομαγνητικό αισθητήριο (EM transducer).

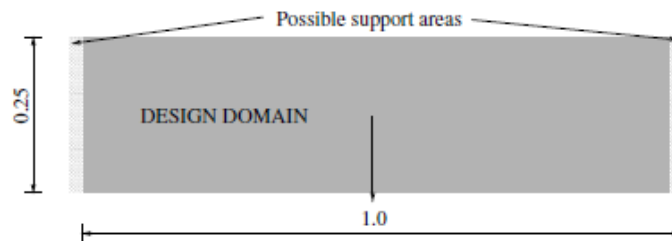
4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΣΕ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ (2D) ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστούν τέσσερα (4) διαφορετικά προβλήματα τα οποία έχουν αντληθεί από την βιβλιογραφία. Οι γεωμετρίες είναι απλές (ορθογωνικές) και καταπονούνται από δυνάμεις που ασκούνται σε διαφορετικά σημεία. Στόχος των αναλύσεων είναι η ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας ικανοποιώντας τον περιορισμό που αφορά τον όγκο (διατήρηση 20% του αρχικού όγκου). Για κάθε πρόβλημα χρησιμοποιήθηκαν τρία (3) διαφορετικά πλέγματα (meshes).

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται με τη χρήση της ψευδοπυκνότητας ανά πεπερασμένο στοιχείο (element). Η ψευδοπυκνότητα μπορεί να πάρει τιμές από 0 έως 1. Το 0 αντιστοιχεί στην πλήρη κατάργηση του συγκεκριμένου στοιχείου ενώ το 1 δείχνει την αναγκαιότητα το στοιχείο να παραμείνει στη θέση του. Δεν υπάρχει συγκεκριμένη τιμή που θεωρείται η καταλληλότερη, αλλά αυτή προσαρμόζεται ανάλογα με το πρόβλημα, τον αριθμό των στοιχείων του πλέγματος και την εμπειρία και της κρίση του μηχανικού.

4.1 Αμφιέριστη δοκός σε κάμψη (δύναμη στο κέντρο της γεωμετρίας)

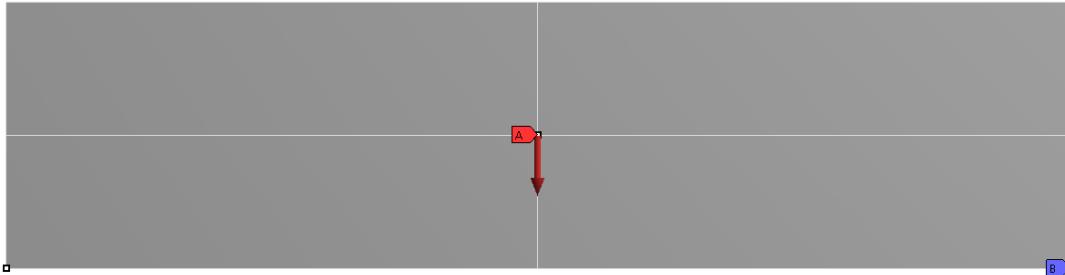
Το πρόβλημα που επιλύεται αφορά μία δισδιάστατη (2D) αμφιέριστη δοκό (**Εικόνα 15**) η οποία καταπονείται με μια δύναμη 1000N που ασκείται ακριβώς στο κέντρο της. Η δοκός έχει διαστάσεις 1m x 0.25m και έχουμε ορίσει οριακές συνθήκες άρθρωσης στην κάτω αριστερή και δεξιά γωνία. Το υλικό της δοκού είναι χάλυβας με πυκνότητα 7850 kg/m³, μέτρο ελαστικότητας 210 GPa και Poisson's ratio 0.3.



Εικόνα 15. Ορισμός προβλήματος

Η παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 16**) παρουσιάζει τον ορισμό των οριακών συνθηκών και του φορτίου στο ANSYS.

A Force: 1000. N
B Fixed Support

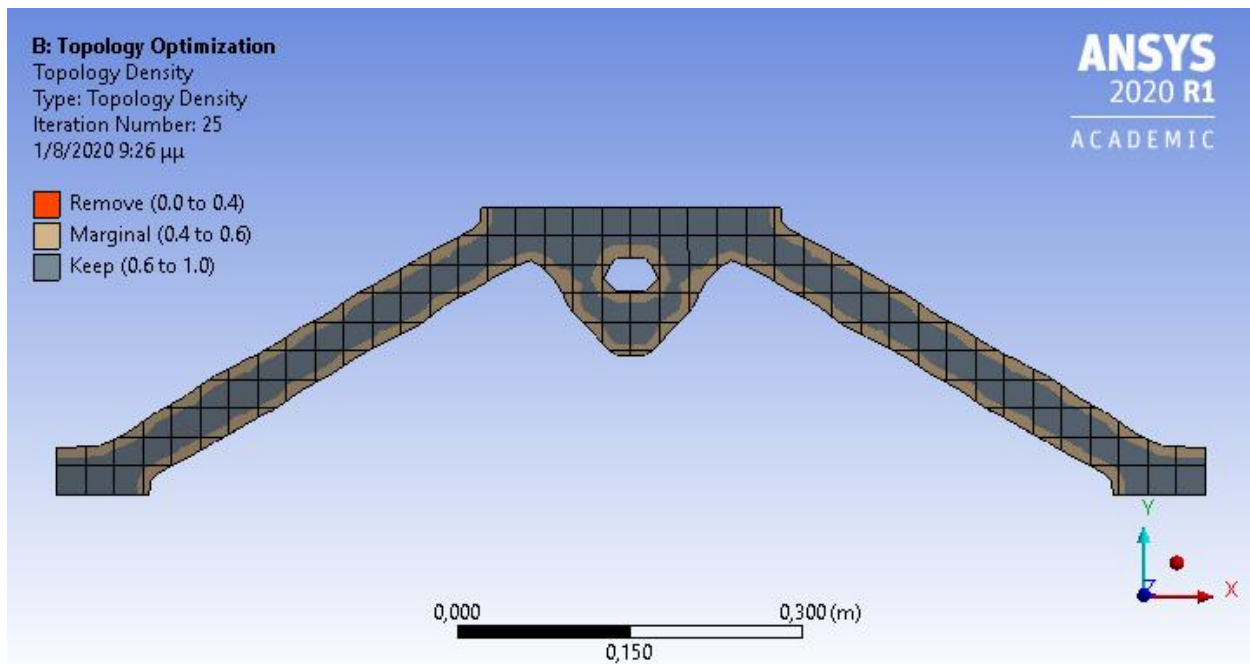


Εικόνα 16. Φορτία και οριακές συνθήκες στο ANSYS

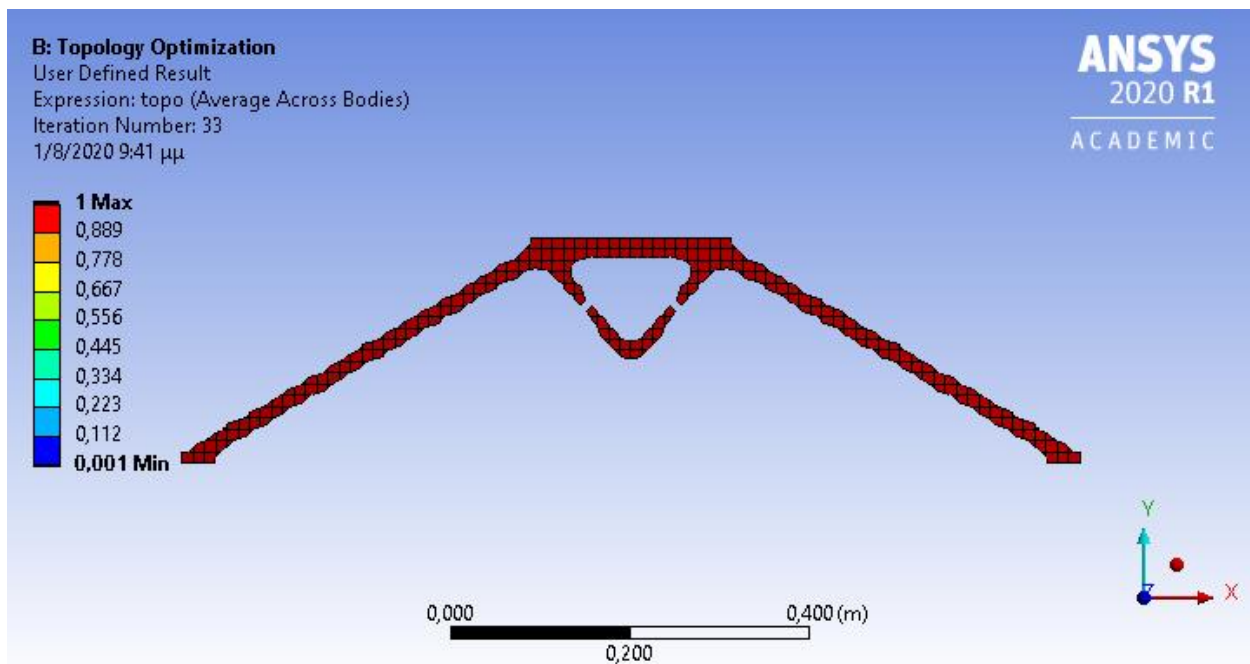


Εικόνα 17. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου

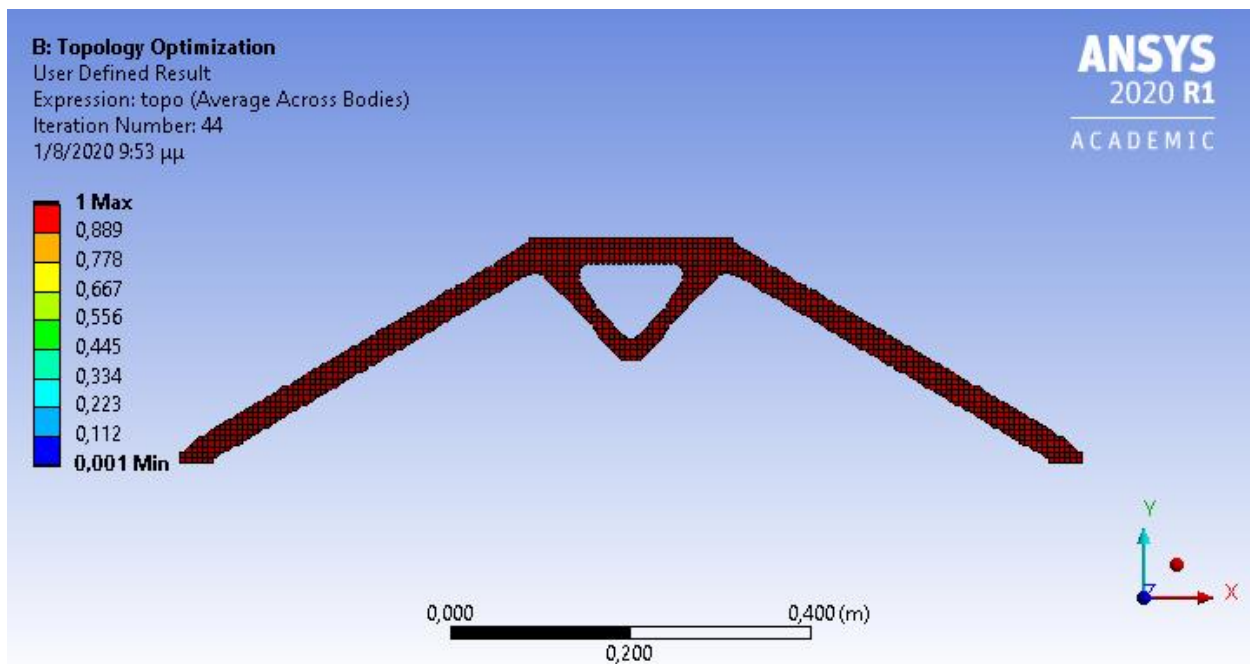
Η **Εικόνα 17** παρουσιάζει το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [7], ενώ οι εικόνες 18 έως 20 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης στο ANSYS. Τρία διαφορετικά πλέγματα (meshes) χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση της ανάλυσης. Η **Εικόνα 18** παρουσιάζει τα αποτελέσματα για πλέγμα με 400 στοιχεία (elements) και ψευδοπυκνότητα 0.5. Η **Εικόνα 19** παρουσιάζει τα αποτελέσματα για πλέγμα με 1600 στοιχεία (elements) και ψευδοπυκνότητα 0.8. Τέλος, η **Εικόνα 20** παρουσιάζει τα αποτελέσματα για πλέγμα με 6400 στοιχεία (elements) και ψευδοπυκνότητα 0.8.



Εικόνα 18. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου και ψευδοπυκνότητα 0.5



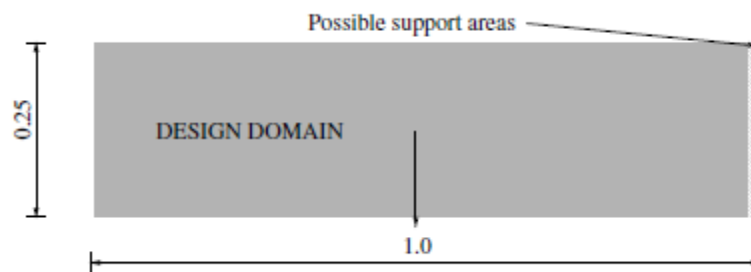
Εικόνα 19. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου και ψευδοπυκνότητα 0.8



Εικόνα 20. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου και ψευδοπυκνότητα 0.8

4.2 Πρόβολος δοκός σε κάμψη

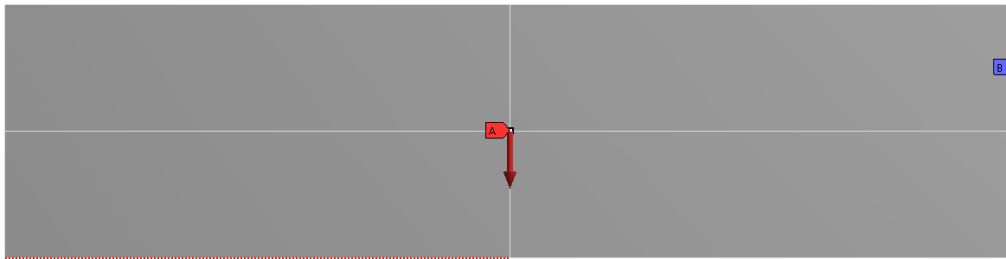
Το πρόβλημα που επιλύεται αφορά έναν δισδιάστατο (2D) πρόβλο δοκό (**Εικόνα 21**) ο οποίος καταπονείται με μια δύναμη 1000N που ασκείται ακριβώς στο κέντρο του. Η δοκός έχει διαστάσεις 1m x 0.25m και έχουμε ορίσει οριακή συνθήκη πάκτωσης στη δεξιά πλευρά του. Το υλικό της δοκού είναι χάλυβας με πυκνότητα 7850 kg/m³, μέτρο ελαστικότητας 210 GPa και Poisson's ratio 0.3.



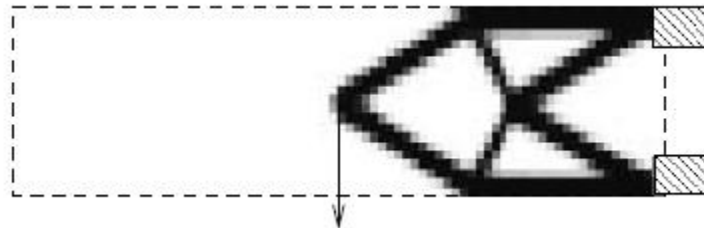
Εικόνα 21. Ορισμός προβλήματος

Η παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 22**) παρουσιάζει τον ορισμό των οριακών συνθηκών και του φορτίου στο ANSYS.

A Force: 1000. N
B Fixed Support

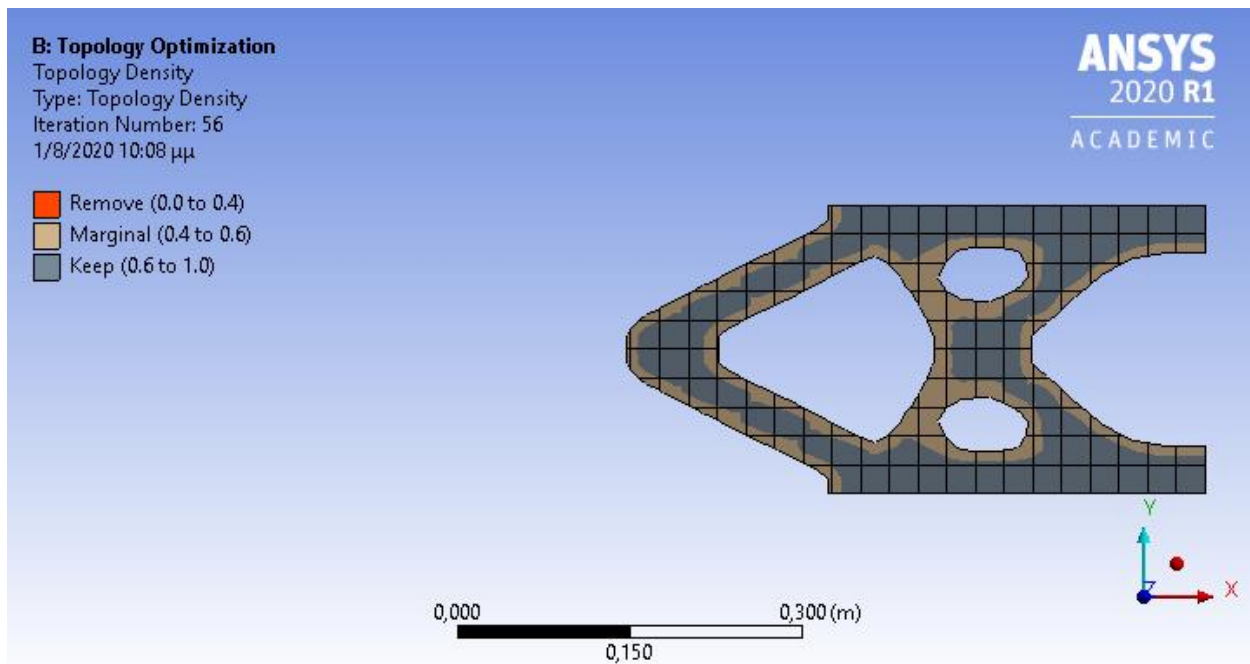


Εικόνα 22. Φορτία και οριακές συνθήκες στο ANSYS

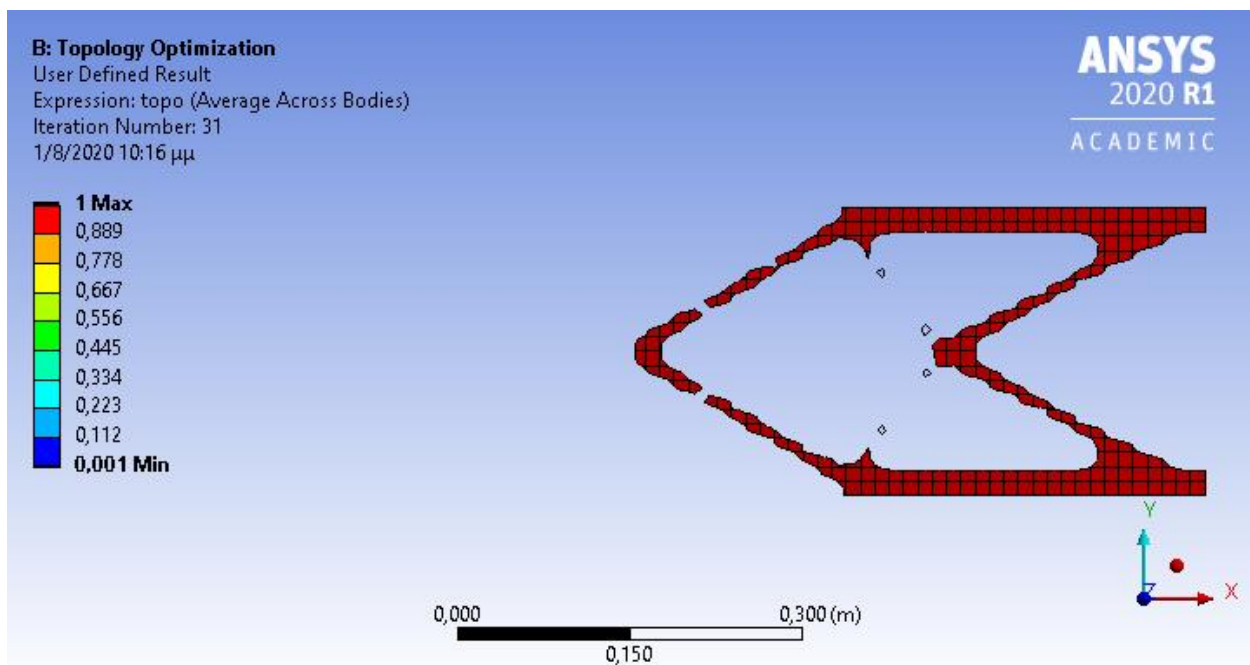


Εικόνα 23. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου

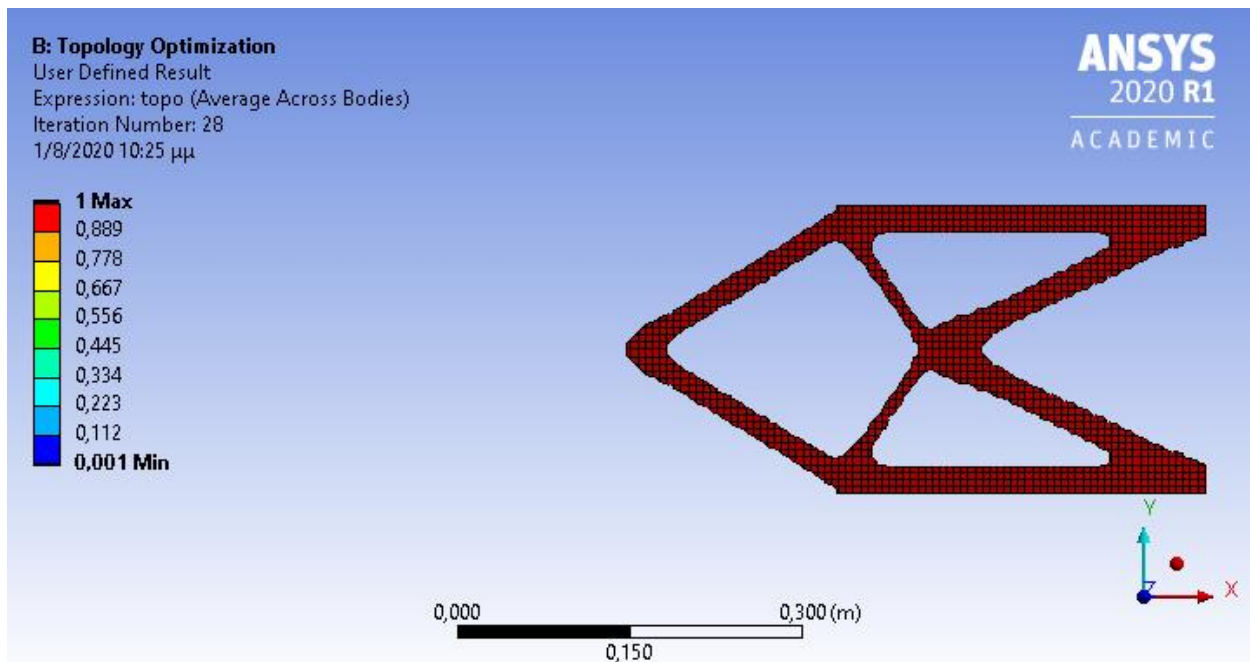
Η **Εικόνα 23** παρουσιάζει το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [7], ενώ οι εικόνες 24 έως 26 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης στο ANSYS. Τρία διαφορετικά πλέγματα (meshes) χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση της ανάλυσης. Η **Εικόνα 24** παρουσιάζει τα αποτελέσματα για πλέγμα με 400 στοιχεία (elements) και ψευδοπυκνότητα 0.5. Η **Εικόνα 25** παρουσιάζει τα αποτελέσματα για πλέγμα με 1600 στοιχεία (elements) και ψευδοπυκνότητα 0.8. Τέλος, η **Εικόνα 26** παρουσιάζει τα αποτελέσματα για πλέγμα με 6400 στοιχεία (elements) και ψευδοπυκνότητα 0.8.



Εικόνα 24. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου και ψευδοπυκνότητα 0.5



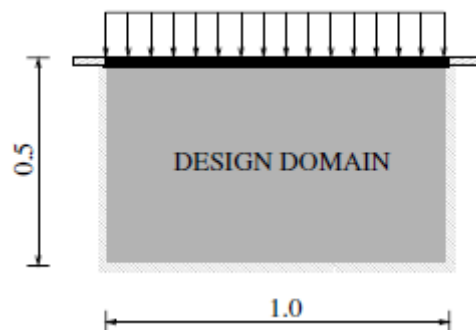
Εικόνα 25. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου και ψευδοπυκνότητα 0.8



Εικόνα 26. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου και ψευδοπυκνότητα 0.8

4.3 Παράδειγμα γέφυρας

Το πρόβλημα που επιλύεται αφορά μία δισδιάστατη (2D) γεωμετρία (**Εικόνα 27**) η οποία καταπονείται με μια κατανομημένη δύναμη 1000N που ασκείται στην πάνω ακμή της. Οι διαστάσεις της γεωμετρίας είναι 1m x 0.5m και έχουμε ορίσει οριακή συνθήκη πάκτωσης στην πάνω δεξιά και αριστερή γωνία. Το υλικό της δοκού είναι χάλυβας με πυκνότητα 7850 kg/m³, μέτρο ελαστικότητας 210 GPa και Poisson's ratio 0.3.



Εικόνα 27. Ορισμός προβλήματος

Η παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 28**) παρουσιάζει τον ορισμό των οριακών συνθηκών και του φορτίου στο ANSYS.



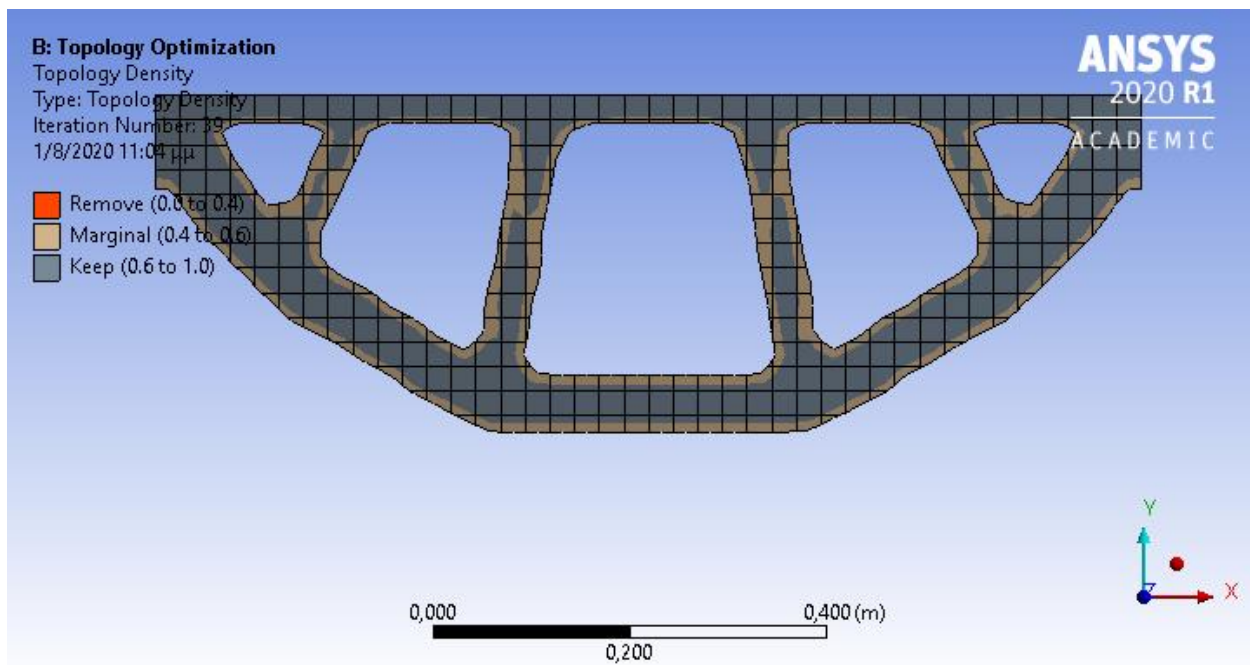
Εικόνα 28. Φορτία και οριακές συνθήκες στο ANSYS

Η **Εικόνα 29** παρουσιάζει το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [7], ενώ οι εικόνες 30 έως 32 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης στο ANSYS. Τρία διαφορετικά πλέγματα (meshes) χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση της ανάλυσης.

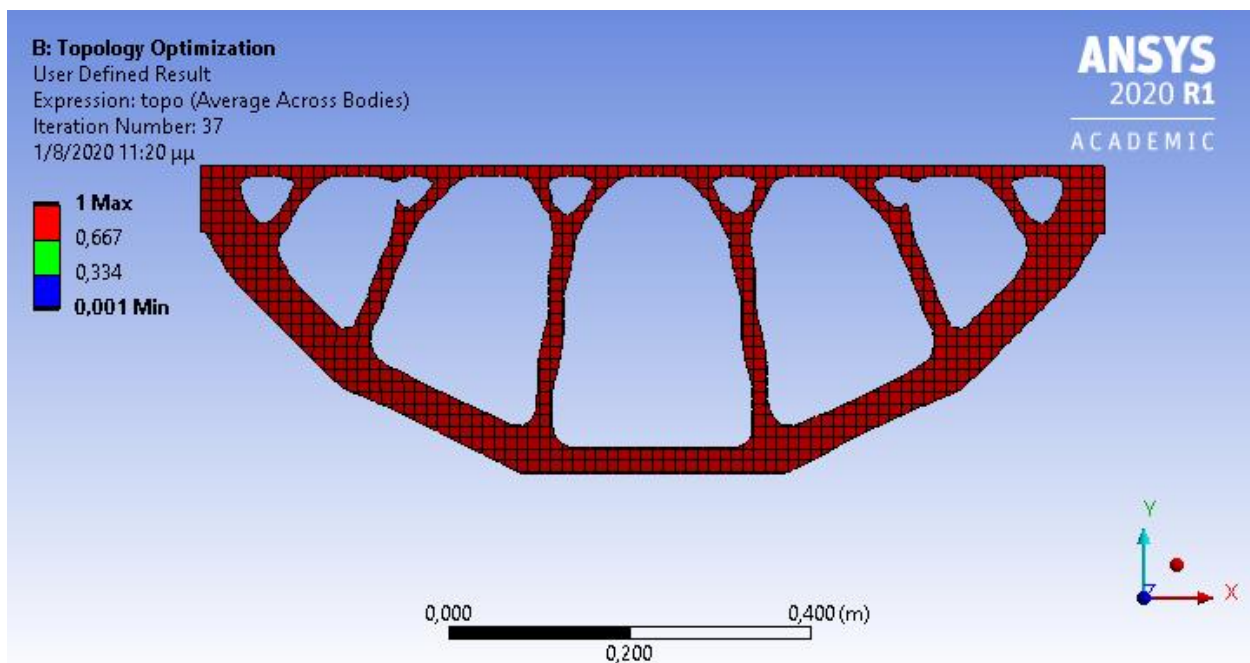


Εικόνα 29. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου

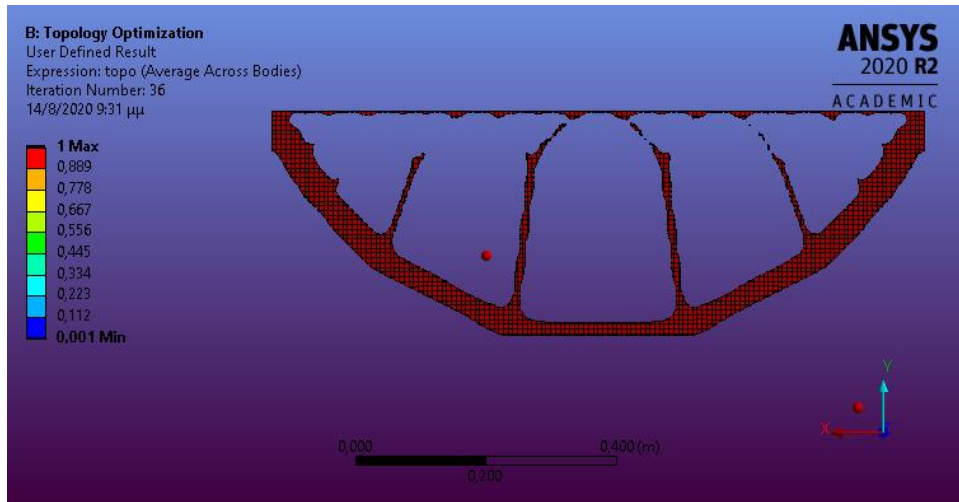
Η **Εικόνα 30** παρουσιάζει τα αποτελέσματα για πλέγμα με 800 στοιχεία (elements) και ψευδοπυκνότητα 0.5, η **Εικόνα 31** για πλέγμα με 3200 στοιχεία (elements) και ψευδοπυκνότητα 0.8, ενώ η **Εικόνα 32** για πλέγμα με 9522 στοιχεία (elements) και ψευδοπυκνότητα 0.8.



Εικόνα 30. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου και ψευδοπυκνότητα 0.5



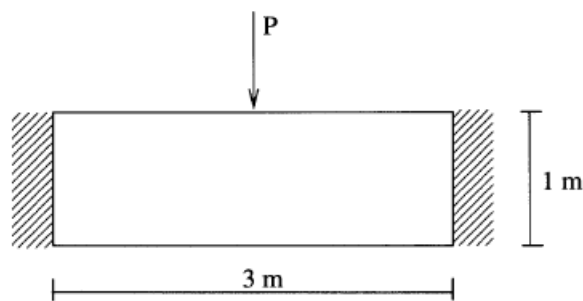
Εικόνα 31. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου και ψευδοπυκνότητα 0.8



Εικόνα 32. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου και ψευδοπυκνότητα 0.8

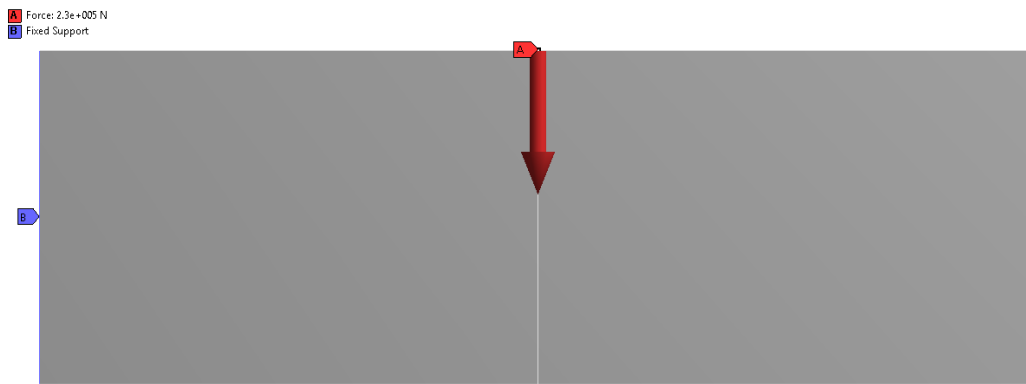
4.4 Αμφιέριστη δοκός σε κάμψη (δύναμη στο κέντρο της πάνω ακμής της γεωμετρίας)

Το πρόβλημα που επιλύεται αφορά μία δισδιάστατη (2D) αμφιέριστη δοκό (**Εικόνα 33**) η οποία καταπονείται με μια δύναμη 1000N που ασκείται ακριβώς στο κέντρο της. Η δοκός έχει διαστάσεις 3m x 1m και έχουμε ορίσει οριακές συνθήκες πάκτωσης στις ακμές δεξιά και αριστερά. Το υλικό της δοκού είναι χάλυβας με πυκνότητα 7850 kg/m³, μέτρο ελαστικότητας 210 GPa και Poisson's ratio 0.3.



Εικόνα 33. Ορισμός του προβλήματος

Η παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 34**) παρουσιάζει τον ορισμό των οριακών συνθηκών και του φορτίου στο ANSYS.



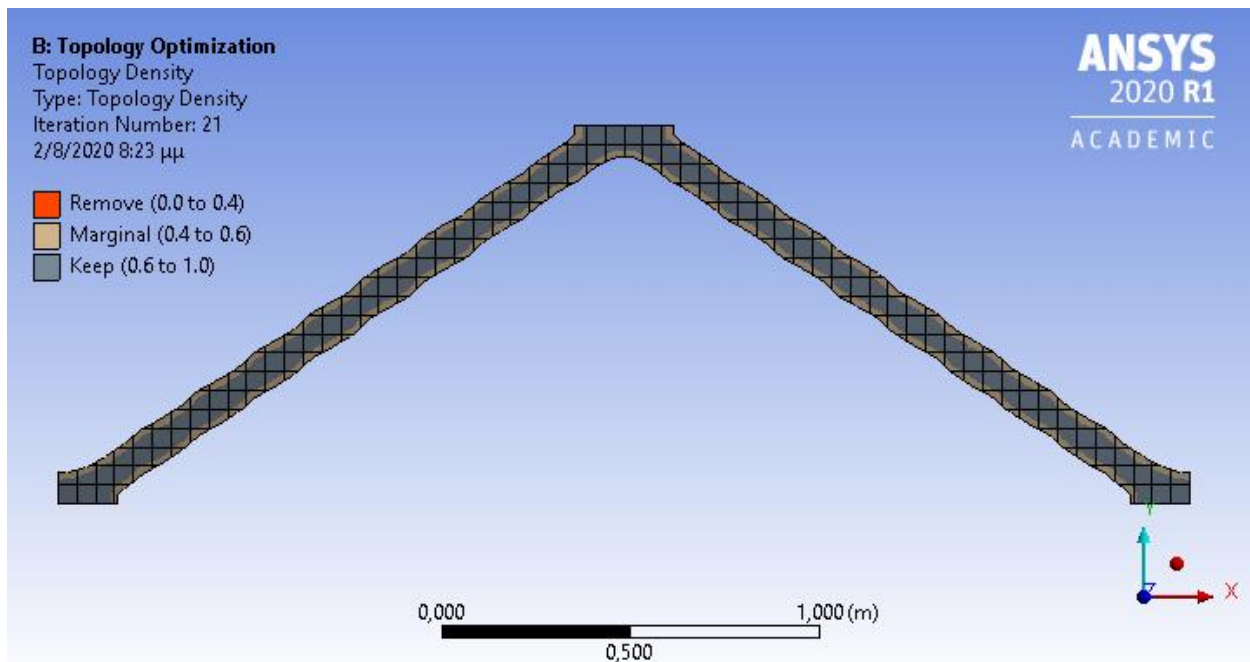
Εικόνα 34. Φορτία και οριακές συνθήκες στο ANSYS

Η **Εικόνα 35** παρουσιάζει το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [6], ενώ οι εικόνες 36 έως 38 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης στο ANSYS. Τρία διαφορετικά πλέγματα (meshes) χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση της ανάλυσης.

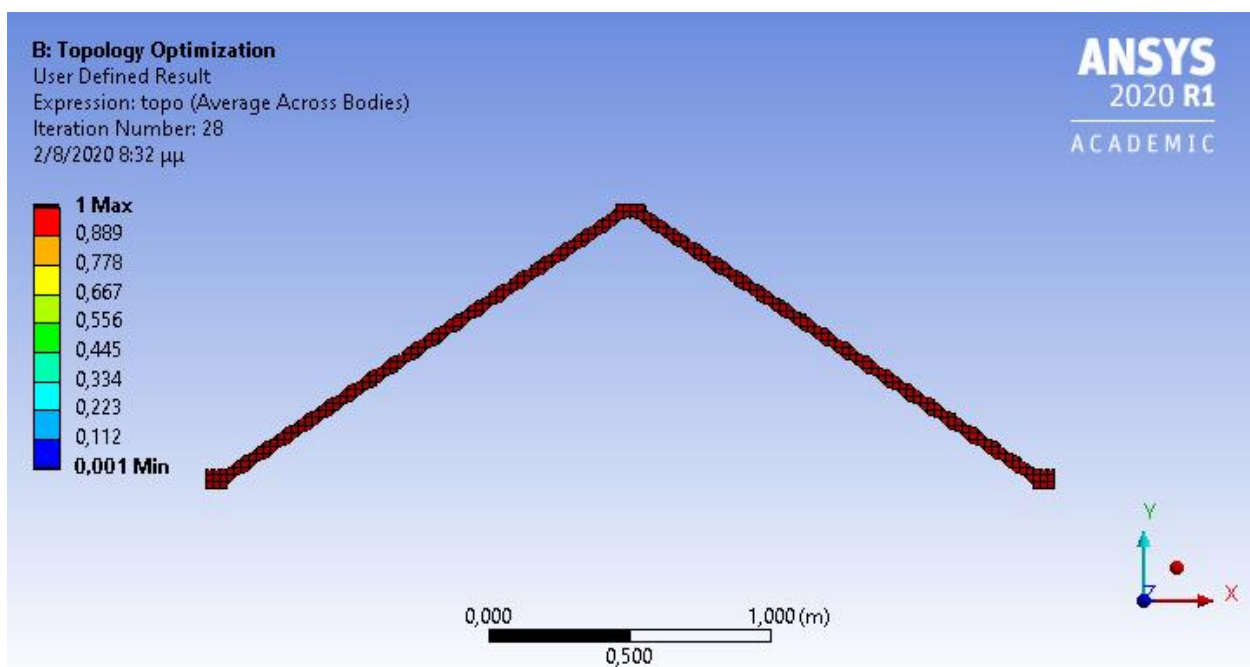


Εικόνα 35. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου

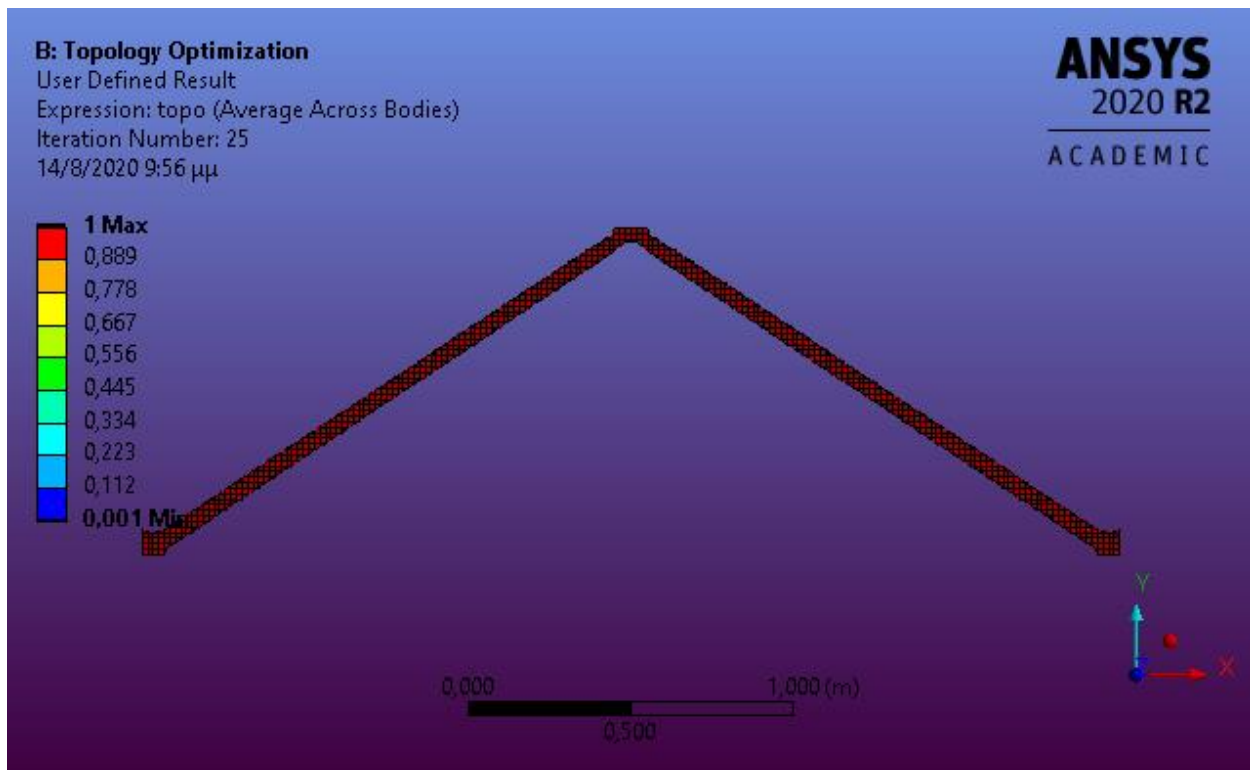
Η **Εικόνα 36** παρουσιάζει τα αποτελέσματα για πλέγμα με 1200 στοιχεία (elements) και ψευδοπυκνότητα 0.5, ενώ η **Εικόνα 37** για πλέγμα με 4800 στοιχεία (elements) και ψευδοπυκνότητα 0.8. Τέλος, η **Εικόνα 38** παρουσιάζει τα αποτελέσματα για πλέγμα με 10384 στοιχεία (elements) και ψευδοπυκνότητα 0.8.



Εικόνα 36. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου και ψευδοπυκνότητα 0.5



Εικόνα 37. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου και ψευδοπυκνότητα 0.8



Εικόνα 38. Βελτιστοποίηση με περιορισμό 20% του αρχικού όγκου και ψευδοπυκνότητα 0.8

4.5 Παρατηρήσεις

Τα προβλήματα που επιλύθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο αντλήθηκαν από τις δημοσιεύσεις [6] και [7]. Σκοπός ήταν η σύγκριση μεταξύ της μεθόδου που ακολουθείται στο υπολογιστικό λογισμικό ANSYS και των αποτελεσμάτων από την βιβλιογραφία. Μέσω της σύγκρισης επαληθεύτηκε η ορθότητα της μεθόδου καθώς οι βελτιστοποιημένες γεωμετρίες που παρήχθησαν μέσω της ανάλυσης, συμφωνούν ποιοτικά με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.

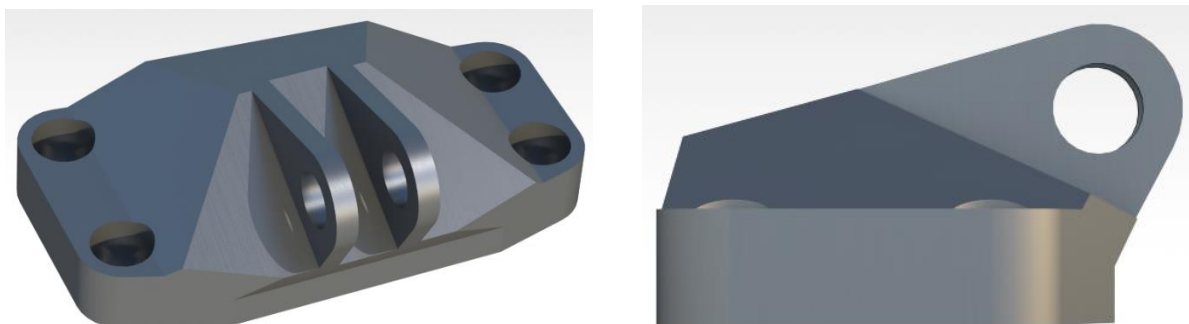
Ιδιαίτερη βαρύτητα στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων, πέρα από τις παραμέτρους που ρυθμίζουν τον αλγόριθμο, έχει η διακρητοποίηση της γεωμετρίας-κατασκευής. Όπως αποδείχθηκε, όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα (mesh), τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια έχουν τα αποτελέσματα. Σε όλες τις περιπτώσεις που επιλύθηκαν, το πλέγμα με τα περισσότερα πεπερασμένα στοιχεία (elements) έδωσε βέλτιστη γεωμετρία που ποιοτικά ήταν κοντά στα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.

5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ ΣΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ (3D) ΠΡΟΒΛΗΜΑ

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί η διαδικασία της βελτιστοποίησης τοπολογίας σε τρισδιάστατη (3D) γεωμετρία. Η γεωμετρία αντλήθηκε από έναν διεθνή διαγωνισμό της General Electric {15} και αφορά ένα στήριγμα μιας jet μηχανής (**Εικόνα 39**). Κατά το σχεδιασμό εξαρτημάτων για κινητήρες, οι σχεδιαστές αντιμετωπίζουν συνεχώς την πρόκληση της δημιουργίας σχεδίων με όσο το δυνατόν καλύτερες ιδιότητες αντοχής και μικρότερου μεγέθους και βάρους.

Τα στηρίγματα σε jet μηχανές παίζουν σημαντικό ρόλο καθώς πρέπει υποστηρίζουν το βάρος του κινητήρα χωρίς να σπάσουν ή να στρεβλώσουν. Μπορούν να χρησιμοποιούνται μόνο περιοδικά, αλλά παραμένουν στον κινητήρα ανά πάσα στιγμή, ακόμη και κατά τη διάρκεια της πτήσης. Υπάρχουν πολλά παρόμοια μέρη που φέρουν φορτίο σε έναν κινητήρα τα οποία, επειδή έχουν σχεδιαστεί με συμβατικές μεθόδους, δεν είναι πλήρως βελτιστοποιημένα τόσο για την απόδοσή τους όσο και για το βάρος τους. Σκοπός της τοπολογικής βελτιστοποίησης στο συγκεκριμένο στήριγμα είναι η μείωση του βάρους και η εξοικονόμηση υλικού (πρώτης ύλης)-θα οδηγήσει σε εξοικονόμηση βάρους σε ολόκληρο τον κινητήρα- χωρίς να μεταβάλλεται η αντοχή και η λειτουργικότητα της κατασκευής.

Η γεωμετρία του στηρίγματος αποτελείται από μία μασίφ πλάκα (βάση) με τέσσερις οπές οι οποίες βοηθούν στην έδρασή του. Πάνω στην πλάκα υπάρχουν δύο ελάσματα με δύο μεγάλες οπές στις οποίες εφαρμόζεται το φορτίο. Οι διαστάσεις του στηρίγματος είναι 178,5 x 108,3 x 62,5 μμ και το αρχικό του βάρος είναι περίπου 2,048 κιλά.



Εικόνα 39. Γεωμετρία του στηρίγματος

Το στήριγμα είναι κατασκευασμένο από ένα κράμα τιτανίου και συγκεκριμένα το Ti-6Al-4V. Το κράμα αυτό έχει υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος και εξαιρετική αντοχή στη διάβρωση. Χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπου απαιτείται χαμηλή πυκνότητα και εξαιρετική αντοχή όπως για παράδειγμα η αεροδιαστημική βιομηχανία (έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στο αεροπλάνο Boeing 787) και η εμβιομηχανική

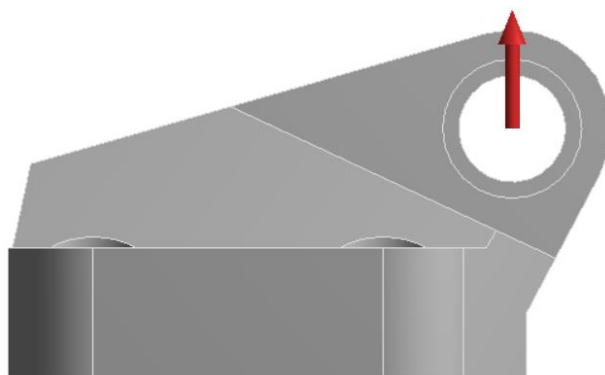
(εμφυτεύματα και προθέσεις). Οι μηχανικές ιδιότητες του Ti-6Al-4V [9] δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΤΙΜΗ
Πυκνότητα	4430 (kg/m ³)
Μέτρο Ελαστικότητας	113.8(GPa)
Λόγος Poisson	0.342
Όριο διαρροής	880 (MPa)
Όριο θραύσης.	950 (MPa)

Πίνακας 1. Μηχανικές ιδιότητες του κράματος Ti-6Al-4V

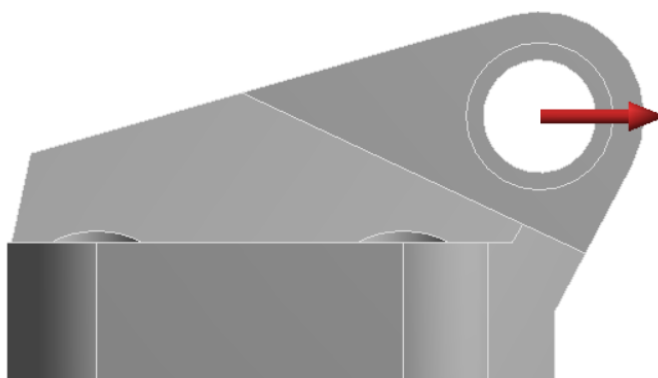
Τρία διαφορετικά σενάρια φορτίσεων εξετάστηκαν, τα οποία είναι τα εξής:

1. Η φορά της δύναμης είναι κάθετη προς τα επάνω (**Εικόνα 40**).



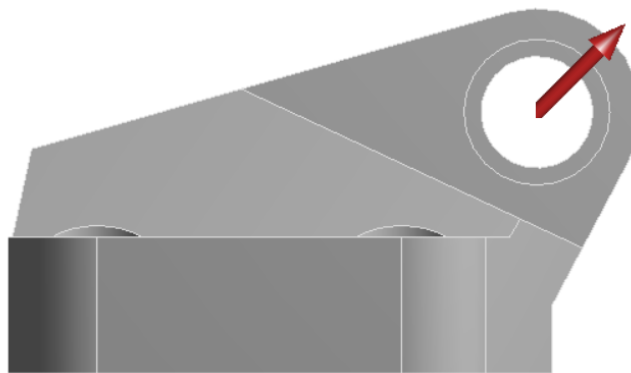
Εικόνα 40. Σενάριο φόρτισης 1

2. Η φορά της δύναμης είναι οριζόντια προς τα έξω (**Εικόνα 41**).



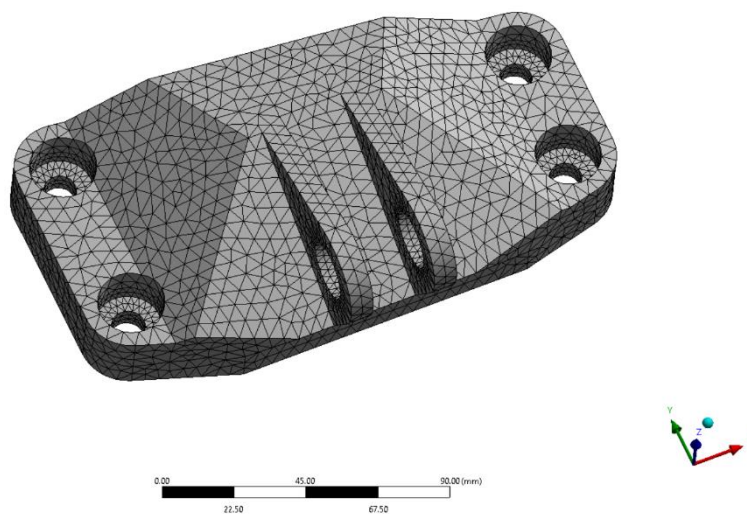
Εικόνα 41. Σενάριο φόρτισης 2

3. Η φορά της δύναμης είναι προς τα έξω και προς τα πάνω (φόρτιση υπό κλίση - **Εικόνα 42**).



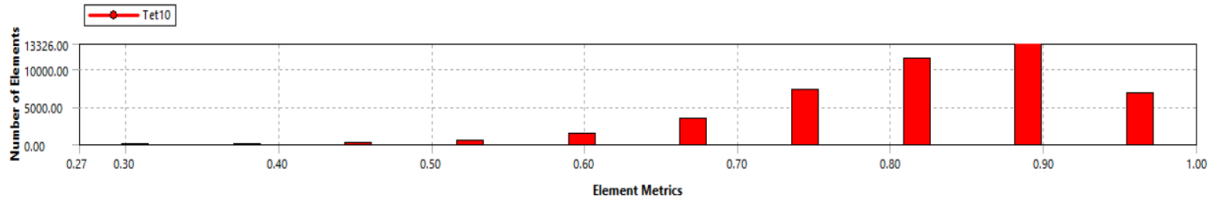
Εικόνα 42. Σενάριο φόρτισης 3

Η γεωμετρία έχει διακριτοποιηθεί με τη μέθοδο Patch Conforming η οποία δημιουργεί πλέγμα (mesh) το οποίο αποτελείται τετράεδρα στοιχεία (tetrahedral elements). Η διακριτοποίηση είναι ίδια και στα τρία σενάρια φόρτισης ώστε η ακρίβεια να είναι συγκρίσιμη και στις τρεις περιπτώσεις. Στην **Εικόνα 43** απεικονίζεται το πλέγμα (mesh). Ο συνολικός αριθμός των στοιχείων του πλέγματος είναι 44056 και οι κόμβοι είναι 65473.



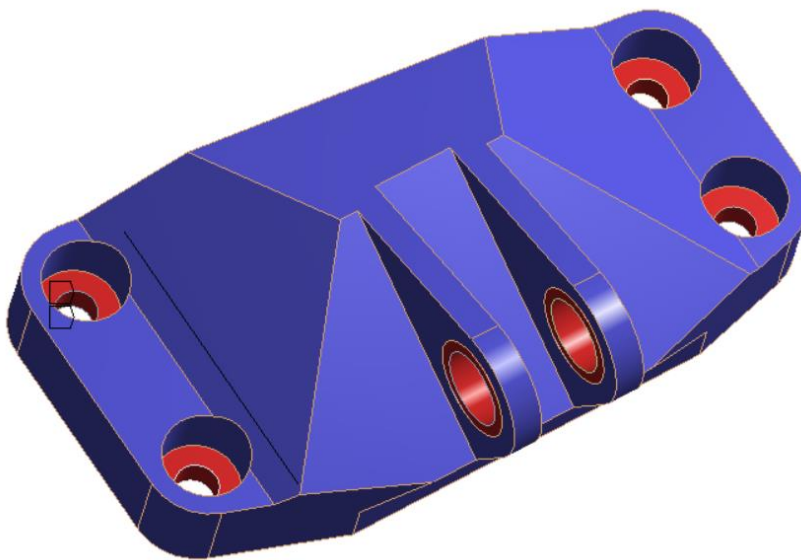
Εικόνα 43. Διακριτοποίηση της γεωμετρίας

Στην Εικόνα 44 φαίνεται η ποιότητα της διακριτοποίησης. Η μέση τιμή της ποιότητας των στοιχείων (element quality) είναι 0,82 (όπου το 0 αντιστοιχεί σε στοιχεία κακής ποιότητας και το 1 σε στοιχεία υψηλής ποιότητας). Η ποιότητα του πλέγματος είναι πολύ σημαντική για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων.



Εικόνα 44. Ιστόγραμμα που απεικονίζει την ποιότητα των στοιχείων (element quality)

Στην **Εικόνα 45** με μπλε χρώμα ορίζεται η περιοχή σχεδιασμού ενώ με κόκκινο χρώμα ορίζονται οι περιοχές που εξαιρούνται από την διαδικασία της βελτιστοποίησης τοπολογίας.



Εικόνα 45. Περιοχή βελτιστοποίησης σχεδιασμού

Η μέθοδος τοπολογικής βελτιστοποίησης που επιλέχθηκε είναι η optimality criteria και σκοπός της ορίζεται η ελαχιστοποίηση της ενδοτικότητας (compliance) - μεγιστοποίηση της δυσκαμψίας. Σαν περιορισμός επιλέχθηκε η διατήρηση του 30% του αρχικού όγκου του στηρίγματος. Για την επίτευξη της όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ακρίβειας ορίστηκε ο συντελεστής convergence tolerance να είναι ίσος με 0,01%. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παράμετροι της μεθόδου τοπολογικής βελτιστοποίησης. Οι τιμές των παραμέτρων είναι οι προεπιλεγμένες τιμές (default values) του προγράμματος.

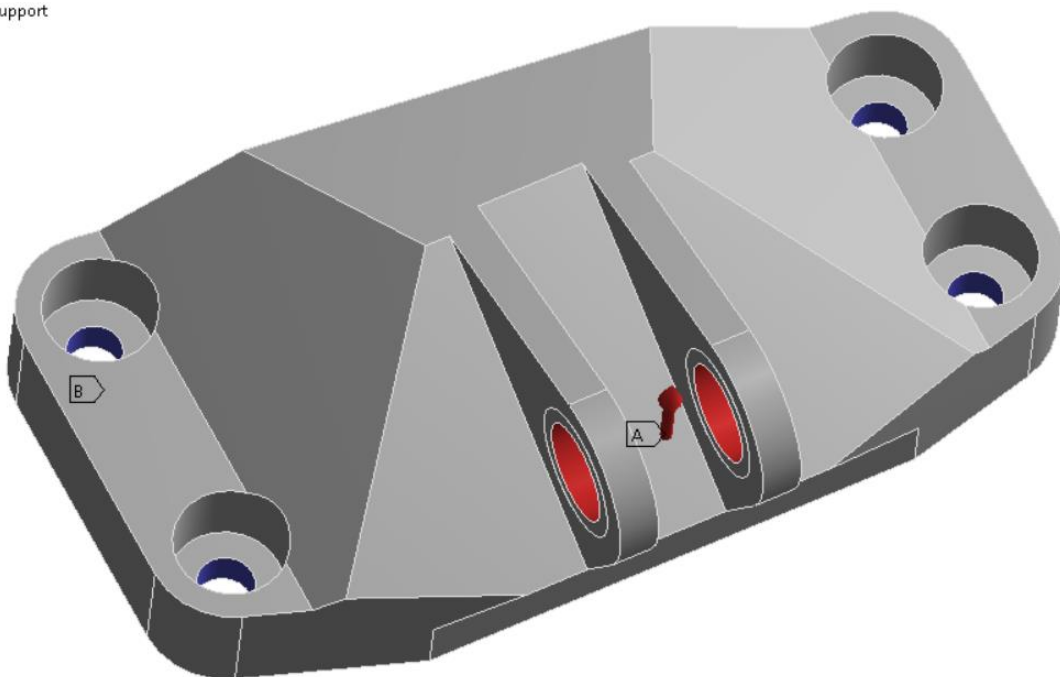
<input type="checkbox"/> Maximum Number Of Iterations	500.
<input type="checkbox"/> Minimum Normalized Density	1.e-003
<input type="checkbox"/> Convergence Accuracy	1.e-002 %
<input type="checkbox"/> Penalty Factor (Stiffness)	3.

Πίνακας 2. Παράμετροι στην μέθοδο τοπολογικής βελτιστοποίησης

5.1 Σενάριο φόρτισης 1: Η φορά της δύναμης είναι κάθετη προς τα επάνω

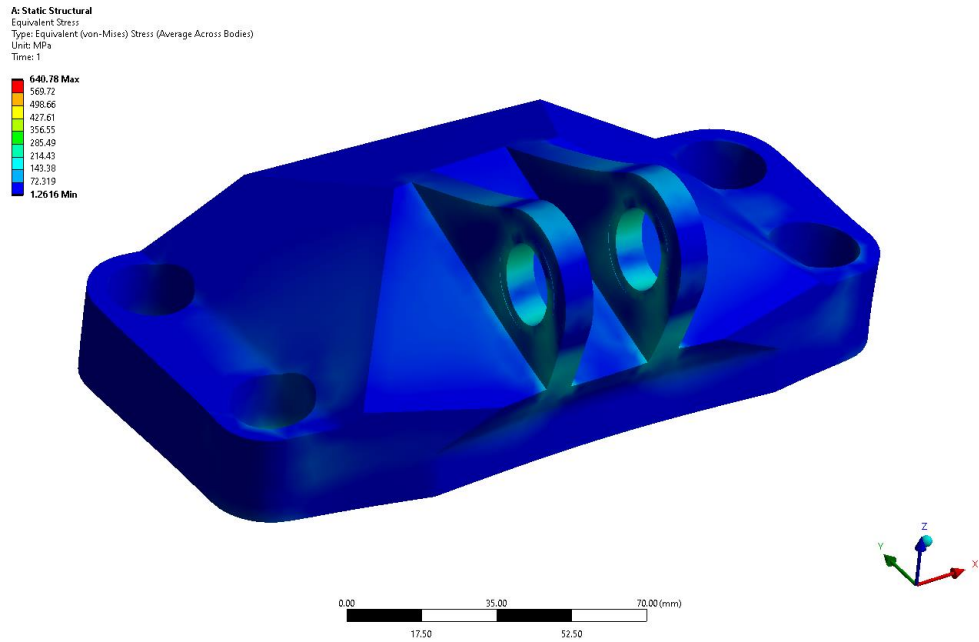
Στην **Εικόνα 46** απεικονίζονται οι οριακές συνθήκες και τα φορτία. Στα σημεία των οπών έχει θεωρηθεί ότι υπάρχει πάκτωση (μπλε χρώμα). Η δύναμη (remote force) ασκείται στο κέντρο των οπών μεταξύ των ελασμάτων. Η φορά της είναι κάθετα προς τα πάνω (**Εικόνα 40**) και το μέτρο της είναι 35600 N.

A Remote Force: 35600 N
B Fixed Support

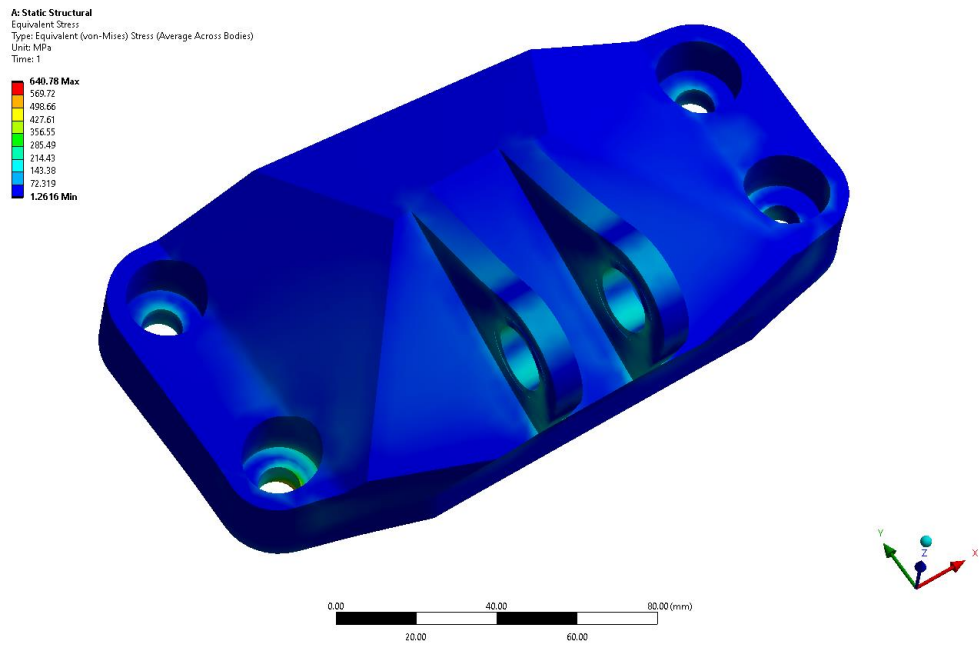


Εικόνα 46. Οριακές συνθήκες και φορτία.

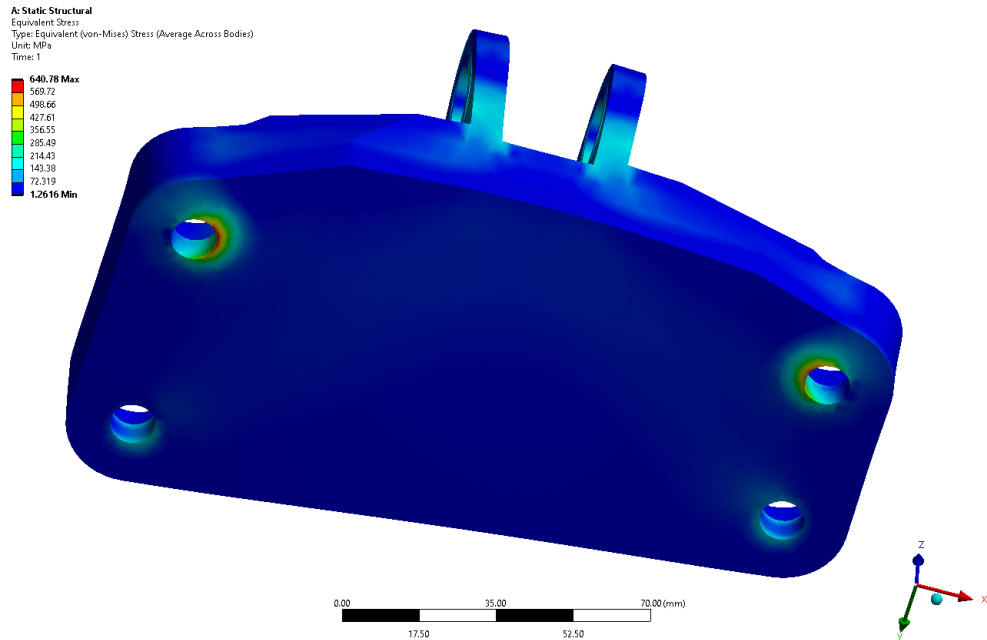
Στις παρακάτω εικόνες (**Εικόνα 47** έως **Εικόνα 49**) παρουσιάζεται η ισοδύναμη τάση Von-Mises με μέγιστη τιμή 640.78 MPa. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού το οποίο είναι 880MPa άρα η κατασκευή μπορεί να θεωρηθεί ασφαλής.



Εικόνα 47. Ισοδύναμη τάση Von-Mises (όψη 1)

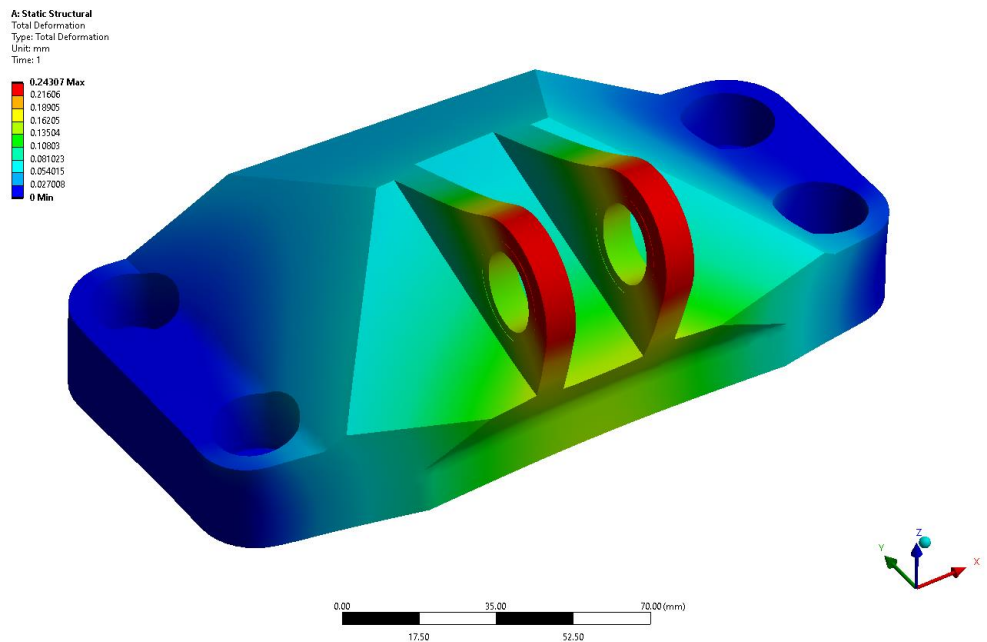


Εικόνα 48. Ισοδύναμη τάση Von-Mises (όψη 2)



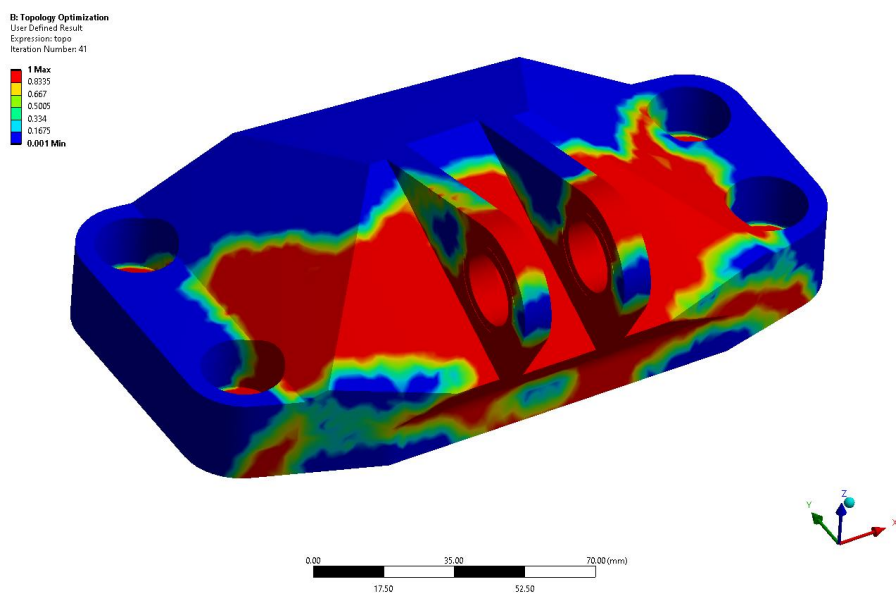
Εικόνα 49. Ισοδύναμη τάση Von-Mises (όψη 3)

Στην **Εικόνα 50** παρουσιάζεται η μέγιστη παραμόρφωση της γεωμετρίας με μέγιστη τιμή 0,24 μμ.

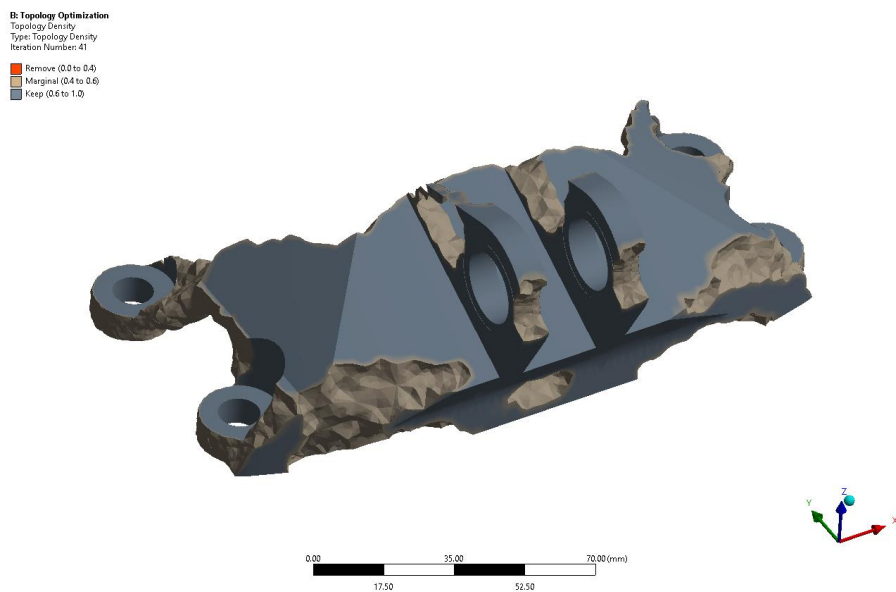


Εικόνα 50. Ολική παραμόρφωση (total deformation)

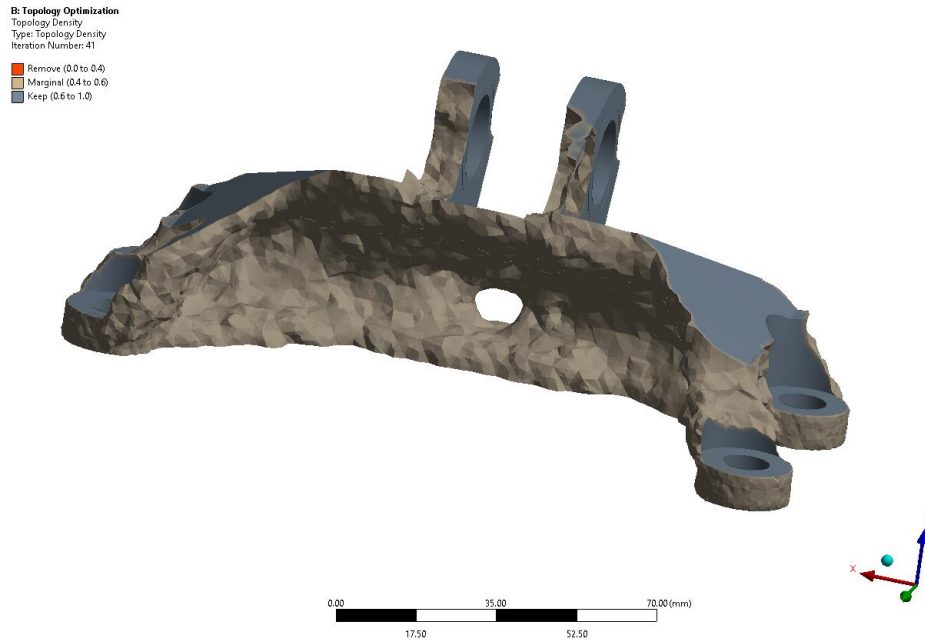
Στις παρακάτω εικόνες (**Εικόνα 51** έως **Εικόνα 53**) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης τοπολογίας. Η μάζα της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας είναι 0,61 κιλά η οποία αντιστοιχεί περίπου στο 29,3% της αρχικής μάζας.



Εικόνα 51. Απεικόνιση ψευδοπυκνότητας υλικού



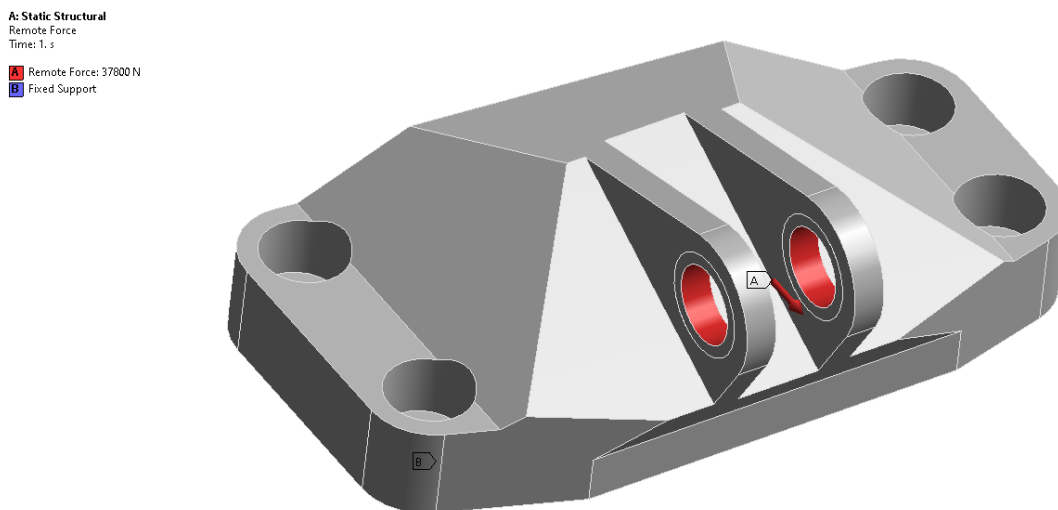
Εικόνα 52. Βελτιστοποιημένη μορφή της γεωμετρίας με τιμή ψευδοπυκνότητας 0,6 (όψη 1)



Εικόνα 53. Βελτιστοποιημένη μορφή της γεωμετρίας με τιμή ψευδοπυκνότητας 0,6 (όψη 2)

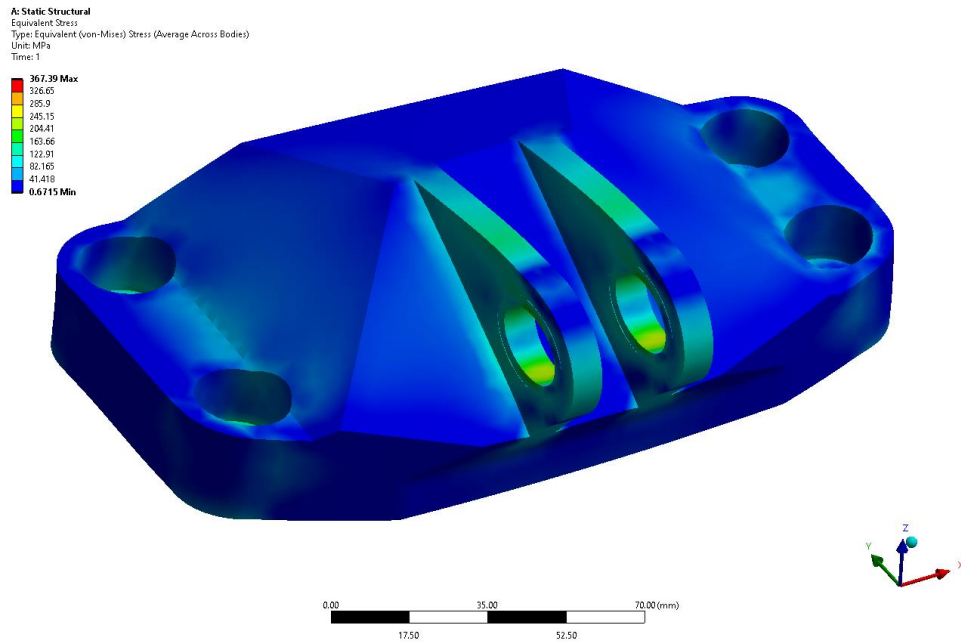
5.2 Σενάριο φόρτισης 2: Η φορά της δύναμης είναι οριζόντια προς τα έξω

Στην **Εικόνα 54** απεικονίζονται οι οριακές συνθήκες και τα φορτία για το δεύτερο σενάριο φόρτισης της κατασκευής. Στα σημεία των οπών έχει θεωρηθεί ότι υπάρχει πάκτωση (μπλε χρώμα). Η δύναμη (remote force) ασκείται στο κέντρο των οπών μεταξύ των ελασμάτων. Η φορά της είναι οριζόντια προς τα έξω (**Εικόνα 41**) και το μέτρο της είναι 37800 N.

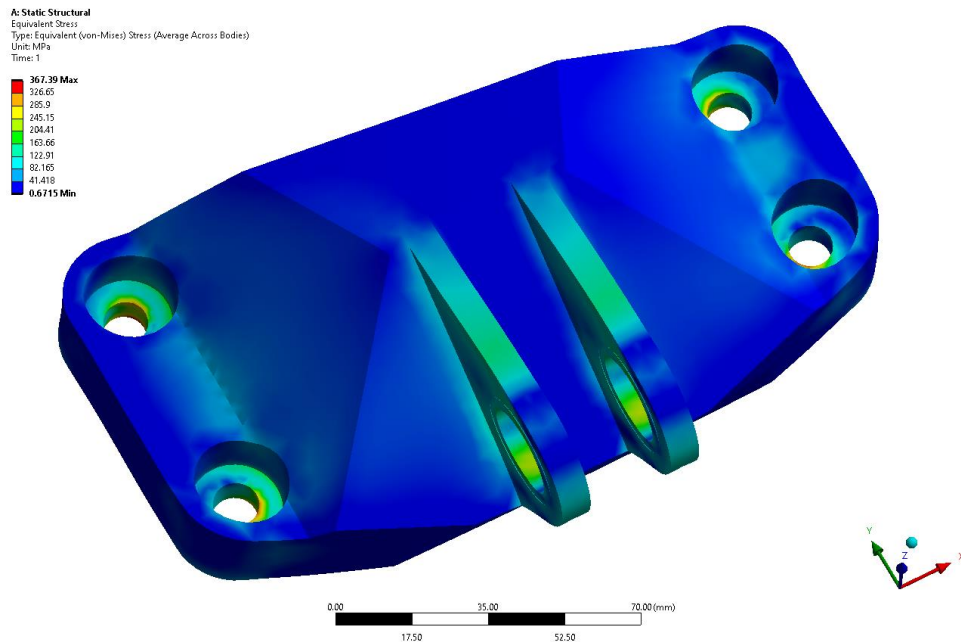


Εικόνα 54. Οριακές συνθήκες και φορτία.

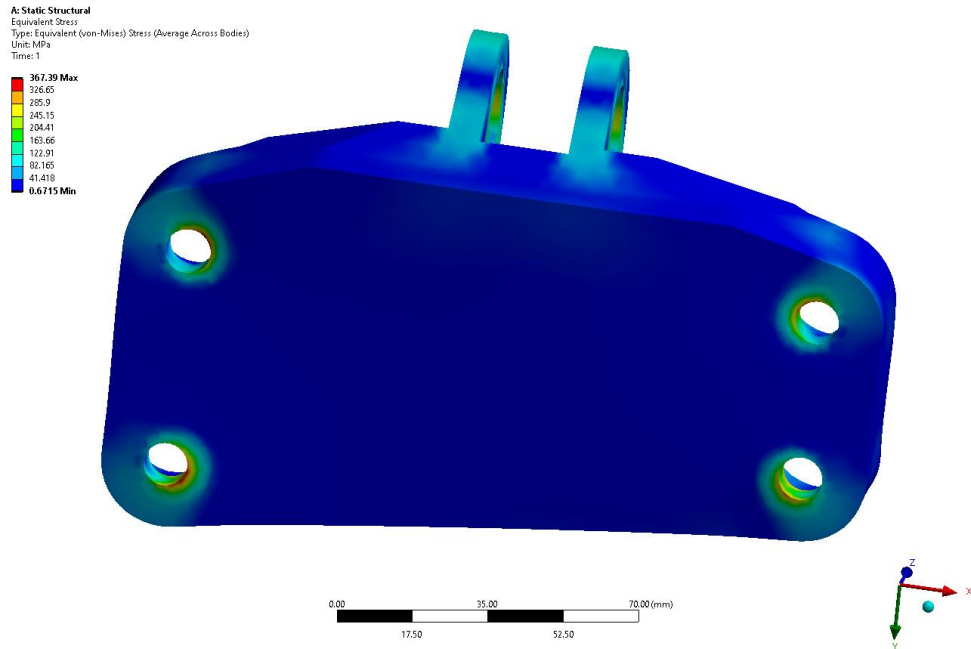
Στις παρακάτω εικόνες (**Εικόνα 55** έως **Εικόνα 57**) παρουσιάζεται η ισοδύναμη τάση Von-Mises με μέγιστη τιμή 367,39 MPa. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού το οποίο είναι 880MPa άρα η κατασκευή μπορεί να θεωρηθεί ασφαλής.



Εικόνα 55. Ισοδύναμη τάση Von-Mises (όψη 1)

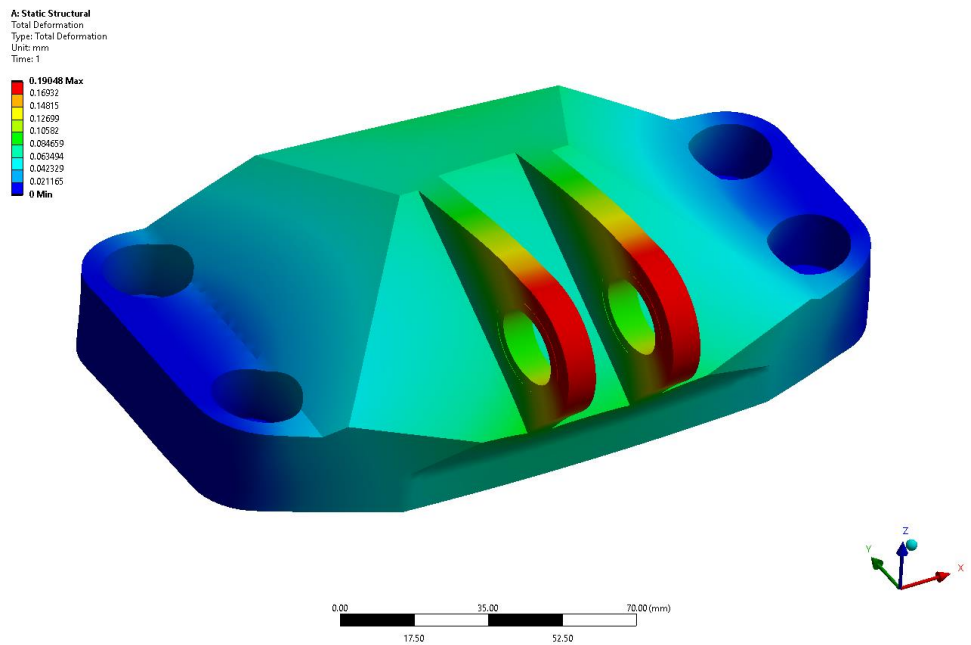


Εικόνα 56. Ισοδύναμη τάση Von-Mises (όψη 2)



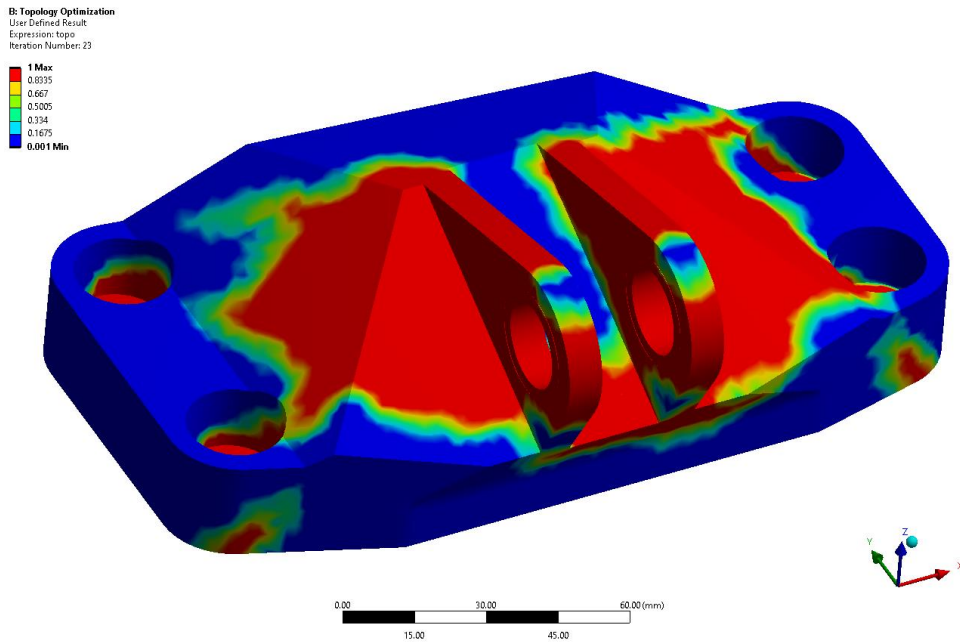
Εικόνα 57. Ισοδύναμη τάση Von-Mises (όψη 3)

Στην **Εικόνα 58** παρουσιάζεται η μέγιστη παραμόρφωση της γεωμετρίας με μέγιστη τιμή 0,19 μμ.

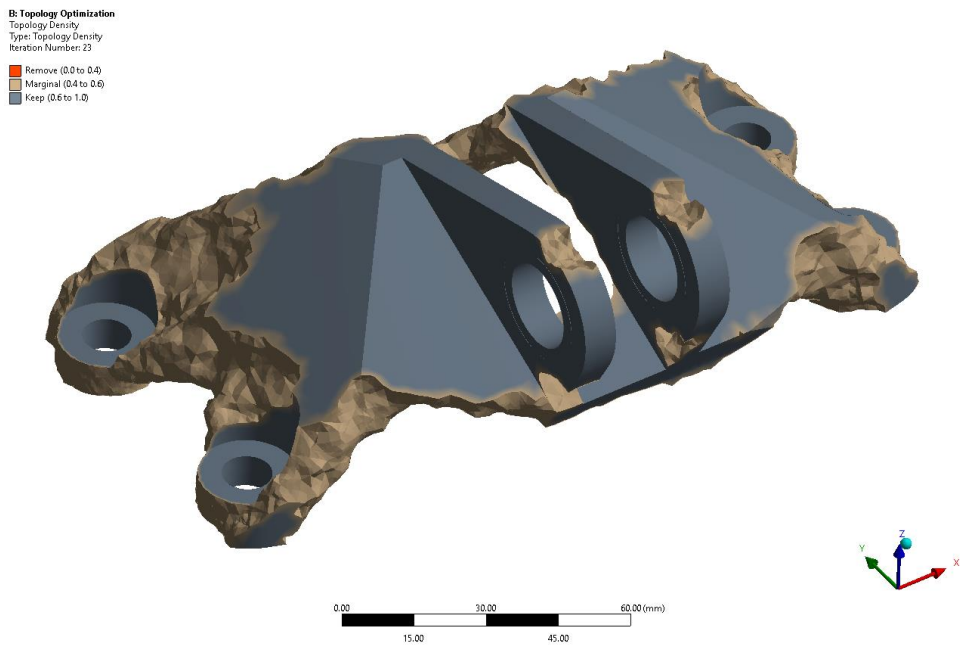


Εικόνα 58. Ολική παραμόρφωση (total deformation)

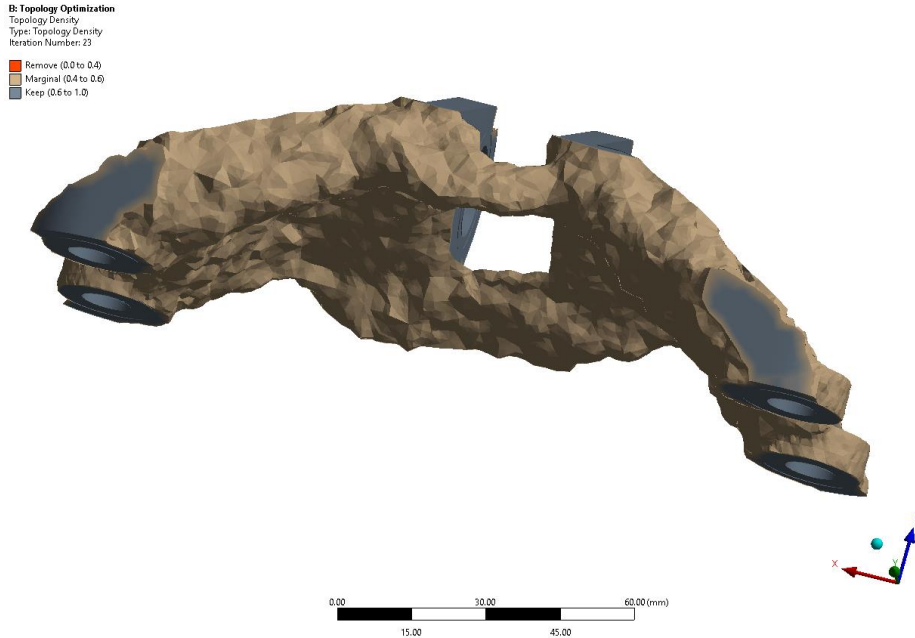
Στις παρακάτω εικόνες (**Εικόνα 59** έως **Εικόνα 61**) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης τοπολογίας. Η μάζα της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας είναι 0,6 κιλά η οποία αντιστοιχεί περίπου στο 29,2% της αρχικής μάζας.



Εικόνα 59. Απεικόνιση ψευδοπυκνότητας υλικού



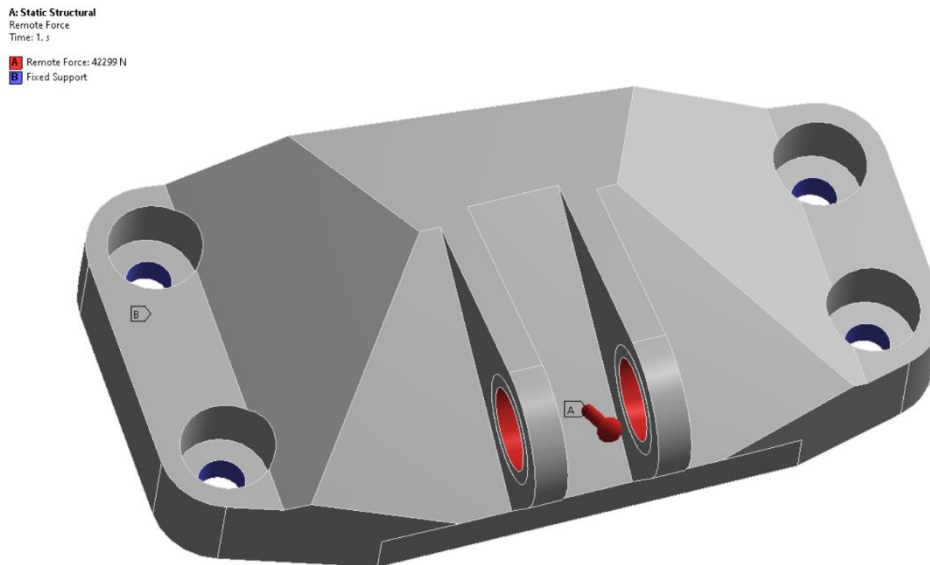
Εικόνα 60. Βελτιστοποιημένη μορφή της γεωμετρίας με τιμή ψευδοπυκνότητας 0,6 (όψη 1)



Εικόνα 61. Βελτιστοποιημένη μορφή της γεωμετρίας με τιμή ψευδοπυκνότητας 0,6 (όψη 2)

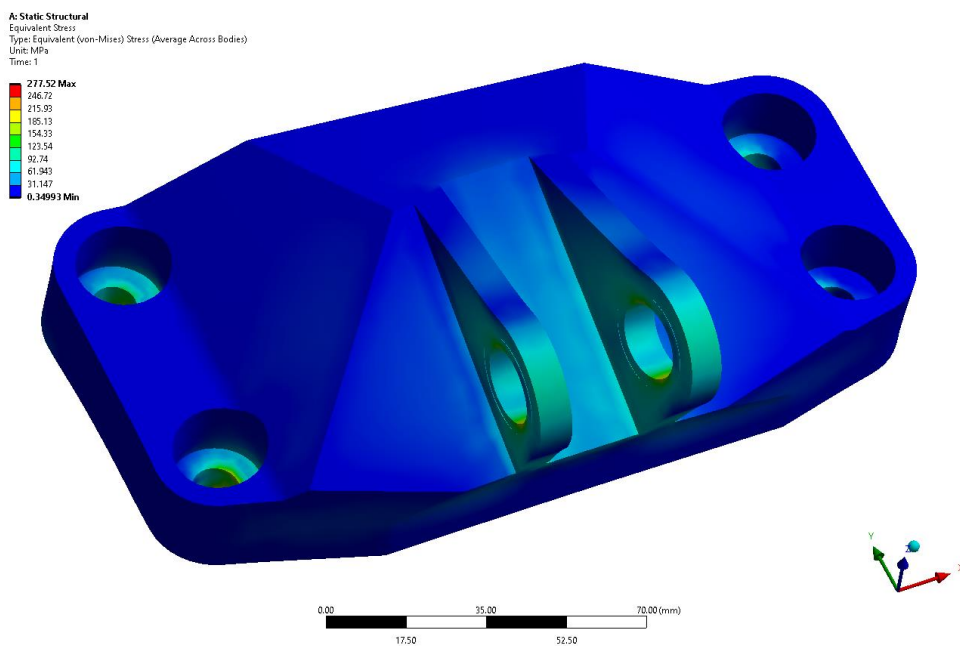
5.3 Σενάριο φόρτισης 3: Η φορά της δύναμης είναι κάθετη και προς τα έξω

Στην **Εικόνα 62, Εικόνα 54** απεικονίζονται οι οριακές συνθήκες και τα φορτία για το τρίτο σενάριο φόρτισης της κατασκευής. Στα σημεία των οπών έχει θεωρηθεί ότι υπάρχει πάκτωση (μπλε χρώμα). Η δύναμη (remote force) ασκείται στο κέντρο των οπών μεταξύ των ελασμάτων. Η φορά της δύναμης είναι προς τα πάνω και προς τα έξω (**Εικόνα 42 Εικόνα 41**) και το μέτρο της είναι 42299 N.

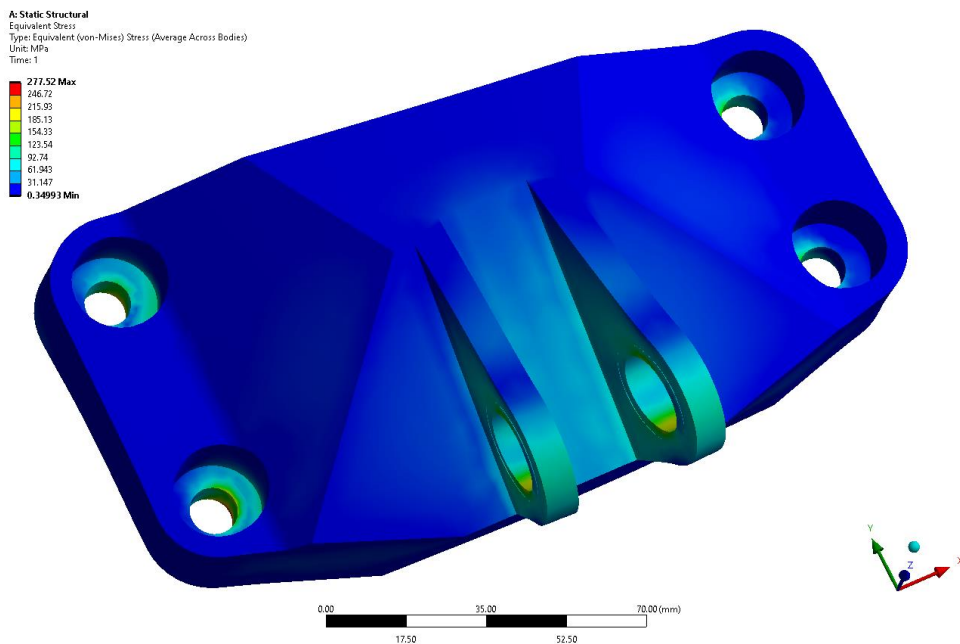


Εικόνα 62. Οριακές συνθήκες και φορτία.

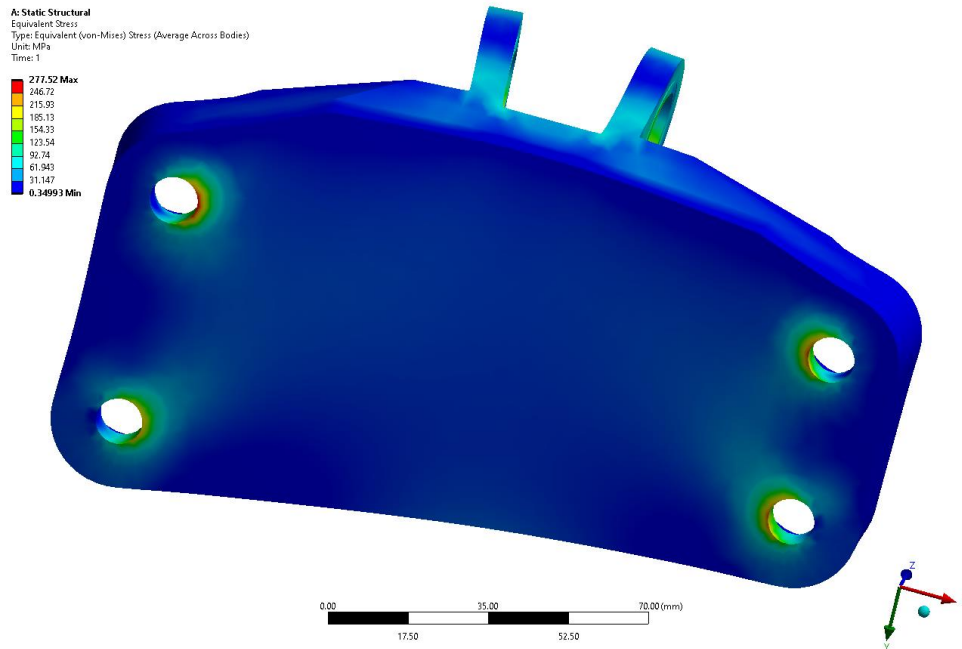
Στις παρακάτω εικόνες (**Εικόνα 63** έως **Εικόνα 65**) παρουσιάζεται η ισοδύναμη τάση Von-Mises με μέγιστη τιμή 277,52 MPa. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού το οποίο είναι 880MPa άρα η κατασκευή μπορεί να θεωρηθεί ασφαλής.



Εικόνα 63. Ισοδύναμη τάση Von-Mises (όψη 1)

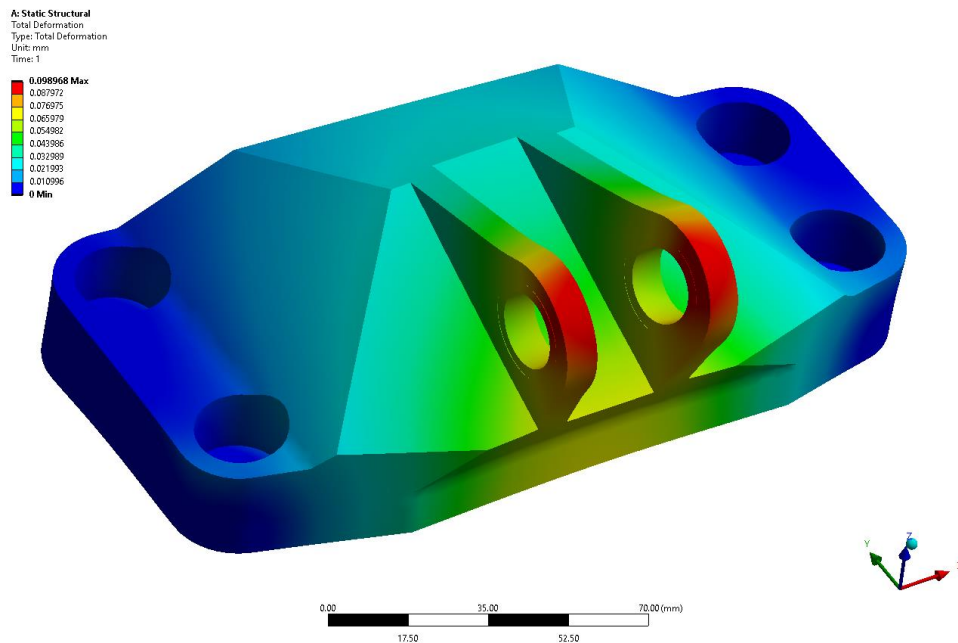


Εικόνα 64. Ισοδύναμη τάση Von-Mises (όψη 2)



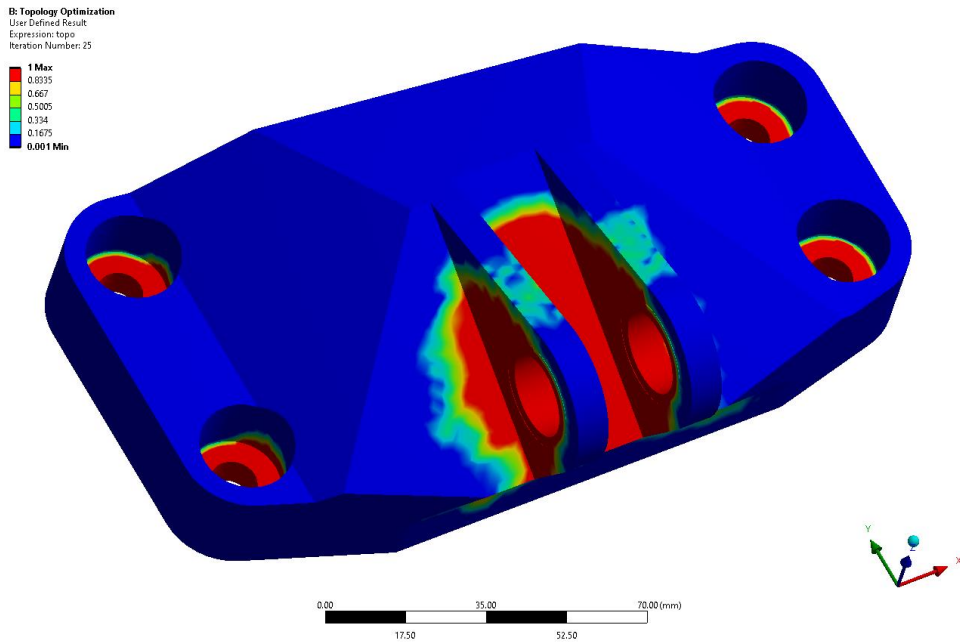
Εικόνα 65. Ισοδύναμη τάση Von-Mises (όψη 3)

Στην **Εικόνα 66** παρουσιάζεται η μέγιστη παραμόρφωση της γεωμετρίας με μέγιστη τιμή 0,098 μμ.

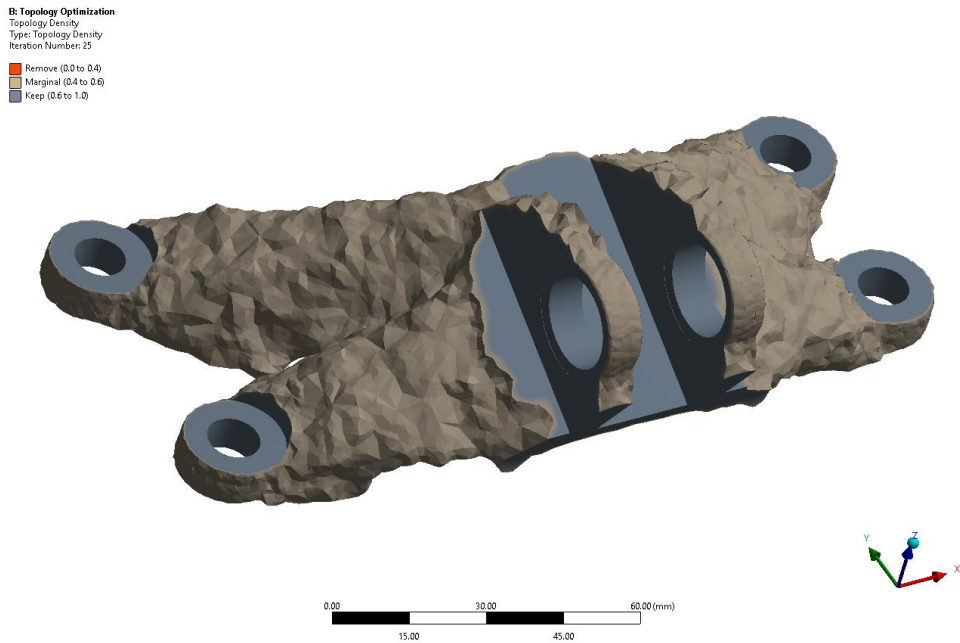


Εικόνα 66. Ολική παραμόρφωση (total deformation)

Στις παρακάτω εικόνες (**Εικόνα 67** έως **Εικόνα 69**) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης τοπολογίας. Η μάζα της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας είναι 0,61 κιλά η οποία αντιστοιχεί περίπου στο 29,3% της αρχικής μάζας.

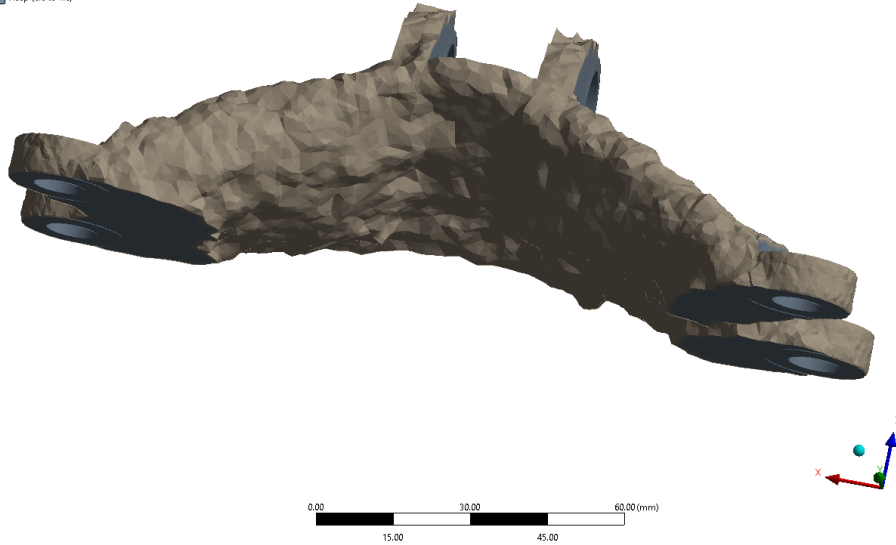


Εικόνα 67. Απεικόνιση ψευδοπυκνότητας υλικού



Εικόνα 68. Βελτιστοποιημένη μορφή της γεωμετρίας με τιμή ψευδοπυκνότητας 0,6 (όψη 1)

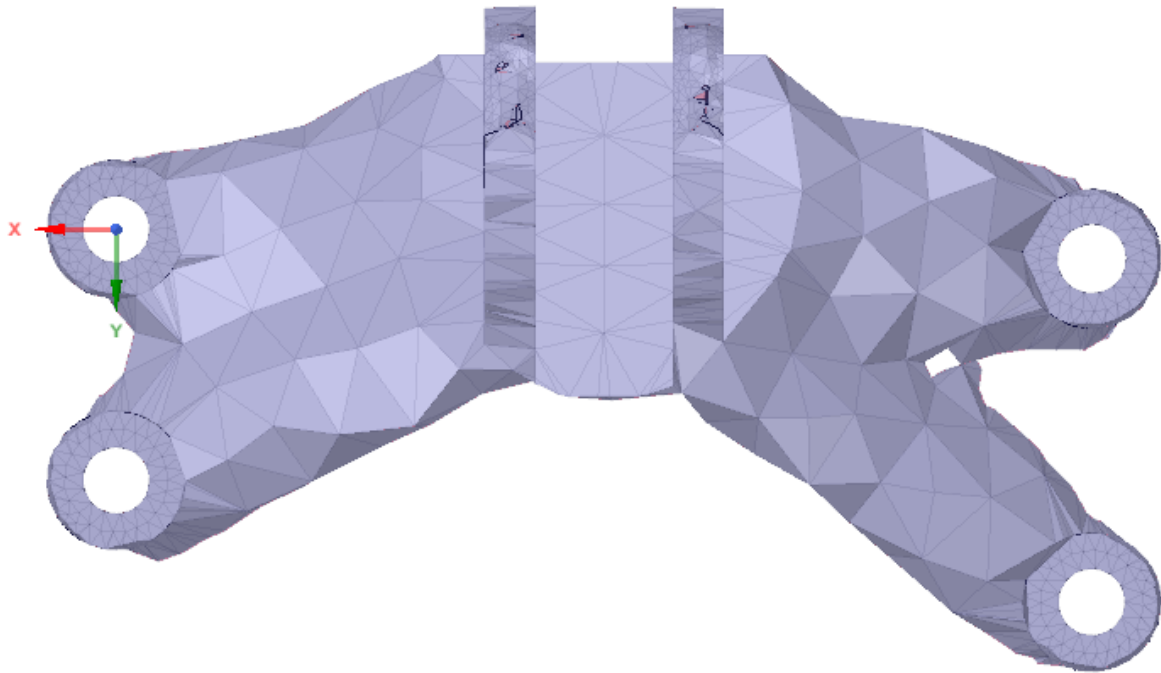
B: Topology Optimization
Topology Density
Type: Topology Density
Iteration Number: 25
Remove (0.0 to 0.4)
Marginal (0.4 to 0.6)
Keep (0.6 to 1.0)



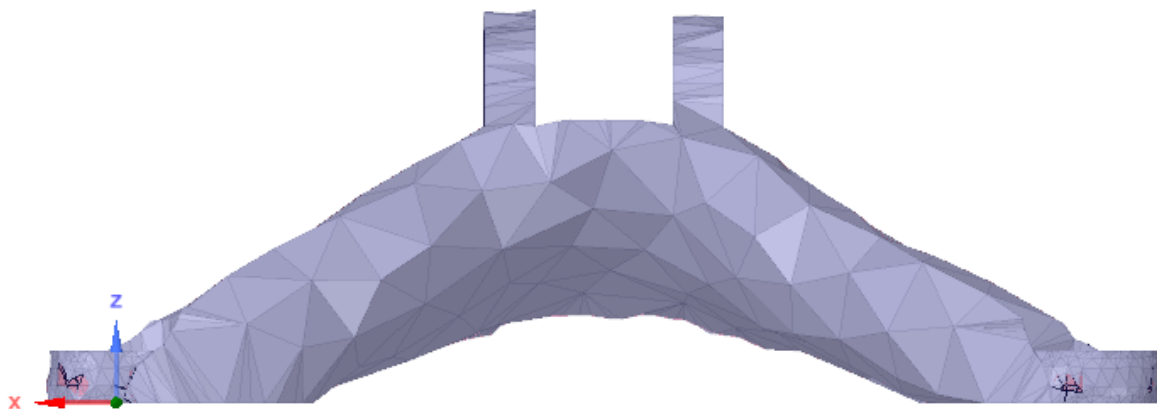
Εικόνα 69. Βελτιστοποιημένη μορφή της γεωμετρίας με τιμή ψευδοπυκνότητας 0,6 (όψη 2)

5.4 Βελτιστοποιημένη γεωμετρία και για τα 3 σενάρια φόρτισης

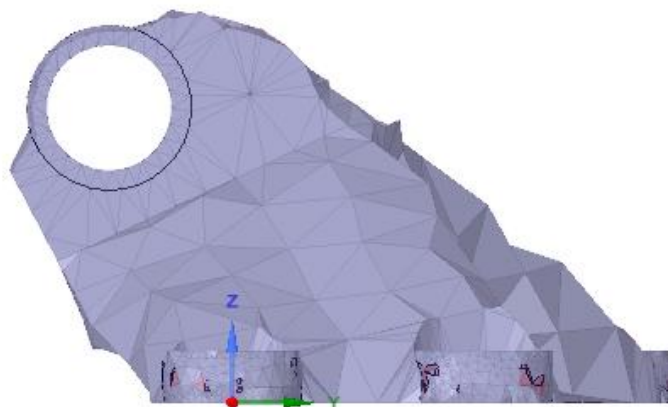
Μετά τα αποτελέσματα και των 3 τοπολογικών βελτιστοποιήσεων καταλήγουμε στην παρακάτω βελτιστοποιημένη γεωμετρία με σχετικά μικρή πρόσθεση μάζας .



Εικόνα 70. Τελική μορφή γεωμετρίας (άνοψη).



Εικόνα 71. Τελική μορφή γεωμετρίας (όψη 1).



Εικόνα 72. Τελική μορφή γεωμετρίας (όψη 2)

Η μάζα της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας βρίσκεται στα 0,64 kg το οποίο είναι αυξημένο κατά 6,25% από το αποτέλεσμα της τοπολογικής βελτιστοποίησης που μας έδωσε το πρόγραμμα. Η προσαύξηση αυτή έγινε για κατασκευαστικούς λόγους βγήκε μέσω του προγράμματος.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της μεθόδου βελτιστοποίησης τοπολογίας σε ένα μοντέλο υποστηρίγματος μηχανής τζετ (jet engine) και η επιφανειακή παρατήρηση του θεωρητικού υποβάθρου αυτής. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού προγράμματος ANSYS 2020. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε τα εξής:

- Η τοπολογική βελτιστοποίηση αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο στα χέρια των μηχανικών-σχεδιαστών, η σωστή χρήση του οποίου μπορεί να οδηγήσει σε καινοτόμες κατασκευές και προϊόντα.
- Το υπολογιστικό πρόγραμμα μας δίνει την δυνατότητα της γρήγορης και εύκολης παραμετροποίησης των δεδομένων της κατασκευής ,αλλά και των πρωταρχικών στόχων που έχουν τεθεί.
- Η εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να γίνει σε πληθώρα κατασκευών και μεγεθών αυτών.
- Ο χρόνος σχεδιασμού και παραγωγής προϊόντων και κατασκευών μπορεί να μειωθεί.
- Το κόστος της διαδικασίας παραγωγής μπορεί να μειωθεί δραστικά εφόσον πολλά δεδομένα για τα όρια αντοχής των κατασκευών είναι γνωστά κατά το πέρας των αναλύσεων ,αφαιρώντας έτσι αρκετούς ελέγχους αντοχής.
- Με τα σενάρια φορτίσεων που εφαρμόσαμε,επιβεβαιώσαμε ότι για την ίδια κατασκευή μπορούμε να καταλήξουμε σε διαφορετικές τοπολογικές βελτιστοποιήσεις ανάλογα την λειτουργία που χρειαζόμαστε από την κατασκευή.
- Με τη χρήση της μεθόδου βελτιστοποίησης τοπολογίας μπορεί να επιτευχθεί μείωση της απαιτούμενης πρώτης ύλης για την παραγωγή προϊόντων και κατασκευών χωρίς να πρέπει να αλλάξουν οι συνθήκες λειτουργίας τους. Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 5 μπορεί να επιτευχθεί μείωση της μάζας έως και 70%

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *Bendsøe, M.P., Sigmund, O., (2004), Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*
2. *Huang, X., Xie, M., (2010), Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications, John Wiley & Sons, Ltd, Sussex, UK*
3. *Xie, Y.M, Steven, G.P, (1997), Evolutionary Structural Optimization, Springer-Verlag, Berlin*
4. *Gebisa A.W, Lemu H.G, (2017), "A case study on topology optimized design for additive manufacturing", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*
5. *Querin, O., Victoria, M., Alonso, C., Ansola, R. and Marti, P., (2017), Topology Design Methods for Structural Optimization, Elsevier Academic Press*
6. *T. Buhl, C.B.W. Pedersen, and O. Sigmund, (2000), Stiffness design of geometrically nonlinear structures using topology optimization. Structural and multidisciplinary optimization 19, 93-104*
7. *T. Buhl, (2002), Simultaneous topology optimization of structure and supports. Structural and multidisciplinary optimization 23, 336-346*
8. <https://grabcad.com/challenges/ge-jet-engine-bracket-challenge>
9. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MTP641>
10. *Zhou, M., Rozvany, G.I.N., (1993), "DCOC: An optimality criteria method for large systems. Part II: algorithm", Structural and Multidisciplinary Optimization, 6, Issue 4, pp 250-262*

11. Bendsoe M.P., (1989), "Optimal shape design as a material distribution problem", *Structural and Multidisciplinary Optimization, Structural and Multidisciplinary Optimization*, **1**, Issue 4, pp. 193-202
12. Bendsoe, M.P., (1995), *Optimization of Structural Topology, Shape, and Material*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
13. Xie, Y.M, Steven, G.P, (1993), "A simple evolutionary procedure for structural optimization", *Computers & Structures*, **49**, Issue 5, pp. 885-896
14. Bendsoe M.P,N.Kikuchi,(1988),"Generating optimal topologies in structural design using homogenization method",*Computer methods in applied mechanics and engineering*,pp 291-318
15. <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/ge-challenges-innovators-to-redesign-jet-engine-parts-to-be-/>