



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΠΜΣ «Συστήματα Αυτοματισμού»

Μεταπτυχιακή Εργασία

Τίτλος Θέματος
Τοπολογική Βελτιστοποίηση Οπίσθιου Ψαλιδιού Μοτοσυκλέτας

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ
ΣΤΑΥΡΟΣ ΡΟΝΤΟΓΙΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΚΟΥΛΟΧΕΡΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ
ΒΟΣΟΥ ΚΛΕΙΩ, ΔΡ. ΜΗΧ.

Αθήνα, 2022

Ευχαριστίες

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε από τον Μεταπτυχιακό φοιτητή Ροντογιάννη Σταύρο του ΔΠΜΣ Συστημάτων Αυτοματισμού του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά το ακαδημαϊκό έτος 2021-2022 υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή Κουλοχέρη Δημήτριου και της Δρ, Μηχ. Βόσου Κλειώς.

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 Μεταπτυχιακής μου Εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στην Δρ. Μηχ. Βόσου Κλειώ για την καθοριστικής σημασίας βοήθεια της, κατά την εκτέλεση του υπολογιστικού μέρους καθώς και για τις συμβουλές και γνώσεις που μου παρείχε κατά τη συγγραφή της εργασίας.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περιεχόμενα	1
Κατάλογος Εικόνων	3
Παράρτημα συντμήσεων	4
Περίληψη	5
Abstract	6
1. Εισαγωγή.....	7
1.1. Στόχος εργασίας.....	9
2. Σχεδιασμός και Μηχανική ανάλυση	10
2.1. Σχεδίαση με τη βοήθεια H/Y (CAD).....	10
2.2. Αρχικός σχεδιασμός.....	12
2.3. Μέθοδος Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων	14
2.3.1. Στατική ανάλυση	17
2.3.1.1. Ορισμός υλικού.....	19
2.4. Ανάλυση Φορτίσεων.....	24
2.4.1. Ορισμός φορτίσεων & στηρίξεων.....	25
2.4.2. Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης.....	26
3. Βελτιστοποίηση κατασκευής στο στάδιο της σχεδιομελέτης.....	28
3.1. Μέθοδοι βελτιστοποίησης.....	28
3.2. Μέθοδος βελτιστοποίησης της τοπολογίας	29
3.3. Μοντελοποίηση και μαθηματική απεικόνιση προβλήματος.....	31
3.4. Χρησιμοποιούμενη μέθοδος και αλγόριθμος επίλυσης.....	32
3.4.1. Μέθοδος SIMP.....	32
3.4.2. Αλγόριθμος επίλυσης.....	33
4. Τοπολογική βελτιστοποίηση ψαλιδιού μοτοσυκλέτας	34
4.1. Ορισμός περιοχών εφαρμογής της μεθόδου	34
4.2. Ογκομετρικά χαρακτηριστικά μοντέλου και ορισμός λοιπών παραμέτρων	35
4.3. Αποτελέσματα ανάλυσης τοπολογίας.....	37
5. Επανασχεδιασμός και επαλήθευση της μεθόδου	40
5.1. Επανασχεδιασμός ψαλιδιού σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης τοπολογίας.....	40
5.2. Στατικός έλεγχος νέου (επανασχεδιασμένου) μοντέλου.....	42

6. Συμπεράσματα	45
6.1. Συμπεράσματα μελέτης.....	45
6.2. Μελλοντική εργασία.....	46
7. Βιβλιογραφία.....	47
Παράρτημα Α.....	49
Παράρτημα Β.....	51
Παράρτημα Γ	57
Παράρτημα Δ.....	61

Κατάλογος Εικόνων

Σχήμα 1. Ψαλίδι από ατσάλινους σωλήνες ορθογωνικής διατομής	8
Σχήμα 2. Ψαλίδι αλουμινίου	8
Σχήμα 3. Αρχικό γεωμετρικό μοντέλο	12
Σχήμα 4. Σημεία συνεργασίας ψαλιδιού-συστήματος μοτοσυκλέτας.....	13
Σχήμα 5. Διαδικασία στατικής ανάλυσης με την μέθοδο των ΠΣ	16
Σχήμα 6. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης.....	18
Σχήμα 7. Μηχανικές ιδιότητες Aluminium_2014.....	19
Σχήμα 8. Ορισμός υλικού.....	20
Σχήμα 9. Τετράπλευρο συμπαγές στοιχείο δέκα κόμβων	20
Σχήμα 10. Δημιουργία (α) ασυνεχών & (β) συνεχών πλεγμάτων μεταξύ διεπαφών	21
Σχήμα 11. Δημιουργία πλέγματος με ενδιάμεσο βήμα παραγωγής συμπιπτουσών διεπαφών	22
Σχήμα 12. Βελτιστοποίηση μορφολογίας 3d τετραεδρικών στοιχείων.....	22
Σχήμα 13. Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων.....	23
Σχήμα 14. Απεικόνιση φορτίσεων ψαλιδιού	24
Σχήμα 15. Ορισμός φορτίσεων και στηρίξεων αρχικού μοντέλου.....	25
Σχήμα 16. Διάγραμμα μετατόπισης κόμβων αρχικού μοντέλου	26
Σχήμα 17. Διάγραμμα τάσης ανά στοιχείο αρχικού μοντέλου.....	27
Σχήμα 18. Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου τοπολογικής βελτιστοποίησης.....	33
Σχήμα 19. Ορισμός περιοχών εφαρμογής τοπολογικής βελτιστοποίησης	34
Σχήμα 20. Ογκομετρικά χαρακτηριστικά αρχικού μοντέλου.....	35
Σχήμα 21. Ορισμός αξονοσυμμετρικής εφαρμογής μεθόδου	36
Σχήμα 22. Διάγραμμα σύγκλισης μεθόδου τοπολογικής βελτιστοποίησης	37
Σχήμα 23. Διάγραμμα κανονικοποιημένης πυκνότητας υλικού ανά στοιχείο	38
Σχήμα 24. 30 ^{ος} κύκλος τοπολογικής βελτιστοποίησης 50% κανονικοποιημένη πυκνότητα.....	38
Σχήμα 25. 30 ^{ος} κύκλος τοπολογικής βελτιστοποίησης 75% κανονικοποιημένη πυκνότητα.....	39
Σχήμα 26. 30 ^{ος} κύκλος τοπολογικής βελτιστοποίησης 99% κανονικοποιημένη πυκνότητα.....	39
Σχήμα 27. Περιοχές αφαίρεσης υλικού κατά τον επανασχεδιασμό.....	40
Σχήμα 28. Επανασχεδιασμένο γεωμετρικό μοντέλο	41
Σχήμα 29. Ογκομετρικά χαρακτηριστικά επανασχεδιασμένου μοντέλου.....	41
Σχήμα 30. Ορισμός φορτίσεων και στηρίξεων νέου μοντέλου	42
Σχήμα 31. Διάγραμμα μετατόπισης κόμβων επανασχεδιασμένου μοντέλου.....	43
Σχήμα 32. Διάγραμμα τάσης ανά στοιχείο αρχικού μοντέλου.....	44
Σχήμα 33. Συνοπτικός πίνακας συμπερασμάτων μελέτης	45
Σχήμα 34. Διαδοχή μεταβολών δομής μοντέλου	45

Παράρτημα συντμήσεων

2D	2 Dimensions
3D	3 Dimensions
CAD	Computer-aided Design
CAM	Computer-aided Manufacturing
CAE	Computer-aided Engineering
CNC	Computer Numerical Control
CG	Center of Gravity
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Mesh

Περίληψη

Η τεχνολογική εξέλιξη και η αύξηση του ανταγωνισμού, η αύξηση του κόστους των πρώτων υλών και η επικίνδυνη αύξηση του ενεργειακού αντικτύπου των διαδικασιών παραγωγής βιομηχανικών προϊόντων και κατασκευών, απαιτούν την υιοθέτηση τεχνικών βέλτιστου σχεδιασμού με σκοπό την εξοικονόμηση των χρησιμοποιούμενων πόρων που δαπανώνται κατά την ανάπτυξη τους.

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία μελετάται ο βέλτιστος σχεδιασμός ψαλιδιού μοτοσυκλέτας, με στόχο την ανάπτυξη ελαφριάς δομής με εύκολη διαδικασία παραγωγής, διατηρώντας ταυτόχρονα τις μηχανικές του ιδιότητες καθώς αυτό υπόκειται σε στατικές φορτίσεις. Για το λόγο αυτό, διενεργούνται επαναληπτικοί στατικοί έλεγχοι και τοπολογική βελτιστοποίηση.

Όλες οι απαιτούμενες διαδικασίες, όπως η αρχική σχεδίαση της κατασκευής, η στατική ανάλυση και στην συνέχεια, η τοπολογική βελτιστοποίηση, από την οποία προκύπτει και ο τελικός βέλτιστος σχεδιασμός αυτής υλοποιούνται με χρήση του λογισμικού Siemens NX_12 το οποίο αποτελεί ένα ολοκληρωμένο CAD/CAM/CAE εργαλείο προηγμένης τεχνολογίας γνωστό και ως “Unigraphics NX”.

Τα βασικότερα συμπεράσματα της παρούσας Μεταπτυχιακής Εργασίας είναι

- Η σημαντικότητα της ορθής χρήσης των αντικειμενικών κριτηρίων που απαιτούνται στη διαδικασία σχεδίασης ενός βιομηχανικού προϊόντος
- Η δυνατότητα ολιστικής προσέγγισης του επιδιωκόμενου στόχου υιοθετώντας σύγχρονες τεχνικές σχεδιομελέτης (συνδυασμός παραμέτρων ασφάλειας-αντοχής, παραγωγικών διαδικασιών και αισθητικής)
- Ο βαθμός στον οποίο μπορούν να μεταβληθούν τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος
- Ο αντίκτυπος των ανωτέρω στις χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες, στον χρόνο παραγωγής και στο κόστος παραγωγής βιομηχανικών προϊόντων.

Abstract

Technological development and increasing competition, lack of precision raw materials as well as the dangerous increase of the energy impact of the production processes of industrial products and constructions, require the adoption of optimal design techniques in order to save the materials used and the energy expended while their processing.

In the present thesis, the optimal design of a motorcycle swing arm type construction is studied, in order to develop a light structure with an easy production process, minimizing its total weight, while maintaining its mechanical properties as it is subject to static loads. For this reason, repeated static inspections and topology analyses are performed as optimal design techniques.

All the required procedures are performed using the Siemens NX_12 software, such as the initial design of the construction, the static analysis and then the topology analysis, from which the final optimal design is derived.

The main conclusions of this Master's Thesis are:

- The importance of the correct use of the objective criteria required in the design process of an industrial product
- The possibility of a holistic approach to the intended goal by adopting modern design techniques (combination of safety-durability parameters, production processes and aesthetics)
- The degree to which the characteristics of the final product can be changed
- The impact of the above on the raw materials used, the production time and the cost of manufacturing industrial products.

1. Εισαγωγή

Το προϊόν που μελετάται στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία είναι το κυρίως τμήμα του συστήματος της πίσω ανάρτησης μίας μοτοσυκλέτας και συγκεκριμένα το ψαλίδι. Λειτουργία του είναι η στήριξη του πίσω τροχού και η σύνδεσή του με το πλαίσιο της μοτοσυκλέτας, ενώ με την ελευθερία κίνησής του κατά τον κατακόρυφο άξονα και τη σύνδεσή του με το/τα αμορτισέρ (αποσβεστήρας) επιτελεί και τον ρόλο της ανάρτησης.

Η συμβολή του ψαλιδιού είναι πραγματικά καίριας σημασίας καθώς παραλαμβάνει συνεργατικά με το αντίστοιχο μπροστινό σύστημα ανάρτησης μίας μοτοσυκλέτας, όλες τις δυνάμεις που υφίστανται στο σύστημα αναβάτη – μοτοσυκλέτας – οδοστρώματος.

Συγκεκριμένα, το ψαλίδι καλείται να διαχειριστεί την ισχύ του κινητήρα της μοτοσυκλέτας καθώς αυτή μεταβιβάζεται με τη μορφή κινητικής ενέργειας μέσω του συστήματος μετάδοσης της κίνησης σε αυτό, τις δυνάμεις από το αμορτισέρ και τον τροχό στις οδικές ανωμαλίες, τις γυροσκοπικές δυνάμεις του τροχού και τα παραγόμενα φορτία, όταν η μοτοσυκλέτα στρίβει. Για να εξασφαλιστεί η οδηγική συμπεριφορά που απαιτείται από τους κατασκευαστές, ένα ψαλίδι πρέπει να παραμένει κατά το δυνατόν απαραμόρφωτο, κρατώντας έτσι τη γεωμετρία της μοτοσυκλέτας σταθερή.

Για να γίνει αυτό, το ψαλίδι χρειάζεται ανθεκτική κατασκευή ώστε να μην επηρεάζεται από τις καταπονήσεις που δέχεται σε βαθμό που αντιβαίνει στην προαναφερθείσα οδηγική συμπεριφορά της μοτοσυκλέτας. Μέχρι πρότινος, οι ασάλινοι σωλήνες ορθογωνικής διατομής (Σχήμα 1) ήταν μια κοινή επιλογή, ωστόσο σταδιακά τα αλουμινένια ψαλίδια (Σχήμα 2) ποικίλων διατομών έγιναν ο κανόνας, καθώς φέρουν το πλεονέκτημα της μικρής μάζας και κατά συνέπεια, μειώνουν το βάρος του συστήματος της μοτοσυκλέτας. Η σοβαρότητα του ρόλου του ψαλιδιού γίνεται προφανής αν παρατηρήσει κανείς τις σπορ μοτοσυκλέτες ή τις αγωνιστικές των Moto GP. Όσο η τεχνολογία υλικών εξελίσσεται, αναμένονται αλλαγές και στα ψαλίδια, τα οποία πιθανότατα θα γίνουν ελαφρύτερα, ανθεκτικότερα και ειδικά σχεδιασμένα ώστε να συμπεριφέρονται κατάλληλα, τελειοποιώντας την λειτουργία των αναρτήσεων στις μελλοντικές μοτοσυκλέτες. [20]



Σχήμα 1. Ψαλίδι από ατσάλινους σωλήνες ορθογωνικής διατομής



Σχήμα 2. Ψαλίδι αλουμινίου

1.1. Στόχος εργασίας

Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία παρατίθενται στοιχεία και αποτελέσματα ανάλυσης τοπολογικής βελτιστοποίησης ενός ψαλιδιού μοτοσυκλέτας με σκοπό τη μελέτη και αποσαφήνιση της χρησιμοποιούμενης μεθόδου με όλα τα ενδιάμεσα βήματα και τεχνικές που απαιτούνται. Σκοπός είναι η αφομοίωση των κανόνων που διέπουν τέτοιου είδους πολυμεταβλητά προβλήματα και η καλλιέργεια εμπειριστατωμένης αντίληψης επί των αποτελεσμάτων. Τελικός και ουσιαστικός στόχος της Μεταπτυχιακής Εργασίας είναι η αναγνώριση των εναλλακτικών λύσεων που έχουν να προτείνουν οι ακολουθούμενες μεθοδολογίες μέσω των επάλληλων διαφορετικών αναλύσεων που διενεργούνται και τι σημαίνει αυτό για τις σύγχρονες διαδικασίες σχεδιομελέτης και παραγωγής βιομηχανικών προϊόντων.

2. Σχεδιασμός και Μηχανική ανάλυση

2.1. Σχεδίαση με τη βοήθεια Η/Υ (CAD)

Σήμερα, ο σχεδιασμός προϊόντων ανά τις βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων μηχανολογικού ενδιαφέροντος, γίνεται με χρήση υπολογιστικών εργαλείων, τα οποία υποστηρίζουν τη δημιουργία ψηφιακών 3D μοντέλων, διενεργώντας προσομοίωση όλων των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των κατασκευών πριν τις διαδικασίες παραγωγής αυτών.

Την δεκαετία του 1960 η σχεδίαση με τη χρήση Ηλεκτρονικού Υπολογιστή (Computer Aided Design – CAD) ξεκίνησε να χρησιμοποιείται στις διαδικασίες σχεδιομελέτης προϊόντων έρευνας και μόνο. Το 1980 κατασκευάστηκαν τα πρώτα ολοκληρωμένα λογισμικά κυρίως από εταιρίες της κατασκευαστικής βιομηχανίας, της αυτοκινητοβιομηχανίας και της αεροδιαστημικής. Έκτοτε και κυρίως από το 1990 που ξεκίνησαν να υπάρχουν στην αγορά τα λογισμικά CAD αποτελούν αναπόσπαστο εργαλείο το οποίο διατίθεται σε πληθώρα βάσει των διαφορετικών απαιτήσεων των κατασκευών και του χρήστη.

Χρησιμοποιούμενες μέθοδοι σχεδιασμού/μοντελοποίησης λογισμικών CAD: [15][14][18]

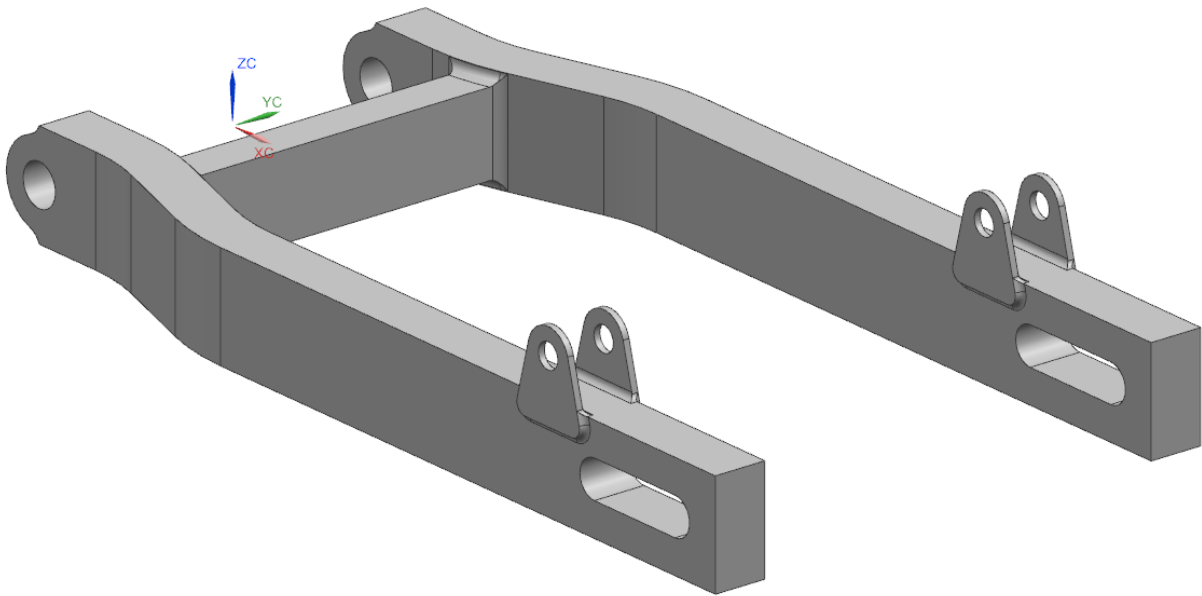
- 2D σχεδιασμός: Αφορά σχεδιασμό σε σύστημα δύο διαστάσεων που χρησιμοποιείται για απεικόνιση όψεων αντικειμένων
- Μοντέλα ακμών: Στα μοντέλα ακμών η περιγραφή του 2D ή 3D αντικειμένου γίνεται με χρήση ακμών και κορυφών και αποτελούν το απλούστερο είδος γεωμετρικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα συστήματα CAD την δεκαετία του 1960.
- Μοντέλα επιφανειών: Τα μοντέλα επιφανειών εκτός από ακμές και κορυφές περιλαμβάνουν και έδρες. Επίσης οι ακμές μπορεί να είναι καμπύλες.
- Στερεά παραμετρικά μοντέλα με Μορφολογικά Χαρακτηριστικά: Τα στερεά μοντέλα είναι πλήρη ως προς τα πληροφοριακά δεδομένα του αναπαριστάμενου αντικειμένου. Με την διατήρηση γεωμετρικών και τοπολογικών πληροφοριών, προσφέρουν τη δυνατότητα εφαρμογής αλγορίθμων εύρεσης της μάζας, του κέντρου βάρους κ.α.

Πλεονεκτήματα λογισμικών CAD: [15][14][18]

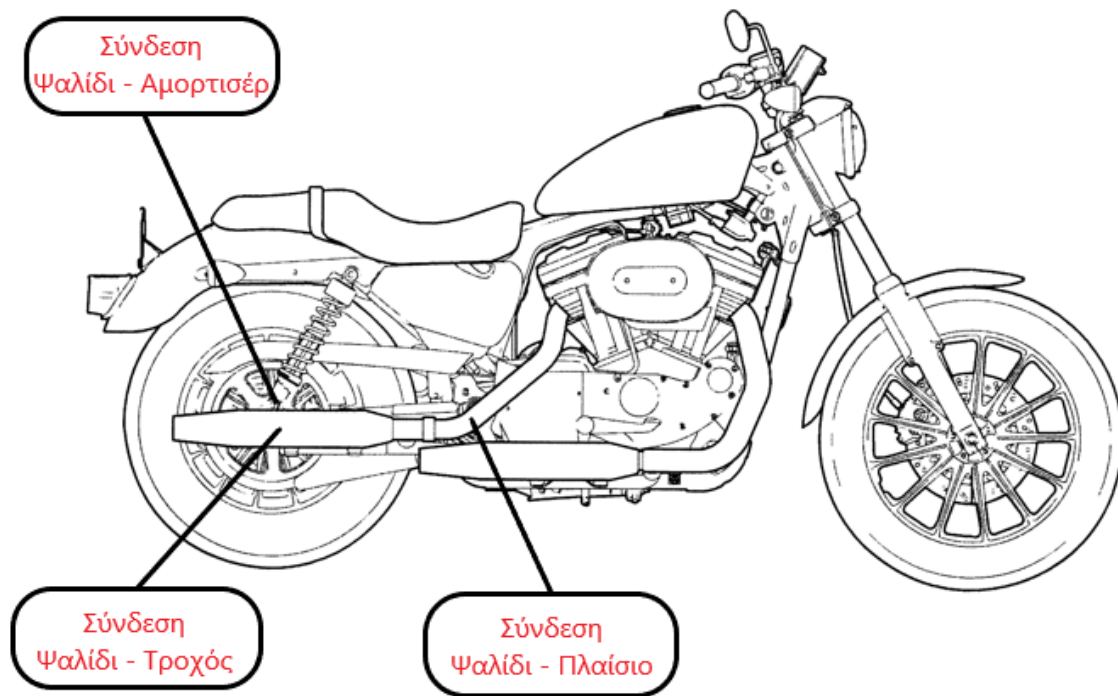
- Άμεση μετάβαση από την ιδέα στην ψηφιακή μοντελοποίηση
- Λεπτομερής απεικόνιση του προϊόντος με απόλυτο έλεγχο ρεαλισμού
- Δυνατότητα γρήγορης τροποποίησης και ελέγχου διαφορετικών σχεδιαστικών επιλογών
- Παραμετρική μοντελοποίηση
- Έλεγχος κατασκευασιμότητας και συναρμογής
- Έλεγχος φυσικών ιδιοτήτων προϊόντος
- Μετατροπή σε διαφορετικές μορφές αρχείων συμβατών με συστήματα CAD, CAM, CAE και μηχανές παραγωγής (CNC, 3D Printing, Laser-cut, κ.α.)
- Εξαγωγή κατασκευαστικών σχεδίων

2.2. Αρχικός σχεδιασμός

Το προϊόν σχεδίασης που παρουσιάζεται είναι μία προσεγγιστική αποτύπωση ψαλιδιού μοτοσυκλέτας τύπου «Cruiser». Η σύνδεσή του με το πλαίσιο της μοτοσυκλέτας (Σχήμα 4) επιτυγχάνεται με περαστό άξονα ενώ συνεργάζεται με ζεύγος αμορτισέρ φέροντας τις αντίστοιχες φλάντζες με οπές για την σύνδεση του με αυτά. Επίσης, φέρει δύο πεπλατυσμένες οπές για την κατάλληλη συνεργασία του με τον άξονα του οπίσθιου τροχού (ρεγουλάρισμα). Η σχεδιαστική απόδοση είναι τέτοια που καθιστά το μοντέλο ρεαλιστικό από άποψη χρήσης και παράλληλα ικανοποιητικό για εφαρμογή των μεθόδων που παρουσιάζονται στη συνέχεια (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Αρχικό γεωμετρικό μοντέλο



Σχήμα 4. Σημεία συνεργασίας ψαλιδιού-συστήματος μοτοσυκλέτας

2.3. Μέθοδος Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στη χρήση μονοδιάστατων, διδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων. Μια από τις πρώτες δημοσιεύσεις στις οποίες παρουσιάστηκε η ιδέα αυτή είναι των Turner, Clough, Martin, και Topp (1956), ορισμένα όμως χαρακτηριστικά της είχαν ήδη περιγράψει από τους Courant (1943), Hrenikoff (1941), McHenry (1943) και άλλους. Τα πρώτα πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν σε προβλήματα επίπεδης εντατικής κατάστασης, αργότερα όμως διατυπώθηκαν στοιχεία και για τρισδιάστατα στερεά, ελάσματα υπό κάμψη, παχιά κελύφη, και άλλες μορφές κατασκευών. Μετά την καθιέρωσή τους στη γραμμική ελαστική περιοχή εφαρμόστηκαν και σε δυσκολότερα προβλήματα όπως η δυναμική συμπεριφορά, ο λυγισμός και η μη-γραμμική απόκριση και συμπεριφορά του υλικού. Για να επιλυθούν δε προβλήματα με μη-γραμμική συμπεριφορά του υλικού απαιτείται επαναληπτική διαδικασία. [14][16]

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η περιοχή του εξεταζόμενου προβλήματος χωρίζεται σε έναν πεπερασμένο αριθμό στοιχειωδών όγκων (3D ΠΣ) και η προσέγγιση της άγνωστης συνάρτησης, επιχειρείται καταρχήν ανά στοιχείο. Στη συνέχεια, η συνολική λύση του προβλήματος προκύπτει ως σύνθεση των επιμέρους προσεγγιστικών λύσεων επί του πεπερασμένου αριθμού των στοιχείων στα οποία υποδιαιρείται η συνολική περιοχή του αρχικού προβλήματος.

Επομένως η συνολική λύση του προβλήματος προκύπτει από την προσέγγιση της λύσης ανά στοιχείο, σε ένα σύνολο πεπερασμένου αριθμού στοιχείων που προσεγγίζουν την αρχική περιοχή.

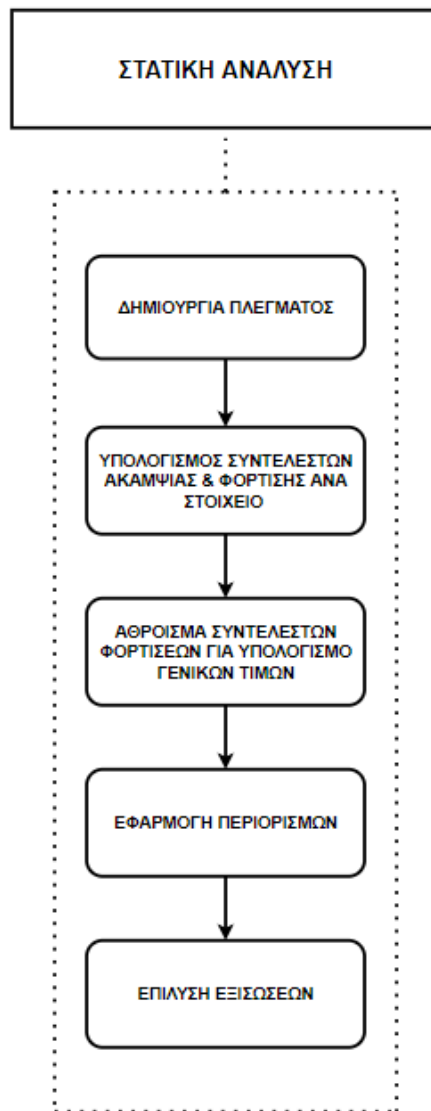
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για όσους ασχολούνται με τον βιομηχανικό και μηχανολογικό σχεδιασμό και χρησιμοποιείται σε περιοχές όπως:

- Η προσομοίωση συγκρούσεων
- Ο σχεδιασμός της δομικής αντοχής κατασκευών
- Η ανάλυση του Shock
- Η θερμική ανάλυση
- Η μελέτη ηλεκτρικών φαινομένων
- Η μελέτη των δονήσεων
- Η μελέτη ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων

- Προβλήματα λυγισμού
- Δυναμικές αναλύσεις
- Η ακουστική

Η συνολική εφαρμογή της μεθόδου ολοκληρώνεται με την υλοποίηση επιμέρους βημάτων τα οποία και είναι τα εξής (Σχήμα 5):

1. Αρχικά εφαρμόζεται διακριτοποίηση του γεωμετρικού μοντέλου σε ΠΣ, με καθορισμένα χαρακτηριστικά όσον αφορά τον τύπο, τη διάταξη το μέγεθος και τον αριθμό αυτών από τον αναλυτή.
2. Έπειτα καθορίζεται το κατάλληλο μοντέλο παρεμβολής που ιδανικά θα μπορούσε να προβλέψει την μετατόπιση της εκάστοτε περίπλοκης γεωμετρίας του αντικειμένου.
3. Εκμεταλλευόμενοι τα προηγούμενα γίνεται παραγωγή μητρώων στιβαρότητας $[Ke]$ και διανυσμάτων του φορτίου $P \rightarrow e$ ενός στοιχείου e , χρησιμοποιώντας συνθήκες ισορροπίας ή κατάλληλες μεταβλητές αρχές.
4. 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 $[K] * U = P \rightarrow$, που αποσκοπεί στην απαραίτητη σωστή συναρμολόγηση που αποτελούν το συνολικό αντικείμενο.
5. Γίνεται επίλυση ως προς τις άγνωστες μετατοπίσεις των κόμβων εφαρμόζοντας τις οριακές συνθήκες για όλες τις εξισώσεις ισορροπίας εκφραζόμενες ως: $[K] * U = P \rightarrow$
6. 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. [1][2][5][6][10][11][12][13][14][16]



Σχήμα 5. Διαδικασία στατικής ανάλυσης με την μέθοδο των ΠΣ

2.3.1. Στατική ανάλυση

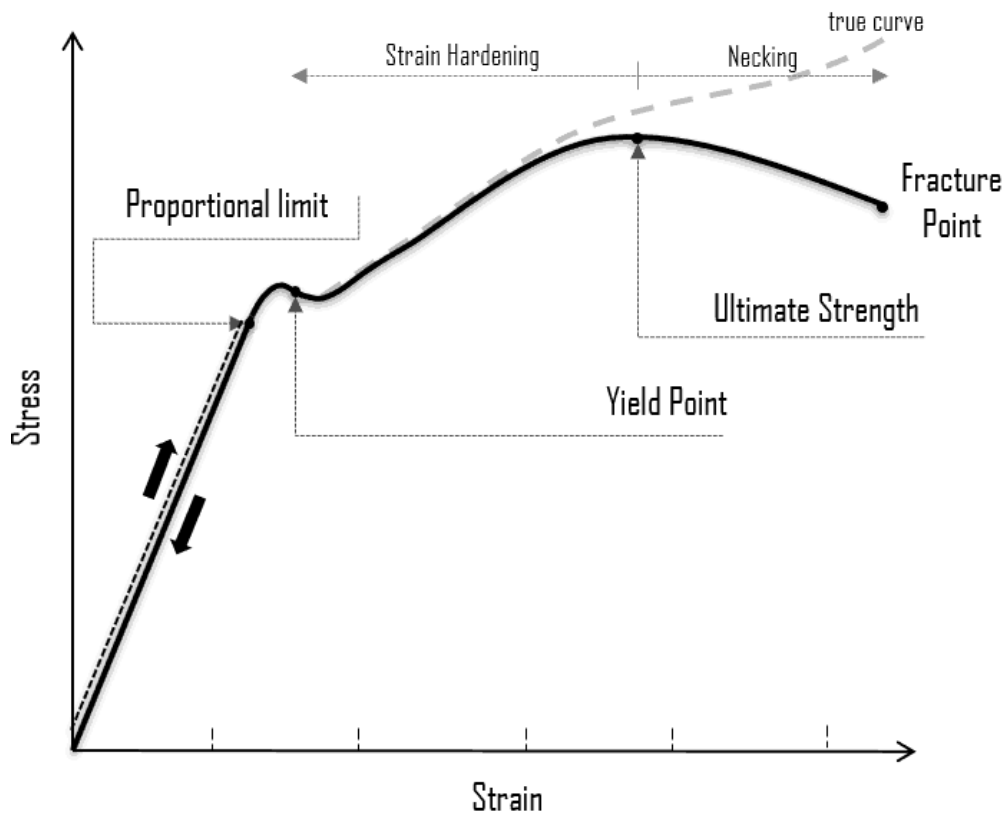
Η στατική ανάλυση που ακολουθεί αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι ενός πλήρους κύκλου εφαρμογής τοπολογικής βελτιστοποίησης.

Κατά τη στατική ανάλυση, το γεωμετρικό μοντέλο διακριτοποιείται με κατάλληλα πεπερασμένα στοιχεία, αναλύεται, καταγράφονται χαρακτηριστικά μεγέθη και εξάγονται αποτελέσματα αναφορικά με τις συνθήκες καταπόνησης που μπορεί να δεχθεί. Πέραν αυτών λειτουργεί ως σημείο αναφοράς καθ' όλη την διαδικασία βελτιστοποίησης της τοπολογίας, αλλά και ως μέτρο σύγκρισης για έναν επαναληπτικό στατικό έλεγχο που έπεται του επανασχεδιασμού του μοντέλου σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Για τους λόγους αυτούς θεωρείται εξαιρετικά χρήσιμη η κατανόηση του διαγράμματος Τάσης – Παραμόρφωσης που ακολουθεί και ερμηνεύει διαδοχικά την συμπεριφορά των υλικών όταν υπόκεινται σε φορτίσεις, αποδεκτές και μη αναφορικά με τα μηχανικά τους όρια.

Συνοπτική ερμηνεία σημείων αναφοράς διαγράμματος Τάσης – Παραμόρφωσης (Σχήμα 6)

- Όριο αναλογίας (Proportional limit): Αφορά την οριακή τιμή τάσης πάνω από την οποία η παραμόρφωση παύει να είναι ανάλογη της αντίστοιχης τάσης. Στην περιοχή αναλογίας (αρχή των αξόνων – όριο αναλογίας) ισχύει ο νόμος του Hooke $\sigma = E \cdot \epsilon$ όπου, σ η τάση, E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και ϵ η παραμόρφωση του υλικού.
- Όριο διαρροής (Yield point): Το όριο διαρροής είναι η τιμή της τάσης πέραν της οποίας η παραμόρφωση που υφίσταται το υλικό είναι μόνιμη.
- Όριο αντοχής / Όριο θραύσης (Ultimate strength): Αντιστοιχεί στο ανώτατο σημείο της καμπύλης που αναπαρίσταται στο διάγραμμα, κατά το οποίο ασκείται η μέγιστη τάση και ξεκινάει η θραύση του υλικού με δημιουργία “λαιμού”.
- Σημείο θραύσης (Fracture point): Στο σημείο θραύσης η διατομή του δημιουργούμενου λαιμού μικραίνει σε βαθμό που το υλικό καταταμείται σε επιμέρους τεμάχια. [14][19]



Σχήμα 6. Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης

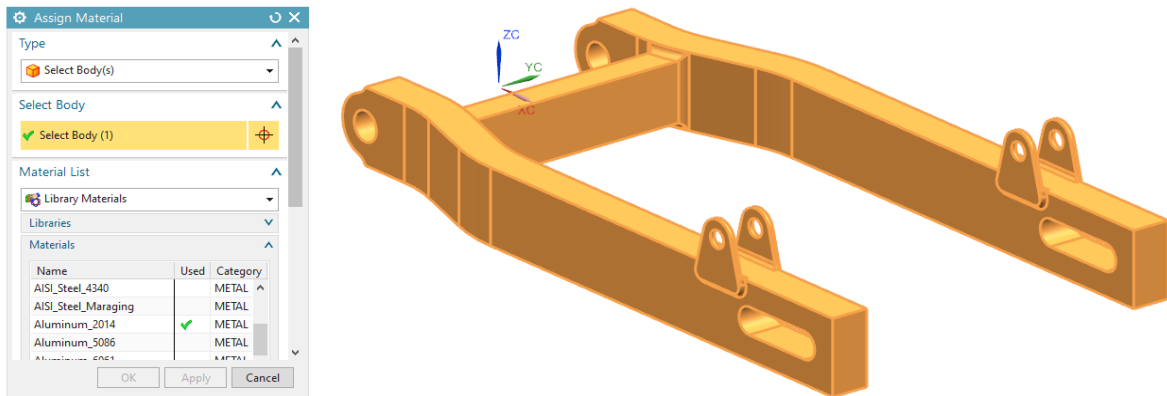
2.3.1.1. Ορισμός υλικού

Ως υλικό ορίστηκε το **Aluminium_2014** για το χαμηλό του βάρος συγκριτικά με το ατσάλι που συνήθιζε να χρησιμοποιείται και τις εξαιρετικές μηχανικές του ιδιότητες που αναφέρονται στη συνέχεια (Σχήμα 10).

Aluminium_2014 Properties	
Estimated Temperature	≈ 25 °C
Ultimate Tensile Strength	438 MPa
Yield Strength	394 MPa
Bearing Yield Strength	662 MPa
Density	2.8 gr/cm ³
Machinability	70%
Melting Point	507 – 638 °C

Σχήμα 7. Μηχανικές ιδιότητες Aluminium_2014

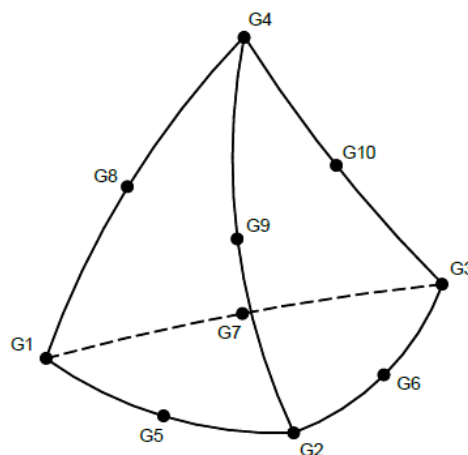
Το Aluminium_2014 παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον καθώς χαρακτηρίζεται από πολύ καλό λόγο Πυκνότητας – Κατεργασιμότητας – Ορίων Θραύσης & Διαρροής. Χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό στην αυτοκινητοβιομηχανία και την αεροδιαστημική καθώς παρουσιάζει μεγάλη αντοχή σε διάβρωση και διατηρεί τη σκληρότητα του σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Δεν προτιμάται για κατεργασίες συγκόλλησης καθώς τείνει να αστοχεί και να θραύει στην περιοχή του λουτρού. Παρ' όλο αυτό επιλέχθηκε με την προοπτική να μην δύναται να κατασκευαστεί μεν απαραίτητως με κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, αλλά χύτευσης και διεργασίες προσθετικής κατασκευής.[23][24]



Σχήμα 8. Ορισμός υλικού

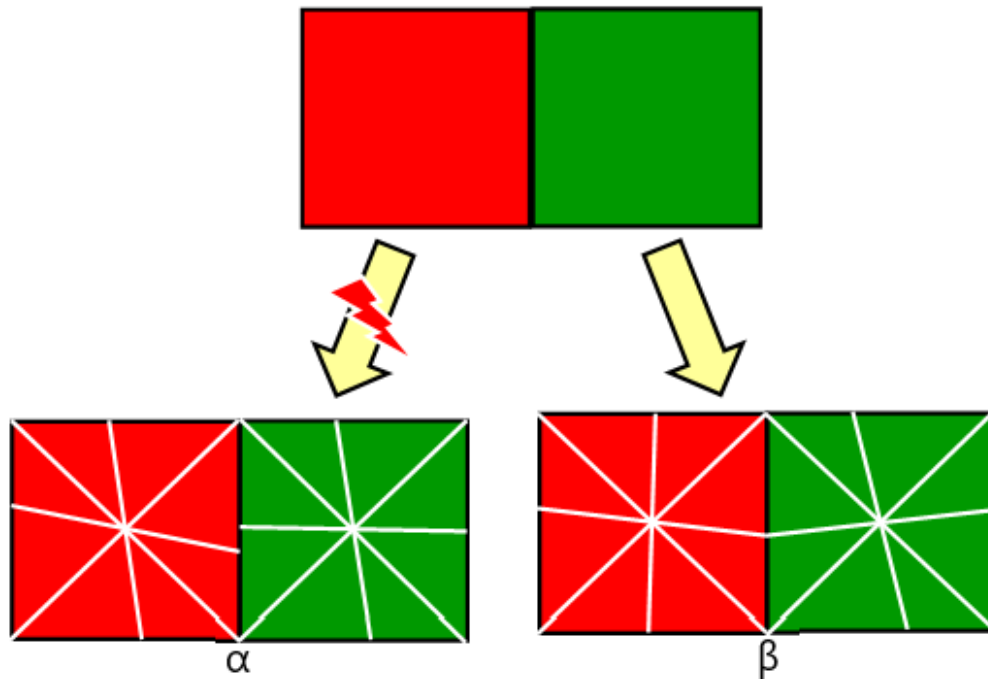
Διακριτοποίηση γεωμετρικού μοντέλου

Η διακριτοποίηση ενός γεωμετρικού μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία, αποτελεί βασική προϋπόθεση για την περαιτέρω ανάλυση τους, επιτρέποντας στο λογισμικό να διενεργεί αναδιάταξη του συνόλου αυτών, ανά επίλυση του αλγορίθμου, προσεγγίζοντας κάθε φορά ολοένα και περισσότερο την βέλτιστη κατανομή τους. Για την επιτυχή υλοποίηση της διαδικασίας αυτής πρέπει να υιοθετούνται κανόνες που συνοπτικά παρουσιάζονται στη συνέχεια για περίπτωση δημιουργίας πλέγματος 3d τετραεδρικών στοιχείων (Σχήμα 9) που πραγματοποιείται και στην παρούσα μελέτη.



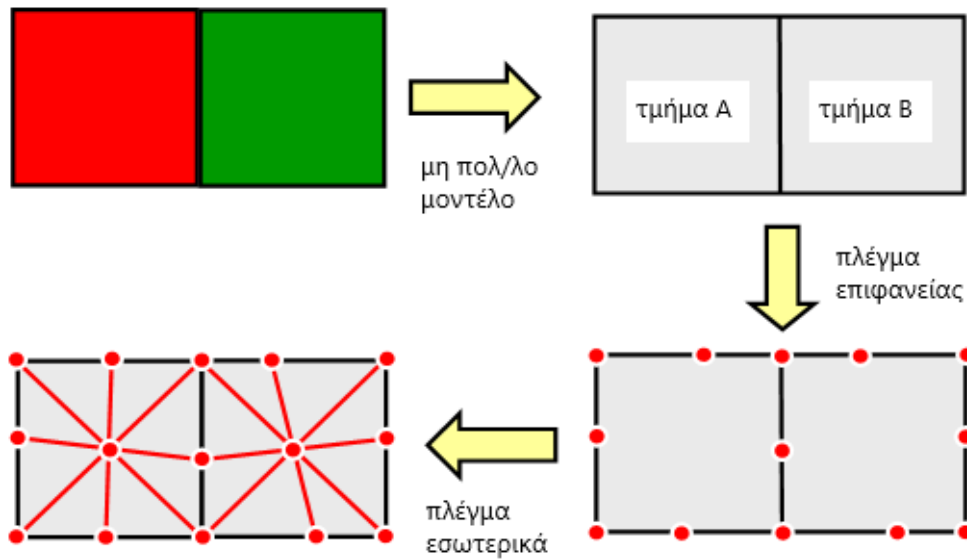
Σχήμα 9. Τετράπλευρο συμπαγές στοιχείο δέκα κόμβων

- Αρχές δημιουργίας μη δομημένου (τετραεδρικών στοιχείων) πλέγματος:
Απαίτηση δημιουργίας πλεγμάτων στις περιοχές διεπαφής διαφορετικών τμημάτων του μοντέλου προκειμένου να ρυθμιστούν σωστά οι μητρικές εξισώσεις που το διέπουν.



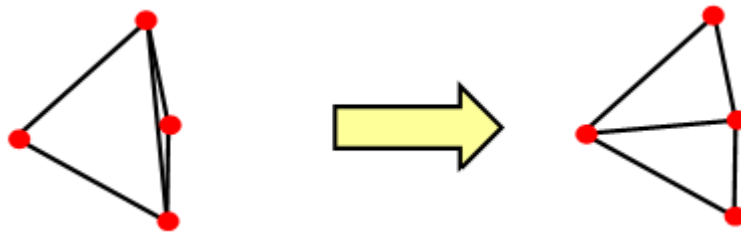
Σχήμα 10. Δημιουργία (α) ασυνεχών & (β) συνεχών πλεγμάτων μεταξύ διεπαφών

Μία τυπική λύση της ανωτέρω περίπτωσης ασυνέχειας των προκύπτοντων πλεγμάτων (Σχήμα 10) είναι η δημιουργία ενός ενδιάμεσου βήματος μη πολλαπλού μοντέλου προσομοίωσης (Σχήμα 11). Κατά αυτό τον τρόπο δύνανται να δημιουργηθούν συμπίπτουσες όψεις και ακμές μεταξύ των επιμέρους τμημάτων οι οποίες χρησιμοποιούνται έπειτα κατά την δημιουργία του πλέγματος του συνολικού όγκου του μοντέλου.



Σχήμα 11. Δημιουργία πλέγματος με ενδιάμεσο βήμα παραγωγής συμπιπτούσων διεπαφών

Τέλος διενεργείται επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης της σχηματοδομής των στοιχείων και του συνολικού όγκου, μέσω μετακίνησης των κόμβων που τα ορίζουν (Σχήμα 12).



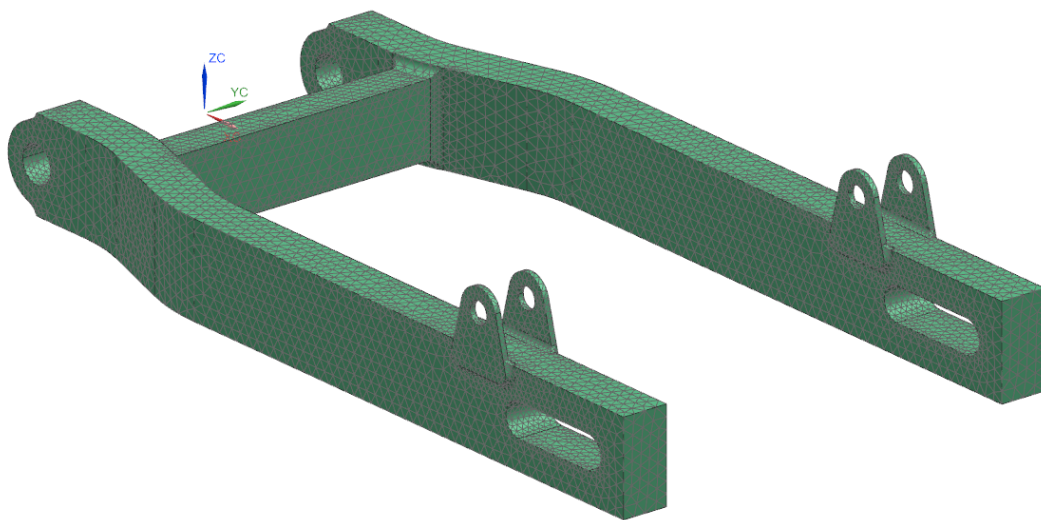
Σχήμα 12. Βελτιστοποίηση μορφολογίας 3d τετραεδρικών στοιχείων

Σύνοψη διαδικασίας:

- Δημιουργία μη πολλαπλού μοντέλου προσομοίωσης
- Δημιουργία επιφανειακού πλέγματος προς δικτύωση των ακμών και επιφανειών του μοντέλου
- Δημιουργία πλέγματος του συνολικού όγκου του μοντέλου (και εσωτερικά) βάσει του αποτελέσματος του πρότερου επιφανειακού πλέγματος
- Έλεγχος βελτίωσης της ποιότητας του αποτελέσματος μέσω πειραματικής μετακίνησης των κόμβων του πλέγματος προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα των τετραέδρων [3][4][8][16][21][22]

Η δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε με τις εξής παραμέτρους (Σχήμα 13):

- Τύπος επίλυσης: Στατικός έλεγχος
- Κατασκευή πλέγματος: 3D τετραεδρικά στοιχεία, τύπου CTETRA(10), ακμών 6 mm έπειτα από έλεγχο σύγκλισης ο οποίος παρουσιάζεται στο παράρτημα «Α»
- Αριθμός κόμβων: 85914
- Αριθμός πεπερασμένων στοιχείων: 50680



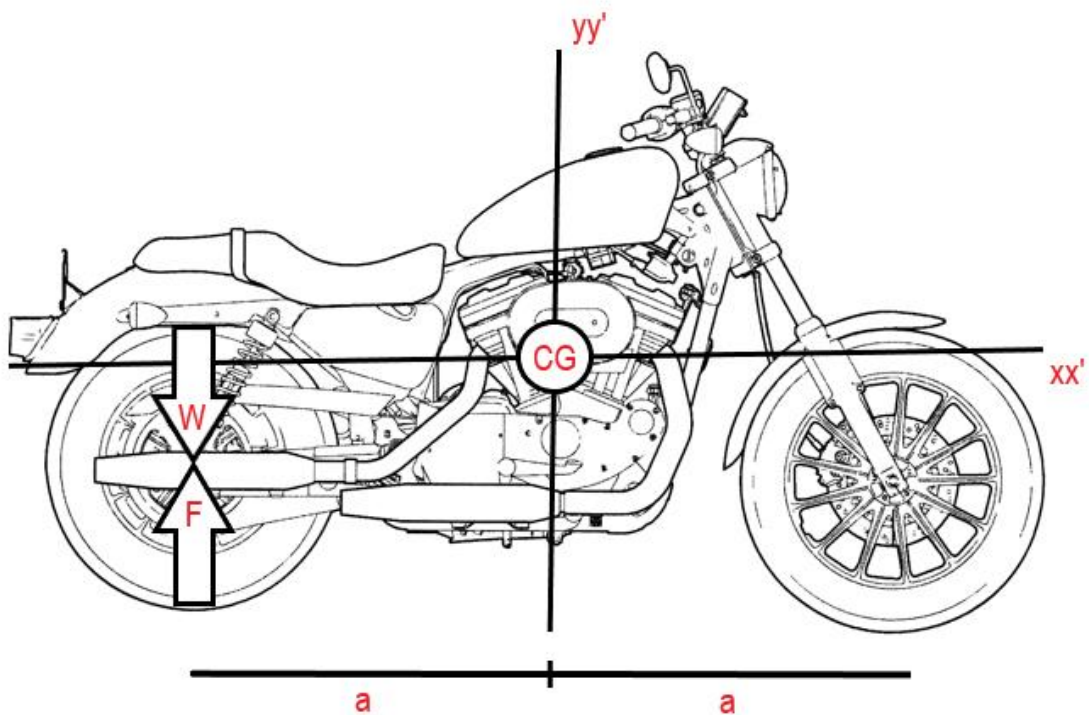
Σχήμα 13. Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Οι αναλυτικές πληροφορίες του δημιουργούμενου πλέγματος ΠΣ, εξαγόμενες από το υπολογιστικό λογισμικό παρατίθενται στο “Παράρτημα Δ”.

2.4. Ανάλυση Φορτίσεων

Για την εξυπηρέτηση των αναγκών της ανάλυσης των στατικών φορτίσεων γίνονται οι εξής παραδοχές (Σχήμα 14):

- Κέντρο βάρους το σημείο τομής των αξόνων
- Βάρος μοτοσυκλέτας (W_m) 256kg.
- Βάρος μέσου αναβάτη (W_r) 75kg.
- $2 * a = 1520\text{mm}$.



Σχήμα 14. Απεικόνιση φορτίσεων ψαλιδιού

Υπολογισμός φορτίσεων ψαλιδιού

Βαρυτική δύναμη (W) :

$$\triangleright W = W_m + W_r = 256 + 75 = 331\text{kg.}$$

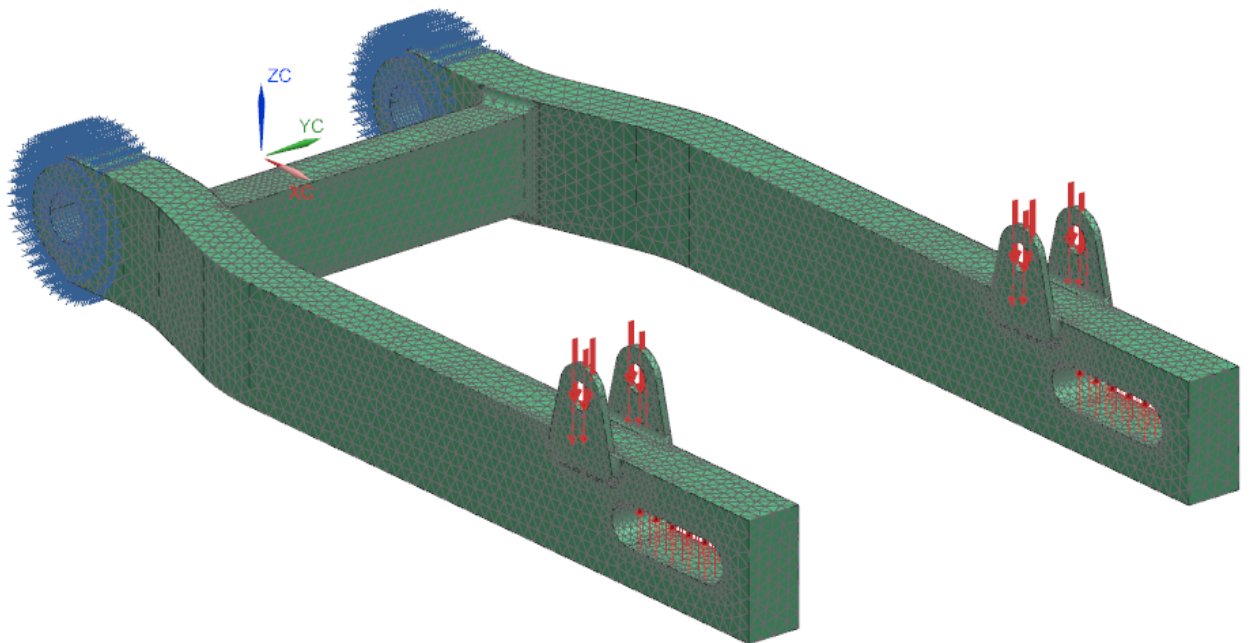
Αντίδραση από το έδαφος (F) :

$$\triangleright F = W * G * (a / (2 * a)) = 331 * 9.81 * (760 / (760 * 2)) = 1623.555 \text{ N} \approx 1624 \text{ N.}$$

2.4.1. Ορισμός φορτίσεων & στηρίξεων

Οι φορτίσεις και οι στηρίξεις που ορίστηκαν ακολουθούν την ρεαλιστική συμπεριφορά ενός συστήματος μοτοσυκλέτας (Σχήμα 15)

- Φόρτιση κατά $-ZC$ (περιοχή σύνδεσης ψαλιδιού – αμορτισέρ): $W = 331\text{kg} = 3246\text{ N}$
- Φόρτιση κατά ZC (περιοχή σύνδεσης ψαλιδιού – τροχού): $F = 1624\text{ N}$
- Είδος στήριξης: Άρθρωση στην περιοχή των οπών του άξονα σύνδεσης με το πλαίσιο

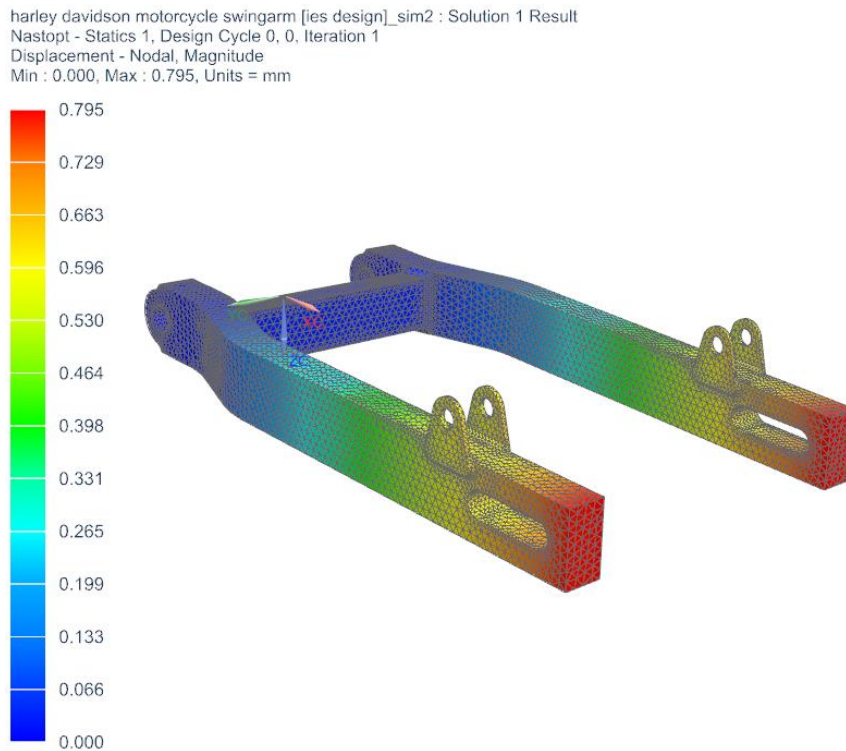


Σχήμα 15. Ορισμός φορτίσεων και στηρίξεων αρχικού μοντέλου

2.4.2. Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης

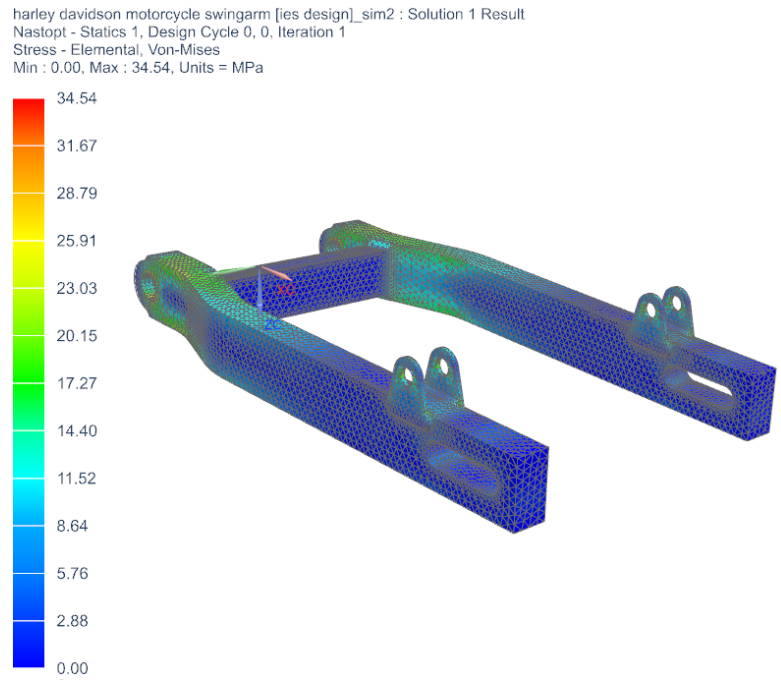
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης προδιαθέτουν για σημαντικές επεμβάσεις στην τελική μορφολογία του μοντέλου, καθώς υποκείμενο στις φορτίσεις που ορίστηκαν, δείχνει να απέχει κατά πολύ από τα ανεκτά μηχανικά του όρια.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης:



Σχήμα 16. Διάγραμμα μετατόπισης κόμβων αρχικού μοντέλου

Το Σχήμα 16 αποτελεί ένα εκ των εξαγόμενων αποτελεσμάτων της στατικής ανάλυσης και αφορά την μετατόπιση των κόμβων των στοιχείων του μοντέλου, υποκείμενο στις φορτίσεις που του ορίστηκαν. Ο βαθμός μετατόπισης που παρουσιάζεται αντιστοιχεί στη μέγιστη συνολική μετατόπιση των κόμβων συμπεριλαμβανομένων και των τριών αξόνων (x, y & z) και παρατίθεται καθώς ενδιαφέρει η αυτού του είδους συμπεριφορά του μοντέλου κυρίως σε περιοχές που υπό κανονικές συνθήκες συνεργάζεται με άλλα μέρη του συστήματος μίας μοτοσυκλέτας. Παρατηρείται πως τιμή μετατόπισης των κόμβων στα σημεία αυτά βρίσκεται εντός του πεδίου τιμών [0.5 , 0.8] σε μονάδα mm.



Σχήμα 17. Διάγραμμα τάσης ανά στοιχείο αρχικού μοντέλου

Το Σχήμα 17 αποτελεί ένα εκ των εξαγόμενων αποτελεσμάτων της στατικής ανάλυσης και αφορά την ισοδύναμη τάση κατά Von Mises που αναπτύσσεται ανά στοιχείο του μοντέλου, υποκείμενο στις φορτίσεις που του ορίστηκαν. Η κατανομή τάσης που παρουσιάζεται αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση που αναπτύσσεται ανά τα στοιχεία του μοντέλου και παρατίθεται καθώς βοηθάει να καταλάβουμε τη συμπεριφορά του υπό ρεαλιστικές συνθήκες με γνώμονα τις μηχανικές του ιδιότητες και όρια. Παρατηρείται πως η τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης είναι 35 MPa απέχοντας κατά πολύ από τα μηχανικά όρια του ορισμένου μοντέλου.

3. Βελτιστοποίηση κατασκευής στο στάδιο της σχεδιομελέτης

3.1. Μέθοδοι βελτιστοποίησης

Στον χώρο της Μηχανικής και κατά την προσπάθεια προσέγγισης της βέλτιστης μορφολογίας των κατασκευών, έχουν υιοθετηθεί κατάλληλες μέθοδοι ώστε να δύνανται να εξάγουν αποτελέσματα βάσει των διαφορετικών παραμέτρων ενδιαφέροντος της εκάστοτε περίπτωσης. Με κοινό γνώμονα την ελαχιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών, έναντι του περιορισμού των αποθεμάτων, του χρονικού περιορισμού των διαδικασιών παραγωγής, της ελαχιστοποίησης του κόστους και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, οι κύριες προσεγγίσεις της βέλτιστης μορφολογίας διακρίνονται στις εξής (κάθε προσέγγιση έχει πολλές μεθόδους):

1. Βελτιστοποίηση μεγέθους
2. Βελτιστοποίηση σχήματος
3. Βελτιστοποίηση τοπολογίας

Κατά τη βελτιστοποίηση μεγέθους, συνηθίζεται ο ορισμός περιορισμών που αφορούν κομβικά διαστατικά χαρακτηριστικά των προς μελέτη κατασκευών προς ικανοποίηση των σχεδιαστικών στόχων του μελετητή. Έτσι, επιτρέπεται στη μέθοδο να επηρεάσει μεγέθη που αφορούν κυρίως τη συμπεριφορά του μοντέλου έναντι των φορτίσεων που καλείται να δεχθεί, πάντα συνυπολογίζοντας τις οριακές συνθήκες που το διέπουν.

Η βελτιστοποίηση σχήματος δρα και αντιμετωπίζεται ως μία γενικευμένη μορφή της προαναφερθείσας βελτιστοποίησης μεγέθους. Είθισται να λειτουργεί παρεμβατικά στην περιγραμματική μορφολογία των κατασκευών μεταβάλλοντας τις καμπύλες που την ορίζουν εντός της δοθείσας περιοχής από τον μελετητή. Η βελτιστοποίηση σχήματος χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις όπου η τελική μορφολογία των εξαγόμενων προϊόντων δεν αποτελεί κύριο περιορισμό (όγκοι ελεύθερης μορφής).

Η βελτιστοποίηση τοπολογίας δε, συνδυάζει τα χαρακτηριστικά των ανωτέρω προσεγγίσεων με τον προσδιορισμό του συνολικού σχήματος, τη διάταξη των στοιχείων και τον τρόπο σύνδεσης αυτών στη δοθείσα περιοχή σχεδιασμού. Η ουσιαστική διαφορά της μεθόδου αυτής έναντι των

υπολοίπων, είναι ο επιτηδευμένα πιο αυστηρός ορισμός των παραμέτρων που αποτελούν το σύνολο των περιορισμών και του προσδοκώμενου αποτελέσματος που πρόκειται να εξαχθεί από το λογισμικό ανάλυσης της μεθόδου. Οι διαφορές που προκύπτουν με τον τρόπο αυτό συνήθως οδηγούν σε σημαντικές παραλλαγές/βελτιώσεις της δομικής και μορφολογικής απόδοσης του τελικού προϊόντος. Τα υψηλά ποσοστά απόδοσης και ακρίβειας της μεθόδου την έχουν ανάγει σε κύριο μέσω υποστήριξης σχεδιομελέτης και τελικής παραγωγής βιομηχανικών προϊόντων με διεργασίες προσθετικής κατασκευής.[7][8][9][10][12][13][14]

3.2. Μέθοδος βελτιστοποίησης της τοπολογίας

Η ανάλυση τοπολογίας αφορά στον γενικότερο κλάδο της γεωμετρίας ο οποίος είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον σχεδιασμό κατασκευών. Η τοπολογική βελτιστοποίηση διενεργείται μέσω πρακτικών που αναπαριστούν τη 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.

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 σημαντικό 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 τη διαδικασία της βελτιστοποίησης τοπολογίας του αντικειμένου που μελετάται. Η προσθήκη περιορισμών στη σύνθεση, προκειμένου να αυξηθεί η δυνατότητα κατασκευής, αποτελεί ένα ενεργό πεδίο έρευνας.

Διάφορες μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες για την επίλυση προβλημάτων τοπολογικής βελτιστοποίησης. Οι αλγόριθμοι ανάλυσης τοπολογίας μπορούν να ομαδοποιηθούν στις εξής τρεις κατηγορίες:

- Μέθοδοι Μαθηματικού Προγραμματισμού
- Βέλτιστων Κριτηρίων
- Εξελικτικού Προγραμματισμού.

Οι μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού προέρχονται από τους επιστημονικούς κλάδους των μαθηματικών, των οικονομικών και της επιχειρησιακής έρευνας. Μερικά παραδείγματα μεθόδων μαθηματικού προγραμματισμού είναι ο Γραμμικός Προγραμματισμός, ο Μη-Γραμμικός Προγραμματισμός, ο Ακέραιος Προγραμματισμός και ο Δυναμικός Προγραμματισμός. Οι μέθοδοι Βέλτιστων Κριτηρίων είναι έμμεσες μέθοδοι βελτιστοποίησης και ικανοποιούν μία σειρά κριτηρίων που σχετίζονται με τη συμπεριφορά της κατασκευής. Συνήθως, αυτές οι μέθοδοι βασίζονται στη συνθήκη βέλτιστου Kuhn-Tucker, γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα ενδεδειγμένες. Κατά κύριο λόγο είναι κατάλληλες για προβλήματα που περιλαμβάνουν λίγους περιορισμούς και μεγάλο αριθμό μεταβλητών σχεδιασμού. Τέλος, οι εξελικτικές μέθοδοι είναι ευρετικές ή διαισθητικές προσεγγίσεις, οι οποίες χρησιμοποιούν μηχανισμούς εμπνευσμένους από εξελικτικές διαδικασίες της φύσης, όπως είναι η αναπαραγωγή, η μετάλλαξη και η επιβίωση του ισχυρότερου, με στόχο να εντοπισθεί η βέλτιστη λύση ενός προβλήματος. Ορισμένες από τις ευρετικές μεθόδους βελτιστοποίησης είναι η Εξελικτική Μέθοδος Δομικής Βελτιστοποίησης, η Αμφίδρομη Εξελικτική Μέθοδος Δομικής Βελτιστοποίησης και η μέθοδος Τοπολογικής Βελτιστοποίησης Απόρριψης και Αποδοχής Διαδοχικών Στοιχείων. [7][8][9][10][12][13][14]

3.3. Μοντελοποίηση και μαθηματική απεικόνιση προβλήματος

Για την εποικοδομητική χρήση της μεθόδου απαιτείται μία σειρά ενεργειών που αποσκοπούν στον καθορισμό/σχηματισμό του προβλήματος και σε μορφή αναγνώσιμη από το λογισμικό επίλυσης. Η διαδικασία καθορισμού του προβλήματος απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή για την εξασφάλιση του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος. Τα επιμέρους βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- Καθορισμός του στόχου της ανάλυσης (γενικευμένη προσέγγιση του επιθυμητού στόχου ως σημείο αναφοράς για το σύνολο των διαδικασιών της μεθόδου)
- Συλλογή των απαραίτητων δεδομένων και πληροφοριών (σχεδιαστικά και ογκομετρικά χαρακτηριστικά βάσει των οποίων εφαρμόζεται η μέθοδος)
- Καθορισμός των σχεδιαστικών παραμέτρων (επιμεριστικός προσδιορισμός σχεδιαστικών παραμέτρων που οδηγούν στην αναμενόμενη ακρίβεια και πολυπλοκότητα επίλυσης της μεθόδου)
- Προσδιορισμός κριτηρίου/γνώμονα ανάλυσης (βασικό κριτήριο διενέργειας και τερματισμού της διαδικασίας)
- Προσδιορισμός περιορισμών (προσδιορισμός λοιπών περιορισμών με μορφή ισοτήτων ή ανισοτήτων, σε άμεση εξάρτηση με τις σχεδιαστικές παραμέτρους που έχουν ήδη οριστεί)

Μαθηματική απεικόνιση προβλήματος:

$f(\mathbf{x})$: ελαχιστοποίηση/μεγιστοποίηση αντικειμενικής συνάρτησης

$g_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, m$: περιορισμοί σε μορφή ανισοτήτων

$h_j(\mathbf{x}) = 0, j = 1, p$: περιορισμοί σε μορφή ισοτήτων

$x_k l \leq x_k \leq x_k u, k = 1, n$: πεδίο ορισμού μεταβλητής σχεδίασης [14][18]

3.4. Χρησιμοποιούμενη μέθοδος και αλγόριθμος επίλυσης

3.4.1. Μέθοδος SIMP

Η τοπολογική βελτιστοποίηση που διενεργείται στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επιλύει προβλήματα μέσω της μεθόδου Στερεού Ισοτροπικού Υλικού με Ποινικοποίηση (SIMP) με σκοπό την εύρεση της κατάλληλης κατανομής υλικού για τον επιθυμητό βέλτιστο σχεδιασμό. Αυτό επιτυγχάνεται με μεταβολή της πυκνότητας των στοιχείων του εκάστοτε προς μελέτη αντικειμένου.

Η μέθοδος SIMP αποτελεί τη δημοφιλέστερη μέθοδο διενέργειας τοπολογικής βελτιστοποίησης, βασισμένη αριθμητικά στη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, η οποία αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του '80. Ο όρος SIMP προκύπτει από το Solid Isotropic Material with Penalization που μεταφράζεται ως μέθοδος Στερεού Ισοτροπικού Υλικού με Ποινικοποίηση για ενδιάμεσες πυκνότητες υλικού. Η βασική ιδέα της προσέγγισης αυτής προτάθηκε από τον Bendsoe, ενώ ο όρος SIMP επινοήθηκε αργότερα και παρουσιάστηκε πρώτη φορά σε ένα επιστημονικό άρθρο των Rozvany & Zhou (1992).

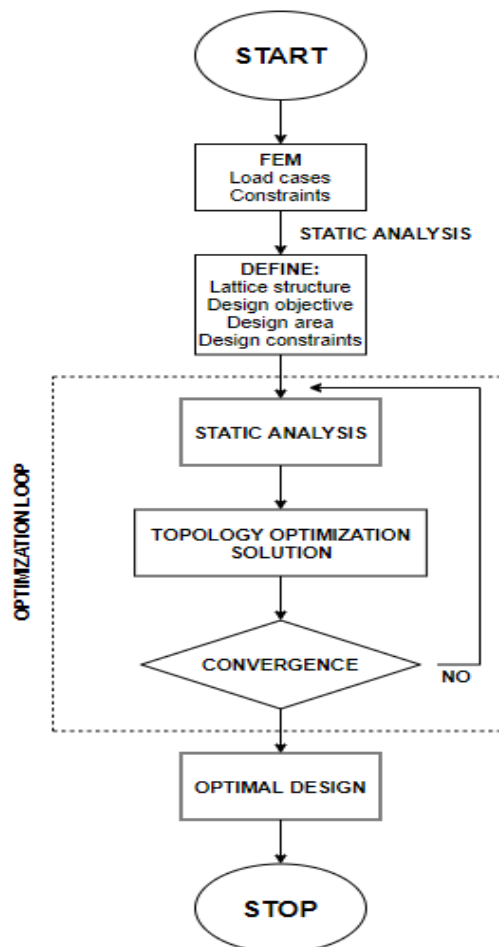
Η μέθοδος SIMP προβλέπει τη βέλτιστη κατανομή υλικού εντός ενός δεδομένου χώρου σχεδίασης, για δεδομένες περιπτώσεις φορτίου, οριακές συνθήκες, περιορισμούς κατασκευής και απαιτήσεις απόδοσης. Σύμφωνα με τον Bendsoe (1989), η βελτιστοποίηση σχήματος στην πιο γενική της μορφή πρέπει να περιλαμβάνει πληροφορία για κάθε σημείο του χώρου αναφοράς, προσδιορίζοντας την ύπαρξη υλικού ή μη στο δεδομένο σημείο. Η παραδοσιακή προσέγγιση στη βελτιστοποίηση τοπολογίας είναι η διακριτοποίηση σε πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που ονομάζονται ισοτροπικές στερεές μικροδομές.

Η τεχνική SIMP αντιμετωπίζει το προς επίλυση πρόβλημα ορίζοντας το υλικό μέσα σε κάθε ένα από τα πεπερασμένα στοιχεία ως μία συνεχή αντί για μία διακριτή μεταβλητή σχεδιασμού, μέσω της εισαγωγής μίας παραμέτρου “ψευδο-πυκνότητας” (pseudo-density parameter). Ταυτόχρονα, προκειμένου να αποφευχθεί η παρουσία υλικού ενδιάμεσης πυκνότητας στο χωρίο του τελικού σχεδιασμού, χρησιμοποιείται κάποια μορφή ποινής (penalization), ώστε να προκύπτει λύση με τιμές 0-1. Δηλαδή, το υλικό στο εκάστοτε στοιχείο του τελικού βέλτιστου πεδίου σχεδιασμού προσεγγίζει να είναι είτε κενό είτε πλήρως στερεό.

Η ανωτέρω διαδικασία επιτυγχάνεται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας στην οποία εμπεριέχεται περιορισμός περί επιρροής της συνολικής δυσκαμψίας του μοντέλου. Για τη μέγιστη δυνατή εξάντληση του περιορισμού αυτού, πραγματοποιείται έλεγχος ευαισθησίας ανά κύκλο επίλυσης του αλγορίθμου, τα αποτελέσματα του οποίου δρουν ως σημείο αναφοράς για τον επερχόμενο κύκλο επίλυσης. Μαθηματικά, η συνάρτηση ευαισθησίας εκφράζεται ως ο λόγος της παραγώγου της συνάρτησης στόχου και της πυκνότητας του εκάστοτε υλικού. [8][10][14][17]

3.4.2. Αλγόριθμος επίλυσης

Για την υλοποίηση της διαδικασίας υπάρχει μία σειρά ενεργειών που εφαρμόζονται και παρουσιάζονται στο λογικό διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 18) [17]:

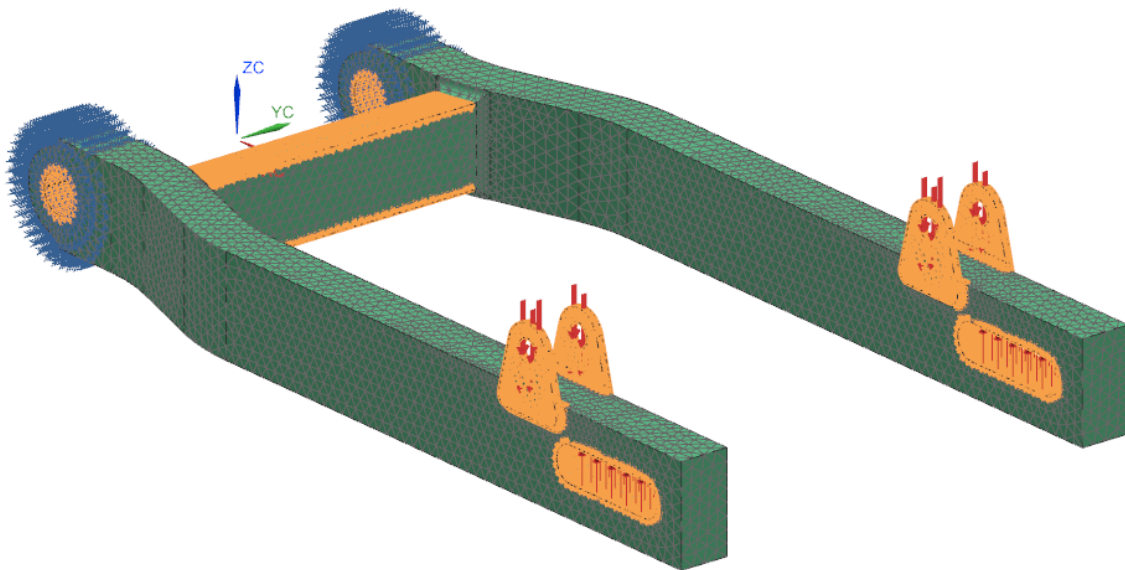


Σχήμα 18. Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου τοπολογικής βελτιστοποίησης

4. Τοπολογική βελτιστοποίηση ψαλιδιού μοτοσυκλέτας

4.1. Ορισμός περιοχών εφαρμογής της μεθόδου

Κατά την προετοιμασία της ανάλυσης ορίζονται σημειακά ή και όχι, οι περιοχές επίδρασης ή μη της μεθόδου. Εδώ ορίστηκαν οι περιοχές που πρόκειται να μείνουν αναλλοίωτες μετά το πέρας της τοπολογικής βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, όλες οι περιοχές του μοντέλου που στην πραγματικότητα συνεργάζονται με άλλα μέρη της μοτοσυκλέτας καθώς και περιοχές που θα επηρέαζαν την επιθυμητή αισθητική του τελικού προϊόντος. Ο μη αυστηρός ορισμός των ανωτέρω περιοχών, θα μπορούσε να επηρεάσει τη γεωμετρία του τελικού προϊόντος, με τρόπο τέτοιο και σε βαθμό που να το καθιστά ανέκδοτο να συνεργαστεί με τα λοιπά μέρη μίας μοτοσυκλέτας που απαιτείται.



Σχήμα 19. Ορισμός περιοχών εφαρμογής τοπολογικής βελτιστοποίησης

4.2. Ογκομετρικά χαρακτηριστικά μοντέλου και ορισμός λοιπών παραμέτρων

Σύμφωνα με το υλικό που ορίστηκε και μετά την δημιουργία πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων προκύπτουν και τα ογκομετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου τα οποία παρατίθενται στη συνέχεια (Σχήμα 20):

```

Total Length (1D elements): 0.000000E+00 mm
Total Area (2D elements) : 0.000000E+00 mm2
Volume                   : 1.228652E+06 mm3

Total Mass                : 3.432853E+00 kg

Center of Gravity about Global CSYS
1.975777E+02 -6.271969E-05 -3.673732E-01 mm

Moment of Inertia about Global CSYS
I(xx)  I(yy)  I(zz) : 3.563936E+04  1.934035E+05  2.275348E+05 kg·mm2
I(xy)  I(yz)  I(xz) : -1.086718E-02 -3.325313E-04 -4.409135E+02 kg·mm2

Moment of Inertia about Center of Gravity
I(xx)  I(yy)  I(zz) : 3.563890E+04  5.939501E+04  9.352678E+04 kg·mm2
I(xy)  I(yz)  I(xz) : 3.167276E-02 -4.116295E-04 -1.917408E+02 kg·mm2

Principal Moments of Inertia
I(11)  I(22)  I(33) : 9.352741E+04  5.939501E+04  3.563826E+04 kg·mm2

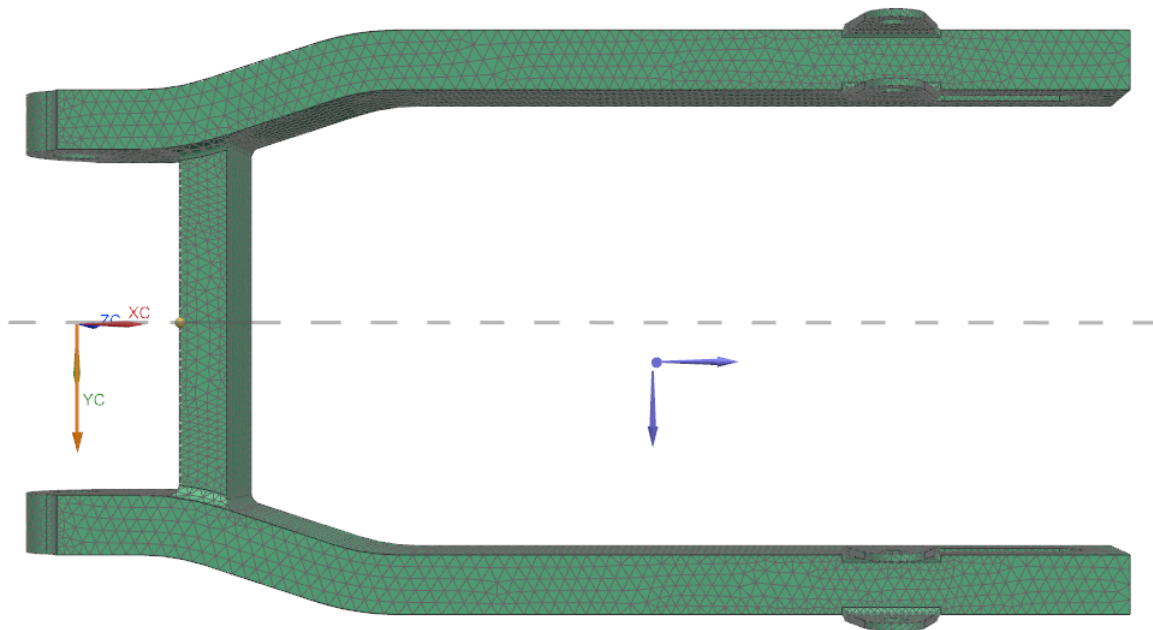
Principal Axes
1 : 0.003312  0.000000  0.999995
2 : 0.000000  1.000000  0.000000
3 : -0.999995  0.000000  0.003312
    
```

Σχήμα 20. Ογκομετρικά χαρακτηριστικά αρχικού μοντέλου

Τα δεδομένα αυτά είναι καθοριστικής σημασίας καθώς στην προκειμένη θα χρησιμοποιηθεί η αναφερόμενη μάζα ως σημείο αναφοράς για όλη την διενέργεια της ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα στην παρούσα περίπτωση ορίστηκε ως κύριος γνώμονας η ελαχιστοποίηση της μάζας του ψαλιδιού, κάτι που προκύπτει ορίζοντας ένα πεδίο ορισμού επιθυμητού βάρους ως αποτέλεσμα της ανάλυσης.

Ορισμός κατασκευαστικών παραμέτρων:

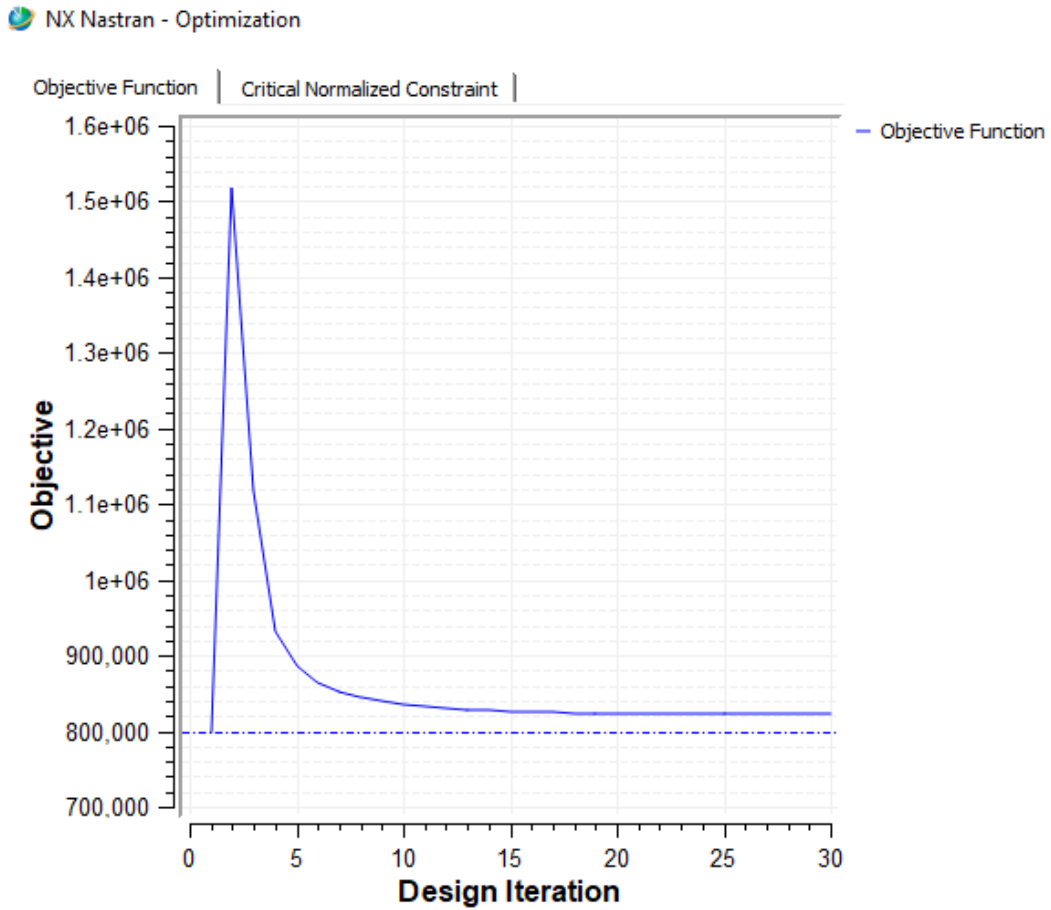
- Ελαχιστοποίηση μάζας
- Επιθυμητή μάζα [1.5 , 2.5] kg (πεδίο ορισμού με σκοπό να μειώσουμε κατ' ελάχιστο 1 kg την αρχική μάζα του μοντέλου)
- Αξονοσυμμετρική εφαρμογή μεθόδου στο μοντέλο (ίδια παρέμβαση της μεθόδου εκατέρωθεν του άξονα συμμετρίας του μοντέλου, Σχήμα 21)



Σχήμα 21. Ορισμός αξονοσυμμετρικής εφαρμογής μεθόδου

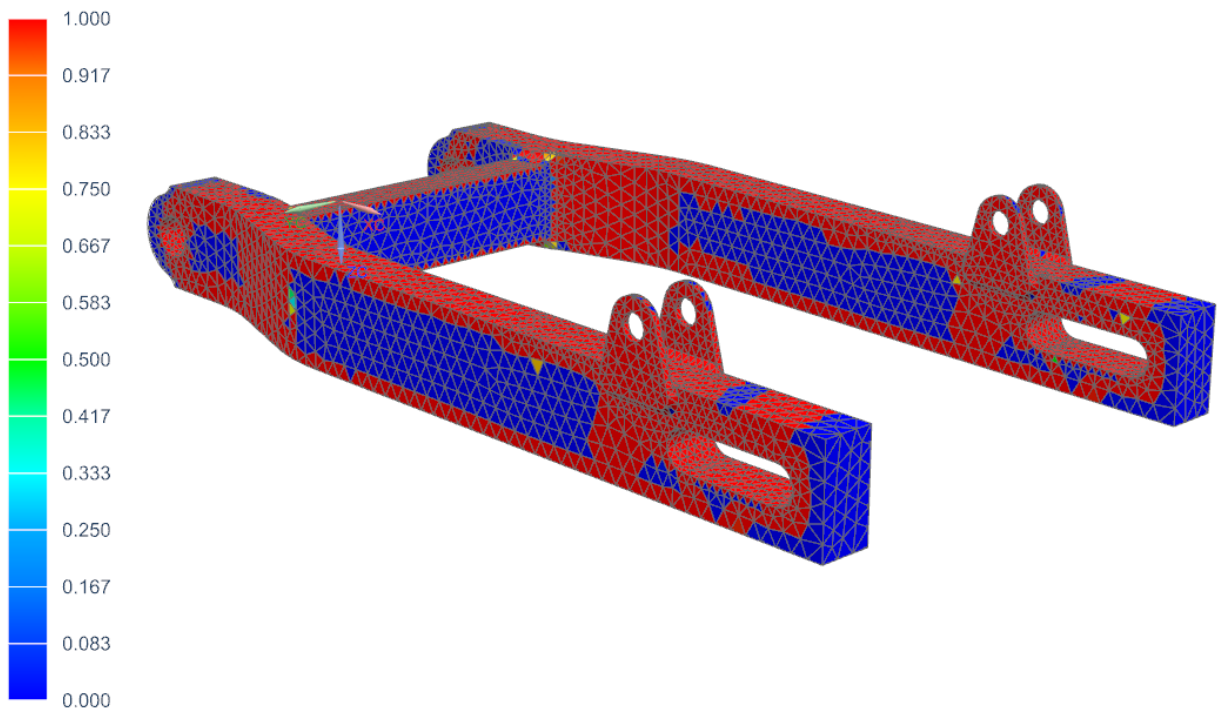
4.3. Αποτελέσματα ανάλυσης τοπολογίας

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια προέκυψαν έπειτα από την επιβολή 30 κύκλων επίλυσης του αλγορίθμου της ανάλυσης.

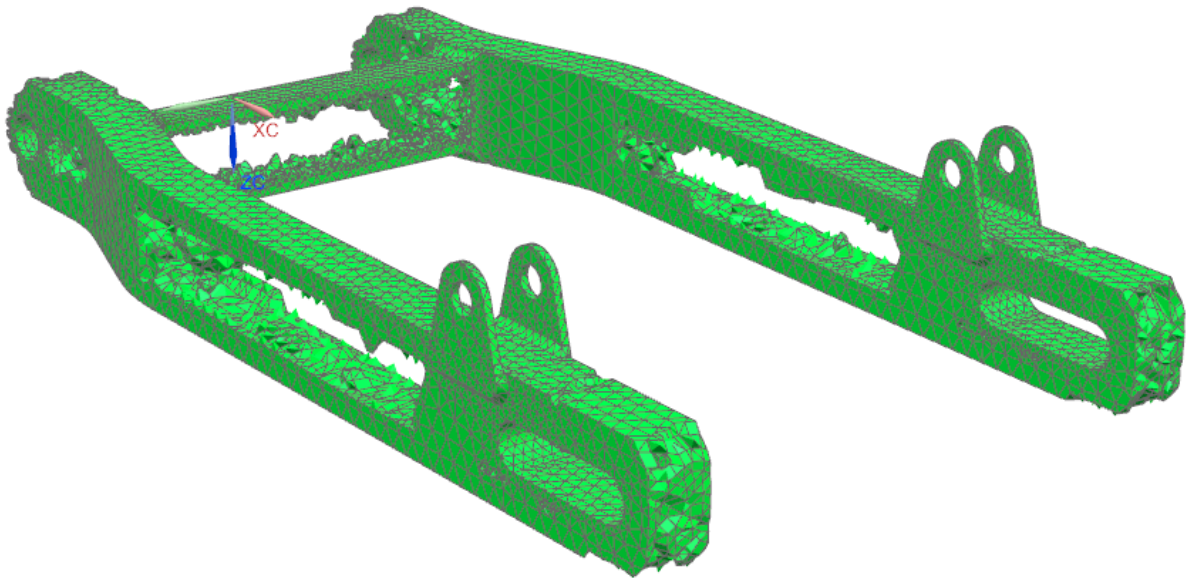


Σχήμα 22. Διάγραμμα σύγκλισης μεθόδου τοπολογικής βελτιστοποίησης

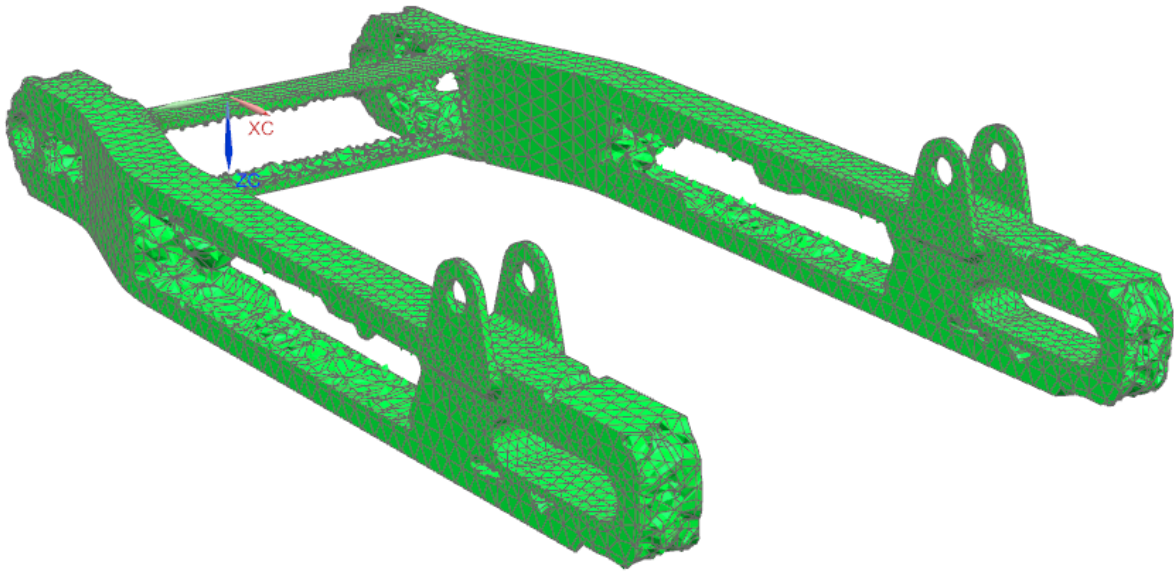
harley davidson motorcycle swingarm [ies design]_sim1 : Solution 1 Result
Loadcase Independent Results, Design Cycle 30, 30, Iteration 1
Normalized Material Density - Elemental, Scalar
Min : 0.000, Max : 1.000, Units = Unitless



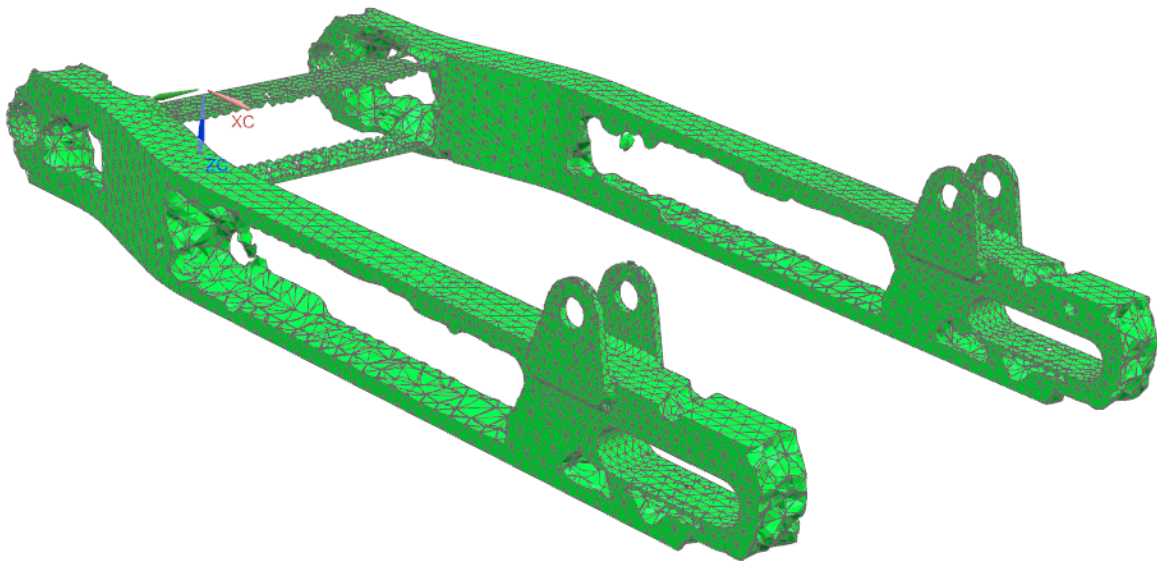
Σχήμα 23. Διάγραμμα κανονικοποιημένης πυκνότητας υλικού ανά στοιχείο



Σχήμα 24. 30^{ος} κύκλος τοπολογικής βελτιστοποίησης 50% κανονικοποιημένη πυκνότητα



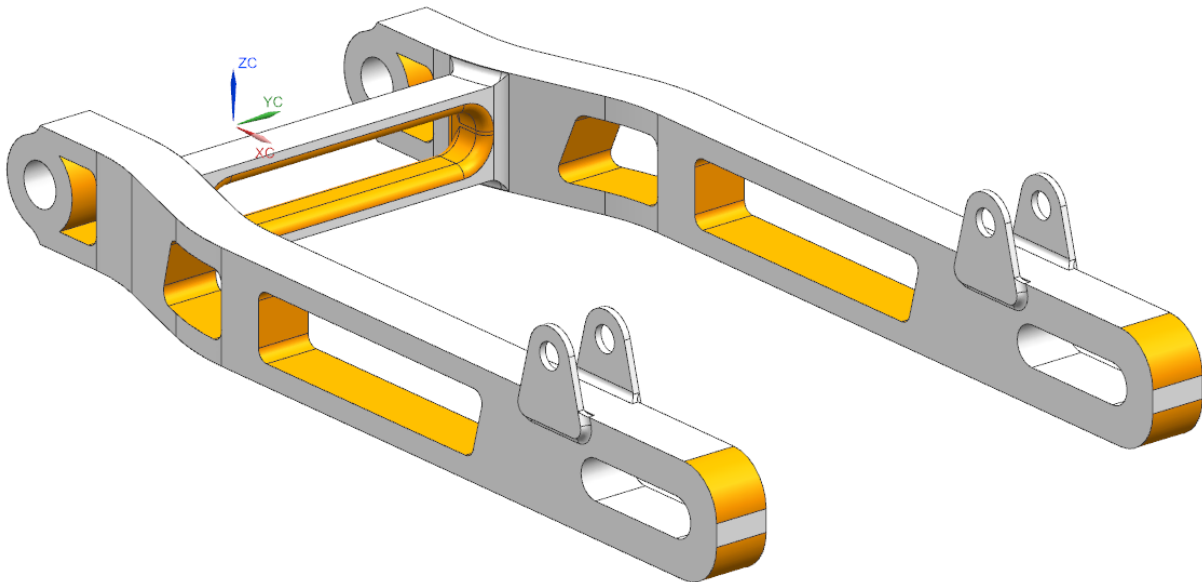
Σχήμα 25. 30^{ος} κύκλος τοπολογικής βελτιστοποίησης 75% κανονικοποιημένη πυκνότητα



Σχήμα 26. 30^{ος} κύκλος τοπολογικής βελτιστοποίησης 99% κανονικοποιημένη πυκνότητα

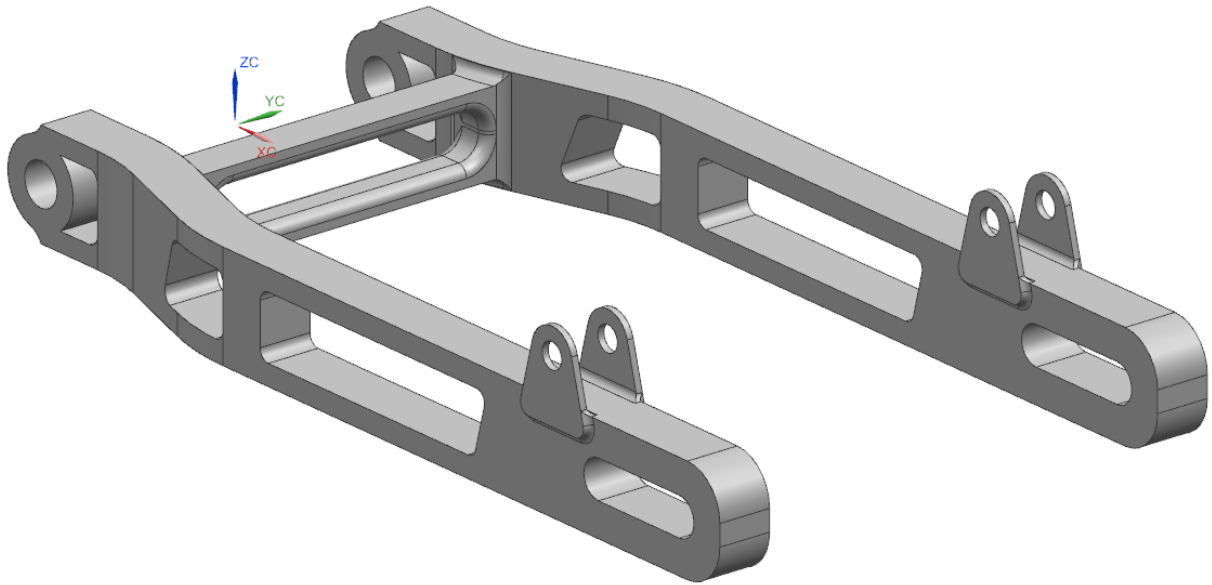
5. Επανασχεδιασμός και επαλήθευση της μεθόδου

5.1. Επανασχεδιασμός ψαλιδιού σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης τοπολογίας



Σχήμα 27. Περιοχές αφαίρεσης υλικού κατά τον επανασχεδιασμό

Ο σχεδιασμός του ανωτέρω μοντέλου αποτελεί προϊόν σχεδίασης κατά προσέγγιση βάσει της πρότασης – αποτελέσματος της ανάλυσης τοπολογίας που παρατέθηκε. Η εν λόγω σχεδίαση πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την λειτουργικότητα του τελικού προϊόντος και βάσει των παραμέτρων που λήφθηκαν υπ' όψη και κατά τις πρότερες μεθόδους. Τα διαστατικά χαρακτηριστικά του επανασχεδιασμένου μοντέλου το καθιστούν εξ ίσου χρηστικό με το αρχικό εξυπηρετώντας τους σκοπούς της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.



Σχήμα 28. Επανασχεδιασμένο γεωμετρικό μοντέλο

Total Length (1D elements): 0.000000E+00 mm
 Total Area (2D elements) : 0.000000E+00 mm²
 Volume : 8.625794E+05 mm³

Total Mass : 2.410047E+00 kg

Center of Gravity about Global CSYS
 2.076862E+02 5.583080E-02 -5.889370E-01 mm

Moment of Inertia about Global CSYS
 I(xx) I(yy) I(zz) : 2.544096E+04 1.533255E+05 1.774187E+05 kg·mm²
 I(xy) I(yz) I(xz) : 8.106783E+00 -3.227192E-03 -4.551561E+02 kg·mm²

Moment of Inertia about Center of Gravity
 I(xx) I(yy) I(zz) : 2.544011E+04 4.937077E+04 7.346480E+04 kg·mm²
 I(xy) I(yz) I(xz) : -1.983840E+01 7.601714E-02 -1.603735E+02 kg·mm²

Principal Moments of Inertia
 I(11) I(22) I(33) : 7.346533E+04 4.937078E+04 2.543956E+04 kg·mm²

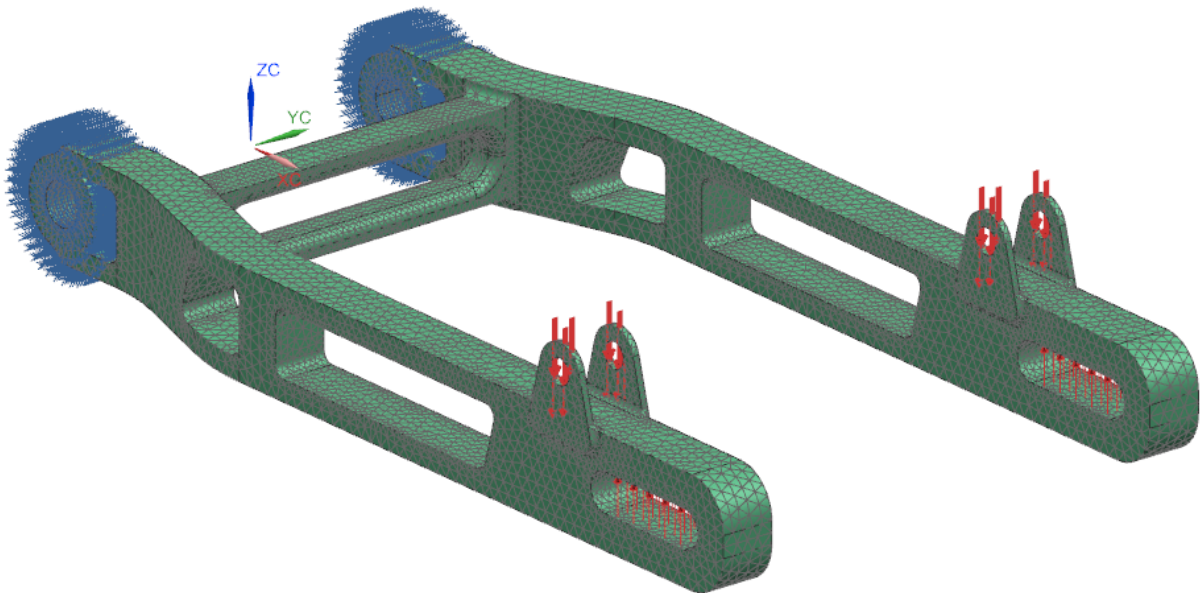
Principal Axes
 1 : -0.003339 0.000003 -0.999994
 2 : 0.000829 1.000000 0.000000
 3 : -0.999994 0.000829 0.003339

Σχήμα 29. Ογκομετρικά χαρακτηριστικά επανασχεδιασμένου μοντέλου

5.2. Στατικός έλεγχος νέου (επανασχεδιασμένου) μοντέλου

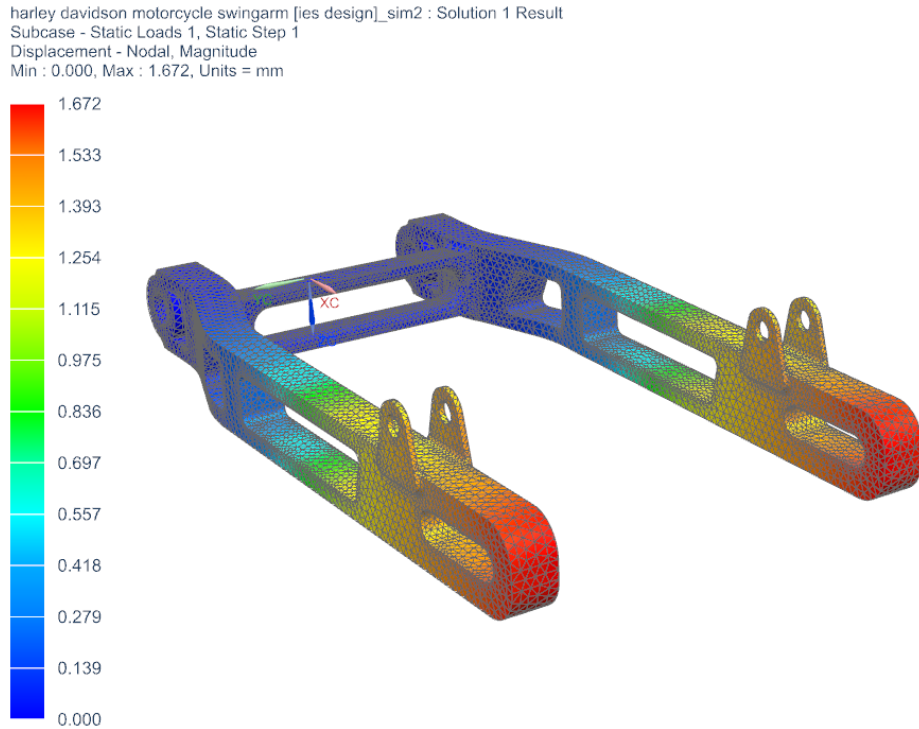
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι αναμενόμενα διαφορετικά της αρχικής, διατηρώντας μεγάλη απόσταση από τα ανεκτά μηχανικά όρια του μοντέλου δίνοντας μας την δυνατότητα κάποιας μελλοντικής περαιτέρω ανάλυσης και επανασχεδιασμού του μοντέλου, όπως επίσης και ένα μεγάλο συντελεστή ασφαλείας. Οι αναλυτικές πληροφορίες του δημιουργούμενου πλέγματος ΠΣ, εξαγόμενες από το υπολογιστικό λογισμικό παρατίθενται στο “Παράρτημα Δ”.

- Τύπος επίλυσης: Στατικός έλεγχος
- Κατασκευή πλέγματος: 3D τετραεδρικά στοιχεία, τύπου CTETRA(10), ακμών 6 mm βάσει του ιδίου ελέγχου σύγκλισης ο οποίος παρουσιάστηκε νωρίτερα
- Αριθμός κόμβων: 97137
- Αριθμός πεπερασμένων στοιχείων: 54716
- Φόρτιση κατά $-ZC$ (περιοχή σύνδεσης ψαλιδιού – αμορτισέρ): $W = 331\text{kg} = 3246\text{ N}$
- Φόρτιση κατά ZC (περιοχή σύνδεσης ψαλιδιού – τροχού): $F = 1624\text{ N}$
- Είδος στήριξης: Άρθρωση στην περιοχή των οπών του άξονα σύνδεσης με το πλαίσιο



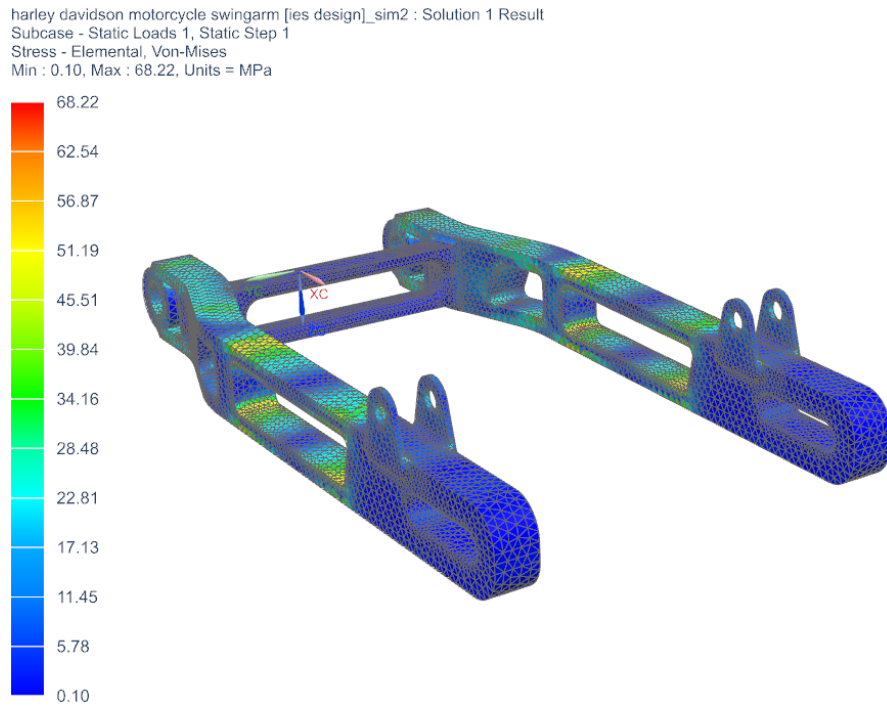
Σχήμα 30. Ορισμός φορτίσεων και στηρίξεων νέου μοντέλου

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης:



Σχήμα 31. Διάγραμμα μετατόπισης κόμβων επανασχεδιασμένου μοντέλου

Το Σχήμα 31 αποτελεί ένα εκ των εξαγόμενων αποτελεσμάτων της στατικής ανάλυσης και αφορά την μετατόπιση των κόμβων των στοιχείων του μοντέλου, υποκείμενο στις φορτίσεις που του ορίστηκαν. Η τιμή μετατόπισης που παρουσιάζεται αντιστοιχεί στη μέγιστη συνολική μετατόπιση των κόμβων συμπεριλαμβανομένων και των τριών αξόνων (x, y & z) και παρατίθεται καθώς μας ενδιαφέρει η αυτού του είδους συμπεριφορά του μοντέλου κυρίως σε περιοχές που υπό κανονικές συνθήκες συνεργάζεται με άλλα μέρη του συστήματος μίας μοτοσυκλέτας. Παρατηρούμε πως ο βαθμός μετατόπισης των κόμβων στα σημεία αυτά βρίσκεται εντός του πεδίου τιμών [1.3 , 1.5] σε μονάδα mm.



Σχήμα 32. Διάγραμμα τάσης ανά στοιχείο αρχικού μοντέλου

Το Σχήμα 32 αποτελεί ένα εκ των εξαγόμενων αποτελεσμάτων της στατικής ανάλυσης και αφορά τις τάσεις που αναπτύσσονται ανά στοιχείο του μοντέλου, υποκείμενο στις φορτίσεις που του ορίστηκαν. Η τιμή τάσης που παρουσιάζεται αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση που αναπτύσσεται ανά τα στοιχεία του μοντέλου και παρατίθεται καθώς βοηθάει να γίνει αντιληπτή η συμπεριφορά του υπό ρεαλιστικές συνθήκες με γνώμονα τις μηχανικές του ιδιότητες και όρια. Παρατηρείται πως η τιμή της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης είναι 68 MPa απέχοντας κατά πολύ από τα μηχανικά όρια του ορισμένου μοντέλου.

6. Συμπεράσματα

6.1. Συμπεράσματα μελέτης

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΜΕΓΕΘΟΣ	ΑΡΧΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ	ΤΕΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ
Μάζα Υλικού	3.4 kg	2.4 kg
Επιβαλλόμενη Τάση	34.5 MPa	68.2 MPa
Μείωση Μάζας Υλικού	29.8%	
Αποτελέσματα Έρευνας	Πολύ Ικανοποιητικό	

Σχήμα 33. Συνοπτικός πίνακας συμπερασμάτων μελέτης

Στην προσπάθεια προσέγγισης του βέλτιστου σχεδιασμού, ακολουθήθηκαν τα στάδια σχεδιομελέτης, ανάλυσης και τελικού επανασχεδιασμού του μοντέλου. Τα αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητικά με εμφανέστατες τις διαφορές που προκύπτουν, καθώς χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία προσέγγισαν τους στόχους που είχαν τεθεί εξ αρχής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασαν οι τεχνικές της τοπολογικής ανάλυσης (βήματα υλοποίησης της μεθόδου και ο βαθμός παραμετροποίησης αυτών), οι οποίες την καθιστούν μία πολύ ενδιαφέρουσα τεχνική-όπλο στα χέρια των σύγχρονων μηχανικών, που μπορεί να εξάγει αποτελέσματα συνυπολογίζοντας την ασφάλεια, τη χρηστικότητα, την αισθητική και το κόστος.



Σχήμα 34. Διαδοχή μεταβολών δομής μοντέλου

6.2. Μελλοντική εργασία

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί ως πρόδρομος μίας νέας έρευνας σχετικά με την παραγωγή του εν λόγω βιομηχανικού προϊόντος με διεργασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ο λόγος της προτεινόμενης έρευνας ποικίλει αναλογιζόμενος τα θετικά αυτής της ιδιαίτερης και νέας ακόμα τεχνολογίας. Η ελαχιστοποίηση της φύρας και των αποβλήτων που προκύπτουν από κατεργασίες αφαίρεσης υλικού αρκούν για να δοθεί περαιτέρω έμφαση.

Επιμέρους τομείς έρευνας:

- Έρευνα υλικών συνεργαζόμενων με μηχανές εκτύπωσης μετάλλου
- Διενέργεια νέου στατικού ελέγχου ανά περίπτωση
- Διενέργεια νέας ανάλυσης τοπολογίας ανά περίπτωση
- Διενέργεια ανάλυσης δυναμικών φορτίσεων για έλεγχο συμπεριφοράς του προϊόντος ως μέρος ενός ολοκληρωμένου συστήματος μοτοσυκλέτας
- Έρευνα βέλτιστης σχεδίασης σύμφωνα με την ικανότητα αποτύπωσης ιδιαίτερα πολύπλοκων διατομών που υποστηρίζει η τρισδιάστατη εκτύπωση
- Τεχνοοικονομική έρευνα σχέσης παραγόμενης αξίας - κόστους λόγω των αυξημένων χρονικών απαιτήσεων της μεθόδου
- Έρευνα Περιβαλλοντικού Αποτυπώματος διαδικασιών παραγωγής
- Επανάληψη τεχνοοικονομικής έρευνας με συμπερίληψη στη συνάρτηση κόστους μίας μεταβλητής απεικόνισης του αποτελέσματος της τελευταίας έρευνας

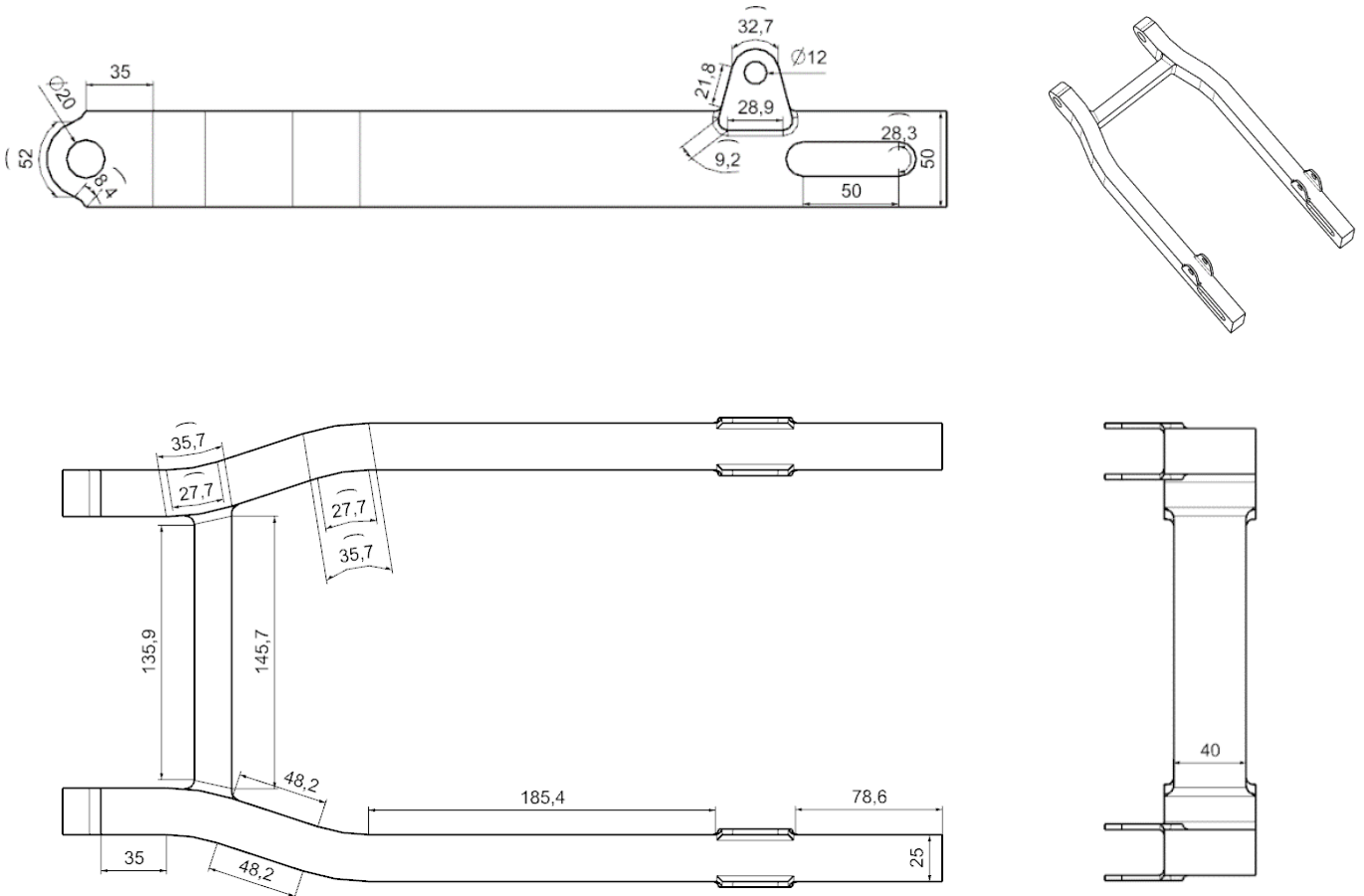
7. Βιβλιογραφία

- [1] Costea, M., Mihai, A., Bilalis, N., (2012), “FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR INSOLE-SOLE PROTOTYPES”, 4th International Conference on Advanced Materials and Systems – ICAMS 2012.
- [2] Carlos A. Felippa. Lecture notes in introduction to finite element methods, 2013.
- [3] D. Savvas και G. Stefanou, «Assessment of the effect of microstructural uncertainty on the macroscopic properties of random composite materials», Journal Of Composite Materials, Vol. 51, 2017.
- [4] G. I. N. Rozvany, M. Zhou, and T. Birker, “Generalized shape optimization without homogenization,” Structural Optimization, Sep. 1992.
- [5] G. Allaire, F. Jouve, and A. M. Toader, Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method, vol. 194, no. 1. 2004.
- [6] M. P. Bendsøe, “Optimal shape design as a material distribution problem,” Structural Optimization, 1989.
- [7] O. Querin, M. Victoria, C. Gordo, R. Ansola, and P. Martí, Topology design methods for structural optimization. Academic Press, 2017.
- [8] Samuel Amstutz. An interpretation of the SIMP method based on topological sensitivity analysis. 2010. fahal-00496925f
- [9] S. Amstutz and H. Andrá, “A new algorithm for topology optimization using a level-set method,” Journal of Computational Physics, vol. 216, 2006.
- [10] Y. Tsompanakis, N. D. Lagaros, and M. Papadrakakis, Structural design optimization considering uncertainties, 1st ed., vol. 1. London: Taylor and Francis, 2008.
- [11] Y. M. Desai, T. I. Eldho και A. H. Shah, «Finite Element Method with Applications in Engineering», 2011.
- [12] Y. M. Xie and G. P. Steven, “A simple evolutionary procedure for structural optimization,” Computers & Structures, vol. 49, 1993.
- [13] Y. M. Xie and G. P. Steven, “Evolutionary structural optimization for dynamic problems,” Computers & Structures, vol. 58, Mar. 1996.

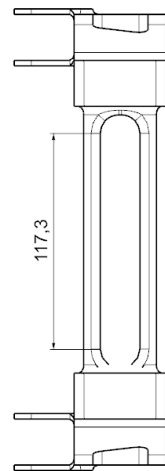
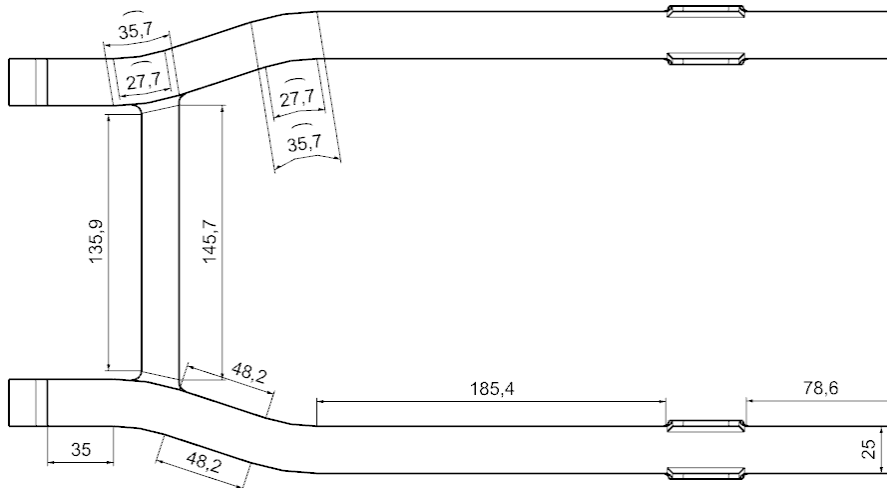
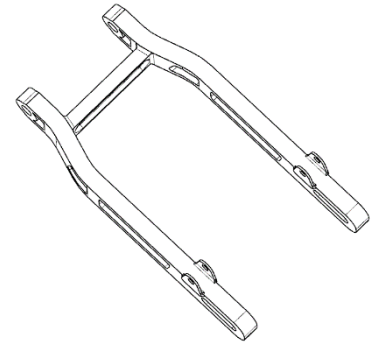
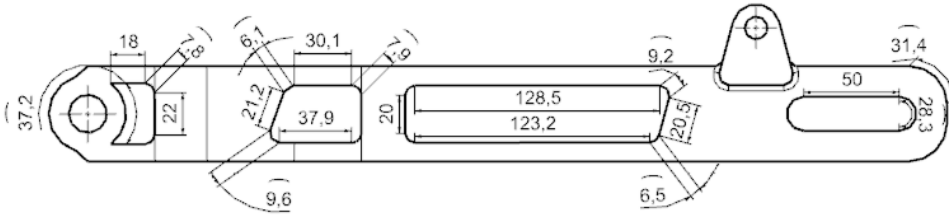
- [14] Κοκκινάκη Ε., “Τοπολογική βελτιστοποίηση κυβελωτών δομών με χρήση του προγράμματος NX”, Μεταπτυχιακή εργασία, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2018.
- [15] Λουφαρδάκη Ε., “Μοντελοποίηση επιφανειών με μοντέλα στερεών”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2016.
- [16] Σκάρος, Ν., “Βέλτιστος σχεδιασμός δικτυωτών φορέων με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και αλγορίθμων βελτιστοποίησης”, Μεταπτυχιακή διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2008
- [17] Τσουμάκης Μ., “Τοπολογική βελτιστοποίηση Κατασκευών”, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2015.
- [18] Χρηστένας Ε., “Μελέτη αντοχής και τοπολογική βελτιστοποίηση εμπρόσθιου ψαλιδιού ηλεκτρικής μοτοσυκλέτας”, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2020.
- [19] [http://charalampakis.com/e-learning/ntua/teknikh-mhxanikh/6.9%20-%20CE%94CE%B9CE%B1CE%B3CF%81CE%ACCE%BCCE%BCCE%B1CF%84CE%B1%20CF%84CE%ACCF%83CE%B5CF%89CE%BD%20-%20CF%80CE%B1CF%81CE%B1CE%BCCE%BFCE%81CF%86CF%8E%CF%83CE%B5CF%89CE%BD%20\(%CF%84CF%81CE%BFCE%80CF%8E%CE%BD\).pdf](http://charalampakis.com/e-learning/ntua/teknikh-mhxanikh/6.9%20-%20CE%94CE%B9CE%B1CE%B3CF%81CE%ACCE%BCCE%BCCE%B1CF%84CE%B1%20CF%84CE%ACCF%83CE%B5CF%89CE%BD%20-%20CF%80CE%B1CF%81CE%B1CE%BCCE%BFCE%81CF%86CF%8E%CF%83CE%B5CF%89CE%BD%20(%CF%84CF%81CE%BFCE%80CF%8E%CE%BD).pdf)
- [20] https://www.mototriti.gr/data/news/preview_news/Psalidi-To-%C2%ABdeytero-plaisio%C2%BB-ths-motosykletas_121073.asp
- [21] https://space.mit.edu/RADIO/CST_online/mergedProjects/3D/common_overview/common_overview_mesh_tet.htm
- [22] <https://knowledge.autodesk.com/support/inventor-nastran/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2021/ENU/NINCAD-ExplicitRef/files/GUID-925FEB35-D12F-46AC-9E45-16C4617499A0-htm.html>

Παράρτημα Α

Κατασκευαστικά σχέδια αρχικού μοντέλου



Κατασκευαστικά σχέδια επανασχεδιασμένου μοντέλου



Παράρτημα Β

Μελέτη σύγκλισης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων:

Cylindrical constraint – Radial growth fixed, Axial rotation fixed, Axial growth fixed

		DISPLACEMENT X AXIS (mm)		DISPLACEMENT Y AXIS (mm)		DISPLACEMENT Z AXIS (mm)		DISPLACEMENT T	NUMBER OF FE
		MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX		
CTETRA (10)	4mm	Δεν τρέχει!							
	6mm	-0.056	0.126	-0.026	0.026	-0.002	0.793	0.795	50680
	8mm	-0.056	0.126	-0.026	0.026	-0.002	0.793	0.795	25535
	10mm	-0.056	0.126	-0.026	0.026	-0.002	0.792	0.794	15030
	12mm	-0.056	0.126	-0.026	0.026	-0.002	0.791	0.793	9560
	14mm	-0.056	0.125	-0.026	0.026	-0.002	0.790	0.791	6862
	16mm	-0.056	0.125	-0.025	0.026	-0.002	0.788	0.789	5631
CTETRA (4)	4mm	-0.055	0.123	-0.021	0.0218	-0.002	0.772	0.774	122388
	6mm	-0.054	0.120	-0.017	0.019	-0.002	0.758	0.760	50680
	8mm	-0.052	0.117	-0.016	0.016	-0.002	0.739	0.741	25535
	10mm	-0.051	0.114	-0.011	0.013	-0.002	0.721	0.723	15030
	12mm	-0.049	0.109	-0.008	0.011	-0.002	0.694	0.696	9560
	14mm	-0.047	0.106	-0.010	0.009	-0.002	0.677	0.679	6862
	16mm	-0.047	0.105	-0.009	0.001	-0.002	0.665	0.666	5631

Όπου,

- Cylindrical constraint – Είδος στήριξης: Άρθρωση
- Radial growth fixed – Ακτινική μετατόπιση: Μη επιτρεπτή
- Axial rotation fixed – Αξονική περιστροφή: Μη επιτρεπτή
- Axial growth fixed – Αξονική μετατόπιση: Μη επιτρεπτή

Cylindrical constraint – Radial growth fixed, Axial rotation free (50mm), Axial growth fixed

		DISPLACEMENT		DISPLACEMENT		DISPLACEMENT		DISPLACEMENT	NUMBER OF
		T		NT		T			
		X AXIS (mm)		Y AXIS (mm)		Z AXIS (mm)			
		MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX		
CTETRA (10)	4mm	Δεν τρέχει!							
	6mm	-287.38	124.99	-0.026	0.026	-2249.23	102.50	2252.69	50680
	8mm	-287.38	124.99	-0.026	0.026	-2249.23	102.50	2252.69	25535
	10mm	-287.37	125.09	-0.026	0.026	-2249.22	102.50	2252.68	15030
	12mm	-287.38	124.99	-0.026	0.026	-2249.23	102.50	2252.70	9560
	14mm	-287.38	124.99	-0.025	0.026	-2249.23	102.50	2252.70	6862
	16mm	-287.38	124.99	-0.025	0.026	-2249.23	102.50	2252.70	5631
CTETRA (4)	4mm	-286.70	124.99	-0.021	0.021	-2249.25	102.49	2252.71	122388
	6mm	-286.70	124.99	-0.017	0.019	-2249.26	102.49	2252.73	50680
	8mm	-287.38	124.99	-0.016	0.016	-2249.27	102.50	2252.74	25535
	10mm	-286.30	124.99	-0.011	0.013	-2249.29	102.46	2252.75	15030
	12mm	-285.26	124.99	-0.008	0.011	-2249.31	102.46	2252.78	9560
	14mm	285.27	124.99	-0.011	0.009	-2249.34	102.50	2252.81	6862
	16mm	-287.40	124.99	-0.01	0.0017	-2249.34	102.50	2252.81	5631

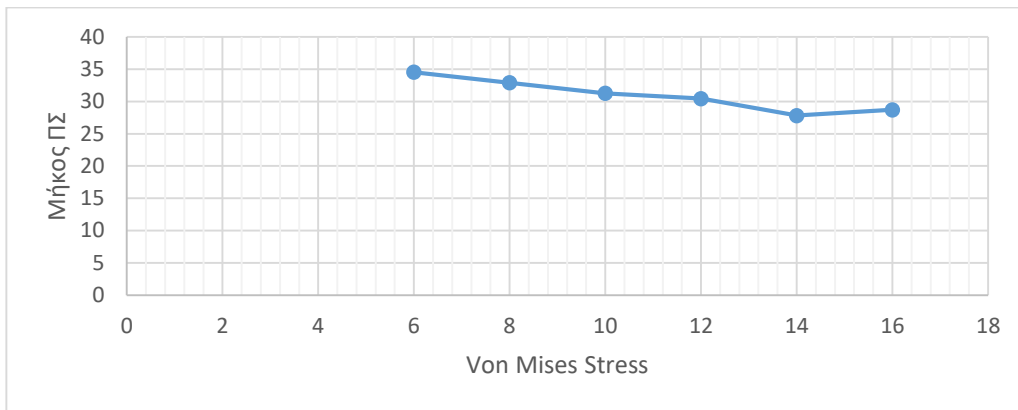
Όπου,

- Cylindrical constraint – Είδος στήριξης: Άρθρωση
- Radial growth fixed – Ακτινική μετατόπιση: Μη επιτρεπτή
- Axial rotation fixed – Αξονική περιστροφή: Επιτρεπτή κατά 50 mm
- Axial growth fixed – Αξονική μετατόπιση: Μη επιτρεπτή

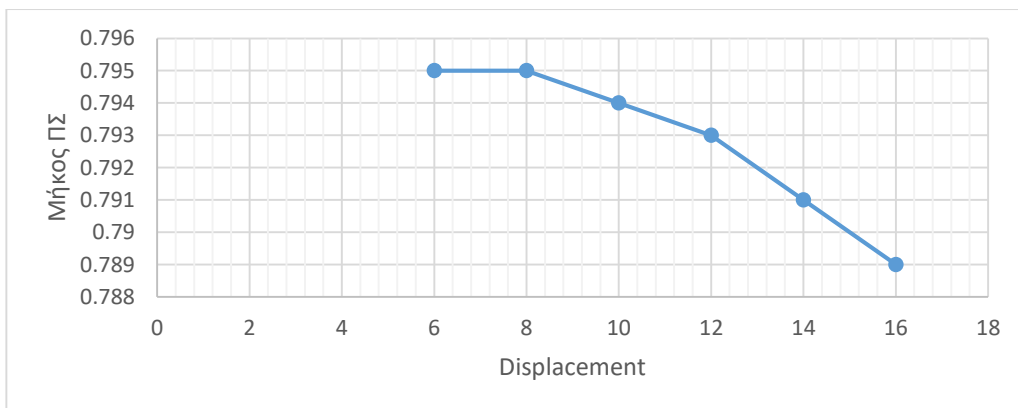
Συμπερασματικά, παρατηρείται πως το μοντέλο έχει καλύτερη συμπεριφορά διακριτοποιημένο σε 10-κομβικά στοιχεία παρά σε 4-κομβικά. Επίσης συγκλίνει και στις δύο περιπτώσεις για ακμές στοιχείων < 10 mm. Η μετατόπιση ανά περίπτωση επιλογής στοιχείων και ελευθερίας στήριξης δεν μεταβάλλεται σημαντικά ώστε να επηρεάζονται σε ανησυχητικό βαθμό οι σε συνέχεια υπολογιζόμενες παραμόρφωση και τάση. Για τους λόγους αυτούς επιλέχθηκαν τελικώς 10-κομβικά στοιχεία με μήκος ακμής 6 mm.

Ακολουθούν τα διαγράμματα σύγκλισης ανά περίπτωση.

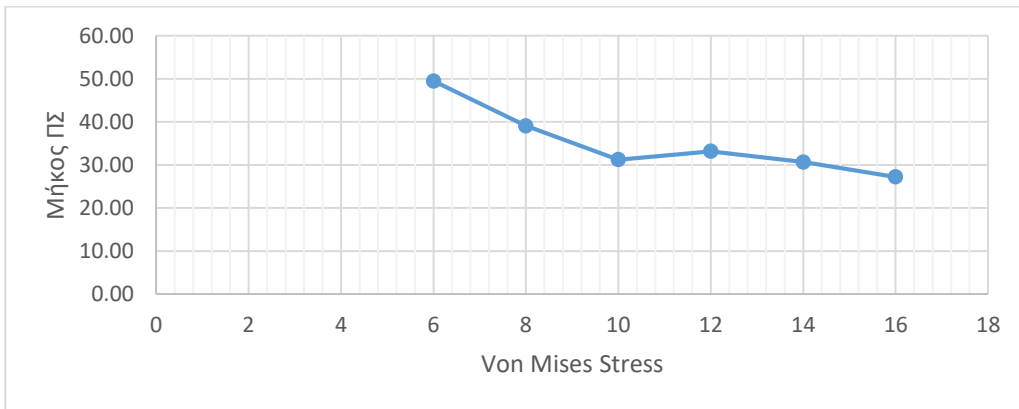
CTETRA (10) Fixed Constraint	
Μήκος ΠΣ	Von Mises Stress
6	34.54
8	32.89
10	31.26
12	30.45
14	27.81
16	28.71



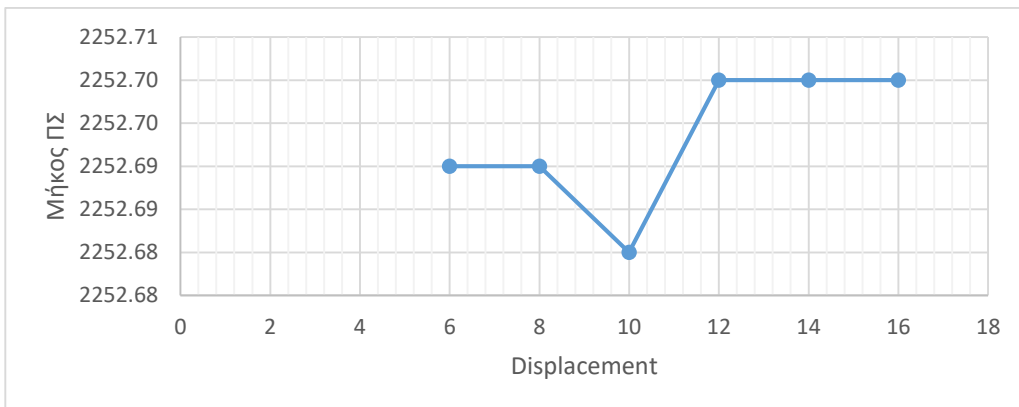
CTETRA (10) Fixed Constraint	
Μήκος ΠΣ	Displacement
6	0.795
8	0.795
10	0.794
12	0.793
14	0.791
16	0.789



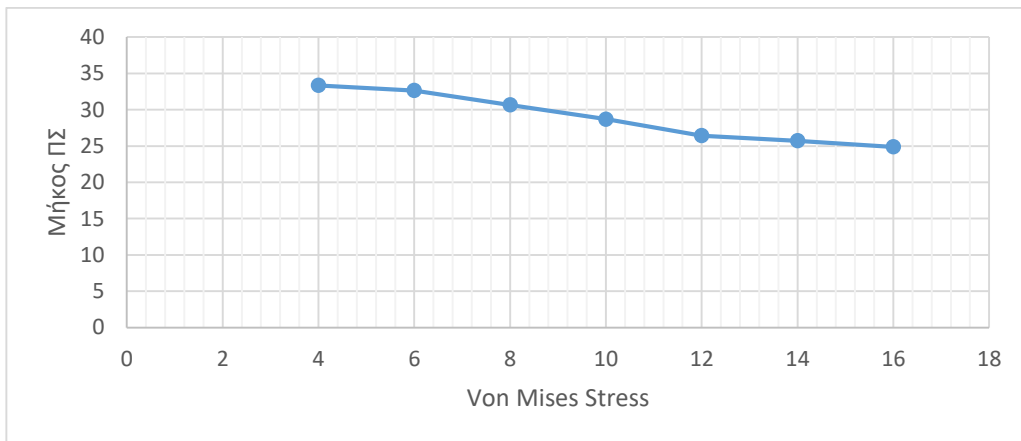
CTETRA (10) Non Fixed Constraint	
Μήκος ΠΣ	Von Mises Stress
6	49.50
8	39.06
10	31.25
12	33.15
14	30.68
16	27.23



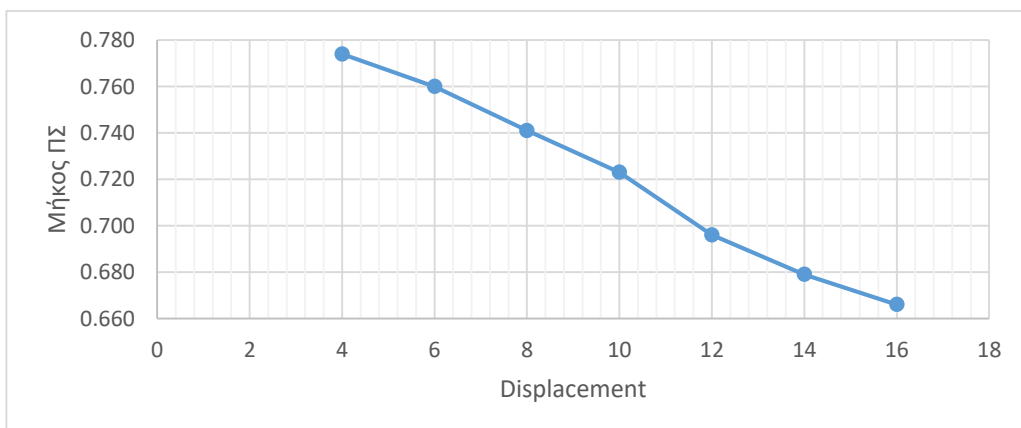
CTETRA (10) Non Fixed Constraint	
Μήκος ΠΣ	Displacement
6	2252.69
8	2252.69
10	2252.68
12	2252.70
14	2252.70
16	2252.70



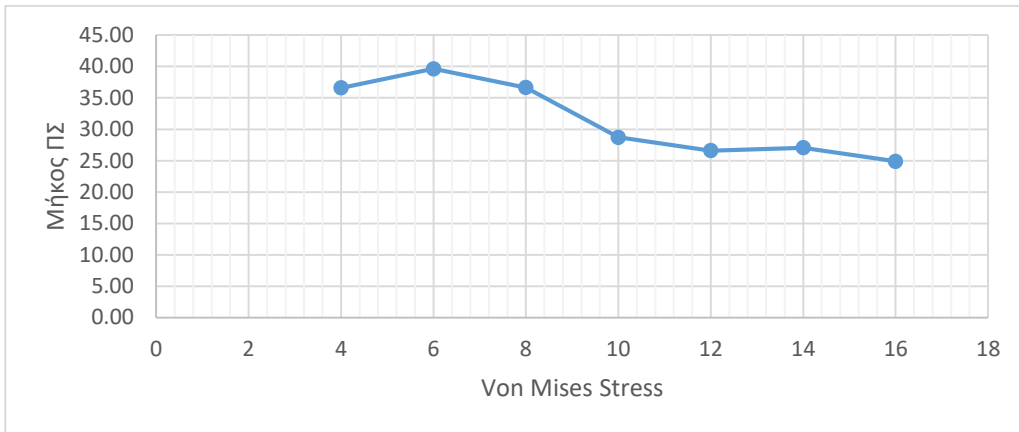
CTETRA (4) Fixed Constraint	
Μήκος ΠΣ	Von Mises Stress
4	33.35
6	32.64
8	30.67
10	28.71
12	26.42
14	25.72
16	24.88



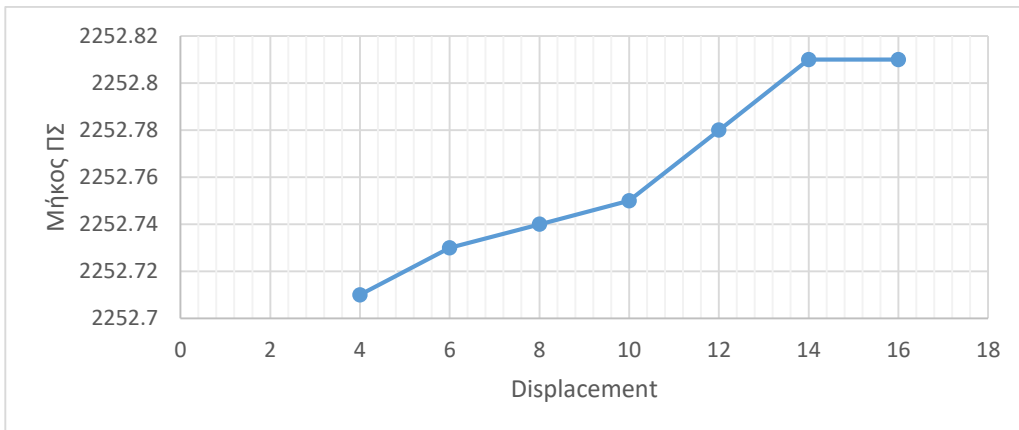
CTETRA (4) Fixed Constraint	
Μήκος ΠΣ	Displacement
4	0.774
6	0.760
8	0.741
10	0.723
12	0.696
14	0.679
16	0.666



CTETRA (4) Non Fixed Constraint	
Μήκος ΠΣ	Von Mises Stress
4	36.59
6	39.63
8	36.64
10	28.70
12	26.60
14	27.05
16	24.88



CTETRA (4) Non Fixed Constraint	
Μήκος ΠΣ	Displacement
4	2252.71
6	2252.73
8	2252.74
10	2252.75
12	2252.78
14	2252.81
16	2252.81



Παράρτημα Γ

Μηχανικές ιδιότητες Aluminium_2014 βιβλιοθήκης λογισμικού Siemens NX_12

MATERIAL INFORMATION

Library Material : Aluminum_2014

Category METAL

Library Reference physicalmateriallibrary.xml

Category : METAL

Sub-Category : Aluminum Alloy

Mass Density (RHO) : 2.794e-06kg/mm³

===== Mechanical

Young's Modulus (E) : Tabular Data:

temperature °C	Youngs Modulus (E) kPa
20	73119000
21.11	73119000
23.89	73119000
37.78	73119000
51.67	73119000
65.56	72429000
79.44	72429000
93.33	71739000
107.22	71049000
121.11	70359000
135	69670000
148.89	68980000
162.78	68290000
176.67	66910000
190.56	66221000
204.44	64841000
218.33	63461000
232.22	61392000
246.11	60012000
260	58633000
273.89	57253000
287.78	55184000
301.67	53804000
315.56	51735000
329.44	49665000
343.33	47596000
357.22	46216000
371.11	44147000

Poisson's Ratio (NU) : Tabular Data:

temperature °C	Poissons Ratio (NU) Unitless
20	0.33
21.11	0.33

Type of Nonlinearity (TYPE) : 1

Yield Function Criterion (YF) : 1

Hardening Rule (HR) : 1

=====
Strength
Yield Strength

: Tabular Data:

temperature °C	Yield Strength kPa
20	393700
26.6667	393001
37.7778	390933
51.6667	387485
65.5556	383348
79.4444	377833
93.3333	370938
107.222	362664
121.111	351633
135	339222
148.889	324054
162.778	308885
176.667	290959
190.556	268896
204.444	243385
218.333	215116
232.222	184779
246.111	155132
260	1254854

Ultimate Tensile Strength

: Tabular Data:

temperature °C	Ultimate Tensile Strength kPa
20	441500
21.1111	441264
23.8889	440575
37.7778	436438
51.6667	430233
65.5556	423338
79.4444	415064
93.3333	406101
107.222	396449
121.111	384038
135	370938
148.889	357148
162.778	343359
176.667	326811
190.556	306127
204.444	282685
218.333	253038
232.222	220632
246.111	186158
260	150306

```

===== Durability
Fatigue Strength Coefficient      : 1008000kPa
Fatigue Strength Exponent        : -0.114
Fatigue Ductility Coefficient    : 1.418
Fatigue Ductility Exponent       : -0.87
Cyclic Strength Coefficient      : 963000kPa
Cyclic Strain Hardening Exponent : 0.132
    
```

```

===== Formability
Initial Strain                    : 0.02mm/mm
Hardening Exponent                : 0.21
Strength Coefficient              : 826.957MPa
R0                                : 2
R45                               : 2
R90                               : 2
    
```

```

===== Thermal/Electrical
Thermal Expansion Coefficient (A) : Tabular Data:
                                     temperature Thermal Expansion (A)
                                     °C          °C-1
                                     20          2.16e-05
                                     93.33       2.25e-05
                                     107.22      2.2662e-05
                                     121.11     2.2824e-05
                                     135        2.2968e-05
                                     148.89     2.313e-05
                                     162.78     2.3274e-05
                                     176.67     2.3418e-05
                                     190.56     2.3544e-05
                                     204.44     2.3688e-05
                                     218.33     2.3814e-05
                                     232.22     2.3958e-05
                                     246.11     2.4066e-05
                                     260        2.4192e-05
                                     273.89     2.43e-05
                                     287.78     2.4408e-05
                                     301.67     2.4498e-05
                                     315.56     2.4606e-05
                                     329.44     2.4696e-05
                                     343.33     2.4786e-05
                                     357.22     2.4876e-05
                                     371.11     2.4984e-05
                                     385        2.511e-05
                                     398.89     2.5254e-05
                                     412.78     2.5398e-05
                                     426.67     2.556e-05
    
```

Thermal Conductivity (K)	: Tabular Data:		
		temperature	Thermal Conductivity (K)
		°C	μW/(mm·°C)
		20	154250
		21.11	154320
		23.89	154540
		37.78	155680
		51.67	156880
		65.56	158160
		79.44	159530
		93.33	160960
		107.22	162490
		121.11	164120
		135	165790
		148.89	167450
		162.78	169090
		176.67	170750
		190.56	172420
		204.44	174080
		218.33	175830
		232.22	177400
		246.11	178510
		260	179270
		273.89	179690
		287.78	179720
		301.67	179490
		315.56	179130
		329.44	178580
		343.33	177820
		357.22	176870
		371.11	175810
		385	174630
		398.89	173290
		412.78	171800
		426.67	170190
Specific Heat (CP)	: 880000000μJ/(kg·K)		
===== Crosshatch Pattern	: Aluminum/Magnesium		

Παράρτημα Δ

Αναλυτικές πληροφορίες πλεγμάτων ΠΣ εξαγόμενες από το υπολογιστικό λογισμικό Siemens NX_12

Αρχικό μοντέλο:

```

-----
MESH INFORMATION
-----

MESH INFORMATION
Name : 3d_mesh(1)
Type of mesh : 3D
Number of elements in the mesh : 50680
Number of nodes in the mesh : 85914
Tetra10 elements : 50680

==== Material Orientation
Material Orientation Method : Physical Property Table

Layer : 1
Inherited material : Aluminum_2014

MESH COLLECTOR INFORMATION
Name : Solid(1)
Type : Solid

==== Physical Property
Solid Property : PSOLID1
Name : PSOLID1::motorcycle swingarm_arxiko montelo_fem1
Type : PSOLID
Label : 1
Material : Inherited from geometry
Inherited material for 3d_mesh(1) : Aluminum_2014
CORDM Definition : User Defined
CORDM : Absolute
Integration Network : Default
Stress Output Location : Default
Integration Scheme : Default

MESH RECIPE INFORMATION
Element Type : CTETRA(10)

==== Mesh Parameters
Element Size : 6 mm
Attempt Free Mapped Meshing : true
Attempt Multi-Block Cylinders : false
Transition with Pyramid Elements : false

==== Mesh Quality Options
Midnode Method : Mixed
Geometry Tolerance : false
Jacobian : 10

==== Mesh Settings
Surface Curvature Based Size Variation: 50
Internal Mesh Gradation : 1.05
Target Internal Edge Length Limit : false
Minimum Two Elements Through Thickness: false
Auto Fix Failed Elements : false

==== Model Cleanup Options
Small Feature Tolerance (% of Element Size): 10
Minimum Element Length (Read-Only): 0.6
-----

```

Επανασχεδιασμένο μοντέλο:

```

-----
MESH INFORMATION
-----

MESH INFORMATION
Name : 3d_mesh(1)
Type of mesh : 3D
Number of elements in the mesh : 54716
Number of nodes in the mesh : 97137
Tetra10 elements : 54716

==== Material Orientation
Material Orientation Method : Physical Property Table

Layer : 1
Inherited material : Aluminum_2014

MESH COLLECTOR INFORMATION
Name : Solid(1)
Type : Solid

==== Physical Property
Solid Property : PSOLID1
Name : PSOLID1::motorcycle swingarm_epanasxediasmeno montelo_fem1
Type : PSOLID
Label : 1
Material : Inherited from geometry
Inherited material for 3d_mesh(1) : Aluminum_2014
CORDM Definition : User Defined
CORDM : Absolute
Integration Network : Default
Stress Output Location : Default
Integration Scheme : Default

MESH RECIPE INFORMATION
Element Type : CTETRA(10)

==== Mesh Parameters
Element Size : 6 mm
Attempt Free Mapped Meshing : true
Attempt Multi-Block Cylinders : false
Transition with Pyramid Elements : false

==== Mesh Quality Options
Midnode Method : Mixed
Geometry Tolerance : false
Jacobian : 10

==== Mesh Settings
Surface Curvature Based Size Variation: 50
Internal Mesh Gradation : 1.05
Target Internal Edge Length Limit : false
Minimum Two Elements Through Thickness: false
Auto Fix Failed Elements : false

==== Model Cleanup Options
Small Feature Tolerance (% of Element Size): 10
Minimum Element Length (Read-Only): 0.6
-----

```